

玄武岩纤维的强度及其离散性研究

任煜¹, 王萍²

(1. 南通大学 纺织服装学院, 江苏 南通 226019; 2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要:对一种国产玄武岩连续纤维的拉伸强度进行了分析, 采用 Weibull 统计理论对玄武岩纤维的抗拉强度离散性进行评价, 探讨了体积效应和玄武岩纤维强度分布离散情况之间的关系. 结果表明: 玄武岩纤维的拉伸强度及其离散性均受到体积效应的影响, 随着试样长度增加纤维强度逐渐下降、强度的离散性则逐渐增加; 同时, 随着试样细度的增加, 玄武岩纤维的强度逐渐减小, 但细度变化与强度离散之间无一定的规律.

关键词:玄武岩纤维; 拉伸性能; 体积效应; 离散性

中图分类号: TS102.4⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2013)01-0055-05

Study on Tensile Strength and Variation of Basalt Fibers

REN Yu¹, WANG Ping²

(1. School of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The tensile properties of a kind of China-made continuous basalt fibers are analyzed. The scattering of the tensile strength of the basalt fibers is evaluated using Weibull Statistical theory in order to discuss the relationship between the size effect and distribution of the tensile strength of the basalt fibers. The tensile strength as well as the scattering of the basalt fibers is influenced by the size effect. The tensile strength of the basalt fibers decreases and its scattering increases with the increase of the length of fiber samples; on the other hand, the tensile strength of the basalt fibers decreases with the increase of the fineness of fiber samples, but the relationship between the fineness and scattering of the tensile strength is irregular.

Key words: Basalt fiber; tensile property; size effect; variation

玄武岩连续纤维(CBF)与碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维等其他高性能纤维相比, 具有许多独特的优点, 如突出的力学性能、耐高温、可在-269~650℃范围内连续工作、耐酸碱、吸湿性低, 此外还有绝缘性好、绝热隔音性能优异、良好的透波性能、性价比好等优点^[1-4]. 因此, 玄武岩纤维可

适用于多种环境, 广泛应用于航天航空、建筑、化工、医学、电子等军工和民用领域. 但是玄武岩纤维强度由于受其内部和表面随机分布的缺陷的影响, 表现出较大的分散性. 分散程度可以用以下几种分布来描述: 正态分布、指数分布和 Weibull 分布等. 它们都有较好的合理性和使用性, 且参数估计较简

收稿日期: 2012-12-30

基金项目: 南通大学博士科研启动基金项目(09B11)

作者简介: 任煜(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为纺织材料的结构与性能. E-mail: ren.y@ntu.edu.cn

单,考虑置信度也较方便,因而得到较广泛的应用.但相对而言 Weibul 分布是一种较为完善的分布^[5-8].本文以 Weibull 理论为基础,通过实验的方法对一种国产玄武岩纤维的拉伸强度进行了概率分析,探讨了体积效应和玄武岩纤维强度离散的关系.

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

玄武岩长丝由横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司生产,400 tex,平均单丝直径 9 μm.

实验仪器:LLY06 型 B/PC 电子单纤维强力测试仪,山东莱州市电子仪器有限公司;XS.212 型光学显微镜,南京江南光电集团股份有限公司;CX21FS1 型形态图像分析系统,江苏捷达科技有限公司;JSM-5600LV 型扫描电子显微镜,日本 JEOL 公司.

1.2 制样

玄武岩纤维属于高强、高模纤维,其变形小、强度高、极易脆断,故其强伸测试方法不同于普通的柔性纤维,不能采用直接夹持的方式,而应在单纤维强伸试验中引入试样卡^[9](如图 1 所示).在操作过程中需要非常小心,因为稍受力玄武岩纤维就会断裂.此外,还需特别注意纤维黏结的平直与位置.

