



硕士学位论文

(学术学位)



基于应力分布的趴卧型枕垫数值模拟与设计研究

**Numerical simulation and design research of prone
cushion based on stress distribution**

作 者: 陈顺微

学科专业: 纺织科学与工程

指导教师: 王雪琴 副教授

所在学院: 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院)

完成日期: 二〇二三年五月

浙江理工大学学位论文独创性声明

本人声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中已经标注和引用的内容外，本论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得浙江理工大学或其他教育机构的学位证书而使用过的材料。对本论文研究作出贡献的个人或集体，均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。本人承担本声明的法律责任。

论文作者签名: 陈欣怡

签字日期: 2023年5月24日

浙江理工大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解浙江理工大学有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江理工大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(涉密的学位论文在解密后适用本授权书)

论文作者签名: 王振华

签字日期: 2023年5月24日

导师签名: 孙晓玲

签字日期: 2023年5月24日

摘要

随着时代的发展，人们的工作和休闲的环境不断变化，各种多功能的辅助产品层出不穷。枕垫产品是生活中十分重要的辅助类产品，不同材料、功能和外形的产品在市场中种类很多。其中趴卧型枕垫作为常见的枕垫产品可以满足各种生活和工作场景需求。本课题选择趴卧型枕垫创新设计作为研究目标，枕垫垫芯材料选择乳胶和记忆海绵这两款性能较为优秀的材料。本文从枕垫材料、枕型、枕垫功能设计方面入手，采用 3 种设计方式研究设计多款缓压舒适的趴卧型枕垫产品。

研究主要分为以下四个部分。

第一部分对市场上的趴卧型枕垫产品进行调研，对消费者进行问卷调查。枕垫主观评价实验和人体数据采集实验对象是根据调研结果选择的中国 18-25 岁且 BMI 指数在 18.5~23.9 之间的 61 名女性。本文对主观评价实验结果进行数值分析得出：在使用电脑和手机环境下，人体身高和臂长与枕垫选择角度的相关性最强。实验者使用趴垫时不适感主要集中在胸腹部等位置。枕垫体压实验选择 61 名实验者中身高和臂长处于 50 分位的实验者进行，体压数据和该实验者的身材数据作为后续数值模拟的拟合数据和基础。

第二部分对 5 款垫芯材料进行物理性能探究和压缩性能仿真。垫芯材料选择密度和性能不同的 I 号海绵、II 号海绵、III 号海绵、记忆海绵和乳胶海绵。该部分在有限元软件中选择多款本构模型进行材料压缩仿真实验。仿真实验与物理实验的对比结果证明最适本构模型为低密度泡沫本构模型（Low density foam）。同时课题还研究了乳胶和记忆海绵材料的应力、厚度和形变量之间的数学模型为后续产品优化设计提供支持。

第三部分建立三维人体模型并进行枕垫使用仿真分析。该部分同时探究了合适的人体组织和微元感应片的本构模型。枕垫使用仿真实验与体压实验的拟合结果证明了仿真的可行性。课题建立了手机与电脑环境下人体使用平板枕垫的仿真模型，并对仿真实验中人体表面应力、枕垫平面应力、最大应力、平均应力以及纵向分布曲线进行分析，结果显示最适枕垫材料为乳胶和记忆海绵。

第四部分运用了 3 种设计方法设计了多款不同类型的乳胶和记忆海绵枕垫。第一种设计方法是根据平面枕垫的应力数据进行反向推导出枕垫表面形状。第二种设计方法是采用数字图像处理设计堆叠型枕垫。第三种设计方法是基于前两种

摘要

方法进行表面简化设计。最后具有颈部支撑的优化枕垫产品是通过材料性能的数学模型求出颈部支撑尺寸而设计的。

关键词：趴卧型枕垫；中国青年女性；乳胶；记忆海绵；应力；数值模拟

Abstract

With the development of the times, people's work and leisure environments are constantly changing, and various multi-functional auxiliary products are emerging one after another. Pillow cushion products are very important auxiliary products in daily life, and there are many types of products with different materials, functions, and shapes in the market. As a common pillow pad product, the prone type pillow pad can meet the needs of various life and work scenarios. This project chooses the innovative design of lying down pillows as the research goal, and the core material of pillows is made of latex and memory sponge, which have excellent performance. This article starts with the design of pillow cushion materials, pillow shapes, and pillow cushion functions, and uses three design methods to study and design multiple cushioned and comfortable lying down pillow cushion products. The research is mainly divided into the following four parts.

The first part is to conduct a survey on lying down pillow cushion products in the market and conduct a questionnaire survey on consumers. The subjective evaluation experiment and human data collection experiment of pillow cushions were conducted on 61 Chinese women aged 18-25 years old with a BMI index between 18.5 and 23.9, selected based on the research results. This article conducts a numerical analysis of the subjective evaluation experimental results and concludes that under the use of computers and mobile phones, the correlation between human height and arm length and the angle of pillow cushion selection is the strongest. The discomfort felt by the experimenter when using the prone mat mainly concentrated in the chest and abdomen. The pillow cushion body pressure experiment was conducted on 61 participants with height and arm length in the 50th percentile. The body pressure data and the participant's body shape data were used as the fitting data and basis for subsequent numerical simulations.

The second part explores the physical properties and simulates the compression properties of five cushion core materials. The selection of cushion core materials includes sponge I, sponge II, sponge III, memory sponge, and latex sponge with

Abstract

different densities and properties. This section selects multiple constitutive models in finite element software for material compression simulation experiments. The comparison between the simulation experiment and the physical experiment proves that the most suitable constitutive model is the low density foam constitutive model. At the same time, the project also studied the mathematical models between stress, thickness, and shape variables of latex and memory sponge materials to provide support for subsequent product optimization design.

The third part establishes a three-dimensional human model and conducts simulation analysis on the use of pillows. This section also explores the appropriate constitutive models of human tissues and micro element sensing films. The fitting results of simulation experiments and body pressure experiments on the use of pillow cushions demonstrate the feasibility of simulation. The project established a simulation model for human use of flat pillow pads in mobile and computer environments, and analyzed the surface stress, plane stress, maximum stress, average stress, and longitudinal distribution curve of the human body in the simulation experiment. The results showed that the most suitable pillow pad materials were latex and memory sponge.

The fourth part used three design methods to design multiple different types of latex and memory sponge pillows. The first design method is to derive the surface shape of the pillow pad in reverse based on the stress data of the flat pillow pad. The second design method is to use digital image processing to design stacked pillow pads. The third design method is based on the first two methods for surface simplification design. The optimized pillow cushion product with neck support is designed by calculating the neck support size through a mathematical model of material performance.

Key words:Prone pillow cushion;Chinese young females;Latex; Memory sponge; Stress; Numerical simulation

目录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景	1
1.1.1 枕垫材料的发展	1
1.1.2 枕垫的需求发展	2
1.1.3 “人”的体压管理需求	3
1.1.4 颈椎舒缓	4
1.1.5 设计工具的改革	4
1.2 研究目的与意义	6
1.3 国内外研究现状	6
1.3.1 枕垫研究现状	6
1.3.2 有限元研究现状	9
1.4 课题研究的主要内容和方法	10
1.4.1 课题研究的主要内容	10
1.4.2 课题研究的主要方法	11
1.4.3 课题研究的创新点与难点	12
1.5 论文思路和结构	12
1.6 小结	13
第 2 章 枕垫主观评价及测试研究	15
2.1 趴卧型枕垫产品调研	15
2.2 趴卧习惯和颈椎舒适性探究	18
2.2.1 问卷调研	19
2.2.2 结果分析	23
2.3 趴卧型枕垫主观评价与改进实验	23
2.3.1 实验方法	23
2.3.2 结果分析	24
2.4 人体尺寸测量与趴卧角度探讨	26
2.5 人体体压实验测试	29

2.6 小结	30
第 3 章 材料压缩性能数值仿真	32
3.1 枕垫款式材料选择	32
3.2 材料物理性能实验	33
3.2.1 压缩实验	35
3.2.2 拉伸实验	37
3.3 海绵有限元仿真	38
3.3.1 超弹性泡沫本构模型 (Hyperfoam)	39
3.3.2 低密度泡沫本构模型 (Low density foam)	40
3.4 海绵压缩仿真	40
3.4.1 I 号海绵压缩仿真	41
3.4.2 II 号海绵压缩仿真	43
3.4.3 III 号海绵压缩仿真	46
3.4.4 记忆海绵压缩仿真	48
3.4.5 乳胶海绵压缩仿真	51
3.5 材料泡沫微元形变量仿真	53
3.5.1 乳胶海绵微元形变量仿真	53
3.5.2 记忆海绵微元形变量仿真	56
3.6 本章小结	59
第 4 章 产品组合模型数值仿真	61
4.1 人体模型与枕垫模型建立与分析	61
4.1.1 人体模型建立	61
4.1.2 人体胸腹部生理结构	62
4.1.3 人体模型与枕模型的组合	63
4.1.4 仿真实验与人体体压实验对比	64
4.1.5 平板枕垫仿真实验	66
4.2 电脑使用模式下多种材质的枕垫仿真及应力分析	67
4.2.1 人体应力分析	67
4.2.2 平板枕垫的应力分布	68
4.2.3 平板枕垫的最大应力和平均应力	70
4.2.4 纵向应力分布曲线分析	71
4.3 手机使用模式下多种材质的枕垫仿真及应力分析	72
4.3.1 人体应力分析	72

4.3.2 平板枕垫的应力分布	73
4.3.3 平板枕垫的最大应力和平均应力	74
4.3.4 纵向应力分布曲线分析	75
4.4 两种环境枕垫应力对比分析	76
4.5 小结	77
第 5 章 基于人体应力分布的趴垫设计及仿真	78
5.1 基于从应力分布数据到曲面形态的设计模式	78
5.1.1 不同表面形态的乳胶枕垫仿真及分析	80
5.1.2 不同表面形态的记忆海绵枕垫仿真及分析	82
5.2 基于数字图像处理的设计模式	84
5.2.1 堆叠型曲面枕垫设计	84
5.2.2 堆叠型乳胶枕垫仿真及分析	86
5.2.3 堆叠型记忆海绵枕垫仿真及分析	87
5.3 基于曲面简化枕垫设计模式	88
5.3.1 非颈椎支撑型乳胶枕垫设计及仿真	88
5.3.2 颈椎支撑型乳胶枕垫设计及仿真	89
5.3.3 非颈椎支撑型记忆海绵枕垫设计及仿真	91
5.3.4 颈椎支撑型记忆海绵枕垫设计及仿真	92
5.4 小结	93
第 6 章 未来与展望	94
6.1 研究工作总结	94
6.2 未来研究展望	96
参考文献	97
附录 A 趴卧习惯和颈椎舒适性探究调查问卷	102
附录 B 可调节枕垫设计的主观舒适性评价实验	105
附录 C 实验材料尺寸测试结果	111
附录 D 实验者身材尺寸统计	115

第1章 绪论

本章主要对选题背景、研究目的与意义、枕垫及有限元国内外研究现状、课题研究的主要内容与方法、创新点与难点、论文思路和结构进行阐述。

1.1 课题背景

1.1.1 枕垫材料的发展

枕垫在日常生活中不可缺少，枕头、靠垫、趴垫等都是家用纺织品的热门产品。以枕头为例，其历史可以追溯到旧石器时代中期。人们为了追求舒适的睡眠感觉而发明了枕头，因此木头、柴草、兽皮等材料常被作为头枕物。随着社会的发展，其材质和外形也发生了巨大的改变。玉石琥珀类、竹木类、陶瓷类、野生植物类、丝织品类等都是早期枕具的常见材料。外形设计有方形、圆形、倒梯形枕等；功能有卧具、药枕等^[1]。通过相关枕具材料的文献研究，软材料^[2-4]由最初常见的软质材料：荞麦皮、菊花、决明子、棉花等发展到现在的海绵、羽绒、化学纤维、乳胶、弹性管、记忆棉、3D空气纤维等新型材料，如表 1.1 所示。

表 1.1 枕垫材料表

	材料类型	种类
枕垫材料	硬质材料	竹木、陶瓷、玉石、藤条、铜、水晶等
	软质材料	普通海绵、动物皮、谷物类、中药材、动物羽毛、乳胶、记忆棉、化纤等新型材料

随着社会发展各种新型功能型材料层出不穷，枕垫产品也可根据其用途选择多种材料。其中乳胶具有绿色环保、防螨除菌、良好透气性、有效缓解人体应力促进睡眠质量及较好的回弹力等特点^[5]。乳胶产品无特殊气味，不会对人体产生毒害作用。乳胶海绵目前大量运用在床垫，枕头，枕垫等产品中^[6]。但是乳胶材料的价格较高，制作成本较高，因此各种密度的普通发泡海绵和记忆海绵成为枕垫类产品的热门填充物。

海绵是一种多孔弹性材料，工业生产中会使用多种多样的海绵，例如有发泡棉、定型棉、橡胶棉、记忆棉等。其中定型棉多适用于沙发座垫、背枕产品等。发泡海绵是用聚醚发泡成型，其密度决定了海绵的软硬度。行业内分为高弹力、灰超、黑灰超、软棉四种类型海绵。

记忆海绵是具有慢回弹特性的聚氨酯海绵。最初是由美国宇航局艾姆斯研究中心研究设计并应用于航天纺织领域，目的是减轻宇航员在航天器在宇宙加速过程中所承担的巨大压力^[7]。记忆海绵是一种具有开放式单元结构(Open-cell)的聚氨酯高分子聚合物，手感柔软，具有很强的冲击能吸收能力。记忆海绵可将受到的应力近似于静态应力，通过改变其分子结构移位变形改变表面形态去贴合施压面。记忆海绵可将支撑点扩散至整个接触面，将接触的应力分散于表面。这个特点被称为慢回弹海绵的“应力均匀分散特性”^[8-9]。通过这种应力分散可大大提升产品使用者的舒适性。

因此海绵类材料将会作为本课题设计研究的枕垫芯材料，课题将对其性能特征进行研究。

1.1.2 枕垫的需求发展

在我国几千年的传承演变中，以枕垫为主的枕具凭借其独特的艺术表现形式成为社会风俗礼仪、市民文化、审美意识、手工艺技术及医学历史等传统文化发展的缩影。它是日常生活中不可缺少的物品，更是前人智慧结晶的载体^[10]。传统枕垫类产品的需求设计点多集中在解决人体夜间睡眠问题上，主要是睡枕产品材料、形状和功能等方面的研究和设计。近年来生活方式以及工作休闲环境的改变，人们对枕具多功能的需求也在改变，各种辅助功能性的枕垫等层出不穷。

表 1.2 枕垫功能汇总表

	适用类型	产品
枕垫功能	日常使用型 保健功能型 治疗型	日常睡枕、坐垫、靠枕等满足人体睡、卧、趴、靠 等日常活动。 按摩型枕、美容枕、护腰枕、护颈枕、婴儿枕等 颈椎枕、医用充气垫、发热垫等

近年来由于工作压力大、久坐办公、多场景办公和休闲导致现在青年群体饱受颈椎病、腰痛等职业病的影响。单一且长久的工作姿势对人的伤害性很大，多场景的办公与休闲切换趋势将成为必然。多功能多场景使用的枕具产品市场需求将增加，颈椎按摩枕、午睡枕、护腰枕、靠枕、趴枕等产品络绎不绝。这些辅助生活型产品能够在一定程度上满足和解决各种人们的需求和烦恼，选择适合的枕具有利于提高身体的舒适感，保护颈部与身体，方便工作与休闲。

近年来新型冠状病毒(SARS-COV-2)和相关疾病(COVID-19)显著地改变了人类的生活方式。在疫情流行期间居家时间、电子产品的使用量、卧床时间增加明显^[11-13]，且手机和电脑成为日常使用最主要的电子产品。除睡枕之外，床上办公桌、床头靠枕、趴枕等也成为现在年轻人的热门选择产品。居家办公和休闲的姿势除坐姿外，卧、趴、靠等姿势也缓解了久坐的不适与枯燥。多功能多场景使用的枕具可以有效地满足人体各种姿态的变化需求。但是经查阅和舒适缓压相关的趴垫资料发现，目前科学、设计实用且多场景使用的趴垫产品市场较为空白，无法满足当代人们的日常需求。于是本文主要从夜间睡眠枕、座椅靠背等研究中获取相关学者的方法理论。研究内容从适用于不同场景的软垫类产品的形状、材料以及人机工程学等方面出发，进行趴垫的创新设计。

本课题聚焦于人体趴卧姿势下的枕垫产品设计研发，拟满足人体趴卧环境下使用电脑手机的舒适性需求。

1.1.3 “人”的体压管理需求

“体压”即人体与外物接触时受到的压力分布大小。体压值与人体舒适感息息相关，体压值越小，人体舒适感越强。在设计枕垫时，人体和趴枕的接触压力分布是评价趴枕是否舒适的一项重要尺度。接触压力分布不合理会导致胸部疼痛并引发压痕。由于人体无法在趴卧时主动控制脊柱的弯曲形状，为了保证趴卧姿势的持续性，需要借助枕垫充分地进行支撑。人与枕垫之间的支撑关系可以通过两者之间的压力界面和形状界面来反映。因此人体的体压分布大小是我们设计时考虑的重要因素。枕垫可以通过设计合理的外形和选择优良的材料来降低应力值提升舒适感。例如：英国的 Anti-pressure Facepillow 美容枕^[14]、瑞福睡美容枕^[15]等产品通过设计改善睡眠时脸部应力以达到减缓脸部皱纹的功效。

随着社会不断地发展，“以人为本”的设计理念也成为产品设计新的关注点。设计师在进行设计时应遵循以人为本的设计理念^[16]。人性化设计就是以人体工程学为基础，包含了人体工程学特点的设计。设计出的产品不仅能满足其使用功能，更能满足使用者的心理需求和期待^[17]。枕垫的设计应遵循以人为本的设计理念，在满足使用需求时兼顾提高人体舒适感等目的。借助计算机辅助设计的人机工程学理论方法可以达到这一目的。人机工程学是研究人在电脑环境中的生理和心理方面问题的一门学科^[18]。现如今，人机工程学在家具等生活用品的设计方面起着重要的作用。自 1988 年，我国制定了 GB/T10000-1988《中国成年人体尺寸》^[19]，该标准记录了成人的 47 项人体静态尺寸数据，为我国的人机工程学发展提供了标准的人体尺寸数据。

本文基于人体工学理论并借助计算机模拟人与枕垫的使用环境来研究人体的应力分布，从而设计多款多场景使用的枕垫。

1.1.4 颈椎舒缓

目前，作为中国人最主要最日常疾病之一的颈椎病正逐渐占领青壮年人群。随着时代的发展，人们伏案工作的时间明显增加。长时间不健康地使用颈椎的情况使得颈椎病正成为中国人最常见的疾病之一，颈椎病的发病年龄也呈年轻化趋势^[20-21]。据统计我国颈椎病的发病率已高达 17.5%^[22]且逐年增加，大部分人群都经历过或轻或重的颈部疼痛问题^[23-24]。因此对颈椎病的防护舒缓和治疗尤为重要，日常治疗手段分为手术治疗和非手术治疗。非手术治疗方式主要有牵引^[25]、针灸^[26]和理疗^[27]等，其中牵引治疗最为简单且日常。颈椎牵引舒缓的原理是降低椎间盘压力、增大椎间隙和椎间孔、解除肌肉痉挛、恢复颈曲、伸张颈椎动脉、拉伸黄韧带等，缓解受到刺激和压迫的神经根和脊髓^[28-29]。目前颈椎牵引体位一般分为坐位、仰卧位和半卧位^[21]。其中半卧位姿势可以通过调节背部的抬升进行更大屈曲角度的牵拉，更容易将颈部控制在屈曲位或中立位。

长期低头伏案等生活习惯正一步步地改变现代人的颈椎生理曲度。正常颈椎呈现‘C’形向前的生理弧线如图 1.1 所示。它既保证了颈椎活动的高度灵活性，又减轻了颈椎间盘的重力负荷，使颈椎处于最佳的力线状态。一旦颈椎生理曲度反弓，便会引起颈肩部不适、头晕、头痛等问题。所以具有趴卧功能且支撑颈部的枕垫可以在日常工作和休闲生活中对颈椎进行舒缓和支撑。



图 1.1 颈椎健康情况

1.1.5 设计工具的改革

科技的进步使得各种设计软件更新换代，现代设计方法以及设计工具也变得十分丰富。设计不仅仅局限于手绘和想象这种传统的模式，数字化软件为设计提供了更好更便捷的途径。现代设计方法与工具发展情况如表 1.3 所示。

表 1.3 现代设计发展情况分析表

设计类别	设计工具
传统设计方式	手绘设计 铅笔、彩笔、水粉颜料等
现代数字化设计方式	平面设计软件 Adobe Photoshop、Adobe Illustrator、CorelDRAW、Adobe InDesign 等
	三维几何建模软件 Rhino、Maya、3Ds Max、Cinema 4D 等
	有限元仿真软件 ABAQUS、ANSYS、LUSAS、MSC.Nastran、LMS-Samtech、Hypermesh、Femap/NX Nastran、FEPRO、COMSOL Multiphysics、Algor 等

由表 1.3 可知，越来越多的现代数字化软件改变和丰富了设计方式，也逐渐成为设计的趋势和潮流。

经过文献研究发现，近年来有许多研究者将有限元虚拟仿真设计法运用于纺织科学与工程各领域的产品设计中。大到纺织机器模拟，小到微观纤维性能等。

ABAQUS、ANSYS 等软件是最著名也是使用最多的有限元仿真软件，既可以研究材料性能也可以研究产品性能^[30-31]。仿真软件通过赋予材料的不同属性，可以模拟各种宏观或微观的运动。有限元虚拟仿真法改变了传统的物理实验方式，将传统实验室的物理实验转换到电脑软件中来，解决了传统物理实验对场地、人员等的限制。

本文以有限元仿真软件 ABAQUS 作为设计工具，对多场景使用趴垫进行设计研究。

有限元软件 ABAQUS 是一款由法国达索 SIMULIA 公司研究开发的具有强大功能的有限元仿真软件，可以处理复杂庞大的非线性问题^[32]。ABAQUS 作为一款具有优秀仿真能力和可靠分析能力的数值模拟软件，不仅仅可对单一部件进行力学及多物理场仿真外，还可对复杂的系统级数值进行仿真分析^[33]。因此该软件大量运用于航天工程、机械工程、土木建设工程、人体医学工程以及工业产品设计领域。ABAQUS 可以模拟分析各种模型和材料，包括橡胶泡沫等可压缩超弹性材料、高分子复合材料，钢筋混凝土板材等。软件可以分析各种复合受力情况下构件的强度、刚度和稳定性问题。ABAQUS 将复杂的物理实验以灵活的仿真方式完成，用图形、图标的形式展示模拟结果。

ABAQUS 有限元软件需要建好模型，将材料属性、边界和载荷条件合理地设置好。软件自带的全自动分析功能可以计算和验证结果。该软件主要拥有 9 个功能模块：几何建模（part）、特性属性（Property）、装配部件（Assembly）、分

析步（Step）、相互作用（Interaction）、载荷（Load）、网格（Mesh）、运算（Job）、可视化处理（Visualization）。

ABAQUS 作为数值计算软件在使用时必须保持数据单位一致。本课题选择表 1.4 所示单位进行仿真研究设计。

表 1.4 ABAQUS 仿真单位表

类别	单位
长度	mm
质量	tonne
力	N
时间	s
应力	MPa
能量	mJ
密度	tonne/mm ³
加速度	mm/s ²

1.2 研究目的与意义

本文目标是设计多场景使用的缓压枕垫。课题采用有限元仿真分析技术，研究了人与枕垫环境中的应力大小。创新设计的枕垫产品可以解决手机和电脑环境下趴卧姿势带来的不适感问题，满足人体使用需求。同时有限元法能够代替传统的产品物理压力试验，能够高效且多次地进行虚拟实验。摆脱传统试验对人力物力环境的限制。

由于目前的学术领域较少地研究趴卧型枕垫产品应力分析和创新设计的方向。本课题通过研究枕芯材料的力学性能特征和人与枕垫间的应力关系，设计具有缓压功能的多场景使用枕垫。本文在枕垫的研究方式上具有一定的创新作用。基于数值反推和图像处理的数字化设计模式为枕垫产品的开发提供了新的思路。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 枕垫研究现状

目前国内、外对枕垫的研究方向主要是对睡枕功能、材料的研究，较少研究趴枕、靠垫类生活产品。其中国内研究更多倾向于设计合适的枕型以提高及保护

颈椎方面，国外研究则更多侧重于枕高对身体内部生物力学影响的讨论^[34]。研究方式也从问卷调查、人体体压测试等传统方式转变成有限元虚拟仿真方式。

随着社会经济的发展，各种多功能美观的枕垫品类也在增加。产品设计也不仅仅在于提高睡眠品质，开始追求诸如美容、保健、理疗、安抚的目的。例如：特瑞堡公司选择高性能开孔聚氨酯泡沫材料作为车用头枕保护材料，设计的头枕可以吸收和消散司机受到的冲击^[35]。我国学者还设计了多款功能丰富运用场景多样的枕具，如表 1.5 所示。

表 1.5 枕据产品汇总表

专利号	专利名称	专利配图	特点
CN 2091529 41 ^[36]	一种斜靠平卧等多角度护脖护脸枕		此款保健枕采用 8 字形设计，其中头靠区和环脖区采用记忆海绵，中间连接缝合区域开合。满足仰卧、侧睡、斜靠、坐立等不同的使用需求。具有防颈椎病、防颈纹、防侧卧脸部压纹的作用。
CN 2010120 03 ^[37]	多功能保健睡枕		主要特点是通过内置填充物的方式支撑头部，符合“人体生理曲面”。医疗保健器物 v 袋、辅料袋等可储存在枕芯和枕芯罩上，保障人体的保健、辅助治疗和美容的功能。
CN 2125559 50 ^[38]	一种自适应轮廓的汽车头枕		这款自适应轮廓的汽车头枕可以依据使用者不同的头型尺寸进行头枕罩的凹陷面积调节。
CN 2110658 76 ^[39]	一种多功能安抚枕		该多功能安抚枕设计目的在于防止婴儿吐奶和安抚婴儿。自带头枕、安抚枕、布带、哺乳枕等。

表 1.5 续 枕据产品汇总表

专利号	专利名称	专利配图	特点
CN 2116735 62 ^[40]	一种可折叠的枕垫		此可折叠枕垫针对趴卧或仰卧的姿势阅读书籍以及使用手机环境。可以方便有效避免手臂麻痹、颈椎劳损。
CN 2124893 83 ^[41]	一种甲状腺手术用多功能枕垫		此款枕垫主要是运用于甲状腺手术，其中的可升降气压杆和支撑带可以支撑和保护头颈部。

表 1.5 展示了具有人体保健、辅助治疗和美容功能的保健枕^[37]、自适应轮廓调节的汽车头枕^[38]、防止婴儿吐奶和安抚婴儿安抚枕^[39]、针对趴卧或仰卧姿势的折叠枕垫^[40]、运用于甲状腺手术的医用枕垫^[41]。

同时各种研究方法，例如：压力分布测试法、主观评价法、问卷调查与数据测量分析法被大量用来研究枕垫类产品。如表 1.6 所示。

表 1.6 产品设计研究方法表

作者	研究方法	内容	结果
李红 ^[42]	压力分布测试，表面肌电技术，主观评价与客观实验。	分析不同高度和角度的午睡枕组合使用舒适度设计。	通过实验证明 10cm+15°、10cm+25° 是最适宜的午睡枕组合。
王笑语 ^[34]	人体工学软件，压分布测试、主观舒适度评价	通过建立中国青年男性身体数据库，讨论不同床垫环境下舒适性的枕高，并进行枕套的设计。	根据实验设计出小号中号大号的 H 型乳胶枕，配套设计抗菌彩色枕套。
孙梦情 ^[43]	压力测试+有限元	通过测量年轻女性头颈尺寸结合有限元仿真的方法，通过改变乳胶枕厚度分次实验设计最合适的乳胶枕型面。	通过实验设计出颈部压力最小和最符合颈部生理曲线的乳胶枕。

表 1.6 须 产品设计研究方法表

作者	研究方法	内容	结果
何艳梅等人 [44]	主观感受实验+问卷 调查	研究枕头高度、软硬度、接触压力和接触面积对睡眠舒适性的影响。	S型枕头的主观软硬度对舒适感影响较为显著。同时枕头越软,接触面积增大,舒适度也会增加。
侯建军等 [45-46]	压力分布测试、舒适感主观评价以及数据分析	研究侧卧时枕头形状对人体舒适度的影响。	凸形枕和S形枕在使用时压力分布均匀舒适度最高;扁平形枕受力较为均匀,舒适度次之;凹形枕和立方枕压力较为集中,舒适度最低。

由表 1.6 可知,压力测试是主要的产品设计方法。产品设计也主要聚焦于外观设计方面^[34, 43, 45, 46],产品材料主要选择乳胶材料。研究发现由乳胶或记忆海绵制成的枕头类产品可以减少颈部疲劳并改善睡眠质量^[47-48]。同时,符合人体工程学高度和形状的产品^[49]具有减轻颈部等生理部位的压力、缓解颈椎病患者的疼痛症状^[50]的作用。

1.3.2 有限元研究现状

有限元法是工程分析中应用最广泛的数值模拟方法^[51],在各个领域得到了迅速的发展和应用。近年来,有限元方法逐渐应用于纺织领域的研究。大量学者在床垫、座椅、衣服和材料的开发和研究中使用有限元方法。

表 1.7 有限元法产品设计表

研究方向	研究人员	研究内容
床垫	戴正烈 ^[52]	研究了基于复合材料的新型纤维床垫设计,从而改进产品结果,提高产品的力学性能。
座椅	刘洪浩 ^[53] 、王广彬 ^[54]	利用有限元研究法,设计了基于压力分布的舒适性座椅。
服装	Dan, Rui ^[55] 等人	根据人体与压力服之间的压力、位移和面积收缩质量随时间分布的研究。

表 1.7 续 有限元法产品设计表

研究方向	研究人员	研究内容
	雷鹏 ^[56]	分析了基于 Abaqus 低密度泡沫模型的 EPE 冲击仿真模拟, 实验发现低密度泡沫模型能准确描述 EPE 的力学性能。
材料	Zeng, Jifang ^[57]	在压缩情况下对三维 (3D) 辅助纺织复合材料进行的有限元分析。
	白晓鹏 ^[58]	通过拉伸和压缩试验数据进行超弹本构模型拟合, 用拟合出的本构参数对微孔聚氨酯弹性垫板的静刚度进行数值模拟, 研究材料的力学性能。

正如表 1.7 中所示, 纤维^[59]、纱线^[60]、织物^[61]、技术^[62]等方向的力学研究大量运用有限元法。戴正烈^[52]研究了使用新型复合材料的纤维床垫的力学性; 刘洪浩^[53]等设计了基于压力分布的舒适性座椅; Dan Rui^[55]等人研究人体与压力服之间的关系。在材料方面, 雷鹏^[56]对 EPE 冲击仿真模拟实验进行分析; Zeng, Jifang^[57]对三维 (3D) 辅助纺织复合材料进行有限元分析; 白晓鹏^[58]研究材料的力学性能。然而在纺织领域, 人体工程学理论和有限元相结合的方式被较少地运用在乳胶和记忆海绵产品的设计研究中, 同时研究也缺少相关的人体建模数据。

1.4 课题研究的主要内容和方法

1.4.1 课题研究的主要内容

当前枕具的学术研究对符合人体工学的趴卧型枕垫的探讨较少。本文通过市场调查发现, 消费者对趴卧型枕垫类产品需求增加, 但是结合人体工程学理论和有限元法的趴卧型枕垫产品研究存在一定的空白。因此本文将使用有限元法设计符合人体生理曲线、可多场景使用的趴卧型枕垫产品。

综上所述, 本课题主要目的是设计基于应力分布的缓压枕垫, 研究内容总结为以下几点:

(1) 枕垫主观评价及测试研究

该部分对市场中的热门趴卧型枕垫产品进行调研, 并对消费者使用及需求内容进行问卷调查, 整理产品设计重点。课题选择中国青年女性 61 名进行趴卧型枕垫的主观评价实验, 总结出舒适的趴卧角度与人体尺寸之间的数字模型, 并收集人体数据为后续仿真做基础。趴卧枕垫的压力测试选择 61 名实验者中身高和臂长

处于 50 分位的实验者进行，实验数据和该实验者的身材数据作为后续仿真拟合和人体建模的基础。

(2) 枕芯材料压缩性能的数值仿真

这一部分对 5 种海绵泡沫进行物理性能研究和有限元压缩仿真实验，实验结果为后续产品设计提供材料模型数据。乳胶和记忆海绵材料的微元仿真实验探究了材料厚度、形变量和应力之间的数字关系。

(3) 产品组合模型的数值仿真及分析

该部分进行了枕垫和人体模型组合的仿真模拟实验，仿真实验结果与体压实验结果对比证明将有限元法运用于枕垫的压缩分析是可行的。同时多种材料多环境的平板枕垫仿真实验对比结果显示乳胶和记忆海绵是最适枕垫材料。

(4) 基于压力分布的趴卧型枕垫设计研究

这一部分的研究主要采用 3 种设计方法进行枕垫设计，三种方式分别是：根据平面枕垫的应力数据进行反向推导出枕垫表面形状的方式、采用数字图像处理的方式、表面简化设计的方式。最后具有颈部支撑的优化枕垫产品是通过材料性能的数学模型求出颈部支撑尺寸而设计的。

1.4.2 课题研究的主要方法

本课题以实践研究方法和虚拟仿真方法为主，设计符合手机和电脑使用环境下的舒适型枕垫产品。

(1) 文献研究法

课题研究初期，对枕具材料和需求的发展情况、人机工程学发展研究、国内外对枕具的结构和枕芯材料的研究现状、有限元法的应用等方面进行大量文献研究，建立了一定的理论知识背景，为枕垫的设计研究做好理论准备。

(2) 市场调研和问卷调查法

产品进行设计前对市场中趴卧型枕垫主要产品的功能、优缺点、材料、尺寸等方面进行调研，课题根据调研结果进行主要消费群体的趴卧姿势和颈椎舒适性的问卷调查，分析调研结果和问卷结果总结产品设计要素。

(3) 抽样调查法及主观评价测试法

主观评价测试法选择 61 名 18-25 岁成年女性进行不同使用场景的枕垫使用体感进行反馈，分析不同体位下的枕垫使用情况。

(3) 体压实验分析法

该分析法选择 61 名实验者中身高和臂长处于 50 分位的实验者进行体压实验，记录趴卧时的体压大小，为后续仿真实验拟合提供数据支撑。

(4) 虚拟仿真研究法

虚拟仿真法是在 ABAQUS 软件中进行人体和枕垫的仿真实验的方法，仿真结果和体压实验结果拟合证明有限元法可应用于枕垫产品的仿真研究。

(5) 仿真实验数据分析法

本文对仿真应力结果进行数据分析，根据应力云图和应力值设计枕垫外形以达到缓压效果。同时对其进行改进优化设计，增加颈部舒缓支撑功能。

1.4.3 课题研究的创新点与难点

本课题研究的创新点现总结如下：

第一：课题更新了当代 18-25 岁年轻女性的部分人体数据库，研究中使用的人体模型参数也是符合现在年轻女性的人体数据。研究的枕垫产品是专门应用于当代人生活和工作息息相关的手机和电脑环境。

第二：本文创新地将有限元仿真的数值结果运用于枕面的设计，枕面的曲面完全表现为应力大小的分布。采用多种设计模式创新地设计了多种组合使用枕垫款式，实现枕垫型面设计的科学性和适用型，设计的枕垫类型中可以适应不同胸型人群。

本课题研究的难点现总结如下：

第一：本文需要在 abaqus 中对材料不同本构模型的拟合，其中涉及到大量本构模型的选择、参数调整等。需要反复实验调整各种步骤设置以拟合真实使用场景以及物理实验数据。

