

激光熔覆单道沉积轨迹横截面形貌变化规律研究

高士友 李健 李臣光 周野飞

(燕山大学机械学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 通过进行工艺参数(激光功率、扫描速度和送粉速率)可控的单道激光熔覆实验,观察了沉积轨迹横截面形貌的变化;提出了单一参数(δ 参数, $\delta = \omega \tan \beta / 2h$)控制的横截面形貌曲线方程。根据横截面几何特征参数:沉积轨迹宽度 w 、高度 h 、面积 F 和沉积角 β 的测量数据,用回归处理方法,给出了 δ 参数与横截面名义面积 F_m ($F_m = \omega h$)之间的函数关系,得到了横截面形貌随 F_m 的变化规律;同时用 F 和 β 的测量数据验证了横截面形貌曲线方程。

关键词 材料;激光熔覆;沉积轨迹横截面形貌;变化规律;几何特征;实验测量

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0503010

Research on the Variation Regularity of Single Laser Tracks Cross-Section Morphology During Laser Cladding

Gao Shiyu Li Jian Li Chenguang Zhou Yefei

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The tracks cross-section morphological variation of single laser with the controllable processing parameters, such as laser power, scanning speed, and powder mass flow rate, is observed by means of the single laser cladding experiment. A curvilinear equation describing cross-section morphology controlled by a single parameter ($\delta = \omega \tan \beta / 2h$) is proposed. According to the measurement data of cross-section geometrical characteristic parameters: width w , height h , area F and deposition angle β , the functional relationship between the parameter δ and the nominal area F_m ($F_m = \omega h$) of the cross-section is established by applying the regression processing method. And the regularity of cross-section morphology is determined with the variation of F_m . The curvilinear equation of cross-section morphology is testified by the measurement data of F and β .

Key words materials; laser cladding; tracks cross-section morphology; variation regularity; geometrical characteristics; experimental measurement

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 240.6700; 350.3390

1 引言

激光熔覆是一个极其复杂的物理冶金过程,目前人们还未能深刻揭示其本质,没有建立完整、系统的量化理论来指导工艺实施和熔覆层质量预测及评估。因此,迫切需要建立工艺结果与工艺参数之间的解析表达式,以解释激光熔覆的复杂过程,揭示工艺参数和工艺结果之间的内在规律。单道沉积轨迹的几何模型研究是控制熔覆层形状的基础,建立工艺参数与结构尺寸和重量的定量对应关系,可以为选择工艺参数和精确控制沉积结构形状提供重要依据。激光熔覆工艺中,单道沉积轨迹形状的准确控制对于

精确控制沉积过程至关重要,而且单道和多道沉积轨迹横截面形貌预测可以指导激光熔覆工艺,为激光熔覆工艺过程的数值仿真建模提供理论基础。

张庆茂等^[1,2]研究了工艺参数对单道沉积轨迹横截面形貌的影响,检测了横截面的高度 h 、宽度 w 和沉积角 β 。其研究表明,随激光作用能量密度和作用时间的增加,横截面积呈线性规律增加,且 w 增加, β 增大,而且这种现象随送粉速率的增加更加显著。J. del Val等^[3]研究了Yb:YAG单模光纤激光和Nd:YAG激光侧向送粉激光熔覆时,在不同激光功率和扫描速度下, w 和 h 的变化,结果显示 w 和

收稿日期: 2012-01-07; 收到修改稿日期: 2012-01-29

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX04003-032)和国家自然科学基金(50871022)资助课题。

