

# 磨料水射流修复钢轨工艺参数优化研究

郑燕

中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉,430063

**摘要:**为提高磨料水射流修复钢轨的效率及修复质量并降低能量损耗,对我国 U71Mn 60 kg/m 重轨开展了磨料水射流修复钢轨正交试验,基于中心复合设计(CCD)响应曲面法建立了钢轨修复质量回归模型,探究了各工艺参数对修复质量的影响。研究表明,喷嘴进给速度较水射流压力对截面轮廓度、切割磨削区表面粗糙度和变形磨削区表面粗糙度的影响更显著;得到了侧重于修复质量以及侧重于修复效率的两套不同适用条件下的工艺参数优化组合,通过试验验证发现,截面轮廓度、切割磨削区表面粗糙度和变形磨削区表面粗糙度的预测值与试验值的误差均小于6%,平均误差小于4%,证明该模型可有效预测切割面的表面粗糙度,为磨料水射流修复钢轨实际应用奠定了理论基础。

**关键词:**磨料水射流;钢轨修复;参数优化;响应曲面法

**中图分类号:** U216

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.025

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Research on Processing Parameter Optimization of Rail Repair by Abrasive Waterjet

ZHENG Yan

China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, 460063

**Abstract:** In order to improve the efficiency and repair quality of abrasive waterjet repairing rails and reduce energy loss, the orthogonal experiments on abrasive waterjet repairing rails were carried out on China's U71Mn 60 kg/m heavy rail, based on central composite design(CCD) response surface method. The repair quality regression model of rails was established, the influences of each processing parameter on the repair quality was studied. The results show that the nozzle feed rate has the more significant effect on the profiles, the surface roughnesses of cutting ground zones and the surface roughnesses of deformation ground zones than that of waterjet pressure. And two sets of processing parameter optimization combinations are obtained under different applicable conditions, one focuses on the repair quality, the other focuses on efficiency of repairing. It is found that the errors of the predicted values and the experimental values of the profiles, the surface roughnesses of the cutting ground zones and the surface roughnesses of the deformation ground zones are less than 6%, and the average error is less than 4%. It is proved that the model may effectively predict the surface roughnesses of the cutting surfaces, which lays a theoretical foundation for the practical applications of abrasive waterjet repairing rails.

**Key words:** abrasive waterjet; rail repair; parameter optimization; response surface method

### 0 引言

铁路运输因其运输速度快、客运货运均可承担、运行安全可靠等特点,逐渐成为我国远距离运输的主要交通方式,目前我国高铁总里程已稳居世界首位<sup>[1]</sup>。但长久运行不可避免地会对轨道造成损伤,常见损伤类型有波磨、肥边、剥离、疲劳断裂等。为提高铁路运输可靠性、降低事故发生概率,需要对钢轨进行打磨,使其保持良好的运行状态。

目前主要采取直接更换和在线修复两种手段进行钢轨修复。直接更换虽然修复精度更高,但是效率低下、修复时间长、人力物力投入大,且修复后钢轨焊接接头数量增加,安全隐患更大<sup>[2]</sup>,所以目前修复方式更倾向于在线修复。在线修复主要利用钢轨打磨车修复,钢轨打磨车进行打磨作业时与钢轨硬接触,加工部位温度高,可能造成钢轨发蓝,形成脆性较大的马氏体组织,导致钢轨易产生裂纹,使用寿命缩短,从而造成很大的安全隐患<sup>[3]</sup>。此外,砂轮或铣刀盘在修复钢轨的过程中损耗较快,需要定期更换,维保费用高,工作过程中会产生火花及粉尘,噪声巨大,易对环境造成

收稿日期:2024-06-19

基金项目:中铁第四勘察设计院集团有限公司重点科研项目(2021K055)

污染<sup>[4]</sup>。

磨料水射流是将具有一定数量和质量的磨料与通过增压设备加压的水混合后从特定喷嘴射出而形成的高速高能量的固液两相射流<sup>[5-6]</sup>。磨料水射流加工 (abrasive jet machining, AJM) 则是通过高压水带动细小的磨料粒子高速移动, 连续冲击试件, 不断去除所接触的材料, 实现对工件加工的技术<sup>[7-8]</sup>。磨料水射流切割技术属于冷切割, 在修复钢轨的过程中不会因摩擦发热而产生热变形和热应力, 也不会产生金属火花、粉尘和噪声, 故磨料水射流技术用于钢轨打磨属于一种颠覆性创新技术, 需要对其修复后的粗糙度等实际检验参数进行试验验证, 以支持该技术的产业化<sup>[9]</sup>。

为提高磨料水射流修复钢轨效率及修复质量并降低能量损耗, 本文进行了磨料水射流修复钢轨工艺参数优化研究, 通过正交试验建立了磨料水射流修复钢轨的修复质量模型, 同时研究了各工艺参数对修复质量的影响。在本文中, 钢轨修复质量主要关注切割磨削区域表面粗糙度、变形磨削区域表面粗糙度和截面轮廓度三个指标。最后得到了两套不同适用条件下的工艺参数优化组合, 为水射流打磨钢轨提供了一定的试验支撑及工程参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验条件

本试验使用的切割设备为 APW2016BA-18 五轴数控超高压水切割机, 由高压柜、数控柜和工作台组成, 为后混合式系统, 高压柜供给最高压力为 420 MPa。宝石喷嘴直径为 0.33 mm, 聚焦管直径为 1.02 mm, 切割平台如图 1 所示。



图 1 APW2016BA-18 五轴数控超高压水切割机  
Fig.1 APW2016BA-18 five-axis CNC ultra-high pressure waterjet cutting machine

本研究采用 NewView9000 白光干涉 3D 表面轮廓仪直接测量或间接换算轮廓度、粗糙度等数据, 实物如图 2 所示。该仪器由气动工作台、传感器、镜头等组成, 附有电脑及专用软件, 其主要技术参数如表 1 所示。

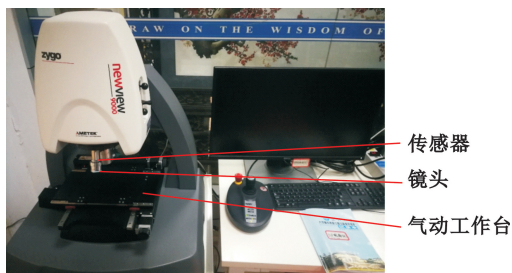


图 2 NewView9000 白光干涉 3D 表面轮廓仪  
Fig.2 NewView9000 white light interferometer  
3D surface profiler

表 1 NewView9000 白光干涉 3D 表面轮廓仪  
主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of NewView9000 white light interferometer 3D surface profiler

