

玻璃纤维束拉伸力学性能影响参数试验研究*

朱德举^{1†}, 欧云福¹, 徐新华²

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 南通东泰新能源设备有限公司, 江苏启东 226200)

摘要:利用 MTS 万能试验机对不同标距(25, 50, 100, 150, 200 和 300 mm)的玻璃纤维束进行了准静态(应变率为 $1/600 \text{ s}^{-1}$)拉伸测试. 同时, 利用 Instron 落锤冲击系统分别研究了标距为 25 mm 的试样在不同应变率(40, 80, 120 和 160 s^{-1})和不同温度(25, 50, 75 和 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)条件下的力学性能. 结果表明, 玻璃纤维束的拉伸力学性能与标距、应变率和温度具有相关性; 杨氏模量随着标距和应变率的增加而增大, 但随着温度的增加而减小; 拉伸强度随着标距的增加而减小, 随应变率的增加而增大, 但随着温度的增加却呈先减后增的趋势; 峰值应变随着标距增加而减小, 但随温度的增加而增大. 最后, 利用 Weibull 模型进行统计分析, 量化了不同标距、应变率和温度下纤维拉伸强度的随机变化程度, 获得的 Weibull 参数可服务于工程应用.

关键词:玻璃纤维; 拉伸性能; 标距; 应变率; 温度效应; Weibull

中图分类号: O316

文献标志码: A

Experimental Study of Parameters Affecting the Tensile Mechanical Properties of Glass Fiber Bundle

ZHU Deju^{1†}, OU Yunfu¹, XU Xinhua²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Nantong Dawntine New Energy Equipment Co, Ltd, Qidong 226200, China)

Abstract: Glass fiber bundles with different gage lengths (25, 50, 100, 150, 200 and 300 mm) were tested under quasi-static loading at a strain rate of $1/600 \text{ s}^{-1}$ using a MTS load frame, and samples with a gage length of 25 mm were tested under dynamic tensile loading at four different strain rates (40, 80, 120 and 160 s^{-1}) and four distinct temperatures (25, 50, 75, $100 \text{ }^\circ\text{C}$) utilizing a drop-tower impact system. The experimental results show that the mechanical properties are dependent on the gage length, strain rate and temperature. Young's modulus increases with the increasing gage length and strain rate, but decreases with the increasing temperature. Tensile strength decreases with the increase of the gage length, but increases with the increase of the strain rate, while it decreases firstly and then increases as the temperature increases. Ultimate strain decreases with the increase of the gage length, but increases as the temperature increases. Finally, Weibull statistics were used to quantify the degree of variability in yarns' strength at different gage lengths, strain rates and temperatures, and the obtained Weibull parameters can be used for

* 收稿日期: 2015-09-01

基金项目: 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2016GK4016), The Major Sci-tech Research and Technological Achievements Transformation of Strategic Emerging Industry in Hunan Province(2016GK4016)

作者简介: 朱德举(1978-), 男, 山东济宁人, 湖南大学教授, 博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

engineering application.

Key words: glass fiber; tensile behavior; gage length; strain rate; temperature effect; Weibull

近半个世纪以来,纤维增强树脂基复合材料(Fiber Reinforced Plastic/Polymer,简称 FRP)以其轻质、高强、绝缘、隔热、耐久性好、可设计性强等优点,逐渐活跃在土木工程领域^[1-3].其中玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)的显著特点是热膨胀系数与混凝土接近、比强度高且价格相对便宜^[4].国际上对 FRP 在土木工程中的应用研究首先从玻璃纤维开始.

单向纤维增强复合材料是工程结构复合材料的最基本单元,纤维又是单向复合材料承受拉伸载荷时的主要承载部分,它在冲击荷载下的力学性能与复合材料的冲击响应行为密切相关.而且,在冲击和爆炸等极端荷载作用下,材料的变形瞬间发生,应变率和温度效应同时影响材料的力学行为.因此理解纤维的尺寸效应以及在不同应变率和温度作用下的破坏失效模式是优化复合材料结构设计的关键.目前,已经有许多学者^[5-7]开展了相关方面的工作,但中等应变率下的相关数据较少,而考虑中等应变率与温度耦合作用的试验数据更是空白.由于在地震和低速冲击荷载作用下,建筑结构遭受的应变率处

于中等水平($1\sim 200\text{ s}^{-1}$)^[8],本文的主要任务是研究玻璃纤维束的尺寸效应以及在中等应变率范围($40\sim 160\text{ s}^{-1}$)和不同温度条件($25\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$)下的力学响应,以获得其破坏强度、韧性等力学性能指标,进而为建立 GFRP 的动态本构关系及其增强结构在极端荷载和环境下的分析与评估方法奠定基础.

