
现代固体力学实验技术

3D 打印纤维掺杂各向异性水凝胶制备 及力学测试实验报告

学院： 航空航天大学

班级： 工程力学（强基）2101

姓名： 黄于翀

学号： 3210105423

2024 年 6 月 15 日

实验报告正文

一、实验目的与任务

- 1、熟悉含纤维水凝胶前驱液的配备。
- 2、掌握 solidworks 及 simplify3d 软件的使用方法，进行 3D 打印设计。
- 3、掌握 3d 打印机的使用方法。
- 4、测试水凝胶式样单轴拉伸。
- 5、数据分析：分析实验结果，作应力-拉伸比曲线。

二、3d 打印与力学测试设备

1、水凝胶前驱液配置：

2mol/L AAm 溶液 40ml（单体溶液）

0.1mol/L MBAA 溶液 200 μ l（交联剂）

0.1 mol/L α -keto 溶液 800 μ l（引发剂）

纤维 1%质量分数 (0.4g)

Carbomer 0.4g（流变调节剂）

10mol/L NaOH 溶液 280 μ l（PH 调节）

2、实验仪器：3d 打印系统

3D 打印系统由三轴运动控制系统（FDM），气泵和点胶控制器组成的挤出系统（983A，JND）。

拉伸测试仪（INSTRON 5965）可根据 ASTM、ISO 和其他行业标准执行拉伸、压缩、弯曲、剥离、撕裂、剪切、摩擦和其他类型的机械试验。拉伸测试（或拉力测试）是将力施加到材料试样上，以测量材料对拉伸（或拉力）应力的响应

情况。此类测试可深入了解材料的机械性能。

3、打印原理：使用 DIW 进行 3D 打印时，水凝胶前驱液被针头挤出时，其中的纤维收到剪切力影响，沿着打印路径方向定向排布，导致水凝胶产生各向异性的力学性质。

4、仪器设备：

切片软件：观察，拍照，记录

3d 打印机：观察、拍照、记录；

氮气固化箱：观察、记录；

Instron 单轴拉伸机：观察、拍照、记录；

5、注意事项：

由于固化原理是基于自由基引发，在氮气固化箱中要彻底排尽空气，杜绝氧抑制作用。充入氮气，此过程最少重复三次。

三、实验步骤

1、水凝胶前驱液制备；

2、使用 solidworks 建模，simplify3D 软件切片。

3、含纤维水凝胶**单轴拉伸**试样 3d 打印，试样尺寸（长×宽×厚：30mm×10mm×2mm）；

4、氮气箱固化水凝胶；

5、使用 instron 拉伸机进行力学测试,拉伸速率 50mm/min；

6、观察记录（实验数据请重点关注！同一组内数据共享）

（1）切片软件操作照片，包括参数设置，打印路径规划等；

（2）3d 打印设备操作照片；

（3）样品打印及固化完成照片；

(4) 氮气箱固化照片；

(5) 单轴拉伸测试照片；

四、实验结果与分析（80 分）

1、相关仪器设备介绍，打印原理，纤维定向排布原理，本节详写。

(1) SolidWorks 软件

本次实验采用 SolidWorks 进行建模，生成 STL 文件，为后续的 3D 打印做准备。

(2) 切片软件

本次实验中使用 Simplify3D 软件，对 SolidWorks 中建模的形体进行切片，为 3D 打印机设置好打印路径。

(3) 3D 打印机

3D 打印机是由三轴运动控制系统，气泵和点胶控制器组成的挤出系统。

(4) 氮气固化箱

3D 打印完成后，需要用紫外灯对样品进行固化，此时必须制造氮气充满的环境。氮气固化箱左侧连接氮气瓶，内置紫外灯和压力计。

(5) Instron 单轴拉伸机

拉伸测试仪（INSTRON 5965）可根据 ASTM、ISO 和其他行业标准执行拉伸、压缩、弯曲、剥离、撕裂、剪切、摩擦和其他类型的机械试验。

拉伸测试（或拉力测试）是将力施加到材料试样上，以测量材料对拉伸（或拉力）应力的响应情况。此类测试可深入了解材料的机械性能。

打印原理：

进行 3D 打印时，水凝胶前驱液被针头挤出，其中的纤维受到剪切力影响沿着打印路径方向定向排布。沿纤维方向和垂直纤维方向力学性质的差异导致其具体排布方式的将导致水凝胶产生各向异性的力学性质。

