

# 三光束光内同轴送丝激光熔覆成形新方法研究

吉绍山, 刘凡, 傅戈雁, 石世宏

(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

**摘要:** **目的** 研究“三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法以及单向、多向单道熔覆成形效果。**方法** 采用光线追迹法分析了三光束光斑几何特性, 运用 TracePro 分析了光斑能量分布。利用研制的三光束光内送丝装置进行了单向以及多向单道熔覆实验, 对其展开成形表面质量以及单道熔覆层的组织和硬度分析。**结果** “三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法可以将原始圆形激光束整形为周向均匀分布的三个扇形光斑, 三个光斑光通量均沿着  $z$  轴方向呈“尖顶状”分布, 丝材能够被三个光斑均匀包裹。基材和丝材采用不锈钢 304 材料, 丝材线径为 0.8 mm, 负离焦量为 2.5 mm, 激光功率为 1500 W, 扫描速度为 3.5 mm/s, 送丝速度为 20.5 mm/s, 展开单向和多向单道熔覆成形测试, 丝材熔化充分, 熔覆层表面均匀平滑。熔覆层形貌和质量基本不受扫描方向的影响。单道熔覆层和基体结合良好, 组织整体比较细密, 无气孔和裂纹等缺陷, 熔覆层底部到顶部晶粒形态主要为树枝晶、柱状晶、胞状晶和树枝晶, 熔覆层组织为铁素体  $\delta$  和奥氏体  $\gamma$ , 凝固模式为 FA 模式, 熔覆层底部到顶部铁素体  $\delta$  的主要形态为板条状铁素体、蠕虫状铁素体、骨架状铁素体和板条状铁素体。熔覆层的平均硬度 (228HV) 明显高于基材硬度, 熔覆层底部到顶部的硬度过渡平稳, 不存在明显软化区, 组织整体比较细小致密, 晶粒分布均匀。**结论** “三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法可以实现光、丝耦合, 基材和丝材采用不锈钢 304 材料, 选择合理的工艺参数, 可以获得理想的单向以及多向单道熔覆成形效果。

**关键词:** 激光熔覆; 三光束; 光内送丝; 光线追迹; 光斑光能; 成形测试

**中图分类号:** TN249; TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0285-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.040

## New Forming Method of Coaxial Wire Feeding inside Three Beams Laser Cladding

Ji Shao-shan, LIU Fan, FU Ge-yan, SHI Shi-hong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study new laser cladding forming method of "coaxial wire feeding inside three beams of light" and unidirectional and multi-direction single-pass cladding forming effect. The light tracing method was used to analyze the geometrical characteristics of the spot and the energy distribution of the spot was analyzed by TracePro. The experiments of uni-

收稿日期: 2018-08-26; 修订日期: 2018-11-04

**Received:** 2018-08-26; **Revised:** 2018-11-04

**基金项目:** 国家重点研发计划课题 (2016YFB1100304); 国家自然科学基金青年项目 (51701134); 国家自然科学基金 (61475107)

**Fund:** Supported by National key R & D Program Project (2016YFB1100304), National key R & D projects (51701134), The National Natural Science Fund (61475107)

**作者简介:** 吉绍山 (1983—), 男, 博士研究生, 主要从事激光增材制造方面的研究。

**Biography:** Ji Shao-shan (1983—), male, Ph.D. graduate student, research focus: additive manufacturing.

**通讯作者:** 傅戈雁 (1956—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与激光增材制造方面的研究。邮箱: Fugeyan@suda.edu.cn

**Corresponding author:** Fu Ge-yan (1956—), female, Ph.D. graduate student, Professor, doctoral supervisor, research focus: laser processing and additive manufacturing. E-mail: Fugeyan@suda.edu.cn

directional and multi-direction single-pass cladding were carried out by device of wire feeding inside three beams to analyze the surface quality and microstructure and hardness of single pass cladding layer. The new method of "three beams coaxial wire feeding" laser cladding could shape the original circular laser beam into three fan-shaped faculae with uniform circumferential distribution. The flux of the three faculae distributed in a "cusp" shape along the  $z$ -axis direction. The wire could be evenly wrapped by three faculae. The substrate and wire were made of stainless steel 304, wire diameter was 0.8 mm, and the process parameters were as follows: negative defocus 2.5 mm, laser power 1500 W, scanning speed 3.5 mm/s, wire feeding speed 20.5 mm/s, to make unidirectional and multi-directional single-pass cladding forming test. The wire was fully melted and the cladding layer was even and smooth. The morphology and quality of the cladding layer were not affected by the scanning direction, the cladding layer and substrate were well bonded, the whole microstructure was fine, and there were no defects such as porosity and crack. The grain morphology from the bottom to the top of the cladding layer was mainly dendrite, columnar crystal, cellular crystal and dendrite. The microstructure of the cladding layer was ferrite  $\delta$  and austenite  $\gamma$ , and the solidification mode was FA model. The main forms of ferrite  $\delta$  from the bottom to the top of the cladding layer were lamellar ferrite, vermicular ferrite, skeleton ferrite and lamellar ferrite. The average hardness 228HV of the cladding layer was obviously higher than that of the substrate. The hardness transition from the bottom to the top of the cladding layer was stable, there was no obvious softening zone, the whole microstructure was fine and compact, and the grain distribution was uniform. New method of "coaxial wire feeding inside three beams of light" laser cladding can achieve accurate coupling of light and wire and substrate and wire are made of stainless steel 304, and select reasonable process parameters to obtain unidirectional and multi-direction single-pass cladding forming effects.

