

不同应变率和温度下 AFRP 力学性能试验研究*

朱德举^{1†}, 张晓彤¹, 张怀安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 液压伺服高速试验机测试芳纶纤维(Kevlar 29)增强复合材料(AFRP)在不同应变率(25, 50, 100 和 200 s⁻¹)和温度(-25, 0, 25, 50 和 100 °C)条件下的力学性能.结果表明,在相同温度(25 °C)下,随着应变率的增大,杨氏模量和拉伸强度先增大(25~50 s⁻¹)后减小(50~200 s⁻¹),而韧性则表现为相反的趋势.在相同应变率(25 s⁻¹)下,温度的升高会造成杨氏模量出现波动,拉伸强度上升,而韧性则没有明显的改变.不同试验条件下 AFRP 破坏形态没有明显区别,均为较平整断裂面.最后,通过 Weibull 分析,量化了破坏强度在不同应变率和温度下的离散程度.

关键词:AFRP; 拉伸性能; 动态载荷; 温度效应; 断裂形态

中图分类号:TU532.3

文献标志码:A

Experimental Study of the Mechanical Properties of AFRP under Different Strain Rates and Temperatures

ZHU Deju^{1†}, ZHANG Xiaotong¹, ZHANG Huaian, 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: Aramid fiber (Kevlar 29) reinforced polymers (AFRP) samples were tested by utilizing a MTS servo-hydraulic high rate testing machine in order to investigate their mechanical properties at different strain rates (25, 50, 100, and 200 s⁻¹) and temperatures (-25, 0, 25, 50, and 100 °C). The results show that at the same temperature (25 °C), Young's modulus and tensile strength increase with the increase of strain rate firstly (25 to 50 s⁻¹), and then decrease under the greater strain rate (50 to 200 s⁻¹), while the opposite occurs for toughness. When strain rate is constant at 25 s⁻¹, Young's modulus shows a trend of fluctuation under elevated temperatures, while the tensile strength and toughness show no substantial temperature effect. The failure patterns of AFRP samples were similar at the investigated strain rates and temperatures, and the fracture surfaces were relatively straight. Moreover, Weibull statistics were used to quantify the degree of variability in failure strength at different strain rates and temperatures.

Key words: AFRP; tensile behavior; dynamic loading; temperature effect; failure patterns

纤维增强复合材料(FRP)是由增强纤维和基体材料经过一定复合工艺制成的高性能材料,以其比

* 收稿日期:2016-06-16

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB026200), Major State Basic Research Development Program of China (973 Program) (2012CB026200);湖南省科技计划重点项目(2014WK2026), Key Projects of Hunan Science and Technology Program (2014WK2026)

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

强度高,抗冲击、抗疲劳性能好等优点,在国防建设、汽车工业、地铁隧道、海洋结构等各个领域获得广泛的应用^[1].近年来,芳纶纤维增强复合材料(AFRP)在土木工程基础设施的加强、修复领域崭露头角.用于结构补强的AFRP材料会受到不同应变率、不同温度的耦合作用,其力学性能与静态荷载和常温条件下相比会发生显著的变化^[2].因此,研究AFRP材料在不同温度和应变率下的力学特性,对其工程应用具有重要意义.Rodriguez等^[3-4]对芳纶/聚丙烯、芳纶/聚对苯二甲酸乙二酯机织复合材料在不同应变率(10^{-3} , 1 , 10^3 s^{-1})下的动态拉伸性能进行测试,发现材料拉伸应力随应变率的增加而增大.Wang等^[5]对Kevlar 49/酚醛树脂复合材料在150, 400和1 500 s^{-1} 三种应变率下进行拉伸试验,结果表明,随着应变率的增大,弹性模量和拉伸强度均有所增加.Tann等^[6]对芳纶纤维增强复合材料分别进行了 $-20\sim 25$ $^{\circ}C$ 冻融循环测试和 180 $^{\circ}C$ 高温测试,得到冻融循环作用对AFRP强度影响不大,而高温可以造成其强度降低的结论.

根据Reinhardt等^[7-9]对不同种类动力荷载作用下钢筋混凝土结构和构件应变率范围的分类,冲击荷载造成的应变率在 $1\sim 100$ s^{-1} 之间,而爆炸荷载引起的应变率大于 100 s^{-1} .土木工程结构经常遇到各种冲击和爆炸作用,但AFRP材料在中等应变率下($10\sim 200$ s^{-1})的力学性能却少有研究,对于在中等应变率和不同温度耦合作用下的力学特性的研究更是近乎空白;同时,Zhu等^[10-11]研究发现,AFRP的主要组成成分——Kevlar纤维在中等应变率下的力学性能会发生明显的改变,AFRP的应变率是否同样具有明显的应变率效应成为亟需研究的问题.本文的任务是测试AFRP材料在中等应变率和不同温度作用下的动力响应和断裂形态.所获得的力学性能可以用于建立应变率相关性和温度相关性的材料本构模型,为AFRP在极端环境下的理论研究和实际应用奠定基础.

