

膜层材料与技术

# 激光内送粉高速熔覆 Cr50Ni 合金 稀释率及单道形貌分析

王暑光, 石拓, 傅戈雁, 万乐

(苏州大学, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** **目的** 研究“光内送粉”正离焦高速熔覆 Cr50Ni 合金单道形貌及稀释率变化影响因素, 制备耐磨、耐腐蚀绿色无污染的金属表面涂层, 从而替代传统电镀。**方法** 采用“光内送粉”正离焦新型耦合技术开展高速熔覆工艺试验, 即在 304 不锈钢基体上制备 Cr50Ni 合金熔覆层。建立了光内送粉条件下粉末遮光模型, 得出了送粉速率与粉末遮光率的关系, 从而得到最终照射在基体上的激光能量, 而激光能量密度与稀释率呈正相关, 以此分析了不同送粉速率对熔覆层稀释率的影响, 同时考察了不同离焦量对熔覆层稀释率以及单道熔覆厚度的影响, 分析了最佳熔覆层的显微组织成分变化和硬度变化趋势。**结果** 当扫描速度为 9 m/min、离焦量为+1~+2 mm、激光功率为 1.85 kW 时, 可获得厚度约为 121~452  $\mu\text{m}$ 、稀释率为 12.9%~75%、硬度值为 280~320HV 的表面形貌较好的熔覆层。粉末粒子直径为 50  $\mu\text{m}$  时, 在 16~32 g/min 送粉速率下, 粉末遮光率为 16.6%~33.1%。熔覆层底部的晶粒形态主要为明显的柱状枝晶, 由于冷却速度快, 进入熔池中的气体来不及逃逸, 使得熔覆层内部存在一些微小气孔。**结论** “光内送粉”正离焦光粉耦合新技术采用 Cr50Ni 合金材料, 在激光功率为 1.85 kW、送粉速率为 28 g/min、离焦量为+2 mm、扫描速度为 9 m/min 的工艺参数下, 可以获得理想的单道成形效果, 实现高速熔覆。

**关键词:** 激光; 高速熔覆; 内送粉; 稀释率; Cr50Ni; 表面涂层

**中图分类号:** TG174.4; V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)07-0311-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.039

## Analysis of Dilution Rate and Single Channel Morphology of High-speed Cladding Cr50Ni Alloy by Laser Inside-beam Powder Feeding Process

WANG Shu-guang, SHI Tuo, FU Ge-yan, WAN Le

(Soochow University, Suzhou 215000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence factors on the changes of the Cr50Ni alloy single-channel morphology

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2019-12-28

Received: 2019-09-27; Revised: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51675359); 国家重点研发计划 (2016YFB1100300)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675359); National Key Research and Development Program (2016YFB1100300)

**作者简介:** 王暑光 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光增材制造。

**Biography:** WANG Shu-guang (1994—), Male, Master, Research focus: laser additive manufacturing.

**通讯作者:** 石拓 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为激光增材制造。邮箱: shituo@suda.edu.cn

**Corresponding author:** SHI Tuo (1984—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: laser additive manufacturing. E-mail: shituo@suda.edu.cn

**引文格式:** 王暑光, 石拓, 傅戈雁, 等. 激光内送粉高速熔覆 Cr50Ni 合金稀释率及单道形貌分析[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 311-318.

WANG Shu-guang, SHI Tuo, FU Ge-yan, et al. Analysis of dilution rate and single channel morphology of high-speed cladding Cr50Ni alloy by laser inside-beam powder feeding process[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 311-318.

bypositive defocusing high-speed cladding of "laser inside-beam powder feeding" and the dilution rate, to prepare a wear-resistant and corrosion-resistant green non-polluting metal surface coating to replace the traditional plating. The high-speed cladding process test was carried out with the "laser inside-beam powder feeding" coupling technology. A Cr50Ni alloy cladding layer was prepared on a 304 stainless steel substrate. A model of powder shading under the condition of laser inside-beam powder feeding was established, and the relationship between the powder feeding rate and the powder shading rate was obtained, so that the laser energy finally irradiated on the substrate was obtained. The laser energy density was positively correlated with the dilution rate and the effect of different powder feeding rates on the dilution rate of the cladding layer was analyzed. At the same time, the effects of different defocusing amounts on the cladding layer dilution rate and the thickness of a single cladding layer were investigated. The microstructure composition change and hardness change trend of the best cladding layer were analyzed. When the scanning speed was 9 m/min, the defocusing amount was +1~+2 mm, and the laser power was 1.85 kW, the cladding layer with better surface morphology, a thickness of about 121~452  $\mu\text{m}$ , a dilution rate of 75%~12.9%, and a hardness value of 280~320HV could be obtained. When the powder particle diameter was 50  $\mu\text{m}$ , the powder shading rate was 16.6%~33.1% at a powder feeding rate of 16 g/min to 32 g/min. The grain morphology at the bottom of the cladding layer was mainly obvious columnar dendrites, and there were some tiny pores inside the cladding layer due to the inability of the gas entering the molten pool to escape quickly. The new technology of "laser inside-beam powder feeding" defocusing powder coupling is based on Cr50Ni alloy material. Under the laser power of 1.85 kW, the powder feeding rate of 28 g/min, the defocus amount of +2 mm, and the scanning speed of 9 m/min, the ideal single-pass forming effect can be obtained to achieve high-speed cladding.

