

[文章编号] 1004- 0609(2000)06- 0827- 05

SiC 颗粒增强铝基复合材料薄板的力学性能^①

胡代忠^{1, 2}, 陈礼清¹, 赵明久¹, 毕敬¹, 徐永波^{1, 2}

(1. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110015; 2. 中国科学院 金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室, 沈阳 110015)

[摘 要] 研究了粉末冶金法制备的 SiC 颗粒增强铝基复合材料薄板的常温及高温力学性能。结果表明, 铝基复合材料薄板在常温下具有较高的强度, 薄板性能基本呈各向同性, 其断裂机制主要为颗粒从基体脱粘, 同时有少量颗粒破碎。随着温度的升高, 复合材料板材强度逐渐下降, 延伸率增大。在 200 ℃时仍能保持较高的强度和较好的综合性能, 其抗拉强度达 370 MPa, 屈服强度达 243 MPa, 延伸率达 11.3%。

[关键词] 铝基复合材料; SiC 颗粒; 力学性能; 断裂机制

[中图分类号] TB333; TG113.25

[文献标识码] A

碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有优异的综合性能, 是一类在航空、航天、机械、电子等领域中有着广阔应用前景的先进材料。对颗粒增强铝基复合材料的研究, 目前主要集中在材料制备、力学性能、磨损、疲劳、断裂以及蠕变等特性上^[1~6]。然而, 这些研究所使用的材料多为挤压态, 而对轧制态的复合材料薄板研究则较少。在航空、航天等实际工程应用领域中, 经常需要使用轧制态的铝基复合材料薄板。因此, 研究颗粒增强铝基复合材料薄板的力学性能对于复合材料工程构件的设计和应用具有很重要的意义。

颗粒增强铝基复合材料的比强度虽然有了很大的提高, 但是其低塑性和低韧性仍然限制了它的进一步推广应用。利用复合基体可以有效的改善铝基复合材料的塑性和韧性^[7]。本文作者系统地研究了添加一定量的纯金属粉末构成复合基体以改善塑性的 SiC 颗粒增强铝基复合材料轧制薄板的力学性能, 并结合微观结构予以解释。

1 实验方法

实验用基体合金为 < 74 μm 的 2024 铝合金粉末, 其化学成分(质量分数, %) 为 Al-4.08Cu-1.29Mg-0.65Mn; 增强体为 15% (体积分数) 的 β-SiC_p, 平均尺寸为 3.5 μm; 添加剂为 15% (体积分数) 的纯铝粉末, 平均尺寸为 13 μm。采用粉末冶金法将上述粉末均匀混合后制备成复合材料热压锭, 热压

锭在 460 ℃挤压成板坯。在 480 ℃下将板坯横向轧制展开, 之后垂直于初轧方向多道次热轧, 得到 2.3 mm 厚的复合材料薄板。

将薄板分别在常温及高温下进行拉伸性能测试。拉伸试样为板状短标距小尺寸试样, 标距段长 15 mm, 宽 4 mm。常温拉伸试样分热轧态和 T6 热处理(495 ℃固溶 40 min 后水淬+ 170 ℃时效 4 h) 状态, 与初始轧制方向分别成 0°, 45°以及 90°方向截取试样。常温拉伸性能测试在日本岛津 AG-5000A 型电子拉伸试验机上进行, 初始应变速率为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; 高温拉伸试样经 T6 热处理后均沿初始轧制方向截取, 测试温度范围为 50~ 350 ℃, 在恒定温度下保温 15 min, 在岛津 DCS-25T 型电子拉伸试验机上进行测试, 初始应变速率为 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。在 JSM-6310F 扫描电镜上观察试样拉伸断口形貌, 在光学显微镜下观察试样金相显微组织, 在 JEM2000FX II 型透射电镜上观察试样微观组织。

