

应变率对 C_f/Al 金属基复合材料力学性能的影响

Effect of Strain Rate on Mechanical Behavior of C_f/Al Composites

周元鑫, 夏源明 (中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

ZHOU Yuan-xin, XIA Yuan-ming (Department of Modern Mechanics,
China University of Science and Technology, Hefei 230027, China)

摘要: 利用自行研制的冲击拉伸试验装置对单向碳纤维增强铝基复合材料实施了不同应变率下的拉伸试验, 获得了材料从 0.001s^{-1} 到 1000s^{-1} 应变率范围内完整的应力应变曲线。试验结果表明 C_f/Al 是一种应变率敏感材料, 随着应变率的提高, 材料的拉伸强度、失稳应变均相应提高, 具有明显的应变率强化效应和动态韧性现象。根据材料在不同应变率下的试验结果, 提出了应变率强化效应的复合丝束统计本构模型, 模型分析表明由于复合材料的破坏受多种因素的影响, C_f/Al 复合丝的强度不再服从单 Weibull 模型, 用双 Weibull 模型更能反映 C_f/Al 复合丝强度的统计分布规律, 且模型拟合的结果与试验结果吻合得很好。

关键词: C_f/Al 复合材料; 动态力学行为; 统计模型

中图分类号: TB301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2000) 09-0003-04

Abstract: Tensile impact tests of C_f/Al metal matrix composite were carried out by a self-designed tensile impact apparatus. The stress/strain curves of composites in strain rate range from 0.001s^{-1} to 1300s^{-1} were obtained. The experimental results indicate that the C_f/Al composite is a rate-sensitive material, namely the strength, failure strain and residual strength of composite all are depending on strain rate. According to the statistical analysis and models, mechanical parameters for the composites and their relationship with strain rate are obtained from experimental results. The simulated stress/strain curves from the model are in good agreement with the test data.

Key words: C_f/Al metal matrix composite; dynamic mechanical behaviors; statistical model

C_f/Al 复合材料是由高强度碳纤维与铝合金基体浸渍铸造而成, 集纤维与铝合金基体良好性能于一体, 具有轻质高强、抗冲击、耐磨损、二次加工性能好等特点, 是一种很有潜力的航空结构材料, 因而受到广泛重视^[1~3]。与绝大多数金属材料相似, C_f/Al 复合材料对应变速率具有一定的敏感性, 目前, 对连续纤维增强金属基复合材料力学性能的研究, 大多局限在准静态加载条件下进行描述, 对这类材料的动态力学性能研究开展较少, 而这类材料在实际工程应用中, 经常处于动态加载条件下, 因此其动态力学性能的测试与表征就显得十分重要, 目前国外已经开始利用 SHPB 对 C_f/Al 复合材料动态压缩性能进行研究^[4]; 同时, 复合材料的拉伸、压缩性能有很大的差异, 且对复合材料力学性能有主要影响的纤维多在拉应力状态下发生破坏, 因此其动态拉伸性能具有更为重要的意义, 目前由于冲击拉伸试验技术的限制, 连续纤维增强金属基复合材料冲击拉伸力学性能的研究尚未开展。

本工作试图利用自行研制的冲击拉伸试验装置对 C_f/Al 复合材料实施不同应变率下的拉伸试验, 研

究加载速度对其力学性能的影响及其变形机理, 从而建立起与复合材料应变率相关的一维本构模型, 分析并预测材料在不同加载速度下的力学行为。

1 试验结果及其分析

冲击拉伸试验用的 C_f/Al 复合材料选用铸造性能良好的 ZL104 铝合金作为基体, 其组成成分 (wt%) 为: 8.0~10.5Si, 0.17~0.3Mg, 0.2~0.5Mn, 1.6 杂质, 其余为 Al; 纤维为 T300 纤维, 纤维的平均直径为 $6.6\mu\text{m}$, 纤维体积百分比含量为 48%。首先将纤维制成预制体, 在底注式真空反压浸渍炉内进行浇注, 经保压浸渍后, 卸压冷却, 同时为了消除由于组份材料热膨胀系数不同而引起的残余热应力, 在压铸完毕后, 对构件进行了一次应力退火, 退火主要工艺为: $300^\circ\text{C}/3\text{h}$ 。

