

适合航空航天用 SiC_p/Al 复合材料的性能

樊建中 肖伯律 左涛 徐骏 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技术研究中心,北京 100088)

文 摘 采用粉末冶金法制备了 300 mm 的 15% (体积分数) SiC_p/Al 复合材料坯锭,研究了热挤压、锻造后的材料力学性能以及断裂特点。结果表明,该材料的弹性模量在 97 GPa,拉伸强度保持在 550 MPa 的水平下,延伸率仍高达 7%左右,旋转弯曲疲劳强度在 250 ~ 290 MPa 范围内,断裂韧性为 $25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,冲击韧性为 62.5 kJ/m^2 。与棒材挤压态相比,T4态复合材料拉伸强度和屈服强度分别提高 66.7%和 100%,但塑性保持在同一水平。断口观察表明,挤压态复合材料以基体韧性断裂为主要形式,而 T4态复合材料除了基体韧性断裂外,还存在 SiC 颗粒断裂现象。挤压棒材锻造后有利于提高材料的横向强度。

关键词 SiC_p/Al 复合材料,粉末冶金,强度,塑韧性,疲劳强度

Properties of SiC_p/Al Composites for Aerospace Application

Fan Jianzhong Xiao Bolü Zuo Tao Xu Jun Shi Likai

(National Engineering & Technology Research Center for Non-Ferrous Metals Composites,
Beijing General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088)

Abstract: A volume fraction of 15% SiC_p/Al composite billets of 300 mm in diameter are fabricated by powder metallurgy (PM) method. Mechanical properties and fracture mechanisms of these composites after hot extrusion and isothermal forging are investigated. The results indicate that the stiffness and the ultimate tensile strength of the composites are access to 97 GPa and 530 MPa respectively, elongation is about 7%, the rotating bend fatigue strength is between 250 MPa and 290 MPa, the fracture toughness K_{IC} is $25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, the impact toughness K_{IU} is 62.5 kJ/m^2 . A 66.7% increase in ultimate tensile strength and a 100% increase in yield strength are obtained in the composites at T4 status as compared with as-extruded status, whereas the ductility of the composites at both status is identical. The fractography shows that the dominant fracture mode at as-extruded status is ductile failure of Al matrix, and the ductile fracture of the matrix coupled with particulate failure by cracking is observed in the composites at T4 status. The isothermal forging process is beneficial to improve the strength in transverse orientations of the extruded billet.

Key words SiC_p/Al composites, Powder metallurgy, Tensile strength, Ductility and toughness, Fatigue strength

1 前言

与铝合金相比, SiC_p/Al 复合材料具有高比强

度、高比模量等优点^[1];与钛合金相比, SiC_p/Al 复合材料具有密度低、高比模量以及低成本等优点^[1]。

收稿日期:2005-06-08

作者简介:樊建中,1969年出生,教授级高级工程师,主要从事金属基复合材料的研究及应用开发

近年来该复合材料在国外已成功应用于航空航天包括战斗机腹鳍^[2]、飞机发动机导流叶片^[2]以及直升机旋翼连接件^[3-4]等关键结构件。因此, SiC_p/Al复合材料已逐渐发展成为应用于航空航天关键承载零部件的重要结构材料。

良好的塑韧性是结构材料应用于航空航天承载结构件的重要指标之一,通常要求材料的延伸率大于5%^[5]。对于 SiC_p/Al复合材料而言,由于陶瓷颗粒的加入,复合材料表现出塑韧性较差的特点,这在很大程度上限制了该材料作为结构材料在航空航天上的广泛应用。影响复合材料塑韧性的因素主要包括材料制备方法、微观组织和具体工艺参数的选择等,作者采用粉末冶金技术,在设计和优化 SiC_p/Al复合材料微观组织的基础上,研制出了具有高强度、良好塑性特点的15%(体积分数) SiC_p/Al复合材料,但这只停留在小尺寸、质量为几千克的小样品上。而对于实际工程应用,通常要求大尺寸的坯锭才能满足目标零部件的设计要求,因此本文采用相同的粉末冶金工艺,制备了大尺寸的坯锭并进行了塑性加工,分析测试了该材料的常规力学性能、疲劳性能、断裂韧性和冲击韧性等,目的是考察复合材料坯锭尺寸放大后,材料性能的变化以及性能的稳定性,为复合材料的实际工程应用奠定坚实的基础。

