



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113281166 B

(45) 授权公告日 2023.05.02

(21) 申请号 202110366444.7

审查员 梁翠

(22) 申请日 2021.04.06

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113281166 A

(43) 申请公布日 2021.08.20

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街  
道高新技术产业园南区粤兴一道18号  
香港理工大学产学研大楼205室

(72) 发明人 滕锦光 谢攀 汪子豪 刘开诚

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理师 谢松 徐凯凯

(51) Int. Cl.

G01N 3/08 (2006.01)

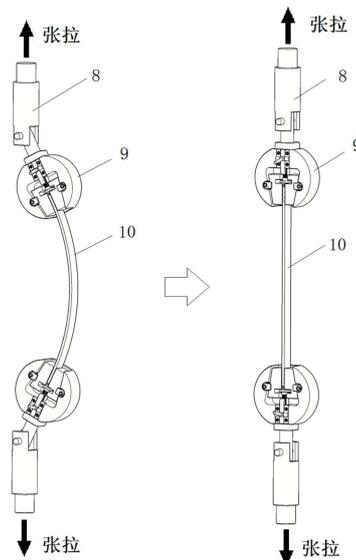
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的  
试验方法

(57) 摘要

本发明公开了一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的新型试验方法,称之为弧形试件拉伸试验方法。本方法通过张拉沿复材管环向截取的弧形试件来测取复材管的环向弹性模量和泊松比,其中固定弧形试件端部的两个楔形式自锁夹具分别通过一个专门设计的单向铰与拉伸试验机相连,用以吸纳试验初始阶段弧形试件的平面外弯曲变形。另外,本试验方法对弧形试件的制备、拉伸试验装置、拉伸加载制度、环向弹性模量和泊松比计算方法,以及本试验方法的适用范围等都给出了具体而明确的规定。本发明操作简单,测量结果准确,适用性广,属于纤维增强复合材料拉伸试验技术领域。



1. 一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的试验方法,其特征在于,对弧形试件进行拉伸,所述方法包括步骤:所测试的弧形试件直接沿复材管环向截取,并粘贴应变片;弧形试件的两端分别夹紧在楔形式自锁夹具上;楔形式自锁夹具通过单向铰与拉伸试验机相连,以实现拉伸过程中弧形试件绕单向铰钢轴的自由转动;试验共包括两个阶段;试验的第一阶段:在拉伸作用下,弧形试件的平面外弯曲逐渐被吸纳,直至弧形试件被拉直;试验的第二阶段:从弧形试件被拉直到弧形试件被拉伸到规定应变或最终破坏后,即完成整个试验;根据试验的第二阶段中线性范围所测得的拉力数据、应变数据计算获得复材管的环向弹性模量和/或泊松比;

所述粘贴应变片包括:应变片精准地定位并粘贴于弧形试件的内外两面,在弧形试件的内表面中部两侧沿纵向分别粘贴第1应变片和第2应变片,在外表面中心位置沿纵向粘贴第3应变片;当需要测量泊松比时,除第1应变片、第2应变片以及第3应变片外,需在弧形试件的外表面靠近第3应变片的位置沿横向粘贴第5应变片,在弧形试件内表面对应于第5应变片的位置沿横向粘贴第4应变片,采用标距为5mm至20mm的应变片,同时应变片标距不小于弧形试件纤维分布结构最小重复尺寸的3倍;

计算弧形试件的环向弹性模量和泊松比时,按如下方法进行计算拉伸应力:

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot t},$$

式中:

$\sigma$ ——表示拉伸应力;

$F$ ——表示拉伸荷载;

$b$ ——表示弧形试件宽度;

$t$ ——表示弧形试件厚度;

对应试验加载的第二阶段,拉伸应力-拉伸应变曲线的基本表现为线性,其斜率即为复材管的环向弹性模量,选取拉伸应力-平均拉伸应变曲线中线性范围内应变增长至少为0.2%两点间的数据用于计算弧形试件的环向弹性模量,环向弹性模量为对应的拉伸应力增长与平均拉伸应变增长的比值,由下式计算:

$$E_{\theta} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{ave}},$$

式中:

$E_{\theta}$ ——表示复材管的环向弹性模量;

$\Delta\varepsilon_{ave}$ ——表示第二阶段平均拉伸应变增量,至少为0.2%;

$\Delta\sigma$ ——表示与第二阶段平均拉伸应变增量 $\Delta\varepsilon_{ave}$ 对应的拉伸应力增量;

泊松比的计算:

泊松比为对应的平均横向应变增长与平均纵向应变增长的比值,由下式计算:

$$\nu_{\theta x} = \left| \frac{\Delta \varepsilon_l}{\Delta \varepsilon_f} \right|,$$

$$\varepsilon_l = \frac{1}{2} (\varepsilon_4 + \varepsilon_5),$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{ave},$$

$\nu_{\theta x}$ ——表示复材管环向泊松比；

$\varepsilon_l$ ——表示弧形试件的平均横向应变；

$\varepsilon_f$ ——表示弧形试件的平均纵向应变；

$\varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件的平均拉伸应变；

$\varepsilon_4, \varepsilon_5$ ——分别表示第4应变片和第5应变片的读数；

$\Delta \varepsilon_l$ ——表示与第二阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的平均横向应变增量；

$\Delta \varepsilon_f$ ——表示与第二阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的平均纵向应变增量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,弧形试件需取自于一根复材管至少2个高度处的环形试件,每个环上取不少于2个弧形试件且总的弧形试件数目不少于4个。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于:弧形试件的宽度不大于35mm,且不小于20mm,弧形试件弧长的标距不小于100mm,且不大于200mm,弧形试件两端锚固的长度不小于30mm。

