



吕梁学院
LULIANG UNIVERSITY

分类号: TB121

密 级: _____

毕业论文

题 目: 基于有限元 ANSYS 的金属软管的
非线性应力分析

系 别: 化学化工系

专业年级: 化学工程与工艺 2013 级

姓 名: 郝泉宇

学 号: 20130707106

指导教师: 王娟娟 硕士

2017 年 06 月 10 日

原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的毕业论文，是在指导老师的指导下独立进行研究所取得的成果。毕业论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：

日 期：

关于毕业论文使用授权的声明

本人在指导老师指导下所完成的论文及相关的资料（包括图纸、试验记录、原始数据、实物照片、图片、录音带、设计手稿等），知识产权归属吕梁学院。本人完全了解吕梁学院有关保存、使用毕业论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吕梁学院可以将本毕业论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本毕业论文。如果发表相关成果，一定征得指导教师同意，且第一署名单位为吕梁学院。本人离校后使用毕业论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为吕梁学院。

论文作者签名：

日 期：

指导老师签名：

日 期：

摘 要

本文在运用有限元法的基础上，在大型通用有限元分析软件 ANSYS 中建立了波纹管有限元模型、金属网套有限元模型最终建立了金属软管的有限元模型，并在 ANSYS 软件中进行分析计算，对金属软管的应力分布情况有了一定的了解。

本文采用了三维壳单元 shell193 来描述波纹管，采用三维空间梁单元 beam189 来描述金属网套，运用约束方程建立了波纹管与金属网套的联系，从而建立金属软管模型。着重从静力学的角度对金属软管主体波纹管进行静力学分析，研究了波纹管在受到内压、轴向拉伸压缩、弯曲以及综合载荷等复杂工况下的应力分布情况。对波纹管的设计优化有重要的参考价值。

关键词： 波纹管；金属软管；有限元法；ANSYS；应力

Abstract

Using finite element method (fem) is presented in this paper, on the basis of the large general finite element analysis software ANSYS to establish the finite element model of corrugated pipe, metal mesh finite element model is finally established the finite element model of metal hose, and carries on the analysis and calculation in the ANSYS software, the stress distribution of metal hose had certain understanding.

Described in this paper USES three-dimensional shell element shell93 bellows, beam189 three-dimensional beam element is used to describe the metal mesh, using the constraint equation set up contact with the metal net corrugated pipe, so as to establish a model of the metal hose. Emphatically from the point of view of statics statics analysis was carried out on the subject of metal hose corrugated pipe, corrugated pipe is studied under internal pressure and axial tension compression, bending and the complex working conditions such as general load stress distribution. The design of corrugated pipe optimization has important reference value.

Key Words : Corrugated pipe ; flexible metal tubing; finite element method; ANSYS; stress

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 金属软管简介.....	1
1.2 金属软管国内外的研究历史及现状.....	2
1.3 论文的研究内容.....	2
第 2 章 研究方法.....	5
2.1 有限元法.....	5
2.1.1 有限元法的运用方法.....	5
2.2 有限元分析软件 ANSYS.....	5
2.2.1 ANSYS 有限元软件进行分析求解的基本过程.....	5
2.2.2 ANSYS 有限元软件分析计算流程示意图.....	6
2.3 本章小结.....	6
第 3 章 金属软管模型的建立.....	7
3.1 波纹管模型的建立.....	7
3.1.1 波纹管单元类型的选择.....	8
3.1.2 对材料特性的定义.....	8
3.2 网套模型的建立 ^[10]	9
3.3 金属软管模型的建立.....	10
3.4 边界条件及载荷的施加.....	11
3.5 求解器的选择.....	12
3.6 结果查看.....	13
3.7 本章小结.....	13
第 4 章 波纹管静力性能的分析.....	15
4.1 承受内压.....	15
4.2 轴向特性分析.....	16
4.3 横向弯曲.....	19
4.4 多种载荷工况.....	20

4.5 本章小结.....	22
第 5 章 总结与展望.....	23
5.1 本文的主要结论.....	23
5.2 后续工作展望.....	23
参考文献.....	24
致 谢.....	25

第1章 绪论

现代工业的发展可以说是日新月异，而金属软管的发展在现代社会中占有重要位置，无论是在石油、化工、钢铁、消防、供水等老工业有重要作用还在新兴工业中计算机方面电线、电缆的保护管以及我们生活中淋浴用的软管都有广泛的运用。所以，在结合计算机技术的最新发展运用 ANSYS 软件对金属软管的应力进行有限元分析是十分必要的。

1.1 金属软管简介

金属软管属于补偿器，金属软管的构件由三大块组成，内层是波纹管也是金属软管的主体，外层由金属丝按一定角度编织而成的网套，在波纹管的两端是接头也就是法兰。金属软管的网套是很难被损坏的，防止内层的波纹管被破坏是其主要的作用，网套还可以对金属软管的变形程度进行限制。网套是经过钢丝倾斜穿插缠绕从而构造了许多个很小的平行四边形，正是因为这种形状，它可以使自身被拉伸，并且还能限制其被拉伸的长度^[1]。

金属软管的两端是法兰，在不尽相同的工况下法兰的材质能够依据要求而选用。金属软管的两片法兰在一般情况下是固定的，然而我们能够依据现实情况的需求来将其中一个改成可以移动的，这使得在某些特殊区域的安装也可以变得很容易。

金属软管的主体就是波纹管，波纹管属于不锈钢材质，它对各种介质都有很好的抗性，并且不锈钢材质本身也具备可拉伸收缩的特点，它的拉伸长度由外表面的网套来限制，所以金属软管有很好的延展性，而且即便外界有实物的摩擦，碰撞以及锋利物体，网套也能够将其阻挡，将波纹管保护好，这使得金属软管的工作寿命更长。

制造金属软管的主要材质是奥氏体不锈钢，而奥氏体不锈钢在耐温耐腐蚀方面有极大的优势，金属软管的工作温度范围在 $-196\sim 600$ 度，关于耐腐蚀性能够按照所要流通的介质腐蚀性来选取对应的不锈钢牌号。金属软管的三大作用为^[2]：

(1) 减少管道的安装应力

因为金属软管能够随便弯曲，并且在弯曲后它所发生的内应力很小，所以金属软管现在常被运用于某些线路的保护管。而对于一些需要经常性的进行往复运动的管路中如果使用一般的软管在进行多次运动后便会发生断裂，而用橡胶管虽然具有良好的

柔软特性但是对于压力、腐蚀等方面便力不从心了，所以金属软管对于这种工况有极大的优势。

(2) 补偿管道额定位置移动

在实际化工生产工作中除了由于介质产生的压力、腐蚀、温度外还会出现由于震动、压迫等外部产生的影响，在长时间的外部作用，如震动的影响下管道会发生不同程度的位移，由于金属软管的特性用它来补偿管路的位移是最好的。

(3) 吸收管路系统的振动

在某些工作环境中由于生产设备功率很大，或者设备老化我们可以感觉到震动和噪音特别大，而在连接官路上使用了金属软管后，我们可以感觉到震动和噪音有明显的降低。金属软管不只能够加强其被疲劳破坏的能力，还可以将震动、噪音等进行有效的降低。

1.2 金属软管国内外的研究历史及现状

最早的制作波纹管的专利是由德国颁布发表的。起初法国的 E•Levavasseur 与德国的 H•Witzenmann 共同研制出了新型的金属螺旋纹管，一九二九年人们用钢和铜锌合金材料制成了整体波纹管。从二十世纪五十年代起，层数更多的波纹管也逐步被人们研发出来。波纹管作为金属软管的主体波纹管的不停发展进步其实就是金属软管的发展进步。再后来，人们用金属丝采用一定的角度编织在波纹管外表面上，形成了金属网套。至此发展成为了现在各种形式的金属软管^[3]。

目前世界上对波纹管的研究分析主要采用工程近似法、解析法和数值分析法其研究主要集中在波纹管上。随着现如今计算机技术的飞速发展，有限元分析方法在我们的生活中越来越重要，涌现出了许多商用有限元软件，运用这些软件在解决非线性问题上有着极大的优势。

因此，本课题使用先进的有限元软件，以有限元理论为基础开展对金属软管的应力情况进行分析计算和模拟是非常需要的。

1.3 论文的研究内容

在非线性有限元法理论的支持下，运用非线性有限元法在有限元分析软件 ANSYS 平台上建立了金属软管的有限元模型对金属软管的应力展开了详尽的研究。本文的主要研究内容如下^[4]：

(1) 先在有限元分析软件 ANSYS 平台上创建波纹管模型，然后对其在各种工况下

如轴向拉伸、横向弯曲、承受内压的应力应变情况运用有限元软件进行分析计算。

(2)在有限元软件 ANSYS 平台上建立金属网套的模型，将金属网套有限元模型和波纹管有限元模型用约束方程联系起来，便形成了金属软管的有限元模型，并对其在各种工况下如轴向拉伸、横向弯曲、承受内压的应力应变情况进行有限元分析计算。