2 材料的制备与试验方法

复合材料增强体选用 SiC粉末颗粒,颗粒的体积分数为15%;基体选用 Al-Cu-Mg体系合金

(质量分数,Cu:3.2%~4.4%,Mg:1.2%~1.6%),基体合金粉末采用雾化技术制备。

复合材料的制备采用粉末冶金方法。首先把烘烤干燥后的 SiC粉末与铝合金粉末混合,然后把粉末混合物进行冷压,随后冷压坯料真空热压,热压坯锭直径为300mm、质量达60kg,热压坯锭在3600t挤压机上进行挤压,挤压棒材直径为100mm。把100×600mm的棒材在3000t的等温模锻设备上上进行径向锻造,获得600mm×157mm×50mm的锻坯。复合材料的固溶温度为500℃,时效工艺为室温96h的自然时效。

复合材料的拉伸试样按照 GB 6397—1986给出的5mm试样标准尺寸加工,拉伸试验在 AG-25TA试验机上进行,延伸率和断面收缩率采用人工测量试样拉断后标距伸长和缩颈处的最小横截面积并进一步计算获得。疲劳试样按照 GB/T4337—1984选用10mm圆柱光滑试样,在 PQ1-6试验机上进行旋转弯曲疲劳试验(试验条件为 K_t=1, R=-1,转速5000r/min,试验温度为室温)。断裂韧性 K_{IC}试样按照 GB/T4161—1984选用三点弯曲试样,试验在 AG-25TA试验机上进行。拉伸断口采用 JSM-840扫描电镜观察。

3 结果与讨论

3.1 挤压态力学性能

图1示出了挤压态15% SiC_p/Al复合材料棒材的纵向力学性能。

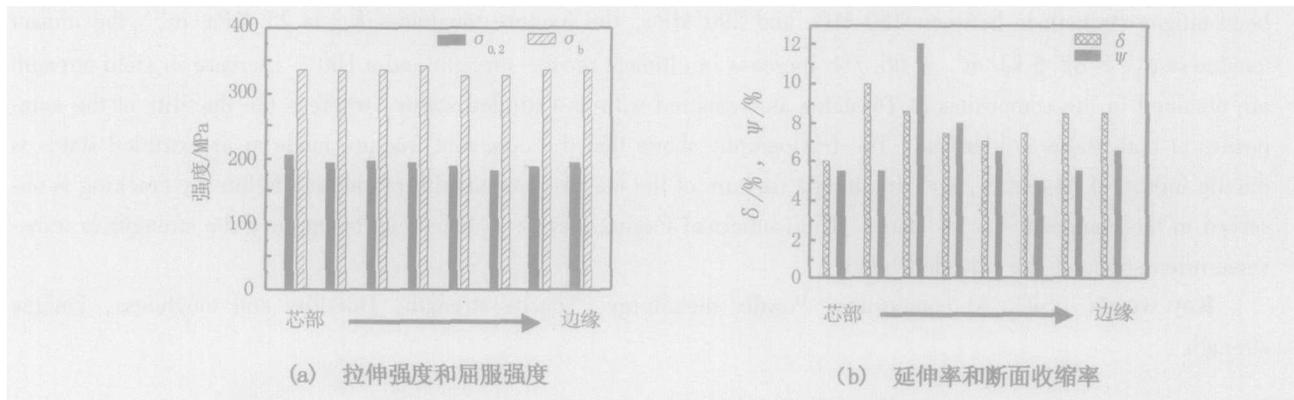


图1 挤压态15% SiC_p/Al复合材料棒材的纵向力学性能

Fig 1 Longitudinal mechanical properties of as-extruded 15vol% SiC_p/Al composite billets

