

6066/ SiC 喷射共沉复合材料的半固态加工^①

康智涛 张 豪 陈振华

(中南工业大学非平衡材料科学与工程研究所, 长沙 410083)

摘 要 研究了多层喷射共沉 6066 铝合金/ SiC 复合材料的半固态加工。半固态水淬后的金相组织表明, 部分重熔后的喷射沉积组织具有适于半固态加工的搅溶性。不同温度的半固态模锻表明, 材料能在较低压力下进一步成形; SiC 颗粒在加工后仍分布均匀, 与基体结合良好; 材料仍保持了较好的力学性能, T6 态性能可达 $\sigma_b = 385 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 342 \text{ MPa}$, $\delta = 4.3\%$ 。

关键词 喷射共沉 半固态加工 复合材料 搅溶性

中图法分类号 TG249.9

喷射沉积是近年来发展起来的一种新型快速凝固技术。采用喷射沉积工艺能制得具有快速凝固特征、氧化程度小的预成形毛坯^[1]。本所研究的多层喷射沉积工艺, 能实现更高冷速 (达 10^3 K/s), 可制备大尺寸锭坯, 晶粒组织细小均匀, 材料性能优异, 并且十分有利于制备均匀弥散的颗粒增强金属基复合材料^[2, 3]。然而多层喷射沉积工艺由于强调冷速, 锭坯冶金结合不是太好, 需经过轧制、挤压等后续加工才能充分致密, 获得高的力学性能。全固态后续加工变形抗力大, 成形较难, 为了降低成本、能耗, 并制备大件、复杂件, 需要采用一种变形力小且成形性好的新的后续加工工艺。

半固态加工是 70 年代末发展起来的一种在金属固液两相区进行加工的技术^[4, 5], 具有变形力低且成形性好的特点。把半固态加工与喷射沉积技术结合起来, 将有可能为喷射沉积工艺提供一条有价值的新的后续加工路线。国外近几年来已开展这方面的研究工作^[6-8], 对喷射沉积锭坯半固态加工的可行性进行了研究, 但所做工作甚少。本文采用半固态淬火与模锻方法, 对自行制备的 6066 铝合金 (Al-1.4Si-1.1Mg-1.0Cu-0.8Mn) 多层喷射沉积坯

与 6066/ SiC (SiC 颗粒为 α 型, 直径 $5 \sim 10 \mu\text{m}$) 多层喷射共沉复合材料坯的半固态加工进行了研究, 探讨了喷射沉积基体及复合材料加热到半固态后的组织变化规律、半固态模锻工艺的成形性及成形后的组织性能, 丰富了这一领域的工作, 同时为今后的深入研究打下了基础。

1 实验方法

1.1 半固态淬火

将 6066 及 6066/ SiC 多层喷射沉积坯切削成厚约 1 cm 的试样, 从 $580 \sim 640^\circ\text{C}$ 每隔 10°C 进行水淬试验, 每一温度取 3 个试样; 加热及保温时间分别为 10, 20 及 30 min。加热设备为 12 kW 电阻炉。淬火后对组织形貌进行金相分析。

1.2 半固态模锻

将 6066/ 10% SiC 多层喷射共沉复合材料坯机加工为 $d 35 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 试样, 从 $590 \sim 620^\circ\text{C}$ 每隔 10°C 进行半固态模锻。在试样中心钻 $d 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 孔插入热电偶, 试样达到预定温度后保温 30 min, 再迅速夹入模内锻

