

海域环境钢桥面铺装长效防腐底漆的研究

闫东波^{1,2}, 庄永毅³, 刘艳², 陈振福³, 曾德亮²

(1.重庆交通大学 土木建筑学院,重庆市 400074;2.重庆特铺路面工程技术有限公司,重庆市 400026;

3.厦门路桥工程投资发展有限公司,福建 厦门 361026)

摘要:为解决钢桥面铺装出现局部病害后钢板容易迅速生锈并加剧病害发展的问题,基于海域环境下的钢桥面铺装甲基丙烯酸甲酯树脂防水黏结体系,采用有机硅改性环氧树脂为主要原料,搭配腰果酚改性酚醛胺和聚酰胺混合固化剂,通过添加新型环保防锈颜料等制得钢桥面铺装长效防腐底漆。参考相关规范拟定钢桥面铺装长效防腐底漆的技术要求。考虑沥青高温摊铺时的热老化作用、水和化学介质腐蚀以及盐雾作用,完成了单一因素作用和多重因素综合作用后防腐底漆的性能测试,对长效防腐底漆与防水层及铺装层的匹配性进行了试验研究,并与钢桥面铺装传统防腐底漆进行了对比。

关键词:钢桥面铺装;防腐底漆;试验研究;长效防腐;甲基丙烯酸甲酯树脂;海域环境;防水黏结层

中图分类号:U444

文献标志码:A

0 引言

海域环境下,钢结构防腐的重要性不言而喻,大量学者从不同角度对钢结构防腐技术做了研究^[1-8]。与钢结构防腐相比,钢桥面铺装防腐具有特殊使用条件:①一般与防水层(黏结层)协同发挥作用;②一般需要承受沥青摊铺的高温作用;③与沥青铺装层一起共同承受车辆荷载作用。因此,钢桥面铺装中的防腐底漆往往与钢结构防腐不同。

防水黏结层失效是钢桥面铺装常见病害之一,经常导致钢桥面板锈蚀^[9-12],降低钢桥面铺装使用寿命,给桥梁结构安全带来隐患。目前,钢桥面铺装防水黏结层的重要性已被普遍重视,然而,钢桥面铺装防水黏结层的研究,大多集中于防水黏结材料的物理、力学性能和铺装组合结构黏结、剪切强度研究^[13-16],对钢桥面板防腐的研究多着眼于初始状态的黏结强度方面^[17-19],王民^[20]对不同防水黏结层的防腐作用效果进行了评价和比较,但均未针对钢桥面铺装防腐的长效性和防腐作用效果的提升进行研究。

甲基丙烯酸甲酯树脂(Methyl Methacrylate Resin,

简称MMA)防水黏结层是近年来钢桥面浇注式沥青混凝土铺装常用的防水黏结体系,一般由丙烯酸防腐底涂层、MMA防水层和丙烯酸黏结层构成,整体使用效果良好,但某些项目出现铺装病害后,钢板存在严重的锈蚀现象^[9]。本文基于MMA防水黏结层,优化研究其中的防腐底涂层,提高其在海域环境条件下的长效防腐能力,目的在于加强对钢桥面板的保护,当钢桥面铺装层出现局部病害后,防腐底漆能够继续有效发挥作用,从而降低钢桥面铺装维修的难度和桥梁结构的安全风险。

基于海域环境下钢桥面铺装的现实环境条件,结合工业重防腐涂料的广泛应用经验,参考《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722—2008)和《城镇桥梁钢结构防腐蚀涂装工程技术规程》(CJJ/T 235—2015),采用环氧树脂重防腐涂料是现实且切合实际的有效方法。但有别于常用的工业重防腐涂料,防腐层上的MMA防水层为现场自由基聚合方式固化的反应性树脂类材料,防腐底漆中若含有活泼单质金属或能参与化学反应的外层电子结构中仍含有非成键自由电子的金属氧化物,会对MMA的自由基聚合固化产生负面影响,所以不宜添加锌粉、铝粉

收稿日期:2022-06-29

基金项目:福建省交通运输科技项目(编号:201918)