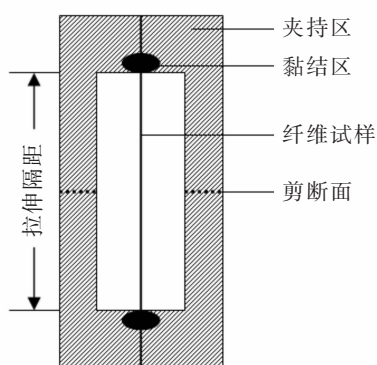


图 1 单根玄武岩纤维的试样卡

1.3 拉伸实验与直径测量

采用 LLY06 B/PC 电子单纤维强力测试仪,将纸卡试样平整地夹持于强力仪的夹头中,沿图 1 所示的位置将纸卡剪开开始拉伸.通过改变纤维的直径和拉伸隔距测纤维强力,每改变一次参数所用的

试样为 50 根,直径采用 XS.212 光学显微镜测量.将带有玄武岩纤维的试样卡放在显微镜的载物台上观察其纵向截面图并测量直径.实验条件为:拉伸速度 10 mm/min,每个试样测定 50 根左右,并应用 Minitab 软件作统计处理.

2 结果与分析

2.1 拉伸曲线及纤维断裂形态

图 2 所示为玄武岩纤维的拉伸强力-伸长曲线图.从图中可以看出,玄武岩纤维单丝的拉伸强力线性增加,直到断裂为止,纤维只有弹性形变而无塑性形变.这表明该材料是典型的脆性断裂,其断裂行为基本符合虎克定律.通过扫描电子显微镜,在放大 10 000 倍下观察玄武岩纤维拉伸断口截面,如图 3 所示.从图 3 可以看出断面呈锯齿状态.玄武岩纤维属于脆性材料,在断裂过程中几乎没有塑性变形,在受到外力作用时易在裂纹尖端形成应力集中,并以裂纹的增值和扩展形成新的表面来释放,导致在较低的应力下发生断裂,这是导致玄武岩纤维强度分散的主要原因.

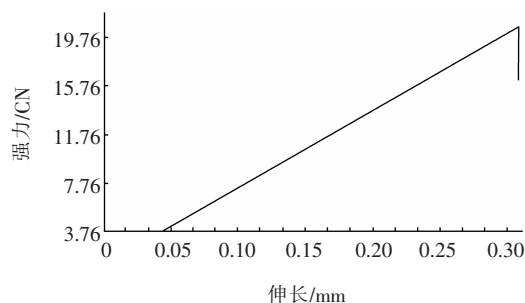


图 2 玄武岩纤维拉伸强力-伸长曲线关系图

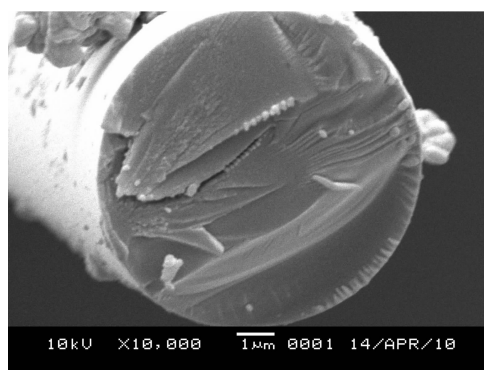


图 3 玄武岩纤维断口截面图(× 10 000)

2.2 玄武岩纤维强度及其离散性分析

2.2.1 体积效应及 Weibull 分析理论

所谓纤维强度的体积效应,是指纤维的抗拉强度随着测试长度或直径的增加而下降^[10].在 Weibull 理论的基础上,对玄武岩纤维的拉伸强度进行了离散性分析. Weibull 理论基于以下 3 个假设^[11]:

1) 作用于脆性材料的力是单轴向和均匀的;

2) 链的最弱连接理论,其内容是指脆性材料中存在许多裂纹,它们彼此独立互不干涉,断裂往往始于最大缺陷处连接最弱的地方;

3) 基于 Griffith 理论,即 $\sigma = \sqrt{2Er/\pi C}$, 抗拉强度 σ 与裂纹半长 C 的平方根成反比. 式中, E 为杨氏模量, r 为表面能.

