

喷射沉积 6061Al/SiC_p 复合材料 的组织与性能^①

张 豪 陈振华 孙 亦 陈 刚 黄培云
(中南工业大学非平衡材料科学与工程研究所, 长沙 410083)

摘 要 研究了 6061Al/SiC_p 颗粒增强复合材料的喷射沉积+ 热挤压工艺及材料的组织特征与力学性能。喷射沉积工艺可以获得增强颗粒均匀分布, 无界面反应的大尺寸复合材料锭坯, 实验锭坯尺寸达 d 200 mm × 250 mm, 热挤压工艺进一步使锭坯致密, 增强颗粒分布改善。挤压材料组织细小, 过饱和度大, 析出相细小、分布弥散, 峰时效时间约为传统制度的一半, 且力学性能极大地改善, 可达 $\sigma_b = 439$ MPa, $\sigma_{0.2} = 409$ MPa, $\delta = 10.4\%$ 。

关键词 喷射沉积 复合材料 铝合金 碳化硅

中图法分类号 TG249.9

颗粒金属基复合材料具有优良的综合性能, 如高比强度、高比刚度、高弹性模量、高耐磨性、低热膨胀率和各向同性, 还可在一定范围内根据使用要求选择强化相的种类、体积分数或形貌等参数来调整材料综合性能, 同时由于比连续纤维增强金属基复合材料的制备成本低得多, 因而, 这类材料在许多工业领域内满足了对于材料性能越来越高的要求, 相关研究亦迅猛开展^[1]。

现有的制备工艺主要有传统铸造, 半固态搅拌铸造及粉末冶金方法, 存在的主要问题有: 铸造工艺中颗粒与基体发生严重的界面反应, 难以均匀混合, 而粉末冶金工艺不能制备大件等。这使得实用的颗粒金属基复合材料的成本高, 综合性能优势不能充分发挥。喷射沉积工艺(SD)能在很大程度上避免了上述问题, 成为颗粒金属基复合材料的新型制备方法^[2]。本文采用多层喷射沉积技术制备 6061Al/SiC_p 复合材料锭坯, 研究了后续挤压工艺及相关的组织与性能。

1 实验过程

配制名义成分为 Al-1.0Mg-0.6Si-0.30Cu-0.20Cr 的 6061Al 合金, 选用平均粒度为 13.6 μm 的 α 型 SiC 颗粒, 在自制喷射沉积装置^[3]上制备 6061Al/10% (质量分数) SiC_p 复合材料锭坯, 锭坯尺寸为 d 200 mm × 250 mm, 详细的工艺参数见文献^[4]。锭坯在适当加工后进行 25:1 的热挤压。热处理在 0.5 级精度的电炉中进行, 固溶温度为 530 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 1 h, 时效温度为 175 $^{\circ}\text{C}$ 。

材料的拉伸力学性能在 INSTRON 电子材料试验机上测试, 其余检测分别在光学金相显微镜、扫描电镜和 X 射线光谱仪上进行。

2 结果与分析

2.1 喷射沉积锭坯的显微组织

冷却条件是影响喷射沉积锭坯组织的最主

① 国家“九·五”科技攻关项目 收稿日期: 1997-10-15; 修回日期: 1997-11-27

张 豪, 男, 27 岁, 博士研究生

要因素，随着冷却速率的增大，组织不断细化，而同时致密度会不同程度地有所下降。对比图 1 中的沉积坯浸蚀显微组织可以发现，在冷速较慢的内部区域孔隙很少，呈等轴晶形貌，平均晶粒度约为 15 μm，SiC 颗粒分布在晶界；而在冷速较高的边缘孔隙多，原始颗粒边界大量存在，有断裂的枝晶，SiC 颗粒较少，这表明过快的冷却使得组织的补缩能力急剧下降，影响致密度、材料收得率和 SiC 颗粒的捕获率，选择适当的工艺条件可以获得致密