第2章 研究方法

2.1 有限元法

有限元法是运用计算机来对结构进行分析计算。有限元法计算精度高适用于许多研究方面，所以被普遍运用于机械、汽车、船舶、航空航天、土木工程等诸多邻域，已经发展成为现代不可或缺的重要分析方法，而且随着现代计算机技术的不停发展普及为有限元分析方法带来了更宽广的运用前景^[5]。

2.1.1 有限元法的运用方法

(1) 离散，就是将一个复杂的图形结构拆分成许多的结构简单的小单元，再用数学模型来描述这些小单元的特性。

(2) 单元分析，在将一个完整结构离散成一个个小单元后，对每个小单元的特性进行描述后将每个小单元建立关系方程。比方将应变与节点的位移分量创建关系方程。

(3) 整体分析，在单元分析的基础上，将每个小单元联系起来形成一个整体，而后对整体进行分析得出整体的参数方程即矩阵方程。

(4) 最后对矩阵方程进行求解，便可以得到构件中应力的分布或其他需要的数据。

2.2 有限元分析软件 ANSYS

ANSYS 软件是一款大型通用有限元分析软件，它可以对结构、电磁、流体动力学、接触进行分析还能够将设计进行优化，自适应进行网格划分还有参数设计言语等功能^[6]。

2.2.1 ANSYS 有限元软件进行分析求解的基本过程

(1)前处理，就是在进行分析前需要进行的准备工作包括确定分析方案、在 ANSYS 中创建有限元模型、设定单元类型、设定材料属性、进行单元格的划分、载荷和约束的施加等。

(2)加载并求解，将建立好的模型选择合适的求解类型和求解选项进行求解矩阵方程。

(3)后处理，在后处理菜单中获取求解后的计算结果，得出其求解后的图形、列表

或数据^[7]。

2.2.2 ANSYS 有限元软件分析计算流程示意图

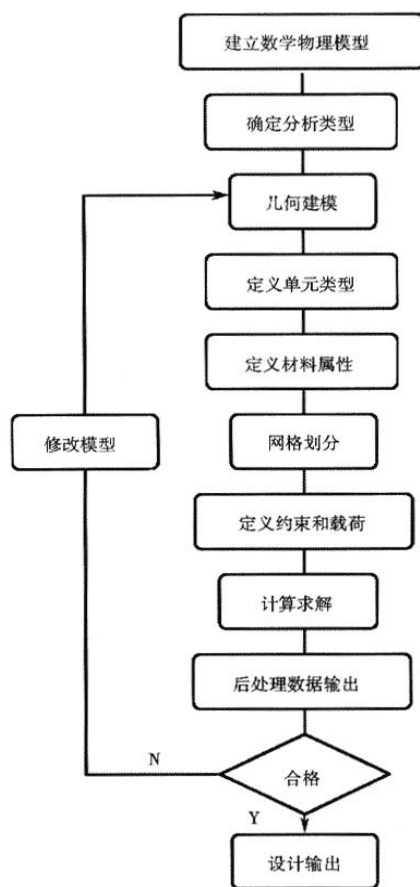


图 2-1 ANSYS 结构分析计算流程示意图

2.3 本章小结

本章通过对有限元法和有限元软件 ANSYS 的探讨，了解了有限元法的根本原理和 ANSYS 软件的分析计算进程，为下文运用 ANSYS 软件创建金属软管的模型并对其进行计算分析提供了基础。

第3章 金属软管模型的建立

因为金属软管有限元模型的创建比较复杂，所以将金属软管的有限元模型分成由它主体波纹管有限元模型和网套有限元模型两部分，再将两者建立力学联系，最终构造了金属软管的有限元模型。本章利用壳单元 shell 93 和空间梁单元 beam189 建立了波纹管和网套的模型，并利用约束方程将两者联络起来最终在 ANSYS 软件中建立了金属软管的有限元模型^[8]。

3.1 波纹管模型的建立

在 ANSYS 软件中模型的创建有直接生成和实体建模两种办法，也可以在 CAD 系统中将做好的实体模型输入 ANSYS 软件中。我们可以用波纹管外直径 $D1$ ，波纹管内直径 d ，壁厚 S ，波峰直径 a ，波距 t ，和波数 n 等参数来描述波纹管。在 ANSYS 软件中创建波纹管模型如图 3-2。

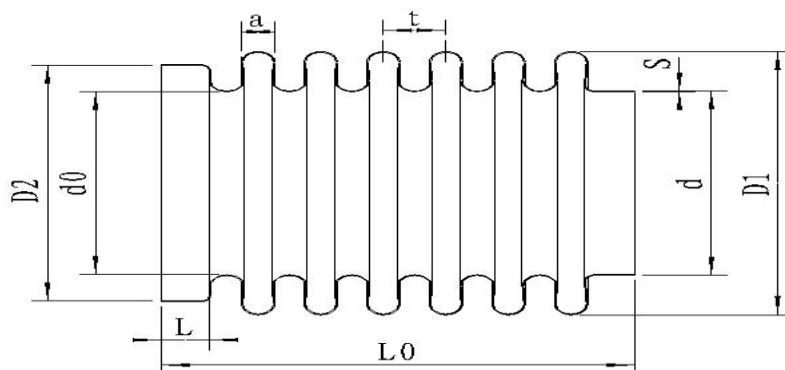


图 3-1 波纹管示意图

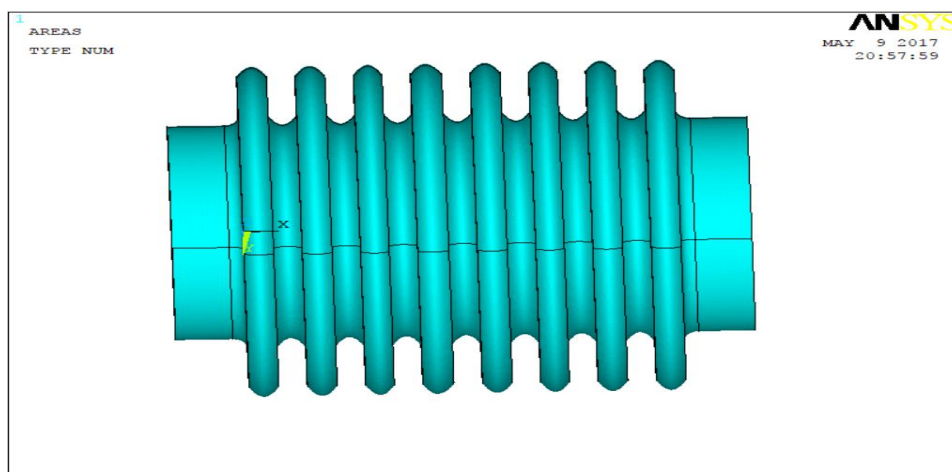


图 3-2 波纹管模型图

3.1.1 波纹管单元类型的选择

我们在初始模型建立后还需要对模型的单元进行定义只有选择合适的单元类型才能在模型分析计算时得到正确的计算结果。在对单元类型进行选择时我们不光要考虑到所要分析模型的形状特征、结构类型、变形特点还要对其分析精度以及硬件条件等因素进行综合考虑，所选用的单元可以反映出模型各方面的特性。

通过对波纹管进行分析我们可以知道波纹管是一个相互对称的薄壁壳体管道，对于这种结构我们可以采用轴对称单元、壳单元以及体单元。但是考虑到波纹管在复杂工况下不光会受到轴向位移载荷和内压载荷，还会受到横向错动、扭转、弯曲等载荷这些载荷会使得波纹管的结构产生不对称性，因此波纹管的单元类型不可以采用轴对称单元否则会对后续的处理分析结果产生较大的影响。而壳单元的厚度远小于长度和宽度，所以将厚度方面的应力忽略不计来进行模型的描述。所以波纹管的结构用壳单元来描述是最适合的。在 ANSYS 软件中 shell93 单元的描述具有大挠度、大转动、大应变可以很好的反应波纹管的力学特性。而且 shell93 单元具有八个节点空间可以用比较少的单元数量来模拟波纹管，不光节省了时间还使它的精度比较高。所以本文在 ANSYS 软件中选用 shell93 单元来形容波纹管^[9]。

3.1.2 对材料特性的定义

目前国内的波纹管材料多选用奥氏体不锈钢如 0Cr19Ni9、0Cr18Ni9、0Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 等。把材料的特性定义为非线性和各向同性，不考虑温度的影响就必须在 ANSYS 软件中必须对杨氏模量 E 和泊松比 μ 进行定义。本文研讨的金属软管材质为 1Cr18Ni9Ti。表 3-1 给出了材料 1Cr18Ni9Ti 的机械性能。