从图1中可以看出,复合材料的拉伸强度和屈服强度分别保持在330MPa和190MPa水平的同时,材料表现出较高的塑性,延伸率和断面收缩率在

5%~12%范围内。另外,从棒材芯部沿径向向边缘所取的8个试样测试结果表明,复合材料棒材强度性能在径向方向上一致性非常好,而延伸率和断面

收缩率测量值变化较大,但最低值均在 5%以上。

图 2 示出了挤压态 15% SiC_p/Al 复合材料棒材的横向力学性能。从图中可见,复合材料的拉伸强度和屈服强度分别在 300 MPa 和 160 MPa 水平、延伸率和断面收缩率在 4.0% ~ 6.5% 范围内。

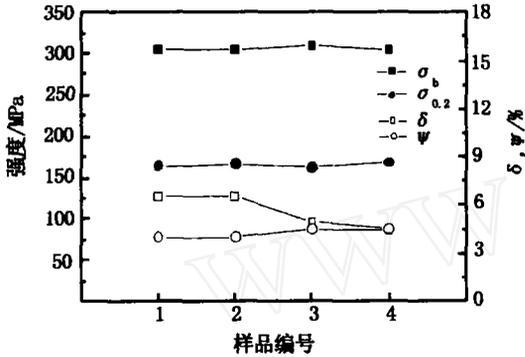


图 2 挤压态 15% SiC_p/Al 复合材料棒材的横向力学性能

Fig 2 Transverse mechanical properties of as-extruded 15vol% SiC_p/Al composite billets

与图 1 给出的纵向性能相比,横向强度和塑性均有明显下降,强度降低了 30 MPa、延伸率和断面收缩率均降低了 2% 以上,可见大直径棒材也表现出一定程度的性能各向异性。另外,在测试的 4 个试样中,各个性能指标的测量值重复性较好。

3.2 T4 态力学性能

图 3 示出了 T4 态 15% SiC_p/Al 复合材料 1[#] 和 2[#] 棒材 (1[#] 和 2[#] 棒材各取 11 个试样,1[#] 和 2[#] 棒材采用相同的工艺制备,本文同时给出 1[#] 和 2[#] 棒材的性能是为了比较材料性能的重现性)的纵向力学性能及其分布,从图中可以看出,1[#] 和 2[#] 棒材的拉伸强度和屈服强度分别在 540 ~ 570 MPa 和 360 ~ 400 MPa 范围内,延伸率和断面收缩率分别在 5% ~ 9% 和 5% ~ 11% 范围内,材料性能比较均匀,延伸率和断面收缩率没有出现低于 5% 的情况。比较 1[#] 和 2[#] 棒材的性能可以发现,二者性能重现性良好。