作者简介:闫东波,男,硕士,正高级工程师.E-mail:81427305@qq.com

等化学防腐蚀物质,而主要依赖防腐底漆自身的防腐性能抵抗外界化学介质的侵蚀,因此钢桥面铺装防水黏结层中的防腐底漆对自身防腐性能的要求要高得多。为达到以上目的,本研究以有机硅环氧树脂为基础原料,添加新型环保高效防锈颜料,并将腰果酚改性酚醛胺和聚酰胺进行搭配作为固化剂,进行两阶段防腐性能的检测,以及与防水层和铺装层的匹配性检测,研发出海域环境下钢桥面板上防腐寿命可达15~25年的长效防腐底漆。

1 材料制备

制备长效防腐底漆的原材料包括环氧树脂、固化剂、无机颜填料、有机颜填料、活性稀释剂、气硅、分散剂、溶剂、防沉剂、流平剂和消泡剂等。

将有机硅环氧树脂、溶剂、促进剂、润湿分散剂、流平剂、消泡剂和防沉剂按比例混合后在实验室高速分散机中搅拌均匀,再加入称量好的防锈颜料、填料以1 000~1 500 r/min分散40~60 min后,移入立式砂磨机研磨至细度50 μm 以下,制得长效防腐底漆A组分。挑选出合适的固化剂、促进剂和溶剂按比例以300~500 r/min混合15~20 min,制得长效防腐底漆B组分。A组分与B组分的配比为10:1。

2 检测方法与标准

海域环境下,钢桥面防腐底漆可能经受酸、碱、氧、盐及有机化合物等的侵蚀,需要具有优良的抗侵蚀能力。

JT/T 722—2008和CJJ/T 235—2015规定,高盐度的沿海和近海区域环境的腐蚀种类的级别为C5-M,该条件下涂层要达到长效防腐(保护年限15~25年),涂层性能需达到耐水、耐盐水、耐化学药品、黏结强度、耐盐雾和人工加速老化指标的要求,其中人工加速老化指标模拟太阳辐射,与钢桥面铺装中防腐底漆的使用条件不符。而《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG T3364-02—2019)中的防腐底漆仅对材料性能以及与钢板的黏结强度做了要求,无防腐性能要求。本文考虑上述工况,以单因素和多因素作用之后材料的外观状态和与钢板的黏结强度保持率来评价其防腐性能,如表1所示。

表1 长效防腐底漆的技术要求

试验项目	单位	技术要求	试验方法
耐水性	h	240	GB/T 1733 甲法
耐盐水性	h	240	GB/T 9274 甲法
耐化学药品(10%氢氧化钠、10%盐酸、汽油和柴油)	h	168	GB/T 9274 甲法
耐盐雾性能(无痕板)	h,级	3 000,1	GB/T 1771, GB/T 1740
与钢板黏结强度(25℃)	MPa	≥ 10	JTG T3364
与钢板黏结强度(60℃)	MPa	≥ 2	JTG T3364
黏结强度保持率(200℃、30 min热老化,化学介质浸泡,热老化+化学介质浸泡)	%	≥ 80	JTG T3364
铺装组合黏结强度(25℃)	MPa	≥ 1.0	JTG T3364
铺装组合剪切强度(25℃)	MPa	≥ 1.0	JTG T3364

3 单因素试验

3.1 初始黏结强度

对钢板进行喷砂除锈后,均匀涂抹长效防腐底漆,固化后进行25℃和60℃的黏结强度试验,结果如表2所示。

表2 与钢板的黏结强度试验结果

温度/℃	黏结强度/MPa		试验方法
	平均值	技术要求	
25	12.93	≥ 10	JTG T3364
60	9.57	≥ 2	

表2显示,长效防腐底漆与钢板在25℃和60℃的黏结强度均满足技术要求,试验温度对长效防腐底漆影响较小。

3.2 耐热老化性能

MMA体系通常用于浇注式混凝土铺装,浇注式混凝土的摊铺温度通常为240℃左右,摊铺后对MMA体系存在高温影响,本文采用200℃、30 min模拟该影响过程。在200℃、30 min老化后再测试25℃和60℃黏结强度,并计算经过老化后黏结强度的保持率,结果如表3所示。

表3显示:热老化后与钢板的黏结强度较老化前更高,强度保持率均超过100%,表明长效防腐底漆高温性能良好,短时高温促使底漆进一步固化。

3.3 耐水及化学介质性能

浸泡介质分别为蒸馏水、50 g/L的盐水、5%硫酸、

表3 热老化后与钢板的黏结强度试验结果(平均值)

项目	热老化后黏结强度/ MPa		热老化后黏结强度保 持率/%	
	25℃	60℃	25℃	60℃
平均值	15.12	11.35	116.9	118.6
技术要求	—		≥80	
试验方法	JTG T3364		—	