**KEY WORDS:** laser high speed cladding; laser inside-beam powder feeding; dilution rate; Cr50Ni; surface coating

高速熔覆技术为替代电镀铬涂层的制备提供了新的思路和方法,近年来的快速发展受到业界高度关注。其原理与传统的熔覆方式有所不同,传统激光熔覆技术是粉末在基体表层与部分基体在激光作用下,同时熔化形成熔池<sup>[1]</sup>,多数粉末颗粒被直接送入熔池中,粉末在空中吸收的光能小。大部分激光能量集中作用在基体及熔覆层上,造成熔覆层稀释率高,且此时由于热膨胀不匹配等材料物理性能的作用,易在涂层内部造成应力集中,对于部分硬度较高的涂层,极易在熔覆过程中发生开裂现象。而高速熔覆一般采用正离焦方式,将粉末送入到激光焦点与基体之间的光照区域内,大部分光能在空中被粉末吸收,粉末达到半熔融状态后,经载粉气喷射到基体表面,少部分光能被基体熔池吸收,故而基体的热变形小,最终可形成稀释率较低的涂层<sup>[2]</sup>,且涂层内部残余应力较小,不易开裂。

由于粉末受热方式不同使得高速熔覆比传统熔覆速度更快、效率更高。传统熔覆过程的熔覆线速度一般为 0.36~1 m/min,熔覆效率一般小于 0.15  $\text{m}^2/\text{h}$ ,而高速熔覆线速度可达 9~150 m/min,熔覆效率可达 0.3~2  $\text{m}^2/\text{h}$ ,整体加工效率为常规熔覆的 2~5 倍。

德国 Fraunhofer 研究所 Schopphoven 等<sup>[2]</sup>采用 Inconel 625 合金,在 3 kW 功率下获得稀释率<1%、厚度为 220  $\mu\text{m}$  的涂层,扫描速度可达 25 m/min,熔覆效率为 500  $\text{cm}^2/\text{min}$ 。李岩等<sup>[3]</sup>在 1.8 kW 激光功率下,实现了扫描速度为 9 m/min,且获得单层厚度约为 300  $\mu\text{m}$ 、稀释率<1%的涂层。李俐群等<sup>[4]</sup>采用高速熔覆和传统熔覆技术在 27SiMn 钢基体上制备 431 合金,在 3 kW 激光功率和扫描线速度达 50 m/min 的工

艺条件下制备 380  $\mu\text{m}$  厚度的涂层,对比分析了两种方法所制备涂层的宏观特性、显微组织与耐腐蚀性能,发现高速熔覆涂层的硬度、耐腐蚀等性能都优于传统熔覆。山东能源重装集团大族再制造有限公司澹台凡亮<sup>[5]</sup>选取 SNJG-160c 型合金粉末,借助 6 kW 激光器在 27SiMn 基体上获得性能良好的熔覆层,扫描速度达 30~50 m/min。西安中科中美<sup>[6]</sup>在 4 kW 激光功率下,当熔覆厚度在 0.2~0.5 mm 时,熔覆效率为 0.7~1.2  $\text{m}^2/\text{h}$ 。虽然以上国内外学者对高速熔覆有初步研究,但未从机理上分析工艺参数对熔覆层形貌的影响。目前高速熔覆装备与工艺还处在研发与优化阶段。

本文采用“光内送粉”正离焦新型光粉耦合技术,进行高速熔覆工艺实验。建立了“光内送粉”粉末遮光模型,分析了送粉速率和离焦量对稀释率和单道形貌的影响。通过实验验证,获得了表面形貌良好、稀释率较低与基体冶金结合良好的均匀熔覆层。

## 1 实验材料与方法

实验采用本团队自主研发的光内送粉 CH-R40 型喷头<sup>[7-8]</sup>,其原理如图 1 所示:通过光路转换镜组,将实心圆柱形激光束转化为倒锥形中空光束,单根粉管居中,粉管外侧设置有环状准直气管,粉末受到载气和保护气的压力作用,实现了光、粉、气一体同轴,光粉耦合程度好<sup>[9-11]</sup>。与传统的光外同轴送粉<sup>[12]</sup>相比,光内送粉单粉束发散小,与激光耦合区间长,可实现更高的粉末捕获率。光内送粉传统熔覆一般采用负离焦方法,如图 1a 所示,粉末被直接送入到熔池中熔化;而高速熔覆一般采用正离焦方法,如图 1b

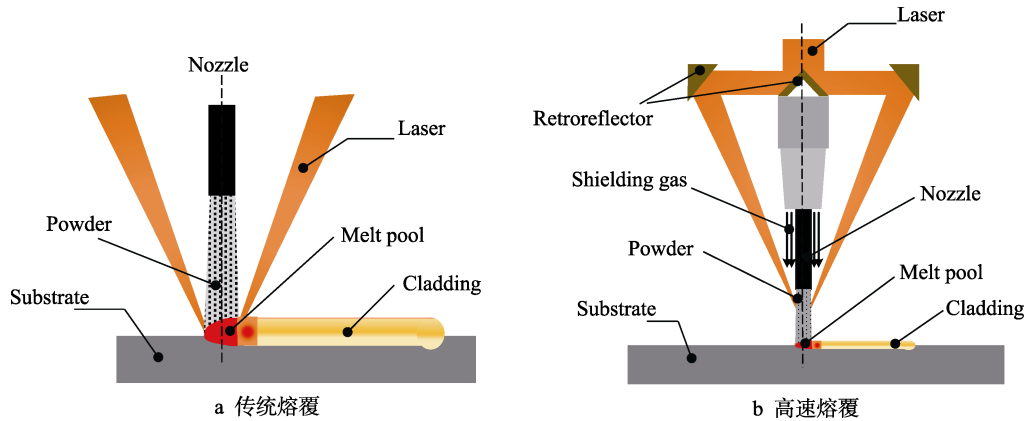


图 1 光内送粉耦合原理  
Fig.1 Principle of laser inside-beam powder feeding: (a) Traditional cladding, (b) High speed cladding

