

Z轴离焦量对激光熔覆成形的影响

练国富, 杨 谔, 黄 旭, 江吉彬

(福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建福州 350118)

摘要: 为了深入探究 Z 轴离焦量对激光熔覆成形的影响, 综合考虑 Z 轴离焦量导致的熔池粉末利用率、激光能量密度等因素对熔覆成形的影响, 通过改变激光功率、扫描速度、气流量、离焦量 4 个因素进行 $L_{16}(4^4)$ 正交试验, 以及 Z 轴离焦量变化的单因素试验, 揭示激光功率、扫描速度、气流量、离焦量 4 个因素对熔覆成形的耦合作用规律。正交试验结果表明, 离焦量、激光功率、扫描速度、气流量在激光熔覆成形中都扮演着重要角色, 对熔覆效率的因素影响主次为: 激光功率 > 气流量 > 离焦量 > 扫描速度。Z 轴离焦量单因素试验结果表明: 激光熔覆过程需要一定的离焦量才能获得最佳熔覆质量; 当离焦量为 5mm 时, 熔覆层的高度最高; 当离焦量小于或大于 5mm 时, 熔覆层高度降低; 当 Z 轴离焦量逐渐增加时, 粉末利用率先逐渐增加再逐渐减少。

关键词: 激光熔覆; 离焦量; 成形质量

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.03.007

引用格式: 练国富, 杨谔, 黄旭, 等. Z 轴离焦量对激光熔覆成形的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(3): 229-235.

LIAN Guofu, YANG Su, HUANG Xu, et al. Effect of defocusing distance along Z axis on laser cladding forming[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(3): 229-235

Effect of defocusing distance along Z axis on laser cladding forming

LIAN Guofu, YANG Su, HUANG Xu, JIANG Jibin

(School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The variation of distance between laser head and substrate (named defocus distance) has a considerable effect on powder utilization efficiency and energy density, therefore affecting the laser cladding forming (LCF) process. Orthogonal experiments $L_{16}(4^4)$ of the four parameters: laser power, scanning speed, gas flow rate and defocusing distance and single factor experiment of the defocusing distance along Z axis were conducted to investigate the coupling effects of these parameters on LCF process. The result of orthogonal experiment suggests that all four parameters play important roles in LCF, and the order of factors which affect the cladding efficiency is: laser power > gas flow rate > defocusing distance > scanning speed. The result of the single factor experiment indicates that the optimal cladding quality occurs when the defocusing distance reaches a certain level. The maximum cladding layer height can be achieved when the defocusing distance is 5mm. The cladding layer height is reduced when the defocusing distance is less or larger than 5mm. It is proved that the powder utilization efficiency gradually increases and then decreases when the defocusing distance keeps increasing.

Key words: laser cladding; defocusing amount; forming quality

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51575110)资助.

作者简介: 练国富(通讯作者), 男, 1980年生, 博士/副教授. 研究方向: 激光增材制造, 激光表面工程. E-mail: gflian@mail.ustc.edu.cn

0 引言

激光熔覆是利用高能激光束,将通过输送装置的金属粉末或事先预置于基体上的涂层熔化,在基体表面添加材料形成冶金结合的熔覆层的一种关键技术^[1-2].理论上来说,单层行程 Z 轴离焦量的数值应当与单层熔覆层高度一样.然而,在进行激光熔覆成形试验时,激光功率和气流量的波动以及基体热积累等因素将导致熔覆层单层高度发生改变,进而使得后续熔覆堆积高度产生不一致性,甚至导致熔覆堆积无法进行^[3].因此,工艺参数 Z 轴离焦量的确定十分重要.

