

面向黏结性能提升的钢桥面铺装层抛丸参数调节方法研究

史慧彬¹, 兰勇烽², 叶勤³, 陈磊磊³

(1. 浙江金华甬金高速公路有限公司杭州科技分公司, 浙江 杭州 310002; 2. 浙江沪杭甬高速公路股份有限公司, 浙江 杭州 310002; 3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 为解决钢桥面铺装脱层病害频发等问题, 提出一种面向黏结性能提升的钢桥面铺装层抛丸参数调节方法, 并通过工程应用验证了方法有效性。首先采用不同方案对车辙板试件进行层间抛丸处治, 并开展剪切试验、拉拔试验进行试件层间黏结性能评价与方案比选; 其次基于正交试验分析不同参数变化对层间黏结性能的影响规律, 并采用灰色关联分析(GRA)法明确性能主控因素; 最后总结形成优化方案并验证其合理性。在此基础上, 依托舟山地区某钢桥面铺装上面层重铺项目, 采用所提方法进行了抛丸方案中的参数选定, 并结合黏结层用量变化开展了黏结层施工方案优化分析, 得到的“黏结层用量采用设计值 0.60 kg/m^2 时抛丸最佳速率为 10 m/min ”、“黏结层用量 0.65 kg/m^2 + 抛丸速率 5 m/min ”为黏结层用量容许变更条件下优化方案的结论, 可为钢桥面铺装层间黏结性能提升提供参考。

关键词: 钢桥面铺装; 层间黏结性能; 抛丸参数; 剪切试验; 拉拔试验; 灰色关联分析

中图分类号: U443.33; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0063-06

Research on Adjustment Method of Shot Blasting Parameters for Steel Bridge Deck Pavement Layer for Improving Bonding Performance

SHI Huibin¹, LAN Yongfeng², YE Qin³, CHEN Leilei³

(1. Hangzhou Technology Branch of Zhejiang Jinhua Yongjin Expressway Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 2. Zhejiang Shanghai-Hangzhou-Ningbo Expressway Joint-Stock Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To address the frequent occurrence of delaminating distress in steel bridge deck pavement, an adjustment method of shot blasting parameters for steel bridge deck pavement layer for improving bonding performance is proposed, and its effectiveness has been verified through engineering application. Firstly, the different schemes are adopted to conduct the interlayer shot blasting treatment on rutting plate specimens, and the shear tests and pull-out tests are carried out to evaluate the interlayer bonding performance of the specimens, and the schemes are compared and selected. Secondly, based on the orthogonal tests, the influence law of different parameter changes on interlayer bonding performance is analyzed, and the grey relational analysis (GRA) method is used to identify the main controlling factors of performance. Finally, an optimized scheme is summarized and its rationality is verified. On this basis, relying on a certain steel bridge deck pavement upper layer repaving project in Zhoushan area, the proposed method is used for parameter selection in the shot blasting scheme, and the optimization analysis of the bonding layer construction scheme is carried out in combination with the change of bonding layer dosage. The conclusions of the optimization scheme under the condition of allowable change in the amount of the bonding layer are that the optimal shot blasting rate is 10 m/min when the bonding layer dosage is the design value of 0.60 kg/m^2 and the bonding layer dosage is 0.65 kg/m^2 + the shot blasting rate is 5 m/min , which can provide a reference for improving the interlayer bonding performance of steel bridge deck pavement.

Keywords: steel bridge deck pavement; interlayer bonding performance; shot blasting parameters; shear test; pull-out test; grey relational analysis

收稿日期: 2025-09-16

作者简介: 史慧彬(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁养护技术研发工作。

0 引言

钢桥面铺装是大跨径钢桥的重要附属设施, 用

于保护桥面钢板、分散车辆荷载和防止雨水侵入,其层间黏结性能直接影响着钢桥的服务质量和服役寿命^[1]。由于环境影响与荷载作用,桥面板和铺装层下层常难以提供足够的黏结性能^[2],易导致铺装层发生层间滑移而出现脱层等一系列病害,严重影响钢桥面铺装整体稳定性。