纤维定向排布原理:

在 Simplify 软件中设置打印路径后, 打印机针头挤出的水凝胶前驱液中的纤维将在剪切力作用下沿着打印路径排布。若设置沿试样轴线方向和垂直试样轴线方向的打印路径, 则最终纤维的排布方向将呈现 0° 和 90° 情形。

2、实验过程、实验照片(打印过程、实物样品等), 本节详写。

实验过程:

(1) 配置水凝胶前驱液:

混合: 2mol/L AAm 溶液 40ml(单体溶液)、0.1mol/L MBAA 溶液 200 μ l(交联剂)、0.1mol/L α -keto 溶液 800 μ l(引发剂)、纤维 1%质量分数(0.4g)、Carbomer 0.4g(流变调节剂)、10mol/L NaOH 溶液 280 μ l(PH 调节)

(2) 使用 SolidWorks 进行 3D 建模, 使用 Simplify3D 软件切片

按照标准单轴拉伸试样要求(长 \times 宽 \times 厚: 30mm \times 10mm \times 2mm), 在 SolidWorks 中进行形体建模, 然后使用 Simplify3D 软件切片, 规划 0° 试样和 90° 试样的打印路径。

(3) 含纤维水凝胶单轴拉伸试样进行 3D 打印

(4) 使用氮气箱固化水凝胶

放入打印好的样品, 打开氮气瓶阀门并调节流量。观察压力计示数合适且稳定后, 打开紫外线灯对样品进行固化。

(5) 使用 instron 拉伸机进行力学测试

用夹具夹住试样两端后, 用拉伸机对其进行加载, 直至试样被破坏, 记录加载数据。分别对 0° 试样和 90° 试样重复三次。

实验照片:

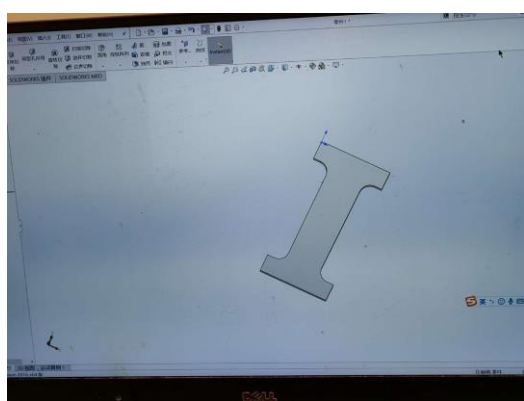


图 4.1 SolidWorks 建模

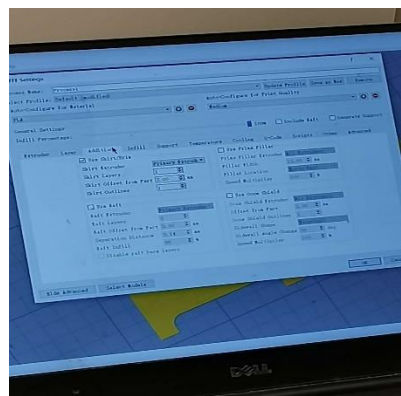


图 4.2 Simplify3D 软件参数设置

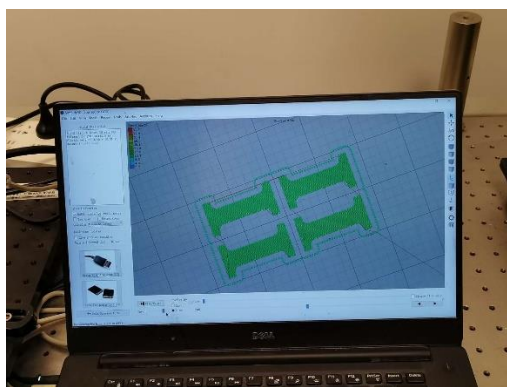


图 4.3 Simplify3D 规划打印路径

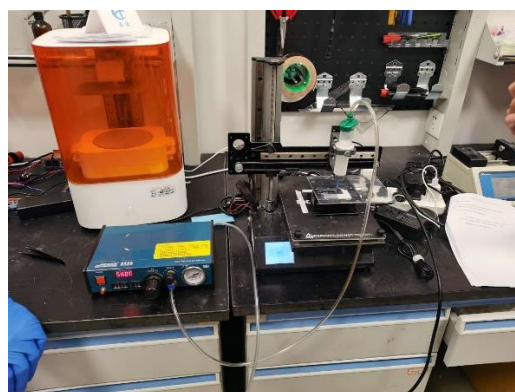


图 4.4 3D 打印机



