

激光与光电子学进展

基于响应面法的同轴送粉多道激光熔覆层形貌预测

梁万旭¹, 杨勇^{1*}, 金康¹, 齐康¹, 熊李¹, 刘毅², 戴龙杰²

¹青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;

²青岛征和工业股份有限公司, 山东 青岛 266705

摘要 探究了不同工艺参数(激光功率、扫描速度、搭接率、熔覆头到基体的距离)相互耦合作用对多道激光熔覆层几何特征(熔覆层平均高度、基体平均熔深、平均稀释率、表面平均高度差)的影响规律,实现了熔覆层形貌的预测。设计全因子实验,基于响应曲面分析方法构建涂层形貌与工艺参数之间的数学模型,并将预测结果与实验数据进行比对。结果表明:扫描速度对熔覆层平均高度的影响最为显著,激光功率对基体平均熔深的影响最为显著,熔覆头到基体的距离对平均稀释率的影响最为显著,扫描速度对表面平均高度差的影响最为显著;熔覆层平均高度、基体平均熔深、平均稀释率、表面平均高度差的平均相对误差分别为 10.09%、4.96%、8.83%、8.34%,模型的拟合优度 $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ 分别为 0.8971、0.9251、0.9240、0.8545。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 同轴送粉; 多道搭接; 多项式回归; 几何特征预测

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114012

Morphology Prediction of Coaxial Powder Feeding Multichannel Laser Cladding Layer Based on Response Surface

Liang Wanxu¹, Yang Yong^{1*}, Jin Kang¹, Qi Kang¹, Xiong Li¹, Liu Yi², Dai Longjie²

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

²Qingdao Choho Industrial Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266705, China

Abstract In this study, the influences of different process parameters, such as the laser power, scanning speed, overlap rate, and distance from the cladding head to the substrate, on the morphological characteristics of the cladding layer, such as the average height of the cladding layer, average substrate melt depth, average dilution rate, and average surface height difference, were explored. Moreover, the prediction of the coating morphology was achieved. An entire factor experiment was designed and the mathematical model between the coating morphology and process parameters was constructed based on the response surface analysis method. The predicted results were compared with the experimental data. Results show that the scanning speed, laser power, distance between the cladding head to the substrate most significantly affect the average height of the cladding layer, average substrate melt depth, and average dilution rate, respectively. Furthermore, the average surface height difference is mostly affected by the scanning speed. The average relative errors of the average height of the cladding layer, average substrate melt depth, average dilution rate, and average surface height difference are 10.09%, 4.96%, 8.83%,

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-04-28; 录用日期: 2021-05-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MEE077)、青岛西海岸科技计划专项(2020-100)

通信作者: *yyong901@163.com

and 8.34%, with the $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ (goodness of fit) of 0.8971, 0.9251, 0.9240, and 0.8545, respectively.

Key words laser technique; laser cladding; coaxial powder feeding; multi-track overlapping; polynomial regression; prediction of geometrical characteristics

1 引言

激光熔覆是一种优良的材料表面改性加工技术,它可以在低成本金属表面制备高性能涂层,进而节约贵重金属材料,延长零件的使用寿命,提升材料的综合性能^[1-2]。激光熔覆按送粉工艺的不同可以分为同步送粉式和预置粉末式。其中,同步送粉式激光熔覆的工作效率和自动化程度更高,熔覆层的组织更加细密,适用于大面积激光熔覆加工以及自动化程度要求较高的场合,已成为目前发展的主流^[3-6]。

激光熔覆过程非常复杂,存在粉末的输送与汇聚,激光与粉末、基体之间的相互作用,以及由温度场、应力场、粉末流场、载气场耦合而导致的非线性变化特征。此外,环境因素、材料因素、工艺参数以及相关设备都会影响熔覆形貌,使得熔覆过程中的熔覆层的几何形貌控制成为研究的难点^[7-11]。目前,已有大量学者进行了相关研究。例如:赵洪运等^[12]分别将多元线性回归分析和遗传神经网络应用于激光熔覆层形貌的预测,结果发现两种方法都具有可行性,且前者应用更方便,后者精度更高。张炳发等^[13]利用多元线性回归分析确定了主要工艺参数(激光功率、扫描速度、送粉速率)和熔覆层形貌(熔覆层高度、宽度)之间的对应关系。孟祥伟^[14]基于反向传播(BP)神经网络建立网络模型,并利用该模型对激光熔覆层的尺寸进行了预测;结果表明,该网络模型预测的平均误差较小,预测精度较高,具有较好的预测能力。范鹏飞等^[15]分别利用多元线性回归和神经网络方法建立了关键工艺参数与熔覆层宏观形貌之间的关系模型,结果表明:两种方法建立的模型都具有较高的预测精度,但后者不具有明确的函数关系,且运算复杂。练国富等^[16]利用响应面优化方法建立了激光熔覆工艺参数与多道搭接成形质量、效率之间的数学预测模型,为多道熔覆涂层质量、熔覆效率的控制与预测提供了理论依据。庞伟帆等^[17]比较了响应面法和神经网络模型对高沉积率激光熔覆参数的预测结果和优化效果,结果表明,神经网络模型具有更高的可靠性,优化效果更好。Meng等^[18]利用响应面分析及方差

分析确立了工艺参数与单道涂层几何形状、力学性能之间的统计关系,为激光熔覆复合涂层的多目标优化提供了参考。Wang等^[19]建立了倾斜基板涂层几何形状的预测数学模型,并采用该模型并对涂层的宽度和高度进行了预测,预测结果与实验结果基本一致。