关于离焦量对熔覆形状的影响,朱刚贤等^[4]研究了 Z 轴单层行程参数对成形薄壁试件表面精度的影响规律,提出并验证了 Z 轴单层行程理论模型,指出 Z 轴离焦量是单道熔覆层宽度与高度的函数.王鑫林等^[3]给出 Z 轴单层行程 ΔZ 选取时的推荐值为 $0.5d_2 \leq \Delta Z \leq 0.6d_2$,此时熔覆过程能够通过自身存在的反馈调节达到 Z 轴单层行程 ΔZ 与单层熔覆层高度相等的稳定成形状态.李建忠等^[5]模拟了离焦量对 7050 铝合金表面熔覆 Al/Ti 复合粉末的性能影响,结果表明熔宽、熔深与离焦量成反比关系,离焦量数值不同时,熔覆层中的晶粒生长情况也不一样.关于离焦量对熔覆性能的影响,邱星武^[6]研究了离焦量对提高 40Cr 表面性能的影响,结果表明适当的离焦量可以保证熔覆层较高的硬度、耐磨性与耐蚀性,能够获得结合良好的熔覆层.魏金龙等^[7]研究了电流、脉宽、频率、扫描速度、离焦量对熔覆裂纹的影响,并建立了裂纹率与工艺参数之间的数学模型.张德强等^[8]研究了熔覆头与基体的距离和激光功率对熔覆层几何特征、硬度、金相组织的影响,并得到了一组优化熔覆工艺参数.Gao 等^[9]研究了离焦量对激光熔覆的影响,结果表明以负离焦方式进行熔覆可以解决重叠熔覆层中高稀释率和孔隙的问题.Rauf 等^[10]采用 CO_2 激光器将等离子喷涂的涂层进行重熔、固化,通过优化激光功率、离焦量等工艺参数改善了熔覆层的微观结构.Riquelme 等^[11]研究了激光功率、扫描速度和激光焦点位置对

熔覆几何与微观结构(气孔和裂纹)的影响.已有的研究表明,离焦量对熔覆的形状与性能都具有一定的影响.

在激光能量和熔覆效率的研究方面, Mahamood 等^[12]研究了激光功率、扫描速度、粉末流速和气体流量四个工艺参数对钛合金材料沉积效率的影响.Fu 等^[13]通过理论和试验研究发现激光熔覆层的裂纹率受到激光功率、光斑直径和扫描速度的影响,并且与激光的能量成正比,和扫描速度、光斑直径成反比.Wang 等^[14]研究了不同的激光类型、激光功率、扫描速度和预热温度对激光能量和熔覆效率的影响.但是在激光熔覆成形的过程中,离焦量的变化将引起激光光斑、进入熔池粉末数量以及能量密度的变化,进而引起熔覆粉末利用率的变化,而现有的研究没有考虑离焦量对激光能量和熔覆效率的影响,特别是离焦量与其他熔覆参数对熔覆效率的耦合作用规律的研究不足.

本次试验研究 Z 轴离焦量与激光功率、扫描速度、气流量对激光熔覆成形的耦合作用规律,借助于金相组织、熔覆层几何形貌的评价手段揭示 Z 轴离焦量对激光熔覆成形质量的影响规律.

1 试验材料与设备

试验采用的基体材料为 45 号钢,规格为 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$.金属粉末为不锈钢粉末,其化学成分如表 1 所示,在扫描电镜下的粉末形态如图 1 所示,绝大多数颗粒为球形,平均粒径约为 $67 \mu\text{m}$,尺寸合理,粒径分布基本符合正态分布,可以保证在一定压力下顺畅送粉.

试验装置为 IPG 公司生产的光纤激光器 Ytterbium Laser System(YLS-3000).熔覆前,用丙酮将基材表面油污清洗干净,随后用酒精再清洗干净并烘干,同时将粉末置于真空烘干机中烘干 30 min.熔覆后的样件随后进行线切割、镶嵌打磨,用手持式 LED 灯数码显微镜拍摄熔覆层横截面的几何形貌,多次测量取平均得到熔覆层的几何特征,并将其进行打磨、抛光,在王水溶液中浸蚀 5 s,于金相显微镜 IE2000 下进行显微组织观察.