图 4.5 打印过程



图 4.6 显微镜下观察

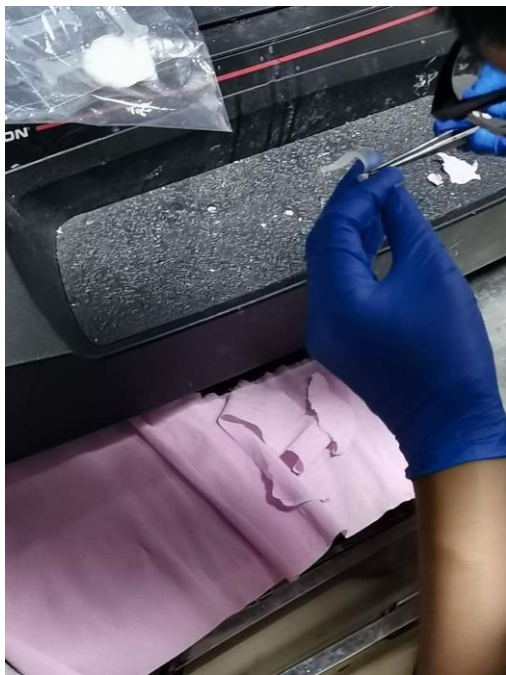


图 4.7 为样品添加防滑移



图 4.8 进行测试



图 4.9 拉断后的样品

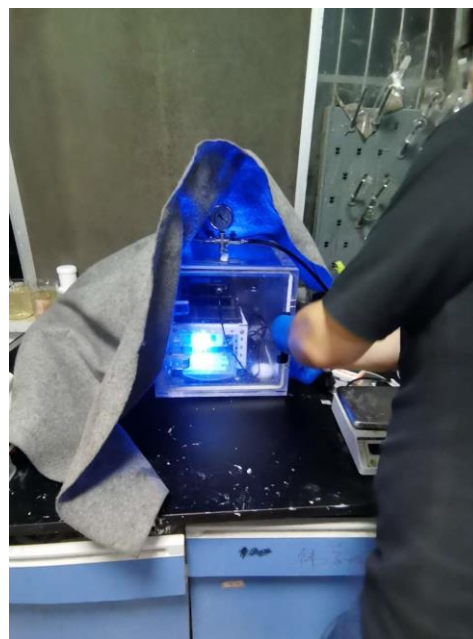


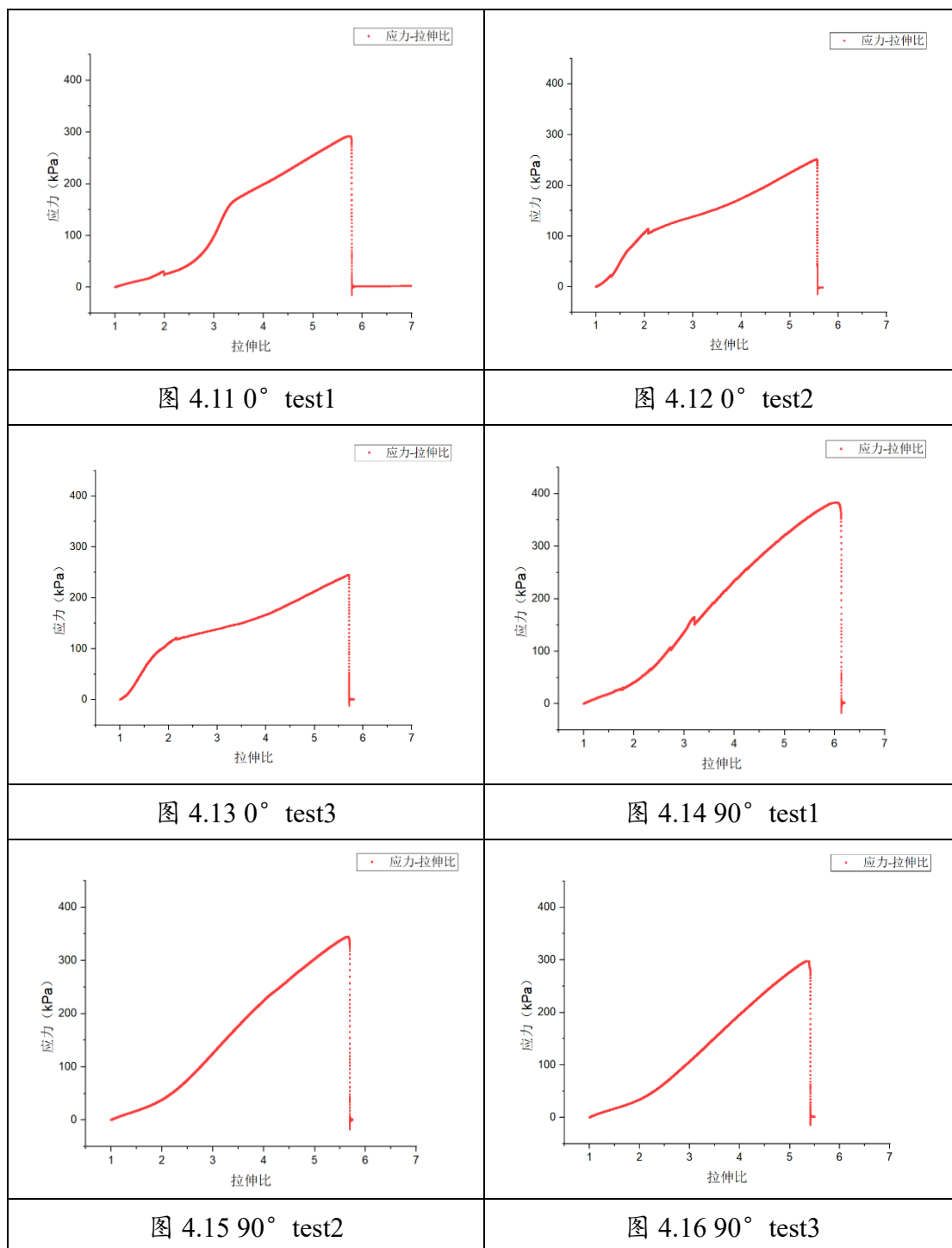
图 4.10 氮气固化样品

数据分析:

- 1、根据实验结果，画出应力-拉伸比曲线，并画出 0° 和 90° 的模量(前 10%)