表 3-1 材料 1Cr18Ni9Ti 的机械性能

σ_s (屈服极限)	μ (泊松比)	E (弹性模量)	ρ (密度)
257Mpa	0.3	196Gpa	7.8g/cm ³

3.1.3 对波纹管进行网格划分

在将波纹管的模型进行网格划分后波纹管的模型即为有限元模型。在进行网格划分时挑选合适的单元形状和数目是十分重要的。如果划分出的单元格比较粗糙劣质即不规则的图形比较多会影响分析结果的准确性，而单元格的数目多少会影响计算的精

度，如果划分的单元格过少，则计算的精度降低，划分的单元格过多又会使计算量增大对计算机的性能要求过高。所以在划分单元格时适当的选择是非常重要的。

在 ANSYS 软件中一共有自由网格划分和映射网格划分两种网格划分办法。自由网格划分对模型没有特殊要求，任何几何模型都可以对其自由网格划分，但是自由网格划分时出现的单元不规则，可以只由四边形单元组成或只由三角形单元组成，或两者的混合。而映射网格划分可以指定全部用四边形面单元、三角形面单元或全部用六面体单元来形成映射网格。然而映射网格要求满足一定的要求，适用于外形比较规则的面或体，还可以控制其内部节点的位置。

由于创建的波纹管模型是由线绕轴形成形状规则，所以本文使用的是映射网格划分，对波纹管进行网格划分后的有限元模型如图 3-3 所示。

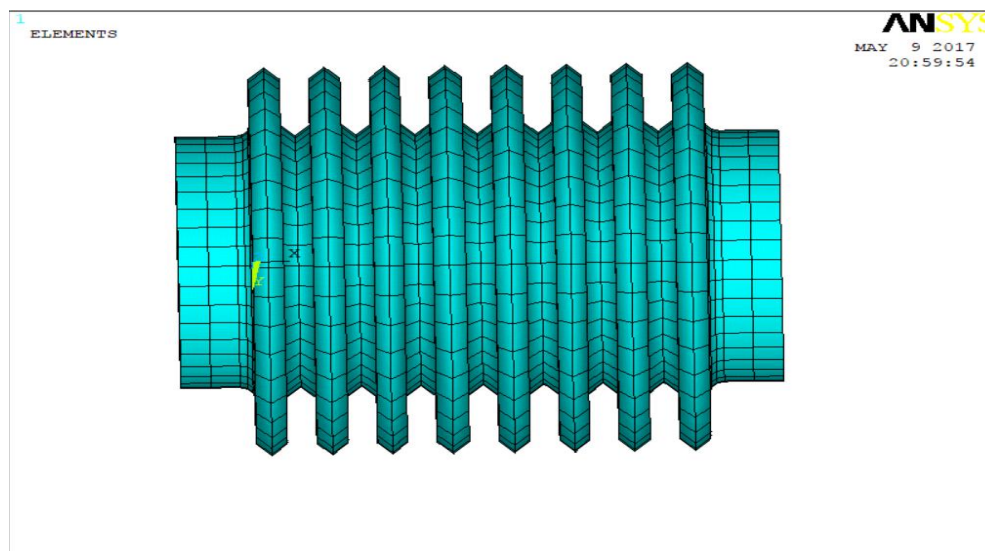


图 3-3 波纹管有限元模型

3.2 网套模型的建立^[10]

金属软管的网套是由多根金属丝或金属带以一定的螺旋角度编织铠装在波纹管的表面上，所以在 ANSYS 软件中可以运用螺旋线的建模方式来对网套进行建模它的参数方程为

$$\begin{cases} x = r \cos \omega t \\ y = r \sin \omega t \\ z = \frac{\omega h}{2\pi} t \end{cases} \quad (3-1)$$

其中， ω 为角速度， h 为螺距。

对上述方程进行二次求导，求出其加速方程

$$\begin{aligned}\bar{a} &= -r\omega^2 \cos \omega t \cdot \bar{i} - r\omega^2 \sin \omega t \cdot \bar{j} + 0 \\ &= a_t \bar{t} + a_n \bar{n} \\ \text{其中 } a_t &= 0; \quad a_n = \sqrt{a^2 - a_t^2} = r\omega^2\end{aligned}\quad (3-2)$$

求得该螺旋线的法线方向为

$$\bar{n} = -\cos \omega t \cdot \bar{i} - \sin \omega t \cdot \bar{j} \quad (3-3)$$

由此可以得到, 钢丝 11 上任一节点的法线方向即为波纹管上与钢丝节点具备同样 z 坐标的半径方向. 因此我们能够在与波纹管同样的坐标系中创立金属软管网套的有限元模型。

金属软管网套在受力时会产生转动, 在 ANSYS 软件中采取三维空间梁单元 Beam189 来对网套进行模拟, Beam189 具备六个自由度, 三个节点, 可以随意设定截面, 非常符合网套建模的要求。金属网套的材质和波纹管的材质一样, 对其定义的方法与波纹管相同。最后再用 Beam189 单元对网套模型划分线实体。

3.3 金属软管模型的建立

在将波纹管有限元模型和网套模型创立的基础上, 创立两者之间互相作用的关系即可构造金属软管的有限元模型。波纹管和网套之间主要有法兰处网套与法兰的衔接关系和网套与波纹管波峰处的接触关系。在这里我们主要研究波纹管波峰处与网套之间互相接触作用的关系^[12]。

在 ANSYS 软件中我们使用约束方程来创立网套和波纹管波峰之间的关系。创建它们之间关系的约束方程其实是经过在节点自由度间建立联系的通用办法, 它能够设定节点自由度之间的线性关系, 它的基本表达式是:

$$Constant = \sum_{I=1}^N (Coefficient(I) \times U(I)) \quad (3-4)$$

式中 $U(I)$ 是自由度, N 是方程中项的编号。

式中的第一项是一个特殊自由度, 在通过分析计算时能够在约束方程中得到它的值。而这个特殊自由度为钢丝上的节点自由度。在进行分析过程中这个自由度将被删除, 依据约束方程会将求得的自由度取值。

我们取网套与波纹管波峰相触碰的某一节点, 取波纹管波峰上的径向自由度 UX 为主自由度, 使网套上与之对应的节点径向自由度改变而和波纹管波峰上的径向自由度相同的值, 从而确保了网套与波纹管波峰的关系。此时的约束方程为:

$$UX_1 - UX_2 = 0 \quad (3-5)$$

式中 UX_1 为波纹管的波峰上节点 N_1 的横向变形, UX_2 为网套上节点 N_2 的横向变形。

但是在实际建模过程中, 波纹管波峰处的节点不一定与网套钢丝上通过波纹管波峰的节点逐个对应。网套钢丝的根数比较多, 所以它通过波纹管波峰的节点也比较多, 所以在出现不能一一对应节点时我们可以运用约束方程来确保网套钢丝的自由度, 让其产生径向形变与波纹管的波峰相接触, 从而确保网套与波纹管波峰保持接触的关系。推导出此时的约束方程为;

$$UX = (D_2 - D_1) / D_2 UX_1 + D_1 / D_2 UX_2 \quad (3-6)$$

式中 N 为网套上的任意节点, N_1, N_2 为波纹管波峰上相邻节点, D_1 为 N 与 N_1 的间隔, D_2 为 N 与 N_2 的间隔, UX_1 、 UX_2 、 UX 分别为节点 N_1 、 N_2 和 N 的径向形变。应用约束方程最终创建的金属软管的有限元模型如图 3-4 所示。