① 国家“九五”攻关资助项目 收稿日期: 1997-04-18; 修回日期: 1997-08-28

康智涛, 男, 24 岁, 博士研究生

造。锻模内径 40 mm, 底模开“十”字形凹槽。锻造设备为 75 kg 空气锤。锻后检测密度, 分析金相, 检测力学性能。

2 实验结果与分析

2.1 淬火组织形貌分析

2.1.1 液相含量与分布

试样经水淬后液相区可形成细小枝晶组织。金相分析得知: 600 °C 加热 30 min 试样中开始有微量液相形成于晶界, 如图 1(a) 所示, 在白色等轴晶粒晶界处呈网络状出现细枝晶组织, 灰色多边形颗粒为 SiC。图 1(b) 为 640 °C 加热 30 min 时, 呈球状的基体固相颗粒分散于较多量液相之中的组织, 其中黑色不规则区为孔隙。

2.1.2 固相颗粒晶粒度与形貌变化

多层喷射沉积冷速快, 锭坯组织晶粒细小, 部分组织甚至可呈现溶质无分配区而观察不到晶界^[3]。金相分析表明, 锭坯加热到接近半固态及刚过固相线时, 晶粒仍很细小。喷射沉积组织由于雾化颗粒间存在微量氧化物膜, 对晶界的移动可能产生阻碍作用, 因而加热到高温下晶粒粗化较慢。随着温度继续升高和保

温时间延长, 晶粒长大开始加快。图 2(a) 为 590 °C 保温 30 min 后的组织, 晶粒未明显粗化。图 2(b) 为 640 °C 保温 30 min 后的组织, 晶粒较大。随着保温时间延长, 在固液界面能驱动力作用下, 晶粒逐渐球化, 这有利于改善组织的流变性能。

图 1(b)、图 2(b) 所示的这种球化固相颗粒分散于液相的组织与用搅拌法制得的常规半固态组织极为相似^[5], 具有搅溶性。当液相含量较低时, 组织中的固相颗粒彼此搭接形成维持整体形状的固相骨架, 此时可用火钳从炉中轻轻夹出。一旦施以剪力作用, 球形固相颗粒便可在极小的作用力下于液相中滑动, 很容易成形。半固态加工利用这种组织特征, 能够使坯料在较低的变形力下一步成形, 制备形状复杂的制品^[4, 5]。

2.2 半固态模锻工艺与材料组织及性能

2.2.1 工艺与成形性

在淬火实验的基础上, 选定出现较少液相的温度及适当工艺参数进行模锻试验。制取的模锻坯为带“十”字筋的 6066/10% SiC 复合材料试样。每个温度下进行 A 和 B 两种不同实验条件的锻造。A 条件为冷模, 无润滑; B 条件下模预热至 250 °C, 模内少许机油润滑。

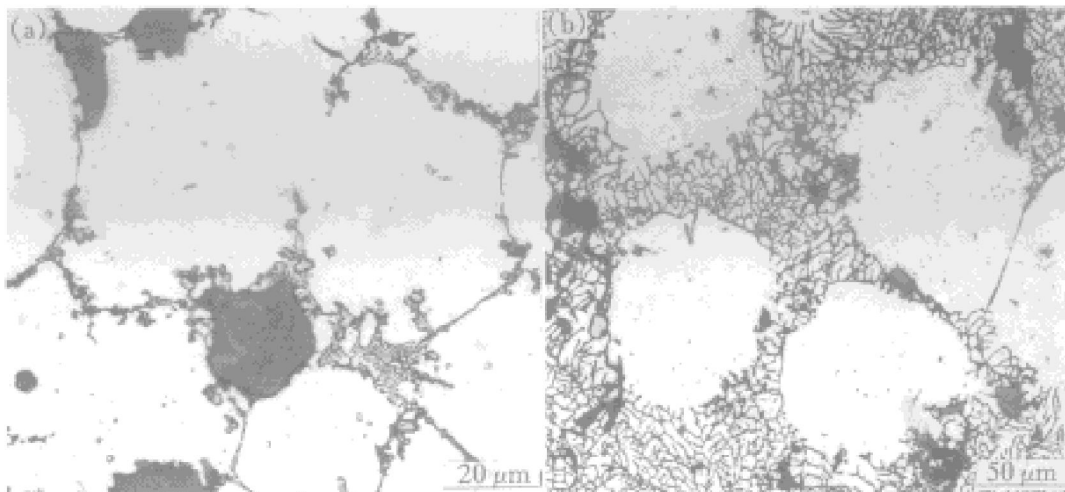


图 1 6066 铝合金不同温度淬火液相含量与分布

Fig. 1 Liquid percentage and microstructure of water quenched 6066 aluminium alloy at different temperatures

