

曲面光斑面积变化模型及其对熔覆质量的影响

崔权维, 孙文磊, 黄勇

(新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: **目的** 建立一种计算曲面工件激光光斑面积变化的数学模型, 研究光斑面积在多大范围内变化对熔覆质量的影响最小。**方法** 采用高斯曲率的倒数作为曲率球的半径, 利用曲率球代替 NURBS 曲面微小单元, 通过圆柱体与球体相贯的数学分析方法求取截交面积, 进而推导出 NURBS 曲面光斑面积的数学模型, 采用 CATIA 软件作对比, 进行验证。**结果** 该数学模型得出的结果与 CATIA 计算的结果相对误差不超过 0.2%, 满足工程应用。对模型中影响光斑面积大小的三个因素(离焦量、光束姿态、曲率)进行分析表明, 影响光斑面积大小的最主要因素是光束姿态。在此基础上, 以 Q235 为母材, KF310 粉末为熔覆材料, 调整光束姿态分别以 0°、10°、20°、30°、40° 为入射角进行激光熔覆, 测试和分析得出, 在 0°、10°、20° 时, 单道熔覆层宽度随空间夹角及光斑面积的增大而增大, 熔覆高度随光斑面积增大而减小, 熔覆层与基体之间存在亮白色界面, 这是凝固初期界面处生长出的平面晶, 说明形成了冶金结合。而 30°、40° 时的单道熔覆层宽度变化不明显, 在熔覆道边缘出现粘粉现象, 冶金质量不高。**结论** 光斑面积变化在增加 8% 的范围内可以保证激光熔覆沉积层的质量, 通过该算法的应用可以满足激光再制造快速响应的要求。

关键词: 激光熔覆; 曲面; 光斑面积; 光束姿态; 熔覆质量; 数学模型; 曲率球

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0225-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.032

Surface Facula Area Changing Model and Its Effect on Quality of Laser Cladding

CUI Quan-wei, SUN Wen-lei, HUANG Yong

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a mathematical model to calculate the change of facula area on curved surface part and study the change range of facula area causing the least effect on the quality of the cladding. The inverse of the Gauss curvature was used as the radius of the curvature sphere and the curvature sphere was used to replace the microelement of the NURBS surface. The cross sectional area was calculated through the mathematical analysis method of the intersection of the cylinder and the sphere so as to derive the mathematical model for the area of the NURBS surface. Through the comparison, the relative error between the result of the mathematical model and the result of CATIA calculation was less than 0.2% and in conformity with the engineering application. Then, three factors (defocusing distance, laser beam attitude and curvature) in the model influencing

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-25

Received: 2018-05-07; **Revised:** 2018-06-25

基金项目: 新疆维吾尔自治区高技术研究发展项目 (201513102)

Fund: Supported by High Technology Research and Development Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (201513102)

作者简介: 崔权维 (1986—), 女, 博士, 主要研究方向为激光熔覆、再制造。

Biography: CUI Quan-wei (1986—), Female, Doctor, Research focus: laser cladding, remanufacturing.

通讯作者: 孙文磊 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为 CAD/CAM、制造业信息化技术。邮箱: sunwenxj@163.com

Corresponding author: SUN Wen-lei (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: CAD/CAM, manufacture information engineering. Email: sunwenxj@163.com

the size of light spot area were analyzed. Laser beam attitude was the main factor that influences the size of light spot area. On this basis, KF310 alloy powder was deposited on Q235 steel. The beam angle was adjusted for 0 degree, 10 degree, 20 degree, 30 degree and 40 degree angle respectively to test and analyze the microstructure, width and height of the cladding layer. It was concluded that, at 0 degree, 10 degree and 5 degree, the width of the single-channel cladding layer increased with the space angle and facula area; while the cladding height decreased with the increase of facula area. There was a bright white interface between the cladding layer and substrate. This was the plane crystal generated at the interface of the initial solidification. It meant that metallurgical bonding was formed; while, at 30 degree and 40 degree, the width of the single-channel cladding layer did not change apparently. There was powder stuck to the surface of the cladding layer edge. The metallurgical quality was poor. The light spot area within 8% increase can ensure the quality of laser cladding deposition layer. The application of this algorithm can meet the requirements of rapid response of laser remanufacturing.

KEY WORDS: laser cladding; curved surface; facula area; laser beam attitude; cladding quality; mathematical model; curvature sphere

对于曲面基材, 激光束在其上的入射角、投影光斑形状和面积都会随曲面位置发生变化, 激光输入的比能和能量密度处于时变非均匀状态。因此, 激光熔池的面积、能量分布、热传导、对流特征和重力作用都无法保持稳定。激光输出功率、光斑面积、激光束扫描速度以及送粉率是激光熔覆的 4 个主要工艺参数^[1-2]。刘杰等^[3]提出光斑面积增大会引起激光功率下降, 从而导致作用于工件表面的激光能量因素改变。当激光功率一定时, 光斑面积的大小决定了工件表面的功率密度。王振宝等^[4]提出光束质量依赖于激光束的总功率、光斑尺寸、功率密度时空分布等多种参数。王志坚等^[5]提出熔覆线的宽度是由激光光斑直径、激光功率、扫描速度和送粉量决定的。李建忠等^[6]提出熔覆成形质量除受基材材质、颜色及粗糙度等影响外, 更受激光功率、扫描速度、光斑直径、离焦量及有无保护气体等多种工艺因素影响。周斌等^[7]提出熔覆层的层高主要受扫描速度、激光功率、离焦量以及送粉量的影响。在曲面上控制光斑面积, 从而稳定激光能量, 是解决曲面激光熔覆的首要问题。然而, 激光修复曲面中, 对光斑面积数值计算的相关研究较少, 目前关于自由曲面激光熔覆问题的研究, 大多采用 NURBS 方法来重构再制造零件的曲面表面, 但激光在 NURBS 曲面上形成的光斑形状和面积, 需用参数曲面(基材表面)和隐式代数曲面(激光束)进行求交运算^[8-11]。此算法效率不高, 无法满足再制造快速响应的要求^[12]。因此, 设计一种快速、高效的光斑面积算法有重要工程意义^[13]。笔者通过建立光斑面积变化的数学模型, 分析影响光斑面积变化的主要因素, 从而控制该因素改变光斑面积的大小, 进而对曲面工件的熔覆质量进行分析。

