

SiC_p/Al-Fe-V-Si 的板材成形过程中 显微组织和力学性能的演变

贺毅强¹, 陈振华²

(1. 淮海工学院 机械工程学院, 连云港 222005;

2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 采用多层喷射沉积工艺制备 SiC_p/Al-Fe-V-Si 复合材料, 并分别通过挤压后轧制和热压后轧制工艺制备了板材, 分析了复合材料不同状态下的显微组织、物相和力学性能, 并研究在轧制过程中复合材料密度和硬度的变化规律。结果表明: 挤压后轧制和热压后轧制均能有效致密沉积坯。与挤压后再轧制相比, 热压后再轧制材料组织更均匀细小, 力学性能更优秀。挤压后再轧制板材抗拉强度为 535 MPa, 伸长率为 4.0%, 压下 25%前, 挤压坯的密度和硬度随之降低; 当压下 25%时, 密度和硬度升高。热压后轧制板材抗拉强度达 580 MPa, 伸长率达 6.3%, 压下量低于 10%时, 热压坯密度与硬度随压下量升高; 压下 10%至 40%, 密度和硬度下降; 压下量高于 40%后, 密度与硬度升高。对于两种材料, 随着压下量的增加, 轧制过程中密度与硬度的变化规律都一致。

关键词: 耐热铝合金; 复合材料; 喷射沉积; 板材成形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Microstructure and mechanical property evolution of SiC_p/Al-Fe-V-Si composite during sheet forming process

HE Yi-qiang¹, CHEN Zhen-hua²

(1. College of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract SiC_p/Al-Fe-V-Si composite prepared by multi-layer spray deposition was densified by rolling process after extruding and rolling after pressing. The microstructure, phases and mechanical properties of the composite under different conditions were analyzed. And the density and hardness evolution of the composite during rolling process were investigated. The results show that the composite deposits can be densified and strengthened efficiently by rolling processes after extruding and pressing separately. More homogeneous, finer microstructure and more excellent mechanical properties of the composite are obtained by rolling process after pressing than by rolling process after extruding. The tensile strength and elongation of the composite as-rolled after extruding are 535 MPa and 4.0%, both of hardness and density of the composite as-extruded decrease firstly when reduction is below 25% and then raise during rolling process, which agrees with density evolution. The tensile strength and elongation of the composite as-rolled after pressing are 580 MPa and 6.3%. And those of the as-pressed composite firstly when reduction is below 10%, then decrease until the reduction reaches 40%, and finally rise during rolling process. The hardness varies as density does with reduction increases during rolling process for both of the composites.

Key words: heat resistant alloy; spray deposition; composite; sheet forming; microstructure; mechanical property

1986 年, 美国 Allied-Signal 公司的 SKINNER 等^[1]利用平流铸造研制了 Al-Fe-V-Si 合金, 该合金具有较高的室温和高温强度、较高的刚度、良好的断裂韧性等优良的综合性能。为了进一步提高该系合金的力学性能, 人们尝试在该系合金中加入 SiC 颗粒及晶须^[2-3]、 $\text{Al}_{18}\text{B}_4\text{O}_{33}$ ^[4]以及原位生成的 TiC 等^[5], 提高材料的室温、高温强度和杨氏模量。射沉积技术作为一种新型近净成形工艺, XIAO 等^[6]用其来制备耐热铝合金及其复合材料, 获得了力学性能良好的材料。TANG 等^[7]研究了 Al-Fe-V-Si 合金与其过喷粉末的喷射共沉积, 提高了合金的冷却速率。为致密沉积坯, 改善材料的力学性能, 众多学者作了大量有益的探索, 采用的致密方法主要有锻造、挤压、轧制等^[8-12], 但对于 $\text{SiC}_p/\text{Al-Fe-V-Si}$ 复合材料沉积坯的致密化研究较少。CHEN 等^[13-14]和贺毅强等^[15-17]采用多层喷射沉积工艺制备 SiC 颗粒增强铝基复合材料, 通过挤压对复合材料进行致密, 并系统研究了其制备工艺、显微组织、力学性能及热稳定性。但因挤压容易导致复合材料中 SiC 颗粒分布的不均匀, 而降低了材料的力学性能, 且对设备吨位要求高, 无法致密大型坯料。而直接采用锻造和轧制工艺则容易导致复合材料的开裂。因此, 有必要采用一种新的工艺来致密复合材料沉积坯。

