

Al₂O₃ 颗粒对 Al-Zn 合金激光快凝组织的影响 *

张 坤 纪 全 陈光南

(中国科学院力学研究所材料中心 北京 100080)

提要 通过比较 Al-Zn 合金和 Al₂O_{3p}/Al-Zn 复合材料的激光重熔组织。分析 Al₂O₃ 颗粒对 Al-Zn 合金激光快凝组织的影响规律。实验结果表明,Al₂O₃ 颗粒可以显著细化激光熔区的晶粒。基于凝固界面与颗粒交互作用的理论分析,给出了晶粒细化的临界条件。

关键词 激光快凝 颗粒复合材料 晶粒细化

Effect of Al₂O₃ Particles on Microstructure of Al-Zn Alloy During Laser Rapid Solidification

Zhang Kun, Ji Quan, Chen Guangnan

(Materials Center, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In order to understand the effect of particles on solidification behavior of matrix alloy during laser processing, resolidified microstructures of Al-Zn alloy and Al₂O_{3p}/Al-Zn composite have been comparatively investigated. Refined grain structure exhibits in laser remelted composite compared to coarse epitaxial grain structure in laser remelted alloy. The condition of grain refinement is rationalized based on the interaction between the particle and the solidification interface.

Key words laser rapid solidification, particle composite, grain refinement

激光制备表面复合材料又称激光复合化,是激光表面熔凝处理中研究十分活跃、发展相当迅速的技术。为提高加工质量和加强控制手段,需要研究复合材料熔池中相关热物理过程^[1]、由于颗粒与金属熔体存在交互作用,颗粒的存在会改变熔体的热量、质量和动量传输过程,难以套用已经建立起来的金属的熔池动力学和凝固学理论。本文从凝固学角度来探索激光作用下复合材料的组织形成规律。

试验方法与材料

激光复合化与复合材料的激光重熔有着不同的加工条件,但都包含高温度梯度下颗粒与

金属两相混合熔体的定向凝固过程,故采用工艺相对简单的激光重熔进行实验。

实验材料为用挤压铸造法获得的 Al₂O₃ 颗粒增强的铝基复合材料、颗粒体积分数为 10%,当量直径为 6μm,基体牌号为 LC4。为便于分析同时选择了 LC4 合金进行实验、两种材料均为固溶处理状态、用横流 CO₂ 激光加工机进行单道重熔实验,具体参数为:光斑直径(d)为 2mm,激光功率(P)和扫描速度(V_s)分别在 400—800W 和 15—60mm/s 之间变化。前期实验表明,通过选择合适的激光功率与扫描速度的组合,可以避免复合材料试样中颗粒的熔化及颗粒与合金熔体间的界面反应。

沿激光扫描方向将激光扫描道纵向剖开,抛光腐蚀后用光学显微镜观察熔区组织。

*国家自然科学基金重点项目资助(No59836220)

试验结果及讨论

1. 颗粒对基体凝固组织的影响

图1(a)和图1(b)分别为合金和复合材料的激光熔区组织,可以看出二者的组织组成物均为初生 α (Al)胞状枝晶和枝晶间共晶组成,表明颗粒不会改变基体的相组成。但是,颗粒对初生相的生长有明显影响。在合金熔区中,初生相为规则排列,偏向热流方向。在复合材料熔区中,初生相的生长虽仍偏向热流方向,但存在一定的无序程度,而且可观察到枝晶生长终止于

颗粒处的现象,表明颗粒对初生相的生长具有强烈阻碍作用。

图2(a)和图2(b)分别为合金和复合材料的激光熔区晶粒组织。对于不含 Al_2O_3 颗粒的Al-Zn合金,激光熔池中的晶粒为从母材外延生长的规则柱状晶,其宽度与母材晶粒尺寸相当。对于复合材料,激光熔池中晶粒为显著细化的非外延生长的柱状晶,其宽度远小于母材晶粒尺寸。

在本文所用激光加工参数范围内,合金熔区与复合材料熔区的组织特征基本保持不变。



图1 LC4合金(a)和LC4/Al₂O₃复合材料(b)的激光熔区显微组织
($\times 800, d=2\text{mm}, P=600\text{W}, V_s=30\text{mm/s}$,熔池中部,激光扫描方向从左向右)

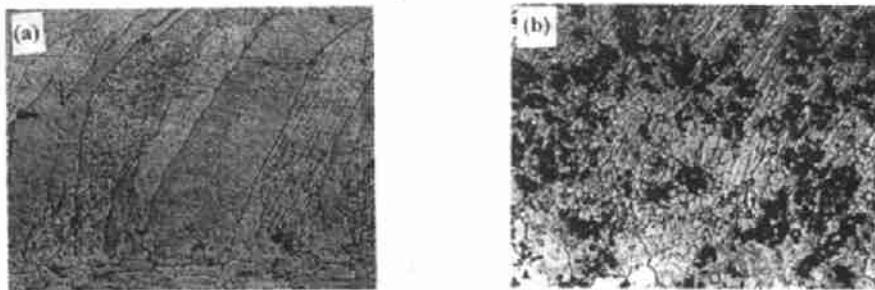


图2 LC4合金(a)和LC4/Al₂O₃复合材料(b)的激光熔区显微组织
($\times 200, d=2\text{mm}, P=600\text{W}, V_s=30\text{mm/s}$,熔池中下部,激光扫描方向从左向右)