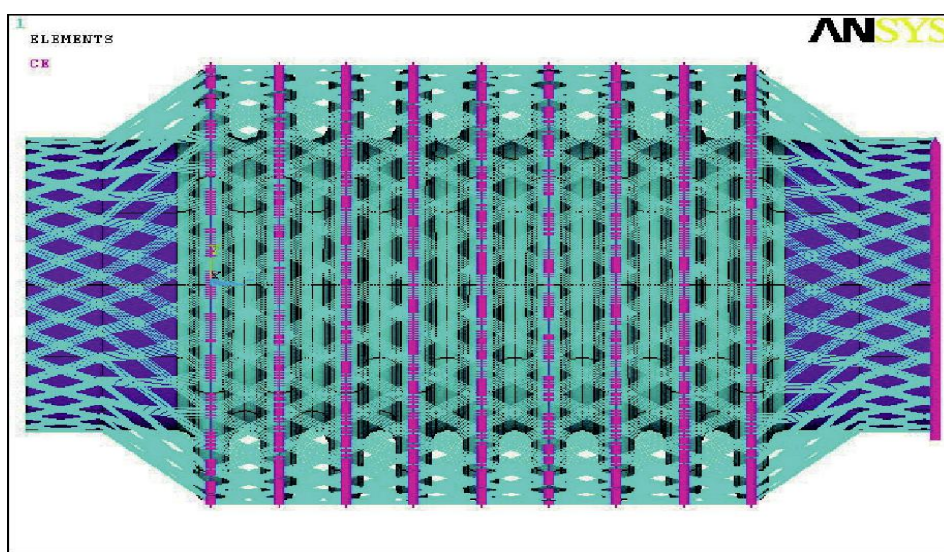


图 3-4 金属软管有限元模型

3.4 边界条件及载荷的施加

在 ANSYS 软件中, 载荷其实包含边界条件以及受到的内外作用力的函数, 大概能够分为六类: 自由度约束、集中载荷、面载荷、体载荷、惯性载荷以及耦合场载荷。

(1) 自由度约束 (DOF Constraints): 在 ANSYS 软件中主要用来定义节点的自由度, 在结构分析中常指位移。

(2) 集中载荷 (Force): 指主要施加在模型节点上的载荷, 在结构分析中用来定义力和力矩。

(3) 面载荷 (Surface Load): 指施加在某一面上的分布载荷, 在结构分析中用来定义压力、弯曲等。

(4) 体载荷 (Body Load): 指作用在体积或场域的载荷, 在结构分析中用来定义重力或温度的影响。

(5) 惯性载荷 (Inertia Load): 指物体由于惯性产生的载荷, 在结构分析中常用来定义角速度、重力加速度等常用在动力分析中。

(6) 耦合场载荷 (Coupled-field Loads): 是一种特殊载荷, 是将一种分析结果作为一种载荷运用于另一分析计算中。

因为本文是对金属软管进行分析计算, 而关于金属软管的有限元分析肯定是包括几何非线性和材料非线性, 所以必须运用非线性来对金属软管进行分析计算, 由于非线性在施加载荷时必须分为几个载荷步来进行。在本文中我们分别施加了内压载荷、外压载荷、轴向拉伸载荷、轴向压缩载荷以及弯曲载荷, 因为施加这些载荷的作用与施加位移载荷的效果相当, 所以我们使用一端固定而对另一端施加相应载荷的方法来仿照金属软管在各种工况下的受力情况, 来对金属软管进行有限元分析计算。

3.5 求解器的选择

在 ANSYS 软件中有以下求解方法:

(1) 波前直接解法 (直接消除法), 对稳定性 (非线性分析) 有要求或内存受限制的时候。

(2) 稀疏矩阵直接解法, 它于对稳定性和求解速度 (非线性分析) 有要求; 线性分析时迭代法收敛很慢时 (尤其对病态矩阵, 如形状不好的单元), 多用于板壳和梁模型。

(3) 雅可比共轭梯度法, 在单场问题 (如热、磁、声、多物理问题) 中对求解速度有要求时。

(4) 不完全乔类斯基共轭梯度法, 多物理模型中求解速度很重要时, 处理其他迭代法很难收敛的模型 (几乎是无穷矩阵)。

(5) 预条件共轭梯度法, 常应用在对求解速度有要求时 (大型模型的线性分析), 尤其适合实体单元的大型模型。

本文选用的是波前求解器，它是计算机经过三角化消去一切能够由其余自由度来描述的自由度，直到最终构造三角矩阵。求解器在三角化过程中保持的节点自由度数量称为波前，在所有自由度被处理后波前为 0。

3.6 结果查看

在 ANSYS 软件计算完成后便可以进入后处理器来得出计算结果。可以得出模型彩色的应力云图，显示模型的形变、最大受力点、位移等，还可以调出模型的每个节点处的受力情况，也可以用数据表输出计算结果。

3.7 本章小结

本章探讨了如何在有限元软件 ANSYS 中创建金属软管的模型，采用三维壳单元 shell193 建立了波纹管的有限元模型，采用空间梁单元 Beam189 建立了金属网套的有限元模型，并应用约束方程将波纹管和金属网套联系起来构造了金属软管的有限元模型。并对其载荷的施加方法和计算器的选择提供了选则依据。

第 4 章 波纹管静力性能的分析

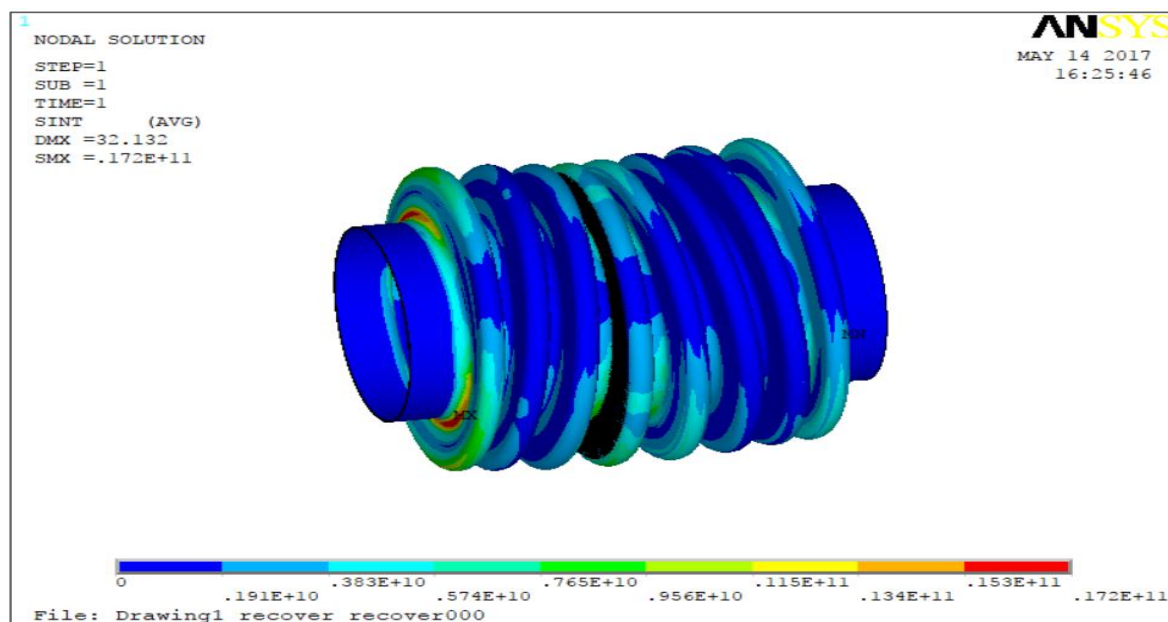
下面以一个波纹管模型为例，研究它在受到内压、轴向压缩、轴向拉伸、横向弯曲等载荷独立作用下或综合作用时波纹管的应力变化、位移等情况。它的制造材料为 1Cr18Ni9Ti，弹性模量为 196Gpa，塑性模量为 257Mpa，屈服强度为 257Mpa，密度为 $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，泊松比为 0.3。表 4-1 给出了其几何参数^[13]。

表 4-1 波纹管几何参数

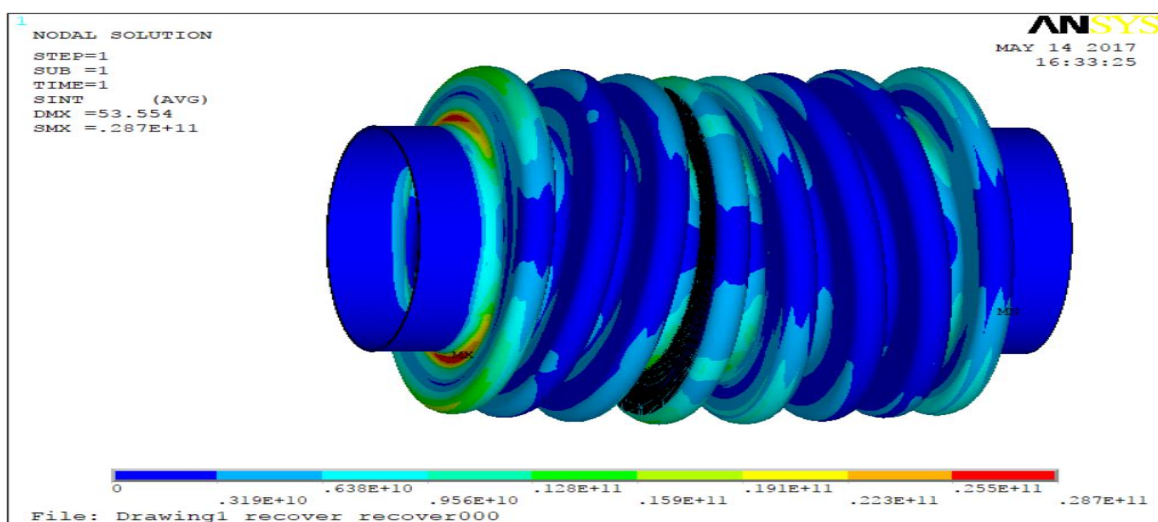
外 径 D1(mm)	内 径 D2(mm)	波 峰 半 径 R1(mm)	波 谷 半 径 R2(mm)	波 纹 管 厚 度 H(mm)	环 板 倾 角 α (°)	波 纹 管 层 数 L	波 纹 管 波 数 W	接 头 长 度 EL=ER(m m)
78	50.5	2.3	2.2	0.4	0	1	15	11