所示，粉末在空中经过激光焦点并受热达到半熔融状态后，喷射到基体表面。

在 304 不锈钢基体上熔覆。选用 Cr50Ni 高温合金粉末，该合金具有良好的抗腐蚀与抗氧化性能，粉末粒度为 15~53  $\mu\text{m}$ ，粉末化学成分（质量分数）为：0.51%B，0.98%Si，50.03%Cr，0.05%O，Ni 余量。激光功率为 1.85 kW 和扫描速度为 9 m/min 时，研究送粉速率和离焦量对熔覆层单道形貌及稀释率的影响，进行双因素多水平实验。实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数  
Tab.1 Experimental process parameters

Process parameters	Values
Laser power/kW	1.85
Laser beam scanning speed/(m·min <sup>-1</sup> )	9
Defocus distance/mm	+1,+1.5,+2
Powder feeding rate/(g·min <sup>-1</sup> )	16,19,22,24,28, 32

## 2 粉末遮光模型

传统激光熔覆多采用负离焦工艺，即加工平面位于激光焦点之上，粉末到达熔池后受热熔化，在此过程中粉末遮光一般较少（图 1a）；在高速熔覆时，粉末经过激光焦点后到达基体表面（图 1b），粉末在空中遮挡激光并受热熔化。但是如果激光能量被粉末遮挡后照射在基体上无法形成熔池，则熔覆层与基体之间的结合性能差。为了能够在更好地熔化粉末的同时降低稀释率，因此研究不同送粉速率下的遮光率、激光功率和对应的稀释率之间的关系很有必要。所以建立正离焦粉末遮光模型，如图 2 所示，在图 2a 中粉末束从出粉口 P 喷出，在激光焦点 O 上下一一定的范围内与激光耦合，然后落入熔池中，其中  $\theta_1$  为激光束内倾角， $\theta_2$  为激光束外倾角。图 2b 是单个粉末颗粒受光照时的遮光示意图。

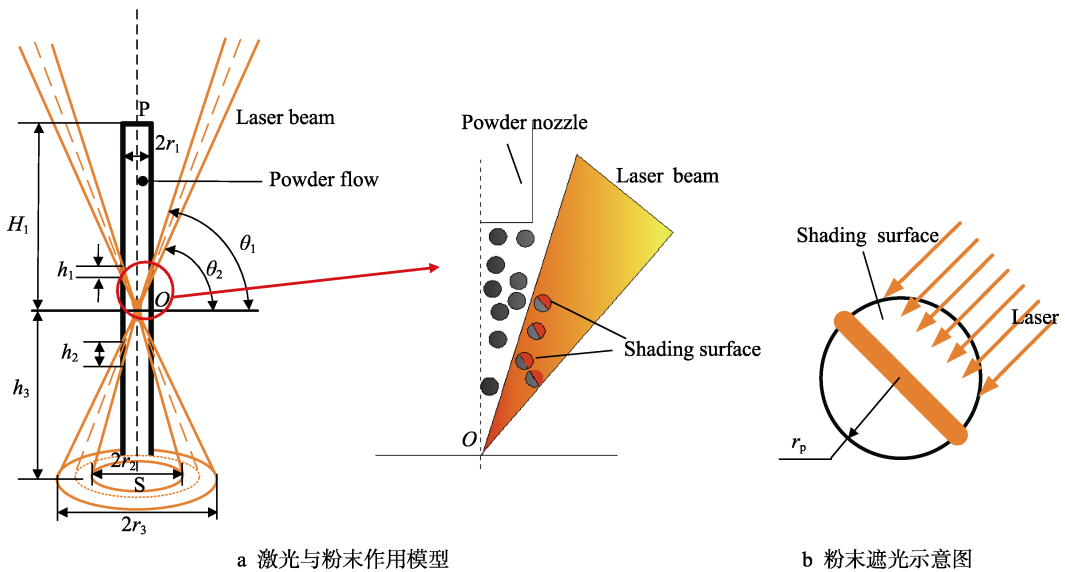


图 2 粉末遮光模型  
Fig.2 Powder shading model: (a) Laser and powder intersection model, (b) Powder shading diagram

假设<sup>[13]</sup>: (1) 粉末颗粒均为半径为  $r_p$ 、形状均匀的球形; (2) 一个颗粒遮挡另一个颗粒的阴影面积忽略不计, 即颗粒在遮蔽激光时全部散开; (3) 不考虑粉末反射掉的能量; (4) 激光束在透过熔覆材料颗粒空隙时不发生衍射、散射; (5) 激光束的光强均匀分布。

在模型的假设条件下, 遮光率可以看作粉末遮挡的功率  $P_{at}$  与激光实际功率  $P_t$  之比, 且它对应于粉末遮挡的面积与光束在竖直方向上第一次与粉末重合所在曲面的投影面积之比。

$$\frac{P_{at}}{P_t} = \frac{S_p}{S_l} \quad (1)$$

式中:  $P_{at}$  为粉末遮挡的功率,  $P_t$  为实际功率,  $S_p$  为粉末遮挡的面积,  $S_l$  为激光在竖直方向上第一次与粉末重合所在曲面的投影面积。