4. 根据权利要求1-3任意一项所述的方法,其特征在于,单向铰为钢加工构件,一端为实心圆柱,与拉伸试验机固接;另一端为空心圆柱,楔形式自锁夹具的端杆插入空心圆柱内,并通过一根插入式的钢轴将楔形式自锁夹具与单向铰连接;单向铰的空心圆柱在垂直于钢轴的平面的两侧各有一个缺口,在这个平面内楔形式自锁夹具可绕钢轴自由转动,从而在拉伸过程中弧形试件可被顺利地拉直。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,第一阶段和第二阶段的总时间不小于30分钟,试验的加载方式为位移控制,试验的第一阶段和第二阶段采用不同的加载速度:第一阶段,首先根据最初始时刻两个单向铰钢轴位置之间弧形试件的弧长和两个单向铰钢轴直线距离的差值来确定该阶段加载头需移动的距离,然后在该阶段加载时间不小于5分钟的限制条件下,计算该阶段的加载速度;试验进入第二阶段后,加载速度则减至0.1~0.2mm/分钟。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,试验的第一阶段和第二阶段中,所有的拉力数据和应变数据均利用数据采集仪连续记录。

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述第1应变片、第2应变片和第3应变片数据的平均值用于消除弧形试件的对中误差,同时也用于判断对中误差是否在可接受范围内,试验的对中误差由下式计算:

$$B_y = \frac{\Delta\varepsilon_{ave} - \Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_{ave}} \times 100\%,$$

$$B_z = \frac{4(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \times 100\%,$$

$$\varepsilon_{ave} = \frac{1}{2}(\varepsilon_c + \varepsilon_t) = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_3 + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\right),$$

式中：

$B_y$ ——表示弧形试件平面外弯曲指标，采用增量形式，用于第二阶段的误差分析；

$B_z$ ——表示弧形试件平面内弯曲指标；

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ——分别表示第1应变片、第2应变片和第3应变片的读数；

$\varepsilon_c, \varepsilon_t$ ——分别表示弧形试件外表面和弧形试件内表面的应变，分别等于  $\varepsilon_3$  和  $\frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ ；

$\Delta\varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件第二阶段的平均拉伸应变增量；

$\Delta\varepsilon_3$ ——表示与第二阶段平均拉伸应变增量  $\Delta\varepsilon_{ave}$  对应的第3应变片读数的增量；

$B_y$  和  $B_z$  宜控制在  $\pm 5\%$  以内。

8. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述方法适用于满足以下条件的复材管：

$$\frac{t}{D} \approx \varepsilon_u - \varepsilon_e \leq \varepsilon_u - 0.2\%,$$

式中：

$t$ ——表示复材管的厚度；

$D$ ——表示复材管的直径；

$\varepsilon_u$ ——表示预设于试验中施加的平均拉伸应变最大值或复材管的环向极限拉伸应变；

$\varepsilon_e$ ——表示用于计算环向弹性模量的第二阶段平均拉伸应变增量，取0.2%；

本方法适用于纤维铺层角度大于等于  $70^\circ$  的复材管。

## 一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的试验方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及纤维增强复合材料测试技术领域,尤其涉及的是一种测量纤维增强复合材料管环向弹性模量和泊松比的新型试验方法。

### 背景技术

[0002] 纤维增强复合材料因其很高的比强度和优异的耐腐蚀性能,近年来作为一种混凝土约束材料被广泛应用于土木工程领域,其中最典型的应用为:复材管约束混凝土柱。其中,复材管既可以采用湿铺法手工制作,也可以直接采用复材缠绕管。考虑到纤维缠绕技术的生产自动化和良好的质量控制,以及施工的便捷性,在新建的复材约束混凝土柱中,复材缠绕管是最佳的选择。

[0003] 在复材管约束混凝土柱中,纤维的铺陈方向与管轴向的夹角一般接近90度,这就意味着:在轴向压力的作用下,混凝土的横向膨胀能有效地被接近环向布置的纤维所约束,从而构件的强度和延性被有效地提高。

[0004] 复材管约束混凝土柱受压破坏的模式以复材管的纤维沿环向被拉断、混凝土被压碎为基本特征。因此,对于复材管而言,其沿环向的拉伸性能(包括环向极限拉伸应变、环向弹性模量和泊松比),特别是环向弹性模量对于复材管约束混凝土的受力性能有着决定性的影响。在测量复合材料弹性模量的试验方法中,除了传统的直条形片材拉伸试验、分裂盘试验和水压试验外,世界各国的学者也提出了各种各样的试验方法,但是现有的这些方法在实际使用中都有着一定的局限性,特别在测量复材管环向弹性模量的问题上,仍然没有一个准确便捷的解决方案,还有待改进和发展。本专利为解决这个问题,依据现有的技术条件,提出了一个针对于测量复材管环向弹性模量和泊松比简易可行、结果可靠、适用性广的试验方法。

[0005] 直条形片材拉伸试验测量纤维增强复合材料的拉伸性能在很多国家和地区的试验规范里都有明确的阐述,例如《聚合物基复合材料拉伸性能标准试验方法》[ASTM D3039/D3039M-14 (2014)]、《土木工程加固用纤维增强复合材料拉伸性能标准试验方法》[ASTM D7565/D7565 M-10 (2017)]、《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》[GB/T 3354 (2014)]、《纤维增强复合材料弹性常数测试方法》[GB/T 32376 (2015)]等等。但是,该试验方法主要是针对连续的单向纤维增强复合材料平板,无法用于复材缠绕管。而对于采用湿铺法手工制作的复材管,虽然可以制作出相同材料和相同铺层的直条形片材试件进行拉伸试验,但是由于两者之间曲率的差别,以及制作方法的不同,采用直条形片材拉伸试验所测得的拉伸性能可能会高估复材约束混凝土中复合材料所表现的实际性能。