第二：如何将仿真实验输出的平面数据展现到枕垫表面三维形态的过程，经过反复软件实验以及参数和代码调整实现了通过 matlab 的数据到三维平面的转换。

1.5 论文思路和结构

本论文的撰写思路和组成结构，如图 1.1 所示。

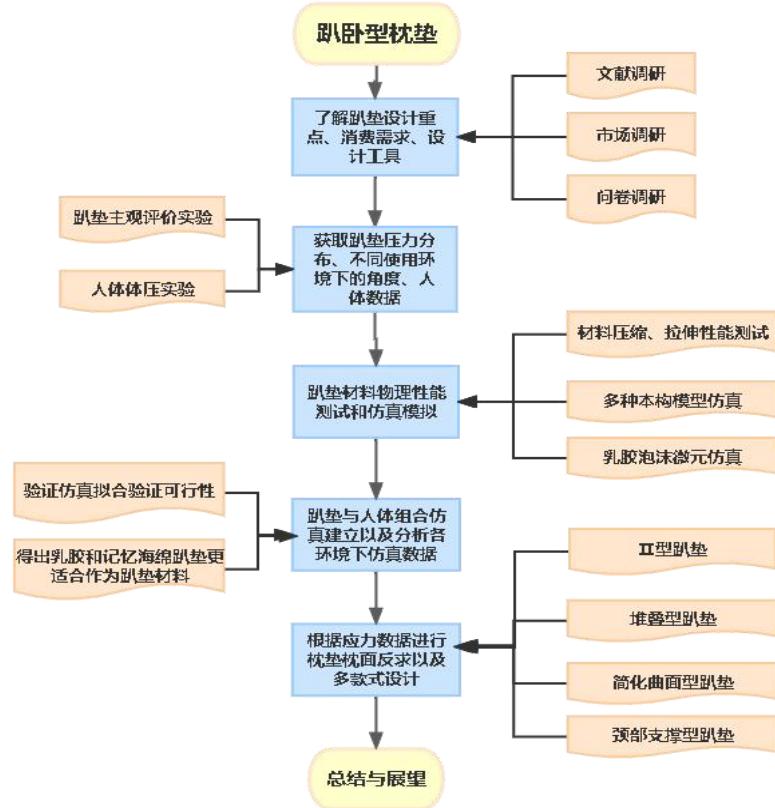


图 1.2 论文思路结果图

本文基于应力分布对趴卧型枕垫展开研究设计，首先通过文献研究对枕具发展、设计方法发展和有限元法运用做背景研究。然后对市场上的趴卧型枕垫产品进行功能、优缺点、尺寸等调研，根据调研结果进行问卷调研，从两者调研结果汇总出枕垫产品设计的重点和需求。再进行枕垫产品主观使用评价实验和体压实验，得出不同环境下使用枕垫的舒适角度和身高臂长的关系式，收集人体尺寸数据。本文第二步选择 5 款海绵泡沫进行有限元材料仿真实验和拟合，为后续产品仿真实验提供材料本构模型和数据。乳胶和记忆海绵材料微元仿真实验得出形变量、应力和厚度的数学模型。人体和枕垫产品组合使用的仿真模型与体压实验拟合后验证了仿真实验的可行性。枕垫平板仿真实验结果证明最适枕垫材料为乳胶海绵和记忆海绵。课题最后采用 3 种设计模式设计出具有缓压作用的多款不同形态的乳胶和记忆海绵枕垫。

1.6 小结

本章主要对枕垫设计的背景做一个研究调研，其中包含枕垫材料发展、枕垫功能需求发展、人体体压概念和设计工具改革发展。同时研究了枕具产品设计的

国内外研究方法和产品。并对本课题研究的主要内容、方法和创新点难点进行总结。

第2章 枕垫主观评价及测试研究

本章第一部分是通过对现有枕垫类产品中趴卧类产品进行市场调研和消费者问卷调研，总结现有产品的主要功能等为后续产品设计提供设计要素。第二部分是主观舒适性评价实验和体压实验，对人体尺寸与枕垫选择角度的相关性进行分析，记录实验者的身材尺寸和体压结果。

2.1 趴卧型枕垫产品调研

本节对市场上枕垫产品中具有趴卧功能的热门产品进行调研，分析产品的主要功能、优缺点和材料等。研究走访各大家居市场、线上购物平台等将调研产品信息汇总于表 2.1 所示。

表 2.1 市场调研产品信息汇总表

序号	产品	主要功能	优点	缺点	材料	图片
例 1	薄款按摩美容胸趴枕	女士按摩使用，在趴卧按摩时放置于头部下保持舒适。	头部中空，胸部趴垫部分上厚下薄更舒适。	胸部没有中空会有压迫感。	记忆海绵 Pu 皮革	
例 2	产后恢复美容床垫	辅助产后按摩恢复，辅助按摩床使用。	方便使用和携带、胸部中空不压胸不会造成溢奶。	尺寸统一。头部和胸部趴垫分离使用不便。	高密度海绵 Pu 皮革	
例 3	女士按摩美容胸垫	女士按摩使用，在趴卧按摩时放置于头部下保持舒适。	胸部隐形中空设计更加美观。中空部分按照女性胸型设计更加舒适。	胸部中空形状尺寸单一。	高密度海绵 Pu 皮革	 畅销日本10年，品质有保证 上门服务必备利器

表 2.1 续 市场调研产品信息汇总表

序号	产品	主要功能	优点	缺点	材料	图片
例 4	视网膜脱落术后恢复趴枕	在视网膜脱落眼内填充术后应用。	遵循人体力学原理,在临床实践中设计眼科术后俯卧趴枕,临床效果良好。	仅用于医学学术后,日常使用不变。	Pvc 植绒面料	<p>功能解析</p>
例 5	颈椎复位趴枕	趴卧治疗颈椎	可以进行颈椎复位、腰椎治疗、胸椎矫正,采用牵引治疗的方式。	仅用于医疗康复治疗,生活使用不便。	金属支架 海绵	<p>颈椎病休息疗法</p>
例 6	小趴熊抬头趴垫	趴卧时满足手机娱乐和电脑工作的床上辅助产品。	趴枕高度可调节,放松肩膀、拉伸腰颈、方便电脑和手机使用。	头部和胸部支撑高度不一致,长时间使用颈椎不适。通过充气调节高度存在漏气风险。	Pvc 材质	<p>人体工学设计 舒适玩乐 抬头做人</p> <ul style="list-style-type: none"> 放松肩膀 颈椎舒缓 不压心胸 看书阅读
例 7	多功能趴垫枕	趴卧时满足手机娱乐和使用电脑的床上辅助产品。	高度可调节,满足手机娱乐。下硬上软舒适贴身。前窄后宽整体稳固不侧翻,中间留空防止压迫胸部。	设计不美观,胸部长方形镂空无尺寸设计。	ABS 工程塑料 高回弹海绵	<p>贴合人体设计 有效支撑不压胸</p> <ul style="list-style-type: none"> 有效支撑头部、上胸骨和腹部,手自由活动不压胸 DESIGN
例 8	多功能趴靠垫枕	趴靠垫枕,睡觉、使用手机、护腰使用。	面料水晶绒舒适,可拆卸清洗,支撑条可拆卸调整支撑部位。	厚度不可调节,对胸部会有压迫。长期使用会塌陷。	PP 棉 水晶绒	

表 2.1 续 市场调研产品信息汇总表

序号	产品	主要功能	优点	缺点	材料	图片
例 9	靠垫软包	趴靠枕垫，趴卧、背靠支撑使用。	可靠可躺可靠，多功能使用。S型设计符合人体工学。	厚度高度不可调节，对胸部会有压迫。长期使用会塌陷。	高回弹海绵网格鸟眼布	
例 10	多功能靠垫椅	方便站立时使用电脑。	可以站立使用，靠垫椅自带电脑支架，使用方便。	站立使用全身压力集中于趴垫上，对前胸的压力较大。	金属弹性海绵	
例 11	Thanko二合一的趴卧靠背垫	居家手机娱乐与电脑时使用。	贴合趴睡的姿势，轻松支撑头部和上身的软垫，既可以趴卧又可以背靠。	可调节角度小，趴垫材料选择较硬的海绵，舒适度低。	金属支架高密度海绵	
例 12	手机专用趴枕	居家使用手机、电脑时使用	高度适宜、符合人体工学设计，采用舒适的枕套和记忆棉内芯不易变形。	单一角度，角度不可调节。使用较为单一。	记忆海绵	
例 13	UHEA LER 手机专用趴枕	使用手机场景时趴卧使用。	紧密贴合人体曲线，使用升级竹炭记忆棉。	单一角度，角度不可调节。使用较单一。	记忆海绵	
例 14	床上神器	床上使用，趴床看书手机等使用。	采用高弹pp棉花，中孔可释放胸口压力。	单一角度。支撑性不佳，仅靠前柱支撑会有下滑。	高弹pp棉花	

根据市场调研情况可知，枕垫类产品中辅助趴卧的产品基本分为生活工作辅助型和美容理疗效果型。生活工作辅助型趴垫产品以斜坡型或者斜向角度调节型为主，主要抬高人体前胸部和头部，使手部和眼部能够顺利地操作手机电脑等工具，如例 6-例 14。外形设计上会考虑手部关节处的灵活折叠、胸部的镂空设计、脖颈部的支撑等。美容理疗类产品主要考虑平趴姿势下的使用，辅助美容床、医疗床等使用，如例 1-例 5 所示。美容理疗产品设计主要考虑平趴情况下部的呼吸和支持、胸部的压迫等方面。生活工作辅助型产品主要考虑脖颈部的支撑、胸部压迫的缓解等方面。市场调研结果显示具有趴卧功能的枕垫尺寸厚度范围在 75mm~240mm，宽度范围在 300mm~500mm，长度范围在 250~600mm。

2.2 趴卧习惯和颈椎舒适性探究

趴卧姿势作为生活姿势，在居家卧床、沙发，以及医院护理治疗中十分常见。随着电子产品的日益普及和广泛使用，多姿势下使用电子产品成为十分常见的现象，也导致各种颈部和身体产生不适感。J. E. Gold^[63]研究了在没有任何枕垫辅助产品情况下采用不同姿势使用笔记本电脑的舒适度，研究发现俯卧姿势的受压强度明显大于坐姿姿势。在肩膀、上臂、背部、颈部、胸部等部位产生了更多不适^[64]，如图 2.1 所示。研究结果显示，使用平板和手机造成的颈椎弯曲程度要大于使用电脑时的弯曲程度，且为了颈椎健康要避免低角度长时间注视^[65-66]。



图 2.1 基于不同姿势使用笔记本电脑的舒适性研究

本课题针对日常生活中使用电脑和手机等电子产品时，有关趴卧姿势的相关问题展开问卷调研（附录 1：辅助趴卧型枕垫产品调查问卷）。问卷旨在挖掘用户对于趴卧型枕垫的需求并进行分类整理，了解当前成年人使用电子产品时的趴卧习惯以及对颈椎脊柱舒适度的关注情况等。进一步进行使用手机和笔记本电脑产品的趴卧舒适性实验，对趴卧时人体的肩膀、上臂、背部、颈部等部位进行舒适性评价（附录 2：可调节枕垫设计的主观舒适性评价）。

2.2.1 问卷调研

本节设置针对成年人有关颈椎脊柱舒适度的关注情况和趴卧姿势下使用电子产品问卷。问卷主要发放人群为18-60岁从事脑力劳动为主的学校、职场人员。采用线上线下同步开展，一共发放400份，其中未填答等无效问卷38份，有效问卷362份。将收集的362份数据进行图表化处理并分析如下：

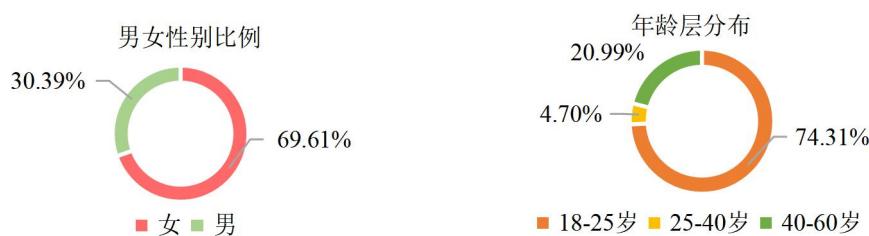


图2.2 男女性别比例及年龄层分布

本次调研中女性较男性占比更多，近四分之三的被调查者的年龄在18到25岁之间（如图2.2）。可见对枕垫辅助类产品的需求以女性和年轻工作者为主。

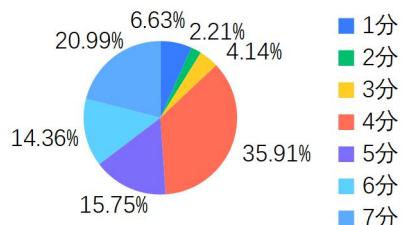


图2.3 工作中颈椎脊柱舒适情况统计

由颈椎脊柱舒适情况探究的统计图（如图2.3）可知，1到7分依次代表生活中颈椎脊柱舒适性情况的等级，1分情况最差，7分情况最好，选择4分一般的人最多。4分及以下的人数将近调研总数的二分之一，说明多数人在工作中的颈椎脊柱常感觉到不适，对合理的提高颈椎脊柱舒适性方法存在需求。参考年龄组成和文献研究也可以看出，目前颈椎病腰椎病有年轻化的趋势。

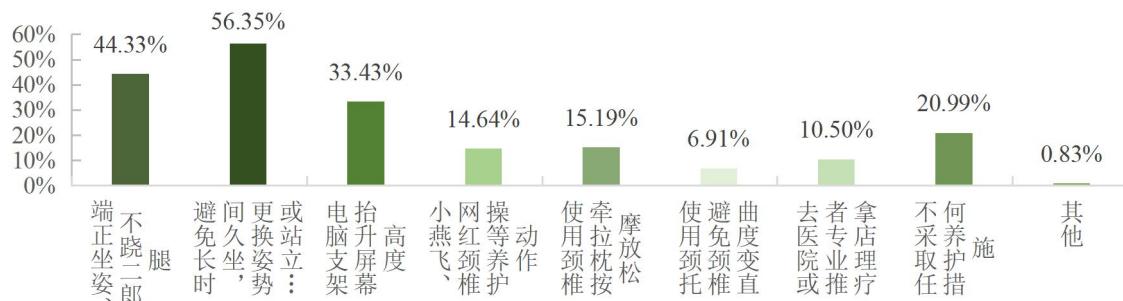


图2.4 颈椎缓解舒适方法统计图

颈椎舒缓方法统计图（如图 2.4）中可以看出大部分人会选择“避免长时间久坐，更换姿势”、“端正坐姿，不跷二郎腿”和“电脑支架抬升屏幕高度”来缓解颈椎的不适。使用颈托等辅助产品方法的人最少，可能是考虑到使用颈托美观性不足以及不够简便。还有约 21% 的人群表示不采取任何养护措施，即使是运动以及按摩辅助缓解的人数都较少，说明颈椎舒缓保护重要性的宣传不足导致健康意识不到位。

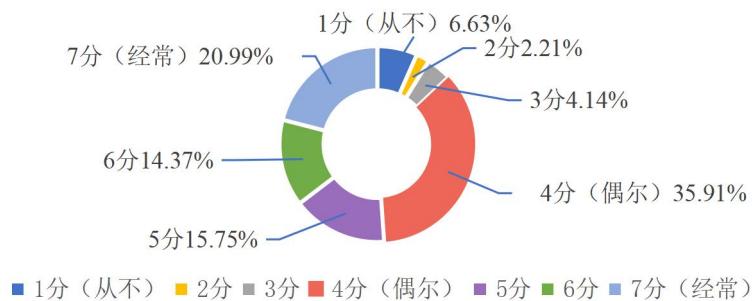


图 2.5 因坐姿使用电子产品时间过长而感到腰颈酸痛比例



图 2.6 趴卧姿势使用电子产品意愿比例

经常因坐姿使用电子产品时间过长而感到腰颈酸痛的人群占到五分之一，偶尔程度及以上的人群所占比例高达 87%（如图 2.5），表明大多数人在坐姿时间过长后，腰颈部都会产生不适，需要缓解不适感。缓解久坐后腰颈部的不适，增强趴卧姿势的舒适感是趴垫开发的重要目标。且有超过半数的被调研者表示久坐后有使用趴卧姿势缓解疲劳的习惯（如图 2.6），因此趴卧姿势的工作与休闲被多数人青睐。

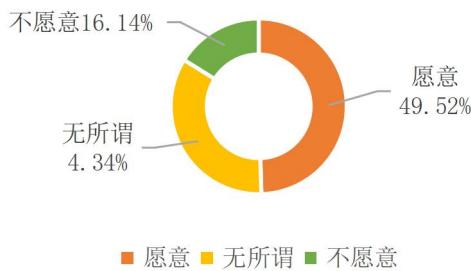


图 2.7 选择趴卧姿势放松意愿

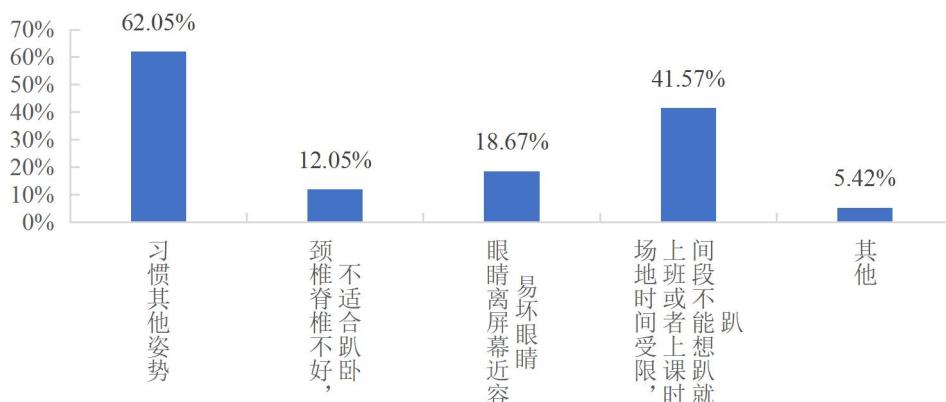


图 2.8 不选择趴卧姿势的原因

如果条件允许，将近一半的调查者在工作休闲中愿意选择趴卧姿势进行工作和放松（如图 2.7），明确不愿意的实验者人数较少。对不选择趴卧姿势使用电子产品的人群进行原因调研，大部分人表示是因为“习惯其他姿势”或“受时间场地受限，不能想趴就趴”（如图 2.8）。说明目前市面上趴卧垫的设计并不能满足所有人使用，且舒适度存在改进。要尊重不同用户的生活习惯，有趴卧习惯的用户满意度会更高，存在幸存者偏差。

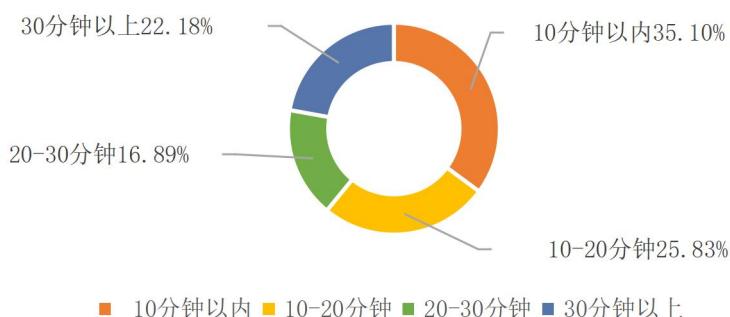


图 2.9 趴卧姿势下使用电子产品的时长统计

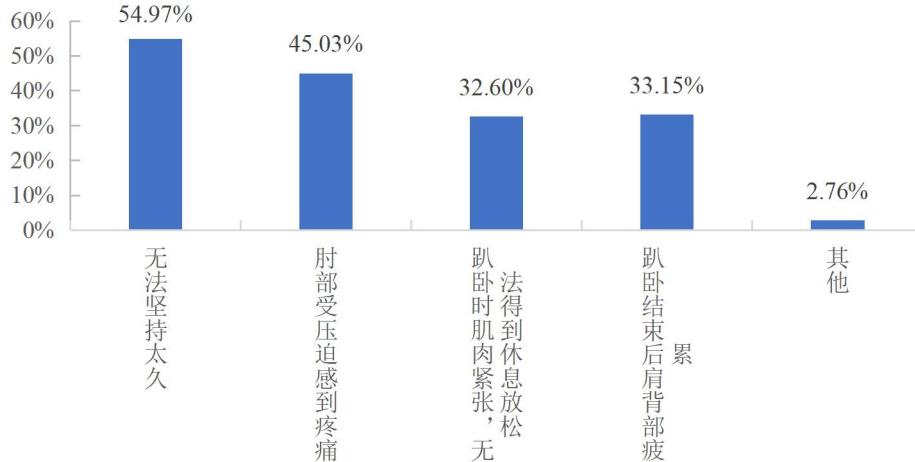


图 2.10 趴卧姿势使用电子产品时出现的困扰问题

本文对趴卧姿势下使用电子产品的时长进行统计（如图 2.9 所示），10 分钟以内的人群最多，20 分钟以内的人群占统计人群的一半以上，但是坚持 30 分钟以上的人群仅有四分之一不到，因此无辅助产品时的趴卧姿势并不能坚持很久。并对趴卧姿势使用电子产品时出现的困扰问题进行统计（如图 2.10 所示），有 54.97% 的人表示在没有趴垫等辅助产品支撑使用的情况下无法坚持太久，还有部分人表示“肘部受压迫感到疼痛”、“趴卧时肌肉紧张，无法得到放松休息”、“趴卧结束后肩背部疲劳”等原因是无法长时间趴卧的困扰。于是，延长趴卧时间并缓解趴卧时的不适感是趴垫设计的内容核心。

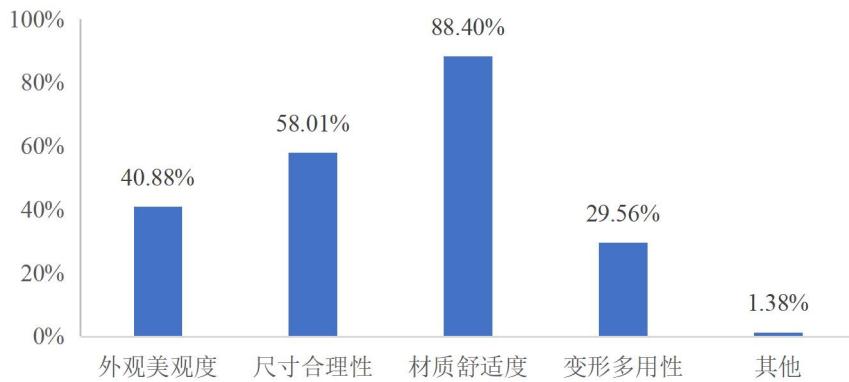


图 2.11 挑选趴卧型枕垫的关注点

图 2.11 是对挑选趴卧型枕垫的关注点的统计结果，结果显示消费者对材质舒适度的关注度是最高的，高达 88%。按关注度高低排序，其他依次为尺寸合理性、外观美观度、变形多用性，还有部分人提出价格也是其在选购时的关注点。这表示趴垫后期在设计上应该关注材质的选择、尺寸的合理、功能多样性上。在定价过程中最好合理以及分层定价，以满足不同消费水平的用户需求。

2.2.2 结果分析

问卷提供的反馈信息显示，使用电子产品时辅助趴卧的枕垫产品对用户来说还是相当重要且必要的。（1）问卷调研发现对于多数人来说趴卧姿势在日常生活中有一定的必要性，尤其在于缓解久坐不适方面。（2）据统计，趴卧时间一般为20分钟以内，且有大多数人表示，趴卧动作无法长时间保持。该姿势进行一段时间后，会有胸部压迫和颈部支撑疲劳等不适情况产生。不借助辅助工具的情况下，姿势本身所造成的受压面积小、压强过大问题是导致舒适度降低主要因素。（3）趴垫使用材质是关注的一大重点，舒适缓压材料能够增加趴卧时间。所以设计一款美观舒适的符合人体工学的趴卧型枕垫是给用户带来更好趴卧体验的关键。

2.3 趴卧型枕垫主观评价与改进实验

趴卧姿势舒适度主观评价是基于上述市场调研和问卷调研结果，选择日本Thanko二合一可调节角度趴卧垫作为基础款趴垫进行的。目的是探讨在使用不同电子产品和不同场景下趴垫角度、结构与人体舒适性之间的关系。本课题主要采用舒适度主观评价法，参考实验结果总结趴垫的结构设计要素。并依据实验测试结果得到使用手机和电脑环境下的舒适角度。研究环境主要选择使用手机和使用电脑这两种日常生活中最普遍的使用环境。

2.3.1 实验方法

主观舒适度实验记录（附录2：可调节枕垫设计的主观舒适性评价）被试者在静态趴卧姿势下对颈部、脊椎、胸腹部、肘关节和肩部的舒适度评分。

本实验选择18-25岁之间的年轻女性61名作为实验者，受试者均无颈椎病、腰椎病等，身体健康。体型判断标准采用BMI来衡量，体重指数 $BMI=体重/\text{身高的平方}$ （国际单位 kg/m^2 ）。依据中国参考标准，被试者的BMI指数需在18.5~23.9之间。实验前用米尺记录实验者身体数据参数，详细数据见附件。

实验中使用的基础趴垫（如图2.12所示）可以通过钢架和调节角切换档位改变垫倾斜角度控制抬升高度，调节角度以 1° 为调节基础。实验结果比较不同角度对趴卧姿势舒适度的影响，进一步得到在“手机模式”或“电脑模式”两种场景下的最适角度。基础款趴垫中枕芯材料为高密度海绵材料，为实验不同材料趴垫的趴卧舒适性，根据趴垫尺寸制做乳胶替换垫进行实验。



图 2.12 基础趴垫

被试者统一在尺寸为 $490 \times 350 \times 110\text{mm}$ 的趴垫上进行测试，一次性完成四个任务。四个任务对应不同的趴卧环境。图 2.13 为四种任务下的展示图。任务一为不使用趴垫、任务二为使用购买的基础海绵趴垫，任务三将海绵垫换成胸部部分中空乳胶垫，任务四将任务三中的胸部中空乳胶垫增加颈部辅助支撑。比较四种条件下不同结构对人体趴卧舒适性的影响。更换不同的电子产品模拟生活场景，在进行上述任务实验。电子产品选择生活中使用较多的手机和笔记本电脑。实验过程不断抬升高度，反复多次实验使用不同电子产品和不同角度选择最适角度。本次实验所有试用者均使用同一趴垫、同一手机、同一电脑。



图 2.13 四个任务对应的趴垫条件

2.3.2 结果分析

趴垫的结构对主观舒适度的影响评价主要考虑颈部舒适度、脊椎舒适度、胸腹部舒适度、肘关节舒适度、肩关节舒适度和整体舒适度 6 个方面（如图 2.14 所

示）。记录每个实验对象的4种任务实验后的舒适度评分，评分越高舒适度越高。并计算均值结果绘制于图2.15。



图 2.14 主观舒适度实验

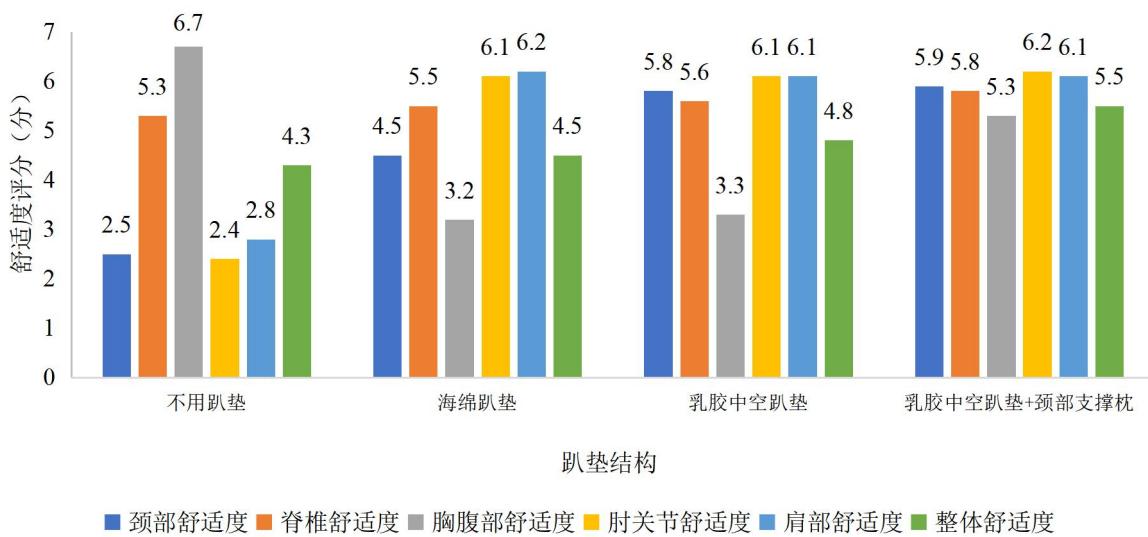


图 2.15 趴垫的结构对主观舒适度的影响

在不同趴垫结构下，各部位舒适度及整体舒适度评分均值如图2.15所示。从图中可以看出：（1）随着趴垫的辅助作用及结构变化，颈部舒适度、脊椎舒适度、肩部舒适度、肘关节舒适度、整体舒适度评分逐渐增加。说明使用趴垫能够有效减缓对肩部、肘关节的压迫，释放作为支撑的肘部和肩部，从而使脊椎舒适度、

颈部舒适度和整体舒适度都得到提高。（2）胸腹部舒适度呈现先减小后增大的趋势，说明在市面上的海绵趴垫不能满足用户在胸腹部部位舒适性需求，于是在此基础上结构和材质方面需进一步提升，趴垫结构改为中空结构并换成乳胶材质等一系列改进方案能够有效提高舒适度，从而更好地提升胸腹部舒适性。

2.4 人体尺寸测量与趴卧角度探讨

本小节对所有实验者在手机和电脑两种场景下选择的最适趴垫角度和身体尺寸数据进行汇总统计，身材数据测量如图 2.16 所示。收集数据为实验者的身高、体重、上身长（下巴到人体上身胯骨的垂直长度）、上臂长（肩关节到肘关节长度）、小臂长（肘关节到手腕关节长度）、胸围（胸部最大维度）、乳深（自然状态下下乳边到乳头突出厚度）。其中身高、上身长、上臂长、小臂长影响枕垫尺寸、胸围和乳深影响枕垫胸部处尺寸设计。统计结果详见附录 3

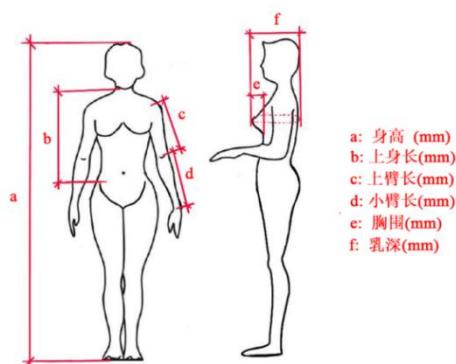


图 2.16 人体尺寸测量数据图

枕垫角度选择实验结果发现实验者普遍选择 25°-30° 范围使用电脑，考虑到该环境需要更高的抬升角度使得人体视线与电脑屏幕平齐。而使用手机时人体相对更加舒适放松，因此选择的角度以 19°-24° 为主。本文对人体的身体数据和不同使用场景下趴垫角度选择两个变量进行皮尔逊相关性分析。分析结果如表 2.2 所示。

表 2.2 人体尺寸与不同场景下枕垫角度选择的相关性分析

	身高 mm	体重 kg	胸围 mm	上臂长 mm	小臂长 mm
身高 mm		.748**	0.193	.979**	.755**
使用电脑舒适角度	.917**	.653**	0.079	.935**	.593**
使用手机舒适角度	.841**	.566**	-0.024	.880**	.843**

注：** 在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

皮尔逊相关性分析结果可知，身高和上臂长是影响不同场景下趴垫角度选择的最主要因素，相关性最强。其中上臂长相关性较身高更强，对角度选择影响更大。对这两组数据进行正态分布分析，上臂长数据的偏度为-0.037，峰度为-0.849；身高数据的偏度为-0.343，峰度为-0.419。上述数值峰度与偏度数值均小于1，可认为数据呈正态分布。上臂长与身高的相关性系数为0.979， p 值小于0.005，具有统计学意义，两者具有强相关性。

因为身高和上臂长都会对使用角度产生影响，因此分别对身高、上臂长与不同使用场景下趴垫选择角度进行回归性分析，分析结果汇总于下表2.3。其中各回归分析中显著性的值均小于0.01，故方程系数具有统计学意义。

表2.3 使用电脑舒适角度与身高的线性回归参数

模型	未标准化系数		标准化系数		共线性统计		
	B	标准错误	Beta	t	显著性	容差	VIF
(常量)	-33.621	3.441		-9.771	<.001		
身高 mm	.037	.002	.917	17.614	<.001	1.000	1.000

a. 因变量：使用电脑舒适角度

根据表2.3的回归系数可得回归方程为： $\alpha = -33.621 + 0.037h$ (2-1)

其中 α 为使用电脑舒适角度， h 为身高mm。

表2.4：使用手机舒适角度与身高的线性回归参数

模型	未标准化系数		标准化系数		共线性统计		
	B	标准错误	Beta	t	显著性	容差	VIF
(常量)	-28.002	4.121		-6.795	<.001		
身高 mm	.030	.003	.841	11.935	<.001	1.000	1.000

a. 因变量：使用手机舒适角度

根据表2.4的回归系数可得回归方程为： $\beta = -28.002 + 0.03h$ (2-2)

其中 β 为使用手机舒适角度， h 为身高mm。

表 2.5：使用电脑舒适角度与上臂长的线性回归参数

模型	未标准化系数		标准化系数		共线性统计		
	B	标准错误	Beta	t	显著性	容差	VIF
(常量)	-32.208	2.917		-11.041	<.001		
上臂长 mm	.181	.009	.935	20.290	<.001	1.000	1.000
a. 因变量：使用电脑舒适角度							

根据表 2.5 的回归系数可得回归方程为: $\alpha = -32.208 + 0.181h_2$ (2-3)

其中 α 为使用电脑舒适角度, h_2 为上臂长 mm。

表 2.6：使用手机舒适角度与上臂长的线性回归参数

模型	未标准化系数		标准化系数		t	显著性	共线性统计	
	B	标准错误	Beta				容差	VIF
(常量)	-28.099	3.460			-8.122	<.001		
上臂长 mm	.151	.011	.880		14.244	<.001	1.000	1.000
a. 因变量：使用手机舒适角度								

根据表 2.6 的回归系数可得回归方程为: $\beta = -28.099 + 0.151h_2$ (2-4)

其中 β 为使用手机舒适角度, h_2 为上臂长 mm。

表 2.6：使用手机舒适角度与上臂长的线性回归参数

模型	未标准化系数		标准化系数		共线性统计		
	B	标准错误	Beta	t	显著性	容差	VIF
(常量)	-7.500	8.986		-.835	.407		
身高 mm	.204	.005	.979	37.139	<0.01	1.000	1.000
a. 因变量：上臂长 mm							

根据表 2.6 的回归系数可得回归方程为: $h_2 = -7.5 + 0.204h$ (2-5)

其中 h 为身高 mm, h_2 为上臂长 mm。

结合公式 2-1、2-2 和公式 2-5, 可知由身高估算枕垫使用角度更优解为:

$$\alpha = -32.621 + 0.181(-7.5 + 0.204h) \quad (2-6)$$

$$\beta = -28.099 + 0.151(-7.5 + 0.204h) \quad (2-7)$$

其中 α 为使用电脑舒适角度, β 为使用手机舒适角度, h 为身高 mm。

本文对进行枕垫舒适性实验的 61 名女性实验者的身体数据进行统计处理，选择身高和手臂长数据处于 50 分位的实验者身体数据作为后续产品设计的人体数据基础。50 分位实验者的人体数据细分如表 2.7 所示。

表 2.7 中位数实验者人体数据数据细分

实验者	身高 mm	体重 kg	上身长 mm	胸围 mm	上臂长 mm	小臂长 mm	使用电 脑舒适 角度	使 用手机 舒适 角度
50 分位	1640	60	511	950	328	249	27	21
平均值	1636	54	510	859	326	227	27	21

枕垫角度选择实验可知使用电脑的环境下人体较为舒适的角度是 27° ，该角度满足视眼与电脑屏幕齐平使用更加方便。使用手机的环境下人体较为舒适的角度是 21° 。本课题研究将以电脑模式和手机模式两种不种趴卧模式展开后续实验设计。

2.5 人体体压实验测试

测量人体压力分布在医学、仿生学等学科中是一个重要的方面^[67]。产品与使用者之间的接触和体压分布能够很好地判断产品的舒适性。例如体压分布指数可以指导弹簧床垫的设计和选择^[68]。产品的体压实验和实验者的舒适性反馈可以给产品设计提供科学和真实的数据和设计基础，设计者可以根据数据结果设计更加符合人体工学的产品。