2 结果与讨论

2.1 复合材料薄板常温力学性能

表 1 给出了复合材料薄板常温拉伸实验结果。可以看出, 薄板的强度、延伸率在初轧方向上略低于终轧方向, 且沿 45°方向薄板延伸率最大。这主要是由轧制工艺所控制。轧制时, 对挤压板坯的横向展开略小于纵向展开, 即薄板在初轧方向的变形程度略低于终轧方向, 而变形程度对位错密度大小有

① [基金项目] 国家“八六三”计划资助项目(715- 005- 0080)

[收稿日期] 1999- 12- 22; [修订日期] 2000- 04- 03

[作者简介] 胡代忠(1974-), 男, 硕士研究生。

很大影响,从而导致薄板在初轧方向上的抗拉强度略低于终轧方向。不过两者差异并不大,性能值与平均值偏差较小,从整体上看材料仍呈各向同性。从图 1 所示金相显微组织上看,颗粒取向随机分布,断裂途径、方式基本相同。从图 2 断口扫描电镜照片中看,与初轧方向成不同角度的拉伸样,其断口形貌、韧窝大小及分布基本相同,均呈现出具有较好塑性的韧窝断口特征,表明取向对材料的影响并不大。而延伸率受与承载方向垂直的变形流线控制,由于在 45° 角方向取样时不与初轧或终轧方向的变形流线垂直,故在 45° 方向薄板延伸率高于其它方向。对比文献[7]给出的数据,经 T6 处理后的试样延伸率由 4.42% 提高到 10.2%,说明其塑性得到了较大改善。材料塑性的改善,有利于轧制成型。

表 1 薄板常温力学性能

Table 1 Mechanical properties of composite sheets at ambient temperature

$\theta/^\circ$	σ_b/MPa		$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$		$\delta/\%$	
	T6	Hot rolling	T6	Hot rolling	T6	Hot rolling
0	458	418	297	338	6.0	4.3
45	463	433	266	347	12.9	9.3
90	470	438	290	362	9.1	7.0
Average	463	430	280	348	10.2	7.5

颗粒与基体间界面结合状况对颗粒增强铝基复合材料的性能有较大影响,并影响其断裂机制。从图 2 断口扫描照片可以看出,大量的颗粒整体从基体脱粘,只有少量的颗粒破裂,断口形貌为细小等轴的韧窝,表明颗粒与基体结合良好。韧窝的产生是由于试样在拉伸载荷作用下,增强颗粒或夹杂物与基体界面脱离,或增强颗粒本身碎裂而形成微孔。微孔不断长大和聚合就形成显微裂纹;新的微孔不断成核、长大和聚合,当其与早期裂纹相连接时,裂纹便继续向前扩展,直到材料最终断裂,在断口表面形成韧窝。因此,颗粒增强复合材料薄板的断裂机制主要是颗粒从基体脱粘,同时有少量颗粒破碎。

从表 1 还可以看出,相对于热轧态而言,经过 T6 热处理后的薄板,其抗拉强度、延伸率有了明显改善,但其屈服强度有所下降。对于这一现象作如下解释。由于薄板较薄,热轧后温度下降较快,产生大量位错,而且位错缠结较复杂,开动位错相对较困难,故热轧态薄板屈服强度较高;但此时材料析出相较粗大,在基体中分布不均匀,对位错的钉