[0006] 相较而言,分裂盘试验采用了环形试件,相对完整地保持了管材的原有形状,也广泛应用于测量复材管的环向拉伸性能,如《塑料或增强塑料管表观环向拉伸强度标准试验方法》[ASTM D2290-16 (2016)]和《塑料管道系统——玻璃纤维增强热固塑料管表观初始周向拉伸强度试验方法》[ISO 8521 (2009)]。在分裂盘试验中,为减少试件与分裂盘之间的摩擦力对试验结果的不利影响,环形试件的测试段应尽可能靠近两个半圆形分裂盘的间隙

处。但是,随着拉力的施加,两个分裂盘逐渐分离,在试件的测试段上将产生无法避免的弯曲现象,因此无法获取准确的复材管环向弹性模量和环向拉伸极限应变。针对这个问题,人们对分裂盘试验方法提出了许多种改进措施,例如让试件的测试段远离分裂盘的间隙处,以消除试件弯曲对测试结果的影响,但这样的处理却带来了另外一个问题:试件与分裂盘之间的摩擦力使得试件上产生沿圆周方向分布的拉伸应力梯度,导致无法获取测试段准确的拉伸应力,从而也无法测得准确的复材管环向拉伸性能。

[0007] 从理论上说,如果想要消除环形试件的弯曲、摩擦力等不利因素对测定复材管环向拉伸性能的影响,复材管内压试验是最佳的选择。复材管内压试验的基本原理与《塑料管道系统——玻璃纤维增强热固塑料管持续内压下破裂时间测定试验方法》[ISO 8521 (2009)]相一致,通过水或油等液体对复材管施加内压以实现对复材管的环向拉伸。复材管内压试验方法一方面保证了试件的纵向完整性,另一方面在内压作用下,复材管均匀膨胀,其受力状态与复材管约束混凝土相似,因此其所测得的复材管环向弹性模量和泊松比非常可靠。但内压试验存在的最大问题在于:为了让水压或油压能够正常地施加在管道内壁上,必须确保加压过程中液体不泄露,因此其端部的密封装置至关重要;特别是对于高强度、径厚比相对较小的复材管而言,需要对其施加很高的内压才能获得准确的环向材料性能数据。另外,在考虑密封效果的同时,还需要消除由于端部密封而在试件轴向产生的应力对测试结果的不利影响。为解决以上两个问题,内压试验的端部密封装置往往设计得很复杂。除此之外,不管是工业化生产的复材缠绕管还是湿铺法手工制作的复材管,其管径和厚度都存在一定的离散,而这往往导致内压试验中标准化的密封装置失效。

[0008] 综上,根据对现有技术的分析可以得知,传统测量复材管环向材料性能的试验方法主要存在以下三个问题使其无法适用于测定复材管环向弹性模量:

[0009] (1) 直条形片材拉伸试验只适用于测定复材平板的相关性能,无法解决复材管沿环向具有弧度的问题;

[0010] (2) 分裂盘试验无法避免的弯曲或摩擦力问题导致其所测得的复材管环向弹性模量误差较大;

[0011] (3) 内压试验的试验装置复杂繁琐,且对复材管尺寸偏差的适用性差,使其很难在实际项目中推广应用。

## 发明内容

[0012] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的新型试验方法,旨在解决现有技术中复材管环向弹性模量和泊松比测量不准确、操作不方便和适用性较差的问题。

[0013] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0014] 一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的新型试验方法,对弧形试件进行拉伸,所述方法包括步骤:所测试的弧形试件直接沿复材管环向截取,并粘贴应变片;弧形试件的两端分别夹紧在楔形式自锁夹具上;楔形式自锁夹具通过单向铰与拉伸试验机相连,以实现拉伸过程中弧形试件绕单向铰钢轴的自由转动;试验共包括两个阶段;试验的第一阶段:在拉伸作用下,弧形试件的平面外弯曲逐渐被吸纳,直至弧形试件被拉直;试验的第二阶段:从弧形试件被拉直到弧形试件被拉伸到规定应变或最终破坏,即完成整个试验;根据试

验第二阶段线性范围所测得的拉力数据、应变数据计算获得复材管的环向弹性模量和/或泊松比。

[0015] 作为一种优选,弧形试件需取自于一根复材管至少2个高度处的环形试件,每个环上取不少于2个弧形试件且总的弧形试件数目不少于4个。

[0016] 作为一种优选,弧形试件的宽度不应超过35mm,不宜小于20mm,弧形试件弧长的标距不应小于100mm,不宜大于200mm。为了保证拉力的传递,弧形试件的两端锚固的长度不应小于30mm。

[0017] 作为一种优选,所述粘贴应变片包括:应变片应精准地定位并粘贴于弧形试件的内外两面,在弧形试件的内表面中部两侧沿纵向分别粘贴第1应变片和第2应变片,在外表面中心位置沿纵向粘贴第3应变片;当需要测量泊松比时,除第1应变片、第2应变片和第3应变片外,需在弧形试件的外表面靠近第3应变片的位置沿横向粘贴第5应变片,在弧形试件内表面对应于第5应变片的位置沿横向粘贴第4应变片,宜采用标距为5mm至20mm的应变片,同时应变片标距应不小于弧形试件纤维分布结构最小重复尺寸的3倍。

[0018] 作为一种优选,单向铰为钢加工构件,一端为实心圆柱,与拉伸试验机固接;另一端为空心圆柱,楔形式自锁夹具的端杆插入空心圆柱内,并通过一根插入式的钢轴将楔形式自锁夹具与单向铰连接;单向铰的空心圆柱在垂直于钢轴的平面的两侧各有一个缺口,在这个平面内楔形式自锁夹具可以绕钢轴自由转动(钢轴位置即为铰支点),从而在拉伸过程中弧形试件可以被顺利地拉直。

[0019] 作为一种优选,整个拉伸试验从开始加载到试件被拉到预定应变或破坏,总的时间应不小于30分钟,试验的加载方式为位移控制,试验的第一阶段和第二阶段采用不同的加载速度;第一阶段,为弯曲控制阶段,首先根据最初时刻两个单向铰钢轴位置之间弧形试件的弧长和两个单向铰钢轴直线距离的差值来确定该阶段加载头需移动的距离,然后在该阶段加载时间不应小于5分钟的限制条件下,计算该阶段的加载速度;第二阶段,为拉伸控制阶段,加载速度则应减至0.1~0.2mm/分钟。