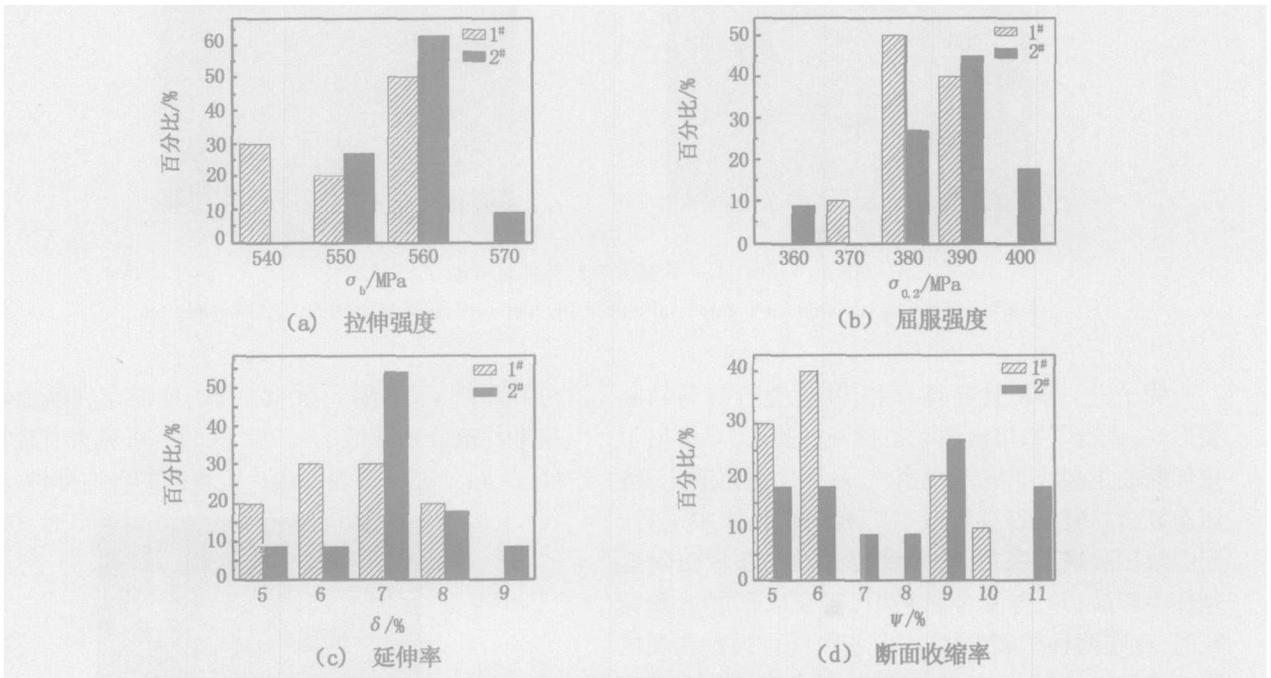


图 3 T4 态 15% SiC_p/Al 复合材料棒材的纵向力学性能及其分布

Fig 3 Histograms showing the distribution of longitudinal mechanical properties of 15vol% SiC_p/Al composite billets at T4 status

与挤压态相比,复合材料经 T4 态处理后,在纵向试样延伸率和断面收缩率平均值保持在 7% 的水平下,强度得到了大幅度的提高,拉伸强度和屈服强度平均值分别提高了 220 MPa 和 190 MPa,增加比宇航材料工艺 2005 年 第 6 期

率分别为 66.7% 和 100%;而对于横向性能而言,经 T4 处理后,塑性略有下降,但拉伸强度和屈服强度得到了大幅度提高,平均值分别提高了 169 MPa 和 174 MPa,增加比率分别为 55.2% 和 105%,见表 1。

表 1 15%SiC_p/Al复合材料的力学性能平均值

Tab 1 Mean values of mechanical properties for 15vol%SiC_p/Al composites

材料状态	取样方向	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
棒材挤压态	纵向	333	192	7.9	6.8
棒材 T4态	纵向	557	387	7.0	7.4
锻造后 T4态	纵向	546	378	6.4	6.9
棒材挤压态	横向	306	165	5.6	4.3
棒材 T4态	横向	475	339	4.3	3.4
锻造后 T4态	横向	506	378	3.5	4.4

图 4 示出了挤压态和 T4 态复合材料的拉伸断口扫描照片,从图中可以看出,两种状态材料的断口上均出现了大量韧窝,韧窝大小和深浅基本一致;没有发现颗粒与基体之间界面脱开现象。挤压态复合