目前,激光熔覆涂层形貌预测模型主要采用多元线性回归及神经网络方法,但前者不能表达工艺参数之间非线性耦合对熔覆形貌的影响,后者则没有明确的函数表达,且运算复杂。此外,现有模型多是对单道激光熔覆涂层形貌进行预测^[20-24],且模型中的工艺参数考虑得不全面,因此研究具有明确表达式的多道激光熔覆形貌预测模型是很有必要的。鉴于此,本研究团队以多道激光熔覆为核心,选择尽可能满足实际加工情况的工艺参数并进行全因子实验;然后利用响应面分析方法建立多道激光熔覆层形貌的预测模型,探索不同工艺参数之间的线性及非线性耦合对熔覆层形貌的影响规律。基于预测模型在实验前预测加工结果并优化实验参数,可为实现大面积激光熔覆涂层形貌的控制提供理论依据。

2 实验设计

2.1 实验条件及参数设计

实验选用的基材为45钢,其尺寸为50 mm×20 mm×10 mm。实验前用砂纸打磨基体表面,去除其表面锈迹及氧化物,并用无水乙醇进行清洗,防止表面氧化。熔覆粉末选择商用球形316L不锈钢粉末,粉末粒径为30~40 μm。实验前将粉末放入烘干机中进行烘干处理,温度为120 °C,时间为30 min。基材与粉末的化学成分如表1所示。

实验设备照片如图1所示。实验设备包括ROFIN-FLO20 光纤激光器、KUKA-KR30-3 机械手、送粉系统、冷水机、控制柜、操作台等。选择氮气作为粉末输送气体,氩气作为保护气体。多道激光熔覆示意图如图2所示。

本文研究激光功率 P (kW)、扫描速度 S (mm·s⁻¹)、搭接率 O_r (%)、熔覆头到基体的距离 L (mm)与多道激光熔覆层平均高度 H (mm)、基体平均熔深

表 1 45 钢和 316L 不锈钢粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of 45 steel and 316L stainless steel powder

Material	Mass fraction / %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
45 steel	0.46	0.27	0.65	—	—	0.23	0.3	—	0.24
316L powder	0.07	0.90	1.90	0.03	0.035	17.5	12	2.5	—

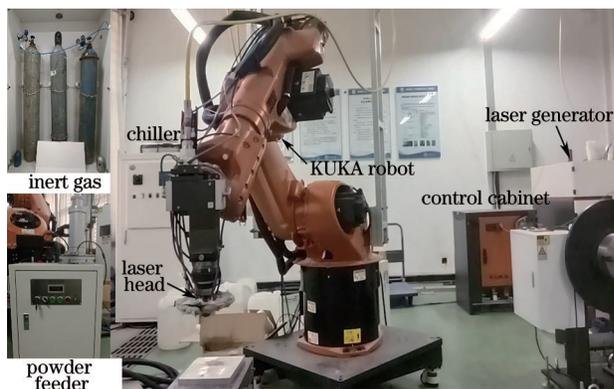


图 1 激光熔覆设备

Fig. 1 Laser cladding equipment

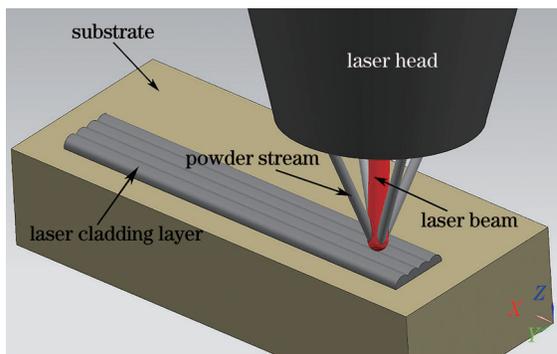


图 2 同轴送粉式多道激光熔覆示意图

Fig. 2 Schematic of coaxial powder feeding multi-channel laser cladding

D (mm)、平均稀释率 D_r (%)、表面平均高度差

A_d (mm)之间的关系。测量得到粉末流焦点到熔覆头的距离为 1.2 cm, 实验过程中控制送粉速率为 20 g/min, 激光光斑直径为 2 mm, 保护气体流量为 200 mL/min。工艺参数的取值如表 2 所示。

表 2 工艺参数取值

Table 2 Process parameter values

Variable	Notation	Value
Laser power	P / kW	1.0, 1.2, 1.4
Scanning speed	S /	5, 7, 9
Overlap rate	O_r / %	10, 20, 30, 40, 50
Distance from cladding head to substrate	L / mm	1.5, 2.0

采用全因子实验方法, 共设计了 90 组实验。实验后, 用线切割机沿平行于基体宽度方向切割出尺寸为 20 mm × 20 mm × 10 mm 的试件, 用普通砂纸及金相砂纸打磨试件的切割面, 然后用 5% 硝酸酒精溶液腐蚀截面 40 s, 然后利用光学显微镜观察熔覆层的截面形貌。稀释率近似定义为^[25-26]

$$D_r \approx \frac{\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{D_i + H_i}}{n}, \quad (1)$$

式中: D_r 为平均稀释率; D_i 为第 i 道基体的熔深; H_i 为第 i 道熔覆层的高度; n 为熔覆总道数。多道熔覆层数据采用单道相加取平均值的方法进行计算, 形貌尺寸数据保留 3 位小数^[11-16]。熔覆层形貌如图 3 所示。