**KEY WORDS:** laser cladding; three beams; wire feeding inside beams; light tracing; spot energy; deposition test

激光熔覆技术是采用高能量激光束作为热源,通过在基材表面添加金属粉末或丝材,使之具有优异的耐磨性、耐蚀性以及耐热性等高性能的表面改性技术<sup>[1]</sup>。目前国内外采用大部分熔覆方法是送粉法,由于粉末发散的原因,粉末不能全部进入熔池,导致粉末利用率低并且容易造成环境污染,同时有部分未熔颗粒会粘附在熔覆层外表面,影响熔覆层成形表面质量<sup>[2-8]</sup>。激光同步送丝熔覆技术,金属丝材为刚性输送无发散,材料利用率几乎为 100%,节能环保。此外,丝材易于获得,成本相对较低,丝材刚性送入更容易实现精确控制,因此送丝熔覆具有很好的发展前景<sup>[2-8]</sup>。目前激光熔覆的送丝方式一般采用“侧向送丝法”,即将丝材从激光束外侧送入激光在基材上所形成的熔池中,丝材相对聚焦光束轴线倾斜布置。这种方法存在的主要问题有<sup>[2-3]</sup>:(1)光斑周向和丝材相对位置不同,进行二维和三维扫描时将呈现熔道形貌与质量各向异性;(2)不同离焦量下光斑和丝材位置关系会发生变化,无法实现精确的光、丝耦合;(3)丝材受到激光束单边照射,受热不均匀。这些缺陷限制了送丝激光熔覆技术的推广应用。文献[2-3,8]提出了“环形光内同轴送丝”激光熔覆方法:将入射圆形激光束通过分光镜和聚焦镜反射聚焦形成一中空锥形的无光区,送丝喷嘴布置在无光区中并同聚焦光束同轴,可消除侧向送丝法扫描方向性,光、丝准确耦合以及受热不均等问题<sup>[2-3,8]</sup>。但其依然存在不足:(1)中空环形光路会受到送丝通道的遮挡,导致光纤干涉,造成激光能量损失;(2)送丝通道过渡圆弧曲率小,易引起丝材传输不畅导致送丝速度不稳

定,从而影响成形质量<sup>[9-12]</sup>。

本文重点研究三光束光斑几何特性以及能量分布,并采用研制出的熔覆装置展开单向、多向单道熔覆成形效果进行研究,并提出了一种三光束光内同轴送丝激光熔覆的新方法,解决了侧向送丝扫描方向性,光、丝准确耦合以及受热不均等问题,避免了光内送丝光纤干涉造成的丝材过度弯曲,所获得的送丝偏摆小,速度稳定<sup>[9-12]</sup>。

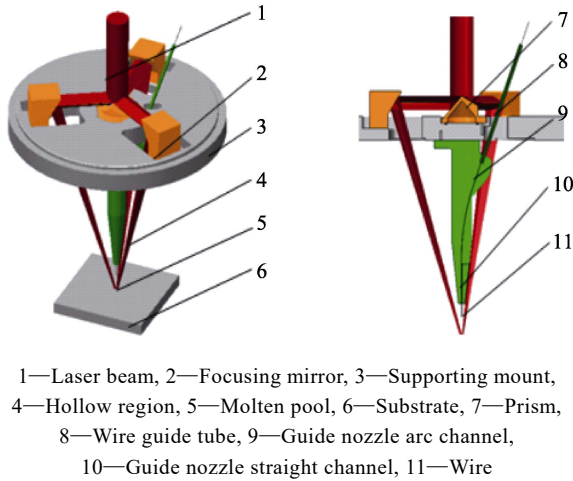
## 1 三光束光内同轴送丝激光熔覆装置研制

### 1.1 工作原理

“三光束光内同轴送丝”激光熔覆原理如图 1 所示。三棱镜将入射圆形激光束分成周向均匀分布的三光束,聚焦镜将三光束反射并聚焦到基材上的熔池,在支撑架下方形成一个中空区域。分光镜固定于支撑架中心,其镜面朝向入射激光束和聚焦镜,聚焦镜周向均布分布并固定在支撑架上,与三棱镜同轴布置。在三光束中空区域,丝材从导丝管、导丝嘴圆弧通道、导丝嘴直线通道进入到熔池区域,丝材在导丝嘴直线通道与三光束同轴布置。

“三光束光内同轴送丝”激光熔覆装置具有如下特点:(1)丝材与三光束同轴并垂直于基体表面,在成形过程中,不受扫描方向性的影响;(2)丝材被三个光束均匀包裹,丝材受热均匀,熔池对流传热传质均匀,有助于提高熔覆层质量;(3)不同离焦量,丝

材与三光束都同轴, 实现了光、丝精确耦合; (4) 避免光丝干涉, 激光能量利用率高<sup>[9-12]</sup>; (5) 送丝通道空间不受光束的影响, 送丝圆弧通道曲率大, 送丝通畅, 有利于送丝速度的稳定<sup>[9-12]</sup>。



1—Laser beam, 2—Focusing mirror, 3—Supporting mount, 4—Hollow region, 5—Molten pool, 6—Substrate, 7—Prism, 8—Wire guide tube, 9—Guide nozzle arc channel, 10—Guide nozzle straight channel, 11—Wire

图 1 三光束光内同轴送丝原理图

Fig.1 Schematic diagram of coaxial wire feeding inside three beams

## 1.2 光斑几何特征分析

### 1.2.1 抛物线方程推导

图 2 为三光束聚焦抛物线参数尺寸示意图。如图 2 所示, 入射光通过 45° 的三棱镜反射到聚焦镜, 三棱镜的三面交点到聚焦镜之间的距离为  $a$ , 聚焦镜将光束聚焦到  $xz$  轴的原点上, 焦距为  $f$ 。