本课题选取了市面上较为常见且热门的枕垫类产品作为体压实验实验品，实验器材如下图 2.17 所示。趴垫填芯材料选择高密度海绵和乳胶海绵。



图 2.17 体压测试器材

实验开始前选择2.3实验中的50分位年轻女性作为实验对象，试验样品为1只海绵材质趴垫A、一个可调节角度的支架A1；1只乳胶材质趴垫B、一个可调节角度的支架B1。海绵和乳胶材质趴垫尺寸为350mm×490mm×110mm，乳胶垫子中填充圆柱形乳胶粒。实验采用Tactilus Pressure Mapping System人体压力分布测试仪进行测试，该检测仪器由单位传感器元件组合。许多单位为10mm×10mm单位的薄如纸的触点传感器放置在接触界面上，记录并吸收两个接触面或之间发生的压力分布和压力大小。实验时将人体完全置于枕垫上，使垫体舒适地支撑起人体上身，通过调节支架使身体与地面的角度为27°。将应力传感垫置于趴垫上方、实验者前胸及腹部下方。等待3min后应力值较为稳定时，读取测试数据记录数据结果。以excel文件格式保存2500个感应元件所测数据结果，输出单位spi，对输出数据进行处理转换成kpi单位汇总，如表2.8所示。

表2.8 趴垫体压分布测试结果

趴垫材料	身体距地角度 (°)	胸部最大压强 (kPa)	腹部最大压强 (kPa)	平均值 (kPa)	方差 (kPa ²)
硬质III号 海绵	27	9.45	2.57	0.47	0.66
乳胶填芯	27	7.69	2.31	0.23	0.62

将实验测得的数据导入软件Matlab进行绘图，绘制二维体压分布云图，如图2.18所示。结合表中数据以及二维体压分布云图可知，使用趴垫时应力主要集中于胸部和腹部。且乳胶海绵上的应力黄色集中区域比硬质海绵小，具有更好的缓压效果。

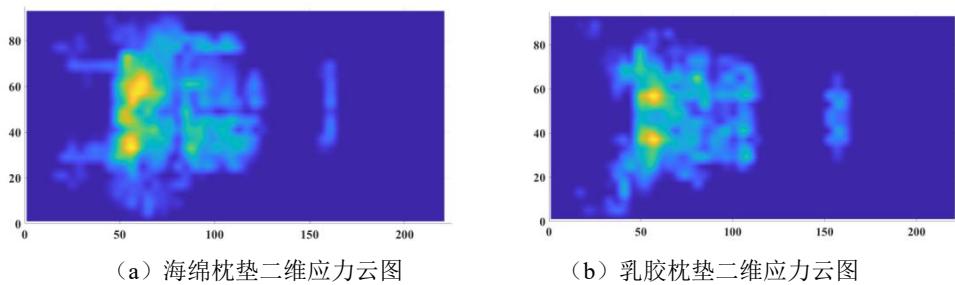


图2.26 人体体压测试二维应力云图

2.6 小结

本章主要进行了市场调研、问卷调研、主观舒适性评价和人体体压实验。

(1) 第一部分对市场调研市场上常见且热门的枕垫中趴卧类产品，总结产品设计重点、产品功能和尺寸。市场调研结果显示当前市场上趴卧类枕垫设计重点在于缓解胸腹部压迫和进行颈部支撑。根据调研结果制作问卷对用户进行问卷调查，通过调研问卷进行数据采集分析可知年轻女性群体对辅助类趴垫需求更高，更加关注产品的设计舒适性和材质。

(2) 主观舒适性实验选择基础款枕垫进行，确定使用趴卧类产品时不适感主要集中于颈部、胸部、腹部等地方。经过多次实验得出使用电脑的环境下和使用手机的环境下的最适角度分别为 27° 和 21° 。

(3) 实验记录了 61 位实验者的人体数据，选择身高和臂长处于 50 分位的实验者身材数据作为后续课题研究的数据基础。

(4) 体压实验分别记录了海绵和乳胶材质枕垫的人体体压大小，二维体压分布图验证了压力主要集中于胸部和腹部。海绵材质最大压强值为 9.45Kpa，乳胶材质最大压强值为 7.69Kpa。体压实验结果说明乳胶材料拥有更好的缓压效果，作为枕垫材质更为适合。

第3章 材料压缩性能数值仿真

本章主要内容是选取市面上五款较为常规的枕垫类填芯材料进行力学性能研究。将各种材料的力学性能通过有限元软件 ABAQUS 中的各种本构模型进行仿真，比较最优仿真方法，为后续的仿真产品设计提供支持。最后根据 50 分位实验者的身材数据和基础枕垫外形建立三维人体模型、三维枕垫模型以及组合人体与枕垫仿真使用场景模型。验证趴卧状态下有限元模拟的可行性。为后续枕垫通过有限元仿真实验进行设计做好基础。

3.1 枕垫款式材料选择

发泡海绵的主要材料是聚氨酯，其制作是通过添加发泡剂等多种助剂，经过高温、喷涂、发泡制作而成^[69]。聚氨酯的原料可分为聚酯型和聚醚型两种，种类决定了产品的不同发泡形态、软硬度等性能^[70]，运用于各类的衍生产品设计中。传统海绵材料具有高回弹性，透气性和吸水性能好等特点。其用于枕垫类产品中不仅价格实惠，而且吸能性能优异，舒适性高。实验研究证明质量较好密度较大的海绵垫可承受 100kg 的重量^[71]，可以作为垫类的优秀填充材料。但是普通海绵的回弹性不佳，长时间使用之后易出现变形、塌陷、氧化变黄、对人体血管回弹应力大、夏天闷热、冬天质地发硬，使得普通软质海绵的应用范畴受到局限。为了弥补普通软质海绵的不足，陆续出现记忆海绵、乳胶海绵等新型海绵。

记忆海绵作为海绵品类的一种，分为温感记忆海绵和非温感记忆海绵。记忆海绵具有较好的吸收冲击力、减少震动保持稳定、释放较低的反弹力等优点。最初是应用于航天产业中，作为太空舱着陆时保护宇航员身体的缓冲材料，后被大量应用于贵重仪器包装的极品材料。作为枕垫类材料的选择之一，记忆海绵能够通过应力松弛缓解表面所受压迫。通过增加接触面积等分散应力，避免应力过于集中，从而避免人体的局部部位受微循环压迫，促进血液循环使得它在医疗中得到大量使用。例如，使用记忆海绵床垫后久卧病人可减少压疮或坏疽、皮肤发麻等不适症状，极大降低翻身需求，改善睡眠质量，促进健康，有助于医疗康复。同时其分子结构稳定且无毒无刺激性物质，科学无害，还具有一定的阻燃效果。记忆海绵中的通透孔泡结构保证了材料的透气性和吸湿性优于普通海绵。有抗菌防螨防腐蚀性，能够保持材料外界清洁度，持久耐用，外形可塑性较高，可以按

照产品的使用需求定制不同软硬度、密度、回弹速度的材料。其中温感记忆海绵具有感温特性，在感知使用者的体温使材料变得柔软时吸收人体应力，使表面根据接触应力调整舒适的贴合形状。由于记忆棉这些杰出的效果，不仅运用在家用工业用纺织领域，在医学临幊上也有广泛使用，如翻身枕、防压疮垫、手术枕垫、早产儿俯卧垫等^[71-73]。

除了记忆海绵之外，乳胶海绵也是市面上枕垫类使用较多的填充型材料。乳胶是一种从橡胶树上提取的天然材质，呈现乳白色液体状，由顺式—1，4—聚异戊二烯两种主要成分以及多种非橡胶物质，如蛋白质、类脂物、水溶物、丙酮溶物和无机盐等组成^[74]。生产中常加入氨和其他稳定剂来防止天然乳胶因微生物、酶的作用而凝集^[75]。天然乳胶的特殊香味具有预防蚊虫的效果，产品表面较为光滑，手感舒适且不易堆积螨虫。天然环保材料可清洗重复利用，不易变形，弹性好具有矫形功能。传统乳胶产品的发泡工艺使得乳胶产品内部布满空隙，使用不会闷热不适。目前发泡工艺主要有物理发泡的特拉雷法和化学发泡的邓禄普法，前者采用开孔结构来达到乳胶产品的超高弹性和透气性；后者以开模成本低和开发较快被普遍使用^[76]。

以上三种材料都是目前市场上枕垫类产品最为常见且热门的材料，本课题将选择这几个材料作为实验对象进行研究设计。

3.2 材料物理性能实验

海绵的密度是行业内区分普通海绵的标准，密度 $\rho=M/V$ 即每平方米海绵的重量。一般海绵密度越高，海绵间的孔隙率越小，质量越大，硬度越高。本次课题选取同一工厂统一原材料和生产工序生产的三款不同密度I号、II号的普通海绵、记忆海绵、乳胶海绵以及实验枕垫中的填芯海绵III号试样进行实验。其中III号海绵硬度最大，II号海绵次之，I号海绵硬度最小最柔软。本次海绵材料密度测试根据国家标准 GB/T 10802-89^[77]设置实验方案。

（1）实验制样

材料密度是进行材料压缩性能有限元模拟的重要数据之一。在进行测试前，先制备试样。从I号、II号、III号海绵式样、记忆海绵试样、乳胶海绵式样上选取平整且均匀部分制作裁制试样尺寸为：50mm×50mm×50mm，样品如图3.1所示。试样应保证表面和切面无损伤、平整且无大孔瑕疵，每种材料共制作5个试样。I号海绵记为I1、I2、I3、I4、I5，II号海绵记为II1、II2、II3、II4、II5，III号密度海绵记为III1、III2、III3、III4、III5，记忆海绵材料记为J1、J2、J3、J4、J5，乳胶海绵记为R1、R2、R3、R4、R5



图 3.1 材料试样品

(2) 体积测量

所有材料试样均为规则正方体，仅需测量材料的长、宽、高等数据进行计算，测量工具为不锈钢直尺和游标卡尺，精度为 0.1 mm。每个海绵试样的长、宽、高各测量 5 次，将测量结果记录并计算出平均值。

(3) 质量测量

海绵试样质量采用 0.0001 g 精度电子天平，如图 3.2 为电子天平。



图 3.2 电子天平

质量测试实验将裁剪好的每个海绵试样各测试 5 次，计算平均值作为各海绵试样的质量。将测量结果记录并计算出平均值。统计结果汇于附录 4。

(4) 材料密度计算

结合上述统计的体积与质量的平均值数据，为方便后续仿真实验，本文统一质量单位为吨，体积单位为 mm^3 。由密度公式计算出各海绵试样的密度值，作为后续模拟的数据基础，如表 3.1 所示。

表 3.1 各海绵试样密度统计表

试样编号	平均体积 (mm^3)	平均质量 (t)	密度 (t/ mm^3)
I 号海绵	126362.2	3.29E-06	2.6E-11
II 号海绵	121580.7	4.46E-06	3.67E-11
III号海绵	125900.9	5.51E-06	4.35E-11
记忆海绵	125099.6	5.33E-06	4.26E-11
乳胶海绵	125189.8	6.54E-06	5.22E-11

3.2.1 单轴压缩实验

压缩试验是测定材料在轴向压力作用下的力学性能的试验，是材料机械性能试验的基本方法之一。本课题使用 Instron 5943 电子万能材料试验机对各海绵试样进行单轴压缩实验，压缩实验过程如下：

(1) 试样准备阶段

试验前根据 GB/T 10802-89 要求取生产超过 72 小时的各海绵样品，并从样品中部平整无损伤的部分裁剪实验试样，按照 GB 2918 规定的温度（23 ± 2）℃；相对湿度为（45 ~ 65）% 的环境条件下进行 16 h 的不受弯曲变形与载荷破坏状态调节。

(2) 试样裁剪

单轴压缩实验的试样在图 3.1 中的海绵样品中裁剪，选取样品中部位置处表面平整无缺口，厚度统一均匀没有明显凹凸不平和表面切面明显大孔。根据 GB 6669 方法 A 的要求需要裁剪样品，根据电子万能材料试验机压头尺寸选定各海绵的压缩式样大小为 30 mm × 30 mm × 50 mm，如图 3.3 所示，各密度海绵分别制作试样 3 个。同时制作拉伸试样如图 3.4，根据夹具尺寸设定裁剪规格为 30 mm × 10 mm × 10 mm 的海绵试样进行拉伸操作，各密度海绵分别制作试样 3 个。

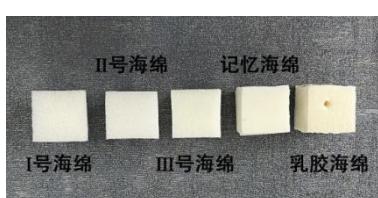


图 3.3 压缩试样

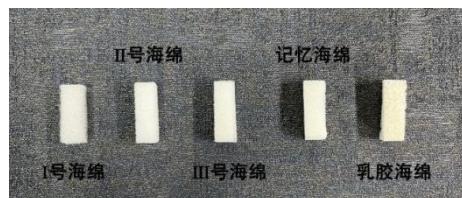


图 3.4 拉伸试样

(3) 实验过程与结果

材料单轴压缩实验仪器为 Instron 5943 电子万能材料试验机，载荷容量为 1KN，精度范围为 0.5%，实验速度范围 0.05-2500mm/min。实验前先进行预压试验，预压试样放置于下压盘正中部，对准上压头，调整参数使上压头以 30 mm/min 的速度均匀下降，试样压陷 70% 后以相同均匀速度卸载恢复原样，将上述的加载卸载过程重复两次，实验过程无明显错误则进行正式试验。正式压缩实验时按照预压流程，设置 30 mm/min 的速度和试样 70% 的压陷后卸载。单轴压缩情况如图 3.5 所示。按照同样的实验流程对乳胶海绵、I 号海绵、II 号海绵、III 号海绵、记忆海绵的 3 组试样分别进行单轴压缩实验并记录数据，分别测算 3 次单轴压缩平均值输出单轴压缩应力-应变数据曲线。



图 3.5 乳胶单轴压缩

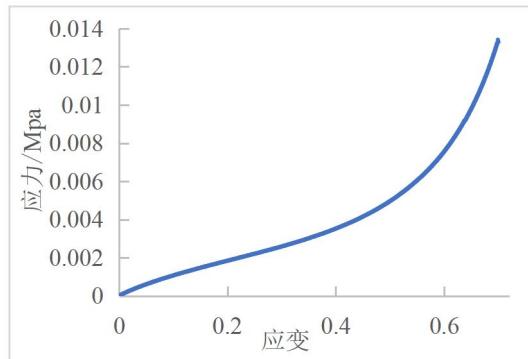


图 3.6 乳胶单轴压缩应力-应变曲线图

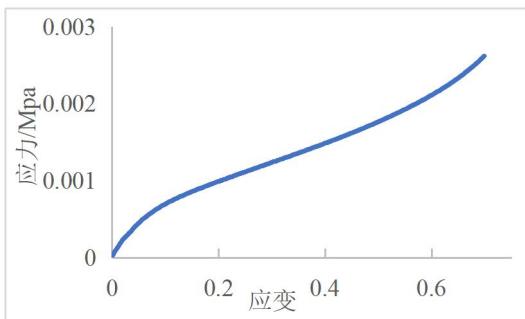


图 3.7 I号海绵单轴压缩应力-应变曲线图

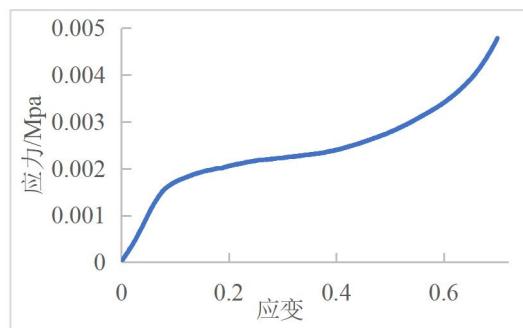


图 3.8 II号海绵单轴平均应力-应变曲线图

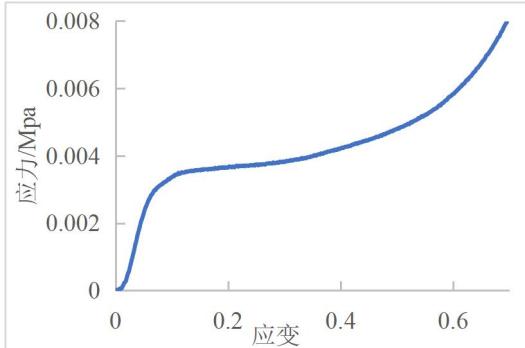


图 3.9 III号海绵单轴压缩应力-应变曲线图

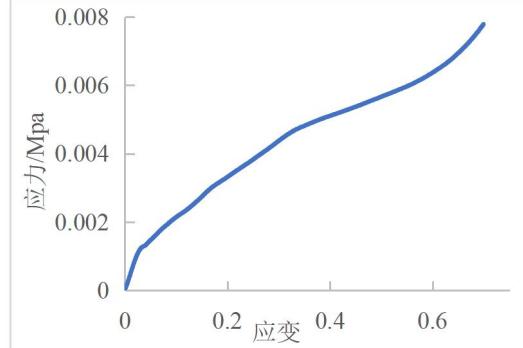


图 3.10 记忆海绵单轴压缩应力-应变曲线图

海绵材料在压缩性能方面具有高回弹性、压缩性、非线性等特点。将图 3.6-3.10 所示的单轴压缩应力应变数据汇总于图 3.11，可知海绵在压缩过程中经历了三个阶段：1、第一阶段“弹性变形阶段”（应变小于 5%），小于 5% 应变范围内海绵泡沫刚受到载荷作用，内部孔隙侧壁在压缩作用下发生较小的弹性形变，静刚度（定义为压缩水平下该阶段曲线的切线）保持相对恒定，应力与应变曲线成线性增加；2、第二阶段“屈服平台阶段”（应变为 5 %-45 %）此阶段应力随应变的变化很小，这是因为海绵泡沫体的微孔孔壁弹性屈曲，封闭气体应力和孔壁变形增加了平台的水平和坡度，静刚度小于线性期；3、第三阶段“致密阶段”（应变大

于45%），海绵体微孔被压扁，孔壁相互挤压而发生变形，海绵泡沫在应力作用下逐渐压实内部结构变得高度致密，造成局部刚度增加。

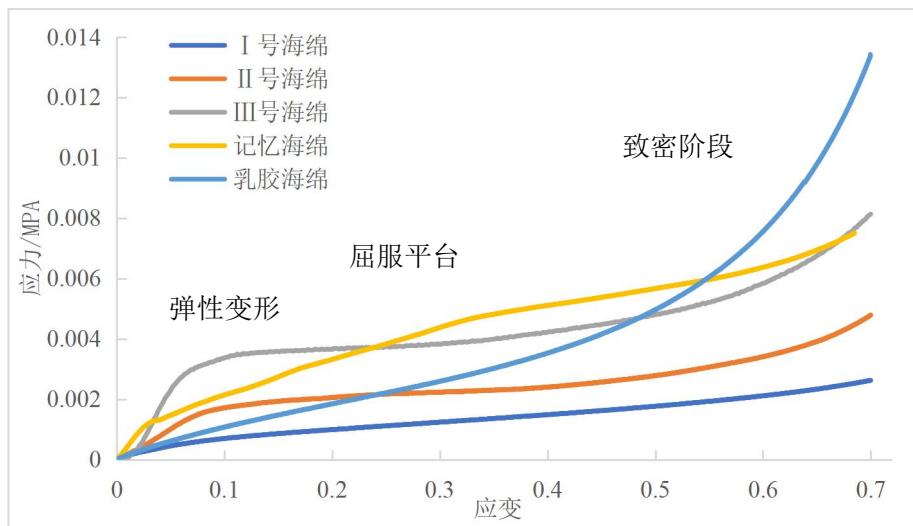


图 3.11 各密度海绵和记忆海绵的压缩应力应变图

3.2.2 单轴拉伸实验

拉伸试验是指在承受轴向拉伸载荷下测定材料特性的试验方法。利用拉伸试验得到的数据可以确定材料的弹性极限、伸长率、弹性模量、拉伸强度、屈服点、屈服强度和其它拉伸性能指标。材料单轴拉伸实验需要与单轴压缩实验经过相同的实验准备、试样制作。拉伸实验仪器依旧使用 Instron 5943 电子万能材料试验机，更换气动弧形拉伸夹具。拉伸实验中，将试样通过上下夹具固定，上夹具以 30 mm/min 的速度匀速向上拉伸。试样固定后，上下夹具的间距为 25 mm，通过上夹具的运动使得海绵试样产生拉伸效果，如图 3.12 所示。记录实验过程，输出拉伸强力和应力应变数据。分别对 5 款海绵试样进行拉伸实验。记录各组强力-伸长、拉伸应力-应变数据，计算平均应力-应变数据绘制出五款材料的单轴拉伸应力-应变曲线图，分别记录在图 3.13-3.17 中。



图 3.12 拉伸实验

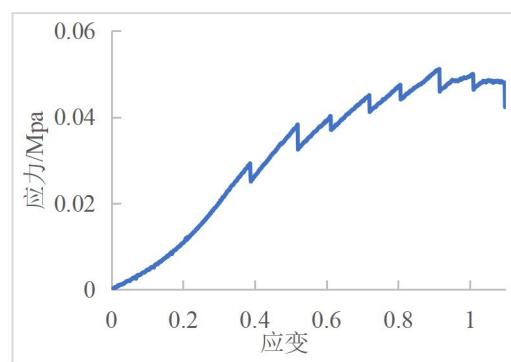


图 3.13 乳胶海绵拉伸应力-应变曲线图

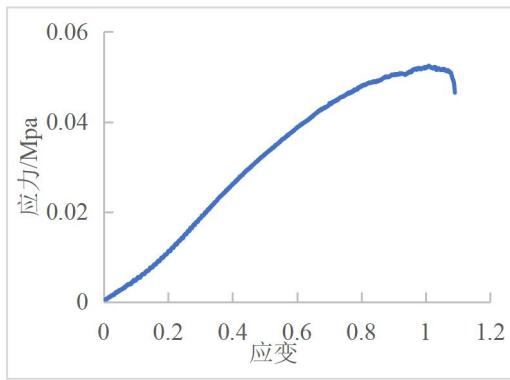


图 3.14 I 号海绵平均应力-应变曲线图

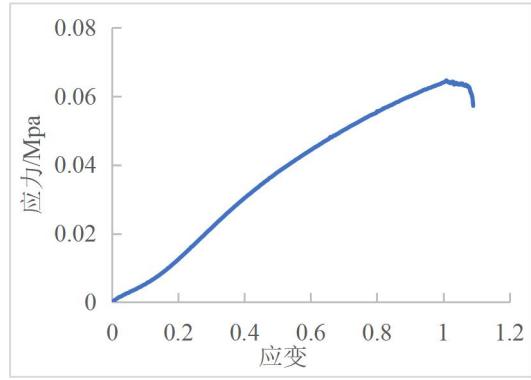


图 3.15 II 号绵平均应力-应变曲线图

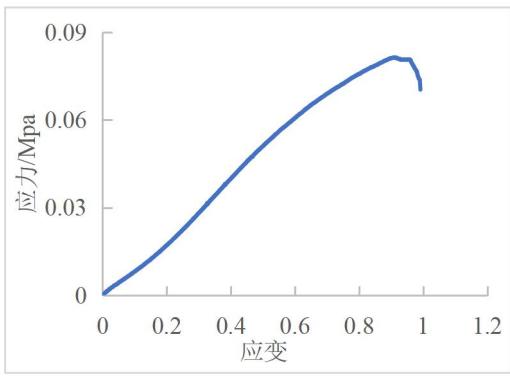


图 3.16 III 号海绵平均应力-应变曲线图

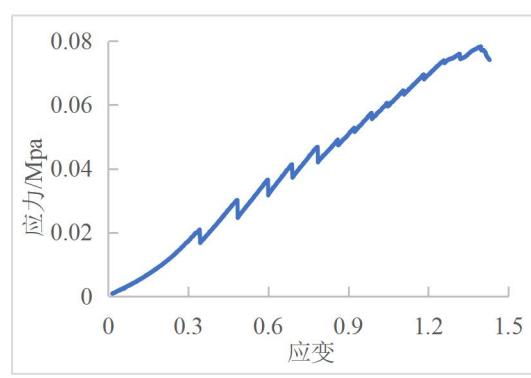


图 3.17 记忆海绵平均应力-应变曲线图

各海绵的单轴拉伸实验结果发现，记忆海绵和乳胶海绵由于具有较好的慢回弹性。能够通过拉伸应力松弛缓解表面所受压迫分散应力，在拉伸过程中会出现应力随应变增加波动增加。图 3.13-3.17 所记录的各材料的平均单轴拉伸的应力应变数据将作为有限元仿真中单轴拉伸的数据。

3.3 海绵压缩有限元仿真

查阅文献^{[63-67][78-85]}可知，海绵有限元仿真在 ABAQUS 中有多种方法，最主要的是超弹泡沫实验数据法 (Hyperfoam)、超弹泡沫模型参数法 (Hyperfoam)、低密度泡沫法 (Low density Foam) 等。本节将采用这 3 种常见的海绵仿真方法对各密度的海绵材料进行压缩仿真实验。其中超弹泡沫实验数据法 (Hyperfoam) 和低密度泡沫法 (Low density Foam) 是以单轴压缩和单轴拉伸实验的应力应变数据作为参数，而超弹泡沫模型参数法 (Hyperfoam) 则是以有限元仿真材料评估功能评估出来的模型评估参数进行仿真。

3.3.1 超弹性泡沫本构模型 (Hyperfoam)

ABAQUS 中使用的是应变势能 (U) (strain energy potential) 表达超弹性材料的应力-应变之间的关系^[79]。主要有 9 种常见的超弹性本构模型：包括 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、多项式模型、Yeoh 模型、Arruda-Boyce 模型、Ogden 模型、Marlow 模型、Van der Waals 模型和简缩多项式模型。在有限元分析中，选择合适的本构模型来描述聚氨酯泡沫的形变过程十分重要。ABAQUS 中主要有三种可以对海绵泡沫材料进行描述的本构模型。其中，超弹泡沫 (Hyperfoam)、低密度泡沫 (Low density foam) 两种本构模型可以用来模拟受力与卸载后能够恢复原状的海绵发泡材料^[80]。超弹泡沫 (Hyperfoam) 中的 Ogden 模型、Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型可以描述应变较大的软质材料。

Ogden 可压缩泡沫的超弹性材料模型函数最早是 1972 年由英格兰东安吉拉大学 (University of East Anglia) 的 Ogden 博士提出的，使用未知的函数 $f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 描述了体积应变的应变能，压缩函数的应变能则是：

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{\overrightarrow{\mu_i}}{\alpha_i} ((\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)) \quad (3-1)$$

式中， N 表示超弹性模型的阶数， α_i 和 $\overrightarrow{\mu_i}$ 是材料参数。

ABAQUS 中使用的材料模型采用的 storakers^[86] 改写后的模型，

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} ((\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + f(J)) \quad (3-2)$$

式中， λ_i 表示伸长率，且 $\lambda_i = 1 + \epsilon_i$ ， ϵ_i 表示应变； $f(J)$ 为体积应变能函数， J 为变形梯度。体积应变能函数如公式 3- (3) 所示：

$$f(J) = (1/\beta_i)(J^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \quad (3-3)$$

式中， β_i 为材料常数，其值根据试样材料的单轴实验、平面剪切及体积试验数据确定。

Hyperfoam 超弹泡沫材料模型可输入单轴拉伸或压缩、双轴拉伸或压缩、剪切数据等相关的材料试验数据，将 3.2.1 和 3.2.2 中的单轴压缩和单轴拉伸的应力应变实验数据作为超弹泡沫实验数据法 (Hyperfoam) 的本构模型实验参数。选择 Hyerelastion 材料行为对海绵材料的单轴压缩和单轴拉伸实验数据进行评估后得到的评估参数值可作为超弹泡沫模型参数法 (Hyperfoam) 的本构模型参数。

3.3.2 低密度泡沫本构模型（Low density foam）

低密度泡沫本构模型（Low density foam）适用于模拟受压时对应变率很敏感的弹性泡沫，如聚氨酯泡棉(polyurethane foam)^[78]。且只能用于 ABAQUS/Explicit 中。使用低密度泡沫本构模型需要同时输入试样的单轴拉伸和压缩试验数据。不同于 Hyperfoam，低密度泡沫本构模型（Low density foam）在不同应变率下的应力应变曲线允许有较大的变化。

3.4 海绵压缩仿真

进行海绵压缩仿真实验首先需要在 ABAQUS 中完成模型的组件：

第一步，建立部件模块（Part），选择“3D-Deformable（可变形）-Solid（实体）-Extrusion（拉伸）”的部件类型去创建海绵试样，试样规格 30 mm×30 mm×50 mm，采用“3D-Deformable（可变形）-Shell（壳体）-Extrusion（拉伸）”创建压缩压板，部件规格为 60 mm×60 mm，厚度为 1 mm。

第二步，创建部件材料（Property）。压板的材料 Material1 设置为钢材料数据，密度： 7.8×10^{-9} tonne/mm³、弹性模量：210000、泊松比：0.3。实验海绵体部件的材料 Material2 填入第二章中的各海绵试样密度，选择超弹性泡沫模型参数法并填入相应的评估参数、超弹性泡沫实验数据法和低密度泡沫本构模型法输入单轴压缩或单轴拉伸实验数据，实验参数和结果见 3.4.1-3.4.5。创建完两个材料属性后，通过 Assign Section 功能将两种材料赋予给相应部件。

第三步，装配部件（Assembly）。将创建好的海绵和压板部件按照压缩实验进行装配。

第四步，创建分析步（Step），选择动态（Dynamic）-显示（Explicit）的分析模式。后续分析结果变量选择应力（Stresses）、位移 Displacement、应变（Strain）。

第五步，创建接触与约束步（Interaction）。选择耦合的方式绑定约束，上、下压板与试样体，接触为硬接触，切向接触方式为“Penalty”，摩擦系数为 0.3。

第六步，创建载荷（Load）。设置下压板底面全约束，上压板向下移动 35mm。

第七步，网格划分（Mesh），乳胶泡沫的网格规格为 5 mm，类型为 8 节点六面体二次减缩积分单元，即 C3D8R；压板的网格规格为 10 mm，类型为四边形壳单元，即 S4R。

第八步，任务创建（Job），创建压缩任务，进行数据检查，提交运算。

第九步：后处理（Visualization），在视图模块中查看运算结果，绘制模拟实验的应力应变曲线。

3.4.1 I号海绵压缩仿真

I号海绵的压缩仿真实验首先在材料属性模块中选择 Hyerelastion 材料行为，添加单轴压缩的应力应变数据，采用材料评估功能（evaluate）对实验数据进行评估，分别评估本构模型为 Ogden 1 阶、Ogden 2 阶、Ogden 3 阶、 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、多项式模型、Yeoh 模型、Arruda-Boyce 模型、Marlow 模型、Van der Waals 模型参数的评估参数，所有评估参数结果汇集到表 3.2。将本构模型依次选择以上 10 种类型并填入评估参数进行压缩模拟实验，完成超弹性参数仿真实验后使用单轴压缩实验数据代替评估参数进行超弹性实验数据仿真。整理各本构模型参数仿真法和实验数据仿真法结果于表 3.2.

表 3.2 I 号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数数据	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
MOONEY-RIVLIN	评估参数 D1: 1574.29623 C10: 4.056076221E-04 C01: 5.471990814E-04	0.025	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 10 倍。
POLYNOMIAL N=2	实验应力应变数据 D1: 1381.16845 C10: -1.522208818E-03 C01: 2.608245791E-03 C02: 1.929240768E-02 C20: 9.761524145E-03 C11: -2.678141872E-02	0.024723	运算顺利完成但是仿真结果与实验结果相差 100 倍。
Ogden N=1	评估参数 MU_I: 1.842492659E-03 ALPHA_I: 0.785903660 D_I: 1628.22901	1.82107	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 6 倍。
Ogden N=2	实验应力应变数据 MU_I: 1.323805104E-07 ALPHA_I: 22.6280250 D_I: 1415.29040 MU_II: 2.119573943E-03 ALPHA_II: -3.08622327	1.82097 0.000482386	仿真结果与实验结果误差较大，ogden2 阶的参数仿真与实验数据仿真相差较大。

表 3.2 续 I 号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数数据	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
Ogden N=2	实验应力应变数据 评估参数 MU_I: -5.332467024E-07 ALPHA_I: 14.3335121 D_I: 1416.92026	0.0623413	
Ogden N=3	MU_II: 2.290743283E-07 ALPHA_II: 21.6451824 MU_III: 2.117572220E-03 ALPHA_III: -3.01231036	0.0598178	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 20 倍。
Neo Hooke	评估参数 D1: 1848.92358 C10: 8.112828540E-04	0.0598202 0.00523	模型挤压无规则形变,且参数仿真与实验数据仿真相差较大。
Yeoh	评估参数 D1: 1541.65243 C10: 9.729819582E-04 C20: -4.954071427E-04 C30: 3.146750738E-04	0.0119593 0.033042	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 15 倍。
ARRUDA-BOYCE	评估参数 MU: 1.622565337E-03 MU_0: 1.622565882E-03 LAMBDA_M: 1336.13593 D: 1848.92338	0.0330294 0.0119769	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 5 倍。
VAN DER WAALS	评估参数 MU: 2.168760424E-03 LAMBDA_M: 2.55088142 A: 1.86769266	0.0119752 0.0279442	运算顺利但是仿真结果与实验结果相差 10 倍。
MARLOW	实验应力应变数据 实验应力应变数据	0.0267006 0.017144	应力应变曲线没有屈服平台期,且数据误差大。

表3.2中的评估参数是通过 Hyerelastion 材料行为评估I号海绵单轴压缩和单轴拉伸的实验数据后，得到的本构模型评估参数值。填入超弹泡沫模型参数法(Hyperfoam)的本构模型中进行仿真。结合I号海绵单轴压缩的应力应变数据可知，材料发生70%形变时应力为0.00262Mpa，表中各超弹性(Hyperfoam)本构模型与材料单轴压缩应力数值相差5-20倍，以上本构模型的拟合不合适。

因此更改为低密度泡沫本构模型进行仿真实验，其他仿真步骤不变，将实验数据与仿真结果绘制曲线图，如图3.18所示。

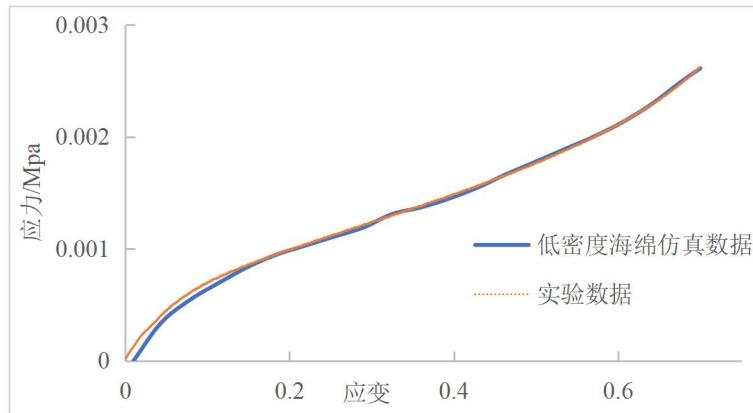


图3.18 低密度泡沫本构模型下压缩仿真结果与实验值比较图

由图3.18可知，对比低密度泡沫本构模型仿真与实验值应力-应变曲线，在应变大于0.18时基本吻合。当应力小于0.18时，仿真应力稍大于实验值。应变为5%时，相对误差最大，为0.00007MPa，百分比是0.016，决定系数为R²=0.9997。证明低密度泡沫本构模型仿真法较其他几种仿真模型更适合模拟I号海绵的压缩行为。

采用低密度泡沫本构模型仿真法进行仿真实验时，海绵块被均匀下压，没有外溢和其他明显变形现象。且仿真模拟的最大应力值是0.00263MPa。

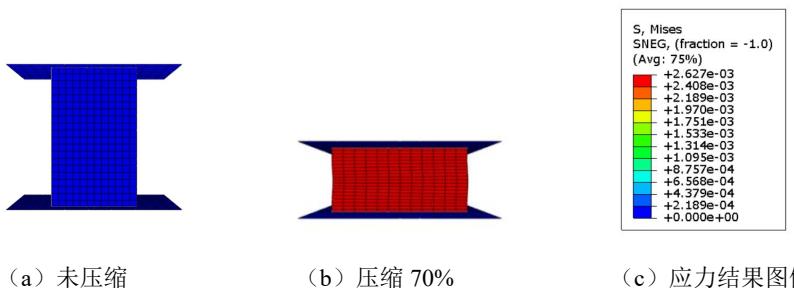


图3.19 低密度泡沫法仿真

3.4.2 II号海绵压缩仿真

II号海绵的仿真流程与I号海绵仿真流程一样。输入II号海绵单轴压缩数据进行参数评估和仿真实验。将仿真结果汇总于表3.3中。

表 3.3 II号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数数据	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
MOONEY-RI VLIN	评估参数 C10:-1.172091773E-03 C01:3.870598297E-03	0.1148	应力应变数据不拟合。且数值过大。
POLYNOMIAL N=2	评估参数 C10: 5.646651089E-03 C01:-2.399185130E-03 C02: -7.731633046E-02 C20: -2.746198091E-02 C11:9.014682364E-02	实验应力应变数据 0.1148 计算失败	模型计算中出现压缩破坏。实验数据拟合结果与物理实验数据不拟合。且数值过大。
Ogden N=1	评估参数 MU_I: 4.646497779E-03 ALPHA_I: -3.55387293	0.1759	拟合结果与物理实验数据不拟合。且数值过大。
Ogden N=2	评估参数 MU_I : -7.443414850E-02 ALPHA_I : -1.42337715 MU_II : 8.243871708E-02 ALPHA_II : -2.68763609	实验应力应变数据 0.1759 0.9540	拟合结果与物理实验数据不拟合。且数值过大。
Ogden N=3	评估参数 MU_I: -0.337514474 ALPHA_I: 2.00004863 MU_II: 0.140126519 ALPHA_II: 2.84641444 MU_III: 0.204651324 ALPHA_III: 1.04747970	实验应力应变数据 0.9540 0.1461	拟合结果与物理实验数据不拟合，且数值过大。
Neo Hooke	评估值 C10: 1.577700020E-03	0.0234	拟合结果与物理实验数据不拟合，且数值过大。
	实验应力应变数据	0.0234	

