

工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律

黄小伟^{1,4} 习俊通^{2,3} J. L. Lebrun⁴ Elcheikh Hussam⁵ Courant Bruno⁵

¹上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; ²上海市网络化制造与企业信息化重点实验室, 上海 200240
³机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240
⁴Arts et Métiers ParisTech-LPMP-2, bd du Ronceray-49035 Angers, France
⁵Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR CNRS 6183, France

摘要 激光熔覆技术经多年发展已取得许多成功的工业应用,但如何控制工艺以达到最佳成形效果,需要通过研究工艺参数与成形精度之间的关系才能找到最终的解决方案。借助激光熔覆快速成形法制备 316L 不锈钢实验试样,研究工艺参数组合对成形试样形状的影响规律。通过定义单涂覆层截面形状特征参数,采用线性相关法处理截面形状数据,建立工艺参数组合与截面形状特征参数的线性关系。此外,激光熔覆成形件易出现两类典型缺陷,即晶界间微裂纹和层间熔合不良缺陷。

关键词 激光技术;激光熔覆成形;形状特性;线性相关

中图分类号 TG142.71; TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.071404

Influences of Processing Parameters on Geometric Characterizations of Laser Cladding Forming 316L Stainless Steel

Huang Xiaowei^{1,4} Xi Juntong^{2,3} J. L. Lebrun⁴ Elcheikh Hussam⁵ Courant Bruno⁵

¹School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
²Shanghai Key Laboratory of Advanced Manufacturing Environment, Shanghai 200240, China
³State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China
⁴Arts et Métiers ParisTech-LPMP-2, bd du Ronceray-49035 Angers, France
⁵Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) UMR CNRS 6183, France

Abstract After years of development of laser cladding forming technology, it has made many successful industrial applications. However, how to control the process to achieve the best forming results? We need study the relationship between the processing parameters and the forming accuracy to find the ultimate best solution. We prepare the 316L stainless steel specimens using the laser cladding forming to investigate the influences of processing parameters on geometric characterizations. Five parameters are defined to describe the geometric characterization of single layer cross section, and then the measurement data is processed with the linear regression method to establish relations between processing parameters and defined parameters. In addition, the laser cladding parts prone to two types of typical defects: micro-cracks between grain boundaries and poor fusion defects between two layers.

Key words laser technique; laser cladding forming; geometric characterization; linear regression

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390; 350.3850

1 引言

激光熔覆成形技术(LSF)是一种融合微焊接技术和激光技术的快速成形方法^[1]。激光为能量源,系统配有与激光同轴的金属粉输送系统。金属粉末喷投到熔融的金属池中,快速熔化,一层层地涂覆到底层已成

收稿日期: 2011-03-10; 收到修改稿日期: 2011-03-23; 网络出版日期: 2011-06-02

作者简介: 黄小伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆成形技术方面的研究。E-mail: xwhuang1987@gmail.com

导师简介: 习俊通(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事数字化产品开发、精密测量、微喷制造以及数字辅助医学工程等方面的研究。E-mail: jtxi@sjtu.edu.cn

形部分。激光熔覆成形技术相对于传统加工方法具有诸多优点,包括缩短制造周期、制造复杂结构零件无需工夹具、直接成形复杂结构的承重金属或复合材料零件、加工具有功能梯度复合材料或合金零件的优势等^[2~3]。目前激光熔覆加工已有诸多应用,如加工具有复杂内部结构的超音速飞行器方向舵,美国 Sandia 国家实验室采用该方法制造内部具有冷却通道的模具等^[4],此外,高性能激光修复是该方法最具应用前景的应用之一,如损伤高温合金和钛合金零件的激光成形修复、激光成形修复整体叶轮和叶盘等。

