

# 基于田口法和响应面法的柔索冲击除锈机工艺参数优化研究\*

李俊霖<sup>①</sup> 龚青山<sup>①②</sup> 吴 兢<sup>①</sup> 辛 新<sup>③</sup> 陈君文<sup>①</sup> 刘 敏<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>湖北汽车工业学院机械工程学院, 湖北 十堰 442002; <sup>②</sup>湖北汽车工业学院艺术设计学院, 湖北 十堰 442002; <sup>③</sup>东风华神汽车有限公司, 湖北 十堰 442002)

**摘 要:** 柔索冲击接触除锈是一种很好的钢板表面除锈及强化工艺方法,合理的工艺及结构参数组合对除锈质量有较大的影响,找到较优的参数组合对提高除锈质量有重要的意义。以项目组前期研发的柔索冲击接触钢板表面除锈机为研究对象,提出一种针对直接影响装置除锈质量的相关工艺参数的优化方法。建立除锈机的接触力学模型,根据力学模型影响因素,确定柔索直径、滚筒高度、滚筒转速为待优化参数;采用田口法及响应面优化方法,计算参数组合信噪比值评价方案稳定性,构建面向冲击接触应力的预测优化模型,进一步全局预测优化,获取稳定性最佳、接触应力最佳参数组合,实现除锈效果提升的同时,提高钢板表面机械性能。最后以最佳参数组合调整柔索冲击除锈机进行除锈测试,验证了所提出优化方法实现了柔索冲击除锈机的除锈性能提升的目标。

**关键词:** 田口法; 响应面法; 柔索冲击除锈机; 工艺参数优化; 有限元分析

**中图分类号:** TH16                      **文献标识码:** A

**DOI:** [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.11.015](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.11.015)

## Optimization of soft cable impact rust removal process parameters based on taguchi method and response surface method

LI Junlin<sup>①</sup>, GONG Qingshan<sup>①②</sup>, WU Jing<sup>①</sup>, XIN Xin<sup>③</sup>, CHEN Junwen<sup>①</sup>, LIU Min<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, CHN;

<sup>②</sup>School of Art and Design, University of Automotive Technology, Shiyan 442002, CHN; <sup>③</sup>Dongfeng Huashen Automobile Co., Ltd., Shiyan 442002, CHN)

**Abstract:** Flexible cable impact contact rust removal is a good method for surface rust removal and strengthening of steel plates. A reasonable combination of process and structural parameters has a significant impact on the quality of rust removal. Finding the optimal parameter combination is of great significance for improving the quality of rust removal. A method for optimizing process parameters that directly affect the rust removal quality of the device is proposed based on the surface rust removal machine for flexible cable impact contact steel plates developed by the project team in the early stage. The contact mechanics model of the rust remover is established. According to the influence factors of the mechanical model, the diameter of the flexible cable, the height of the drum and the rotation speed of the drum are determined as the parameters to be optimized. Using the Taguchi method and response surface optimization method, the signal-to-noise ratio of parameter combinations is calculated to evaluate stability, and an predictive optimization model for impact contact stress is constructed. Further global prediction optimization is carried out to obtain the best combination of stability and contact stress parameters, achieving the improvement of the rust removal effect and improving the mechanical properties of the steel plate surface. Finally, taking the flexible cable impact rust removal machine manufactured with the optimal parameter combination as an example, the proposed optimization

\* 国家自然科学基金项目(52375508, 52105527); 湖北省教育厅重点项目(D20211803); 湖北汽车工业学院博士基金项目(BK202001)

method was verified to achieve the goal of improving the rust removal performance of the flexible cable impact rust removal machine.

**Keywords:** taguchi method; response surface method; flex impact descaling machine; optimization of process parameters; finite element analysis

随着制造业对环保和效率要求的不断提升,传统的除锈方法面临着重大的挑战。本文关注一种新型高效且环保的除锈技术——柔索冲击除锈。相较于激光除锈、高压水流清洗和化学清洗等传统方法,柔索冲击除锈机展现了显著优势:显著减少人工成本、提升环保性能、高效率、装置设计的灵活以及较小的除锈损伤。这些优点不仅提高了钢板表面的清洁度,还有助于提升其机械性能,是推进新型环保制造业装备发展的关键。