作者简介: 高士友(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光熔覆、激光直接沉积、激光切割技术和塑性成形工艺理论等方面的研究。E-mail: gao58@sina.com

h 分别与激光功率和扫描速度存在线性关系。王志坚等^[4]在测量单道沉积轨迹横截面图像基础上,对沉积轨迹几何特征进行三维表征,提出了横截面形貌曲线可以用一段圆弧模拟。黄小伟等^[5]研究了单道沉积轨迹形貌和工艺参数组合的影响规律。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横截面形状特征参数的线性关系。Ni 等^[6]运用 BP 神经网络建立熔覆道特征(w 和 h)与熔覆工艺参数之间的预测模型。Zhou 等^[7]提出一个预测 h 的模型,模型中假设横截面近似为半椭圆。Hofman 等^[8,9]以单道沉积轨迹高度、宽度、面积和稀释区面积为横截面几何特征量,提出一个决定单道沉积轨迹几何形貌的模型,使用该模型分析了可观测熔池特征与稀释率之间的关系。Santhanakrishnan 等^[10]使用二极管激光器进行单道激光熔覆,给定送粉速率,改变功率和扫描速度产生了不同横截面形貌的沉积轨迹,在大部分参数下横截面形貌具有中心下凹,边缘上凸的特征。Huang 等^[11]在基于激光-感应混合粉末熔覆的稀释区实验研究中,采用二次代数曲线描述单道沉积轨迹横截面形貌的几何模型,计算横截面积。Cheikh 等^[12]在研究单道沉积轨迹横截面几何特征(宽度、高度、面积和穿透深度)与工艺参数之间的解析关系时,采用两种模型来预测横截面形貌和几何特征:第一种是假设送粉喷嘴内的粉末分布控制横截面的几何形状,建立了解析模型,第二种是假设横截面形貌为盘状;以第二种模型建立了盘状半径和中心与工艺参数之间的解析关系。Onwubolu 等^[13]使用响应面法和分散搜索优化技术研究横截面形貌的预测。

目前大部分研究人员均采用二次曲线描述单道沉积轨迹横截面形貌曲线,缺乏对横截面形貌变化

的全面观察以及对变化规律的研究。本文对不同工艺参数下的单道沉积轨迹横截面形貌进行系统的实验研究,建立了新的横截面形貌几何模型,分析横截面形貌的变化规律,为建立系统的工艺分析理论、指导工艺实施、熔覆层质量预测和评估奠定基础。

2 单道沉积轨迹横截面形貌的实验观察

单道沉积轨迹横截面形貌与熔池动力学特性及凝固条件相关,而这些工艺条件取决于激光特性、光斑形状尺寸,以及基板和熔覆材料、熔覆工艺参数、熔覆条件(基板的散热能力、熔池周围的散热条件和基板表面状态等)。

为了观察单道沉积轨迹横截面形貌的变化规律,使用粒度为-100~+325 目的 316L 不锈钢气雾化粉末作为熔覆材料,基板是 30 mm×30 mm×3 mm 的 Q235 钢。以准确可控的工艺条件参数为变量:激光功率 P 、扫描速度 V 、送粉速率 S ,选择常用的参数变化范围($P=900、1100、1300、1500、1700$ W; $V=3.0、4.0、5.0$ mm/s; $S=3.0、4.0、5.0$ L/min),进行单道熔覆实验。使用 2000 W 的 CO₂ 横流激光熔覆系统,该系统配备四轴数控系统,控制光路沿 y 轴、 z 轴运动,基板沿 x 轴运动;使用 DPSF-2 型双筒载气送粉器和侧向送粉头,喷嘴直径为 1.5 mm,送粉精度通过标定载气流量和载粉转盘转速与单位时间喷粉重量来保证。焦距为 300 mm,负离焦量为 4 mm,无送粉条件下基板上熔化的圆光斑直径为 2.8 mm。将 316L 不锈钢粉末进行真空烘干处理,基板表面经过砂纸除锈,再用丙酮清洗干净;在每组参数下熔覆长度为 30 mm 的沉积轨迹,使用线切割方法沿沉积轨迹横断面切开,对沉积轨迹横断面进行腐蚀,显示出包括稀释区的沉积轨迹横截面形貌。图 1 为工具显微镜下, S 和 V 取不同值时的横截面形貌(仅给出 $P=1300$ W 的实验结果)。

