

# 大跨径公路钢桁梁桥防腐设计分析

王立勇<sup>1</sup>, 李武<sup>2</sup>, 姜凤连<sup>2</sup>, 王海东<sup>2</sup>

(1. 滨州市公路管理局 滨州市 256614; 2. 山东省公路工程总公司 济南市 250002)

**摘要:** 介绍了两座钢桁梁桥防腐涂层、质量检测、评价与设计方法, 给出了考虑使用寿命的防腐涂层的方法和考虑的主要因素。为同类桥梁的维修养护提供借鉴。

**关键词:** 钢桁梁桥; 防腐涂层; 检测评价; 设计方法

山东省平阴、滨州黄河公路大桥分别是国道 105 线、205 线跨越黄河的重要桥梁, 始建于 20 世纪 70 年代初期。平阴黄河公路大桥全长 963.52 m, 主桥为两联(96+112+96)m 三跨连续栓焊钢桁梁; 滨州黄河公路大桥全长 2 932.45 m, 主桥为 4×112 m 连续栓焊钢桁结构。两桥钢桁均采用平行弦三角形体系, 桁高 11 m, 节长 8 m, 主桁横桥向中距 10 m。

## 1 钢桁梁锈蚀状况检查评价

为了保证钢梁的设计使用寿命周期和维持其正常防腐能力, 两桥在运营过程中每 3 年进行一次涂装维修, 主要进行局部手工除锈并加涂油漆保护层, 对未生锈部分只进行常规涂层覆盖, 使用耐老化性能较差的普通醇酸桥梁漆, 1997 年 4 月(大修前)防护涂层厚度达 450~600 μm, 钢梁各主要部位均出现程度不同的病害。

### 1.1 钢梁病害情况

(1) 钢梁大面积外露部位。

包括上、下弦杆, 斜杆, 各连接系杆件, 纵横梁, 这些部位钢梁涂层变色、白垩化严重, 钢梁多处出现锈斑, 局部有锈块产生, 多处皱裂剥落, 露出生锈的钢梁基体或红丹防锈漆层。

(2) 高强螺栓节点板部位。

表面涂层均有皱裂, 起皮较多, 防护死角多, 防护质量差, 但内层无机富锌漆完好。

(3) 下弦钢横梁部位。

本部分为钢筋混凝土桥面板所覆盖, 是桥面板

的接缝处。因桥面铺装在该处严重裂缝, 有水分下渗, 锈蚀特别严重, 局部锈蚀形成锈层厚度达 8~10 mm, 锈蚀程度足以导致应力集中和纵横梁的承载能力的降低。

### 1.2 钢结构防腐涂层质量的评定

对已有钢结构防腐涂层质量的评定, 是确定防腐处理等级、范围、施工方案和方法的基础。由于我国公路钢桥较少, 在交通部《公路养护技术规范》(JTJ073-96)中没有明确规定质量检验评定的方法和标准, 我们在收集资料和多方调研的基础上, 确定了评价标准。

(1) 交通部公路研究所为本桥提出的钢结构评定建议标准如表 1。

表 1 钢结构防腐涂层评定标准

评定分	评定标准
1	涂层略有老化, 表面污垢
2	① 涂层老化, 脱落和膨胀面积在 10% 以内 ② 焊接部位涂层裂纹
3	① 涂层明显老化, 脱落和膨胀面积为 10%~60% ② 表面锈蚀, 截面损失在 3% 以下
4	① 涂层显著老化, 膨胀和脱落面积在 50% 以上 ② 表面严重锈蚀, 截面损失为 3%~10%
5	① 焊缝开裂, 或构件裂纹和锈蚀剥离, 截面削弱 10% 以上 ② 较多的主要构件出现异常变形, 显著影响承载力 ③ 钢材明显变质, 造成结构承载力明显降低

(2)我国铁道部标准《铁路钢梁涂膜劣化评定》(TB/T2486-94)中规定了5种劣化类型,即粉化、起泡、裂纹、脱落、生锈。确定涂膜劣化类型等级要求在明亮光线条件下,用肉眼观察和擦拭,并且规定在实际情况同规范标准不一致时,取劣化等级严重的一级。评价指标见表2。