材料的断裂形式主要是颗粒附近基体的韧性断裂;但 T4 态复合材料中除了颗粒附近基体发生韧性断裂外,还发生了部分 SiC 颗粒的断裂现象,见图 5。

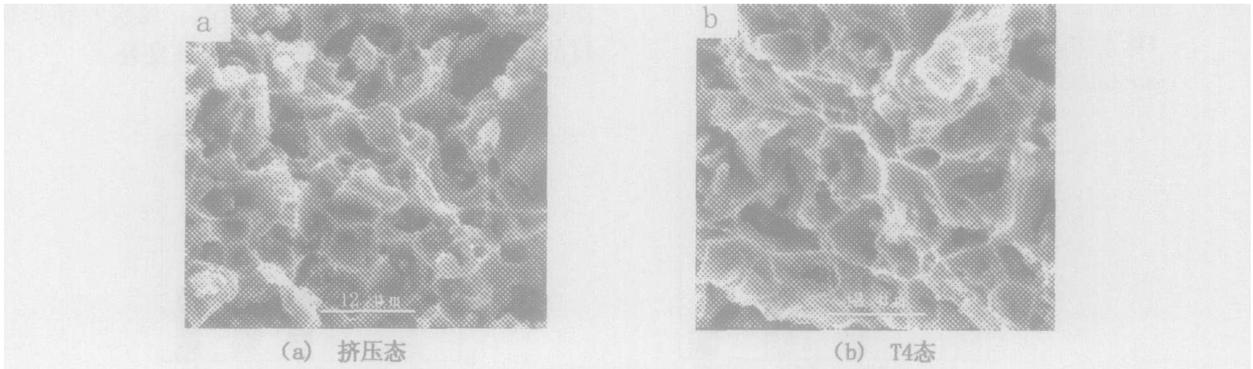


图 4 15% SiC_p/Al 复合材料拉伸试样断口 SEM 照片

Fig 4 Scanning electron micrographs of tensile fracture surface of 15vol% SiC_p/Al composites

为了进一步对比挤压态和 T4 态复合材料的断裂形式,进行了扫描电镜动态拉伸试验,图 6 示出了拉伸断裂主裂纹扩展过程照片,从图中可以看出,挤压态复合材料中裂纹形成与扩展均在基体中进行,当裂纹扩展遇到颗粒时,裂纹绕过颗粒在颗粒附近基体中扩展;T4 态复合材料中,当裂纹扩展遇到颗粒时,存在两种扩展方式,一是裂纹绕过颗粒在颗粒附近基体中扩展;二是颗粒断裂,裂纹穿过颗粒进行扩展。

图 7 为 T4 态复合材料棒材的横向力学性能,从图中可见,复合材料的拉伸强度和屈服强度分别在 470 ~ 490 MPa 和 335 ~ 340 MPa 范围内,延伸率和断面收缩率分别在 3.5% ~ 6.0% 和 3.0% ~ 4.5% 范围内。与表 1 给出的纵向性能相比,横向强度和塑性均发生明显下降,拉伸强度和屈服强度平均值

分别降低了 82 MPa 和 48 MPa,延伸率和断面收缩率平均值分别降低了 2.7% 和 3%,可见大直径棒材经 T4 热处理后也表现出一定程度的各向异性。

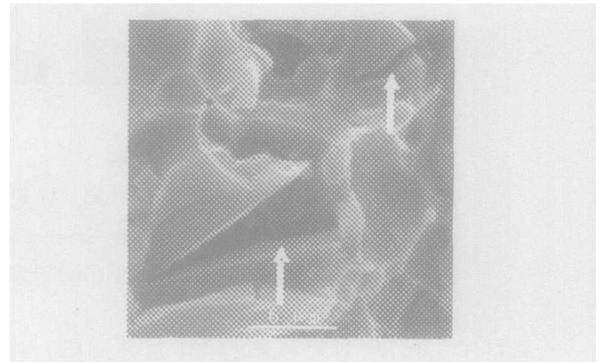


图 5 15% SiC_p/Al 复合材料拉伸试样断口 SEM 照片

Fig 5 Scanning electron micrographs of tensile fracture surface of 15vol% SiC_p/Al composites at T4 status

