

模拟研究离焦量对7050铝合金 Al/Ti 熔覆过程的影响

李建忠,黎向锋,左敦稳,许瑞华,陈竹

(南京航空航天大学机电学院,江苏南京 210016)

摘要: 针对7050铝合金表面激光熔覆Al/Ti复合粉体,建立了三维瞬态温度场有限元模型,模拟了不同离焦量条件下的熔池大小、温度梯度、冷却速度及形状控制因子。结果表明,熔池宽度与深度尺寸随着离焦量数值的增大先增大后减小,在离焦量为20 mm时熔池宽度与深度都出现了最大值。沿熔池深度方向(即Z向)的温度梯度数值最大,散热条件最好,表明熔覆凝固过程中的晶粒生长方向主要集中在Z向。离焦量为40 mm时的冷却速度最大、晶粒细小,离焦量为80 mm时的冷却速度最小、晶粒粗大,且得到实验验证。离焦量为60 mm时的形状控制因子最大,金相组织出现柱状晶;离焦量为80 mm时的形状控制因子最小,金相组织主要为胞状晶,并有相应的实验验证。

关键词: 激光熔覆; 离焦量; Al/Ti复合粉体; 温度梯度; 冷却速度

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1126-08

Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study

Li Jianzhong, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, Xu Ruihua, Chen Zhu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the process of laser clad Al/Ti composite powder above 7050 aluminum, a three dimensional model was established, which can simulate the molten pool size, the temperature gradient, cooling rate and the shape control factor in the condition of different defocusing amount. The simulated results show that the width and depth of the molten pools are positively correlated to the defocusing amount, but negatively correlated after the defocusing amount reaches 20 mm. Both the max temperature gradient numerical value and the best cooling condition appear in the Z direction, which also indicate the growth direction of grains mainly concentrates on the Z direction. The cooling speed reaches the highest and the grain size is small when the defocusing amount is 40 mm. The cooling speed is lowest and grain size is big when the defocusing amount is 80 mm. Moreover, the shape control factor is biggest and the crystal microstructure is columnar when the defocusing amount is 60 mm, and the shape control factor is smallest with cellular crystal microstructure when the defocusing amount 80 mm. Finally, the simulated

收稿日期:2014-08-05; 修订日期:2014-09-03

基金项目:航空科学基金(2010ZE52056);江苏省精密与微细制造技术重点实验室基金;

南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj201467);江苏省研究生培养创新工程(SJLX_0120)

作者简介:李建忠(1989-),男,硕士生,主要从事涂层及功能表面方面的研究。Email:1060410520@qq.com

导师简介:黎向锋(1971-),女,教授,硕士生导师,博士,主要从事激光加工、抗疲劳制造等方面的研究。Email:fxli@nuaa.edu.cn

results about both the grain size and the crystal microstructure of the molten pool are verified by the experiment study.

Key words: laser cladding; defocusing amount; Al/Ti composite powder; temperature gradient; cooling rate

0 引言

铝合金作为工业应用的重要材料之一,对其表面性能改善以及修复的研究极为重要,激光熔覆作为表面处理研究的热点之一受到广泛关注,目前针对铝合金已开展的激光熔覆材料主要有AA333、ZL102、ZL104、LY12、6061及AA7075铝合金等。7050铝合金属于7XXX系列(Al-Zn-Mg-Cu)铝合金,具有高强度、高断裂韧性及良好的抗腐蚀性,在汽车以及航空航天工业材料中的应用日趋增加^[1]。然而,其低硬度与较差的耐磨性限制了7050铝合金在对硬度及耐磨性能要求较高领域的应用。Al/Ti金属间化合物是一种具有合理性价比与良好工艺性能的轻型结构,具有低密度、高弹性模量、高硬度、高抗氧化性以及较好的力学性能等特性^[2]。利用Al/Ti复合粉体,采用铝合金熔覆最常用的连续型激光器,可以使涂层材料与7050基材表面熔化形成低稀释率无气孔、无裂纹且与基材结合良好的Al/Ti金属间化合物涂层,从而提高基材表面硬度以及耐磨性能。

