复合材料学报 第23卷 第6期 12月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 6 December 2006

文章编号: 1000-3851(2006)06-0103-05

纤维长度和体积分数对 Al_2O_3-SiO_2/Al-Si 微屈服行为的影响

刘贯军[1,2], 李文芳*[1], 杜 军[1], 谢 勇[1]
(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广州 510640; 2. 河南科技学院 机电学院, 新乡 453003)

摘 要: 以通过浸渗挤压工艺制备的 Al_2O_3-SiO_2/Al-Si 复合材料为研究对象, 使用配备有精度达 10^{-7} 位移测量装置的 Instron5569 电子拉伸试验机, 并采用连续加载法, 详细研究了晶化硅酸铝短纤维的体积分数和短纤维长度对铝硅基复合材料微屈服行为的影响规律, 并定性分析了原因。结果表明: 随着晶化硅酸铝短纤维体积分数的逐渐增大, 铝硅基复合材料的微屈服强度逐渐减小, 但其宏观屈服强度和弹性模量却逐渐增大; 随着晶化硅酸铝短纤维长度的逐渐增加, 铝硅基复合材料的微屈服强度逐渐减小, 但其宏观屈服强度却逐渐增大。

关键词: 铝硅基复合材料; 微屈服强度; 硅酸铝纤维
中图分类号: TB331 **文献标识码**: A

Effect of length and volume fraction of the reinforcing fibers on micro yield behaviors of Al_2O_3-SiO_2/Al-Si metal matrix composites

LIU Guanjun[1,2], LI Wenfang*[1], DU Jun[1], XIE Yong[1]
(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The effects of volume fraction of alumina silicate short fibers in crystal and their length on micro yield behaviors of Al_2O_3-SiO_2(sf)/Al-Si metal matrix composites (MMCs) fabricated with squeezing cast were investigated by continuous loading on an Instron5569 tester with measuring installation of accuracy 10^{-7}. It is shown that the micro yield strength of the MMCs decreases while the macro yield strength and Young's modulus increase when the volume fraction of alumina silicate short fibers increases and the micro yield strength of the MMCs decreases while the macro yield strength increases when the length of the short fibers in crystal increases.

Keywords: Al-Si metal matrix composite; micro yield strength; alumina silicate short fiber

金属基复合材料(MMCs)由于具有高的比强度和比刚度、可调节的导热性和热膨胀性而受到重视, 在诸如导航、红外探测、超轻天文望远镜、精密机械和精密仪表等方面具有良好的应用前景[1]。这与金属基复合材料在普通结构件上的应用不同, 后者需要的是其高比强度和比刚度, 而前者要求的主要是其尺寸稳定性。人们在进行普通结构件设计时, 通常以材料的屈服强度(在拉伸过程中, 试样在拉伸方向产生 0.2%的塑性变形时, 单位截面上所受的外力大小)作为校核结构件是否失效的依据; 而在如导航仪和精密机械仪表零件上, 常规的 0.2%屈服强度已无实际意义。这里, 微屈服强度成为衡量材料尺寸稳定性的重要指标, 即材料在外加载荷作用下产生 1×10^{-6} 残余塑性应变时的应力值。目前, 国内外对金属基复合材料微屈服行为的研究基本局限于 SiC 颗粒或晶须增强的铝基复合材料, 而且测试方法也不相同。晶化的硅酸铝短纤维对于铝基复合材料是一种相对廉价的增强体, 市场前景广阔。目前, 对复合材料尺寸稳定性的研究主要集中在热处理和冷热循环的影响上面[1-11]。文献[12]研究指出, 金属基复合材料中短纤维的不同长径比和体积分数对复合材料基体金属中的应力大小会产生不同影响。文献[13]的研究则证明, 存在于金属基体内部的热残余应力, 特别是界面热残余应

