

热处理对 15% SiC_p /2009A1 复合材料力学性能与断裂行为的影响

肖伯律 张维玉 左涛 樊建中 石力开

(北京有色金属研究总院国家有色金属复合材料工程中心,北京 100088)

文 摘 使用不同固溶温度对粉末冶金工艺制备的 15% SiC_p /2009A1 复合材料进行了处理,经过自然时效后进行了拉伸试验。结果表明:复合材料强度与塑性均随着固溶温度的提高而增加;挤压态的复合材料强度与基体合金基本相同。动态拉伸和断口形貌观察表明:挤压态的复合材料断裂形式为界面和基体中形成孔洞并相互连接导致试样断裂;而热处理后界面附近的基体中形成孔洞以及颗粒开裂并向基体中扩展导致试样断裂。

关键词 金属基复合材料,粉末冶金,界面

Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Fracture Behavior of 15% SiC_p /2009A1 Composite

Xiao Bolü Zhang Weiyu Zuo Tao Fan Jianzhong Shi Likai

(General Research Institute for Nonferrous Metals of Beijing, Beijing 100088)

Abstract Solution treatments with different temperatures are conducted on 15% SiC_p /2009A1 composite followed by natural ageing. Tensile test results indicate that strength and elongation of composite are improved by increasing solution temperature while the strength of as-extruded composite is close to that of unreinforced alloy. Observation under dynamic tensile with fractograph shows that fracture for as-extruded specimens is composed of void nucleation on interface or matrix and mutual linkage, whereas the fracture after heat treatment is composed of void generation in matrix near interface and crack of particle followed by expansion into matrix for specimens.

Key words Metal matrix composite, Powder metallurgy, Interface

1 前言

陶瓷颗粒增强铝基复合材料具有十分优异的力学性能和物理性能,目前已作为一种关键的结构材料被应用于工程领域中。过去 20 多年的研究结果表明^[1,2],通过添加陶瓷颗粒,复合材料的弹性模量可比相应的铝合金高出 30% ~ 100%,拉伸强度高出 15% ~ 40%,且还具备良好的耐磨性、抗疲劳性能以及抗蠕变性能等。通过铸造和粉末冶金两种方法制备的颗粒增强复合材料具有不同的力学性

能^[3]。其中,粉末冶金法在制备高性能颗粒增强铝基复合材料方面更具有吸引力。最主要的原因是在其在固态或较低温度下可以避免有害的界面反应^[4]。由于陶瓷颗粒的加入,使复合材料的塑性与韧性明显低于基体合金。如何使复合材料具备尽可能高的塑性,一直是复合材料研究的重要方向。对既定的复合材料体系而言,增强颗粒的尺寸和形貌对复合材料塑性的影响十分明显^[5]。此外,热处理也能有效改善复合材料的力学性能。然而目前只有少数的

收稿日期:2004 - 09 - 07;修回日期:2004 - 09 - 22

作者简介:肖伯律,1975 年出生,博士,主要从事金属基复合材料的研究工作

研究工作^[6]报道过热处理对粉末冶金制备复合材料力学性能的影响机制,而且,热处理对复合材料断裂行为的影响机制还没有完全被人们所了解,还需要较多的试验数据和分析。本文对粉末冶金法制备的 15% SiC_p/2009 Al 复合材料进行不同固溶温度处理,并进行力学性能测试与断口和动态拉伸观察,试图了解热处理对复合材料力学性能的影响和复合材料的断裂特征,以期为实际工程应用提供实验依据和理论指导。

2 实验

2.1 材料

选用增强颗粒为 - SiC_p, 平均尺寸 14.7 μm。基体合金为 Al-Cu-Mg 系合金, 牌号为 2009。通过氩气雾化制得基体合金粉末, 平均尺寸为 70 μm。将合金粉末与 SiC_p 在卧式球磨机中进行机械混合, 球料质量比 10:1, 转速 100 r/min, 时间 24 h; 将混合粉末冷压实并在 550 °C 下进行除气处理; 之后将冷压坯锭在 450 °C 下通过 800 t 卧式挤压机挤压成棒材, 挤压比 15:1。

2.2 性能测试与组织观察

将棒材分别在 490 °C、500 °C、510 °C、520 °C 下保温 1 h 后淬入冷水中并在室温下时效 96 h。沿挤压方向将以上棒材加工成标准拉伸试样(标距段长 40 mm, 直径 5 mm)。使用岛津万能实验机在室温下进行拉伸试验(拉伸速率 1 mm/min)。每个固溶温度处理的复合材料取三个拉伸试样, 对测得的数据取平均值。用扫描电镜观察断口。此外, 对挤压态的复合材料与经过 500 °C 固溶处理并经过时效的复合材料试样进行动态拉伸观察。使用片状试样, 拉伸轴与挤压方向平行(试样经过机械抛光, 拉伸速度 1 mm/min)。使用 MEF3 型光学显微镜进行金相观察(观察平面平行于挤压方向)。