1 试验测试

1.1 试验材料

本试验选用湖南固特邦土木技术发展有限公司研发的JN-C3P改性环氧胶黏剂,以单层Kevlar® 29作为增强纤维,纤维束支数为 6.7×6.7 束/cm,体密度为 1.44 g/cm^3 ,线密度为 1.64×10^{-3} g/cm ,纤维丝直径为 12 μm ,每根纤维束的横截面积为

1.14×10^{-3} cm^2 ^[12].利用真空辅助树脂灌注成型工艺(VARI)^[13]和定制的铝模具制备含单层Kevlar纤维的AFRP试样.

综合考虑夹具尺寸的限制和尽量包含较多纤维束,以更真实地反映AFRP的力学性能,确定试样宽度为 22 mm ,约 15 束Kevlar 29纤维束,纤维体积分数约为 15.5% ,标距长度为 25 mm .为了将荷载均匀传递到试样的标距部分,并防止加载过程中夹具对试样产生破坏,在试样两端的上下两侧均用相同的环氧树脂胶黏结 40 $mm\times 22$ $mm\times 0.3$ mm 的铝片,试样总长度为 105 mm ,如图1所示.



图1 待测试试样
Fig.1 Sample for testing

在试样的中心区域任取3处,用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测得试样厚度,取平均值作为试样厚度.试样厚度与宽度的乘积为其横截面积,用于计算试样的拉伸应力.

1.2 试验方法

试验在美国亚利桑那州立大学使用MTS液压伺服高速试验机完成,试验仪器如图2所示.该试验仪器的荷载量程为 20 kN ,最高加载速率可达 14 m/s ^[14].通过调节阀门,可以控制加载速率,当拉伸速率达到预定加载速率后,再安装试件进行测试.所用夹具为由不锈钢制成的楔形块状,可以有效地夹紧试件,避免试件在拉伸测试过程中发生滑移.环境箱采用电阻丝加热和液氮制冷,工作温度范围为 $-60\sim 200$ $^{\circ}C$,内置风扇可以使得箱内温度均匀变化.在室温(25 $^{\circ}C$)条件下,选取 0.625 , 1.25 , 2.5 和 5 m/s 四种加载速率,加载速率与试样标距长度的比值为名义应变率,则对应得到 25 , 50 和 100 和 200 s^{-1} 四种名义应变率;在名义应变率为 25 s^{-1} 条件下,选取 -25 , 0 , 25 , 50 , 100 $^{\circ}C$ 五种温度条件对试样进行测试.试验机内置的位移传感器可以记录试验过程中试样的变形,用于应变的计算.每组测试均选取 10 个试样,以减少随机误差的影响.荷载和位移数据采集频率均设定为 250 Hz .试样前方的Phantom v7.3高速相机可以对试件的拉伸破坏过程进行记录,采集频率为 $20\ 000$ 帧/秒(fps).

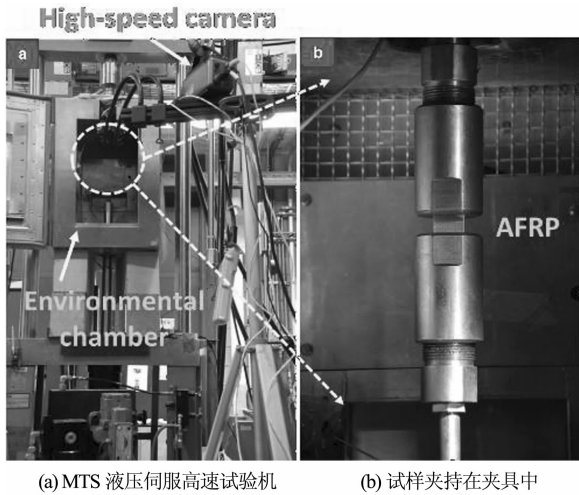


图 2 试验装置
Fig.2 Experimental setup

2 试验结果

2.1 应变率对力学性能的影响

图 3 展现的是在室内温度(25 °C)条件下,试样在 25, 50, 100 和 200 s⁻¹ 应变率下的应力-应变曲线,其中,应力为仪器记录的荷载与试样横截面积的比值.由于加载过程中试样的反作用力降低了加载速率,试样受到的实际应变率不同于名义应变率^[1],如曲线右侧标注所示;当 MTS 液压伺服高速试验机的加载速率较高时,会造成油泵压力有所降低,因此,加载速率越高,名义应变率与实际应变率的差异越大.但总体而言,随着名义应变率的增加,实际应变率也呈现上升趋势.

