

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905153

连续热镀锌生产线中锌层重量影响因素模拟与优化*

徐巍,孔建益,王兴东,刘怀广

(武汉科技大学 冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室 武汉 430081)

摘要:针对锌层重量控制过程中存在非线性和多变量的对象特性,提出一种基于正交试验设计、数值模拟及响应面法的锌层重量控制影响因素模拟与优化分析新方法。以单面镀锌层重量在 $100\sim 400\text{ g/m}^2$ 之间的热镀锌生产过程为研究对象,采用试验设计(DOE)和现场数据采集方法获取实验样本数据,运用极差分析得到各因素对响应指标的主次顺序。根据实验结果推导出线性回归公式,并采用含交互作用列的正交试验对模型进行优化,以修正实验结果。结果表明:拟合得到的二次回归方程模型的复相关系数为 $R^2=0.9976$, $P<0.0001$ 。根据实验结果得出影响锌层重量变化的主次因素关系顺序是:吹气压力、带钢速度、吹气压力与带钢速度的交互作用、喷嘴距离、喷嘴缝隙、吹气压力与喷嘴距离的交互作用。

关键词:连续热镀锌;锌层重量;正交试验设计;响应面法

中图分类号:TF701.2 TH162.1 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:450.35 460.25

Simulation and optimization of factors influencing the weight of zinc coating in continuous hot-dip galvanizing line

Xu Wei, Kong Jianyi, Wang Xingdong, Liu Huaiguang

(Key Laboratory of Metallurgical Equipment & Control Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The process of zinc coating weight control has the characteristics of non-linear and multi-variable. A new simulation and optimization analysis method is proposed to control the influence factors of zinc coating weight control, which is based on orthogonal experimental design, numerical simulation and response surface method. The hot galvanizing production process with the weight of single surface galvanizing layer between 100 and 400 g/m^2 is taken as the research object. Orthogonal experimental and on-line data collection methods are used to collect sample data. The importance of each factor on the response index is ranked by range analysis. Based on the experimental results, the linear regression formula is derived and the orthogonal experiment with interaction columns is used to analyze the influence of factor interaction on the model. In this way, experimental results can be modified. Results show that the multiple correlation coefficient of the fitted quadratic regression equation model is $R^2 = 0.9976$ and $P < 0.0001$. According to the experimental results, the factors influencing the weight change of zinc coating is ranked as the order of jet pressure, strip velocity, interaction between jet pressure and strip velocity, nozzle distance, nozzle gap, and interaction between jet pressure and nozzle distance.

Keywords: continuous hot dip galvanizing; zinc coating weight; orthogonal experimental design; response surface method

0 引言

热镀锌产品具有良好的机械加工性能和很强的耐腐蚀性能,在机械工业、钢结构建筑、汽车制造、家电制造、通讯及电力等诸多领域具有广泛的应用。在连续热镀锌生产线中,气刀是控制锌层重量的核心设备。在正常工

艺生产速度下,通过调节吹气压力、喷嘴与带钢距离、刀唇间隙等参数使镀锌产品在满足用户对锌层重量要求的同时,减少锌原料消耗,降低生产成本。

近年,锌层重量控制研究主要围绕设备技改和建模预测两方面。工艺控制研究包含气刀设备改进、浸锌时间、带钢拉取速度等方面。例如,Kwon等^[1]研究了Coanda喷嘴偏角对射流结构和钢板表面冲击压力分布的

影响,并通过数值分析与实验验证了气刀喷嘴狭缝的偏转角越小,冲击压力越大。Choi等^[2]对刀唇喷嘴进行了优化设计,分析了喷嘴倾斜对涂覆效果的影响,结果表明,气刀系统轻微倾斜是抑制飞溅的最有效方法。Yahyaee等^[3]提出了一种新型的多缝射流气刀的结构形式,以替代传统的单槽气刀。

建模预测则是研究利用生产线参数构建数学模型对锌层重量进行预测与控制。例如,Naphade等^[4]建立了一个预测锌层厚度的数学模型,该模型预测了涂层质量随带钢速度、喷嘴压力、刀带间距、喷嘴开度等不同操作参数的变化规律,结果表明,预测值与测量值的偏差 $\leq \pm 15\%$ 。Hrymak等^[5]和Elsaadawy等^[6]将压力和壁面剪应力分布描述为喷嘴缝隙和喷嘴距离(Z/d)的函数以预测锌层重量,特别对涂层重量小于 75 g/m^2 的区间,预测值与测量值最大偏差为 8% 。Chen等^[7]提出一种基于正交数组的实验设计,找到锌层重量与生产线参数之间的关系,并结合回归公式、气刀控制系统和过程计算机,实现了一种新型的气刀前馈控制系统。

国内学者也开展了相关研究。例如,董占东^[8]使用风机串联的方法对气刀进行增压改造,有效地提高了机组速度。张顺等^[9]找出锌层厚度与浸锌时间之间的关系规律,并拟合得出锌层厚度与浸锌时间之间的关系系数值,结果表明,随着钢板厚度的增加,锌层厚度增大且锌层厚度增长的速度也加快。鲍成人等^[10-11]和赵兴时等^[12]运用Fluent软件对气刀吹锌过程中气体流动情况进行数值模拟,对各工艺参数对锌层厚度的影响规律进行分析,但没有进一步分析各工艺参数的综合影响。林莉军^[13]介绍了控制模型的基本式,但没有最终确定模型系数。

