



## 基于单轴拉伸试验机的双轴拉伸 夹具设计与应用

周龙早, 刘 杰, 刘 辉

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 该文针对单轴拉伸试验机不能实现双轴拉伸试验的问题, 设计了一种能够将单轴拉伸运动精准地转换为双轴拉伸运动的双轴拉伸夹具。首先介绍了双轴拉伸夹具的基本原理和运动机构; 然后以细菌纤维素水凝胶十字拉伸试样进行双轴拉伸试验, 通过对水平和垂直方向拉伸位移的比较, 来对双轴拉伸运动的精度和可靠度进行验证。结果表明: 双轴拉伸垂直位移  $Y$  与水平位移  $X$  的线性回归关系为  $Y=0.9998X+0.002$ , 样本判定系数  $R^2=1$ ; 水平位移和垂直位移在 0~10 s 内的标准差基本在千分之一的水平。试验结果有力地证明了双轴拉伸夹具具有较高的精度和可靠度, 能够较精确地将单轴拉伸力转换为双轴拉伸力, 从而成功实现基于单轴拉伸试验机的双轴十字拉伸实验。

**关键词:** 单轴拉伸试验机; 双轴拉伸夹具; 双轴拉伸试验; 力学测试

中图分类号: TB302.3

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20170642

## Design and Application of Biaxial Tensile Fixture Based on Uniaxial Tensile Testing Machine

ZHOU Longzao, LIU Jie, LIU Hui

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the uniaxial tensile testing machine cannot achieve the biaxial tensile test, a biaxial tensile fixture capable of accurately converting the uniaxial tensile motion into the biaxial tensile motion is designed. First, the basic principle and motion mechanism of the biaxial stretching jig is introduced; then, a biaxial tensile test is performed with a bacterial cellulose hydrogel cross tensile sample, and the comparison of the horizontal and vertical tensile displacement is performed to complete verification of the accuracy and reliability of biaxial stretching movements. The results show that the linear regression relationship between the vertical displacement  $Y$  and the horizontal displacement  $X$  is  $Y=0.9998X+0.002$ , the determinants of coefficient  $R^2=1$ . The standard tolerances between the horizontal displacement and the vertical displacement within 0 to 10 seconds are almost in the level of one in a thousand. The test results suggest that the biaxial tensile fixture could transform a uniaxial tensile motion into a biaxial one. It can successfully realize the biaxial cruciform tensile test based on the uniaxial tensile testing machine.

**Key words:** uniaxial tensile testing machine; biaxial tensile fixture; biaxial tensile test; mechanical test

单轴拉伸试验机是实验室配备的常见设备之一, 因为用它做的单轴拉伸实验是最为常见的力学测试, 其用于测量材料在特定一个方向上的力学属性, 如杨氏模量、极限应力与应变等<sup>[1-2]</sup>。实验室常常配置几台不同规格的单轴拉伸试验机, 以满足测试各种不同材料、不同形状标准试样的要求, 如金属及陶瓷材料的测试需要的作用力较大, 而如橡胶、生物材料等需要的测试灵敏度较

高。单轴拉伸试验机主要实现的是准静态单轴拉伸实验, 即拉伸试验机在一个方向上对材料施加一个匀速的位移, 再通过力传感器反馈得到某一时间点的力。然后将得到的位移-时间与力-时间的数据整合成为位移-力的关系, 再根据样品的尺寸规格计算出相应的应力-应变曲线, 最终得出材料在某一个方向上的力学属性<sup>[3]</sup>。这种测试方法几乎适用于任何材料, 所以单轴拉伸试验机是每

收稿日期: 2017-12-27; 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 华中科技大学教学研究项目(2015010)。

作者简介: 周龙早(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料加工工程专业的教学和研究。

个实验室的必备设备之一。

对于一些各向异性的材料而言，每个方向上的力学属性都不同。在有限元模拟中，如果仅仅简单地使用一个方向上的力学属性作为材料的主属性，将会带来很大的误差，对工程应用会造成很大的不便。在连续介质力学理论中，置于三维空间的形变物体受到  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴三个方向的主应力，所以在材料力学测试中通常只考虑  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  三个方向的力学性能，并且这种方法广泛用于一些经典的力学模型中。在通常情况下，测试各向异性材料的力学属性是通过单轴拉伸实验分别测试材料在三个方向上的力学属性。然而这种测试得出的各向异性力学属性通常会存在原理上的误差，但是由于实验过程简单有效且误差在允许范围内，所以这种原理上的误差常常被忽略<sup>[4-5]</sup>。但是在有一些情况下，特别是在测试大形变的软质材料时，单轴测试中样品形状会发生显著变化，这种误差将会增加，并且单轴测试得出的材料属性并不能完全描述材料的力学表现<sup>[6-7]</sup>。为了减少这种误差以便获得更完全的材料属性，进行双轴甚至三轴测试是非常有必要的，而且测试结果也是比较准确的。但是，通常情况下三轴拉伸的样品制备要求非常高，且不易把握，三轴测试往往是压缩实验，因此会更多地使用二轴测试的方法<sup>[8-11]</sup>。