由于实际应变率具有一定的离散性,为了便于统计分析,后续关于力学性能随应变率变化趋势的讨论将采用名义应变率.通过对不同名义应变率下的应力应变曲线进行对比,可以看出,在名义应变率为 25 s⁻¹ 时,曲线呈现双峰值,这是因为部分纤维首先断裂,应力重分布,再次达到峰值后试样完全断裂;而在其他 3 种较高应变率下,应力应变曲线走势基本相同,都是达到单一峰值后下降.初始阶段的非线性区域,为 AFRP 内部弯曲纤维丝拉直过程^[3].对比 50, 100 和 200 s⁻¹ 三种应变率下的应力应变曲线可以看出,随着应变率的增大,下降段斜率减小,说明 AFRP 内部纤维的断裂应变离散性大,较多的纤维在应力达到峰值后发生断裂.取应力-应变曲线下的面积作为韧性,表征单位体积的变形能.具体计算公式如式(1).

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

式中: U_T 为韧性; ϵ 为应变, ϵ_f 为最大应变; σ 为应力.

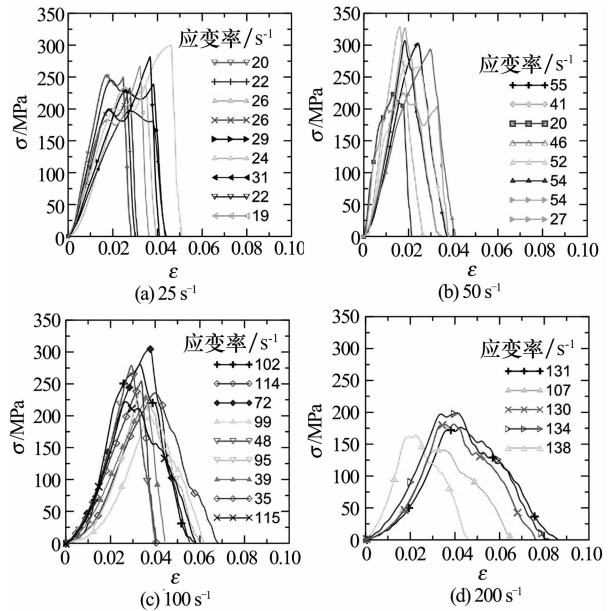


图 3 不同应变率下的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves at different strain rates

图 4 为 AFRP 力学性能随应变率的变化趋势图.从整体上看,杨氏模量与拉伸强度变化趋势一致,均是先升高后降低,而韧性则呈现相反的趋势.具体而言,当名义应变率由 25 s⁻¹ 增加到 50 s⁻¹ 时,杨氏模量和拉伸强度分别由 (14.4 ± 6.0) GPa, (243.8 ± 38.4) MPa 增加到 (21.5 ± 6.3) GPa 和 (293.0 ± 41.1) MPa,增幅分别为 49.3% 和 20.2%;而当名义应变率由 50 s⁻¹ 增加到 200 s⁻¹ 时,杨氏模量和拉伸强度呈现下降的趋势,分别降低到 (9.6 ± 2.1) GPa 和 (197.6 ± 57.9) MPa,降低幅度为 55.3% 和 32.6%.韧性随应变率的增加表现为先降低后升高的趋势.当名义应变率由 25 s⁻¹ 增加到 50 s⁻¹ 时,材料的韧性由 (5.14 ± 2.12) MPa 降低约 8.9% 至 (4.68 ± 1.52) MPa;随着名义应变率由 50 s⁻¹ 增加到 200 s⁻¹,韧性增加 32.9% 至 (6.22 ± 1.62) MPa.