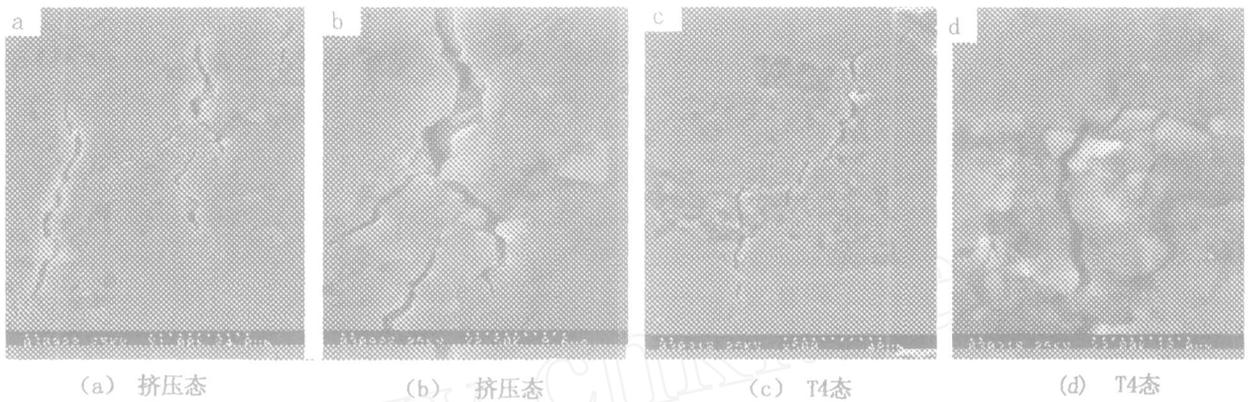


图 6 15% SiC_p /Al 复合材料动态拉伸 SEM 照片

Fig 6 Scanning electron micrographs of dynamic tensile specimen of 15vol% SiC_p /Al composites

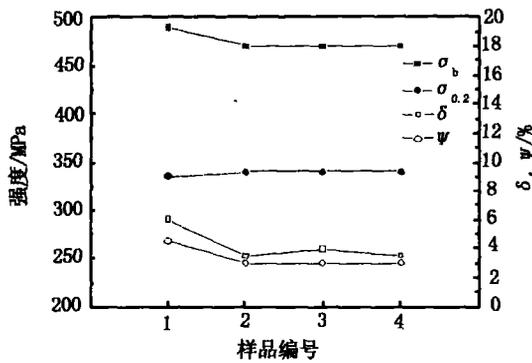
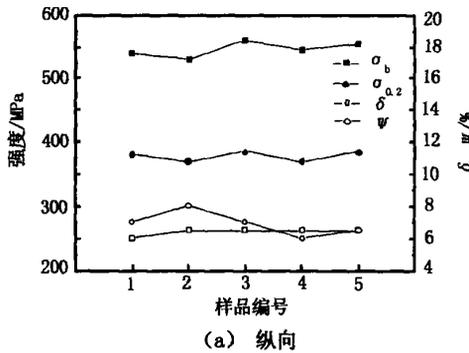


图 7 T4 态 15% SiC_p /Al 复合材料棒材的横向力学性能

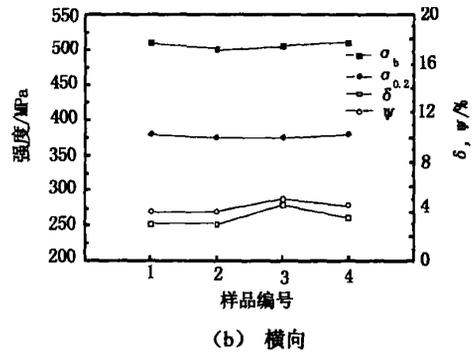
Fig 7 Transverse mechanical properties of 15vol% SiC_p /Al composite billets at T4 status



(a) 纵向

3.3 锻造后力学性能

图 8 示出了锻造后复合材料的力学性能。从图中可见,与表 1 给出的棒材纵向性能相比,锻造后复合材料的强度和塑性略有下降;与表 1 给出的棒材横向性能相比,锻造后复合材料的塑性基本没有变化,而强度得到较大幅度的提高,特别是屈服强度从锻造前的 339 MPa 提高到 378 MPa,增加了 39 MPa。这表明锻造工艺有利于提高复合材料的横向性能。分析图 8 和表 1 的纵向和横向性能可见,纵向和横向的屈服强度均达到了 378 MPa,拉伸强度的纵、横向差也减小,表明锻造加工方式有利于消弱热挤压工序带来的材料各向异性。



(b) 横向

图 8 锻造后 T4 态 15% SiC_p /Al 复合材料的力学性能,

Fig 8 Mechanical properties of forged 15vol% SiC_p /Al composite billets at T4 status