随着现代技术的不断发展,对除锈效果的要求越来越高。在应对这一挑战的过程中,优化除锈工艺参数被认为是提升除锈效果的最佳途径之一。近几年国内外诸多学者针对除锈工艺参数优化的研究多集中于传统除锈方法。刘伟军等<sup>[1]</sup>通过研究激光除锈的特性,运用 GRA 以及 TOPSIS 方法获得最佳工艺参数,达到降碳减排的目的。陈远刚等<sup>[2]</sup>对原有的高压水机实物进行结构尺寸优化,达到节能减排的目的。高仕琳等<sup>[3]</sup>采用遗传算法针对喷丸除锈喷头轨迹优化,优化之后不但除锈性能提高,并达到节能、安全、环保的效果。张若楠等<sup>[4]</sup>通过宏观微观以及表面化学成分建立除锈质量评价准则,以此来确定最佳工艺参数, EH36 钢的表面性能得以保留。黄河等<sup>[5]</sup>利用单元去除技术以及周期性胞元法建立有限元模型来模拟喷丸碰撞,发现可以通过增大喷丸直径及入射速度参数来提高除锈效果。马百战等<sup>[6]</sup>通过在高压水动力泵组加装支路,并且加入密封装置来提高高压水射流压强,从而提高铁锈的清洗效率。王祥洪等<sup>[7]</sup>通过采用单因素控制方法,以除锈效果为目的,优化温度、pH 值以及浸泡时间等参数。Zhang L J 等<sup>[8]</sup>建立了以除锈率为评估指标的响应面模型,确定最佳清洗温度和超声功率,提高了除锈工艺的除锈率。

综上所述,尽管国内外对传统除锈技术的工艺参数优化进行了大量研究,并取得了丰富的成果,但这些成果并不适用于柔索冲击除锈机。特别是柔索除锈机的工艺参数对除锈效果的具体影响尚未得到充分地研究和理解。

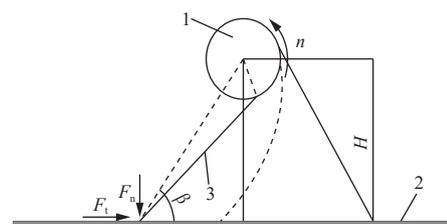
基于此,本文旨在深入研究柔索冲击除锈机的

工艺参数特性及其优化方法。田口法与响应面法分别属于局部优化方法和全局优化方法<sup>[9]</sup>。田口法虽无法像灰色关联法和遗传算法等其他优化方法考虑较多目标且精度不如全局优化,但其操作简便,收敛性快,引入噪声比值模拟加工中的干扰因素,适用于工业实际。响应面法相比粒子群算法、灰色关联法等全局优化方法在处理高度交合因素的能力有限且数据依赖性较强,但其合理使用较少试验次数,高效低成本建立参数与响应的高精度模型,可在范围内连续精确预测最优方案,适用于生产实际。因此本文提出一种田口法与响应面法相互结合验证的研究方法,预测性优化工艺参数方案的同时考虑方案在除锈加工时的稳定性。而且通过仿真试验验证了参数优化的可靠性和有效性。最终确定的最优参数组合和钢板的最佳冲击接触应力,显著提高了除锈质量,同时通过增加钢板表面的粗糙度,进一步改善了钢板的力学性能。

## 1 柔索冲击接触除锈工艺参数分析

### 1.1 柔索冲击接触除锈原理模型

根据图 1 所示的柔索冲击接触除锈模型可知,柔索冲击除锈技术通过距离待除锈钢板高度  $H$  的滚筒,以转速  $n$  来驱动柔索末端以一定速度  $V_t$  进入待处理的钢板锈层。由于待除锈钢板表面具有不平整的结构,当柔索接触到钢板时,会产生法向力  $F_n$  和切向摩擦力  $F_t$ 。在这两种力的作用下,使得钢板表面的锈层被有效剥落,并进一步强化了钢板表面,柔索冲击除锈工作原理及过程如图 2 所示。整个柔索冲击除锈过程依赖于卷筒的旋转速度  $\omega$  和柔索与钢板接触的动态作用,从而实现除锈并改善钢板表面质量。



1—滚筒; 2—待除锈钢板; 3—柔索。

图 1 柔索冲击接触除锈模型

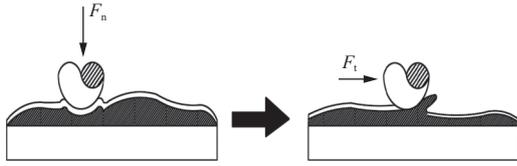


图2 柔索冲击接触除锈原理图

### 1.2 柔索冲击接触力模型分析

由于柔索与钢板的接触力不平行于钢板，因此可将此力分解为法向接触力  $F_n$  和切向接触力  $F_t$ 。根据 Hertz 碰撞理论<sup>[10-11]</sup>，设计两个碰撞的物体所产生的法向接触力为

$$F_n = \left(\frac{\delta_n}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中： $\delta_n$  为法向嵌入深度； $\alpha$  为结构常量。

$$\delta_n = \left(\frac{5}{4}\alpha^{\frac{3}{2}} \cdot (360nH \cdot \sin\beta)^2\right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

式中： $n$  为滚筒转速； $\beta$  为柔索末端点与滚筒中心连线和钢板的夹角。

$\alpha$  的表达式为

$$\alpha = \frac{4}{3(\delta_1 + \delta_2)} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (3)$$

式中： $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为材料强度； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为柔索与钢板接触强度。

由于柔索碰撞产生的接触力为非线性，因此可表达为非线性函数。

$$F_n = K \cdot \left(\frac{\delta_n}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

