

大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治与维护

吴艳红

云南云岭高速公路工程咨询有限公司，云南 昆明 650200

DOI:10.61369/ETQM.2026010006

摘要：本文选取主跨628米的普立特大桥钢箱梁悬索桥作研究对象，针对2023年检测出来的主缆、加劲梁箱内、箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座等核心构件出现的涂层脱落、锈蚀等病害，剖析由环境侵蚀、施工缺陷、材料老化等共同引发的病害起因，阐明按照差异化处治原则的技术方案，涉及喷砂除锈等表面处理、适合不同构件的涂层修复体系，以及覆盖全生命周期的日常监测、定期养护和应急处置策略。通过严格的检验，确保涂层满足耐久性的需求，修复后涂层性能达标，为大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治及保护的实际应用指引。

关键词：大跨径悬索桥；钢箱梁；涂层病害；处治技术；维护策略

Treatment and Maintenance of Steel Structure Coating of Large Span Steel Box Girder Suspension Bridge

Wu Yanhong

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650200

Abstract : This study focuses on the 628-meter main span of the Pulte Bridge, a steel box girder suspension bridge. It investigates coating detachment and corrosion issues identified in 2023 at critical components including main cables, stiffener box interiors, exterior maintenance channels, wind nozzle slopes, and railing bases. The analysis identifies root causes stemming from environmental erosion, construction defects, and material aging. The research proposes a differentiated treatment strategy encompassing surface treatments like sandblasting, customized coating repair systems, and comprehensive lifecycle management strategies including daily monitoring, periodic maintenance, and emergency response protocols. Through rigorous testing, the study ensures coatings meet durability requirements and achieve performance standards post-repair, providing practical guidance for coating treatment and protection of large-span steel box girder suspension bridges.

Keywords : long-span suspension bridge; steel box girder; coating defects; treatment techniques; maintenance strategies

引言

大跨径钢箱梁悬索桥属于交通重点工程，其钢结构涂层耐久性影响桥梁安全和寿命。普立特大桥是杭瑞高速的控制性工程，主跨628m，2015年通车。2023年专项检测发现多构件涂层病害，存在力学损伤和环境侵蚀恶性循环风险。目前，对于同类桥梁涂层维护缺少针对性的方案，因此以该桥为例，对涂层病害特征、处治技术、全生命周期维护策略进行研究，对保障桥梁运行安全、延长服役年限有重要的现实意义。

一、工程背景与涂层病害特征

普立特大桥是G56杭瑞高速公路的控制性工程，主桥为双塔单跨钢箱梁悬索桥，主跨628m，钢箱梁梁宽28.5m、梁高3米，通车时间：2015年8月。2023专项检测报告(BG2023XCJ0261)显示，桥梁钢结构涂层损坏位于加劲梁内、主缆、索夹、吊索、索鞍、箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座

等主要结构部位，较为集中。涂层出现脱落、锈蚀、局部破损等情况，存在焊缝缺陷、螺栓松动等关联性病害。

从病害成因来看，钢结构涂层劣化是环境侵蚀、施工缺陷、材料老化共同作用的结果。首先，桥梁所处地区湿度较大，钢箱梁外表面长期被雨水冲刷，箱内空气不流通，冷凝水积聚，加速了涂层水解和钢材锈蚀；其次，施工阶段钢材表面清洁度不够，有油污、灰尘残留，涂层附着力差，部分区域涂装间隔过长，出

作者简介：吴艳红（1984.02-），女，云南昆明人，大学本科，中级工程师，研究方向：高速公路工程施工与养护研究。

现层间剥离；再次，材料时效作用下，环氧富锌底漆锌粉含量降低，面漆抗紫外老化能力下降，出现粉化、开裂等现象。索夹和主缆之间存在相对滑动，吊索存在振动，这些力学因素会加剧局部涂层破损程度，造成力学损伤和环境侵蚀相互促进的恶性循环。

二、钢结构涂层处治技术与实施要点

根据普立特大桥各构件涂层病害的不同特点，按照差异化处理、标准化施工、全过程质量控制的原则，根据构件的功能需求和受力特点，制定针对性处治方案。主要技术环节包括表面处理、涂层修复、质量验收。