上述学者的研究成果有利于提高锌层控制精度和生产效率。但随着热镀锌技术在家电及汽车制造业中的广泛应用,对其表面质量的要求越来越高,常用热镀锌钢板的单面镀层重量范围已提高至 $100\sim 200\text{ g/m}^2$,甚至更高。此外,影响锌层重量控制的因素存在非线性和多变量的对象特性。为提高锌层重量控制的精度和满足更高的目标重量范围,本文进行热镀锌生产线中锌层重量的影响因素分析及参数优化设计。通过参数的正交试验设计,研究生产线速度、吹气压力、喷嘴距离、喷嘴间隙对目标锌层重量的影响,并利用响应面法对多个参数进行可视化优化设计。

1 锌层重量控制影响因素分析

应用流体冲击学的原理来控制带钢镀锌层厚度的方法,习惯上称为吹气法镀锌,如图1所示。这种方法采用的是一个横贯整个带钢宽度的缝形喷嘴,可喷出连续的像刀一样的扁平气流,刮掉带钢表面多余的锌。

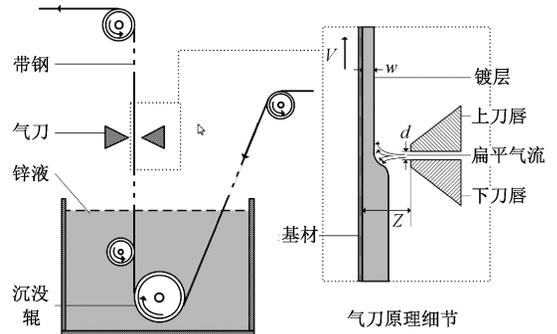


图1 吹气法原理

Fig.1 Schematic diagram of hot dip galvanizing

在吹气法热镀锌中,影响锌层厚度的因素有多种,包括吹气压力、喷吹角度、喷嘴距离、气刀高度、喷嘴缝隙、带钢的速度、温度、厚度、宽度、板形和表面粗糙度,锌液的温度以及化学成分等。气刀的各参数和带钢速度是影响较大的6个因素。根据长期生产实践证实,气刀的最佳喷吹角度为 0° ,这一试验结果已得到全世界热镀锌工作者的认同^[14]。气刀高度的调节主要取决于吹气压力和带钢速度。生产条件包括原料卷、锌锭的成分等,环境条件包括环境温度、湿度等。这些参数在生产中变化不显著,对镀锌的影响可以忽略不计,因此重点讨论对镀锌影响大的因素:吹气压力、喷嘴与带钢距离、喷嘴缝隙、带钢速度。

在生产实践中,上述4个因素对锌层重量的影响往往综合交错而不是互相独立。因而,必须从大量数据中研究统计规律,以提高控制锌层重量的准确性。

2 基于正交试验的非线性模型拟合方法

通过试验设计方法(design of experiments, DOE)设计一系列试验,可以分辨某生产过程中的最关键影响因素。DOE在整个质量控制过程中扮演了非常重要的作用。正交试验设计是常用的多因素DOE方法^[15-16]。

2.1 正交试验设计

正交试验设计^[17]是一种解决多因素、多水平实验问题的有效方法,它利用正交表 $L_M(Q^N)$ 安排少数次试验,就能找到最好或者较好的试验条件,因此它被广泛地用于寻优。 $L_M(Q^N)$ 表示一个具有 N 个因素和 Q 个水平的正交表,其中 L 表示拉丁方, M 表示水平组合数。对 N 因素、 Q 水平的试验问题,若进行全面试验法,则要做 Q^N 组试验,但是当 Q 和 N 很大时,做 Q^N 组试验的代价很大或者不可能,而应用正交表 $L_M(Q^N)$ 来实施正交试验,只需要选择 M 个组合去做试验。这里 M 一般远小于 Q^N 。以正交表 $L_4(2^3)$ 为例,如表1所示,对3因素、2水平的问

题而言,若依据正交表 $L_4(2^3)$ 来进行正交试验,只需做4次试验,但若进行全面组合试验,则需 $2^3=8$ 次试验。

表1 3因素、2水平正交表 $L_4(2^3)$

Table 1 Orthogonal array for 3 factors and 2 levels $L_4(2^3)$

试验组合	因素1	因素2	因素3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

数组正交性的含义:1)对任一列中的因素,每个水平出现的次数相同;2)对任两列中的两个因素,两个水平的任一组合出现的次数相同;3)所选组合均匀分布在所有可能的组合中。正交设计对求解加性模型和二次模型是最优的,所选择的组合很好的代表了所有可能组合,正交性的意义如图2所示^[18]。

