

复合材料冲击拉伸行为及 Weibull 分布

沈煜¹, 孙宝忠²

(1.东华大学 计算机科学与技术学院, 上海 200241; 2.东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要: 研究了平纹玄武岩纤维增强复合材料在冲击加载下的拉伸力学行为。运用 Hopkinson 拉杆测试了应变率在 900~3 200 s⁻¹ 内的材料的冲击拉伸性能,同时测试了材料在 0.001 s⁻¹ 应变率下的拉伸性能。结果表明:平纹玄武岩纤维增强复合材料的应力应变曲线是应变率敏感的,随着应变率的增加,其拉伸模量和最大应力增加,而相应最大应力的应变则减小。通过 Weibull 分布模拟了其应力应变曲线及参数的变化规律,分析了其破坏机理。

关键词: 复合材料; 冲击力; 应变; 应力; 拉伸曲线; Weibull 分布

中图分类号: TS101.923

文献标识码: B

文章编号: 1001-2044(2018)07-0005-03

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.07.002

Dynamic tensile behavior of woven fabric composites and Weibull distribution

SHEN Yu¹, SUN Baozhong²

(1.School of Computer Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200241, China)

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

Abstract: The tensile properties of composites reinforced by basalt woven fabrics in impacting loadings are investigated at different strain rates. The tensile behavior is tested at the strain rates from 900 s⁻¹ to 3 200 s⁻¹ by using the Hopkinson tension bar technique. The tensile behavior at strain rate of 0.001 s⁻¹ is also tested to compare the high strain rate tensile behaviors. The results show that the stress strain curves of composites reinforced by basalt woven fabric are rate sensitive. With increasing the strain rates, the tensile modulus and maximum tensile stress increases, and the corresponding tensile strain decreases. The stress-strain curves are simulated by Weibull distribution, and the damage mechanism is analyzed.

Key words: composites spinning; impulsive force; strain; stress; tensile curtilinear; Weibull distribution

玄武岩纤维作为一种新型纤维,因性能优异在航天航空、国防军工、交通运输等领域广泛应用。玄武岩纤维以火山喷出岩(主要成分为玄武岩)为原料,经过粉碎熔融纺丝制得,其化学组成与玻璃纤维相似,但比玻璃纤维更耐腐蚀^[1],电绝缘以及化学稳定性更好^[2]。由于玄武岩生产过程中没有硼和其他碱金属氧化物排出,因此制造玄武岩连续纤维对环境无害^[3]。

由于平纹复合材料制造成本低,面内力学性能好,广泛应用于航空航天、汽车制造、船舶等工程领域^[4-7]。研究者对平纹机织复合材料在高应变率下的力学行为进行了大量的研究^[8-17],但是对玄武岩纤维平纹复合材料的高应变率研究非常有限,并且在相应分析和有限元计算方面的研究相对缺乏。本文研究了平纹玄武岩纤维增强复合材料的高应变率拉伸行为,分析其力学性能随着应变率变化的规律,同时使用 Weibull 分布拟合不同应变率的应力应变曲线,得到相应的尺度参数和形态参数,揭示其冲击拉伸破坏机理。

1 试验部分

1.1 试验材料

玄武岩织物由上海俄金横店玄武岩公司制造,经纬纱线密度均为 400 tex,经纬密度均为 80 根/10 cm,织物组织为平纹。RF-1001 型不饱和树脂由上海树脂厂制造。织物成型采用真空辅助树脂传递成型技术(VARTM),在 80℃ 下处理 4 h,然后在室温下放置 24 h,制得的复合材料纤维平均体积含量为 50%,厚度为 15 mm。

