

文章编号 1004-924X(2011)02-0316-07

激光熔覆工艺参数对横向搭接熔覆层结合界面组织的影响

黄凤晓^{1,2}, 江中浩¹, 刘喜明³

(1. 吉林大学材料科学与工程学院汽车材料教育部重点实验室, 吉林 长春 130025;
2. 空军航空大学力学教研室, 吉林 长春 130022; 3. 长春工业大学材料学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了提高搭接熔覆层的质量并控制搭接结合界面, 研究了工艺参数对横向搭接结合区域组织形态的影响。结果显示, 当扫描速度、送粉速率、激光功率分别在 100~250 mm/min, 6~7.5 g/min, 1 500~2 500 W 区间变化时, 搭接结合区域呈现出不同的界面组织形态, 没有出现白亮层。这些界面组织一类表现为具有组织与方向“遗传性”的连续外延式生长, 另一类表现为非连续外延生长。工艺参数对结合界面组织的影响与其对前一道熔覆层表面转向枝晶区域的重熔深度以及前一道表面晶粒取向、各晶粒的熔化程度和激光熔池内存在的对流作用有关。

关键词: 激光熔覆; 工艺参数; 搭接; 结合界面; 显微组织

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0316

Effects of parameters on microstructure of bonding interface formed by overlapping laser cladding

HUANG Feng-xiao^{1,2}, JIANG Zhong-hao¹, LIU Xi-ming³

(1. *Key Laboratory of Automobile Materials, Ministry of Education, College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;*
2. *Department of Engineering Mechanics, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;*
3. *School of Materials Science & Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

Abstract: In order to improve the cladding quality and to control the bonding interface of the layer formed by overlapping laser cladding, the effects of parameters on the microstructure of bonding interface were studied. The results show that when scanning speed, powder feeding rate and laser power change in the range of 100–250 mm/min, 6–7.5 g/min and 1 500–2 500 W, respectively, the bonding region does not appear a white layer and presents different morphologies. One of morphologies is the continuous epitaxial growth with inherited microstructures and directions, and the other is discontinuous epitaxial growth. This is related to the effects of parameters on the depth of remelting region of a shifted dendrite, the orientation and molten degree of grain of a prior layer surface, and the con-

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50771049)

vection in the molten pool.

Key words: laser cladding; technological parameters; overlapping; interface; microstructure

1 引言

激光熔覆是一种利用激光处理的表面改性技术,它可以在低成本的基体材料上制成高性能的表层,节约大量的贵重合金,适用于工具、模具、机械零件的修复、抗摩擦及耐腐蚀涂层的加工等。此项技术现已发展成为一种无模成形制造工艺,能够快速直接制造出致密零件或模具,可以节约磨具费用、缩短制造周期,并能制造出传统技术不能或难以成形的复杂结构零件,具有成形材料范围广、零件性能优良和零件内部可实现梯度功能等优点^[1-7]。目前,激光熔覆及其成形技术已成为西方发达国家和我国激光加工领域的研究热点^[8]。

由于受激光功率的局限,单道激光熔覆层的宽度较窄。当要求大面积的熔覆层时,就需要采用横向搭接激光熔覆技术。搭接形成的熔覆层必须整体表面粗糙程度小,几何尺寸差别不大,界面为冶金结合,组织细密均匀,宏观缺陷少^[9]。在多道搭接熔覆中由于基体已不再是单一的原始基体,有一部分为前一道熔覆层,并且多次加热、冷却会使熔覆层和基体材料产生变形,开裂倾向加大;搭接熔覆过程中还涉及到了前一道熔覆层对基体表面的影响以及原熔覆层搭接处的重熔问题。另外,由于受界面熔化特征、凝固行为等因素的影响,横向搭接界面具有与其它区域不同的组织结构特征。结合界面的组织会影响熔覆层间的结合,熔覆层间的结合又会直接影响材料的最终使用性能,而层与层之间的界面结合问题是影响激光熔覆层质量的关键问题。因此,本文探讨了工艺参数对熔覆层搭接结合界面组织的影响,研究结果为提高搭接熔覆层的质量和对接界面的控制提供了一定的理论和实验依据。

2 实验材料及方法

基体材料为中碳钢,尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm。熔覆前基体材料表面预先用砂纸蹭去余锈,酒精/丙酮去除油污;熔覆合金粉末为