扫描范围/ $\mu\text{m}$	扫描速度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Ra 精度/nm	RMS 重复性/nm	CCD 分辨率/pixel $\times$ pixel
0~150	$\geq 114$	$\leq 0.1$	$\leq 0.01$	1024 $\times$ 1024

选择符合行业标准 TB/T 2344—2012 的 60 kg/m 重型钢轨作为研究的修复对象, 钢轨轨头的主要尺寸如图 3 所示。选取钢轨材料为 U71Mn, 表 2 和表 3 分别展现了 U71Mn 材料各元素的质量分数和主要力学性能<sup>[10]</sup>。

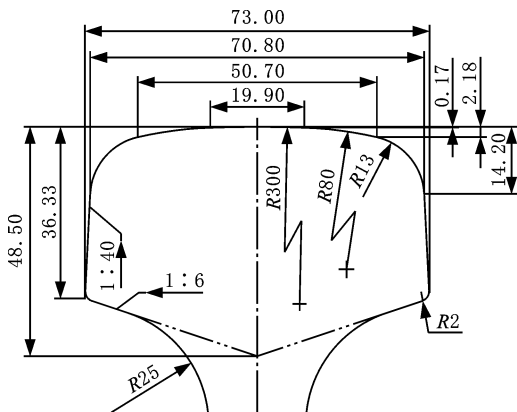


图 3 60 kg/m 钢轨轨头部分主要尺寸图  
Fig.3 Main dimension diagram of the rail head of a 60 kg/m rail

表 2 U71Mn 各元素的质量分数

Tab.2 Mass fraction of each element in U71Mn %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Al)
0.65~0.76	0.15~0.58	0.70~1.2	$\leq 0.03$	$\leq 0.025$	$\leq 0.01$

表 3 U71Mn 的主要力学性能

Tab.3 Main mechanics properties of U71Mn

硬度(HV)	面缩率/%	伸长率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
260~300	$\geq 14$	$\geq 10$	460	880

本试验磨料选用 80 目石榴石, 磨料质量流量为 730 g/min, 聚焦管直径为 1.02 mm, 靶距为 9 mm。根据 QIAN 等<sup>[11]</sup>提出的钢轨廓形拟合方法, 将轨头外轮廓线分割为多段直线, 如图 4 所

示。使用多段直线拟合圆弧时,若拟合直线总数确定,则每段直线长度一致,拟合的轮廓度最小。切割一段圆弧,如图 5 所示,设该圆弧圆心角为  $\beta$ ,被均分为  $n$  份,每段弦长为  $L$ ,对应圆心角为  $\alpha$ ,圆弧半径为  $R$ ,切割的圆弧到弦的最远距离为  $d_m$ ,则存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{L}{2}\right)^2 + (R - d_m)^2 &= R^2 \\ \beta &= n\alpha \\ \sin \frac{\alpha}{2} &= \frac{L}{2R} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)可简化为

$$d_m = R - R \left| \cos \frac{\beta}{2n} \right| \quad (2)$$

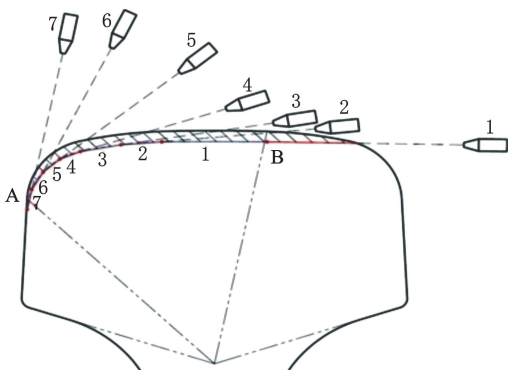


图 4 60 kg/m 重轨表面处理方法示意图<sup>[11]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of the surface treatment method for 60 kg/m heavy rail<sup>[11]</sup>

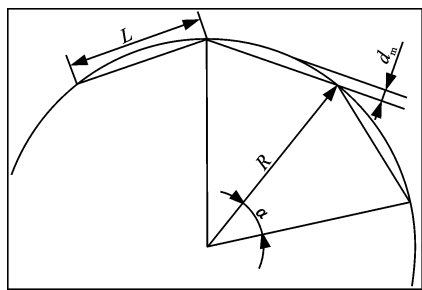


图 5 圆弧廓形拟合方法示意图

Fig.5 Schematic diagram of arc profile fitting method

按 TBT3520—2018《铁路大型养路机械 钢轨打磨车》的规定,修复后钢轨横向轮廓精度为  $\pm 0.2$  mm,将轮廓度不超过 0.2 mm 作为拟定目标廓形的设计目标,即保证  $d_m$  不大于 0.2 mm,则可得

$$n \geq \frac{\beta}{2\arccos\left(1 - \frac{0.2}{R}\right)} \quad (3)$$

利用图 3 所示的钢轨各段圆弧半径参数,由式(1)~式(3)可计算得到轨头上表面 3 段圆弧分别分为圆弧 4(图 4 中线段 4、5、6、7)、圆弧 2(图 4 中线段 2、3)、圆弧 1(图 4 中线段 1)。理想情况下,当各工艺参数相同时,磨料水射流切割不同厚

度的相同材料所获得的切缝形状曲线基本一致<sup>[12]</sup>,对应深度的粗糙度也相同。开展磨料水射流修复钢轨试验时,拟合廓形各线段对应修复面的实际宽度不同,相当于在相同的工艺参数下切割不同厚度的钢轨材料,因此从试验简便角度考虑,只研究拟合廓形线段 5 对应修复面的切割磨削区和变形磨削区的粗糙度。

同理,修复深度不同时,拟合廓形相同线段对应的修复面的宽度不同,相当于磨料水射流切割了不同厚度的钢轨,修复面的同等深度位置下的廓形和粗糙度也应是相同的,即理想情况下修复深度对修复质量没有影响,本试验选定的修复深度为 0.5 mm。但只有刚好切穿时,切割磨削区和变形磨削区才完整,大部分情况下切割磨削区完整,变形磨削区不完整,因此通过试验建立的切割磨削区表面粗糙度的模型适用于拟合廓形对应的不同修复面,而变形磨削区表面粗糙度的模型仅适用于拟合廓形线段 5 对应的修复面。根据 ZENG<sup>[13]</sup>的研究,磨料水射流切割材料最大切割深度的三分之一深度区域为切割磨削区,其余区域为变形磨削区,粗糙度测量位置如图 6 所示。