式中： $K$  为非线性常量。

因此根据运动学模型与动力学模型结合，接触力  $F$  在法向和切向的分量如图3所示。

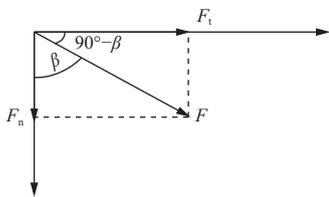


图3 柔索接触力示意图

接触力的分量最终表达式为

$$\begin{Bmatrix} F_n \\ F_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cot(90^\circ - \beta) \end{bmatrix} \left[ 0 \quad K \cdot \left(\frac{\delta_n}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (5)$$

在分析柔索冲击除锈装置的工作原理时，法向接触力显得尤为关键，因为它直接影响着碎裂锈层

的效能。根据接触力的分析可得，法向接触力与滚筒的高度和转速有关，法向接触力越大，除锈效果越佳。在接触面积固定的条件下，较大的法向接触力会导致较高的接触应力，进而提升除锈质量。同时，柔索的直径也可能通过影响接触面积的大小来间接影响接触应力。基于这些分析，本研究选择滚筒高度、滚筒转速和柔索直径作为优化参数，以钢板的冲击接触应力作为优化目标，旨在进一步提高除锈效果。

## 2 柔索冲击除锈机参数影响分析

### 2.1 正交试验设计

正交试验是一种高效的多因素试验设计方法，通过有限次数的试验评估多个因素的影响，广泛应用于工程、科研等领域，以期获得最优的试验结果。本研究考虑到成本和效率，采用正交试验设计来优化柔索冲击除锈工艺参数，这种方法在各个领域都取得了理想的应用效果<sup>[12-14]</sup>。

针对柔索冲击除锈机的操作，可以发现滚筒转速、滚筒高度和柔索直径是影响除锈效果的关键因素。通过对原型机的分析，确定了滚筒转速的合理范围为 20~50 r/s，滚筒高度的范围为 170~190 mm，柔索直径的范围为 6~10 mm。这些参数范围的设定旨在确保除锈效果的最优化，避免如转速过低导致无法剥落铁锈或转速过高造成柔索缠绕，以及确保柔索末端能有效接触待除锈钢板而非过高或过低影响效果。

在这些参数的基础上，通过采用三因素五水平的  $L_{25}(5^3)$  正交试验设计，共计划进行 25 组试验，以系统地分析和优化工艺参数。对比传统的全因素试验设计，如果采用全局设计则需要进行 125 组试验，显然正交试验设计大大减少了试验的数量，有效提高了优化的效率，减少了不必要的试验和设计周期。

为体现试验客观性，在参数设定范围内均匀取值，滚筒转速设定为 25、30、35、40、45 r/s，滚筒高度设定为 170、175、180、185、190 mm，柔索直径设定为 6、7、8、9、10 mm，优化水平见表1。对于工艺参数的选择旨在覆盖上述分析确定的参数范围，通过正交试验的方法对柔索冲击除锈工艺参数进行优化，期待找到最优的参数组合，以实现除锈效果的最大化。正交试验见表2。

表1 优化水平表

试验因子	滚筒高度 <i>H</i> /mm	滚筒转速 <i>n</i> / (r/s)	柔索直径 <i>d</i> /mm
水平1	170	25	6
水平2	175	30	7
水平3	180	35	8
水平4	185	40	9
水平5	190	45	10

表2  $L_{25}(5^3)$  正交试验表

序号	因素		
	滚筒高度 <i>H</i> /mm	滚筒转速 <i>n</i> / (r/s)	柔索直径 <i>d</i> /mm
1	170	25	6
2	170	30	7
3	170	35	8
4	170	40	9
5	170	45	10
6	175	25	7
7	175	30	8
8	175	35	9
9	175	40	10
10	175	45	6
11	180	25	8
12	180	30	9
13	180	35	10
14	180	40	6
15	180	45	7
16	185	25	9
17	185	30	10
18	185	35	6
19	185	40	7
20	185	45	8
21	190	25	10
22	190	30	6
23	190	35	7
24	190	40	8
25	190	45	9

2.2 动力学仿真试验分析

在模拟含有柔性力的柔索动力学时，可以采用

了2种主要方法：第一种方法是直接利用 Adams 软件中的柔性体模型来建立柔索模型<sup>[15]</sup>；第二种方法，即本次试验采用的方法，是通过柔索离散化技术，此方法涉及将柔索划分为60个具有相同形状、大小和材质的圆柱形滚子，然后通过轴承套将这些滚子相互连接。与第一种方法相比，第二种方法允许定义每对滚子之间的轴承套力，从而提供了更细致的控制和模拟精度。建模的基本原理如图4所示。

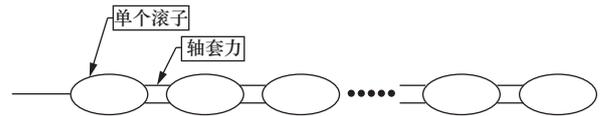


图4 柔索建模原理简图

为探究滚筒转速、柔索直径、滚筒高度对柔索末端接触力的影响，建立柔索除锈机虚拟样机模型，如图5所示。动力学模型的建立和数据收集遵循《GB/T 708—2006 冷轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》的标准。通过动力学仿真，将柔索直径设置为6、7、8、9、10 mm这5个不同级别进行分组，探索柔索末端接触力的变化规律。仿真结果如图6所示。