表2 涂膜劣化等级评定

涂膜劣化等级	劣化类型		
	粉化	起泡或裂纹或脱落	生锈
轻微(一级)	1级	0.3%	无
中等(二级)	2级	5%	0.3%
轻重(三级)	3级	16%	3%
严重(四级)	4级	33%	5%

表2中涂膜粉化等级评定按国标GB1766规定,以食指在涂膜表面上往复擦两次(擦痕长5~7cm),然后视手指上的颜料粒子多少,按表3评定。

表3 涂膜粉化等级评定

等级	粉化状况
0	无粉化
1	用力擦涂膜,手指粘有少量颜料粒子
2	用力擦涂膜,手指粘有较多颜料粒子
3	用力较轻,手指粘有较多颜料粒子
4	轻轻一擦,整个手指粘满大量颜料粒子或出现漏底

(3)日本高架桥构造协会方法。

该方法要求选择有代表性的区域画出棋盘式方格试验测试区,按表4、表5的评定标准逐个检测、评分,并在此基础上,进行综合评价确定劣化等级并由此确定维修的范围、方法和施工方案。

表4 锈蚀、膨胀、开裂和剥离

涂层的状态	日本评分	选用评分
看出表面积的30%以上为异状	1	4
看出表面积的5%~30%左右为异状	2	3
看出的异状不到表面积的5%	3	2
没有看出异状的	—	1

表5 白垩化和变色的标准

涂层的状态	日本评分	选用评分
看出与涂刷时的状态有显著变化的	A	3
看出与涂刷时的状态有明显变化的	B	2
看出与涂刷时的状态相比变化不大	C	1

锈蚀、膨胀、开裂和剥离按表4进行评定。白垩和变色按表5进行评定,综合判定涂层恶化程度按表6进行评定。

表6 涂层的恶化程度

涂层的状态	恶化程度	选用评分
涂层恶化、膨胀、开裂、剥离和生锈等很厉害	N-I	3
涂层几乎都是活层,看出一部分开裂、膨胀、剥离和生锈等状态	N-II	2
涂层是活层,变色、白垩化和附着物等较多	N-III	1

由于我国的评价方法没有提供钢梁细部环境、部位差异对杆件油漆劣化测试结果和最终钢梁油漆劣化评价的影响,在具体应用上有一定的难度。而日本高架桥构造协会方法同我国铁道部方法相比,具有规则详细,可操作性强的特点。去除我们无法应用的撕裂力试验,我们借用日本方法进行评价,表4~表6中所列的“选定评分”项为评定中确定的评分分值,并同交通部公路所的推荐标准相对照。取样位置及频率遵循以下原则方法:根据杆件位置,按每节间2根抽样,每根杆件按照近节点板和杆中间处各取2个测区共6个测区,并使之分布在不同的面上。

经对测试结果的比较分析,两种评价方法的结果有较好的一致性。测试表明:两座大桥的钢桁梁锈蚀涂层已经明显老化,并存在大面积的脱落和膨胀,面积超过50%,钢桁梁表面已经产生大量的锈斑和锈点,已经达到了3~4级的劣化程度,应予全面补修。

### 1.3 锈蚀原因分析

(1)钢梁出厂时表面清理质量不稳定。原桥杆件在桥梁厂生产时,采用酸洗清除锈斑和钢材表面的氧化皮(黑皮)。由于酸洗液长期使用导致H<sup>+</sup>浓度逐渐降低,使全桥除锈质量不一,差别较大,在喷砂除锈中发现,大量的钢梁表面有原氧化皮存在(约10~50 μm),大部分黑皮同钢基粘结不牢固,部分剥落,其附近有锈蚀产生。

