

# 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究

潘 浒 赵剑峰 刘云雷 王 凯 肖 猛 高雪松

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 为了提高激光熔覆修复性能的稳定性, 针对 GH4169 镍基高温合金, 从控制稀释率的角度进行了单因素工艺试验。试验结果表明: 在一定的参数范围内, 稀释率随激光功率的增大而增大, 随送粉速率的增大而减小, 扫描速度对稀释率的影响不大。为了简化稀释率的研究过程, 将激光功率与送粉速率的比值定义为粉末吸热密度, 即修复过程中单位质量粉末吸收的激光能量, 进一步确立了粉末吸热密度与稀释率的正相关性。运用回归的思想, 通过 SPSS 软件对试验结果进行数据分析, 建立了粉末吸热密度与稀释率的关系模型并验证了其准确性, 为镍基高温合金激光熔覆修复性能的稳定性研究提供了理论参考与试验支持。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆修复; 稀释率; 工艺参数; 粉末吸热密度; 回归分析

中图分类号 TN249; TG136 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0403007

## Controllability Research on Dilution Ratio of Nickel-Based Superalloy by Laser Cladding Repairation

Pan Hu Zhao Jianfeng Liu Yunlei Wang Kai Xiao Meng Gao Xuesong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** In order to improve the stability of laser cladding repairation property, several single-factor tests are carried out for GH4169 nickel-based superalloy by controlling the dilution ratio. The result shows that within certain parameter range, the dilution ratio increases with the increase of laser power or the decrease of feeding speed, and the scanning speed may have little influence. In order to simplify the study process of dilution ratio, this paper puts forward the concept of powder-heat-absorption density, which means the laser energy absorbed by a unit mass of powder during the process of laser cladding, establishes the positive correlation between the powder heat absorption and dilution ratio with the combination between laser power and power feeding speed. By using the regression thoughts and with the data analysis about the test results by SPSS software, the relation model between powder heat absorption and dilution ratio is established and the accuracy is verified, which provides the theoretical references and test support about the study of stability of laser cladding repairation property of nickel-based superalloy.

**Key words** laser technique; laser cladding repairation; dilution ratio; process parameter; powder-heat-absorption density; regression analysis

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

镍基高温合金因其优异的高温强度和良好的抗氧化、抗燃气腐蚀能力, 目前已广泛应用于航空发动

机构件的加工制造领域。由于工作环境恶劣, 发动机机构件易出现磨损、裂纹和点蚀等缺陷<sup>[1,2]</sup>。传统修复方法如真空钎焊、钨极惰性气体保护焊(TIG)

收稿日期: 2012-11-08; 收到修改稿日期: 2012-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51205198)、中国博士后科学基金(2012M511266)、中国博士后科学基金(2012M520966)和江苏省博士后科研资助计划项目(1102052C) 资助课题。

作者简介: 潘 浒(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: panhu@nuaa.edu.cn

导师简介: 赵剑峰(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光快速成形技术和纳米材料制造技术等方面的研究。E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn(通信联系人)

和等离子体熔覆修复在一定程度上解决了上述问题,但由于热输入量较大,热影响区极易出现热裂纹,同时修复过程引起的收缩变形使构件的安装精度难以保证<sup>[3]</sup>。激光熔覆修复技术具有作用时间短、热影响区小等优势,在航空发动机构件的修复环节得到了逐步推广。

激光熔覆修复技术是一种用高能激光束作为热源、通过预置粉末或同轴送粉来修复金属零件表面缺陷的先进增材制造技术<sup>[4]</sup>。在激光熔覆过程中,影响激光、粉末与基体相互作用的因素众多,从而导致修复区域的稀释率难以得到有效控制<sup>[5,6]</sup>。稀释率是衡量激光熔覆修复性能的关键指标之一<sup>[7]</sup>。若稀释率过大,基体对修复区域的稀释作用大,则将损害粉末材料的固有性能,并加大修复区域开裂、变形的倾向;若稀释率过小,粉末与基体不能在界面形成良好的冶金结合,则修复区域的结合性能较差<sup>[8]</sup>。因此,有效地控制稀释率对于提高激光熔覆修复性能具有重要意义。