本文作者采用热压后再轧制的工艺有效地致密了复合材料沉积坯, 改善挤压工艺导致的 SiC 颗粒分布不均匀的问题, 同时通过热压可以解决因为设备限制难以制备大尺寸板材的问题。系统研究了复合材料在致密化过程中显微组织和物相的演变, 分析了致密化过程中材料致密度与力学性能的变化规律, 以评估热压后再轧制工艺制备 $\text{SiC}_p/\text{Al-Fe-V-Si}$ 板材的可行性, 并对工艺参数进行优化, 对 $\text{SiC}_p/\text{Al-Fe-V-Si}$ 的致密与加工具有重要参考意义。

1 实验

1.1 原料及成分设计

本试验以名义成分为 $15\text{SiC}_p/\text{Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si}$ 和 $15\text{SiC}_p/\text{Al-10.0Fe-1.3V-2.0Si}$ (体积分数, %)的复合材料为研究对象, 基体合金中的 Fe 和 V 以 Al-40Fe 和 Al-40Fe-10V 中间合金的形式加入。 SiC 颗粒为 $\beta\text{-SiC}$, 平均粒径约为 $10\mu\text{m}$, 在多层喷射沉积圆坯制备装置上制备复合材料沉积坯。

1.2 塑性加工

将沉积锭坯车削成直径为 155mm 的圆柱形坯

料, 然后在 1025T 挤压机上挤压和热压, 锭坯加热温度为 480°C , 保温 1h 。挤压后板材板厚 10mm , 挤压比为 11。热压后将热压坯垂直于热压方向锯成板坯, 板坯厚约 15mm 。然后将挤压板材和热压坯料分别进行多道次热轧, 坯料温度为 480°C , 轧制前保温 1h , 道次间保温时间 20min , 采用石墨+机油润滑, 轧速为 0.43m/s 。

1.3 性能检测

常温拉伸试验在 CSS-44100 型电子万能试验机上进行, 拉伸速率为 0.5mm/min , 拉伸方向平行于板材轧制方向。金相样品用 Keller 试剂浸蚀后在 XJL-03 大型金相显微镜下进行组织观察。在 JSM-5600 扫描电镜下观察拉伸试样断口形貌。用 H800 型透射电镜观察弥散粒子及晶粒的变化。在 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计上测试硬度, 并采用 X 射线衍射仪进行物相分析, 采用阿基米德法测量试样密度。

2 结果与分析

2.1 SiC 颗粒分布

复合材料中 SiC 颗粒的形态和分布随着加工工艺和加工状态变化而发生变化。图 1 所示为挤压比为 11:1 时 $15\text{SiC}_p/\text{Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si}$ 沉积坯在加工过程中金相组织的演变。从图 1(a)可以看出, 沉积坯中存在较大的孔洞, 经密度测量其相对致密度约为 85%。经过挤压的大剪切变形, 粉末颗粒间的原始边界消失, 孔洞基本消失, 获得了致密度较高的复合材料(图 1(b))。但由于挤压过程中 SiC 颗粒与基体合金的流动性差别, SiC 颗粒易聚集板材板面, 且之后的多道次轧制并不能消除 SiC 颗粒的不均匀分布(图 1(d))。热压能在一定程度上致密沉积坯料, 改善材料的成形能力, 从图 1(c)可以看出, 沉积颗粒被压扁, 但由于剪切作用小, 颗粒之间的孔洞未能完全消除。与挤压不同的是, 热压能保留沉积态下 SiC 颗粒的均匀分布, 且通过后续的多道次轧制, 可以达到板材的致密且保留 SiC 颗粒的均匀分布(图 1(e))。沉积态和热压态中的 SiC 颗粒呈无方向分布, 而轧制态的板材中 SiC 颗粒长轴方向都与轧制方向平行。在轧制过程中, 由基体的塑性变形导致 SiC 颗粒的转动与滑动, 使其长轴方向平行于挤压和轧制方向。ČADEK 等^[18]在研究也发现, 该复合材料中的 $\text{Al}_{13}(\text{Fe,V})_3\text{Si}$ 颗粒和 SiC 颗粒几乎都沿挤压方向排列, 且基体呈现出弱织构。

