

国内外大跨度钢桥耐久性调查报告

对钢桥而言，如何针对桥梁所处环境特点，选择经济、有效的防腐措施，减缓钢结构的金属腐蚀，延长其使用寿命，对降低钢桥全寿命周期成本，提高其竞争力有十分重要的意义。近 20 年来，我国东南沿海地区先后建成了多座钢结构悬索桥、斜拉桥，对大跨度钢结构防腐技术也有了进一步认识。

浙江公路水运工程咨询公司与同济大学于 2017 年到 2019 年陆续调研了 13 座国内大型钢结构桥梁、日本东京湾及濑户内海 6 座国外大型钢结构桥梁，跨度从百米至千米级别不等，桥型涵盖了梁桥、斜拉桥和悬索桥。

本文意在梳理目前国内外大跨度钢结构桥梁的耐久性现状，对我国桥梁养护工作的现状进行思考，从而对我国未来钢结构桥梁的管理、养护方案提出一些建议。

防腐设计与耐久性现状

钢主梁

无论是何种桥型，钢主梁或钢加劲梁都是最重要的桥梁构件之一，其表面的涂装防护，直接关系到结构的使用寿命和耐久性能。本次调研的中日桥梁的钢主梁，主要分为钢箱梁与钢桁梁。

国内调研桥梁主要依据国内行业标准《JT/T722-2008 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》中规定的防腐体系进行防腐涂装，外表面多选择 S09 与 S11 体系，内表面多采用 S12 或 S13 体系。各体系具体构成见表 1。

表1《JT/T 722-2008 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》中规定体系

配套编号	腐蚀环境	涂层	涂料品种	道数/最低干膜厚度 μm
S09	C5-M	底涂层	无机富锌底漆	1/75
		封闭涂层	环氧封闭漆	1/25
		中间涂层	环氧(云铁)漆	(1~2)/150
		面涂层(第一道)	丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆/氟碳树脂漆	1/40
		面涂层(第二道)	氟碳面漆	1/40
		膜干总厚度涂层		330
S11	C5-M	底涂层	热喷铝或锌	1/150
		封闭涂层	环氧封闭漆	(1~2)/50
		中间涂层	环氧(云铁)漆	(1~2)/150
		面涂层(第一道)	丙烯酸脂肪族聚氨酯面漆/氟碳树脂漆	1/40
		面涂层(第二道)	氟碳面漆	1/40
		总干膜厚度		280
S12	配置抽湿机	底-面合一	环氧(厚浆)漆(浅色)	(1~2)/150
		总干膜厚度	150	
S13	未配置抽湿机	底漆层	环氧富锌底漆	1/50
		面漆层	环氧(厚浆)漆(浅色)	200~300
		总干膜厚度		250~350

