

高体分 SiCp / Al 复合材料热变形行为及组织的研究

曾莉¹, 任学平¹, 王小俐², 崔岩³

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京建龙钢铁控股有限公司, 北京 100070;
3. 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: 在应变速率为 $0.0005 \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $700 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 对高体积分数 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料进行了高温压缩实验, 研究了复合材料高温压缩流变应力, 观察了复合材料压缩后的组织形貌。结果表明: SiCp/Al 复合材料在热压缩变形中发生了伪塑性变形, 流变应力随应变速率的增加而增加, 随变形温度的增加而降低; 通过线性回归分析计算了复合材料的应变指数 n 以及变形激活能 Q , 获得了材料高温条件下的流变应力本构方程; 高温压缩后的复合材料, 颗粒尺寸、圆整度及分布均匀性明显提高。

关键词: SiCp/Al 复合材料; 热压缩; 本构方程; 组织

中图分类号: TB333 文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0057-05

The Research of Hot-deformation Behavior and Microstructure of SiCp/Al Composite with High Volume Fraction

ZENG Li¹, REN Xue-ping¹, WANG Xiao-li², CUI Yan³

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Jianlong Steel Holdings Co., Ltd, Beijing 100070, China;
3. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Hot compression on the composite was tested at strain rates range from 0.0005 s^{-1} to 0.01 s^{-1} , deformation temperatures from $700 \text{ }^\circ\text{C}$ to $900 \text{ }^\circ\text{C}$, the flow stress behavior was researched, microstructure and properties of composite were observed and measured. The results show that: SiCp/Al composite with high volume fraction showed Pseudo-plastic deformation during hot compression, the flow stress increased with raising strain rates, decreased with raising deformation temperatures; strain exponent n and deformation activation energy Q were calculated in term of linear regression analysis, flow stress constitutive equation was got on hot compression conditions; the size, roundness and distribution uniformity of SiC particle increased obviously after hot compression.

Key words: SiCp/Al composites; hot deformation; constitutive relation; microstructure

随着电子、航空航天、汽车技术的高速发展, 对材料的性能提出了更高的要求。SiCp/Al 复合材料是一种能满足特殊物理性能要求的轻型合金复合材

料, 具有比强度高、比刚度高、弹性模量高等优异性能, 被广泛应用于航空航天、军事武器、汽车电子、体育器材等领域^[1-2]。

收稿日期: 2009-04-16

基金项目: 国家高技术(863)项目(2007AA03Z544)

作者简介: 曾莉(1982-), 女, 辽宁人, 博士研究生, 主要研究方向为高体积分数碳化硅颗粒增强铝基复合材料。

SiCp/Al 复合材料,除一部分可以采用粉末冶金法、铸造法以及喷射沉积法等直接制备外,大多数都需要进行二次变形加工。SiCp/Al 复合材料的二次变形加工大多在较高的温度下进行,是一个热变形的过程,因此对于 SiCp/Al 复合材料热变形行为的研究具有重要的意义。国内外学者对 SiCp/Al 复合材料的研究很多^[3-7],但对于高体积分数 SiCp/Al 复合材料的高温热变形,尤其是高于基体材料熔点温度条件下变形行为的研究很少。

文中对体积分数为 55% ~ 57% 的 SiCp/A356 复合材料进行高温压缩变形实验,研究其高温流变行为,建立高体积分数 SiCp/A356 复合材料本构模型,为制定此体积含量的复合材料塑性成形工艺以及工艺优化提供依据。

1 实验材料及方案

试验材料采用无压浸渗制备出的高体分 SiCp/A356 复合材料,基体材料为工业用 A356 铝合金,复合材料经过机械加工,制成 $\phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的试样。

高温压缩实验在 WDW50E 微机控制电子式万能试验机上进行,用特制石英加热圈进行温度控制,自制保温钢套及冲头采用耐热合金,试验装置如图 1 所示。

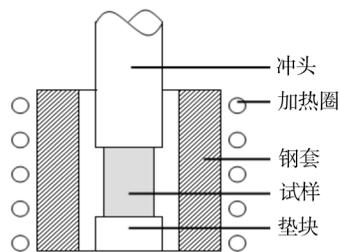


图 1 压缩实验模具示意

Fig. 1 Diagrammatic sketch of hot compression mold

试验变形温度为 700~900 °C,应变速率为 0.0005~0.01 s^{-1} ,试样加热速度为 9 °C/s,加热至预定温度后保温 30 min,然后进行压缩试验,压缩后的试样立即进行水淬处理,以保留变形后的组织;温度、位移、速度等变形条件由计算机系统自动控制,并采集载荷、位移等。