细小的组织。

加入室温的 SiC 颗粒显著影响基体冷却过程。在理想的基体合金喷射沉积工艺条件下，SiC 颗粒的加入吸收了大量热量，导致材料致密度下降，如图 2(a)。适当增加雾化温度和液流流率，可以显著提高致密度，并使 SiC 颗粒/基体界面结合牢固，且不发生严重脆性界面反应，如图 2(b)。SiC 颗粒的加入对喷射沉积坯组织的细化主要有两个原因：(1) 吸取基体热量，提高冷却速率；(2) 提供非均匀形核

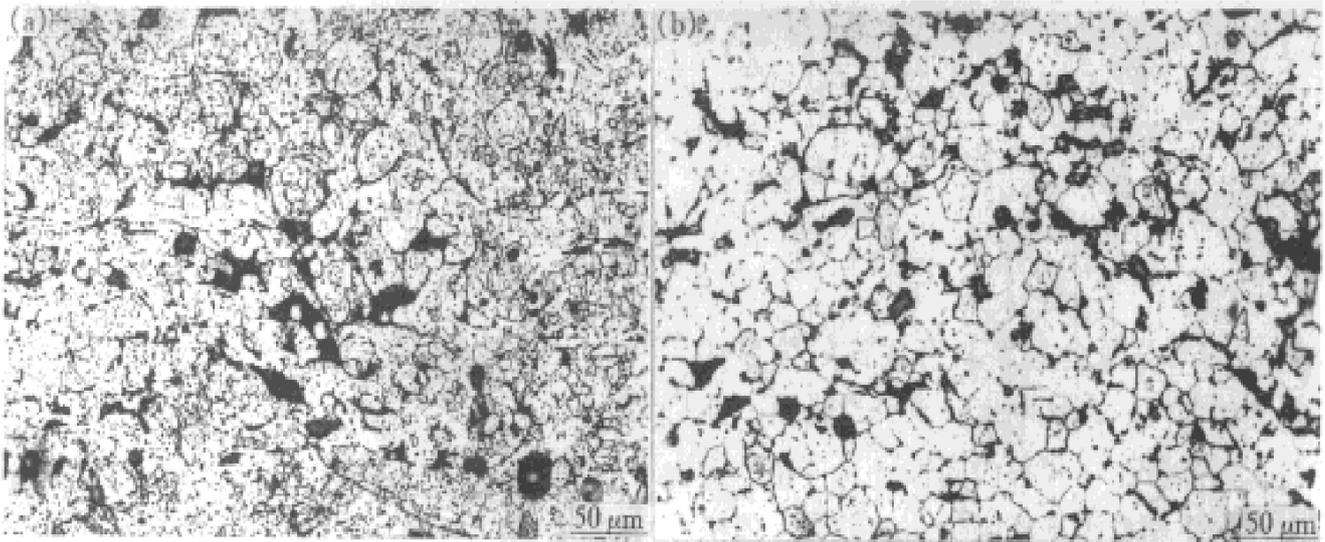


图 1 沉积坯的浸蚀显微组织

Fig. 1 Etched microstructures of spray deposits

(a) —Outer zone; (b) —Inner zone

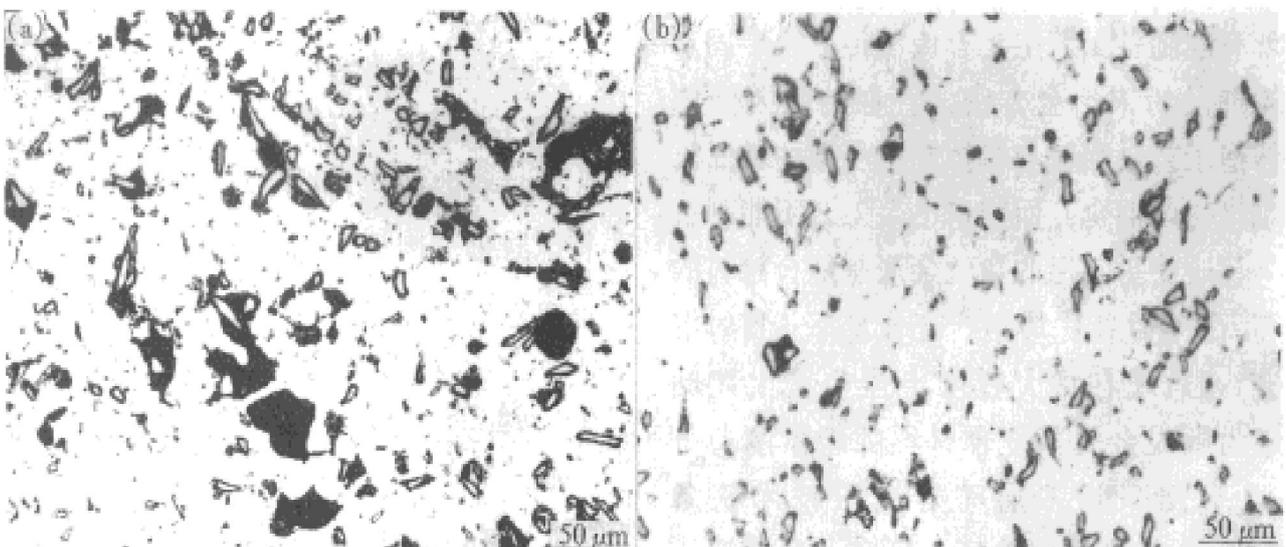


图 2 SiC 颗粒在 6061Al 基体中的分布

Fig. 2 Distribution of SiC particles in matrix

(a) —Low liquid content; (b) —High liquid content

条件, 增大形核率^[5]。在与图 1 相同的工艺条件下 6061Al 合金喷射沉积坯内部的平均晶粒为 27 μm, 比图 1 组织要粗大。