在自行研制的旋转盘式冲击拉伸试验装置^[5], 通过改变入射脉冲的方法对 C_f/Al 复合材料材料进行了应变率为 200s^{-1} , 500s^{-1} 和 1000s^{-1} 的三组单向冲击拉伸试验。同时为了便于对 C_f/Al 复合材料动态力学性能与静态力学性能比较, 对复合材料实施了准

静态下的单向拉伸试验。试验在岛津 DS-5000 试验机上进行,加载速度分别为 0.3mm/min,相应的应变率为 0.001s⁻¹。

图 1 为 C_f/Al 复合材料在不同应变率下的应力应变曲线,从这些曲线中可以看出复合材料在加载的弹性阶段就出现了非线性现象,且在整个加载过程中没有出现明显的屈服点;继续加载材料至极限载荷点,材料开始失稳破坏,在加载至极限载荷的变形过程中,复合材料材料模量变化很小,没有塑性变形发生。具体的材料参数的平均值如表 1 所示。

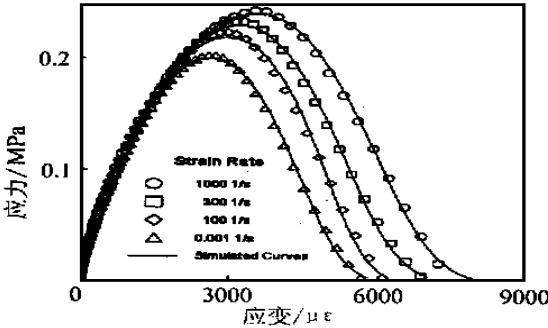


图 1 C_f/Al 复合材料在不同应变率下的应力应变曲线
Fig. 1 Typical stress-strain curves of C_f/Al under different strain rates

表 1 C_f/Al 复合材料在不同应变率下的力学性能参数
Table 1 Mechanical parameters of C_f/Al composites under different strain rate

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	σ_0/GPa	E_0/GPa	$\epsilon_f/\%$	β_1	σ_{01}/GPa	β_2	σ_{02}/GPa
0.001	0.2035	137.13	1.26	1.36	0.466	6.21	0.571
100	0.2241	137.48	1.38	1.40	0.515	6.58	0.678
300	0.2341	137.37	1.50	1.38	0.571	6.52	0.786
1000	0.2439	137.28	1.69	1.36	0.664	6.26	0.875

图 1 和表 1 表明 C_f/Al 是一种应变率敏感材料,材料的抗拉强度 (σ)、失稳应变 (ϵ_f) 均随着应变率的提高而增大,具有明显的应变率强化效应和动态韧性现象。图 2 为应变率对 C_f/Al 复合材料拉伸强度、失稳应变的影响。从图 2 中可以看出材料的应变率敏感性随着应变率的提高而成阶段性变化:在应变率很低时,材料的拉伸强度和失稳应变随着应变率的增加变化不大;当应变率很高时,材料的拉伸强度和失稳应变随着应变率的增加而急剧增大。本文选用修正的幂次模型^[6]来描述复合材料的应变率敏感行为:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon + \epsilon_T}{\epsilon_0} \right)^N \tag{1}$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon + \epsilon_T}{\epsilon_0} \right)^N \tag{2}$$

其中, ϵ , ϵ_0 , σ_0 和 ϵ_T 分别为应变率、参考应变率、参考应力和参考应变, N 为应变率强化系数, ϵ_T 是特征材料由应变率不敏感区向应变率敏感区过渡的特征应变率。通过对表 1 中的试验结果进行拟合,本文获得了复合材料拉伸强度和残余强度与应变率的变化关系:

$$\sigma_0 = 0.224 \left(\frac{\epsilon + 7.03}{100} \right)^{0.03677} \tag{3}$$

$$\epsilon_0 = 0.298 \left(\frac{\epsilon + 13.16}{100} \right)^{0.0738} \tag{4}$$

图 2 中的实线为拟合曲线,与试验点吻合得很好。

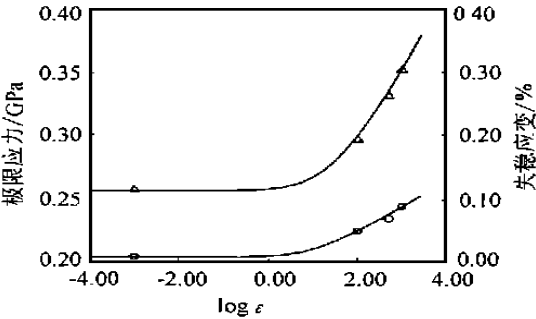


图 2 应变率对 C_f/Al 复合材料力学性能的影响
Fig. 2 Effect of strain rate on mechanical behavior of C_f/Al composites