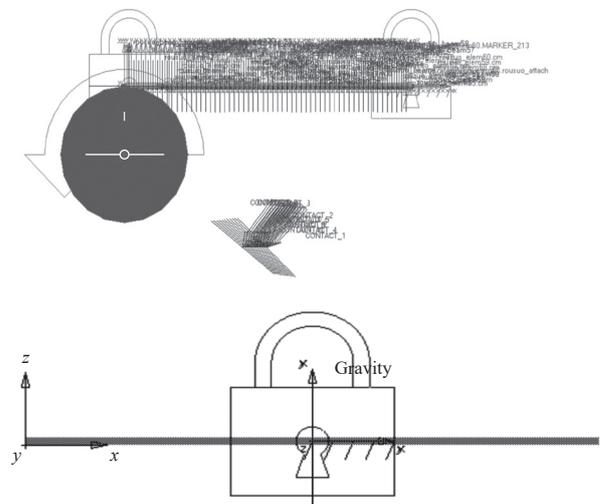


图5 动力学虚拟样机模型

根据动力学分析结果，在不同转速变化下，法向接触力在转速35 r/s处达到峰值呈两端减弱趋势。不同柔索直径的法向接触力在直径为7、8 mm时峰值较大。根据动力学仿真结果结合正交试验方案得到正交试验结果见表3。

2.3 参数影响特性分析

田口法是一种通过设计正交试验并考虑误差因素来模拟加工过程中的干扰的优化技术。其核心指

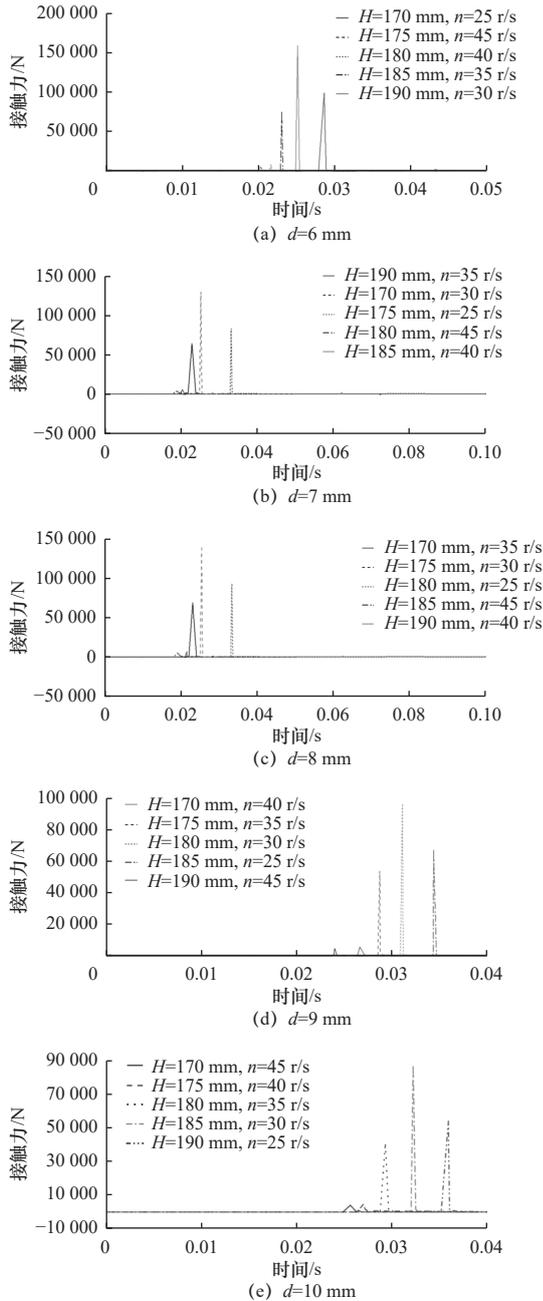


图 6 正交试验柔索末端法向接触力变化规律

表 3 正交试验结果

编号	滚筒高度 $H/\text{mm}$	滚筒转速 $n/(\text{r/s})$	柔索直径 $d/\text{mm}$	接触应力/ MPa
1	170	25	6	300.4
2	170	30	7	395.2
3	170	35	8	214.3
4	170	40	9	162.8
5	170	45	10	141.2
6	175	25	7	253.9
7	175	30	8	427.6