显然,玄武岩纤维材料是符合理论假设的,因此其强度及其分散性可以由简化的两参数 Weibull 分布模型来模拟,其累积概率分布函数为

$$f(\sigma_i) = 1 - \exp[-(\frac{\sigma_i}{\sigma_0})^m] \quad (1)$$

式中, $f(\sigma_i)$ 为破坏概率(%), σ_i 为强度随机变量, σ_0 为 Weibull 分布的尺度参数, m 为形状参数 (Weibull 模数).

式(1)的一阶导数就是强度分布的概率密度函数:

$$f(\sigma_i) = \frac{m}{\sigma_0} \sigma_i^{m-1} \exp[-(\frac{\sigma_i}{\sigma_0})^m] \quad (2)$$

通过 Minitab 软件对模型中的参数进行计算并绘制概率分布曲线图. Weibull 模数 m 表征了材料的均匀性和可靠性, m 值越大,材料的均匀性越好,可靠性越高^[12-14].

2.2.2 不同隔距时纤维的强度及其离散性

为了证明拉伸隔距对纤维强度离散的影响,进行了对比试验.表 1 为隔距分别为 10, 20, 30 mm 时纤维的应力均值和不匀率.

表 1 不同拉伸隔距时纤维的强度及其不匀率

隔距/mm	根数	平均强度/GPa	CV/%
10	50	2.18	27.0
20	50	2.06	28.1
30	50	2.01	30.2

从表 1 可以看出:随着拉伸隔距的增大,平均强度逐渐变小,强度变异系数逐渐变大.根据 1926 年 Peirce 提出的弱节理论^[15],随着试样长度的增加,部分纤维中会出现比原纤维所有环节更弱的环节,使得这部分纤维的强度下降从而导致纤维平均强度下降和强度离散变化.

本文应用 Minitab 软件就不同拉伸隔距时玄武岩纤维的强度进行 Weibull 分布拟合,得出纤维强度的韦伯分布图(如图 4 所示),并得出 10, 20, 30 mm 3 种拉伸隔距时的形状参数(即 Weibull 参数) m 分别为 4.175, 3.960, 3.565.对应图 4 中纤维强度的离散值是依次增大的.这可以说明:随着玄武岩纤维试样长度的增加, Weibull 模数越小,即玄武岩纤维的强力离散性越大,显示了材料的均匀性越差,可靠性越低.这主要是因为玄武岩纤维的表面和内部存在着各种缺陷,强度受这些在长度方向上随机分布的缺陷的影响.同时,纤维长度越长,包含弱节的概率就越大,对强度的影响也越大.

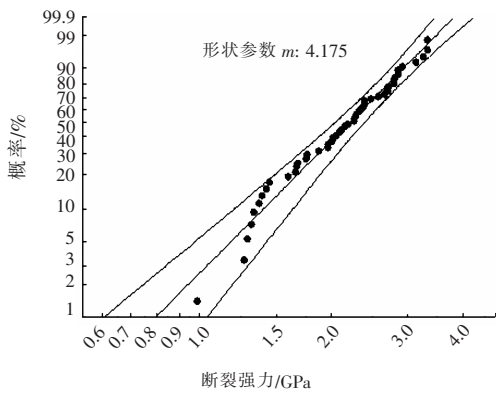
2.2.3 不同细度时纤维的强度及其离散性

为了了解细度对强度离散的影响,进行了不同细度纤维的对比试验,拉伸隔距均为 20 mm.表 2 为直径分别为 8, 9, 11 μm 时纤维的应力均值和不匀率.