熔覆成形质量除受基材材质、颜色及粗糙度等影响外,更受激光功率、扫描速度、光斑直径、离焦量及有无保护气体等多种工艺因素影响。其中离焦量指待熔覆工件偏离环形光焦点的距离。目前对于离焦量的研究主要集中在其变化所引起的熔池尺寸变化上^[3]。实际上,离焦量的变化不但会影响光斑尺寸及能量分布,而且对于熔池内的对流、传热和传质,以及材料凝固组织形态及固态相变组织结构都有一定影响。针对激光熔覆过程复杂的物理变化过程分析,有限元由于其完善的数值分析功能是使用最多的分析方法。陈刚等^[4]针对激光熔覆过程中温度变化对其凝固组织的影响,建立有限元模型,讨论了温度梯度与冷却速度对凝固组织的影响,利用形状控制因子分析了激光熔覆过程的凝固行为;W.C Tseng等^[5]考虑熔覆试样偏离激光焦点引起的光斑直径以及能量分布变化,建立了可调热源模型,模拟分析了

预置式激光熔覆熔池形状尺寸变化,但并未对离焦量变化对熔覆质量的影响进行深入研究。至于模拟分析离焦量引起的光斑直径变化对于熔池温度梯度、冷却速度及形状控制因子的影响目前还尚未有报道。文中针对7050铝合金表面熔覆Al/Ti复合粉体,建立有限元模型,采用不同离焦量,分析离焦量对于熔池尺寸、晶粒组织生长方向、晶粒细化以及金相组织特征的影响。

1 激光熔覆模型建立

1.1 激光熔覆过程分析

采用压片预置式激光熔覆物理模型,激光束以一定速度沿材料中心扫描,经激光束扫描后的预置粉体经过熔化凝固形成与基体结合良好的熔覆涂层。基体7050铝合金及熔覆材料Al/Ti复合粉体的热物性参数通过参考文献[6-7]得到,熔覆材料在形成熔覆层前后的材料属性以熔覆材料熔点为分界线进行转换。未达到熔点前为复合粉体的物性参数,达到熔点后为涂层材料的物性参数。

利用有限元分析过程中,考虑到模型沿激光扫描中心对称,所以可沿扫描中心将试样进行分割,选择其中一部分进行研究,这样既保证了仿真模型的正确性,又可以简化仿真过程,实现在同等运行时间下细化网格提高仿真的精度,基体模型尺寸为30 mm×6 mm×3 mm,熔覆层高度为0.3 mm。

采用SOLID70三维8节点热分析单元,考虑到分析单元为规则的六面体单元,所以采用映射法进行网格划分。在整个熔覆过程中,激光束光斑扫描下的涂层材料的变化最为激烈,在经历了熔化、相变和凝固后形成熔覆层,基体变化相对较强的部分为与涂层材料的接触表面;所以在网格划分时,为了保证计算精度,同时也避免冗长的计算时间,沿激光扫描方向,涂层材料模型网格划分整体较密,而基体网格划分采用上密下疏,垂直于扫描方向,激光束光斑扫描区域整体模型网格较密,其它部分随激光扫描中

心距离的增加逐渐变疏。图 1 为网格划分图。

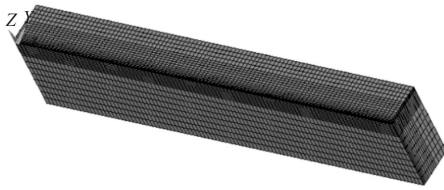


图 1 网格划分图

Fig.1 Finite element mesh model

1.2 激光熔覆热分析

激光熔覆过程属于典型的准稳态热过程, 在研究中选择传统描述法拉格朗日对温度场进行描述, 即对非线性瞬态热传递过程问题的研究^[9]。随着时间的变化, 热源以速度 v 沿着目标材料运动, 热力学能量平衡方程表示为:

$$\rho C \frac{dT}{dt}(x, t) = \nabla \cdot \tilde{k}(t) \nabla T + Q(x, t) \quad (1)$$

式中: ρ 为材料的密度; C 为比热容; T 为温度; \tilde{k} 为随温度变化的导热系数; Q 为内部热生成率。

熔覆模拟过程中激光束热流成高斯分布:

$$q(r) = \frac{k\eta P}{\pi r^2} e\left(-k \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

$$R^2 = (x-x_0)^2 + (y-v \cdot t)^2 + (z-z_0)^2 \quad (3)$$

$$z_0 = 0 \quad (4)$$

式中: k 为热流集中密度系数; η 为激光利用率; r 为光斑半径; R 为距光斑中心的距离。高斯激光的特点是: 距激光中心越远, 其能量分布越低。

熔覆过程中试样边界与周围介质热交换主要包括对流换热和辐射换热。激光束光斑区域内的熔覆材料主要处于吸收光能状态, 与周围介质的热交换极少, 而未进入光斑区域内的熔覆材料与周围介质存在着热交换, 因此, 激光扫描过程中, 热交换属于动态变化过程。通过“杀死”进入光斑区域的等效单元, 离开光斑区域后将其“激活”, 以实现边界条件的动态变化。