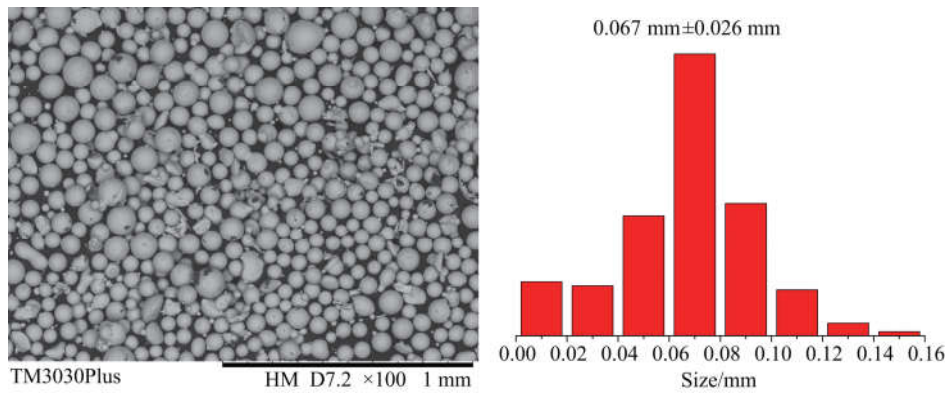


图 1 不锈钢粉末的 SEM 照片及粒径分布

Fig.1 Particle size and distribution of stainless steel powder

表 1 不锈钢粉末的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of the stainless steel powder(mass fraction)

C	Si	Cr	Mo	O	Ni	Cu	Fe
3.74%	1.73%	16.51%	2.29%	0.97%	3.37%	0.22%	余量

2 正交试验结果与分析

根据激光熔覆设备的工艺参数设置以及前期的预试验,采用 $L_{16}(4^4)$ 正交设计进行试验.光斑直径为设备设定值 1.2 mm,此时激光的焦平面与喷嘴距离为 10 mm.16 组工艺参数熔覆的几何形貌如图 2 所示,以熔覆层高度、宽度、横截面积为评价指标的试验结果如表 2 所示.



图 2 正交试验几何形貌图

Fig.2 Geometric morphology of the orthogonal experiment

表 2 正交试验结果分析

Tab.2 Analysis of orthogonal experiment results

试验号	激光功率/ kW	扫描速度/ (mm · s ⁻¹)	气流量/ (L · h ⁻¹)	离焦量/ mm	高度 h/mm	宽度 w/mm	面积 s/μm ²
1	1	6	1 000	5	0.530	2.300	9 831
2	1	8	1 200	10	0.715	1.953	14 576
3	1	10	1 400	15	0.398	2.006	7 879
4	1	12	1 600	20	0.415	2.562	9 189
5	1.1	6	1 200	20	0.440	2.853	13 418
6	1.1	8	1 000	15	0.759	2.941	19 480
7	1.1	10	1 600	10	1.306	2.077	32 232
8	1.1	12	1 400	5	1.465	2.200	33 763
9	1.2	6	1 400	10	1.968	2.509	60 769
10	1.2	8	1 600	5	2.331	2.050	58 807
11	1.2	10	1 000	20	0.698	2.968	18 848

续表 1

试验号	激光功率/ kW	扫描速度/ (mm · s ⁻¹)	气流量/ (L · h ⁻¹)	离焦量/ mm	高度 h/mm	宽度 w/mm	面积 s/μm ²
12	1.2	12	1 200	15	0.979	2.677	27 806
13	1.3	6	1 600	15	0.986	2.933	29 721
14	1.3	8	1 400	20	0.847	3.215	25 105
15	1.3	10	1 200	5	0.441	2.006	25 050
16	1.3	12	1 000	10	0.309	2.040	11 383
k _{1h}	0.514	0.981	0.574	1.192			
k _{2h}	0.992	1.163	0.644	1.074			
k _{3h}	1.494	0.711	1.169	0.780			
k _{4h}	0.646	0.792	1.260	0.600			
R _h	0.980	0.452	0.686	0.592			
因素主次	(高度)	激光功率 > 气流量 > 离焦量 > 扫描速度					
k _{1w}	2.205	2.649	2.562	2.139			
k _{2w}	2.518	2.540	2.372	2.145			
k _{3w}	2.551	2.264	2.482	2.639			
k _{4w}	2.548	2.370	2.405	2.899			
R _w	0.346	0.385	0.190	0.760			
因素主次	(宽度)	离焦量 > 扫描速度 > 激光功率 > 气流量					
k _{1s}	10 368.464	28 434.664	14 885.557	31 862.745			
k _{2s}	24 723.255	29 492.010	20 212.499	29 739.800			
k _{3s}	41 557.547	21 002.359	31 878.881	21 221.554			
k _{4s}	22 814.947	20 535.179	32 487.276	16 640.113			
R _s	31 189.083	8 956.831	17 601.719	15 222.632			
因素主次	(面积)	激光功率 > 气流量 > 离焦量 > 扫描速度					
优方案	1.2	8	1600	5			