10% 盐酸溶液、10% 氢氧化钠溶液、汽油、柴油。长效防腐底漆采用全覆盖式刷涂,即钢板正反面及四周均进行涂覆,将试件浸泡在介质中,中途随时观察底漆状态。试件浸泡规定时间后取出清洗并吸干水分后仔细观察底漆变化情况,检测黏结强度,结果如表4所示。

表4 介质侵蚀后与钢板的黏结强度试验结果

项目	黏结强度 (25℃)/MPa	黏结强度 保持率/%	外观
蒸馏水 240 h	12.80	99.0	无严重变色、 皱皮、起泡、 剥落、变软
盐水 240 h	12.55	97.1	
5% 硫酸溶液 168 h	12.40	95.9	
10% 盐酸溶液 168 h	12.09	93.5	
10% 氢氧化钠溶液 168 h	12.15	94.0	
汽油 168 h	11.44	88.5	
柴油 168 h	10.95	84.7	—
技术要求	—	≥80	
试验方法	JTG T3364	—	

表4显示:试件经过不同介质浸泡后,外观和黏结强度保持率均满足技术要求。汽油和柴油对底漆的影响较盐酸和氢氧化钠更大。

3.4 耐盐雾性能

耐盐雾性能采用中性盐酸试验,盐雾箱内温度为(35±2)℃,氯化钠溶液的浓度为(50±5)g/L,pH值为6.5~7.2,喷雾压力控制为70kPa,盐雾收集器每24h测得的盐雾溶液收集速率控制为1~2.5

mL/h。盐雾试验结束后先观察样板是否满足等级要求,结果如表5所示。

表5 耐盐雾试件外观试验结果

项目	试验结果	技术要求	试验方法
外观	3 000 h,1级	3 000 h,1级	GB/T 1771,GB/T 1740

经过3 000 h盐雾试验后,外观满足要求。

盐雾试验过程中测试黏结强度,结果如表6所示。

表6 耐盐雾试件与钢板黏结强度试验结果

时间/ h	黏结强度(25℃)/MPa		黏结强度保持率/%		试验方法
	平均值	技术要求	平均值	技术要求	
500	12.18	—	94	≥80	JTG T3364
1 000	11.12	—	86	—	—

表6显示:经过500 h和1 000 h盐雾腐蚀试验后,底漆与钢板黏结强度的保持率在80%以上。1 000 h盐雾腐蚀较500 h盐雾腐蚀后底漆与钢板黏结强度有所降低,说明盐雾对底漆与钢板之间的黏结强度有不利影响。

4 多因素试验

将热老化流程前置,酸、碱及有机溶剂侵蚀后继续受到水、氧气及盐分作用,检验防腐层经过热老化、化学介质(酸、碱、溶剂)作用后的防腐性能,化学介质仅考虑条件比较严苛的化学介质:10% 盐酸、10% 氢氧化钠、柴油和汽油,浸泡时间为168 h。

4.1 耐热老化和化学介质性能

经过200℃、30 min热老化后的试件分别再经过各种化学介质浸泡168 h,观察外观变化情况,测试与钢板的黏结强度,结果如表7所示。

表7显示:试件经过热老化和不同化学介质168 h浸泡后,外观和黏结强度均满足技术要求。

表7 热老化和化学介质浸泡试验结果

项目	外观	黏结强度(25℃)/MPa	黏结强度保持率/%
热老化+10% 盐酸溶液浸泡	无严重变色、皱皮、起泡、 剥落、变软	12.30	95.1
热老化+10% 氢氧化钠溶液浸泡		12.26	94.8
热老化+汽油浸泡		11.71	90.6
热老化+柴油浸泡		11.25	87.0
技术要求	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软	—	≥80
试验方法	GB/T 9274 甲法	JTG T3364	—