4.1 承受内压

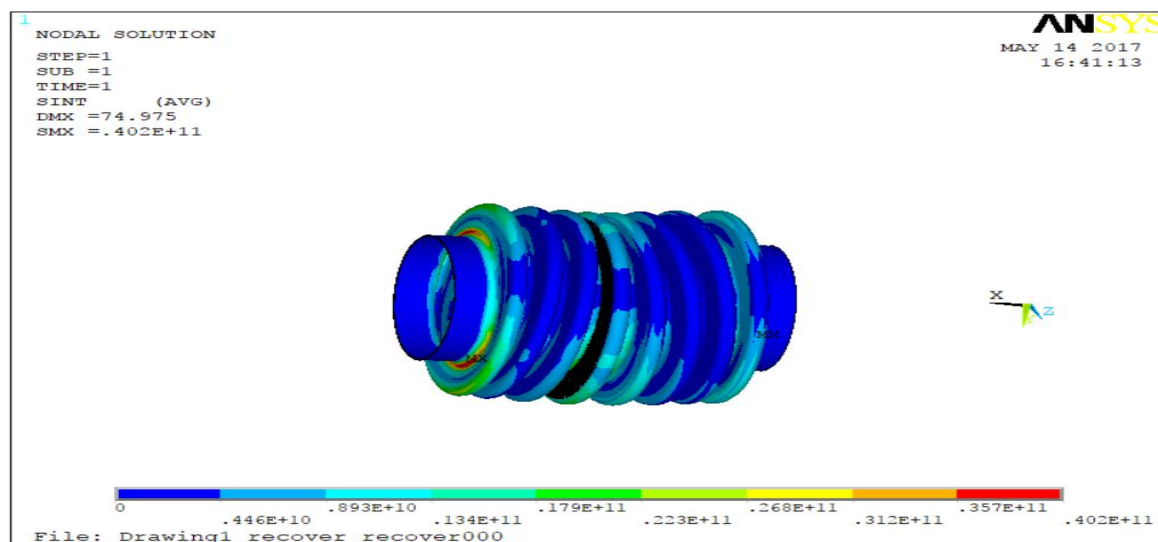
先将波纹管模型左端施加全约束即将波纹管左端的所有节点自由度设置为零完全固定，再将波纹管右端也施加全约束自由度也为零完全固定，最后在波纹管内部分别施加垂直于内表面向外的压力 3Mpa、5Mpa、7Mpa^[14]。



(a) 内压为 3Mpa 应力云图



(b) 内压为 5Mpa 应力云图



(c) 内压为 7Mpa 应力云图

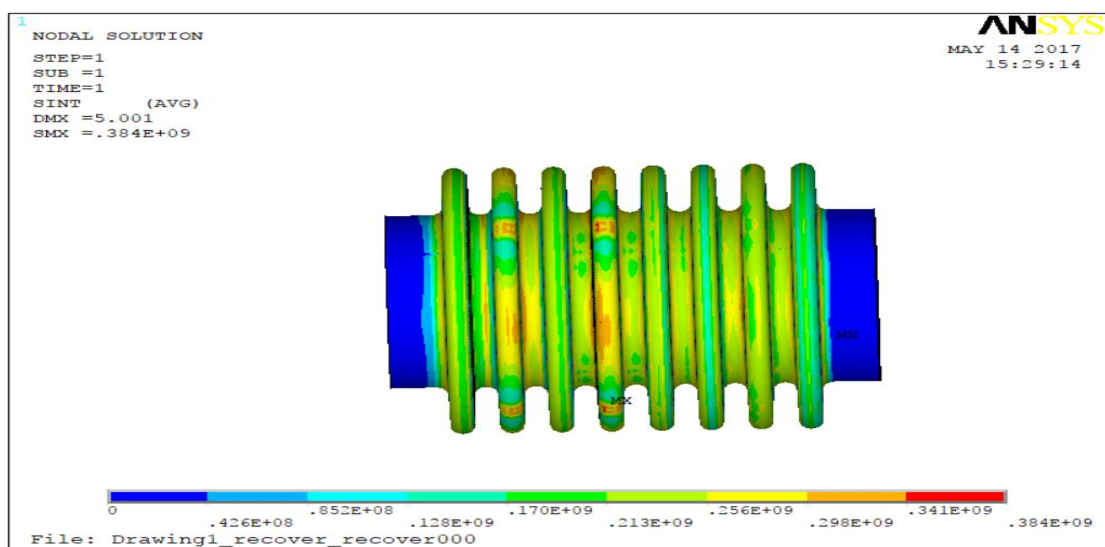
图 4-1 波纹管受内压应力云图

从图 4-1 波纹管受内压应力云图可以看出，波纹管的固定端波谷处的应力最大。所以我们可以将波纹管的波谷厚度加厚或者将波谷半径优化来将波谷处的应力降低从而提高波纹管的使用寿命。

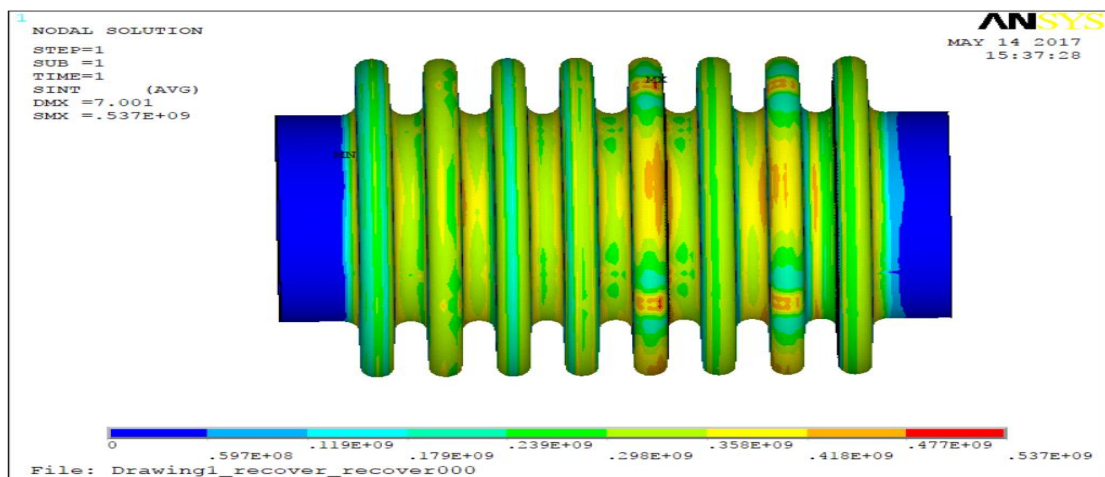
4.2 轴向特性分析

(1) 轴向拉伸，将波纹管左端的节点自由度设为零，右端其他自由度不变只输入轴向位移自由度 UX。在波纹管右端分别施加轴向位移约束 UX=5mm、UX=7mm、UX=10mm。

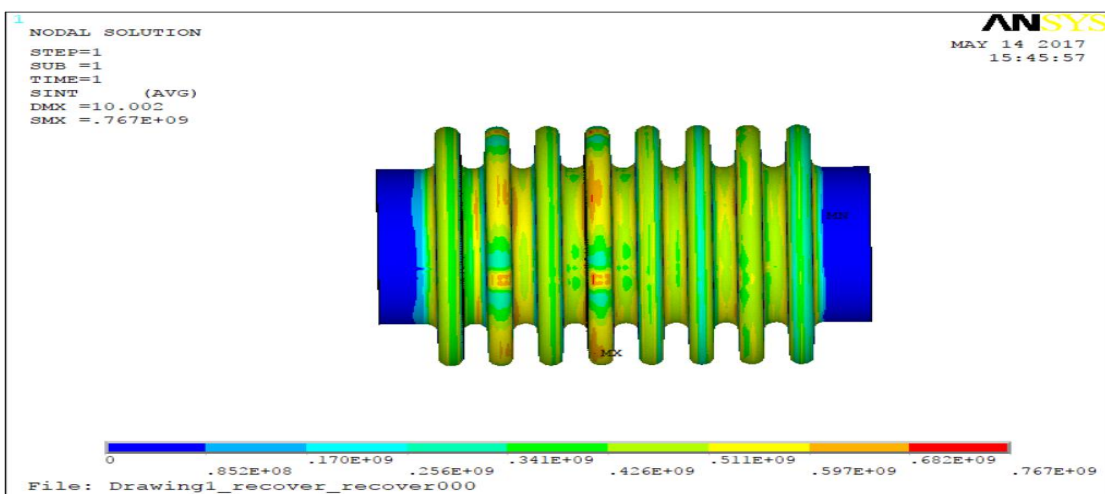
(2) 轴向压缩，将波纹管左端节点自由度设为零完，右端其他自由度不变只输入轴向位移自由度 UX。在波管右端施加轴向位移约束 UX=-5mm、UX=-7mm、UX=-10mm。