1 曲面光斑面积求解建模方法

采用大量小的面来估计曲面的主曲率和主要方向^[14], 将复杂的非线性计算过程转化成为线性的思

路, 提出用代数曲面在微小局部近似代替 NURBS 曲面, 用两代数曲面求交方式来计算光斑的面积。此算法在复杂程度上得到极大简化。该方法采用高斯曲率的倒数作为曲率球的半径, 利用曲率球代替 NURBS 曲面微小单元, 通过圆柱体与球体相贯的数学分析方法求取截交面积, 进而推导出 NURBS 曲面光斑面积的数学模型。

如图 1 所示, NURBS 曲面上有一点 M 。求 M 点处的曲面高斯曲率 k_m 及法向矢量 MO 。在法矢上(或反向)截取线段 MO 。线段长 $\overline{MO} = \frac{1}{k_m}$, 以 O 为圆心, $\frac{1}{k_m}$ 为半径做曲率球 O 与 NURBS 曲面在 M 点处接触。利用高斯曲率球 O 在 M 点周围微小局部区域内近似代替 NURBS 曲面。

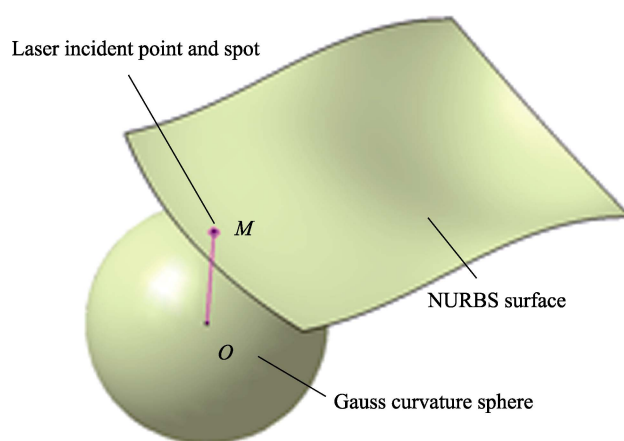


图 1 NURBS 曲面及在某点的高斯曲率球
Fig.1 NURBS surface and gauss curvature sphere at some point

根据微分几何的知识, 通过利用第一基本形式与第二基本形式的系数, 平均曲率表示为: E 、 F 、 G 是第一基本形式的系数, L 、 M 、 N 为第二基本形式的系数。其中:

$$L = \vec{n} \cdot \vec{r}_{uu} = \frac{(\vec{r}_u, \vec{r}_v, \vec{r}_{uv})}{\sqrt{EG - F^2}} \quad (1)$$

$$M = \vec{n} \cdot \vec{r}_{uv} = \frac{(\vec{r}_u, \vec{r}_v, \vec{r}_{uv})}{\sqrt{EG - F^2}}$$

$$N = \vec{n} \cdot \vec{r}_{vv} = \frac{(\vec{r}_u, \vec{r}_v, \vec{r}_{vv})}{\sqrt{EG - F^2}}$$

高斯曲率为:

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (2)$$

光束以任意姿态入射曲面^[15], 如图 2 所示。建立半径为 R 的半球:

$$R = \left(\frac{1}{k_{\max} \times k_{\min}} \right) \quad (3)$$

式中, k_{\max} 、 k_{\min} 代表主曲率。由曲面理论得:

$$S = \iint_{D_{xy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - (x-a)^2 - y^2}} dx dy \quad (4)$$

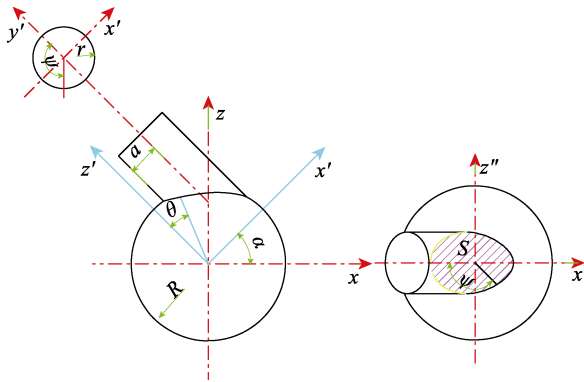


图 2 任意方向圆柱与球体相贯
Fig.2 Intersection of the column at any direction and the sphere

激光束与曲面法向矢量夹角 (后文称空间夹角) 为 θ , 参数 a 在激光入射点处的高斯曲率球中求出, 其公式为:

$$a = R \sin \theta \quad (5)$$

如图 3 所示, jn 为入射光束, on 为沿曲面法向

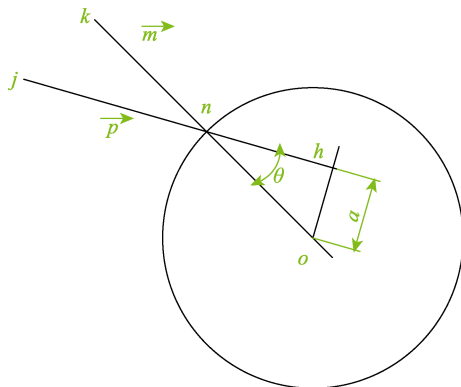


图 3 激光束与球面法矢相交示意图
Fig.3 Intersection diagram of laser beam and spherical normal vector