假设粉末颗粒数量为  $n$ , 每个颗粒的遮挡面积为  $\pi r_p^2$ , 那么总遮挡面积为:

$$S_p = n\pi r_p^2 \quad (2)$$

假设粉末流是稳态的, 作匀速直线运动, 速度为  $V_p$ , 一粒粉末从出粉口 P 到基板 S 的时间为:

$$t = \frac{H_1 + h_3}{V_p} \quad (3)$$

在此时间内输送的粉末量为:

$$m_p t = \frac{m_p (H_1 + h_3)}{V_p} \quad (4)$$

其中  $m_p$  为送粉速率。不考虑粉末流到基体和熔覆层, 粉气流在粉嘴到熔池之间占据的体积  $V$  为:

$$V = \pi r_1^2 (H_1 + h_3) \quad (5)$$

假设粉末在空间是均匀分布的, 那么单位体积所含的粉末质量为:

$$\zeta = \frac{m_p}{\pi r_1^2 V_p} \quad (6)$$

本次实验所采用的离焦量最大为 +2 mm, 根据图 2a 中模型计算此时投影在基板上的光斑外径为 1.15 mm, 可见此时粉斑面积大于光斑, 则这段时间参与遮光的粉末所占据的体积为:

$$V_e = \frac{\pi}{3} [2r_1^2 h_1 + (r_3^2 - r_2^2) h_3] \quad (7)$$

$V_e$  中所含的粉末质量为  $\zeta V_e$ , 根据式 (8), 可以求出参与遮光的粉末颗粒数  $n$ , 其中  $\rho_p$  是粉末的密度。根据式 (2), 可得总遮光面积见式 (9)。根据式 (10), 最终得到粉末的遮光率模型见式 (11), 则最终到达基体表面的实际功率  $P_w$  为见式 (12)。

$$\zeta V_e = n \frac{4\pi r_p^3 \rho_p}{3} \quad (8)$$

$$S_p = \frac{m_p [2r_1^2 h_1 + (r_3^2 - r_2^2) h_3]}{4r_p \rho_p V_p r_1^2} \quad (9)$$

$$S_l = 2\pi r_1 h_1 \quad (10)$$

$$\frac{P_{at}}{P_t} = \frac{S_p}{S_l} = \frac{m_p [2r_1^2 h_1 + (r_3^2 - r_2^2) h_3]}{8\pi r_p \rho_p V_p r_1^3 h_1} \quad (11)$$

$$P_w = P_t \left( 1 - \frac{P_{at}}{P_t} \right) \quad (12)$$

### 3 结果及分析

#### 3.1 熔覆层截面形貌

图 3 是激光熔覆横截面示意图, 稀释率可通过横截面面积测量值的比值进行计算。简化的稀释率可以表达为<sup>[14]</sup>:

$$\eta = \frac{h}{H+h} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $H$  为熔覆层的厚度,  $h$  为稀释区的深度。

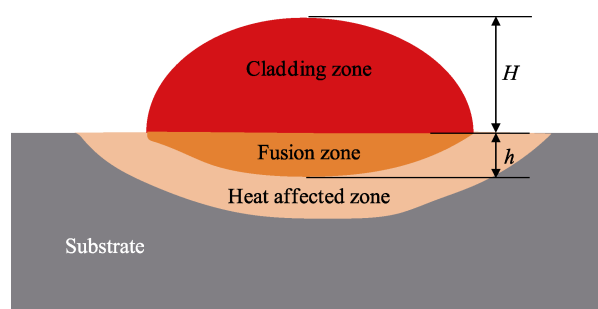


图 3 激光熔覆横截面示意图  
Fig.3 Diagram of laser cladding cross section

图 4 为激光功率  $P=1850$  W、扫描速度  $V=9$  m/min 时, 不同离焦量  $Z$ 、不同送粉速率  $m_p$  下单道熔覆层的横截面形貌。熔覆层形貌以及熔覆层高度、稀释区深度采用 Leica 光学显微镜获取。

#### 3.2 工艺参数对熔覆层稀释率的影响

##### 3.2.1 送粉速率

图 5 是在不同送粉速率下, 粉末的遮光率和最终激光能量照射到基体表面上的能量百分比, 将表 2 中的数值代入公式 (11) 中计算得到粉末遮光率, 然后再代入公式 (12) 得到最终激光能量照射到基体表面上的能量百分比。图 6 是利用红外测温仪测量激光功率为 1.85 kW 时, 在不同离焦量下激光透过粉末最终照射在基体上时所形成的温度值。