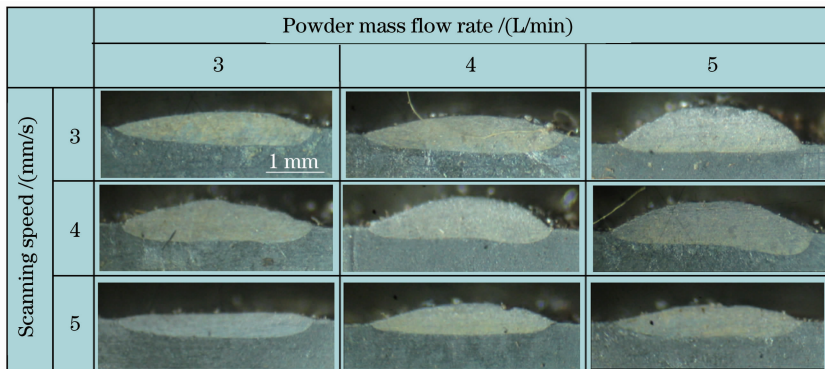


图 1 不同 S 和 V 时沉积轨迹横截面形貌($P=1300$ W)

Fig. 1 Tracks cross-section morphology of different S and V ($P=1300$ W)

以沉积轨迹与基板实现冶金结合为条件,出现二种横截面形状明显不同的典型沉积轨迹如图 2 所示。

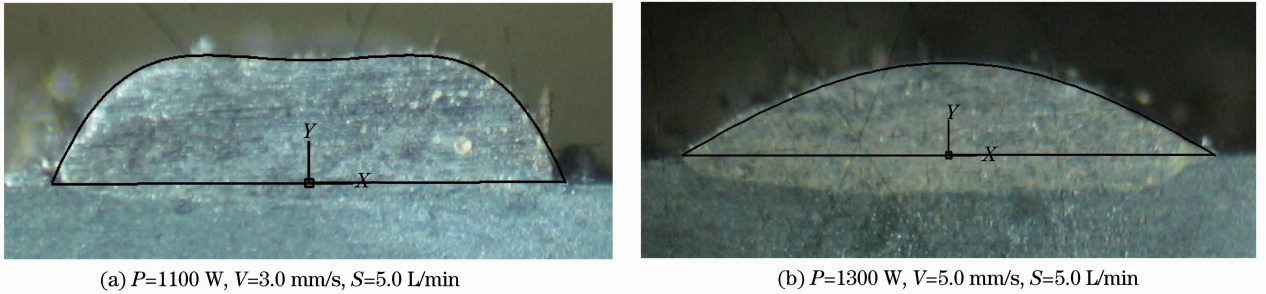


图 2 典型的横截面形貌

Fig. 2 Typical cross-section morphology

3 单道沉积轨迹横截面形貌几何形状描述

单道沉积轨迹横截面几何特征分别由高度 h 、宽度 w 和沉积角 β 表示。用工具显微镜提取横截面形貌图像,将图像以光栅图像格式 1:1 比例导入

AutoCAD 软件,在形貌轮廓线上标记 18~20 个点,模拟出形貌曲线,然后在形貌曲线上测量各几何特征参数,同时测出沉积层横截面积 F 。图 3 是实验结果中任选一组工艺参数下横截面几何特征参数测量示意图。

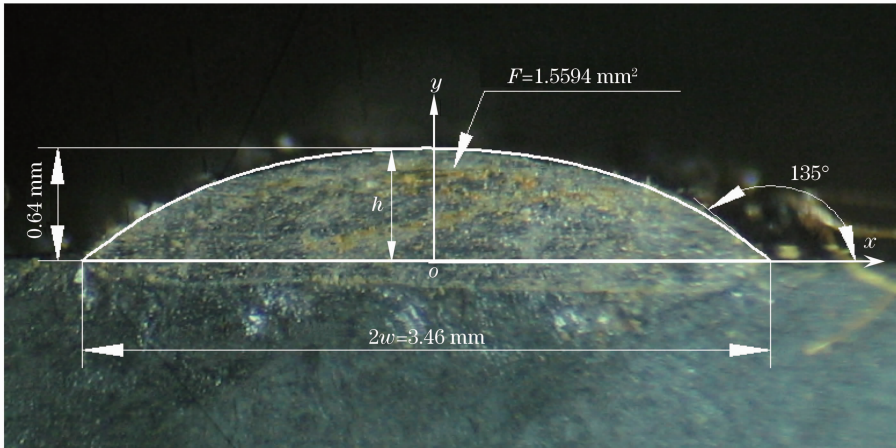


图 3 几何特征参数测量示意图($P=1500$ W, $V=4.0$ mm/s, $S=3.0$ L/min)