分别以熔覆层高度、宽度、横截面积为评价指标进行直观分析可得:离焦量、激光功率、扫描速度、气流量在激光熔覆成形中都扮演着重要角色.理论上,气流量增加、扫描速度减少,进入熔池的粉末量增加,相应的熔覆效率增大,如第 9,10 组.然而第 13,14 组与第 9,10 组在相同的气流量、扫描速度下,激光功率增加了,熔覆效率反而减少了.虽然激光功率增大,单位时间内进入熔池的能量相应增加,但是由于 Z 轴离焦量增大了,使得激光能量密度减少了,一定的粉末状态下获得的能量减少,导致熔池能量需求与实际熔池获得的能量不匹配,使得成形质量

减少.因此,适当的 Z 轴离焦量、增大气流量、降低扫描速度、增大激光功率可以提高熔覆成形的效率.

从图 2 中可观察到,16 组样件均没有产生裂纹,每道熔覆层都与基体充分地冶金结合,结合性好.另外,从微观角度对熔覆效果做进一步地分析,观察每道熔覆层的金相组织,16 组的金相组织如图 3 所示,不同工艺参数激光熔覆出来的效果相差甚大.其中,由第 3,4,5,6,12,14,16 组的显微组织图显示,熔覆层中存在大量的气孔或未充分熔融的粉末颗粒等熔覆缺陷.这些缺陷主要来源于激光功率的不足所导致的粉末未充分熔融并获得足够的流动

性,或者在过高的激光功率下部分粉末气化所导致的气孔.这些缺陷都将导致应力集中,易成为裂纹源,使熔覆层开裂并明显降低其力学性能.另外,第 1,2,7,9,10,11,13,15 组的显微组织情况相对于前面几组而言,晶体组织较为均匀,靠近熔覆界面的部分为无核形式生长的平面晶,而后沿着温度梯度方向生长出柱状晶和少量的树枝晶,符合激光熔覆快

速凝固过程的预期,但这 8 组也存在着少量气孔等熔覆缺陷,或在界面层有明显的成分偏析存在,不利于熔覆层的稳定结合.而第 8 组的组织图显示,该熔覆层晶体组织生长均匀,主要为柱状晶,无明显的可见缺陷,可以推测其熔覆层的物理力学性能稳定,熔覆效果最佳.