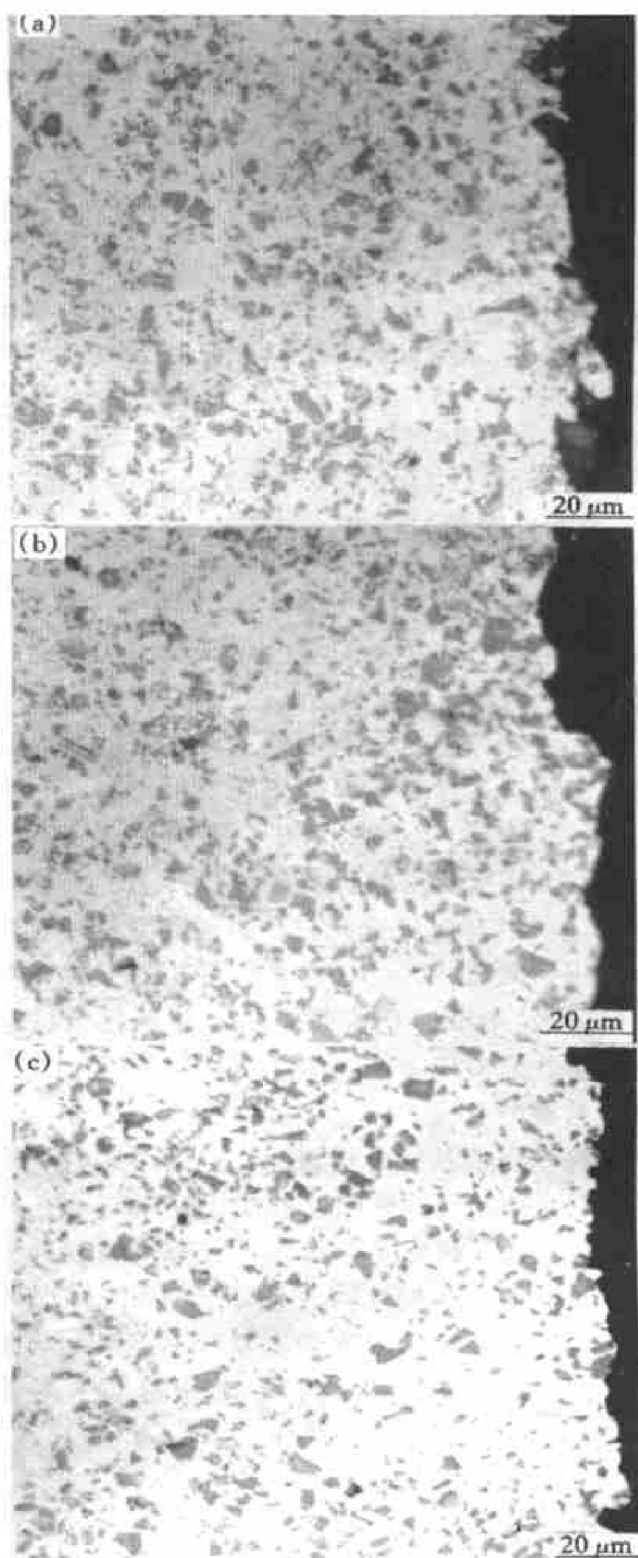


图 1 与初轧方向成不同角度 θ 的复合材料薄板常温拉伸断口附近金相显微组织

Fig. 1 Optical micrographs of longitudinal section at ambient temperature

(a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 45^\circ$; (c) $\theta = 90^\circ$

扎作用相对较弱,故抗拉强度较低(见图 3(a))。经过 T6 时效处理后,析出的第二相细小,分布较均匀,对位错的钉扎作用较显著,因而薄板抗拉强度较高;但此时位错缠结部分松弛,位错密度