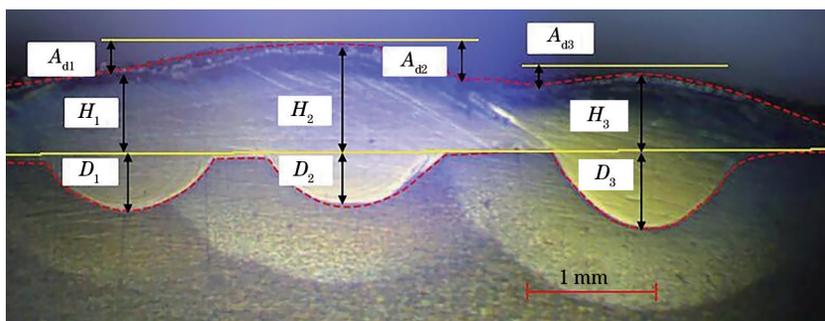


图 3 熔覆层的截面形貌

Fig. 3 Section morphology of cladding layer

2.2 响应曲面分析方法

响应曲面设计是一种有助于深入了解和优化

响应的高级实验设计(DOE)技术, 可以获得影响因素和响应变量之间明确的函数关系。本文中的响

应变量 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 分别代表熔覆层的平均高度 H 、基体的平均熔深 D 、平均稀释率 D_r 、表面平均高度差 A_d 。影响因素 X_1, X_2, X_3, X_4 分别为激光功率 P 、扫描速度 S 、搭接率 O_r 、熔覆头到基体的距离 L 。响应变量与影响因素之间的模型关系表达式为^[27]

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^4 \alpha_{i+4} X_i^2 + \sum_{i < j}^4 \alpha_{ij} X_i X_j + \epsilon, \quad (2)$$

式中： $\alpha_0, \alpha_i, \alpha_{i+4}, \alpha_{ij}$ 为多项式的系数； α_0 为常数项；

$$H = 1.915 + 0.4801 \times P - 0.2198 \times S - 0.001647 \times O_r - 0.4571 \times L + 0.01004 \times S^2, \quad (3)$$

$$D = 0.467 - 0.672 \times P + 0.00011 \times S + 0.02117 \times O_r - 0.59 \times L - 0.000101 \times O_r^2 + 0.7706 \times P \times L - 0.000726 \times S \times O_r - 0.00555 \times O_r \times L, \quad (4)$$

$$D_r = -0.264 - 0.076 \times P + 0.0085 \times S + 0.01437 \times O_r - 0.093 \times L - 0.000141 \times O_r^2 + 0.2242 \times P \times L - 0.000767 \times S \times O_r + 0.01802 \times S \times L, \quad (5)$$

$$A_d = 0.3999 - 0.0232 \times P - 0.01727 \times S + 0.00015 \times O_r + 0.0527 \times L + 0.000081 \times O_r^2 + 0.001721 \times P \times O_r - 0.004925 \times O_r \times L. \quad (6)$$

由(3)~(6)式可得 H, D, D_r, A_d 的预测值, 则相对误差 Δ 可由(7)式^[28] 计算得到。

$$\Delta = \frac{|V - V_{\text{exp}}|}{V} \times 100\%, \quad (7)$$

式中： V 表示数据的实际测量值； V_{exp} 表示数据的预测值。

3 结果分析

为了检验响应面法得到的熔覆层形貌预测值

$\sum_{i=1}^4 \alpha_i X_i$ 为线性项； $\sum_{i=1}^4 \alpha_{i+4} X_i^2$ 为平方项； $\sum_{i < j}^4 \alpha_{ij} X_i X_j$ 为影响因子的相互作用项； ϵ 为误差项。

将实验数据导入到 Minitab 19 软件中, 选择逐步回归中的后退法, 设置显著性水平为 95%, 剔除不显著的项后得到多道熔覆层形貌与工艺参数之间的关系为

的相对误差及预测精度, 在 90 组样本中选择一部分样本作为对照组。对照组的选取会影响模型相对误差的大小, 因此对照组中样本的数量不能太少, 并且选择标准不能有较强的主观性。鉴于此, 从 10 号样本开始, 选取样本号为 10、20、30、40、50、60、70、80、90 的 9 个样本作为对照组, 并以对照组预测误差的平均值作为预测模型的平均相对误差。对照组试样熔覆层的界面形貌如图 4 所示。

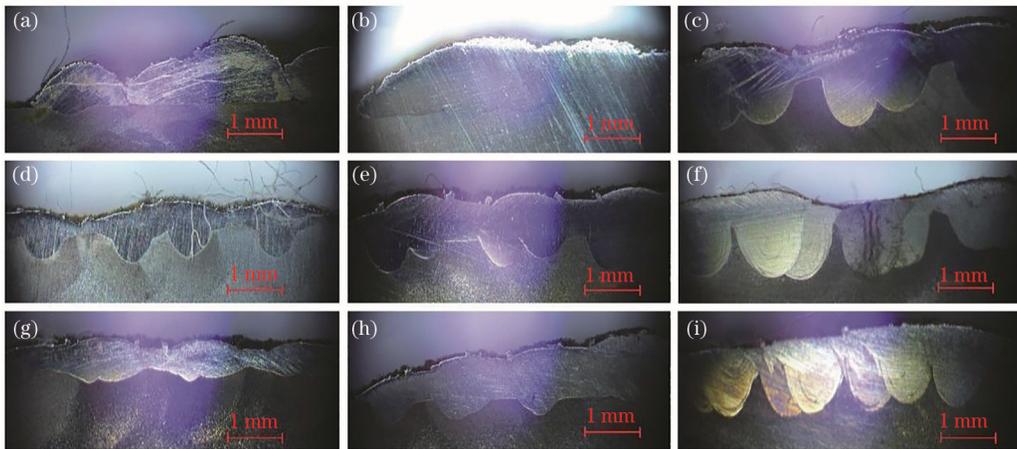


图 4 各样本熔覆层的截面形貌。(a) 10 号样本；(b) 20 号样本；(c) 30 号样本；(d) 40 号样本；(e) 50 号样本；(f) 60 号样本；(g) 70 号样本；(h) 80 号样本；(i) 90 号样本

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of cladding layers of each sample. (a) Sample 10; (b) sample 20; (c) sample 30; (d) sample 40; (e) sample 50; (f) sample 60; (g) sample 70; (h) sample 80; (i) sample 90