矢量 $n(u, v)$ 的线段, 距离为球面半径 R 。 θ 为矢量 jn 与 kn 之间的夹角。做 o 点到直线 jh 的垂线, 垂足为 h , r 代表圆柱半径。设曲面法向矢量 $n(u, v)$ 的坐标形式为 $n(u, v) = \{n_x, n_y, n_z\}$, 光束轴向矢量为 $p(u, v) = \{p_x, p_y, p_z\}$, 根据矢量数量积公式:

$$\cos \theta = \frac{n_x p_x + n_y p_y + n_z p_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}} \quad (6)$$

公式 (4) 通过极坐标转换得到求解公式:

$$s = \iint_{D_{xy}} \frac{R}{\sqrt{R^2 - (x-a)^2 - y^2}} dx dy = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^b \frac{Rr}{\sqrt{R^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \theta}} dr \quad (7)$$

实际激光加工时 $\theta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$, $\sin \theta = \sqrt{1 - (\cos \theta)^2}$ 。

采用复合辛普森公式将两步积分的上下限 $[0, 2\pi]$ 和 $[0, b]$ 分成 M 和 N 份, 设 $f(\theta, r) = \frac{Rr}{\sqrt{R^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \theta}}$ 。应用复合辛普森公式, 第一步积分为:

$$\int_0^b \frac{Rr}{\sqrt{R^2 - a^2 - r^2 + 2ar \cos \theta}} dr = \left\{ \frac{h}{3} (f(\theta, 0) + 4 \sum_{i=1}^n f(\theta, r_{2i-1}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(\theta, r_{2i}) + f(\theta, b)) \right\} \quad (8)$$

从而得到:

$$s = \frac{h}{3} \left\{ \int_0^{2\pi} f(\theta, 0) + 4 \sum_{i=1}^n \int_0^{2\pi} f(\theta, r_{2i-1}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \int_0^{2\pi} f(\theta, r_{2i}) + \int_0^{2\pi} f(\theta, b) \right\} \quad (9)$$

依次对公式里的积分项应用辛普森公式:

$$\int_0^{2\pi} f(\theta, 0) = \frac{h}{3} \left\{ f(0, 0) + 4 \sum_{j=1}^m f(\theta_{2j-1}, 0) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(\theta_{2j}, 0) + f(2\pi, 0) \right\} \quad (10)$$

$$\int_0^{2\pi} f(\theta, r_{2i-1}) = \frac{h}{3} \left\{ f(0, r_{2i-1}) + 4 \sum_{j=1}^m f(\theta_{2j-1}, r_{2i-1}) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(\theta_{2j}, r_{2i-1}) + f(2\pi, r_{2i-1}) \right\} \quad (11)$$

$$\int_0^{2\pi} f(\theta, r_{2i}) = \frac{h}{3} \left\{ f(0, r_{2i}) + 4 \sum_{j=1}^m f(\theta_{2j-1}, r_{2i}) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(\theta_{2j}, r_{2i}) + f(2\pi, r_{2i}) \right\} \quad (12)$$

$$\int_0^{2\pi} f(\theta, b) = \frac{h}{3} \left\{ f(0, 2\pi) + 4 \sum_{j=1}^m f(\theta_{2j-1}, 2\pi) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} f(\theta_{2j}, 2\pi) + f(2\pi, b) \right\} \quad (13)$$

将 (10)、(11)、(12)、(13) 式代入 (9) 式

中就可以计算任意姿态光束入射曲面时光斑的面积。

利用 CATIA 软件的面积计算功能与近似计算模型进行对比,验证高斯曲率球代替 NURBS 曲面的求解模型的可行性。在 CATIA 软件中建立实体,实体上表面是 NURBS 曲面,如图 4 所示。无数个圆柱体代替激光束,白色圆圈为激光束在曲面上的投影,通过相贯截取曲面的交面,该交面即为光斑面积,通过 CATIA 软件计算此面积。

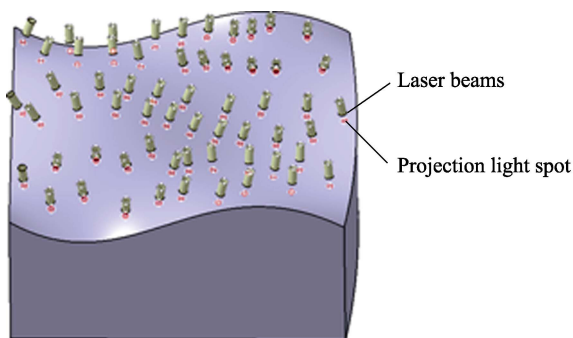


图 4 CATIA 中曲面与圆柱截交
Fig.4 Intersection of surface and cylinder in CATIA

通过计算得出求解模型的光斑面积,如图 5 所示。图中列出了不同曲率、法矢、空间夹角的各个点的面积结果。经数据分析,求解模型得出的结果与 CATIA 计算的结果相对误差不超过 0.2%,满足工程应用。因此,该模型的计算方法可行。