1.3 光斑直径公式推导

激光熔覆过程中, 离焦量的变化会影响光斑尺寸及能量分布, 这会影响到熔池的形成, 温度梯度大小以及冷却速度, 这些决定着制备的熔覆涂层质量高低。由于测试条件限制, 在仿真过程中忽略离焦量改变所引起的加载到工件上热源能量大小的改变, 将离焦量变化问题等效为光斑直径变化问题进行分

析, 不考虑引起的其它变化。通过参考文献[9]推导出离焦量用光路图表示形式, 如图 2 所示。

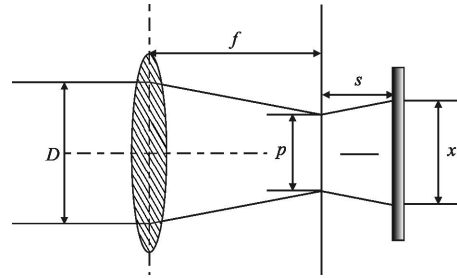


图 2 离焦量光路图

Fig.2 Light path diagram of defocusing amount

光斑直径 x 与离焦量 s 的关系表示为:

$$x = s(D-d)/f+d \quad (5)$$

式中: x 为激光束实际作用于试样的光斑直径; s 为离焦量; f 为焦距, 其值为 250 mm; D 为入射激光束直径, 其值为 4 mm。通过以上离焦量光路图, 得到不同离焦量对应的光斑直径, 见表 1。实验过程中, 由于铝合金熔覆过程中飞溅较为严重, 在离焦量为负值的情况下, 铝合金的强烈飞溅不仅影响熔覆效果, 而且对于激光器会产生一定损害, 所以在激光熔覆过程中对于离焦量为负值的情况不予考虑。

表 1 不同离焦量光斑直径

Tab.1 Spot diameter of different defocusing amount

s/mm	0	20	40	60	80
x/mm	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3

2 结果讨论

2.1 实验过程

实验过程中使用连续型 CO_2 激光器, He 为保护气体, 采用压片预置式法在铝合金表面熔覆添加 1 wt% 40 nmSiC 的 Al/Ti 复合粉体(原子比 1:1, 粒径均为 100~300 目), 制备高质量熔覆涂层, 激光扫描过程中熔覆材料温度达到其熔点后形成熔覆层, 基体上受热影响较大而未熔化部分称为热影响区, 在熔覆层与热影响区之间存在的结合良好的部分称之为结合区^[10]。

2.2 温度分布

利用上述建立的有限元模型, 当激光功率 P 为 1.8 kW, 扫描速度 V 为 200 mm/min, 使用不同离焦量 s , 对上述实验过程进行数值计算。通过能量密度公式

$E=P/(Vx)$ 得到不同离焦量的能量密度表,如表2 所示。

表 2 不同离焦量能量密度

Tab.2 Energy density of different defocusing amount

s/mm	0	20	40	60	80
$E/J \cdot mm^{-2}$	360.04	317.68	284.24	257.17	234.81

图 3(a)为离焦量为 0 mm 时,沿激光扫描方向的三维准稳态温度场分布云图(熔覆时间为 4.75 s)。激光功率为 1.8 kW,扫描速度为 200 mm/min,离焦量为 0 mm 时,熔覆时间为 4.75 s 时的基体三维温度场分布见图 3(b)。被激光照射部分温度很高,温度最高点出现在激光扫描中心,扫描中心温度最大值大于熔覆材料的熔点,可以确定仿真过程中,试样出现熔池。激光源离开后,通过工件与周围介质的对流换热和工件内部的热传导,材料温度迅速降低,表现出典型的急热急冷特征。这一特征使得熔覆层组织的凝固速度很快,可形成微观组织细小致密的熔覆层。由于激光束一直处于移动过程,激光光斑移出的区域温度没来得及下降,光斑进入的区域迅速升温,导致光斑移出的等温区域比将要进入的区域大。熔池前方温度变化较为剧烈,熔池后方的温度变化则较为缓慢,激光束前端的温度场密度与温度梯度要明显大于激光束后端。