1.2 试验方法与结果

本文对平纹玄武岩纤维复合材料的拉伸性能进行了 4 种应变率测试,其应变率分别为 0.001、900、2 100、3 200 s⁻¹,其中,应变率为 0.001 s⁻¹ 在 MTS 复合材料试验机上进行测试,其余在间接式反射 Hopkinson 拉杆上进行测试,不同条件下的试验数据以重复性较好的试验结果为准。平纹玄武岩纤维复合材料在上述 4 个应变率下的应力应变曲线见图 1。可以看出,应变率不同时其力学性能有较大差异,随着应变率增加,最大应力和刚度明显增加,而破坏应变,即对应最大应力的应变减小。为了分析方便,整理得到不同应变率下复合材料的力学参数,见表 1。

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675095)

作者简介: 沈煜(1980—),男,湖南湘潭人,助理研究员,主要从事数据处理及分析研究。

通信作者: 孙宝忠。E-mail: sunbz@dhu.edu.cn。

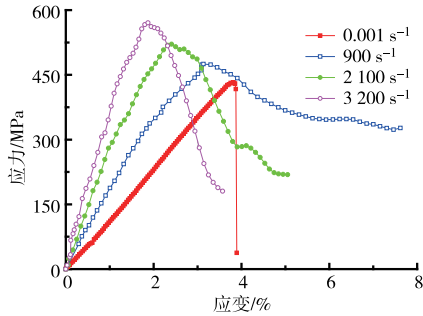


图1 平纹玄武岩纤维复合材料的拉伸曲线

表1 不同应变率平纹玄武岩纤维复合材料的力学参数

应变率/(s ⁻¹)	模量/GPa	最大应力/MPa	破坏应变/%
0.001	11.66	432.36	3.81
900	18.21	475.00	3.17
2100	28.75	520.90	2.41
3200	37.54	570.65	1.87

2 分析与讨论

2.1 平纹玄武岩纤维复合材料的模量

图2描述了平纹玄武岩纤维复合材料的模量和应变率的关系。

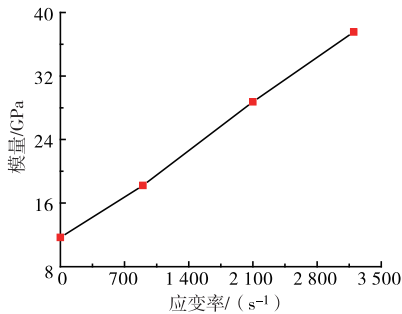


图2 平纹玄武岩纤维复合材料的应变率和模量的关系

由表1和图2可见,随着应变率的增加,平纹玄武岩纤维复合材料的模量基本呈线性增加,其线性关系的拟合方程式为 $E = 11.363 + 0.0082\varepsilon$ ($R^2 = 0.999$)。

2.2 平纹玄武岩纤维复合材料的最大应力

图3描述了复合材料最大应力在不同应变率下的变化趋势。

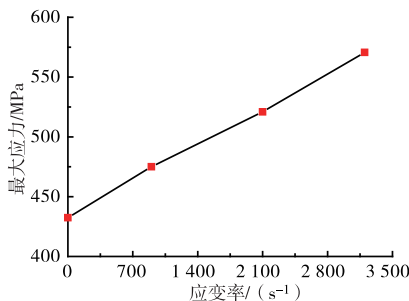


图3 平纹玄武岩纤维复合材料的应变率和最大应力关系

从图3和表1可见,随着应变率增加,最大应力

σ_{max} 线性增加,其拟合方程式为 $\sigma_{max} = 433.71 + 0.0426\varepsilon$ ($R^2 = 0.9985$)。