1 试验测试

1.1 试样制备

本实验所选单向玻璃纤维布由南京海拓复合材料有限责任公司生产.图 1 给出了纤维布的单向编织结构和光学显微镜下的微观结构.纤维束的横截面积为 0.473 mm^2 ,可以通过其线密度除以体密度得到^[9].制备试样时,用薄刀片沿纤维布纵向小心裁取多根纤维束备用.将 0.2 mm 厚铝片用圆齿压痕、居中对折,涂上环氧树脂胶,按所需标距($25, 50, 100, 150, 200$ 和 300 mm)夹持在纤维束两侧,待胶固化后,将两端多余纤维去除,试件成型,如图 1(b)所示.

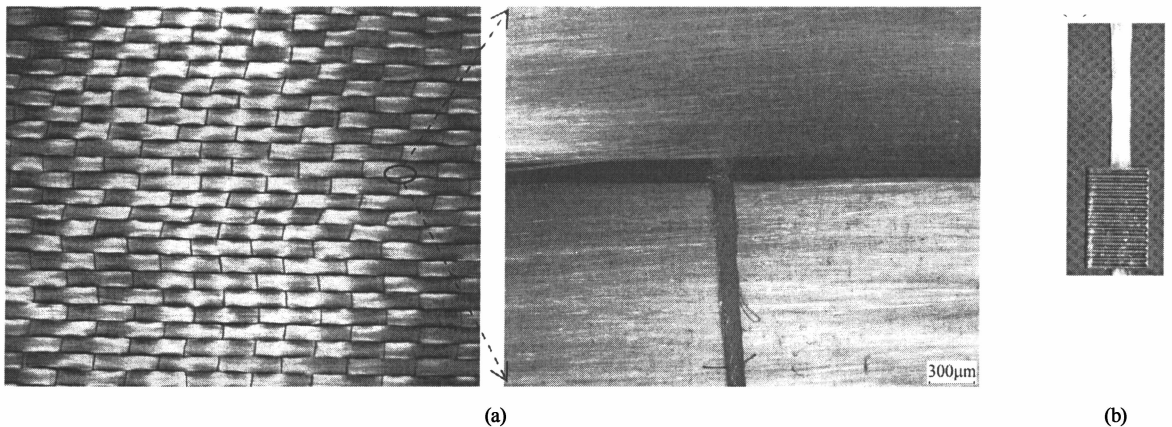


图 1 (a)玻璃纤维的单向编织结构和光学显微镜下的微观结构;(b)试件

Fig. 1 (a) Unidirectional woven structure and microscopy image of glass fiber; (b) specimen

1.2 测试仪器与方法

单束纤维的准静态拉伸测试采用 MTS 微机控制电子万能试验机(型号 C43.304).该试验机机架的负荷上限为 30 kN ,数据采样频率最大可达 $1\ 000\text{ Hz}$,控制器分辨率为 20 bit .试验时加载速度设定为 2.5 mm/min ,采用 1 kN 力传感器,采样频率设为 20 Hz .动态拉伸测试采用国际先进的 Instron 落锤冲击系统(型号 Ceast 9340).本系统的冲击高度为

$0.03\sim 1.10\text{ m}$,速度范围为 $0.77\sim 4.65\text{ m/s}$,最大落锤重量为 37.5 kg ,最大冲击能量为 405 J .冲击速度 V 可以自行设定,然后由落锤控制系统换算成相应的锤头下落高度 H .本实验根据仪器的量程,设 V 为 $1, 2, 3, 4\text{ m/s}$,对应的应变率分别为 $40, 80, 120, 160\text{ s}^{-1}$.本研究选取 $25, 50, 75$ 和 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 作为温度变量 T 进行一系列测试^[10].