镍基合金,颗粒尺寸为 47~120 μm,使用前均进行烘干。基体材料和熔覆材料的化学成分见表 1。实验所用激光设备主要由上海雷鸣激光设备厂生产的 HJ-4 型串联 5 kW CO₂ 激光器,三轴联动激光加工数控机床和同轴送粉系统组成。保护气体和送粉气体均为氩气,气流量为 200 l/min。实验工艺参数见表 2,分别采用不同的工艺参数进行单层两道横向搭接熔覆,搭接率为 35%。

表 1 基体材料和熔覆材料的化学成分(质量分数%)

Tab. 1 Chemical compositions of substrate and cladding material

Element	Steel 45	Cladding material
C	0.45	<0.4
Si	0.20	2.5
B	—	1.5
Mn	0.20	—
Fe	—	<17
P	<0.04	—
S	<0.04	—
Ni	≤0.25	Bal.
Cr	≤0.25	10

表 2 激光熔覆工艺参数列表

Tab. 2 List of laser cladding processing parameters

序号 No.	激光功率 /W	扫描速度 /(mm·min ⁻¹)	送粉速率 /(g·min ⁻¹)
1	1500	100	6.5
2	2000	100	6.5
3	2500	100	6.5
4	2000	100	6
5	2000	100	6.5
6	2000	100	7
7	2000	100	7.5
8	2000	100	6.5
9	2000	150	6.5
10	2000	200	6.5
11	2000	250	6.5

3 实验结果及分析

单层两道搭接熔覆示意图如图 1 所示。横向

搭接熔覆时,熔覆第一道以中碳钢为基体。熔覆第二道时基体发生了变化,一部分为表面是倾斜曲面的前一道熔覆层,一部分为表面是平面的原始基体。激光熔覆时,在激光连续扫描作用下,金属熔体的凝固不是静态凝固,而是一个动态凝固的过程。随着激光的连续扫描,在熔池中金属熔体的凝固和熔化是同时进行的。在熔池的前半部分,固态金属连续不断地进入熔池内形成熔体,进行着熔化过程,而在后半部分液态金属不断地脱离熔池形成固体,进行着凝固过程。据物理冶金学得知,形核方式有两种,即均匀形核和非均匀形核。均匀形核其晶坯尺寸必须超过某一临界值时才能稳定存在,否则,又将重新溶入液态金属中。另一方面,熔体的过冷度 ΔT ($\Delta T = T_m - T$, T_m 为理论结晶温度, T 为实际结晶温度) 越小,某晶坯的临界值越大,越不容易形核。在激光作用下,由于熔池处于过热的状态,在凝固开始阶段,过冷度一般不会太大,均匀形核的可能性极小,特别是在过热度大的熔池中心区域,均匀形核更是不可能。在熔池边缘区域,即使过热度较低,但因为边缘区域有现成的固相界面存在,是非均匀形核的极好位置,同时非均匀形核所需形核功比均匀形核低,所以均匀形核的可能性也不太大。并且熔池边界被加热到半熔化状态的基材晶粒或相界面,这均给非均匀形核创造了条件^[10]。

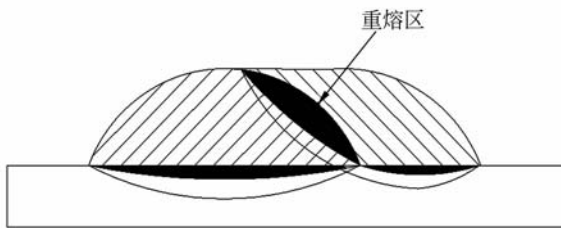
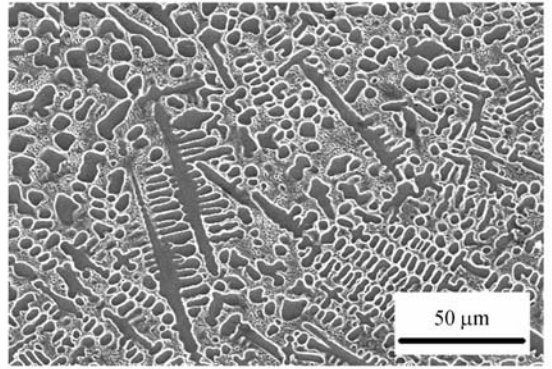