用线切割的方法将高温压缩变形后的试样沿纵

截面剖开,采用 618 环氧树脂、邻苯二甲酸二丁酯、乙二胺(质量比为 100 : 15 : 10)的混合料,将镶好后的试样打磨、抛光,然后用硝酸酒精(5%)对其侵蚀,侵蚀时间为 25 s。利用 ZEISS SUPRA 55 型扫描电镜观察、拍摄颗粒形貌及表面状态。

2 结果与分析

2.1 热变形行为

2.1.1 流变规律

流变应力主要与变形温度、应变速率及应变有关。不同热变形条件的高体积分数 SiCp/A356 复合材料的流变应力-应变曲线,如图 2、3 所示。

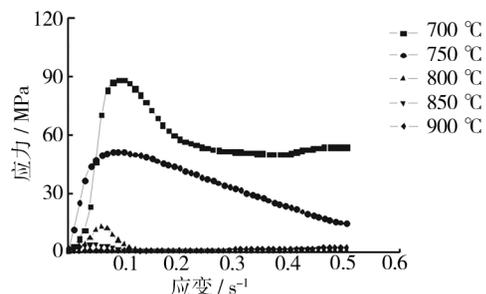


图 2 不同变形温度下的真应力-真应变曲线

Fig. 2 Flow stress strain curves for SiCp/Al composite at different temperatures

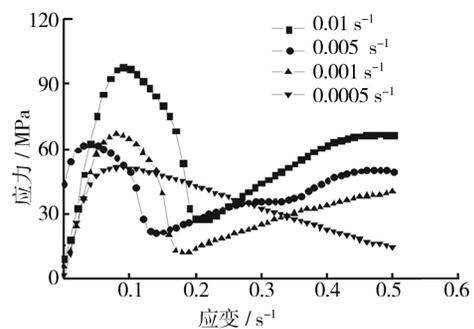


图 3 不同应变速率下的真应力-真应变曲线

Fig. 3 Flow stress strain curves for SiCp/Al composite at different strain rates

从图中看出, SiCp/A356 复合材料在热压缩变形中出现了明显的波峰,流变应力在达到峰值后迅速降低,各应变速率出现波峰的应变量相近,高应变速率下的波峰较低应变速率明显,850 和 900 °C 时的应力应变曲线没有明显的波峰,表现为持续低应

力值。

采用无压浸渗工艺形成的 SiCp 增强颗粒骨架在达到极限应力时出现压溃现象, 在流变应力-应变曲线上, 表现为应力值开始下降, 当 SiCp 增强颗粒骨架被压溃到一定程度时, 复合材料内部的 SiCp 增强颗粒发生重新排列和重组, 此时复合材料作为重新排列后的材料继续受到高温压缩, 表现在应力-应变曲线上为应力值随应变的增加又重新开始上升, 达到一定应变量后趋于稳定。

由图 2 可以看出, 复合材料的流变规律受变形温度的影响较大。材料的峰值应力随变形温度的升高而降低。这是由于随着变形温度的提高, 复合材料的流动性增强, 颗粒承载并同时随基体流动能力增强, 导致了流变应力的降低。

由图 3 可以看出, 复合材料的流变规律受应变速率的影响不大。材料的峰值应力随应变速率的减小而略微降低。这是由于变形速度的降低增强了复合材料的流动性, 颗粒承载并同时随基体流动能力增强, 导致了流变应力的降低。

2.1.2 本构关系

热变形是一个受激活控制的过程, 流变应力主要与变形温度、应变速率及应变有关。应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、变形温度 T 和流变应力 σ 之间的关系, 常用的本构关系数学表达式为 Arrhenius 型方程。热加工参数(温度补偿的变形速率因子)可表示为(1)式, 即 Zener-Hollomon 提出并实验验证了应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 的关系可用 Zener-Hollomon 参数 Z 表示为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = f(\sigma) \quad (1)$$