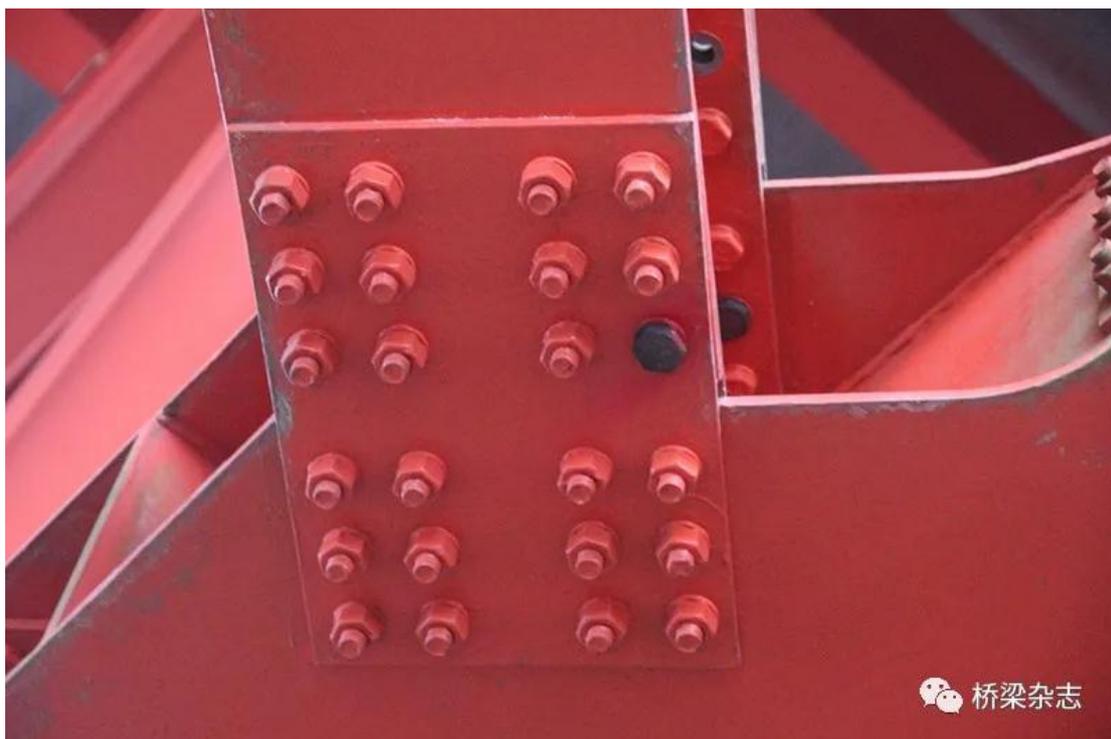
注：抽湿机常年工作，以保持内部相对湿度低于50%。

桥梁杂志

国内调研中，近 20 年建造的桥梁所采用的外表面防腐涂装均表现较好，但某些早期建造桥梁，由于涂装体系较落后，局部锈蚀较严重，表现为风嘴处涂装剥落、集中位置的较严重锈蚀。钢箱梁内部涂装在使用过程中效果总体较好，但受除湿机影响较大，功率太小或密封性差导致湿度的提升会加剧锈蚀现象。箱梁内部焊缝是普遍容易发生锈蚀的部位，其锈蚀情况受涂装、除湿与结构所受疲劳荷载共同影响。国内钢主梁耐久性情况调研结果如图 1。

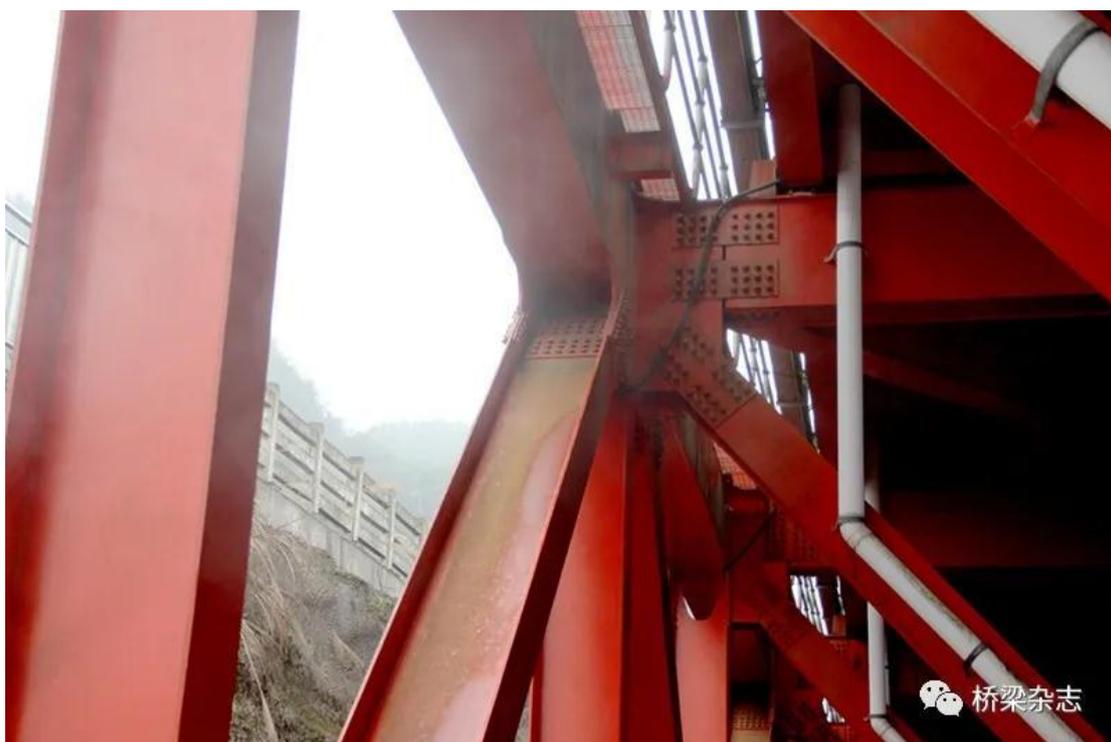


涂装剥落



桥梁杂志

外露栓钉锈蚀



桥梁杂志

钢桁架表面斑锈



箱梁内部锈蚀



除湿机功率不足引起锈蚀



纵隔板与横隔板相交处焊缝开裂锈蚀

图 1 国内钢主梁耐久性情况调研结果

日本钢结构桥梁采用的 C5 涂装体系，在多年的应用中证明了自身较好的防腐能力。该体系在明石海峡大桥、东京彩虹桥上已工作了 20 余年，虽存在一些局部劣化现象，如杆件边缘涂装局部剥落，但配合平时养护补涂，总体表现较好。