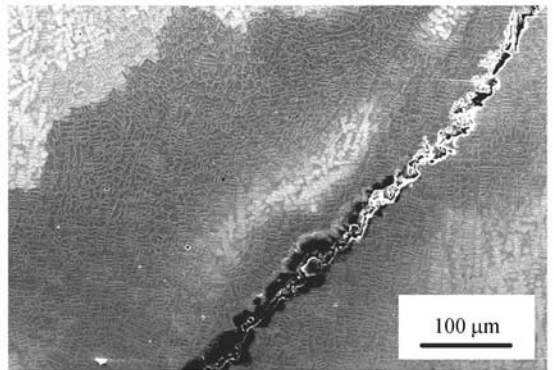
图 1 单层两道搭接熔覆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overlapping cladding layers

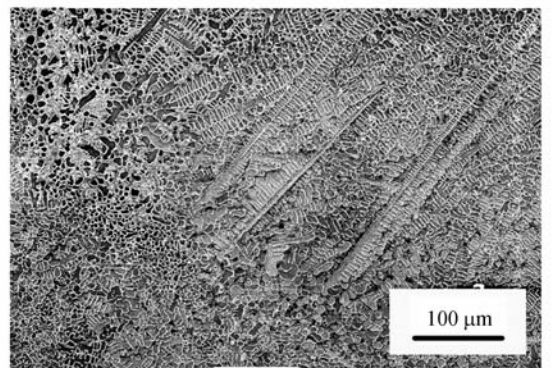
横向搭接熔覆结合界面组织形态如图 2 所示。搭接熔覆时前一道熔覆层的部分表面重新熔化,并以激光熔池的弧面为界面重新结晶向熔池中心生长。第一层表面的枝晶部分重熔,第二道熔覆层凝固结晶时,熔池的底部位于前道熔覆层的表面。激光熔覆过程中,改变工艺参数,对前一道熔覆层表面转向枝晶区域的重熔深度以及前一道表面晶粒取向、各晶粒的熔化程度和激光熔池内存在的对流搅拌作用的影响不同,导致结合界



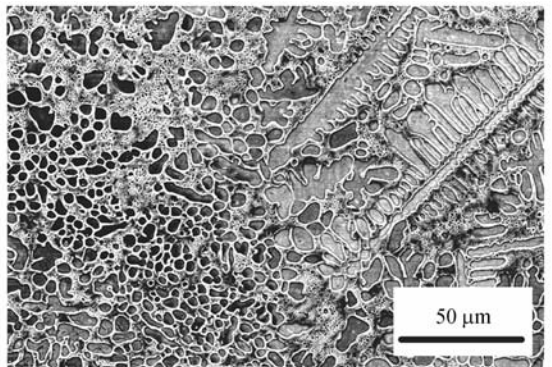
(a) $v_s = 100 \text{ mm/min}$, $v_f = 7 \text{ g/min}$, $P = 2\,500 \text{ W}$



(b) $v_s = 100 \text{ mm/min}$, $v_f = 7.5 \text{ g/min}$, $P = 2\,000 \text{ W}$

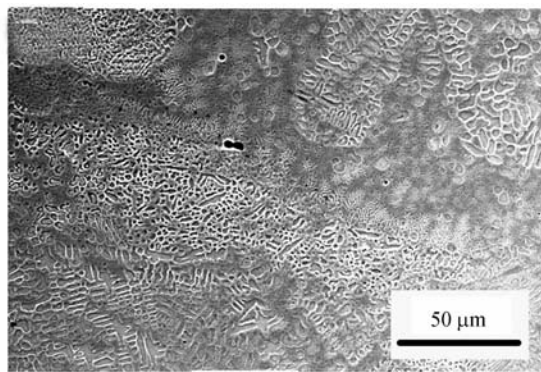


(c) $v_s = 100 \text{ mm/min}$, $v_f = 7 \text{ g/min}$, $P = 2\,000 \text{ W}$

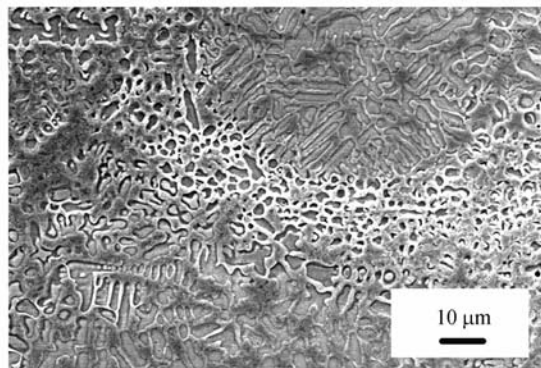


(d) c 图放大照片

(d) Magnified view of Fig. (c)