2.3 平纹玄武岩纤维复合材料的破坏应变

平纹玄武岩纤维复合材料在 0.001、900、2100、3200 s⁻¹ 应变率下的破坏应变 $\varepsilon_{failure}$ 见图4。

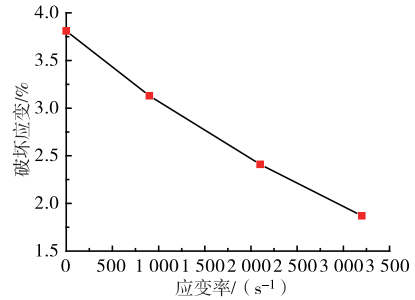


图4 平纹玄武岩纤维复合材料的应变率和破坏应变关系

由表1和图4可见,破坏应变和应变率呈一定的非线性变化趋势,但是由于非线性区间较小,所以该趋势依然可以用线性关系式表示,同时也可以非线性关系式表示,不过非线性关系式的相关系数 R 更大,线性和非线性关系式分别为 $\varepsilon_{failure} = 3.74 - 0.0006\varepsilon$ ($R^2 = 0.9921$) 和 $\varepsilon_{failure} = 3.8193e^{-0.0002\varepsilon}$ ($R^2 = 0.9998$)。

2.4 平纹玄武岩纤维复合材料的损伤

平纹玄武岩纤维复合材料在 0.001、900、2100、3200 s⁻¹ 应变率下的试验后破坏图见图5。

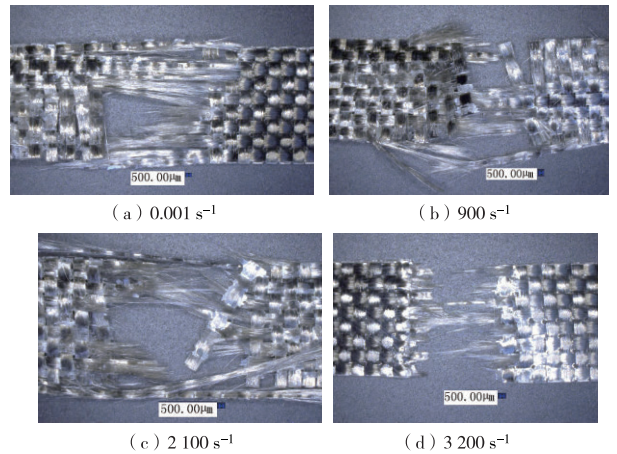


图5 平纹玄武岩纤维复合材料的拉伸破坏

从图5复合材料的断口形貌可以看出,该复合材料的破坏形态对应变率敏感。在应变率为 0.001 s⁻¹ 时,复合材料最主要的破坏模式是剪切破坏,随着应变率越来越大,破坏的端口越来越整齐,破坏模式逐渐从剪切破坏转变成脆性破坏。

2.5 冲击拉伸的单 Weibull 分布

Weibull 强度理论在材料力学中被广泛使用^[8-13]。

Weibull 分布由最弱缺陷决定,即所谓的“弱节理论”。为了表征不同应变率下的强度分布,引入了单 Weibull 分布拉伸本构方程,见式(1):

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

式中: σ ——应力;

ε ——应变;

E ——模量;

σ_0 ——材料尺度参数;

m ——材料形态参数

本文应用 Matlab 软件,采用最小二乘法按单 Weibull 分布对应力应变曲线进行拟合,得到 0.001、900、2 100、3 200 s^{-1} 应变率下单 Weibull 分布的参数,其尺度参数分别为 889.23、937.37、989.03、1 038.63,形态参数分别为 3.11、3.15、3.52、3.63。可以看出,从准静态到高应变率,尺度参数逐渐增加,说明随着材料变形速率的加快,材料对载荷的响应发生变化,最大应力值增加,这和理论上最大应力的变化趋势是一致的。随着应变率的增加,形态参数也在增加,但是变化幅度较小,说明随着应变率增加,材料的力学离散性有变小的趋势,但是变化幅度较小,这是因为材料的离散性取决于材料本身的特性,而不是应变率。为了更好地对比 Weibull 分布数据和表 1 的试验数据,将上述参数代入式(1),得到拟合的应力应变曲线结果,见图 6。