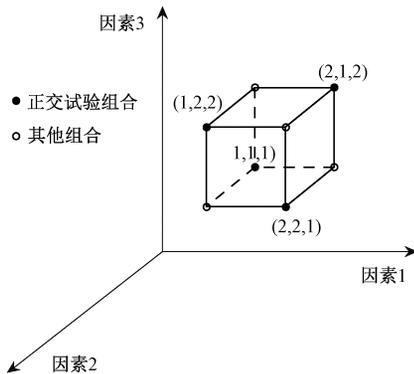


图2 正交表 $L_4(2^3)$ 的正交性

Fig.2 Orthogonality of the orthogonal array $L_4(2^3)$

2.2 正交数组构建方法

对于正交试验数组 $L_M(Q^N)$,其中 Q 为奇数, J 为满足式(1)的正整数, $M=Q^J$ 。构建算法如下^[15]:

$$N = \frac{Q^J - 1}{Q - 1} \quad (1)$$

1) 构建基本列

FOR $k=1$ TO J DO

BEGIN

$$j = \frac{Q^{k-1} - 1}{Q - 1} + 1;$$

FOR $i=1$ TO Q^J DO

$$a_{i,j} = \left[\frac{i-1}{Q^{J-k}} \right] \bmod Q;$$

END

2) 构建非基本列

FOR $k=2$ T J DO

BEGIN

$$j = \frac{Q^{k-1} - 1}{Q - 1} + 1;$$

FOR $s=1$ TO $j-1$ DO

FOR $t=1$ TO $Q-1$ DO

$$a_{j+(s-1)(Q-1)+t} = (a_s \times t + a_j) \bmod Q;$$

END

3) $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 范围内各 $a_{i,j} + 1$

2.3 含交互作用的正交试验设计

若因素 A、B 有一级交互作用记作 $A \times B$ 。在式(2)中若存在交叉项 $x_i x_j$,则表示 x_i 和 x_j 的交互作用。当因素间的联合配对对试验指标存在影响时,应进行有交互作用的 DOE。其主要步骤如下。

1) 选取合适的正交表

将交互作用视作因素,与试验因素一并考虑。交互作用列与试验因素列合计总列数,再选择合适的正交表。

2) 表头设计

严格按照交互作用表进行配列,各因素及交互作用不能任意安排。

2.4 非线性最小二乘法拟合

在线性回归的基础上,为获得更精确的拟合结果,本文采用非线性模型对有交互作用的正交试验结果进行拟合,如式(2)所示。

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 a_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式中: a_0, a_i 和 a_{ij} 为待定系数,共 10 个。

在对非线性模型进行拟合的过程中,求解模型参数本质上是一个非线性最小二乘问题。对于试验中的 n 组因素水平与指标值 (x_i, y_i) ,函数模型为 $f(x_i, a)$, a 为 m 维模型参数,目标函数则可表示为式(3):

$$\min Q(a) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a)]^2 \quad a \in R^m \quad (3)$$

为求得式(3)的最优解,本节采用信赖域牛顿法。信赖域牛顿法在给定初值 $a^{(k)}$ 后,先确定一个变化范围,通常取 $a^{(k)}$ 为中心的球域,称为信赖域,在此域内优化目标函数的二次逼近式。因此避免了牛顿法在给定初值 $a^{(k)}$ 后,先定义搜索方向,再在这个方向上作一维搜索所产生的不能全局收敛的问题。

对于目标函数式(3),设第 k 次迭代点为 $a^{(k)}$,将 $Q(a)$ 在 $a^{(k)}$ 处进行泰勒展开,并忽略高阶项。

$$Q(a) \approx Q(a^{(k)}) + \nabla Q(a^{(k)})^T (a - a^{(k)}) + \frac{1}{2} (a - a^{(k)})^T \nabla^2 Q(a^{(k)}) (a - a^{(k)}) \quad (4)$$

记 $d = a - a^{(k)}$,得到二次模型:

$$\varphi_k(d) \approx Q(a^{(k)}) + \nabla Q(a^{(k)})^T d +$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{d}^T \nabla^2 Q(\mathbf{a}^{(k)}) \mathbf{d} \quad (5)$$

给定常数 r_k 为信赖域半径, 则信赖域表示为 $\|\mathbf{d}\| \leq r_k$ 。此时若 $\mathbf{a}^{(k)}$ 的取值范围是给定的, 进而可通过限定 \mathbf{d} 的取值将求解限定在合理的范围内, 目标函数式(3)将转化为依次解一系列子问题。

$$\min \varphi_k(\mathbf{d}) \text{ s.t. } \|\mathbf{d}\| \leq r_k \quad (6)$$

通过一维搜索方法解得式(6)的最优解 $\mathbf{d}^{(k)}$, 再判断 $\mathbf{a}^{(k)} + \mathbf{d}^{(k)}$ 能否作为式(3)的近似解。根据函数值实际下降量与预测下降量之比判断 $\mathbf{d}^{(k)}$ 的正确性。

$$\rho_k = \frac{Q(\mathbf{a}^{(k)}) - Q(\mathbf{a}^{(k)} + \mathbf{d}^{(k)})}{Q(\mathbf{a}^{(k)}) - \varphi_k(\mathbf{d}^{(k)})} \quad (7)$$

若 $\rho_k \leq \mu$, 则认为 $\mathbf{d}^{(k)}$ 逼近失败, 令 $\mathbf{a}^{(k+1)} = \mathbf{a}^{(k)}$; 反之认为逼近成功, 令 $\mathbf{a}^{(k+1)} = \mathbf{a}^{(k)} + \mathbf{d}^{(k)}$; 并根据 ρ_k 计算新的信赖域半径。如果 $\rho_k \leq \mu$, 令 $r_{k+1} = r_k/2$, 如果 $\mu < \rho_k < \eta$, 令 $r_{k+1} = r_k$, 如果 $\rho_k \geq \eta$, 则令 $r_{k+1} = 2r_k$ 。由新起点 $\mathbf{a}^{(k+1)}$ 和信赖域半径 r_{k+1} 重新代入式(5)、(6) 计算, 如此反复直至结果收敛。