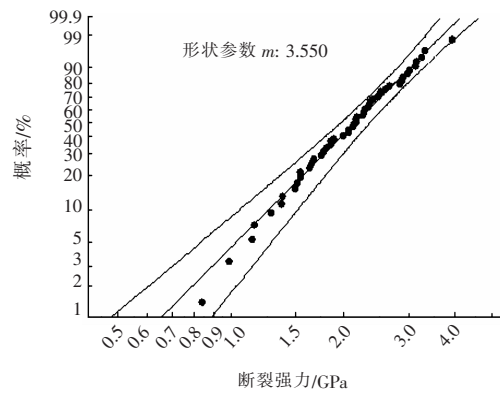
表 2 不同细度时纤维的强度及其不匀率

直径/ μm	根数	平均强度/GPa	CV/%
8	50	2.15	30.57
9	50	2.00	29.01
11	50	1.80	30.11

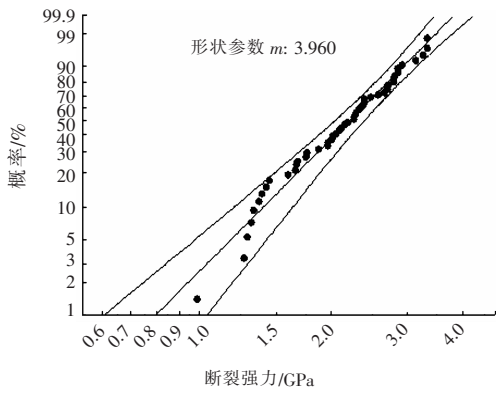
由表 2 可以看出:纤维直径越大,应力均值越小,相反直径越小的纤维应力均值越大.然而,纤维拉伸应力变异系数却无一定的变化规律.根据 1971 年 Knox^[16]提出的理论得知,纤维的强度不仅与长度位置有关,而且与纤维的截面积相关,即随纤维截面积的增加,纤维内出现更大缺陷和更弱缺陷组合的可能性增大,部分纤维弱节结构更弱或会断裂在强度更低的新弱节处,使得这部分纤维的强度下降,从而导致平均强度下降和强度离散变化.