对于纤维束而言,其刚度远小于仪器加载系统的刚度.为了检验 MTS 试验机测量误差,额外采用

引伸计测量试件变形,并与试验机记录的夹持端位移进行对比,得知测量误差在2%以内,因此将夹持端的相对位移近似作为试件标距内的变形,与标距的比值即为应变值。

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

图2分别为玻璃纤维束在不同标距、不同应变率和不同温度作用下的典型应力-应变曲线。从图中可以看出,在静态拉伸作用下,应力-应变曲线相对平滑;而在动态拉伸作用下,曲线波动较大。动态曲线的波动主要由冲击过程激发的仪器振动引起^[11],其个数随着应变率的增大而递减。从这些应力-应变

曲线中获得材料的基本力学性能参数:杨氏模量,拉伸强度,峰值应变和韧性。其中,杨氏模量代表曲线的线性段斜率。对于准静态曲线而言,上升段基本为线性,因此所获得的杨氏模量较为准确。而对于动态曲线而言,波动的影响使得杨氏模量的确定十分困难,因此本文以能够描述曲线整体趋势的直线斜率为代表值。相对而言,韧性的结果比较容易获得,因其代表的是应力-应变曲线下的面积,表征的是单位体积的变形能。具体计算公式如下:

$$U_T = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中: U_T 表示韧性; ϵ 表示应变; ϵ_f 表示最大应变; σ 表示应力。

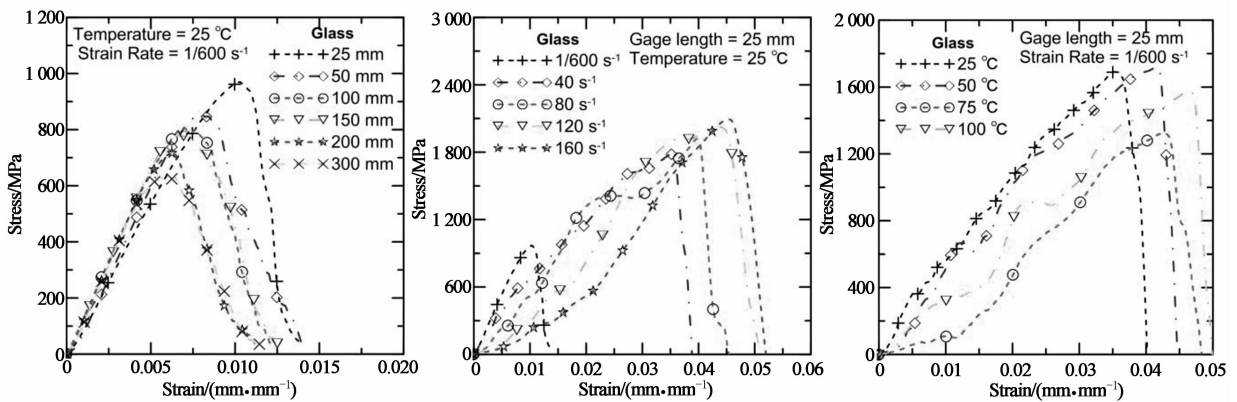


图2 典型应力-应变曲线
Fig. 2 Representative stress-strain curves

2.2 不同标距、应变率和温度下的力学性能

图3~5给出了玻璃纤维束的杨氏模量、拉伸强度、峰值应变和韧性与标距、应变率和温度的关系,结果表明,这些材料力学性能参数均与标距、应变率和温度相关。从图3可以得出,杨氏模量随标距的增加而增大;而拉伸强度、峰值应变和韧性随着标距的增大而减小。具体而言,当标距由25 mm增加到300 mm时,杨氏模量增加了23.6%,而拉伸强度、峰值应变和韧性分别降低了29.0%,40.9%和45.5%。从图4可以得出,在40~160 s⁻¹应变率范围内,杨氏模量和拉伸强度都随着应变率的增加而增大,而峰值应变与韧性呈先增后减的趋势。具体而言,当应变率从40 s⁻¹增加到160 s⁻¹,杨氏模量和拉伸强度分别增加了22.0%和38.6%;而当应变率由40 s⁻¹增加到120 s⁻¹时,峰值应变和韧性先由原来的0.038 ± 0.004 mm/mm和40.2 ± 7.9 MPa增大到0.041 ± 0.004 mm/mm和50.8 ± 6.3 MPa,而当应变率继续增加至160 s⁻¹,其值又分别减小到0.037 ± 0.004 mm/mm和46.1 ± 5.9

MPa。但总体来看,峰值应变减小了1.8%,而韧性增大了14.6%。从图5可以得出,杨氏模量随温度的增加而减小,峰值应变恰好相反,而拉伸强度和韧性却呈现出先减后增的趋势。具体而言,当温度由25 °C增加到100 °C时,杨氏模量减小了36.7%;而峰值应变增大了19.9%。至于拉伸强度和韧性,当温度由25 °C增加到75 °C,其值由1 729 ± 67 MPa和40.2 ± 7.9 MPa减小到1 292 ± 123 MPa和27.7 ± 4.8 MPa,分别减小了25.3%和31.1%;而当温度增加到100 °C,其值反而增加至1540 ± 107 MPa和40.0 ± 3.6 MPa,分别增大了19.2%和44.5%。