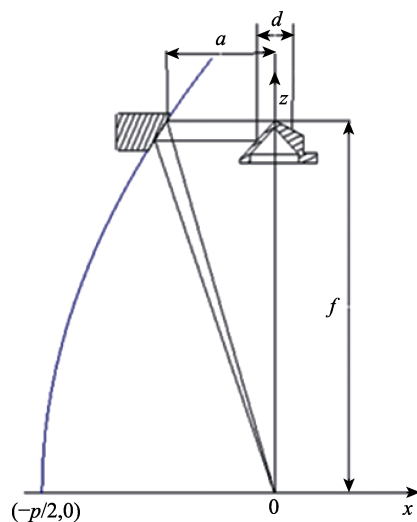


图 2 三光束聚焦抛物线参数图

Fig.2 Focusing parabola parameter diagram of three beams

抛物线的二维方程为  $z^2 = 2p(x + p/2)$ , 此抛物线过  $(-a, f)$  点, 带入方程得到, 并解出  $p = a + \sqrt{a^2 + f^2}$ 。求得抛物线的二次方程为:

$$z^2 = 2(a + \sqrt{a^2 + f^2})(x + (a + \sqrt{a^2 + f^2})/2) \quad (1)$$

此抛物线绕  $x$  轴旋转, 则抛物面的三维方程为:

$$y^2 + z^2 = 2(a + \sqrt{a^2 + f^2})(x + (a + \sqrt{a^2 + f^2})/2) \quad (2)$$

### 1.2.2 光路追迹

根据几何光学原理, 采用光线追迹的方法<sup>[13]</sup>对三光束光内送丝的聚焦光斑分布形状进行分析。假设入射光束为均匀分布的圆光束, 选取入射光点阵如图 3 所示。

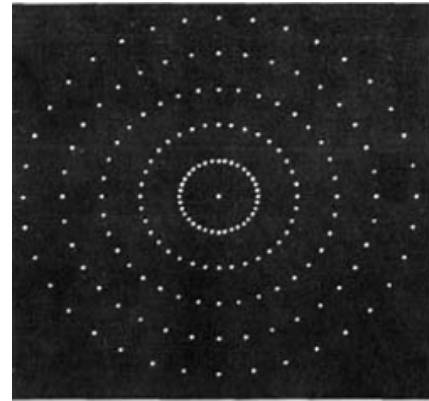


图 3 入射点光阵

Fig.3 Incident light lattice

取图 3 中入射光线通过 45° 三棱镜表面相交于  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ , 并通过分光镜反射到反射聚焦镜的抛物面上, 反射光线和入射光完全垂直, 并交汇于  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ , 则入射光的线方程为:

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha} = \frac{y - y_0}{\cos \beta} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma} \quad (3)$$

反射光的线方程为:

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \quad (4)$$

抛物面的法线方程为:

$$\frac{x - x_1}{2(a + \sqrt{a^2 + f^2})x_1} = \frac{y - y_1}{-2y_1} = \frac{z - z_1}{-2z_1} \quad (5)$$

由入射光线方程(3), 通过三棱镜得出的反射光线方程(4), 再通过聚焦镜抛物面反射聚焦光线的方程(5), 确定入射光束分布, 取遍图 3 入射光束的各点, 可以计算出任意  $z$  平面内光斑的形状与尺寸。

### 1.2.3 光斑的形状尺寸

本文采用 IPG 2 kW 光纤激光器, 将光束输入到三棱镜之前需要先通过准直镜, 其光束的发散角非常小。在此文的计算中, 发散角忽略不计, 假设入射光线平行于  $z$  轴的光线, 入射光直径  $d=18$  mm。由于三光束内部空腔需要布置导丝通道相关零件, 考虑光丝不能干涉、零件制造误差以及装配误差等要求, 这些零件需要与光束留出一定距离, 根据这些约束要求选择参数: 入射光从三棱镜顶点反射到聚焦镜表面的距

离  $a=95$  mm, 焦距  $f=300$  mm。求得如图 4 的光斑形状以及分布图, 三光斑分别成扇形,  $120^\circ$  均布分布。 $d_1$  为光斑内径,  $d_2$  为光斑外径, 按照正负离焦 0、2.5、5 mm, 分别求出  $d_1$ 、 $d_2$  的尺寸, 如表 1 所示。

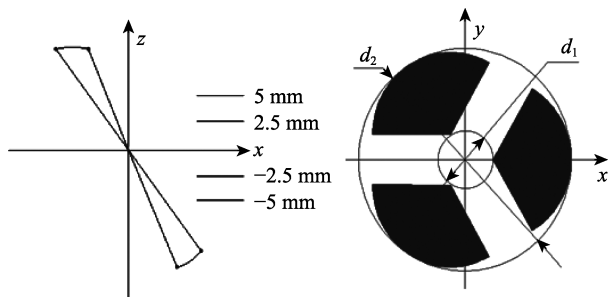


图 4 光斑形状尺寸以及分布图  
Fig.4 Shape and size of spot and distribution profiles

表 1 不同离焦量光斑尺寸  
Tab.1 Spot size of different defocus size

Defocus size $z$	0	2.5	5
$d_1$	Solid point	1.58	3.17
$d_2$	Solid point	1.74	3.49

mm

### 1.3 光斑光能分析

根据上述提供的参数, 采用 Creo 建模软件建立三棱镜、聚焦镜以及基材的 3D 模型, 导入 TracePro 软件, 如图 5a 所示, 并采用其光束轨迹追踪分析功能和辐照度分析模块, 对三光束光内同轴送丝的激光熔覆装置的光路展开仿真分析, 研究三光束聚焦光斑光通量  $W$  分布情况。在 TracePro 软件中, 三棱镜、聚焦镜以及基材的底平面均平行于  $xy$  坐标平面, 分光镜的中心与  $z$  轴同轴, 基材上表面位于聚焦镜抛物面焦点上方 2.5 mm 处 (即负离焦量为 2.5 mm), 根据表 1 的计算结果, 三个光斑照射到基体上表面的光斑尺寸为:  $d_1=1.58$  mm,  $d_2=1.74$  mm。定义发光功率为 1.3 kW, 圆柱入射光与  $z$  轴同轴, 其直径为 18 mm, 定义三棱镜面和聚焦镜面对入射光束的吸收率为 1%, 熔覆基材上表面对入射光的吸收率为 80%<sup>[14]</sup>, 展开基材上光斑的光能分析。

观察图 5a 可知, 入射圆形光束通过三棱镜将其均分三等份, 入射到聚焦镜之后反射聚焦, 在离焦状态下, 会形成三个均布分布的呈扇形的聚焦光斑, 并与  $z$  轴同轴, 所形成的中空空间, 完全可以容纳送丝通道等零件, 并可以和丝材同轴, 与上述分析的原理以及光斑形状尺寸保持一致。如图 5b 所示, 聚焦所