(a)轴向拉伸 5mm 应力云图



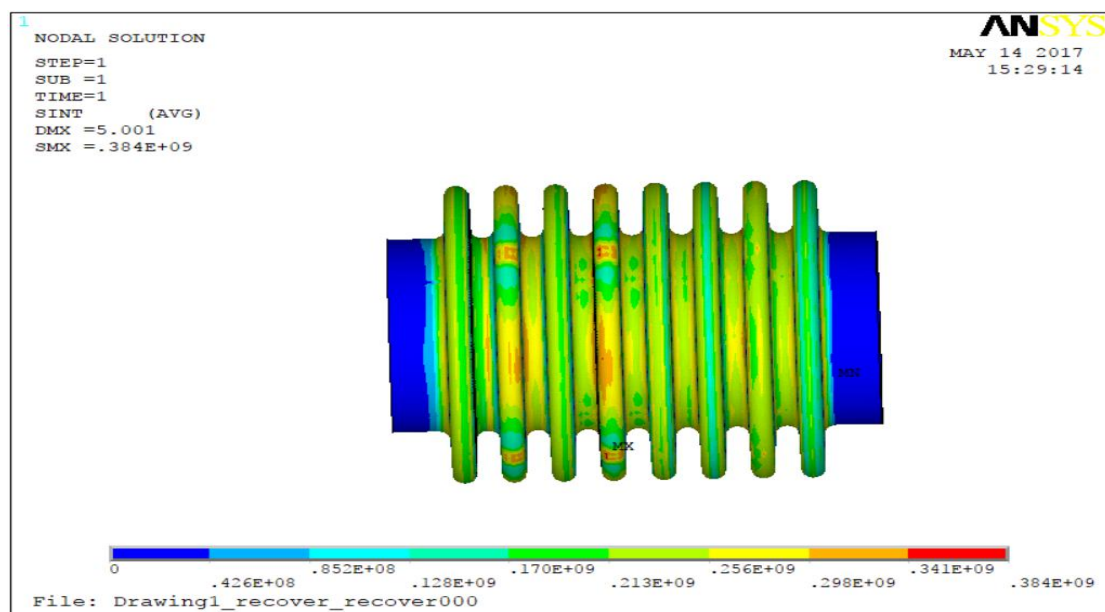
(b)轴向拉伸 7mm 应力云图



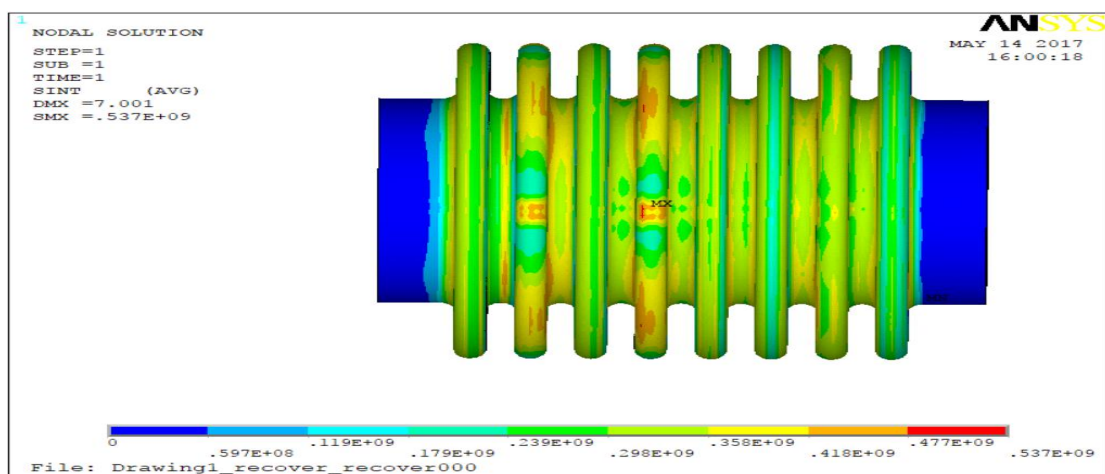
(c)轴向拉伸 10mm 应力云图

图 4-2 波纹管受拉伸载荷应力云图

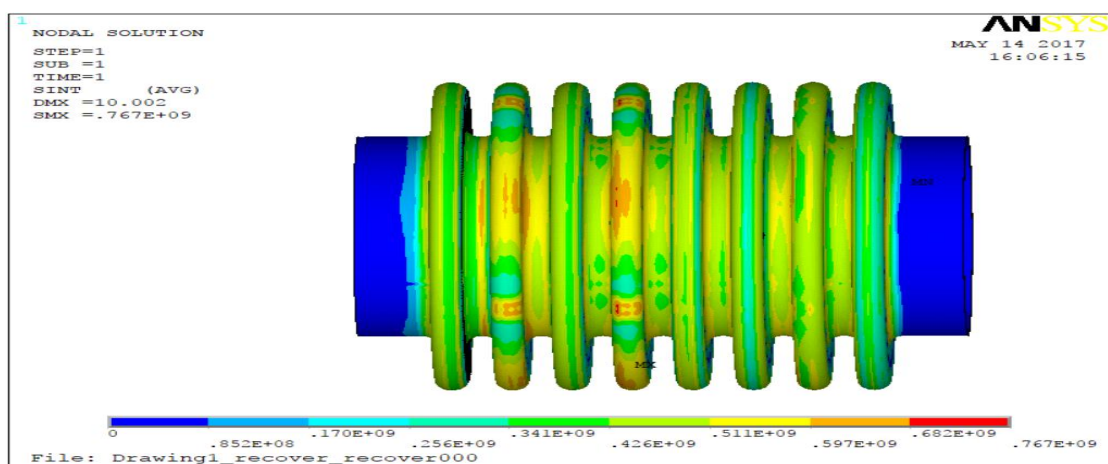
基于有限元 ANSYS 的金属软管的非线性应力分析



(a)轴向压缩 5mm 应力云图



(b)轴向压缩 7mm 应力云图



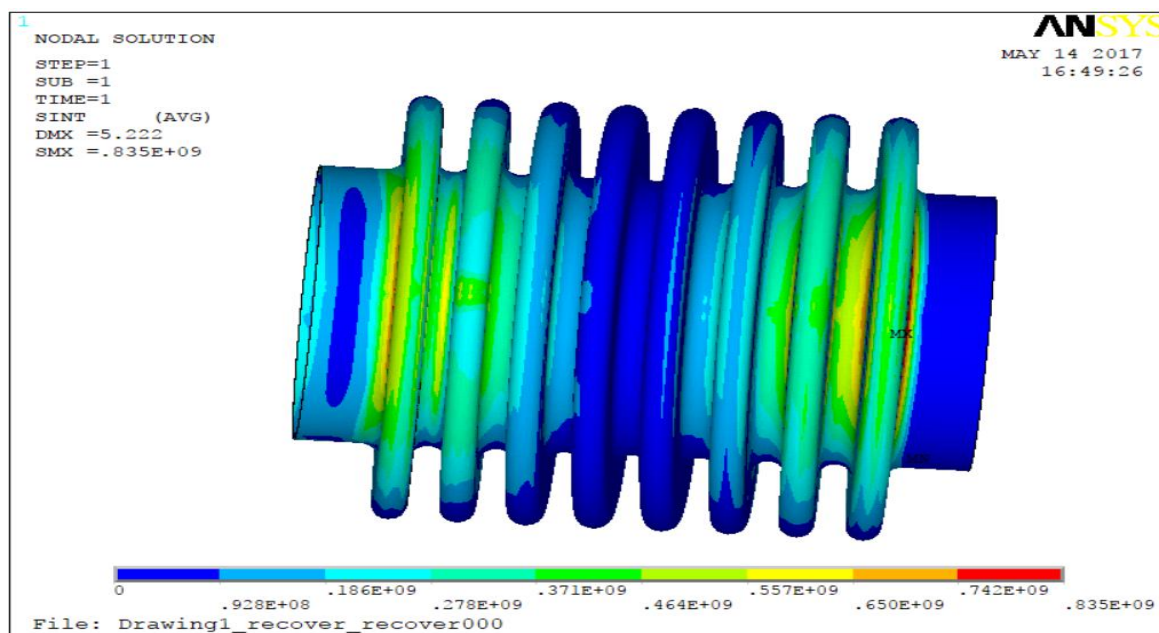
(c)轴向压缩 10mm 应力云图

图 4-3 波纹管受压缩载荷应力云图

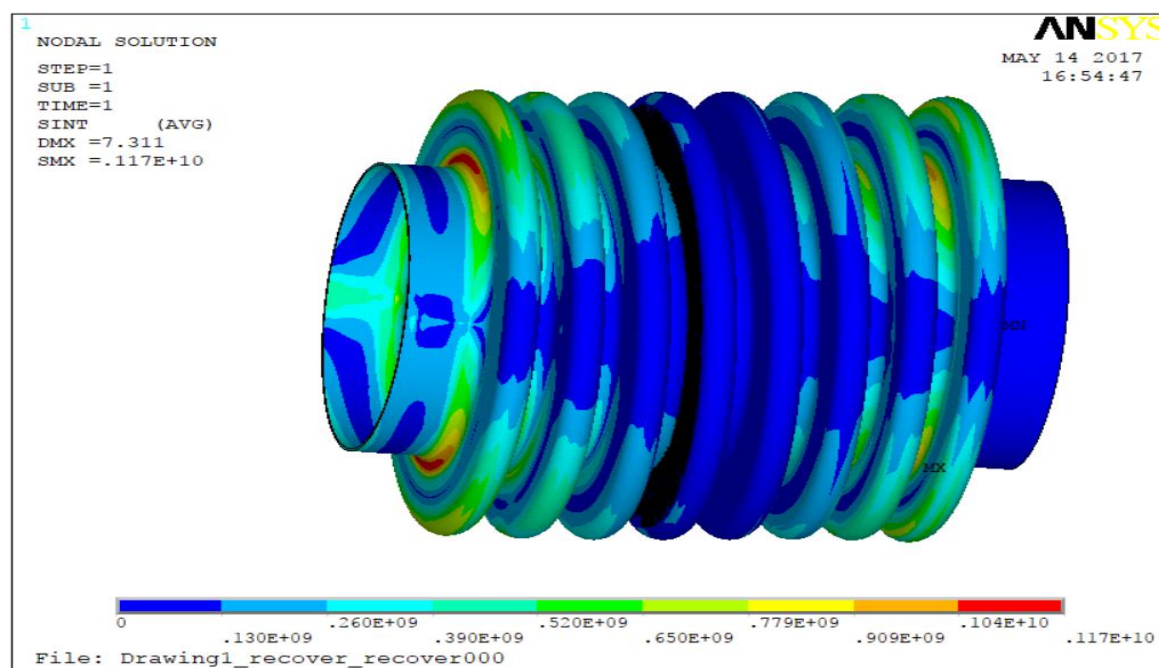