为了更加深入地理解 AFRP 的应变率效应,表 1 分别列出了 Kevlar 29-AFRP 与 Kevlar 29 纤维束的应变率试验结果.其中, Kevlar 29 纤维束的应变率测试由本课题组欧云福等人实施,具体测试过程和结果分析将另文阐述.由于 AFRP 复合材料的强度计算采用试样的横截面积,其纤维的体积分数为

15.5%,说明大部分面积是由承载力较低的胶体填充而成的,并且由于试样中纤维束拉伸强度的随机性、纤维束不能完全同时破坏等原因,造成AFRP复合材料的强度比纤维束的强度低.两者的应变率效应表现为相反的趋势,结合较高应变率下应力-应变曲线的下降段斜率降低的现象,认为拉伸强度的降低趋势很可能是由于在较高应变率下内部纤维的破坏应变更为离散,造成AFRP整体承载力下降.

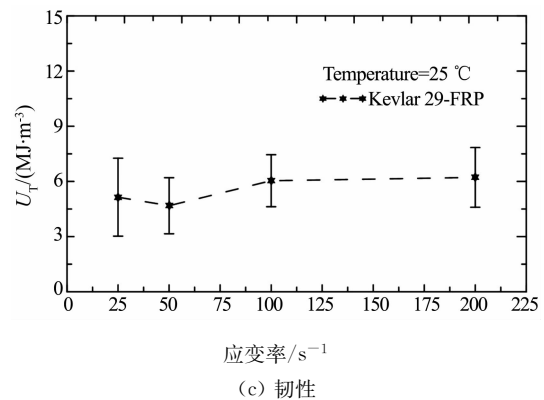
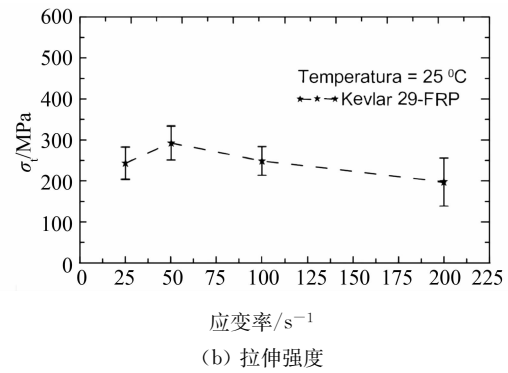
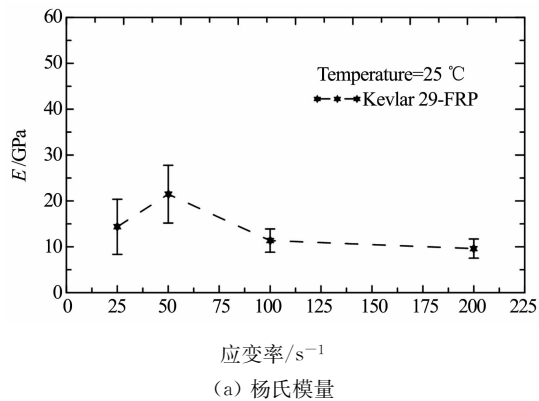


图4 应变率对材料力学性能的影响

Fig.4 Strain rate effect on mechanical properties

表1 Kevlar 29 纤维束与 AFRP 动态拉伸试验结果对比

Tab.1 Comparison of the experimental results between Kevlar 29 single yarn and AFRP

材料种类	标距/mm	应变率/ s^{-1}	杨氏模量/GPa	拉伸强度/MPa	韧性/ $(MJ \cdot m^{-3})$
Kevlar 29 single yarn	25	40	123.1 ± 13.2	2247 ± 101	40.5 ± 6.9
		80	129.4 ± 19.0	2439 ± 177	43.9 ± 8.6
		120	140.0 ± 15.8	2465 ± 201	38.2 ± 5.9
		160	156.6 ± 14.6	2691 ± 103	38.1 ± 3.1
Kevlar 29 AFRP	25	25	14.4 ± 6.0	243.8 ± 38.4	5.14 ± 2.12
		50	21.5 ± 6.3	293.0 ± 41.1	4.68 ± 1.52
		100	11.4 ± 2.5	249.2 ± 34.6	6.04 ± 1.41
		200	9.6 ± 2.1	197.6 ± 57.9	6.22 ± 1.62

2.2 温度对力学性能的影响

AFRP 试样在 $25 s^{-1}$ 应变率, $-25, 0, 50$ 和 100 $^{\circ}C$ 温度条件下的应力-应变曲线如图 5 所示, 曲线离散程度较小, 试验的重复性较好. 图 6 为 AFRP 力学性能随温度的变化趋势. 总体来说, 温度对 AFRP 力学性能的影响较小. 具体而言, 杨氏模量随温度变化呈现出一定的波动, 拉伸强度呈现出微小的上升趋势, 而韧性随温度变化几乎不变. 具体而言, 当温度从 -25 $^{\circ}C$ 变化到 100 $^{\circ}C$ 时, 杨氏模量分别为 (12.7 ± 4.1) GPa, (15.6 ± 3.0) GPa, (14.4 ± 6.0) GPa, (17.4 ± 2.5) GPa 和 (10.5 ± 3.2) GPa, 最大变化幅度为 39.7%; 拉伸强度分别为 (226.0 ± 9.9) MPa, (228.1 ± 33.9) MPa, (243.8 ± 38.4) MPa, $(251.5 \pm$