(a) —Heated at 600 °C for 30 min; (b) —Heated at 640 °C for 30 min

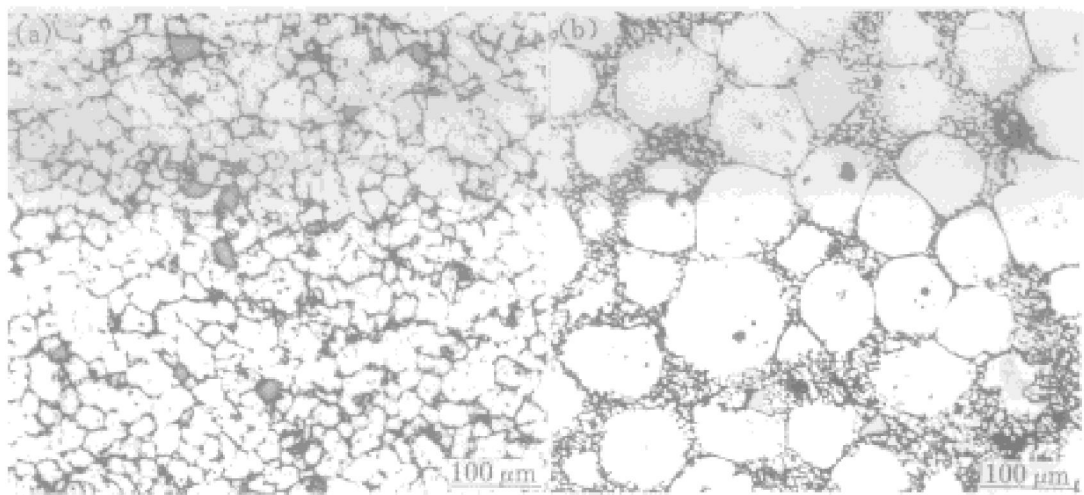


图 2 6066 铝合金不同温度淬火后晶粒度及组织形貌

Fig. 2 Grain size and morphology of 6066 aluminium alloy water quenched at different temperatures
(a) —Heated at 590 °C for 30 min; (b) —Heated at 640 °C for 30 min

实验现象表明，随着温度升高，液相量增大，试样变形性增强，充模性逐渐提高。590 °C 时“十”字筋部未完全充模且开裂，用于插热电偶的孔未能弥合。该温度下尚未开始出现液相，因而在较低锻造力下未能充分变形。600 °C 时已出现液相，充模性明显提高，但筋部仍有少量裂纹。随温度升高，裂纹减少变细。620 °C 时充模完好，虽然表面部分区域有黑色氧化膜，但整个外表光滑平整，此时基体含有较少量液相，液相部分如同散布于固相颗粒及 SiC 粒子之间的润滑剂，使其能在较低的压力下迅速打破彼此之间的粘结而变形，从而很好地充模，成形为结构较复杂的制品，具有良好的搅溶性。通过改进实验条件，发现模子预热与加入润滑油有利于防止试样迅速降温，减少模壁摩擦，从而保证更好地成形。同时也发现工艺中还存在不少有待解决的问题：如加热与输送过程中，试样温度难于精确控制；试样在加热过程中表面可能产生氧化物膜，锻造时氧化皮易卷入试样内部。这些因素将会影响到锻件的最终质量。但总的说来，在含有较少量液相的温度 620 °C 及适当工艺条件下，半固态模锻成形良好、尺寸精确、表面质量较好、在较低变形力下能一步成形为结构较复杂的制品，大大减少了机加工量，节约了原材料。