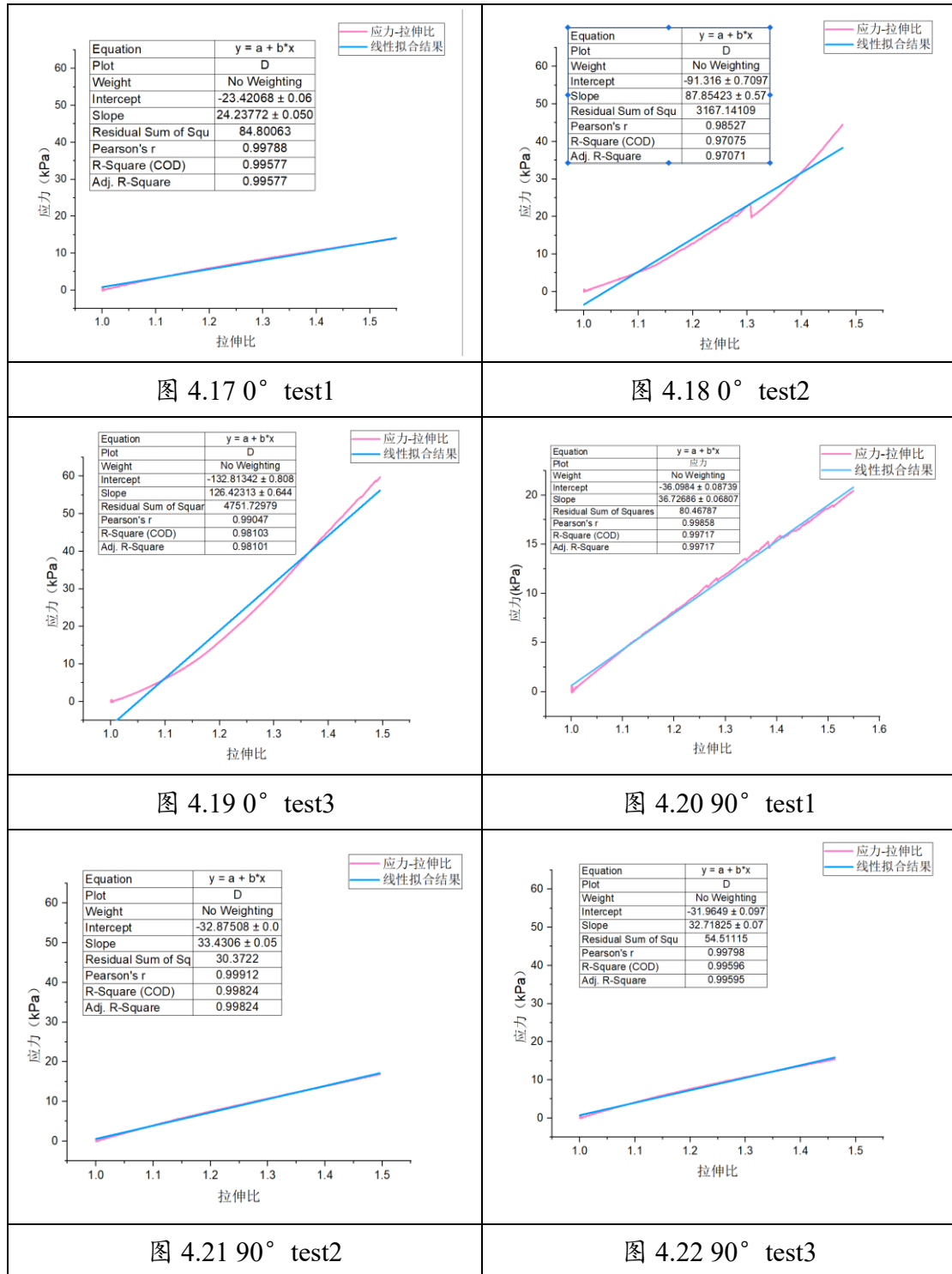
的应变), 带有 error bar (统一 kPa 单位)。

首先画出应力-拉伸比曲线



从整体上来看, 90° 的试样几次实验得到的曲线较为相似。0° 试样则通过肉眼就能看出些许差别

接下来给出各次实验前 10%应变的应变-拉伸比曲线。



通过 3 次实验取平均值，得到两个试样的杨氏模量。

$$E_0 = 79.505 \text{ kPa} \quad E_{90} = 34.292 \text{ kPa}$$

画出经过数据处理后得到的杨氏模量误差棒图。可以看到，0° 试样三次测出来的杨氏模量差异较大，90° 试样则较为接近，差异较小。

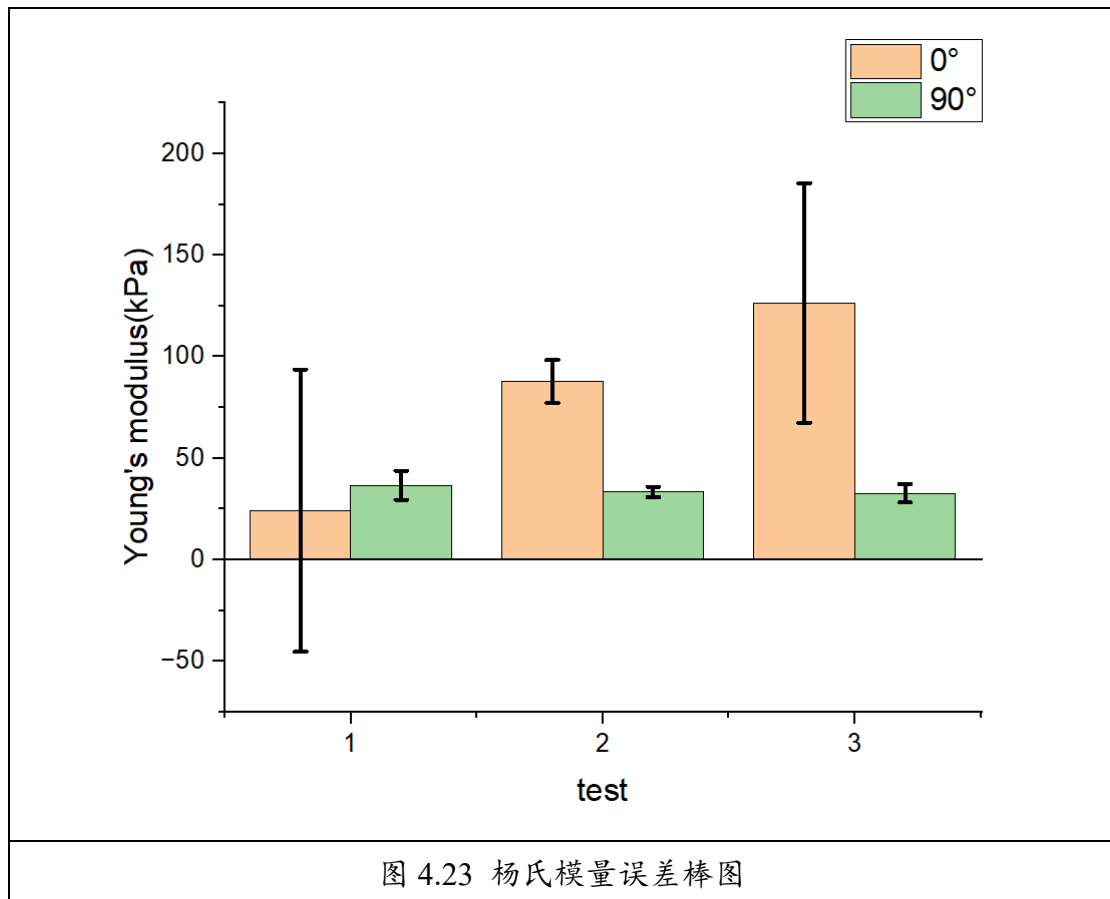


图 4.23 杨氏模量误差棒图

2、对 (1) 的对比结果进行原因分析，拉伸比，模量的差异因素，详细列出。

从 (1) 中可以看出，纤维排布方向不同，其杨氏模量差异很大，前者远大于后者。

0° 试样的应力应变曲线拟合结果较差，同时所测杨氏模量不确定度大。相反，90° 试样应力应变曲线拟合结果较好，同时所测弹性模量的不确定度较小。

下面分析原因：

首先解释一下两种排布方向差异明显的原因。不同的排布方式直接影响了试样的力学性能。排布方向为 0° 时，因为纤维的方向与应力方向一致，主要由纤维方向拉伸变形以承受外载荷，试样在纵向上诱更高的强度和刚度。当排布方式为 90°，纤维方向与应力方向垂直，主要由纤维之间的黏附作用承受外载荷，因此两种排布方式的杨氏模量在数值上存在差异。