$30.0)$ MPa 和 (252.0 ± 24.3) MPa, 增长幅度为 11.5%; 而韧性分别为 (5.12 ± 1.15) MPa, (5.15 ± 0.92) MPa, (5.14 ± 2.12) MPa, (5.32 ± 0.84) MPa 和 (5.21 ± 1.08) MPa, 变化幅度在 3.9% 以内.

由于环氧树脂胶体具有低温变脆、高温软化的性质, 受温度影响较大; 而 Kevlar 29 纤维具有良好的热稳定性. 根据 AFRP 力学性能随温度变化不明显的试验结果可以推断, Kevlar 纤维是 AFRP 材料承担应力的主要部分. 杨氏模量随温度变化产生一定的波动, 有可能是由于环氧树脂胶体与 Kevlar 29 纤维热膨胀系数不同, 两者之间存在残余应力和相互作用^[15]; 同时, 由于所用胶结材料到达其玻璃化温度, 100 $^{\circ}C$ 时 AFRP 的弹性模量有明显的下降.

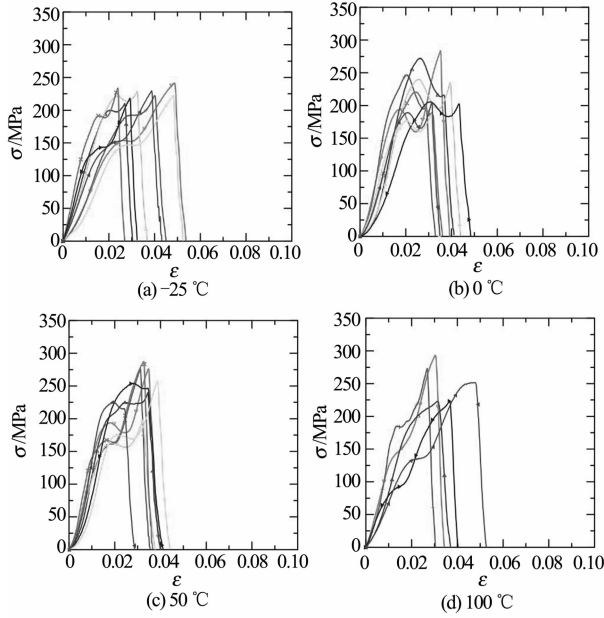


图 5 不同温度下的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves at different temperatures