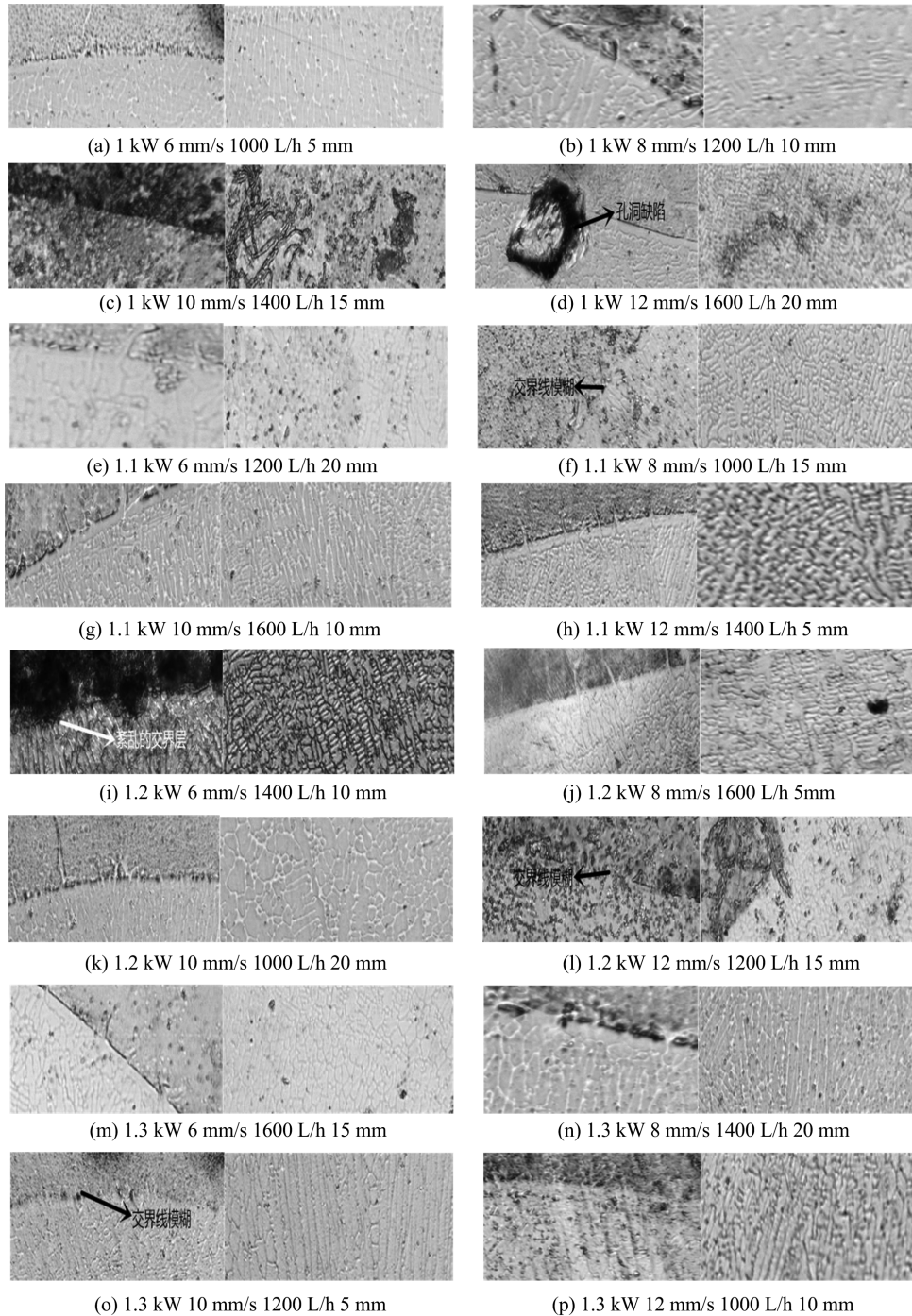


图 3 正交试验金相组织图 (200X)

Fig.3 Metallographic diagram of orthographic experimental(200X)

正交试验直观分析法(表 2)根据熔覆层尺寸所得到的最优方案为第 10 组,熔覆效率较高依次为第 9,10,8 组.但最优参数的选择应综合考虑熔覆效率和熔覆质量,在保证质量的前提下尽可能提高熔覆效率.9,10 两组样品的熔覆层都存在明显缺陷,而熔覆质量最好的第 8 组(1.1 kW,12 mm/s,1400 L/h,5 mm)熔覆面积仅次于 9,10 两组,熔覆效率较高,为最优参数,作为后续单因素试验的基础.

3 Z 轴离焦量单因素试验结果与分析

由前面分析可得,激光功率 1.1kW、扫描速度 12mm/s、气流量 1400L/h、离焦量 5mm 为最优工艺参数组.本文通过改变离焦量参数值进行单因素试验,研究 Z 轴离焦量在激光功率、扫描速度、气流量一定的工艺参数条件下对激光熔覆成形的影响.Z 轴离焦量的试验范围以 2 mm 为间隔,从 1 mm 试验至 25 mm.