[0020] 作为一种优选,试验的第一阶段和第二阶段中,所有的拉力数据和应变等数据均应利用数据采集仪连续记录。

[0021] 作为一种优选,所述第1应变片、第2应变片以及第3应变片数据的平均用于消除弧形试件的对中误差,同时也用于判断对中误差是否在可接受范围内,试验的对中误差可由下式计算:

$$[0022] \quad B_y = \frac{\Delta\varepsilon_{ave} - \Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_{ave}} \times 100\%$$

$$[0023] \quad B_z = \frac{4(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \times 100\%$$

$$[0024] \quad \varepsilon_{ave} = \frac{1}{2}(\varepsilon_c + \varepsilon_t) = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_3 + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)\right)$$

[0025] 式中:

[0026]  $B_y$ ——表示弧形试件平面外弯曲指标(%),采用增量形式,仅用于第二阶段的误差分析;

[0027]  $B_z$ ——表示弧形试件平面内弯曲指标(%)；

[0028]  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ——分别表示第1应变片、第2应变片、第3应变片的读数；

[0029]  $\varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件的平均拉伸应变；

[0030]  $\varepsilon_c, \varepsilon_t$ ——分别表示弧形试件外表面和弧形试件内表面的应变,分别等于 $\varepsilon_3$ 和 $\frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ ；

[0031]  $\Delta \varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件第二阶段的平均拉伸应变增量；

[0032]  $\Delta \varepsilon_3$ ——表示与第二阶段平均拉伸应变增量 $\Delta \varepsilon_{ave}$ 对应的第3应变片读数的增量；

[0033]  $B_y$ 和 $B_z$ 宜控制在 $\pm 5\%$ 以内。

[0034] 作为一种优选,试件的环向弹性模量和泊松比按如下方法进行计算：

$$[0035] \quad \sigma = \frac{F}{b \cdot t}$$

[0036] 式中：

[0037]  $\sigma$ ——表示拉伸应力(MPa)；

[0038]  $F$ ——表示拉伸荷载(N)；

[0039]  $b$ ——表示弧形试件宽度(mm)；

[0040]  $t$ ——表示弧形试件厚度(mm)；

[0041] 对应试验加载的第二阶段(即拉伸控制阶段),拉伸应力-拉伸应变曲线的基本表现为线性,其斜率即为复材管的环向弹性模量,为保证数据的可靠性,选取拉伸应力-平均拉伸应变曲线中线性范围内应变增长 $\Delta \varepsilon_{ave}$ 至少为0.2%两点间的数据用于计算试件的环向弹性模量,为对应的拉伸应力增长与平均拉伸应变增长的比值,由下式计算：

$$[0042] \quad E_{\theta} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_{ave}}$$

[0043] 式中：

[0044]  $E_{\theta}$ ——表示复材管的环向弹性模量(MPa)；

[0045]  $\Delta \varepsilon_{ave}$ ——表示第二阶段平均拉伸应变增量,至少为0.2%；

[0046]  $\Delta \sigma$ ——表示与第二阶段平均拉伸应变增量 $\Delta \varepsilon_{ave}$ 对应的拉伸应力增量(MPa)；

[0047] 泊松比的计算：

[0048] 泊松比为对应的平均横向应变增长与平均纵向应变增长的比值,由下式计算：

$$[0049] \quad \nu_{\theta x} = \left| \frac{\Delta \varepsilon_l}{\Delta \varepsilon_f} \right|$$

$$[0050] \quad \varepsilon_l = \frac{1}{2}(\varepsilon_4 + \varepsilon_5)$$

$$[0051] \quad \varepsilon_f = \varepsilon_{ave}$$

[0052]  $\nu_{\theta x}$ ——表示复材管环向泊松比；

[0053]  $\varepsilon_l$ ——表示弧形试件的平均横向应变；

[0054]  $\varepsilon_f$ ——表示弧形试件的平均纵向应变(即 $\varepsilon_{ave}$ )；

[0055]  $\varepsilon_4, \varepsilon_5$ ——分别表示第4应变片和第5应变片的读数；

[0056]  $\Delta \varepsilon_l$ ——表示与第二阶段平均拉应变增量 $\Delta \varepsilon_{ave}$ 对应的平均横向应变增量；

[0057]  $\Delta \varepsilon_f$ ——表示与第二阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的平均纵向应变增量 (即  $\Delta \varepsilon_{ave}$ )。

[0058] 作为一种优选,所述方法适用于满足以下条件的复材管:

$$[0059] \quad \frac{t}{D} \approx \varepsilon_u - \varepsilon_e \leq \varepsilon_u - 0.2\%$$

[0060] 式中:

[0061]  $t$ ——表示复材管的厚度;

[0062]  $D$ ——表示复材管的直径;

[0063]  $\varepsilon_u$ ——表示预设于试验中施加的平均拉伸应变最大值或复材管的环向极限拉伸应变;

[0064]  $\varepsilon_e$ ——表示用于计算弹性模量的第二阶段平均拉伸应变增量 (即  $\Delta \varepsilon_{ave}$ ), 取 0.2%;

[0065] 另外,为避免边界效应的不利影响 (弧形试件中纤维在边缘被截断的影响),本试验方法宜适用于纤维铺层角度 (纤维方向与管轴向之间的夹角) 大于等于  $70^\circ$  的复材管;当纤维铺层角度小于  $70^\circ$  时,试件的宽度宜适当增加,且须考虑应力应变曲线非线性的影响。