3.4 疲劳性能

图 9 示出了棒材的高周旋转弯曲疲劳性能,从图中可以看出,该材料的旋转弯曲疲劳强度在 250

~290 MPa 范围内,表明该复合材料具有较高的疲劳性能。图 10 给出了旋转弯曲疲劳断口 SEM 照片,从图中可见,断口上存在大量韧窝并有部分 SiC

颗粒断裂现象,与图 4(b)给出的拉伸断口类似,呈韧性断裂。

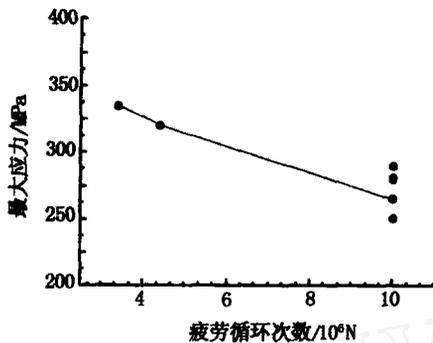


图 9 15% SiC_p / Al 复合材料棒材的旋转弯曲疲劳性能 (T4 态)

Fig 9 Rotating bend fatigue properties of 15vol% SiC_p / Al composite billets at T4 status

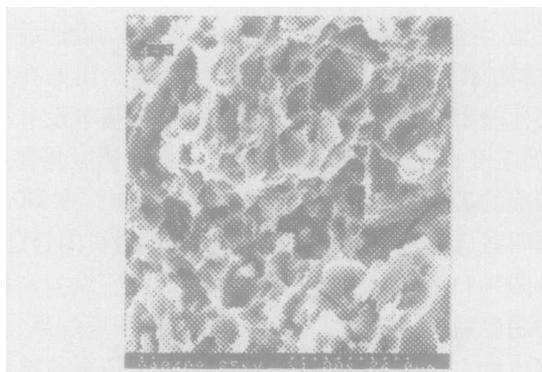


图 10 15% SiC_p / Al 复合材料旋转弯曲疲劳断口 SEM 照片

Fig 10 Scanning electron micrographs of rotating bend fatigue fracture surface of 15vol% SiC_p / Al composite

3.5 其他性能

表 2 示出了 15% SiC_p / Al 复合材料的其他性能的测试结果。可见,该复合材料具有接近铝合金的密度,远高于铝合金的弹性模量,良好的韧性。

表 2 15% SiC_p / Al 复合材料的性能

Tab 2 Properties of 15vol% SiC_p / Al composite

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	HB _{2.5/187.5/30}	E / GPa	$K_{IC} / \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$K_{IU} / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$
2.784	169	97.5	25	62.5

4 结论

(1) 采用粉末冶金法制备的 300 mm 的 15% SiC_p / Al 复合材料坯锭经热挤压、锻造后,材料具有优异的综合性能,弹性模量在 97 GPa,拉伸强度保持在 550 MPa 的水平下,延伸率仍高达 7% 左右,旋转弯曲疲劳强度在 250 ~ 290 MPa 范围内,断裂韧性 K_{IC} 为 25 MPa·m^{1/2},冲击韧性 K_{IU} 为 62.5 kJ/m²。有望成为航空航天领域重要的结构材料。

(2) 采用粉末冶金法制备的大尺寸复合材料的综合性能好,分散性小、质量稳定可靠。

(3) 与棒材挤压态相比, T4 态复合材料拉伸强度和屈服强度分别提高了 66.7% 和 100%,但塑性保持在同一水平。断口观察表明,挤压态复合材料以基体韧性断裂为主要形式,而 T4 态复合材料除了基体韧性断裂外,还存在 SiC 颗粒断裂现象。

(4) 挤压棒材的纵向和横向性能存在一定程度的差别,材料横向强度和塑性明显低于纵向。锻造工艺有利于提高材料的横向强度,降低挤压工艺带来的纵向和横向性能的差别。

参考文献

- Geiger A L, Walker J A. The processing and properties of discontinuously reinforced aluminum composites JOM, 1991; (8): 8 ~ 15
- Maruyama B, Hunt W H. Discontinuously reinforced aluminum: current status and future direction JOM, 1999; (11): 59 ~ 61
- Jerome P. Commercial success for MMCs PowderMetallurgy, 1998; 41(1): 25 ~ 26
- AMC. Leading edge MMCs and powder materials PowderMetallurgy, 1997; 40(2): 102 ~ 103
- Mckimpson M G, Pohlentz E L, Thompson S R. Evaluating the mechanical properties of commercial DRA. JOM, 1993; (1): 26 ~ 29

(编辑 任涛)