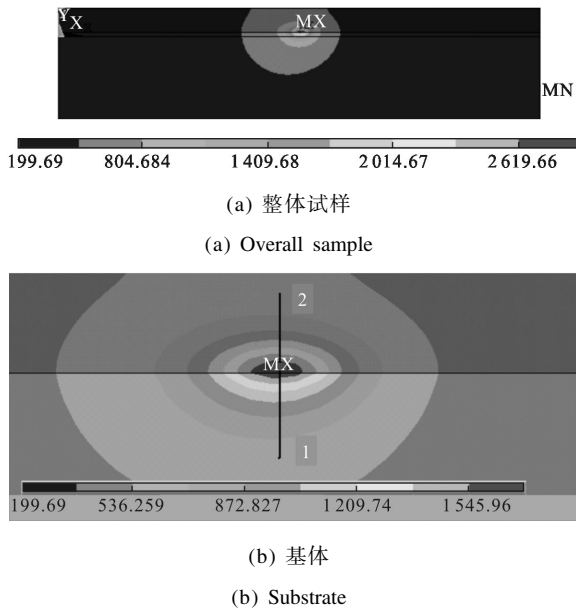


图 3 三维温度分布示意图

Fig.3 Three dimensional temperature distribution contours

对不同离焦量条件下的激光熔覆进行有限元仿真研究,得到不同离焦量下,熔覆时间为 4.75 s 时的

扫描中心最高温度值,如表 3 所示。

表 3 不同离焦量的最高温度值

Tab.3 Highest temperature of different defocusing amount

s/mm	0	20	40	60	80
$T/^\circ C$	2 922.2	2 722.1	2 457.5	2 182.4	1 937.6

由表 3 可知:随着离焦量的增大,光斑直径逐渐增大,能量密度随之减小,扫描中心最高温度值也逐渐降低。从最高温度值来看,在不同离焦量条件下,熔覆试样均可以熔化产生熔池。由能量密度表可以知道,离焦量为 0 mm 时的能量密度最大,所以在激光扫描过程中,其扫描中心温度最高。

2.3 熔池三维形状与大小

选取激光熔覆 Al/Ti 复合粉体仿真结果,对基体熔池进行分析。激光扫描过程中,当温度达到熔覆材料熔点后,熔覆材料迅速熔化、扩散凝固且形成熔池。路径 1 为垂直激光扫描方向,沿熔池深度方向的路径;路径 2 为垂直激光扫描方向,沿熔池宽度方向的路径。

当温度达到 1168 $^\circ C$ 时,涂层材料熔化,在基体上形成熔池。图 4(a)为熔覆时间为 4.75 s 时垂直于激光扫描方向沿熔池深度方向的温度变化曲线图,

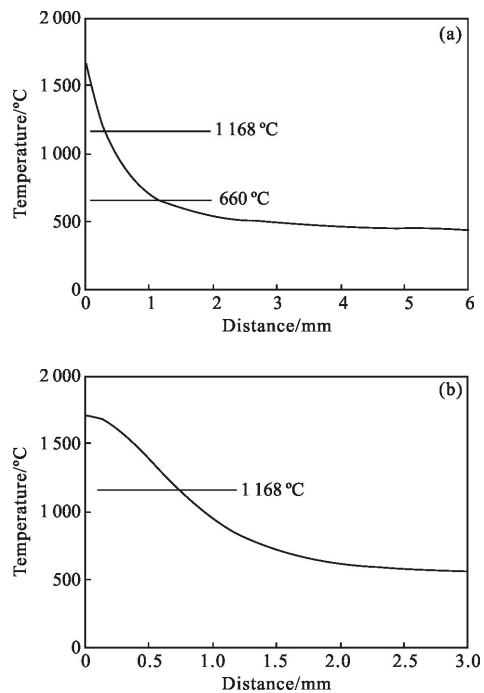


图 4 沿路径 1 和 2 温度分布图

Fig.4 Temperature distribution along path 1 and 2

温度高于 1168 °C 的区域为涂层材料熔化区域,由此可知其熔池深度值为 0.332 mm。通过对基体材料熔点分界线分析(铝合金熔点 660 °C),可以确定分界线以上为熔覆时间 4.75 s 时,在激光束作用下基体产生的熔化区,其深度为 1.16 mm。图 4(b)为垂直于激光扫描方向沿熔池宽度方向的温度变化曲线图,温度高于 1168 °C 的区域为涂层材料熔化区域,由此可知基体熔池的宽度为 0.785 mm,考虑到仿真分析过程中取试样的一半进行分析,所以基体上产生的熔池宽度为 1.57 mm。