3.1 熔覆层的平均高度

熔覆层平均高度的预测结果如表 3 所示, 其中 H 为熔覆层平均高度的实际测量值, H' 为模型预测值,

Δ_1 为熔覆层平均高度预测值与测量值之间的相对误差。熔覆层平均高度预测模型的拟合优度 $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ 为 0.8971, 平均相对误差为 10.09%, 预测值与实际测

表 3 熔覆层平均高度的预测结果
Table 3 Predicted average height of cladding layers

No.	P/kW	$S/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$O_r/\%$	L/mm	H/mm	H'/mm	$\Delta_1/\%$
10	1.0	5	10	1.5	0.934	0.845	9.53
20	1.2	5	30	1.5	0.886	0.908	2.49
30	1.4	5	20	2.0	0.795	0.792	0.37
40	1.0	7	10	2.0	0.328	0.418	27.46
50	1.2	7	30	2.0	0.571	0.481	15.82
60	1.4	7	40	1.5	0.679	0.789	16.20
70	1.0	9	40	2.0	0.256	0.250	2.51
80	1.2	9	50	1.5	0.609	0.558	8.39
90	1.4	9	50	2.0	0.463	0.426	8.01
Average							10.09

量值较为吻合。

由(3)式可知影响因子的交互项对熔覆层平均高度的影响不显著。线性显著因子的大小可由图5求得。由图5可以看出扫描速度(因素B)对熔覆层平均高度的影响最显著,搭接率(因素C)对平均高

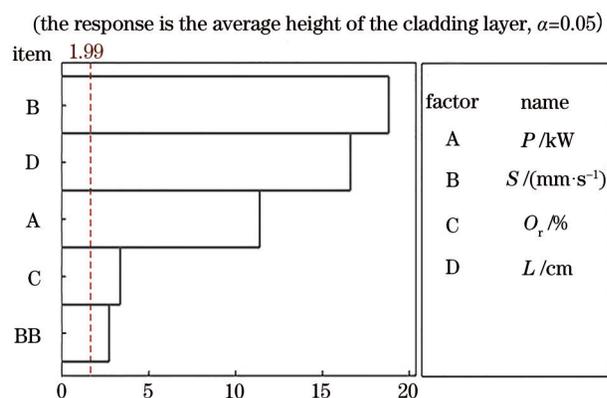


图 5 熔覆层平均高度的效应 Pareto 图
Fig. 5 Effect Pareto diagram of average height of cladding layer

度的影响最不显著。在其他参数不变的情况下,随着扫描速度降低,单位熔覆区域内获得的粉末量增加,因此熔覆层的平均高度增大。

3.2 基体的平均熔深

表4为基体平均熔深的预测结果,其中D为基体平均熔深的测量值,D'为模型的预测值, Δ_2 为基体平均熔深预测值与测量值之间的相对误差。基体平均熔深预测模型的拟合优度 $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ 为 0.9251,平均相对误差为 4.96%,模型具有较高的预测精度。

由图6可知激光功率(因素A)对基体平均熔深的影响最大,搭接率的影响最小。图7为显著交互项对基体平均熔深的影响,可以看出:随激光功率增大,熔深增加。这是因为,在其他参数不变的情况下,随着激光功率增加,单位面积上的功率密度增加,基体获得了更多的热输入,使得熔池能持续更长的时间,进而增大了基体的平均熔深。在低功率下,随着熔覆头到基体的距离逐渐增加,粉末流

表 4 基体平均熔深的预测结果
Table 4 Predicted average substrate melt depth

No.	P/kW	$S/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$O_r/\%$	L/mm	D/mm	D'/mm	$\Delta_2/\%$
10	1.0	5	10	1.5	0.147	0.149	1.02
20	1.2	5	30	1.5	0.327	0.349	6.64
30	1.4	5	20	2.0	0.638	0.593	7.08
40	1.0	7	10	2.0	0.221	0.197	10.97
50	1.2	7	30	2.0	0.393	0.390	0.95
60	1.4	7	40	1.5	0.426	0.409	3.96
70	1.0	9	40	2.0	0.125	0.137	9.71
80	1.2	9	50	1.5	0.229	0.227	1.11
90	1.4	9	50	2.0	0.442	0.429	2.98
Average							4.96

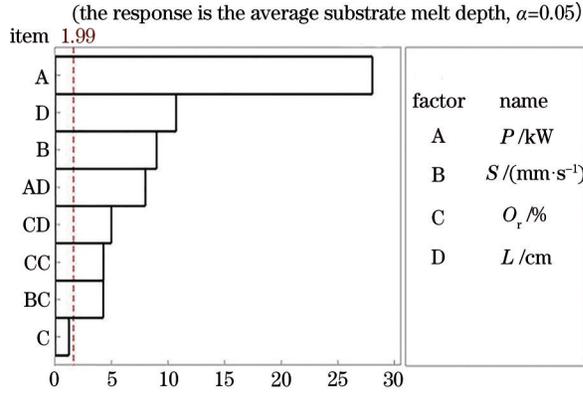


图 6 基体平均熔深的效应 Pareto 图

Fig. 6 Effect Pareto diagram of average substrate melt depth

的密集度降低,激光穿过粉末流输送至基体的能量增加,使得基体的熔深增加;之后,随着熔覆头到基体的距离继续增加,粉末的散射作用增强,增加了激光能量消耗,使得基体的熔深开始减小。在高功率下,随着熔覆头到基体距离的增加,激光能量充足,足以忽视粉末的散射作用,因此基体熔深持续增加;搭接率的增加使得单位面积上熔化粉末所需的能量增加,降低了基体上的能量输入,同时熔覆头到基体距离的增加降低了粉末流的密度,使得基体上的能量输入有所增加,在二者的交互作用下基体熔深变化不大;同理,扫描速度及搭接率的增加都会使单位时间内基体获得的能量降低,进而降低了基体熔深。

