

济阳公铁两用特大桥不锈钢复合钢桥面板 加工制造技术

马春江, 贾 广

(中铁山桥集团有限公司, 河北 秦皇岛 066205)

摘要: 针对现代铁路桥梁对桥面板高强度、高耐久性的严苛需求, 解决传统钢桥面板易受荷载与环境影响出现锈蚀、疲劳裂纹, 进而缩短寿命、增加维护成本的问题, 以济阳公铁两用特大桥为载体, 探索不锈钢复合钢桥面板的高效制造技术。基于复合钢板“异质材料协同”特性, 通过多环节工艺创新实现精准控制: 下料阶段优化切割与坡口工艺控制尺寸误差; U肋加工搭建新生产线保障截面精度与贴合度; 组装环节采用自动化设备及机器人焊接系统提升焊缝质量; 通过焊接工艺优化破解热影响区性能劣化、焊接变形难题。结果表明, 工艺创新使钢桥面板生产效率大大提高, 形成可复制推广的数控化、自动化工艺体系, 验证了不锈钢复合钢板作为桥面板替代材料的适配性, 为同类铁路桥梁工程应用该材料提供关键技术支撑。

关键词: 铁路桥梁; 不锈钢复合钢桥面板; 制造技术; 焊接工艺

中图分类号: U445.4; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0347-05

Processing and Manufacturing Technology of Stainless Steel Composite Bridge Deck for Jiyang Highway-Railway Two-Use Extra-Large Bridge

MA Chunjiang, JIA Guang

(China Railway Shanhaiguan Bridge Group Co., Ltd., Qinhuangdao 066205, China)

Abstract: In view of the harsh requirements of modern railway bridges for high strength and high durability of the bridge deck slab, and to solve the problems of steel bridge deck slab being easily affected by load and environment, resulting in rust and fatigue cracks, and thus shortening the service life and increasing maintenance costs, the high-efficiency manufacturing technology of stainless steel composite bridge deck slab is explored with the Jiyang Highway and Railway Two-use Extra-large Bridge as the carrier. Based on the “heterogeneous material synergy” characteristics of composite steel plates, the precise control is realized through multi-link process innovation, which are that the cutting and chamfering process in the blanking stage is optimized to control the error, the U-rib processing is organized to build a new production line to ensure the section accuracy and close fit, the assembly link adopts automatic equipment and robot welding system to improve weld quality, and through the optimization of welding process, the problems of performance deterioration and welding deformation in the heat affected zone are solved. The results show that process innovation has greatly improved the production efficiency of steel bridge deck slab, and has formed a replicable and popularized CNC and automation process system, which verifies the adaptability of stainless steel composite plates as alternative material for bridge deck slab, and provides key technical support for the application of this material in similar railway bridge projects.

Keywords: railway bridges; stainless steel composite bridge deck; manufacturing technology; welding process

0 引言

铁路钢桥在现代交通基础设施中具有重要地位^[1-4], 其桥面系的耐久性直接影响桥梁的使用寿命和维护成本。我国高速铁路钢桥普遍采用正交异性

钢桥面结构, 但传统道碴槽与钢桥面间的局部不密贴问题易导致积水, 加速桥面锈蚀, 且检修维护难度大^[5-8]。不锈钢复合钢板是通过将耐腐蚀、耐磨的不锈钢复层与高强度、高韧性的碳钢或低合金钢基层相结合, 在保证力学性能的同时显著提升耐久性, 已成为铁路钢桥面系统的重要发展方向^[9-11]。

国内外学者对不锈钢复合钢板在桥梁工程中的应用进行了广泛研究。日本JFE公司开发的真空轧

收稿日期: 2025-09-12

作者简介: 马春江(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 从事桥梁钢结构工作。

制法实现了复层与基层的冶金结合,界面结合强度可达 500 MPa 以上^[12-13]。欧洲注重全寿命周期成本控制,开发了耐海洋大气腐蚀的复合钢板,并在北海风电平台等工程中成功应用。国内自 2009 年首次在合肥南淝河大桥应用不锈钢复合钢板以来,已推广至 60 余座铁路大跨度桥梁,但在高精度轧制设备和自动化检测技术方面仍与国际先进水平存在差距。