在同等激光过程参数,不同离焦量条件下,利用上述研究过程得到熔覆相关数值表,如表 4 所示。

表 4 不同离焦量的熔化尺寸

Tab.4 Molten pool sizes of different defocusing amount

s/mm	Width/mm	Depth/mm	Depth of fusion/mm
0	1.57	0.332	1.16
20	1.63	0.335	1.19
40	1.61	0.299	1.18
60	1.50	0.262	1.13
80	1.34	0.214	1.06

通过上表发现,随着离焦量的增加,熔池尺寸呈现先增加后减小的变化趋势;这是由于随着离焦量的增加光斑直径一直处于增大状态,其能量密度随之逐渐减小;所以不同离焦量下的熔池尺寸变化主要是由能量密度大小及其分布变化引起的。对于离焦量为 20 mm 时,熔池宽度与深度都出现了最大值,是由于离焦量增大了光斑直径,熔覆过程中整体光斑覆盖面积增加,激光扫描过程中光斑预热范围增大。考虑到离焦量为 20 mm 时,其能量密度数值较大,虽然小于离焦量为 0 mm 的能量密度,但减小幅度有限;且其光斑直径大于离焦量为 0 mm 的光斑直径,其预热范围增大,综合这两方面影响,导致离焦量为 20 mm 时的熔池尺寸出现最大值。随着离焦量值的增加,虽然激光束光斑直径增加使得激光束作用范围增加,但其能量密度一直处于减小趋势,且光斑外围能量密度未能达到熔覆材料的熔点,所以出现了熔池尺寸降低的趋势。

2.4 温度梯度

温度梯度是温度在空间上的变化率,具有方向性,其方向与热流传递的方向相反,在三维空间中可分解成为 X、Y 和 Z 三个方向。在熔池凝固过程中,沿着温度梯度方向散热条件最好,利于晶粒析出,同时也有利于晶粒长大^[4]。为此,凝固过程中的温度梯度对晶粒生长方向及其尺寸大小均有很大关系。选择 Z 方向(路径 1 方向)上三点 P1(0.015, 0, -0.3e-3), P2(0.015, 0, -0.6e-3)和 P3(0.015, 0, -0.9e-3)。选取 YZ 面进行分析(试样截面所在平面),得到以上三点在 Y 以及 Z 方向的温度梯度曲线,分别如图 5(a)和 (b)所示。通过对三点温度梯度的分析可知,P1 点 Z 向最大温度梯度值 1.23×10^6 °C/m, Y 向温度梯度值为 -4.29×10^4 °C/m,所以 YZ 面温度梯度的变化方向主要集中在 Z 向,热量主要沿着 Z 向传递,晶粒主要沿着 Z 向析出,即晶粒生长方向主要沿 Z 向。这三点温度梯度的变化趋势主要是由这三点离热源的位置决定的,离热源中心越近,温度梯度变化越明显。

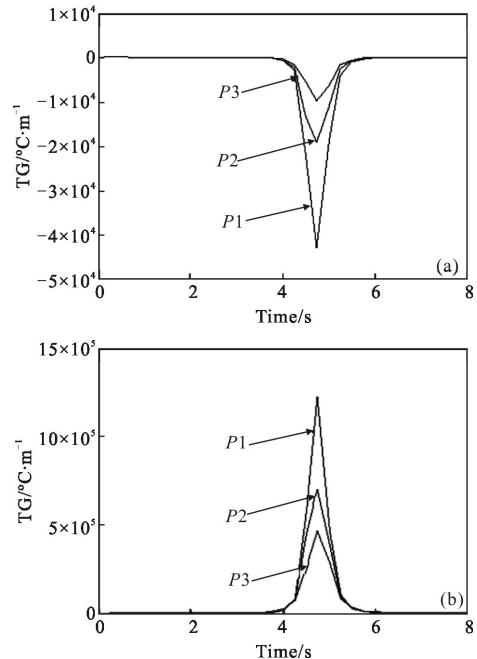


图 5 离焦量为 0 mm 时的 P1、P2 和 P3 三点温度梯度曲线

Fig.5 Temperature gradient curves of P1, P2, and P3 when the defocusing amount is 0 mm