另外,图3~5还对各力学性能参数随标距、应变率和温度的变化趋势进行了曲线拟合,并给出了拟合方程,以便于工程应用。在25~200 mm的标距范围内,随着标距的增加,玻璃纤维束的杨氏模量随之增加,但200 mm之后没有显著变化,而拉伸强度、峰值应变和韧性随着标距的增加呈对数减小;在40~160 s⁻¹的应变率范围内,随着应变率的增加,杨氏模量呈对数增加,而拉伸强度呈线性增加。峰值

应变和韧性的变化趋势可近似用二次多项式拟合;而在 25~100 °C 的温度区间内,随着温度的递增,材料的杨氏模量呈线性减小,峰值应变呈线性增加,拉

伸强度和韧性随温度的变化趋势也可近似用一个二次多项式拟合。

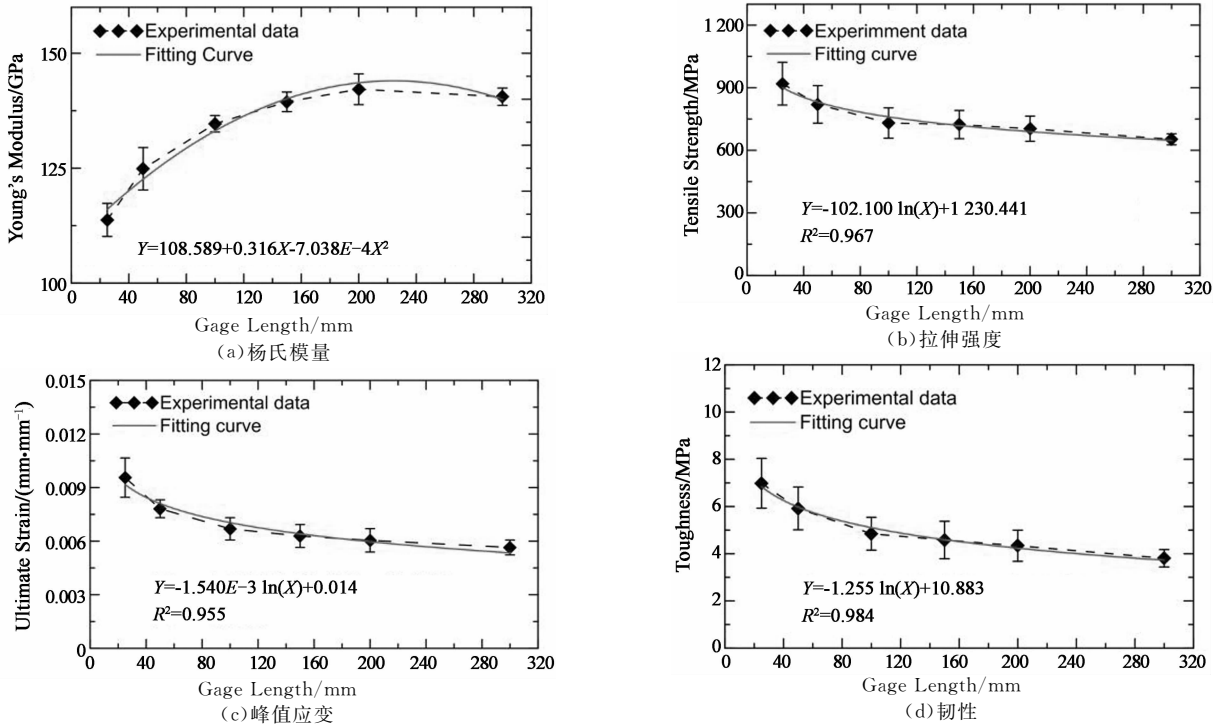


图 3 标距对材料力学性能的影响
Fig. 3 Gauge length effect on material mechanical properties

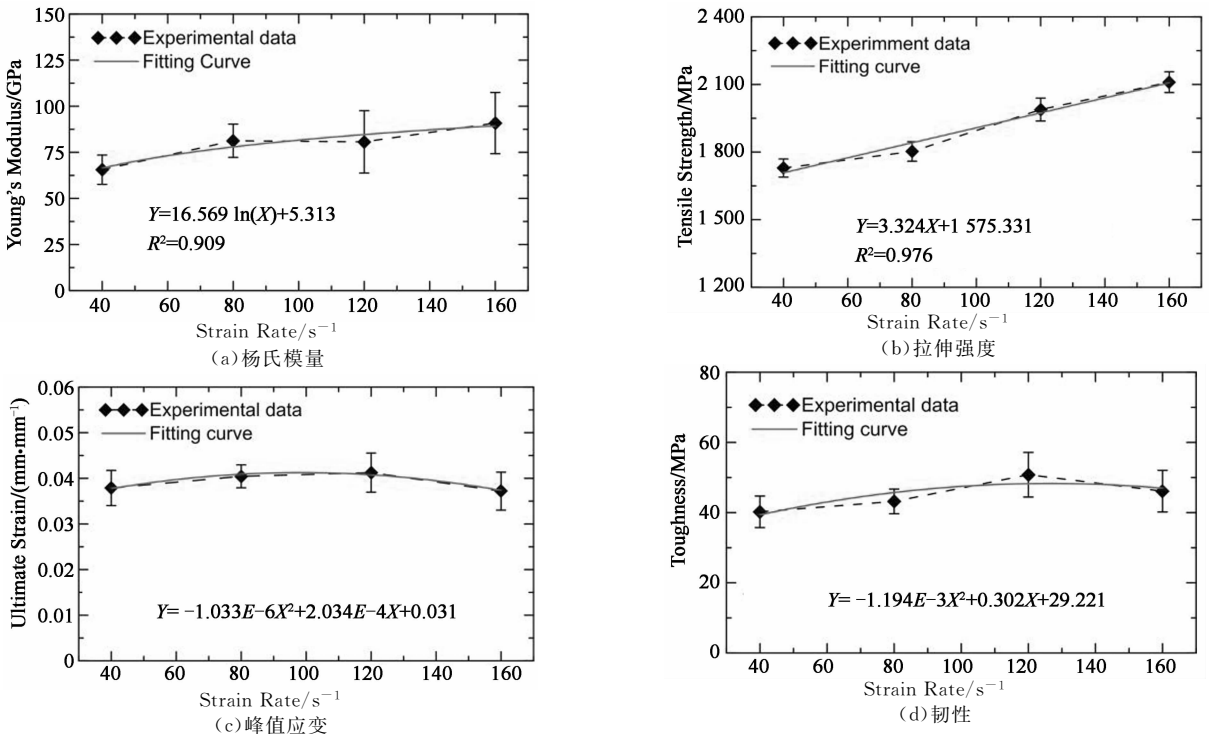


图 4 应变率对材料力学性能的影响
Fig. 4 Strain rate effect on material mechanical properties

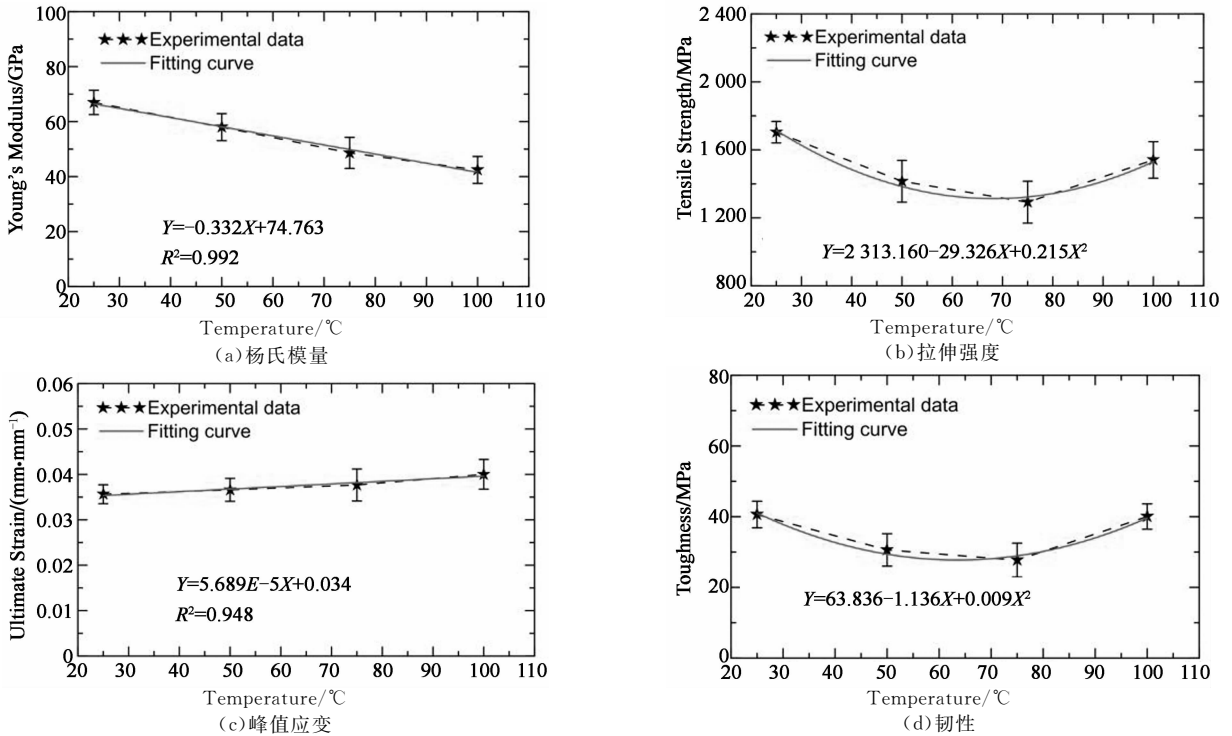


图5 温度对材料力学性能的影响