3 实 验

3.1 构建锌层重量控制因素正交数组

根据钢厂的生产实际建立连续热镀锌生产线关键 4 因素 3 水平表, 如表 2 所示。

表 2 锌层重量控制关键因素水平表

Table 2 Factors and levels for zinc coating weight control

水平	因素			
	A (带钢速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	B (吹气压力/ kPa)	C (喷嘴距离/ mm)	D (喷嘴缝隙/ mm)
1	90	20	8	1.0
2	120	30	10	1.2
3	150	40	12	1.4

使用 2.2 节算法构建正交数组 $L_M(Q^N)$, 其中 $Q = 3$, $N = 4$ 。由式(1)可知, $J = 2$ 。则 $M = Q^J = 9$ 。

1) 构建基本列 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$

当 $k = 1$,

$$j = \frac{Q^{k-1} - 1}{Q - 1} + 1 = 1$$

$$\mathbf{a}_1 = [000111222]^T$$

当 $k = 2$,

$$j = \frac{Q^{k-1} - 1}{Q - 1} + 1 = 2$$

$$\mathbf{a}_2 = [012012012]^T$$

2) 构建非基本列 $\mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$

因为 $J = 2$,

则 $k = 2$,

$$j = \frac{Q^{k-1} - 1}{Q - 1} + 1 = 2,$$

$s = 1$

当 $t = 1$,

$$\mathbf{a}_3 = (\mathbf{a}_1 \times 1 + \mathbf{a}_2) \bmod 3 =$$

$$[0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 3 \ 4]^T \bmod 3 =$$

$$[0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 0 \ 2 \ 0 \ 1]^T$$

当 $t = 2$

$$\mathbf{a}_4 = (\mathbf{a}_1 \times 2 + \mathbf{a}_2) \bmod 3 =$$

$$[0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4 \ 5 \ 6]^T \bmod 3 =$$

$$[0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 0]^T$$

3) $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 内各 $\mathbf{a}_{i,j} + 1$,

最后将 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \mathbf{a}_4$ 组合成 $L_9(3^4)$ 。

3.2 实验数据采集

实验采用 Thermo RM310EC 在线涂层测厚仪测量锌层重量, 其检测结果如图 3 所示。该设备虽可对钢卷锌层重量进行实时检测, 但不能自动获得其数据并进行有效分析计算。

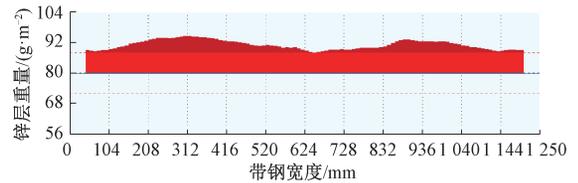


图 3 在线测量锌层重量结果

Fig.3 On-line measurement results of zinc coating weight

本文采用共享网络和端口镜像方式对检测数据进行侦听。首先将网卡模式设置为混杂模式, 工作在混杂模式下的网卡接受所有流过网卡的帧。再对包结构进行解析, 获得了 5 种电文信息, 包括实时测量值、分段汇总值等信息, 对这些信息分析和测试, 实现了数据分类和分离, 确定了以实时测量值的电文信息作为基础数据, 并建立数据运算方法, 在此基础上开发了数据采集软件。部分实际抓取数据如表 3 所示。

下文中所使用的锌层重量值即为在数据采集基础上计算所得的 3 点平均值 (W), 其确定方法为:

1) 通过在线锌层测厚仪至少 5 次全宽横向移动, 分别测量钢卷的操作侧/中部/传动侧的单个值。

2) 计算操作侧的平均值, 中部的平均值, 传动侧的平均值。

3) 对这 3 个结果进行平均, 求得钢卷单面的 3 点平均值。

表3 部分实际抓取数据
Table 3 Partial measurement data

表面	钢卷号	长度位置	横向位置	锌层重量
		mm	mm	($g \cdot m^{-2}$)
TOP	02002434	3 391	507	74.1
BUTTON	02002434	3 391	507	74.3
TOP	02002434	3 392	506	74.3
BUTTON	02002434	3 392	506	75.9
TOP	02002434	3 393	501	74.0
BUTTON	02002434	3 393	501	75.7
TOP	02002434	3 394	493	73.5
BUTTON	02002434	3 394	493	74.1
TOP	02002434	3 395	479	72.6
BUTTON	02002434	3 395	479	72.2
TOP	02002434	3 396	458	70.2
BUTTON	02002434	3 396	458	70.6
TOP	02002434	3 397	432	68.8
BUTTON	02002434	3 397	432	68.0

3.3 实验结果

结合 3.1 节中的正交数组和 3.2 节中的检测结果构造不考虑交互作用的正交试验结果如表 4 所示。

表4 不考虑交互作用的 $L_9(3^4)$ 正交试验结果
Table 4 Orthogonal experiment results of array $L_9(3^4)$ without considering interaction

试验号	因素				指标 $W/(g \cdot m^{-2})$
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	223
2	1	2	2	2	148
3	1	3	3	3	110
4	2	1	2	3	308
5	2	2	3	1	214
6	2	3	1	2	135
7	3	1	3	2	390
8	3	2	1	3	257
9	3	3	2	1	194
R_j	120	160.67	33	14.67	