3.1 熔覆层几何形貌分析

图 4 为单因素试验熔覆层的熔宽、熔高变化趋势图.从图中可观察到,对于熔高而言,当离焦量为 5 mm 时,熔覆层高度最高;当离焦量小于或大于 5 mm 时,熔覆层高度都表现为减小.对于熔宽而言,总体趋势变化不是很明显,细微观察之下发现,熔覆层的宽度缓慢增加.当离焦量增大时,激光的光斑直径随之增大,从而使更多的粉末处于高能光斑中,但由于能量更为分散,高斯型热源的光斑边界能量过低,不能达到熔覆的效果,所以熔覆层宽度增加,但幅度有限;当离焦面越靠近焦平面时,光斑直径越小,能量密度越高,能够获得足够能量熔化并进入熔池的合金粉末也增加.但是,当离焦量值接近于 0

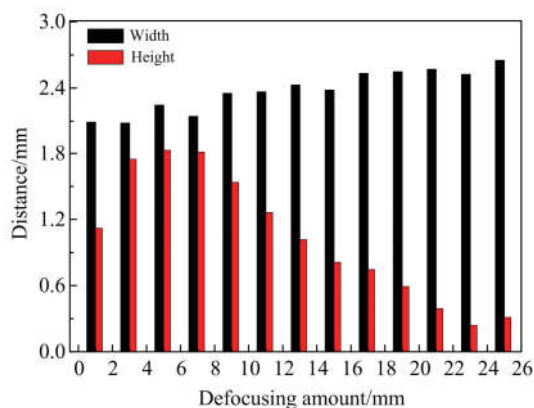


图 4 熔覆层几何形貌

Fig.4 Cladding layer geometry morphology

时,由于能量密度过高,光斑中心温度将使部分合金粉末气化,实际熔覆质量有所下降,最终使得熔覆层高度降低.如第 1,2 组,离焦量较小的样品熔覆层高度反而小于离焦量较大的第 3 组,就是因此而来.综上所述可知,选择适当的离焦量使得功率密度分布相对均匀,可以获得更好的熔覆效率,并优化组织.

3.2 粉末与能量利用率

在粉末扫描速度、气流量、颗粒尺寸不变的情况下,熔覆层质量的增加代表着粉末利用率的增加.图 5 为激光熔覆的前后质量差值,从图中可知,随着 Z 轴离焦量的增加,熔覆层的质量先逐渐增加随后再逐渐减少,第 11 组之后熔覆层的质量小于 0.2 g,已经不能顺利进行熔覆成形.在固定其余参数后,调整离焦量将改变激光光斑中单位面积获得的能量大小,以及送粉路径焦点与光路的耦合状态.因此,提供粉末熔融所需的足够的能量密度以及尽可能多地将粉末包裹于激光光束内部是获得更高粉末利用率的两个主要因素,其均可通过调整 Z 轴离焦量来获得最优参数.

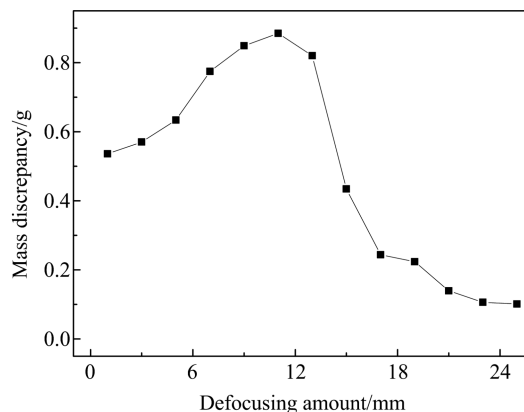


图 5 熔覆前后质量差

Fig.5 Mass difference before and after the cladding

4 结论

在正交试验中,通过直观分析法结合熔覆层的显微组织分析发现,离焦量是激光功率、扫描速度、气流量三个基本参数以外的一个极其重要的参数:

(I)激光功率 1.1 kW、扫描速度 12 mm/s、气流量 1400 L/h、离焦量 5 mm 为最优工艺参数组,获得了较优的熔覆效率和良好的金相组织,通过调整离焦量可以进一步改变熔覆效率.