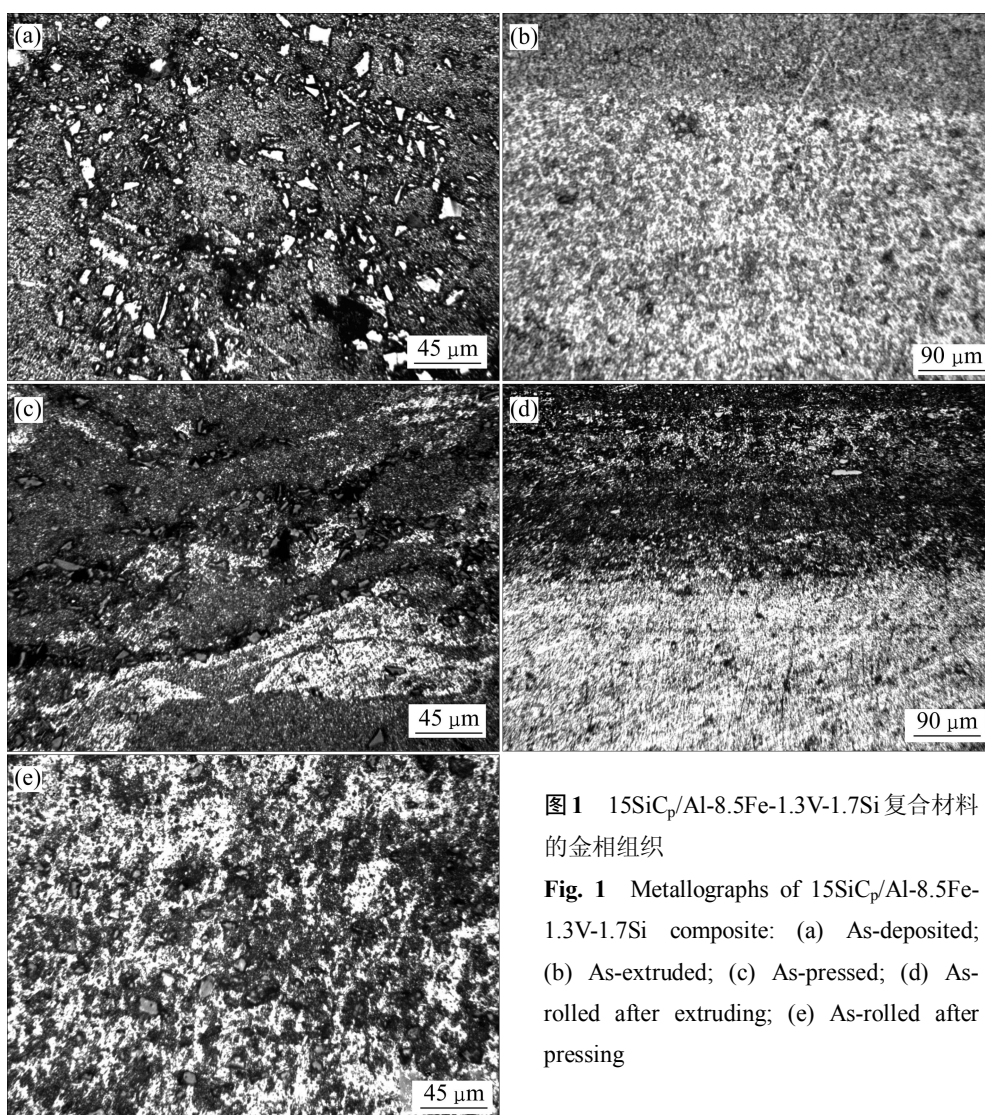


图1 15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 复合材料的金相组织

Fig. 1 Metallographs of 15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si composite: (a) As-deposited; (b) As-extruded; (c) As-pressed; (d) As-rolled after extruding; (e) As-rolled after pressing

2.2 弥散粒子

图2所示为15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si挤压坯和热压坯经多道次轧制后晶粒大小与弥散粒子的形状和分布。由图2可看出,沉积态复合材料的弥散粒子均匀细小,为30~60 nm,呈近球状,晶粒细小,约为300 nm(见图2(a))。经480 °C挤压后多道次轧制,弥散粒子长大至100~120 nm(见图2(b))。而经热压后再多道次轧制,弥散粒子长大程度小,约为80 nm(见图2(c))。因此,热压后,再轧制比挤压后再轧制更能保持显微组织的均匀细小。从图2(b)和(c)还可以看出,经过塑性变形后,弥散粒子大多分布在晶界上。CARREÑO等^[19]认为在晶界被弥散粒子钉扎住以前有轻微的移动,因此晶内很少有位错和弥散粒子,晶粒在加热过程中因受到弥散粒子的限制而不易长大。