4.2 耐热老化、化学介质及盐雾性能

200℃、30 min热老化后,分别再经过各种化学

介质浸泡168 h,进行中性盐雾试验。盐雾试验期满后,测试黏结强度,结果如表8所示。

表 8 热老化和化学介质侵蚀后的盐雾试验结果

项目	外观	黏结强度(25℃)/MPa	黏结强度保持率/%
盐雾 500 h		12.18	94
盐雾 1 000 h		11.12	86
热老化+盐雾 500 h		11.92	92
热老化+盐雾 1 000 h		10.86	84
热老化+10%盐酸+盐雾 500 h		11.51	89
热老化+10%盐酸+盐雾 1 000 h	1 级,无起泡、生锈、	10.47	81
热老化+10%氢氧化钠+盐雾 500 h	开裂、脱落等	11.65	90
热老化+10%氢氧化钠+盐雾 1 000 h		10.73	83
热老化+汽油+盐雾 500 h		12.17	94
热老化+汽油+盐雾 1 000 h		10.69	83
热老化+柴油+盐雾 500 h		10.99	85
热老化+柴油+盐雾 1 000 h		10.43	81
技术要求	—	—	≥80
试验方法	GB/T 1740 甲法	JTG T3364	—

表 8 显示:试件经热老化、化学介质浸泡和盐雾试验后,外观和黏结强度均满足要求。

500 h 盐雾腐蚀后,未经处理的试件黏结强度最大,经热老化处理后的黏结强度有所降低,经热老化+化学介质浸泡的黏结强度损失更大;1 000 h 盐雾腐蚀后,具有相同的规律,但黏结强度损失更明显。

从单因素耐热老化试验数据可知,热老化后的黏结强度有所增加,但热老化+盐雾试验后的黏结强度却低于仅经盐雾腐蚀的黏结强度,可知热老化过程对防腐底漆的致密性产生了影响,使盐雾蒸气进入通道,从而影响防腐底漆与钢板的黏结强度。

5 匹配性试验

长效防腐底漆作为钢桥面铺装的防腐底涂层,其上一一般还需配合防水层(含黏结层)使用,才能完全起到承上启下的作用。基于钢桥面铺装 MMA 防水黏结层,研究长效防腐底漆与 MMA 防水层和浇注式沥青混凝土铺装组合结构的匹配性。

5.1 防水黏结层匹配性

在固化后和固化并经过热老化的长效防腐底漆上涂抹 MMA 防水层,待防水层固化后测试黏结强度(图 1),结果如表 9 所示。

表 9 显示:在长效防腐底漆上涂布 MMA 防水层,黏结强度满足要求,底漆热老化后黏结强度更高,底漆热老化前后的破坏部位均发生在 MMA 防水层,说明长效防腐底漆与 MMA 防水层匹配良好。



图 1 防水黏结层拉拔试验

表 9 防水黏结层匹配性试验结果

项目	25℃黏结强度/MPa	底漆热老化后 25℃黏结强度/MPa	底漆热老化后黏结强度保持率/%
平均值	8.58	11.74	136.8
破坏部位	MMA 内部		
技术要求	≥5.0 ^注	—	—
试验方法	JTG T3364	JTG T3364	—

注:JTG T3364-02—2019 对 MMA 防水黏结层中防腐底涂层的要求。

5.2 铺装组合匹配性

在固化后的长效防腐底漆上涂抹 MMA 防水层和丙烯酸黏结剂,完成后再铺筑浇注式沥青混凝土,进行组合件的黏结强度和剪切强度测试,结果如表 10 所示。

表 10 铺装组合的黏结、剪切试验结果

项目	黏结强度(25℃)/MPa	剪切强度(25℃)/MPa
平均值	1.60	1.69
破坏部位	大量在 MMA 防水层与浇注式沥青混凝土之间,少量在浇注式沥青混凝土内部	
技术要求	≥1.0	
试验方法	JTG T3364	

铺装组合试件的黏结强度与剪切强度满足技术要求,且长效防腐底漆与 MMA 防水层之间的界面未破坏。

为模拟防腐底漆与MMA防水层、浇注式沥青混凝土铺装层整体结构的使用耐久性,采用五点加载复合梁疲劳试验测试铺装结构在长期反复荷载作用下的使用情况,按JTG/T 3364-02—2019附录D进行试验,如图2所示。



图2 组合结构五点加载疲劳试验

疲劳加载次数达到100万次后停止试验,经观察,试件未出现开裂、脱层等情况,表明长效防腐底漆与MMA防水层和浇注式沥青混凝土铺装组合结构有良好的匹配性。

6 与传统防腐底漆对比试验

将长效防腐底漆与钢桥面铺装常用的防腐底漆进行横向对比试验,选用的防腐底漆为:1号丙烯酸

底漆、2号丙烯酸底漆、环氧富锌漆、环氧云铁漆,对比试验包括与钢板的黏结强度、耐化学介质和耐中性盐雾试验。

6.1 黏结强度

各类防腐底漆与钢板的黏结强度对比检测结果如表11所示。

表11 不同防腐底漆黏结强度试验结果

底漆类型	25℃黏结 强度/MPa	破坏部位	试验方法
长效防腐底漆	12.93	底漆内聚破坏	JTGT3364
1号丙烯酸底漆	8.79	底漆与钢板间	
2号丙烯酸底漆	8.63		
环氧富锌底漆	10.34		
环氧云铁底漆	12.26	底漆内聚破坏	