有学者在研究高温蠕变时发现^[8-11], 流变应力 σ 与应变速率、变形温度之间满足下列关系式:

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, $F(\sigma)$ 为应力的函数。

通常应力状态有

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

对式(3)两边取自然对数可得:

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{\ln \dot{\epsilon}}{n} + \frac{Q}{nRT} - \frac{\ln A}{n} \quad (4)$$

将图 2、3 中的试验结果真应力-真应变数据中各应变速率和温度下的峰值应力进行处理可得图 4。

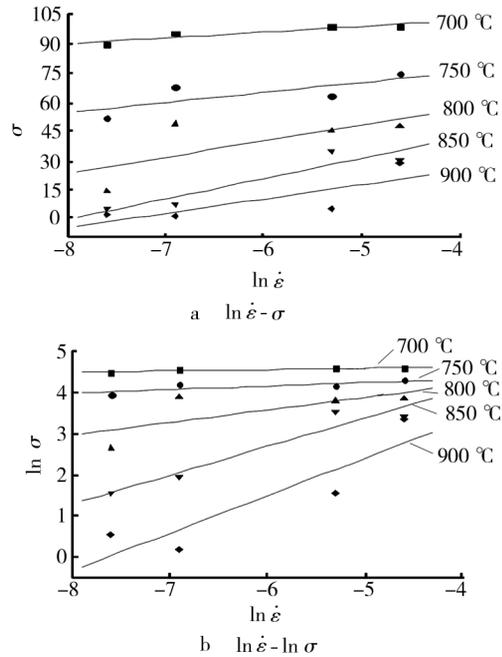


图 4 复合材料高温应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与压缩应力 σ 之间的关系

Fig. 4 Relation between $\dot{\epsilon}$ and σ of SiCp/Al composite by hot compression

结果表明: σ 和 $\ln \dot{\epsilon}$, $\ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 都成直线关系, 对直线斜率取倒数并平均即可得到: $\beta = 0.178 \text{ MPa}^{-1}$, $\gamma = 10.339$, 此时对应的 $\alpha = 0.017 \text{ MPa}^{-1}$ 。

复合材料经高温压缩变形试验得到的不同温度和变形速率下的峰值应力值, 经计算变换得到的不同温度和变形速率下的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 值如图 5 所示。

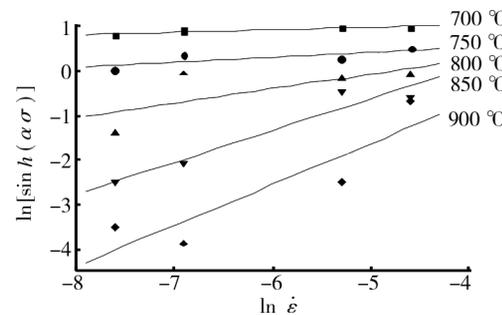


图 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系

Fig. 5 Relation between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $\ln \dot{\epsilon}$ of SiCp/Al composite by hot compression

根据最小二乘法原理^[12], 得到回归方程系数 $R = 0.948$, 回归方程结果较理想。这种双曲正弦函数关系可用于描述合金所有应力水平下 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 之间的关

系,因而能较准确地为通过改变应变速率来控制热加工的应力水平和为确定力能参数提供理论依据。

将计算结果代入(4)式,经变换计算后可得到 SiCp/Al 复合材料高温压缩变形时的应力-应变速率关系方程为:

$$\ln[\sin h(0.02\sigma)] = 0.43 \ln \dot{\epsilon} + 2.0 \times 10^4 \frac{1}{T} - 16.73 \quad (5)$$

由(5)式结合图5可知,在同一变形温度下,变形速率越高,流变应力越大,说明材料是正应变速率敏感材料;在同一变形速率下,温度越高,流变应力越小,回归方程结果与实验所得数据变化趋势基本一致。这是因为,当应变速率一定时,随着变形温度的升高,热激活的作用增强,原子间的动能增大,临界剪切应力减弱,导致流变应力的降低;当变形温度一定时,应变速率越大,塑性变形进行得越不充分,从而导致流变应力增大。