表 3.3 续 II号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70%的应力 Mpa	结果分析
Yeoh	C10:2.682633160E-03		仿真数据与物理实验数据不拟合, 且数值过大。
	C20: -2.434162129E-03	0.1004	
	C30:1.324455789E-03		
实验应力应变数据			
ARRUDA-BOYCE	MU: 3.155399611E-03	0.0234	仿真数据与物理实验数据不拟合, 且数值大于 5 倍。
	LAMBDA_M: 1773.89871		
	实验应力应变数据	0.0234	
VAN DER WAALS	MU: 6.819850211E-03	0.0967	仿真数据与物理实验数据不拟合, 且数值大于 10 倍。
	LAMBDA_M: 2.45107473		
	A: 2.63151231		
实验应力应变数据			
MARLOW	实验应力应变数据	0.0605	数据不拟合。

II号海绵单轴压缩发生 70%形变时应力为 0.00479Mpa, 表 3.3 中各超弹性本构(Hyperfoam)模型与材料的压缩应力相差 5-100 倍, 以上本构模型的拟合不合适。因此更改为低密度泡沫本构模型进行仿真实验, 其他仿真步骤不变, 将实验数据与仿真结果绘制曲线图, 如图 3.20 所示。

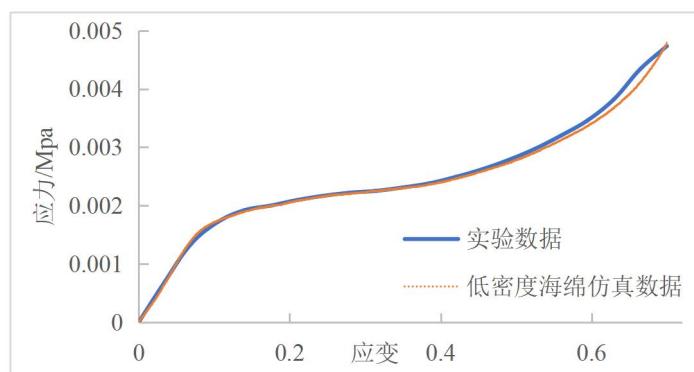


图 3.20 低密度泡沫本构模型下压缩仿真结果与实验值比较图

由图 3.20 可知, 低密度泡沫本构模型仿真与实验数据在应变小于 0.5 时基本吻合。当应力大于 0.5 时, 仿真中的应力与压缩实验值稍有误差。应变为 66%时, 相对误差最大, 误差为 0.000222Mpa, 百分比是 5.4%, 计算决定系数 $R^2=0.9988$ 。证

明低密度泡沫仿真方式较其他几种仿真模型更适合模拟II号海绵的压缩行为。采用低密度泡沫法进行仿真实验时，结果如图 3.21 所示。

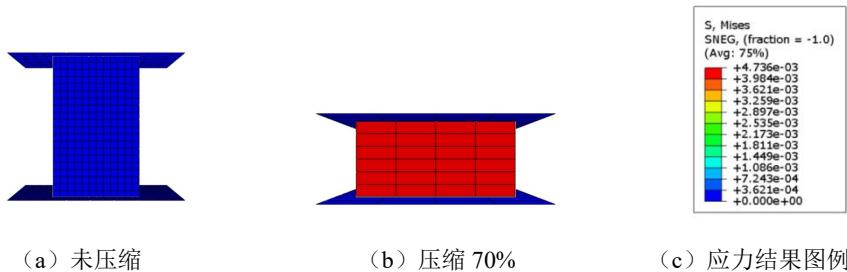


图 3.21 低密度泡沫法仿真

3.4.3 III 号海绵压缩仿真

III号海绵的仿真流程与I号海绵仿真流程一样。输入III号海绵单轴压缩数据进行参数评估和仿真实验。将仿真结果汇总于表 3.4 中。

表 3.4 III号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
MOONEY-RI	评估参数	C10:5.178098382E-03 C01: -3.864871792E-03	计算失败
VLIN	评估参数	实验应力应变数据 C10:0.117974425 C01: -0.117959007 C02: -0.633006273 C20: -0.227898703 C11:0.724754246	计算失败 计算失败 不符合实际。
POLYNOMIAL N=2	评估参数	实验应力应变数据 MU_I: 3.346414447E-03 ALPHA_I: 4.01626859	计算失败 0.0309 计算结果与实际相差 40 倍左右。
Ogden N=1	评估参数	实验应力应变数据 MU_I : 2.003663216E-02 ALPHA_I : 1.58366497	0.0309 计算失败 模型破坏
Ogden N=2	评估参数	MU_II : -1.837426369E-02 ALPHA_II : -7.04046469	

表 3.4 续 III号海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70%的应力 Mpa	结果分析
Ogden N=2	实验应力应变数据	计算失败	
Ogden N=3	评估参数 MU_I: 3.628084438E-02 ALPHA_I: 1.55924338 MU_II: -1.608075234E-02 ALPHA_II: 1.56466502 MU_III: -1.853728748E-02 ALPHA_III: -6.99048096	计算失败	模型被破坏
Neo Hooke	实验应力应变数据 C10: 2.166033948E-03	计算失败 0.0311	
Yeoh	评估参数 C10: 1.530578247E-03 C20: 1.799111042E-03 C30: -9.554657897E-04	实验应力应变数据 0.03207	模型型变严重
ARRUDA-BOYCE	评估参数 MU: 1.518244305E-03 MU_0: 3.626869260E-03 LAMBDA_M: 1.11964161	计算失败 计算失败	模型计算失败， 单元型变量太大 不符合实际。
VAN DER WAALS	评估参数 MU: 1.11964161 LAMBDA_M: 169.708950 A: -1.46146392	实验应力应变数据 0.0624	模拟结果与实际 结果相差 10 倍， 误差较大。
MARLOW	实验应力应变数据	0.0633	

结合III号海绵单轴压缩的应力应变数据可知，材料发生 70%形变时应力为 0.00813Mpa，表 3.4 中各超弹性本构（Hyperfoam）模型与材料的压缩应力应变数据误差在 10-40 倍之间或计算失败，以上本构模型的拟合不合适。更改为低密度泡

沫本构模型进行仿真实验，其他仿真步骤不变，实验数据与仿真结果绘制曲线图，如图 3.22 所示。

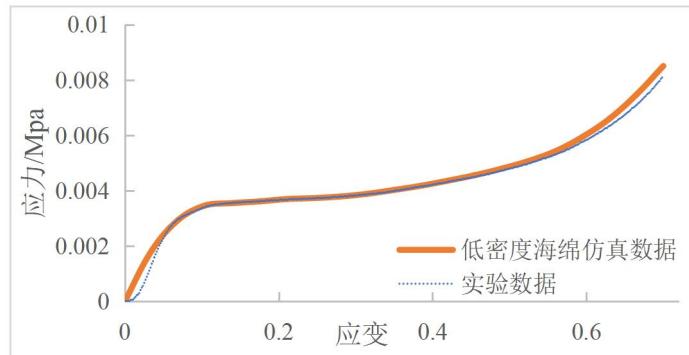


图 3.22 低密度泡沫本构模型下压缩仿真结果与实验值比较图

由图 3.22 可知，低密度泡沫本构模型仿真与单轴压缩实验值在应变 0.1 到 0.6 时基本吻合。当应变小于 0.1 和大于 0.6 时，仿真应力稍大于实验数据。应变为 3.5% 时，相对误差最大，误差为 0.00049MPa，百分比 3.4%，决定系数 $R^2=0.9985$ 。证明低密度泡沫仿真方式更适合模拟III号海绵的压缩行为。仿真过程如图 3.23 所示。

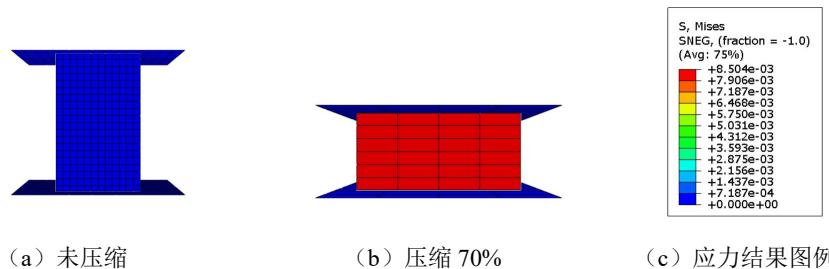


图 3.23 低密度泡沫法仿真

3.4.4 记忆海绵压缩仿真

记忆海绵的仿真流程与I号海绵仿真流程一样。输入记忆海绵单轴压缩数据进行参数评估和仿真实验。将仿真结果汇总于表 3.5 中。

表 3.5 记忆海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70% 的应力 MPa	结果分析
MOONEY-RIV	D1: 344.233144		
LIN	C10:-4.626286250E-04 C01: 4.820140461E-03	0.157274	海绵外溢型压缩变形
	实验应力应变数据	0.15727	

表 3.5 续 记忆海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70%的应力 Mpa	结果分析
POLYNOMIAL N=2	评估参数 D1: 196.499266 C10:-5.628254952E-02 C01: 6.391616581E-02 C02: 0.231386498 C20: 8.361786648E-02 C11: -0.261980172 实验应力应变数据	24.1755	
Ogden N=1	评估值 MU_I: 8.676727718E-03 ALPHA_I: -4.07850550 D_I: 345.752465 实验应力应变数据	0.443841	
Ogden N=2	评估参数 MU_I : -6.791605525E-03 ALPHA_I : 6.93298910 D_I : 220.639994 MU_II : 2.038841518E-02 ALPHA_II : -12.4566166 实验应力应变数据	83.824	
Ogden N=3	评估参数 MU_I: -1.161590658E-02 ALPHA_I: 12.3624274 MU_II: 5.960381404E-03 ALPHA_II: 4.99095427 MU_III: 2.155351253E-02 ALPHA_III: -24.9919653 实验应力应变数据	计算失败	仿真结果与实验结果相差较大，相差均在10倍以上，仿真实验不合适。
Neo Hooke	评估值 D1: 497.848636 C10:3.012963964E-03 实验应力应变数据	0.0446277	
Yeoh	评估值 D1: 368.804610 C10: 4.067194276E-03 C20: -2.238148610E-03	0.0978082	

表 3.5 续 记忆海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
Yeoh	实验应力应变数据 评估参数 MU: 6.025927093E-03 MU_0: 6.025928274E-03 LAMBDA_M: 1749.77872 D: 497.848607	0.0978071	
ARRUDA-BOYCE	实验应力应变数据 评估参数 MU: 9.769418396E-03 LAMBDA_M: 2.63234582	0.0444945	
VAN DER WAALS	A: 2.02826847 D1: 1.13966789	0.0823538	仿真结果与实验结果相差较大，相差均在 10 倍以上，仿真实验不合适。
MARLOW	实验应力应变数据	0.0823553	
	实验应力应变数据	0.0830621	

结合记忆海绵单轴压缩的应力应变数据可知，材料 70% 形变时应力为 0.00779Mpa，表 3.5 中各超弹性本构（Hyperfoam）模型与材料的单轴压缩数据误差在 10 倍以上，因此以上本构模型的拟合不合适。更改为低密度泡沫本构模型进行仿真实验，其他仿真步骤不变，将实验数据与仿真结果绘制曲线图，如图 3.24 所示。

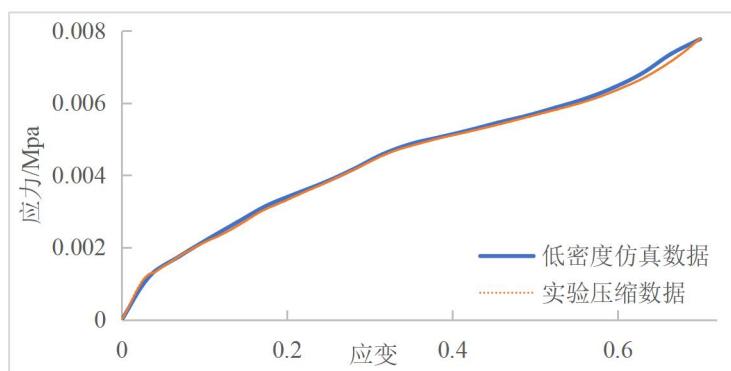


图 3.24 低密度泡沫本构模型下压缩仿真结果与实验值比较图

由图 3.24 可知，低密度泡沫本构模型仿真与实验值应力-应变曲线，在应变小于 0.6 时基本吻合。当应力大于 0.6 时，仿真中的应力稍大于实验数据。应变为 0.65 时，相对误差最大，误差为 0.000071Mpa，百分比是 16%，计算决定系数 $R^2=0.9997$ 。证明低密度泡沫仿真方式更适合模拟记忆海绵的压缩行为。采用低密度泡沫本构模型仿真法进行仿真实验时，结果如图 3.25 所示。

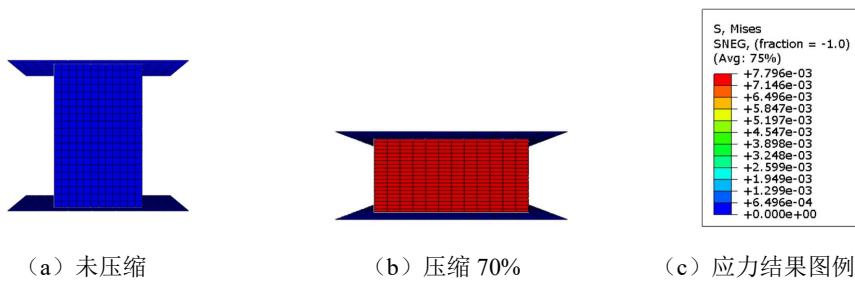


图 3.25 低密度泡沫法仿真

3.4.5 乳胶海绵压缩仿真

乳胶海绵的仿真流程与I号海绵仿真流程一样。输入乳胶海绵单轴压缩数据进行参数评估和仿真实验。将仿真结果汇总于表 3.6 中。

表 3.6 乳胶海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70% 的应力 Mpa	结果分析
MOONEY-RI VLIN	评估参数 C10: 3.817278221E-03 C01: -2.186706672E-03	计算失败	
POLYNOMIA L N=2	评估参数 实验应力应变数据 C10: -1.087190949E-02 C01: 1.349853345E-02 C02: 0.100561556 C20: 5.057715255E-02 C11: -0.137265046	计算失败	计算过程中模型被破坏，无法进行运算。
Ogden N=1	评估参数 实验应力应变数据 MU_I: 3.227553349E-03 ALPHA_I: 4.31207532	0.04185	
Ogden N=2	评估参数 实验应力应变数据 MU_I 5.520031408E-06 ALPHA_I : 18.6792248 MU_II 4.780668842E-03 ALPHA_II : -8.47869275	0.04185 计算失败	

表 3.6 续 乳胶海绵超弹性泡沫本构模型仿真表

材料本构模型	参数	压缩 70%的应力 Mpa	结果分析
Ogden N=3 参数 评 估	MU_I: -1.816125221E-02		计算过程中模型被破坏, 无法进行运算。
	ALPHA_I: 13.1292988		
	MU_II: 1.786062914E-02	计算失败	
	ALPHA_II: 13.1680802		
	MU_III: 5.374406847E-03		
Neo Hooke 实验应力应变数据	ALPHA_III: -11.5108052		
	C10: 2.102289858E-03	0.02786	海绵压缩外溢
	实验应力应变数据	0.02786	
Yeoh 值 评 估	C10: 2.064971155E-03	计算失败	
	C20: -9.844802215E-04		
	C30: 1.386614561E-03		
VAN DER WAALS 值 评 估	实验应力应变数据	计算失败	
	MU: 4.549272166E-03	计算失败	计算过程中模型被破坏, 无法进行运算。
	LAMBDA_M: 2.24139789		
MARLOW 实验应力应变数据	A: 2.09225823		
	实验应力应变数据	计算失败	
	实验应力应变数据	计算失败	

结合乳胶海绵压缩的应力应变数据可知, 材料发生 70% 形变时应力为 0.01342Mpa, 表 3.6 中各超弹性 (Hyperfoam) 本构模型与材料单轴压缩数据相差 2-3 倍且失败较多, 因此以上本构模型的拟合不合适。更改为低密度泡沫本构模型进行仿真实验, 其他仿真步骤不变。将实验数据与仿真结果绘制曲线图, 如图 3.26。

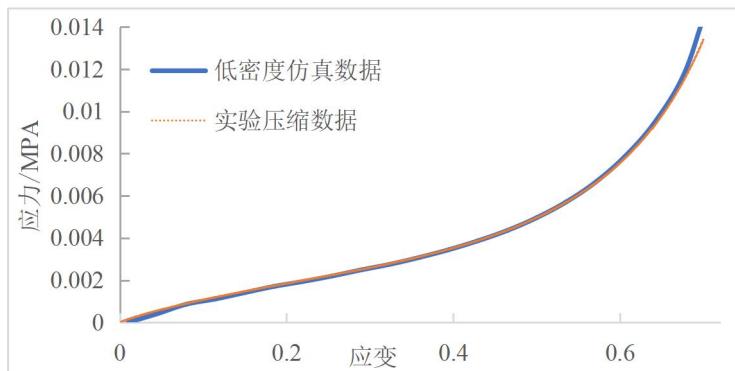


图 3.26 低密度泡沫压缩仿真结果与实验值比较图

由图 3.26 可知，低密度泡沫本构模型仿真与乳胶海绵单轴压缩实验值在应变小于 0.7 时基本吻合。应变为 0.7 时，相对误差最大，误差为 0.001009mpa，百分比是 0.07，计算决定系数 $R^2=0.9975$ 。证明低密度泡沫仿真方式较其他几种仿真模型更适合模拟乳胶海绵的压缩行为。采用低密度泡沫法进行仿真实验时，结果如图 3.27 所示。

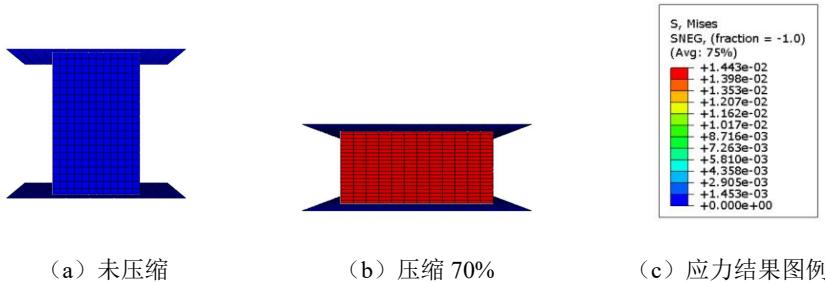


图 3.27 低密度泡沫法仿真

3.5 材料泡沫微元形变量仿真

3.5.1 乳胶海绵微元形变量仿真

本节选择乳胶材料进行乳胶泡沫微元应力、形变量、厚度三者关系进行研究，建立不同厚度与应力的微元仿真模型。探究一定厚度下，不同应力值与形变量的关系和一定应力值下，不同厚度与形变量之间的关系。目的在于为后续产品反求提供乳胶泡沫应力、形变量和厚度的数学关系式。

首先在 Abaqus 中分别建立横截面尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，厚度尺寸以 10mm 为厚度步长建立 10mm 至 80mm 的 8 个实体长方体乳胶部件，应力设置以 0.001Mpa 为步长从 0.005 至 0.015Mpa 。其余操作同 3.4 所示，网格尺寸为 1mm ，约束除垂直方向外的其他方向自由度。如图 3.28 所示为 30mm 厚度和 0.01Mpa 的泡沫微元仿真的应力值和形变量。

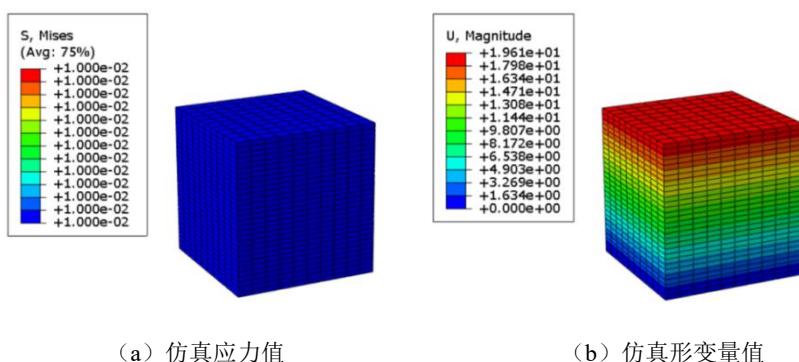


图 3.28 30mm 厚度乳胶微元仿真结果

查阅文献可知，仿真计算中模型的动能与势能的比值保持在10%以内来评价模拟过程是否产生了正确的准静态效应^[79~87]。图3.29是该仿真模型的动能和势能比值，仿真结果显示动能和势能比值小于10%，且最后能量趋于平衡，证明仿真模型是正确的。

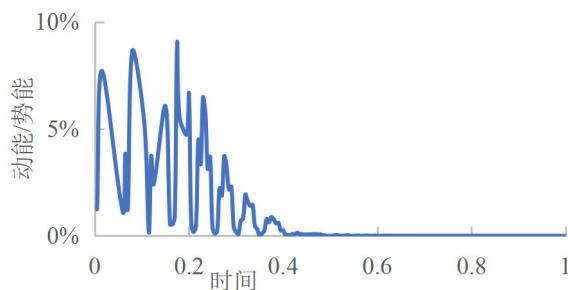


图3.29 乳胶微元仿真动势能比值

本文分析6个厚度微元仿真模型结果，分别在厚度一定和应力值一定的情况下，绘制形变量与应力值和厚度的关系图，如图3.30和图3.31所示。将两者关系进行数字关系拟合，将拟合程度较高的关系系数汇总于表3.7和表3.8中。

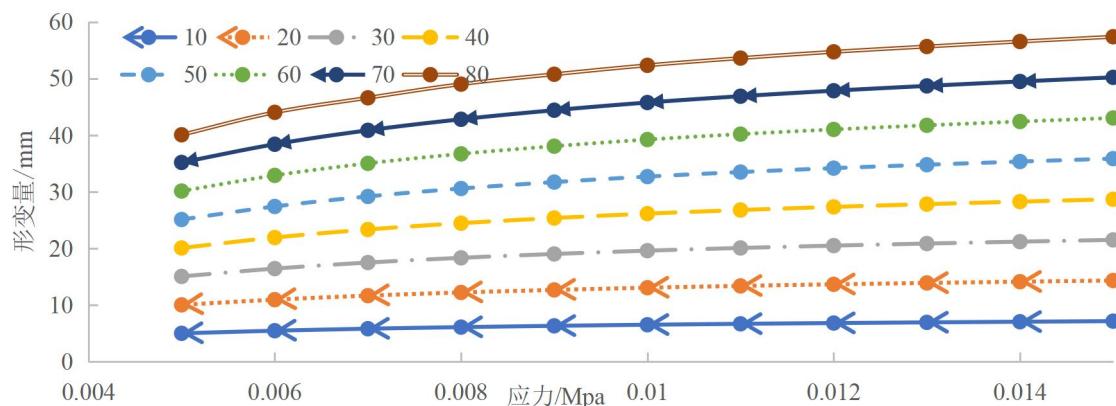


图3.30 乳胶变形量与应力的非线性关系

表3.7 乳胶变形量与应力的多项式拟合结果

厚度/mm	a	b	c	d	R^2
10	2E+06	- 69197	1038.5	1.3563	0.9998
20	3E+06	- 138403	2077.1	2.7124	0.9998
30	5E+06	- 207585	3115.5	4.0691	0.9998
40	7E+06	- 276784	4154.1	5.4253	0.9998
50	9E+06	- 346017	5193	6.7805	0.9998

表 3.7 续 乳胶变形量与应力的多项式拟合结果

厚度/mm	a	b	c	d	R^2
60	1E+07	- 414744	6226.2	8.1562	0.9998
70	1E+07	- 477916	7198.7	9.7425	0.9998
80	1E+07	- 572560	8510.4	10.199	0.9996

注: 表中乳胶泡沫变形量拟合公式模型为 $h=a \times x^3 + b \times x^2 + c \times x + d$, 其中 h 为变形量, x 为厚度, a 、 b 、 c 系数, d 为常量。

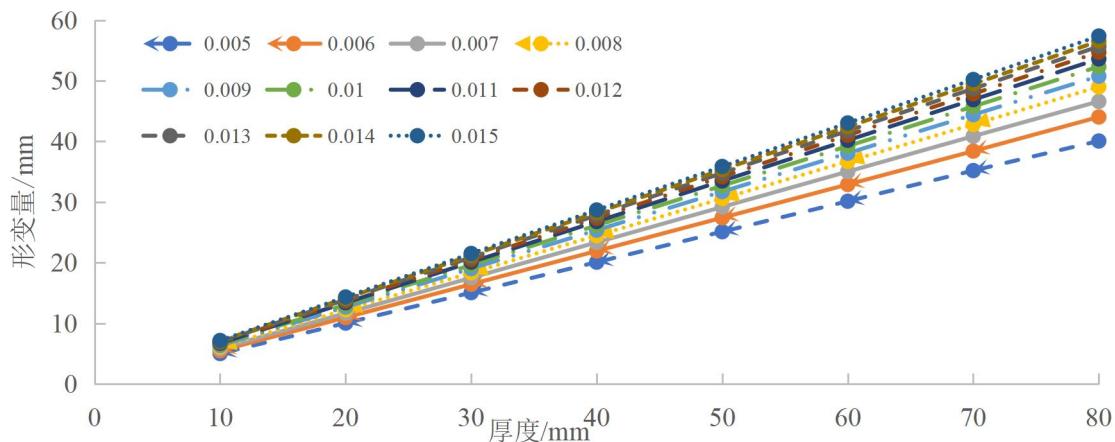


图 3.31 乳胶变形量与厚度的线性关系

表 3.8 乳胶变形量与厚度的线性拟合结果

应力/MPa	a	b	R^2
0.005	0.5015	0.0226	1
0.006	0.5498	- 0.0437	1
0.007	0.5829	0.0258	1
0.008	0.6122	- 0.0165	1
0.008	0.6344	- 0.0026	1
0.010	0.654	- 0.0068	1
0.011	0.6699	- 0.006	1
0.012	0.6838	- 0.0057	1
0.013	0.6956	0.0015	1
0.014	0.7067	0.004	1
0.015	0.7172	0.0018	1

注：表中乳胶泡沫变形量拟合公式模型为 $h=a \times x+b$ ，其中 h 为变形量， x 为厚度， a 为系数， b 为常量。

通过上述图 3.30、图 3.31 和表 3.7、3.8 结果显示，当乳胶泡沫表面应力值一定时，随着乳胶泡沫厚度的增加形变量增大，两者呈现明显的线性关系。当乳胶泡沫厚度一定时，随着表面施加应力值增加形变量增加，两者之间呈现非线性关系。根据要素间的两两关系，需要探求三者间的数学模型。本文将数据通过软件 MATLAB 中进行数字模型拟合。设置 x 为厚度， y 为应力， $f(x, y)$ 为变形量，经过多次拟合调整 R^2 ，选择拟合程度最好的二元三次拟合，公式如（3-4）所示。 R^2 值为 0.9999，RMSE 值为 0.1146。并将曲面拟合原理进行的三次多项式拟合仿真数据在三维空间中显示，分布情况如图 3.32 所示。

$$f(x, y) = -6.376 + 0.2763x + 2192y + 55.49xy - (2.335e+05) y^2 - 1764xy^2 + (7.799e+06) y^3 \quad (3-4)$$

其中 $f(x, y)$ 为乳胶泡沫变形量， x 为厚度， y 为应力值，单位 MPa。

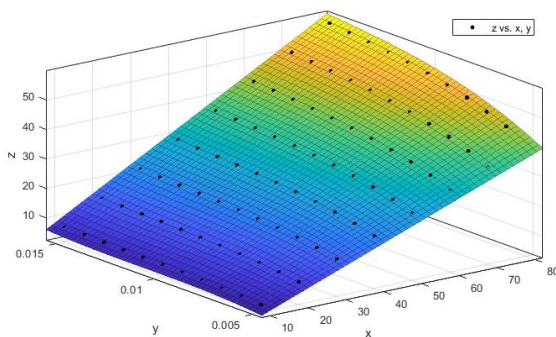


图 3.32 乳胶变形量、厚度与应力之间的非线性关系

3.5.2 记忆海绵微元形变量仿真

本节按照乳胶材料的泡沫微元应力、形变量、厚度三者研究过程，探究记忆海绵一定厚度下，不同应力值与形变量的关系和一定应力值下，不同厚度与形变量之间的关系。

在 Abaqus 中分别建立横截面尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，厚度尺寸以 10mm 为厚度步长建立 10mm 至 80mm 的 8 个实体长方体乳胶部件，应力设置以 0.001Mpa 为步长从 0.005 至 0.014Mpa 。其余操作同 3.5.1 所示，仅改变材料属性中记忆海绵的材料拉伸与压缩的实验参数数据。网格尺寸为 1mm ，约束除垂直方向外的其他方向自由度。

图 3.33 是该仿真模型输出的动能和势能比值，仿真结果显示动能和势能比值小于 10%，且最后能量趋于平衡，证明仿真模型是正确的。

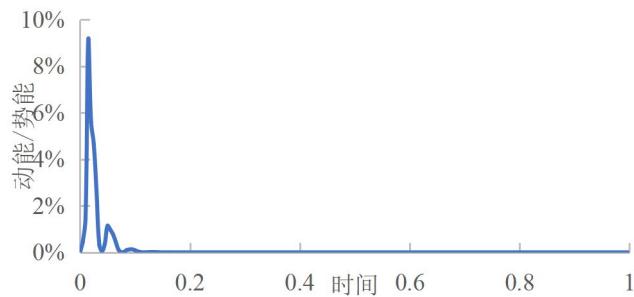


图 3.33 记忆海绵微元仿真动势能比值

本文分析 6 个厚度微元仿真模型结果，分别将厚度一定和应力值一定的情况下，绘制形变量与应力值和厚度的关系图，如图 3.34 和图 3.35 所示。将两者关系进行数字关系拟合，将拟合程度较高的关系系数汇总于表 3.9 和表 3.10 中。

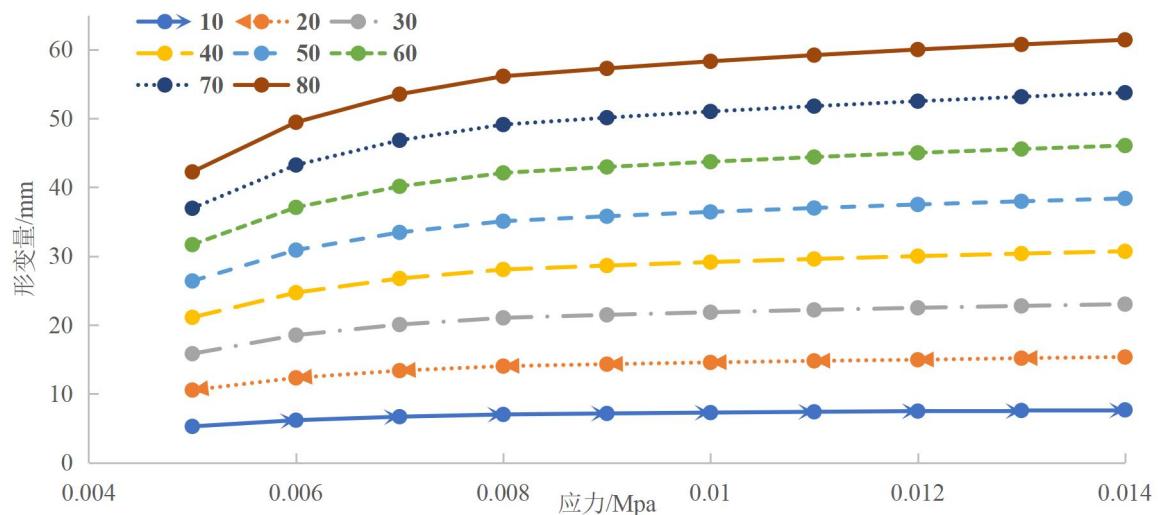


图 3.34 记忆海绵变形量与应力的非线性关系

表 3.9 记忆海绵变形量与应力的多项式拟合结果

厚度/mm	a	b	c	d	R^2
10	8E+06	-254483	2886.5	-3.6892	0.9956
20	2E+07	-515469	5831.5	-7.5501	0.9963
30	2E+07	-763129	8657.1	11.064	0.9957
40	3E+07	-1E+06	11537	-14.742	0.9957

表 3.9 续 记忆海绵变形量与应力的多项式拟合结果

厚度/mm	a	b	c	d	R^2
50	4E+07	-1E+06	14424	-18.432	0.9957
60	5E+07	-2E+06	17321	-22.14	0.9956
70	5E+07	-2E+06	20197	-25.819	0.9958
80	6E+07	-2E+06	23075	-29.465	0.9956

注: 表中记忆海绵泡沫变形量拟合公式模型为 $h=a \times x^3 + b \times x^2 + c \times x + d$, 其中 h 为变形量, x 为厚度, a 、 b 、 c 系数, d 为常量。

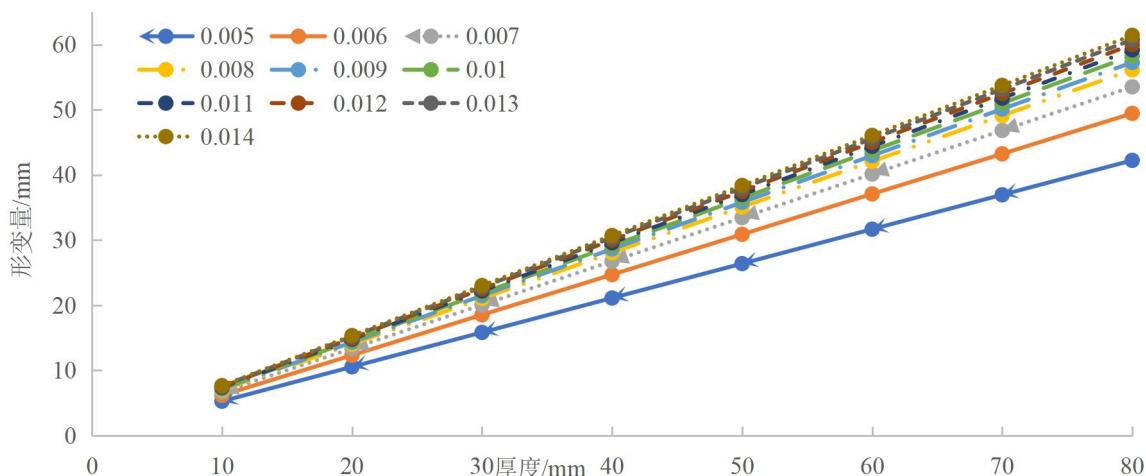


图 3.35 记忆海绵变形量与厚度的线性关系

表 3.10 记忆海绵变形量与厚度的线性拟合结果

应力/MPa	a	b	R^2
0.005	0.7679	4E-05	1
0.006	0.7594	0.0001	1
0.007	0.7505	-0.01861	1
0.008	0.74	0.0005	1
0.008	0.7288	-0.0041	1
0.010	0.716	0.0014	1
0.011	0.7017	-0.0009	1
0.012	0.6691	0.0009	1
0.013	0.6182	-0.0129	1
0.014	0.528	-0.0011	1