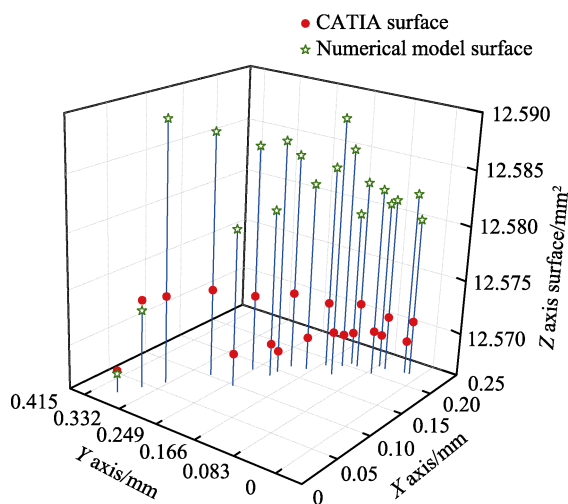


图 5 求解模型与 CATIA 软件计算结果对比
Fig.5 Comparison of model and CATIA software results

2 激光熔覆曲面光斑面积变化的影响因素分析

从模型中可以分析出影响光斑面积大小的因素,包括光束半径 r (离焦量因素)、激光入射点处光束轴线矢量与曲面法向矢量之间的空间夹角 θ (光束姿态因素)、近似替代 NURBS 曲面的高斯曲率球的半

径 R (即曲面高斯曲率的倒数,曲率因素)。为了研究曲面上光斑面积的变化规律,分别对这三个因素进行分析。

2.1 离焦量对光斑面积的影响

针对不同设备,离焦量允许变化的范围不同。本实验采用的设备允许的离焦量变化范围在 0~32 mm,不同离焦量对应的光斑面积变化如图 6 所示。经数据分析,光斑半径从 1.148 mm 变化至 1.622 mm,符合光束聚焦特性和锐利长度的定义。光斑初始面积为 4.140 mm²、离焦量为 5 mm 时,光斑面积增加 2%,这个增量几乎不会对熔覆质量产生影响。因此,设定离焦量的变化范围为 0~5 mm,该范围内,离焦量的变化对光斑面积的影响可忽略。

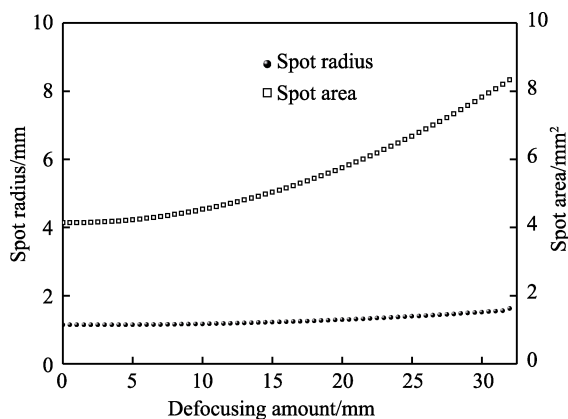


图 6 离焦量与光斑半径和光斑面积的关系
Fig.6 Relationship between the defocusing amount and the spot radius and the spot area

2.2 光束姿态因素对光斑面积的影响

不计离焦量的影响,即光束半径 r 为常量。根据 (4) 式, θ 角和高斯曲率球半径 R 决定了参量 a 。针对上述考虑设计试验,设空间夹角 θ 为函数自变量,曲率半径 R 为常量,将用近似计算模型得出的光斑面积作为因变量, r 为 2 mm,试验中 R 分别取值 3、5、7、9、11、13 mm,以计算相应的光斑面积,空间夹角分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1 rad。由图 7 可知,随着空间夹角变大,光斑面积变化幅度很大。当高斯曲率半径为 13 mm、空间夹角为 0 rad 时,光斑面积为 12.642 mm²;而空间夹角为 1 rad 时,光斑面积为初始位置的两倍多,达到 27.269 mm²;空间夹角在 0.2~1 rad 之间、高斯曲率半径在 3~11 mm 之间时,数据出现缺失现象。原因在于,当光斑面积大于曲率球的截交区域时,光斑的投影区域在曲率球外侧,导致求解失效。因此,使用上述近似计算模型时要先进行曲面曲率评估,再进行求解计算。