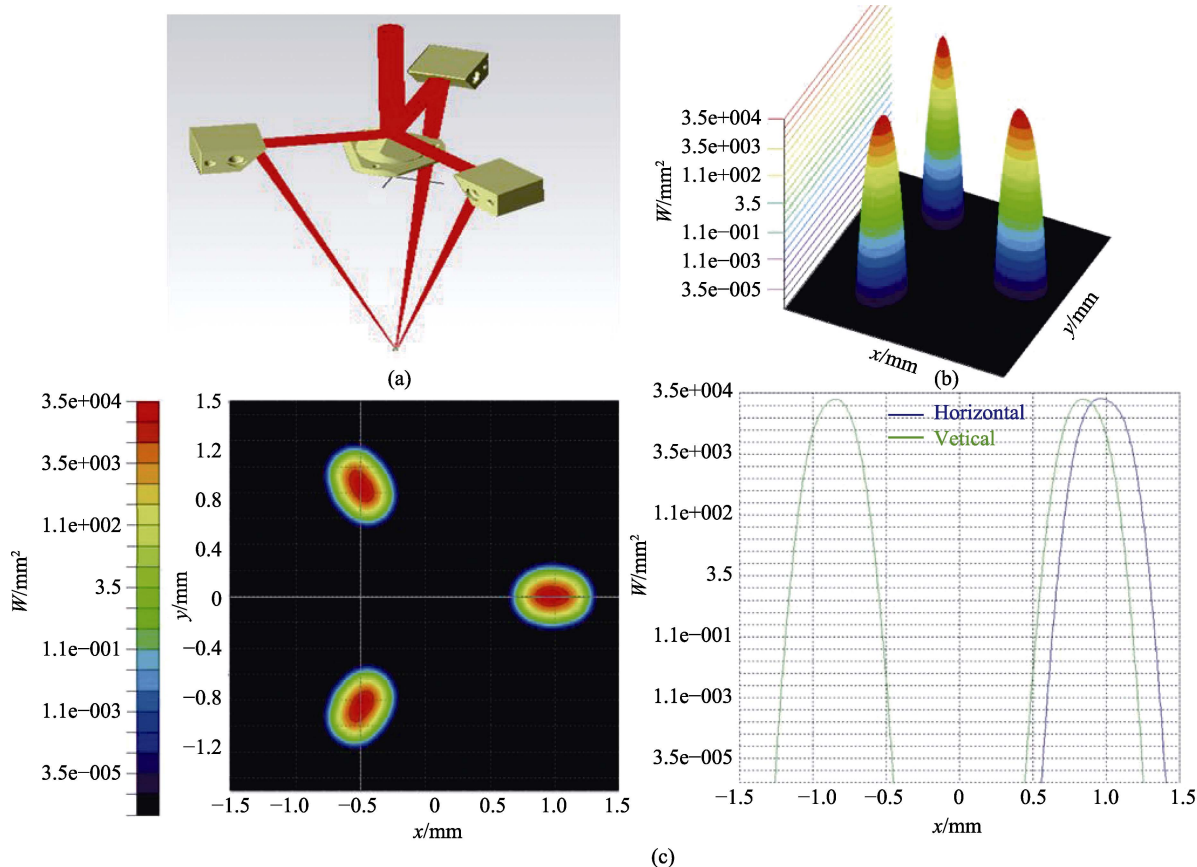


图 5 (a) 三光束轨迹; (b) 基材光斑立体光通量值; (c) 基材光斑二维光通量值  
Fig.5 (a) Three beams track; (b) Solid luminous flux value of spot on substrate;  
(c) Two-dimensional luminous flux value of spot on substrate



得光斑为中空三光束光斑，三个光斑的光通量周向均匀分布，沿着  $z$  方向呈“尖顶”状分布。由图 5c 分析结果可知，沿着  $y=0$  剖面方向，此剖面主要是剖在其中最右侧的一个光斑上，单个光斑的光通量呈“单峰”状，沿着  $x=0.5$  剖面方向，此剖面主要是剖在左边的两个光斑上，此光斑的光通量呈“双峰”状，激光能量分布较为集中，表明此光学系统具有较好的聚光效果。

1.4 三光束激光熔覆装置

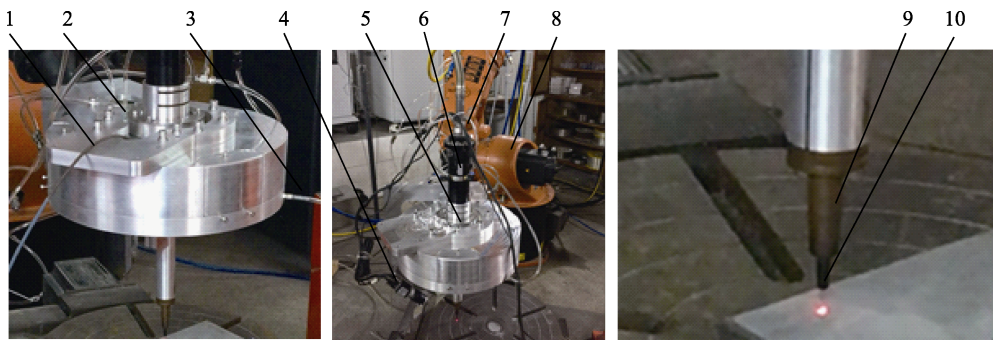
1.4.1 熔覆实验装置

根据上述三光束核心参数的研究与确定，完成熔覆装置的设计制造，三光束光内同轴送丝熔覆装置如图 6 所示。喷头上端接口与 IPG 品牌 2 kW 光纤激光器以及准直镜输入端口连接，将激光输入到三棱