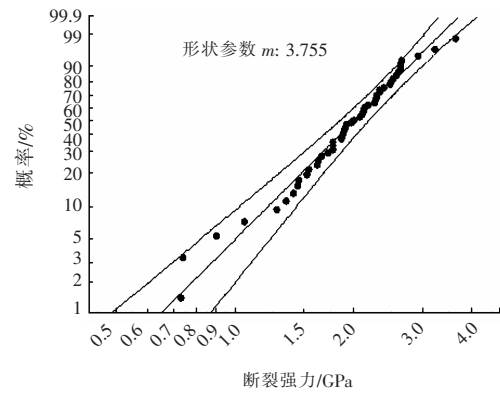
a 拉伸隔距 10 mm



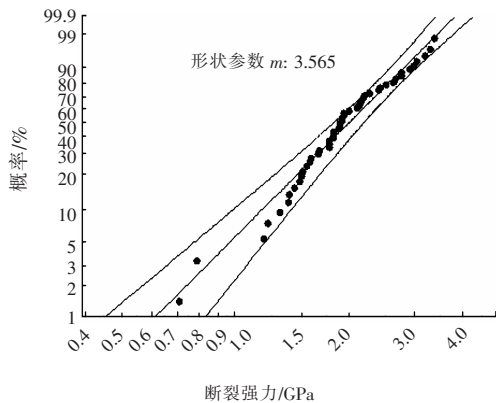
a 直径 8 μm



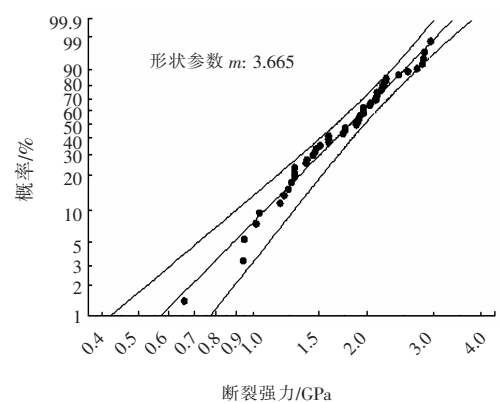
b 拉伸隔距 20 mm



b 直径 9 μm



c 拉伸隔距 30 mm



c 直径 11 μm

图 4 不同隔距时玄武岩纤维强度的韦伯分布拟合效果图

图 5 不同细度时玄武岩纤维拉伸强度的韦伯分布拟合效果图

同样依据 Weibull 理论, 采用 Minitab 软件就不同细度时玄武岩纤维的强度进行 Weibull 分布拟合, 得出纤维强度的韦伯分布以及玄武岩纤维的细度与形状参数 m 的关系(如图 5 所示). 所测纤维的平均直径为 8, 9, 11 μm , 对应的形状参数分别为 3.550, 3.755, 3.665. 从以上结果可以看出, 随着细度的增加, 玄武岩纤维应力逐渐减小, 但细度变化与强度离散之间无一定的规律.

3 结论

- 1) 玄武岩纤维单丝的拉伸曲线, 呈明显的直线; 直到断裂为止, 纤维只有弹性形变而无塑性形变, 表明该材料是典型的脆性断裂.
- 2) Weibull 理论中的形状参数 m 可用于玄武岩纤维离散的定量评估, 能较好地模拟玄武岩纤维的强度累计概率.

3)玄武岩纤维的抗拉强度随着测试长度或直径的增加而下降,很好地体现了其具有体积效应。

4)与普通柔性纤维不同,体积效应不仅影响玄武岩纤维的平均应力,强度离散也受其影响。

参考文献:

- [1] 齐风杰,李锦文,李传校,等.连续玄武岩纤维研究综述[J].高科技纤维与应用,2006,31(2):42-46.
- [2] 崔毅华.玄武岩连续纤维的基本特性[J].纺织学报,2005,26(5):120-121.
- [3] 李建军,党新安.玄武岩连续纤维的制备[J].合成纤维工业,2007,30(2):35-37.
- [4] 毛俊芳,董卫国,丛森滋.玄武岩纤维特性及其应用前景[J].产业用纺织品,2007(10):38-40.
- [5] 宋鹏飞,王秋美.玄武岩纤维强度的统计分析[J].青岛大学学报:工程技术版,2008,23(1):10-12.
- [6] 李海斌,阳建红,石增强,等.用改进的Weibull方法分析纤维强度的长度效应[J].宇航材料工艺,2009(4):14-17.
- [7] 王存涛,谢剑飞,邱夷平.用weibull理论评价表面处理对碳纤维拉伸强度的影响[J].产业用纺织品,2011(2):19-22.
- [8] 武玉芬,张博明.碳纤维拉伸强度的离散性分析[J].玻璃钢/复合材料,2010(3):29-31.
- [9] 姚江薇,于伟东.脆性纤维强伸性能的国外测试方法简介[J].中国纤检,2006(8):40-42.
- [10] Moreton R. The effect of gauge length on the tensile strength of carbon fibers[J]. Fiber Science and Technology, 1968(1):273-275.
- [11] 吴琪琳,潘鼎.碳纤维强度的WEIBULL分析理论[J].高科技纤维与应用,1999,24(6):41-44.
- [12] 刘翠霞,杨延清,张荣军,等.涂碳前后SiC纤维的强度测试和评价[J].材料工程,2009(2):63-66.
- [13] 吴琪琳,潘鼎.国产粘胶基碳纤维强度的两种统计分析[J].材料导报,2000,14(11):55-56.
- [14] 郑一泉,孙雅杰,丁超,等.玻纤增强尼龙材料强度的Weibull统计分析[J].工程塑料应用,2012,40(7):64-67.
- [15] Peirce F T. Tensile test for cotton yarns, V; the weakest link of theorems on the strength of long and of composite specimens[J]. Journal of the Textile Institute, 1926(17):355-368.
- [16] Jr Knox L J, Whitwell J C. Studies of breaking-stress distributions, Part I ; the weak-link theory and alternate models[J]. Textile Research Journal, 1971, 41(6):510-517.

(责任编辑:张燕)