利用(5)式计算得到的 SiCp/Al 复合材料高温压缩峰峰值应力值与实测结果值比较如图6所示。

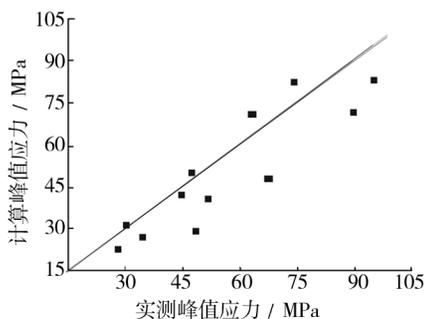


图6 SiCp/Al 复合材料高温压缩峰峰值应力计算结果与实验结果比较

Fig. 6 Comparison between calculation and experimental result of peak stress of SiCp/Al composite by hot compression

由图6可知,实测值和计算值数据点分布于直线的两侧,计算值和实验数据间的误差相对较小,基本都控制在10%以内,说明利用应力-应变关系方程(5)式计算的峰值应力与实测结果符合得较好。

2.2 组织

将未经过高温压缩的试样研磨、抛光,得到复合材料的SEM图,如图7所示。SiC颗粒均匀地分布于铝合金基体中,颗粒大小比较一致,呈多边不规则

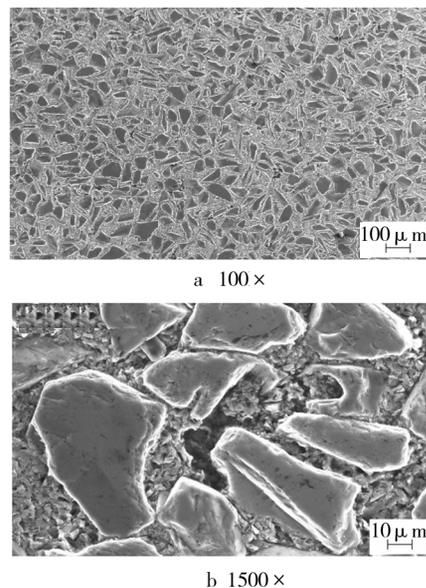


图7 高温压缩前的SiCp/Al复合材料的SEM图

Fig. 7 SEM of SiCp/Al composite before Hot Compression

形状。高倍SEM图可观察到少量孔隙存在。

SiC颗粒呈白色,铝合金基体呈暗黑色,主要是在磨试样时SiC的硬度较高,抛光时不易被磨损,形成平坦区,而其他区域Al组织较软,易被磨损发暗。

高体分SiCp/Al复合材料高温压缩变形后,基体仍保持连续,压缩过程中,颗粒在压力作用下会翻转,部分颗粒破碎,尺寸及分布均匀性等组织特性受高温变形参数控制。

由图8看出,经过高温压缩后的复合材料,颗粒尺寸、圆整度及分布均匀性明显提高。说明高温压缩变形有利于SiC颗粒尺寸、形状及分布均匀性的调整,进而提高复合材料的性能。

3 结论

1) 在同一变形温度下,应变速率越大,流变峰值应力越大,流变应力随着应变速率的增大而增大,材料是正应变速率敏感材料;在同一变形速率下,变形温度越高,流变峰值应力越小。

2) 热变形是一个受激活控制的过程,流变应力主要与变形温度、应变速率及应变有关。利用Zener-Hollomon参数Z,经变换计算后可得到SiCp/Al复合材料高温压缩变形时的应力-应变速率关系方程为:

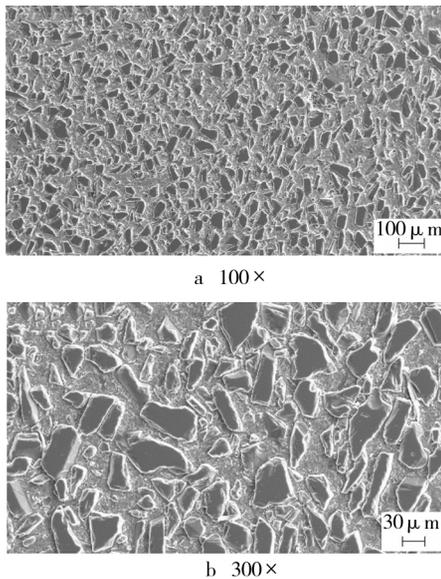


图8 高温压缩后的SiCp/Al复合材料的SEM图

Fig.8 SEM of SiCp/Al composite after Hot Compression

$\ln[\sin h(0.02\sigma)] = 0.43 \ln \dot{\varepsilon} + 2.0 \times 10^4 \frac{1}{T} - 16.73$,
变形激活能 $Q = 388.93 \text{ kJ/mol}$ 。回归方程结果与实验所得数据变化趋势基本一致。

3) 高体分 SiCp/Al 多功能复合材料高温压缩变形后,基体仍保持连续,压缩过程中,颗粒在压力作用下会翻转,部分颗粒破碎,颗粒尺寸、圆整度及分布均匀性明显提高,高温压缩变形有利于 SiC 颗粒尺寸及分布均匀性的调整。

参考文献:

- [1] GUO Shao-wen, LI Li-bo, ZHANG Guang-yu, et al. Adhesion Analysis of Electroless Ni Coating on SiCp/Al Composite Mirror Substrate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(6): 960-963.
- [2] LEI Yu-cheng, ZHANG Zhen, NIE Jia-jun, et al. Effect of Ti-Al on Microstructures and Mechanical Properties of Plasma Arc In-situ Welded Joint of SiCp/Al MMCs [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18:809-813.
- [3] 郝斌,崔华,余志勇,等. 纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料制备工艺研究[J]. 材料工程,2006,1(1):489-492.
- [4] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用[J]. 材料工程,2002,1(6):3-6.
- [5] BARDAL A. The Effect of Antimony on the Interface of Cast ALSi-SiC Composites[J]. Mater Sci,1983,28:2699-2705.
- [6] THUNEMANN M. Aluminum Matrix Composites Based on Pre-ceramic-polymer-boned SiC Preforms [J]. Composites Science and Technology,2007,67:376-379.
- [7] WANG X J, HU X S, WU K, et al. Hot Deformation Behaviour of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Composite Fabricated by Stir Casting [J]. Material Science and Engineering A,2008,492(1-2):481-485.
- [8] 刘坚,毛大恒,冯广,等. 2124 铝合金高温压缩流变行为研究[J]. 湖南有色金属,2007,22(5):26-29.
- [9] 马宁,刘书田. 复合材料粘弹性本构关系与热应力松弛规律研究[J]. 复合材料学报,2005,22(1):158-160.
- [10] SPIGARELLI S, EVANGELISTA E, CERRI E, et al. Constitutive Equations for Hot Deformation of an Al-6061/20% Al₂O₃ Composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 12(319): 721-725.
- [11] 李进军,于家康. SiC 颗粒增强 Al 复合材料的热膨胀性能[J]. 陕西科技大学学报,2007,25(2):74-76.
- [12] 中国科学院数学研究所统计组. 常用数理统计方法[M]. 北京:科学出版社,1973:272-273.

(上接第31页)

- [19] 刘钢,何祝斌,苑世剑,等. 镁合金热态内高压成形装置及管材成形性能[J]. 航空制造技术,2007(增刊):470-477.
- [20] 齐军. 5A02 铝合金管材热态液压成形研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文,2008:76-83.
- [21] HE Zhu-bin, LIU Gang, WU Jia, et al. Mechanical Properties Testing and Formability Evaluation of AZ31B Extruded Tube at Elevated Temperature [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2008,18:s209-s213.
- [22] HU Lan, HAN Cong, HE Zhu-bin, et al. Warm Hydroforming for a Square-sectional Component of AZ61A Magnesium Alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,16(2): 227-231.
- [23] 刘钢,何祝斌,齐军,等. 轻合金管材热态内压成形性能测试及样件试制[J]. 锻压技术,2008,33(3):48-51.
- [24] YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin, WANG Xiao-song, et al. Material Characterization and Formability Evaluation of AZ31B Mg Alloy Tube for Warm Tube Hydroforming [C]. The 9th International Conference on Technology of Plasticity, Korea, 2008: 1274-1279.