注：表中记忆海绵泡沫变形量拟合公式模型为 $h=a \times x + b$ ，其中 h 为变形量， x 为厚度， a 为系数， b 为常量。

通过上述的图 3.34、图 3.35 和表 3.9、3.10 结果显示，当记忆海绵泡沫表面应力值一定时，随着海绵泡沫厚度的增加形变量增大，两者呈现明显的线性关系。当泡沫厚度一定时，随着表面施加应力值增加形变量增加，两者之间呈现非线性关系。将数据通过软件 MATLAB 中进行数字模型拟合，设置 x 为厚度， y 为应力， $f(x, y)$ 为变形量，进行三者关系的二元三次方程拟合，公式如（3-5）所示。 R^2 值为 0.9994，RMSE 值为 0.4041。并将拟合曲面在三维空间中显示，分布情况如图 3.36 所示。

$$f(x, y) = -23.6 + 0.1775x + 8770y + 93.8xy - (9.76e+05) y^2 - 3763xy^2 + (3.424e+07) y^3 \quad (3-5)$$

其中 $f(x, y)$ 为记忆海绵泡沫变形量， x 为厚度， y 为应力值，单位 MPa。

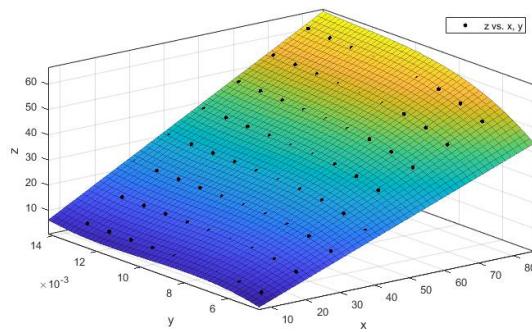


图 3.36 记忆海绵变形量、厚度与应力之间的非线性关系

3.6 小结

本章选择 I 号 II 号 III 号三种海绵、记忆海绵和乳胶海绵进行了海绵材料密度测算、并根据国家标准进行物理压缩性能和拉伸实验，获得应力应变曲线。将实验结果输入 ABAQUS 中进行材料拟合的三维仿真实验。

(1) 仿真实验选择超弹性泡沫本构模型法中的 Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、多项式模型、Yeoh 模型、Arruda-Boyce 模型、Ogden 模型、Marlow 模型、Van der Waals 模型和低密度泡沫本构模型法进行，仿真实验结果显示低密度泡沫本构模型法最符合 5 种海绵材料的压缩性能。其中 I 海绵仿真最大误差为 0.016， $R^2=0.9997$ 。II 号海绵仿真最大误差是 0.054，计算决定系数 $R^2=0.9988$ 。III 号海绵仿真最大误差是 0.034，计算决定系数 $R^2=0.9985$ 。记忆海绵

仿真最大误差是 0.029，计算决定系数 $R^2=0.9995$ 。乳胶海绵仿真最大误差是 0.07，计算决定系数 $R^2=0.9975$ 。

(2) 本节对乳胶泡沫和记忆海绵微元进行了应力、形变量、厚度三者之间数学关系的研究，建立 8 种厚度，11 种应力值的微元仿真模型。仿真结果显示：当海绵泡沫表面应力值为定值时，形变量随乳胶泡沫厚度的增加而增大，两者呈现明显的线性关系。当海绵泡沫厚度为定值时，形变量随表面施加应力值增加而增加，两者之间呈现非线性关系。

(3) 实验最后通过 MATLAB 分别对乳胶和记忆海绵进行数学模型拟合，得到乳胶的数学模型为 $R^2=0.9999$, $RMSE=0.1146$ 的二元三次公式拟合，记忆海绵的数学模型为 $R^2=0.9994$, $RMSE=0.4041$ 的二元三次公式拟合。该数学模型可以为后续产品设计提供反求帮助。

第4章 产品组合模型数值仿真

本节主要是建立了三维人体模型和枕垫模型，并进行枕垫和人体的组合产品模型试验。对比仿真实验和人体体压实验结果验证有限元仿真模型的可行性。其次对不同海绵材质的平板枕垫进行仿真实验从而获取人体上身接触面的受力分布情况。由于枕垫接触层需要较柔软和舒适的材料，因此将I号、II号海绵、记忆海绵和乳胶海绵作为优化材料接触层。本文主要从人体前胸部各区域的最大应力，枕垫平面上的最大应力及平均应力，枕垫平面上的二维及三维应力云图以及纵向应力分布曲线四个方向的结果进行分析，为后续的枕垫外形设计提供思路。

4.1 人体模型与枕垫模型建立与分析

本节通过 3Dmax、Hypermesh 和 Abaqus 三个软件进行人体与枕垫模型的建立以及仿真。首先通过 3Dmax 软件进行人体建模和尺寸的修改，再通过 Hypermesh 软件进行人体网格和部件划分，最后导入 Abaqus 中进行装载和仿真实验。

4.1.1 人体模型建立

人体模型数据选择第二章实验中 50 分位女性实验者的身材数据，并对实验者人体数据进行更加细致的测量和汇总。

表 4.1 人体数据测量表

参数	身高 mm	体重 kg	上身长 mm	胸宽 mm	胸厚 mm	胸围 mm	乳深 mm	臂宽 mm	全头高 mm	头宽 mm	头长 mm	上臂长 mm	小臂长 mm	手长 mm
50 分位女性上身参数	1640	60	511	289	230	950	52	340	230	156	184	328	249	180

模型建立首先在 3Dmax 中绘制并修改女性人体参数，输出 SAT 格式。在 Hypermesh 中对壳模型进行网格处理。首先选择输出模式为 Abaqus 选项进行操作页面建立，导入 SAT 格式人体模型。一般来说在网格尺寸设置上以 10mm-20mm 左右^[75]进行划分，划分的网格越细致则模型精度越高。对于人体模型的网格选择

上六面体网格精度高于四面体，但四面体网格运算稳定性和效率更高，操作性更强。本课题对模型进行四面体网格划分。为使模型精度更高，身体部位网格选择10mm精细单位进行划分。由于非接触部位不会产生接触应力也不会对本实验研究的身体与枕垫间应力产生影响，因此小手臂及头部等非接触部位网格大小设置为20mm以缩短运算时间，处理后的人体模型作为本课题研究的统一人体模型。

4.1.2 人体胸腹部生理结构

女性胸部主要由乳房组织构成，乳房主要是乳腺、脂肪组织、韧带等填充而成。且主要是柔软的脂肪和乳腺结构，两者相互粘连，其决定着乳房的大小，如图4.1(a)所示。陈明艳^[88]发现18~25岁的发育成熟女性乳房主要呈现标准型、半球型和圆锥型。

女性腹部主要由皮肤、皮下组织、腹部肌肉层、内脏肌肉层和各种内脏组合以及肋骨组成，如图4.1(b)所示。趴卧时主要接触的腹部柔软组织层。正常成年女性群体的腹部皮肤脂肪厚度范围为：12~20mm^[89]。



图4.1 女性胸腹部结构

本文研究胸型为标准型，乳深为52mm，胸宽289mm，胸厚为230mm，整体胸围为950mm。由于本文研究的应力为人体上半身与枕垫接触面间的应力，胸部和腹部因其接触组织以脂肪为主较为柔软，因此胸部和腹部单独划分Part，填充柔软的脂肪组织材料属性。其中腹部厚度为16mm。其余部分划分为硬质部分，输出为inp文件，如图4.2所示。本课题所有实验使用同一处理后人体模型。



图4.2 仿真人模型

4.1.3 人体模型与枕模型的组合

完成人体模型制作之后需要在 Abaqus 中制作人体和枕垫组合模型。通过建立部件、设置材料参数、装配、接触、载荷边界和任务，最后完成整体仿真模型的建立。

(1) 人-枕垫模型装配

首先将处理好的人体模型导入到 Abaqus 中，按照基础枕垫形状建立 part1。由于人体体压实验中测试的应力传感器由极薄的尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的触点传感器元件组成，因此为模拟更真实的体压实验，建立 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 壳属性的微元传感器元件置于胸部最凸点与枕垫之间。按照使用场景组装人体和枕垫，以 10mm 单位大小的六面体划分枕垫和传感器元件，如图所示。



(a) 人与枕垫组合使用展示图



(b) 人与枕垫组合使用仿真图

图 4.3 枕垫和人体组合产品模型

(2) 材料属性设置

完成整体装配后需要设置各部件的材料属性进行计算，在 Property 模块中选择合适的本构模型进行设置。查阅大量文献汇总出两款胸部脂肪本构模型参数较适用于本课题研究，汇总与表 4.2 所示。将材料参数赋予仿真模型部件中。

表 4.2 模型本构材料属性表

材料	本构模型	参数	密度
脂肪 ^[90-91]	Hyperplastic Ogden	$\mu = 0.01\text{Mpa}$ $\alpha = 0.5$	$9.2\text{E}-10\text{T/mm}^3$
身体其他硬质区域 ^[92]	Elastic 弹性	弹性模量=0.15 泊松比=0.45	
微元感应片 ^[93-94]	Elastic 弹性	弹性模量=15000 泊松比=0.3	$9.48\text{E}-10\text{T/mm}^3$
		弹性模量=0.06~11.7 泊松比=0.49	$1.2\text{E}-9\text{T/mm}^3$

(3) 分析步设置、载荷和边界条件设置

实验采用动力学显示（Dynamic-Explicit）分析步进行分析，时间设置为 0.35 秒。载荷部分选择重力（Gravity）模式在下压方向设置 9800mm/s^2 加速度并固定在枕垫底部。接触采用硬接触，摩擦系数为 0.3。最后提交 JOB 进行运算。

4.1.4 仿真实验与人体体压实验对比

本小节探求了两种不同的胸腹部本构模型仿真实验与真实实验的拟合效果，以及微元感应器最适本构模型参数。设置实验仅更改胸腹部本构模型、更改枕头材料、更改微元感应器材料进行多组对比仿真实验。将仿真实验结果汇总于表 4.3，并将两种胸部本构模型的仿真实验中胸部形变情况进行对比。

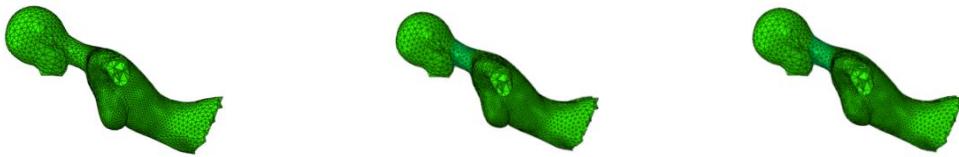
表 4.3 仿真对比试验结果表

材料	胸部本构模型	感应片本构 模型参数	感应片应力大小	人体实验胸 部应力大小
乳胶枕垫模拟	Hyperplastic	$t=0.2$ $p=0.49$	8.8kpa	
		$t=0.18$ $p=0.49$	7.9kpa	
		$t=0.15$ $p=0.49$	7.6kpa	
		$t=0.1$ $p=0.49$	6.5kpa	
		$t=0.06$ $p=0.49$	5.8kpa	
	Elastic 弹性模量=0.15 泊松比=0.45	$t=0.2$ $p=0.49$	7.1kpa	7.69kpa
		$t=0.18$ $p=0.49$	6.3kpa	
		$t=0.15$ $p=0.49$	5.9kpa	
		$t=0.06$ $p=0.49$	4.8kpa	

表 4.3 续 仿真对比试验结果表

材料	胸部本构模型	感应片本构 模型参数	感应片应力大小	人体实验胸 部应力大小
硬质III号海绵	Hyperplastic	$t=0.2$ $p=0.49$	12.6kpa	
		$t=0.15$ $p=0.49$	9.5kpa	
	Ogden	$t=0.1$ $p=0.49$	8.6kpa	
	Elastic 弹性模量=0.15 泊松比=0.45	$t=0.06$ $p=0.49$	6.0kpa	
		$t=0.45$ $p=0.49$	10.6kpa	9.45kpa
		$t=0.18$ $p=0.49$	8.4kpa	
		$t=0.15$ $p=0.49$	7.8kpa	
		$t=0.06$ $p=0.49$	5.2kpa	

由表 4.3 结果所示，乳胶海绵枕垫和硬质海绵枕垫实验中胸部本构模型选择 Hyperplastic Ogden，微元感应片本构模型选择弹性模量=0.15 泊松比=0.49 与人体体压实验数据更加符合。对于乳胶海绵来说误差大小为 0.09Kpa，百分比为 1.17%。硬质海绵误差大小为 0.04Kpa，百分比为 0.5%。当枕垫材料为乳胶、微元感应片本构模型为 $t=0.15$ 、 $p=0.49$ 时观察两种胸部本构模型胸部变形情况如下图（4.4）所示：



(a) 下压前人体模型 (b) Elastic 本构模型下压后 (c) Ogden 本构模型下压后

图 4.4 不同胸部本构模型下压后胸部变形情况

由上图 4.4 结果可以发现胸部 Ogden 本构模型实验中胸部下压后变形情况更为合理。胸部 Elastic 本构模型下压后胸部变形较小，模拟胸部材质较硬。因此后续

仿真模型中人体胸部本构模型将使用 Hyperplastic Ogden、微元感应片使用弹性模量=0.15 泊松比=0.49 弹性形变本构模型来进行仿真实验。

除对比仿真实验中人体表面应力大小之外，将仿真实验中枕垫表面数据导出处理成数组导入 matlab 中进行绘制二维应力图与人体体压实验二维图对比(4.5-4.6)所示。

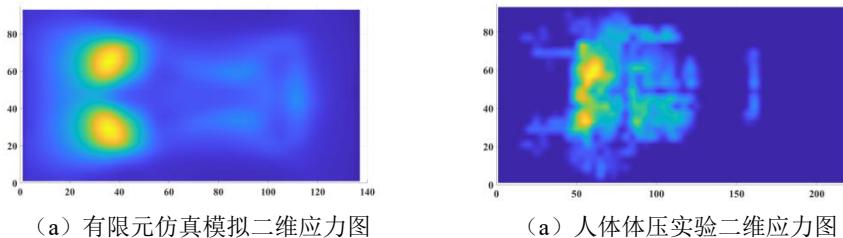


图 4.5 III号硬海绵产品组合二维应力图对比

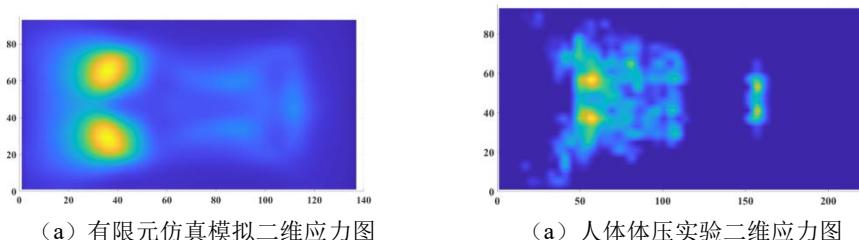


图 4.6 乳胶海绵产品组合二维应力图对比

结合图 4.5、4.6 可知枕垫产品使用的仿真模拟实验显示主要应力集中在胸部和腹部区间，人体体压实验主要应力也是集中在胸部和腹部区间。且胸部应力大于腹部应力，因此有限元仿真实验应力分布符合人体体压实验应力分布且误差小于 0.1Kpa，百分比小于 1.5%。综上对比人体胸部本构模型使用 Hyperplastic Ogden、微元感应片使用弹性模量=0.15 泊松比=0.49 弹性形变本构模型的组合仿真模型在应力分布情况、胸部压强大小、胸部变形情况方面均较符合真实人体体压实验。因此有限元仿真模拟实验具有可行性，可以作为后续枕垫产品设计的仿真方法。

4.1.5 平板枕垫仿真实验

经过本文第三章对比各海绵材料应力应变数据以及物理性能，本小节选择硬度较软和适中的I号、II号海绵以及缓压回弹性能效果较好的记忆海绵和乳胶海绵作为后续枕垫设计研究的材料。为采集到更加全面的人体与枕垫表面间的数值，选择较大尺寸的平板枕垫进行实验，尺寸为： $500\text{mm} \times 450\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。在 ABAQUS 中设置其他参数以及操作与 4.1.2 步骤相同。人体胸部本构模型使用 Hyperplastic Ogden、微元感应片使用弹性模量=0.15 泊松比=0.49 弹性形变本构模

型。为探究不同使用场景下枕垫产品实用设计，更改枕垫仿真模型中的使用角度。分别设置 27° 为电脑模式环境下的枕垫使用角度，设置 21° 为手机模式环境下的使用角度。装配完成后的产品组合使用模型如图 4.7 所示。



图 4.7 不同环境下平板枕垫仿真实验

4.2 电脑使用模式下多种材质的枕垫仿真及应力分析

本小节探究电脑环境下 4 种材料的枕垫产品组合使用仿真，分析仿真结果，选择最优材料枕垫作为后续优化设计的基础。

4.2.1 人体应力分析

本节将人体前身部区域主要划分为上胸部和腹部，根据人体前身部分各区域的最大应力情况可以判断人体受力情况。表 4.4 和图 4.8 所示分别为 I 号海绵、II 号海绵、记忆海绵、乳胶海绵四种海绵材料的人体表面应力对比图。根据图表分析可知，身体前侧应力区域主要集中在锁骨处、胸部处和腹部处区域。对于 I 号和 II 号海绵来说密度较小硬度较小更为柔软的 I 号海绵使用时人体体压较小，舒适感较好。记忆海绵和乳胶海绵因为有较好的缓压慢回弹作用，人体的体压较 I 号 II 号海绵小，更适合作为枕垫填芯材料。且人体前身部各区域应力峰值图表也显示人体应力主要集中在锁骨处和胸部。锁骨处因脂肪含量少有锁骨骨质明显凸起，接触后产生较大的应力。胸部由脂肪组成较为柔软因此比锁骨处应力更小，但依旧是凸起部分应力仍较平坦柔软的腹部更大。仿真结果也从侧面印证上胸部区是人体的主要受力区域。对于锁骨、胸部等有明显凸起和坚硬骨头处的部分接触更软的材料时该部分人体应力更小，然而对于腹部这部分无明显骨头凸起且具有较多柔软平坦脂肪而言并非是接触枕垫材料更加柔软人体应力更小。相反更具有缓压且支撑性的材料人体表面应力更小。

表 4.4 四种材料下人体前身部各区域应力峰值表

	锁骨处 (kpa)	胸部 (kpa)	腹部 (kpa)
I 号海绵	16.19	9.24	2.66
II 号度海绵	17.16	11.68	2.54
记忆海绵	14.25	9.13	2.47
乳胶海绵	14.65	9.04	2.26

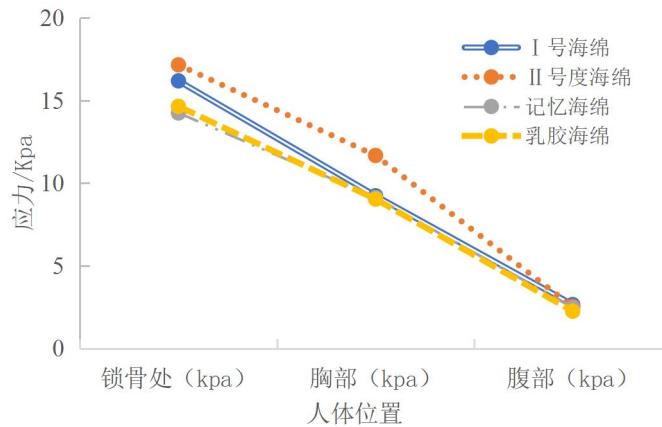
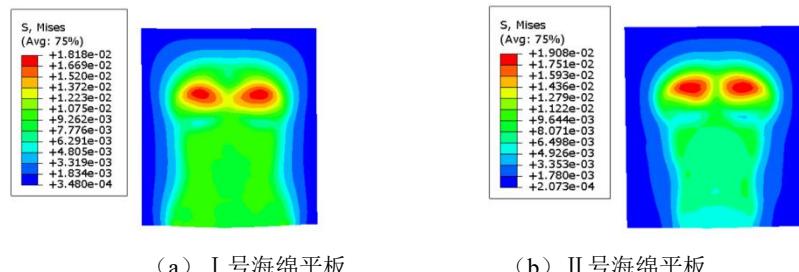


图 4.8 四种材料下人体前身部各区域应力峰值表对比图

4.2.2 平板枕垫的应力分布

除人体的应力值可以直接反映人体的受力情况，枕垫上的应力值也能间接地体现人体使用枕垫时受力情况。下图 4.9 为四种材料仿真实验的应力云图。由四幅云图可知记忆海绵和乳胶海绵平板枕垫上的应力值小于I号海绵和II号海绵。



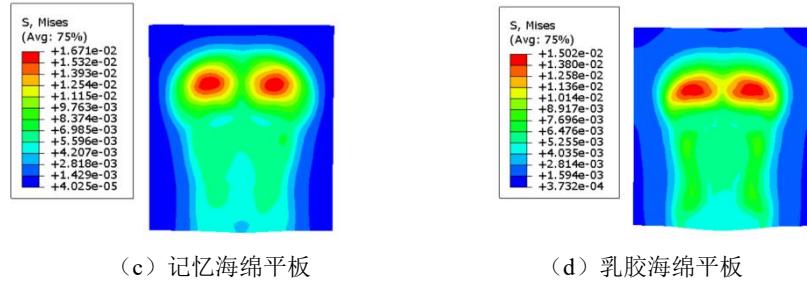
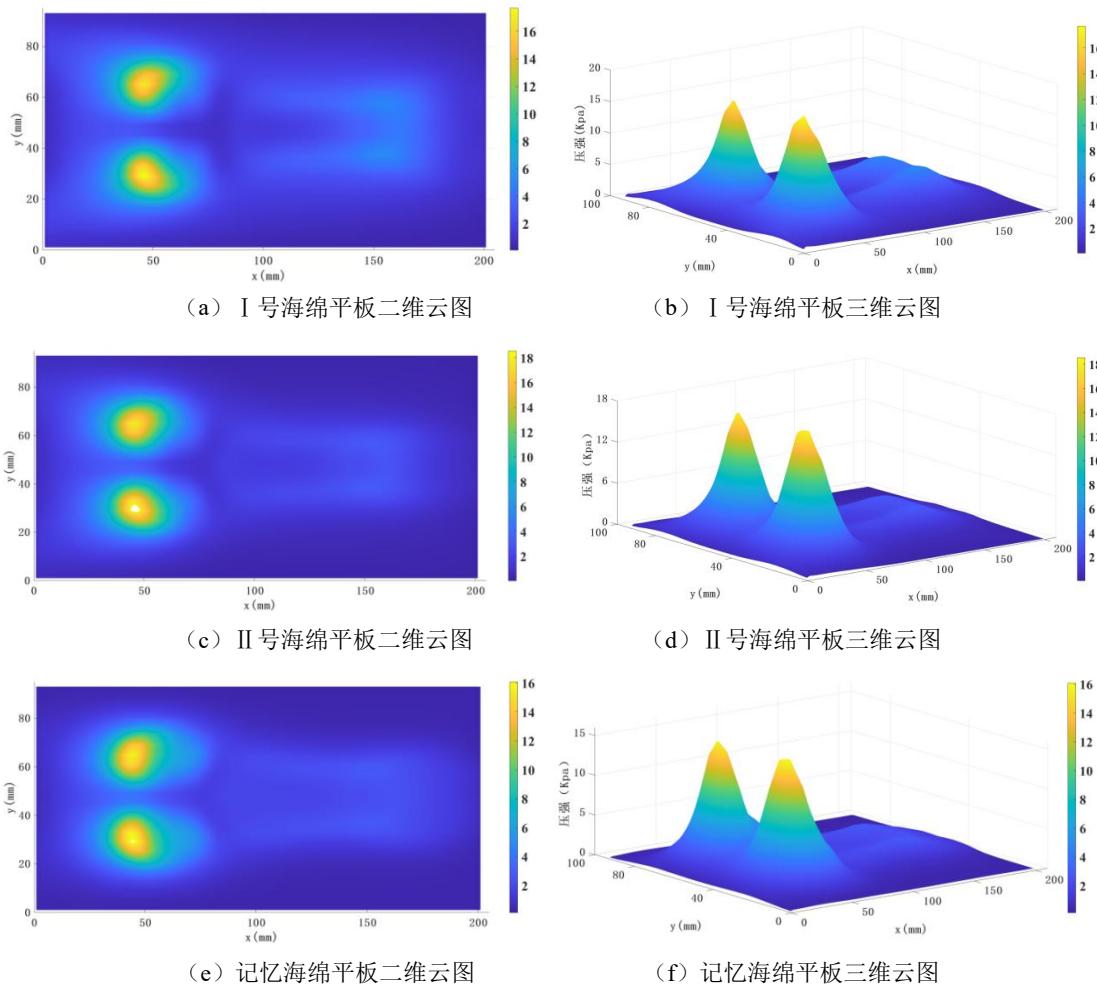


图 4.9 四种材料下平板枕垫仿真实验应力云图

本节将四种材料仿真实验的平板表面应力数据值导出，通过 Matlab 软件对输出的向量组进行插值显示处理。分别绘制出四种材料平板枕垫上的应力二维云图和三维云图，如图 4.10 所示。其中二维云图与人体体压实验应力分布云图形态基本符合，根据三维云图可以明显看出 4 种海绵材料枕垫平板上的应力大小分别为乳胶海绵 < 记忆海绵 < I 号海绵 < II 号海绵，应力主要集中于上胸部和腹部区域。



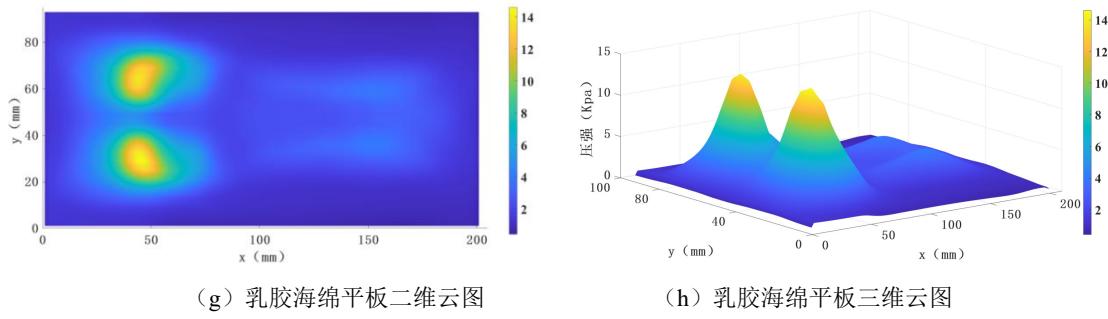


图 4.10 四种材料枕垫平板的二维云图和三维云图

4.2.3 平板枕垫的最大应力和平均应力

表 4.5 为四种材料仿真实验的平板表面各区域应力数据值，在前胸区四种材料的应力大小为乳胶海绵<记忆海绵<I号海绵<II号海绵。乳胶海绵和记忆海绵材质依旧优于II号海绵与I号海绵，且与人体胸部表面比较相吻合。在腹部区四种材料的应力大小为记忆海绵<II号海绵<乳胶海绵<I号海绵，在腹部区域与上胸部区域应力分布相同。图 4.11 为四种材料枕垫平板上的平均应力图，平均应力能够反映枕垫平板上整体受力情况，可以对比发现I号II号海绵最大应力较大，平均应力较小，说明其对主要应力的缓压作用差，使得局部受力集中且明显。

表 4.5 四种材料平板枕垫各区域应力值

海绵材料	最大应力 kpa		平均应力 kpa
	上胸部	腹部	
I 号海绵	18.18	4.87	2.42
II 号海绵	19.08	3.13	1.97
记忆海绵	16.71	2.76	1.93
乳胶海绵	15.02	3.77	2.23

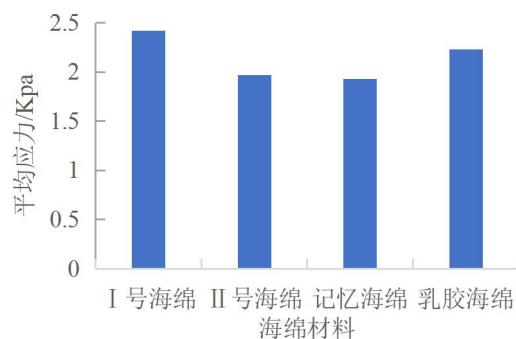


图 4.11 四种材料枕垫平板上的平均应力

图4.12为四种材料枕垫平板上胸部和腹部的应力最值，可以明显看到I号海绵和II号海绵的胸部应力值大于乳胶海绵和记忆海绵，也证明I号海绵和II号海绵使用时应力较为集中，不能很好的对局部应力进行分散。且无论是哪一种材料，胸部区域的应力值都要大于腹部应力值，这也符合人体使用枕垫时主要受力区域为胸部凸起部分。

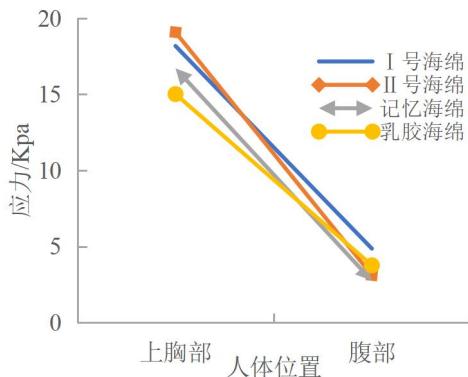


图4.12 四种材料枕垫平板上的各区域最大应力

4.2.4 纵向应力分布曲线分析

枕垫上的纵向应力曲线是除以上参数研究之外可以形象地分析人体使用枕垫时纵向各区域的应力变化情况。

纵向应力曲线是将垂直于平板枕垫纵向对称轴的各截面上的应力积分，并且以纵向轴为横坐标轴，以应力积分的结果作为纵坐标轴的关系曲线，称为纵向应力分布曲线（PL）^[91]。其可反映出人体使用枕垫时各区域的受压情况和应力变化趋势情况。其表达式为：

$$P_L(x_i) = \sum_{j=1}^N P(x_i, y_j) \cdot \Delta l_i \quad (2-2)$$

其中：N为第i排测点数；P(x_i,y_j)为第i排第j个测点的应力，KPa；ΔL_i—该测点所代表的线长度（对于等间隔分布的测点，ΔL_i为常数），cm。

图4.13为四种材料的纵向应力分布曲线，从左至右分别为上胸部区、腹部区域。胸部区域在10cm处达到峰值，腹部区域峰值在40cm处。

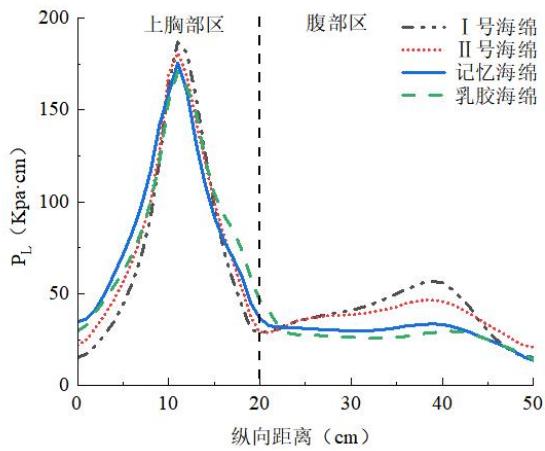


图 4.13 四种材料的纵向应力分布曲线

4.3 手机使用模式下多种材质的枕垫仿真及应力分析

本小节探究相同枕垫在手机环境下 4 种材料的枕垫产品组合使用仿真情况，分析仿真结果如 4.2。选择最优材料枕垫作为后续优化设计的基础。

4.3.1 人体应力分析

表 4.6 和图 4.14 所示分别为 I 号海绵、II 号海绵、记忆海绵、乳胶海绵四种海绵材料下应力对比图。根据图表分析可知，该使用环境下身体前侧应力区域依旧主要集中在锁骨处、胸部处和腹部处区域。在锁骨区人体应力大小为乳胶海绵 < 记忆海绵 < I 号海绵 < II 号海绵。在胸部区域人体应力大小为记忆海绵 < 乳胶海绵 < I 号海绵 < II 号海绵。在腹部区域人体应力大小为乳胶海绵 < 记忆海绵 < II 号海绵 < I 号海绵。然而可以观察到无论是人体哪个部分各海绵材料应力相差不大，且综合观察乳胶海绵和记忆海绵较优于 I 号和 II 号海绵。

表 4.6 四种材料下人体前身部各区域应力峰值表

	锁骨处 (kpa)	胸部 (kpa)	腹部 (kpa)
I 号海绵	14.04	8.58	2.45
II 号海绵	16.73	10.10	2.38
记忆海绵	13.42	8.04	2.36
乳胶海绵	12.93	8.07	2.17

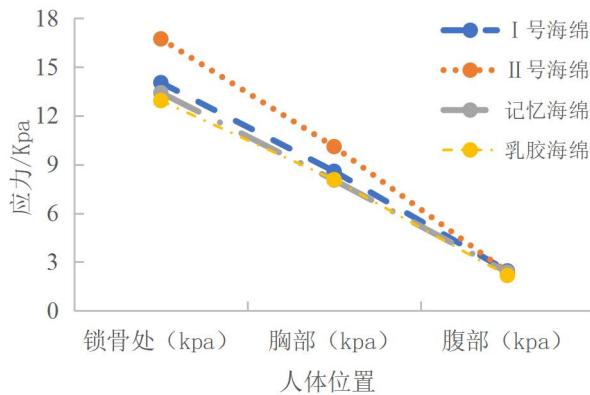


图 4.14 四种材料下人体前身部各区域应力峰值表对比图

4.3.2 平板枕垫的应力分布

下图 4.15 为四种材料仿真实验的应力云图。由四幅云图可知记忆海绵和乳胶海绵平板枕垫上的应力值依旧小于I号海绵和II号海绵。I号海绵和II号海绵最大应力值红色区域较为集中，且数值更大。

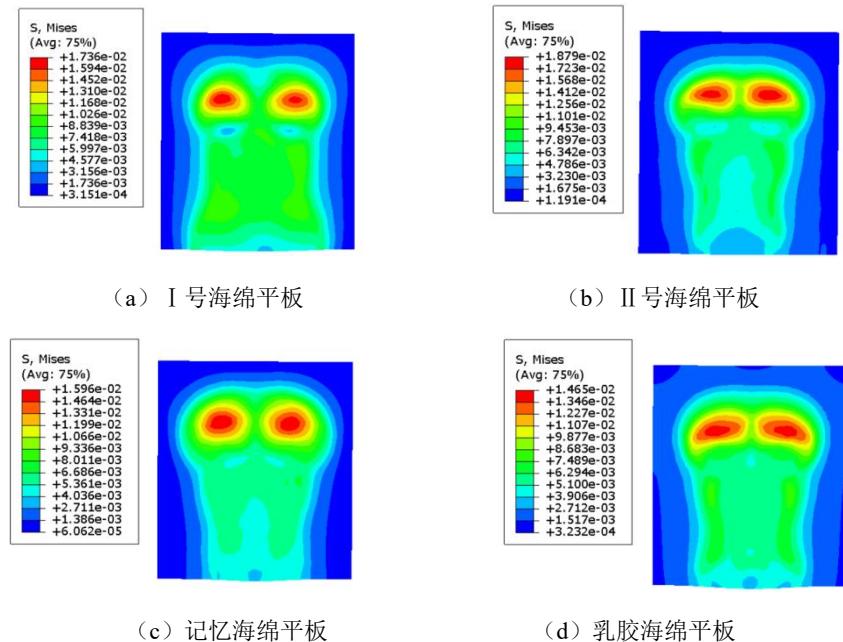


图 4.15 四种材料下平板枕垫仿真实验应力云图

本节与 4.2.2 处理相同，在 Matlab 软件中绘制手机环境下四种材料平板枕垫上的应力二维云图和三维云图，如图 4.16 所示。其中二维云图与人体体压实验应力分布云图形态基本符合，根据三维云图可以明显看出 4 种海绵材料枕垫平板上的