[0066] 与传统的直条形片材拉伸试验、分裂盘试验和内压试验方法相比较,弧形试件拉伸试验方法的优点在于:试验装置和方法操作简单,测量结果准确,适用性广。其中适用性广的特点主要体现在以下四个方面:(1)对圆形、椭圆形或其他曲线型截面的复材管均适用;(2)对所测复材缠绕管的几何尺寸的离散有很好的适应性;(3)可采用各种类型的拉伸试验机或万能材料试验机实施;(4)除了典型的复材缠绕管之外,对采用湿铺法手工制作的复材管或其他曲线型开口或闭口截面的复材管,均可采用此方法测定其环向弹性模量和泊松比。

## 附图说明

[0067] 图1是本发明中复材管制成弧形试件的示意图。

[0068] 图2是本发明中粘贴了应变片的弧形试件的正视图。

[0069] 图3是本发明中粘贴了应变片的弧形试件的侧视图。

[0070] 图4是本发明中单向铰示意图。

[0071] 图5是本发明中弧形试件张拉的示意图。

[0072] 图6是本发明中弧形试件拉伸试验的拉伸应力-应变曲线图。

[0073] 图中:1—第1应变片;2—第2应变片;3—第3应变片;4—第4应变片;5—第5应变片;6—弧形试件内表面;7—弧形试件外表面;8—单向铰;9—楔形式自锁夹具;10—弧形试件;11—单向铰钢轴; $w$ —弧形试件的宽度; $l_0$ —弧长的标距。

## 具体实施方式

[0074] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确,以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0075] 本发明提供了一种测量复材管环向弹性模量和泊松比的弧形试件拉伸试验方法,

下面参阅图1-图6并举一些实施例来说明本发明的具体实施方式和要求。

#### [0076] (1) 弧形试件制备

[0077] 所测试的弧形试件10直接沿复材管环向截取,具体地,试件需取自于复材管约束混凝土构件同一批次的复材管至少2个高度处的环形试件,每个环上取不少于2个弧形试件10且总的弧形试件数不少于4个,如图1所示。另外,弧形试件10应沿复材管环向切割,边缘平整,以尽可能的减小边缘效应和对中误差对试验结果的不利影响。

#### [0078] (2) 弧形试件尺寸

[0079] 为控制对中误差所造成的沿宽度方向的弯曲(即平面内弯曲或面内弯曲),弧形试件的宽度 $w$ 不应超过35mm,同时为了方便应变片的粘贴,试件宽度不宜小于20mm。考虑到弧形试件面外弯曲对其线性拉伸的影响和夹具压力对试件测试段的影响,弧形试件弧长的标距 $l_0$ 不应小于100mm,同时考虑到拉伸初始阶段的弯曲变形较大,弧长的标距 $l_0$ 不宜大于200mm,如图1所示。为了保证拉力的传递,弧形试件10两端锚固的长度不应小于30mm。

#### [0080] (3) 试验准备

[0081] 在开始拉伸试验前,需对每一个弧形拉伸试件进行编号,试件的厚度和宽度等几何数据应准确测量并按编号记录。然后在试件上粘贴应变片,具体地,应变片应精准地定位并粘贴于弧形试件10的内外两面,在内表面(弯曲控制阶段的受拉面)中部的两侧沿纵向分别粘贴一片应变片(即第1应变片1和第2应变片2),在外表面(弯曲控制阶段的受压面)中心位置沿纵向粘贴一片应变片(即第3应变片3),如图2和图3所示。当需要测量泊松比时,除纵向应变片外,需在弧形试件的外表面靠近第3应变片3的位置沿横向粘贴第5应变片5,在弧形试件内表面6对应于第5应变片5的位置沿横向粘贴第4应变片4,如图2和3所示。宜采用标距为5mm至20mm的应变片,同时应变片标距应不小于弧形试件10纤维分布结构最小重复尺寸的3倍。

#### [0082] (4) 拉伸夹具

[0083] 考虑试件对中及紧固的操作简易性,本发明建议采用楔形式自锁夹具9分别夹紧弧形试件10的两端,夹具的锚固面需要满足一定的粗糙度以提供足够的锚固力。楔形式自锁夹具9通过单向铰8与拉伸试验机相连。

[0084] 由于弧形试件10在张拉初始阶段会经历一段较长的平面外弯曲变形,直至试件被拉直,因此本发明设计了两个独特的单向铰8分别将楔形式自锁夹具9与拉伸试验机上下端相连,如图5所示。单向铰8为钢加工构件,如图4一端为实心圆柱,与拉伸试验机固接;另一端为空心圆柱,楔形式自锁夹具9的端杆插入空心圆柱内,并通过一根插入式的钢轴将楔形式自锁夹具9与单向铰8连接;单向铰8的空心圆柱在垂直于钢轴的平面的两侧各有一个缺口,在这个平面内楔形式自锁夹具9可以绕钢轴自由转动(钢轴位置即为铰支点)。在弧形试件10被拉伸过程中,楔形式自锁夹具9可以绕着钢轴自由转动,而弧形试件10则可以被顺利地拉直。

#### [0085] (5) 加载制度

[0086] 图5展示了典型的弧形试件拉伸试验过程。整个试验过程分为两个阶段,分别为弯曲控制阶段和拉伸控制阶段。

[0087] 第一个阶段,即弯曲控制阶段,发生在试验加载的初期,从开始加载到试件被拉直,试件的变形以弯曲为主。在这个过程中,试验机的拉力增长很小,而试件内外两面(即受

拉面和受压面)的应变绝对值对应增加。

[0088] 第二个阶段,即拉伸控制阶段,开始于试件被拉直后,直到弧形试件10被拉伸到规定应变或最终破坏后,试验结束。在这个过程中,试件的薄膜应变的增长逐渐替代了弯曲应变的增长,试件的变形以拉伸为主。与此同时,试件外表面(即受压面)的纵向应变绝对值也经历了一个由上升到下降的转变。