Fig. 3 Schematic diagram of measurement for geometrical characteristic parameters ($P=1500$ W, $V=4.0$ mm/s, $S=3.0$ L/min)

根据图 3 显示的横截面形貌的几何特征,可以将实验结果中横截面上表面形状曲线分为两类:上凸曲线和中心下凹、边缘上凸曲线。以横截面形貌的几何对称中心为纵坐标 y 轴,以沉积层与基板的界面为横坐标 x 轴(如图 3 所示),并且如图 3 所示,定义高度 h 、宽度 w 和沉积角 β 。由于图 2(a)中显示的形状曲线上存在拐点,拐点位置随工艺参数不同而变化,所以不能用二次代数方程描述。从图 3 中可以看出形状曲线满足以下条件,当 $x=0, y=h$ 时, $y'=0$; 当 $x=w, y=0$ 时, $y'=-\tan\beta$; 当 $x=-w, y=0$ 时, $y'=\tan\beta$ 。根据这些条件,可以选择四次代数方程描述图 2(a)和图 2(b)中显示的形状曲线(三次代数方程不满足横截面形貌的对称性),

称为单道沉积轨迹形貌曲线,即:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e. \quad (1)$$

将边界条件代入(1)式,得

$$y = \left(h - \frac{w \tan \beta}{2}\right) \frac{x^4}{w^4} + \left(\frac{w \tan \beta}{2} - 2h\right) \frac{x^2}{w^2} + h, \quad (2)$$

设 $x_w = \frac{x}{w}, y_h = \frac{y}{h}, \delta = \frac{w \tan \beta}{2h}$, (2)式变为

$$y_h = (1 - \delta)x_w^4 + (\delta - 2)x_w^2 + 1, \quad (3)$$

(2)式的二阶导数为

$$y'' = (1 - \delta) \frac{12hx^2}{w^4} + (\delta - 2) \frac{2h}{w^2}. \quad (4)$$

由(3)式可以得出当 δ 参数变化时的形貌曲线

(如图 4 所示)。从图 4 中可以看出随着 δ 数值的增大,形貌曲线的凸凹方向发生变化。根据(4)式,当 $x = 0$ 时, $y'' = (\delta - 2) \frac{2h}{w^2}$; 当 $x = w$ 时, $y'' = (3 - 5\delta) \frac{2h}{w^2}$; 当 $y'' = 0$, 且 $\delta \neq 1$ 时, 拐点坐标 $x_{y''=0} = \sqrt{\frac{2-\delta}{6(1-\delta)}}$; 当 $\delta = 1$ 时, 形貌曲线为上凸的二次抛物线。由 $x_{y''=0} = \sqrt{\frac{2-\delta}{6(1-\delta)}}$, 当 $\delta < 1$ 或 $\delta > 2$ 时, 形貌曲线上存在凸凹拐点, 但是由于 $x_w \leq 1$, 所以 $\delta < 0.8$, 形貌曲线上存在凸凹拐点, $x_{y''=0}$ 与 δ 参数之间的关系如图 5 所示。当 $\delta < 0.8$ 时, 形貌曲线中心上凸, 边缘下凹; 随 δ 参数数值的增大, 拐点向边缘靠近, 下凹区间减小[如图 5(a) 所示]; 当 $\delta > 2$ 时, 形

貌曲线中心下凹, 边缘上凸; 随 δ 参数数值的增大, 拐点向边缘靠近, 中心下凹区间增大[如图 5(b) 所示]; 而当 $0.8 \leq \delta \leq 2$, 形貌曲线为上凸曲线(如图 4 所示)。