在表 4 结果的基础上增加试验点,进行有交互作用 ($A \times B, B \times C$) 的正交试验结果如表 5 所示。表中喷嘴缝隙由于对锌层重量的影响较小,取 $d = 1.2$ mm 固定值。对于 3 水平正交试验,每列有 2 个自由度,而交互作用列有 4 个自由度,因此 2 个 3 水平因素的交互作用列占 2

列。第 6~7、10~13 列为空列(误差列),由于篇幅原因未在表 5 中列出。

表5 有交互作用的 $L_{27}(3^{13})$ 正交试验结果
Table 5 Orthogonal experiment results of array $L_{27}(3^{13})$ considering interaction

试验号	因素及其所在列							指标 $W/(g \cdot m^{-2})$
	1 A	2 B	3 A×B1	4 A×B2	5 C	8 B×C1	9 B×C2	
1	1	1	1	1	1	1	1	200
2	1	1	1	1	2	2	2	224
3	1	1	1	1	3	3	3	237
4	1	2	2	2	1	2	2	136
5	1	2	2	2	2	3	3	150
6	1	2	2	2	3	1	1	163
7	1	3	3	3	1	3	3	100
8	1	3	3	3	2	1	1	115
9	1	3	3	3	3	2	2	125
10	2	1	2	3	1	1	2	290
11	2	1	2	3	2	2	3	302
12	2	1	2	3	3	3	1	312
13	2	2	3	1	1	2	3	189
14	2	2	3	1	2	3	1	198
15	2	2	3	1	3	1	2	204
16	2	3	1	2	1	3	1	135
17	2	3	1	2	2	1	2	139
18	2	3	1	2	3	2	3	150
19	3	1	3	2	1	1	3	367
20	3	1	3	2	2	2	1	385
21	3	1	3	2	3	3	2	390
22	3	2	1	3	1	2	1	243
23	3	2	1	3	2	3	2	255
24	3	2	1	3	3	1	3	268
25	3	3	2	1	1	3	2	168
26	3	3	2	1	2	1	3	181
27	3	3	2	1	3	2	1	194
R_j	111.2	155.6	24.7	24.4	23.9	2.3	1.6	

4 结果与讨论

4.1 锌层重量控制因素主次顺序

表 4、5 中 R_j 为极差,计算方法如式(8)所示。

$$R_j = \max \{ \bar{K}_{1j}, \bar{K}_{2j}, \bar{K}_{3j} \} - \min \{ \bar{K}_{1j}, \bar{K}_{2j}, \bar{K}_{3j} \},$$

$$j \in \{A, B, C, D\} \quad (8)$$

式中: K_1, K_2, K_3 分别为各因素取 1、2、3 水平相应的试验结果之和。 $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \bar{K}_3$ 分别为 K_1, K_2, K_3 的平均值。

比较 R_j 值可知: $R_B > R_A > R_C > R_D$, 因此试验因素对试验指标的影响的主次顺序为 BACD。吹气压力对锌层重量的影响最大,其次是带钢速度和喷嘴到带钢的距离,喷嘴缝隙大小的影响最小。

4.2 4 种因素与锌层重量的拟合关系

通过 Design-Expert 软件对表 4 试验结果进行线性回归分析,拟合各因素和指标(锌层重量)的多项式方程如式(9)所示:

$$W = 94.39 + 2A - 8.03B + 8.25C + 36.67D \quad (9)$$

回归方程方差分析表如表 6 所示。模型方程的决定系数 $R^2 = 0.9847, P = 0.0007$, 表明模型方程回归结果有效。

表 6 回归方程方差分析表

Table 6 Analysis of variance of regression equation

项目源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	62 276.83	4	15 569.21	64.47	0.0007	显著
A 带钢速度	21 600.00	1	21 600.00	89.44	0.0007	
B 吹气压力	38 720.67	1	38 720.67	160.32	0.0002	
C 喷嘴距离	1 633.50	1	1 633.50	6.76	0.0600	
D 喷嘴缝隙	322.67	1	322.67	1.34	0.3121	
残差	966.06	4	241.51			
综合	6 3242.89	8				

$R^2 = 0.9847 \quad R_{adj}^2 = 0.9694 \quad R_{pred}^2 = 0.9103 \quad Adeq \text{ Precision} = 23.597$

由 4.1 节可知吹气压力和带钢速度是锌层重量控制中最重要的工艺参数。因此应用上述模型对吹气压力、带钢速度进行模拟计算,研究不同吹气压力和带钢速度对锌层重量的影响。在喷嘴距离 $Z = 12 \text{ mm}$, 喷嘴缝隙 $d = 1.2 \text{ mm}$ 的情况下,分别作出了 90、120、150 m/min 3 种带钢速度的吹气压力与锌层重量关系曲线(如图 4 所示)和 20、30、40 kPa 3 种吹气压力的带钢速度与锌层重量的关系曲线(如图 5 所示)。

从图 4、5 可以看出,在其他工艺条件不变的情况下,锌层重量随着吹气压力的增加而降低,而随着带钢速度的提高而增加。所得关系曲线与文献[6]中的验证模型所得的关系曲线具有很好的一致性。在 20~40 kPa 吹气压力区间,压力每增加 5 kPa,则单面锌层重量就减少