2.5 冷却速度

熔覆材料处于降温期间,冷却速度越大,晶粒析出速度就越快,晶粒就越细小。冷却速度就是指在降温阶段的温度变化率,其值为负值;其数值大小会直

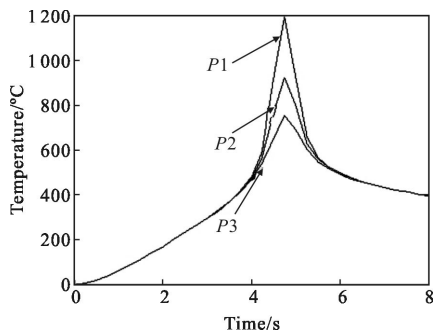
接影响到熔覆组织的分布均匀性及晶粒尺寸。

通常,激光熔覆温度变化率包含加热和冷却两个阶段。激光扫描熔覆材料期间,材料各点温度都先处于平稳升温阶段,一段时间后出现急剧升温现象,在温度达到极大值后又出现急剧降温,最后进入平稳的降温阶段,如图 6(a)所示为离焦量为 0 mm 时 P1、P2、P3 三点的温度曲线。考虑到激光熔覆期间单元材料属性由于温度变化作用,其热导率、密度以及比热容一直处于不断变化,所以整个激光熔覆过程温度的消耗以及热传递都随时间发生改变。熔覆过程中温度变化曲线的变化趋势在一定程度上反映了激光熔覆过程中材料的复杂物理化学反应现象,如热传递、流体流动和相转换等。

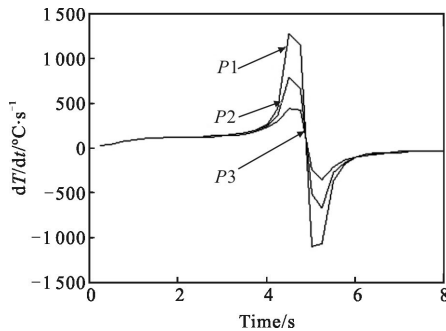
一般,温度变化率的计算公式如下^[9]:

$$dT/dt = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

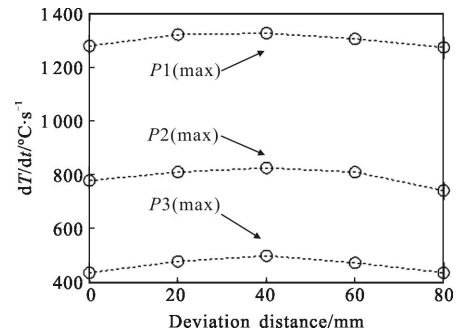
式中: T_2 和 T_1 分别对应 t_1 、 t_2 时刻的温度,根据上述温度曲线图可得到离焦量为 0 mm 时以上三点温度变化速率,如图 6(b)所示。由图 6(b)可知:试样点温度开始处于增加阶段及试样熔化阶段;当温度达到



(a) 离焦量为 0 mm 时的 P1、P2 和 P3 温度的时间历程曲线
(a) Time history curves of the temperature of P1, P2, and P3 when the defocusing amount is 0 mm



(b) 温度变化率曲线图
(b) Temperature change rate curves



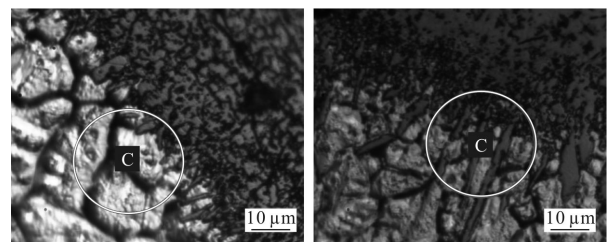
(c) 不同离焦量 3 点最大冷却速度值
(c) Highest cooling rates on P1, P2, and P3 with different defocusing amount

图 6 冷却速度历程

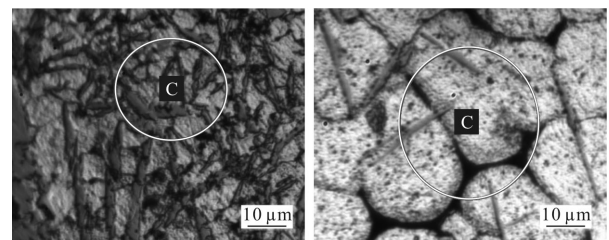
Fig.6 Cooling rate process

一个极大值后,温度开始逐渐降低及试样凝固阶段。图 6(c)为不同离焦量条件下的 P1、P2 和 P3 这三点最高冷却速度分布图。

由图 6(c)可知,Z 方向的这三点冷却速度分布规律基本一致,离焦量为 40 mm 的冷却速度有最大值,此时由于温度下降的速率比较大,所以晶粒生长的时间较短,晶粒尺寸应相对较小且分布应较为致密;离焦量为 80 mm 时的冷却率出现最小值,由于温度下降的速率比较小,其晶粒生长的时间较长,其晶粒尺寸应相对粗大且分布应相对不均匀。图 7 是