收稿日期: 2005-11-23; **收修改稿日期**: 2006-03-23
基金项目: 国家自然科学基金资助(19972021)
通讯作者: 李文芳, 教授, 博导, 主要从事金属基复合材料研究 E-mail: mewfli@scut.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力将对界面甚至复合材料的整体性能产生影响。基于以上认识，本文中针对晶化硅酸铝短纤维增强 Al-Si 基复合材料，研究了短纤维的长度及其在基体金属中所占的体积分数对 Al-Si 基复合材料微屈服强度的影响规律。

1　实验材料及方法

试验使用的基体材料为 A00 纯铝，与 Si 含量为 20 wt %的铝硅合金以一定的比例混配熔炼成含 12.60 wt % Si 的共晶铝硅合金，详细的化学成分见表 1。增强体是以价格低廉的硅酸铝纤维为原料经过晶化处理、研磨、淘洗、分级筛选出的晶化硅酸铝(Al_2O_3-SiO_2)短纤维，其公称长度分别为60 μm、80 μm 和 125 μm，直径约为 Φ8～10 μm。为了研究短纤维尺寸对复合材料微屈服强度的影响，试验将短纤维的体积分数固定为 20 %；为了研究增强体的体积分数对复合材料微屈服强度的影响，试验采用的是长度为 60～120 μm 随机分布的短纤维。复合材料的制备采用预制体挤压浸渗工艺。

表 1　Al-Si 合金基体的化学成分

Table 1　Mass fractions of elements contained in the Al-Si alloy matrix

Component	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Etceteras	Al
Mass fraction/ %	12.60	0.15	0.30	0.24	0.22	0.72	Balance

试验在美国生产的电子拉伸性能实验机 Instron5569 上进行，其上配有精度达 10^{-7} 的位移测量装置[11]。微屈服强度的测定一般采用连续加载法和加载-卸载法，与后者相比，前者可避免因微循环强化及应变片粘胶松驰造成的误差。本试验采用的是连续加载法。拉伸试样为板状哑铃型，厚 2 mm，工作标距内宽度为 4 mm。试验使用感量 6×10^{-7}、量程 6×10^{-3} 的 Instron 引伸计测量应变。拉伸过程中应力应变曲线和数据采集由试验机所带的 PC 机完成，所用的数据采集及处理软件是 Merlin 软件。首先根据公式 $E=\sigma/\varepsilon$ 求出弹性模量，然后由公式 $\varepsilon_p=\varepsilon-\sigma/E$ 求出残余塑性应变 ε_p，并得 $\varepsilon_p-\sigma$ 曲线图，在该曲线图上确定 $\varepsilon_p=10^{-6}$ 时的应力值 σ，即为所求微屈服强度[12]。

Brown 和 Lukens 于 1961 年首先提出金属材料的微屈服应力 σ 同其所产生的微塑变 ε_p 之间存在抛物线关系。为了研究方便，将 σ 与 ε_p 之间的抛物线关系经过变形改写为 σ 与 $\varepsilon_p^{1/2}$ 之间的线性关系：$\sigma=\sigma_0+K\varepsilon_p^{1/2}$。式中：$\sigma_0$ 为每一个位错运动所必须的应力；K 为与材料切变模量、晶粒直径、可动位错密度及 σ_0 有关的常数，K 值反映了材料抵抗微塑性变形的能力。为了更好地与 B-L 关系进行比较和观察，本试验特将试验数据进行了处理，进一步得到 $\varepsilon_p^{1/2}-\sigma$ 曲线图。本次研究的试验结果将证明，B-L 关系也同样适合于短纤维增强的 Al-Si 基复合材料。