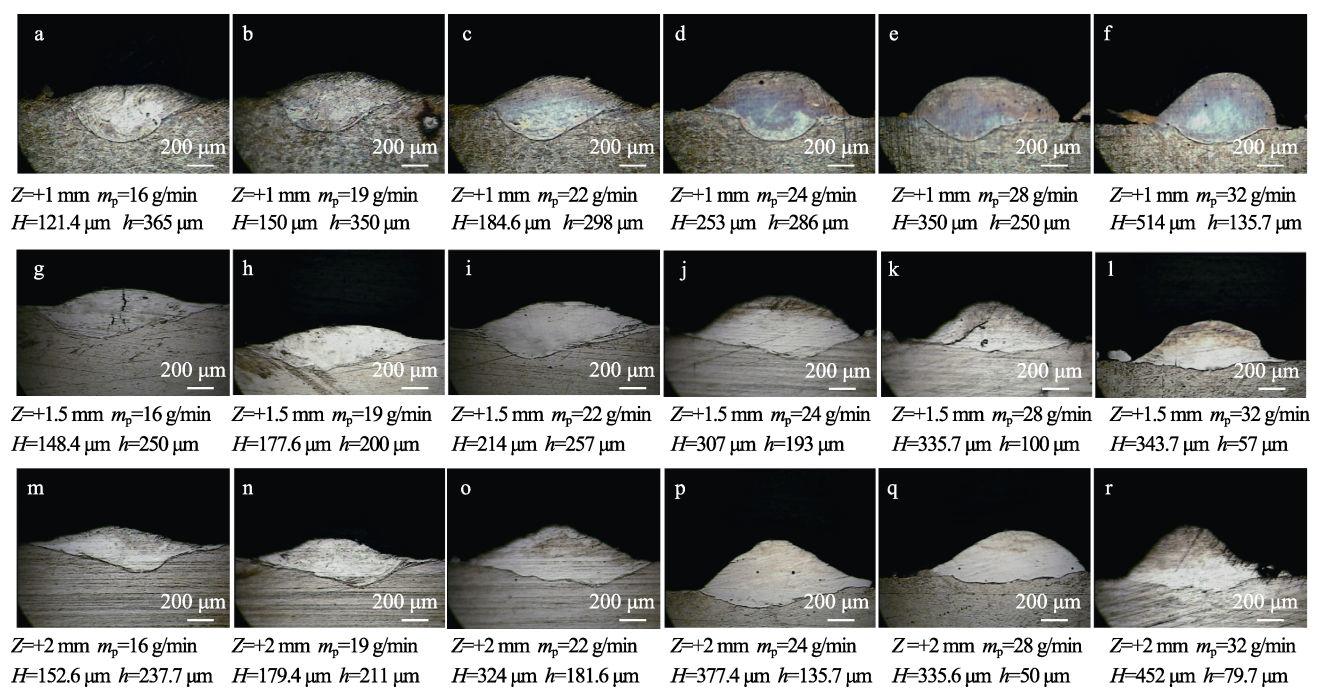


图 4 不同送粉速率及离焦量下熔覆层截面形貌

Tab.4 Cross-section morphology of cladding layer under different powder feeding rates and different defocusing amounts

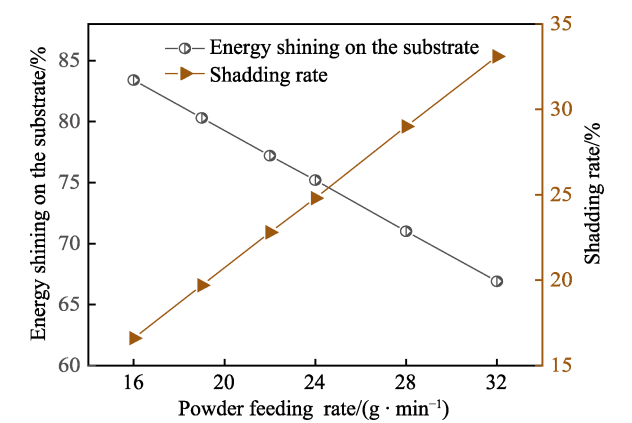


图 5 不同送粉速率下粉末的遮光率和到达基体表面的实际激光功率

Fig.5 Shading rate of powder at different powder rates and actual laser power reaching the surface of the substrate

表 2 遮光模型各参数取值  
Tab.2 Shading model parameters

$r_1/mm$	$r_p/\mu m$	$\rho_p/(kg \cdot m^{-3})$	$V_p/(m \cdot s^{-1})$	$r_2/mm$	$r_3/mm$	$h_1/mm$	$h_3/mm$
0.7	25	6980	1.5	0.38	0.58	1.58	2

如图 5 所示，在送粉速率为 16~32 g/min 时，粉末的遮光率为 16.6%~33.1%，激光透过粉末衰减后到基体表面的功率为实际激光功率的 83.4%~66.9%。在同一功率下，随着送粉速率的增大，照射在基体上的激光能量密度逐渐减小。从图 6 可以得到，随着送粉速率逐渐增大，激光透过粉末照射在基体上所形成的温度越来越低。304 不锈钢基体的熔点为 1450 ℃左右，要在基体上形成熔池，温度需要超过基体的熔点温度，但是温度不宜过大，否则在基体上形成的熔覆

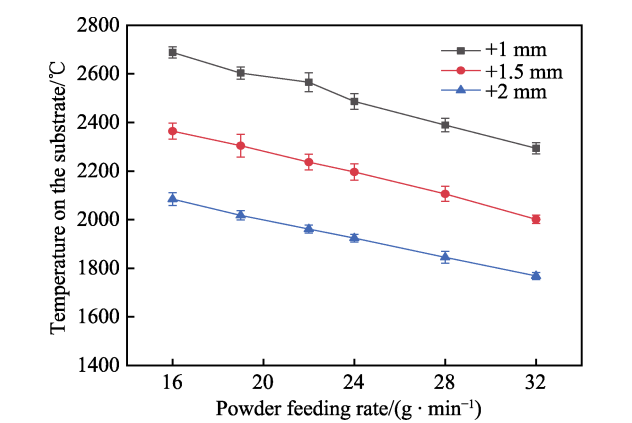


图 6 1.85 kW 时不同送粉速率下透过粉末的激光在基体上形成的温度

Fig.6 The temperature of the laser formed through the powder on the substrate at different powder feed rates at 1.85 kW

层稀释率很大。所以在一定的功率条件下，为了获得低稀释率与基体结合性好的熔覆层应选用大离焦量、大送粉速率。图 7 是根据图 4 测量的熔覆层高度和稀释区深度。绘制出在离焦量为 +1、+1.5、+2 mm 下随着送粉速率的增大，熔覆层稀释率变化折线图。

通过图 7 可知，随着送粉速率的增大，熔覆层高度逐渐增高，稀释区深度逐渐变小，稀释率也随着送粉率的增大而急速减小。当激光功率和扫描速度不变时，由式 (11) 可知，送粉速率的增大，单位时间内进入激光束中的粉末量增大，遮挡的激光面积增大，引起粉末遮光率变大，导致激光透过粉末照射到基体上的能量减少，在基体上形成的熔池变小，从而使得稀释区深度变小。与此同时，在足够能量的激光功率条件下，送粉速率越大，熔化的粉末量就越多，同一