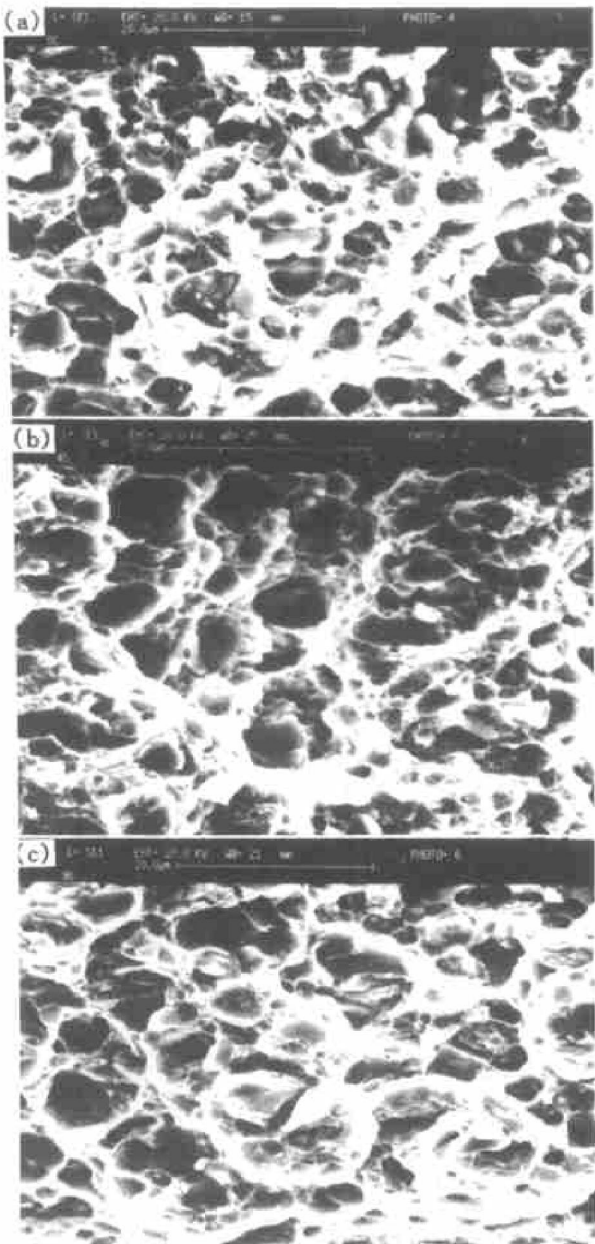


图 2 复合材料薄板常温拉伸断口形貌

Fig. 2 Fractographs of fracture surfaces of composite sheets at ambient temperature
(a) $-\theta=0^\circ$; (b) $-\theta=45^\circ$; (c) $-\theta=90^\circ$

下降, 开动位错较容易, 从而其屈服强度有所下降 (见图 3(b))。

2.2 复合材料薄板高温力学性能

图 4, 图 5 分别是复合材料薄板在 50~ 350 ℃ 下拉伸时的强度-温度及延伸率-温度关系曲线。可以看出, 随着温度升高, 薄板强度逐渐下降, 延伸率逐渐增大。观察到在 300 ℃ 以上温度拉伸时, 试样有明显的颈缩现象。从金相上看断口不再呈平直状, 而是有一定的回折 (见图 6(b)), 表明其塑性较好。高温断口扫描照片 (图 7) 显示韧窝的形态与常温拉伸断口基本一样, 只是韧窝更深、更细小,

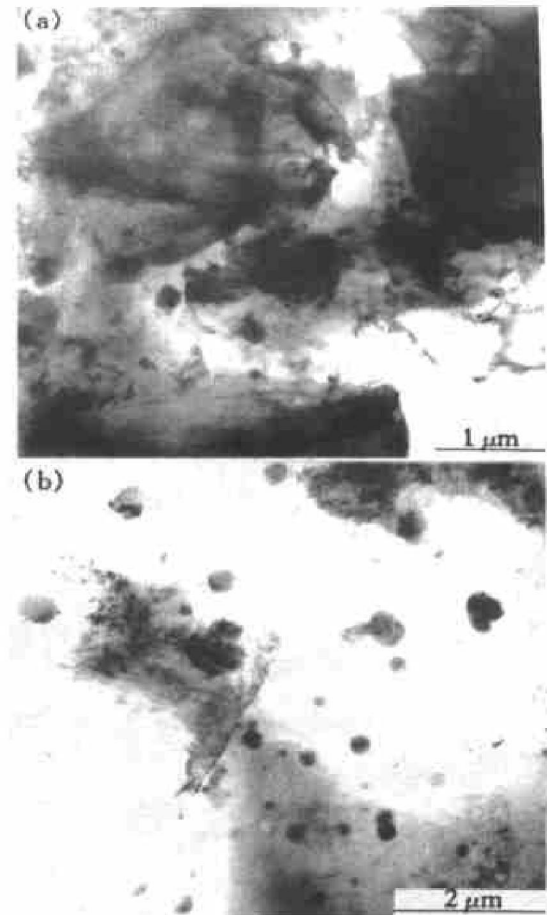


图 3 复合材料薄板 TEM 像

Fig. 3 TEM micrographs of composite sheets
(a) —Hot rolling condition; (b) —T6 condition