[0089] 整个弧形试件10拉伸试验从开始加载到试件被拉到预定应变或破坏应不小于30分钟,加载方式为位移控制,两个阶段采用不同的加载速度。第一阶段,首先根据最初时刻从两个铰支点(即单向铰钢轴11位置)之间弧形试件10的弧长和两个铰支点直线距离的差值来确定本阶段加载头所需移动的距离,然后在该阶段加载时间不应小于5分钟的限制条件下,计算本阶段的加载速度。试验进入第二阶段后,加载速度则应减至0.1~0.2mm/分钟。整个过程中,所有的拉力数据和应变数据均应利用数据采集仪连续记录。

[0090] (6) 数据处理

[0091] 图6所示为典型的弧形试件拉伸试验全过程拉伸应力-拉伸应变曲线,其中规定拉为正,压为负,弧形试件内表面6(受拉面)和弧形试件外表面7(受压面)的曲线明显分为两个阶段,对应的分别是弯曲控制阶段和拉伸控制阶段。

[0092] 三个纵向应变片数据的平均可以在一定程度上消除试件的对中误差,同时也是用于判断对中误差是否在可接受范围内的依据。

[0093] (a) 误差分析

[0094] 对中误差可由下式计算:

$$[0095] \quad B_y = \frac{\Delta \varepsilon_{ave} - \Delta \varepsilon_3}{\Delta \varepsilon_{ave}} \times 100\%$$

$$[0096] \quad B_z = \frac{4(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \times 100\%$$

$$[0097] \quad \varepsilon_{ave} = \frac{1}{2}(\varepsilon_c + \varepsilon_t) = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_3 + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right)$$

[0098] 式中:

[0099]  $B_y$ ——表示弧形试件平面外弯曲指标(%),采用增量形式,仅用于第二阶段(拉伸控制阶段)的误差分析;

[0100]  $B_z$ ——表示弧形试件平面内弯曲指标(%);

[0101]  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ——分别表示图2和图3中第1应变片、第2应变片和第3应变片的读数;

[0102]  $\varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件的平均拉伸应变;

[0103]  $\varepsilon_c, \varepsilon_t$ ——分别表示弧形试件外表面7(受压面)和弧形试件内表面6(受拉面)的应变,分别等于 $\varepsilon_3$ 和 $\frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ ;

[0104]  $\Delta \varepsilon_{ave}$ ——表示弧形试件第二阶段的平均拉伸应变增量;

[0105]  $\Delta \varepsilon_3$ ——表示与第二阶段平均拉伸应变增量 $\Delta \varepsilon_{ave}$ 对应的第3应变片读数的增量;

[0106]  $B_y$ 和 $B_z$ 宜控制在 $\pm 5\%$ 以内。

[0107] (b) 环向弹性模量的计算

[0108] 拉伸应力按下式计算:

$$[0109] \quad \sigma = \frac{F}{b \cdot t}$$

[0110] 式中:

[0111]  $\sigma$ ——表示拉伸应力 (MPa);

[0112]  $F$ ——表示拉伸荷载 (N);

[0113]  $b$ ——表示弧形试件宽度 (mm);

[0114]  $t$ ——表示弧形试件厚度 (mm)。

[0115] 拉伸应力-应变曲线的第二阶段基本表现为线性,其斜率即为复材管的环向弹性模量,为保证数据的可靠性,选取拉伸应力-平均拉应变曲线中线性范围内应变增长  $\Delta \varepsilon_{ave}$  至少为0.2%两点间的数据用于计算弧形试件的环向弹性模量,为对应的拉伸应力增长与平均拉伸应变增长的比值,由下式计算:

$$[0116] \quad E_{\theta} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_{ave}}$$

[0117] 式中:

[0118]  $E_{\theta}$ ——表示复材管环向弹性模量 (MPa);

[0119]  $\Delta \varepsilon_{ave}$ ——表示拉伸控制阶段平均拉应变增量,至少为0.2%;

[0120]  $\Delta \sigma$ ——表示与拉伸控制阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的拉伸应力增量 (MPa);

[0121] (c) 泊松比的计算

[0122] 泊松比为对应的平均横向应变增长与平均纵向应变增长的比值,由下式计算:

$$[0123] \quad \nu_{\theta x} = \left| \frac{\Delta \varepsilon_l}{\Delta \varepsilon_f} \right|$$

$$[0124] \quad \varepsilon_l = \frac{1}{2}(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)$$

$$[0125] \quad \varepsilon_f = \varepsilon_{ave}$$

[0126]  $\nu_{\theta x}$ ——表示复材管环向泊松比;

[0127]  $\varepsilon_l$ ——表示弧形试件的平均横向应变;

[0128]  $\varepsilon_f$ ——表示弧形试件的平均纵向应变(即  $\varepsilon_{ave}$ )。

[0129]  $\varepsilon_3, \varepsilon_4$ ——分别表示图2和图3中第4应变片和第5应变片的读数;

[0130]  $\Delta \varepsilon_l$ ——表示与拉伸控制阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的平均横向应变增量;

[0131]  $\Delta \varepsilon_f$ ——表示与拉伸控制阶段平均拉应变增量  $\Delta \varepsilon_{ave}$  对应的平均纵向应变增量(即  $\Delta \varepsilon_{ave}$ )。

[0132] (7) 弧形试件拉伸试验的适用范围

[0133] 为保证拉伸应力-应变曲线线性范围至少有0.2%,试件应满足下述条件:

$$[0134] \quad \frac{t}{D} \approx \varepsilon_u - \varepsilon_e \leq \varepsilon_u - 0.2\%$$

[0135] 式中:

[0136]  $t$ ——表示复材管的厚度;

[0137]  $D$ ——表示复材管的直径;

[0138]  $\varepsilon_u$ ——表示预设于试验中施加的平均拉伸应变最大值或复材管的环向极限拉伸应变；

[0139]  $\varepsilon_e$ ——表示用于计算环向弹性模量的拉伸控制阶段拉应变增量(即  $\Delta \varepsilon_{ave}$ )，取 0.2%。