有关稀释率的研究一直以来都是中外学者关注的热点。刘喜明等<sup>[9]</sup>以碳素钢 Q235 为试验材料,研究了工艺参数对熔覆层稀释率影响的作用机理,并提出熔覆层界面附近局部稀释率的概念;葛江波等<sup>[10]</sup>针对 DZ125L 高温合金材料,从稀释率方面阐述了良好熔覆层和其成形工艺参数之间的相互匹配关系;Hofman 等<sup>[11]</sup>将工艺试验与有限元仿真相结合,初步建立了稀释率在线控制模型。目前针对镍基高温合金的激光熔覆修复稀释率的研究仍少见报道,然而,对于航空发动机构件特别是涡轮叶片等薄壁件的修复而言,稀释率的控制尤为关键。因此,本文针对 GH4169 镍基高温合金,将稀释率作为研究对象,通过单因素试验,全面分析不同工艺参数对稀释率的影响,确立粉末吸热密度与稀释率的正相关性;运用回归分析的思想,建立相关模型并验证其精度,从而达到通过控制稀释率来提高激光熔覆修复性能稳定性的目标。

表 1 基体材料与粉末材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrate and powder material (mass fraction, %)

	C	Si	Mn	Ti	Mo	Co	Al	Cr	Ni
Substrate	≤0.08	≤0.35	≤0.35	0.65~1.55	2.80~3.30	≤1.0	0.20~0.80	17~21	50~55
Powder	≤0.09	≤0.20	≤0.15	3.30~3.70	3.30~3.70	7~9	2.30~3.70	12~14	Etc

试验开始前,对基体表面进行砂纸打磨,再用酒精和丙酮去除油污,与粉末一并采用烘干处理。试验原理如图 2 所示,试验使用美国 PRC 公司的

## 2 理论与试验

### 2.1 稀释率的概念

在激光熔覆过程中,由于熔化基体的混入引起修复区域的合金成分发生变化,这一现象称为稀释。稀释率  $\eta$  考察了基体材料在修复区域中所占的百分比,由于修复区域真正被稀释的范围主要在基体表面以下,因此稀释率通常使用横截面面积测量值的比值进行计算<sup>[12]</sup>。图 1 为激光熔覆横截面示意图,假设修复区域表面为抛物面,位于基体表面之上的修复区域为熔覆区,横截面积为  $S_1$ ,位于基体表面之下的修复区域为熔合区,横截面积为  $S_2$ ,根据抛物线面积公式  $S = \frac{2}{3}ab$ ,稀释率的公式可以简化为

$$\eta = \frac{S_2}{S_1 + S_2} = \frac{\frac{2}{3}Wh}{\frac{2}{3} \cdot W(H+h)} = \frac{h}{H+h}, \quad (1)$$

式中  $W$ 、 $H$  和  $h$  分别为修复区域宽度、熔覆区高度和熔合区深度。因此,可以通过关注熔覆区高度和熔合区深度,来实现对修复区域稀释率的可控性研究。

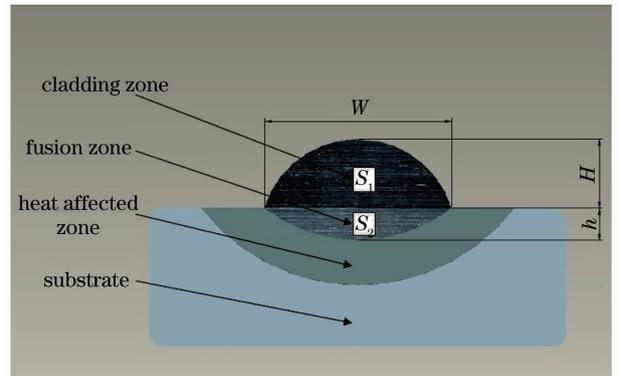


图 1 激光熔覆横截面示意图

Fig. 1 Sketch of laser-cladding cross section

### 2.2 试验材料与方法

试验基体材料选用镍基高温合金 GH4169,尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm。粉末材料选用 FGH95 镍基高温合金粉末,颗粒尺寸为 106~120  $\mu\text{m}$ 。基体材料和粉末材料的化学成分如表 1 所示。