2.3 曲率因素对光斑面积的影响

图 8 为 NURBS 曲面对光斑面积的影响分析。可以

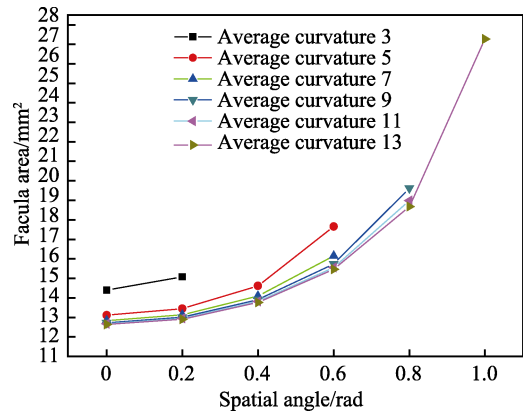


图 7 空间夹角对光斑面积的影响
Fig.7 Influence of space angle on the area of facula area

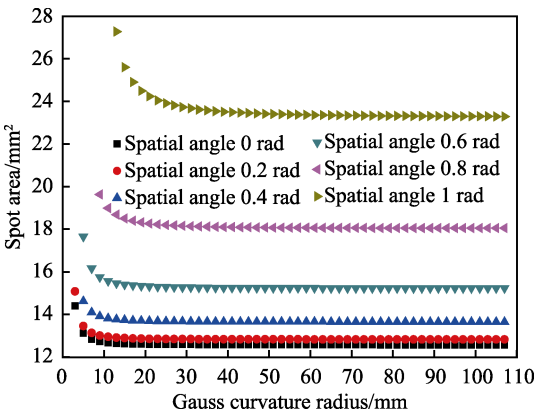


图 8 高斯曲率球的半径 R 对光斑面积的影响
Fig.8 Influence of the radius R of the gauss curvature sphere on the facula area

看出，高斯曲率半径要大于光束半径，因此最小值定为 3 mm。通过计算发现当 R 为 107 mm 时，光斑面积接近平面光斑面积，从而失去研究价值。而当高斯曲

率半径大于 15 mm 时，光斑面积变化幅度变小并接近直线；高斯曲率半径在 3~15 mm 之间变化时，夹角为 0 rad。高斯曲率半径为 3 mm，光斑面积为 14.4 mm²，高斯曲率半径为 15 mm，光斑面积为 12.623 mm²，面积减少 1.877 mm²。由此可得出，影响光斑面积变化的最主要因素是激光入射点处光束轴线矢量和曲面法向矢量之间的空间夹角 θ ，即光束姿态。

3 光斑面积变化对熔覆质量的影响

3.1 试验方法

试验系统由 IPG 光纤激光器、KUKA 机器人、伺服旋转工作台、负压式气载送粉系统组成。激光聚焦点(PLFDH0125)使用抛物聚焦镜, 焦距 $f=300$ mm, 焦点光斑直径为 4 mm，配置侧向送粉喷嘴及调整机构，载气与保护气为氩气，零件基材为 Q235，采用 KF310 铁基自熔性合金粉末。

基材在伺服旋转工作台上倾斜装夹，激光熔池处的法矢与重力并不垂直，激光熔池受力动态变化。试验过程中功率不变，采用面积变化的光斑进行单道熔覆。改变空间夹角进行试验，空间夹角为 0°、10°、20°、30°、40°，试验过程如图 9 所示。通过改变不同入射角得到的光斑形状变化如图 10 所示。在离焦量不变的情况下改变空间夹角得到的光斑面积的数据如表 1 所示。

表 1 入射角度对应光斑面积					
Tab.1 Area of incident angle corresponding to spot					
Angle/(°)	0	10	20	30	40
Spot area/mm ²	12.5664	12.7602	13.3729	14.5104	16.4042