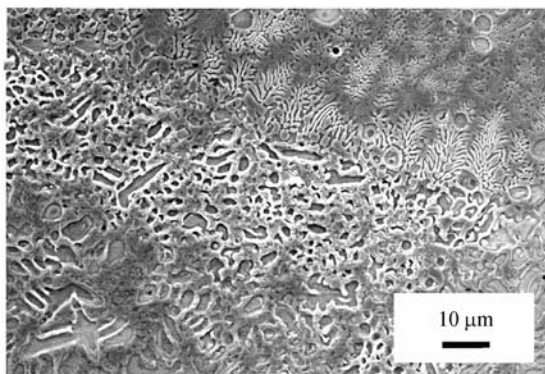


(e) $v_s = 150 \text{ mm/min}, v_t = 7 \text{ g/min}, P = 2\,000 \text{ W}$



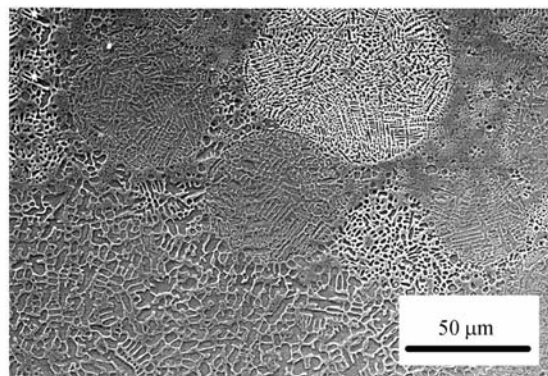
(i) h 图放大照片

(i) Magnified view of Fig. (h)



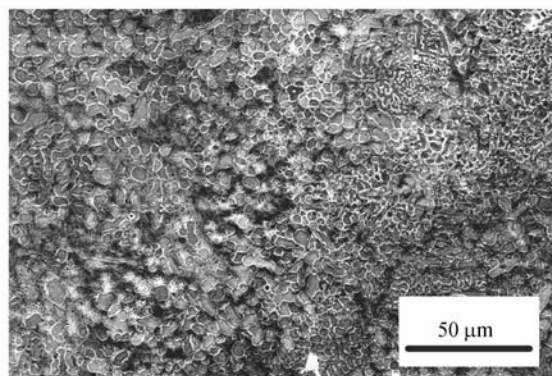
(f) e 图放大照片

(f) Magnified view of Fig. (e)

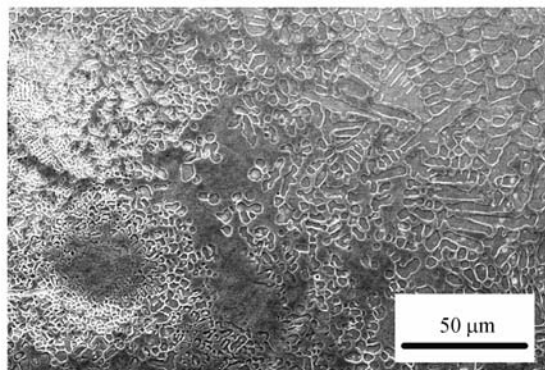


(j) 界面上部 ($v_s = 150 \text{ mm/min}, v_t = 7 \text{ g/min}, P = 2\,000 \text{ W}$)

(j) Upper of interface ($v_s = 150 \text{ mm/min}, v_t = 7 \text{ g/min}, P = 2\,000 \text{ W}$)