然而,目前激光直接熔覆也具有某些缺点,如成形零件表面质量差、成形后需要后处理工序、加工表面易氧化、难于精确控制成形零件尺寸、易出现微裂纹等,就必须对熔覆成形工艺过程进行特殊控制才能保证成形零件符合设计要求。许多研究专注于不同材料下激光熔覆工艺参数对成形件微观组织特性、力学性能,残余应力分布等的影响。J. D. Majumdar 等^[5]使用连续波激光二极管研究直接激光成形中激光参数对于 AISI 316L 不锈钢成形件表面和层间界面微观组织特性的影响。F. Huang 等^[6]研究激光熔覆成形的镍基碳化钨(WC)薄膜特性,包括相组成、微观组织性能和微硬度。Yanmin Li 等^[7]对激光快速成形 316L 和 Ni20 试样进行实验对比,研究工艺参数,如激光焦点位置、激光输出功率、激光束扫描速度和激光光斑直径等对于试样成形特性的影响。席明哲等^[8]研究了激光快速成形 316L 不锈钢工艺中,激光功率对成形试样组织性能影响,对比激光快速成形零件性能与常规方法制造零件的机械性能。

尽管已经存在许多对激光熔覆成形试样微观组织特性、微观硬度和残余应力分布的对比实验研究,但很少有针对于建立成形工艺参数与成形试样形状之间定量关系的研究。激光熔覆成形工艺中,单涂覆层形状的准确控制对于精确控制成形过程,快速稳定地制造无内部缺陷试样至关重要^[7]。另外,单层和多层试样截面形状预测对激光熔覆成形方法制造精密复杂零件提供指导,同时为激光熔覆成形工艺过程的数值仿真建模提供理论基础。

本文对 316L 粉末成形试样的对比实验研究,建立激光熔覆成形工艺中 3 个工艺参数:激光功率 P 、喷粉速率 Q_m 、扫描速度 V 和单涂覆层截面几何特征之间的定量关系。另外,研究不同层间进给距离 h 对于多层熔覆试样高度的影响。借助于扫描电子显微镜(SEM)对多层熔覆试样的典型微观组织缺陷进行观察分析。

2 实验方法与条件

实验试样在法国南特 IRCCyN 研究所制备,其使用 IPERA LASER 激光快速成形解决方案 Easy Clad 系统,机床主体为法国宇龙(Huron)机床工作台,喷嘴为 IPERA LASER 设计的 Macro CLAD 10V3,集成激光头和送粉喷头,数控部分为 Siemens 的 CN Siemens 840D 系统。激光器为 YLS-4000-ST 型光纤激光器, Yb:YAG 型晶体触发激光源,激光光纤直径 150 μm ,最大功率 700 W。激光聚焦在基体零件表面,光圈直径约 0.53 mm。喷嘴喷粉速率 2~6 g/min,送粉气体 Ar,气体流量在 1~5 L/min 范围内。

制备试样材料为 316L 不锈钢粉末(表 1),粉末由气雾化方法制备,直径约在 45~75 μm 之间(图 1)。316L 不锈钢是典型奥氏体不锈钢,耐腐蚀性能强,具有良好可焊性,常用于化学、食品、石油等行业。

本项目是在不同的工艺参数条件下,分别制备单涂覆层和多涂覆层多组试样。主要研究工艺参数为:激光功率 P 、喷粉速率 Q_m 、扫描速度 V 。特别地,对于多层涂覆试样,还研究了层间喷头进给距离 h 对多层成形试样高度的影响。根据 P 、 Q_m 和 V 的不同组合(表 2),在低碳钢薄板基体上成形 27 道单涂覆层。

类似地,选择不同层间进给距离 h (0.2, 0.25 和 0.3 mm)分别制备 3 组多涂覆层试样。每组试样中激光功率 P 和喷粉速率 Q_m 设定为常量,分别为 280 W 和 0.05 g/s,扫描速度 V 以 200 mm/min 为增量从 500 mm/min 增大到 1500 mm/min,在不同扫描速度 V 下(表 3),分别成形 1,3,5 和 10 层的单道多层涂覆试样。