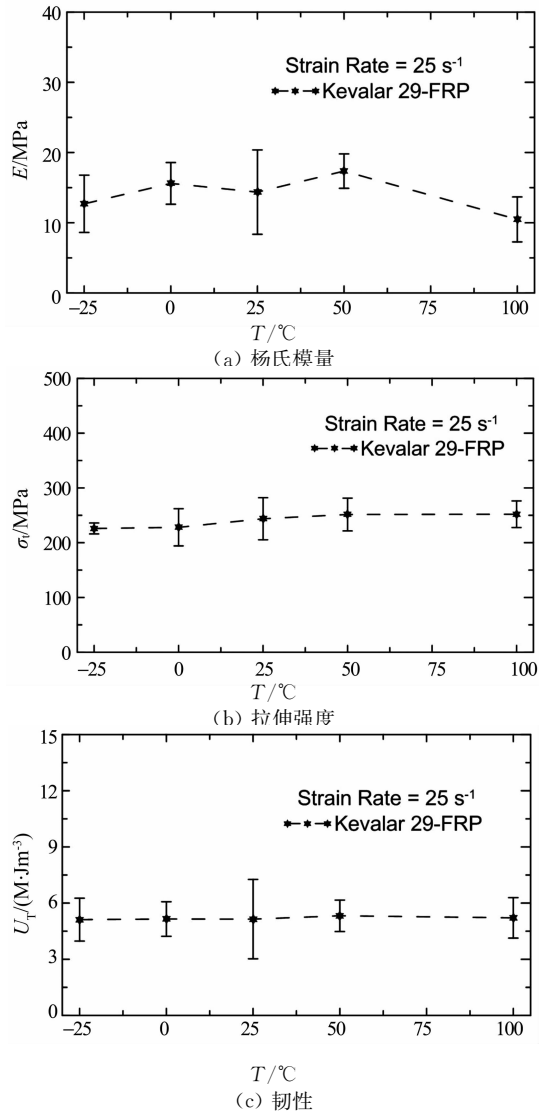


图 6 温度对材料力学性能的影响

Fig.6 Temperature effect on mechanical properties

2.3 Weibull 分析

由于试样制作所采用的纤维织物不可避免地存在少量褶皱,造成纤维的平行程度不一致,使试样在拉伸过程中出现偏心受力,以及纤维材料存在的缺陷,都会造成 AFRP 试样强度出现离散性.采用二参数 Weibull 概率统计分布^[16]对拉伸强度进行处理,以表征强度的分散程度.

二参数 Weibull 分布的基本形式如下:

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

式中: σ_t 为拉伸强度; σ_0 为尺度参数; m 为形状参数.

累积概率密度由式(2)得到:

$$P = \frac{i}{N + 1}. \quad (2)$$

式中: N 为有效测试数量; i 为当前测试编号.

将式(2)代入式(1)并两边取对数可得回归方程:

$$Y_i = mX_i - m \ln \sigma_0. \quad (3)$$

式中:

$$Y_i = \ln \left\{ \ln \left[1 - \frac{i}{N + 1} \right] \right\}; \quad (4)$$

$$X_i = \ln \sigma_t. \quad (5)$$

若概率图可以回归成一条直线,并且相关系数接近 1,则说明符合 Weibull 二参数分布;反之,不符合.由回归曲线的斜率和横截距可确定 m 和 σ_0 .

得到的 AFRP 试样在不同应变率和不同温度下的累计破坏概率图如图 7 所示.表 2 为 Weibull 参数计算结果.由图 7(a)可以看出,当应变率由 25 s^{-1} 增加到 50 s^{-1} 时,曲线向高强度方向移动;而当应变率由 50 s^{-1} 增加到 200 s^{-1} 时,曲线转为向低强度方向移动,与图 4 结论一致.随着温度的升高,图 7(b)中的曲线逐渐向高强度方向发生少量移动,与图 6 结论一致.

表 2 AFRP 在不同应变率和温度下拉伸强度 Weibull 参数
Tab.2 Weibull parameters for tensile strength of AFRP with different strain rates and temperatures

测试条件 (温度和应变率)		σ_0 /MPa	m
25 °C	25 s^{-1}	264	8.7
	50 s^{-1}	307	8.1
	100 s^{-1}	268	12.3
	200 s^{-1}	212	18.0
25 s^{-1}	-25 °C	234	28.3
	0 °C	254	8.7
	50 °C	264	8.1
	100 °C	258	10.9

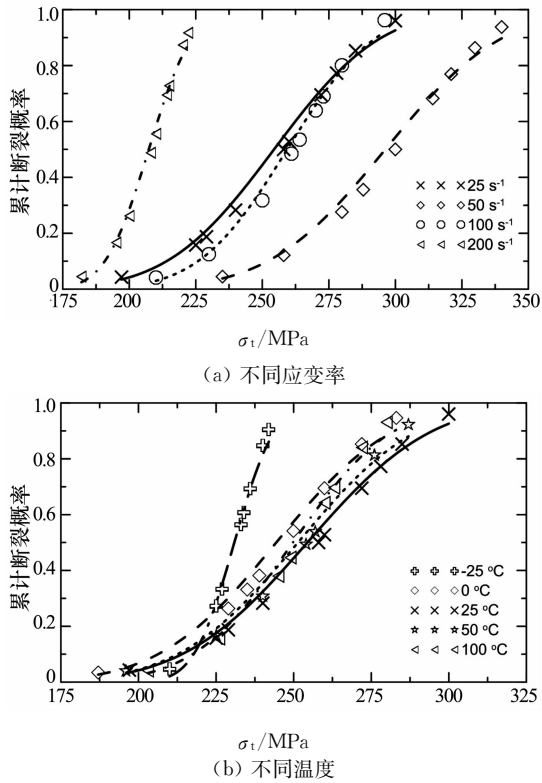


图7 拉伸强度-累计断裂概率曲线
Fig.7 Cumulative failure probability of tensile strength

2.4 应变率和温度对破坏形态的影响

高速相机记录的 AFRP 在不同应变率下的破坏过程如图 8 所示,最终破坏形态如图 9 所示.