镜，喷头通过支架与 Kuka 机器人连接，喷头上表面分别布有冷却水输入、输出口，将冷却水流入三棱镜和聚焦镜进行冷却。保护气体通过喷头一侧气体输入口，再通过喷头内部通道，将气体同轴通过气嘴输入到熔覆层表面，用来防止熔覆层氧化和冷却丝材。丝材从喷头侧端通过送丝软管进入喷头内部，并沿着丝材通道传输到送丝喷嘴，并进入到熔覆区域。

1.4.2 光斑尺寸以及光丝耦合

通过观察熔覆装置光斑，如图 7 所示，基材上的三个聚焦光斑周向均匀分布，光斑呈扇形，通过检测红光模拟三光束在基材上的光斑并测量其尺寸，由于零件制造误差、装配误差以及入射光束的误差等，光斑尺寸变化接近理论分析趋势：离焦量大小决定了光斑尺寸大小，离焦量从 0 到 5 mm 变化，光斑从实心光斑到三光斑变化，光斑尺寸如表 2 所示。



1—Wire feeding soft tube, 2—Cooling water input and output, 3—Air input, 4—CCD, 5—Connector, 6—Input port, 7—Laser device, 8—Robot, 9—Gas nozzle, 10—Wire feeding nozzle

图 6 三光束熔覆装置图  
Fig.6 Three beams cladding device

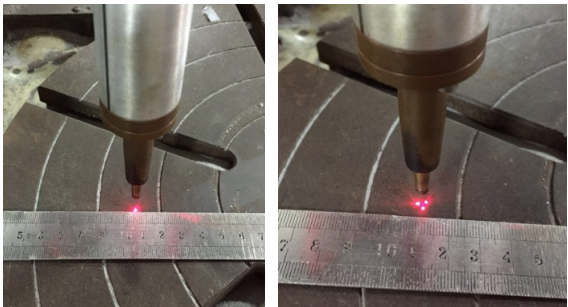


图 7 熔覆装置光斑尺寸图  
Fig.7 Spot size of cladding device



图 8 光丝耦合图  
Fig.8 Coupling of beams and wire

表 2 基材上不同离焦量的光斑尺寸  
Tab.2 Spot size of different defocus on substrate

Defocus size $z$	0	2.5	5
$d_1$	0	1.2	2
$d_2$	1.6	3.8	4.5

观察图 8 可知，通过调节送丝喷嘴的位置，可以将丝材输出端对准三个光斑的中心。在不同离焦量的情况下，三光斑都能均匀包裹丝材，实现精确的光、丝耦合。

2 熔覆实验与结果分析

2.1 实验方案

2.1.1 实验材料

基材材料选用尺寸 100 mm×80 mm×10 mm 的 304 不锈钢，熔覆前，基体用酒精/丙酮去除油污，烘干备用。熔覆材料选用 304 不锈钢丝材（法瑞钠品牌的丝材），直径为 0.8 mm。其成分如表 3 所示。

表 3 基材和熔覆丝材化学成分  
Tab.3 Chemical composition of substrate and cladding materials

Composition	C	Si	Mn	Cr	P	Ni	S	Fe
Substrate mass ratio/%	0.05	0.4	1.12	18.13	0.026	8.2	0.03	Bal.
Cladding material mass ratio/%	0.01	0.52	1.9	18.46	0.015	8.57	0.007	Bal.

### 2.1.2 实验方法

采用“三光束光内同轴送丝”激光熔覆装置,选取表 4 熔覆工艺参数范围,采用所有可能工艺参数(离焦量、激光功率、扫描速度和送丝速度)组合开展一系列熔覆实验,将单道熔覆层表面形貌好以及熔覆层几何特征宽高比(熔覆层宽度  $W$  与高度  $H$  比值,如图 9)大作为熔覆层表面质量的评价指标,选取可以获得高质量的单道熔覆层以及较高熔覆层宽高比的工艺参数进行单向以及多向单道熔覆,分析扫描方向性对熔覆层质量的影响,并对单道熔覆层进行显微组织和硬度分析。

表 4 熔覆实验工艺参数范围  
Tab.4 Parameters range of cladding experiment

Defocus value/mm	Laser power/kW	Wire feeding rate/(mm·s <sup>-1</sup> )	Scanning speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
-1~3.5	1.4~1.6	17.5~23.5	2.5~4.5

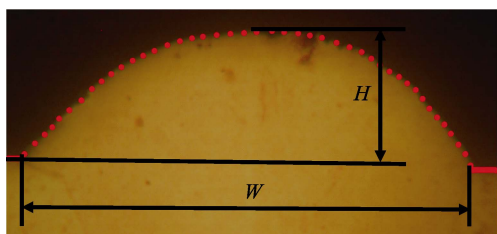


图 9 熔覆层宽度、高度示意图  
Fig.9 Cladding layer width and height diagram

沿着垂直于扫描方向的熔覆层进行切割、镶嵌、打磨和抛光,并采用王水(硝酸和盐酸体积比 1:3)进行腐蚀,采用 Hitachi S-3400N 扫描电镜观察熔覆层内部微观组织,采用 Ultima IV 型多功能 X 设计衍射仪对其表面进行扫描,分析相组成。另外,采用 MH5 显微硬度计对熔覆层区域硬度进行检测,载荷为 500 g,加载时间为 15 s。

## 2.2 单向和多向单道熔覆

利用“三光束光内同轴送丝”激光熔覆装置和表 4 熔覆工艺参数范围,将离焦量、激光功率、扫描速度和送丝速度所有可能的工艺组合进行一系列单向熔覆实验,选取可以获得高质量的单道熔覆层以及较高熔覆层宽高比的工艺参数:负离焦量 2.5 mm,激光功率 1500 W,扫描速度 3.5 mm/s,送丝速度

20.5 mm/s。熔池能量“充足”可以充分熔化进入熔池的丝材,熔池对流充分,在熔池表面张力的作用下,丝材可以连续平稳地熔入熔池,获得熔覆层表面连续光滑且均匀的形貌,其宽度为 3.2 mm,高度 1 mm,宽高比为 3.2,如图 10 所示。