表2《钢质公路桥涂装便览》中C5体系

涂装工程	涂料名称	使用量/gm ²	膜厚/μm	涂装间隔
基材处理	喷砂处理ISO Sa2.5			4h内
底漆	无机富锌底漆	160	15	6个月内
2次基材处理	喷砂处理ISO Sa2.5			4h内
防腐底漆	无机富锌底漆	600	75	2~10d
雾喷底漆	环氧树脂涂料	160	-	1~10d
底漆	环氧树脂涂料	540	120	1~10d
中期	氟树脂涂料	170	30	1~10d
面漆	氟树脂涂料	140	25	

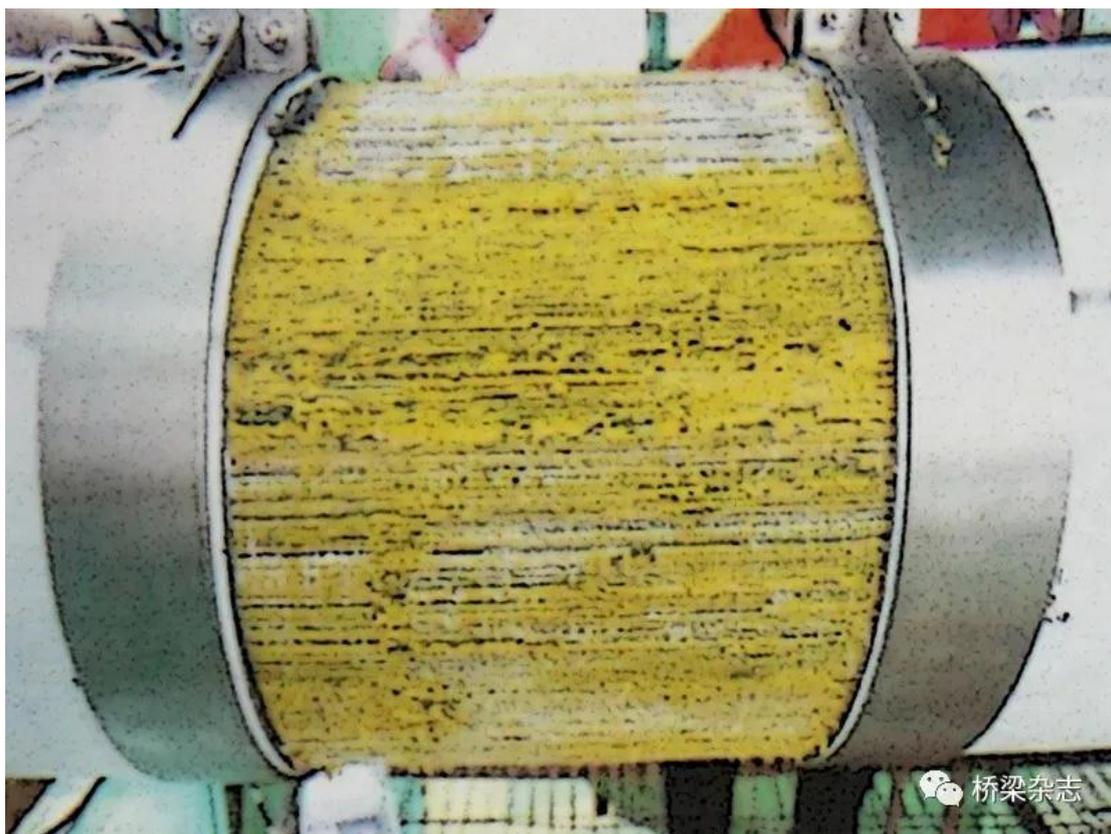
国内外调研结果显示，现有的防腐涂装体系总体上能保证大跨径钢结构桥梁的防腐需求，但长期的使用仍然会出现局部涂装劣化现象，往往出现在焊缝处、螺栓与钢板交界处、钢板边缘与转折处。钢箱梁内部锈蚀情况受除湿机效果影响大，合理布设除湿机可大幅降低箱内湿度，减少锈蚀发生的可能性。建议对钢结构表面涂装易劣化部位着重处理，如对风嘴上表面涂装进行适当加强，对劣化部位及时补涂。同时合理配置除湿机，保证除湿机功率足以降低箱梁内部湿度。