Fig. 5 Temperature effect on material mechanical properties

2.3 尺寸、应变率及温度效应机制

2.3.1 尺寸效应机制

玻璃纤维束的拉伸强度随着标距的增加而减小,呈明显的尺寸效应. Weibull 尺寸效应统计理论认为^[12],这主要是由于材料强度的随机分布所引起. 沿纤维长度方向,强度是不均一的,纤维总是在最薄弱处断裂,试样愈长,出现最薄弱环节的概率越大,越容易发生断裂. 但是,当标距大于 200 mm,纤维的拉伸强度不再发生明显变化. 这说明对于玻璃纤维束而言,200 mm 接近其强度受限临界长度,当长度超过这个临界值时,其内部包含最薄弱环节的概率极大.

2.3.2 应变率效应机制

玻璃纤维束的拉伸强度呈明显的应变率相关性. 当应变率由 $1/600\text{ s}^{-1}$ (准静态) 增加到 160 s^{-1} (动态) 时,拉伸强度由 $919 \pm 102\text{ MPa}$ 增长到 $1\,727 \pm 67\text{ MPa}$,增幅近一倍. 这种应变率相关性可作如下解释:如图 6 所示,在准静态拉伸荷载作用下,试件的断裂部位比较集中,而在动态拉伸荷载作用下,断裂部位延伸至整个标距范围. 这说明随着应变率的增加,冲击荷载在基本承载单元上的分布更为均匀,单丝有更多的部位参与耗能,使得其强度发挥得更充分. 另外,在拉伸荷载作用下,构成纤维束