应力大小分别为乳胶海绵<记忆海绵<II号海绵<I号海绵，应力主要集中于上胸部和腹部区域。

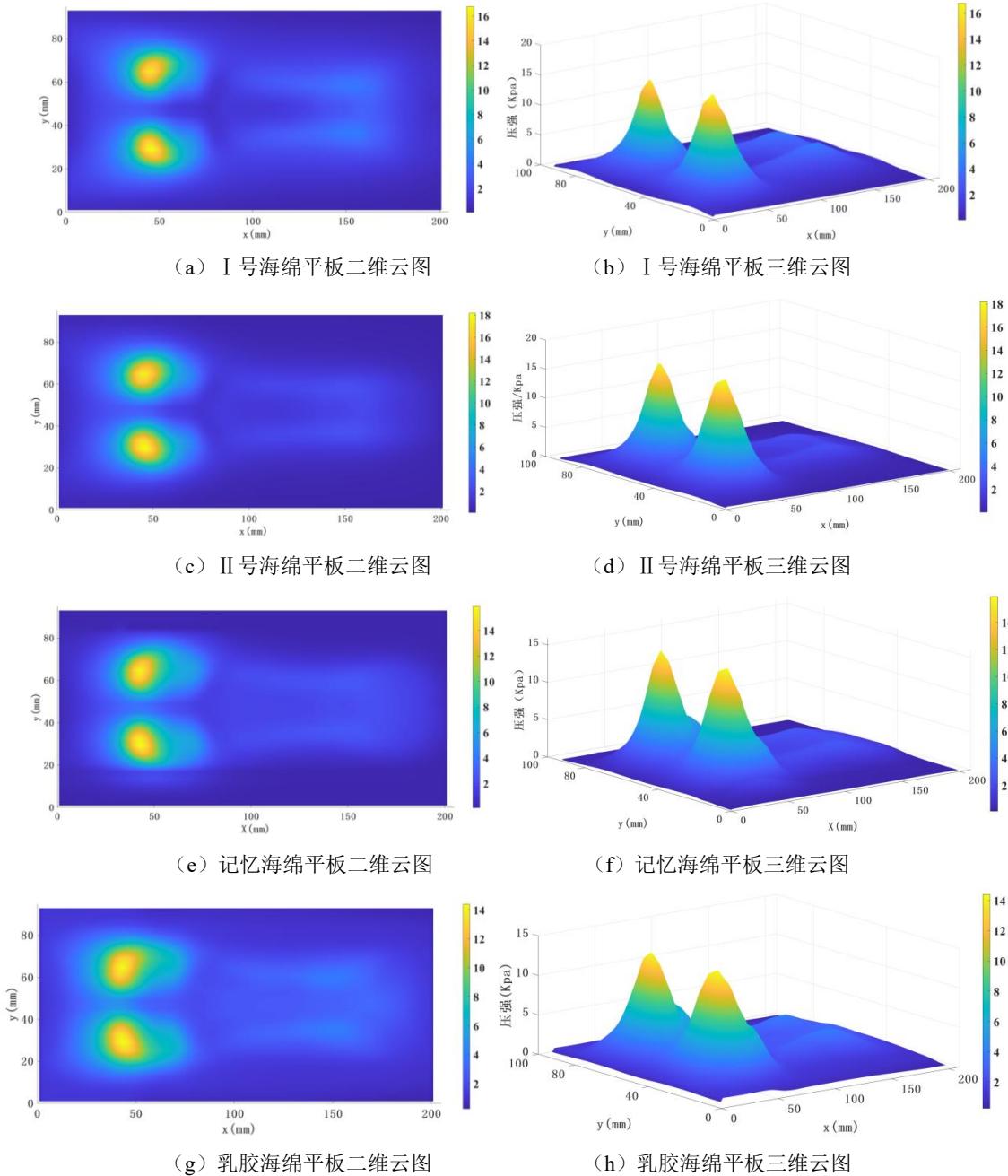


图 4.16 四种材料枕垫平板的二维云图和三维云图

4.3.3 平板枕垫的最大应力和平均应力

表 4.7 为四种材料在手机环境下仿真实验的平板表面各区域应力数据值，在前胸区四种材料的应力大小为乳胶海绵<记忆海绵<II号海绵<I号海绵。乳胶海绵

和记忆海绵材质依旧优于II号海绵与I号海绵，且与人体胸部表面比较相吻合。在腹部区四种材料的应力大小为记忆海绵<乳胶海绵<II号海绵<I号海绵。

表 4.7 四种材料平板枕垫各区域应力值

海绵材料	最大应力 kpa		平均应力 kpa
	上胸部	腹部	
I 号海绵	17.36	4.3	2.17
II 号海绵	18.79	3.69	1.89
记忆海绵	15.96	2.61	1.84
乳胶海绵	14.65	3.81	2.02

图 4.17 为四种材料枕垫平板上的平均应力图，平均应力能够反映枕垫平板上整体受力情况，可以看到记忆海绵枕垫整体的平均应力值最小。图 4.18 为四种材料枕垫平板上胸部和腹部的应力最值，可以明显看到I号海绵和II号海绵在胸部应力值大于乳胶海绵和记忆海绵，证明I号海绵和II号海绵使用时应力较为集中，不能很好的对局部应力进行分散。四款材料在腹部区域应力值相差不大。

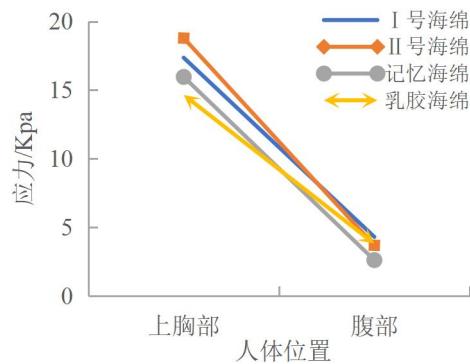
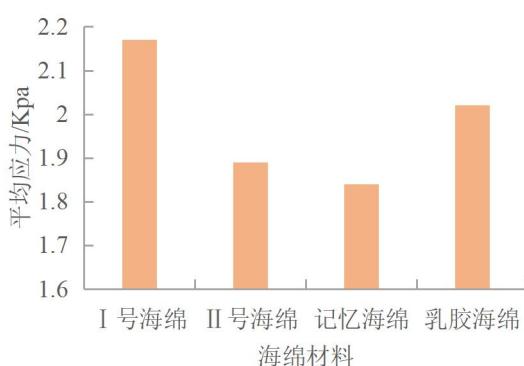


图 4.17 四种材料枕垫平板上的平均应力 图 4.18 四种材料枕垫平板上的各区域最大应力

4.3.4 纵向应力分布曲线分析

图 4.19 为手机环境下四种材料的纵向应力分布曲线，从左至右分别为上胸部区和腹部区域。手机环境下的纵向应力分布曲线与电脑环境下的纵向应力分布曲线的趋势相同。说明手机环境下使用枕垫时人体应力峰值也是在胸部区域。

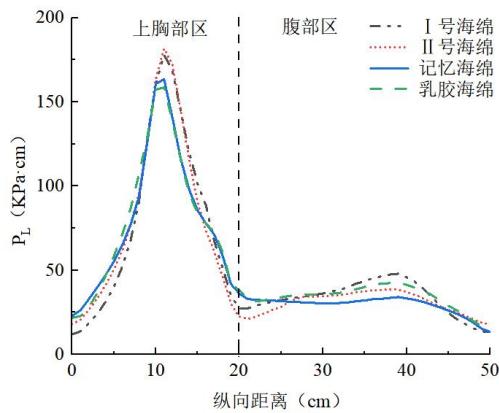
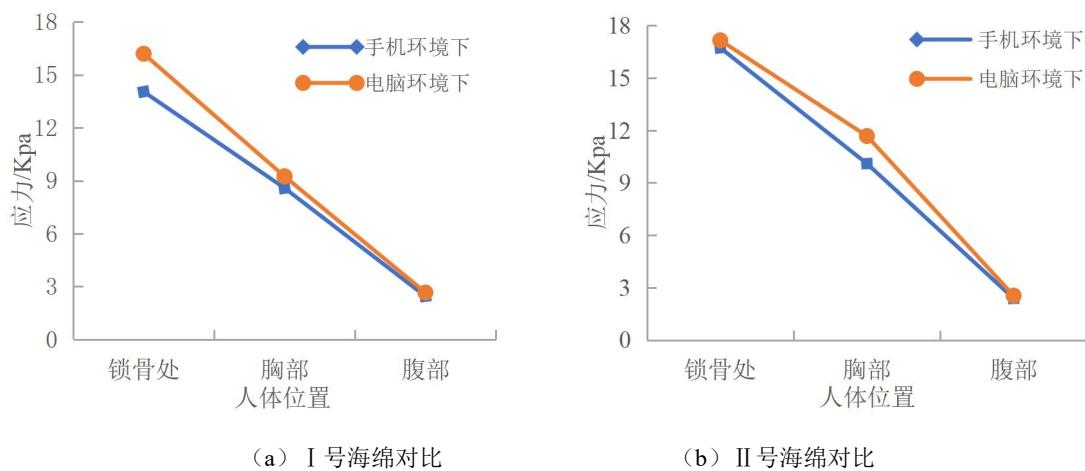


图 4.19 四种材料的纵向应力分布曲线

4.4 两种环境枕垫应力对比分析

图 4.20 为电脑环境下和手机环境下四种材料的人体各区域应力对比图, 由图可知无论是何种海绵材料何种环境下人体各区域的应力值大小都是锁骨处>胸部>腹部。出现该现象的重要原因除锁骨凸起外还是该模拟枕垫平板上半身接触在锁骨稍上方, 对颈部支撑少, 因此作为衔接处的锁骨部位会承担更多应力。因此后续设计除设计枕面外还可以考虑颈部更多舒适性的支撑, 可以缓解锁骨处的应力。除此之外对比分析发现无论是何种海绵材料手机环境下人体各区域的应力值都较小于电脑环境下, 考虑到是电脑环境下使用枕垫角度更高, 上半身下压重心较靠后, 整体接触面积较少。而手机环境下人体使用枕垫角度更低, 上半身重心较为靠前且接触面积大, 需要枕垫支撑更多面积的身体重力, 人体也更加放松。且角度的改变对上胸部的锁骨和胸部位置影响较大, 腹部因较为平坦且柔软影响较小。整体对比发现乳胶海绵和记忆海绵枕垫使用时更加舒适, 人体应力更小。



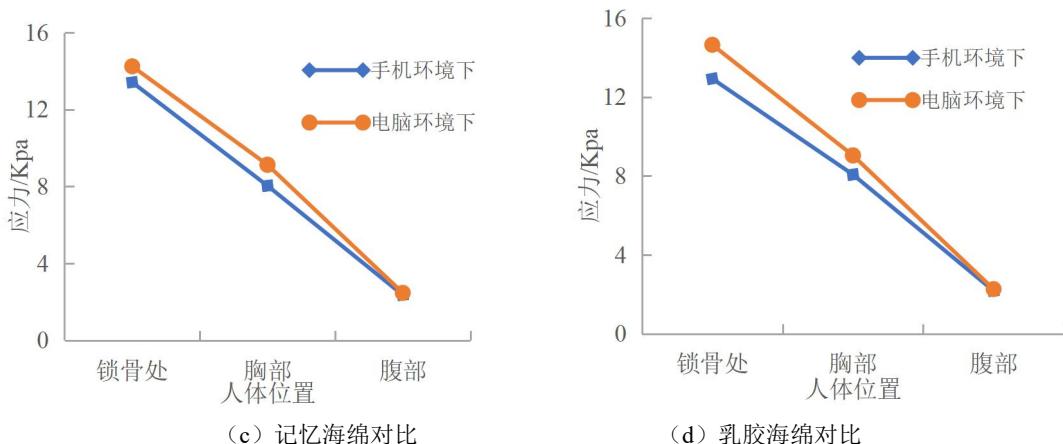


图 4.20 两种使用环境下四种材料仿真实验人体各区域应力图

4.5 小结

本章主要进行了枕垫使用组合仿真模型建立与拟合。根据第二章的 50 分位年轻女性人体数据在 C4D 中进行人体模型的建立和修改，使用 Hypermesh 对人体进行四面体网格划分和人体胸腹部分区，导入到 Abaqus 中按照第二章的人体体压实验建立和装配枕垫组合使用模型。对比了仿真实验和人体体压实验的应力分布范围和最大应力值基本符合，证明了人体与枕垫组合使用的仿真模型的可靠性和可行性。为研究更加全面的原始枕垫应力数值，更改平板枕垫大小为 500mm×450mm×200mm 进行四种材料在两种环境下的枕垫使用仿真实验。两个仿真实验主要得出以下结论：

(1) 在人体与枕垫接触面间加入 10mm×10mm 的感应片，更改感应片的材料参数和人体胸部本构模型研究出最适的胸部本构模型和感应片材料参数为：仿真模型中人体胸部本构模型为 Hyperplastic Ogden、微元感应片为弹性模量=0.15 泊松比=0.49 弹性形变本构模型来反映人体表面应力大小。

(2) 平板枕垫仿真结果显示：四种材料无论在何种环境下使用，人体表面的应力值大小都是锁骨处>胸部>腹部。且四种材料腹部的应力值差异最小。两种环境下人体锁骨处和胸部处 II 号海绵的应力值最大，腹部处 I 号海绵应力值最大。将 8 个仿真实验的平板枕垫应力分布绘制出二维和三维云图进行对比，发现应力值大小为 II 号海绵>I 号海绵>记忆海绵>乳胶海绵。纵向应力曲线和平板枕垫最大应力值都能反映出每款材料的应力主要分布在上胸部和腹部。

整体对比来说，乳胶海绵和记忆海绵枕垫无论是人体表面应力还是平板枕垫应力都更小，使用更加舒适。

第5章 基于人体应力分布的枕垫设计及仿真

本章通过第四章的分析研究发现乳胶和记忆海绵材料作为枕垫填芯材料较为合适，因此本章将从不同设计方法入手进行多款乳胶和记忆海绵枕垫的设计。

5.1 基于从应力分布数据到曲面形态的设计模式

将产品使用的应力数据反馈到产品外形设计当中的设计方法一直是较为科学准确且热门的研究方法。本课题选择 Matlab 作为数据工具将人体使用枕垫时的枕垫表面应力分布数据转化设计为枕垫接触面形态。即枕垫表面对于受压部分不同程度的下凹设计来满足产品使用时的缓压效果。

进行数据转换设计前的数据预处理步骤十分重要，其中最重要的处理就是滤波、降噪和平滑，将数据组进行去噪以及平滑。图像噪声处理在数字图像处理技术中的重要性越来越明显。经过滤波降噪后处理的数据反推的曲面会更加光滑。在 Matlab 中选择 smooth2 函数和插值 Interp 函数 2 种曲面光滑函数进行处理。

Smooth2 函数的表达式如 (5-1) 所示，MATRIXIN 是原始矩阵，Nr 是平滑行点数，Nc 是平滑列点数。

$$\text{MATRIXOUT}=\text{SMOOTH2}(\text{MATRIXIN}, \text{Nr}, \text{Nc}) \quad (5-1)$$

插值 Interp2 函数就是在样本数值中生成插值点，其格式如 (5-2) 所示，Z 是原始数值，n 是递归计算次数。

$$\text{ZI}=\text{INTERP2}(Z, n) \quad (5-2)$$

本节对仿真实验数据做好插值和平滑处理之后，采用数据映射来反求枕垫型面。同样在 Matlab 中对数据进行映射，映射即构建两组模型之间数据元素的对应关系，可通过编程语言来实现。本文选择等比例映射函数进行处理，等比例映射函数就是增大或缩小数据之间的差异，从而获得更加好的可视化效果。

本文经过第四章对四种材料枕垫平板的仿真实验探究，并结合第二章的市场调研的枕垫尺寸和实验人体尺寸数据，设计第一款支架组合型枕垫。枕垫尺寸为：480mm×350×130mm。将 4.1 与 4.2 实验中乳胶平板枕垫在手机环境下和电脑环境下实验仿真所得的平板应力数据导出计算出平均值，导入 Excel 中处理成 45×50 的数组。导入到 Matlab 中先进行数据的平滑，平滑后使用插值函数 interp 增加数值数量，最后选择 smooth2 函数对数据进行平滑处理，如图 5.1 (a) 所示

再进行数据映射为后续构建枕垫平面，如图 5.1 (b) 所示。最后通过调整映射函数得到不同厚度的和形态的枕垫模型，导出模型图导入到 C4D 中如图 5.1 (c) 所示。

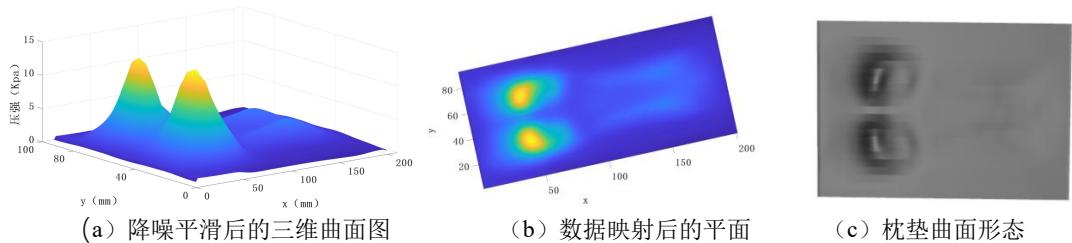


图 5.1 从应力分布数据到曲面形态设计

该设计模式将 matlab 处理后的枕垫表面形态反推得到多个不同厚度 x 的枕面形态。其厚度 X 如图 5.2 所示为枕垫接触面对应胸部下陷区域厚度。处理后得到的三种尺寸分别为曲面I ($x=30\text{mm}$)、曲面II ($x=50\text{mm}$)、曲面III ($x=70\text{mm}$)，处理成图 5.3 所示 3 种完整的枕垫尺寸产品。整体枕垫厚度为 130mm ，长度为 480mm ，宽度为 350mm 。查询文献可知青年女性胸部形态中乳深的平均值^[95]为 49.15mm ，与曲面II的厚度相近，因此曲面I、曲面II、曲面III尺寸合理。

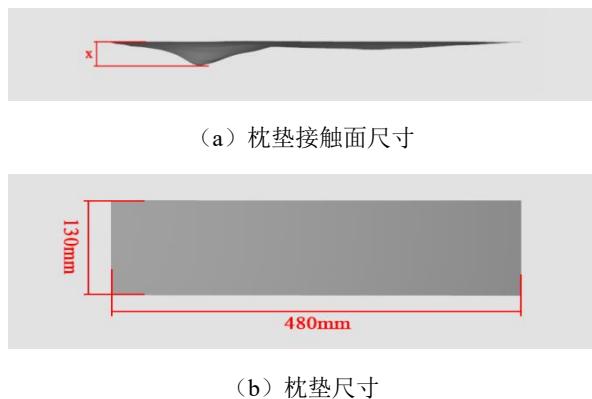


图 5.2 枕垫接触面形态尺寸

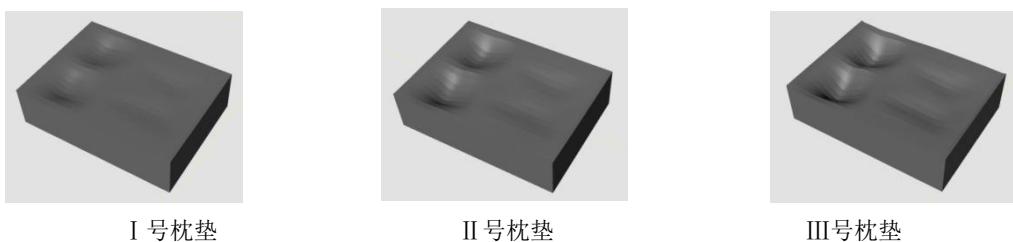


图 5.3 枕垫模型

5.1.1 不同表面形态的乳胶枕垫仿真及分析

本小节将枕垫模型导入 hypermesh 中处理网格再导入到 abaqus 中进行枕垫组合使用仿真模拟。由于第四章研究可知乳胶材料作为枕垫材料最为合适，因此仿真实验中选择乳胶材料作为三款枕垫的材料进行实验，乳胶平板枕垫作为对照组数据。仿真实验探究了电脑环境下和手机环境下的枕垫组合使用情况。6 组仿真实验的枕垫表面应力云图如下 5.4 和 5.5 所示。根据云图可知无论是手机环境下还是电脑环境下 II 号曲面枕垫表面应力值都最小，曲面形态最优。且 III 号曲面应力值小于 I 号曲面应力值，因此并非曲面下陷厚度越多应力越小。观察枕垫表面应力图也会发现枕垫表面越平整应力分布越集中，表面形态越贴合人体应力值越小，说明胸部下陷设计对于缓解应力具有很大作用。

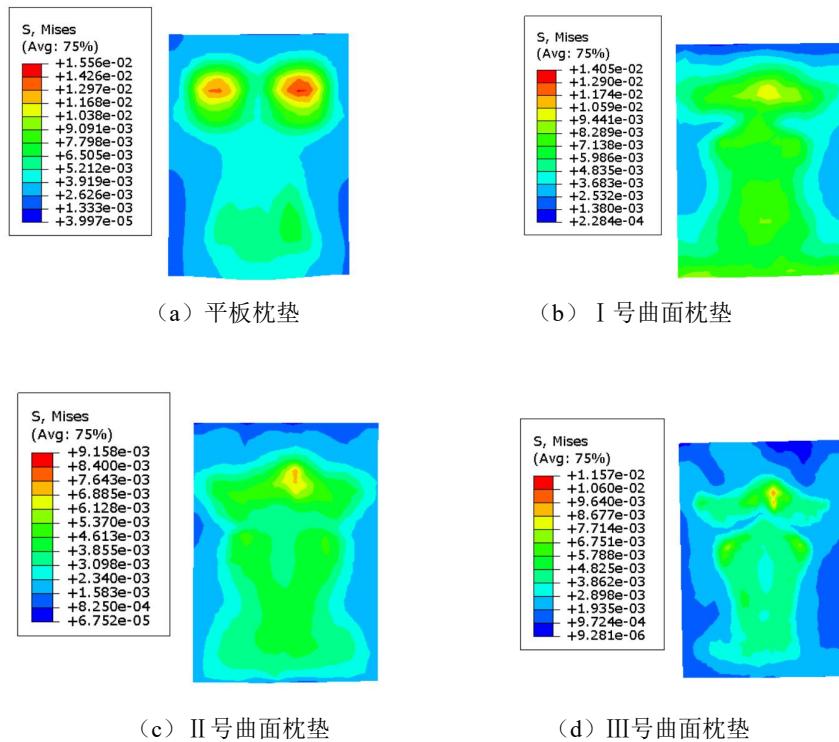
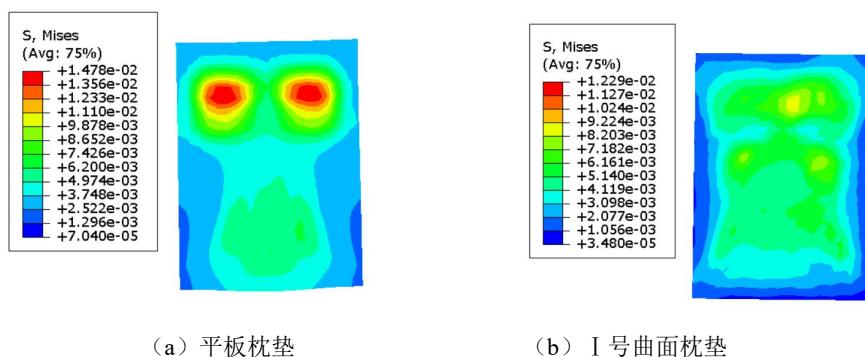


图 5.4 电脑环境下不同曲面乳胶枕垫仿真实验应力云图



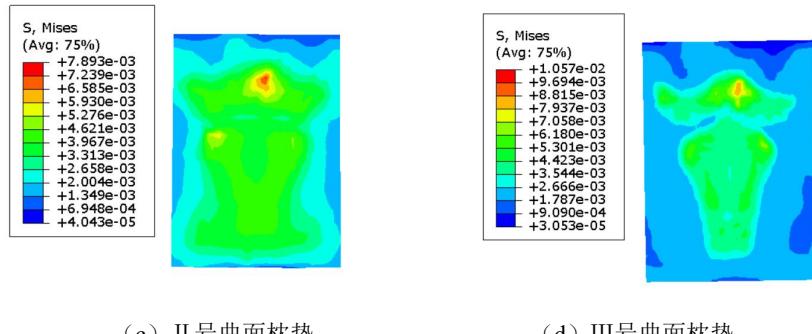


图 5.5 手机环境下不同曲面乳胶枕垫仿真实验应力云图

表 5.1 是 3 款曲面枕垫组合仿真模型的人体表面应力汇总表。本节同时将两种环境下 3 种曲面枕垫仿真实验人体应力图绘制而成图 5.6 所示。由图表可知，无论哪一款的曲面枕垫手机环境下人体整体应力略低于电脑环境下。且整体对比应力最小的是 II 号枕垫，I 号枕垫和 III 号枕垫应力差距不大。但是 III 号枕垫由于胸部下陷最多，胸部中空较多，胸部的应力较其他两个曲面更加集中在胸外侧。考虑到手机环境下人体上半身更加放松对枕垫下压也更多接触面积较大。因三款枕垫腹部下陷厚度相差不大，整体三款枕垫对腹部影响都较小。

表 5.1 四种乳胶枕垫各区域应力值

	曲面形态	锁骨处 (kpa)	胸部 (kpa)	腹部 (kpa)
电脑环境下	平板枕垫	14.70	9.06	2.21
	I 号枕垫	13.93	5.81	2.04
	II 号枕垫	8.84	5.00	1.94
	III 号枕垫	10.90	5.84	2
手机环境下	平板枕垫	13.35	8.36	2.12
	I 号枕垫	12.01	5.42	1.98
	II 号枕垫	7.07	4.37	1.87
	III 号枕垫	10.42	4.77	1.95

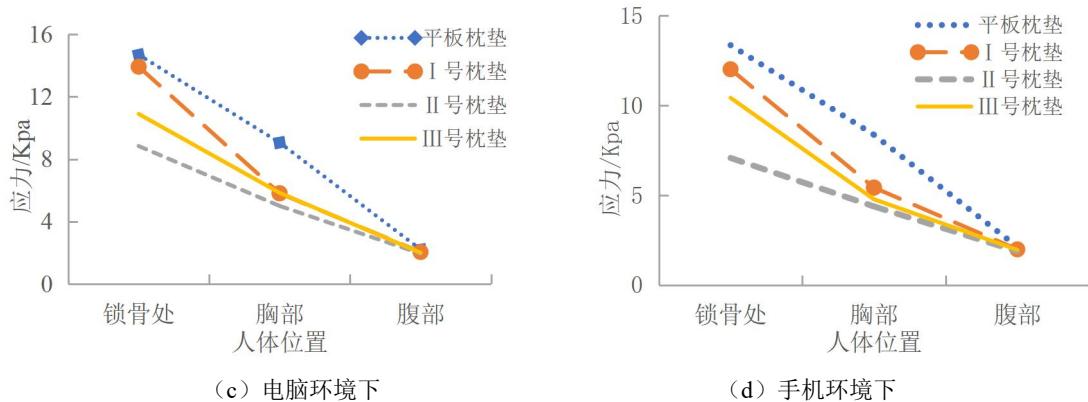
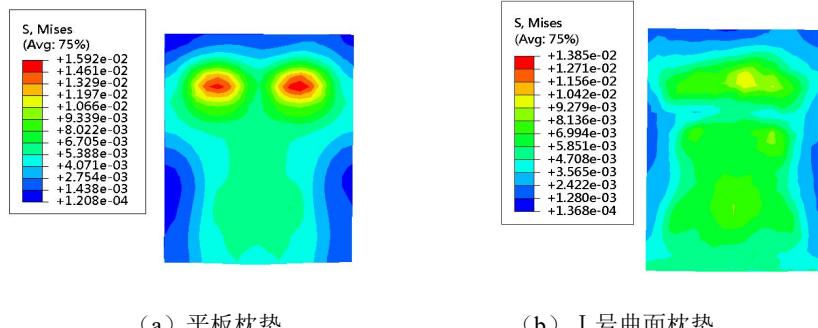


图 5.6 两种环境下不同曲面应力对比

查阅文献可知作用于人体表面局部的应力超过末端毛细血管动脉压（3.33-4.67Kpa）的 2 倍（6.67-9.33Kpa）并持续时间 1 小时以上就会阻断毛细血管对组织的灌流造成组织缺氧，若时间超过 2 小时就会造成组织不可逆的损伤^[96-97]。因此对比两种环境下的三款枕垫可以发现II号枕垫人体表面应力值最大为 8.84Kpa 小于 9.33Kpa，因此使用该款尺寸的枕垫 1 小时内对毛细血管的影响较其他更小，尺寸更适合。

5.1.2 不同表面形态的记忆海绵枕垫仿真及分析

基于表面应力形态的记忆海绵枕垫设计模式与乳胶枕垫设计模式一致，将曲面反推形成的枕垫模型导入到 abaqus 中进行仿真模拟。仿真实验中选择记忆海绵材料作为三款枕垫的材料进行实验，平板枕垫作为对照组数据。仿真实验探究了电脑模式环境下和手机模式环境下的枕垫组合使用情况，6 组仿真实验的枕垫表面应力云图如下 5.7 和 5.8 所示。根据云图可知无论是电脑环境下还是手机环境下II号曲面枕垫表面应力值都最小，曲面形态最优。且III号曲面应力值小于I号曲面应力值，与乳胶枕垫类似，表面下陷的记忆海绵枕垫较平板枕垫应力更为分散，缓压效果更好。



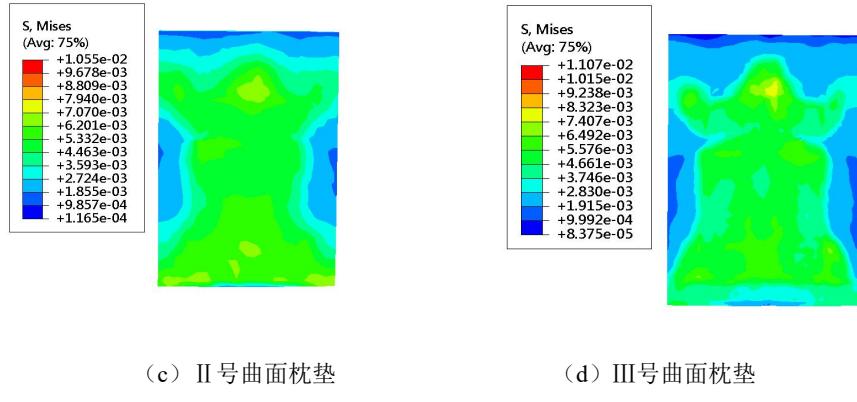


图 5.7 电脑环境下不同曲面乳胶枕垫仿真实验应力云图

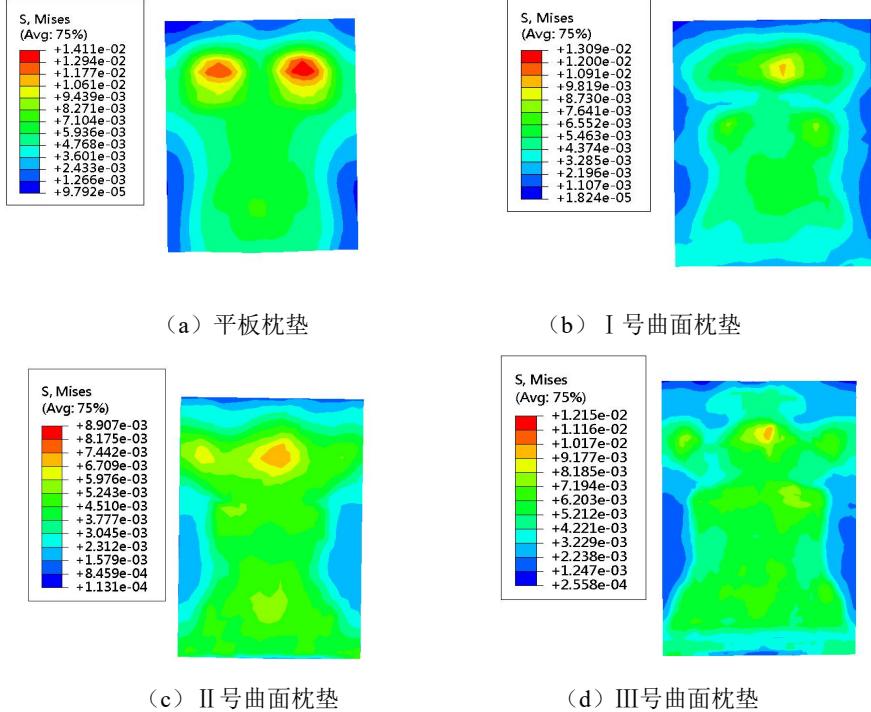


图 5.8 手机环境下不同曲面乳胶枕垫仿真实验应力云图

本节将3款记忆海绵曲面枕垫组合仿真模型中的人体表面应力汇总于表5.1所示。并绘制如图5.9所示。由图表可知，整体对比之下应力最小的依旧是II号枕垫，I号枕垫和III号枕垫应力差距不大。但是III号枕垫由于胸部下陷最多的优势在记忆海绵材料枕垫中依旧适用。对于腹部区域来说三款枕垫腹部下陷厚度相差不大，整体三款枕垫对腹部影响都较小。且II号枕垫在工作环境下的锁骨处应力值最大是8.59Kpa 小于 9.33Kpa，因此对于记忆海绵材料来说II号枕垫尺寸也是最合适。

表 5.2 四种乳胶枕垫各区域应力值

	曲面形态	锁骨处 (kpa)	胸部 (kpa)	腹部 (kpa)
电脑环境下	平板枕垫	14.53	9.24	2.41
	I 号枕垫	13.52	5.89	2.13
	II 号枕垫	8.59	5.05	2.12
	III号枕垫	10.77	5.89	2.10
手机环境下	平板枕垫	13.81	8.42	2.30
	I 号枕垫	12.25	5.43	2.11
	II 号枕垫	7.33	4.39	2.03
	III号枕垫	10.71	4.75	2.08

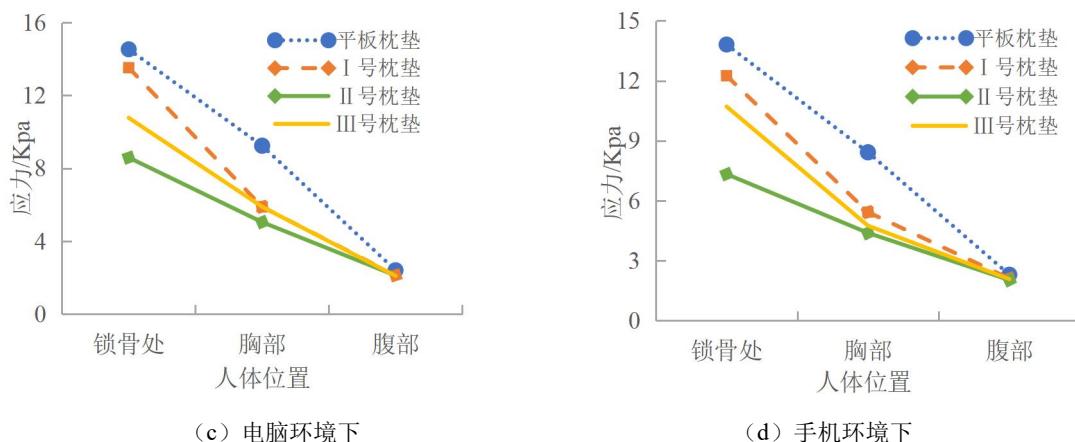


图 5.9 两种环境下不同曲面应力对比

5.2 基于数字图像处理的设计模式

除了直接通过应力分布数据反推曲面形态设计之外，本节还对枕垫表面外形做了创意的功能设计以满足不同胸型需求。设计考虑到试用者存在男性以及不同胸部大小的女性使用。通过 matlab 中对平板枕垫图像进行二值化处理确定枕面接触面形态，对枕垫整体进行分割组合来满足不同胸部大小和性别试用者。

5.2.1 堆叠型曲面枕垫设计

本节提出了基于应力云图的数字图像处理模式进行枕垫设计的方法。该设计方法在于利用应力云图分布进行处理设计。由第 4 章和 5.1 研究可知，枕垫应力主要集中于胸部，枕垫接触面设计时需在胸部处进行下陷设计，且下陷厚度为 50mm 最宜。枕垫接触面设计是将乳胶平板两种环境下平均应力 RGB 云图输入到 matlab

中进行二值化处理。图像二值化（Image Binarization）就是将图像上的像素点的灰度值设置为0或255，也就是将整个图像呈现出明显的黑白效果的过程。二值化图像是数字图像处理非常重要的设计方法，其可将图像中的数据量降低以凸显出重点区域轮廓。在matlab中使用graythresh函数和im2bw函数。graythresh函数是自动确定二值化阈值的函数，大于该阈值的就变成白色，小于该阈值就变成黑色，所以阈值越大越黑，阈值越小越白。im2bw函数是使用阈值（threshold）变换法把灰度图像（grayscale image）转换成二值图像，可以设置value=[0, 1]中间的任何数值，经过多次数值测试，选择效果较好的value=0.5时的二值化图像。处理后图像为5.10（b）所示。

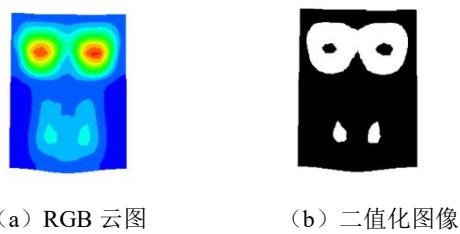


图5.10 图像处理过程

设计过程将二值化的图像导入Photoshop中进行枕垫接触面形态提取。如图5.7(a)所示。根据二值化后图案的形状提取尺寸，胸部下陷部位横向长度为250mm，纵向宽度为180mm。按照数字图像处理的尺寸在C4D中绘制出枕垫表面下陷形态如图5.11(b)所示。