STS2000 激光器,最高输出功率为 2 kW。同轴送粉采用沈阳新松公司的 XSL-PF-01A-2 型送粉设备。试验选取的工艺参数如表 2 所示。试验过程中

使用氩气作为保护气体。试验结束后,将样件沿垂直于扫描方向进行线切割,对单道熔覆线横截面进行打磨抛光,使用稀王水溶液(50 mL HCL+25 mL HNO<sub>3</sub>+25 mL H<sub>2</sub>O)对横截面进行均匀腐蚀 3~5 min后烘干,最后通过 Leica DVM5000 三维视频显微镜观察横截面形貌并使用 AutoCAD 进行宽度、高度和深度的测量工作。

### 3 结果与分析

#### 3.1 工艺参数对稀释率的影响

##### 3.1.1 激光功率

图 3 显示了当扫描速度  $V_s = 600$  mm/min、送粉速率  $V_F = 24.10$  g/min 时,不同激光功率  $P$  作用下单道熔覆横截面形状。结合图 4 可知,随着激光

功率的增加,熔合区的深度逐渐增加,熔覆区的高度先增加后减小,且后者的增长幅度小于前者。稀释率随着激光功率的增加而逐渐增大。

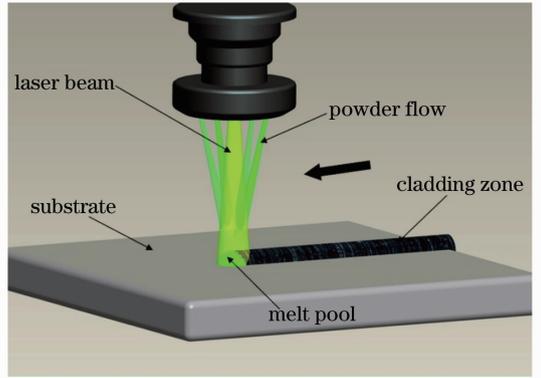


图 2 激光熔覆试验原理示意图

Fig. 2 Sketch of laser-cladding principle

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Process parameters of laser cladding

Parameter	Value			
Laser power $P/W$	1050	1150	1250	1350
Scanning speed $V_s/(mm/min)$	400	500	600	700
Powder feeding rate $V_F/(g/min)$	19.28	21.69	24.1	26.51
Spot diameter /mm	1.0			
Gas supply /(L/h)	200			