对于一些膜材料而言，其在膜平面内的力学性能相比于垂直于膜平面方向的力学性能来说要重要，且膜材料的拉伸性能相比于压缩性能在应用方面要重要得多，所以双轴平面十字拉伸实验在膜材料的力学测试中越来越受到重视<sup>[12-16]</sup>。然而很多实验室没有配备专业的双轴拉伸试验机，其主要原因是成本高，且双轴拉伸实验并不是主流的力学测试实验。因此，以较低的成本设计一种可用在单轴拉伸试验机上的双轴拉伸夹具来实现双轴拉伸是一种非常实用的方案。

本文以较低的成本、较简单的运动原理设计一种基于单轴拉伸试验机的双轴拉伸夹具，能够较精确地将单轴拉伸力转换为双轴拉伸力，从而实现双轴拉伸实验。然后以细菌纤维素水凝胶十字拉伸试样进行双轴拉伸试验，通过对水平和垂直方向拉伸位移的比较，来对双轴拉伸运动的精度和可靠度进行验证。

## 1 双轴拉伸夹具设计及运动原理分析

### 1.1 双轴拉伸夹具的运动原理分析

本文设计并制造一种特制的可用于单轴拉伸试验机的双轴拉伸夹具，能够较精确地将单轴拉伸力转换为双轴拉伸力，从而实现对样品施加双轴拉伸力，单轴拉伸试验机配合双轴拉伸夹具实现双轴拉伸的过程如图 1 所示。其运动的主要原理如下：双轴拉伸夹具主要由上夹板、下夹板和上下、左右四块夹钳构成，上下夹板分别与单轴拉伸试验机的底座和可动夹持端相连，拉伸试验样品通过上下、左右四块夹钳进行装夹，如图 1(a) 所示；分别由上下、左右四块夹钳中心点所构成的四边形在上夹板从工位  $A$  运动到工位  $B$  的过程中始终保持为正方形，如图 1(b) 所示；左右两块夹钳在运动过程中需保持在水平位置，并且能够同时随着上下夹板做轴向运动，如图 1(b) 中工位  $a$  到工位  $b$  所示；当单轴拉伸试验机通过上下夹板对双轴拉伸夹具施加一个垂直方向的拉伸位移时，双轴拉伸夹具能够通过左右两块夹钳对拉伸试验样品施加一个同样大小的水平方向的拉伸位移，以此实现均匀施加双轴拉力，从而实现基于单轴拉伸试验机的双轴十字拉伸运动。

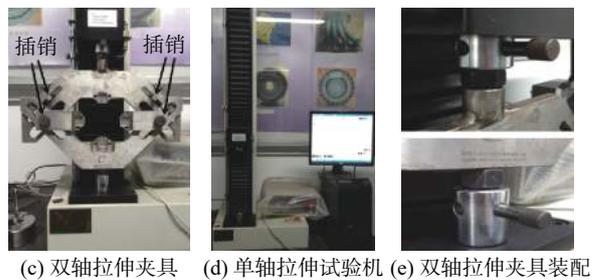
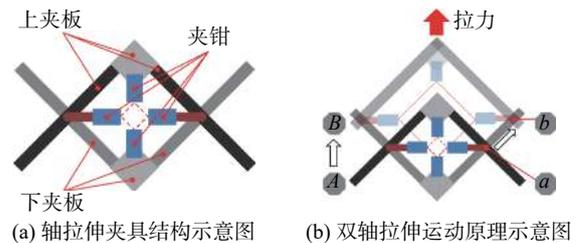


图 1 双轴拉伸夹具设计

因为上夹钳和下夹钳在运动过程中始终分别随着上夹板和下夹板一起运动，所以在实际加工制造中它们分别与上夹板和下夹板合并为一体。为了使左右两块夹钳能够在上下夹板的槽中沿着轴向自由运动，设计并使用了圆柱形插销将左右