2.3 加工过程中的X射线物相分析

致密化过程中是否发生由 α -Al₁₃(Fe,V)₃Si到

θ -Al₁₃Fe₄脆性相的转变对于判断致密化工艺特别是致密化温度是否合理十分重要。图3所示为不同状态下15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si的XRD谱。

由XRD分析可知,沉积态15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si复合材料的衍射峰主有 α (Al)、 α -Al₁₃(Fe,V)₃Si以及 β -SiC。而经过热挤压、热压以及后续的轧制等热加工工艺后, α -Al₁₃(Fe,V)₃Si相的衍射峰强度增强,没有出现明显的 θ -Al₁₃Fe₄脆性相衍射峰,这说明在热加工过程中并没有明显的 θ -Al₁₃Fe₄脆性相析出。在材料的热加工过程中,材料只发生形的变化,没有明显新相的产生。

2.4 轧制过程中的密度与硬度变化

15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si沉积坯经挤压和热压后再多道次轧制成板材,轧制过程中的密度变化规律如图4所示。从图4(a)可以看出,挤压坯在轧制过程中密度先下降后升高。挤压后材料密度为2.99 g/cm³,

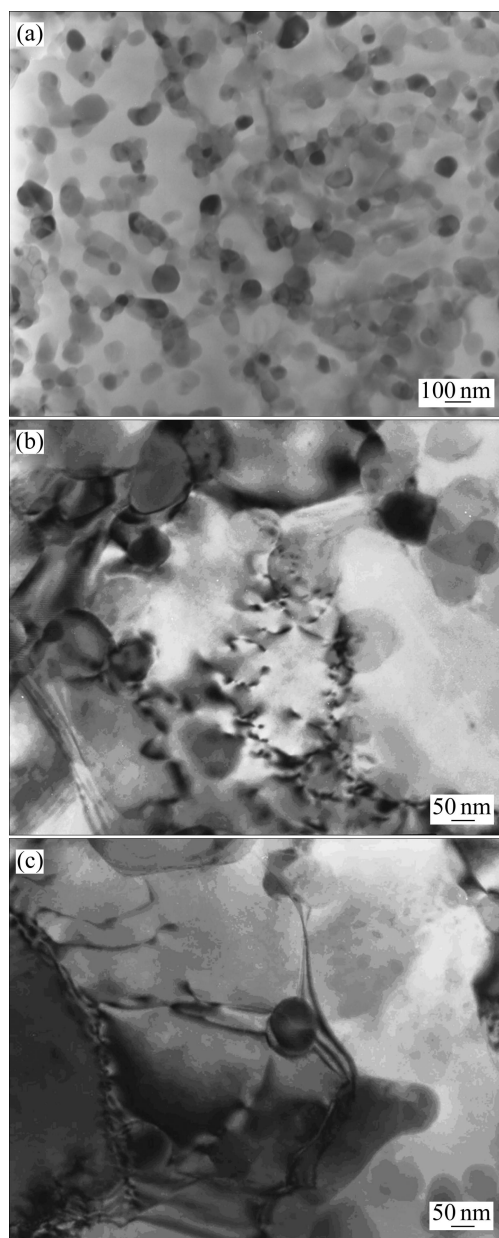


图 2 复合材料不同加工状态下的 TEM 像

Fig. 2 TEM images of composite on different conditions: (a) As-deposited; (b) As-rolled after extruding; (c) As-rolled after pressing

随着轧制压下量的增加, 密度降低, 压下量达 25% 时, 板材的密度最低, 为 2.98 g/cm^3 。压下量超过 25% 后, 板材密度又随着压下量的增加而升高, 压下量为 70% 时, 密度达 2.99 g/cm^3 。压下 80% 时, 密度逐渐稳定, 达到 3.00 g/cm^3 。与热挤压板坯不同的是, 由于热压致密后沉积颗粒之间的孔隙没有完全消除, 轧制初期, 密度呈上升趋势。当压下量超过 10% 后, 密度下降, 密度的最低点出现在压下量为 30%~40% 之间, 与挤压板坯料轧制相比, 其压下量延后了 10% 左右。压下量