试样截面形状参数由光学显微镜系统中集成的辅助测量软件完成。

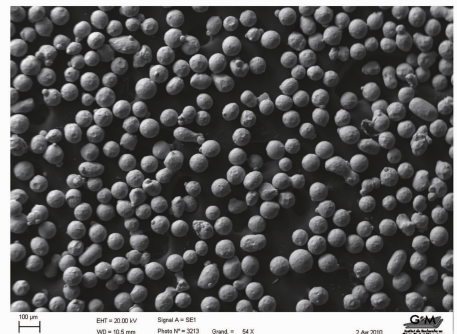


图 1 成形材料 316L 不锈钢粉末在 SEM 下的形貌
Fig. 1 316L powder for the deposition under SEM

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel (mass fraction,%)

	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Fe
316L	<0.03	18	11	3	0.7	1.7	Balance

表 2 单涂覆层成形的工艺参数组合

Table 2 Processing parameters for the 27 single layer depositions

P/W	$Q_m/(g/s)$	$V/(mm/min)$
180	0.025	300
360	0.050	600
280	0.075	900

表 3 多涂覆层成形的工艺参数组合

Table 3 Processing parameters for the multi-layer depositions

$V/(mm/min)$	Number of layers	Inter layer distance h/mm	P/W	$Q_m/(g/s)$
500				
700	3			
900	10	0.2		
1100	1	0.25	280	0.050
1300	5	0.3		
1500				

3 实验结果

3.1 单熔覆层截面形貌及表征

单涂覆层试样基体是为低碳钢薄板,尺寸为 $10\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ (如图 2)。使用光学显微镜观察单涂覆层试样横截面,根据定义的涂覆层横截面形状特征要素(如图 3),分别测量涂覆层高度 H 、宽度 W 、深度 H_f 、涂覆层横截面积 S 和基体熔化面积 S_f 。

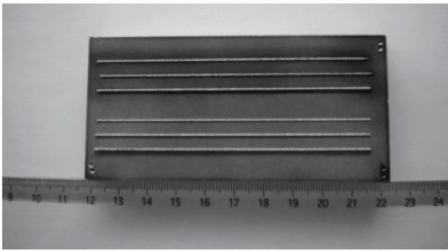


图 2 六道单熔覆层和基体薄板

Fig. 2 Six single layer depositions and low carbon substrate

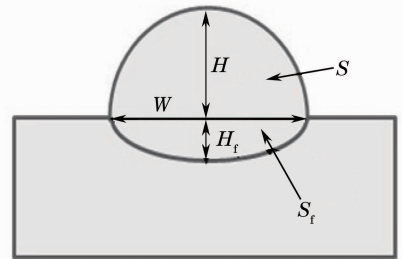


图 3 定义涂覆层横截面形状特征要素

Fig. 3 Defined cross section geometrical parameters for each single track

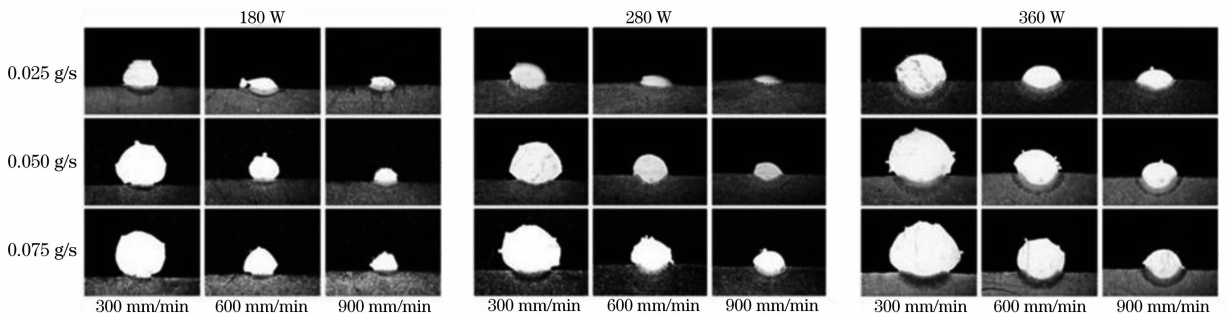


图 4 27 道单涂覆层在光学显微镜下的截面形貌

Fig. 4 27 single track cross sections under optical microscopy

制备单涂覆层截面的金相组织观察试样,抛光,使用浓度为 2% 的 Nital 溶液进行腐蚀,图 4 为单涂覆层截面在光学显微镜下的形貌,代表 3 种工艺参数组合下的 27 道单涂覆层。涂覆层横截面形状特征随着激光功率 P 、扫描速度 V 和喷粉速率 Q_m 等参数的不同组合而变化。