2　试验结果及分析

2.1　短纤维体积分数对铝基复合材料微屈服强度的影响

试验选用的 Al_2O_3-SiO_2 短纤维体积分数分别为 10 %、20 %、30 %、40 %，所用纤维为长度 60～120 μm 随机分布的短纤维。用挤压浸渗法分别制备不同体积分数的 Al_2O_3-SiO_2/Al-Si 复合材料试样进行微屈服试验，图表中的每个试验数据均为 3 个被测试样试验数据的算术平均值(以下同)。图 1 所示为不同纤维体积下的 $\varepsilon_p^{1/2}-\sigma$ 曲线。Al_2O_3-SiO_2 短纤维体积分数对 Al-Si 基复合材料宏观和微观力学性能的影响规律对比见表 2。表 2 中的宏观屈服强度为被测复合材料试样在拉伸过程中残余应变量达到 0.2 %时的应力值，微屈服强度为残余应变量达到 1×10^{-6} 时的应力值。从图 1 和表 2 可以看出，Al_2O_3-SiO_2/Al-Si 基复合材料的宏观屈服强度和弹性模量均随增强体短纤维体积分数的增加而增加，说明硅酸铝短纤维有效地起到了增强作用，增强体短纤维体积分数越高，在形成良好的增强体/

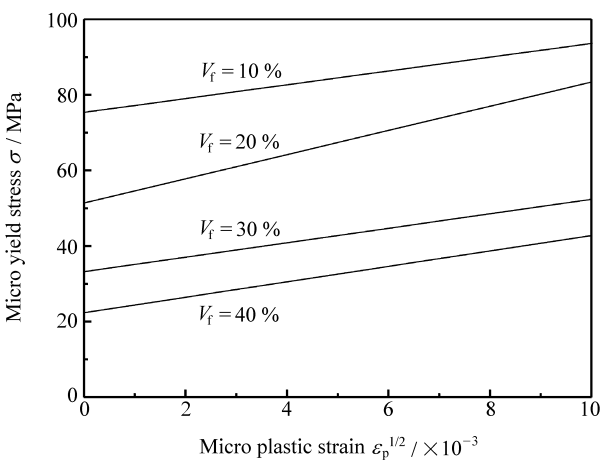

图 1　短纤维体积分数 V_f 对 MMCs 微屈服规律的影响实验曲线

Fig. 1　Experimental curves of influence of short fibre volume fraction on MMCs micro yield

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基体界面结合前提下，高强度增强体能够通过基体合金和增强体之间界面的传递来承担更多的载荷，从而有效地提高复合材料的宏观力学性能。然而，Al_2O_3- SiO_2/ Al- Si 复合材料的微屈服强度却随着增强体短纤维体积分数的增大而减小，短纤维体积分数在复合材料的微屈服阶段对微屈服强度的影响与在宏观屈服阶段对宏观屈服强度的影响正好相反。

表 2　Al_2O_3- SiO_2 体积分数对 Al- Si 基复合材料宏观和微观力学性能影响规律对比

Table 2　Comparison of influences of fiber volume fraction on the MMCs macro and micro mechanical properties

Volume fraction/ %	Macro yield strength/ MPa	Micro yield strength/ MPa	Start micro yield stress/ MPa	Young's modulus/ GPa
10	120	78	75	68.9
20	130	53	52	71.1
30	142	37	34	81.1
40	165	24	23	89.8

对于这样的结果，可作如下解释[13]：大量研究结果表明，热残余应力在金属基复合材料微屈服过程中有着极其重要的影响。而在金属基复合材料的高温制备或热处理的冷却过程中，由于基体和增强体之间的热膨胀系数的巨大差异和弹性系数的不同，产生了较大的热残余应力，当界面粘结良好时，硬质增强体不能随周围延性基体的变形而协调变形，只能在驱动力(热残余应力或外加载荷)作用下，以位错形式来补偿。但这些位错并未发生缠结或形成位错网络，如图 2 所示，大部分可视为可动位错，而热残余应力又不足以使这些位错长距离滑移，因此这些位错仍处于原来的静止状态。但若与外载荷叠加即能推动位错运动，加速随后的塑性变形。对处于同一状态的复合材料来说，推动位错运动的力是一定的。热残余应力越大，所需的外部载荷就相对越小。这样，在外载荷作用下，基体内有大量的位错可参与滑移，迅速贡献出"大量"的塑性变形，导致微塑性变形抗力降低。即在微塑性变形阶段，热残余应力越大，可动位错密度越高，基体的微塑变抗力就越低。而增强体短纤维的体积分数越高，这种热残余应力就越大[3,14]，从而最终导致复合材料的微屈服强度降低。随着塑性变形程度的增大，晶粒晶面会发生偏转，此时的塑性变形本质上将由一个滑移系参与滑动变成由两个相交的滑移系同时参与滑动，进而产生位错相互交割，并演变