在喷射沉积过程中, SiC 颗粒的捕获机制不同于基于传统凝固前沿与陶瓷颗粒相互作用理论提出的捕获机制^[2]。Gupta^[6]等人的工作表明传统理论判明的不能捕获的情形在喷射沉积过程中却实现了捕获, 据此提出了(a)机械作用机制和(b)枝晶碎块或已凝固液滴阻塞机制。这些机制大大改善了 SiC 颗粒在基体中的分布状态, 避免 SiC 颗粒与铝合金基体在铸造时易于发生的偏聚现象。

2.2 挤压及热处理对组织的影响

挤压消除了绝大部分孔隙, 是效果明显的致密化工艺, 挤压进一步增强了 SiC 颗粒与基体的结合, 如图 3 所示。在 480 °C 热挤压过程

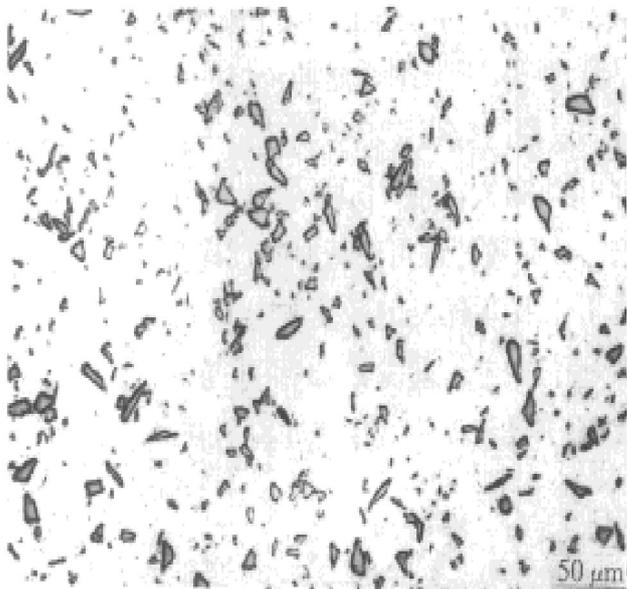


图 3 6061Al/SiC 挤压后 SiC_p 颗粒在基体中的分布

Fig. 3 Distribution of SiC_p in as-extruded 6061Al/SiC_p composites

中, SiC 颗粒与基体的界面未发生明显界面反应, 界面处 Si 元素线扫描未出现化学反应特征, 如图 4 所示。SiC 颗粒在喷射沉积过程中的局部轻微聚集在挤压时发生的物质流动中得以分散, 长条状的 SiC 颗粒的长度方向将沿挤压方向择优取向, 图 5(a) 是挤压后材料纵截面的浸蚀显微组织, 反映了上述现象。此外还表明没有发生明显的再结晶, 浸蚀后呈现大量