2. 2. 2 半固态模锻材料显微组织

(1) SiC 分布及与基体的结合

利用多层喷射沉积工艺制备的 6066/ SiC 复合材料具有颗粒增强相分布均匀和增强相与基体界面洁净的优点^[3]。锭坯在 620 °C 经半固态模锻后，从图 3 金相组织可看出 SiC 颗粒仍分布均匀，未因加热部分熔化与变形流动而发

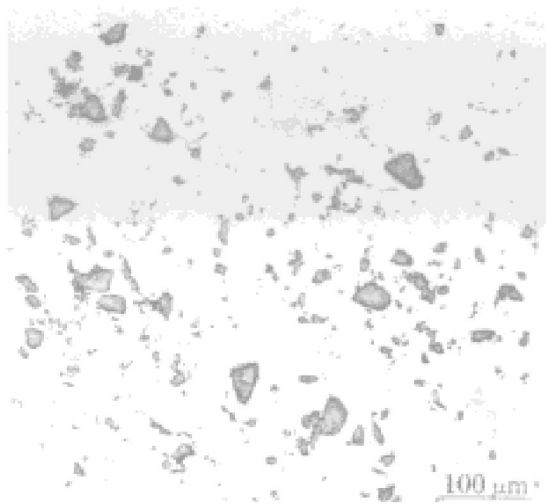


图 3 6066/ 10% SiC 620 °C 半固态模锻件的 SiC 分布

Fig. 3 Distribution of SiC in 6066/ 10% SiC composites after semi-solid die forging at 620 °C

生偏聚。半固态加工温度略高于固相线，远低于铸造温度，因而也能有效避免颗粒增强相与基体间发生过度的有害界面反应。金相组织中可观察到 SiC 与基体界面洁净、结合良好，能

谱分析也未探测到明显的界面反应区。

(2) 金相组织

620 ℃保温后模锻的 6066/ 10% SiC 喷射共沉复合材料的金相组织如图 4。半固态下呈球状的固相颗粒经锻造后形成尺寸稍大的等轴晶。颗粒间的液相部分经锻造迅速冷却后, 在压力作用下结晶形成尺寸较细的等轴晶粒。

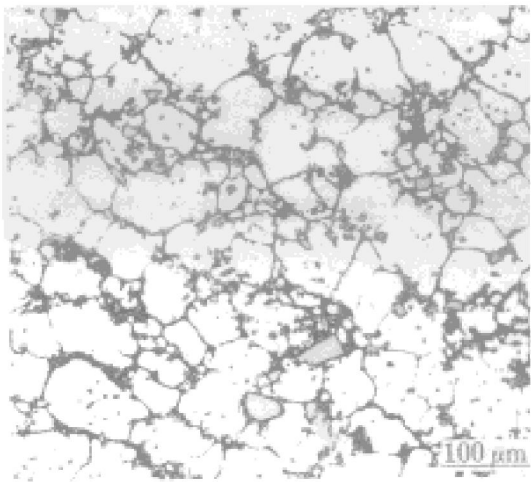


图 4 6066/ 10% SiC 喷射共沉复合材料
620 ℃模锻件显微组织

Fig. 4 Microstructure of spray co-deposited
6066/ 10% SiC composite after
die forging at 620 ℃

SiC 颗粒整体上分布均匀, 与基体结合良好, 起到颗粒强化作用。晶界处 SiC 颗粒较多, 阻碍晶界运动, 强化基体材料。不少细小的 SiC 也进入到晶粒内部, 钉扎位错运动, 起弥散强化作用。

(3) 孔隙度

原始多层喷射沉积坯因冷速高, 坯内常有细微孔隙^[2], 且颗粒强化相与基体界面也常存在部分间隙^[3], 因而组织未充分致密。经半固态模锻后, 金相观察表明孔隙完全弥合, 测得其平均密度约为 98. 9% 理论密度(以 10% SiC 含量计算其理论密度), 基本实现致密化。