(一) 表面处理：质量控制的基础保障措施

表面处理是涂层修复的基础，直接决定涂层的附着力和耐久性。按照构件材质、病害程度和施工环境，选择恰当的处理工艺：对钢构件大面积锈蚀区域采用喷砂除锈工艺，钢箱梁内表面除锈处理达到 Sa2.5 级，表面粗糙度控制在 $35 \sim 75 \mu\text{m}$ ；钢箱梁外表面除锈处理达到 Sa3.0 级，表面粗糙度控制在 $40 \sim 80 \mu\text{m}$ 。确保钢材表面没有可见的氧化皮、锈蚀和油污；主缆、索夹、吊索下锚杯等精密构件用手工和动力工具结合除锈，除锈等级不低于 St3 级。

表面清洁度用白布擦拭法检测，擦拭后白布无明显污渍；油污严重部位先用溶剂型清洗剂（三氯乙烯）脱脂，再进行除锈。表面粗糙度用粗糙度仪现场检测，每 10m^2 取 3 个测点，粗糙度符合涂层体系设计要求——环氧富锌底漆适配粗糙度 $40 \sim 70 \mu\text{m}$ ，氟碳面漆适配粗糙度 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 。表面处理完毕后应在 4h 内进行底漆涂装，超过 8h 或者表面出现返锈，需重新除锈，防止二次污染影响涂层质量。

(二) 差异化涂层修复：基于构件特性的体系设计

各个构件的工作环境、受力状态都相差很大，必须根据构件自身情况选择相应的涂层体系和施工方式，以确保涂层具有良好的耐久性、功能性。

1. 加劲梁内涂层修复

加劲梁是桥梁的承重构件，涂层修复要兼顾防锈和力学性能。涂层体系为第一层环氧预涂层，第二、三层采用厚浆环氧中间漆、面漆，总膜厚 $200 \mu\text{m}$ ，通过除湿系统将箱内湿度控制在 50% 以下，防止冷凝水破坏涂层。焊缝区域的修复先对漏焊、补焊、打磨等缺陷进行处理，补焊后 24h 进行超声探伤和磁粉无损检测，合格后清理焊缝周围涂层，形成 50mm 过渡区，采用箱内刷涂方式涂底漆、中间漆和面漆，确保焊缝处的涂层厚度与周围一致。

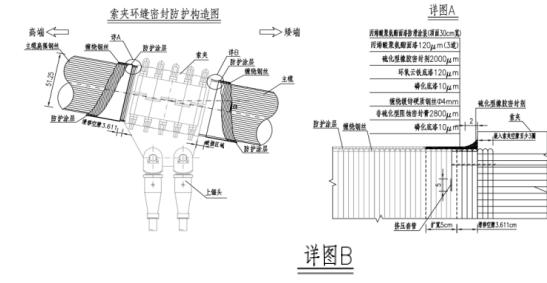
2. 加劲梁箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座涂层修复

加劲梁箱外表面检修道涂层病害主要为普遍存在涂层脱落、锈蚀、劣化、开裂现象，处治方式为将人行检修道、风嘴上斜面及栏杆底座涂层全部清理，按原设计涂装体系进行全面重新涂装，全面修复外表面防护涂层。涂层体系为第一层采用环氧富锌底漆 3 道 $180 \mu\text{m}$ 、第二层环氧云铁封闭漆 $25 \mu\text{m}$ 、第三层环氧云铁中间漆 $80 \mu\text{m}$ 、第四、五层均喷涂氟碳面漆各 $40 \mu\text{m}$ ，总干膜厚 $365 \mu\text{m}$ 。采用 $15 \sim 20 \text{ MPa}$ 高压无气喷涂工艺，漆膜厚度均匀