(g) $v_s = 150 \text{ mm/min}, v_t = 7 \text{ g/min}, P = 1\,500 \text{ W}$



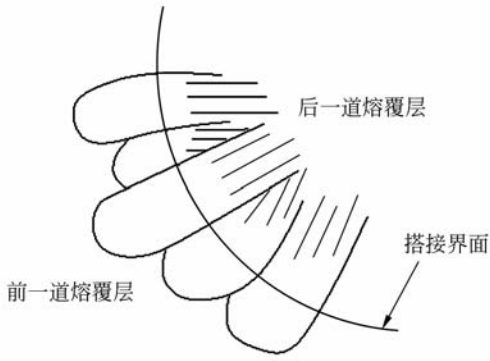
(h) $v_s = 150 \text{ mm/min}, v_t = 7 \text{ g/min}, P = 1\,500 \text{ W}$

图 2 单层两道熔覆形成的搭接界面组织

Fig. 2 Microstructures of interface of layers formed by overlapping cladding

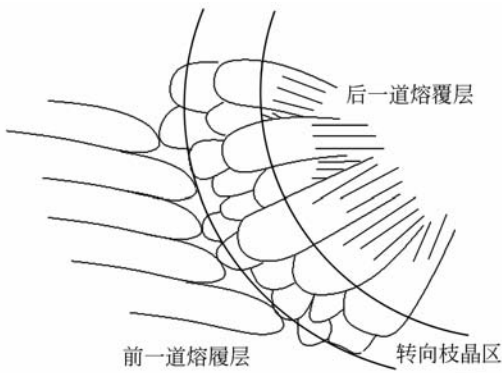
面组织形态产生了异同。图 3 为搭接熔覆界面结合示意图。

激光熔覆时,由于熔覆层表面的散热主要通过周围环境,因而熔池顶部会由于温度梯度的降低和凝固速度的增大出现等轴晶或改变方向的树枝晶(称其为转向树枝晶)。横向搭接熔覆时,由于搭接区域基体不再是中碳钢基材,而是前一道部分激光熔覆层,因此搭接熔池边界重熔区基体的化学成分和晶体结构与熔池金属完全相同,重熔区晶格结构及点阵常数完全相同,为第二道熔覆层依附于第一道熔覆层的部分熔化界面作为“现成界面”,形成具有相同或相近晶格结构与晶粒尺寸的凝固方式即“外延式”生长提供了条件^[11]。图 2(a)为激光功率相对较大得到的照片。由图观察到后一道熔覆层与前一道熔覆层的搭接



(a) 连续外延生长

(a) Continuous epitaxial growth



(b) 非连续外延生长

(b) Discontinuous epitaxial growth

图 3 搭接熔覆结合界面形态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of interface morphology of overlapping cladding layers

区域清晰可见, 搭接界面没有出现白亮层。在搭接表面重熔时, 由于激光功率相对较大, 转向树枝晶区域熔化较多, 搭接区的组织形态是枝晶垂直于搭接区的等温面向熔池中生长, 由不同方向生长的枝晶发生交叉而形成的, 部分晶粒沿袭第一道熔覆层的晶粒生长方向。第二道熔覆层部分枝晶继续以外延式向熔池生长, 部分枝晶的生长方向继承了第一道熔覆层的结晶方向, 即第二道的组织延续第一道树枝晶组织继续生长, 呈现出了组织与方向的“遗传性”。有的树枝晶生长方向发生了改变, 这与晶体的生长方向由晶体学取向和热流方向共同决定有关。同时组织明显粗化, 由于此时部分的热量传递主要通过第一道熔覆层, 第一道熔覆层由于材料本身的导热系数较中碳钢低一些, 同时又由于第一道熔覆层对基体的预热

导致了第二道熔覆层组织的粗大。

图 2(b) 所示为送粉速率相对较大的状态。可观察到在搭接熔覆时, 由于送粉速率相对较大或送粉不稳定等因素的影响, 粉光匹配不好, 出现了前一道熔覆层与后一熔覆层之间未形成冶金结合的现象。但并未阻碍生长方向的继承, 这种生长方向继承性表现的依然非常明显。即使受到了断续未冶金结合界面的阻碍, 后一熔覆层枝晶的生长方向仍然是继承了前一道熔覆层的方向, 枝晶的生长呈现出强烈的继承性。此现象破坏了搭接界面的结合性, 严重影响了熔覆层的搭接质量。