缆索系统

1.主缆

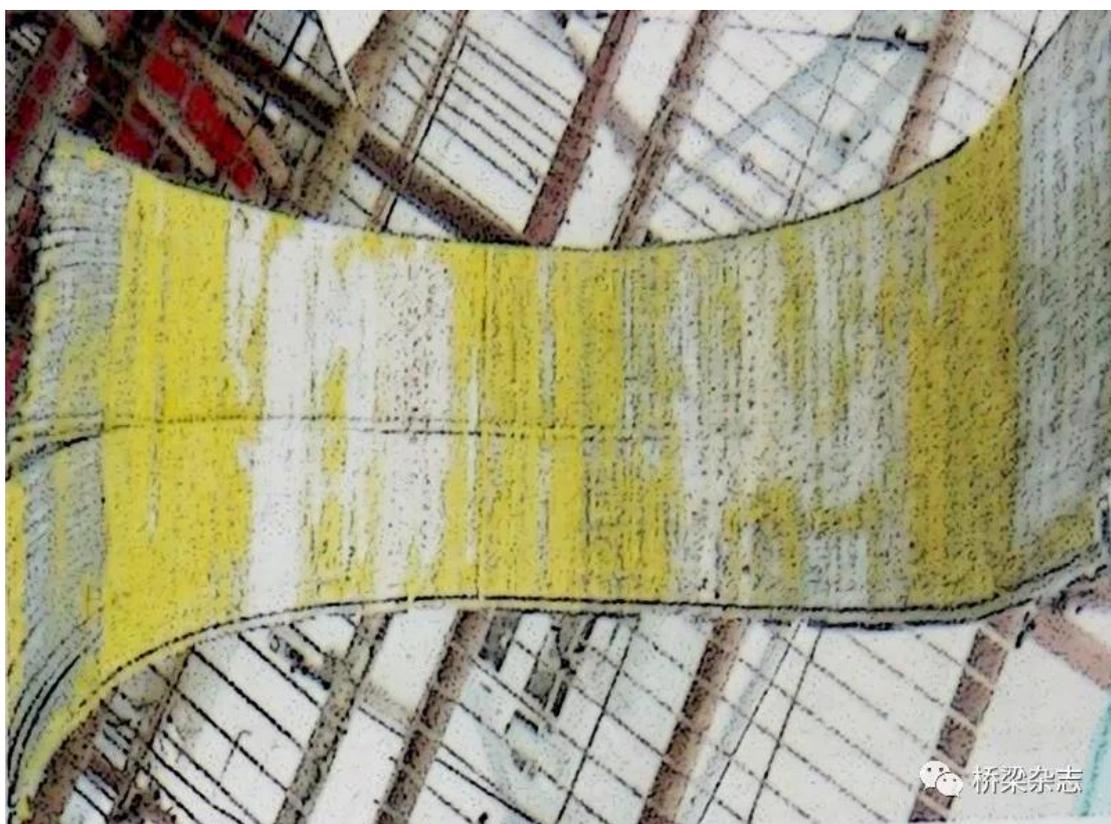
我国早期采用“不干腻子+圆形缠丝+密封防护层”的传统体系，对悬索桥主缆进行防护，但效果不佳。2004年开始引进了包括S形缠丝、柔性涂料和除湿系统在内的全套日本技术，之后建设的国内大型悬索桥，陆续开始采用S形缠丝或缠包带除湿防护体系。此次调研的大部分国内桥梁建成较早，仍然采用了传统防护体系，仅一座设置了主缆除湿系统。目前，主缆除湿系统在国内的使用并不如日本普遍。

国内调研所收集到的历年检修报告显示，主缆检查发现内部钢丝锈蚀、腻子不饱满等现象，传统的主缆防护体系表现不尽如人意。国内主缆耐久性情况调研结果如图2。



桥梁杂志

腻子覆盖不饱满



桥梁杂志

缠绕钢丝内侧锈蚀



防腐涂装层剥落



缠丝局部外露

图 2 国内主缆耐久性调研结果

日本悬索桥主缆防护主要采用了物理主缆防护+主缆除湿系统的防护体系，其中物理主缆防护包括了 S 形缠丝技术、主缆缠包带等。

来岛海峡大桥设置了主缆除湿系统，同时采用了气密性优秀的 S 形缠丝技术，再涂刷延展性好、不易开裂的柔软型氟化乙烯树脂涂料。

明石海峡大桥则采用氯丁橡胶缠包系统以及干燥除湿系统。此外，索夹区域的气密性通过含有橡胶和硅树脂的密封剂保证。在明石海峡大桥中，干燥空气每隔约 140m 被注入主缆外围区域，注入气压则由密封材料的耐久性以及引入口和索夹处气压损失决定，材料耐久性和气压损失大小，则通过主缆模型试验和现场实际测量决定。进气口的细滤器可以在空气进入主缆前筛除盐分粒子，出气口的空气相对湿度控制在 40%以减少锈蚀发生。