的单丝不一定同步断裂,断裂位置也不一定平齐,因而纤维丝之间的摩擦在破坏变形过程中一直存在. 随着应变率的增加,纤维丝之间的相互挤压作用也不断再增大,因此滑动摩擦力也不断增大(摩擦系数可视作常数),进而提高了纤维束的整体拉伸强度.

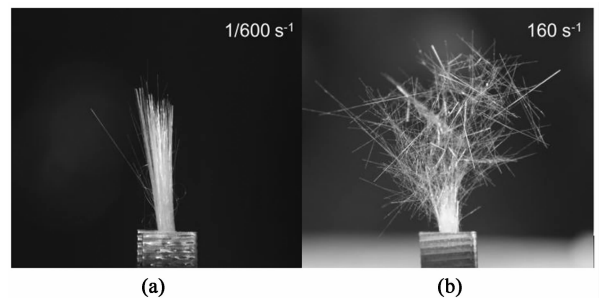


图6 不同应变率下的破坏形态

Fig. 6 Fracture morphologies under different strain rates

2.3.3 温度效应机制

纤维的断裂过程包括化学键破坏、分子间滑脱、范德华力破坏等^[13]. 温度升高,对化学键、范德华力等都有一定削弱. 所以,玻璃纤维的拉伸强度随温度升高有一定的降低. 但当温度升至 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时,纤维表面浸润剂的消失以及水等小分子脱出使纤维之间摩擦系数增大,纤维之间摩擦力也随之增大,因此, $100\text{ }^\circ\text{C}$ 玻璃纤维束的拉伸强度反而有所上升.

3 Weibull 分析

Weibull 统计模型以弱环定理^[12]为基础,假定缺陷沿纤维束长度方向随机分布.当其中最大的缺陷发生破坏时,整个试件随即失效.随着纤维束长度的增加,处于临界强度的缺陷出现的概率更高,试件越容易发生失效.相关研究^[14-15]表明,纤维的拉伸强度分布符合 Weibull 统计规律.