针对桥面铺装结构层间黏结性能的提升,目前已开展的研究主要是关于采用抛丸等界面处治方式对桥面板表面进行处理,并基于处治前后层间黏结性能变化情况分析性能提升效果。如陈标等^[3]采用抛丸工艺增加混凝土桥面板粗糙度,并对比分析了处治前后黏结性能的变化情况;黄学文等^[4]基于剪切试验得出刻槽处治可有效提高水泥混凝土桥面与沥青混凝土铺装层在水平力作用下的抗剪切变形能力;徐永钢^[5]进行了钢桥面 ERS 结构界面处治方案的试验对比研究;万晨光等^[6]基于铺装结构层间剪切评价指标,分析了抛丸处治的层间黏结性能提升效果;黄飞^[7]通过试验对比,从界面构造深度、抗剪能力等方面进行了多种界面处治方式的性能提升效果研究;HELSEL 等^[8]使用激光分析超高性能混凝土(UHPC)基材表面粗糙度,并采用直接拉伸试验来评估层间性能,总结了表面处治方法对 UHPC 堆焊黏接的影响规律;为进一步明确处治参数调整对于界面处治效果的影响规律,胡海波等^[9]采用 2 种方案实施桥面抛丸,分析了抛丸遍数对于处治效果的影响;朱定等^[10]以钢板粗糙度数据为评价指标,依托港珠澳大桥项目分析了抛丸设备对抛丸施工质量的影响;李嘉等^[11]提出一种基于数字图像技术的 UHPC 表面纹理构造分析方法,建立了处治因素与表面构造深度之间的关系。另外,针对其他多层材料结构的层间黏结性能提升,也有学者开展了相关研究。如石长洪等^[12]结合实际工程中长寿命路面结构和材料设计,针对不同路面结构分别设计了 30 种层间处治方案;He 等^[13]研究了 3 种密封涂层处治条件对沥青砾石密封性能的影响;Yang 等^[14]研究了 5 种沥青路面层间黏结涂层,并基于层间剪切强度分析了黏结涂层施工速率对于层间黏结性能的影响,确定了黏结层最佳施工速率。

现有研究表明,采用抛丸等界面处治方式提升结构层间黏结性能具有可行性,且性能提升效果随着处治参数的调整而改变。但目前关于通过界面处治来提升钢桥面铺装上下层间黏结性能的研究较少,未形成可应用于实际工程的系统化方法。因此,

本文提出了一种面向黏结性能提升的钢桥面铺装层抛丸参数调节方法,并通过工程应用验证了方法有效性。首先,设计制备车辙板试件,采用不同参数抛丸工艺对试件下面层表面进行处治,并开展剪切试验、拉拔试验测定黏结性能评估指标值,再用权重分析方法进行试件综合黏结性能评价与施工方案优选;其次,基于正交试验分析黏结层用量变化对抛丸调参的影响,进一步探究双因素对钢桥面铺装层间黏结性能的影响规律,同时采用灰色关联分析(GRA)法进行影响因素敏感性评价以明确主控因素;最后,总结形成施工方案优化策略并进行合理性验证。