3 实验结果

3.1 复合材料的微观组织与力学性能

图 1 所示为 15% SiC_p/2009 Al 复合材料的金相组织。可以发现 SiC_p 分布较均匀, 并且没有孔洞疏松等缺陷存在, 说明试验所选用的工艺是可行的。

表 1 所示为不同固溶温度的 15% SiC_p/2009 Al 复合材料的力学性能。从表 1 可见, 在挤压态时, 复合材料强度和基体合金基本相同, 而延伸率约为基体合金的 50%。经过热处理后, 复合材料强度得到

大幅提高, 拉伸强度比基体合金高出 16.1% ~ 17.8%, 屈服强度比基体合金高出约 7% ~ 20%, 延伸率则比未热处理时提高了约 12.6% ~ 31%。经过热处理的基体合金在强度提高的同时延伸率也有大幅度增加。此外, 复合材料与基体合金的拉伸强度均随着固溶温度升高而有所增加。同时, 复合材料的延伸率随着固溶温度增加不断有所提高, 基体合金的延伸率也随着固溶温度增加而提高。但热处理后复合材料与基体合金的断裂延伸率相比低 60% 左右。

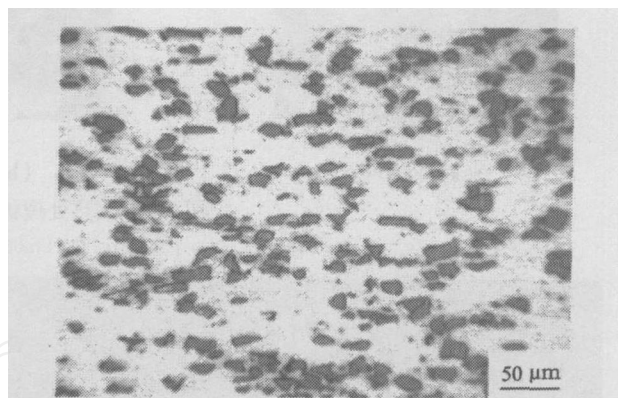


图 1 15% SiC_p/2009 Al 复合材料的金相组织

Fig 1 Micrograph of 15% SiC_p/2009 Al composite

表 1 固溶温度对复合材料及基体力学性能的影响

Tab 1 Effect of solution temperature on tensile properties

固溶温度 / °C	15% SiC _p /2009 Al			2009 Al		
	拉伸强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %	拉伸强度 / MPa	屈服强度 / MPa	延伸率 / %
490	504	342	9.8	431	282	24.1
500	509	333	10.6	432	292	25.2
510	534	346	10.7	459	322	26.7
520	534	365	11.4	460	325	26.5
挤压态	340	205	8.7	346	206	17.5

3.2 复合材料断裂行为

图 2 为复合材料在不同固溶温度下热处理及挤压态的断口形貌。从图 2 可见, 经不同的固溶温度处理的复合材料在断口特征上没有很大差别, 均呈现出形状不均匀的韧窝, 而且韧窝较浅; 断口上有少量孔洞。挤压态复合材料断口上的韧窝尺寸比较均匀, 同时存在较大的孔洞或裂纹(如箭头所指)。图 3、图 4 为材料在动态拉伸中的形貌。可以发现挤压

态的复合材料界面脱粘倾向较大 [图 3 (a)], 而热处理后复合材料中的颗粒开裂倾向较大 [图 3 (b)]; 挤压态下基体合金容易形成较多的二次裂纹, 且裂纹方向基本垂直于拉伸方向 [图 4 (a)]。经过