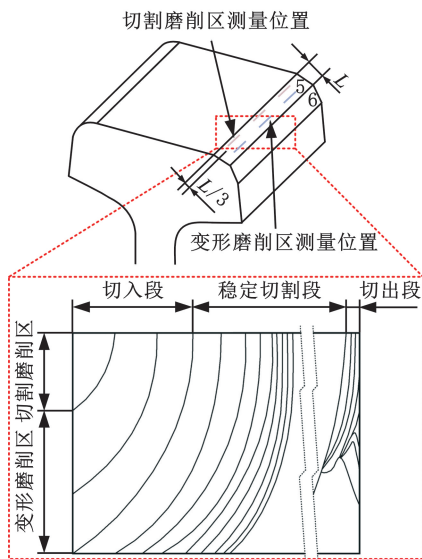


图 6 粗糙度测量位置图

Fig.6 Roughness measurement position diagram

### 1.2 试验方案及结果

基于响应曲面法设计磨料水射流修复钢轨试验,只研究水射流压力及喷嘴进给速度对修复质量的影响,采用中心复合设计(central composite design, CCD),设置  $-\gamma, -1, 0, 1, \gamma$  五个水平,其中  $\gamma = 1.414$ 。试验研究的各工艺参数及水平如表 4 所示。

将截面轮廓度  $T$ 、切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  和变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  作为修复效

表 4 工艺参数优化试验的工艺参数及水平

Tab.4 Processing parameters and levels of processing parameter optimization test

工艺参数	水平				
	-1.414	-1	0	1	1.414
A(水射流压力)/MPa	360	365.858	380	394.142	400
B(喷嘴进给速度)/(mm·min <sup>-1</sup> )	200	258.579	400	541.421	600

果的评价指标,共进行 13 组试验。通过轮廓仪直接测量或间接换算可以得到截面轮廓度和表面粗糙度,截面轮廓度由轮廓仪测量 5 个不同位置截面得到,是指切割后的廓形与理论廓形之间的偏离程度,偏离程度越大,则截面轮廓度值越大。而修复区域的表面粗糙度则借助白光干涉轮廓仪在切割磨削区域中变形磨削区域内的 5 个不同位置下测量得出。正交试验安排如表 5 所示,其中水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 都是水平值。试验结果分别如图 7~图 9 所示,可以看出,切割磨削区表面粗糙度均在 8 μm 附近,最小可达 7.603 μm,最大为 10.253 μm。而变形磨削区表面粗糙度波动较大,最大可达 84.862 μm,最小为 21.222 μm,最小值也几乎是切割磨削区表面粗糙度最大值的两倍。截面轮廓度最小为 0.281 mm,

表 5 磨料水射流修复钢轨正交试验安排

Tab.5 Orthogonal test arrangement for abrasive waterjet repair of rails

参数	序号						
	1	2	3	4	5	6	7
A	-1	1	-1	1	-1.414	1.414	0
B	-1	-1	1	1	0	0	-1.414

参数	序号						
	8	9	10	11	12	13	
A	0	0	0	0	0	0	
B	1.414	0	0	0	0	0	

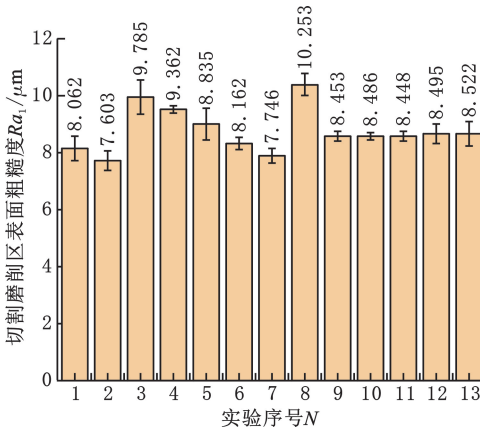


图 7 切割磨削区表面粗糙度试验结果

Fig.7 Testing results of surface roughness of cutting and grinding area

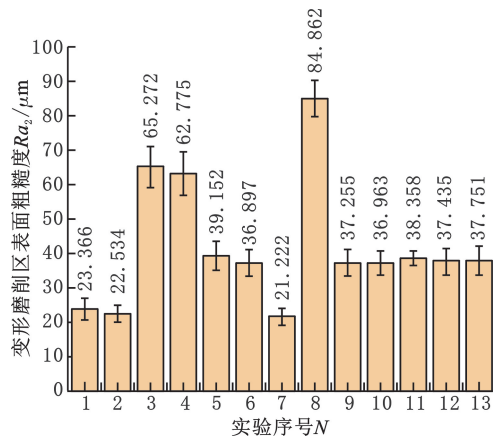


图 8 变形磨削区表面粗糙度试验结果

Fig.8 Testing results of surface roughness of deformation grinding area

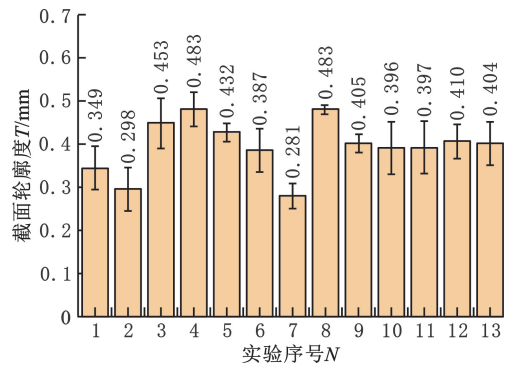


图 9 截面轮廓度试验结果

Fig.9 Testing results of cross-sectional profile

最大为 0.483 mm,根据《TJ/GW170—2021 普速铁路钢轨打磨验收标准》,轨头不同区域公差带最高要求为±0.3 mm,结合设计目标为 0.2 mm,则钢轨修复后验收的轮廓度不超过 0.5 mm 即可满足验收条件。

## 2 结果分析

### 2.1 修复质量回归模型

#### 2.1.1 截面轮廓度方差分析

对截面轮廓度的试验数据进行响应面回归分析,所得截面轮廓度的回归方程为

$$T = 0.4049 - 0.01619A + 0.07178B + 0.0202AB - 0.01082B^2 + 0.01134AB^2 \quad (4)$$

其中, T 为截面轮廓度(mm),代入计算时 A、B 参数的实际值需要转换为[-1.414, 1.414]范围内的水平值(与表 4 中的参数水平范围保持一致)。对式(4)进行方差分析,其结果如表 6 所示。取显著性水平 ε 为 0.05,由表 6 可知,模型的 P 值小于 0.05,模型显著。A、B、AB、B<sup>2</sup>、AB<sup>2</sup>项的 P 值均小于 0.05,均较为显著。失拟项的 P 值为 0.5535>0.05,不显著,表明模型准确可靠。