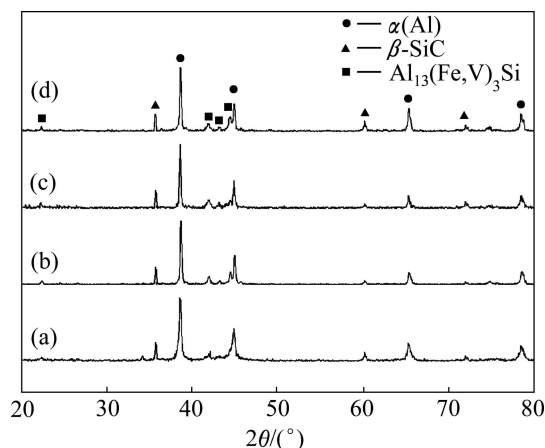


图 3 不同状态下 $15\text{SiC}_p/\text{Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si}$ 复合材料的 XRD 谱

Fig. 3 XRD patterns of $15\text{SiC}_p/\text{Al-Fe-V-Si}$ under different conditions: (a) As-deposited; (b) As-extruded; (c) As-pressed; (d) As-rolled after pressing

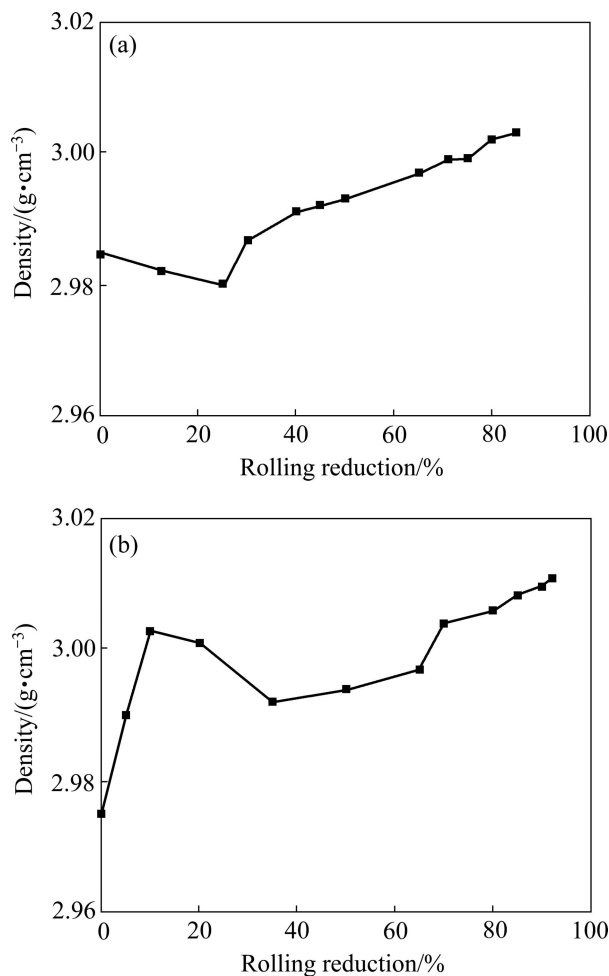


图 4 轧制过程中 $15\text{SiC}_p/\text{Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si}$ 的密度变化

Fig. 4 Density evolution of $15\text{SiC}_p/\text{Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si}$ during rolling process: (a) As-extruded; (b) As-pressed

达到 90%，材料基本致密。在轧制过程中出现的密度下降则与变成过程中 SiC 颗粒的滑动与转动造成 SiC 颗粒与基体间出现新的孔隙有关，当 SiC 颗粒长轴方向平行于轧制方向后，材料密度增加。

图 5 所示为轧制过程中复合材料的硬度变化曲线。从图 5 可以看出，挤压后的复合材料在轧制过程中的硬度变化曲线(图 5(a))与密度变化曲线(图 4(a))一致，也存在先下降后上升的变化规律。同样与 4(b)对应，压下量低于 10%时，硬度随着压下量的升高而升高(图 5(b))；当压下量超过 10%后，硬度也随压下量的升高而下降，最低点出现在压下量为 30~40%；当压下量高于 40%，硬度随着压下量的升高而升高，与密度的变化趋势一致。