图 2(c) 所示为扫描速度相对较慢的状态。观察到出现了明显的组织分界现象, 以第一道熔覆层为基的第二道熔覆层在界面处的组织为粗大的树枝晶, 但树枝晶的生长方向明显发生了改变。这是因为搭接熔覆时, 由于扫描速度相对较慢, 使重熔深度增加, 但扫描速度慢, 又增加了熔覆层的厚度, 不利于重熔深度的增加, 二者共同影响了界面处的组织形态, 同时扫描速度的减慢, 降低了熔覆层的冷却速率, 促使了粗大组织的形成。如重熔深度未超过转向枝晶区域, 则破坏了枝晶外延生长的连续性, 从而使第二道熔覆层树枝晶没有呈现连续外延生长的特点^[12]。第二道熔覆层树枝晶生长方向几乎与搭接结合界面垂直, 这也与晶体生长方向由晶体学取向和热流方向共同决定有关。对立方点阵金属 Ni, 最有利于晶体生长的方向为 $\langle 001 \rangle$, 在第一道熔覆层的熔池边界处, 以熔覆层为基的基体晶粒取向各不相同, 杂乱无章, 其中当有的晶粒结晶取向 $\langle 001 \rangle$ 正好与熔池边界等温面相互垂直, 即正好指向散热最快的方向时, 其生长方向自然与搭接界面垂直, 以有利的优势向熔池中心不断生长。而其中有的晶粒结晶取向 $\langle 001 \rangle$ 会不同程度地偏离熔池边界等温面的垂直方向, 因而其生长受到不同程度的抑制。图 2(d) 为图 2(c) 的放大照片。

图 2(e) 所示为扫描速度相对较快的状态。与图 2(c) 相似, 观察到以第一道熔覆层为基的第二道熔覆层在界面处的组织为短细的树枝晶, 生长方向几乎与搭接界面垂直, 但树枝晶无论一次枝晶还是二次枝晶均明显变细。组织较细与扫描速度加快, 熔覆层的冷却速率较大有关。第二道熔覆层树枝晶没有呈现连续外延生长的特点, 图 2(f) 是图 2(e) 的放大照片, 从图中可看出搭接界

面上生长的树枝晶与图 2(d)相比明显细化。搭接区显微组织局部呈现不均匀的现象,这与熔覆颗粒与颗粒之间的相互作用、熔池中的对流传质、微区的冷却速度和生长方向均有关。

图 2(g),(h)呈现的是第一道与第二道的搭接区域并不明显,说明两道熔覆层之间已经达到了层间界限不明显的冶金结合。与上述几种情况相比,由于激光功率较低,重熔深度远未超过第一道熔覆层顶部转向枝晶区域。同时由于功率较低,熔覆层的冷却速率较快,界面处未形成较长生长的树枝晶。这种结合组织形态有利于搭接熔覆层之间界面的良好结合,有利于熔覆层组织、性能的整体性。图 2(i)为图 2(h)中球状组织的放大照片,分析认为球状组织为熔覆材料镍基合金的粉末颗粒。由图可见,镍基合金粉末颗粒的周围已出现白色组织,颗粒被周围白色组织包围着。这表明镍基合金颗粒边缘已部分熔化,与其它颗粒间形成了良好的冶金结合。这种保持原有镍基合金颗粒形态的组织是一种较为理想的加热状态,既保留了颗粒原有的良好性能,又促进了熔覆材料颗粒间的良好冶金结合,对提高熔覆层的性能非常有利,是激光熔覆过程中期望得到的。

图 2(j)所示为位于搭接结合界面上半部的组织。图中观察到依附第一道熔覆层搭接形成的第二道熔覆层出现了球状组织,其中有一个较大的球状颗粒,周围存在一些相比较小的球状颗粒,并且较小颗粒侵入大颗粒中。分析认为球状颗粒均

为镍基合金粉末颗粒,但是小颗粒为原始的镍基合金小颗粒,而大颗粒为镍基小颗粒被激光加热后的长大,即原始小颗粒的粗化。这种颗粒的粗化,相比原始的小颗粒不利于熔覆层性能的提高。调整好工艺参数,使熔覆颗粒在保持原始细小颗粒形态的前提下,与其它颗粒间形成良好的冶金结合,有利于熔覆层性能的提高。