3.2 多涂覆层截面形貌特征

根据表 3 工艺参数,成形 72 道多涂覆层试样,分别包括 1, 3, 5 和 10 层试样。对多涂覆层截面研究中,主要考虑工艺参数对涂覆层高度的影响。图 5 为多涂覆层截面形貌。

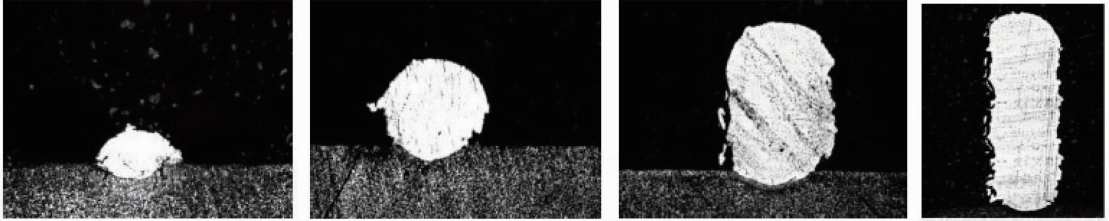


图 5 多涂覆层在光学显微下的截面形貌

Fig. 5 Multi-layer cross sections under optical microscopy

4 分析与讨论

4.1 单熔覆层试样截面形状特征与工艺参数的关系

从图 4 中定性地看出,当激光功率 P 和喷粉速率 Q_m 一定时,增大扫描速度 V 会使涂覆层高度 H 、宽度 W 和涂覆层截面积 S 相应减小;当 V 一定时,增大 P 或者 Q_m ,涂覆层高度 H 、宽度 W 和涂覆层截面积 S 相应增大。单层涂覆层截面形状与工艺参数 P , Q_m 和 V 的组合有关。通过光学显微镜下的截面形貌观察对比发现,低扫描速度 V 和高喷粉速率 Q_m 条件下,粉末堆积易形成圆柱形截面的涂覆层;另一方面,高扫描速度 V 和低喷粉速率 Q_m 组合下,粉末堆积涂覆层呈扁平状,有利于涂覆后续层时的形状控制。

通过定性对比观察不同参数条件下成形的涂覆层,发现工艺参数组合和涂覆层截面形状特征存在某种对应关系,为定量研究该关系,定义描述单涂覆层截面的 5 个形状特征参数 H , W , H_t , S 和 S_t ,分别测量单涂覆层截面,建立工艺参数与涂覆层截面形状参数之间的关系。本文试图用一种简单的关系来描述主要工艺参数对涂覆截面形状特征的影响,先假设线性关系,再确定待定参数,建立线性关系。

定义工艺参数组合 $x(P^\alpha Q_m^\beta V^\gamma)$,构造线性关系:

$$y = a(P^\alpha Q_m^\beta V^\gamma) + b, \quad (1)$$

y 代表定义的涂覆层截面形状特征参数, a, b, α, β 和 γ 为待定参数,对于每一特征参数,采用线性相关拟合方法确定待定参数,并给出相关系数 R 。

通过实验结果,得到单涂覆层高度 H 与 $P^{1/4} Q_m^{3/4} V^{-1}$ 组合之间的线性关系,如图 6 所示。其中单涂覆层高度 H 实验测量结果的重复不确定性为 0.040 mm,而用拟合线性关系得到的高度估计值的重复不确定性为 0.068 mm,两者非常接近,说明该关系能较为准确地反映主要工艺参数对于涂覆截面高度的影响。类似地,得到涂覆截面宽度 W 和截面面积 S 与工艺参数组合间的线性关系,线性关系表达式和相关系数 R ,如图 7, 8 所示。