表 6 截面轮廓度回归方程模型的方差分析结果

Tab.6 ANOVA results of the cross-sectional profile regression equation model

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	0.045	5	$8.963 \times 10^{-3}$	265.86	<0.0001
A(水射流压力)	$1.049 \times 10^{-3}$	1	$1.049 \times 10^{-3}$	31.11	0.0008
B(喷嘴进给速度)	0.041	1	0.041	1222.42	<0.0001
AB	$1.632 \times 10^{-3}$	1	$1.632 \times 10^{-3}$	48.41	0.0002
B <sup>2</sup>	$8.284 \times 10^{-4}$	1	$8.284 \times 10^{-4}$	24.57	0.0016
AB <sup>2</sup>	$2.573 \times 10^{-4}$	1	$2.573 \times 10^{-4}$	7.63	0.0280
残差	$2.360 \times 10^{-4}$	7	$3.371 \times 10^{-5}$		
失拟项	$8.876 \times 10^{-5}$	3	$2.959 \times 10^{-5}$	0.80	0.5535
纯误差	$1.472 \times 10^{-4}$	4	$3.681 \times 10^{-5}$		
总和	0.045	12			

对磨料水射流修复钢轨的截面轮廓度的试验数据进行残差分析,进一步检验模型的正确性,包括计算残差的正态概率,探究不同预测值和不同试验顺序下残差的分布情况,并对比预测值和试验值的接近程度,绘制于图 10。由图 10a 可知,各点分布在同一条直线附近,表明残差满足正态分布;由图 10b 和图 10c 可知,残差与预测值、试验顺序都没有明显的函数关系,表明试验中的系统误差小;由图 10d 可知,预测值与实际值成线性正相关,表明模型预测性良好。

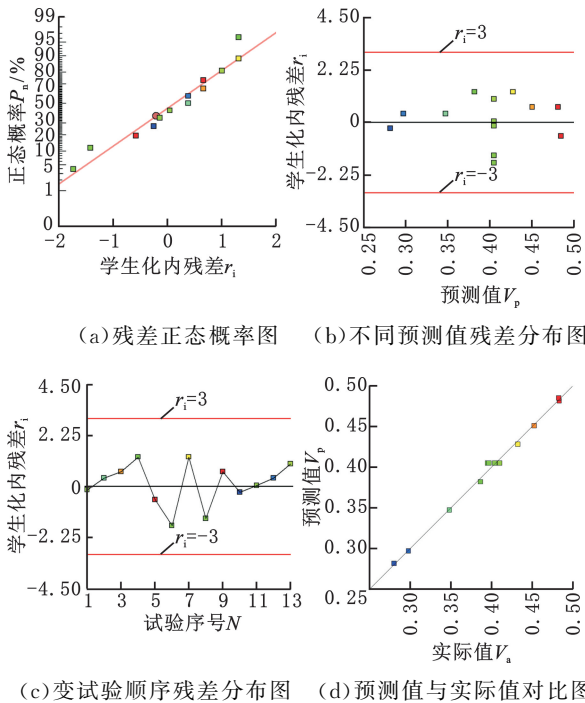


图 10 截面轮廓度试验数据残差分析图

Fig.10 Residual analysis diagram of cross-sectional profile testing data

2.1.2 切割磨削区方差分析

对切割磨削区表面粗糙度的试验数据进行响应面回归分析,得到的切割磨削区表面粗糙度的

回归方程为

$$Ra_1 = 8.4859 - 0.2292A + 0.8784B + 0.2568B^2 - 0.03968A^2B^2 \quad (5)$$

其中,  $Ra_1$  为切割磨削区表面粗糙度( $\mu\text{m}$ ),代入计算时 A、B 参数的实际值需要转换为[-1.414, 1.414]范围内的水平值。对式(5)进行方差分析,结果如表 7 所示。取显著性水平  $\epsilon$  为 0.05,由表 7 可知,模型的 P 值小于 0.05,模型显著。A、B、B<sup>2</sup>、A<sup>2</sup>B<sup>2</sup>项的 P 值均小于 0.05,均较为显著。失拟项的 P 值为 0.7414 > 0.05,不显著,表明模型准确可靠。

表 7 切割磨削区表面粗糙度方差分析结果

Tab.7 Results of variance analysis of surface roughness of cutting and grinding area

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	7.03	4	1.76	2486.23	<0.0001
A(水射流压力)	0.42	1	0.42	594.35	<0.0001
B(喷嘴进给速度)	6.17	1	6.17	8728.72	<0.0001
B <sup>2</sup>	0.41	1	0.41	580.30	<0.0001
A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>	$3.833 \times 10^{-3}$	1	$3.833 \times 10^{-3}$	5.42	0.0483
残差	$5.658 \times 10^{-3}$	8	$7.072 \times 10^{-4}$		
失拟项	$1.883 \times 10^{-3}$	4	$4.707 \times 10^{-4}$	0.50	0.7414
纯误差	$3.775 \times 10^{-3}$	4	$9.437 \times 10^{-4}$		
总和	7.04	12			

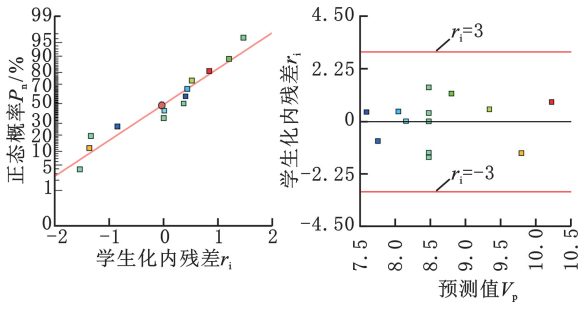
为进一步检验回归模型(式(5))的正确性,绘制出了残差分析图(图 11)。由图 11a 可知,各点分布在同一条直线附近,残差满足正态分布;由图 11b 和图 11c 可知,残差与预测值、试验顺序都没有明显的函数关系,试验中的系统误差小;由图 11d 可知,预测值与实际值成线性正相关,表明模型的预测性好,故该回归方程模型可靠性高、拟合程度高。

2.1.3 变形磨削区方差分析

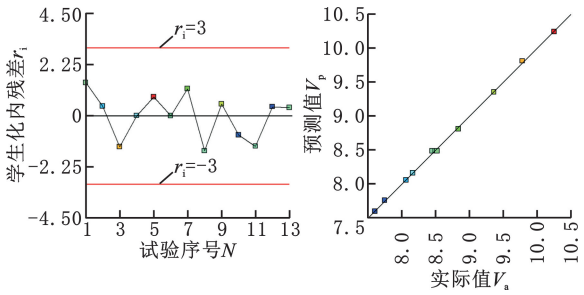
对变形磨削区表面粗糙度的试验数据进行响应面回归分析,得到的切缝入口宽度的回归方程为

$$Ra_2 = 37.6873 - 0.8148A + 22.5001B + 7.6774B^2 - 1.9634A^2B - 1.8779A^2B^2 \quad (6)$$