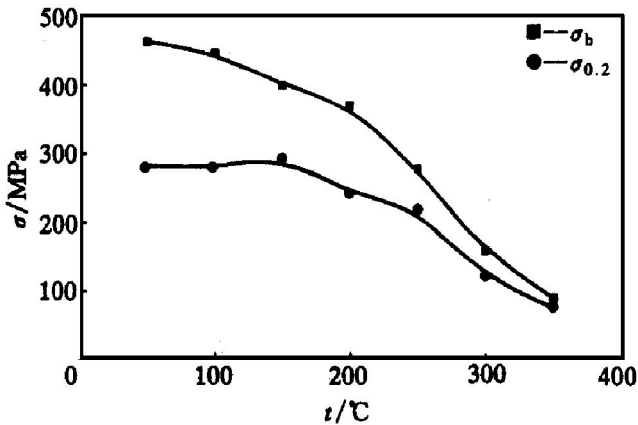


图 4 复合材料薄板强度-温度曲线

Fig. 4 Tensile strength of composite sheets as a function of temperature

说明其塑性较常温时更好。

从图 4 和图 5 还可以看出, 薄板在 200 ℃ 时仍能保持较高的强度和较好的综合性能, 其抗拉强度达 370 MPa, 屈服强度达 243 MPa, 延伸率达 11.3%。但在 250 ℃ 以上时, 薄板性能急剧下降。我们知道, 颗粒增强铝基复合材料的强化机制主要是通过界面剪切由基体向增强相传递载荷而使增强

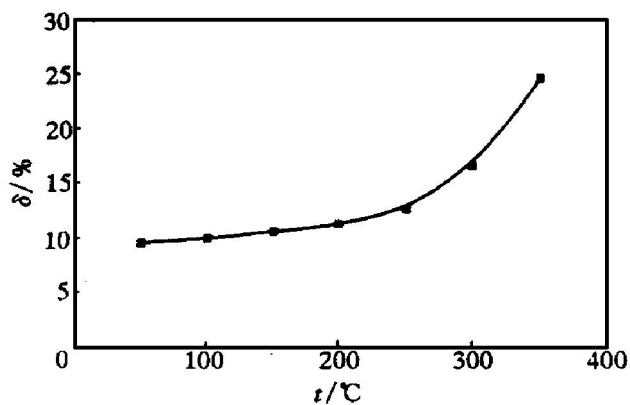


图5 复合材料薄板延伸率-温度曲线

Fig. 5 Elongation of composite sheets as a function of temperature

相承载,但在250 °C以上时铝合金基体强度较低,无法进行有效的载荷传递,从而导致复合材料薄板高

温强度明显下降。

3 结论

1) 用粉末冶金法制备的 SiC 颗粒增强铝基复合材料薄板室温性能基本呈各向同性,综合性能较好。经过 T6 热处理后,其抗拉强度为 463 MPa,延伸率为 10.2%。

2) SiC 颗粒(平均尺寸 3.5 μm) 增强铝基复合材料薄板的断裂机制主要是颗粒从基体脱粘,并有少量的颗粒破碎;拉伸断口为等轴细小的韧窝,呈明显的塑性断口特征。