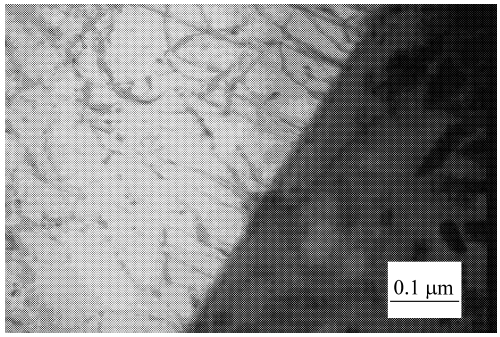

图 2　纤维纵截面上的界面位错 TEM 照片([$1\bar{1}1$])

Fig. 2　TEM image of the interface dislocation in longitudinal section of the fiber

为固定位错，继而发生位错塞积，导致变形抗力增大。当塑性变形进行到某种程度时，界面上的机械应力也将会变大，此时基体上细小的短纤维成了基体继续塑性变形的障碍。即热残余应力对屈服强度的影响变得微不足道，而界面上机械应力的作用变得重要。所以，短纤维体积分数越大，复合材料的塑性变形抗力就越大，因而宏观屈服强度就越大。

2.2　短纤维长度对 Al- Si 基复合材料微屈服强度的影响

对以体积分数为 20 %，公称长度分别为 60 μm、80 μm 和 125 μm 的晶化硅酸铝短纤维为增强体制备的 Al- Si 基复合材料进行拉伸试验，得到如图 3 所示的 $\varepsilon_p^{1/2}-\sigma$ 曲线。不同纤维长度对 Al- Si 基复合材料宏观和微观力学性能的影响规律对比见表 3。从图 3 和表 3 可以看出，Al_2O_3- SiO_2 短纤维长度对 Al- Si 基复合材料的微屈服强度有显著影

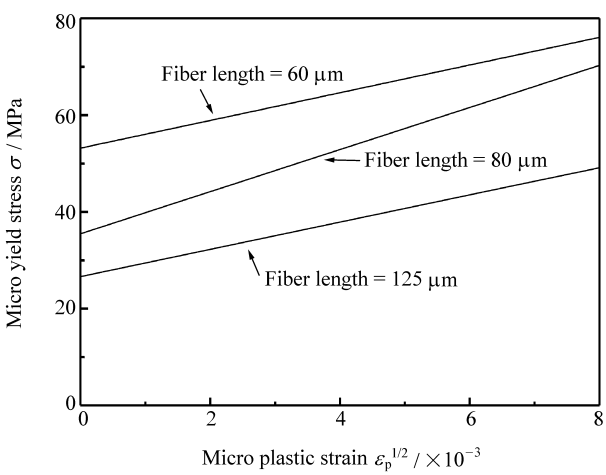

图 3　短纤维长度对 MMCs 微屈服规律的影响实验曲线

Fig. 3　Experimental curves of influence of short fibre length on MMCs micro yield

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

响。短纤维越长，复合材料的微屈服强度越低，而宏观屈服强度却越高。

表 3　Al_2O_3- SiO_2纤维长度对 Al- Si 基复合材料宏观和微观力学性能影响规律对比

Table 3　Comparison of influences of fiber length on the MMCs macro and micro mechanical properties