本研究以济阳公铁两用特大桥为工程背景,系统研究正交异性不锈钢复合钢桥面板的制造与焊接技术,重点解决以下技术难点,一是复合钢板切割过程中的氧化问题,不锈钢复层在火焰切割时易形成高熔点的 Cr_2O_3 氧化膜,阻碍切割过程;二是异种钢材焊接时的冶金相容性问题,基层碳钢与不锈钢复层的化学成分差异导致焊接时合金元素稀释,易产生脆性相和腐蚀敏感性;三是大尺寸桥面板单元的变形控制问题,大尺寸桥面板单元焊接过程中产生的残余应力和变形难以控制;四是复合界面质量的无损检测难题,复合界面结合质量和焊缝缺陷的传统检测方法存在局限性。

研究成果将推动不锈钢复合钢板在铁路桥梁中的应用,提高桥面系统的耐久性,降低全寿命周期维护成本,为我国铁路桥梁建设提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 济阳公铁两用特大桥简介

济阳公铁两用特大桥跨越黄河段,地处济南市章丘区与济阳区交界处,距离济南遥墙国际机场 7 km,距离下游既有济阳黄河公路大桥约 2 km。主桥总长 1178 m,孔跨布置为 $(84+144+228+240+300+120+60)\text{m}$,为四塔三主跨矮塔钢桁梁斜拉桥。主塔为扁箱钢塔结构,主梁采用双层钢板桁结合结构:上层按一级公路标准设置双向 6 车道;下层为双线铁路桥面(标准横断面)如图 1 所示。中间行车区域两侧桥面板镂空设计,布置 2 道纵梁,每个节间均设置 3 道横肋,铁路桥面系平面布置如图 2 所示。为减少横梁面外受力,节点横梁与纵梁之间设置 X 形桥面平纵联。铁路桥面中间行车区域采用正交异性钢桥面板,中间行车区域采用 $(3+16)\text{mm}$ 规格的正交异性复合钢桥面板,其中 3 mm 厚不锈钢板材质为 316 L,16 mm 厚钢板材质为 Q370qE。U 肋外形尺寸为 $260\times 380\text{ mm}$,厚度为 8 mm,材质为 Q370qE,节段之间采用栓接,如图 3 所示。

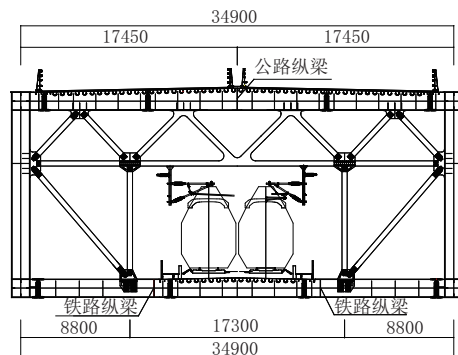


图1 铁路标准横断面示意图(单位:mm)

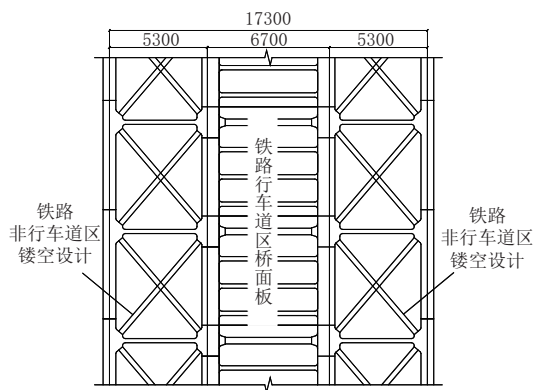


图2 铁路桥面系平面布置图(单位:mm)

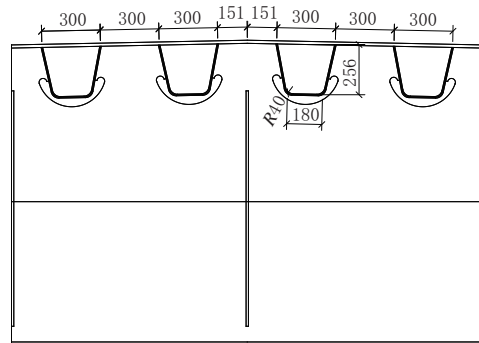


图3 桥面系U肋布置形式平面布置图(单位:mm)