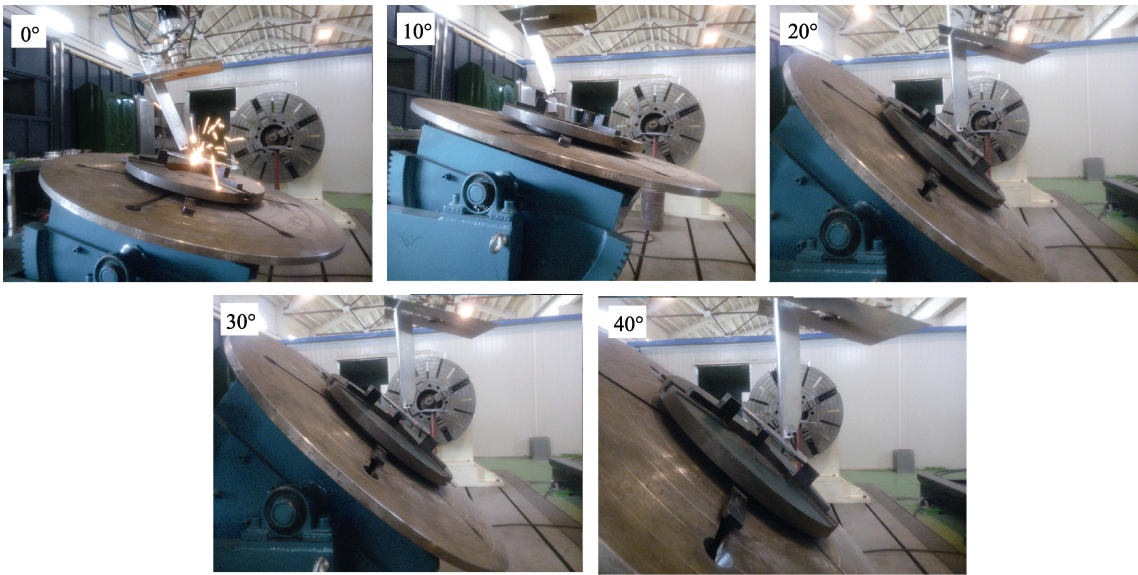


图 9 不同入射角度熔覆试验
Fig.9 Cladding test at different incident angles

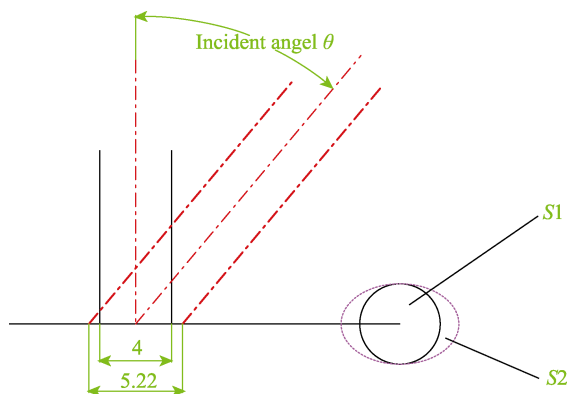


图10 光束姿态变化后光斑的变化

Fig.10 Change of light spot after the change of beam attitude

3.2 试验分析

图11为不同光束姿态(0°、10°、20°、30°、40°)下所得熔覆层的宏观形貌。宏观分析表明,在0°、10°、

20°时,单道熔覆层宽度随空间夹角及光斑面积的增大而增大;而30°、40°时的单道熔覆层宽度变化不明显。30°入射角试验件在熔覆道边缘出现粘粉现象(球形未熔化颗粒);而40°入射角试验件粘粉现象加剧。通过QuantaFEG 250电镜对熔覆件进行微观分析。使用线切割机切割试件,经过打磨、抛光和腐蚀,腐蚀溶液为20%(质量分数)的FeCl₃溶液,腐蚀时间10 min。在低倍镜下获得单道熔覆层的截面轮廓,利用CAD软件将高度、宽度标出,尺寸结果如图12所示。通过测量得出,单道激光熔覆高度随光斑面积增大而减小。如图13所示,入射角度为0°、10°、20°的熔覆层与基体之间存在亮白色界面,这是凝固初期界面处生长出的平面晶,说明形成了冶金结合^[16-18]。而30°样件的电镜照片显示结合区的亮白层平面晶并不明显,只存在于局部区域。40°样件的电镜照片未发现平面晶,说明冶金质量不高。另外30°和40°样件的缺陷数量也较多。