的细小蚀坑, 挤压流线不明显。图 5(b) 是挤压后横截面浸蚀显微组织, 难以浸蚀出完整的晶界。

6061Al 合金是热处理强化铝合金, 其强化相主要为 Mg₂Si, 采用常用热处理制度, 对 6061Al/SiC_p 挤压后的试样进行了热处理, 图 6 是 530 °C 固溶 1 h 后, 在 175 °C 时效 5 h 后的横截面典型金相组织, 图 7 是浸蚀后同一样品的扫描电镜形貌。能谱分析表明图 7 中圆形黑区是富溶质相, 可能是 Mg₂Si 相, 由于体积含量较少, 在 XRD 谱线上不能反映出来。热处理促进了溶质的聚集和析出, 使得晶界易于浸蚀, 见图 6。析出相呈近球形, 且弥散、均匀分布, 其粒度在 2 μm 以下。对同样热处理条件下的样品进行 XRD 物相分析, 结果如图 8(a) 所示。为了便于比较, 取同样样品重新熔化, 取内部区域进行 XRD 相分析, 如图 8(b) 所示。图 8(a) 的 α-Al 峰与 8(b) 相比发生宽化, 没有明显的 Si 相和 Mg₂Si 相, 而 8(b) 中明显存在 Si 相和 Mg₂Si 相, 这些结果表明挤压热处理后材料中基体 α-Al 相过饱和度大。

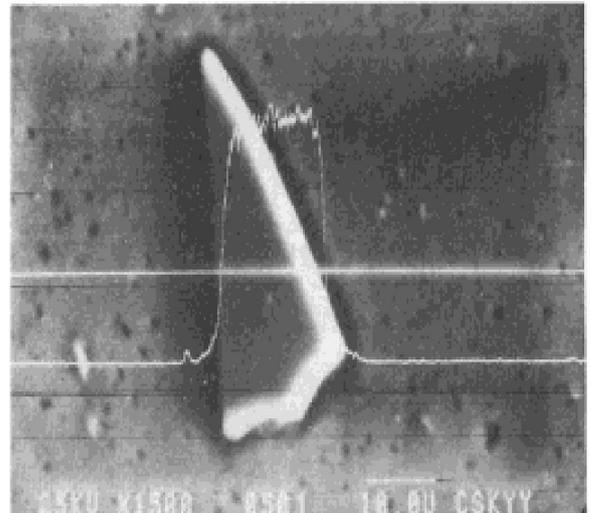


图 4 SiC/基体界面 Si 元素线扫描

Fig. 4 Si line scanning of SiC_p/matrix interface

2.3 断口组织

挤压棒材固溶后经过 5 h 人工时效后试样延伸率为 10.4%, 其断口形貌如图 9 所示。根据宏观和显微断口可判定该样品为韧性断裂。显微裂纹在析出相及 SiC 颗粒与基体的界