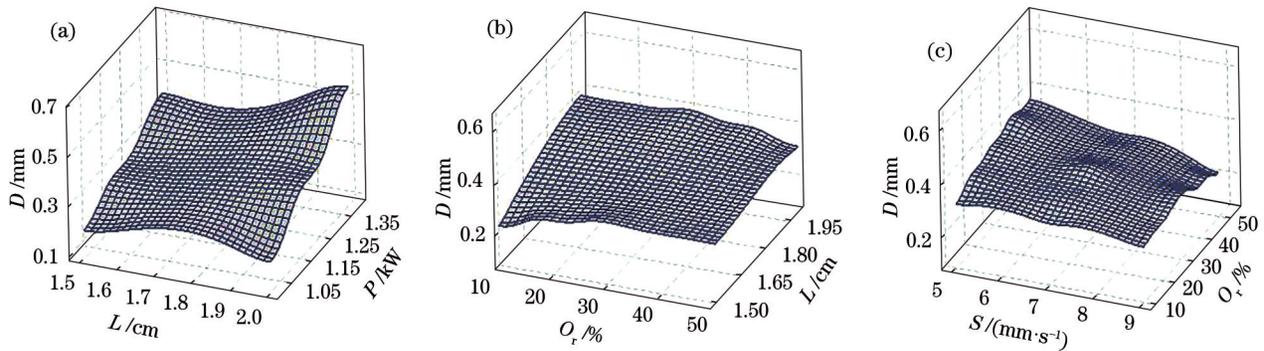


图 7 不同显著交互项下基体平均熔深的三维响应曲面。(a)激光功率 P 与熔覆头到基体的距离 L ; (b)搭接率 O_r 与熔覆头到基体的距离 L ; (c)扫描速度 S 与搭接率 O_r

Fig. 7 Three-dimensional response surfaces of average substrate melt depth under different significant interaction terms.

(a) Laser power P and distance from cladding head to the substrate L ; (b) overlap rate O_r and distance from cladding head to the substrate L ; (c) scanning speed S and overlap rate O_r

3.3 平均稀释率

表 5 为平均稀释率的预测结果,其中 D_r 为平均稀释率的测量值, D'_r 为平均稀释率模型的预测值, Δ_3 为平均稀释率预测值与测量值之间的相对误差。平均稀释率预测模型的拟合优度 $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ 为 0.9240, 平均相对误差为 8.83%。由图 8 可以看出,熔覆头到基体的

距离对平均稀释率的影响最大,搭接率对平均稀释率的影响最小。图 9 为不同显著交互项下平均稀释率的三维响应曲面。随着搭接率增大,基体单位面积上粉末堆积量及熔化能量增加,使得熔覆层面积增大、熔池面积减小,此时提高扫描速度会减小基体单位面积上的粉末堆积量及单位时间内的热输入量,使得平

表 5 平均稀释率的预测结果

Table 5 Predicted average dilution rate

No.	P/kW	$S/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$O_r/\%$	L/mm	$D_r/\%$	$D'_r/\%$	$\Delta_3/\%$
10	1.0	5	10	1.5	15.5	12.6	18.77
20	1.2	5	30	1.5	28.3	27.6	2.59
30	1.4	5	20	2.0	45.5	44.8	1.46
40	1.0	7	10	2.0	32.2	31.0	3.81
50	1.2	7	30	2.0	40.7	45.2	10.89
60	1.4	7	40	1.5	32.5	34.4	5.87
70	1.0	9	40	2.0	32.6	39.6	21.75
80	1.2	9	50	1.5	28.9	24.9	13.80
90	1.4	9	50	2.0	49.0	49.3	0.55
Average							8.83

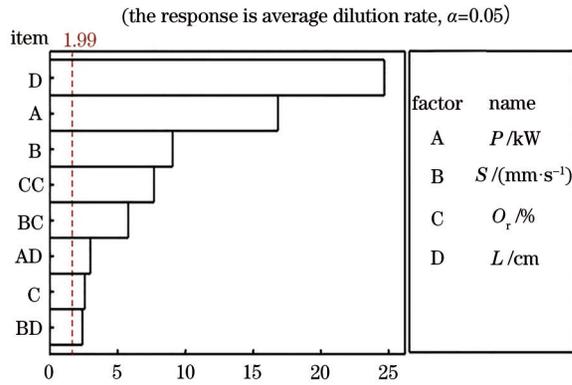


图 8 平均稀释率的效应 Pareto 图

Fig. 8 Effect Pareto diagram of average dilution rate

均稀释率先增大后减小。增大熔覆头到基体的距离会降低粉末的密集度,加之粉末的散射作用,熔覆层面积减小,熔池面积略有增大;此时,随着激光功率增大,基体获得的热量大幅增加,进而使熔池面积显著增加,增大了稀释率。扫描速度的提升使得单位熔覆

面积上获得的粉末减少,熔覆层面积减小,熔池面积增加;同时,熔覆头到基体距离的增加使得熔池面积进一步增加,进一步增加了基体对熔覆层的稀释。

3.4 表面的平均高度差

表 6 为表面平均高度差的预测结果,其中 A_d 为表面平均高度差的测量值, A'_d 为表面平均高度差模型的预测值, Δ_d 为表面平均高度差预测值与测量值之间的相对误差。表面平均高度差预测模型的拟合优度 $R_{\text{adjust}}^{(2)}$ 为 0.8545, 平均相对误差为 8.34%。由图 10 可知模型线性项中的扫描速度对表面平均高度差的影响最大,激光功率的影响最小。随着扫描速度增大,单位熔覆面积内获得的粉末减少,熔覆层整体平滑,不容易产生堆积。由图 11 可以看出:在搭接率小于 40% 的情况下,随着搭接率增大,多道重熔区域增加,单道熔覆层之间的高度差持续降低;在搭接率大于 40% 的情况下,粉末堆叠严重,随着激光功率增加,激光能量不能完全熔化所有粉