3) 随着温度的升高,复合材料薄板的强度逐渐下降,延伸率逐渐增大;且在 200 °C 时仍能保持较高的强度和较好的综合性能,其抗拉强度达 370

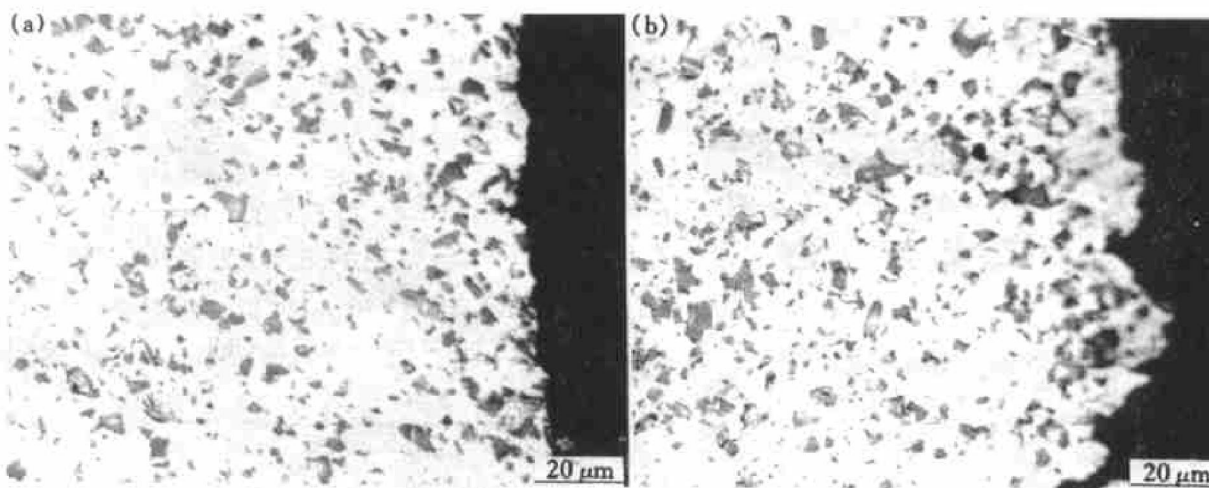


图6 复合材料薄板高温拉伸断口附近金相显微组织

Fig. 6 Optical micrographs of longitudinal section at elevated temperatures

(a) —200 °C; (b) —350 °C

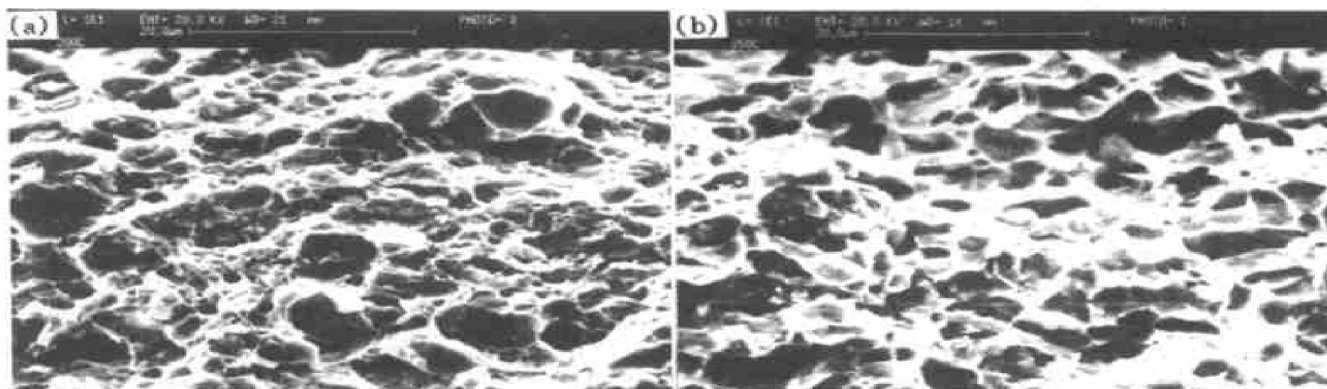


图7 复合材料薄板高温拉伸断口形貌

Fig. 7 Fractographs of fracture surfaces of composite sheets at elevated temperature