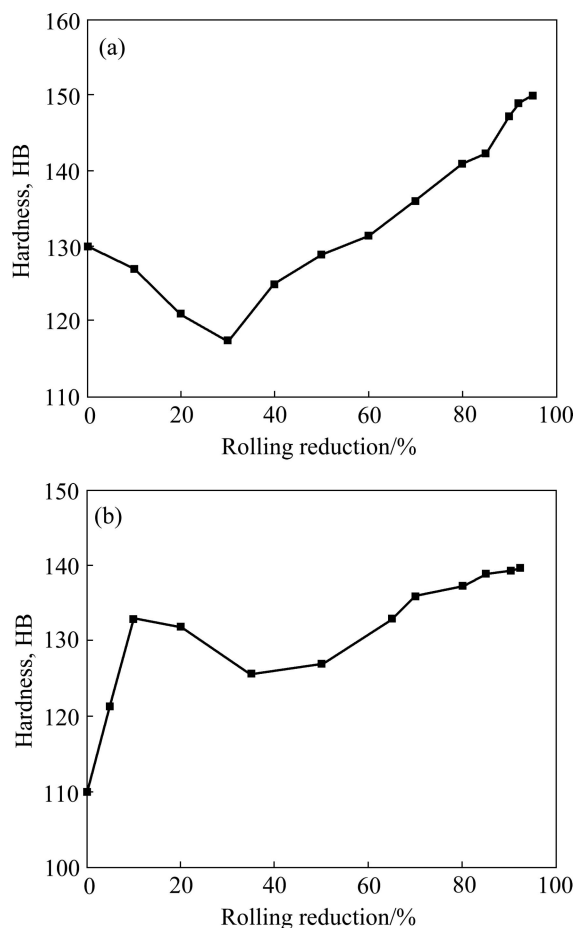


图 5 轧制过程中 15SiC_p/Al-10.0Fe-1.3V-2.0Si 的硬度变化
Fig. 5 Hardness evolution of 15SiC_p/Al-10.0Fe-1.3V-2.0Si during rolling process: (a) As-extruded; (b) As-pressed

从图 4 的密度曲线与图 5 中的硬度曲线变化规律可以看出，对于挤压坯和热压坯经轧制压下 10%后，由于 SiC 颗粒在基体中的转动造成 SiC 颗粒与基体结合处出现孔隙，而使密度和硬度下降。随着压下量的增

加，SiC 颗粒转动后其长轴方向平行于轧制方向，与基体界面结合逐渐紧密，密度和硬度逐渐增加。

由上可知，经过挤压后轧制和热压后轧制均能有效致密复合材料沉积坯，明显提高材料硬度，符合实验要求。材料的力学性能取决于其显微组织，密度则反映了显微组织的变化。因此，轧制过程中，随着压下量的增加，复合材料挤压坯和热压坯硬度与密度的变化规律一致。

2.5 拉伸性能

沉积态、热挤压态、热挤压后轧制及热压后轧制的 15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 室温拉伸性能如表 1 所列。

表 1 不同加工状态下的 15SiC_p/Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 复合材料的室温拉伸性能

Material	Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %
Deposit	160	—	0
As-extrude sheet	390	310	2.5
As-rolled after extruding sheet	535	485	4.0
As-rolled after pressing sheet	580	525	6.3

从表 1 可以看出，喷射沉积坯的力学性能差，经过挤压后力学性能大幅度提高，抗拉强度从 160 MPa 提高到了 390 MPa，提高 144%，伸长率提高到 2.5%。挤压后经多道次热轧，复合材料的抗拉强度达 535 MPa，伸长率为 4.0%；而通过热压致密后再多道次热轧后板材抗拉强度达 580 MPa，比挤压后经多道次热轧的抗拉强度提高 8.5%，伸长率也提高 58%。

金属基复合材料的力学性能取决于其显微组织，增强颗粒的分布与体积分数影响复合材料的断裂方式和断裂性能。从图 1 的显微组织可以看出，沉积坯料的沉积颗粒之间存在大量孔洞和裂纹，且 SiC 颗粒与基体结合不够牢固，因此导致沉积坯的强度低，且几乎没有塑性。挤压对沉积材料的致密效果好，力学性能有大幅提高。但由于挤压致密容易导致 SiC 颗粒在基体中分布不均匀。通过后续的轧制仍未能明显改善 SiC 表层聚集现象，SiC 颗粒集中的地方更容易导致应力集中，更易导致基体开裂、界面脱粘和 SiC 颗粒的断裂。最后的失效通常是由聚集的 SiC 颗粒之间的基

体开裂并迅速扩展而造成的。而通过热压致密后, 虽然坯料中还存在由喷射沉积工艺中喷嘴扫描造成的 SiC 颗粒成层状分布, 但通过后续热轧加工, 减少层间距离, 最终达到 SiC 颗粒在基体中的均匀分布, 有利于提高复合材料的力学性能。