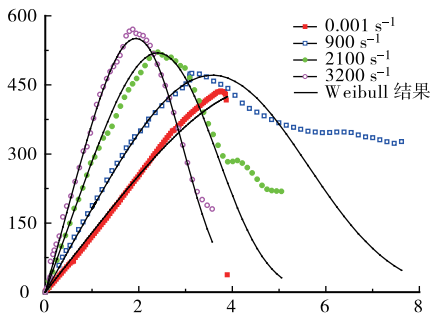


图 6 Weibull 曲线和试验曲线对比图

由图 6 可以看出,单 Weibull 分布可以很好地模拟准静态和冲击加载复合材料的拉伸行为。

3 结 语

平纹玄武岩纤维复合材料的最大应力、模量及破坏应变都随着应变率的变化而变化。从准静态到高应变率,最大应力和模量在应变率测试区内几乎都呈线性增加,但破坏应变呈减小的趋势。在 4 种应变率下的试样破坏图显示,在准静态试验中,主要的破坏模式为剪切破坏,而在冲击加载情况下,破坏更加整齐和规

整。通过单 Weibull 分布模拟了不同应变率下的应力应变曲线,其拟合曲线同试验数据的应力应变曲线相近;随着应变率的增加,其 Weibull 分布的尺度参数和形态参数也相应增加。



参考文献:

- [1] 王明超,张佐光,孙志杰,等.连续玄武岩纤维及其复合材料耐腐蚀特性[J].北京航空航天大学学报,2006(32):1255-1258.
- [2] 郑劲东,张兴刚,杨勇.连续玄武岩纤维及其复合材料研究[J].玻璃钢/复合材料,2009(1):31-33.
- [3] 崔毅华.玄武岩连续纤维的基本特性[J].纺织学报,2005,26(5):57-60.
- [4] 朱波,余同希,陶肖明.机织复合材料的本构关系与成型研究[J].力学进展,2004,34(3):327-340.
- [5] 马丕波,蒋高明,高哲,等.纺织结构复合材料冲击拉伸研究进展[J].力学进展,2013,43(3):329-357.
- [6] 曾翔龙,王奇志,苏飞.含缺陷 C/SiC 平纹机织复合材料拉伸力学行为数值模拟[J].航空材料学报,2017,37(4):61-68.
- [7] 董孚允.纺织结构用于先进复合材料增强物的发展[J].复合材料学报,1992(9):47-52.
- [8] BAOZHONG S, ZHILIN N, LVTAO Z, et al. Mechanical behaviors of 2D and 3D basalt fiber woven composites under various strain rates [J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(14): 1779-1795.
- [9] 田宏伟,郭伟.平纹机织玻璃纤维增强复合材料面内压缩力学行为及破坏机制[J].复合材料学报,2010,27(2):133-139.
- [10] 张君秋,孙宝忠,张威.温度和应变率对碳纤维平纹织物/环氧树脂层压复合材料压缩性能的影响[J].东华大学学报,2016,42(5):636-640.
- [11] HOSUR M V, ALEXANDER J, VAIDYA U K, et al. Mayer A. Studies on the off-axis high strain rate compression loading of satin weave carbon/epoxy composites [J]. Composite Structures, 2004(63): 75-85.
- [12] ANGIIONI S L, MEO M, FOREMAN A. A critical review of homogenization methods for 2D woven composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(22): 1895-1906.
- [13] T I, TW C. Elastic behavior of woven hybrid composites [J]. Journal of Materials Science, 1982(16): 2-19.
- [14] GAMA B A, GILLESPIE J W, MAHFUZ H, et al. High strain-rate behavior of plain-weave S-2 glass/vinyl ester composites [J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(13): 1201-1228.
- [15] HOSUR M V, VAIDYA U K, MAYER A, et al. Effect of stitching and weave architecture on the high strain rate compression response of affordable woven carbon epoxy composites [J]. Composite Structures, 2003, 59(4): 507-523.
- [16] 朱德举,张晓彤,张怀安.动态拉伸载荷下应变率和温度对 Kevlar 49 芳纶纤维布增强环氧树脂复合材料力学性能的影响[J].复合材料学报,2016,33(3):459-468.
- [17] 蒋邦海,张若棋.一种碳纤维织物增强复合材料的层间冲击拉伸力学性能实验研究[J].复合材料学报,2005(5):107-112.