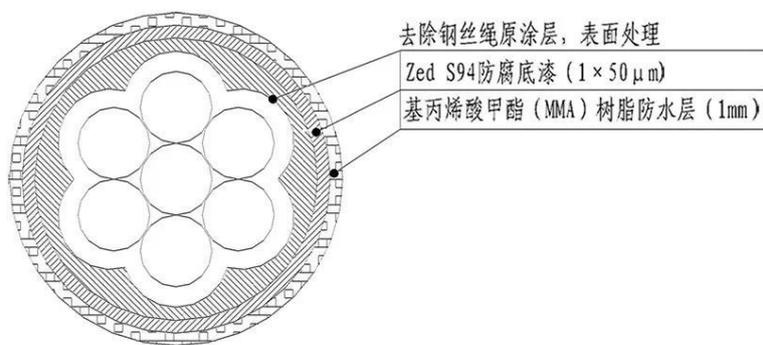
2013 年、2016 年，彩虹大桥分别于芝浦侧、台场侧设置了主缆送气干燥系统，送气系统由过滤装置、除湿机、送风机、冷却器、送气阀、排气阀构成。使用过滤装置防止粉尘和海盐粒子侵入。除湿机使用硅胶吸收空气中的水分。送风机采用容易调整送气量和压力的罗茨式鼓风机。为使空气容易进出主缆，除去送气阀和排气阀处的防锈油和缠绕钢丝，还设置了从外部可观察主缆钢丝状况的检查窗。为确保气密性，在主缆索箍的端部和接缝处，采用下层异丁橡胶、表层改性硅的双重堵缝。

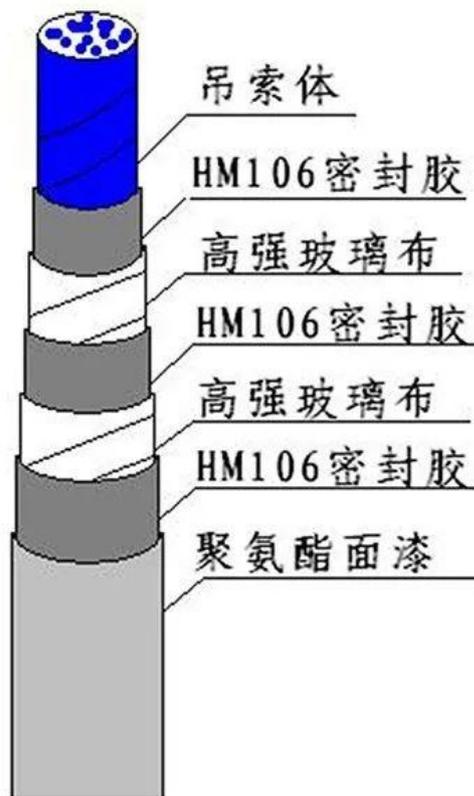
从调研结果来看，以上物理防护配合主缆除湿系统能达到较好的主缆防护效果。以明石海峡大桥为例，在建成后 10 年的不间断观察中，管养人员没有发现主缆锈蚀现象，通过消除水分来防止锈蚀的方法得到了充分证明。

目前主缆除湿系统配合 S 形缠丝技术或主缆缠包带体系,被认为是最有效的主缆长期防腐体系,国内由于种种原因在早期建设的悬索桥中并未配置。但近年来的新建桥梁越来越多地采用主缆除湿系统,配合主缆观察窗和腐蚀监控系统,可以达到更长效、更可靠的主缆防腐与维护效果。

2.吊索

本次调研中国内悬索桥吊索采用的防护方法,有 PE 套筒防护、“不干性腻子涂抹嵌缝+涂聚氨酯面漆” “ZedS94 防腐底漆+弹性甲基丙烯酸甲酯(MMA)防水树脂层” “三胶两布+聚氨酯面漆” 等防护体系。其中 PE 套筒防护主要用于平行钢丝,而其他防护均应用在钢丝绳吊索上。图 3 为 ZedS94+MMA 体系和三胶两布体系示意图。





桥梁杂志

三胶两布

图3 国内吊索防护体系

从各个防腐体系的实用效果来看，PE 套筒常见的耐久性问题为吊索 PE 层不规则横向裂纹，表层 PE 老化，引发进水、钢丝表面氧化锈蚀等。“不干性腻子涂抹嵌缝+涂聚氨酯面漆”防护体系，由于聚氨酯面漆在一定时间后逐渐老化，加上热胀冷缩的原因，聚氨酯面漆的弹性不能适应不干性腻子的弹性，造成了面漆开裂并脱落。同时，不干性腻子在经过风化和紫外线照射下逐渐老化并硬化失去一定的黏性，造成表面少许开裂后，空气、氯离子、水等腐蚀介质深入到吊索内部，由此造成了吊索锈蚀。相关管养单位反映“ZedS94 防腐底漆+弹性甲基丙烯酸甲酯（MMA）防水树脂层”和“三胶两布+聚氨酯面漆”