续表 3

编号	滚筒高度 $H/\text{mm}$	滚筒转速 $n/(\text{r/s})$	柔索直径 $d/\text{mm}$	接触应力/ MPa
8	175	35	9	191.3
9	175	40	10	160.3
10	175	45	6	146.9
11	180	25	8	281.6
12	180	30	9	292.8
13	180	35	10	187.9
14	180	40	6	171.6
15	180	45	7	135.2
16	185	25	9	209.6
17	185	30	10	264.9
18	185	35	6	228.6
19	185	40	7	161.4
20	185	45	8	145.2
21	190	25	10	193.7
22	190	30	6	483.2
23	190	35	7	196.4
24	190	40	8	165.8
25	190	45	9	144.2

标是信噪比 ( $S/N$ )，定义为信号值除以噪声值。理论上，信号值较大而噪声值较小的方案稳定性最优，应选择信噪比最大的方案为最优方案<sup>[16-19]</sup>。田口法根据信噪比的不同应用场景，分为望大特性（目标值越大越好）、望小特性（目标值越小越好）和望目特性（目标值接近某一具体值最好）3种。在考虑到接触应力对铁锈清除和钢板表面（如Q235，其抗拉强度为500 MPa）保护的影响时，研究选择了望目特性以确保应力值既能破除铁锈又不损害钢板表面。然而，根据正交试验的结果，在保证结果处于合理范围内的同时，追求更大的目标值显得更为理想，因此本研究采用了望大特性。望大特性的核心在于，信噪比越大，表示系统或过程的稳定性越好。望大特性计算公式为

$$\frac{S}{N} = -10 \times \lg(\Sigma k^2) \frac{1}{A} \quad (6)$$

式中： $S/N$ 为信噪比值； $k$ 为望大特性； $A$ 为样本组数。

按照正交试验设计表以及望大特性计算公式，得到共组方案的信噪比值，结果见表4。

表4 正交试验信噪比值

编号	滚筒高度 H/mm	滚筒转速 n/(r/s)	柔索直径 d/mm	信噪比
1	170	25	6	49.554 0
2	170	30	7	51.936 3
3	170	35	8	46.620 4
4	170	40	9	44.233 1
5	170	45	10	42.996 7
6	175	25	7	48.093 3
7	175	30	8	52.620 8
8	175	35	9	45.634 3
9	175	40	10	44.098 7
10	175	45	6	43.340 4
11	180	25	8	48.992 7
12	180	30	9	49.331 4
13	180	35	10	45.478 5
14	180	40	6	44.690 3
15	180	45	7	42.619 5
16	185	25	9	46.427 8
17	185	30	10	48.461 6
18	185	35	6	47.181 5
19	185	40	7	44.158 1
20	185	45	8	43.239 3
21	190	25	10	45.742 6
22	190	30	6	53.682 5
23	190	35	7	45.862 8
24	190	40	8	44.391 7
25	190	45	9	43.179 3

根据表3的正交试验方案结果以及表4的信噪比,可知第2组、第7组、第22组参数组合的信噪比值大,稳定性较好。各参数的信噪比极差可以反映影响程度,其值见表5,信噪比均值如图7所示,通过排序确定对接触应力的重要性,各个参数的显著水平按从大到小的次序为滚筒转速、柔索直径、滚筒高度,即滚筒转速为影响程度最大因素。

通过表5和图7对各参数影响程度排序,以滚筒转速为优先考虑因素,结合正交试验方案组合选择的最优参数组合方案为滚筒转速30 r/s,柔索直径6 mm,滚筒高度190 mm。虽然滚筒高度170、175 mm信噪比值大,但作为最次要优化因素,且

实装机滚筒高度170 mm过低易发生柔索相互缠绕,因此选择合理高度190 mm。

表5 参数信噪比值以及极差

水平	滚筒高度 H/mm	滚筒转速 n/(r/s)	柔索直径 d/mm
1	47.07	47.76	47.69
2	46.76	51.21	46.53
3	46.22	46.16	47.17
4	45.89	44.31	45.76
5	46.57	43.08	45.36
极差	1.17	8.13	2.33

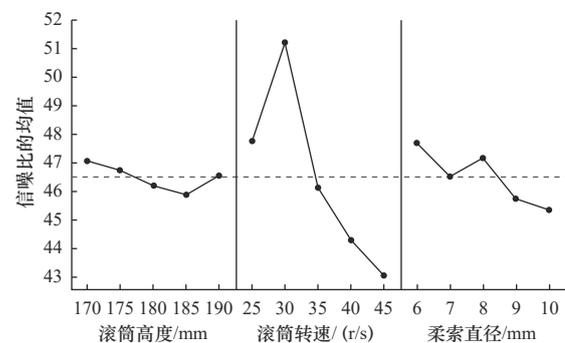


图7 信噪比均值图

### 3 冲击接触应力响应曲面优化

#### 3.1 冲击接触应力模型

根据田口法参数影响程度排序,在建立非线性回归预测优化模型时可以提高主要优化参数拟合度,并在优化过程中可以适当提高主要优化参数的权重,为响应面法优化确定最优组合参数提供技术支持。本文通过Minitab软件结合响应曲面分析方法来建立冲击接触应力与各参数之间的拟合函数模型来验证优化可靠性<sup>[20-22]</sup>。一般多元非线性,形式为