其中,  $Ra_2$  为变形磨削区表面粗糙度( $\mu\text{m}$ ),代入计算时 A、B 参数的实际值需要转换为[-1.414, 1.414]范围内的水平值。对式(6)进行方差分析,结果如表 8 所示。将显著性水平  $\epsilon$  取为 0.05,由表 8 可知,模型的 P 值小于 0.05,表明模型是显著的。A、B、B<sup>2</sup>、A<sup>2</sup>B、A<sup>2</sup>B<sup>2</sup>项的 P 值均小于 0.05,均较为显著。失拟项的 P 值为 0.4201 > 0.05,不显著,表明模型准确可靠。



(a) 残差正态概率图 (b) 不同预测值残差分布图



(c) 变试验顺序残差分布图 (d) 预测值与实际值对比图

图 11 切割磨削区表面粗糙度试验数据残差分析图

Fig.11 Residual analysis of experimental data of surface roughness of cutting and grinding area

表 8 变形磨削区表面粗糙度方差分析结果

Tab.8 Variance analysis results of surface roughness in deformation grinding area

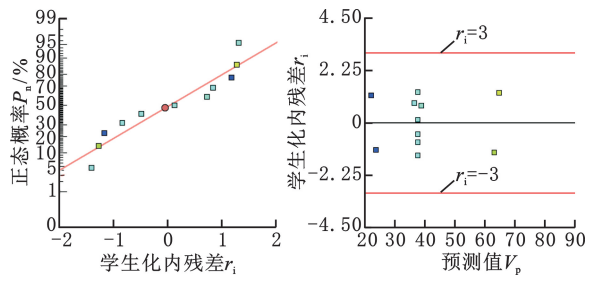
方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	4099.90	5	819.98	2667.27	<0.0001
A(水射流压力)	5.31	1	5.31	17.27	0.0043
B(喷嘴进给速度)	2025.02	1	2025.02	6587.11	<0.0001
B <sup>2</sup>	366.75	1	366.75	1192.98	<0.0001
A <sup>2</sup> B	7.71	1	7.71	25.08	0.0016
A <sup>2</sup> B <sup>2</sup>	8.59	1	8.59	27.93	0.0011
残差	2.15	7	0.31		
失拟项	1.01	3	0.34	1.19	0.4201
纯误差	1.14	4	0.28		
总和	4102.05	12			

为进一步检验回归方程(式(6))的正确性,同理绘制出残差分析图(图 12)。由图 12a 可知,各点分布在同一条直线附近,说明残差满足正态分布;由图 12b 和图 12c 可知,残差与预测值、试验顺序都没有明显的函数关系,说明试验中的系统误差小;由图 12d 可知,预测值与实际值呈线性正相关,说明模型的预测性好。故该回归方程模型可靠性高,拟合程度高。

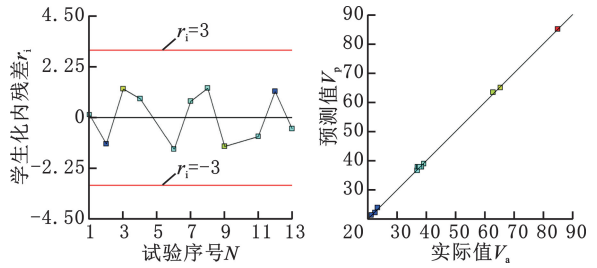
## 2.2 工艺参数对修复质量的影响

### 2.2.1 工艺参数对截面轮廓度的影响

图 13 为截面轮廓度的微扰图,展现了水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 各自对截面轮廓度 T



(a) 残差正态概率图 (b) 不同预测值残差分布图



(c) 变试验顺序残差分布图 (d) 预测值与实际值对比图

图 12 变形磨削区表面粗糙度试验数据残差分析图

Fig.12 Residual analysis of experimental data of surface roughness in deformation grinding area

的影响。由图 13 可知,喷嘴进给速度对截面轮廓度的影响更加显著,水射流压力对截面轮廓度的影响较弱;截面轮廓度与喷嘴进给速度成正相关,与水射流压力成负相关,即喷嘴进给速度越大,截面轮廓度越大,水射流压力越大,截面轮廓度越小。

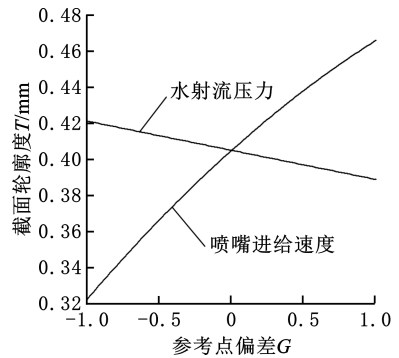


图 13 截面轮廓度的微扰图

Fig.13 Perturbation diagram of cross-sectional profile

当喷嘴进给速度越大时,射流在钢轨相同位置处切割的时间越短,射流与钢轨的接触越不充分,射流对钢轨的切割和打磨效果越差,故表面波纹度越大,截面轮廓与目标廓形的偏离越大,即截面轮廓度越大;而水射流压力越大,射流发散程度越低,射流能量越集中,射流对钢轨的切割和打磨越稳定,故表面波纹度越小,截面轮廓与目标廓形的偏离越小,即截面轮廓度越小。图 14 展现了水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 的交互作用对截面轮廓度 T 的影响。

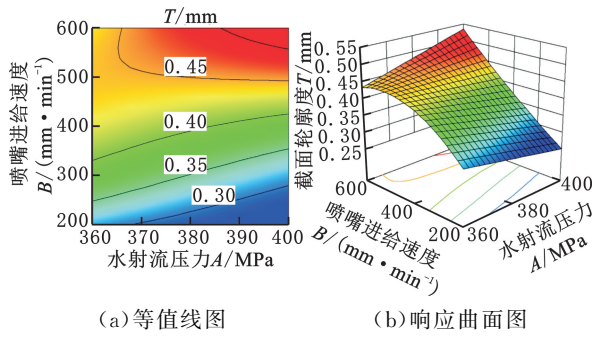


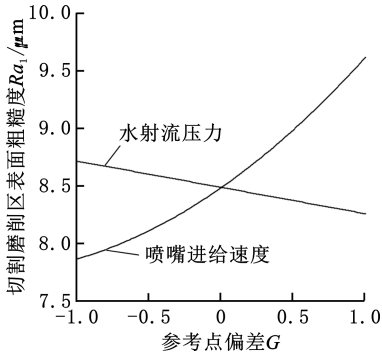
图 14 水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 的交互作用对截面轮廓度的影响图