2. 激光熔区中晶粒细化的原因

在不含增强相的合金的激光快凝时,熔池中一般形成趋向热流方向而生长的外延柱状晶^[2]。激光扫描速度较快时,熔池不同位置处的热流方向变化不大,柱状晶的亚组织即枝晶基本沿同一方向生长,LC4合金的激光重熔组织即为此例。

对于复合材料,尽管SiC_p对初生相不具备

异质形核作用,但颗粒会对初生相的外延生长起到抑制作用。当这种抑制作用大到可以在定向凝固前沿熔体中产生足够过冷并形成非外延生长的晶粒时,金相检验就会观察到初生相的紊乱生长特征。另外激光熔池中具有很高温度梯度,定向凝固前沿熔体过冷区较窄,等轴晶形成几率较小,往往形成显著细化的柱状晶,故仍能观察到初生相偏向热流方向的生长特征。

3. 激光熔区中晶粒细化的条件

晶粒细化有利于抑制激光加工时的凝固裂纹倾向和提高复合材料的强韧性。其临界条件可根据凝固界面与单颗粒交互作用的理论分析而给出：

(1) 颗粒不应被凝固界面所推移

如果颗粒直径过小，凝固过程中颗粒将被推移，此时颗粒不能强烈抑制晶体生长。为使颗粒在凝固过程中保持固定不动，颗粒直径应大于临界推移直径。根据文献[3,4]，临界推移直径可写为：

$$d_{cr} = \frac{\Delta\sigma_0 a_0}{3(n-1)\eta V_b \cos\theta} \left(2 - \frac{k_p}{k_t} \right) \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma_0$ 为颗粒与凝固相界面能之差， a_0 和 n 为常数， η 为液态金属粘度， θ 为激光扫描速度与凝固速度间夹角， k_p 和 k_t 分别为颗粒与凝固相的热导率。

(2) 颗粒不应被凝固界面所卷入

即使颗粒不会被凝固界面推移，它仍可能被卷入到枝晶内或枝晶间，此时颗粒对晶体生长抑制作用较小。如果颗粒直径满足以下条件

$$d > \lambda_1(2R_d) \quad (2)$$

式中 λ_1 为枝晶一次臂距， R_d 为枝晶尖端半径，颗粒就不能进入某一枝晶内或枝晶间^[5]。此时

颗粒正前方的枝晶会停止生长，颗粒间隙处的枝晶必须绕过颗粒才能继续生长，晶体生长相应受到强烈抑制。

结 论

1. 在 Al-Zn 合金的激光快凝时，外加 Al_2O_3 颗粒可以细化激光熔区晶粒尺寸。
2. 激光熔区晶粒细化的必要条件是颗粒对凝固初生相的生长具有强烈阻碍作用，应根据激光加工参数和复合材料熔体热物性来选择颗粒尺寸。

参 考 文 献

- [1] 郭元强等, 第六届全国激光热处理学术年会, 1997, 57, 上海
- [2] P. Gilgien et al. *ISIJ International*, 1995, 35(6), 751
- [3] D M Stefanescu et al., *Metallurgical Transactions*, 1988, 19A(11), 2847
- [4] R Colaco et al. , *Scripta Materialia*, 1997, 36(2), 199
- [5] B Dutta et al. , *Metallurgical Transaction*, 1998, 29A(4), 1329

(上接第 249 页)

合金进行激光表面合金化，制得了以快速凝固 Al_2O_3 为增强相的“原位”耐磨复合材料表面改性层，合金层表面光滑、无裂纹、内部组织致密、厚度可达 1.0mm 以上。

2. γ -TiAl 激光表面合金化 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiAl}$ 复合材料涂层硬度及在干滑动及磨料磨损条件下耐磨性大幅度提高。

参 考 文 献

- [1] Y. W. Kim, *Acta Metall. Mater.*, 1992, 40, 1121

- [2] M. Morris, *Script. Metal. Mater.* 1994, 30, 449
- [3] T. Noda, *Mat. Sci. Eng.*, 1996, A123, 157
- [4] Y. Wang, *Surf. Coat. Technol.*, 1997, 91, 37
- [5] 王华明, *金属学报*, 1997, 33, 917
- [6] 王华明, *中国激光*, 1997, A24, 1049
- [7] H. M. Wang, 1st Asia Intern. Conf. on Tribology, Tsinghua Univ. Press, Beijing, 1998, 603
- [8] 王华明,《材料研究与应用新进展》, 化学工业出版社, 1998
- [9] 何秀丽, *金属学报*, 1998, 34, 983