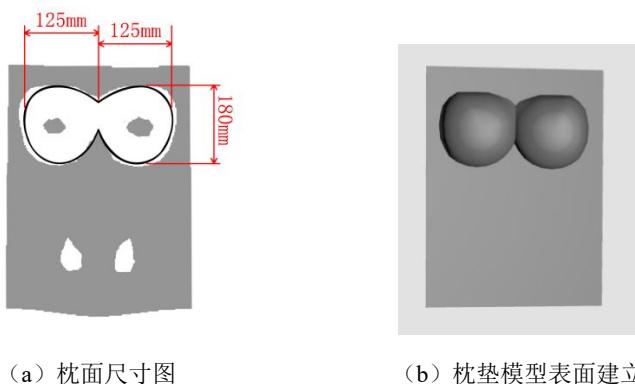


图5.11 图像处理后枕垫接触面形态

本节通过数字图像处理后的尺寸进行建模，设计的组合型功能枕垫是对具有胸部下陷的枕垫进行切割设计，通过5.1的研究可知胸部下陷厚度为50mm，枕垫整体厚度为130mm，长度为480mm，宽度为350mm。因此考虑到胸部下陷厚度将枕垫自上而下进行切割处理，切割尺寸如下图5.12所示。使用时可以随意切换各

枕垫块面之间的堆叠方式以满足不同胸部大小和性别使用，各海绵堆块间采用暗扣和枕套控制连接以防止相互滑移。使用堆叠方式如图中 5.13 所示，本小节主要探究下最主要的两种使用方式的对比情况。



图 5.12 堆叠功能型枕垫切割尺寸

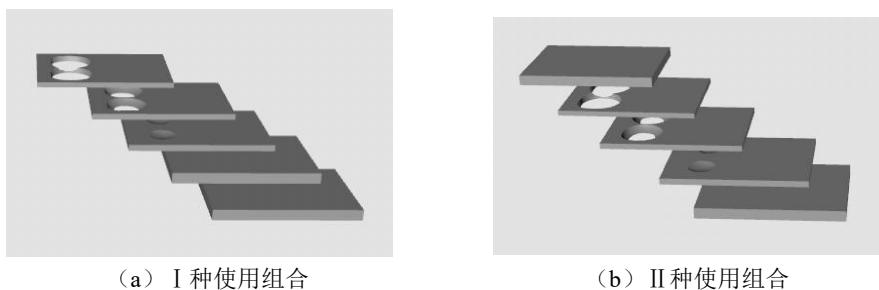


图 5.13 不同堆叠型使用组合的枕垫

5.2.2 堆叠型乳胶枕垫仿真及分析

本小节对两种堆叠组合使用方式的枕垫进行枕垫模型仿真实验，对手机环境下和电脑环境下两种不同使用环境进行仿真，将仿真的枕垫应力图展示于图 5.14-5.15 所示。由图可知相同人体使用 I 种使用组合和 II 种使用组合都能起到缓压的效果，因此胸部中空无论在枕垫表面还是在内部都有缓解胸部应力的作用。且 II 种使用效果与 I 使用效果差距并不大，I 种使用组合应力主要集中于两胸部中间凸起部位，后续优化可以考虑胸部统一凹陷。II 种使用组合考虑接触面是平面，因此应力分布与平板枕垫应力分布相似，胸部应力较为集中且应力较大。因此堆叠组合型枕垫设计既满足了不同使用人群使用，又能够缓解应力以及美观和创新。

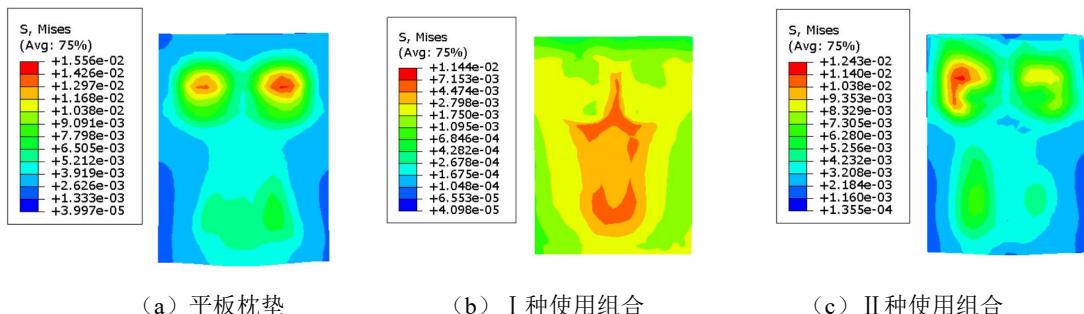


图 5.14 电脑环境下的枕垫应力云图

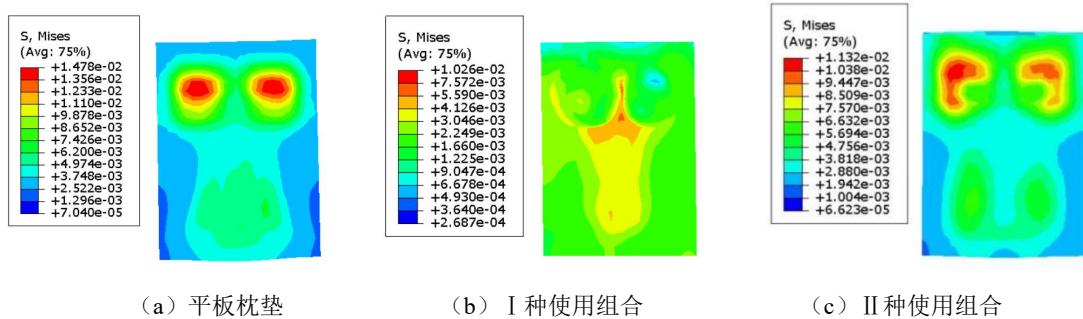


图 5.15 手机环境下的枕垫应力云图

5.2.3 堆叠型记忆海绵枕垫仿真及分析

记忆海绵型堆叠枕垫设计过程参照乳胶堆叠型枕垫设计，并对I型使用组合进行仿真模拟与平板枕垫进行对比。图 5.16、5.17 是电脑环境下和手机环境下两种枕垫的对比，对比可以发现记忆海绵材料的堆叠型枕垫表面应力更小，且胸部中空部分因下陷设计应力值非常的小，但是该种中空设计也会存在下陷边缘会有局部应力较大值。

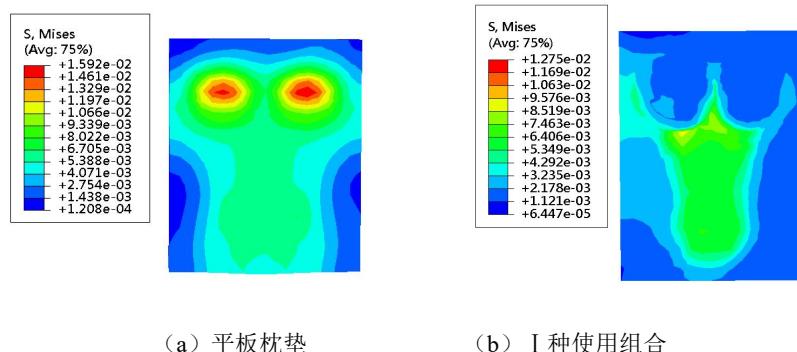


图 5.16 电脑环境下的枕垫应力云图

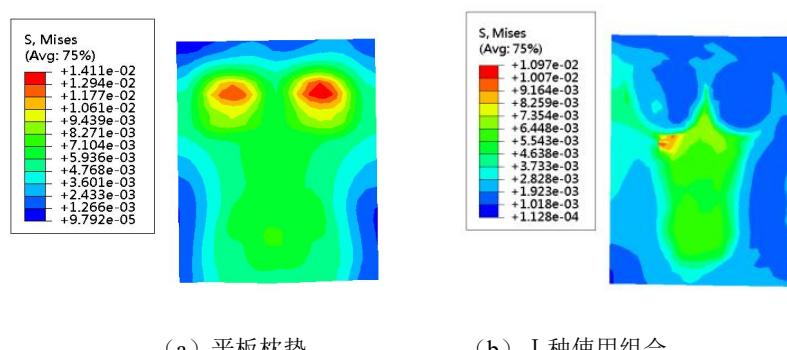


图 5.17 手机环境下的枕垫应力云图

5.3 基于曲面简化枕垫设计模式

5.3.1 非颈椎支撑型乳胶枕垫设计及仿真

简化设计模式是在第四章和第五章枕垫设计的研究基础上优化改进的。考虑胸部和腹部下陷可以起到缓压的效果，并结合5.2研究的II号曲面枕垫和5.3研究的堆叠型枕垫尺寸数据，设计出左右胸部间没有凸起连接处且胸腹部均有合理下陷的简化枕垫。尺寸设计如图5.18(a)所示。按照枕垫尺寸进行建模如图5.18(b)所示，与人体模型组合装配进行仿真实验。

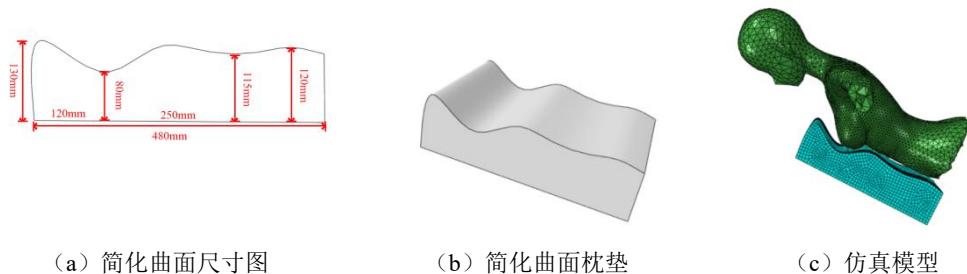


图 5.18 简化曲面枕垫设计流程

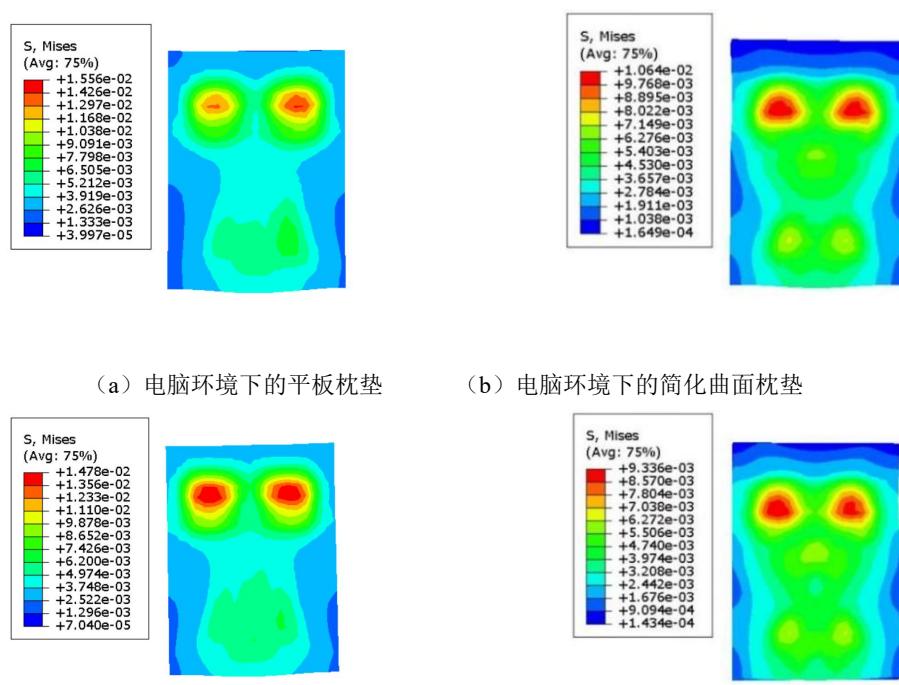


图 5.19 两种环境下优化曲面仿真枕垫应力图

图 5.19 是两种使用环境下的优化枕垫仿真结果。可以明显观察到简化后的枕垫具有明显的缓压效果，且造型更加简单。分区起伏设计能够有效的贴合人体曲线达到对应的降低应力作用。胸部最大应力值也在缩小，简化曲面设计有效的缩小了两种环境下的应力值差距，对比平板枕垫两种环境下应力值相差较大。

5.3.2 颈椎支撑型乳胶枕垫设计及仿真

本课题对枕垫的研究除枕垫接触面缓压方向的研究之外，通过问卷调研和人体实验得知颈部支撑和颈部舒适度在枕垫设计中也尤为重要。在颈椎病日益严重且年轻化的趋势下，辅助功能性枕垫设计需要兼顾部分身体舒缓作用。本节之前的这些设计以接触面的缓压为主，因此实验中可以观察到枕垫上接触面应力经过设计处理后均有降低的情况。

通过查阅文献对人体颈椎构造以及颈椎病的了解可知，目前颈椎牵引治疗是非手术治疗最主要的治疗手段，考虑到颈椎牵引仪器较重且使用麻烦，本课题将颈椎牵引理疗原理设计应用在枕垫中，使日常使用中可以做到一个颈椎的简单舒缓作用。颈部牵引治疗主要有颈部前屈和颈部后伸两种情况。且颈椎前屈角度以 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 为宜^[21-22]，颈椎后伸角度以 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间为宜，如图 5.20 所示。后伸牵引角度为 15° 时对恢复颈椎的正常生理弧度有效，颈部应力也不会集中，颈后部肌群可以处于较为松弛的状态。而本课题研究的枕垫处于卧位使用，因此产品使用时以颈部适当后伸为主，后伸角度选择 15° 进行产品设计。

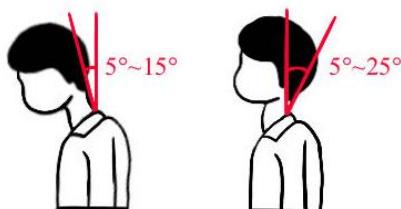


图 5.20 颈部牵引治疗角度

由于需要进行颈部支撑，本课题测量的 18-25 岁年轻女性实验者平均上身长为 520mm。5.4 中未考虑颈部支撑的枕垫初始长度为 480mm，延长后的枕垫长度为 520mm，因此增加长度为 40mm。

胸部及腹部尺寸为 5.4 简化后提炼的枕垫尺寸长 480m，宽 350m，高 130m，颈部支撑部分需要抬升 15° ，按照以上需求进行枕垫平面尺寸的绘制。由于长

度增加了 40mm, 颈部支撑角度增加了 15° , 因此增加高度为: $H = 40\text{mm} \times \tan 15^\circ$, $H=10.7\text{mm}$. 取整数枕垫压缩后需抬升 11mm。

除考虑尺寸外, 需对颈部支撑应力大小进行测量。为测出较为精确的局部范围应力值大小, 选择图 5.21 (a) 中的广州市斯巴拓电子科技有限公司型号为 SBT674-20KG 的图显推拉力器, 由直径 1.4cm, 高 0.9cm, 量程 200N, 误差在 0.1% 范围内的小型圆柱传感器、显示屏组成。将感应器放置于颈部与乳胶枕垫材料接触的部位进行应力采集, 依旧选择本课题研究的 50 分位人体数据的实验者进行图 5.21 的应力实验。分别进行 5 次测试实验, 每次待数据稳定后进行记录, 记录后的数据进行平均数求值。



(a) 感应器测量位置图



(b) 颈部应力测试实验

图 5.21 颈部支撑枕垫设计流程

表 5.3 颈部应力测试数据

材料	峰值/Kpa	平均值/Kpa
乳胶	12.65	10.03

由表 5.3 颈部应力测试结果可知颈部支撑平均应力值为 0.01Mpa。结合第三章中乳胶微元形变量、应力与厚度的数学模型, 根据数学模型进行枕垫颈部厚度的反求。假设乳胶枕垫的颈部受压变形后增加的抬升厚度为理想的 11mm, 且人体此时颈部应力 0.01Mpa, 则由 (3-4) 式可得

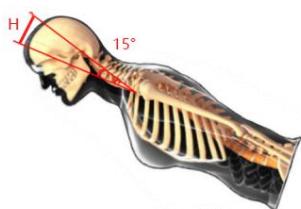
$$f(x, y) = -6.376 + 0.2763x + 2192y + 55.49xy - (2.335e + 05) y^2 - 1764xy^2 + (7.799e + 06) y^3 \quad (5-1)$$

其中 $f(x, y)$ 为乳胶泡沫变形量, x 为厚度单位 mm, y 为应力值, 单位 MPa。

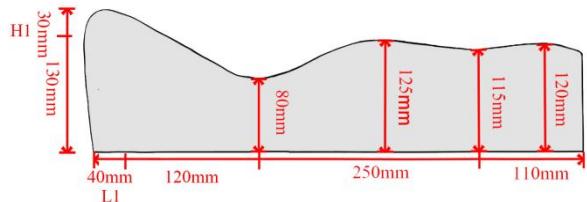
取 $y=0.01$, $f(x,y)=x-11$, 代入求解得 $x=29.76\text{mm}$ 。即乳胶枕垫颈部增加厚度为 30mm 下压后得枕垫颈部高度抬升 11mm, 增加枕垫高度为 19mm。

因此增加颈部支撑后枕垫总高度为 160mm, 长度为 520mm, 宽度为 350mm。流程如图 5.22 所示。5.22 (a) 为趴卧姿势下达到颈部后仰 15° 的舒缓效果, (b)

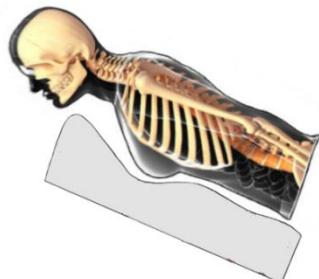
为颈部支撑枕垫尺寸图，其中 H 为支撑后抬升高度 11mm，H1 为增加的枕垫高度 30mm，L 为枕垫总长度，L1 为增加的枕垫长度 40mm。



(a) 颈部拉伸情况



(b) 颈部支撑枕垫尺寸图



(c) 枕垫组合使用图

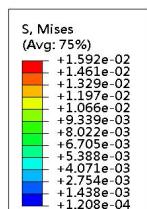


(d) 乳胶枕垫产品图

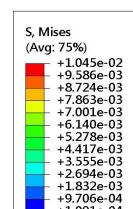
图 5.22 颈部支撑乳胶枕垫设计流程

5.3.3 非颈椎支撑型记忆海绵枕垫设计及仿真

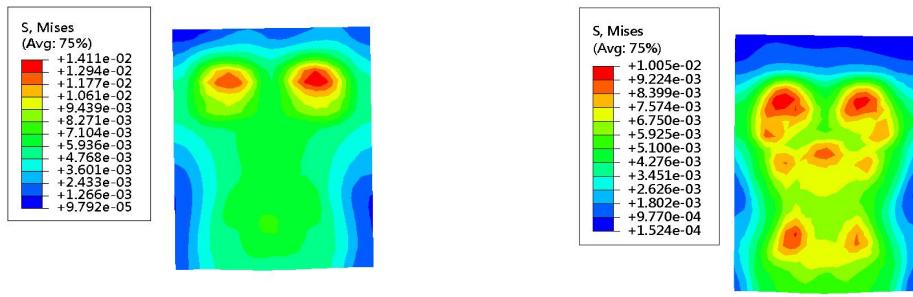
本课题第四章的对比实验证明记忆海绵材料作为枕垫材料也具有优势，且记忆海绵生产成本较乳胶海绵低，性价比更高。因此记忆海绵可作为缓压性能强性价比高的枕垫。本小节将 5.3.1 研究设计的枕垫造型更换成记忆海绵材料进行仿真实验，其他实验步骤以及枕垫尺寸同乳胶枕垫仿真实验。与记忆海绵平板枕垫进行应力值对比，探究记忆海绵枕垫设计的可行性。



(a) 电脑环境下的平板枕垫



(b) 电脑环境下的简化曲面枕垫



(c) 手机环境下的平板枕垫

(d) 手机环境下的简化曲面枕垫

图 5.23 两种环境下优化曲面仿真枕垫应力图

图 5.23 为非颈部支撑型简化设计记忆海绵枕垫仿真结果对比应力图, 由图可知简化设计后应力值明显有得到缓解, 但是将应力分散后会发现记忆海绵材料会分散形成应力小峰值, 说明其平衡应力效果不如乳胶海绵。

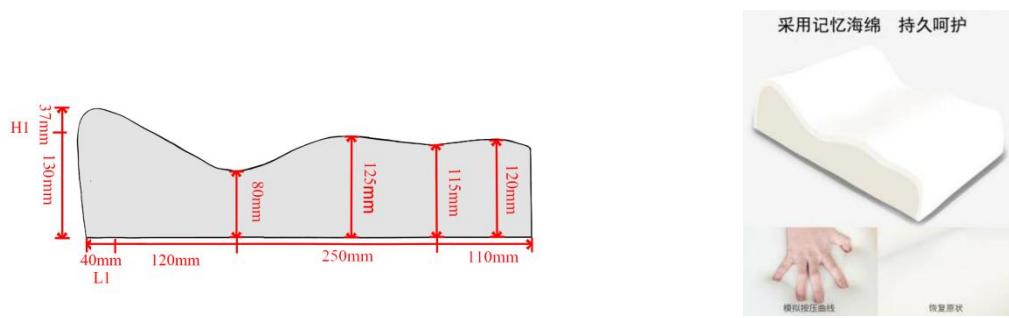
5.3.4 颈椎支撑型记忆海绵枕垫设计及仿真

颈部支撑型记忆海绵枕垫的设计流程与乳胶枕垫相同, 根据颈部支撑下压后需抬升 11mm, 结合第三章中的记忆海绵形变量公式 (3-5) 进行反推计算, 其中颈部支撑应力值 $y=0.01\text{MPa}$, 形变量 $f(x,y)=x-11, x$ 为枕垫厚度。

$$f(x,y) = -23.6 + 0.1775x + 8770y + 93.8xy - (9.76e+05) y^2 - 3763 xy^2 + (3.424e+07) y^3 \quad (5-2)$$

其中 y 为应力, 单位 MPa , x 为厚度, 单位 mm , $f(x,y)$ 为形变量。带入公式求得 $x=37.1\text{mm}$ 。即记忆海绵枕垫颈部增加厚度为 37mm 下压后得枕垫颈部高度抬升 11mm, 增加枕垫高度为 26mm。

因此增加颈部支撑后枕垫总高度为 167mm, 长度为 520mm, 宽度为 350mm。图 5.24 为颈部支撑枕垫尺寸图, 其中 H_1 为增加的枕垫高度 37mm, H_2 为总高度, L 为枕垫总长度, L_1 为增加的枕垫长度 40mm。



(a) 记忆海绵颈部支撑枕垫尺寸图

(b) 颈部支撑枕垫产品图

图 5.24 记忆海绵颈部支撑枕垫

5.4 小结

本节探究基于人体应力分布进行枕垫的设计方法和数字化仿真方法。将第四章中研究对比结论出的枕垫优适材料乳胶和记忆海绵作为本章设计研究的枕垫材料。以三种不同的设计模式设计出多款不同接触面结构的枕垫，并使用 Abaqus 进行仿真模拟验证设计后的枕垫应力值，以减少枕垫成品的测试。

(1) 第一种是从应力分布数据到曲面形态的设计模式，本章将第四章得到的两种环境下的乳胶枕垫表面应力值导出，在 matable 中进行数据的降噪和平滑处理。完成处理之后，将数据反馈出来的曲面形态保存输入到 C4D 中进行枕垫外形的绘制。整体尺寸经过市场调研和人体数据统计设定为 $480\text{mm} \times 350\text{mm} \times 130\text{mm}$ 。将三款不同深度曲面模型在 Abaqus 中建立装配成枕垫的使用仿真模型进行实验，实验结果显示 II 号曲面即胸部下陷 50mm 的枕垫表面最为合适，人体表面应力值和枕垫应力值都最小。

(2) 第二种是基于数字图像处理的设计模式，枕垫表面形态的设计是通过平板枕垫应力云图进行数字图像处理，将应力云图处理成二值化图片，勾勒出枕垫胸部的接触形态和下陷 50mm 的位置。并将整体枕垫尺寸分割成 5 份，每一层可以相互叠堆使用，该设计可以满足不同胸型和性别使用者的需求。该款设计堆叠型枕垫建立了两种最主要使用情况的仿真模型，I 号模型是不交换任何枕垫层进行仿真实验，II 号模型是将底下平面层放置于最上层，该模式有中间下陷的情况。通过对两种模型进行仿真实验，实验结果显示两种使用模式的枕垫都能有效的缓解表面应力。该设计不仅兼顾缓压作用，还具有创新作用。

(3) 第三种是基于简化曲面处理的颈部非支撑型枕垫设计，该款枕垫从侧面整体进行凹凸的切割，接触面纵向统一高度。建立的简化曲面枕垫的仿真模型结果也表明该设计更够有效缓压，同时降低工艺成本和时间。

(4) 第四种是增加了颈部支撑的优化枕垫设计。优化后的枕垫支撑颈部向后拉伸 15° ，可以有效的缓解颈部疲劳进行颈部舒缓。该设计方法通过材料形变量的数学模型反求得出乳胶枕垫增加颈部支撑的长度为 40mm，支撑高度为 30mm。枕垫总体长度为 520mm，高度为 160mm。记忆海绵枕垫增加颈部支撑的长度为 40mm，支撑高度为 37mm。枕垫总体长度为 520mm，高度为 167mm。

第6章 未来与展望

6.1 研究工作总结

本课题主要从枕垫接触面缓压入手，以缓压枕垫设计为目标进行。基于枕垫应力分布配合算法程序进行枕垫曲面反求。设计采用有限元法作为仿真方式，通过枕垫组合使用仿真模型验证枕垫的缓压情况和仿真实验设计的有效性。

本文第一部分主要有如下几点：（1）产品设计重点归纳：第一步通过市场调研对市场上流行且热门的枕垫产品就功能、优缺点、尺寸材质等方面进行产品调研，目的在于归纳枕垫类产品的设计重点与尺寸类型。（2）产品消费需求调研：本文进行了一份关于趴卧习惯和颈椎舒适性探究的调查问卷，问卷包含消费者对趴卧姿势的习惯程度、颈椎舒缓的关注度、以及枕垫产品需求、关注点等，调研结果作为后续的枕垫产品设计参考。（3）枕垫体压舒适性评价：趴卧姿势舒适度评价实验是根据市场调研和问卷情况进行的，选择 18-25 岁年轻女性 61 名进行枕垫角度对“玩手机”或“用电脑”两种手机和电脑场景下趴卧姿势舒适度的探究。试验结果发现使用辅助型趴卧垫能够有效地缓解趴卧姿势对肩部、肘部的压迫。总结枕垫设计主要拟解决胸腹部缓压和颈部支撑舒缓。合理的抬升角度和枕垫设计还能够兼顾电脑和手机。（4）枕垫使用角度和人体参数采集：这部分经过反复进行的舒适性实验，记录实验者身体尺寸和不同场景下使用趴垫角度的选择。经过 spss 相关性分析出身高和上臂长对两种环境下使用枕垫角度的回归方程。选择实验者中身高臂长处于 50 分位的实验者身材数据作为本课题后续研究的人体参数。（6）体压实验：该实验选择普通款海绵和乳胶枕垫进行人体体压实验并绘制了二维应力云图，观察出人体使用枕垫时主要的应力集中于胸腹部。

第二部分主要探究了枕垫材料选择：（1）5 款材料性能研究：本文选择了不同硬度的 I 号、II 号、III 号海绵、以及具有较好应力松弛性能的记忆海绵和缓压效果明显的乳胶海绵，分别进行密度的测算以及压缩应力应变、拉伸应力应变的物理实验。（2）材料压缩仿真实验：该部分通过有限元软件 Abaqus 对材料进行压缩仿真建模，输入各海绵材料的物理性能实验数据进行超弹泡沫实验数据法、超弹泡沫参数法和低密度泡沫本构模型法 3 种两种仿真实验。仿真结果显示无论是哪一种海绵材料选择低密度泡沫本构模型的仿真方法拟合度 R^2 均超过 0.99，误差百分比均小于 0.07。拟合效果较好。

本文第三部分建立了人体与枕垫的仿真模型：（1）人体建模：这一部分通过3Dmax、Hypermesh和Abaqus三个软件分别进行了模型尺寸修改、网格划分、模型组建和仿真。并对胸部脂肪本构模型和人体与枕垫之间的微元感应片本构参数进行多次实验对比，对比结果为人体胸部本构模型选择Hyperplastic Ogden、微元感应片使用弹性模量=0.15 泊松比=0.49 弹性形变本构模型来反映人体表面应力大小更合适。同时拟合了人体表面应力值和应力分布验证了枕垫组合使用仿真模型的可靠性。（2）平板枕垫实验：本文建立了 $500\text{mm} \times 450\text{mm} \times 200\text{mm}$ 的平板枕垫仿真实验以获得更多更全面的人体枕垫应力数据。分析了在电脑环境下和手机环境下的I号、II号、记忆海绵和乳胶海绵四款枕垫的最大应力值、平均应力值和纵向应力曲线。结果可知电脑环境下的应力值均大于手机环境下的应力值，考虑到手机环境下人体俯卧枕垫的受力面积更多受力更加分散。同时无论是哪种使用情况何种材料枕垫应力都主要分布在上胸部和腹部两个位置，因此后续设计也以这两个位置的缓压为主。

第四部分是基于枕垫的仿真结果进行产品设计：（1）基于从应力分布数据到曲面形态的设计模式：该设计模式主要使用了matlab软件对仿真实验后的枕垫平面各点数据进行平滑降噪映射处理，处理后的数据点以平面图形的模式保存导入到C4D中进行枕垫模型绘制。将三种通过算法程序得出枕垫表面形态的枕垫建立仿真模型，并分析枕垫表面应力值、人体表面应力值等发现乳胶和记忆海绵枕垫都是胸部下陷深度为50mm时应力值最低。（2）基于数字图像处理的设计模式：该设计模式通过图像二值化处理平板枕垫应力云图，划分枕垫表面区域。对胸部区域弧形下陷50mm，并且以20mm为距离分割枕垫为5份的堆叠式枕垫，可以随意更换每一层使用。枕垫满足了不同胸型和不同性别的使用者使用。两种不同使用方式的堆叠型枕垫仿真实验结果显示：无论是哪一种使用方式与平板枕垫相比都能有效的降低表面应力起到缓解效果。（3）基于曲面简化枕垫的设计模式，为了降低工艺成本，统一接触面纵向曲线结构。简化版的枕垫仿真结果也证实了该设计不仅节约了工艺成本，同时也具有一定的缓压效果。（4）本节最后考虑到枕垫设计除了枕垫接触面缓压还需要设计颈部的支撑舒缓，根据乳胶海绵和记忆海绵形变量和应力与厚度数学模型进行枕垫颈部尺寸反推。设计出最终尺寸为长度520mm、高度160mm、宽度350mm 颈部具有支撑的优化乳胶枕垫。尺寸为长度520mm、高度167mm、宽度350mm 颈部具有支撑的优化记忆海绵枕垫。

6.2 未来研究展望

本文通过有限元仿真设计方法构建人体与枕垫的三维模型，基于应力分布进行枕垫产品设计。但在研究过程中实验设计方面仍存在不足之处，未来将会在以下几个方面进行改进和深入研究：

- (1) 本文人体模型建立划分不够细致，未来会对人体模型进行骨骼、脂肪、皮肤的划分进行建模。
- (2) 本文实验的人体上半身的颈椎腰椎部分不能活动舒展，后续通过学习研究可以建立更加细致灵活的人体仿真模型，模拟更加真实的产品使用环境。
- (3) 本文研究对象范围较小，后续会拓宽研究人群，不仅限于女性群体研究。会更加关注具有颈椎病、腰椎病患者的研究。
- (4) 本文对枕垫枕面设计验证时仅使用女性人体模型验证，未来需要增加男性人体模型以及不同胸型人体模型进行验证，以达到更准确的设计优化目的。
- (5) 本文研究的枕垫仅从趴卧姿势入手，未来将会丰富枕垫的使用功能，设计考虑趴卧、仰卧等不同姿势使用的多功能枕垫。
- (6) 本文设计的最终产品由于国内疫情环境影响，并未做最终产品的大范围使用反馈实验，后续将会完善最终产品的使用人群反馈分析实验。

参考文献

- [1] 柏媛, 吴微微. 枕头的起源及其发展[J]. 设计, 2014, 000(009): 55-56.
- [2] 伍海环. 论中国枕具文化艺术[J]. 美术大观, 2006, 000(007): 70-71.
- [3] 崔蒙蒙. 浅析睡枕舒适性的研究现状[J]. 家具, 2015(1): 47-50.
- [4] 张紫艳, 王瑄, 沈兰萍. 睡枕的研究现状[J]. 合成纤维, 2018, 047(008): 34-36.
- [5] Katkeaw K, Khangkhamano M, Kokoo R. Microbubble technology for natural rubber latex foam production: The use of various gas-filled microbubbles[J]. Cellular Polymers: An International Journal, 2022(1):41.
- [6] Thongpin C, Muanwong A, Yanyongsak J, et al. Effect of ENR Contents on Cure Characteristic and Properties of NR/ENR/EVA Foam[J]. Materials Science Forum, 2017, 889:45-50.
- [7] 刘益军. 聚氨酯原料及助剂手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [8] 吕民, 刘益军. 聚氨酯泡沫塑料[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [9] 孟素青, 甘经虎, 李海朝, 任明月. 一种慢回弹聚氨酯汽车座椅组合料的开发[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2019, 17(02):34-36+60.
- [10] 王婷. 枕具的品类与文化内涵探究[J]. 收藏与投资, 2021, 12(05):140-142.
- [11] Jeremias J. de Klerk, Mandi Joubert, Hendrikjan F. Mosca. Is working from home the new workplace panacea? Lessons from the COVID-19 pandemic for the future world of work[J]. SA Journal of Industrial Psychology, 2021, 47(0):
- [12] Javad Koohsari Mohammad, Nakaya Tomoki, Shibata Ai, Ishii Kaori, Oka Koichiro. Working from Home After the COVID-19 Pandemic: Do Company Employees Sit More and Move Less? [J]. Sustainability, 2021, 13(2):
- [13] Weitzer J, Papantoniou K, Seidel S, et al. Correction to: Working from home, quality of life, and perceived productivity during the first 50day COVID19 mitigation measures in Austria: a crosssectional study[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2021.
- [14] 张蕾. 基于人体工学的多功能睡枕研究与产品开发[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2019:83.
- [15] 张思懿. 选择最适合你的睡眠系统——专访 Swissflex 瑞福睡市场副总监 Jens Fischer[J]. 优品, 2013(03):180.
- [16] 谈乐斌, 张秋生. 以人为本的设计理念[J]. 人类工效学, 2004, 10(001): 63-65.
- [17] 柯舒雅. 论以人为本的设计理念的家具设计[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2015(07):135.
- [18] 阮宝湘, 邵祥华. 工业设计人机工程[M]. 机械工业出版社, 2010.
- [19] GB/T10000-1988 《中国成年人体尺寸》 [S]

- [20] Webb R, Brammah T, Lunt M, et al. Prevalence and predictors of intense, chronic, and disabling neck and back pain in the UK general population[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2003, 28(11): 1195-202.
- [21] 陈威烨, 王辉昊, 梁飞凡. 牵引治疗颈椎病的研究进展[J]. 中国康复医学杂志 , 2016, 31(5): 599-601
- [22] 尚经轩. 颈椎牵引治疗神经根型颈椎病的研究进展 [J]. 黑龙江科技信息 , 2016, 21(30): 151-152.
- [23] Khan RR, Awan WA, Rashid S, et al. A randomized controlled trial of intermittent Cervical Traction in sitting Vs. Supine position for the management of Cervical Radiculopathy[J]. Pak J Med Sci, 2017, 33(6): 1333-1338.
- [24] Borman P, Keskin D, Ekici B, et al. The efficacy of intermittent cervical traction in patients with chronic neck pain[J]. Clin Rheumatol, 2008, 27(10): 1249-1253.
- [25] Hamdy A , Azmy O , Lotfy R , et al. Multicenter randomized controlled trial assessing the impact of a cervical traction maneuver (Amr's maneuver) on the incidence of postpartum hemorrhage[J]. International journal of gynaecology and obstetrics: the official organ of the International Federation of Gynaecology and Obstetrics, 2019, 144(1):56-61.
- [26] 梁立君. 中医针灸联合推拿手法治疗椎动脉型颈椎病的疗效[J]. 中国医药指南 , 2019, 17(2): 163-164.
- [27] 李倩. 针刺联合理疗治疗颈椎病的效果评价[J]. 当代医药论丛, 2018, 16(11): 109-110.
- [28] Tsai C T, Chang W D, Kao M J, et al. Changes in blood pressure and related autonomic function during cervical traction in healthy women[J]. Orthopedics, 2011, 34(7): e295- 301.
- [29] Yang J D, Tam K W, Huang T W, et al. Intermittent cervical traction for treating neck pain: a Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2017, 42(13): 959- 965.
- [30] 齐威. ABAQUS 6.14 超级学习手册[M]. 人民邮电出版社:, 201606.673.
- [31] 周炬. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解[M]. 人民邮电出版社:, 201703.482.
- [32] 庄苗. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 清华大学出版社,2009
- [33] 王沿朝, 秦忠宝, 桑媛园, 谢惠祥, 刘彬. ABAQUS 数值仿真在理论力学教学中的运用[J]. 教育教学论坛,2021(38):132-135.
- [34] 王笑语, 杨蕾, 陈顺微, 邓倩因, 王雪琴. 中国青年男性侧睡枕高度相关因素研究[J]. 人类工效学, 2021,27(1): 80-86
- [35] 张俊良. 特瑞堡公司率先将聚氨酯泡沫材料应用于赛车头枕[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2018, 16(05): 48.
- [36] 陈小丽,宁飞扬,王雪琴,张蕾. 一种斜靠平卧等多角度护脖护脸枕[P]. 浙江省: CN209152941U,2019-07-26.
- [37] 启萌, 常玉文. 多功能保健睡枕[P]. 天津: CN201012003,2008-01-30.
- [38] 朱航凯. 一种自适应轮廓的汽车头枕[P]. 浙江省: CN212555950U,2021-02-19.
- [39] 杨学慧. 一种多功能安抚枕[P]. 江苏省: CN211065876U,2020-07-24.
- [40] 邱昭晖, 李艺光. 一种可折叠的枕垫[P]. 广东省: CN211673562U,2020-10-16.