由图 4-2 和图 4-3 可以看到, 轴向拉伸波纹管 and 轴向压缩波纹管其最大应力都集中在波纹管的波峰处并且基本相同, 所以在波纹管的外表面增加金属网套可以有效加强波纹管应对轴向拉伸或轴向压缩的能力, 提高波纹管的使用寿命。

4.3 横向弯曲

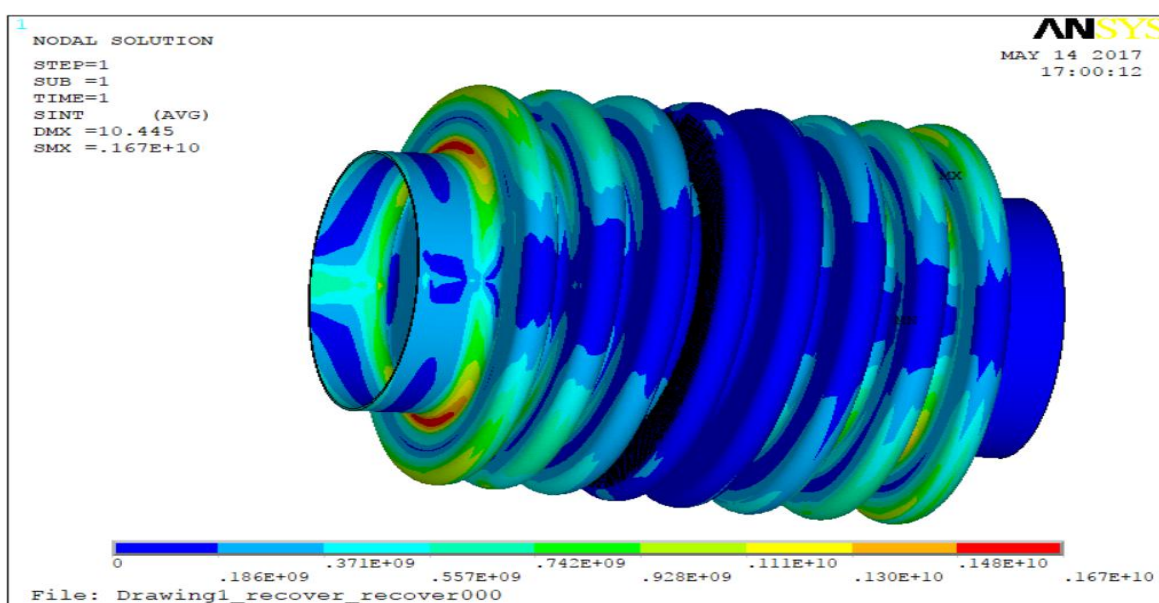
将波纹管左端节点自由度设定为零, 在波纹管的右端分别施加横向力 $UY=5\text{mm}$ 、 $UY=7\text{mm}$ 、 $UY=10\text{mm}$, 其余的自由度保持不变, 对波纹管施加弯曲载荷。



(a) 横向弯曲 5mm 应力云图



(b) 横向弯曲 7mm 应力云图



(c) 横向弯曲 10mm 应力云图

图 4-4 波纹管受弯曲载荷应力云图

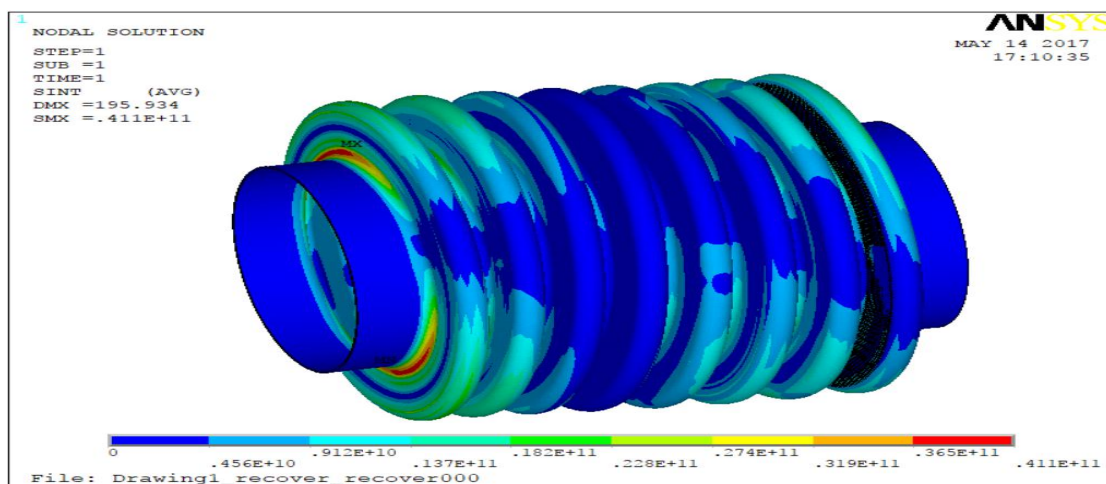
由图 4-4 可以看出波纹管的最大应力在波纹管两固定端一侧第一个波谷位置附近，所以在波纹管受到弯曲载荷时我们可以将波纹管固定端第一个波谷位置进行加厚来提高其强度延长使用寿命。