从图 1 和表 1 可以看出,在不同的应变率下, C_f/Al 复合材料具有明显的室温脆性的变形特征,且存在低应力破坏现象。界面结合过强或过弱,高温处理后纤维强度的降低,热残余应力的影响,被认为是导致其低应力破坏的主要原因^[7~8],这同样适用于其在高应变率下复合材料低应力破坏的现象的解释,因为在动态加载条件下,上述因素并未有所减轻或消除。图 3 为复合材料在应变率等于 100s⁻¹时断口的 SEM 照片,可以看出断口形貌为脆性断口,断口平整,无明显纤维拔出;基体、纤维界面属于强结合界面,当强度较弱的纤维在外载的作用下首先发生断裂产生内部裂纹后,界面不能以脱粘的形式吸收能量,裂纹会通过界面横向扩展,迅速发生材料的整体破坏。同时,断口中还伴随有部分纤维开裂现象,这同样是由于界面结合过强导致对于局部微裂纹不能通过界面传播,而是将裂纹导入纤维,为裂纹扩展提供一条低阻路径。

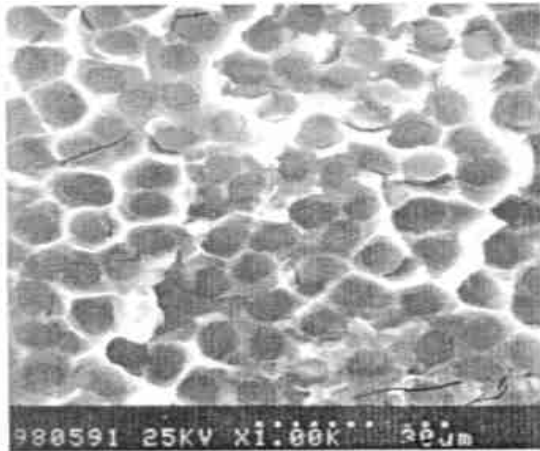

 图3 C_f/Al 复合材料断口形貌

 Fig. 3 Tensile fracture SEM of C_f/Al composites

2 C_f/Al 复合材料一维统计本构模型

复合丝束模型依据 C_f/Al 复合材料在不同应变率下的应力应变曲线, 本研究采用复合丝束模型来描述材料在不同加载条件下的载荷与变形关系。该模型将单向纤维增强铝基复合材料简化为 N 根长度为 L, 截面积为 A 的复合丝组成的复合丝束, 每根复合丝有一根碳纤维以及其周围的基体共同组成, 并且模型满足下列条件:

①每根复合丝在纤维断裂之前, 其应力应变关系都是线性的。

②忽略复合丝之间的相互作用, 当 n 根复合丝发生纤维断裂时载荷仅由未发生断裂的 N-n 根复合丝承担, 发生纤维断裂的 n 根复合丝不具有承载能力。在某一确定应变下, 有 n 根复合丝发生纤维断裂, 则复合丝束的合力与平均应力就可以表述为:

$$P = E\epsilon A (N - n) \quad (5)$$

$$\sigma = E\epsilon \left[1 - \frac{n}{N} \right] \quad (6)$$

③每根复合丝的强度服从一种确定的概率统计分布概率。复合丝束应力应变曲线的非线性就是由复合丝的累积破坏所造成的。由最弱链假设得出的纤维统计强度是服从 Weibull 统计分布规律^[9], 若复合丝的统计强度也服从 Weibull 统计分布规律, 则概率密度 G(ε) 应为:

$$G(\epsilon) = \frac{n}{N} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_0} \right)^{\beta} \right] \quad (7)$$

其中 σ₀ 和 β 分别为 Weibull 统计分布的尺度参数和形状参数。复合材料的应力应变关系就可以表述为:

$$\sigma = E\epsilon \left[- \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_0} \right)^{\beta} \right] \quad (8)$$

方程(8)即为由复合丝束模型所确定的 C_f/Al 复合材

料基本本构方程。对方程(8)取双对数, 可得:

$$\ln \left[- \ln \left(\frac{\sigma - \sigma^*}{E\epsilon - \sigma^*} \right) \right] = \beta \ln(E\epsilon) - \beta \ln(\sigma_0) \quad (9)$$