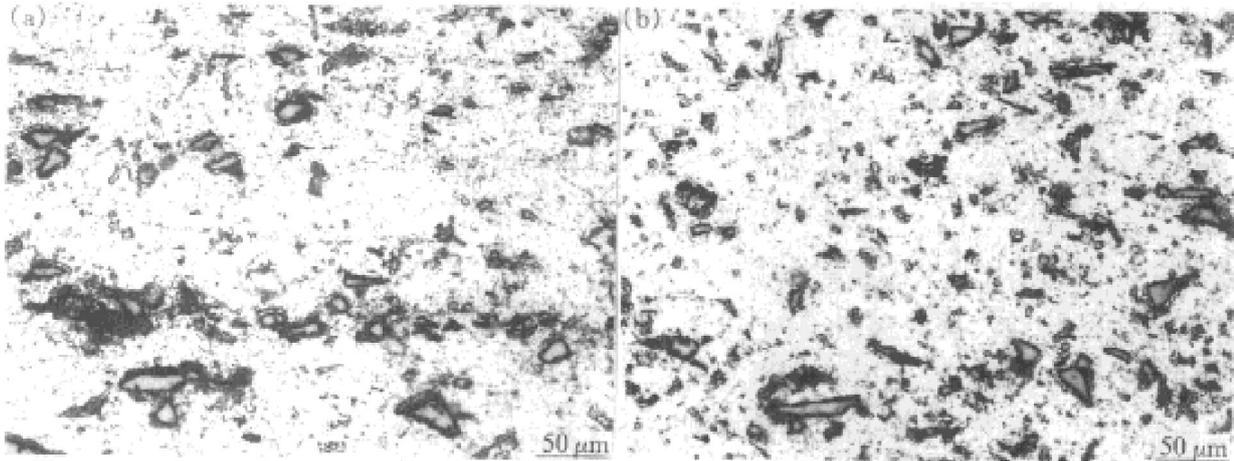


图5 6061Al/SiC_p 挤压后浸蚀显微组织

Fig. 5 Microstructures of as-extruded 6061Al/SiC_p composites

(a) —Vertical section; (b) —Cross section

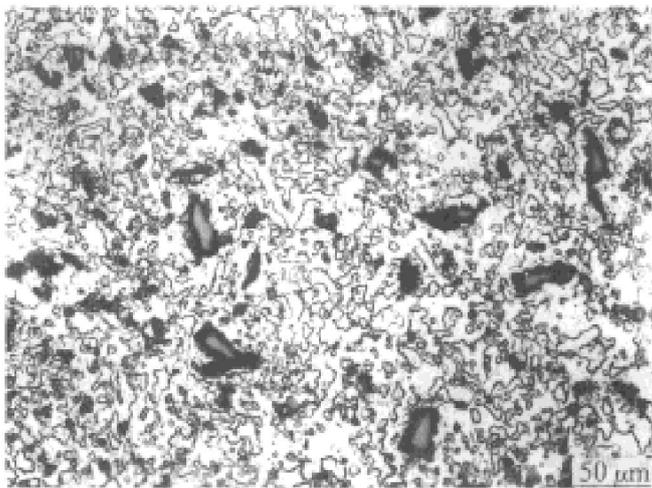


图6 固溶后时效5 h 的横截面显微组织

Fig. 6 Microstructure of cross section after aging 5 h

面上产生，并逐渐沿拉伸方向伸长为空洞，空洞合并成塑坑，并最终导致断裂。析出相分布弥散、粒度细，形成的塑坑细小、密集，如图9。SiC颗粒钉扎在基体上，强化了材料，少数SiC甚至发生了断裂，如图9(b)所示。部分SiC颗粒在拉伸时被拔出，留下滑坑，如图9(a)所示。图9(c)有明显断裂的SiC颗粒。这些分析表明SiC颗粒与基体结合牢固，且没有脆性界面反应，否则断裂将脆化，不会出现密集的析出相产生的细小塑坑。

2.4 力学性能

挤压后材料在 530 °C固溶处理 1 h，然后

在 175 °C时效，其力学性能如表 1 所示。材料的拉伸强度在时效时间达 2 h 后迅速接近峰值，在 2~ 8 h 之间时效，拉伸强度基本持平，进一步延长时效时间，拉伸强度有下降趋势。其峰时效强度比传统铸造+ 挤压工艺制品高出约 50%。喷射沉积 6061Al/ 10% SiC_p 复合材料的时效特性可能与时效过程中 Mg₂Si 的迅速析出及其优良的粒度和分布状态有重要关系。导致这一现象的原因可能有：(1) 基体成分过饱和度大，析出过程的热力学驱动力