2 正交异性不锈钢复合钢桥面板制造技术

2.1 不锈钢复合钢板下料技术

2.1.1 下料方法选择

与普通低碳钢不同,不锈钢在用火切割时,在预热火焰的温度影响下,不锈钢表面有一层很薄的氧化膜,即称高熔点、黏度大的 Cr_2O_3 遮盖在不锈钢表面上,妨碍下一层金属燃烧,因此,不锈钢复合钢板不能采用普通的火焰切割。故此,济阳公铁两用特大桥工程采用空气等离子数控切割机进行下料。在下料时考虑到坡口机加量及焊缝收缩量,减少了因预留配切量造成的原材料浪费,同时还节省了人工费用。

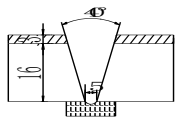
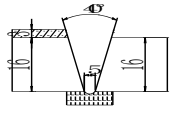
2.1.2 坡口加工工艺

不锈钢复合钢板下料完成后,转入机加工序,采用铣削加工工艺,使用数控铣床或刨床加工出焊缝

坡口,该加工工艺适用于总厚度 $\leq 10\text{ mm}$ 的薄板,加工精度可达 $\pm 0.1\text{ mm}$,加工时复层朝上,可避免氧化层污染。其中Y形坡口适用于气保焊或埋弧焊,坡口角度 $60^\circ\pm 2^\circ$,钝边 $3\sim 5\text{ mm}$,根部间隙 $0\sim 1\text{ mm}$ 。该设计可减少焊接层数,避免焊漏,适合全自动焊接;V形坡口常用于单面焊或组合坡口,坡口角度 $40^\circ\sim$

50° ,根部间隙 5 mm ,通过增大坡口角度降低熔合比,减少碳钢对不锈钢的稀释;组合坡口在复层侧加工深度 2 mm 、宽度 10 mm 的小坡口,便于区分过渡层与基层,精准控制焊接层次,V形坡口尺寸、焊接方法及代表焊缝如表1所示,对应焊接方法金相照片如图4、图5所示。

表1 V形坡口尺寸、焊接方法及代表焊缝

板厚组合(材质)	坡口形式	焊接位置	焊接方法及焊接材料	代表焊缝
3/16+3/16 (316L-Q370qE)		平位	气保护半自动焊 HTW-58($\Phi 1.2$) TS309L-FC11($\Phi 1.2$) TS316L-FC11($\Phi 1.2$) 背面衬TG-2.0Z陶瓷衬垫	桥面板(复合板)间对接焊缝板厚组合:3/16+3/16等
3/16+16 (316L-Q370qE+Q370qE)		平位	气保护半自动焊 HTW-58($\Phi 1.2$) TS309L-FC11($\Phi 1.2$) 背面衬TG-2.0Z陶瓷衬垫	桥面板(复合板与普通钢板)间对接焊缝板厚组合:3/16+16等

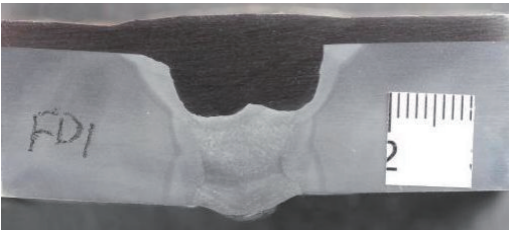


图4 FD1($\delta 3/16+3/16\text{ mm}$,平位焊接)金相照片

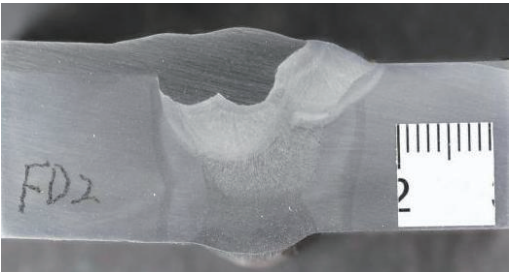


图5 FD2($\delta 3/16+16\text{ mm}$,平位焊接)金相照片

2.2 U肋加工技术

与传统的制造工艺不同,为了减小变形、减少人工、提高制造效率,济阳公铁两用特大桥U肋采用新的生产线,按照切割→铣边→钻孔→坡口加工→数控折弯的顺序进行生产,提高了U肋的加工精度和生产效率。

(1)钢板切割。U肋下料时采用多嘴火焰切割机双枪对称切割,按设计要求切割U肋毛坯,预留 4 mm 铣边余量,以避免板件因受热后内应力释放不均匀而造成的变形。

(2)铣边。U肋边缘采用配备新型直线导轨与高效加工刀具的铣削系统,优化后的铣削工艺实现了加工精度与效率的同步提升,加工效率提高了 30% ,且加工后板边直线度、尺寸精度稳定,边缘直