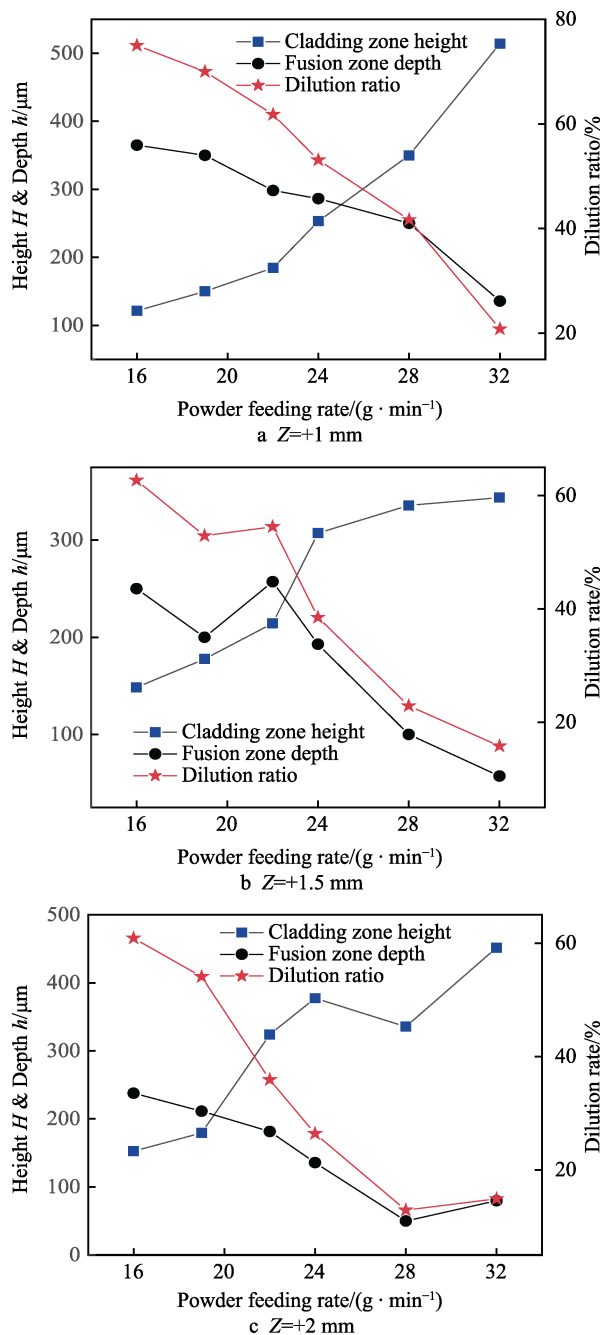


图7 不同离焦量下送粉速率对熔覆层高度、稀释区深度和稀释率的影响

Fig.7 Effect of powder feeding rate on cladding height, dilution zone depth and dilution rate under different defocusing amounts

时间内进入熔池中的粉末量增多,使得熔覆层的高度变大,综上所述导致稀释率急速下降。但是送粉速率不能持续增大,根据能量质量密度公式  $E_{md} = P_t / m_p$  [15]可知,在激光功率不变的前提下,当送粉速率过大时,能量质量密度过小,部分粉末得不到充分的能量而无法充分熔化,使得熔覆层材料内部出现多孔、稀释率过小与基体产生粘连等缺陷。与此同时,照射在基板上的光斑边缘能量较低,粉末受热达到半熔融状态在熔道两边就会产生严重的粘粉现象。

### 3.2.2 离焦量

图8是在激光功率  $P=1850$  W、扫描速度  $V=9$  m/min时,在不同离焦量下随着送粉速率的增大得到的稀释率对比图。

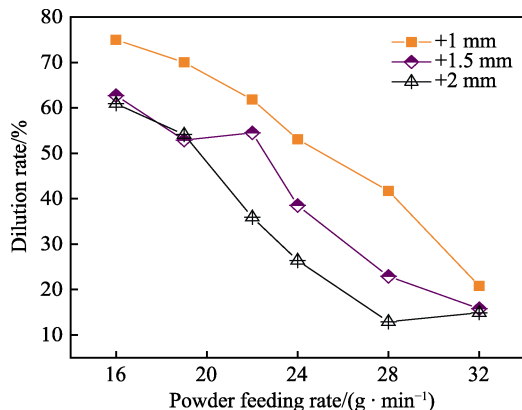


图8 在不同离焦量下送粉速率对稀释率的影响  
Fig.8 Effect of powder feeding rate on dilution rate under different defocusing amounts

结合式(11)和图8可知,在一定的送粉速率范围内,遮光率与送粉速率成线性相关。在同一送粉速率下,随着离焦量的增大,稀释率呈下降趋势。离焦量  $Z$  越大,光斑直径  $D$  也就越大,根据能量面密度公式  $E_{ad} = P_t / (DV)$  [15] (其中  $D$  为照射在基体上的光斑直径)可知,在一定的激光功率、扫描速度下,光斑直径越大,光斑能量面密度越小,此时透过粉末照射在基体表面上的光斑能量弱,在基体上形成的熔池深度较浅。同时在大离焦量下,一是同一时间进入熔池中的粉末增多,二是粉末在激光束中被照射的时间也越长,在空中吸收更多的激光能量,使得最终照射在基体上的光斑能量再一次被削弱,从而得到稀释区深度小、熔覆层高度大、稀释率小的表面涂层。需要指出的是,激光光斑直径不能过大,否则会因为单位面积内激光能量密度小,不能够充分熔化粉末,由此会比较容易发生粘粉,使得熔覆层与基体产生粘连缺陷。

### 3.3 组织及性能分析

通过对图4单因素实验结果对比分析选出最佳的工艺参数,即图4q:功率1.85 kW,扫描速度9 m/min,离焦量+2 mm,送粉速率28 g/min。在此工艺参数下得到熔覆单道截面形貌如图9所示。图10是图9中熔覆层与基体结合处的扫描电镜图,由图10可知,熔覆层呈现出垂直于熔池底部的柱状枝晶。由于激光功率较大,扫描速度快,熔池受到快热快冷,使得熔覆层具有明显的定向凝固特征。基体作为冷端,熔池作为热端,有一个很大的自上而下的正温度梯度,因此熔覆层组织是垂直于熔池底部外延生长的柱状枝晶[16-17]。图10中气孔的存在是因为扫描速度快,熔池