2. 2. 3 半固态模锻材料力学性能

多层喷射共沉 6066/ 10% SiC 复合材料经半固态模锻后力学性能如表 1 所示。与铸坯基体材料模锻件性能比, 复材喷射沉积制品半固态加工后仍保持了较好的力学性能; 620 ℃模

锻 T6 态性能可达 $\sigma_b = 385 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 342 \text{ MPa}$, $\delta = 4.3\%$ 。同时可看出, 加工温度越低, 对喷射沉积组织影响越小, 性能越好。但要充分发挥喷射沉积制品的高性能优势, 还需进一步改进工艺, 如采用感应炉快速加热及保护气氛下加热保温等来进一步提高其力学性能。

表 1 6066/ 10% SiC 复合材料半固态
模锻件与基体材料力学性能比较

Table 1 Comparison of mechanical properties
between semi-solid die forged
6066/ 10% SiC composite and matrix alloy

Material	Heat treatment	Process temperature	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %
6066/ 10% SiC	—	600 ℃	336	288	5.2
Spray co-deposited	—	620 ℃	314	261	4.5
Semi-solid die forged	T6	620 ℃	385	342	4.3
6066 Cast forging ^[9]	O	—	150	83	18
	T6	—	345	310	—

3 结论

(1) 多层喷射沉积 6066 铝合金及 6066/ SiC 复合材料加热到半固态后具有适于半固态加工的搅溶性组织。

(2) 6066/ 10% SiC 喷射共沉复合材料进行含少量液相的半固态模锻具有良好的成形性能, 能在较低变形力下一步成形为形状较复杂的制品。

(3) 复合材料中的 SiC 颗粒在半固态加工后仍分布均匀, 与基体结合良好。

(4) 6066/ 10% SiC 喷射共沉复合材料经半固态加工后基体组织有所粗化, 但仍保持了较好的力学性能, T6 态性能可达 $\sigma_b = 385 \text{ MPa}$, $\sigma_{0.2} = 342 \text{ MPa}$, $\delta = 4.3\%$ 。

REFERENCES

1 Evans R W *et al.* Powder Metallurgy, 1985, 28(1): 13– 20.

- 2 Chen Zhenhua(陈振华) *et al.* The Chinese J of Non-ferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(4): 66–72.
- 3 Chen Zhenhua(陈振华) *et al.* The Chinese J of Non-ferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 83–86.
- 4 Flemings M C. Metall Trans, 1991, 22A: 957–981.
- 5 Kirkwood D H. Int Mat Rev, 1994, 39(5): 173–189.
- 6 Leatham A and Ogilvy A. GB2172900A. 1988.
- 7 McLelland A R A *et al.* Mater Lett, 1991, 11(1, 2): 26–30.
- 8 Ward P J *et al.* Acta Mater, 1996, 44(5): 1717–1729.
- 9 American Metals Soc. Handbook of Metals(金属手册). 9th Edition, Vol. 2. Beijing: Mechanical Industry Press, 1994: 169.

SEMI-SOLID PROCESSING OF SPRAY CO-DEPOSITED 6066/ SiC_p COMPOSITES

Kang Zhitao, Zhang Hao and Chen Zhenhua

Non-Equilibrium Material Research Institute,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT Semi-solid processing of multi-layer spray co-deposited 6066Al/SiC_p composites was studied. By analyzing the water quenched microstructure, it was shown that the partly remelted spray-formed structure got thixotropy suitable for semi-solid processing. Semi-solid die-forging at different temperatures was conducted, the results showed that the material could be shaped under low pressure, SiC particles still uniformly distributed after processing and combined well with matrix alloy; the material maintained reasonable good mechanical properties.

Key words spray co-deposition semi-solid process composites thixotropy

(编辑 彭超群)