根据(9)式, 由复合材料完整的试验应力应变曲线(图3)得到 Weibull 概率纸上的直线为

$$y = \beta [x - \ln(\sigma_0)] \quad (10)$$

由直线斜率和截距得到 Weibull 分布参数 β₀ 和 σ₀^β。

图4为 C_f/Al 复合材料在 Weibull 坐标系下的试验结果, 可以看出 C_f/Al 在 Weibull 坐标下的试验结果并非直线, 而是具有非线性的特征, 这表明单 Weibull 分布统计模型虽然其形式简洁, 又能较好地描述纤维强度的统计分布, 但并不能完整、准确地反映出 C_f/Al 复合材料强度的统计规律。纤维的单 Weibull 分布模型实际上反映了纤维断裂过程中破坏机理的单一性, 复合材料在 Weibull 概率纸上的分布曲线并非一条直线, 这表明有多种因素影响着复合材料的强度, 即破坏形式的多样性。新近对硼纤维准静态拉伸的研究发现, 即使对于单一的纤维, 由于强度实际上是由两类缺陷控制的, 其应力应变曲线在 Weibull 坐标中也具有非线性的特征^[11]。因此, 根据图4中的结果, 尚需用其他形式的 Weibull 分布来描述 C_f/Al 复合材料的强度分布规律。

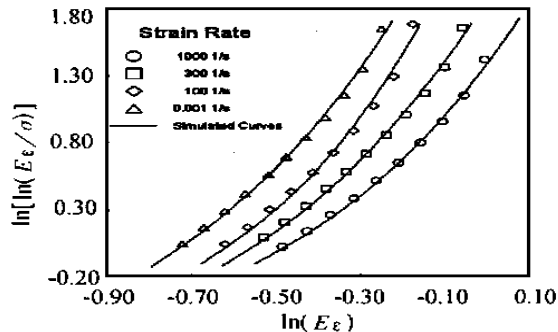

 图4 Weibull 坐标下的 C_f/Al 试验结果

 Fig. 4 Weibull plots of C_f/Al Composites

本文采用双 Weibull 分布函数来描述纤维的强度的分布规律, 在双 Weibull 分布模型中, 除认为每根复合丝强度服从双 Weibull 分布外, 统计本构模型中其他假设仍旧不变, 即认为纤维的动态强度服从双 Weibull 分布规律:

$$G(\epsilon) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{01}} \right)^{\beta_1} - \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{02}} \right)^{\beta_2} \right] \quad (11)$$

其中 β₁ 和 β₂ 是纤维的形状参数, σ₀₁ 和 σ₀₂ 为纤维的尺度参数, 由(6)和(11)式可以得到 σ₀₁ 和 σ₀₂

$$\sigma = E\epsilon \exp \left[- \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{01}} \right)^{\beta_1} - \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{02}} \right)^{\beta_2} \right] \quad (12)$$

同样, 由(12)式可得到由纤维束试验确定纤维单丝

力学性能的参数。对 (12) 式两边取双对数得到:

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{\sigma}{E\epsilon} \right) \right] = \ln \left[\left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{01}} \right)^{\beta_1} - \left(\frac{E\epsilon}{\sigma_{02}} \right)^{\beta_2} \right] \quad (13)$$

利用最小二乘法, 采用逐次“线性化”的间接处理方法可确定方程 (13) 中四个非线性参数 σ_{01}^D , σ_{02}^D , β_1^D 和 β_2^D , 结果如表 1 所示。

图 5 为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数随应变率的变化关系, 可以看出形状参数 β_1 , β_2 在试验范围内随应变率基本无变化, 其平均值分别为 $\beta_1 = 1.375$, $\beta_2 = 6.39$, 即表明复合材料的离散程度与应变率无关; 而尺度参数 σ_{01} , σ_{02} 则随着应变率的增加而明显增大, 利用幂次应变率强化模型对其拟合可得:

$$\sigma_{01} = 0.515 \left(\frac{\epsilon + 29.0}{100} \right)^{0.1038} \quad (14)$$

$$\sigma_{02} = 0.671 \left(\frac{\epsilon + 23.1}{100} \right)^{0.1108} \quad (15)$$