(2)由于施工等原因,杆(部)件出厂时红丹防锈漆涂层有机械刮伤现象,后期补涂存在厚薄不均和欠涂。

(3)限于当时的技术条件和施工条件,涂层油漆选用当时通用的常规型钢梁防护的醇酸桥梁面漆,其致密性和耐老化性都存在问题。

(4)在该桥的长期运营过程中,因环境(如大气污染等)、温度、湿度、日照及紫外线的影响和外力碰撞,人为刻划等机械损伤对保护层的破坏,致使整体钢梁防护上存在较多的薄弱环节。其中,环境影响主要是指汽车尾气形成的大气污染对钢梁的腐蚀。汽车尾气的主要成分是亚硝酸气( $\text{NO}_2$ )和硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ ),可导致油漆涂层发黑和层间剥离。尤其当温度和湿度达到一定程度时,使腐蚀加快。一般认为当湿度达到80%以上时,亚硝酸气( $\text{NO}_2$ )引起的腐蚀速度将急剧增加;而在下弦钢横梁上表面,由桥面板覆盖并形成预制桥面板的接缝。该接缝由沥青砂填料填充。按原设计要求,应每年更换桥面板接缝间隙的沥青砂填料以防透水,但该桥运营20余年未做此项工作,使该部位锈蚀严重。

(5)在近20余年的养护中,仅用手工进行局部除锈、清理和补漆;涂层不断加厚,导致钢梁防护效果进一步恶化。大大超过了防护涂层的大修周期,无法保证钢梁处于养护的良性循环中。

## 2 防腐工程方案设计

方案设计的目的是根据桥梁的具体情况,确定防腐工程的除锈方案、油漆选型、漆膜厚度、漆层组合设计。通过技术、经济评价分析和使用寿命分析,进行设计方案优化,以求达到技术可行、经济合理的目标。

### 2.1 油漆涂层系列防腐机理

油漆涂层对钢结构的防腐作用主要体现在以下几个方面。

#### (1)隔绝作用。

良好的油漆涂层可以有效减少水汽和其他成分液体的渗入,降低钢结构锈蚀的概率,这是油漆防腐的基本功能。经过改性处理的铝粉石墨醇酸漆,其掺加的铝粉和石墨在微观上形成片状迭层覆盖,使得水分更难以透过油漆层的微观空隙。

#### (2)钝化缓蚀作用。

油漆涂料中的氧化性助剂与铁质发生化学反应,形成保护性薄膜,使金属表面的电极电位升高,从而降低金属成为阳极而溶解的倾向,同时阻隔腐蚀介质的渗透,提高涂层的防腐性。

#### (3)屏蔽作用。

涂层干燥后表面形成连续的附着薄膜,使腐蚀介质不能和金属接触,电极反应难以进行,延缓金属的腐蚀。树脂类油漆涂料主要靠成膜物质即树脂的

分子结构起作用。一般来说,极性基团的数目越多,极性越大,在成膜后交联反应不完全,耐腐蚀性就越差。树脂含双键越多,分子链的侧链越长则成膜后交联反应不完全,渗透性增大,防腐性降低。该类涂料要通过合成和改性使涂膜能充分的交联固化,提高交联度。使涂膜具有良好的附着力、柔韧性和抗冲击性能,而且漆膜致密坚硬,具有较好的抗水、氧、电解质渗透性。

#### (4)稳定作用。

某些活性颜料对有锈的钢铁表面有良好的适应性,可保持良好的防腐效果。这些颜料水解产生含硫酸根阴离子的活性络合物和铁锈反应生成较稳定的抑制络合物。

### 2.2 除锈方案

目前通用做法有:一是手工除锈,二是喷砂及抛丸除锈,三是脱漆剂除锈。

在一般情况下,手工除锈价格低廉,但至多只能达到2级(一般为3级)标准,主要用于中小构件的处理。大面积使用手工除锈脱漆,将导致质量不稳定和除锈漏洞较多,施工控制难度增加,且存在较多的死角。脱漆剂除锈,可以比较彻底地除去锈迹,但造价较高,施工难度大,施工工艺控制要求严格且要用大量的水进行冲洗,对河流和水源造成污染。喷砂除锈工作效率高,可以方便地达到Sa2.5级甚至Sa3级除锈标准,便于施工控制,基本不用水源,虽对周围环境有一定的粉尘污染,但可以通过必要的措施加以控制,施工费用介于上述二者之间。