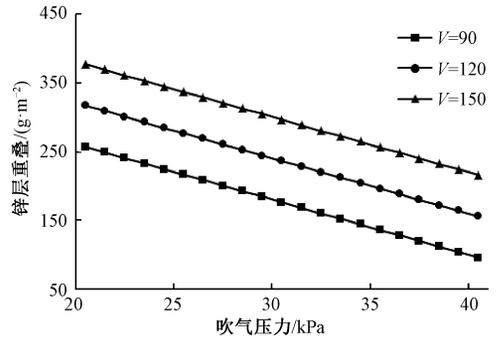


图 4 锌层重量随吹气压力的变化关系

Fig.4 The relation of coating weight with jet pressure

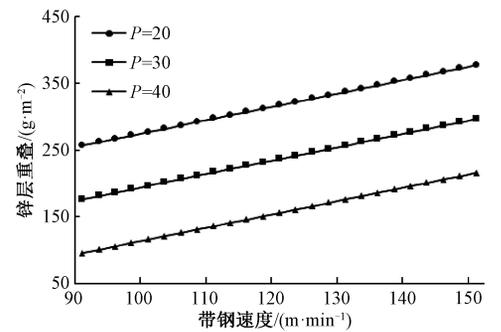


图 5 锌层重量随带钢速度的变化关系

Fig.5 The relation of coating weight with strip velocity

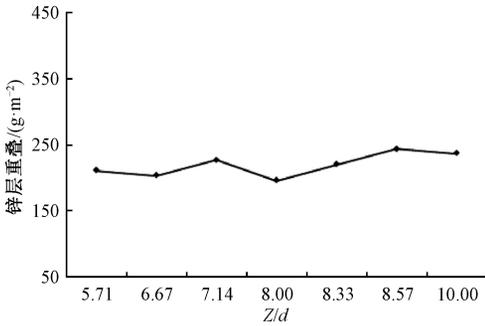
40 g/m²。因为吹气压力越大,气刀的刮锌能力越强,则锌层就越薄。同时,在各种吹气压力下,提高带钢速度均会引起锌层重量的增加。因此,当带钢速度提高时,要获得一定的锌层重量,必须增加吹气压力。为了得到带钢速度与吹气压力之间的关系曲线,需要进行各因素交互作用对锌层重量的影响分析。

其次,喷嘴距离同喷嘴缝隙之比(Z/d)对锌层重量也具有很大的影响。文献[6-8]均建立了 Z/d 与目标值(锌层重量、压力、剪应力)之间的变化关系。本文在带钢速度 $V = 120 \text{ m/min}$, 吹气压力 $P = 30 \text{ kPa}$ 条件下,获得 Z/d 与锌层重量的关系曲线(如图 6 所示)。所得关系曲线与文献[7]中的相同关系曲线同样具有较好的一致性。当 $6 < Z/d < 10$ 时,锌层重量与 Z/d 的变化关系处于过渡区域,锌层重量对 Z/d 的变化并不敏感。

由以上分析可得,4.2 节中所建立的拟合模型方程基本准确有效,但该模型并未引入各因素交互作用对锌层重量的影响,并且未能给出直观的图形。为此本文提出考虑交叉项的正交试验法来优化模型方程(9)。

4.3 因素交互作用对锌层重量的影响

首先,采用上节中的喷嘴距离与喷嘴缝隙,获得单面锌层重量 150 g/m² 时吹气压力与带钢速度的关系曲线

图6 Z/d 与锌层重量的关系Fig.6 The relation of zinc coating weight with Z/d value

(如图7所示)。所得关系曲线与文献[10]中的相关曲线吻合度较高。由此关系曲线看,当带钢速度为150 m/min,相应的吹气压力要求达到近50 kPa。若供气压力达不到要求时,必须采用降低工艺段速度的措施来保证要求的锌层重量。不难看出,吹气压力与带钢速度存在不可忽略的交互作用,而该交互作用并没有体现在4.2节的式(9)中。

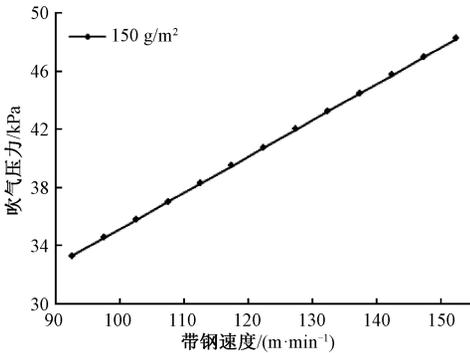


图7 吹气压力与带钢速度的关系

Fig.7 The relation of jet pressure with strip velocity

因此,有必要进行有交互作用的正交试验对4.2节的结果进行补充和修正。有交互作用的正交试验结果如表5所示。同样,比较各因素极差可得试验因素对试验指标的影响的主次顺序为 $B>A>A\times B>C>B\times C$ 。其中独立试验因素的主次顺序与4.1节一致,而因素A和因素B的交互作用对指标的影响则超过了因素C,也体现了上述分析的吹气压力与带钢速度存在不可忽略的交互作用。因此线性拟合已经不能满足要求。

4.4 非线性最小二乘法拟合

使用2.4节的算法通过MATLAB软件对表5的结果进行非线性最小二乘拟合,经过4次迭代得最优解:

$$a = [0.003\ 9 \quad 0.223\ 3 \quad -0.375\ 0 \quad -0.077\ 2 \\ -0.066\ 7 \quad -0.020\ 8 \quad 3.445\ 4 \quad -11.244\ 4 \\ 17.972\ 2 \quad 47.000\ 0]$$