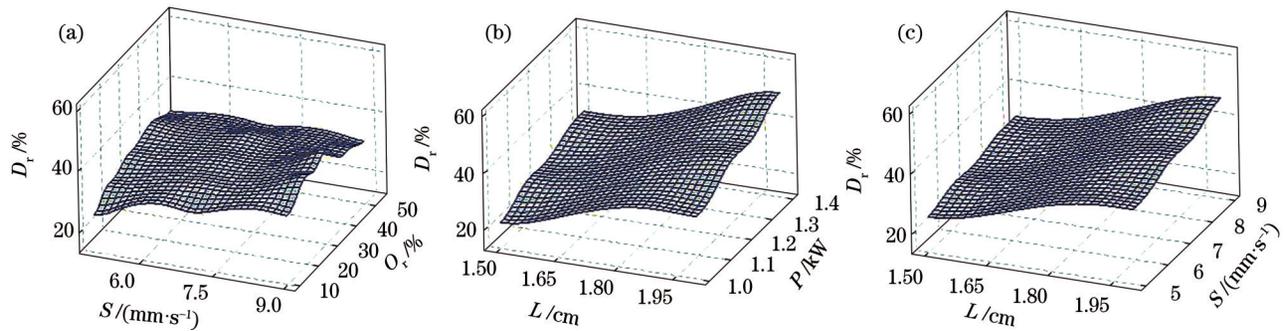


图 9 不同显著交互项下平均稀释率的三维响应曲面。(a)扫描速度 S 与搭接率 O_r ; (b)熔覆头到基体的距离 L 与激光功率 P ; (c)熔覆头到基体的距离 L 与扫描速度 S

Fig. 9 Three-dimensional response surfaces of average dilution rate under different significant interaction terms. (a) Scanning speed S and overlap rate O_r ; (b) distance from cladding head to the substrate L and laser power P ; (c) distance from cladding head to the substrate L and scanning speed S

表 6 表面平均高度差的预测结果

Table 6 Predicted average surface height difference

No.	P/kW	$S/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$O_r/\%$	L/mm	A_d/mm	A'_d/mm	$\Delta_d/\%$
10	1.0	5	10	1.5	0.337	0.322	4.32
20	1.2	5	30	1.5	0.253	0.282	11.58
30	1.4	5	20	2.0	0.286	0.273	4.47
40	1.0	7	10	2.0	0.280	0.290	3.27
50	1.2	7	30	2.0	0.196	0.200	2.40
60	1.4	7	40	1.5	0.239	0.262	9.85
70	1.0	9	40	2.0	0.115	0.137	19.54
80	1.2	9	50	1.5	0.203	0.240	18.03
90	1.4	9	50	2.0	0.153	0.155	1.58
Average							8.34

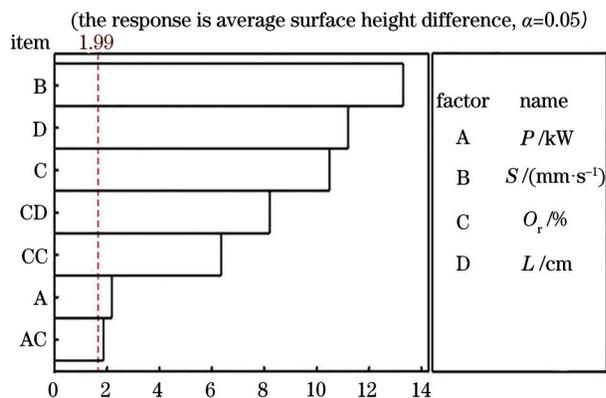


图 10 表面平均高度差的效应 Pareto 图
Fig. 10 Effect Pareto diagram of average surface height difference

末,使得单道熔覆层的高度差增大。在低搭接率的情况下,增加熔覆头到基体的距离会增加熔覆层获得的能量,熔融状态下的熔覆层在重力作用下不断流动,有流平的趋势,但随着粉末散射作用的增强,激光能量不足以熔化全部粉末,使得熔覆层表面的平均高度差增大。在高搭接率下,激光能量不足以熔化全部粉末,随着熔覆头到基体的

距离增加,熔覆层获得的能量增加,使得熔化后的熔覆层上部的流动性增强,进而降低了熔覆层的表面高度差。

模型的拟合优度越大,预测的精度越高,平均相对误差越小。综上,基体平均熔深预测模型的拟合优度高达 0.9251,平均相对误差仅为 4.96%,而熔覆层平均高度、平均稀释率、表面平均高度差预测模型的拟合优度分别为 0.8971、0.9240、0.8545,平均相对误差分别为 10.09%、8.83%、8.34%。这与对照组的选取有一定的关系。4 组预测模型的平均相对误差均可认为小于或等于 10%^[10-15],因此,该模型对多道激光熔覆形貌预测有重要意义。

3.5 工艺参数优化

以 90 组实验数据为基础,结合多道熔覆层形貌预测模型,选定优化条件为:熔覆层平均高度 0.6~0.8 mm,稀释率小于 25%,表面平均高度差最小。预测及实验所用工艺参数以及实验结果如表 7 所示,实验结果如图 12 所示。由表 7 数据可知工艺参数 I 对应的熔覆结果最为理想,因此选定工艺参数 I 作为优化结果。