(II)当离焦量为 5 mm 时,熔覆层的高度最高;当离焦量小于或大于 5 mm 时,熔覆层高度降低.离焦量过低,过大的中心温度使部分粉末气化烧失;离

焦量过高,光斑能量较低,边缘区域的粉末未能获得足够能量熔融成液相,使熔覆效率降低,粉末利用率迅速降低直至不能熔覆成形。

(Ⅲ)Z轴离焦量对熔覆层组织形貌有重要影响。离焦量过大时粉末未能获得足够的能量充分熔融,熔覆层中将存在大量由未熔融颗粒所带来的界面缺陷和裂纹。当离焦量不足时,光斑中心区域能量过大,高温将使部分颗粒气化烧蚀,形成气孔和杂质缺陷,同样不利于获得优质熔覆质量。

(Ⅳ)激光熔覆需要一定的离焦量,因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高,会使部分合金粉末气化。选择适当的离焦量使得功率密度分布相对均匀,可以获得更好的熔覆效率,并优化组织。

参考文献(References)

- [1] 江吉彬,练国富,许明三. 激光熔覆技术研究现状及趋势[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(1): 27-36.
JIANG Jibin, LIAN Guofu, XU Mingsan. Research on status and trend of laser cladding [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(1): 27-36.
- [2] TOYSERKANI E, KHAJEPOUR A, CORBIN S. Laser Cladding [M]. 1st ed. New York: CRC Press, 2005.
- [3] 王鑫林,邓德伟,胡恒,等. Z轴单层行程对激光熔覆成形的影响[J]. 激光技术, 2015, 39(5): 702-705.
WANG Xinlin, DENG Dewei, HU Heng, et al. Effect of single z-increment on laser cladding forming [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 702-705.
- [4] 朱刚贤,张安峰,李涤尘,等. 激光金属制造薄壁零件z轴单层行程模型[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 57-60.
ZHU Gangxian, ZHANG Anfeng, LI Dichen, et al. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 57-60.
- [5] 李建忠,黎向锋,左敦稳,等. 模拟研究离焦量对7050铝合金Al/Ti熔覆过程的影响[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1126-1133.
LI Jianzhong, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen, et al. Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1126-1133.
- [6] 邱星武. 离焦量对激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2017, 9(2): 98-101.
QIU Xingwu. Effects of defocusing distance on microstructure and properties of laser cladding layer [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(2): 98-101.
- [7] 魏金龙,于爱兵,施晨淳,等. 工艺参数对激光熔覆裂纹缺陷的影响[J]. 激光杂志, 2016, 37(4): 7-10.
WEI Jinlong, YU Aibing, SHI Chenchun, et al. Influence of process parameters on laser cladding crack defects [J]. Laser Journal, 2016, 37(4): 7-10.
- [8] 张德强,张吉庆,李金华,等. 离焦量对45#钢表面激光熔覆镍基碳化钨粉的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(12): 92-97.
ZHANG Deqiang, ZHANG Jiqing, LI Jinhua, et al. Effect of defocusing amount on laser cladding of self-fluxing Ni-based WC on 45# steel surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 92-97.
- [9] GAO W, ZHAO S, LIU F, et al. Effect of defocus manner on laser cladding of Fe-based alloy powder [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 248(13): 54-62.
- [10] RAUF M M, SHAHID M, DURRANI Y A, et al. Cladding of Ni - 20Cr coatings by optimizing the CO₂ laser parameters [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(6): 2353-2362.
- [11] RIQUELME A, RODRIGO P, ESCALERA-RODRIGUEZ M D, et al. Analysis and optimization of process parameters in Al-SiCp laser cladding [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78(2): 165-173.
- [12] MAHAMOOD R M, AKINLABI E T. Processing parameters optimization for material deposition efficiency in laser metal deposited titanium alloy [J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2016, 3(1): 9-21.
- [13] FU F X, ZHANG Y L, CHANG G R, et al. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors [J]. Optik, 2016, 127(1): 200-202.
- [14] WANG D Z, HU Q W, ZHENG Y L, et al. Study on deposition rate and laser energy efficiency of laser-induction hybrid cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 16-22.