4 结 论

为提高搭接熔覆层的质量和实现对搭接结合界面的控制,本文根据激光熔覆及其成形技术的工艺特点研究了工艺参数对横向搭接结合区域组织形态的影响。当扫描速度、送粉速率、激光功率分别在 100~250 mm/min, 6~7.5 g/min, 1 500~2 500 W 区间变化时,由于工艺参数综合作用的影响,横向搭接熔覆时结合界面呈现了不同的组织形态,未出现白亮层。一种表现为具有组织与方向“遗传性”的连续外延式生长,另一种为非连续外延生长。当扫描速度 v_s 为 100 mm/min, 送粉速率 v_f 为 7.5 g/min, 激光功率为 2 000 W 时,送粉速率相对较大,粉光匹配不佳,搭接区域未形成冶金结合,破坏了熔覆层良好的整体性能。激光熔覆时,熔覆颗粒既保持原有的细小颗粒的形态,同时又与其它颗粒间形成良好的冶金结合,是一种较为理想的加热状态,有利于熔覆层整体性能的提高。

参考文献:

- [1] GU D D, SHEN Y F, LU Z J. Microstructural characteristics and formation mechanism of direct laser-sintered Cu-based alloys reinforced with Ni particles [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 2099-2107.
- [2] SMUROV I. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202: 4496-4502.
- [3] ZHANG F Y, CHEN J, TAN H, *et al.*. Composition control for laser solid forming from blended elemental powders [J]. *Optic. Laser. Technol.*, 2009, 41: 601-607.
- [4] YANG N. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding [J]. *Optic. Laser. Technol.*, 2009, 41: 94-98.
- [5] 刘要武. 铜基材料上激光熔覆镍基合金的结合强度 [J]. *光学精密工程*, 1997, 5(1): 62-66.
- LIU Y W. Binding strength between coating layer and the substrate clad Ni-base alloy on the copper alloy by laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 62-66. (in Chinese)
- [6] POPRAWA R. 激光制造工艺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 149-153.
- POPRAWA R. *Laser Manufacture Technics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 149-153. (in Chinese)
- [7] 刘要武. H62 黄铜基材间显微组织及微区分析 [J]. *光学精密工程*, 2000, 8(1): 26-28.
- LIU Y W. Analysis of microstructure between Ni-Cr-B-Si laser cladding layers and H62 brass bases

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 26-28. (in Chinese)
- [8] 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659. ZHONG M L, LIU W J. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1653-1659. (in Chinese)
- [9] 张庆茂, 刘喜明, 关振中, 等. 送粉式宽带激光熔覆—搭接基础理论的研究[J]. 金属热处理, 2001(2): 25-28. ZHANG Q M, LIU X M, GUANG Z Z, *et al.*. Fundamental investigation on overlapping coating formed by broad-beam powder feeding cladding [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001(2): 25-28. (in Chinese)
- [10] 刘喜明. 送粉式激光熔覆基础理论研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1998: 87-89.
- LIU X M. *An Investigation on the fundamentals of powder feeding type laser cladding* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998: 87-89. (in Chinese)
- [11] 李言祥, 吴爱萍. 材料加工原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 132-136. LI Y X, WU A P. *Principle of Materials Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 132-136. (in Chinese)
- [12] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 50-70. HUANG W D, LIN X, CHEN J, *et al.*. *Laser Three-dimensional Forming* [M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 50-70. (in Chinese)

作者简介:

黄凤晓(1969—), 女, 吉林长春人, 讲师, 博士研究生, 1992年、2000年于长春工业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事激光及材料表面改性技术的研究。E-mail: hfx0431@sohu.com

江中浩(1956—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 1982年、1989年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位, 1994年于中国科学院长春光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事复合材料的力学行为、金属及合金纳米表面工艺和应用等方面的研究。E-mail: jzh@jlu.edu.cn

刘喜明(1963—), 男, 吉林四平人, 教授, 博士生导师, 1985年、1990年于长春工业大学、吉林工业大学分别获得学士、硕士学位, 1998年于中国科学院长春光学精密机械研究所获得博士学位, 主要从事激光与材料之间作用的本质规律、金属表面工艺和应用等方面的研究。E-mail: liuxm@ mails. ccut. edu. cn。