热处理后, 基体合金产生二次裂纹的几率明显下降, 裂纹的方向不一定垂直于拉伸轴线而会产生明显的扭转 [图 4 (b)]。

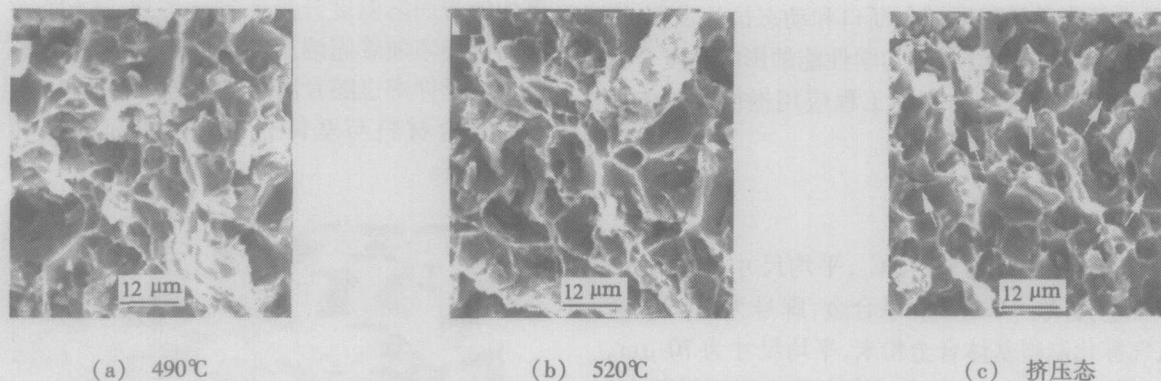


图 2 不同热处理状态下复合材料的断口形貌

Fig. 2 Fractograph of composites

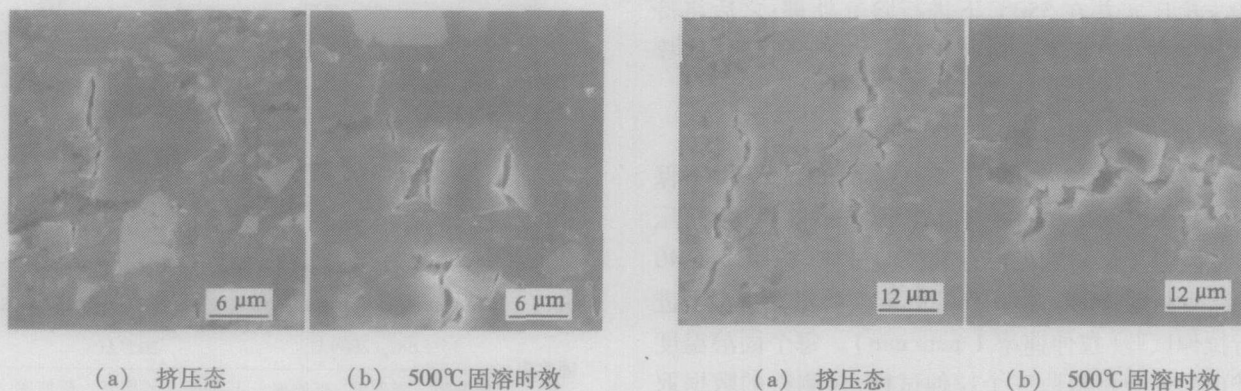


图 3 复合材料动态拉伸中的 SiC_p

Fig. 3 SiC_p in dynamic tensile

图 4 复合材料动态拉伸中的基体合金

Fig. 4 Matrix of composites in dynamic tensile

4 讨论

4.1 热处理对复合材料界面与颗粒行为的影响

从力学性能测试发现, 未经热处理时 SiC_p 未发挥强化作用。根据非连续增强金属基复合材料的强化机制, 颗粒要发挥约束基体合金变形从而强化基体的作用, 复合材料必需具备良好的界面结合。从动态拉伸观察结果 [图 4 (b)] 表明, 未经热处理的复合材料中界面附近开裂的倾向较大。由此可推断, 在拉伸过程中, 界面附近可能会产生两种情况: (1) 界面结合强度较低, 拉伸过程形成的应力集中导致裂纹或孔洞在界面上产生, 随着载荷增加使颗粒与基体合金分离; (2) 界面具有一定结合强度, 但基体合金强度较低, 作为应力集中程度最大的部位, 界面附近的基体内首先产生裂纹。对第一种情况而

言, 颗粒不能约束基体变形, 因而起不到强化作用, 相反, 由于颗粒割裂了基体合金的连续性, 造成复合材料强度比基体合金还低。对第二种情况, 界面具有一定强度, 颗粒能起到一定的约束基体作用, 由此导致的应力集中超过基体合金剪切强度, 使裂纹和孔洞在界面附近的基体中产生, 随着拉伸载荷增加, 裂纹沿界面附近的基体开裂, 此时复合材料的强度应比基体合金高。当基体合金强度足够高时 (如经过热处理), 应力集中的幅度会增加并达到颗粒开裂的水平 [图 3 (b)]。从断口形貌可见, 较浅的韧窝 [图 2 (a)、(b)] 说明颗粒起到了约束基体变形的作用并产生较大的应力集中。这时首先发生颗粒开裂, 裂纹再在基体合金中扩展, 颗粒的高强度得以发挥从而使基体合金得到有效强化, 使复合材料获得