(a) 离焦量 $s=20$ mm (b) 离焦量 $s=40$ mm
(a) Defocusing amount $s=20$ mm (b) Defocusing amount $s=40$ mm



(c) 离焦量 $s=60$ mm (d) 离焦量 $s=80$ mm
(c) Defocusing amount $s=60$ mm (d) Defocusing amount $s=80$ mm

图 7 不同离焦量的试样金相图

Fig.7 Sample metallographic figure of different defocusing amount

同离焦量情况下的熔覆组织图,通过对试样横截面结合区 C 的组织分布情况及其晶粒尺寸大小对比分析发现,离焦量为 40 mm 时的晶粒尺寸最小,细化最明显,分布较为致密;离焦量为 80 mm 时的晶粒尺寸最大且晶粒分布不均匀。当离焦量分别为 20 mm 和 60 mm 时,其晶粒尺寸介于离焦量为 40 mm 与 80 mm 之间,晶粒分布均匀,符合冷却速度对晶粒尺寸以及组织分布的影响规律。

2.6 形状控制因子

激光熔覆过程中,凝固组织的生长形态主要由其形状控制因子 K 决定,根据上面的温度梯度分析可知 Z 向温度梯度对凝固组织影响最大,所以形状控制因子中温度梯度为 Z 向。形状控制因子 K 表示为:

$$K=G/R \quad (7)$$

式中: G 表示凝固过程的温度梯度; R 为凝固速度,其计算公式为^[9]:

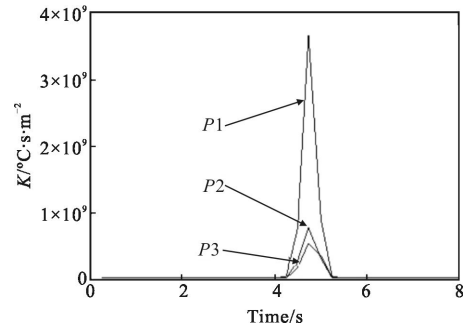
$$R=ldT/dt/G \quad (8)$$

形状控制因子 K 变化规律为: G 值在凝固开始时最大,随着凝固时间变化而逐渐减小;而 R 的变化规律正好相反。

由图 6(a)温度曲线图可知,在熔覆时间为 4.75s 三点的温度达到最大,4.75s 以后温度开始下降,熔覆材料处于凝固状态。图 8(a)为:离焦量为 0 mm 时,根据形状控制因子 K 得到的一个数值变化图。图 8(a)中 $P1$ 点的形状控制因子 K 值明显大于其余两点,所以图 8(b)中只列出 $P1$ 点在不同离焦量情况下的形状控制因子最大值进行分析说明($P2$ 、 $P3$ 两点均有相同的变化趋势)。

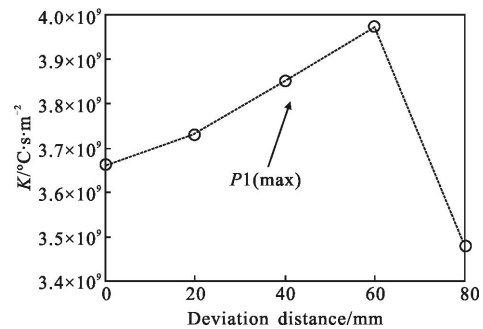
由图 6(a)可以得到离焦量为 0 mm 时, $P1$ 点温度达到基体材料熔点(660 °C)时的时间 t_1 为 5.25 s,由于基体熔点较低,所以其它 4 个不同离焦量, $P1$ 点温度达到基体熔点时的时间也均为 5.25 s;由图 6(b)得到离焦量为 0 mm 时, $P1$ 点出现最大冷却速度的时间 t_2 为 5 s,而其它 4 个不同离焦量, $P1$ 出现最大冷却速度的时间为 5.15 s,归因于,离焦量增加,光斑直径变大,材料的冷却速度受热影响范围变化的影响导致最大冷却速度出现了延迟。通过分析图 7 的试样金相图可以发现:基体材料降温阶段达到熔点的时间与达到最大冷却速度时间的先后顺序对其凝固组织形态并未表现出如参考文献[4]的结论:若冷却速度先达到最大值,其组织呈胞状晶粒,否则,其