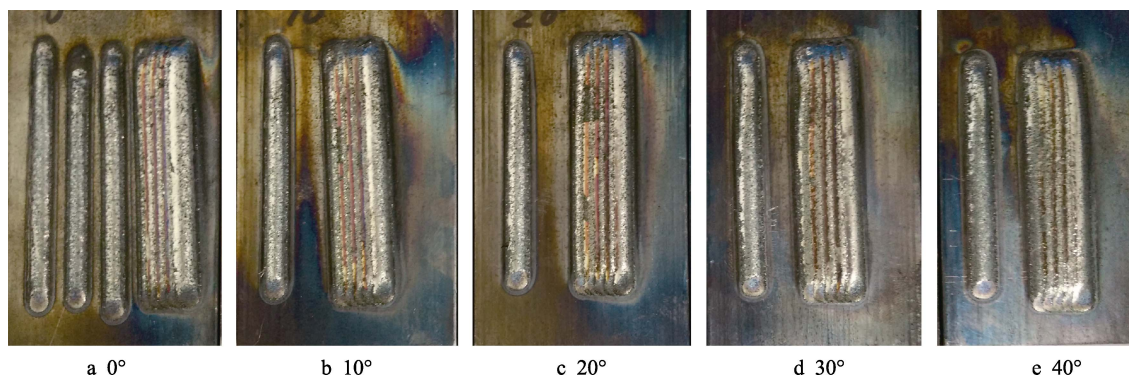


图11 激光熔覆试验结果

Fig.11 Laser cladding test results

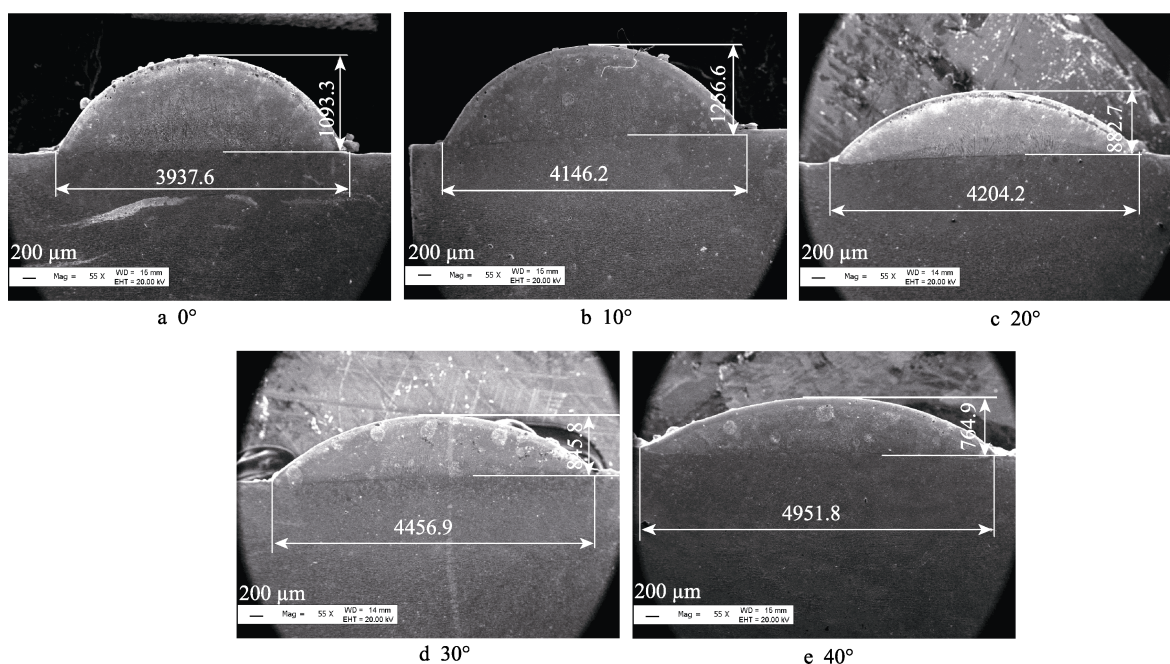


图12 单道试样截面尺寸

Fig.12 Section size of single test sample

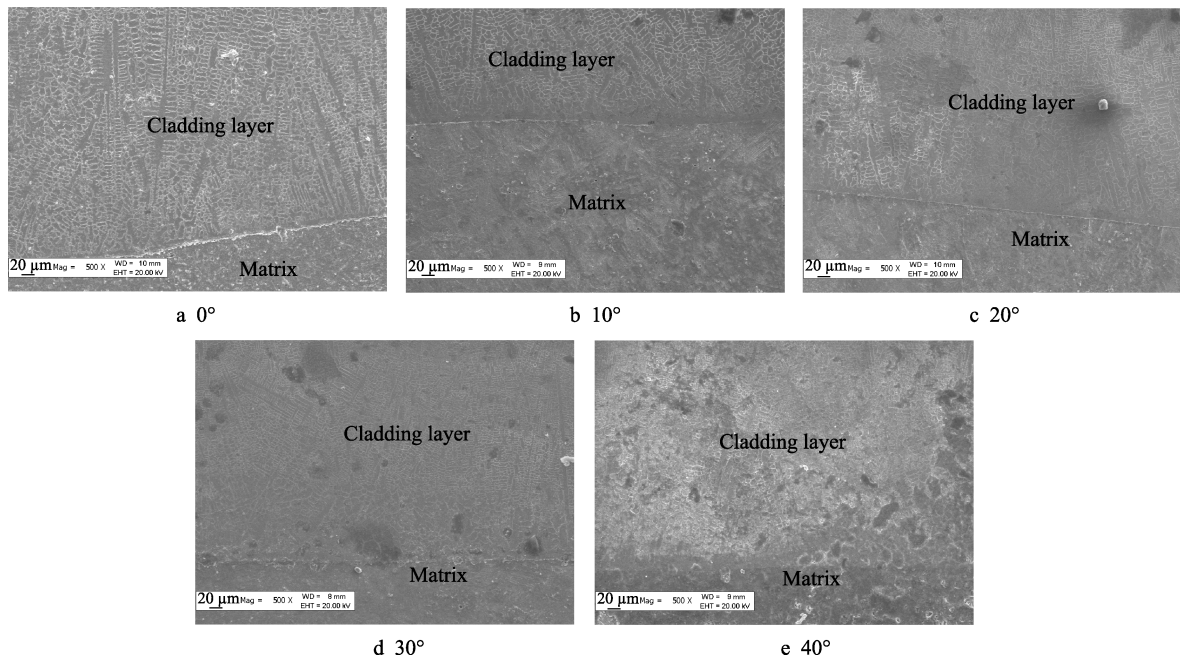


图 13 试样结合界面区域电镜照片
Fig.13 Microscopy of combination interface

图 14 显示 40°样件熔覆层边缘与基材结合的区域。可以发现, 熔覆层边缘与基材未能完全结合, 出现翘曲现象。另外还能观察到粘粉现象(球状粉末粒子)。说明光斑边缘的能量密度严重下降。

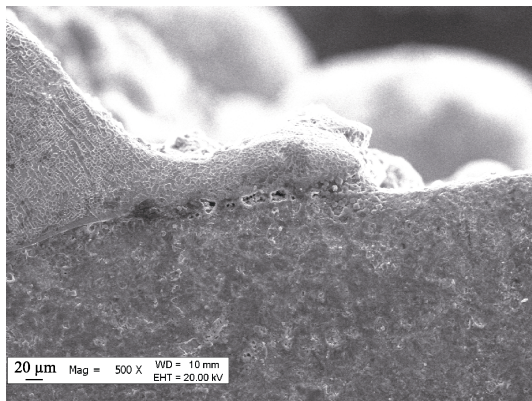


图 14 单道熔覆层最边缘电镜照片
Fig.14 Microscopy of the most marginal electron of single cladding layer

从以上试验得到结论, 当激光光斑面积从 12.5664 mm^2 变化至 13.3729 mm^2 时, 能够保证激光熔覆沉积层质量, 此时光斑面积增加了大约 8% 左右。

4 结论

1) 提出用代数曲面在微小局部近似代替 NURBS 曲面, 用两代数曲面求交方式来计算光斑的面积。此算法在复杂程度上得到极大简化, 并通过与 CATIA 软件作对比, 验证了计算模型的可行性。通过设计数值模拟实验分析影响光斑面积大小的三个因素, 确定

了该数学模型的使用范围。使用近似计算模型时要先进行曲面曲率评估, 再进行求解计算, 进而分析出影响光斑面积的主要因素: 激光入射点处光束轴线矢量和曲面法向矢量之间的空间夹角 θ , 即光束姿态。