Length/ μm	Micro yield strength/ MPa	Macro yield strength/ MPa	Start micro yield stress / MPa
60	58	105	54
80	42	117	35
125	30	125	26

对于复合材料宏观屈服强度随短纤维长度增加而增大的事实可以通过 Nardone 和 Prewo 的研究结论[15,16]来解释。Nardone 和 Prewo 研究了 SiC 增强铝基复合材料中金属基体发生塑性变形而纤维发生弹性变形的情况，并通过考虑载荷在纤维端部的传递(假设根载荷等于基体的平均强度)，首次给出了复合材料屈服强度的预测表达式。根据他们的模型，复合材料屈服强度可由下式计算：

$$\sigma_{cy} = \sigma_{my}\left[\frac{1}{2}V_f\left(2 + \frac{l}{d}\right) + (1 - V_f)\right] = \sigma_{my}\left(1 + \frac{l}{2d}V_f\right)$$

式中：σ_{cy}、σ_{my}分别为复合材料和基体合金的屈服强度；l/d 与 V_f 分别为增强纤维的长径比和体积分数；d 为增强纤维的直径。从上式可以看出，随着增强纤维的长径比变大，金属基复合材料的屈服强度随之提高。

对于短纤维长度增加导致复合材料微屈服强度降低的事实，本文认为是以下两种因素综合作用的结果：(1) 对于短纤维增强复合材料，在不考虑纤维与基体之间热错配应力的情况下，在纤维端部基体中产生的应力集中程度比纤维其余部位基体的应力集中程度更大[17]，因而在纤维端部的位错线密度就更大。在复合材料的体积分数一定的前提下，纤维越长，纤维的数量就越少，因而，基体中如此应力集中程度的区域就越少，基体中高密度位错量也就越少，这将导致复合材料的微屈服强度增大。(2) 事实上，增强体与基体金属的热膨胀系数相差极大。短纤维越长，在热交换中，纤维与基体之间的热错配量就越大，因而在纤维附近界面处的基体中应力集中也就越严重，附近基体中的位错密度也就越大，这又将导致复合材料的微屈服强度降低。这样，短纤维长度的增加经过这两方面因素的综合作用最终导致复合材料微屈服强度的降低。

3　结　论

(1) 在 Al_2O_3- SiO_2/ Al- Si 基复合材料中，随着 Al_2O_3- SiO_2短纤维增强体体积分数的增大，Al- Si 基复合材料的宏观屈服强度和弹性模量增大，而微屈服强度减小。

(2) 随着 Al_2O_3- SiO_2短纤维增强体长度的增加(长径比变大)，Al- Si 基复合材料的宏观屈服强度增大，微屈服强度减小。

参考文献：

[1] 吴人洁. 下世纪我国复合材料的发展机遇与挑战 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(1): 1 - 4.
Wu Renjie. The prospective opportunities and challenges of composite materials in China during the next century [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(1): 1 - 4.

[2] 张　帆, 李小璀, 金　诚, 等. SiC_P/ 2024Al 复合材料及 2024Al 合金的微屈服行为 [J]. 金属学报, 1998, 34(7): 713 - 718.
Zhang Fan, Li Xiaocui, Jin Cheng, et al. Micro yield behaviour of SiC_P/ 2024Al composite and 2024Al alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 34(7): 713 - 718.

[3] 张　帆, 金　诚, 李小璀, 等. SiC_P/ LY12 复合材料微屈服强度的研究 [J]. 材料导报, 1998, 12(2): 53 - 55.
Zhang Fan, Jin Cheng, Li Xiaocui, et al. Studies on micro yield strength of SiC_P/ LY12 matrix composite [J]. Materials Review, 1998, 12(2): 53 - 55.

[4] 吴　晶, 李文芳, 蒙继龙. 短纤维增强金属基复合材料微屈服行为的细观力学分析 [J]. 金属学报, 2003, 39(7): 761 - 766.
Wu Jing, Li Wenfang, Meng Jilong. Micromechanics analysis of micro yield behavior of short fiber reinforced metal matrix composite [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(7): 761 - 766.