夹钳固定在上下夹板的槽中, 即在运动过程中为滚动摩擦。在滚动界面上施加固态润滑剂以减小摩擦带来的误差。如果只分别用一根插销固定左右夹钳, 由于配重不均匀, 左右夹钳将在重力的影响下会竖直朝下, 给实验带来极大不便。为了应对这种情况, 分别使用两根插销来固定左右夹钳, 其中靠近单轴拉伸试验机可动端的第二根插销起到固定夹钳水平工位的作用, 并且该插销只在上夹板的固定槽中滚动, 如图 1(c) 所示。为了在单轴拉伸试验机上顺利装配夹具, 需要准确测量单轴拉伸试验机的底座、可动端和其他相关部位的定位尺寸, 并且配合使用插销固定法将双轴拉伸夹具固定在单轴拉伸试验机的底座和可动端上, 如图 1(e) 所示。

由于拉伸实验对设备的精度要求非常高, 在夹具设计过程中必须考虑各部件的高配合度与小公差要求, 所以对夹具的加工精度要求较高, 整套夹具设备基本上需要采用线切割的工艺方法进行加工。

### 1.2 双轴拉伸夹具的受力分析

本文设计的基于单轴拉伸试验机的双轴拉伸夹具能够较精确地将单轴拉伸力转换成为双轴拉伸力, 其双轴拉伸试样的受力分析如图 2~图 4 所示。

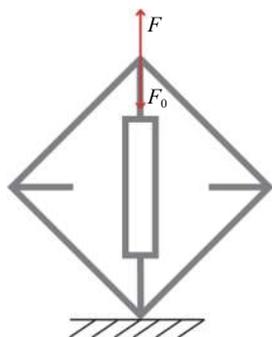


图 2 只加载竖直方向试样的受力分析

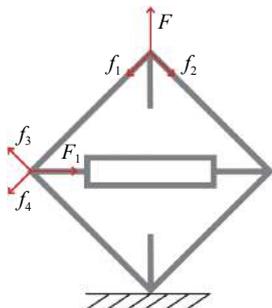


图 3 只加载横向方向试样的受力分析

在不考虑夹具机构摩擦力的情况下, 只加载竖直方向的试样, 如图 2 所示, 可得:

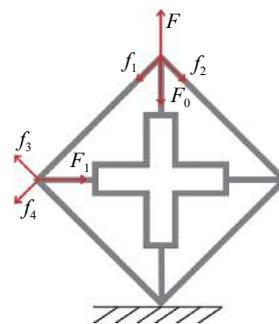


图 4 加载双向试样的受力分析

$$F = F_0 \quad (1)$$

如果只加载横向试样, 如图 3 所示, 对夹具结构进行简化后, 进行静力学分析, 拉伸机对夹具施加力  $F$ , 上夹板双臂分别承受力  $f_1$  和  $f_2$ , 因上夹板双臂拉伸机施力方向分别成  $45^\circ$ , 可得:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} (f_1 + f_2) \quad (2)$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} f_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} f_2 \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)可得:

$$F = \sqrt{2} f_1 \quad (4)$$

在运动过程中, 插销需要分别同时沿着上下夹板的槽内运动, 可知下夹板对插销施加反向作用力  $f_4$ , 上夹板对插销施加反向作用力  $f_3$ , 并且有:

$$f_1 = f_4$$

$$f_4 = f_3$$

$$F_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} (f_3 + f_4) = F \quad (5)$$

由式(5)可知, 对试样施加的水平与垂直方向的力是相等的。可知, 此夹具机构可以将竖直方向的力转换为单向水平拉力。

如果加载的是双向试样, 如图 4 所示, 由式(1)和式(5)可知样品两个方向受力的合力为:

$$F = F_0 + F_1 \quad (6)$$

此夹具的特点是施加水平和竖直方向等量的位移,  $F_0$  与  $F_1$  的关系取决于材料特性, 如各向同性材料, 理论上  $F_0 = F_1$ 。

稍钉处因为存在未知的摩擦力与为防止水平夹头下垂而维持的力耦作用, 所以实际中力的测量需要在夹头处额外安装力传感器。

### 1.3 双轴拉伸夹具的位移分析

在运动过程中的任意一时间, 垂直方向的位移为  $u$ , 水平方向为  $d$ , 如图 5 所示。

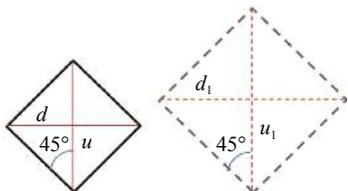


图 5 双轴拉伸夹具的位移分析

因上下夹板双臂与垂直位移方向成 45°，可知：

$$u = d \quad (7)$$

经过任意垂直位移增量  $\Delta u$  后：

$$\begin{aligned} u_1 &= u + \Delta u \\ d_1 &= d + \Delta d \end{aligned}$$

又因上下夹板双臂与垂直位移方向成 45°，可得：

$$\begin{aligned} \Delta u &= \Delta d \\ u_1 &= d_1 \end{aligned}$$

因此，在运动过程中，水平位移始终与垂直位移相等。

## 2 双轴拉伸实验及误差分析

### 2.1 双轴拉伸实验

采用细菌纤维素水凝胶 (bacterial cellulose, BC) 的正交十字样品作双轴拉伸实验，实验过程如图 6 所示。

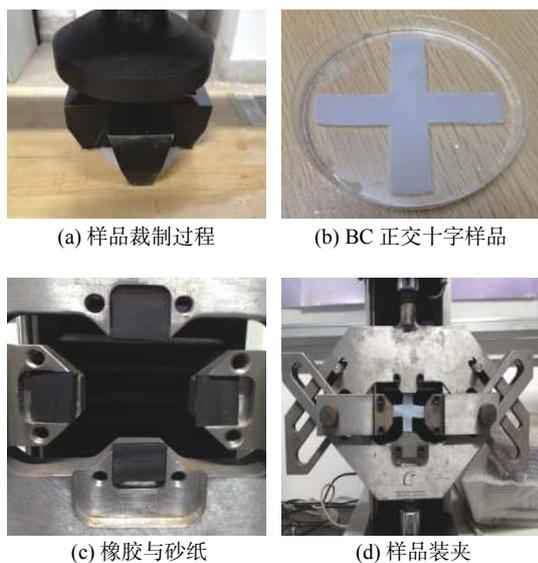


图 6 BC 样品双轴拉伸试验

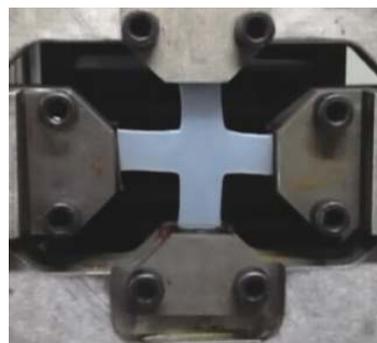
BC 是一种新型的生物材料，其优秀的生物相容性使其已经被用于多种生物医疗领域<sup>[17]</sup>。从结构上来说，细菌纤维素水凝胶由多层纳米网结构构成，是一种典型的多层生物非编织材料。在双轴拉伸实验制样过程中，将 BC 膜置于定制的十字裁刀下，用冲压机做出正交十字样品，如图 6(a)和(b)

所示。为了防止拉伸过程中 BC 样品在上下、左右四块夹钳的夹持部位处出现滑移，在样品和夹持部位增加橡胶和砂纸，利用二者较大的摩擦系数实现样品的可靠夹持，如图 6(c)所示。将 BC 十字样品装夹在双轴拉伸夹具的夹钳中，然后以 60 mm/min 的速度进行匀速双轴拉伸，拉伸位移为 10 mm，如图 6(d)所示。

双轴拉伸过程中，将一台数码相机放置在三脚架上，静置于样品前方，相机的镜头轴向中心垂直于双轴拉伸平面，并且以定时拍照的方式记录拉伸过程中水平与垂直方向的拉伸位移情况，如图 7 所示。在拉伸过程中，每隔一秒采集一张图像，试样在拉伸试验各阶段的图像如图 7(a) ~ 图 7(c)所示。其中，垂直方向的拉伸位移和拉伸



(a) 试样拉伸阶段1



(b) 试样拉伸阶段2



(c) 试样拉伸阶段3

图 7 BC 双轴拉伸试验图像

时间以单轴拉伸试验机记录的为准, 水平方向的拉伸位移通过图像处理软件 Image-Pro 采集得到, 所得到的水平方向和垂直方向的位移数据用于分析双轴拉伸夹具的拉伸精度。