二参数 Weibull 分布的基本形式如下

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

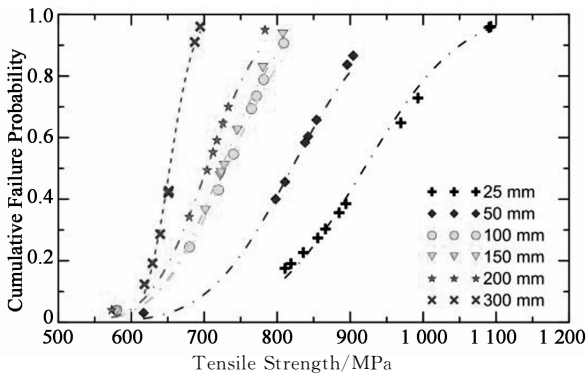
式中: σ 为拉伸强度; σ_0 为尺度参数; m 为形状参数.累积概率密度公式如下

$$P = \frac{i}{N+1} \quad (3)$$

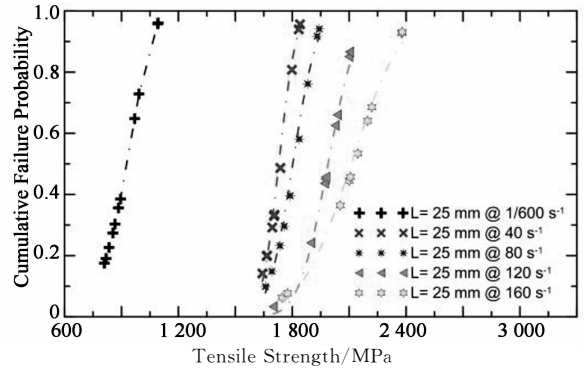
式中: N 为测试总数; i 为当前测试编号.参考文献^[16]拟合拉伸强度数据并获取 Weibull 参数.

图 7(a),(b)和(c)分别为玻璃纤维束在不同标距、应变率和温度下的累积概率密度-强度曲线.如图所示,随着标距的增加,累积概率密度曲线向低应力区偏移,而随着应变率的增加,曲线朝着高应变区偏移.这再次印证了玻璃纤维束拉伸强度的标距和应变率相关性.其拉伸强度与温度的相关性也很明显,然而曲线的偏移轨迹有些特别.当温度由 25℃ 上升到 75℃ 时,曲线依次朝低应变区偏移,然而升至 100℃ 时,曲线又往高应力区反弹,与图 5(b)的结果相呼应.当然,从图中曲线的疏密也可以轻易辨别纤维强度的敏感标距区间、应变率区间和温度区间.

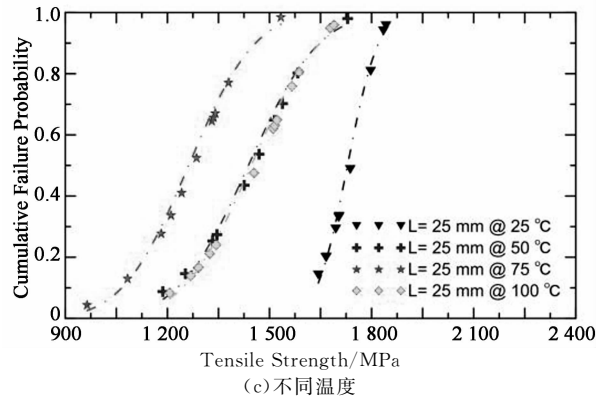
表 1~3 列出了玻璃纤维束在不同标距、应变率和温度下的拉伸强度 Weibull 参数.其中, σ 为尺度参数,类似于平均强度. m 为形状参数,表征的是数据的离散程度; m 越小,说明数据越离散.显然,动态下 m 值小于静态值,而且随着应变率的增加, m 值逐渐减小,表明更高的应变率下,玻璃纤维束表现出更随机的破坏分布.从表 3 中可以发现,当温度从



(a) 不同标距



(b) 不同应变率



(c) 不同温度

图 7 拉伸强度的累积概率曲线

Fig. 7 Cumulative failure probability of tensile strength

25℃ 逐步升高到 100℃ 时, m 也在依次减小,呈现出愈发离散分布.