为检验近似函数模型的预测精度,本文考察复相关系数 R^2 的大小来判断模型与试验模型的近似程度。 R^2

定义为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [f'(x_i) - \bar{f}(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [f(x_i) - \bar{f}(x_i)]^2} \quad (10)$$

式中: n 为正交试验组数; $f(x_i)$ 为正交试验指标值; $\bar{f}(x_i)$ 为指标平均值; $f'(x_i)$ 为模型预测值。 R^2 的值越趋近于1,表示模型的近似程度越高。经过计算,最优解模型的复相关系数 $R^2 = 0.999\ 4$,表明模型方程结果有效,并且优于未考虑交互作用的线性方程(9)。

4.5 模型修剪优化

上节中得到的模型拟合度高,但复杂度也高,对实际生产的指导意义不明显。为在拟合度与复杂度之间找到一个平衡点,本节采用实验值与预测值的平均偏差为标准,对4.4节所得模型进行修剪。通过依次令模型参数向量 a 中的 a_i 为0(其中常数项保留),剔除某项来考察相对应平均偏差的大小,结果如表7所示。

表7 剔除某项后的平均偏差表

Table 7 Average deviation after eliminate one item

剔除项	完整	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
平均偏差	1	28	131	20	152	11	13	210	193	94

从表7中可以看出,剔除第2、4、7、8、9项后,对结果影响非常大,而上述几项分别是 x_2^2 、 x_1x_2 、 x_1 、 x_2 、 x_3 的系数。因此所得结果与4.3节中主次因素关系顺序高度吻合。

依据分析结果对非重要项进行修剪,进一步通过MATLAB软件对表5结果再次拟合,得到多项式方程:

$$W = 0.223\ 3B^2 - 0.077\ 2AB + 4.170\ 4A - \\ 11.911\ 1B + 5.972\ 2C + 74.833\ 3 \quad (11)$$

模型方程的复相关系数 $R^2 = 0.997\ 6$,表明模型方程在剔除几个非重要项后仍能获得很好的拟合度,实现了拟合度与复杂度的较好平衡。如图8和9所示,该模型锌层重量预测值与测量值的偏差在 $\pm 5\%$ 以内。如图10所示可直观地反映各因素交互作用对响应值的影响。

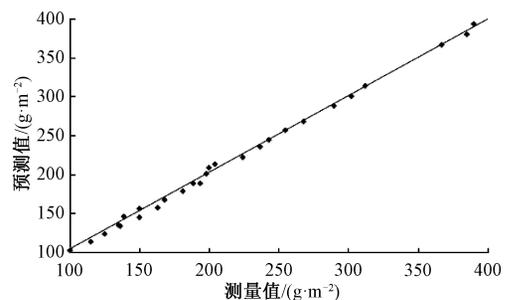


图8 锌层重量预测值与测量值对比

Fig.8 Comparison of predicted results and plant data

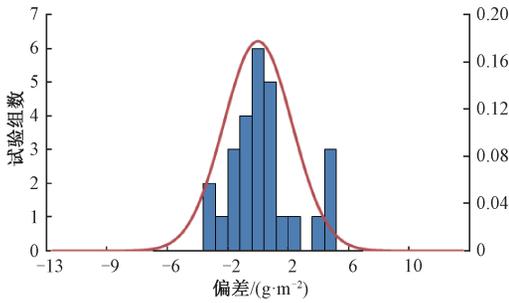
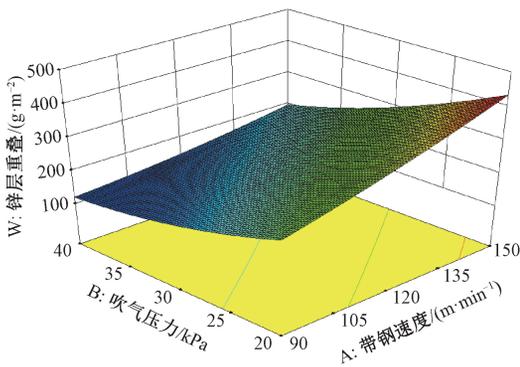
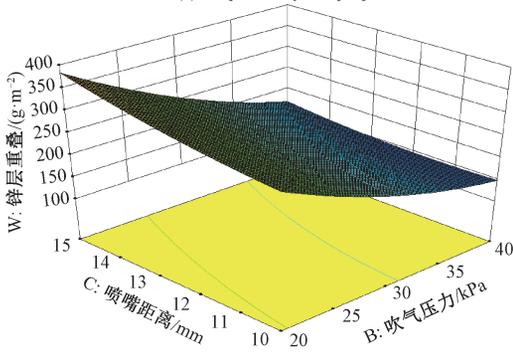


图 9 锌层重量预测值偏差分布

Fig.9 Distribution of the deviation between the predicted results and plant data



(a) 带钢速度与吹气压力
(a) Strip velocity and jet pressure



(b) 吹气压力与喷嘴距离
(b) Jet pressure and nozzle gap

图 10 因素交互作用对锌层重量影响的响应曲面

Fig.10 Response surface of the effect of factor interaction on zinc coating weight

5 结 论

本文通过 4 因素 3 水平正交试验和 13 因素 3 水平含交互作用的正交试验,确定了各因素及其交互作用对锌层重量影响的主次顺序为:吹气压力、带钢速度、吹气压力与带钢速度的交互作用、喷嘴距离、喷嘴缝隙、吹气压力与喷嘴距离的交互作用。通过回归分析与最小二乘

法非线性曲线拟合得到模型方程,其复相关系数 $R^2 = 0.9976$,回归效果好。利用该模型进行计算的预测值与测量值最大偏差仅在 $\pm 5\%$ 以内。通过分析建立的二次多项式模型可以很好地描述单面锌层重量在 $100 \sim 400 \text{ g/m}^2$ 范围内,带钢速度、吹气压力、喷嘴距离及三者之间交互作用与锌层重量之间的定量关系。

参考文献

[1] KWON S B, LEE D W, KWON Y D. Experimental and computational studies on Coanda nozzle flow for the air knife application[J]. Journal of Thermal Science, 2007, 16(2):164-169.