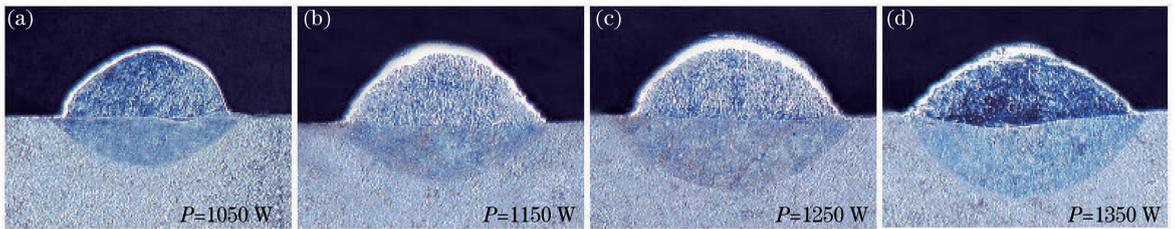


图 3 不同激光功率作用下单道熔覆横截面形状

Fig. 3 Cross-section shapes of single cladding with different laser powers

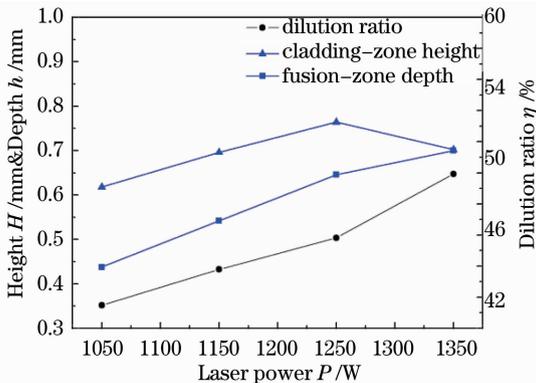


图 4 激光功率对熔覆区高度、融合区深度和稀释率的影响

Fig. 4 Effect of different laser powers on cladding-zone height, fusion-zone depth and dilution ratio

在扫描速度和送粉速率不变的前提下,激光功率决定了粉末与基体吸收的能量总和。激光功率越大,基体吸收的能量越多,融合区深度越大,在粉末充足的情况下,参与熔覆成形的粉末量越多,熔覆区的高度越大。随着激光功率的增加,融合区的深度随着熔池吸收能量的增多而增大<sup>[13]</sup>。然而,熔化一定的粉末量所需要的激光功率是确定的,一旦超过阈值,粉末易发生气化甚至形成等离子体<sup>[14]</sup>,熔覆区的高度会有减小的趋势。因此,稀释率随着激光功率的增加而逐渐增大。

##### 3.1.2 扫描速度

图 5 显示了当激光功率  $P = 1250$  W,送粉速率  $V_F = 24.10$  g/min 时,不同扫描速度作用下单道熔覆横截面形状。结合图 6 可知,随着扫描速度的增

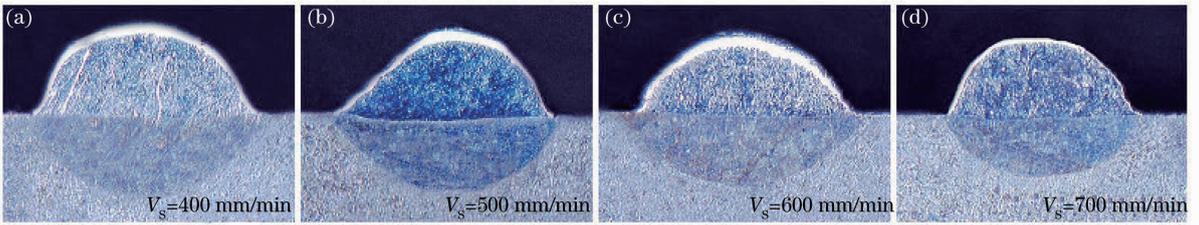


图 5 不同扫描速度作用下单道熔覆横截面形状

Fig. 5 Cross-section shapes of single cladding with different scanning speeds

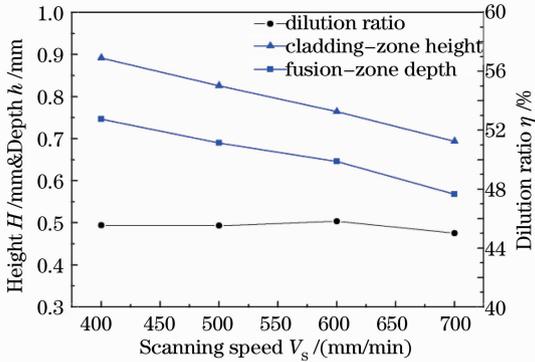


图 6 扫描速度对熔覆区高度、融合区深度和稀释率的影响

Fig. 6 Effect of different scanning speeds on cladding-zone height, fusion-zone depth and dilution ratio