这两种防护体系工作情况较好，这两种方法在实际工程中被普遍用于钢丝吊索防护。国内吊索耐久性情况调研结果如图 4。



钢丝绳吊索表面凹槽污渍累积



PE 套筒钢丝表面氧化，有锈斑



桥梁杂志

吊索表面劣化



桥梁杂志

吊索不干腻子劣化



面漆开裂脱落



三胶两布涂装效果

图 4 国内桥梁吊索耐久性情况调研结果

在濑户大桥之前，日本修建的悬索桥采用涂料涂装的 CFRC(绞捻钢丝绳)吊索，明石海峡大桥和来岛海峡大桥考虑维修养护的便利，变更为聚乙烯管包裹的 PWS 吊索。

调研结果表明，在吊索的一般部位，水从涂膜开裂处渗入到吊索内部，内部空隙处有腐蚀倾向，比起手刷涂装的因岛大桥，使用浸渍涂装机施工的状况要好些。

总结国内外调研现状，吊索的防护主要分 PE 套筒防护和表面涂装防护两类。PE 套筒防护主要需注意的问题是老化开裂，而表面涂装体系在长时间使用后，也可能出现涂装开裂剥落等现象，但像三胶两布这类产包+涂装的防护体系效果较好。

桥面铺装

国内钢结构桥梁的桥面铺装主要采用高弹改性沥青 SMA10、细粒式改性沥青混凝土，也有环氧沥青（双层热拌环氧沥青铺装）、浇筑式沥青以及 ERS 等。调研中发现悬索桥桥面板厚度、交通量对桥面铺装耐久性影响巨大，国内已建成悬索桥钢桥面板大多为 12mm。由于交通量增长迅速，桥面板刚度偏低，易引发桥面铺装裂缝，严重者发展到桥面铺装与钢桥面板共同开裂，进而引发箱梁渗水。而采用 16mm 厚钢桥面板则可以大大减少铺装病害发生。

调研的日本桥梁桥面铺装大多采用浇筑式沥青混凝土和改性密级配沥青混凝土。调研的桥梁中，京门大桥桥面板厚度为 16mm，桥面铺装状况总体良好；其余调研钢结构斜拉桥、悬索桥均为 12mm，在繁重的交通量下都出现了较严重的开裂。东京彩虹桥上层高速公路日交通量约 6 万辆，2010 年管养单位对钢桥面开裂进行了补修，2012 年桥面铺装换成了 50mmSFRC 钢纤维混凝土 +30mm 沥青混凝土。横滨港湾大桥（斜拉桥）由于桥面刚度较小、重车（最大达 110t）较多等因素，桥面铺装出现了坑洞等病害，现已将铺装结构调整为 7.5cmSFRC 钢纤维混凝土。

新建桥梁可考虑适当加厚钢桥面板，而对于已建桥梁，可考虑更换铺装层材料来提高桥面铺装性能。除东京彩虹桥采用的 SFRC 钢纤维混凝土外，也可以采用 STC 等新材料进行铺装。

钢管桩

目前，国内对钢管桩的耐久性状况监测，主要还是通过水下探摸。采用的防腐蚀措施有“高性能环氧涂层+阴极保护法+预留腐蚀量”的联合防护法，或配合“环氧树脂底漆+环氧树脂中间漆+聚氨酯面漆的”表面防腐涂装体系。调研的许多国内桥梁都采用了联合防护法，该方法从隔离腐蚀环境、转移腐蚀目标、预留腐蚀厚度 3 个方面对钢管桩进行防护，效果较好。国内钢管桩耐久性问题主要表现在表面涂装脱落与锈蚀上。

明石海峡大桥采用钢沉井，施工中采用了电沉积缓蚀施工法，该施工法利用在海水中通以微弱的电流，使海水中存在的以钙和氢氧化镁等为主要成分的物质（被称为电沉积物）附着在外板的原理，利用电沉积物镀层来抑制钢沉井的腐蚀。明石海峡大桥运营 10 年后，调查发现局部出现被称为“点腐蚀”的腐蚀现象。

附属结构

1.除湿机

除湿机作为封闭环境内防止钢构件腐蚀的重要设备，在中国与日本的桥梁中普遍使用。从调研结果看，主梁与锚碇内除湿机最受重视，基本都有所配备，但某些桥梁塔顶鞍室不设除湿机。通常重力式锚碇由于结构部分埋入地底，混凝土壁厚较大，其与外界气体几乎没有交换，除湿机干燥效果非常明显；主梁与鞍室整体结构都处于大气中，受雨水侵蚀等因素更严重，且存在较多通道、孔隙，干燥效果次之，但总体较好。但调研也发现，对于隧道锚，受岩石裂隙水等因素影响，仅靠除湿机降低湿度较困难。