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_f) \\ = a + b \sum_{i=1}^f x_i + c \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^f x_i x_j + d \left( \sum_{i=1}^f x_i \right)^2 \quad (7)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为待定系数,可通过非线性回归确定; $f$ 为影响因素个数; $x_i$ 、 $x_j$ 为影响因素(本文为滚筒高度、滚筒转速、柔索直径)。

用Minitab创建响应曲面对上述非线性形式采用完全平方下的多元非线性模型进行回归分析,得到模型的汇总分析,回归模型标准误差 $S=0.064\ 426$ ,因此使用该模型并得到回归方程,即

$$y = 231 + 5.55x_1 + 47.6x_2 - 390x_3 - 1.144x_2^2 + 14.8x_3^2 + 3.36x_2x_3 \quad (8)$$

式中： $x_1$ 为滚筒高度； $x_2$ 为滚筒转速； $x_3$ 为柔索直径。

根据以上拟合曲线函数，得到冲击应力接触方差表，具体见表6。

表6 冲击接触应力模型方差表

来源	自由度	调整平方和	调整均方	统计量	P
模型	6	284 981	47 496.8	11.69	0.000
$x_1$	1	16 848	16 848	4.15	0.043
$x_2$	1	75 287	75 287.3	18.3	0.001
$x_3$	1	47 792	47 792.2	117.7	0.004
$x_2^2$	1	5 331	5 331.3	1.31	0.027
$x_3^2$	1	4 088	4 088.3	1.01	0.033
$x_2x_3$	1	26 298	26 297.7	6.47	0.024
误差	13	52 822	4 063.2		

回归统计学中P值小于等于0.05反映自变量与因变量关联性强，预测精度高。由表6可以看出，回归模型中的P值均小于等于0.05（水平显著），证明该优化回归模型预测良好。

### 3.2 接触应力优化模型诊断

通过观察“残差四合一”图进行残差分析，诊断此模型拟合状况。正态概率图（图8a）未出现偏离基线，说明回归模型的正态性假设成立。与拟合值图（图8b）没有呈现特别离散的“喇叭口”形状，说明残差对响应变量拟合模型正常。残差直方图（图8c）呈“钟型”，没有出现偏差，有助于验证模型正态性。与顺序图（图8d）没有无规则U型曲线且在基线处上下波动，证明回归模型可靠性高，模型数据独立性合理没有呈现“异常”结果点，可客观连续预测分析参数与响应的最优结果，具体如图8所示。

### 3.3 响应曲面优化结果

按照接触应力预测模型进行响应曲面优化分析，设定各参数上下限，设置响应目标值上限为500 MPa，采用相应目标最大化响应器进行分析，如响应面优化结果如图9所示，优化结果为滚筒高度190 mm、滚筒转速为29.6 r/s、柔索直径为6 mm时，期望值函数D为0.748 2，趋近于1，表明优化响应变量达到理想目标，冲击接触应力响应y最大为477.17 MPa。