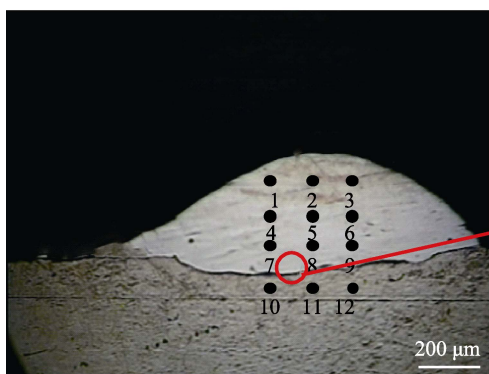


图 9 测量取样位置示意图  
Fig.9 Schematic diagram of sampling positions for measurement

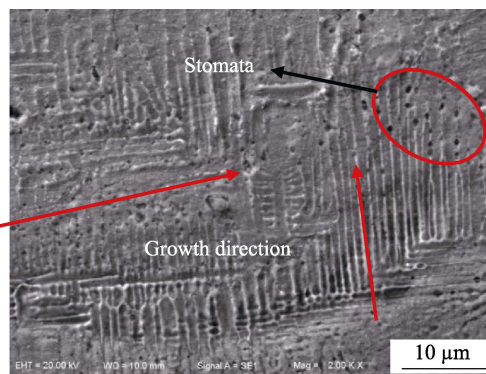


图 10 熔覆层与基体结合处的扫描电镜形貌  
Fig.10 SEM images of samples at cladding layer and substrate joint in Fig.9

急速冷却,使得进入熔池中的空气来不及逸出而残留其中,最终形成轻微气孔。

对图 9 中 12 个不同位置进行硬度测试,截面显微硬度分布见图 11,由图 11 可知,在熔覆层顶端和底部,显微硬度值有轻微波动,在熔覆层中间位置的显微硬度值趋于均匀,硬度值基本处于 280~320HV 之间,比基体材料的平均显微硬度(217.9HV)有所提升。

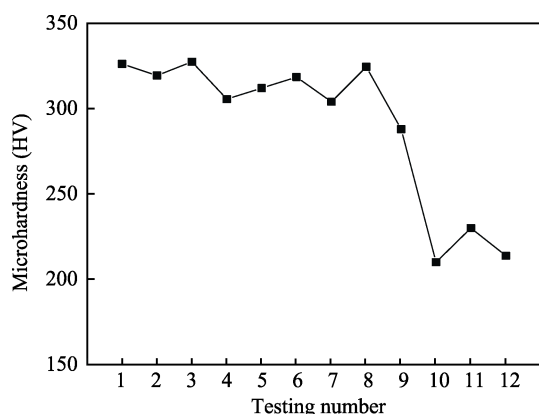


图 11 不同位置的显微硬度  
Fig.11 Microhardness at different locations

## 4 结论

1) 建立了光内送粉粉末遮光理论模型,经过分析:送粉速率为 16~32 g/min 时,遮光率随送粉速率的增大呈线性增长,在 28 g/min 送粉速率下,粉末遮光率为 28.96%。

2) 激光高速熔覆过程中,随着送粉速率的增加,粉末遮光率增大,激光能量在空中衰减增多,照射到基体表面的能量减少,使得稀释率逐渐减小;Z 在 +1~+2 mm 之间时,随着离焦量的增大,光斑能量密度减弱,熔覆层的稀释率降低。

3) 基于光内送粉技术,在 1.85 kW 激光功率下高速熔覆,在送粉速率为 28 g/min、离焦量为 +2 mm 下,实现扫描速度为 9 m/min,且获得熔覆层厚度为

336 μm、稀释率为 12.9% 的涂层,涂层表面形貌好且涂层与基体之间有良好的冶金结合,熔覆层显微硬度达 280~320HV。

## 参考文献:

- [1] 王至尧. 材料特种加工成形工程(下)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 320-321.  
WANG Zhi-yao. Material special processing and forming engineering (Part II)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 320-321.
- [2] THOMAS S, ANDRES G, KONRAD W, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of laser applications, 2016, 28(2): 022501.
- [3] LI Yan, BAI Rui-xing, LOU Li-yan, et al. Microstructure of ferrous alloy coatings deposited by 1.8 kW high speed laser cladding[C]//The 21st international thermal spraying symposium (ITSS'2018) and the 22nd national thermal spraying annual conference (CNTSC'2018). Tianjing: Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018.
- [4] 李俐群, 申发明, 周远东, 等. 超高速熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性对比研究[J]. 中国激光, 2019(18): 1-13.  
LI Li-qun, SHEN Fa-ming, ZHOU Yuan-dong, et al. Microstructure and corrosion resistance analysis of 431 stainless steel coating prepared by extreme high speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2019(18): 1-13.
- [5] 澹台凡亮, 田洪芳, 陈峰, 等. 高速熔覆在 27SiMn 液压支架立柱上的应用探讨[J]. 新技术新工艺, 2019(3): 52-54.  
TANTAI Fan-liang, TIAN Hong-fang, CHEN Feng, et al. Discussion on application of high-speed laser cladding on 27SiMn hydraulic support column[J]. New technology & new process, 2019(3): 52-54.
- [6] 西安中科中美激光科技有限公司. 采用高速激光熔覆是提高熔覆工作效率的最佳途径[EB/OL]. (2018-05-28) [2019-08-28]. <http://www.zkzmlaser.com/newsinfo/235502.html>.  
Xi'an Zhongke Zhongmei Laser Technology Co., Ltd.