Fig.14 Effect of interaction between waterjet pressure A and nozzle feed speed B on cross-sectional profile

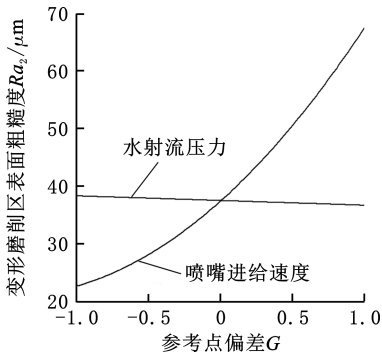
由图 14 可知,随着水射流压力的增大和喷嘴进给速度的减小,截面轮廓度总体逐渐减小,且随喷嘴进给速度的变化更加明显。这是因为截面轮廓度与水射流压力成负相关,与喷嘴进给速度成正相关,且喷嘴进给速度对截面轮廓度的影响更大。

2.2.2 工艺参数对表面粗糙度的影响

图 15a 为切割磨削区表面粗糙度的微扰图,图 15b 为变形磨削区表面粗糙度的微扰图,两者分别展现了水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 各自对切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  和变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  的影响。



(a) 切割磨削区



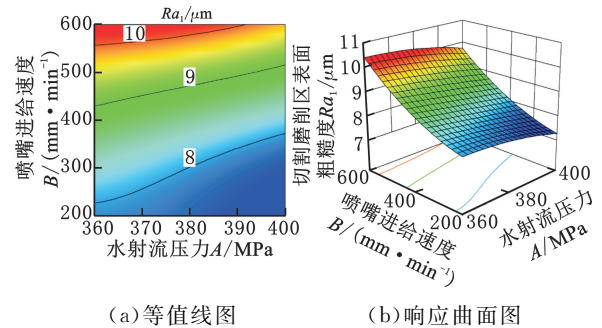
(b) 变形磨削区

图 15 修复面上不同区域表面粗糙度的微扰图  
Fig.15 Perturbation map of surface roughness in different areas on the repaired surface

由图 15 可知,喷嘴进给速度对切割磨削区和变形磨削区表面粗糙度的影响都更显著,而水射流压力的影响则较弱;切割磨削区和变形磨削区表面粗糙度与喷嘴进给速度均成正相关,与水射流压力均成负相关,即喷嘴进给速度越大,表面粗糙度越大,水射流压力越大,表面粗糙度越小。水射流压力变化对切割磨削区及变形磨削区表面粗糙度的影响均不大;虽然喷嘴进给速度的改变对切割磨削区表面粗糙度的影响不大,但它对变形磨削区表面粗糙度影响却很大。

但相比于变形磨削区表面粗糙度,水射流压力和喷嘴进给速度各自对切割磨削区表面粗糙度的影响基本可以忽略。当喷嘴进给速度越大时,射流在钢轨切割磨削区相同位置处切割的时间越短,射流与切割磨削区的接触越不充分,射流对切割磨削区的切割效果越差,故表面粗糙度越大;而水射流压力越大,射流发散度越小,射流能量越集中,射流对钢轨切割磨削区的切割越稳定,切割效果越好,即表面粗糙度越小。

图 16、图 17 分别展现了水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 的交互作用对切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  和变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  的影响。



(a) 等值线图 (b) 响应曲面图

图 16 水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 的交互作用对切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  的影响

Fig.16 Effect of the interaction between waterjet pressure A and nozzle feed speed B on the surface roughness  $Ra_1$  of the cutting and grinding area

由图 16 和图 17 可知,总体来看,随着水射流压力的增大和喷嘴进给速度的减小,切割磨削区及变形磨削区表面粗糙度逐渐减小,且随喷嘴进给速度的变化更加明显。这是因为切割磨削区和变形磨削区表面粗糙度与水射流压力均成负相关,与喷嘴进给速度均成正相关,且喷嘴进给速度对切割磨削区及变形磨削区表面粗糙度的影响均更大。

2.3 磨料水射流修复钢轨的工艺参数优化

2.3.1 工艺参数优化策略

钢轨修复需要保证切割面尽可能光滑,因此

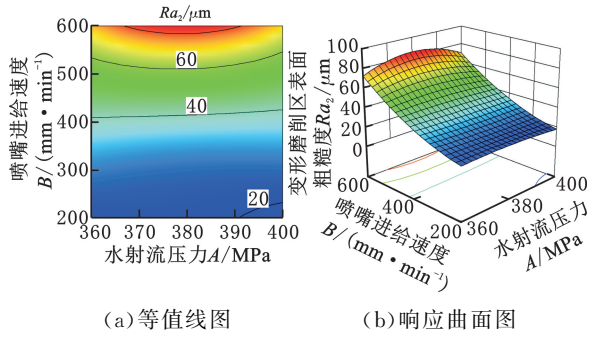


图 17 水射流压力 A 和喷嘴进给速度 B 的交互作用对变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  的影响

Fig.17 Effect of the interaction between waterjet pressure A and nozzle feed speed B on the surface roughness

A and nozzle feed speed B on the surface roughness  $Ra_2$  of the deformation grinding area

截面轮廓度和表面粗糙度要尽量小,同时,为降低能源消耗,积极实现“双碳”目标,水射流压力应尽量最小,且需要保证一定的修复效率,所以应使喷嘴进给速度尽量大。但水射流压力减小或喷嘴进给速度增大会导致截面轮廓度和表面粗糙度增大,因此有必要设置两套优化准则,以适应不同的工作要求。第一套准则以修复质量为唯一指标,使截面轮廓度和表面粗糙度最小,可得到最优的修复效果;第二套准则兼顾修复质量和修复效率,但效率优先,即喷嘴进给速度尽量大,水射流压力、截面轮廓度、表面粗糙度尽量小。具体设置如表 9 所示,将重要性分级处理,重要度最大为 5 级、最小为 1 级。

表 9 磨料水射流修复钢轨的工艺参数优化策略

Tab.9 Optimization strategy of processing parameters for abrasive waterjet of repairing rails

条件参数	下限	上限	下权重	上权重	重要度	第一套准则	第二套准则
水射流压力 A/MPa	360	400	1	1	3	范围内	最小化
喷嘴进给速度 B/(mm·min <sup>-1</sup> )	200	600	1	1	5	范围内	最大化
截面轮廓度 T/mm	0.2808	0.4832	1	1	3	最小化	最小化
切割磨削区表面粗糙度 $Ra_1/\mu\text{m}$	7.603	10.253	1	1	3	最小化	最小化
变形磨削区表面粗糙度 $Ra_2/\mu\text{m}$	21.222	84.862	1	1	3	最小化	最小化