此外, 基体弥散粒子和晶粒的大小是影响金属基复合材料力学性能的另一关键因素。热压后再轧制后基体的弥散粒子和晶粒尺寸小于挤压后再轧制基体的, 这可能由于挤压过程中积聚的能量以及挤压过程中由于塑性变形材料内部的摩擦导致材料温度升高, 导致晶粒和弥散粒子长大。由于弥散粒子的粗化导致强度下降, 强度与弥散粒子之间的关系如下:

$$\sigma_{0.2} = \varphi^{3/2} / r \quad (1)$$

式中: r 弥散粒子半径, m ; $\sigma_{0.2}$ 为合金的屈服强度, MPa ; φ 为弥散粒子的体积分数, %。因为热压后轧制复合材料弥散粒子比挤压后轧制的更加细小, 根据式 (1) 可以得出热压后再轧制复合材料的力学性能更好。

3 结论

1) 挤压后轧制和热压后轧制均能有效致密复合材料沉积坯, SiC 颗粒长轴方向平行于轧制方向。与挤压后再热轧相比, SiC_p/Al-Fe-V-Si 复合材料经热压后再轧制 SiC 颗粒分布更加均匀。挤压工艺容易导致 SiC 颗粒的分层与聚集, 而无法通过后续的多道次轧制消除。热压工艺无法完全致密复合材料, 但能保留喷射沉积坯中 SiC 颗粒的均匀分布, 通过后续的多道次轧制, SiC 颗粒分布均匀, 组织致密。

2) 在 450 °C 热压、挤压及轧制过程中无明显 Al₁₃Fe₄ 脆性相生成。热压后再轧制复合材料的弥散粒子和晶粒比挤压后再轧制的更加细小。

3) 挤压后轧制板材的抗拉强度为 535 MPa, 伸长率为 4.0%; 热压后再轧制复合材料板材的 SiC 颗粒分布更均匀, 弥散粒子更细小, 因此, 其力学性能更好, 抗拉强度达 580 MPa, 伸长率为 6.3%。

4) 挤压坯在轧制过程中, 当压下量低于 25% 时, 由于 SiC 颗粒的滑动与转动, 密度和硬度先降低; 当压下量高于 25% 时, 密度和硬度升高; 当轧制压向量达 80% 时, 材料基本致密。热压后材料致密度低; 在轧制压下量低于 10% 时, 主要是致密过程, 密度与硬度升高; 当轧制压下量在 10% 至 40% 之间, 由于 SiC 颗粒的滑动与转动, 密度和硬度下降; 当轧制压向量

高于 40% 后, 密度与硬度升高, 压下 90% 时, 材料基本致密。

REFERENCES

- [1] SKINNER D J, BYE R L, RAYBOULD D, BROWN A M. Dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloys[J]. Scripta Metal Mater, 1986, 20(6): 867-872.
- [2] MA Z Y, TJONG S C. High-temperature creep behavior of SiC particulate reinforced Al-Fe-V-Si alloy composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 278(1/2): 5-15.
- [3] 马宗义, 宁小光, 潘进, 李吉红, 吕毓雄, 毕敬. 晶须增强 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 复合材料及晶须增强效果的评价[J]. 金属学报, 1994, 30(9): 420-426.
MA Zong-yi, NING Xiao-guang, PAN Jin, LI Ji-hong, LÜ Yu-xiong, BI Jing. Preparation of whisker reinforced Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si composites and appraisal of reinforcing behaviour for various whiskers[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(9): 420-426.
- [4] PENG L M, ZHU S J, MA Z Y, BI J, WANG F G, CHEN H R, NORTHWOOD D O. High temperature creep deformation of Al₁₈B₄O₃₃ whisker-reinforced 8009 Al composite[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 265(1/2): 63-70.
- [5] 孙玉峰, 沈宁福, 熊柏清, 张永安, 袁新. TiC 对喷射沉积 Al-8Fe-1.3V-1.7Si 合金显微组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): s54-s59.
SUN Yu-feng, SHEN Ning-fu, XIONG Bai-qing, ZHANG Yong-an, YUAN Xin. Effect of TiC particle on microstructure and properties of spray formed Al-8Fe-1.3V-1.7Si[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): s54-s59.
- [6] XIAO Yu-de, WANG Wei, LI Wen-xian. High temperature deformation behavior and mechanism of spray deposited Al-Fe-V-Si alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(6): 1175-1180.
- [7] TANG Yi-ping, TAN Dun-qiang, LI Wen-xian, PAN Zhi-jun, LIU Lei, HU Wen-bin. Preparation of Al-Fe-V-Si alloy by spray co-deposition with added its over-sprayed powders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 439(1/2): 103-108.
- [8] 陶友瑞, 吴安如. 耐热铝合金 FVS0812 板材冲压成形性能研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 9-12.
TAO You-rui, WU An-ru. Research on property of heat-resistance aluminum(FVS0812) sheet drawing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 9-12.
- [9] 谭敦强, 黎文献, 肖于德, 王日初, 张迎元, 周浪. 非致密喷射沉积耐热铝合金锭坯制备 $\Phi 520/\Phi 460$ mm 管材过程数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(1): 145-148.
TAN Du-qiang, LI Wen-xian, XIAO Yu-de, WANG Ri-chu, ZHANG Ying-yuan, ZHOU Lang. Numerical simulation for preparing $\Phi 520/\Phi 460$ mm pipe of spray deposition heat-