将拟合所得的 Weibull 统计参数代入 (12) 式中即可获得 Cf/A1 复合材料在不同应变率下本构方程。图 1 中的实线为拟合结果, 可以看出拟合结果与试验数据点之间吻合得很好, 这表明用复合丝束模型来描述 Cf/A1 复合材料的载荷与形变关系是有效的。

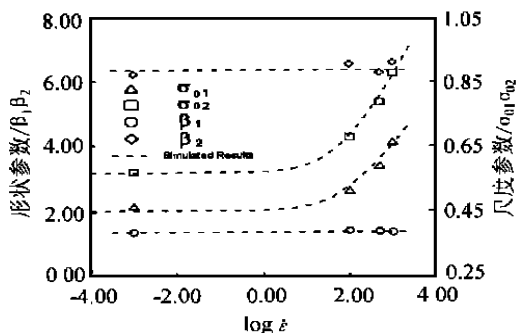


图 5 双 Weibull 统计参数与应变率的关系

Fig. 5 The relationship between strain rate and Weibull parameters

3 结论

(1) Cf/A1 复合材料是一种应变率相关材料, 随着应变率的提高, 材料的拉伸强度、失稳应变以及残余强度均相应提高, 具有明显的应变率强化效应与动态韧性现象。

(2) 本研究在复合丝束模型的基础上建立起来的一维统计本构方程较好地描述了 Cf/A1 复合材料在不同应变率下的应力应变关系, 是可靠的。

参考文献

[1] 吴人洁. 第六届全国复合材料会议论文集 [D]. 北京: 1990, 10

~ 14

- [2] J. P. Rocher, et al. J. Mater. Sci. Lett., 1985, 4: 1527 ~ 1529
- [3] H. L. Marrous. Interface character in Al-Cf metal matrix composites., AD-A 127590
- [4] C. C. Poteet, I. W. Hall. Material Science and Engineering, A222 (1997): 35 ~ 44
- [5] Yuanming Xia and Yuanxin Zhou. ACTA Mechanica Sinica (English Series), 1996, 12 (3): 243 ~ 250
- [6] 周元鑫, 等. 材料科学与工程, 1997, 5 (1): 72 ~ 77
- [7] 张国定. 材料研究学报, 1997, 11 (6): 649 ~ 657
- [8] 李文方, 等. 金属学报, 1995, 31 (5): B226 ~ B232
- [9] 夏源明, 袁建明, 杨报昌. 纤维应变率相关统计本构模型的理论及试验研究 [J]. 复合材料学报, 1993, 10 (2): 17 ~ 24
- [10] K. Goda, and H. Fukunaga. J. Mater. Sci., 21 (1986): 3260 ~ 3268

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (19972065)

收稿日期: 1999-05-10; 修订日期: 2000-06-08

作者简介: 周元鑫 (1972-), 男, 博士, 主要研究方向为动态测试技术和材料动态力学行为。联系地址: 安徽合肥, 中国科学技术大学近代力学系 (230027)

本文编辑: 杨 雪

* * * * *

(上接第 27 页)

(2) 熔化过程中化学成分的变化导致了玻璃性质的变化, 提高熔化温度后, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解更加完全, 使得玻璃中残存的 OH^- 和 NH_4^+ 减少; 红外光谱的测试结果和所述分析一致。

(3) 玻璃成分在熔化过程中有显著的挥发, 提高熔化温度后, 磷和氧的损失更加严重, 挥发形式主要有 PbBr_2 , PbCl_2 和 P_2O_5 , 也可能存在 PCl_5 和 PBr_3 的挥发。

参考文献

- [1] Tick P. A. Water durable glasses with low melting Temperature [J]. Phys. Chem. Glasses, 1984 (25): 149 ~ 154
- [2] Wayne R. Tomkin, Robert W. Boyd, Douglas W. Hall, Paul A. Tick [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1987 (B4): 1030 ~ 1034
- [3] Hongsheng Zhao, Wancheng Zhou, Dongmei Zhu. Journal of Non-Crystalline Solids, 1999, 249 (1) 23
- [4] 朱冬梅, 周万城, 赵宏生. 硅酸盐学报, 1999, 3: 324

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59772005)

收稿日期: 1999-11-19

作者简介: 赵宏生 (1973-), 男, 满族, 博士研究生, 从事高密度快闪烁玻璃, 特种光学玻璃的形成学、物化性质以及结构的研究。联系地址: 西安西北工业大学凝固技术国家重点实验室 (710072)。

本文编辑: 孙常青