加, 融合区的深度与熔覆区的高度在逐渐减小, 两者减小幅度接近。扫描速度对稀释率的影响较小。

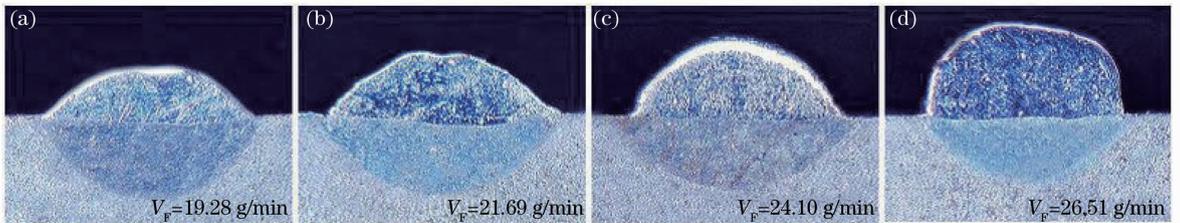


图 7 不同送粉速率下单道熔覆横截面形状

Fig. 7 Cross section shapes of single cladding with different power feeding rates

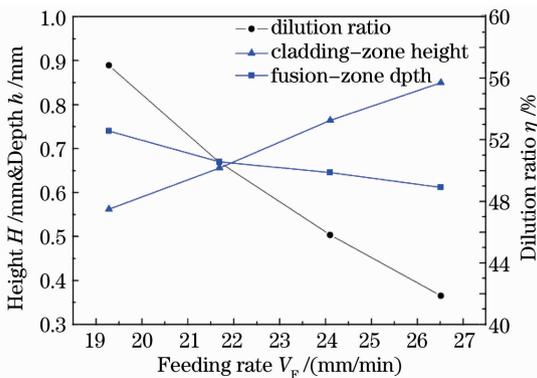


图 8 送粉速率对熔覆区高度、融合区深度和稀释率的影响

Fig. 8 Effect of different feeding rates on cladding-zone height, fusion-zone depth and dilution ratio

在激光功率和送粉速率不变的前提下, 扫描速度决定了粉末与基体受激光辐照的时间长短。扫描速度越大, 激光辐照时间越短, 则基体吸收的能量越少, 融合区深度越小, 与此同时, 进入单位面积熔池的粉末量越少, 熔覆区高度越小。由于基体与粉末的热物理性参数较为接近, 融合区深度与熔覆区高度的变化幅度差别较小<sup>[15]</sup>, 因此稀释率波动较小。需要指出的是, 对于同轴送粉而言, 在仅改变扫描速度的情况下, 单位质量粉末受到的激光能量是不变的。

### 3.1.3 送粉速率

图 7 显示了当激光功率  $P=1250\text{ W}$ , 扫描速度  $V_s=600\text{ mm/min}$  时, 不同送粉速率下单道熔覆横截面形状。结合图 8 可知, 随着送粉速率的增加, 融合区的深度逐渐减小, 熔覆区的高度逐渐增加。稀释率随着送粉速率的增加而急剧减小。

在激光功率和扫描速度不变的前提下, 送粉速率决定了粉末与基体吸收的能量比例<sup>[16]</sup>。送粉速率越大, 基体吸收的能量越少, 融合区深度越小, 在激光功率充足的情况下, 参与熔覆成形的粉末量越多, 熔覆区高度越大<sup>[17]</sup>, 融合区深度和熔覆区高度呈相反方向变化, 因此, 稀释率随着送粉速率的增加而急剧减小。

### 3.2 粉末吸热密度的概念

在本试验条件下, 激光功率和送粉速率对激光修复区域稀释率产生决定性的影响, 而扫描速度产生的影响很小, 可忽略不计。根据上述分析可知, 稀释率与激光功率正相关, 与送粉速率反相关。因此, 将激光功率与送粉速率的比值进行定义, 创建粉末