有关资料表明:在相同的外界环境条件和同类同等漆膜厚度下,不同的除锈方式,其使用寿命见表7。

表7 不同的除锈方式漆膜使用寿命

除锈方式	手工	酸洗	脱漆剂	喷砂	抛丸
使用寿命	3年	5~7年		8~10年	10年以上

### 2.3 油漆选型和漆膜厚度

根据钢梁的使用状况和目前技术条件,合理地确定油漆选型、厚度和组合是充分发挥油漆防腐效用,提高经济效益的关键。一般要求:底层涂漆系列应与钢本身牢固的密结,以发挥较大的防锈效果;中层涂料,补助底层涂料的防锈效果,帮助底层涂料密结;最外层(上层)涂料应对涂层所处的外部条件具有较大的抵抗力,在保护底层的同时,呈现出必要的色相和美观等。据此,钢梁的油漆选型组合可以根据

不同的区域部位进行处理。

### 2.3.1 节点板部位

该部位在出厂时涂无机富锌漆和封孔漆,该漆同后来使用的桥梁漆不配套,出现较多的起皮和锈蚀,属于易出现问题的难点部位。其处理方法为:在表面清理达标后,涂敷环氧类中间漆(云母氧化铁环氧漆),面漆为铝粉石墨醇酸漆(桥梁专用漆)。中间漆主要起联接密封作用。

### 2.3.2 钢梁大面积部位

在表面清理达标后,可采用以下 3 种方案:

方案 1:红丹防锈底漆 2~3 道,漆膜厚度 $\geq 80 \mu\text{m}$ ;面漆为铝粉醇酸石墨桥梁面漆,漆膜厚度 $\geq 120 \mu\text{m}$ (上限不控制)。

其中,红丹防锈漆呈微碱性,可以中和少量的酸(主要是透过面漆膜进入的水及其他酸性溶液,面漆在微观上是可以透水的)。同时,在钢梁表面同钢板相互作用,形成钝化膜,紧密结合,起防护作用。

方案 2:环氧富锌底漆(锌含量在 94%~95%)主要起阴极保护作用,其附着力、防腐作用均优于红丹防锈漆;云铁环氧中间漆主要起封闭和界面作用;铝粉石墨醇酸漆,该漆型中的铝粉和石墨在微观上是片状层层覆盖,使水分(酸性)透过油漆的微观空隙进入更加困难,且抗阳光、紫外线老化功能好,比重小、不易沉淀,可施工性能好。

方案 3:在方案 2 的基础上,将面漆改为含羟基的聚丙烯酸酯和脂肪族异氰酸酯组成的防老化面漆,具有极好的柔韧性、附着力和硬度以及在不同介质和环境条件下的耐侯性,即具有优异的抗盐雾、抗海水腐蚀、耐热、耐油、耐碱、耐弱酸性和良好的可修补性。

### 2.3.3 下弦钢横梁上表面

下弦纵横钢梁上表面有桥面板覆盖,由于长期

漏水锈蚀得不到处理,成为钢桥中锈蚀最严重的部位,又是未来养护处理中的死角,必须一次处理完善。可采用以下两种方案。

方案 1:棕黄色聚氨酯盖板漆 2 道,漆膜厚度 80~100  $\mu\text{m}$ ,或者银灰聚胺酯盖板漆 4~5 道,漆膜厚度 $\geq 180 \mu\text{m}$ ,外裹敷环氧玻璃丝布。

该方案对除锈等级要求较低,但施工周期较长,每周期需 5~7 d。

方案 2:表面处理采用喷砂除锈达到 Sa3 水平。涂无机富锌漆 50~60  $\mu\text{m}$ ,或者热喷锌 120  $\mu\text{m}$ ,并用环氧沥青无蜡型玻璃丝布 4 层裹覆 300  $\mu\text{m}$ ,形成四布五胶体系。

本方案可以有效地增加该部位的保护能力和附着力(化学附着力+机械附着力+金属键附着力),增大比表面积。可以有效的缩短工期(1~2 d 一个施工周期)。

### 2.4 方案评价

显然,除锈方案采用喷砂除锈法是较为合适的,尤其对于已经运营 27 年未曾大修过的桥梁系统,彻底地处理是极有必要的。

油漆系统的方案评价——是与油漆品种选择、厚度确定、工程费用、寿命周期(维修周期)等相互联系的。

根据我们目前的技术水平和桥梁所处的环境,按一定的周期进行全面维修,其综合养护成本是最低的。目前可以达到 8~12 年左右,这是一个适度的时间。在日本,规定为 50 年大修一次,日本高架干道公司明确规定了周期 50 年内,每隔一定的年限(6~8 年)必须在已有涂层的基础上再涂敷如表 8 所规定厚度的面漆。