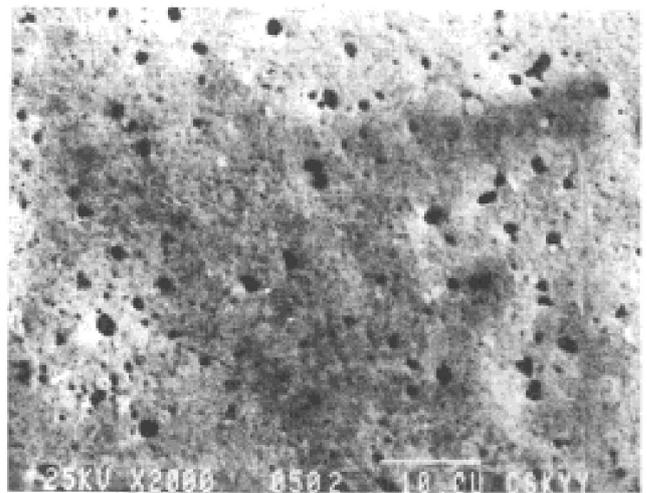


图7 6061Al/SiC_p 固溶+ 5 h 时效后横截面显微组织

Fig. 7 Microstructure of cross section of 6061Al/SiC_p after aging 5 h

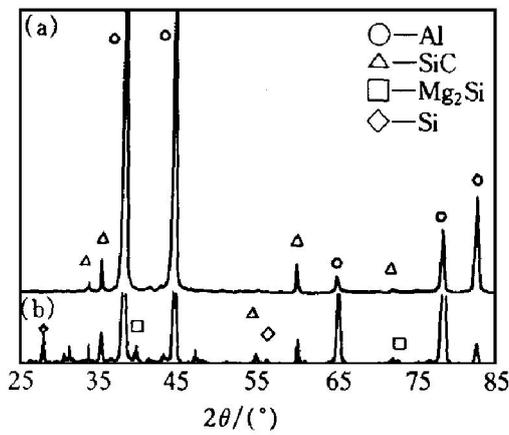


图 8 6061Al/10% SiC_p 的 XRD 谱

Fig. 8 XRD of 6061Al/10% SiC_p

(a) —Solution+ aging 5h; (b) —Casting

表 1 不同时效时间对应的
6061Al/10% SiC_p 力学性能

Table 1 Mechanical properties vs different
aging time of 6061Al/10% SiC_p

Aging time/h	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
1	379	312	14.4
2	433	390	11.1
3	424	388	12.0
4	430	396	10.0
5	439	409	10.4
6	433	402	10.3
7	438	404	10.3
8	431	401	10.9
9	418	384	10.0
10	414	378	12.7
6061Al/ 11.7% SiC _p ^[7]	339	290	7.1
6061Al ^[8] Cast+ extrusion/T6	290	255	17

大; (2) SiC 颗粒的存在增大了位错密度, 有利于析出相析出; (3) 细小的晶粒导致大量的晶界, 为析出相析出提供了择优形核位置。

这一时效特征有利于缩短制备周期, 降低制备成本。实验中所获力学性能超过国际同类产品, 显示出实验工艺的优越性。

3 结论

通过上述分析可得出如下结论:

(1) 喷射沉积工艺可以制备增强颗粒分布均匀、与基体结合良好的颗粒复合材料, 与其它工艺相比, 有更大的产率, 更短的制备周

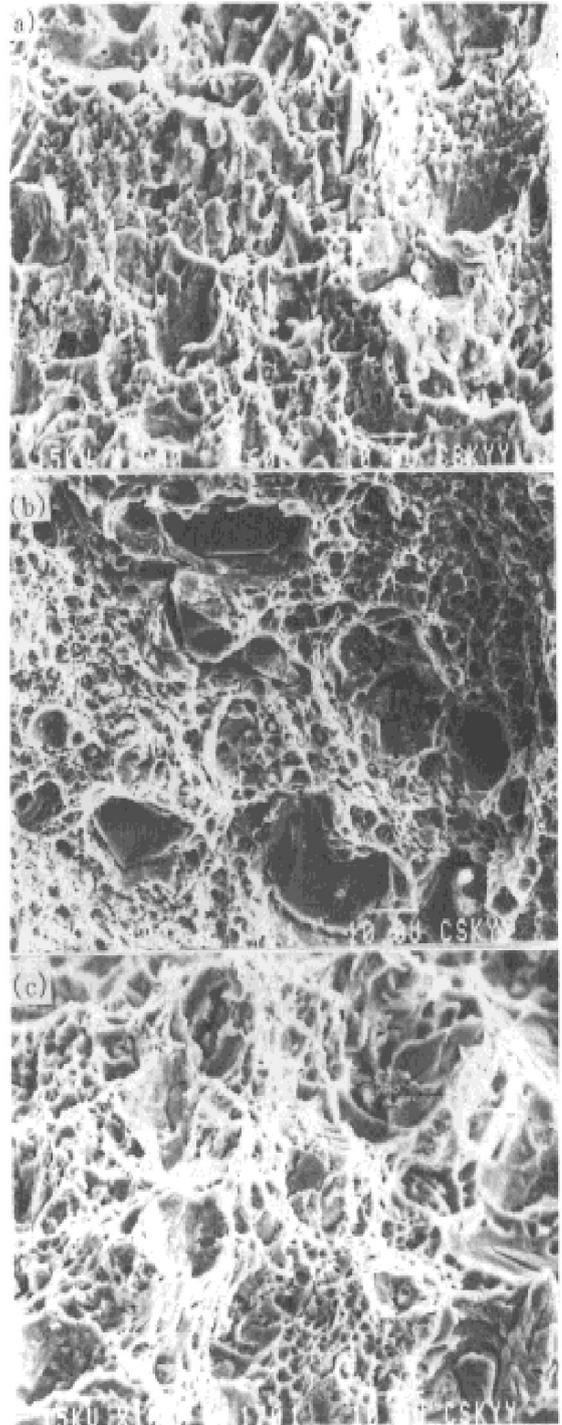


图 9 挤压6061Al/10% SiC_p 在 530 °C 固溶
1 h+ 175 °C 时效 5 h 后拉伸断口形貌

Fig. 9 Tensile fracture of extruded
6061Al/10% SiC_p heat treated with

530 °C/1 h solid-soluting+ 175 °C/5 h aging

(a) —SiC particles pull out;

(b) —Nailing SiC particles;

(c) —Fine dense dimple and broken SiC particles

期,并能生产大尺寸材料;

(2) 挤压工艺是喷射沉积复合材料坯可行的致密化工艺,能进一步改善增强颗粒分布状态,并增强颗粒/基体界面强度,不发生明显的界面反应。挤压后复合材料组织细小,基体过饱和度明显;

(3) 基体自生增强相在时效过程中迅速析出,颗粒细小,弥散分布,在拉伸过程中和外加颗粒共同增强基体;

(4) 喷射沉积-挤压 6061Al/10% SiC_p 复合材料拉伸强度比基体高出约 50%,该工艺路线是制备大尺寸、高性能复合材料的成本较低的途径。

REFERENCES

1 Zhang Shuying(张淑英) *et al.* Mater Lett(材料导

报), 1996, 2: 66.

2 Zhang Jishan(张济山), Chen Guoliang(陈国良) *et al.* Mater Sic & Engineering(材料科学与工程), 1995, 13(1): 21.

3 Chen Zhenghua(陈振华), Zhang Hao(张豪), Chen Gang(陈刚) *et al.* Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(4): 61.

4 Chen Zhenghua(陈振华), Jiang Xiangyang(蒋向阳), Yang Fuliang(杨伏良) *et al.* Trans Nonferrous Met Soc China, 1995, 5(4): 66.

5 Zhang Q *et al.* Acta Mater, 1996, 44(9): 3693.

6 Gupta M *et al.* Metall Trans A, 1992, 23(A): 845.

7 Wu Y *et al.* JOM, 1991, 8: 16.

8 Li Zhengxia(李振夏). Handbook of Worldwide Non-ferrous Metals Composition and Properties(世界有色金属材料成分与性能手册). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 839.

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF SPRAY DEPOSITION 6061Al/ SiC_p COMPOSITES

Zhang Hao, Chen Zhenghua, Sun Yi, Chen Gang and Huang Peiyun
*Institute of Non-equilibrium Materials Science and Technology,
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China*

ABSTRACT Spray deposition and hot extrusion process for producing 6061Al/SiC_p composites and the material's microstructure feature and mechanical properties were studied. As-sprayed large scale composites have uniformly distributed reinforcing particles, and there is no apparent interface reaction. Hot extrusion can densify billets and improve the distribution of particles. As-extruded microstructure is fine and of excess solution, with fine and scattered precipitates. The peak aging time is half that of traditional ones. The mechanical properties improve greatly, and are up to $\sigma_b = 439$ MPa, $\sigma_{0.2} = 409$ MPa, $\delta = 10.4\%$.

Key words spray deposition composites mechanical properties silicon carbide

(编辑 朱忠国)