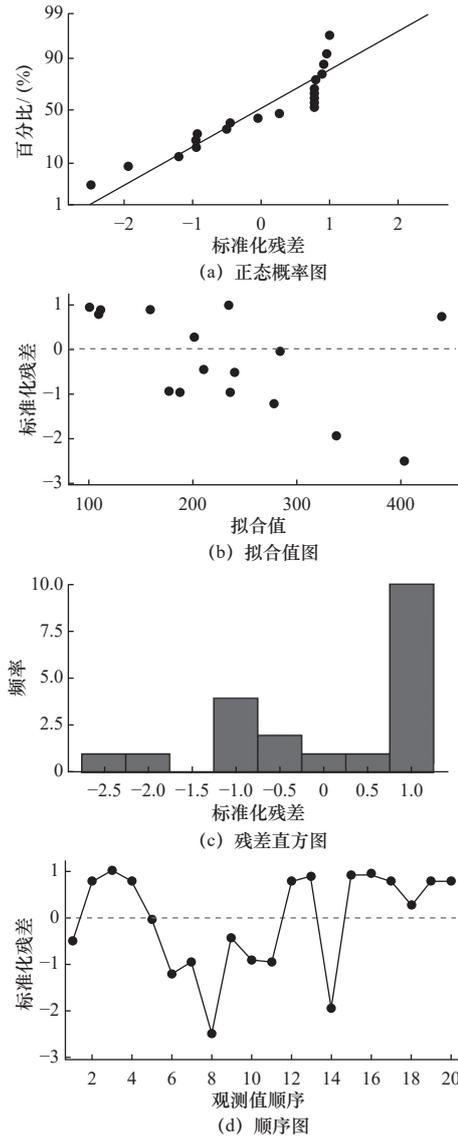


图8 冲击应力残差图

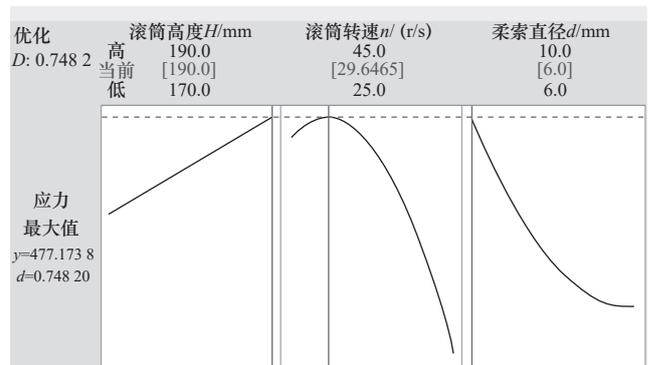


图9 响应面优化结果

### 3.4 有限元仿真试验验证

为了提高计算效率，采用了Ansys Workbench软件建立了除锈装置的有限元模型。简化模型的方法包括建立柔索与钢板冲击接触部分的简化模型。该

模型中选用 Q235 钢作为待除锈零件的材料，柔索材料则为 45 号钢，详细的材料参数见表 7。

表 7 钢板及柔索材料参数表

参数	45号钢	Q235钢
弹性模量/GPa	209	206
泊松比	0.3	0.288
密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	7.85	7.86
屈服强度 /MPa	355	235
抗拉强度 /MPa	600	500

在有限元模型的建立过程中，对于规则物体的钢板，采用多区域网格划分方法以提高模拟精度。对于柔索末端这一复杂形状，选择了四面体网格划分方法，并对局部区域进行细化，更准确地捕捉冲击接触的变形。冲击发生在柔索末端与钢板接触部分，柔索由多段滚子离散而成，简化了模型。

建立的冲击接触有限元模型，如图 10 所示。为了确保仿真结果的真实性，考虑了材料的物理参数，并全面考虑了柔索与钢板的复杂接触情况。该模型为除锈装置冲击仿真试验提供了有价值的结果。

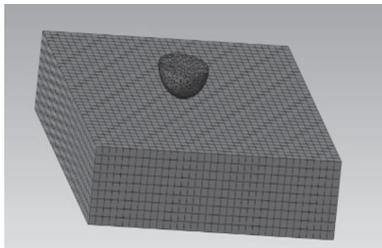


图 10 有限元分析模型

通过有限元分析的结果，即田口法正交试验参数组合方案稳定性最佳组合为滚筒高度 190 mm、滚筒转速 30 r/s，柔索直径 6 mm，Q235 钢接触应力响应值 483.2 MPa。田口法优化结果与响应曲面优化方法的误差为 1.2%。

最终确定了最佳工艺参数组合：滚筒高度为 190 mm，滚筒转速为 30 r/s，柔索直径为 6 mm。具体冲击接触应力云图如图 11 所示。

### 3.5 案例研究

根据优化后的工艺参数，为了分析优化后的工艺参数的除锈效果，进行了优化后的工艺参数柔索除锈机的试验。试验使用的 Q235 钢待除锈钢板宽度为 300 mm，厚度为 20 mm。试验参数设置为滚筒转速优化后为 30 r/s，柔索直径为 6 mm，滚筒高

度为 190 mm，具体实机图片如图 12 所示。经过除锈后，钢板表面清洁度根据 GB/T 8923.1-2011 标准进行评定，结果显示达到了 ST3 表面处理彻底的标准，并且具有金属光泽，证明此接触应力达到除锈良好效果。除锈前后的对比如图 13 所示，其中图 13a 所示为待除锈钢板表面，图 13b 所示为除锈后钢板表面。

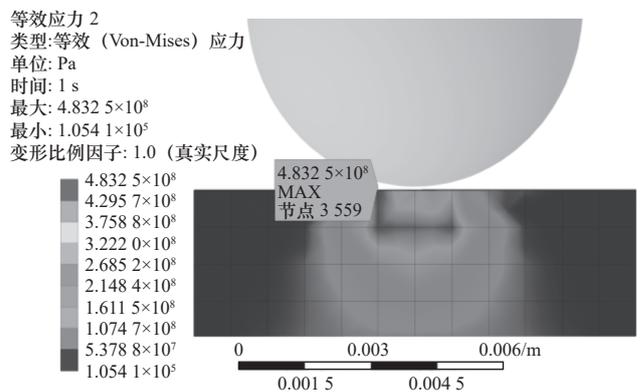


图 11 Q235 钢接触应力云图



图 12 柔索除锈机实机图

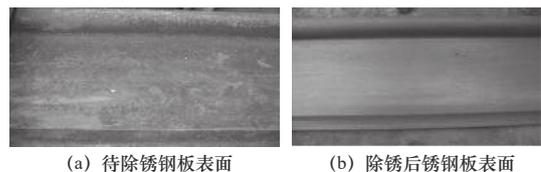


图 13 柔索除锈机除锈效果对比图

## 4 结语

根据田口法正交试验和响应曲面预测优化方法，以待除锈钢板接触冲击应力为优化目标，对滚筒转速、柔索直径、滚筒高度结构参数进行了深入分析，并得出以下结论：

(1) 通过田口法正交试验和动力学仿真分析，结果表明在合理组合滚筒转速、柔索直径和滚筒高度的情况下，可以达到碎裂锈层，提高钢板表面机械性能的最佳接触冲击应力。

(2) 通过信噪比值的均值和方差分析，得到

影响冲击接触应力的主次关系为滚筒转速>柔索直径>滚筒高度。

(3) 针对柔索冲击除锈装置工艺参数建立高精度预测优化模型, 结合响应面优化方法和田口法试验结果, 结果表明最佳工艺参数组合为滚筒高度 190 mm, 滚筒转速 29.6 r/s, 柔索直径 6 mm。并以最佳参数组合代入实机进行测试, 验证了优化方法的可靠性和可行性。