- High-speed laser cladding is the best way to improve the efficiency of cladding[EB/OL]. (2018-05-28)[2019-08-28]. <http://www.zkzmlaser.com/news/info235502.html>.
- [7] 石世宏, 傅戈雁, 姚纯, 等. 激光精密熔覆光粉同轴装置: 中国, ZL200510112041.0[P]. 2006-08-09.  
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, YAO Chun, et al. Laser precision cladding powder coaxial device: China, ZL200510112041.0[P]. 2006-08-09.
- [8] 石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 中国, 200610116413.1[P]. 2016-12-01.  
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, WANG An-jun, et al. Laser processing forming and manufacturing intra-light powder feeding process and optical powder feeding nozzle: China, 200610116413.1[P]. 2016-12-01.
- [9] 王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 空间多元密排扭曲薄壁件 LCF 研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 108-117.  
WANG Cong, SHI Shi-hong, FANG Qin-qin, et al. Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(6): 108-117.
- [10] 沈婷, 石拓, 傅戈雁, 等. 变壁厚偏心圆环结构激光熔覆成形及闭环控制[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 228-235.  
SHEN Ting, SHI Tuo, FU Ge-yan, et al. Laser cladding forming and closed-loop control of thickness-variable eccentric ring structure[J]. Chinese journal of lasers, 2018, 45(3): 228-235.
- [11] LIU Shuang, KONG Fan-rong, SHI Shi-hong, et al. Study of a hollow laser beam for cladding[J]. The International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 73(1-4): 147-159.
- [12] 杨轼. 中空激光仰面熔覆立体成形工艺研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 3-6.  
YANG Shi. Study of hollow laser cladding solid forming processing technology on the base greater than 90 degrees[D]. Suzhou: Soochow University, 2015: 3-6.
- [13] 刘振侠. 激光熔凝和激光熔覆的数学模型及数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 90-97.  
LIU Zhen-xia. Modeling and numerical simulation on laser remelting and cladding[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 90-97.
- [14] 张庆茂, 刘文今, 杨森, 等. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 11-15.  
ZHANG Qing-mao, LIU Wen-jin, YANG Sen, et al. Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding[J]. Iron and steel research, 2002, 14(1): 11-15.
- [15] 仲崇亮. 基于 Incone1718 的高沉积率激光金属沉积增材制造技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 63-64.  
ZHONG Chong-liang. Investigations on high deposition-rate laser metal deposition for additive manufacturing application based on inconel 718[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 63-64.
- [16] 胡赓祥, 蔡瑜, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 256-318.  
HU Geng-xiang, CAI Yu, RONG Yong-hua. Fundamentals of materials science[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 256-318.
- [17] 刘勇, 田保红, 刘素芹. 先进材料表面处理和测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 36-41.  
LIU Yong, TIAN Bao-hong, LIU Su-qin. Advanced surface treatment and testing technology of materials[M]. Beijing: Science Press, 2008: 36-41.

(上接第 293 页)

- [22] 张胜寒, 檀玉, 梁可心. 电化学阻抗谱法对 304 不锈钢孔蚀生长和再钝化阶段的原位研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(2): 130-134.  
ZHANG Sheng-han, TAN Yu, LIANG Ke-xin. In-situ impedance investigation of 304 stainless steel between pit growth and repassivation state[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(2): 130-134.
- [23] YOSHIMORI M, TAKAO H, HISAYOSHI T. An analysis of current fluctuations during passive film breakdown and repassivation in stainless alloys[J]. Corrosion science, 1990, 31: 465-470.
- [24] 辛森森, 李谋成, 沈嘉年. 海水温度和浓缩度对 316L 不锈钢点蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(3): 373-378.  
XIN Sen-sen, LI Mou-cheng, SHEN Jia-nian. Effect of temperature and concentration ratio on pitting resistance of 316L stainless steel in seawater[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(3): 373-378.
- [25] LEE J, KITAGAWA Y, NAKANISHI T, et al. Passivation behavior of type-316L stainless steel in the presence of hydrogen sulfide ions generated from a local anion generating system[J]. Electrochimica acta, 2016, 220: 304-311.
- [26] EBRAHIMI N, MOMENI M, KOSARI A, et al. A comparative study of critical pitting temperature (CPT) of stainless steels by electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic and potentiostatic techniques[J]. Corrosion science, 2012, 59(67): 96-102.
- [27] BELLANGER G, RAMEAU J J. Effect of slightly acid pH with or without chloride in radioactive water on the corrosion of maraging steel[J]. Journal of nuclear materials, 1996, 228(1): 24-37.
- [28] 唐娴, 张雷, 王竹, 等.  $\text{SO}_4^{2-}$  对含  $\text{Cl}^-$  溶液中 316L 奥氏体不锈钢钝化行为及点蚀行为的影响[J]. 工程科学学报. 2018, 40(3): 367-372.  
TANG Xian, ZHANG Lei, WANG Zhu, et al. Effect of  $\text{SO}_4^{2-}$  on the passive and pitting behavior of 316L austenite stainless steel in a  $\text{Cl}^-$ -containing solution[J]. Chinese journal of engineering, 2018, 40(3): 367-372.
- [29] FATTAH-ALHOSSEINI A, SAATCHI A, GOLOZAR M A, et al. The transpassive dissolution mechanism of 316L stainless steel[J]. Electrochimica acta, 2009, 54(13): 3645-3650.
- [30] HAMADA E, YAMADA K, NAGOSHI M, et al. The transpassive dissolution mechanism of 316L stainless steel[J]. Corrosion science, 2010, 52(12): 3851-3854.