钢桥面铺装层抛丸参数调节方法见图 1。

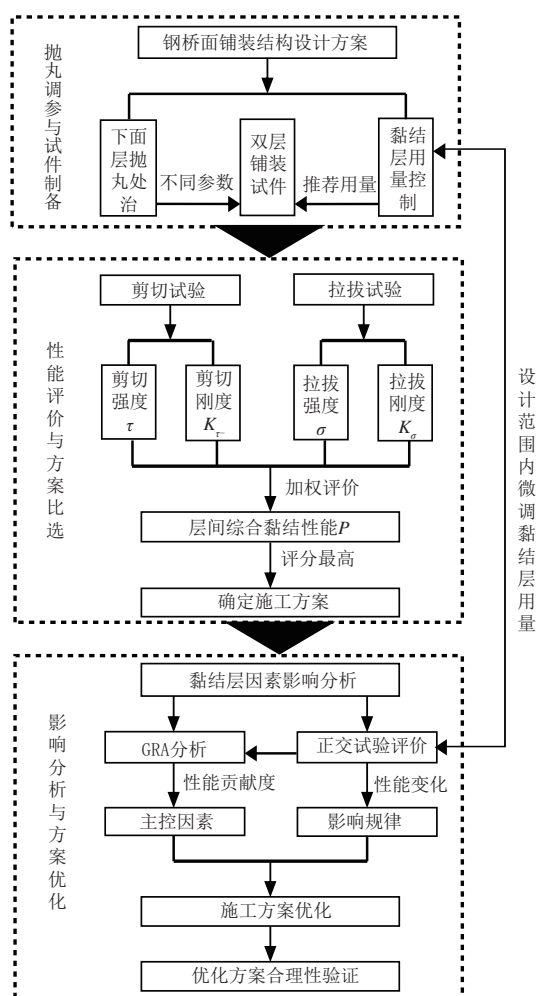


图1 钢桥面铺装层抛丸参数调节方法

1 具体方法

1.1 抛丸调参与试件制备

根据钢桥面铺装结构的现场施工步骤,制定了试件制备和抛丸处治流程。

(1)在车辙板模具中通过轮碾方式制作下面层

试件,并在120、60℃的烘箱中分别养生4 h和4 d。

(2)采用抛丸方式对试件下面层进行表面处治,根据实际施工条件调整抛丸参数。抛丸工艺可调整参数包括弹丸类型和材质、弹丸直径、弹丸流量、抛丸速率等。

(3)在处治后的下面层表面涂布黏结层材料,黏结层用量控制为设计文件推荐用量;待养生条件等满足后轮碾成型上面层,制成钢桥面铺装结构试件。

1.2 性能评价与方案比选

1.2.1 剪切试验

剪切试验所用仪器为微机控制电液伺服万能试验机。剪切试验步骤如下:

(1)切割车辙板试件以制备剪切试验专用试件。

(2)将制备完成的剪切试件放入设定为25℃的烘箱中保温5 h,确保试件温度均匀。

(3)将保温后的剪切试件置于万能机夹具上并确保试件与夹具紧密结合,将组合好的夹具与试件一同置于试验机的圆台支撑中央。

(4)设置竖向加载速率为10 mm/min并开始加载,匀速加载至试件破坏。

(5)读取加载过程中的荷载峰值 $F_{\max}$,记录破坏时荷载及破坏位置,同时观察界面破坏情况。

剪切试验中选定界面剪切强度和界面剪切刚度为层间黏结性能评价指标,分别按式(1)、(2)计算。

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A} \times \sin \alpha \times 10^3 \quad (1)$$

式中: τ 为界面剪切强度,MPa; $F_{\max}$ 为试件在剪切作用下达到极限时的最大加载力,kN; A 为试件有效接触面积, mm^2 ; α 为试件受剪角度, 45° 。

$$K_\tau = \frac{\tau_k}{S_0} \quad (2)$$

式中: K_τ 为界面剪切刚度, N/mm^3 ; τ_k 为剪切力达到线性阶段极限时的剪切强度,MPa; S_0 为剪切力达到线性阶段极限时的切向位移,mm。

1.2.2 拉拔试验

拉拔试验所用仪器为桥面铺装专用拉拔仪。拉拔试验步骤如下:

(1)对车辙板试件进行钻芯处理,以制备拉拔试验专用试件。

(2)在拉拔试件表面涂抹黏结层,并采用AB胶将拉拔头黏附在试件上,放入设定为25℃的烘箱中保温24 h,保证拉拔头与试件表面黏结良好。

(2)连接拉拔头与拉拔仪,并保证试件纵轴与

上、下拉头中心连线相重合。

(3)设定加载速率为10 mm/min并开始加载,以竖向位移控制试验进行。

(4)读取试验过程中的荷载峰值 $F_{\max}$,记录破坏时荷载及破坏位置,同时观察界面破坏情况。

拉拔试验中选定界面拉拔强度和界面拉拔刚度为层间黏结性能评价指标,分别按式(3)、(4)计算。

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \times 10^3 \quad (3)$$

式中: σ 为界面拉拔强度,MPa; $F_{\max}$ 为试件在拉拔过程中达到极限时的最大拉力,kN。

$$K_\sigma = \frac{\sigma_p}{S_n} \quad (4)$$

式中: K_σ 为界面拉拔刚度, N/mm^3 ; σ_p 为拉应力峰值,MPa; S_n 为界面开始破坏时的竖向位移,mm。

1.2.3 综合黏结性能评价及方案比选

为实现综合黏结性能的量化评价,对比不同施工参数对于层间黏结性能的综合提升效果,基于指标标准化与权重求和进行综合黏结性能评价。

首先,通过极差标准化法对原始性能指标值进行归一化处理,其标准化公式为:

$$N_{\text{标准}} = \frac{N - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \quad (5)$$