- [41] 杨艳, 熊超, 蔡晶, 倪诚斌. 一种甲状腺手术用多功能枕垫[P]. 江西省: CN212489383U,2021-02-09.
- [42] 李红. 辅助午睡产品的设计研究与开发[D]. 浙江工业大学,2017.
- [43] 孙梦情, 张蕾, 王雪琴.缓压型睡枕的头部压力分析[J]. 人类工效学,2019,25(04):62-64+73.
- [44] 何艳梅,陈英,唐世君,李宁. 枕型对睡眠舒适性的影响[J]. 北京服装学院学报,2005(04):40-47.
- [45] 侯建军, 申黎明. 符合睡眠舒适性的人机枕头设计研究[J]. 包装工程,2014,(08):21-25.
- [46] 侯建军, 申黎明. 睡枕高度对仰卧位睡眠舒适性的影响[J]. 家具,2013,34(01):44-46+57.
- [47] Son J, Jung S, Song H, et al. A Survey of Koreans on Sleep Habits and Sleeping Symptoms Relating to Pillow Comfort and Support[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(1):302.
- [48] Lee J S , Lee S K . Comparison of Neck Pain, Shoulder Pain, and Comfort between Buckwheat and Latex Pillows[J]. Korean Journal of Health Promotion, 2019(2).
- [49] Ren S, Wong D W C, Yang H, et al. Effect of pillow height on the biomechanics of the head-neck complex: investigation of the cranio-cervical pressure and cervical spine alignment.[J]. PeerJ Inc. 2016(4).
- [50] Fazli F, Farahmand B, Azadinia F, et al. A preliminary study: The effect of ergonomic latex pillow on pain and disability in patients with cervical spondylosis[J]. Medical journal of the Islamic Republic of Iran, 2018, 32(1):470-474.
- [51] Xu M, Chen X, Wang J, et al. Finite element analysis modeling research on the compression process of cotton fiber assembly:[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(11-12):1414-1427..
- [52] 戴正烈. 基于复合材料的新型纤维床垫设计与力学分析[J]. 科技创新导报, 2008, (12): 150-1.
- [53] 刘洪浩. 基于压力分布的座椅正向设计方法研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [54] 王广彬. 面向理想压力分布的人椅界面正向设计研究[D]. 吉林大学, 2019.
- [55] Rui, Dan, Xue-rong, et al. Finite element simulation of pressure, displacement, and area shrinkage mass of lower leg with time for the top part of men's socks[J]. Journal of the Textile Institute, 2015.
- [56] 雷鹏, 付志强, 张蕾. 基于 Abaqus 低密度泡沫模型的 EPE 冲击仿真模拟[J]. 塑料科技, 2019, 47(09): 89-94.
- [57] Jifang Zeng, Hong Hu. Finite Element Analysis of Three-Dimensional (3D) Auxetic Textile Composite under Compression[J]. Polymers,2018,10(4).
- [58] 白晓鹏, 丁智平, 唐先贺. 微孔聚氨酯弹性材料的力学性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(06): 32-7.
- [59] Xu Minjun, et al. Finite element analysis modeling research on the compression process of cotton fiber assembly[J]. Textile Research Journal,2020,90(11-12).
- [60] Jifang Zeng, Haijian Cao, Hong Hu. Finite element simulation of an auxetic plied yarn structure[J]. Textile Research Journal,2019,89(16).

- [61] Jiahong Wu, Zimin Jin, Jing Jin, Yuxiu Yan, Jianwei Tao. Study on the tensile modulus of seamless fabric and tight compression finite element modeling[J]. Textile Research Journal,2020,90(1).
- [62] Shuangqing Wang, Huile Zhang, Huimin Chen, Yi Zhong, Xiaoli Yue. A numerical model of the open-width coupling drying process for cotton fabrics based on the theory of heat and mass transfer in porous media[J]. Textile Research Journal,2020,90(13-14).
- [63] Gold J E, Driban J B, Yingling V R, et al. Characterization of posture and comfort in laptop users in non-desk settings[J]. Applied Ergonomics, 2012, 43(2): 392-399.
- [64] Lee S, Kang H, Shin G. Head flexion angle while using a smartphone[J]. Ergonomics, 2015, 58(2): 220-226.
- [65] Young J G, Trudeau M, Odell D, et al. Touch-screen tablet user configurations and case-supported tilt affect head and neck flexion angles[J]. Work-a Journal of Prevention Assessment & Rehabilitation, 2012, 41(1): 81-91.
- [66] Christine, Justin G. Young,Matthieu Trudeau, Dan Odell,Kim Marinelli, Jack T. Dennerlein. Touch-screen tablet user configurations and case-supported tilt affect head and neck flexion angles[J]. Work,2011,41(1).
- [67] 黄榕熙, 胡国清, 陈雄, 刘文艳. 人体压力分布测量技术的研究现状与发展综述[J]. 生命科学仪器, 2006(06):10-15
- [68] 胡琼. 基于体压分布的床垫舒适性选择方法[P]. 四川: CN106820763A,2017-06-13.
- [69] 刘军. 汽车座椅海绵发泡工艺分析及参数优化[D]. 江西农业大学,2013.
- [70] 徐培林, 张淑琴. 聚氨酯材料手册[M], 北京: 化学工业出版社, 2002
- [71] 吴莹. 记忆海绵体位垫在侧卧位手术中预防压力性损伤的效果研究[D]. 南昌大学, 2020.
- [72] 王莉梅, 沈蕾, 杨夏林. 自制记忆海绵枕垫在全麻俯卧位手术中的应用[J]. 海南医学, 2016, 27(19): 3244-3246.
- [73] 沈婷. 早产儿俯卧位用具的制作[J]. 护理学报, 2015,22(22):70-71.
- [74] 刘通, 李普旺, 李思东. 天然乳胶制品性能的影响因素研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(02): 353-356.
- [75] 孙梦情. 基于压力分布的乳胶枕设计研究[D]. 浙江理工大学,2021.
- [76] 王香爱, 张洪利, 王洋. 东南亚天然橡胶胶乳的研究进展 [J]. 中国胶粘剂, 2017,26(06):56-60.
- [77] GB/ 10802-1989 《软质聚氨酯泡沫塑料》[s]
- [78] 胡琼. 基于体压分布的床垫舒适性选择方法[P]. 四川: CN106820763A,2017-06-13.
- [79] 庄苗. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2009
- [80] 王沿朝, 秦忠宝, 桑媛园, 谢惠祥, 刘彬. ABAQUS 数值仿真在理论力学教学中的运用[J]. 教育教学论坛,2021(38):132-135.
- [81] 艾荣. 基于仿真方法的座椅舒适性客观评价研究[D]. 吉林大学,2020.

- [82] 管国阳, 孟政委, 谢立新, 彭南陵. 聚氨酯橡胶超弹性本构模型拟合效果评估[J]. 力学季刊, 2021, 42 (03) : 571-580.刊,
- [83] Ogden R W. Nonlinear Elastic Deformation[M] New York:Dover,1997:221.
- [84] Yeoh O H. Some forms of the strain energy for rubber [J]. Rubber Chemistryand Technology199365(5):751-771.
- [85] Arruda E M , Boyce M C . A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1993, 41(2):389-412.
- [86] Storåkers, B. On material representation and constitutive branching in finite compressible elasticity[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1986, 34(2): 125-145.
- [87] 苏高峰. 基于 ABAQUS 模拟孔结构对泡沫铝压缩及吸能性能的影响[D]. 太原科技大学, 2020.
- [88] 陈明艳. 我国女性体型特征及其内衣消费特点的分析[J]. 针织工业,2006(07):32-34.
- [89] 张超. 便携式超声皮下脂肪测厚仪的研发[D]. 北京工业大学,2020.
- [90] Oomens C W J, Bressers O, Bosboom E M H, et al. Can loaded interface characteristics influence strain distributions in muscle adjacent to bony prominences?[J]. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, 2003, 6(3): 171-180.
- [91] 陆璐. 文胸压力分布的数字化模拟研究[D]. 西安工程大学,2013.
- [92] Chen Shunwei, Wang Xueqin, Sun Mengqing, Deng Qiannan. Supine dynamic simulation and latex pillow design for Chinese women based on finite element method[J]. Textile Research Journal,2022,92(13-14).
- [93] 杨蕾. 基于有限元的缓压鞋垫设计研究[D]. 浙江理工大学,2022.000333.
- [94] 徐明, 夏群生. 体压分布的指标[J]. 中国机械工程, 1997(01): 65-68+124.
- [95] 田润雨. 基于青年女性胸部形态的文胸压力舒适性研究[D]. 武汉纺织大学,2022.000251.
- [96] 许小梅, 郝艳芳. 预见性护理措施对外科长期卧床患者褥疮的预防作用[J]. 实用临床医药杂志,2017,21(16):191-193.
- [97] 苏娜. 丝瓜络床垫特性对人—床界面体压分布影响的研究[D]. 安徽农业大学,2018.

附录 A 趴卧习惯和颈椎舒适性探究调查问卷

本调查问卷旨在了解当前成年人使用电子产品时的趴卧习惯和对颈椎脊柱舒适度的关注情况，请如实填写并回答下列问题，您所提供的结果，将有助于我们设计更为优质的创新枕垫产品，非常感谢！

1. 性别 【单选题】

- 男
- 女

2. 年龄 【单选题】

- 18-25 岁
- 25-40 岁
- 40-60 岁

3. 您在电脑中的颈椎脊柱舒适情况如何 【打分题】 (请填 1-7 数字打分)

1 分为非常差，2 分为差，3 为较差，4 分为轻微不适，5 分为正常，6 分为较好，7 分为非常好。

您的评分是 _____ 分。

4. 您一般在日常生活中，采取什么方法舒缓颈椎脊柱不适？ 【多选题】

- 端正坐姿、不跷二郎腿
- 避免长时间久坐，更换姿势或站立活动舒缓
- 电脑支架抬升屏幕高度
- 小燕飞、网红颈椎操等养护动作



- 使用颈椎牵引枕按摩放松



使用颈托避免颈椎曲度变直



去医院或者专业推拿店理疗



不采取任何养护措施

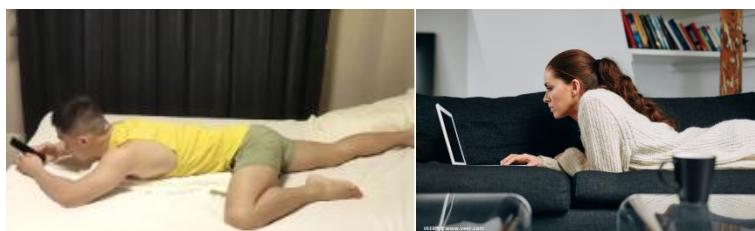
其他

5. 您在日常生活中是否因坐姿使用电子产品时间过长而感到腰颈酸痛? 【打分题】

(请填 1-7 数字打分)

1 分为从不,7 分为经常, 您的评分是 ____ 分

6. 您是否会在坐立过久后选择趴卧姿势使用电子产品? 【单选题】



是 否

7. 如果条件允许, 您是否愿意在手机电脑中选择趴卧姿势进行电脑或者放松?

【单选题】

愿意

- 无所谓
- 不愿意

8. 您不选择趴卧姿势的原因？ 【多选题】

- 习惯其他姿势
- 颈椎脊椎不好，不适合趴卧
- 眼睛离屏幕近容易坏眼睛
- 场地时间受限，上班或者上课时间段不能想趴就趴
- 其他

9. 一般情况下，您在趴卧姿势下使用电子产品的时长？ 【单选题】

- 10 分钟以内
- 10-20 分钟
- 20-30 分钟
- 30 分钟以上

10. 您在趴卧姿势使用电子产品时出现了哪些困扰问题？ 【多选题】

- 无法坚持太久
- 肘部受压迫感到疼痛
- 趴卧时肌肉紧张，无法得到休息放松
- 趴卧结束后肩背部疲累
- 其他

11. 请问您在挑选颈椎脊柱养护枕垫时会关注哪些点？ 【多选题】

- 外观美观度
- 尺寸合理性
- 材质舒适度
- 变形多用性
- 其他

附录 B 可调节枕垫设计的主观舒适性评价实验

本调研问卷旨在获得用户对影响趴垫舒适性的主观评价。请根据您的自身情况，对您所使用的趴垫的体验感受、以及各指标打分。请如实填写并回答下列问题，您所提供的结果，将有助于我们设计更为优质的创新枕垫产品。

1. 请填写您的姓名：

2. 您的真实身高：_____ cm 体重：_____ kg

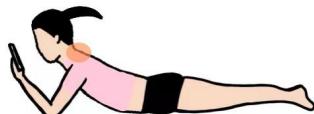
接下来，需要您根据任务内容完成几个简单的姿势，并根据示意图所示部位进行舒适度评分：

任务一：不使用趴垫时趴姿的舒适度评价（完成“看手机”动作后填写）

请您保持看手机动作 2 分钟，根据使用感受分别对该动作下颈椎、脊椎及其他相关部位舒适度表现进行主观评分

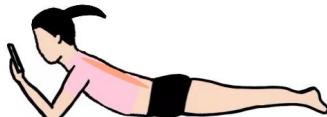
1. 请对当前姿势的“颈部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



2. 请对当前姿势的“脊椎舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



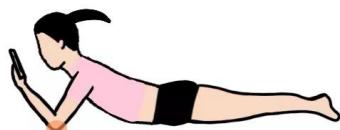
3. 请对当前姿势的“胸腹部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



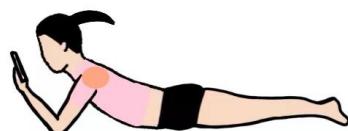
4. 请对当前姿势的“肘关节舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



5. 对当前姿势的“肩部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



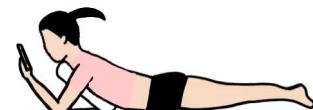
6. 请对该动作的“整体舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

任务二：趴垫舒适度评价（完成“看手机”和“用电脑”动作后填写）

借助趴垫完成趴姿动作，请您保持看手机动作 2 分钟和用电脑动作 2 分钟，根据使用感受分别对该动作下相关部位舒适度表现进行主观评分：

1. 进行“玩手机”动作时，请根据舒适需要，选择该姿势下最舒服的角度：

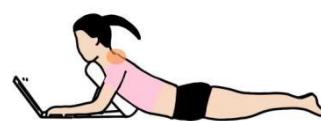


2. 进行“用电脑”动作时，请根据舒适需要，选择该姿势下最舒服的角度：



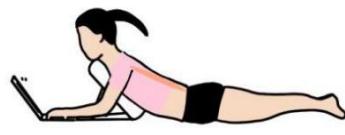
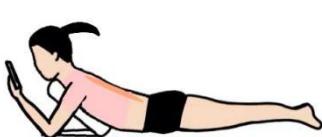
3. 请对当前姿势的“颈部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



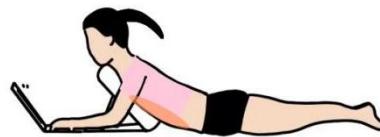
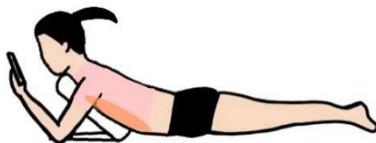
4. 请对当前姿势的“脊椎舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



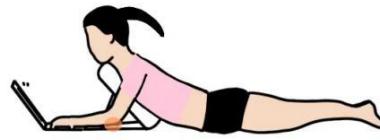
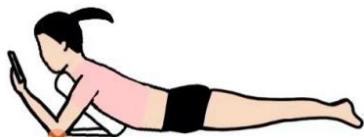
5. 请对当前姿势的“胸腹部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



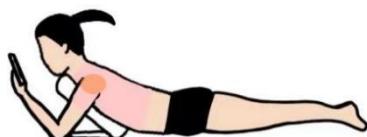
6. 请对当前姿势的“肘关节舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



7. 对当前姿势的“肩部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



8. 请对该款趴垫的“软硬度”进行评分:

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

9. 请对该款趴垫的“弹性”进行评分:

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

10. 请对该款趴垫的“整体舒适度”进行评分

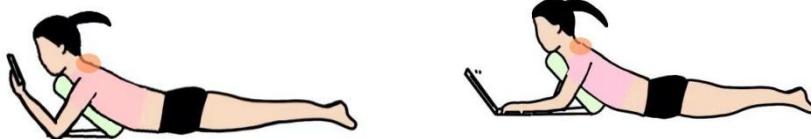
非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

任务三：趴垫舒适度评价（趴垫材质调整，完成“看手机”动作后填写）

将海绵垫换成中空乳胶垫，请您保持看手机动作 2 分钟，根据使用感受分别对该动作下相关部位舒适度的表现进行主观评分：

1. 请对当前姿势的“颈部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



2. 请对当前姿势的“脊椎舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



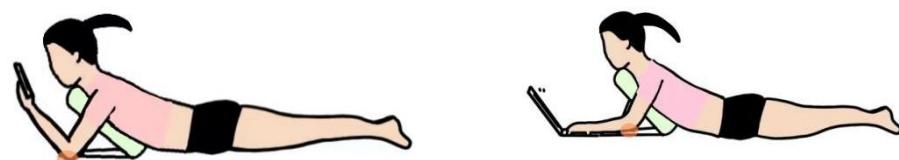
3. 请对当前姿势的“胸腹部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



4. 请对当前姿势的“肘关节舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



5. 对当前姿势的“肩部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



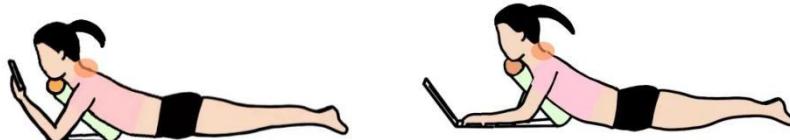
6. 请对该款趴垫的“整体舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

任务四：趴垫舒适度评价（趴垫机构材质调整，完成“看手机”动作后填写）
调整结构，添加颈部辅助支撑的乳胶枕，请您保持看手机动作 2 分钟，根据使用感受分别对该动作下相关部位舒适度的表现进行主观评分（6-9 为材质舒适度评价，10 为整体舒适度评价）：

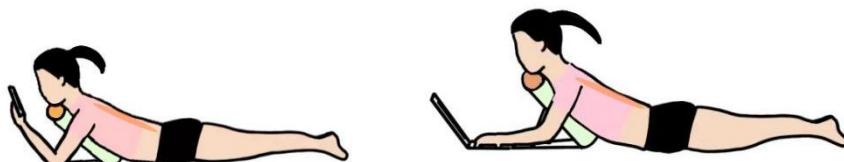
1. 请对当前姿势的“颈部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



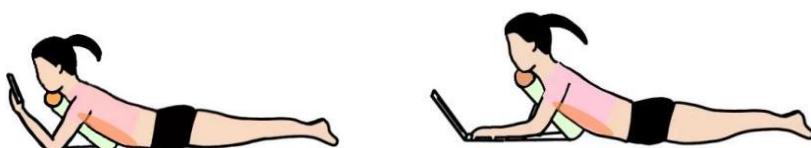
2. 请对当前姿势的“脊椎舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



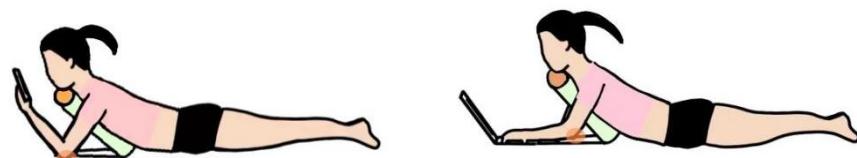
3. 请对当前姿势的“胸腹部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



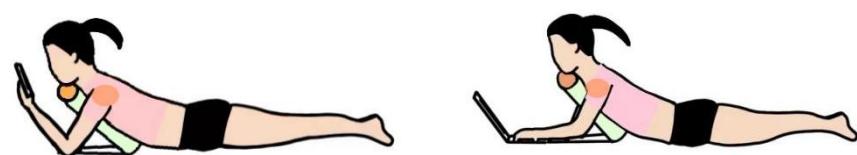
4. 请对当前姿势的“肘关节舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



5. 对当前姿势的“肩部舒适度”进行评分 [单选题] *

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好



6. 请对当前趴垫的“软硬度”进行评分:

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

7. 请对当前趴垫的“弹性”进行评分:

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

8. 趴垫结构与材质调整后, 请对当前趴垫的“整体舒适度”进行评分:

非常差 1 2 3 4 5 6 7 非常好

附录 C 实验材料尺寸测试结果

表 1 I号海绵尺寸测量表

试样分类	试样编号	测量值 (mm)					平均值 (mm)	体积 (mm ³)	体积平均 值 (mm ³)
I号海绵	I 1	长	49.5	51	49.5	50	50	50	
		宽	48.5	49.5	52	50	51	50.2	126253.0
		高	50	50	51	50.5	50	50.3	
	I 2	长	49.5	51	49.5	50	50	50	
		宽	48.5	49.5	52	50	51	50.2	126253.0
		高	50	50	51	50.5	50	50.3	
	I 3	长	50	50	50.5	51.5	50	50.4	
		宽	49.5	49.5	51	50	51	50.2	125947.4
		高	50	49.6	49.8	50	49.5	49.8	126362.2
	I 4	长	50.5	50	50.5	51.5	50	50.5	
		宽	50	49.5	50.5	51	50	50.2	126349.4
		高	50	50	50	49.5	49.7	49.8	
	I 5	长	50	51	50	51	50	50.4	
		宽	49.5	49.5	50	50	51	50	127008.0
		高	50.5	50.5	51	50	50	50.4	

表 2 I号海绵质量测量表

试样分类	试样编号	质量 (g)				平均值 (g)
I号海绵	I 1	3.2908	3.2912	3.2907	3.2912	3.291
	I 2	3.2907	3.2911	3.2912	3.2914	3.2901
	I 3	3.2909	3.291	3.2911	3.2908	3.2911
	I 4	3.2913	3.2912	3.2906	3.2911	3.2907
	I 5	3.2908	3.2911	3.2907	3.291	3.2912

表 3 II号海绵尺寸测量表

试样分类	试样编号	测量值 (mm)					平均值 (mm)	体积 (mm ³)	体积平均 值 (mm ³)
II号海绵	II 1	长	49	50	49.5	50	50	49.7	
		宽	49	49.5	51	50	50	49.9	104508.5
		高	50	51	50	49.7	10	42.1	
	II 2	长	49	51	49.5	50	49.5	49.8	
		宽	49	49.5	51	50	51	50.1	125747.0
		高	50	50.5	51	50.5	50	50.4	
	II 3	长	50	50	50.5	51.5	50	50.4	
		宽	50	49.5	50	50	51	50.1	126151.0
		高	50	50.5	50	49.8	49.5	49.9	121580.7
	II 4	长	50.5	50	50	51	50	50.3	
		宽	50	49.5	50.5	50	50	50	125750.0
		高	49.5	50	50	50.5	50	50	
	II 5	长	50	50	50.5	50	50	50.1	
		宽	50	49.5	49.5	50	50	49.8	125747.0
		高	50.5	50	51	50	50.5	50.4	

表 4 II号海绵质量测量表

试样分类	试样编号	质量 (g)				平均值 (g)
II号海绵	II 1	4.4599	4.4621	4.4614	4.4619	4.4623
	II 2	4.46298	4.4612	4.4624	4.4629	4.4603
	II 3	4.4609	4.4631	4.4594	4.461	4.4613
	II 4	4.4608	4.4607	4.4622	4.4617	4.4622
	II 5	4.4608	4.4620	4.4616	4.4619	4.4618
						4.4615512

表 5 III号海绵尺寸测量表

试样分类	试样编号	测量值 (mm)					平均值 (mm)	体积 (mm ³)	体积平均 值 (mm ³)
III号海绵	III1	长	49.0	50.0	50.0	50.0	50.0	49.8	
		宽	49.0	50.0	51.0	49.5	50.0	49.9	124996.5
		高	50.5	51.0	50.0	50.0	50.0	50.3	
	III2	长	50.0	51.0	49.5	50.0	49.5	50.0	
		宽	50.0	49.5	51.0	50.0	50.0	50.1	126001.5
		高	50.0	50.0	51.0	50.5	50.0	50.3	
	III3	长	50.0	50.0	50.0	51.5	50.0	50.3	
		宽	49.5	49.5	51.0	50.0	50.0	50.0	126504.5
		高	50.0	50.5	50.0	51.0	50.0	50.3	125900.9
	III4	长	50.0	50.0	50.0	51.0	50.0	50.2	
		宽	50.0	49.5	50.0	51.0	50.0	50.1	126254.0
		高	50.0	50.5	50.0	50.0	50.5	50.2	
	III5	长	50.0	51.0	50.0	50.0	50.0	50.2	
		宽	50.0	49.5	50.0	50.0	49.5	49.8	125748.0
		高	50.0	50.0	50.5	50.0	51.0	50.3	

表 6 III号海绵质量测量表

试样分类	试样编号	质量 (g)				平均值 (g)
II号海绵	III1	5.4785	5.4772	5.4783	5.4779	5.4773
	III2	5.4791	5.4782	5.4779	5.4777	5.476
	III3	5.4781	5.4782	5.4791	5.4781	5.4771
	III4	5.4781	5.4774	5.478	5.4776	5.4776
	III5	5.4788	5.475	5.4779	5.4783	5.4784

表 7 记忆海绵尺寸测量表

试样分类	试样编号	测量值 (mm)					平均值 (mm)	体积 (mm ³)	体积平均 值 (mm ³)
记忆海绵	J1	长	49	50	50	50	50	49.8	
		宽	49	50	51	49.5	50	49.9	124251
		高	49.5	51	49.5	50	50	50	
	J2	长	50	51	49.5	50	49.5	50	
		宽	50	49.5	51	50	50	50.1	124999.5
		高	49	50	51	49.5	50	49.9	125099.6
	J3	长	50	50	50	51.5	50	50.3	
		宽	49.5	49.5	51	50	50	50	126001.5
		高	49.5	50	50	51	50	50.1	
	J4	长	50	50	50	51	50	50.2	
		宽	50	49.5	50	51	50	50.1	125247.99
		高	50	49.5	49.5	51	50	49.8	6
	J5	长	50	51	50	50	50	50.2	
		宽	50	49.5	50	50	49.5	49.8	124998
		高	49.5	49.5	51	50	50	50	

表 8 记忆海绵质量测量表

试样分类	试样编号	质量 (g)				平均值 (g)
记忆海绵	J1	5.3287	5.3277	5.3233	5.3225	5.3252
	J2	5.3271	5.3106	5.3261	5.3219	5.3259
	J3	5.3281	5.3243	5.32783	5.3225	5.3261
	J4	5.3259	5.3287	5.3263	5.3275	5.3272
	J5	5.3251	5.3267	5.3253	5.3249	5.3242

表 9 乳胶海绵尺寸测量表

试样分类	试样编号	测量值 (mm)						平均值 (mm)	体积 (mm ³)	体积平均 值 (mm ³)
乳胶海绵	R1	长	49	50	50	50	50	49.8		
		宽	49.1	50	51	49.5	50	49.92	124052.20	
		高	49.5	51	49	50	50	49.9		
	R2	长	50	50.1	50	51	50	50		
		宽	50.1	49.5	50	51	50	50.1	125250	
		高	50	49.4	49.5	51	49.5	50		
	R3	长	50	51	49.5	50	49.5	50		
		宽	50	49.5	51	50	50	50	126001.5	125190.16
		高	49.5	50	51	49.5	50	49.5		
	R4	长	50.1	51	50	50	50	50.1		
		宽	50	49.5	50	50	49.5	50	125549.28	
		高	49.5	49.5	51	50.1	50	49.5		
	R5	长	50	50	50	51.5	50	50		
		宽	49.5	49.5	51	50	50	49.5	125097.82	
		高	49.5	50	50	51	50	49.5		

表 10 乳胶海绵质量测量表

试样分类	试样编号	质量 (g)				平均值 (g)
乳胶海绵	R1	6.557727	6.546517	6.551193	6.540225	6.543492
	R2	6.545791	6.565826	6.554581	6.559499	6.564339
	R3	6.547001	6.542403	6.546674	6.480225	6.494581
	R4	6.544339	6.557727	6.544823	6.546275	6.545912
	R5	6.543371	6.545307	6.543613	6.543129	6.542282

附录 D 实验者身材尺寸统计

表 1 实验者身体数据统计表

实验者序号	身高	体重	上身长	胸宽	胸厚	胸围	乳深	上臂长	小臂长	使用电脑舒适角度	使用手机舒适角度
	mm	kg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
1	1634	55	508	296	237	966	53	324	232	27	21
2	1635	53	513	288	229	935	49	324	228	27	20
3	1641	62	513	288	228	910	53	327	230	26	21
4	1625	50	511	260	196	833	47	323	220	26	20
5	1630	52	509	285	225	900	53	321	227	26	20
6	1589	53	501	263	201	835	47	317	216	25	20
7	1590	49	501	255	192	815	48	318	215	25	20
8	1620	50	508	259	196	831	47	321	219	26	19
9	1635	55	514	307	249	979	49	326	231	26	21
10	1642	63	517	289	230	920	53	329	229	28	20
11	1568	51	488	259	197	821	48	313	213	25	20
12	1570	51	499	255	195	810	49	315	209	25	20
13	1635	60	509	309	251	967	51	326	233	26	20
14	1640	66	510	297	238	944	53	327	233	27	21
15	1640	60	511	289	230	950	52	328	249	27	21
16	1598	50	502	256	193	835	48	317	216	26	19
17	1659	58	516	285	220	880	52	329	230	27	21
18	1610	52	503	284	226	902	49	320	225	25	21
19	1697	60	531	295	230	889	50	340	240	30	24
20	1622	52	505	284	224	896	48	320	226	26	19
21	1667	61	517	285	225	890	53	332	230	28	22
22	1635	53	511	285	200	830	50	325	240	27	22

表 1 续 实验者身体数据统计表

实验者序号	身高	体重	上身长	胸宽	胸厚	胸围	乳深	上臂长	小臂长	使用电脑舒适角度	使用手机舒适角度
	mm	kg	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
23	1642	57	511	266	199	830	53	328	227	27	21
24	1630	50	508	265	210	830	47	323	245	27	21
25	1661	59	516	273	209	855	52	330	232	28	21
26	1610	48	505	265	195	810	47	319	230	26	20
27	1672	55	532	269	200	845	48	333	235	29	23
28	1660	54	514	275	220	830	51	330	235	27	22
29	1640	56	515	270	207	851	50	329	226	27	21
30	1660	58	516	285	220	881	50	331	230	28	22
31	1660	58	516	285	220	881	50	330	230	27	22
32	1667	60	520	279	221	872	53	332	225	29	23
33	1670	51	527	260	198	822	48	337	214	30	23
34	1672	56	528	258	193	805	48	336	220	29	22
35	1665	59	517	274	210	857	53	333	233	28	22
36	1671	55	527	270	200	847	47	335	236	28	23
37	1680	59	531	267	205	842	50	338	224	29	23
38	1664	55	522	275	220	845	52	332	231	29	23
39	1720	60	534	280	225	870	47	342	239	30	23
40	1700	61	434	288	219	882	49	340	240	30	24
41	1650	55	514	270	210	852	51	329	228	27	22
42	1690	58	528	290	228	868	47	339	237	29	24
43	1672	53	527	268	190	800	49	334	235	28	23
44	1669	59	519	285	215	883	52	334	230	28	22
45	1661	58	514	263	203	840	51	331	230	29	22
46	1655	53	514	273	209	839	51	330	237	27	21
47	1646	52	515	270	207	851	51	329	226	27	22
48	1659	55	519	280	210	850	50	329	227	28	21

表 1 续 实验者身体数据统计表

实验者 序号	身高	体重	上身	胸宽	胸厚	胸围	乳深	上臂	小臂	使用 电脑 舒适 角度	使用 手机 舒适 角度
	mm	kg	长 mm	mm	mm	mm	mm	长 mm	长 mm		
49	1647	54	522	274	215	865	52	329	229	27	22
50	1642	56	512	260	190	810	51	328	222	27	21
51	1640	53	518	269	210	825	49	326	230	27	21
52	1615	49	507	260	199	828	47	319	221	26	20
53	1613	49	504	269	190	812	47	319	228	25	21
54	1600	50	498	270	200	831	49	318	228	26	20
55	1586	49	500	260	217	867	48	316	215	25	20
56	1580	48	503	253	191	842	47	316	214	25	20
57	1574	47	498	255	199	856	49	315	210	25	20
58	1572	48	501	260	190	805	49	314	210	25	20
59	1570	50	491	258	199	815	49	314	211	25	20
60	1566	46	488	255	195	830	49	314	210	25	19
61	1560	45	485	256	197	839	49	313	210	25	19

致 谢

在浙江理工大学的三年研究生生活很充实也很快乐，所收获的不仅仅是愈加丰厚的知识，更重要的是在阅读、实践中所培养的思维方式、表达能力和广阔视野。很高兴能在浙理遇到许多恩师益友，无论在学习上、生活上还是工作上都给予了我无私的帮助和热心的照顾，让我在诸多方面都有所成长。感恩之情难以用语言量度，谨以最朴实的话语致以最崇高的敬意。

感谢我的恩师王雪琴老师。三年来，王老师对我的学习和研究都非常严格，并给予了悉心的指导，使我受益菲浅。不仅在我课题上给了我很多指导性的意见，一直帮助指引我完成课题研究。同时在我完成课题之余，又给了我充足的可支配时间，我可以在研究生期间进行课外实习。因此在3年研究生期间我也没有忘记和辜负老师期待，先后发表了一篇sci一作论文、一篇scd一作论文、一篇二级论文。有效地完成了老师布置的教学作业和毕业要求。

从恩师身上我体味到了丰富的学养、严谨的作风、求实的态度，勤奋的精神，这都成为了我不断前行的动力和标杆。

同时感谢我们实验室同期的同学们，给予了我很多帮助，尤其是在我实习和最后完成论文期间，包容和理解我。也感谢我的师弟师妹们，也在校内给予了很

多帮助。

作者简历

1997年2月出生于浙江丽水市。

2016年9月考入浙江理工大学材料与纺织学院纺织品设计专业，2020年6月本科毕业并获得工学学士学位。

2020年9月考入进入浙江理工大学纺织科学与工程学院攻读纺织科学与工程硕士至今。

攻读学位期间完成的相关学术成果如下：

- [1] Shunwei C,Xueqin W,Mengqing S, et al. Supine dynamic simulation and latex pillow design for Chinese women based on finite element method[J].Textile Research Journal 2022,92(13-14).
- [2] 陈顺微,厉纯纯,孙梦情,王雪琴.天然乳胶泡沫材料压缩形变的数值模拟[J].现代纺织技术,2022,30(05):60-66.
- [3] 陈顺微,孙梦情,邓倩因,马晓晶,王雪琴.基于人体工学的舒适性睡枕数值模拟与设计[J].人类工效学,2021,27(05):59-61.