环氧树脂类底漆与钢板的黏结强度均在10MPa以上,丙烯酸底漆与钢板基面黏结强度低于10MPa,力学性能相对较弱。

6.2 耐化学介质性能

各类防腐底漆耐化学介质性能试验检测对比如表12所示。

表12 不同防腐底漆耐化学介质性能对比试验结果

试验项目	试验结果				试验方法
	浸泡10%盐酸溶液168h	浸泡10%氢氧化钠溶液168h	浸泡汽油168h	浸泡柴油168h	
长效防腐底漆	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度12.09MPa;黏结强度保持率93.5%	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度12.15MPa;黏结强度保持率94.0%	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度11.44MPa;黏结强度保持率88.5%	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度10.95MPa;黏结强度保持率84.7%	GB/T 1740 甲法, JTGT3364
1号丙烯酸底漆	大量细小起泡现象	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度9.27MPa;黏结强度保持率94.0%	变色明显	轻微变色	
2号丙烯酸底漆	严重被溶解	部分溶解,大量细小起泡	全部被溶解	涂层龟裂	
环氧富锌漆	严重鼓包现象	大量细小起泡现象	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度8.97MPa;黏结强度保持率86.7%	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度9.55MPa;黏结强度保持率92.3%	
环氧云铁漆	明显变色	明显变色	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度9.27MPa;黏结强度保持率75.6%	无严重变色、皱皮、起泡、剥落、变软;黏结强度10.58MPa;黏结强度保持率86.3%	

表12显示:长效防腐底漆在耐化学介质性能上最强,耐酸、碱、汽油和柴油,在化学溶液中浸泡后黏结强度保持率在80%以上;1号丙烯酸底漆不耐酸、在汽油和柴油中会变色,耐碱稍好;2号丙烯酸底漆在酸、碱和汽油中都会溶解,在柴油中浸泡后涂层会龟裂;环氧富锌漆和环氧云铁漆的试验结果相近,稍好于丙烯酸底漆,不耐酸和碱,耐汽油和柴油,浸泡

化学介质后,环氧富锌漆与钢板的黏结强度值小于环氧云铁漆,但黏结强度保持率大于环氧云铁漆。

6.3 耐盐雾试验

盐雾试验对比分别使用无划痕的试板和有划痕的试板,试验过程中,通过盐雾试验箱的透明观察窗对试验板进行观察,发现异常情况时将试验板取出仔细观察。无划痕的试板参照《漆膜耐湿热测定法》

(GB/T 1740—2007)规定的方法进行检查评定,等级1~5级,数值越低代表性能越好,有划痕的试板参照《喷涂件耐腐蚀环境评估》(ASTM D1654-05)规定的方法进行检查评定,等级0~10级,数值越高代表性能越好。经过试验,各底漆盐雾试验效果如表13所示。

表 13 盐雾试验对比结果

底漆	盐雾时间/h	现象	评级
长效防腐底漆	3 000	无痕板无起泡、生锈、开裂;划痕板无起泡,锈蚀扩展 ≤ 1 mm	无痕板 1级 划痕板 8级
1号丙烯酸底漆	500	无痕板外观正常,剥开后内部生锈;划痕板起泡生锈	无痕板 5级 划痕板 0级
2号丙烯酸底漆	126	无痕板、划痕板均生锈	无痕板 5级 划痕板 0级
环氧富锌漆	645	划痕板起泡,锈蚀严重扩展	无痕板 5级
锌漆	910	无痕板生锈	划痕板 5级
环氧云铁漆	885	无痕板、划痕板均起泡生锈	无痕板 5级 划痕板 1级

长效防腐底漆能够经受3 000 h的盐雾试验,而其他4种防腐底漆都不能经受;丙烯酸树脂底漆耐盐雾性能最差;环氧富锌漆和环氧云铁漆较丙烯酸底漆稍好,但耐中性盐雾试验的时间也不超过1 000 h。