式中: $N_{\text{标准}}$ 为标准化后的韧性指标值; $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$ 分别为分组试验结果中该指标值的最小、最大值。

标准化过程消除了量纲差异,确保各指标具有同一尺度可比性。在此基础上,基于工程经验和专家评分确定各性能指标权重,构建综合黏结性能评价公式:

$$P = A\tau_{\text{标准}} + BK_{\tau\text{标准}} + C\sigma_{\text{标准}} + DK_{\sigma\text{标准}} \quad (6)$$

式中: P 为钢桥面铺装层间综合黏结性能; A 、 B 、 C 、 D 分别为性能指标权重(由施工方基于工程实际与专家评分综合确定),性能指标值均为标准化指标值。

根据不同处治试件的层间综合黏结性能评价结果,选定评分最高组所对应的抛丸参数作为施工方案。

1.3 影响分析与方案优化

在已有方案基础上,增设黏结层用量为变量,设计其与抛丸参数的正交试验,进一步探究双因素变化对钢桥面铺装层间黏结性能的影响规律,分析黏结层用量变化对抛丸调参的影响;同时采用GRA法进行影响因素敏感性评价以明确主控因素,总结形成优化方案并进行合理性验证。

1.3.1 双因素影响分析

基于设计文件与实际工程条件,拟定黏结层推

荐用量的容许浮动范围,调整黏结层用量并采用不同抛丸参数条件制备车辙板试件,再结合各组综合黏结性能评价结果分析黏结层参数变化对抛丸参数选择的可能影响。正交试验具体设置情况见表1。

表1 双因素影响分析试验		
试验分组	黏结层用量取值	抛丸参数取值
1	下调用量	P1
2		P2
3		P3
4	推荐用量	P1
5		P2
6		P3
7	上调用量	P1
8		P2
9		P3

1.3.2 主控因素分析

采用 GRA 法进行双因素敏感性评价,定量分析黏结层用量与抛丸参数对钢桥面铺装层间黏结性能的交互作用并评估其相对重要性。具体步骤如下:

(1)根据评价目的确定评价指标体系。设 $(X_0, X_1, \cdots, X_n)$ 为参考序列; X_i 为比较序列,形成下列矩阵:

$$(X_0, X_1, \cdots, X_n) = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & \cdots & x_{n1} \\ x_{02} & x_{12} & \cdots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{0m} & x_{1m} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

(6)

(2)为消除数据数量大小不一的影响,首先采用各数列除以该数列第1个数进行初值化处理,得到以矩阵形式表示的新数列:

$$(X_0, X_1, \cdots, X_n) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \frac{x_{02}}{x_{01}} & \frac{x_{12}}{x_{11}} & \cdots & \frac{x_{n2}}{x_{n1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_{0m}}{x_{01}} & \frac{x_{1m}}{x_{11}} & \cdots & \frac{x_{nm}}{x_{n1}} \end{pmatrix}$$

(7)

(3)计算关联系数 ζ_{ik} :

$$\zeta_{ik} = \frac{\min_i \min_k |x_{0k} - x_{ik}| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_{0k} - x_{ik}|}{|x_{0k} - x_{ik}| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_{0k} - x_{ik}|}$$

(8)

式(8)中的 ρ 为分辨系数,取为0.5。
(4)计算关联度 R_i ,确定研究对象与影响因素之间的关联度:

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \zeta_{im}$$

(9)