2.3.2 工艺参数优化结果

使用 Design Expert 基于中心复合设计响应曲面法进行磨料水射流修复钢轨的工艺参数优化,在第一套和第二套准则约束下的解仅取满意度前三的组合,具体如表 10 所示,其中满意度是指优化后的水射流压力 A、喷嘴进给速度 B、截面轮廓度 T、切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  和变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  符合准则的程度。

表 10 磨料水射流修复钢轨的工艺参数优化结果

Tab.10 Optimization results of processing parameters for repairing rail by abrasive waterjet

准则	解	水射流压力 A/MPa	喷嘴进给速度 B/(mm·min <sup>-1</sup> )	截面轮廓度 T/mm	切割磨削区表面粗糙度 $Ra_1/\mu\text{m}$	变形磨削区表面粗糙度 $Ra_2/\mu\text{m}$
第一套	1	398.250	206.250	0.257	7.345	18.830
	2	390.094	214.688	0.276	7.577	20.473
	3	388.944	202.774	0.270	7.584	20.359
第二套	1	366.118	353.503	0.401	8.446	32.346
	2	366.139	353.408	0.401	8.445	32.332
	3	366.215	353.435	0.401	8.444	32.326

对于第一套准则,目的是获取最小的截面轮廓度和表面粗糙度,故选截面轮廓度 T、切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  及变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  数值最小的一组作为最优解,这个解的喷嘴进给速度较小,修复效率较低,适用于修复质量(即对轮廓度及粗糙度)要求较高的情形。对于第二套准则,由于第二套准则中喷嘴进给速度的重要度最大,故选择喷嘴进给速度最大的一组解作为最优解,这个解的表面粗糙度较大,修复质量较差,适用于对修复效率要求较高的情形。综上所述,磨料水射流修复钢轨的工艺参数优化的两组最优解如表 11 所示。

表 11 磨料水射流修复钢轨工艺参数优化的最优解

Tab.11 Optimal solution for process parameter optimization of rail repair by abrasive waterjet

序号	水射流压力 A/MPa	喷嘴进给速度 B/(mm·min <sup>-1</sup> )	适用情形	后续处理
1	398.250	206.250	对修复质量要求较高时	需要进一步打磨处理
2	366.251	353.464	对修复效率要求较高时	需要进一步打磨处理

钢轨修复试验后的验收目标为:截面轮廓度不超过 0.6 mm 且表面粗糙度不超过 10  $\mu\text{m}$ 。由表 10 可知,两套准则约束下的两组最优解都满足截面轮廓度小于 0.6 mm 且切割磨削区表面粗糙度小于 10  $\mu\text{m}$  的要求,变形磨削区表面粗糙度稍大于 10  $\mu\text{m}$ ,需通过后续的打磨装置将变形磨削区表面粗糙度打磨至 10  $\mu\text{m}$  以内。

以上两个最优解仅仅是水射流压力在 360~400 MPa 之间变化、喷嘴进给速度在 200~600 mm/min 之间变化时的最优解,实际水射流压力或喷嘴进给速度超过本范围或其他工艺参数不同时,可以按照上述研究思路重新进行工艺参数优化。

2.3.3 优化结果试验验证

为验证最优解的有效性,取与最优解相同的

两组工艺参数进行磨料水射流修复钢轨的验证试验,第一组:水射流压力  $A = 398.25$  MPa、喷嘴进给速度  $B = 206.25$  mm/min;第二组:水射流压力  $A = 366.251$  MPa、喷嘴进给速度  $B = 353.464$  mm/min。试验结果如图 18、图 19 和表 12 所示。第一组试验中,截面轮廓度  $T$  的试验值为  $0.262$  mm、预测值为  $0.257$  mm、误差为  $1.91\%$ ,第二组中  $T$  的试验值为  $0.412$  mm、预测值为  $0.401$  mm、误差为  $2.67\%$ ,两组试验的误差均小于  $3\%$ ,平均误差为  $2.29\%$ ;第一组试验中,切割磨削区表面粗糙度  $Ra_1$  的试验值为  $7.426$   $\mu\text{m}$ 、预测值为  $7.345$   $\mu\text{m}$ 、误差为  $1.09\%$ ,第二组中  $Ra_1$  的试验值为  $8.405$   $\mu\text{m}$ 、预测值为  $8.443$   $\mu\text{m}$ 、误差为  $0.45\%$ ,两组试验的误差均小于  $2\%$ ,平均误差为  $0.77\%$ ;第一组试验中,变形磨削区表面粗糙度  $Ra_2$  的试验值为  $18.934$   $\mu\text{m}$ 、预测值为  $18.83$   $\mu\text{m}$ 、误差为  $0.55\%$ ,第二组中  $Ra_2$  的试验值为  $34.137$   $\mu\text{m}$ 、预测值为  $32.325$   $\mu\text{m}$ 、误差为  $5.47\%$ ,两组试验的误差均小于  $6\%$ ,平均误差为  $3.01\%$ 。由上述误差数据可知,基于响应曲面法的优化结果具有较好的有效性和可信度,该模型可有效预测切割后的表面粗糙度。

表 12 磨料水射流修复钢轨工艺参数优化试验验证结果  
Tab.12 Abrasive waterjet repair rail process parameter optimization test results

参数		序号	
		1	2
A/MPa		398.250	366.251
B/(mm·min <sup>-1</sup> )		206.250	353.464
T	试验值/mm	0.262	0.412
	预测值/mm	0.257	0.401
	误差/%	1.91	2.67
	平均误差/%	2.29	
Ra <sub>1</sub>	试验值/ $\mu\text{m}$	7.426	8.405
	预测值/ $\mu\text{m}$	7.345	8.443
	误差/%	1.09	0.45
	平均误差/%	0.77	
Ra <sub>2</sub>	试验值/ $\mu\text{m}$	18.934	34.137
	预测值/ $\mu\text{m}$	18.830	32.325
	误差/%	0.55	5.47
	平均误差/%	3.01	

### 3 结论

为提高磨料水射流修复钢轨效率及修复质量并降低能量损耗,对我国 60 kg/m U71Mn 重轨进行磨料水射流修复钢轨工艺参数优化正交试验。根据试验与分析得出以下结论:

1)建立了磨料水射流修复钢轨的修复质量(即截面轮廓度、切割磨削区和变形磨削区的表面粗糙度)关于水射流压力和喷嘴进给速度的回归方程模型,方差分析结果表明,所建立的回归模型  $P$  值均小于  $0.0001$ ,远小于  $0.05$ ,模型预测性良好,拟合程度高,可靠性高。经试验测量,水射流打磨面粗糙度不大于  $10$   $\mu\text{m}$ ,与钢轨打磨精度相同。