吸热密度的概念,将极大地简化工艺参数对稀释率影响的研究过程。粉末吸热密度  $P_F$  是指在激光熔覆修复过程中,单位质量粉末所吸收的激光能量,其定义式为

$$P_F = \frac{P}{V_F}. \quad (2)$$

对于既定质量的熔覆粉末,完成熔覆成形所需要的激光能量是一定的,如果实际吸收的激光能量小于所需激光能量,则粉末无法完成熔覆成形;如果实际吸收的激光能量大于所需激光能量,则多余能量通过粉末传递给基体,与直接辐照到基体的能量共同作用,致使基体表面熔融并形成熔池;如果实际吸收的激光能量远大于所需激光能量,则粉末易发生气化或形成等离子体,熔池深度过大,基体对粉末稀释作用过大,将对修复区域性能产生不利影响。因此,粉末吸热密度在一定程度上反映了基体与粉

末吸收能量的比值,合理选择粉末吸热密度对提高稀释率的可控性、获取良好的激光熔覆修复性能具有重要的意义。

### 3.3 关系模型的构建与分析

为提高激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性,运用回归分析的思想,并结合上述工艺试验,将稀释率与粉末吸热密度进行数据拟合,建立数学模型并对其进行验证分析。

#### 3.3.1 回归分析及模型构建

回归分析是相关关系的一种数学工具,它提供了变量之间关系的一种近似表达,即经验公式。通过验证的经验公式可以实现预测与控制的目的<sup>[18,19]</sup>。本文使用统计分析软件 SPSS 进行一元回归分析。表 3 为本试验条件下稀释率与粉末吸热密度的对应关系。

表 3 稀释率与粉末吸热密度的关系

Table 3 Relationship between dilution ratio and powder heat absorption density

$x$ Powder heat absorption density / (kJ/g)	2.61	2.82	2.86	3.11	3.36	3.46	3.89
$y$ Dilution ratio / %	41.477	41.860	43.780	45.471	49.929	50.520	56.836

在一定参数范围内,随着粉末吸热密度的增大(增大激光功率或减小送粉速率),基体与单位质量粉末所吸收的热量增多,熔合区深度持续增长,熔覆区高度增长渐缓或逐步下降,因此,激光修复区域的稀释率呈现增长趋势。

在做一元回归分析之前,先对因变量做正态性检验。以  $x$ 、 $y$  建立配伍格式数据文件, $x$  为计量资料,用 Explore 命令对  $y$  作正态性检验,结果如表 4 所示, $d_f$  表示自由度。

表 4 正态性检验输出结果

Table 4 Tests of normality

Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
$f_{stat.}$	$d_f$	$f'_{sig.}$	$f_{stat.}$	$d_f$	$f'_{sig.}$
$y$ 0.203	6	0.200(*)	0.877	6	0.255

SPSS 可采用两种方法对一组数据进行正态性检验,Kolmogorov-Smirnov Test 和 Shapiro-Wilk Test。前者检验结果较精确,适用于大样本的检测,而后者适用于小样本的检验,本试验中  $n=7$ ,属于小样本,因此使用 Shapiro-Wilk Test 的输出结果。Shapiro-Wilk 统计量  $f_{stat.}=0.877$ 、显著水平  $f'_{sig.}=0.255>0.05$ ,所以因变量  $y$  服从正态分布,即  $y$  是正态变量可以进行回归分析。

为提高模型精度,在拟合数据时,同时选择线性( $y = b_0 + b_1 x$ )、指数 $[y = b_0 \exp(b_1 x)]$ 、对数( $y = b_0 + b_1 \ln x$ )、幂型( $y = b_0 x^{b_1}$ )、S 型 $[y = \exp(b_0 + \frac{b_1}{x})]$ 等多种模型进行拟合,并根据方差分析或相关系数选择较优模型,其中  $y$  为独立变量, $x$  为非独立变量。拟合结果如表 5 所示。