[5] 徐文娟, 吴申庆, 卫中山, 等. 短纤维增强铝基复合材料的热循环尺寸稳定性 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999(5): 1 - 3.
Xu Wenjuan, Wu Shenqing, Wei Zhongshan, et al. Dimensional stability of alumina silicate fiber reinforced aluminum alloy matrix composite in thermal cycle [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1999 (5): 1 - 3.

[6] 王秀芳, 武高辉, 孙东立, 等. 颗粒增强 2024Al 复合材料的微屈服性能研究 [J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(1): 34 - 38.
Wang Xiufang, Wu Gaohui, Sun Dongli, et al. A study on microyield properties of a particle reinforced 2024Al matrix composite [J]. Materials Science & Engineering, 2003, 11(1): 34 - 38.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] 李义春, 樊建中, 张 奎, 等. 冷热循环对颗粒增强铝基复合材料微屈服行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(3): 399 - 404.
Li Yichun, Fan Jianzhong, Zhang Kui, et al. Effect of thermal cycling treatment on microyield behavior of particle reinforced aluminum matrix composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(3): 399 - 404.

[8] Hu M, Fei W D, Yao C K. Effect of heat treatment on dislocation states and work hardening behaviors of SiC_W/ 6061Al composite [J]. Materials Letters, 2002, 56: 637 - 641.

[9] Fei W D, Hu M, Yao C K. Effects of thermal residual stress creeping on microstructure and tensile properties of SiC whisker reinforced aluminum matrix composite [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A356: 17 - 22.

[10] Zhong Fan, Sun Pengfei, Li Xiaocui, et al. An experimental study on deformation behavior below 0.2 % offset yield stress in some SiC_P/ Al composites and their unreinforced matrix alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A300: 12 - 21.

[11] Zhong Fan, Sun Pengfei, Li Xiaocui, et al. A comparative study on microplastic deformation behavior in a SiC_P/ 2024Al composites and their unreinforced matrix alloy [J]. Materials Letters, 2001, 49: 69 - 74.

[12] 康国政, 高 庆. 短纤维增强金属基复合材料基体中的应力分布及其变形特征 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 20 - 24.
Kang Guozheng, Gao Qing. Stress distribution and deformation characteristics of matrix in short fiber reinforced metal matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 20 - 24.

[13] 高 庆, 康国政, 杨 川, 等. 高温下短纤维增强金属基复合材料界面的微观结构和热残余应力状态研究 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(4): 46 - 50.
Gao Qing, Kang Guozheng, Yang Chuan, et al. Study on microstructure characteristics and thermal residual stress states of interface short fiber reinforced composite at elevated temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(4): 46 - 50.

[14] 吴 晶, 李文芳, 蒙继龙. 金属基复合材料的微屈服行为 [J]. 材料科学与工程, 2002, 20(4): 594 - 596.
Wu Jing, Li Wenfang, Meng Jilong. Microyield behavior of metal matrix composites [J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(4): 594 - 596.

[15] 李义春, 安希墉. 尺寸稳定化工艺对 SiC_P/ Al 复合材料尺寸稳定性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1992(3): 76 - 80.
Li Yichun, An Xiyong. Effect of dimensional stabilizing process on dimensional stability of SiC_P/ Al composite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1992(3): 76 - 80.

[16] Nardone V C, Prewo K M. On the strength of discontinuous silicon carbide reinforced aluminum composites [J]. Scripta Metall, 1986, 20: 43 - 48.

[17] 康国政, 高 庆, 杨 川, 等. 基体特性对 δ- Al_2O_3/ Al 合金复合材料力学行为的影响 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 25 - 29.
Kang Guozheng, Gao Qing, Yang Chuan, et al. Effects of matrix properties on mechanical performance of δ- Al_2O_3/ Al alloy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 25 - 29.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net