本次调研发现，日本除了在上述位置设置除湿机以外，在桥塔内部亦普遍设置，这也反映出日本桥梁管养工作者对桥塔内部的防腐更加重视。国内桥梁主塔内部防腐容易被忽略，大多数桥梁对主塔内壁不做表面防腐处理，塔顶通道与主塔间往往无封闭措施，雨水湿气可直接侵袭塔内空间，调研中仅有个别桥梁进行了主塔内部的表面防腐处理。

结合调研结果与管养人员经验，桥梁除湿机使用上需注意保证除湿空间的密封性，否则外界的气体交换很难使除湿空间湿度下降。还需保证除湿机功率与除湿空间大小匹配，避免除湿能力不足的情况。

2.检查车

检查车作为桥梁养护的重要工具被普遍设置，但由于使用次数较少而容易被日常养护工作忽略。

国内调研发现，桥梁检查车多采用钢结构，部分采用铝结构，且钢结构检查车相对而言耐久性问题更严重。工作环境的恶劣和检查车自身的设计考虑不周，是检查车耐久性问题频发的主要因素。横风导致雨水容易侵蚀检查车，尤其是外露的电机动力、机械传动与电路控制系统。检查车轨道暴露于与钢主梁相同的腐蚀环境中，却在工作中要承受机械摩擦，故涂层更易受到损伤。对较大跨径的桥梁，常规供电系统中电力沿程损失较大，致使检查车易在跨中位置失去动力。尤其是钢制检查车自重过大，易引起轨道变形、轨距变化，最终导致检查车在桥梁建成若干年后容易失去行走功能。此外，部分检查车缺乏对巡检、养护工作人员的人身安全考虑，缺少风速警报、停靠泊车等安全装置。国内检查车耐久性情况调研结果如图 5 所示。