图 10 单向单道熔覆层表面形貌  
Fig.10 Surface profile of single-directional cladding layer

“三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法由于金属丝材周向均匀被三个光束包络,丝材相对三个光束产生的热源完全对称,当喷头沿不同方向扫描时,三光束对丝材作用相同,因此不存在侧向送丝所带来的扫描方向差异问题。采用上述单向单道熔覆材料以及工艺参数,设计迷宫式轨迹进行扫描(图 11),观察可知:采用三光束光内同轴送丝激光熔覆工艺时,迷宫轨迹中不同扫描方向上的熔覆层表面质量以及几何特征(宽度、高度以及宽高比)没有明显差别,基本上消除了扫描方向性的影响。



图 11 多向单道熔覆层表面形貌  
Fig.11 Surface morphology of multi-directional cladding layer

## 2.3 单道熔覆层组织和硬度分析

### 2.3.1 显微组织分析

根据金属凝固机理可知,熔覆层结晶方向温度梯度  $G$  与凝固速度  $R$  比值直接影响熔覆层的组织形态,熔覆层的晶粒形态主要由平面晶、柱状晶、胞状晶和树枝晶等组成<sup>[15-17]</sup>。将单道熔覆层从底部结合区、中间区以及顶部区域对应划分为①区、②区和③区,如图 12—13,区域①是熔池和基体结合处,热量主要由基体传导,温度梯度  $G$  最大,凝固速度  $R$  比较小,



导致  $G/R$  比值很大, 因为冷却速度较大, 使得平面晶区域很小, 较难识别。由于组织生长方向与熔覆层散热方向基本保持一致, 所以熔池凝固过程中, 熔覆层底部结合区域①的组织结晶出近似垂直于基材熔接线树枝晶和柱状晶。区域②受熔覆层表层保护气体和空气的影响小, 且与区域①和③相距一定距离, 散热没有方向性, 各个方向的生长速度基本相等, 从而形成了均匀的胞状晶。区域③由于凝固时同时受到基体、表面空气和保护气体散热, 温度梯度  $G$  进一步减小, 凝固速度  $R$  进一步增大, 导致  $G/R$  比值很小, 形成了细小树枝晶, 由于保护气体对流引起散热方向不一致, 导致晶粒凝固冷却方向也会不同, 所以形成

的细小树枝晶也不同。通过上述熔覆层展开微观组织分析可知, 熔覆层组织整体比较细小、致密, 无气孔和裂纹等缺陷, 与基材冶金结合良好。

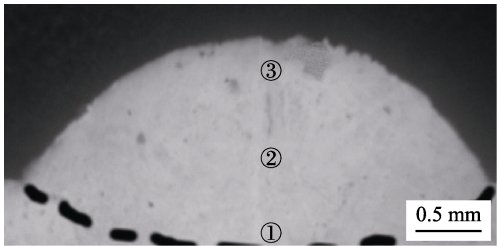


图 12 单道熔覆层剖面图  
Fig.12 Sectional view of single-directional cladding layer

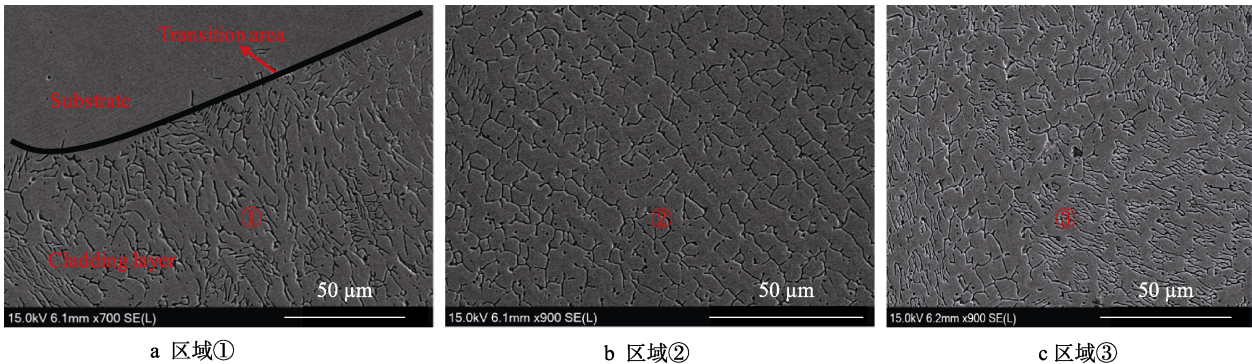


图 13 单道熔覆层 SEM 图

奥氏体不锈钢凝固模式与其化学成分密切相关, 改变 Cr、Ni 元素含量直接影响奥氏体不锈钢的凝固模式, 奥氏体不锈钢共有 4 种凝固模式: A 模式、AF 模式、FA 模式、F 模式。不同模式下铁素体形态和含量有较大的差别, 通常使用舍夫勒 (Schaeffler) 铬当量 ( $Cr_{eq}$ )、镍当量 ( $Ni_{eq}$ ) 对 Fe 元素以外的化学成分预测凝固模式<sup>[18]</sup>。Cr、Mo、Si 等元素促进铁素体形成, 而 Ni、C、Mn 等元素促进奥氏体形成, 所以可以根据不锈钢成分  $Cr_{eq}$  和  $Ni_{eq}$  比值来判断所属的凝固模式, 本文所采用的舍夫勒  $Cr_{eq}$ 、 $Ni_{eq}$  计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (6)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn \quad (7)$$

根据熔覆材料不锈钢 304 的  $Cr_{eq}$  和  $Ni_{eq}$  比值及舍夫勒焊缝组织图<sup>[19]</sup>就可以大概预测出熔覆层的凝固模式, 预测结果如表 5 所示。