表 8

项目	初厚	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
厚度/ $\mu\text{m}$	240	+70=310	+70=380	+40=420	+40=460	+40=500
年限/年		6	6	8	8	10

其次,在厚度和使用寿命关系上,一般认为防腐涂层的极限厚度应是 500  $\mu\text{m}$ (这是考虑钢梁疲劳、锈蚀等因素综合确定的数值),按表 8 在第 5 次涂装后,不再处理,继续使用 10 年后,即进行大修。但如果一次涂层厚度达到 500  $\mu\text{m}$ ,则达不到 50 年的耐老化要求。

通过对比实验和野外测试,确定在某种具体气候情况下,涂漆品类、厚度同使用年限与维修周期的关系,是科学经济地进行钢梁养护维修的重要一环,是一个尚待研究的课题。

根据上述分析评价,结合该桥所处的地理环境,施工工期和进度有特殊要求的情况,选定了如表 9 和表 10 所要求的涂装方案。

目前国内没有这方面的详细规定和实验数据。

表9 平阴黄河大桥油漆涂装设计方案及工艺要求、技术标准

钢梁部位	设计方案	施工工艺	质量要求	检测方法
大面积部位及螺栓节点外露部位	喷砂除锈	喷砂除旧漆、除锈达到 Sa2.5 级以上	表面有轻微的牢固的阴影,无粉尘,无油污	按 GB8923—88,目视比较检测
	喷涂特制红丹酚醛防锈漆	3道,干膜厚度达 90 $\mu\text{m}$	干膜厚度达 90 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ;外观均匀平整,无剥落、起泡、裂纹、气孔、漏涂	TB/T1527,用测厚仪测厚度,外观用目测法
	喷涂 018 灰铝粉石墨醇酸面漆	3道,每道干膜厚度 40 $\mu\text{m}$ (螺帽处加涂 1道)	总干膜厚度达 210 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ;外观要求同上	同上
纵横梁上翼板	喷砂除锈	喷砂除旧漆,除锈达到 Sa3 级	表面无任何附着物,无粉尘、无油污	按 GB8923—88,目视比较检测
	热喷锌	厚度 120 $\mu\text{m}$	锌层厚度平均达 120 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ;表面均匀一致,无起皮、鼓泡、大熔滴、松散粒子、裂纹和掉块	GB4956 GB9794 GB11374 TB/T1527
	涂刷环氧沥青漆	2道,厚度不做具体要求	漆层丰满,无气泡	目视或触摸

表10 滨州黄河大桥油漆涂装设计方案及工艺要求、技术标准

钢梁部位	设计方案	施工工艺	质量要求	检测方法
大面积部位及螺栓节点外露部位	喷砂除锈	喷砂除旧漆,除锈达到 Sa2.5 级以上	表面有轻微的附着牢固的阴影,无粉尘,无油污	按 GB8923—88,目视比较检测
	喷涂环氧富锌底漆	喷涂 1道,干膜厚度达 40 $\mu\text{m}$	干膜厚度达 40 $\mu\text{m}$ ,外观均匀平整,无剥落、起泡、裂纹、气孔、漏涂,允许 10%测点值负偏差 $\leq 5 \mu\text{m}$	TB/T1527,用测厚仪测厚度,外观用目测法
	喷涂环氧云铁底漆 2道	喷涂 2道,每道干膜厚度 30 $\mu\text{m}$	总干膜厚平均度达 100 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ,外观同上	同上
	喷涂聚氨酯面漆 2道	2道,喷涂,每道干膜厚度 40 $\mu\text{m}$ (螺帽处加涂 1道)	总干膜平均厚度达 180 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ,外观同上	同上
纵横梁上翼板	喷砂除锈	喷砂除旧漆,除锈达到 Sa3 级	表面无任何附着物,无粉尘、无油污	按 GB8923—88,目视比较检测
	热喷锌	厚度 120 $\mu\text{m}$	锌层厚度平均达 120 $\mu\text{m}$ ,允许 10%测点值负偏差 $\leq 10 \mu\text{m}$ ;表面均匀一致,无起皮、鼓泡、大熔滴、松散粒子、裂纹和掉块	GB4956,GB9794 GB11374 TB/T1527
	涂刷环氧沥青漆	2道,厚度不做具体要求	漆层丰满,无气泡	目视或触摸