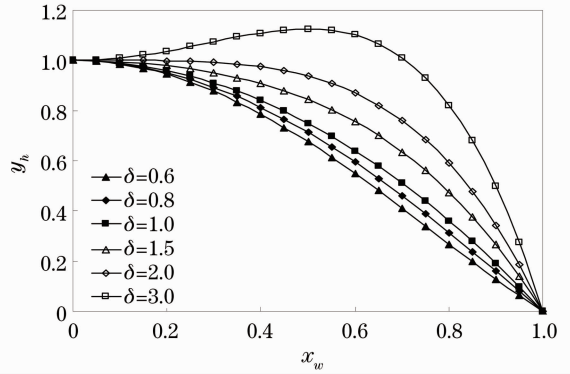


图 4 横截面形貌曲线

Fig. 4 Curve of cross-section morphology

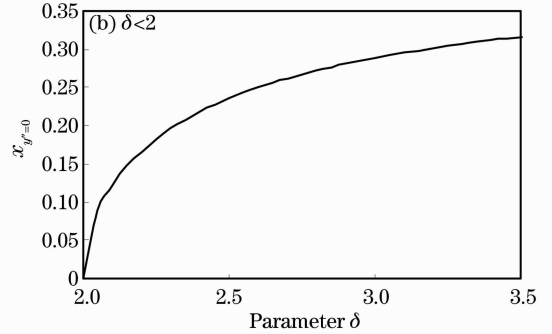
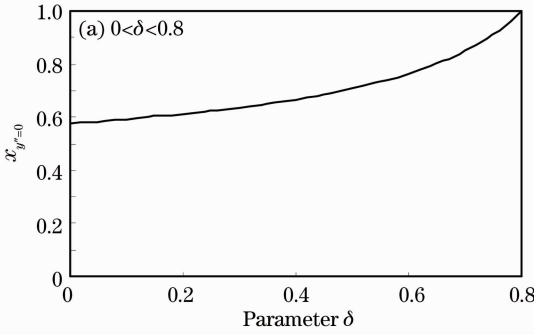


图 5 拐点坐标 $x_{y''=0}$ 与参数 δ 之间的关系曲线

Fig. 5 Curves of relationship between inflection point coordinates $x_{y''=0}$ and parameter δ

图 6 所示是根据图 2 显示的形貌而测量的几何特征参数 w, h, β 计算得到的参数 δ , 用(2)式计算形貌曲线, 与横截面形貌实验测量点的对比。图 6(a) 显示 $\delta = 2.48$, 形貌曲线中心下凹, 边缘上凸, 计算曲线与测量点符合很好; 图 6(b) 显示 $\delta = 0.825$, 形貌曲线为上凸曲线, 计算曲线的右半部分与测量点符合很好, 在左半部分出现误差, 这主要是因为熔覆过程中送粉的均匀性和对称性误差所致。因此, (3)

式确定的方程可以描述图 2 显示的两类横截面形貌。

4 横截面几何特征参数与 δ 参数之间的关系

由于单道沉积轨迹横截面形状与众多因素有关, 所以形貌曲线是各类工艺条件参数的函数, δ 参数决定形貌曲线形状, 即 $\delta = f(P, V, S, \dots)$; 同时,

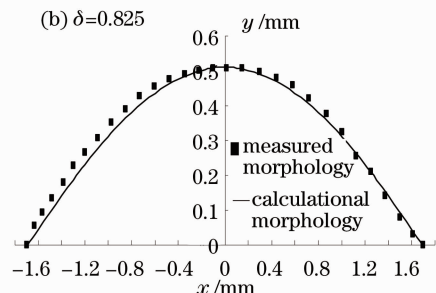
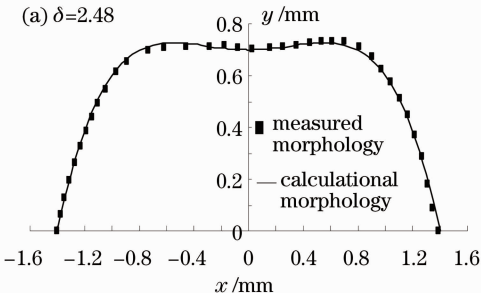