通过 XRD 结果 (图 14) 可知, 熔覆层中存在奥氏体  $\gamma$  和铁素体  $\delta$ , 基体主要为奥氏体  $\gamma$ 。结合熔覆层内部显微组织 (图 13) 及表 5 凝固模式预测结果可知, 其凝固过程中的相变和典型奥氏体不锈钢 FA 理论凝固模式<sup>[15-18]</sup>基本一致: 铁素体  $\delta$  先从液相中析出, 随后通过包晶反应或共晶反应生成奥氏体  $\gamma$ , 即  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma$ , 室温组织为铁素体  $\delta$  和奥氏体  $\gamma$  混合物。熔覆层底部到顶部的铁素体主要形态为板条状铁素体  $\rightarrow$  蠕虫状铁素体  $\rightarrow$  骨架状铁素体  $\rightarrow$  板条状铁素体, 熔覆层底部由于熔池的高温液态金属与基体接触, 激冷过程中, 熔覆层底部与基体结合处会发生凝固再结晶现象, 从而出现细小的板条状铁素体<sup>[18]</sup>。熔覆层的中间区域与受到保护气体和空气冲击的熔覆层顶部以及熔覆层底部有一定距离, 相比熔覆层顶部和底部, 其冷却速度为中等, 奥氏体通过消耗铁素体不断生长, 在相变过程中, 残留铁素体中的铬和钼元素不断聚集, 而镍、碳、氮等奥氏体元素不断贫化, 直到铁素体扩散受到限制为止, 所以形成了蠕虫状铁素体和骨架状铁素体<sup>[18]</sup>。熔覆层的顶部由于受到保护气体和空气的冲击, 其冷却速度较快, 导致铁素体-奥氏体相变扩散受到限制, 当扩散相变扩散距离相应变小时, 板条状铁素体就会替代中间区域的骨架状铁素体<sup>[18]</sup>。

表 5 预测凝固模式  
Tab.5 Prediction of solidification model

Cladding material	$Cr_{eq}/\%$	$Ni_{eq}/\%$	$Cr_{eq}/Ni_{eq}$	Prediction of solidification model
Stainless steel 304	19.24	9.82	1.96	FA

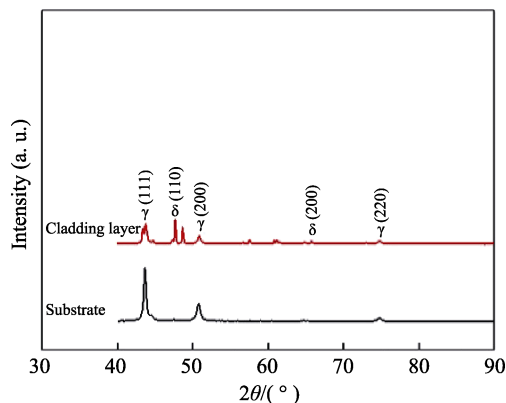


图14 基材和熔覆层 X 射线衍射结果

Fig.14 X-ray diffraction results of substrate and cladding

### 2.3.2 硬度分析

对单道熔覆层横截面微观硬度展开测试分析,从熔覆层底部到顶部依次测试6个检测点,测试点位置示意图如图15所示。每一检测点附近检测3次,取其平均值绘制成图16所示的硬度趋势图。

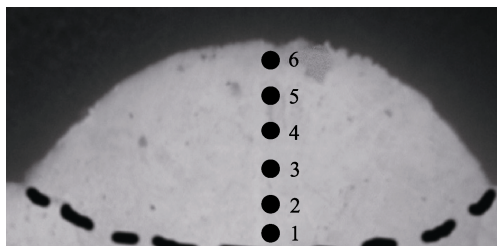


图15 单道熔覆层硬度测试点示意图

Fig.15 Hardness test point of single-directional cladding layer

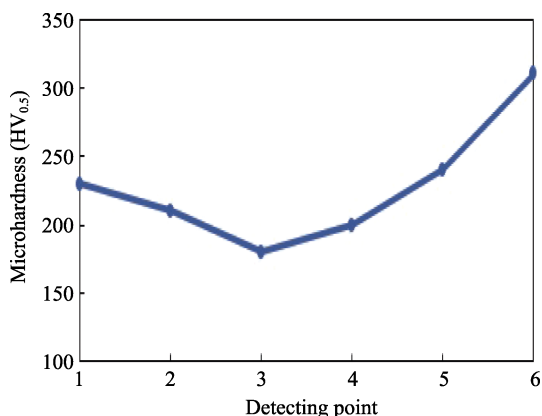


图16 熔覆层显微硬度

Fig.16 Microhardness of cladding layer

一般认为,金属晶粒越细其硬度就越高,这是由于细小金属晶粒在外力作用下产生塑性变形时,外力可以由更多的晶粒分担,塑性变形比较均匀,应力集中非常小。另外,晶粒越细小,晶界面积就会越大,晶界就会越曲折,就越不利于裂纹扩展<sup>[20]</sup>。由上述对熔覆层晶粒形态分析可知,由于熔覆层顶部区域③与保护气体和空气直接接触,以及熔覆层底部区域①与

基材接触,冷却速度相比熔覆层中间区域②要大,晶粒得到进一步细化,其晶粒要比中间区域②要小,所以呈现如图16硬度区间图:熔覆层顶部区域③的硬度平均值为250HV,熔覆层中间区域②的硬度为180HV,熔覆层底部区域①的硬度平均值为220HV,其硬度分布和晶体形态基本吻合,从熔覆层底部、中部到顶部区域,硬度由高变低再变高,整个熔覆层的平均硬度为228HV,相比基体(硬度平均值为160HV)有显著提高,这是由于激光的快速加热和熔池的快速冷却凝固导致熔覆层晶粒细化以及强化等原因造成的。总之,熔覆层组织整体比较细小致密,晶粒分布均匀,熔覆层底部到顶部硬度过渡平稳,不存在明显软化区。

## 3 结论

1) 针对“三光束光内同轴送丝”激光熔覆新方法,采用光线追迹的方法分析光斑几何特性,运用TracePro分析光斑能量分布,得出通过分光镜和聚焦镜反射聚焦后,将原始圆形激光束整形为周向均布的三个扇形光斑,三个光斑光通量均沿着z轴方向呈“尖顶状”分布,丝材能够被三个光斑均匀包裹。通过熔覆装置的实验验证,表明可以实现光、丝精确耦合。