[0140] 例如，此方法对玻璃纤维复材缠绕管进行试验时，极限拉伸应变可达到约 2%，当玻璃纤维复材缠绕管直径为 300mm 时，应满足：

[0141]  $t \leq (0.02-0.002) \times 300 = 5.4\text{mm}$

[0142] 另外，为避免边界效应的不利影响(弧形试件中纤维在边缘被截断的影响)，本试验方法宜适用于纤维铺层角度(纤维方向与管轴向之间的夹角)大于等于  $70^\circ$  的复材管；当纤维铺层角度小于  $70^\circ$  时，试件的宽度宜适当增加，且须考虑应力应变曲线非线性的影响。

[0143] 应当理解的是，本发明的应用不限于上述的举例，对本领域普通技术人员来说，可以根据上述说明加以改进或变换，所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

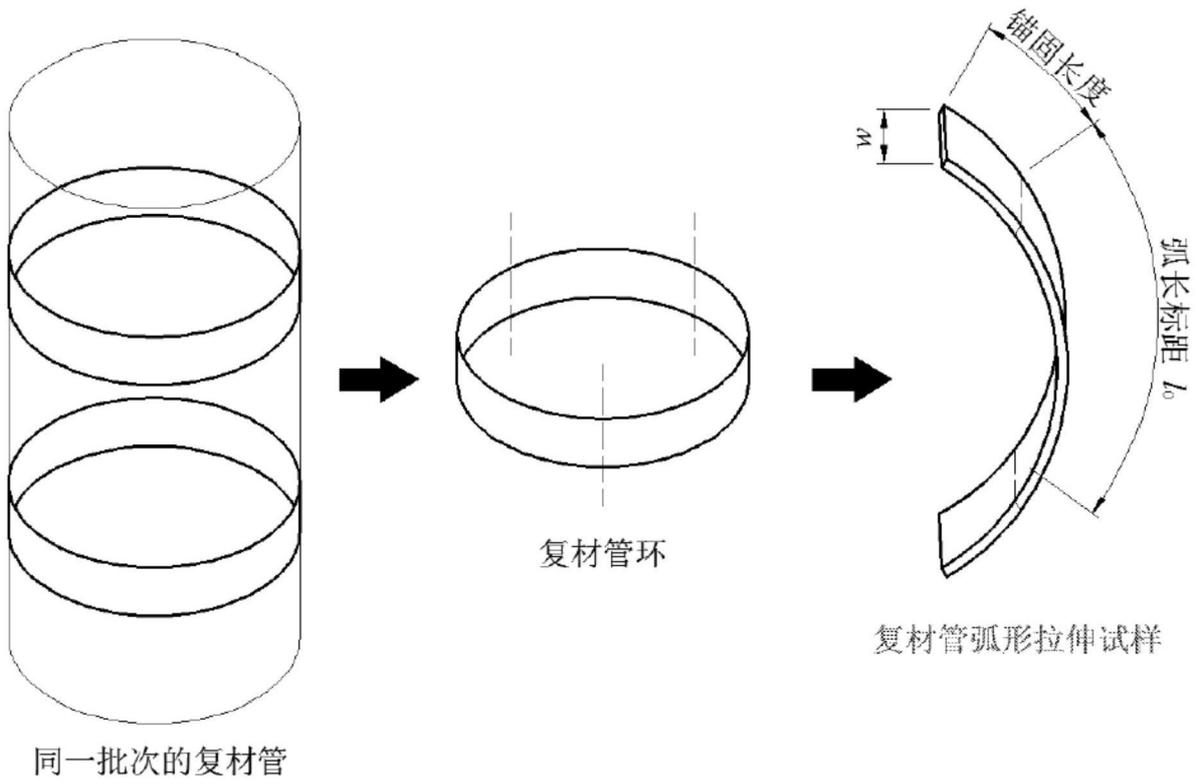


图1

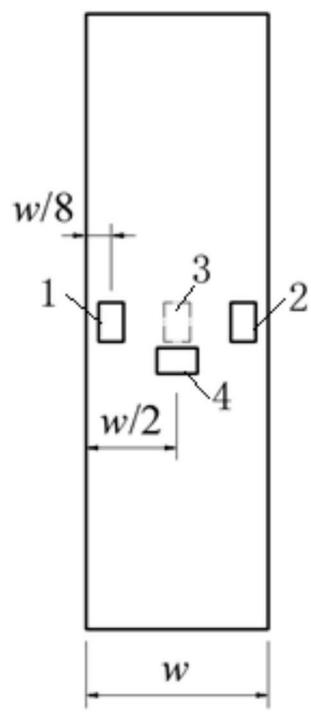


图2

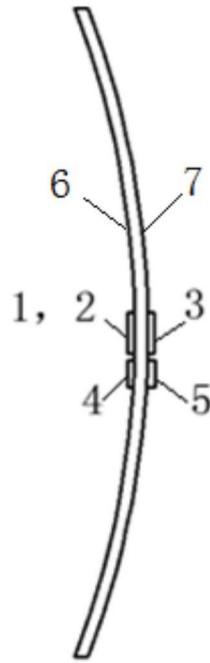


图3

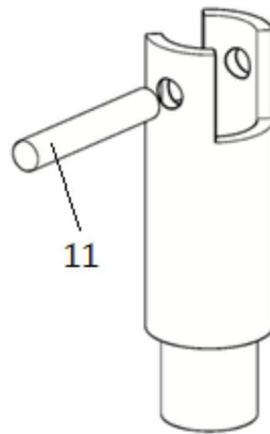


图4

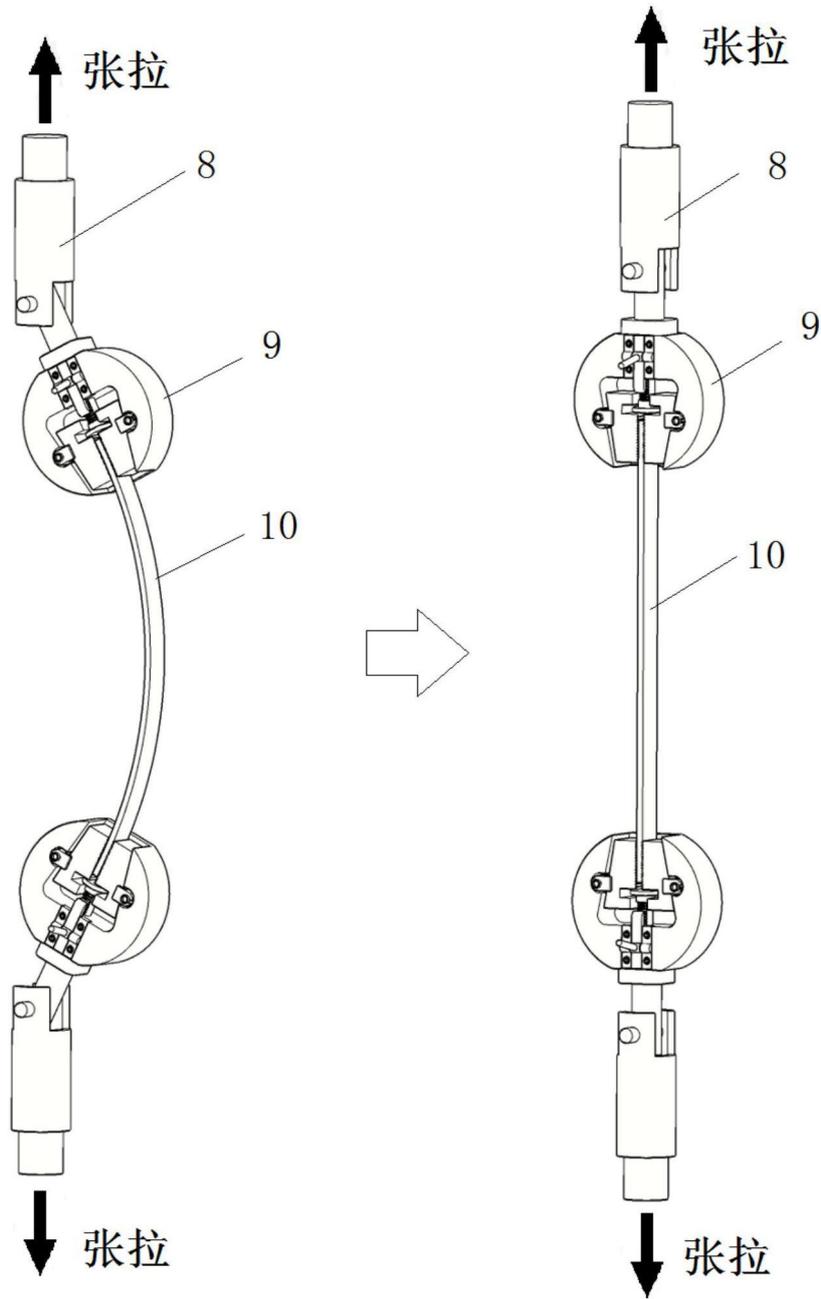


图5

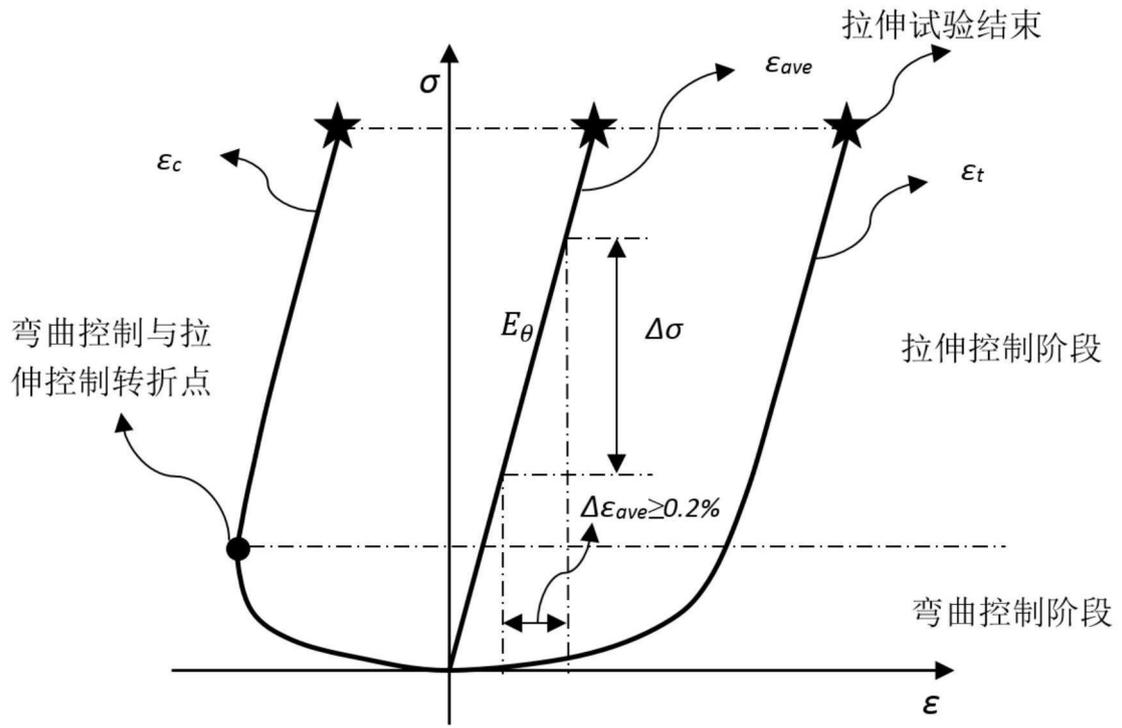


图6