2) 通过改变空间夹角 (0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40°) 改变光斑面积大小, 对基材进行单道熔覆实验。从微观和宏观进行分析得出, 随着空间夹角增大, 熔覆质量变差。通过对熔覆质量的定量分析得到, 工程中光斑面积大小在增加 8% 的范围内变化, 对熔覆质量的影响很小, 可以保证熔覆沉积层质量。

参考文献:

- [1] 张志强, 程宗辉, 曹强, 等. 30CrMnSiNi2A 超强钢激光熔覆修复试验研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 62-67.
ZHANG Zhi-qiang, CHENG Zong-hui, CAO Qiang, et al. Repairing of 30CrMnSiNi2A high strength steel by laser cladding[J]. Equipment enviromental engineering, 2016, 13(1): 62-67.
- [2] 叶四友, 刘建永, 杨伟. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 48-53.
YE Si-you, LIU Jian-yong, YANG Wei. Microstructure and properties of laser cladded 316L stainless steel layer [J]. Surface technology, 2018, 47(3): 48-53.
- [3] 刘杰, 孙胜, 管延锦. 激光偏振特性在微尺度工件激光弯曲成形中的作用[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 96-100.
LIU Jie, SUN Sheng, GUAN Yan-jin. Experimental study on laser polarization properties in laser micro-bending processes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 96-100.

- [4] 王振宝, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 近红外激光光斑功率密度时空分布探测器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 935-938.
WANG Zhen-bao, FENG Guo-bin, YANG Peng-ling, et al. Detector array for measuring spatio temporal distribution of near infrared laser power density[J]. Infrared and laser engineering, 2011, 40(5): 935-938.
- [5] 王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 315-319.
WANG Zhi-jian, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, et al. Effect of laser cladding processing parameters on metal forming efficiency and geometry[J]. Infrared and laser engineering, 2010, 39(2): 315-319.
- [6] 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 Jian-zhong, LI Xiang-feng, ZUO Dun-wen, 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.
- [7] 周斌, 石世宏, 邓志强, 等. 基于中空激光光内送粉技术的扇形结构件激光成形研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 1-6.
ZHOU Bin, SHI Shi-hong, Deng Zhi-qiang, et al. Laser cladding forming of fan-shaped part based on hollow laser beam inside powder feeding technology[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(9): 1-6.
- [8] 余正生, 彭群生, 马利庄. 一种参数曲面与隐式曲面的求交算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(2): 97-99.
YU Zheng-sheng, PENG Qun-sheng, MA Li-zhuang. An algorithm for intersection between parametric surface and implicit surface[J]. Journal of computer-aided design & computer graphics, 1999, 11(2): 97-99.
- [9] BARNHILL R E, KERSEY S N. A marching method for parametric surface/surface intersection[J]. Computer aided geometric design, 1990, 7(1): 257-280.
- [10] 王川, 赵成璧, 唐友宏, 等. 一种改进的 NURBS 曲面和隐式曲面求交算法及在船体曲面求交中的应用[J]. 中国造船, 2013(3): 43-49.
WANG Chuan, ZHAO Cheng-bi, TANG You-hong, et al. An improved algorithm for the intersection of NURBS surface and implicit surface and its application to hull surface intersection[J]. Shipbuilding of China, 2013(3): 43-49.
- [11] 张明霞, 纪卓尚, 林焰. NURBS 曲面与隐式曲面求交的计算机实现及应用[J]. 中国造船, 2002, 43(3): 94-98.
ZHANG Ming-xia, JI Zhuo-shang, LIN Yan. Implementation and application of intersection between NURBS-Based surface and implicit surface[J]. Shipbuilding of China, 2002, 43(3): 94-98.
- [12] PARK H. An Approximate lofting approach for B-spline surface fitting to functional surfaces[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2001, 18(7): 474-482.
- [13] 刘金朵, 孙文磊, 黄勇, 等. 曲面零件激光熔覆轨迹的快速算法与自动生成[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 223-228.
LIU Jin-duo, SUN Wen-lei, HUANG Yong, et al. Fast algorithm and auto generation for laser cladding trajectory on curved surface parts[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 223-228.
- [14] BATAGELO H C, WU S T. Estimating curvatures and their derivatives on meshes of arbitrary topology from sampling directions[J]. Visual computer, 2007, 23(9-11): 803-812.
- [15] 肖读春. 用矩阵求解球与圆柱的相贯线[J]. 成都信息工程学院学报, 1987(1): 90-99.
XIAO Du-chun. Solving the intersecting line of a sphere and a cylinder by matrix[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 1987(1): 90-99.
- [16] 黄勇, 孙文磊, 陈影, 等. 曲面塑料模具激光熔覆再制造快速加工路径生成方法[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 150-158.
HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying, et al. Rapid processing path generation method for curved surface plastic mold remanufacturing by laser cladding[J]. China surface engineering, 2017, 30(5): 150-158.
- [17] 陈影, 孙文磊, 黄勇, 等. 激光熔覆曲面零件再制造的机器人路径规划[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 79-88.
CHEN Ying, SUN Wen-lei, HUANG Yong, et al. Robot path planning of laser cladding and remanufacturing of curved surface parts[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(5): 79-88.
- [18] 黄勇, 孙文磊, 陈影. 激光熔覆再制造复杂轴类零件的轨迹规划[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 1-7.
HUANG Yong, SUN Wen-lei, CHEN Ying. Trajectory planning of laser cladding remanufacturing for complex shaft shaped part[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(5): 1-7.