[2] CHO T S, KWON Y D, KWON S B. A study of the influence of air-knife tilting on coating thickness in hot-dip galvanizing[J]. Journal of Thermal Science, 2009, 18(3):262-267.

[3] SOUFIANI A Y, MCDERMID J R, HRYMAK A N, et al. Numerical investigation of multiple-slot jets in air-knife wiping [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2017, 14(5):1015-1028.

[4] NAPHADE P, MUKHOPADHYAY A, CHAKRABARTI S. Mathematical modelling of jet finishing process for hot-dip zinc coatings on steel strip [J]. ISIJ International, 2005, 45(2):209-213.

[5] HRYMAK A N, ELSAADAWY E A, HANUMANT-H G, et al. Air knife coating weight models[J]. AISTech 2004-Iron and Steel Technology Conference Proceedings, 2005, 2:393-401.

[6] ELSAADAWY E A, HANUMANTH G S, BALTHAZAAR A K S, et al. Coating weight model for the continuous hot-dip galvanizing process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, 38(3):413-424.

[7] CHEN C M, LIN J H, HSU T W, et al. Improvement of zinc coating weight control for transition of target change[J]. Corrosion Science and Technology, 2010, 9(3):105-108.

[8] 董占东.控制锌层厚度的一种有效方法[J].轧钢, 2010, 27(3):56-58.
DONG ZH D. An effective method of control the zinc coating thickness[J].Steel Rolling, 2010, 27(3):56-58.

[9] 张顺,王玉星,张凯.热浸锌钢板锌层厚度研究[J].电镀与精饰, 2016, (38)4:40-43.
ZHANG SH, WANG Y X, ZHANG K. Study on zinc coating thickness of hot-dip galvanized steel plate [J]. Plating and Finishing, 2016, (38)4:40-43.

- [10] 鲍成人, 康永林, 王龙. 气刀工艺对锌层厚度影响的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(8):39-43.
BAO CH R, KANG Y L, WANG L. Numerical simulation of effect of air knife process on thickness of zinc layer[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(8):39-43.
- [11] BAO CH R, KANG Y L, LI Y. Numerical analysis of edge over coating and baffle effect on hot-dip galvanizing[J]. Surface Review and Letters, 2017, 24(1):1750010-1-7.
- [12] 赵兴时, 张扬. 热镀锌机组锌层精度控制分析及优化[J]. 轧钢, 2015, 32(S2):143-145.
ZHAO X SH, ZHANG Y. Analysis and optimization of zinc coating precision control in galvanizing line [J]. Steel Rolling, 2015, 32(S2):143-145.
- [13] 林莉军. 宝钢热镀锌机组锌层重量控制模型的应用[J]. 宝钢技术, 2007(4):33-36.
LIN L J. Application of the coating weight control model for continuous galvanizing line (CGL) at Baosteel [J]. Baosteel Technology, 2007(4):33-36.
- [14] 李九岭. 带钢连续热镀锌(第3版)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010:287-293.
LI J L. Continuous hot dip galvanizing of strip steel[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2010:287-293.
- [15] 张勇, 邱静, 刘冠军, 等. 正交试验下基于 FMESA 和 GRA 的环境应力-故障关联分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1):29-35.
ZHANG Y, QIU J, LIU G J, et al. Environmental stress-fault relation analysis under orthogonal test based on FMESA and GRA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1):29-35.
- [16] 骆燕燕, 梁弘, 刘旭阳, 等. 接触件结构参数对电连接器振动特性的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11):202-208.

LUO Y Y, LIANG H, LIU X Y, et al. Effects of structure parameters of electrical connector contacts on the vibration of connector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018,32(11):202-208.

[17] LEUNG Y W, WANG Y P. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization [J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2001, 5(1):41-53.

[18] ZHANG Q F, LEUNG Y W. An orthogonal genetic algorithm for multimedia multicast routing [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 1999, 3(1):53-62.

作者简介



徐巍, 2008 年于武汉科技大学获得硕士学位, 现为武汉科技大学博士研究生, 主要研究方向为工业自动化检测、机器视觉。

E-mail: xuxu110@21cn.com

Xu Wei received his M. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 2008. He is currently a Ph. D. candidate at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include industrial automated testing and machine vision.



孔建益(通信作者), 1981 年于南昌大学获得学士学位, 1995 年于德国汉堡国防军大学获得博士学位, 现为武汉科技大学教授, 主要研究方向为机构学、智能设计与制造。

E-mail: kongjianyi@wust.edu.com

Kong Jianyi (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang University in 1981, and received his Ph. D. degree from Helmut Schmidt Universitat in 1995. He is currently a professor at Wuhan University of Science and Technology. His main research interests include theory of mechanism and intelligent design and manufacturing.