基于 GRA 法分析结果,分析双因素对于钢桥面铺装层间黏结性能的贡献度并明确主控因素。

1.3.3 方案优化策略及合理性验证

基于正交试验和 GRA 结果,对比分析正交试验

确定的最优施工方案与原施工方案。
当最优方案的抛丸参数与原施工方案的抛丸参数一致时,代表黏结层用量对于抛丸参数选择无明显影响,故不变更施工方案。当最优方案的抛丸参数与原施工方案的抛丸参数不一致时,代表黏结层用量对于抛丸参数的选择产生了影响。若抛丸参数为层间黏结性能的主控因素,则代表黏结层用量对于层间黏结性能的影响程度不及抛丸参数显著,故无需提出黏结层用量设计变更,仍采用原施工方案;若黏结层用量为层间黏结性能的主控因素,则代表黏结层用量对于层间黏结性能的贡献度较高,应考虑采用最优施工方案并根据设计文件及相关规范进行方案合理性验证,确保设计变更后的钢桥面铺装结构各指标仍满足设计要求。

施工方案优化策略见图2。

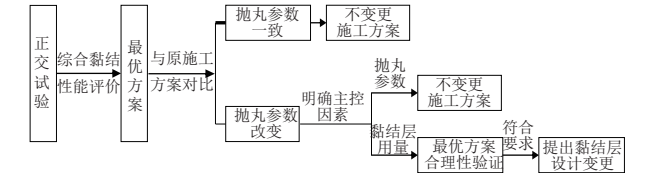


图2 施工方案优化策略

2 工程案例

为验证本方法在钢桥面铺装实际工程应用中的有效性,依托舟山地区某钢桥面铺装上面层重铺项目,采用上述方法进行了抛丸方案中的参数选定,并结合黏结层用量变化开展了黏结层施工方案优化分析。

2.1 材料选取与试件制备

2.1.1 原材料

依据工程情况,本试验下面层 EA-10 所用沥青为热拌环氧沥青,所使用的集料为钢桥面铺装用优质辉绿岩。上面层 SMA-13 所用沥青为高弹改性沥青,所使用的集料均为钢桥面铺装用优质玄武岩。根据《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行马歇尔试验,得到 EA-10 混合料的最佳油石比为 6.5%, SMA-13 最佳油石比为 6%。层间黏结材料选用环氧树脂黏层油。

环氧沥青黏结剂相关技术指标见表2。

表2 环氧沥青黏结剂相关技术指标			
项目	技术要求	试验结果	试验方法
拉伸强度(23℃)/MPa	≥6.0	3.5	GB/T 16777—2008
断裂伸长率(23℃)/%	≥190	>100	
不透水性(0.3 MPa, 24 h)	不透水	不透水	
吸水率(7 d, 25℃)/%	≤0.3	0.12	GB/T 1034—2008

2.1.2 “EA+SMA”车辙板制备

根据上述方法制备 EA-10+SMA-13 结构双层车辙板试件(见图3),黏结层用量采用设计文件推荐值 0.6 kg/m^2 ,施工现场所用抛丸机型号为 850 型双轴。基于工程实际,选定抛丸速率为待调整参数,分别采用 5、10、15 m/min 的抛丸速率对试件下面层表面进行处理。

2.2 施工方案比选

开展室内试验,进行综合黏结性能评价。剪切、拉拔试验分组及试验结果见表3、表4;综合黏结性能评价结果见表5。

基于评价结果可知,当抛丸速率为 10 m/min 时,层间黏结性能提升效果最佳,故施工时的抛丸速率选定为 10 m/min 。

2.3 施工方案优化

2.3.1 正交试验结果

结合工程实际,根据上述方法选定黏结层上调

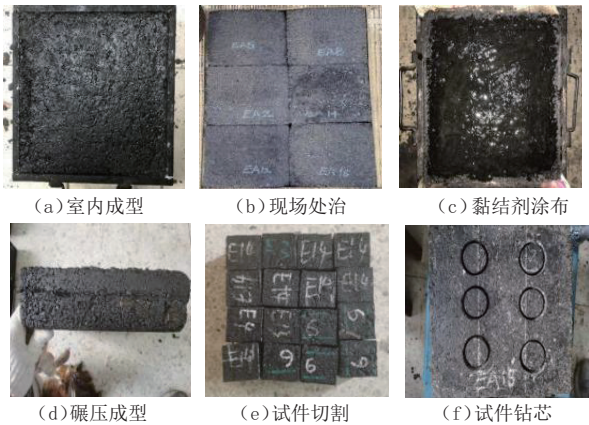


图3 双层 EA 试件制备过程

用量为 0.65 kg/m^2 ,下调用量为 0.55 kg/m^2 ,分别按不同抛丸速率制备试件并进行试验。正交试验分组及各组试件层间综合黏结性能评价结果见表6。