对于单涂覆层截面宽度 W 实验测量结果的重复不确定性为 0.040 mm,而通过拟合的线性关系得到的宽度估计值重复不确定性为 0.068 mm,与高度估计不确定性相当。对于单涂覆层截面面积 S 实验测量结果的重复不确定性为 0.025 mm²,通过拟合线性关系得到的宽度估计值重复不确定性为 0.049 mm²。表 4 列出 5 个截面形状特征参数与工艺参数组合间的线性关系,并给出线性相关系数。综上所述,通过线性相关法处理数据,得到主要工艺参数与涂覆截面形状之间的线性关系,该关系

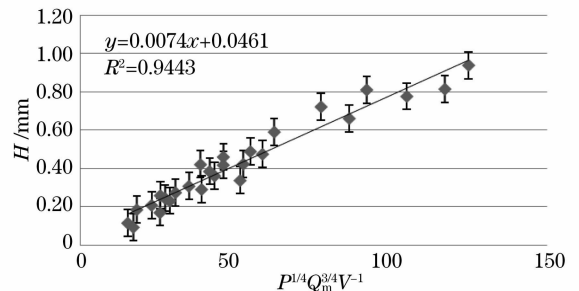


图 6 单涂覆层截面高度与工艺参数组合间的关系

Fig. 6 Single track height versus $P^{1/4} Q_m^{3/4} V^{-1}$

清晰定量地表述了各参数对于涂覆形状的影响。

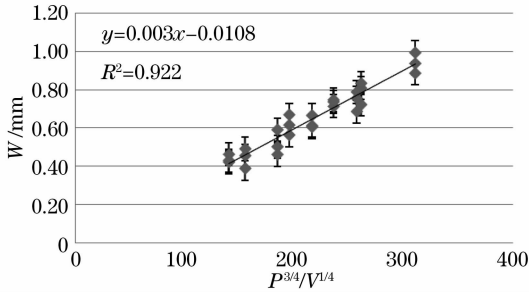


图7 单涂覆层截面宽度与工艺参数组合的关系

Fig. 7 10 Single track width versus $P^{3/4}/V^{1/4}$

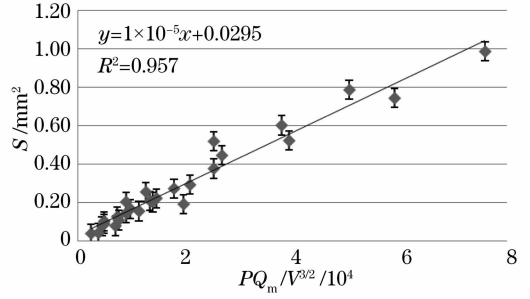


图8 单涂覆层截面面积与工艺参数组合的关系

Fig. 8 Single track cross section versus $PQ_m/V^{3/2}$

表4 单涂覆层截面几何特征参数与工艺参数组合的线性关系

Table 4 Relations between the geometric characteristics of cross sections and the main parameters

Quantity	Combined parameters	Correlation coefficient (R^2)
H	$P^{1/4} Q_m^{3/4} / V$	0.944
W	$P^{3/4} V^{1/4}$	0.922
S	$PQ_m / V \sqrt{V}$	0.957
S_f	$\ln(P^{4/5} Q_m^{-1/4})$	0.649
H_f	$\ln(P^2 V^{1/4} Q_m^{-1/4})$	0.765

在其他工艺参数,如激光光斑直径、激光聚焦距离等一定的情况下,根据主要工艺参数 P 、 Q_m 和 V 组合,使用上述关系能预测激光熔覆成形中单熔覆层截面形状,对控制复杂零件一次精确成形,免去后续精加工有指导意义,然而上述关系并没有考虑成形过程中诸如表面氧化等复杂物理现象对表面质量的影响,因而对成形零件形状精确预测更深入的研究应考虑验证其他因素对形状精度的影响程度。