表 5 模型概述与参数估计

Table 5 Model summary and parameter estimates

Equation	Model summary					Parameter estimate	
	$R$ square	$F$	$df_1$	$df_2$	$f'_{sig.}$	Constant	$b_1$
Linear	0.977	211.808	1	5	0	7.690	12.485
Logarithmic	0.961	124.488	1	5	0	1.827	39.669
Power	0.970	160.980	1	5	0	18.285	0.824
S	0.952	99.466	1	5	0	4.677	-2.579
Exponential	0.980	249.100	1	5	0	20.698	0.259

表 5 中,方差分析 Exponential 最大,回归方程显著性检验观测值  $F=249.100$ ,具有统计学意义,决定系数  $R$  square 为  $0.980(>0.05)$ ,回归方程拟合优度较好,可以投入使用。最优回归模型方程为

$$\eta = y = b_0 \exp(b_1 x) = 20.698 \exp(0.259 P_F),$$

$$P_F \in [2.61, 3.89]. \quad (3)$$

### 3.3.2 模型验证及误差分析

根据最优回归模型方程可以预测出不同粉末吸热密度作用下所对应的理论稀释率<sup>[20]</sup>。为了验证回归模型的实用性,在相同的试验条件下,补充任意 5 组工艺参数试验作为试验验证。理论值和试验值

的绝对误差  $\Delta_1$  和相对误差  $\Delta_2$  分别表示为

$$\Delta_1 (\%) = |\eta - \eta_{\text{exp}}|, \quad (4)$$

$$\Delta_2 (\%) = \frac{|\eta - \eta_{\text{exp}}|}{\eta_{\text{exp}}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中  $\eta$  为理论值,  $\eta_{\text{exp}}$  为试验值。回归分析理论值与试验值的对比如表 6 所示。通过对 5 组数据对比计算得知,绝对误差最大值为  $2.096\%$ ,最小值为  $0.287\%$ ,平均值为  $1.246\%$ ;相对误差最大值为  $4.651\%$ ,最小值为  $0.531\%$ ,平均值为  $2.744\%$ 。理论值与试验值趋同程度较高,回归模型方程的精度达到使用要求。

表 6 回归分析理论值与试验值的对比

Table 6 Comparison between theoretical and experimental values by regression analysis

Laser power $P/W$	Scanning rate $V_S/(mm/min)$	Powder feeding rate $V_F/(g/min)$	Powder heat absorption density $P_F/(kJ/g)$	Experimental height $H_{\text{exp}}/mm$	Experimental depth $h_{\text{exp}}/mm$	Experimental dilution ratio $\eta_{\text{exp}}/\%$	Theoretical dilution ratio $\eta/\%$	Absolute error $\Delta_1/\%$	Relative error $\Delta_2/\%$
1250	500	26.51	2.83	0.715	0.524	42.297	43.078	0.781	1.846
1350	600	26.51	3.06	0.707	0.557	44.072	45.722	1.650	3.744
1150	500	21.69	3.18	0.742	0.606	45.069	47.165	2.096	4.651
1350	500	24.10	3.36	0.647	0.598	48.000	49.416	1.416	2.950
1350	700	21.67	3.73	0.516	0.608	54.099	54.386	0.287	0.531

## 4 结 论

1) 激光熔覆修复过程中,各工艺参数对稀释率的影响不同;随着激光功率的增大,稀释率逐渐增大;随着送粉速率的增大,稀释率逐渐减小;扫描速度对稀释率的影响较小。

2) 粉末吸热密度概念的建立简化了稀释率的研究过程,试验结果证明:粉末吸热密度与稀释率呈正相关,在一定的参数范围内,随着粉末吸热密度的增大,稀释率呈现增大趋势。

3) 利用回归的思想建立了粉末吸热密度与稀释率的关系模型,模型验证结果表明:回归模型与试验结果趋同程度较高,模型精度达到了使用要求,修复区域稀释率得到了有效地控制,可用于本试验条件下 GH4169 镍基高温合金激光熔覆修复性能的稳定性研究。