由表6可知,“黏结层用量 0.65 kg/m^2 +抛丸速率 5 m/min ”的施工参数组合对于层间黏结性能的提升效果最佳。

表3 剪切试验分组及试验结果

抛丸速率/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	剪切强度/MPa				剪切刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$			
	试件 1	试件 2	试件 3	平均值	试件 1	试件 2	试件 3	平均值
5	3.23	3.50	3.39	3.41	1.07	1.17	1.05	1.12
10	3.12	2.92	2.87	3.32	1.16	1.26	1.14	1.21
15	2.82	2.60	2.78	2.43	1.00	1.10	1.03	1.05

表4 拉拔试验分组及试验结果

抛丸速率/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	拉拔强度/MPa				拉拔刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$			
	试件 1	试件 2	试件 3	平均值	试件 1	试件 2	试件 3	平均值
5	3.33	3.12	3.07	3.22	1.18	1.08	1.05	1.13
10	3.04	3.25	2.99	3.15	1.16	1.05	1.07	1.11
15	2.57	2.45	2.60	2.51	1.53	1.43	1.38	1.48

表5 综合黏结性能评价结果

分组	抛丸速率/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	剪切强度标准值	剪切刚度标准值	拉拔强度标准值	拉拔刚度标准值	综合黏结性能
1	5	1.00	0.44	1.00	0.05	0.62
2	10	0.91	1.00	0.90	0	0.70
3	15	0	0	0	1.00	0.25

注:综合黏结性能评价公式性能指标权重由施工方取为 $A=B=C=D=0.25$ 。

表6 综合黏结性能评价结果

分组	黏结层用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	抛丸速率/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	剪切强度标准值	剪切刚度标准值	拉拔强度标准值	拉拔刚度标准值	P
1	0.55	5	0.08	0.31	0.14	0.30	0.21
2		10	0.03	0.15	0.06	0.81	0.26
3		15	0	0	0	0.59	0.15
4	0.60	5	1.00	0.56	0.57	0.05	0.54
5		10	0.95	0.71	0.54	0	0.55
6		15	0.47	0.44	0.20	1.00	0.53
7	0.65	5	0.68	0.68	1.00	0.62	0.75
8		10	0.60	0.64	0.81	0.59	0.66
9		15	0.68	1.00	0.82	0.03	0.63

注:综合黏结性能评价公式性能指标权重由施工方取为 $A=B=C=D=0.25$ 。

不同抛丸速率、不同黏结层用量对剪切试验和拉拔试验各评价指标的影响见图4。由图4可知:

(1)在一定的黏结层用量下,随着抛丸速率的增大,层间剪切强度基本呈逐渐减小的趋势,剪切刚度则无明显的一致性变化规律;层间拉拔强度随着抛丸速率的增大而逐渐降低,拉拔刚度则随着抛丸速率变化的规律无一致性。分析可知,抛丸机抛丸速率降低代表处治时间的延长,较大程度地丰富了处治表面的凹陷与空隙分布。因此,当涂布适量黏结剂时,表面处治促进了黏结层与铺装层材料的相互渗透,形成更为紧密的机械嵌固和化学黏附,从而有效提升了层间黏结性能。

(2)当抛丸速率较低时,剪切强度随着黏结层用量的增大呈现先增大后减小的变化趋势;当抛丸速率较高时,剪切强度随着黏结层用量的增大而逐渐增大。剪切刚度随着黏结层用量的变化总体呈上升趋势。拉拔试验结果表明,当抛丸速率一定时,界面拉拔强度随着黏结层用量的增大而增大,界面拉拔刚度则随着黏结层用量的变化无一致性变化规律。