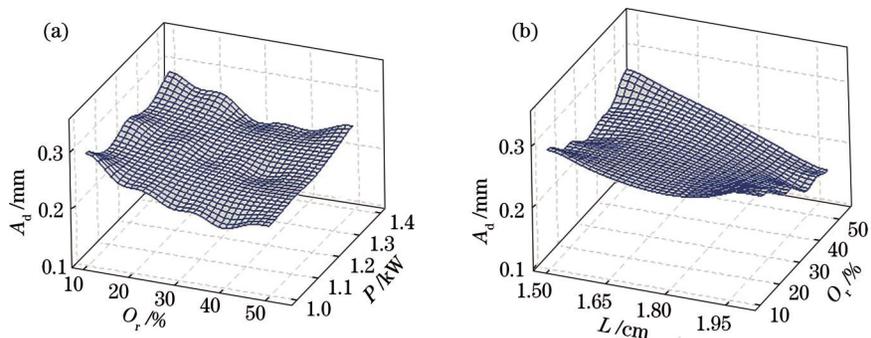


图 11 不同显著交互项下表面平均高度差的三维响应曲面。(a) 搭接率 O_r 与激光功率 P ; (b) 熔覆头到基体的距离 L 与搭接率 O_r
Fig. 11 Three-dimensional response surfaces of average surface height difference under different significant interaction terms.

(a) Overlap rate O_r and laser power P ; (b) distance from cladding head to the substrate L and overlap rate O_r

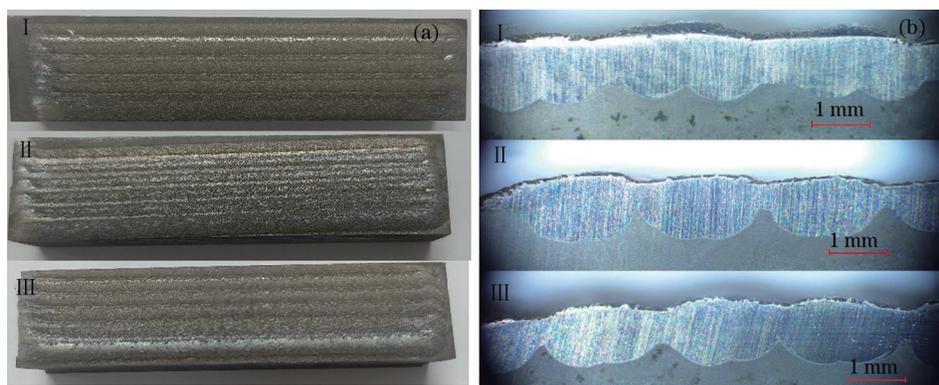


图 12 参数优化后的熔覆层形貌。(a) 表面形貌; (b) 截面形貌
Fig. 12 Cladding layer morphologies after optimization. (a) Surface morphology; (b) cross-sectional morphology

表 7 优化结果及验证
Table 7 Optimization results and validation

	No.	P /kW	S /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	O_r /%	L /mm	H /mm	D /mm	D_r /%	A_d /mm
Predict	I	1.1	6	30	1.4	0.796	0.270	23.6	0.272
	II	1.2	8	45	1.4	0.661	0.267	24.6	0.261
	III	1.3	9	45	1.3	0.706	0.259	23.3	0.266
Experimental	I	1.1	6	30	1.4	0.829	0.246	22.1	0.268
	II	1.2	8	45	1.4	0.698	0.424	36.8	0.209
	III	1.3	9	45	1.3	0.776	0.318	29.6	0.230

4 结 论

本文基于同轴送粉多道激光熔覆实验,利用响应面法建立了熔覆层形貌的预测模型,并利用部分样本数据与预测数据进行对比,得到了模型的平均相对误差。

研究结果表明:扫描速度对熔覆层平均高度的影响最为显著,激光功率对基体平均熔深的影响最为显著,熔覆头到基体的距离对基体平均稀释率的影响最为显著,扫描速度对表面平均高度差的影响最为显著。4种熔覆层形貌预测模型中预测精度最高的是基体平均熔深,平均相对误差仅为4.96%,熔覆层平均高度、平均稀释率、表面平均高度差的平均相对误差分别为10.09%、8.83%、8.34%,均具有较高的预测精度。

相比以往的其他研究,本文从多道激光熔覆入手,将更多的工艺参数考虑在内,并利用具有全面分析能力的响应面法得到了工艺参数间的交互作用。

采用本研究模型可以在实际加工前对熔覆层形貌尺寸进行预测并加以控制,进而获得理想的表面形貌。所建立的多道激光熔覆层形貌预测模型对大面积激光熔覆层形貌的预测及优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Ding Z Y, Ma Z B, Li W Q, et al. Study on microstructure and properties of laser cladding Fe-based alloy powder cladding layer[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(18): 100-102, 107.
丁紫阳, 马宗彬, 黎文强, 等. 激光熔覆 Fe 基合金粉末熔覆层的组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(18): 100-102, 107.
- [2] Zhu L D, Wang S H, Pan H C, et al. Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13

steel powder based on laser cladding technology[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 344-354.