4.2 工艺参数对多层熔覆试样截面高度的影响

借助光学显微镜观察测量多涂覆层的截面高度,在不同扫描速度下,建立截面高度与涂覆层数之间的关系,如图9所示;在给定扫描速度 V 时,不同层间进给距离条件下涂覆层的截面高度如图10所示。

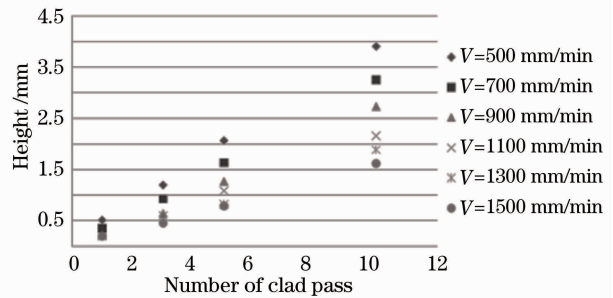


图9 不同扫描速度下涂覆层数与涂覆层高度的关系 ($P=180W$, $Q_m=0.05 g/s$, $h=0.2 mm$)

Fig. 9 Measured height of multi-layer wall at different scanning speeds ($P=180W$, $Q_m=0.05 g/s$, $h=0.2 mm$)

图9表示在不同扫描速度下,多层涂覆试样截面高度与涂覆层数之间的关系。试样截面高度与涂覆层数呈近线性关系,涂覆高度随着层数的增多而相应线性地增大。由于第一层要与基体材料结合,不太稳定,

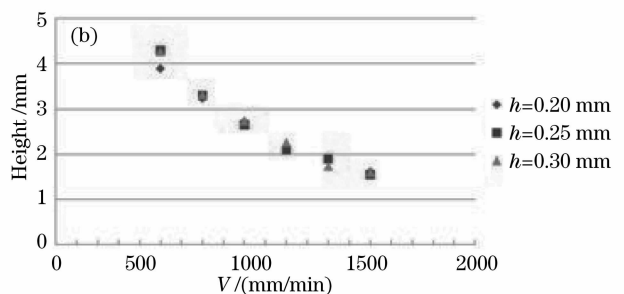
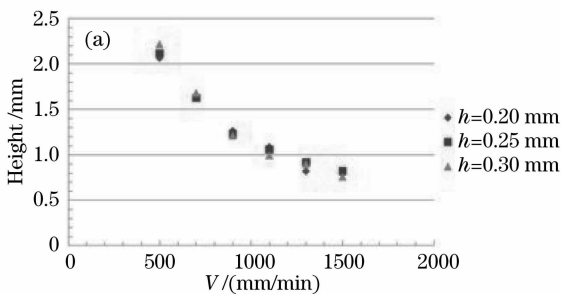


图10 扫描速度不同时,3种层间进给距离下涂覆试样高度的比较。(a) 5层,(b) 10层

Fig. 10 Comparison of the heights in function of scanning speed at different h -inter layer feed distances.

(a) 5 layer,(b) 10 layer

可以看到单层高度区别不大,但随着层数的增加,线性关系更加明显。通过图 10,对不同层间进给距离条件下的层高比较,不同层间进给距离 h 情况下,多涂覆层截面高度无较大差别。

4.3 微观组织分析

成形试样微观组织性能是评价衡量激光熔覆工艺的重要标准,裂纹等缺陷的控制对于提升微观组织性能至关重要。了解裂纹存在的部位有助于分析研究其产生机理,对进一步控制其产生有很大意义。借助扫描电子显微镜对多层试样横截面及侧面进行观察分析,发现了成形试样中的裂纹缺陷。