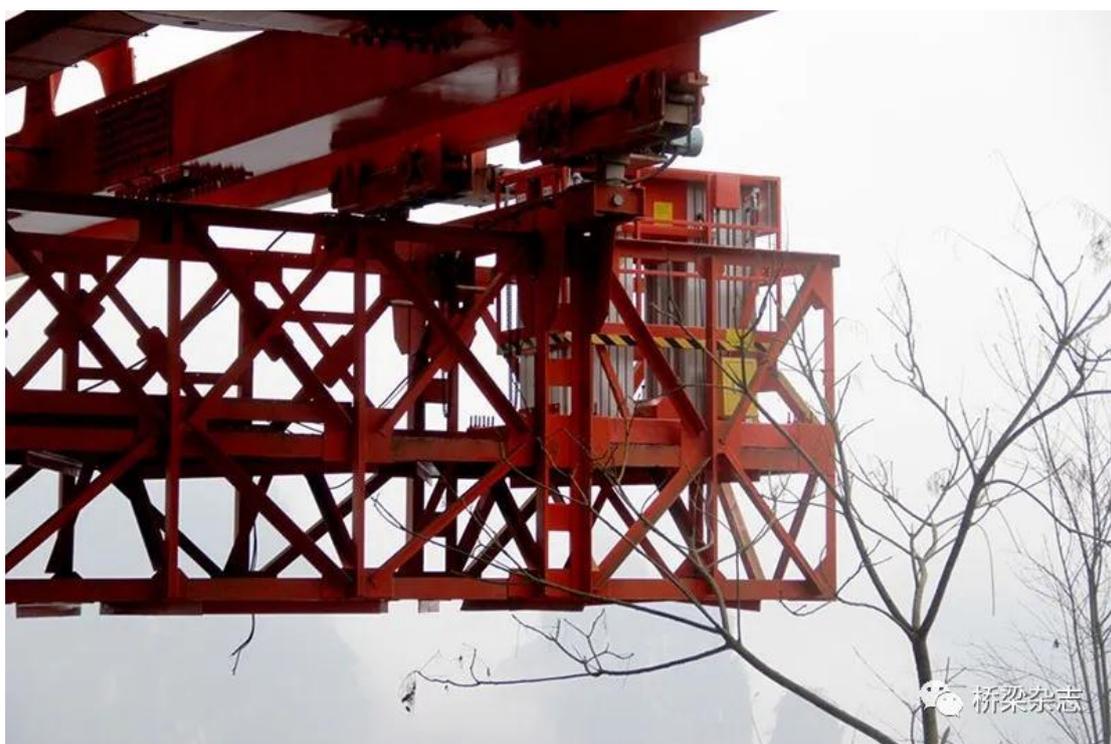
电机锈蚀



悬挂工字钢锈蚀



滑轮锈蚀



铝制检查车耐久性较好

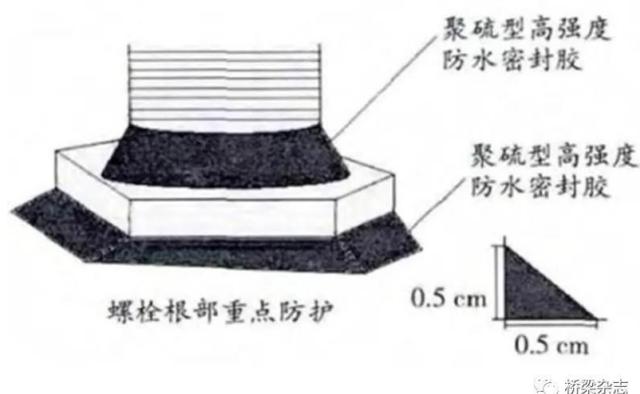
图 5 国内检查车耐久性情况调研结果

日本桥梁普遍采用铝制检查车，从调研结果看，总体使用情况较好。

为了后期管理养护工作顺利高效，建议检查车采用轻质、高强的航空铝合金材料；加装防水保护设置保护外露电气设备，免受加劲梁下落雨水侵害；提高检查车及其轨道的防腐涂装等级；优化检查车电力传输系统与控制系统。同时，考虑设置风速警报装置、优化检查车的制动装置系统、设置轨道探测与误差适应装置。

3.钢护栏

提高钢护栏耐久性措施主要体现在表面涂装与连接螺栓的防护上。国内钢护栏表面涂装一般与该桥采用的钢结构外表面涂装相同。螺栓处表面进行热浸锌或喷锌处理后，再进行涂装。调研中发现，一些桥梁对螺栓防护较为重视，对地脚螺栓缝隙密封胶密封，一些桥梁则在螺栓紧固后设置专门的防护帽杯，用密封胶将其固定，防止螺栓腐蚀。调研结果表明，钢护栏总体耐久性较好，但在局部位置，如螺栓连接处会产生锈蚀或涂装开裂，或是涂装被机械损坏，在某些情况下也会出现螺栓缺失现象。国内桥面栏杆耐久性情况调研结果如图 6。



地脚螺栓缝隙密封胶密封



桥梁杂志

螺栓帽杯



桥梁杂志

涂装开裂剥落



栏杆锈蚀

图 6 国内桥面栏杆耐久性情况调研结果

在日本的调研中也发现个别桥梁的钢护栏腐蚀较严重。

钢护栏耐久性对桥梁美观影响较大，其表面涂装容易在安装运营时受到机械损坏，在日常维护中应注意。同时对螺栓也应采用密封胶密封、帽杯防护，不仅能提高耐久性，还能提高结构与行车的安全性。

维保问题与建议

在过去的几十年间，我国的桥梁养护工作者在桥梁养护的理念与技术上获得了巨大进步，在不断的尝试与创新中取得了巨大成就，但与国外相比仍然存在一

定差距，管养意识稍显薄弱，许多管养与防腐设计未考虑或仅停留在“有”的阶段，对“用”的可行性与持久性考虑较少。

结合以上大跨度钢结构桥梁的耐久性现状，可以总结出以下防腐工作经验——

1.桥梁结构设计对耐久性影响巨大。最典型的例子就是钢桥面厚度与桥面铺装耐久性的关系。许多桥梁实际交通量与设计时的预测交通量差异较大，刚度过低的桥面板沦为了桥面铺装的不坚实基础。同时，部分桥梁因景观等因素设置冗余构件或构件外形复杂多变，也会大大增加日后养护难度与工作量。

2.堵不如疏。如主缆除湿系统的缆索防护系统能可靠保证主缆内部干燥，防止锈蚀。实践表明，再严格的密封措施也无法做到杜绝水分进入主缆，而优质的密封措施配合针对每座桥专门设计的主缆除湿系统，可以高效长久地保证主缆耐久性。

3.重视附属结构。大桥的一些附属结构并不像主要构件一样时时刻刻在工作或发挥实用效果，往往容易被忽视，维护工作做得不到位，成为“装饰品”，如桥梁的健康监测系统、检查车等。

国内外共同存在的主要问题，仍然是对耐久性问题认知的欠缺与技术的不足。

新型钢结构涂装材料与工艺仍亟待研发，混合聚苯胺（PANI）和聚乙烯

（PVC）材料、基于纳米复合涂装的防腐涂层与超疏水防腐涂层，为管养工作

者提供了新的选择。主缆除湿系统大大提高了主缆耐久性，但合理的除湿系统设计与自主掌握的相配合使用的 S 形缠丝与缠包带技术，仍然需要我国桥梁工作者进行研究突破。对于一直存在的桥面铺装问题，除了适当增加钢桥面板厚度外，新型铺装材料 SFRCT、STC、UHPC 等也是未来开拓的方向。

特别鸣谢浙江省交通运输厅科研计划项目 (2019059) 对本次调研工作的资助。