- resistant aluminum alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2008, 16(1): 145–148.
- [10] 陈振华, 陈志钢, 陈 鼎, 贺毅强, 陈 刚. 大尺寸喷射沉积耐热铝合金管坯楔压致密化与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1383–1388.
- CHEN Zhen-hua, CHEN Zhi-gang, CHEN Ding, HE Yi-qiang, CHEN Gang. Densification and mechanical properties of spray deposited large scale heat-resistant aluminum alloy tubular preforms during wedge pressing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1383–1388.
- [11] 张荣华, 张永安, 王 峰, 朱宝宏. 喷射成形 Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si 合金组织和性能的研究[J]. *材料导报*, 2010, 24(15): 509–511.
- ZHANG Rong-hua, ZHANG Yong-an, WANG Feng, ZHU Bao-hong. An investigation on the microstructure and mechanical properties of spray-deposited Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si alloy[J]. *Science and Technology Review*, 2010, 24(15): 509–511.
- [12] SRIVASTAVA V C, MANDAL R K, OJHA S N, VENKATESWARLU K. Microstructural modifications induced during spray deposition of Al-Si-Fe alloys and their mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 471: 38–49.
- [13] CHEN Zhen-hua, HE Yi-qiang, YAN Hong-ge, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Ambient temperature mechanical properties of Al-11.7Fe-1.15V-2.4Si/SiC_p composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 460/461: 180–185.
- [14] CHEN Zhen-hua, HE Yi-qiang, YAN Hong-ge, HAO Liang, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-V-Si/SiC_p composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(S1): s238–s243.
- [15] 贺毅强, 陈振华, 王 娜, 郝 亮, 陈志钢, 陈 刚. SiC_p/Al-Fe-V-Si 复合材料组织与性能的热稳定性[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 432–438.
- HE Yi-qiang, CHEN Zhen-hua, WANG Na, HAO Liang, CHEN Zhi-gang, CHEN Gang. Thermostability of hardness and microstructure of SiC_p/Al-Fe-V-Si composite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 432–438.
- [16] 贺毅强, 乔 斌, 王 娜, 杨建明, 徐政坤, 尚 峰, 陈振华. 不同拉伸温度下 SiC 颗粒增强 Al-Fe-V-Si 复合材料的断裂行为[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(3): 469–475.
- HE Yi-qiang, QIAO Bin, WANG Na, YANG Jian-ming, XU Zheng-kun, SHANG Feng, CHEN Zhen-hua. Fracture behavior of Al-Fe-V-Si composite reinforced with SiC particles at different tensile temperatures[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(3): 469–475.
- [17] 贺毅强, 王 娜, 乔 斌, 冯立超, 陈志钢, 陈振华. SiC 颗粒增强 Al-Fe-V-Si 复合材料的 SiC/Al 界面形貌[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1302–1308.
- HE Yi-qiang, WANG Na, QIAO Bin, FENG Li-chao, CHEN Zhi-gang, CHEN Zhen-hua. SiC/Al interface feature of Al-Fe-V-Si alloy reinforced with SiC particles[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(7): 1302–1308.
- [18] ČADEK J, KUCHARŮRÁ K, ZHU S J. High temperature creep behaviour of an Al-11.7Fe-1.15V-2.4Si alloy reinforced with silicon carbide particulates[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 283: 172–180.
- [19] CARREÑO F, TORRALBA M, EDDAHBI M, RUANO O A. Elevated temperature creep behavior of three rapidly solidified Al-Fe-Si materials containing Cr, Mn, or Mo[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 230(1/2): 116–123.

(编辑 李艳红)