较高的强度。因此可以认为,挤压态的复合材料中界面结合强度较差,即所观察到的界面开裂实际应为第一种情况,由此导致复合材料的力学性能较低。经过热处理后,界面结合强度与基体合金强度增加,使颗粒的强化作用得以发挥,因而提高了复合材料的强度。热处理对提高复合材料界面结合强度的作用目前还未见详细报道,但根据 W. J. Kim^[7]等人对 20% SiC_p/2124 复合材料的差热分析研究表明,由于界面处存在溶质原子偏析,使界面在较低温度下会出现微区域熔化,弥补了因粉末冶金工艺温度较低所导致的界面结合较弱的情况,这有利于提高界面结合强度。此外,高温有利于促进原子扩散,这对提高界面结合也有一定作用。因此,固溶处理温度越高,界面结合强度越高,因而可以提高材料强度。另外,高的固溶温度可以提高合金元素固溶度^[6],有利于提高复合材料与基体合金的塑性(表 1)。此外,从表 1 还可见,基体合金与复合材料随着固溶温度以及热处理状态的变化规律基本相同,说明基体合金的性能对复合材料的性能起决定性作用。

4.2 热处理对复合材料基体行为的影响

在对挤压态复合材料的断口和动态拉伸进行观察发现裂纹并不只在界面附近形成。由于基体合金强度较低,与热处理后状态相比,基体中可能产生裂纹和孔洞的几率较大[图 4(a)],随着载荷增加,这些孔洞裂纹相互连接使材料断裂。从断口上看,这些孔洞或裂纹都有明显的增加[图 2(c),如箭头所示],在基体合金中则观察不到这种现象^[4]。裂纹形核位置的增加和相互连接,以及界面结合强度较低,这些因素的共同影响使得挤压态的复合材料强度和塑性都比热处理状态低。

5 结论

使用粉末冶金工艺制备的 15% SiC_p/2009 复合材料,经过热处理后拉伸强度比相应的基体合金高出约 16.1%~17.8%,断裂延伸率下降约 60%。随着固溶温度升高,复合材料强度与塑性都提高,其中延伸率增加约 12.6%~31%。在拉伸过程中,挤压态复合材料的裂纹主要在界面和基体合金内形核并相互连接。经过热处理后,复合材料断裂特点为裂纹在界面附近的基体内形核以及颗粒开裂产生的裂纹在基体中扩展。

参考文献

- 1 Hasson D F, Crowe C R. Strength of metals and alloys In: CSMA 7, Pergamon Press, Oxford, UK, 1985: 1 515
- 2 Fishman S G Role of interfaces in material damping ASM, Materials Park, OH, 1985: 33
- 3 Srivatsan T S, Sudarshan T S Rapid solidification technology: an engineers guide Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, 1988: 23
- 4 Srivatsan T S, Al-Hajri M, Smith C et al The tensile response and fracture behavior of 2009 aluminum alloy metal matrix composite Mater Sci Eng A, 2003; 346: 91~100
- 5 肖伯律,毕敬,赵明久,马宗义. SiC 尺寸对铝基复合材料拉伸性能和断裂机制的影响. 金属学报, 2002; 38(9): 1 006~1 009
- 6 Thomas M P, King J E. Improvement of the mechanical properties of 2124/SiC_p MMC plate by optimization of the solution treatment. Composites Sci Technol, 1996; 56: 1 141~1 147
- 7 Kim W J, Yeon J H, Shin D H et al Deformation behavior of powdermetallurgy processed high-strain-rate superplastic 20% SiC_p/2124 Al composite in a wide range of temperature. Mater Sci Eng A, 1999; 269: 142~151

(编辑 李洪泉)

(上接第 33 页)

参考文献

- 1 Beauchman P M, Rodgers D H. New concepts for inflatable structures applied to spaceborne radars. AIAA-95-3795, 1995: 1~8
- 2 Mabne P K, Williams G T. Lightweight inflatable solar array. Journal of Propulsion and Power, 1996; 12(5): 1~9
- 3 Scatter C M, Freeland R E. Inflatable structure technology applications and requirements. AIAA-95-3737, 1995(7): 3~5
- 4 Costa Cassapakis, Mitch Thomas. Inflatable structures technology development overview. AIAA-95-3738, 1995: 1~10

(编辑 吴坚)