7 结论

针对钢桥面铺装出现局部病害后钢板迅速生锈的现象,基于钢桥面浇注式沥青混凝土铺装常用的MMA防水黏结层,研制出海域环境长效防腐底漆并进行各项性能测试与对比研究,主要结论为:

(1) 以有机硅环氧树脂为基础原料,添加新型环保高效防锈颜料,并将腰果酚改性酚醛胺和聚酰胺进行搭配作为固化剂,制备了性能优良的长效防腐底漆。

(2) 通过单因素作用和多因素作用后的性能检测,长效防腐底漆与钢板的初始黏结强度大于10 MPa,浸泡化学介质后黏结强度保持率在80%以上,耐盐雾试验可达3 000 h和1级标准,热老化试件经化学介质浸泡再经过盐雾试验1 000 h后黏结强度保持率仍在80%以上。

(3) 通过钢桥面铺装组合结构五点加载复合梁疲劳试验,当荷载作用次数达100万次时防水黏结层界面连接完好,说明长效防腐底漆与防水层和铺装层的匹配性良好。

(4) 长效防腐底漆的耐化学介质腐蚀性能、盐雾试验性能均远超钢桥面铺装传统所用的防腐底漆,

满足海域C5-M环境下钢桥面铺装长效防腐底漆的技术要求,理论防腐寿命可达15~25年。

参考文献:

- [1] 张辉,闫宝伟,杨帅,等.功能性粉末涂料的研究现状与发展[J].化学工业与工程,2020,37(2):1-18.
- [2] 曹慧军,张昕,韩金,等.高固体分环氧海洋防腐蚀涂料的研究进展[C]//浙江省腐蚀与防护学会.2017浙江省腐蚀与防护学术与技术发展论坛:现代表面技术推广应用学术研讨会,2017:177-182.
- [3] 赵金霞,白凯,廖原.嘉鱼长江公路大桥钢箱梁设计[J].中外公路,2020,40(5):172-176.
- [4] 宋笑.水性涂料重防腐应用若干问题探讨[J].涂层与防护,2018,39(9):46-50.
- [5] 宋冬冬.钢结构文物桥梁维修长效防腐涂装施工技术[J].工程建设,2018,50(7):74-78.
- [6] 杨宏启.海洋工程防腐涂层/碳钢体系的力学化学行为研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [7] 张贤慧,徐静,梅奕,等.海洋工程用环氧富锌涂料的研究[J].涂料技术与文摘,2016,37(9):33-36.
- [8] 包胜军,谢昕欣,郭红锋.Q355GNH耐候钢板表面防腐研究[J].涂料工业,2015,45(3):69-72.
- [9] 陈仕周,闫东波.钢桥面浇注式沥青混凝土铺装技术[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [10] 马融,陈飞.ERS钢桥面铺装病害调研及原因分析[J].中外公路,2019,39(3):175-178.
- [11] 丁庆军,刘小星,何浩,等.白沙洲大桥钢桥面铺装修复方案设计与施工[J].公路,2006,51(7):61-65.
- [12] 陈团结.大跨径钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝行为研究[D].南京:东南大学,2006.
- [13] 赵锋军,李宇峙,易伟建.钢桥面铺装防水黏结层抗剪问题研究[J].公路交通科技,2007,24(2):37-39.
- [14] 洪亮,姑丽比娅·艾斯卡尔,刘书君.钢桥面铺装防水黏结层材料黏结性能影响因素分析[J].山西交通科技,2019(4):78-80,91.
- [15] 李永安,陈楚鹏.钢桥面铺装防水黏结层性能研究[J].广东公路交通,2019,45(2):30-36.
- [16] 朱定,李书亮.港珠澳大桥钢桥面铺装方案比选及浇注式沥青混合料(GMA)标准化施工工艺控制[J].中外公路,2019,39(2):161-164.
- [17] 李勇,付红,张伯权.钢桥面防腐蚀方案的比较与选择[J].材料保护,2006,39(12):61-63.
- [18] 阎春霞,李志国,苏波,等.钢桥面板粗糙度及防腐层优选[J].天津建设科技,2014,24(1):45-46,51.
- [19] 牟建波,余子腾.钢桥面板的除锈与防腐研究[J].公路,2001,46(1):50-52.
- [20] 王民.钢桥面铺装防水体系防腐性能的评价[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(2):74-81.