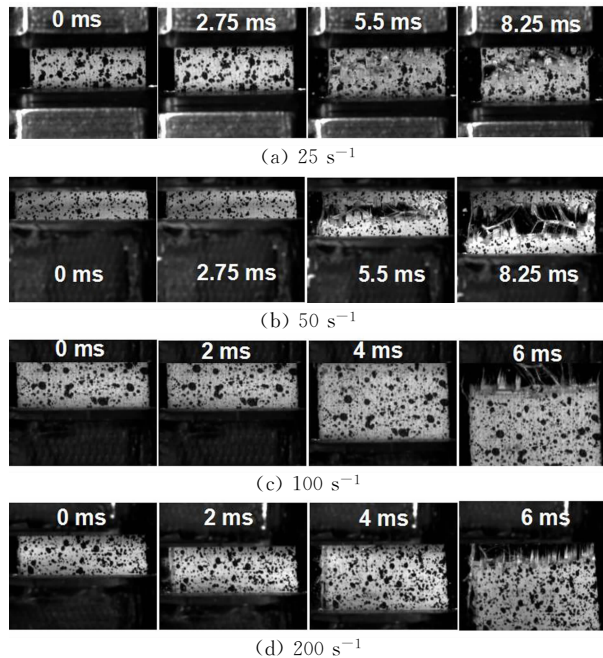


图8 不同应变率下的破坏过程
Fig.8 Failure process at different strain rates

可看出,AFRP 破坏形态与应变率无关,受力方向上纤维和环氧树脂胶体几乎在同一位置拉断,纤维拔出长度较短,形成较平整的断裂面^[3, 15].由于内

部纤维不可能完全平行,以及纤维束强度有一定的随机性^[10],试样断裂面并非完全平整.由 AFRP 试样在不同温度下的拉伸破坏断裂图(图 10)可看出,随着温度的改变,破坏形态并没有明显的差异,断裂面比较整齐.综上可知,不同应变率和温度对 AFRP 力学性能有影响,而对其断裂形态基本上没有影响.

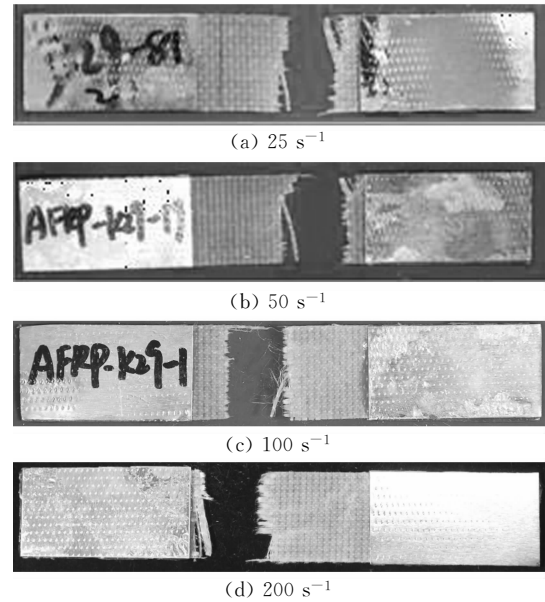


图9 不同应变率下的破坏形态
Fig.9 Fracture morphology under different strain rates

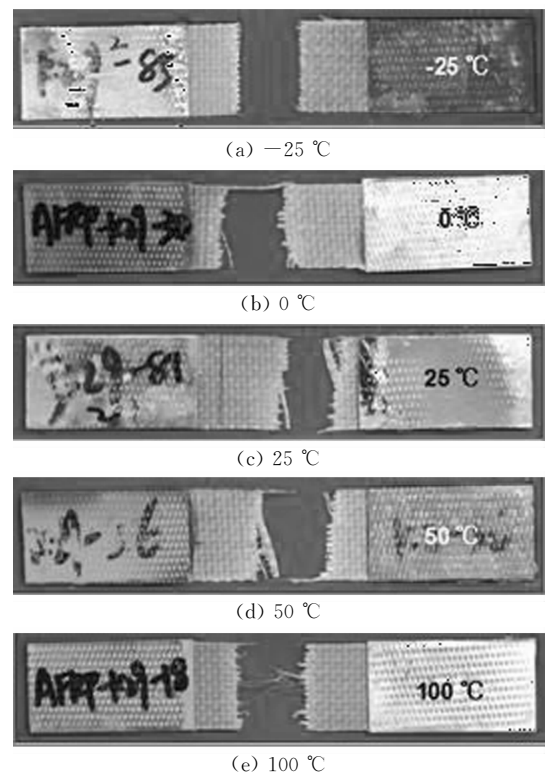


图10 不同温度下试样的断裂形态
Fig.10 Fracture morphology of tested samples under different temperatures