图 6 计算形貌曲线与实验测量点的对比

Fig. 6 Comparison of calculational morphology curve with the measurement points

参数 δ 由横截面几何特征参数确定。在激光熔覆过程中,准确可控的工艺条件参数包括激光功率 P 、扫描速度 V 和送粉速率 S 。这些参数对形貌曲线影响规律是研究的重点。众多学者研究了工艺参数 P 、 V 、 S 与单道沉积轨迹横截面几何特征参数 h 、 w 、 β 之间的关系(其中大部分学者以 h 和 w 为几何特征参数),预测工艺参数^[3,5,7~13]。

在几何特征参数中沉积角 β 测量精度较差,而且与工艺参数之间的关系不直观。沉积层面积 F 方便测量,容易建立起与工艺参数的相关性,特别是 F 与送粉速率和扫描速度有明显的关系。将 F 、 h 、 w 作为几何特征参数,根据(3)式的积分,可以得出计算面积 $F_j = \frac{4(4+\delta)}{15}h\omega$,定义名义面积 $F_m = h\omega$,则 $F_j = \frac{4(4+\delta)}{15}F_m$ 。定义 F_s 为测量面积,在实测的 F_s 、 h 、 w 数值范围内,以 F_s 为纵坐标, F_m 为横坐标显示测量结果(如图7所示)。两条 $\delta=0.8$ 和 $\delta=2.0$ 的线将图7分成 A、B、C 3 个区,3 个区对应不同的横截面形貌,实测数据分别落在 3 个区内。回归处理图7中的实验数据,拟合得到 F_s 与 F_m 的函数关系为

$$F_s = a_0 \exp(b_0 F_m), \quad (5)$$

其中拟合度 $R^2 = 0.9871$, $a_0 = 0.2509$, $b_0 = 1.7867$ 。

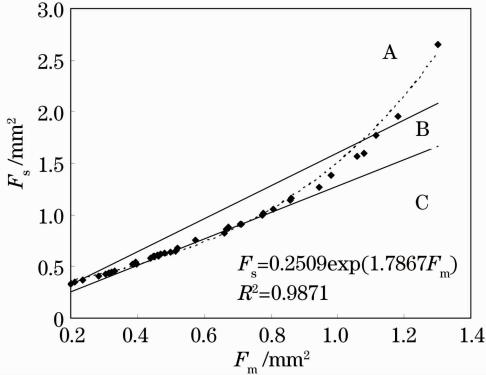


图7 测量面积 F_s 与名义面积 F_m 之间的关系
Fig. 7 Relationship between measured area F_s and nominal area F_m

设 $F_j = F_s$,将(5)式代入 $F_j = \frac{4(4+\delta)}{15}F_m$,得 δ 参数与 F_m 的关系:

$$\delta = \frac{15a \exp(bF_m)}{4F_m} - 4. \quad (6)$$

沉积角 β 可以由 $\delta = \frac{w \tan \beta}{2h}$,并通过(6)式得出:

$$\beta = \frac{2h}{w} \arctan \left[\frac{15a \exp(bF_m)}{4F_m} - 4 \right]. \quad (7)$$

根据几何特征参数 w 和 h 给出 F_m , (5) 式计算沉积层面积,通过图7可以确定沉积轨迹横截面形貌, (6) 式计算 δ 参数, (7) 式计算沉积角 β 。如果给出了几何特征参数 w 和 h 与工艺参数 P 、 V 、 S 之间的关系,则可以根据工艺参数预测沉积轨迹形貌,建立激光熔覆工艺分析的基础。

图8是通过(6)式,根据实测的几何特征参数 w 、 h ,计算得到的 δ 参数。图中显示1点与2点和3点与4点之间的数据点落入 $0.8 \leq \delta \leq 2$ 的 B 区,形貌曲线为上凸曲线;2点与3点之间的数据点落入 $\delta < 0.8$ 的 C 区,形貌曲线中心上凸,边缘下凹;1点之外和4点之外的数据点落入 $\delta > 2$ 的 A 区,形貌曲线中心下凹,边缘上凸。虽然图8显示在实验参数范围内,存在中心上凸,边缘下凹横截面形貌,但是 δ 的数值接近 0.8。由于熔覆过程中送粉的均匀性和对称性误差等工艺因素的影响,在横截面形貌照片中边缘小范围的下凹很难识别。