表 1 玻璃纤维束在不同标距下的拉伸强度 Weibull 参数

Tab. 1 Weibull parameters for tensile strength of glass fiber bundle with different gauge lengths

	Gage length/mm					
	25	50	100	150	200	300
Glass fiber σ_0 /MPa	951	850	754	745	717	674
bundle m	29.2	19.6	22.4	24.5	28.6	19.4

表 2 玻璃纤维束在不同应变率下的拉伸强度 Weibull 参数

Tab. 2 Weibull parameters for tensile strength of glass fiber bundle with different strain rates

		Strain rate/s ⁻¹			
		40	80	120	160
Glass fiber σ_0 /MPa		1 744	1 836	2 027	2 177
bundle m		20.2	16.2	15.4	10.9

表 3 玻璃纤维束在不同温度下的拉伸强度 Weibull 参数

Tab. 3 Weibull parameters for tensile strength of glass fiber bundle with different temperatures

		Temperature/°C			
		25	50	75	100
Glass fiber σ_0 /MPa		1 744	1 479	1 312	1 497
bundle m		20.2	10.3	9.3	8.1

4 结 论

本文对玻璃纤维束进行了不同标距、应变率和温度下的拉伸测试,并讨论了标距、应变率和温度对其力学性能参数的影响,最终得到以下结论:

1)玻璃纤维具有明显的尺寸效应.杨氏模量随标距的增加而增大,而拉伸强度、峰值应变和韧性随着标距的增加而减小.当标距大于200 mm,纤维的杨氏模量和拉伸强度不再发生明显变化.这说明对于玻璃纤维束而言,200 mm接近其强度受限临界长度,当长度超过这个临界值,其内部包含最薄弱环节的概率极大.

2)玻璃纤维属于应变率敏感材料,在 $40\sim 160\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内,杨氏模量和拉伸强度都随着应变率的增加而增大,而峰值应变与韧性呈先增后减的趋势.

3)温度对玻璃纤维的力学性能也有一定的影响.在 $25\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,杨氏模量随温度的增加而减小,峰值应变恰好相反,而拉伸强度和韧性却呈现出先减后增的趋势.

4)随着应变率的增加, m 值逐渐减小,表明更高的应变率下,玻璃纤维束表现出更随机的破坏分布.当温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐步升高到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, m 也在依次减小,体现出愈发离散分布.

参考文献

- [1] BAKIS C, BANK L C, BROWN V, *et al.* Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2): 73-87.
- [2] DAI J G, BAI Y L, TENG J. Behavior and modeling of concrete confined with FRP composites of large deformability [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(6): 963-973.
- [3] FIORE V, DI BELLA G, VALENZA A. Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(4): 2091-2099.
- [4] NKURUNZIZA G, DEBAIKY A, COUSIN P. *et al.* Durability of GFRP bars: A critical review of the literature [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, 7(4): 194-209.
- [5] ZHU L, SUN B, HU H, *et al.* Constitutive equations of basalt filament tows under quasi-static and high strain rate tension [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(13): 3245-3252.
- [6] LIM J, ZHENG J Q, MASTERS K, *et al.* Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(4): 219-227.
- [7] ANDERSONS J, JOFFE R, HOJO M, *et al.* Glass fibre strength distribution determined by common experimental methods [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(1): 131-145.
- [8] 林峰, 顾祥林, 匡昕昕, 等. 高应变率下建筑钢筋的本构模型 [J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1): 14-20.
LIN Feng, Gu Xianglin, KUANG Xinxin, *et al.* Constitutive models for reinforcing steel bars under high strain rates [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(1): 14-20. (In Chinese)
- [9] ZHU D, MOBASHER B, RAJAN S D. Dynamic tensile testing of kevlar 49 fabrics [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(3): 230-239.
- [10] 朱德举, 欧云福. 应变率和温度对单束BFRP力学性能的影响 [J]. *建筑材料学报(优先出版)*, 2015: 1-11.
ZHU Deju, OU Yunfu. Strain rate and temperature effects on mechanical behavior of BFRP single yarns [J]. *Journal of Building Materials (Online First)*, 2015: 1-11.
- [11] ZHU D, RAJAN S, MOBASHER B, *et al.* Modal analysis of a servo-hydraulic high speed machine and its application to dynamic tensile testing at an intermediate strain rate [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(8): 1347-1363.
- [12] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 13(1): 293-297.
- [13] 刘凤岐, 汤心颐. 高分子物理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
LIU Fengqi, TANG Xinyi. *Polymer physics* [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1995. (In Chinese)
- [14] CREASY T. Modeling analysis of tensile tests of bundled filaments with a bimodal Weibull survival function [J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(2): 183-194.
- [15] WANG Z, XIA Y. Experimental evaluation of the strength distribution of fibers under high strain rates by bimodal Weibull distribution [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 57(12): 1599-1607.
- [16] OU Y, ZHU D. Tensile behavior of glass fiber reinforced composite at different strain rates and temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 648-656.