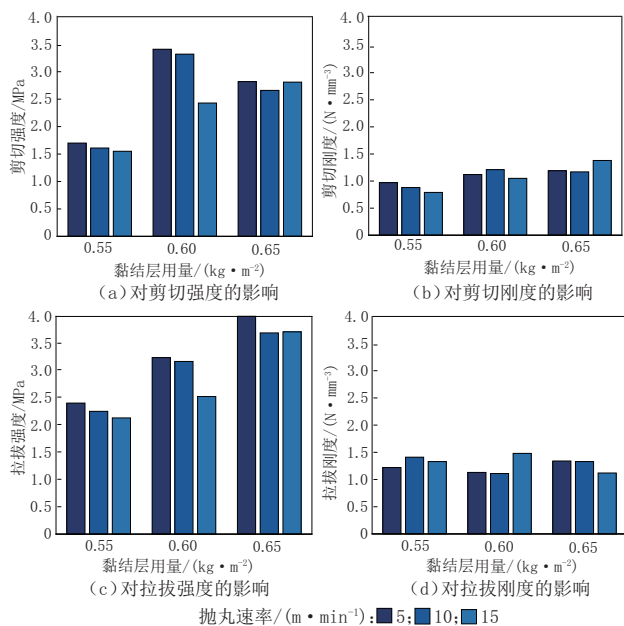


图4 抛丸速率和黏结层用量的影响规律分析

2.3.2 GRA法分析结果

GRA法分析结果见表7。

表7 GRA法分析结果

指标	抛丸速率	黏结层用量
剪切强度	0.67	0.89
剪切刚度	0.75	0.91
拉拔强度	0.45	0.78
拉拔刚度	0.63	0.97

由表7可知,抛丸速率与黏结层用量对层间黏结性能的影响存在交互作用。其中黏结层用量的灰色

关联度较高,表明黏结层用量为层间黏结性能的主控因素,其对层间黏结性能的影响更为显著。因此,在实际工程应用中,应考虑黏结层用量变化对于抛丸速率调整的影响,合理优化黏结层用量和抛丸速率的施工参数组合,最大程度地提升钢桥面铺装层间黏结性能。

2.3.3 优化方案及合理性验证

对比最优施工方案与原方案可知,抛丸速率的选择有所更改,证明黏结层用量变化对于抛丸速率调整存在影响。由于黏结层用量为层间黏结性能主控因素,根据设计文件及相关规范进行方案合理性验证后,确定“黏结层用量0.65 kg/m²+抛丸速率5 m/min”参数组合为黏结层设计用量容许变更条件下原施工方案的优化方案。

3 结 语

(1)基于某工程“EA+SMA”重铺结构,确定黏结层用量采用设计值0.60 kg/m²时的抛丸速率应为10 m/min,此时层间黏结性能提升效果最佳,可作为该类铺装结构的施工方案参考。

(2)黏结层用量和抛丸速率对钢桥面铺装层间黏结性能的影响存在交互作用,且黏结层用量为性能主控因素。钢桥面铺装工程中,应考虑黏结层用量对于抛丸速率调整的影响,合理优化施工参数组合,最大程度地提升钢桥面铺装层间黏结性能。基于某工程双层EA铺装结构,确定“黏结层用量0.65 kg/m²+抛丸速率5 m/min”的施工参数组合为黏结层设计用量容许变更条件下原施工方案的优化方案。

(3)后续研究可结合钢桥面铺装服役环境条件,进一步明确不同弹丸类型(如钢丸、铸铁丸)及弹丸直径对抛丸效果的影响,并基于其他常见铺装结构开展适配性试验,进一步提升方法的普适性,为钢桥面铺装层间黏结性能提升提供更全面的理论支持和工程指导。

参考文献:

- [1] 钱振东,刘龔.整桥-温度-重载耦合作用下钢桥面黏结层力学分析[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(4):729-733.
- [2] YU H, FENG X, GE J, et al. Evaluation of the developed and performance of epoxy resin bonding materials for steel bridge deck pavement layers[J]. Construction and Building Materials, 2024, 455: 139155.
- [3] 陈标,杨显平,韩国祥.桥面粗糙度对防水黏结层性能影响研究[J].公路,2021,66(11):199-204.

(下转第79页)