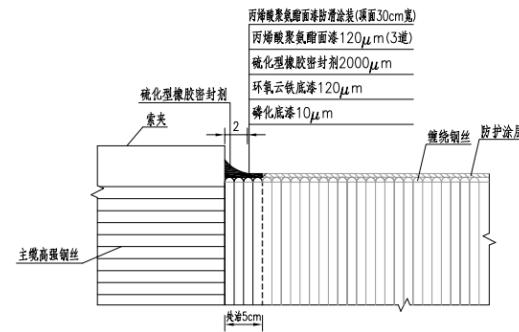
性，防止流挂、针孔等缺陷，确保焊缝等易蚀部位全覆盖。

3. 主缆与索夹涂层修复

主缆、索夹是悬索桥的主要受力构件，涂层修复要同时解决防腐和密封问题。主缆非缠丝段修复：磷化底漆均匀着色，环氧云铁底漆 ($120 \mu\text{m}$, 2 道)，硫化型橡胶密封剂 ($5000 \mu\text{m}$)，高强玻璃布 ($2000 \mu\text{m}$, 2 道)，丙烯酸聚氨酯面漆 ($120 \mu\text{m}$, 3 道)；L2 号索夹因滑移（滑移量 36.11 mm ）造成主缆缠丝外露，处理时先复拧索夹螺栓（预紧力 385 kN ），清除损坏、变质涂层，杂物等，用溶剂擦净主缆表面油污及沙尘等有害物质，涂磷化底漆一道 ($10 \mu\text{m}$)，涂抹非硫化型阻蚀密封膏 ($2800 \mu\text{m}$)，在腻子固化前截断滑移部分缠丝，补设直径 4 mm 的镀锌硬质钢丝，用挤压套管连接原缠丝，连接点设于索夹侧，钢丝嵌入索夹槽至少 3 圈，缠丝后用非硫化型阻蚀密封膏对索夹进行嵌缝。涂层体系采用“磷化底漆 ($10 \mu\text{m}$)、环氧云铁底漆 ($120 \mu\text{m}$)、硫化型橡胶密封剂 ($2000 \mu\text{m}$)、聚氨酯面漆 ($120 \mu\text{m}$, 3 道)”，橡胶密封剂要填满索夹环缝，用特制工具压实，确保密封性能；主缆顶面 30 cm 宽范围复涂聚氨酯防滑面漆，提升检修安全性。



详图 B



索夹滑移环缝密封防护图

4. 吊索、阻尼器与索鞍的涂层处理方案

吊索、阻尼器及主索鞍、散索鞍涂层病害处治表面处理除锈不得低于 Sa2.5 级或者 3 级，移除的区域向外延伸 20 mm 到 50 mm ，彻底去除锈蚀和松散的涂层以及残渣灰尘；涂层修复采用和构件材质匹配的涂装体系，如缆套外表面处理除锈达到 Sa3.0，采用 3 道环氧富锌底漆 ($200 \mu\text{m}$) + 2 道有色金属环氧封闭漆 + 1 道有色金属环氧中间漆 ($50 \mu\text{m}$) + 2 道聚氨酯面漆 (总 $80 \mu\text{m}$) 等。施工条件要符合环境要求，表面处理后 4 h 内涂装，施工温度 $5^\circ\text{C} \sim 38^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于 85%，钢材表面温度高于露点 3°C ，恶劣天气禁止施工。质量验收按加劲梁涂层标准，重点检测总干膜厚度和附着力，确保符合设计及规范要求。

(三) 质量验收：全指标控制处理成效

涂层处治质量验收按照公路工程质量检验评定标准JTGF80/1-2017、钢结构工程施工质量验收规范GB50205-2020的规定，采用过程检测和竣工检测相结合的方式。核心验收指标为涂层厚度、附着力和外观质量：涂层厚度检测用磁性测厚仪，按构件类型分检测单元，索塔、加劲梁等大型构件每10m²测10点，主缆、吊索等小型构件每5m测5点，干膜厚度小于设计值的测点数量不超10%，任意测点厚度不低于设计值的90%；附着力检测用拉开法，抽查5%且不少于5件构件，每件测1处，环氧富锌底漆附着力不低于3MPa，氟碳面漆附着力不低于5MPa；外观质量用目测法，漆膜平整均匀，无气泡、皱纹、流挂、漏涂等缺陷，色泽与原有涂层一致，用色差仪检测，色差需 $\Delta E < 2.0$ 。

三、钢结构涂层全生命周期维护策略

大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层耐久性并不是依靠一次性处治质量来完全实现的，而是通过全生命周期的维护来达到预防为主、防治结合的效果。根据普立特大桥的运营情况来分析，维护策略应该包括日常监测、定期养护、应急处置这三部分。

(一) 日常监测：建立病害预警机制

日常监测是及时发现涂层病害的重要手段，需将人工检查同智能检测相结合，构建起可视化、数据化的监测体系^[1]。人工巡检频率为每季度1次，重点对索夹环缝、吊索下锚杯、加劲梁边角等易锈蚀部位展开巡检，利用高清相机拍摄涂层状况，形成“一构件一档”的监测档案，记载病害位置、面积以及发展趋势。智能监测方面，在主缆、索塔等关键部位安装腐蚀传感器、温湿度传感器，实时采集钢材表面腐蚀电位、环境温湿度等数据，并通过物联网平台传送到后台，当腐蚀电位小于-0.85V时，即自动发出预警，起到提醒运维单位现场核查的作用。另外还要注意特殊天气后的应急监测：暴雨、台风过后，要重点检查迎风面的涂膜是否破损，防止雨水渗入导致锈蚀加重；冬季寒冷时，对箱体内冷凝水凝结情况进行检查，开启除湿系统，控制箱内相对湿度不大于60%。