晶界处裂纹产生于金属结晶过程末期的“脆性温度”区间,此时晶粒间存在着薄的液相层,因而金属塑性极低,由冷却的不均匀收缩而产生的拉伸变形超过了允许值时,即沿晶界液层开裂,如图 11 所示,微裂纹出现在晶界处。由于熔合不良而导致的孔洞形貌不规则,内壁粗糙,这类孔洞分布在层间的搭接处^[9],如图 12 所示。当成形工艺参数不匹配时,会使各层之间未形成致密冶金结合而产生融合不良的缺陷。因此优化成形工艺参数,调整微观组织是一种重要的控制裂纹和消除熔合不良的手段。

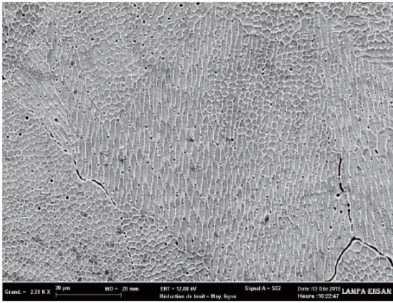


图 11 多层熔覆试样第一层中的裂纹

Fig. 11 Crack in the section of the 1st layer

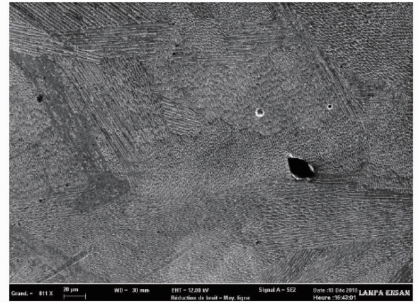


图 12 多层熔覆试样第一层和第二层界面处裂纹

Fig. 12 Crack in the boundary between the 1st and 2nd layers

5 结 论

1) 当激光功率 P 和喷粉速率 Q_m 一定时,增大扫描速度 V ,涂覆层高度 H 、宽度 W 和截面积 S 相应减小;当 V 一定,增大 P 或者 Q_m , H , W 和 S 相应增大。2) 建立工艺参数组合 ($P^a Q_m^b V^c$) 与单涂覆层截面形状特征变量之间的线性关系。3) 多涂覆层中,试样截面高度与涂覆层数成近似线性关系,其他参数一定情况下,层间进给距离 h 对成形件高度影响不大。4) 消除成形件中微裂纹和熔合不良缺陷是激光熔覆成形工艺参数改进优化的方向。

参 考 文 献

- 1 G. N. Levy, R. Schindel, J. P. Kruth. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives[J]. *RP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, **52**(2): 589~609
- 2 J. Laeng, J. G. Stewart, F. W. Liou. Laser metal forming processes for rapid prototyping—A review [J]. *International J. Production Research*, 2000, **38**(16): 3973~3996
- 3 J. Dutta Majumdar, I. Manna. Laser processing of materials [J]. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2003, **28**(3~4): 495~562
- 4 C. Atwood, M. Griffith, L. Harwell *et al.*. Laser engineered net shaping (LENSTM): a toll for direct fabrication of metal parts[C]. Proceedings of ICALEO '98, Orlando; Laser Institute of America, 1999. E1~E7
- 5 J. D. Majumdar, A. Pinkerton, Z. Liu *et al.*. Microstructure characterization and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **247**(1-4): 320~327
- 6 F. Huang, Z. Jiang, X. Liu *et al.*. Microstructure and properties of thin wall by laser cladding forming[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2009, **209**(11): 4970~4976
- 7 Yanmin Li, Haiou Yang, Xin Lin *et al.*. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **360**(1-2): 18~25
- 8 Xi Mingzhe, Zhang Yongzhong, Zhang Pingzhi *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and properties of 316L SS fabricated by laser direct deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
席明哲, 张永忠, 章萍芝 等. 工艺参数对激光快速成型 316L 不锈钢组织性能的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1045~1048
- 9 Song Jianli, Deng Qilin, Hu Dejin *et al.*. Microstructure characterization and properties of laser cladding forming 316L stainless steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1441~1444
宋建丽, 邓琦林, 胡德金 等. 激光熔覆成形 316L 不锈钢组织的特征与性能[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1441~1444