2) 采用基材和丝材材料为不锈钢304,丝材直径为0.8 mm,选择工艺参数为:负离焦量2.5 mm,激光功率1500 W,扫描速度3.5 mm/s,送丝速度20.5 mm/s。单向、多向单道熔覆实验结果表明:丝材熔化充分,熔道表面均匀平滑,激光对丝材的热作用基本不会受到熔覆扫描方向的影响,有利于堆积各种形状的立体零件。

3) 对单道熔覆层组织和硬度进行分析,结果表明:熔道和基体结合良好,组织整体比较细密,无气孔和裂纹等缺陷,熔覆层底部到顶部的晶粒形态主要为树枝晶、柱状晶、胞状晶和树枝晶,熔覆层组织为铁素体δ和奥氏体γ,凝固模式为FA模式,熔覆层底部到顶部的铁素体δ主要形态为板条状铁素体、蠕虫状铁素体、骨架状铁素体和板条状铁素体。熔覆层的平均硬度(228HV)明显高于基材硬度,熔覆层底部到顶部硬度过渡平稳,不存在明显软化区,组织整体比较细小致密,晶粒分布均匀。

### 参考文献:

- [1] 董世运,马运哲,徐滨士,等. 激光熔覆材料研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 5-9.  
DONG Shi-yun, MA Yun-zhe, XU Bin-shi, et al. Current status of material for laser cladding[J]. Material review, 2006, 20(6): 5-9.
- [2] 石世宏,傅戈雁,李龙,等. 中空激光光内同轴送丝熔覆工艺的实现及其试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(1):



- 266-270.  
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, LI Long, et al. Realization and research of laser cladding with method of internal wire feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese journal of laser, 2010, 37(1): 266-270.
- [3] 朱刚贤, 石拓, 傅戈雁, 等. 中空光内送丝熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 381-384.  
ZHU Gang-xian, SHI Tuo, FU Ge-yan, et al. Effect of process parameters on the quality of the cladding layer by the inside-laser wire feeding[J]. Applied laser, 2013, 33(4): 381-384.
- [4] SYEDW H H, LI Lin. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition[J]. Applied surface science, 2005, 248: 518-524.
- [5] MOK Sui-him, BI Gui-jun, FOLKES J, et al. Deposition of Ti-6Al-4V using a higher power diode laser and wire, part I: Investigation on the process characteristics[J]. Surface & coating technology, 2008, 202: 3933-3939.
- [6] ABIOYE T E, FOLKES J, CLARE A T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of material processing technology 2013, 213: 2145-2151.
- [7] LIU Shuang, LIU Wei, HAROONI Masoud, et al. Real-time monitoring of laser hot-wire cladding of Inconel 625[J]. Optics and laser technology, 2014, 62: 124-134.
- [8] SHI Jian-jun, ZHU Ping, FU Ge-yan, et al. Geometry characteristics modeling and process optimization in co-axial laser inside wire cladding[J]. Optics and laser technology, 2018, 101: 341-348.
- [9] 傅戈雁, 吉绍山, 石世宏, 等. 一种用于激光熔覆的激光光内送丝装置: 中国, 201610075735[P]. 2016-06-07.  
FU Ge-yan, JI Shao-shao, SHI Shi-hong, et al. A device of coaxial wire feeding through beams for laser cladding: China, 201610075735[P]. 2016-06-07.
- [10] 傅戈雁, 吉绍山, 刘凡, 等. 激光熔覆装置的抛物面的设定方法及激光熔覆装置: 中国, 201710662057.1[P]. 2017-02-27.  
FU Ge-yan, JI Shao-shao, LIU Fan, et al. Setting method of parabola of laser cladding device and laser cladding device: China, 201710662057.1[P]. 2017-02-27.
- [11] 傅戈雁, 吉绍山, 刘凡, 等. 激光熔覆装置: 中国, 201710661517.9[P]. 2017-05-16.  
FU Ge-yan, JI Shao-shao, LIU Fan, et al. Laser cladding device: China, 201710661517.9[P]. 2017-05-16.
- [12] 傅戈雁, 吉绍山, 刘凡, 等. 激光熔覆装置: 中国, 201710661537.6[P]. 2017-04-23.  
FU Ge-yan, JI Shao-shao, LIU Fan, et al. Laser cladding device: China, 201710661537.6[P]. 2017-04-23.
- [13] 罗曦, 陈培峰, 王英, 等. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1854-1856.  
LUO Xi, CHEN Pei-feng, WANG Ying, et al. Novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing[J]. Chinese journal of laser, 2008, 35(11): 1854-1856.
- [14] 雷定中, 石世宏, 傅戈雁. 宽带激光内送粉熔覆工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1-8.  
LEI Ding-zhong, SHI Shi-hong, FU Ge-yan. Research of hollow broadband laser cladding method[J]. Chinese journal of laser, 2015, 42(11): 1-8.
- [15] 胡赓祥, 蔡珣, 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 Xun, RONG Yong-hua. Fundamentals of materials science[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010: 256-318.
- [16] 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.
- [17] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 侧向送丝光纤激光单道熔覆层组织[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 85-88.  
LI Kai-bin, LI Dong, LIU Dong-yu, et al. Microstructure of lateral wire feeding fiber laser single pass cladding layer. Transactions of the china welding institution, 2014, 35(10): 85-88.
- [18] LIPPOLD J C, KOTECKI D J. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹译. 北京: 机械工业出版社, 2016, 7-153.  
LIPPOLD J C, KOTECKI D J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels[M]. CHEN Jian-hong translated. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016, 7-153.
- [19] 李亚江. 焊接冶金学: 材料的焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 113-149.  
LI Ya-jiang. Welding metallurgy: Weldability of materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 113-149.
- [20] 张凌峰, 熊毅, 张毅, 等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 226-229.  
ZHANG Ling-feng, XIONG Yi, ZHANG Yi, et al. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. Chinese journal of laser, 2011, 38(6): 226-229.