2)喷嘴进给速度对截面轮廓度、切割磨削区表面粗糙度和变形磨削区表面粗糙度的影响较为显著,进给速度增大,截面轮廓度、切割磨削区表面粗糙度和变形磨削区表面粗糙度值均增大,水射流压力的影响相较于进给速度的影响不显著,且截面轮廓度、切割磨削区表面粗糙度和变形磨削区表面粗糙度值均随水射流压力增大而增大。

3)分别以考虑修复质量为准则、兼顾修复质量和效率为准则,优化得到了两组最优解,对磨料水射流修复钢轨工程实际应用具有一定指导意义,验证结果表明,优化结果预测值与试验值的误差均小于  $6\%$ ,平均误差小于  $4\%$ ,验证了优化结果的有效性。根据试验结果,按打磨面粗糙度不大于  $10$   $\mu\text{m}$  进行钢轨打磨作业时,水射流打磨作业速度可与钢轨打磨车作业速度相当,均能满足天窗内作业的需求,但水射流打磨可有效解决粉尘污染、局部温升过高等问题。

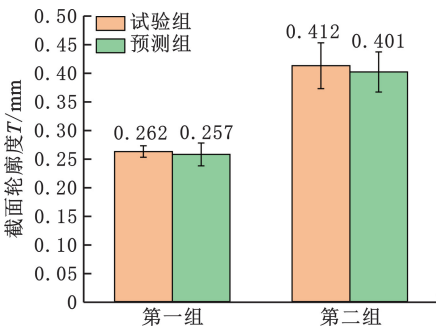


图 18 截面轮廓度试验值与预测值对比图

Fig.18 Comparison of experimental and predicted values of cross-sectional profile

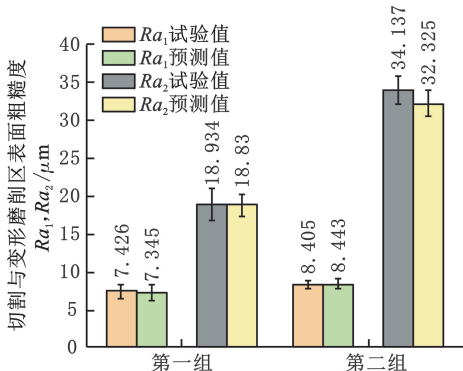


图 19 切割与变形磨削区表面粗糙度试验值与预测值

Fig.19 Experimental and predicted values of surface roughness in cutting and deformation grinding areas

本文暂在室内试验条件下研究工艺参数对钢轨修复质量的影响,最优工艺参数仅在论文试验范围内适用,但可为后续修轨车动态行走中的钢轨修复提供数据参考。此外,钢轨修复车可搭载多个射流喷嘴,因此改进加工方法中喷嘴的布置方式并进行工艺参数的优化,这是在未来的实际应用中需要考虑的。

#### 参考文献:

- [1] 石油沥青编辑部. 中国高速公路、铁路里程均居世界首位[J]. 石油沥青, 2019, 33(4):35.  
Petroleum Asphalt Editorial Department. China Ranks First in the World in Terms of Highway and Railway Mileage[J]. Petroleum Asphalt, 2019, 33(4):35.
- [2] 齐海波, 徐全盖, 赵衍庆, 等. 无缝线路磨损钢轨激光熔覆自动修复方式的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22):160-165.  
QI Haibo, XU Quangai, ZHAO Yanqing, et al. Research on Automatic Repair Method of Worn Rails on Seamless Railway by Laser Cladding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22):160-165.
- [3] 贾春, 戴虹, 汪鹏举, 等. 钢轨现场焊打磨工艺对接头质量的影响[J]. 电焊机, 2016, 46(8):76-79.  
JIA Chun, DAI Hong, WANG Pengju, et al. Effect of Rail Field Welding and Grinding Process on Joint Quality[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(8):76-79.
- [4] 王建军. 无缝线路钢轨在线修复技术[J]. 国防交通工程与技术, 2012, 10(2):1-4.  
WANG Jianjun. Online Repair Technology for Seamless Rail Tracks[J]. National Defense Transportation Engineering and Technology, 2012, 10(2):1-4.
- [5] 邓乾发, 汪杨笑, 袁巨龙, 等. 基于流体自激的磨料水射流加工仿真与实验[J]. 中国机械工程, 2022, 33(3):279-289.  
DENG Qianfa, WANG Yangxiao, YUAN Julong, et al. Simulation and Experiment of Abrasive Water Jet Machining Based on Fluid Self-excitation[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(3):279-289.
- [6] 弓永军. 磨料水射流切割技术研究现状及其发展趋势[J]. 液压与气动, 2016(10):1-5.  
GONG Yongjun. Research Status and Development Trend of Abrasive Waterjet Cutting Technology[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2016(10):1-5.

- [7] 刘海青, 王志文, 成明, 等. 高压水射流切割技术发展及应用现状[J]. 机床与液压, 2018, 46(21):173-179.  
LIU Haiqing, WANG Zhiwen, CHENG Ming, et al. Development and Application Status of High-pressure Waterjet Cutting Technology[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2018, 46(21):173-179.
- [8] GOSTIMIROVIC M, PUCOVSKY V, SEKULIC M, et al. Evolutionary Optimization of Jet Lag in the Abrasive Waterjet Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101:3131-3141.
- [9] 章武林, 樊小强, 朱旻昊, 等. 钢轨打磨关键装备及磨石技术发展现状与展望[J]. 中国机械工程, 2022, 33(19):2269-2287.  
ZHANG Wulin, FAN Xiaoqiang, ZHU Minhao, et al. Current Status and Prospects of Key Equipment and Grinding Stone Technology for Rail Grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(19):2269-2287.
- [10] 占国栋. 钢轨铣磨车铣刀盘设计与优化研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.  
ZHAN Guodong. Research on Design and Optimization of Rail Milling Cutter Head[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [11] QIAN Yinan, XIONG Jie, LI Min, et al. Surface and Profile Treatment of China's U71Mn Heavy Rail Using Abrasive Waterjet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124:2919-2930.
- [12] HENNING A, ANDERS S. Cutting-edge Quality Improvements through Geometrical Modeling[C]//14th International Conference on Jetting Technology. Brugge, 1998:321-328.
- [13] ZENG J. Erosion of Brittle Materials in AWJ Processing[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 1992.

(编辑 胡佳慧)

作者简介:郑燕\*,女,1982年生,高级工程师。研究方向为铁路工务、综合维修、车站设备、物流等。E-mail:113739215@qq.com。

#### 本文引用格式:

郑燕.磨料水射流修复钢轨工艺参数优化研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):1132-1141.  
ZHENG Yan. Research on Processing Parameter Optimization of Rail Repair by Abrasive Waterjet[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):1132-1141.