### 参 考 文 献

1 Song Zhaohong. Aviation Engine Reliability and Fault Inhibition Engineering [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002. 10~11  
宋兆泓. 航空发动机可靠性与故障抑制工程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002. 10~11  
2 Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,

30(8): 2311~2316

徐松华,肖 阳,李 健. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2311~2316  
3 M. Gaumann, S. Henry, F. Cleton *et al.*. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 271(1-2): 232~241  
4 H. E. Cheikh, B. Courant, S. Branchu *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3): 413~422  
5 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(1): 296~301  
朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 296~301  
6 G. Chryssolouris, S. Zannis, K. Tsirbas *et al.*. An experimental investigation of laser cladding [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(1): 145~148  
7 J. D. Kim, Y. Peng. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2000, 104(3): 284~293  
8 Zhang Qingmao, Liu Wenjin, Yang Sen *et al.*. Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding [J]. *J. Iron and Steel Research*, 2002, 14(1): 11~15  
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  
9 Liu Ximing, Lian Jianshe, Zhang Qingmao. Characteristics of the bound interface between the coating and the substrate formed by powder feeding laser cladding [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2001, 37(4): 38~43  
刘喜明,连建设,张庆茂. 送粉激光熔覆界面特性及熔覆层稀释率[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(4): 38~43  
10 Ge Jiangbo, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Process research on

- DZ125L superalloy parts by laser metal direct forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0703001
- 葛江波, 张安峰, 李涤尘等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0703001
- 11 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
- 12 Huang Xiaofeng. An Investigation on Microstructure and Properties of Ni-Based Alloy by Laser Cladding and Laser Cladding Forming [D]. Jilin: Jilin University, 2011
- 黄晓凤. 激光熔覆和熔覆成形镍基合金的组织与性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011
- 13 Jiang Shujuan, Liu Weijun, Nan Liangliang. Laser cladding height prediction based on neural network [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2009, **45**(3): 269~274
- 姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测[J]. *机械工程学报*, 2009, **45**(3): 269~274
- 14 Zhang Qingmao, Liu Wenjin, Zhong Minlin. Error analysis on the analytical model of pool depth formed by the powder feeding laser cladding [J]. *Heat Treatment*, 2003, **28**(4): 11~15
- 张庆茂, 刘文金, 钟敏霖. 送粉激光熔覆熔池深度解析模型的误差分析[J]. *金属热处理*, 2003, **28**(4): 11~15
- 15 U. de Oliveira, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2005, **197**(2-3): 127~136
- 16 Zhang Qingmao, Liu Ximing, Sun Ning *et al.*. Analysis model and effect factors of pool depth formed by the powder feeding laser cladding [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2000, **21**(4): 42~45
- 张庆茂, 刘喜明, 孙宁等. 送粉式激光熔覆熔池深度的分析模型及其影响因素[J]. *焊接学报*, 2000, **21**(4): 42~45
- 17 Huang Fengxiao, Jiang Zhonghao, Zhang Jian. Effects of laser cladding parameters on macro-dimensions of laser cladding layer [J]. *Hot Working Technology*, 2010, **39**(18): 119~121
- 黄凤晓, 江中浩, 张健. 激光熔覆工艺参数对单道熔覆层宏观尺寸的影响[J]. *热加工工艺*, 2010, **39**(18): 119~121
- 18 S. Chatterjee, A. S. Hadi, B. Price. Regression Analysis by Example [M]. Canada: Wiley-Interscience, 2004. 25~29
- 19 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 于君, 陈静, 谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 20 Zhao Hongyun, Yang Xianqun, Shu Fengyuan *et al.*. Comparative analysis of morphology prediction for laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, **30**(1): 51~54
- 赵洪运, 杨贤群, 舒风远等. 激光熔覆层形貌预测对比分析[J]. *焊接学报*, 2009, **30**(1): 51~54

栏目编辑: 宋梅梅