(4) 目前针对除锈机不同参数对除锈效果的影响研究, 主要考虑除锈材料和待除锈对象材料选择同一材质, 具有一定局限性。在下一阶段, 将深入研究除锈机针对多种待除锈材料如何提升除锈质量。

### 参 考 文 献

[1] 刘伟军, 索英祁, 姜兴宇, 等. 激光清洗过程低碳建模与工艺参数优化 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 276-294.

[2] 陈远刚, 刘鹤, 陈海江. 一种船舶除锈清洗超高压水机设计及优化 [J]. 广东造船, 2022, 41(4): 60-62, 59.

[3] 高仕琳, 高国琴, 方志明. 钢箱梁喷砂除锈并机器人喷枪轨迹智能优化 [J]. 软件导刊, 2021, 20(8): 6-11.

[4] 张若楠, 韦朋余, 郭鑫, 等. EH36 钢激光清洗参数优化与表面性能评估 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 148-156.

[5] 黄河, 杨帆, 高玉魁. 喷丸除锈过程及效果的数值模拟研究 [J]. 表面技术, 2016, 45(11): 194-201.

[6] 马百战, 康海云, 乔鹏, 等. 浮船坞高压水除锈改装方法 [J]. 航海工程, 2020, 49(4): 50-52, 56.

[7] 王祥洪, 谢兵. 新型配方除锈剂的研究与应用 [J]. 材料开发与应用, 2010, 25(5): 34-38.

[8] Zhang L J, He B, Wang S N, et al. Ecofriendly ultrasonic rust removal: an empirical optimization based on response surface methodology [J]. Coatings, 2021, 11(9): 1127.

[9] 邱马顺, 华青松. 基于田口迭代法的高速永磁同步电机电磁优化设计 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(5): 713-719.

[10] 陈剑, 王全才, 王浩, 等. 基于 Hertz 理论的泥石流块石冲击力修正系

数研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 26-31.

[11] 赵彦玲, 李积才, 赵志强, 等. 钢球展开机构的接触碰撞特性 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(6): 37-41.

[12] 郭彦军, 杨晓京, 姚同, 等. 激光辅助车削工艺参数对单晶硅表面质量的影响 [J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(6): 64-68.

[13] 刘兆洋, 贾国涛, 朱治忠, 等. 近临界水处理废次烟叶工艺条件及优化 [J]. 化工进展, 2024, 43(4): 1720-1730.

[14] 薛玉琴, 靳雨祺, 关奔, 等. 基于正交试验设计的可渗透喷管参数影响规律分析 [J/OL]. 兵器装备工程学报. [2024-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1213.TJ.20240104.1456.002.html>.

[15] 龚青山. 面向再制造的机械装备多目标优化设计研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.

[16] 徐金河, 彭兵. 基于田口法的分裂齿式永磁游标电机转矩优化设计 [J]. 微特电机, 2023, 51(10): 14-18.

[17] 冯逸亭, 刘文光, 吴兴意, 等. 基于田口法的压电振动俘能器尺寸优化 [J]. 传感技术学报, 2023, 36(4): 543-548.

[18] 陈鹏, 雷正保. 基于拓扑优化超高性能混凝土护栏多目标稳健性设计 [J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1371-1379.

[19] 陈科嘉, 阿达依·谢尔亚孜旦. 基于田口法的 TC4 钛合金电化学车削试验研究 [J]. 现代制造工程, 2023(7): 1-8.

[20] 王义江, 孙莉, 刘梦涵, 等. 基于响应面法的矿用翅片管空冷器参数优化 [J]. 化工学报, 2024, 75(1): 279-291.

[21] 童佳琪, 田景坤, 王奕涵, 等. 响应曲面法优化磁铁矿-石英体系瓷球磨矿参数 [J]. 过程工程学报, 2024, 24(6): 726-733.

[22] 史永鹏, 武云鹏, 杨锋光, 等. 基于响应曲面法的切削 38CrMoAl 材料表面粗糙度预测模型和优化 [J]. 工具技术, 2023, 57(12): 89-92.

第一作者: 李俊霖, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为机械零件优化设计。E-mail: 1064842491@qq.com

通信作者: 龚青山, 男, 1982 年生, 博士, 教授, 研究方向为绿色设计与制造。E-mail: gongqingshan@163.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-04-07)

文章编号: 20241116

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。