组织呈柱形树枝晶。 t_1 与 t_2 的大小关系并未对晶粒生长产生一定的规律,可能是由于 7050 铝合金熔点较低,所以降温阶段到达熔点的时间均相对较迟,与整个温度变化阶段最高温度值出现的时间相差较多,所以冷却速度出现最大值的时间相对较早。



(a) 离焦量为 0 mm 时的 $P1$ 、 $P2$ 和 $P3$ 形状控制因子曲线图

(a) Shape control factor variation curves on $P1$ 、 $P2$ and $P3$ when the defocusing amount is 0 mm



(b) $P1$ 点不同离焦量时的最大形状控制因子值

(b) Highest shape control factor of $P1$ with different defocusing amount

图 8 形状控制因子

Fig.8 Shape control factor

材料凝固时,液相内的温度梯度 G 、凝固速度 R 和合金的原始成分是决定合金晶体形貌的主要因素。由图 8(b)可知,离焦量不同,其形状控制因子 K 也处于不断变化的过程,离焦量为 60 mm 的形状控制因子 K 有最大值 $3.97 \times 10^9 \text{ °C} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,相应的试样结合处 C 区金相图 7(c)出现生长缓慢的柱状晶;离焦量为 80 mm 时,其结晶前沿液相内实际温度梯度下降,凝固速度相对增大,其形状控制因子 K 出现最小值为 $3.48 \times 10^9 \text{ °C} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,相应的试样结合处 C 区金相图 7(d)组织主要以胞状晶形式生长;当离焦量为 20 mm 其金相组织主要为胞状晶,但考虑到其冷却速度相对离焦量为 80 mm 时较小,所以晶粒相对较为细

小;离焦量40 mm时,其金相组织也出现少量柱状晶。

3 结论

熔池宽度与深度尺寸随着离焦量的增大先增加后减小,在离焦量为20 mm时的熔池宽度与深度都出现了最大值。

通过对温度梯度的仿真发现,温度梯度在Z向的数值远大于Y向,以此可确定Z向散热条件最好,晶粒生长方向主要集中在Z向。

通过分析冷却速度,冷却速度最大值随离焦量的增大呈先增大后减小的趋势,离焦量为40 mm时的冷却速度最大,晶粒生长时间较短,相应的实验试样晶粒相对较小;当离焦量为80 mm时的冷却速度最小,相应的实验试样晶粒尺寸最大。

基体材料降温阶段达到熔点的时间与达到最大冷却速度时间的先后顺序对其凝固组织形态并未呈现出一定的规律性变化。

离焦量不同,其形状控制因子 K 也处于不断变化的过程。离焦量为60 mm的形状控制因子 K 有最大值,相应的金相组织出现生长缓慢的柱状晶;离焦量为80 mm时,其形状控制因子 K 出现最小值,金相图组织主要以胞状晶形式生长。

参考文献:

[1] Wu B, Li M Q, Ma D W. The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2012, 542: 79-87.

[2] PalDey S, Deevi S C, Alford T L. Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(7-9): 985-991.

[3] Zhu Gangxian, Lin Dichen, Zhang Anfeng. The influence of

laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 349-356

- [4] Chen Gang, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen. Solidification analysis during laser cladding process based on finite elements [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23 (4): 468-473. (in Chinese)
- 陈刚, 黎向锋, 左敦稳, 等. 基于有限元的激光熔覆凝固过程分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 468-473.
- [5] Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 141-152.
- [6] Zhang Xue. Studying for ultrasonic casting microstructure and thermal cracking sensitivity of 7050 aluminum alloy round ingot [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- 张雪. 7050 铝合金圆锭超声铸造微观组织及热裂敏感性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [7] Tian Rongzhang, Wang Zhutang. Alloy and Processing Manual [M]. Changsha: Central South University Press, 2000. (in Chinese)
- 田荣璋, 王祝堂. 合金及其加工手册 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [8] Zhao G P, Kim J D. Application of 3-D finite element method using Lagrangian formulation to dilution control in laser cladding process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, 45(5): 777-796.
- [9] Michael Bass. Laser Material Processing [M]. North-holland Publishing Company, 1983: 239-245.
- [10] Zheng Lijuan, Li Yan, He Dachuan, et al. Analysis on temperature field of multi-path laser clad and microstructure of coatings layer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S01): 52-57. (in Chinese)
- 郑丽娟, 李燕, 何大川, 等. 激光多道熔覆温度场及熔覆层组织分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S01): 52-57.