3 结 论

本研究采用 Kevlar 29 纤维和环氧树脂胶体制备 AFRP 试样,对其进行 4 种应变率(25, 50, 100, 200 s^{-1})和 5 种温度条件(-25, 0, 25, 50, 100 $^{\circ}C$)下的动态拉伸测试,并针对其力学性能和破坏形态进行了分析,得到如下主要结论:

1)在应变率为 25~50 s^{-1} 时,AFRP 杨氏模量和拉伸强度随着应变率的增大而增大;大于 50 s^{-1} 时,则随着应变率的增加而减小,韧性随应变率的变化趋势与之相反。

2)在温度为 -25~100 $^{\circ}C$ 时,温度的升高会造成 AFRP 的杨氏模量出现最大变化幅度为 39.7% 的波动,拉伸强度增长 1.5%。而温度对韧性的影响较小,最大变化范围只有 3.9%。

3)在不同应变率和不同温度下,AFRP 的断裂形态基本相同,都是较平整的断裂面。

致谢:感谢美国亚利桑那州立大学 Barzin Mobasher 教授、姚一鸣博士对试验的顺利进行给予的帮助和支持。

参考文献

- [1] 周芬,冷举良,杜运兴.基于纤维模型的FRP约束混凝土圆柱本构模型研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(5):46-52.
ZHOU Fen, LENG Juliang, DU Yunxing. Research on the constitutive models of FRP confined concrete cylinder based on fiber models [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(5):46-52. (In Chinese)
- [2] NARDONE F, DI LUDOVICO M, BASALO Y, *et al.* Tensile behavior of epoxy based FRP composites under extreme service conditions [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1468-1474.
- [3] RODRIGUEZ J, CHOCRON I, MARTINEZ M, *et al.* High strain rate properties of aramid and polyethylene woven fabric composites [J]. Composites Part B: Engineering, 1996, 27(2): 147-154.
- [4] BENLOULO I C, RODRIGUEZ J, MARTINEZ M, *et al.* Dynamic tensile testing of aramid and polyethylene fiber composites [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(2): 135-146.
- [5] WANG Y, XIA Y. A modified constitutive equation for unidirectional composites under tensile impact and the dynamic tensile properties of KFRP [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(4): 591-596.
- [6] TANN D B, DELPAK R. Influences of freeze and thaw cycles and elevated temperature on the properties of FRP composites [C]//Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2004: 611-618.
- [7] REINHARDT H. Testing and monitoring techniques for impact and impulsive loading of concrete structures[C]//Proceedings RILEM-CEB-IABSE-IASS-Interassociation Symposium on Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. Berlin: Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), 1982: 65-87.
- [8] 唐亮.考虑应变率效应的不同配筋率钢筋混凝土柱动力性能试验与模拟 [D].长沙:湖南大学土木工程学院,2010:1-2
TANG Liang. Test and simulation on dynamic behavior of RC columns with different reinforcement ratios considering strain rate effect [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2010: 1-2. (In Chinese)
- [9] 张皓.材料应变率效应对钢筋混凝土框-剪结构地震反应的影响[D].大连:大连理工大学土木工程学院,2012:1.
ZHANG Hao. Strain rate effect of materials on seismic response of reinforced concrete frame-wall structure [D]. Dalian: College of Civil Engineering, Dalian University of Technolog, 2012:1. (In Chinese)
- [10] ZHU D, MOBASHER B, ERNI J, *et al.* Strain rate and gage length effects on tensile behavior of Kevlar 49 single yarn [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(11): 2021-2029.
- [11] 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.
- [12] CEN H, KANG Y, LEI Z. Micromechanics analysis of Kevlar-29 aramid fiber and epoxy resin microdroplet composite by Micro-Raman spectroscopy [J]. Composite Structures, 2006, 75(1): 532-538.
- [13] XIA C, SHI S Q, CAI L. Vacuum-assisted resin infusion (VARI) and hot pressing for $CaCO_3$ nanoparticle treated kenaf fiber reinforced composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 78(1):138-143.
- [14] ZHU D, RAJAN S, MOBASHER B. 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.
- [15] ZHOU Y, WANG Y, MALLICK P K. An experimental study on the tensile behavior of Kevlar fiber reinforced aluminum laminates at high strain rates [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 381(1/2): 355-362.
- [16] JIANG R. A drawback and an improvement of the classical Weibull probability plot [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 126:135-142.