# 钢桥面铺装轴载换算研究

曹 玫, 杨若冲

(东南大学 ITS 工程研究中心 南京市 210096)

摘 要: 归纳总结钢桥面铺装的主要破坏形式, 是钢桥面铺装研究的基础和关键。在此基础上提出轴载换算指标, 利用有限元软件及 SMA 混合料和浇注式沥青混合料疲劳方程, 推导了 2 种沥青混合料的轴载换算公式(对于 SMA 沥青混合料, 其换算系数为 4.72; 对于浇注式沥青混合料, 其换算系数为 4.54)。为方便使用及结构安全起见, 换算系数统一取为 4.72。

关键词: 钢桥面铺装; 轴载换算; 疲劳损伤等效

近年来, 随着我国经济的飞速增长, 国家在重要的公路通道修筑了不少大跨径钢箱梁桥。由于正交异性钢桥面板的钢箱梁具有重量轻及跨度大等优点, 在国内大跨径钢桥中得到广泛的应用, 但是由于钢桥面铺装直接铺设在正交异性钢桥面板上, 在行车荷载、风载、温度变化、地震和正交异性桥面钢板结构的特殊性等因素综合影响下, 其受力和变形远较公路路面或机场道面复杂, 现行沥青混凝土路面设计规范尚不能完全胜任于钢桥面铺装这一特例, 特别是其轴载换算公式是否适用于钢桥面铺装有待深入研究。

轴载换算是确定设计年限末累计标准轴载作用次数的依据, 是钢桥面铺装结构设计最重要、最基本的基础数据之一。总结和分析钢桥面铺装的主要破坏形式, 根据主要破坏形式提出相应的轴载换算指标进行轴载换算, 是保证钢桥面铺装能否在设计年

限内实现设计者设计目标的重要依据之一, 研究钢桥面铺装轴载换算方法有十分重要的意义。

## 1 钢桥面铺装轴载换算指标及钢桥面铺装轴载换算原则

### 1.1 钢桥面铺装轴载换算指标

德国学者的调查研究认为: 钢桥面铺装表面的纵向裂缝和车辙是钢桥面铺装的主要破坏形式。日本学者 Kenji Himeno 等对东京都市圈的 50 多条大跨径钢桥进行调查也发现, 钢桥面铺装表面的纵向裂缝、车辙是钢桥面铺装的主要破坏类型, 纵向裂缝远比车辙破坏严重得多, 而少量的钢桥铺装表层也出现一些坑洞<sup>[1]</sup>。目前, 我国大陆地区的钢桥面铺装主要破坏形式有: 纵向疲劳裂缝、车辙及脱层; 台湾地区的钢桥面铺装主要破坏形式则为纵向疲劳裂缝及车辙<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2004-07-27

考虑便于施工和缩短工期以及这两座大桥所处地理位置的差异、使用寿命周期的不同, 按选定的涂装方案进行涂装处理, 平阴黄河公路大桥的大修周期可以达到 12 年。滨州黄河公路大桥地处城市边缘, 大修施工对城市交通和正常秩序影响过大, 大修周期可延长至 25 年。

## 3 结论及建议

平阴、滨州黄河大桥分别于 1997 年、1998 年按

上述方案进行油漆涂层防腐处理。目前已经 6~7 年的时间, 经过多次复查和测试, 表明该方案是成功的, 能满足公路钢桁梁桥的运营养护的要求。而且, 按上述方案施工, 整个使用寿命期内可节约养护费用 1/3 左右, 具有明显的经济效益和社会效益。

该工程的实施, 为我国公路钢桁梁桥的养护维修提供了可资借鉴的范例, 有一定的参考价值。