另外对于 0° 试样不确定度大这一点，因为纤维中随机分布着不同的缺陷，

这将增加 0° 试样轴向拉伸实验结果的不确定度。这一点对 90° 试样的影响就较小。

五、拓展问题（20 分）

1、同一角度不同试样之间应力应变曲线不完全相同，可能的原因有哪些？纤维不同的排布方向主要起到什么作用？（10 分）

同一角度不同试样之间应力应变曲线不完全相同的原因：

（1）试样的制备过程不尽相同，试样的尺寸、形状或组织结构难免会有细微的差异，也就导致最后的测量结果存在差异；

（2）实验时的拉伸速率、加载方式以及固定方式都会对最终结果造成影响；

（3）水凝胶材料对湿度和温度比较敏感，因此环境也是一个潜在的影响因素；

纤维的排布方向不同，则力学性能也会产生变化。在本次实验中就选取了两种不同排向的水凝胶试样来进行抗拉伸性能的对比。

在实际生产或者应用中，这一点也可以帮助我们使用 3D 打印纤维增强水凝胶的各向异性力学本构，从而得到我们需要的最终产品。

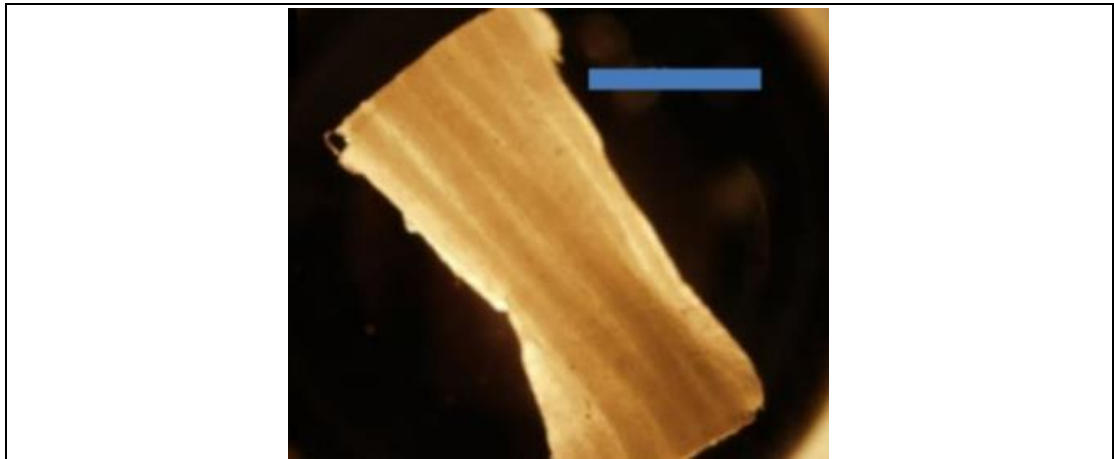


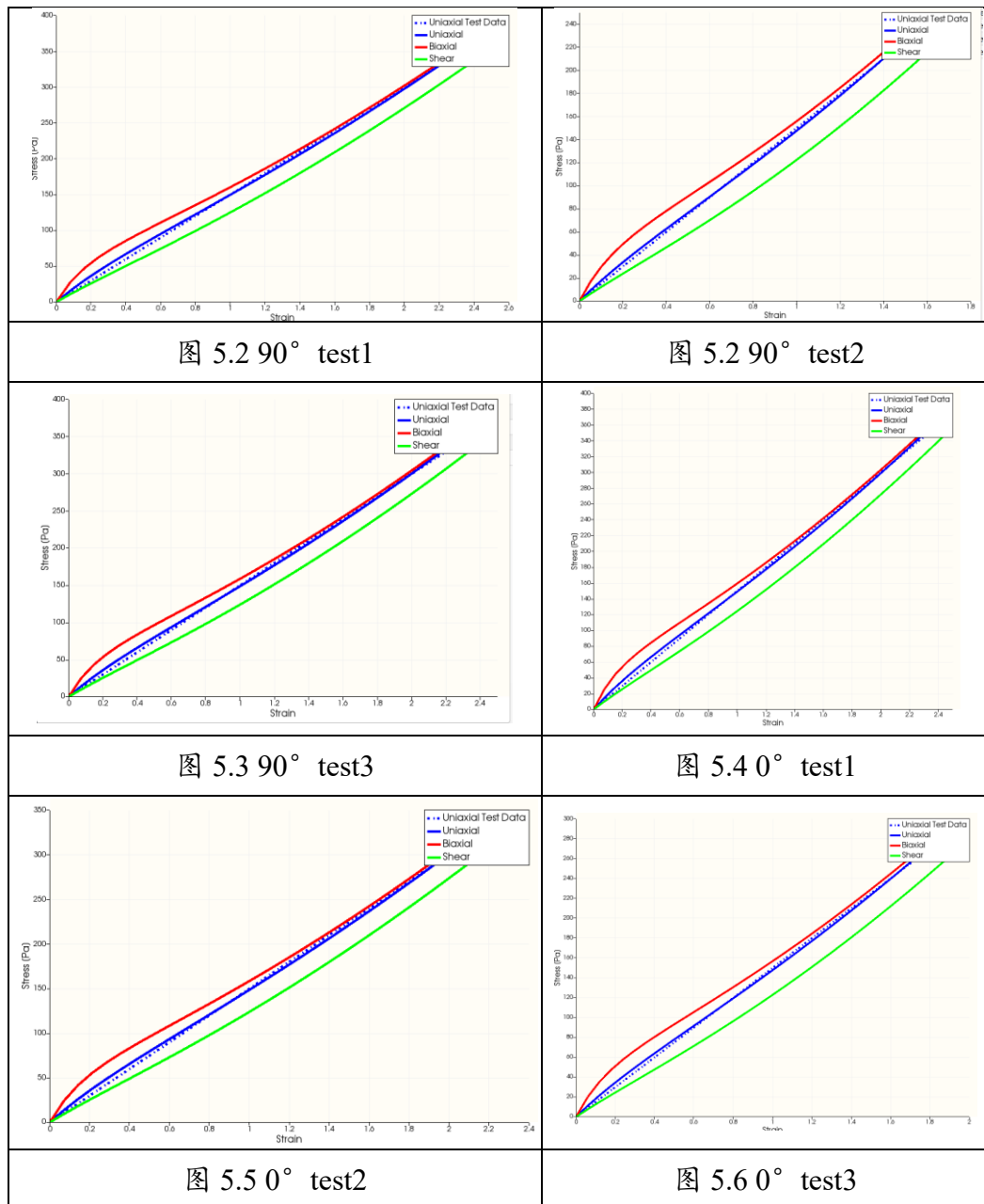
图 5.1 3D 打印肌腱类结构

2、使用本构模型（如 Ogden，Neo-Hookean 等唯象模型）拟合 0° 和 90°

的拉伸曲线，注明使用的模型，并写明所有的拟合参数；（10 分）

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k}$$

其中，N 为多项式的阶数， α 和 μ 是待定的系数。我使用 MatEditor 软件，利用一阶 Ogden 模型对实验数据进行拟合，结果如下。



参数的拟合结果则如下所示。

实验组数	μ (Pa)	α
90° test1	54.9616	2.55128
90° test2	45.9245	2.76859
90° test3	52.8066	2.59488
0° test1	53.7418	2.57544
0° test2	52.2935	2.60593
0° test3	48.9165	2.68569

得到的结果和预期不太符合。因为六次实验的拟合结果都十分相近，可能是对 MatEditor 软件的使用不熟悉造成的错误，但是经过多次尝试仍未找到是哪个步骤出现了疏漏，因此就按上述拟合结果作为最终结果。