4.4 多种载荷工况

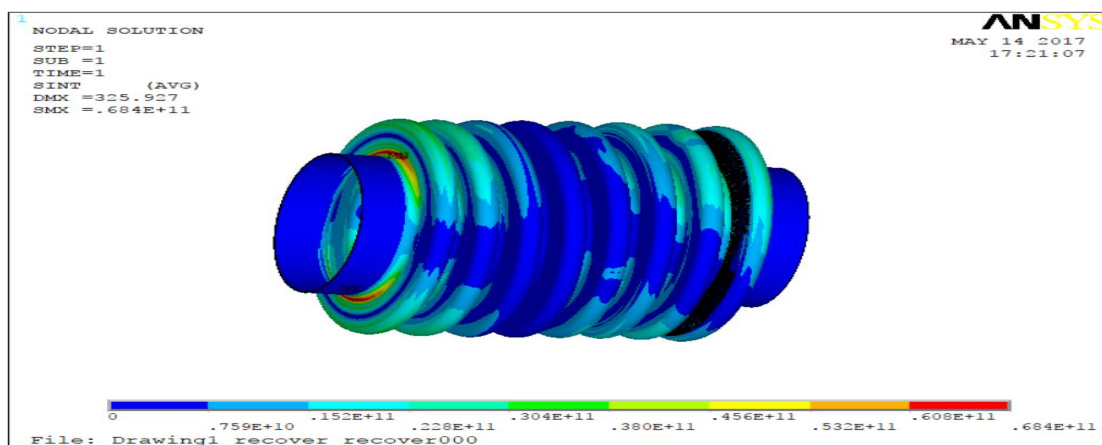
将波纹管左端完全固定左端节点自由度设置为零，在波纹管右端分别施加联合载荷 1，轴向位移 DX=5mm，横向位移 DY=5mm，内压为 3Mpa。联合载荷 2，轴向位移 DX=7mm，横向位移 DY=7mm，内压为 5Mpa。联合载荷 3，轴向位移 DX=10mm，横向位移 DY=10mm，内压为 7Mpa。

表 4-2 联合载荷情况

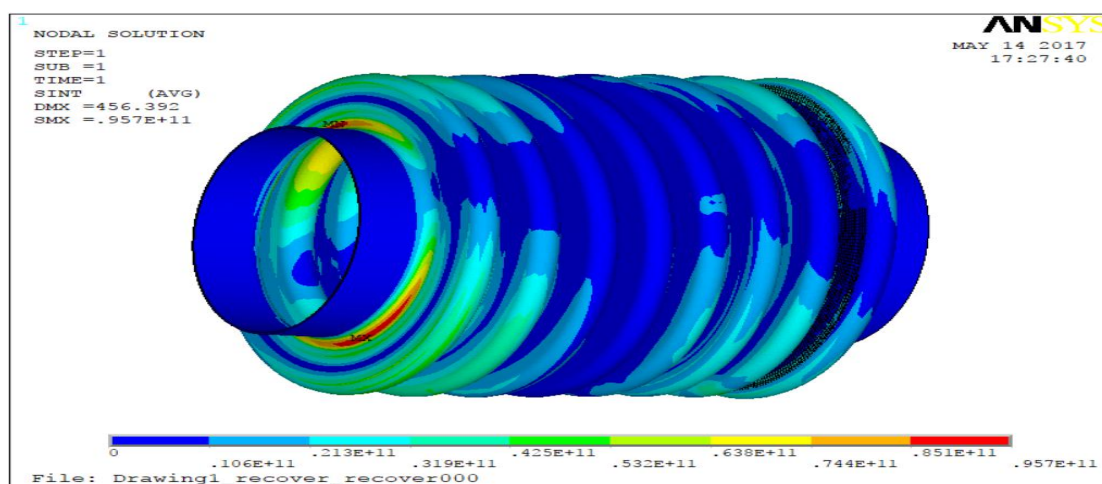
联合载荷编号	轴向位移 DX (mm)	横向位移 DY (mm)	内压 (Mpa)
1	5	5	3
2	7	7	5
3	10	10	7



(a)联合载荷 1 应力云图



(b)联合载荷 2 应力云图



(c)联合载荷 3 应力云图

图 4-5 波纹管受联合载荷应力云图

由图 4-5 可以看到波纹管在受到拉伸、弯曲以及内压的综合作用下，它的最大应力在靠近波纹管固定端的波谷处，由此可以得出波纹管在复杂工况下应力主要集中在波纹管固定端第一个波谷处，要想提高波纹管的使用寿命就必须将波纹管两端的波谷进行加厚加固处理。

4.5 本章小结

经过使用 ANSYS 软件建立了波纹管的有限元模型，并对其进行了内压、轴向拉伸压缩、弯曲以及综合工况下波纹管的静力性能分析，得出了波纹管在各种工况下的应力分布云图，为波纹管的优化设计给予了帮助。

第5章 总结与展望

本文在有限元法的基础上，提出了运用有限元分析软件 ANSYS 对金属软管的应力进行分析计算，着重研究了金属软管主体波纹管对其在各种工况条件的应力变化进行了分析计算，深入了解了金属软管的力学性能，为金属软管的设计制造以及如何让其更为耐用给予了理论依据，为进一步对金属软管的研究提供了参照。

5.1 本文的主要结论

(1) 波纹管在只承受内压的情况下，其应力最大的区域在波纹管的波谷处，我们可以通过加大波谷的厚度或改变波谷半径的方法来优化波纹管的承压能力。

(2) 波纹管在受到轴向拉伸或轴向压缩时，它的应力最大点出现在波纹管的波峰处，这也说明了增加网套可以有效保护波纹管从而提高其使用寿命。

(3) 波纹管在受到弯曲载荷影响时，最大应力出现在靠近固定端的波谷附近，而且可以看到应力有对称性，在对称轴的地方应力最小。

(4) 在复杂工况下，波纹管所受的应力大小最主要是内压，应力最大点在靠近固定端的波谷处。所以我们要想提高波纹管的使用寿命便需要对波纹管的波谷处特别是靠近两端的波谷处需要特别注意。

5.2 后续工作展望

(1) 因为金属软管结构的复杂性，对其运用有限元分析进行精确的模拟、计算和分析是困难的，对于有限元模型的建立还需要进行优化改进。

(2) 基于 ANSYS 软件还可以对金属软管开展动力学研究，对其吸收震动、瞬态振动等方面进行研究。

(3) 还需要对 ANSYS 软件进行深入学习，运用参数化建模的方法可以让我们更方便得出有限元分析计算结果。

参考文献

- [1]葛子余. 金属软管[M]. 宇航出版社, 1985.
- [2]葛子余, 蔡志奇. 金属软管波纹补偿器及其应用[M]. 宇航出版社, 1991.
- [3]李延夫, 李晓旭, 张玉杰, 等. 金属软管产品质量及应用现状[J]. 管道技术与设备, 2015(1):1-2.
- [4]杜健, 李延夫, 李晓旭, 等. 金属软管失效模式及失效原因分析[J]. 管道技术与设备, 2015(3):1-3.
- [5]SaeedMoaveni. 有限元分析:ANSYS 理论与应用[M]. 电子工业出版社, 2015.
- [6]宁连旺. ANSYS 有限元分析理论与发展[J]. 山西科技, 2008(4):65-66.
- [7]王立涛. 大型有限元分析软件——ANSYS 的应用技巧[J]. 安徽工程大学学报, 2003, 18(3):18-21.
- [8]盛冬平, 朱如鹏, 王心丰, 等. 基于 ANSYS 的金属软管的静态有限元分析[J]. 压力容器, 2007, 24(1):32-35.
- [9]屈彩虹, 岳林, 张兵, 等. 金属软管的静态有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2007, 24(8):30-31.
- [10]韩淑洁. 金属软管力学性能的非线性有限元法研究[D]. 南京航空航天大学, 2005.
- [11]刘岩, 段玫, 张道伟. 波纹管应力分析研究进展[J]. 管道技术与设备, 2006(4):31-33.
- [12]文世冬. 超高层空调管道膨胀节及金属软管的有限元分析[D]. 华东理工大学, 2016.
- [13]孙忠日. 基于 ANSYS 的 S 型金属波纹管的有限元分析[D]. 延边大学, 2014.
- [14]金枝, 孔德兵, 胡腾, 等. 基于 ANSYS 的 U 型和 S 型金属波纹管的疲劳对比分析[C]// 北京力学学会学术年会. 2015.

致 谢

时光如梭四年的大学生活已经进入了尾声，在此我要对我的母校，我的父母、我的老师和同学们表达我由衷的谢意。感谢我的母校给了我在大学四年学习生活的机会，感谢家人们对我大学四年学习的默默支持，让我可以继续学习和提高也要感谢老师和同学们在这四年以来的关心和鼓励。

老师们的谆谆教诲，同学们的关心帮助，以及父母的殷切期盼，这些都历历在目。这次的毕业论文我得到了许多老师和同学的帮助，其中我的论文指导老师王娟娟老师对我的帮助尤为重要。从选题到研究方法，软件的安装、中期论文的修改等各个环节中都给了我极大的帮助。在建模遇到困难时是老师给我指明方向，如果没有王娟娟老师的辛勤栽培、孜孜教诲，就没有我论文的顺利完成。

感谢在整个毕业论文研究写作期间在各个方面给予过我帮助的同学老师们，在此，我再一次真诚地向帮助过我的老师和同学表示感谢！