(二) 定期维护：延长涂层寿命

定期养护是维持涂层功能的重要环节，依据涂层材料的寿命和环境侵蚀强度，决定不同的养护周期和内容：环氧富锌底漆+氟碳面漆体系（加劲梁外表面）养护周期为3-5年，主要是涂层的清洁和局部的补涂，用高压水枪（压力≤0.8MPa）清洗涂层表面的灰

尘、油污，局部粉化区域（粉化等级≤2级）先打磨掉粉化层，再补涂面漆；环氧富锌底漆+聚氨酯面漆体系（加劲梁内表面）养护周期为2-3年，重点是涂层的附着力检查，用划格法检测，附着力等级不低于1级，附着力下降时，局部除锈后重新涂装^[2]。主缆和索夹涂层定期养护，要结合主缆除湿系统运行情况，每隔2年对索夹环缝密封性做一次检测，采用皂膜法检测密封性，若有气泡就重新灌注橡胶密封剂；每隔5年对主缆缠丝涂层全面检查，用超声波测厚仪检测涂层厚度，若低于设计值80%就整体复涂。

(三) 突发病害应急处置的快速响应机制

突发病害（交通事故造成涂层破损、极端天气造成涂层大面积脱落）启动应急处置流程，48小时内处治。应急处置前需评估病害影响范围和风险等级：索夹、吊索等受力核心部位涂层破损，采用临时防护加永久修复两步法，用防腐胶带缠绕好破损部位，防止钢材暴露，在7天内完成喷砂除锈和涂层修复；加劲梁非承重部位涂层破损，采用便携式除锈工具局部除锈，补涂快干型环氧底漆和面漆，缩短施工周期。^[4-9]应急处置过程中，施工质量必须严格把控，临时防护措施要满足至少三个月的防腐需求，永久修复要符合原有的涂层体系设计要求，验收时增加附着力检测的频率，确保应急处置的效果和长期耐久性能够衔接^[3]。此外，针对不同气候区可能出现的特殊突发病害，还需制定应急措施：在沿海高盐雾地区，涂层起泡剥落，要先用淡水分淋去除盐分，再返涂一次冷镀锌；工业污染严重地区，涂层受到酸雨侵蚀后泛白，应该先用弱碱性清洁剂中和，再涂刷抗酸雨功能落的系列丙烯酸面漆。所有的应急处理，都要详细记录病害的位置、处理的方法和材料的批次，建立病害处置档案，为之后涂层维护提供数据支持。

四、结语

对普立特大桥钢结构涂层病害实施差异化处理技术，针对各个构件分别设计涂层体系，严格处理表面状态，合格检验质量，改善各个核心构件涂层问题。经修复后所形成的涂层达到耐久性与功能性目标。全生命周期维护策略的实施，创建起完善的病害预警与应对机制，可及时发现涂层病害并予以处置。该研究形成的技术方案与维护模式，为大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治提供了可以借鉴的实践经验，对提升同类桥梁涂层维护水平，保障桥梁长期安全稳定运营具有推广价值。

参考文献

- [1] 朱绪江. 大跨径钢箱梁悬索桥病害成因及维修策略分析 [J]. 上海建材, 2025, (04): 144-146.
- [2] 姜洪伟. 大跨径悬索桥加劲梁加工制造与拼装技术研究 [J]. 内蒙古公路与运输, 2022, (01): 19-23.
- [3] 周云. 复杂地质条件下大跨径独塔斜拉悬索桥施工关键技术研究 [J]. 建筑机械, 2024, (08): 161-166.
- [4] 白鹏宇. 大跨径悬索桥正交异性钢桥面板疲劳性能研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2017.
- [5] 谭仁智. 钢结构桥梁桥面铺装材料与技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008. DOI: 10.7666/d.Y1694123.
- [6] 赵鹏贤. 悬索桥索鞍、索夹设计、施工、维护常见问题探讨 [C]// 2014钢结构桥梁论坛论文集. 2014: 311-314.
- [7] 茹俊强. 大跨径悬索桥结构桥梁定期检查的内容与方法 [J]. 电脑爱好者(普及版)(电子刊), 2022(7): 767-768.
- [8] 苏林. 江阴长江大桥主缆系统运营中的涂装维护 [C]// 特大跨径桥梁养护管理论坛暨中国桥梁自主创新论坛论文集. 2009: 104-109.
- [9] 陈若男. 大跨径钢箱梁悬索桥的病害分析及正交异性钢桥面板的疲劳研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2017.