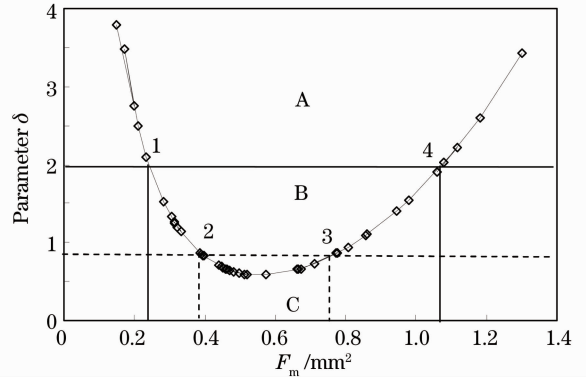


图8 名义面积 F_m 与参数 δ 之间关系
Fig. 8 Relationship between nominal area F_m and parameter δ

图9(a)显示了实测的沉积层 F_s 与(5)式计算的 F_j 随 F_m 的变化;图9(b)显示了实测的沉积角 β 与(7)式计算的 β 的正切值随 F_m 的变化。图9说明(5)式和(7)式的计算结果与实测数据相符合,证明了在本文实验条件下,(3)式确定的方程描述了单道沉积轨迹横截面形貌的变化规律。

5 结 论

1) 在不同激光功率、扫描速度和送粉速率的单道激光熔覆实验中,沉积轨迹横截面出现二种不同的几何形状,其形貌曲线分别为上凸曲线和中心下凹,边缘上凸曲线。

2) 用单一参数 δ 确定的四次代数方程可以描述沉积轨迹横截面形貌曲线,横截面形貌的变化规

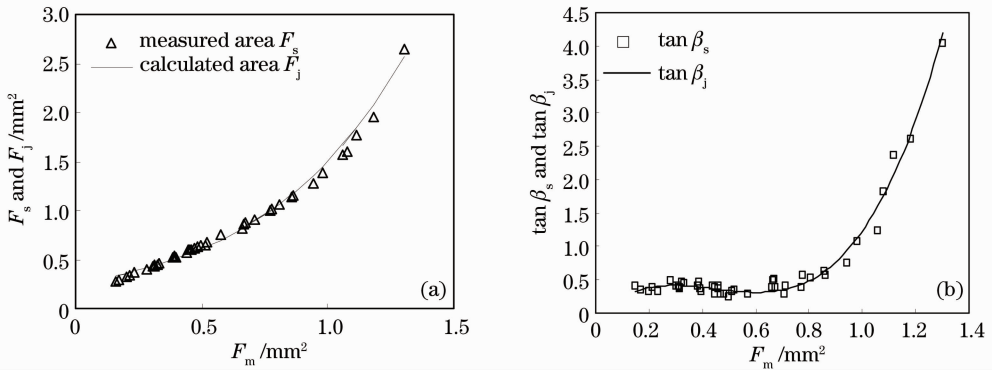


图 9 实测 F_s 和 β_s 与计算 F_j 和 β_j 随 F_m 的变化

Fig. 9 Regularity of measured F_s , β_s and calculated F_j , β_j with the variation of F_m

律是 $\delta < 0.8$, 形貌曲线中心上凸, 边缘下凹, 随 δ 参数数值的增大, 拐点向边缘靠近下凹区间减小; $\delta > 2$, 形貌曲线中心下凹, 边缘上凸, 随 δ 参数数值的增大, 拐点向边缘靠近, 中心下凹区间增大; $0.8 \leq \delta \leq 2$, 形貌曲线为上凸曲线。

3) 参数 δ 与沉积轨迹横截面几何特征参数 w 和 h 之间具有确定的函数关系, 同时横截面积 F 和沉积角 β 也可以由 w 和 h 确定; 给出 w 和 h 与工艺参数之间的关系, 可以确定横截面形貌与工艺参数之间的关系, 从而建立系统的工艺分析理论, 指导工艺实施和熔覆层质量预测和评估。