(a) —200 °C; (b) —350 °C

MPa, 屈服强度达 243 MPa, 延伸率达 11.3%。

[REFERENCES]

- [1] Flom Y and Arsenault R J. Effect of particle size on fracture toughness of SiC/Al composite material [J]. *Acta Metall*, 1989, 37(9): 2413– 2413.
- [2] Lloyd D J. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites [J]. *Inter Mater Rev*, 1994, 39(1): 1– 23.
- [3] Ibrahim I A, Mohamed F A and Lavernia E J. Particulate reinforced metal matrix composites—a review [J]. *J Mater Sci*, 1991(1): 1137– 1155.
- [4] Manahran M and Lewandowski J. Effect of reinforcement size and matrix microstructure on the fracture properties of an aluminum metal matrix composite [J]. *J Mat Sci Eng*, 1992, A150: 179– 186.
- [5] MA Zong-yi(马宗义), L Ü Yur-xiong(吕毓雄) and BI Jing(毕敬). 原位 Al_2O_3 和 TiB_2 粒子增强 Al-Cu 合金基复合材料的制备和性能 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 1999, 9(1): 101– 105.
- [6] Razaghian A, Yu D and Chendra T. Fracture behaviour of a SiC-particle reinforced aluminium alloy at high temperature [J]. *Composite Sci Tech*, 1998, 58: 293– 298.
- [7] L Ü Yur-xiong(吕毓雄), MA Zong-yi(马宗义), GAO Yir-xuan(高荫轩), et al. 粉末法制备非连续增强金属基复合材料研究 [A]. YANG Ting-xiang(杨庭湘). *Proceedings of Conference on Application and Processing Technology of Composite Materials*(复合材料应用与工艺技术交流会议论文集) [C]. Beijing, 1993. 55– 60.
- [8] ZHANG Fan(张帆), LI Xiao-cui(李小瑞) and SUN Peng-fei(孙鹏飞). 热处理对 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料尺寸稳定性的影响 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 1999, 9(4): 759– 763.
- [9] L Ü Yur-xiong(吕毓雄), BI Jing(毕敬), CHEN Li-qing(陈礼清), et al. SiC_p 尺寸及基体强度对铝基复合材料破坏机制的影响 [J]. *Acta Metall Sinica*(金属学报), 1998, 34(11): 1188– 1192.
- [10] Clyne T W and Withers P J. *An Introduction to Metal Matrix Composites* [M]. New York: Cambridge University Press, 1993. 79– 81.
- [11] LIN Jun-shan(林君山), LI Peng-xing(李鹏兴) and WU Ren-jie(吴人洁). 增强相体积分数对 SiC_p/Al 复合材料基体沉积的影响 [J]. *Acta Metall Sinica*(金属学报), 1992, 28(10): B465– 470.

Mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum matrix composite sheets

HU Da-zhong^{1, 2}, CHEN Li-qing¹, ZHAO Ming-jiu¹, BI Jing¹, XU Yong-bo^{1, 2}

(1. Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, P. R. China;

2. State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, P. R. China)

[Abstract] The mechanical properties of SiC particulate-reinforced aluminum matrix composite sheets via P/M technique at ambient and elevated temperatures were investigated. The results show that the rolled sheets have an elevated ultimate tensile strength and appear isotropic at ambient temperature. The particles separating from the matrix is the main failure mechanism of these materials, as well as some fractured particles are observed. It is also found that the strength of these materials decreases and the ductility increases with increasing temperature. Up to 200 °C, the materials still have quite higher strength and show preferable properties. The ultimate tensile strength reaches about 370 MPa, and the yield strength reaches 243 MPa, as well as the ductility reaches 11.3%.

[Key words] aluminum matrix composites; SiC particulate; mechanical properties; failure mechanism

(编辑 袁赛前)