- [3] Shen D J, Liao B, Wang Y L. Thinning effect of coaxial powder feeding on laser cladding microstructures [J]. Applied Laser, 2002, 22(3): 290-292.
沈德久, 廖波, 王玉林. 同轴送粉对激光熔覆组织的细化作用[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 290-292.
- [4] Zhang H Q, Zhu L D, Xue P S. Laser direct metal deposition of variable width thin-walled structures in Inconel 718 alloy by coaxial powder feeding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(3): 821-840.
- [5] Wang X J, Yan Y L. Microstructure and properties of laser cladding 316L stainless steel coating assisted by magnetic field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 231401.
王新军, 闫迎亮. 磁场辅助激光熔覆 316L 不锈钢涂层的微结构及性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 231401.
- [6] Pang X T, Gong Q F, Wang Z J, et al. Microstructures and mechanical properties of 30CrMnSiA and 30CrMnSiNi2A high-strength steels after laser-cladding repair[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1102002.
庞小通, 龚群甫, 王志杰, 等. 30CrMnSiA 和 30CrMnSiNi2A 高强度钢激光熔覆修复后的组织特征与力学性能[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1102002.
- [7] Han X, Feng X F, Zhang Y H, et al. Research progress of powder transport behavior of coaxial powder feeding laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 21-23, 27.
韩鑫, 冯校飞, 张云浩, 等. 同轴送粉激光熔覆粉末传输行为研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 21-23, 27.
- [8] Wang S Y, Zhao Y, Xie M X, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and properties of Fe-based alloyed layer on ductile iron hot roller surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(5):

- 243-249.
王硕煜, 赵毅, 解明祥, 等. 激光扫描速度对球墨铸铁热轧辊表面铁基合金化层组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(5): 243-249.
- [9] Li Y Y. Effect of gas-powder flow on the molten pool morphology for coaxial powder-feed laser cladding [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
李媛媛. 同轴送粉式激光熔覆气体-粉末流对熔池形貌的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [10] Gao W Y, Zhao S S, Liu F L, et al. Effect of defocus manner on laser cladding of Fe-based alloy powder[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 248: 54-62.
- [11] Devojno O G, Feldshtein E, Kardapolava M A, et al. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 195-206.
- [12] Zhao H Y, Yang X Q, Shu F Y, et al. Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(1): 51-54, 59, 115-116.
赵洪运, 杨贤群, 舒凤远, 等. 激光熔覆层形貌预测对比分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 51-54, 59, 115-116.
- [13] Zhang B F, Hong L. Prediction and research of laser fuse cladding appearance and size[J]. China Heavy Equipment, 2012(1): 39-40.
张炳发, 洪蕾. 激光熔覆层形貌尺寸预测研究[J]. 中国重型装备, 2012(1): 39-40.
- [14] Meng X W. Prediction of laser fuse cladding appearance made from Ni-WC alloy powder[J]. China Heavy Equipment, 2014(1): 33-36.
孟祥伟. Ni基-WC合金粉末激光熔覆层形貌的预测[J]. 中国重型装备, 2014(1): 33-36.
- [15] Fan P F, Zhang G. Prediction on geometrical characteristics of cermet laser cladding based on linear regression and neural network[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 353-359, 368.
范鹏飞, 张冠. 基于线性回归和神经网络的金属陶瓷激光熔覆层形貌预测[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 353-359, 368.
- [16] Lian G F, Yao M P, Chen C R, et al. Control of the quality and efficiency of multi-track overlapping laser cladding[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 229-239.
练国富, 姚明浦, 陈昌荣, 等. 激光熔覆多道搭接成形质量与效率控制方法[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 229-239.
- [17] Pang Y F, Fu G Y, Wang M Y, et al. Parameter optimization of high deposition rate laser cladding based on the response surface method and genetic neural network model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602112.
庞伟帆, 傅戈雁, 王明雨, 等. 基于响应面法和遗传神经网络模型的高沉积率激光熔覆参数优化[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602112.
- [18] Meng G R, Zhu L D, Zhang J D, et al. Statistical analysis and multi-objective process optimization of laser cladding TiC-Inconel 718 composite coating[J]. Optik, 2021, 240: 166828.
- [19] Wang D, Li T, Shi B W, et al. An analytical model of bead morphology on the inclined substrate in coaxial laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126944.
- [20] Lian G F, Yang S, Chen C R, et al. Study on single-track profile control method for laser cladding trajectory [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(4): 438-446.
练国富, 杨谟, 陈昌荣, 等. 激光熔覆单层单道轨迹成形控制方法[J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 438-446.
- [21] Xu B, Tian W. The geometrical features of single laser cladding for the green remanufacturing[J]. Applied Laser, 2010, 30(4): 254-258.
许波, 田威. 面向绿色再制造的单道激光熔覆几何特征研究[J]. 应用激光, 2010, 30(4): 254-258.
- [22] Zhang Q M, Zhong M L, Yang S, 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): 2, 51-54.
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): 2, 51-54.
- [23] Wang T, Qiao W L, Wang N, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211403.
王涛, 乔伟林, 王宁, 等. 扫描速度对激光熔覆 NiCoCrAlY涂层组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211403.
- [24] Xu H Z, Ge H H, Wang J F, et al. Effects of process parameters upon chromium element distribution in laser-cladded 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1202004.
徐瀚宗, 葛鸿浩, 王杰锋, 等. 工艺参数对 316L 不锈钢激光熔覆层中 Cr 元素分布的影响[J]. 中国激光,

- 2020, 47(12): 1202004.
- [25] Cong Y J, Zhang H Y. Optimization of fermentation process of xylitol fig mulberry fruit yogurt using fuzzy mathematics method combined with response surface method[J]. Food Research and Development, 2021, 42(2): 127-135.
- 丛懿洁, 张慧云. 模糊数学法结合响应面法优化木糖醇无花果桑葚果粒酸奶工艺[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 127-135.
- [26] Li L X, Zhang D Q, Li J H, et al. Residual stress analysis and shape optimization of laser clad Ni-based alloy coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171405.
- 李伦翔, 张德强, 李金华, 等. 激光熔覆镍基合金形貌优化及残余应力分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171405.
- [27] Vahiddastjerdi H, Rezaeian A, Toroghinejad M R, et al. Optimizing pulsed Nd: YAG laser welding of high-Mn TWIP steel using response surface methodology technique[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105721.
- [28] Liu X H, Lin Y Y, Wang Z F. Group variable selection for relative error regression[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2016, 175: 40-50.