## 2.2 误差分析

根据 1.1 及 1.2 节中的双轴拉伸夹具样品受力和位移分析可知, 理论上双轴拉伸夹具的垂直和水平两个方向的拉伸位移应该是完全相等的。但是, 考虑到双轴拉伸实验需要较高的精度, 而且双轴拉伸夹具在制造过程中难免会产生一定的误差, 这将可能导致垂直和水平方向的拉伸位移出现不相等的情况。因此, 有必要根据 BC 双轴拉伸实验的结果, 来检测夹具是否能够对样品施加一个相对高精度的十字双轴拉伸位移, 即对 BC 样品的双轴拉伸实验进行位移误差分析, 如图 8 所示。夹具机构设计中在如图 1(c) 中插销位置存在摩擦力, 因此, 为了精确测量作用力大小, 可在此夹具夹头位置安装力传感器。因本文主要阐述在单轴拉伸机上实现双轴拉伸效果, 作用力的测量将会是未来工作的一部分。值得注意的是, 此

夹具机构设计中, 竖向和水平作用力不能任意给出, 限制了本夹具的实用范畴, 也将会在未来的工作中改进。

其中, 图 8(a) 显示的是在同一时间点, 双轴拉伸夹具水平方向位移  $d$  和垂直方向位移  $u$  的对比结果。采用线性回归的方式得到水平方向位移和垂直方向位移的关系为  $u=0.9998d+0.002$ , 图中显示的样本判定系数  $R^2=1$ , 有效地证明了双轴拉伸夹具具有较高的精度, 水平方向和垂直方向的位移基本相等。图 8(b) 显示的是水平方向位移和垂直方向位移在 0~10 s 内的标准差, 从图中可以看出水平和垂直方向位移的误差值基本在千分之一的水平, 这同样也证明了双轴拉伸夹具具有较高的可靠度。

## 3 结束语

本文主要介绍了一种可用于单轴拉伸试验机上的双轴拉伸夹具的设计。由于双轴拉伸实验正在成为一种重要的测试各向异性材料的力学性能的方法, 且大部分实验室没有配备标准的双轴拉伸试验机。而单轴拉伸试验机是很多实验室的常备设备之一, 因此本文成功设计了一种原理简单地将单轴拉伸位移精密地转换成双轴拉伸位移, 并根据这一原理制造出了一种用于单轴拉伸试验机的双轴拉伸夹具。试验测试结果表明, 双轴拉伸垂直位移  $u$  与水平位移  $d$  的线性回归关系为  $u=0.9998d+0.002$ , 样本判定系数  $R^2=1$ ; 水平位移和垂直位移在 0~10 s 内的标准差基本在千分之一的水平。试验结果有力地证明了双轴拉伸夹具具有较高的精度和可靠度, 能够较精确地将单轴拉伸力转换为双轴拉伸力, 从而成功实现基于单轴拉伸试验机的双轴拉伸实验。基于单轴拉伸试验机的双轴拉伸夹具具有结构简单、价格低廉和易于操作的特点, 可有效增强实验室的实验能力。

## 参考文献

- [1] PRUITT L A, CHAKRAVARTULA A M. Mechanics of biomaterials: fundamental principles for implant design[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [2] MOHAN D, MELVIN J W. Failure properties of passive human aortic tissue II—Biaxial tension tests[J]. *Journal of Biomechanics*, 1983, 16(1): 31–44.

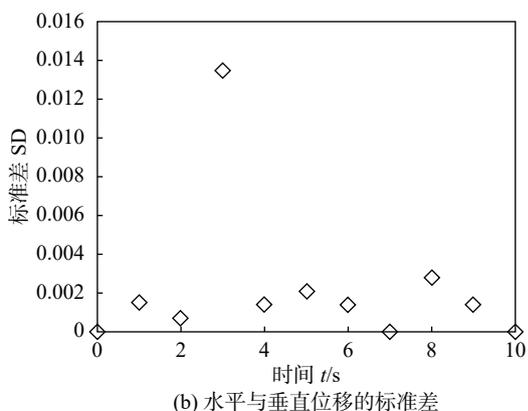
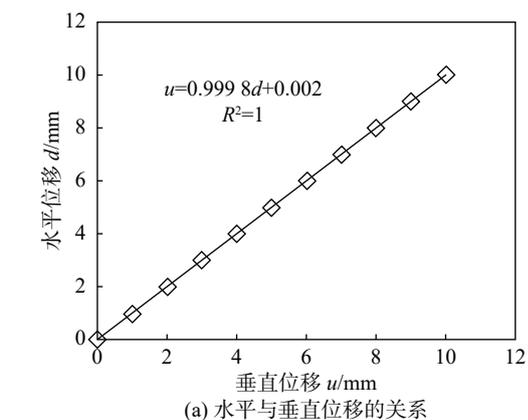


图 8 BC 样品双轴拉伸试验水平与垂直位移的关系及其标准差