4) 根据横截面形貌几何模型计算的形貌曲线与实测的横截面形貌相符合; 沉积层横截面积 F 和沉积角 β 的实测结果与几何模型的计算结果相符合; 证明了单道沉积轨迹横截面形貌变化规律分析的正确性。

本文针对激光熔覆 316L 不锈钢实验中单道沉积轨迹横截面几何形状特征的变化, 建立了描述横截面形貌几何形状变化规律的几何模型, 论证了单道沉积轨迹横截面几何模型在工艺分析理论中的意义。沉积轨迹形貌的几何特征反映的工艺过程信息十分复杂, 目前还只能从形貌几何特征中寻找工艺参数影响的信息, 建立几何特征与工艺参数之间的关系(利用实验数据回归处理); 而确定形貌几何特征中反映的熔池流动和凝固信息, 由此建立相互之间的关系是继续研究的方向。如考虑沉积角隐含着材料的润湿性、流动性和熔池表面张力等信息, 建立相应的方程并耦合求解。

参 考 文 献

1 Zhang Qingmao, Zhong Minlin, Yang Sen *et al.*. The relationship between the processing parameters and the qualities

of the coatings formed by powder feeding laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, **22**(4): 51~55
 张庆茂, 钟敏霖, 杨森等. 送粉式激光熔覆层质量与工艺参数之间的关系 [J]. *焊接学报*, 2001, **22**(4): 51~55
 2 Zhang Qingmao, Wang Zhongdong, Liu Ximing *et al.*. Influence of processing parameters on geometrical features of powder feeding laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding*, 2000, **21**(2): 43~46
 张庆茂, 王忠东, 刘喜明等. 工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响 [J]. *焊接学报*, 2000, **21**(2): 43~46
 3 J. Del Val, R. Comesaña, F. Lusquinos *et al.*. Laser cladding of co-based superalloy coatings: comparative study between Nd:YAG laser and fibre laser [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, **204**(12-13): 1957~1961
 4 Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi *et al.*. Three-dimensional characterizing technique for geometrical features of single laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 581~585
 王志坚, 董世运, 徐滨士等. 单道激光熔覆层几何特征的三维表征方法 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 581~585
 5 Huang Xiaowei, Xi Juntong, J. L. Lebrun *et al.*. Influences of processing parameters on geometric characterizations of laser cladding forming 316L stainless steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071404
 黄小伟, 刁俊通, J. L. Lebrun 等. 工艺参数对激光熔覆成形 316L 不锈钢形状的影响规律 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(7): 071404
 6 Ni Libin, Liu Jichang, Wu Yaoting *et al.*. Optimization of laser cladding process variables based on neural network and particle swarm optimization algorithms [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0203003
 倪立斌, 刘继常, 伍耀庭等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺优化 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0203003
 7 Shengfeng Zhou, Xiaoqin Dai, Haizhong Zheng. Analytical modeling and experimental investigation of laser induction hybrid rapid cladding for Ni-based WC composite coatings [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(3): 613~621
 8 J. T. Hofman, D. F. de Lange, B. Pathiraj *et al.*. FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2011, **211**(2): 187~196
 9 J. T. Hofman. Development of an Observation and Control System for Industrial Laser Cladding [D]. Enschede: University of Twente, 2009. 46~47
 10 Soundarapandian Santhanakrishnan, Fanrong Kong, Radovan Kovacevic. An experimentally based thermo-kinetic hardening

- model for high power direct diode laser cladding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2011, **211**(7): 1247~1259
- 11 Yongjun Huang. Characterization of dilution action in laser-induction hybrid cladding [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(5): 965~973
- 12 Hussam El Cheikh, Bruno Courant, Samuel Branchu *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2012, **50**(3): 413~422
- 13 C. Onwubolu, J. Paulo Davim, C. Oliveira *et al.*. Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(6): 1130~1134

栏目编辑：宋梅梅