线度在 2 mm 以内,宽度偏差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内。

(3)钻孔。采用“先孔法”,利用机械样板钻制U肋两端的高强度螺栓连接孔,控制极边孔距偏差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。

(4)坡口加工。采用数控铣削方式加工U肋坡口,依靠钢板加持机构,使控制钢板在加工过程中产生震动,避免了坡口微观裂纹的产生,确保坡口钝边尺寸偏差 $\leq 0.5\text{ mm}$,坡口角度偏差 $\leq 0.5^\circ$,坡口表面粗糙度 $\geq \text{Ra}12.5$ 。坡口加工完成后,进入U肋与桥面板焊接环节:首先通过U肋激光清洗设备与面板自动除尘打磨机,对U肋坡口及桥面板焊接区域进行预处理,去除油污、氧化皮等杂质,保障焊接质量;随后采用自动组装、定位焊一体式机床搭配液压夹紧机构实现U肋的精确定位及焊接,组装后U肋间距偏差在 1 mm 以内,组装间隙偏差在 0.5 mm 以内;焊接完成后,通过无损检测设备(如超声波探伤仪)对焊缝质量进行检测,确保无内部缺陷,最终形成完整的焊接工艺闭环,保障U肋与桥面板连接的结构强度与稳定性。

(5)折弯。采用 1000×2 大型双机联动数控折弯机对U肋板进行折弯。单边下压量分2次完成(每次 $\leq 1.5\text{ mm}$),角度控制做到圆角外边缘无裂纹,纵向旁弯 $\leq 2\text{ mm}$,横向旁弯 $\leq 3\text{ mm}$,温度控制做到冷弯成型,避免高温($> 60^\circ\text{C}$),确保外形尺寸。反弹量、补偿量等高精度控制系统的增加,提高了折弯精度,保证了U肋外形尺寸。

2.3 正交异性不锈钢复合钢桥面板单元自动化组装、焊接技术

2.3.1 自动化组装设备

为减少人为误差和劳动强度,济阳大桥工程采用自动化组装与焊接技术。采用自动组装、定位焊一体式机床,该机床可实现自动定位,同时配备液压夹紧机构,能够对U肋精确定位,组装完成后,U肋间距偏差在1 mm以内,组装间隙偏差在0.5 mm以内。此外,该机床还配备了焊缝区域自动打磨、除尘系统,改善了施工环境。

为避免火修时造成不锈钢复合钢板的不锈钢层与基层分层,在反变形胎架上预置反变形,结合U肋板单元反变形船位焊接机器人进行焊接,因采用机器人焊接,焊接工艺规程中的焊接参数更容易实现,能够有效保证焊缝熔深及焊缝外观。焊接过程中结合反变形胎架和机器人焊接技术,有效控制了焊接变形,确保了焊缝熔深和外观质量,减少了组装误差。

2.3.2 焊接工艺优化

济阳公铁两用特大桥采用的是316L+Q370qE不锈钢复合钢板,受钢板轧制及道路运输限制,现场不可避免出现不锈钢板对接焊缝。不锈钢复合钢板在焊接时涉及到异种钢材的焊接,基层焊接时,可能因不锈钢的熔化而造成铬、镍等元素的掺入,从而产生焊接裂纹;不锈钢层焊接时,由于基层焊接时不锈钢层中铬、镍元素含量降低,同时不锈钢层焊缝中碳含量增加,会导致焊接接头的塑性和韧性降低,并会降低不锈钢层焊缝的耐腐蚀性能,导致焊缝性能下降^[14-15]。为了解决相关问题,需要在基层与不锈钢层之间增加过渡层,来补充不锈钢层中损失的铬、镍等元素,还需要调整焊接材料、焊接方法等焊接工艺,确保焊缝焊接性能。

为解决上述问题,济阳大桥通过焊接工艺评定实验,确定采取单面焊双面成型的焊接工艺,并确定了分步焊接顺序:先焊接基层,基层焊接材料采用HTW-58($\phi 1.2$)实心焊丝进行焊缝的打底及填充作业;再焊接过渡层,采用TS309L-FC11($\phi 1.2$)不锈钢药芯焊丝进行焊缝过渡层的焊接,来补充铬、镍等合金元素;最后焊接不锈钢层,该面层采用与不锈钢相匹配的TS316L-FC11($\phi 1.2$)不锈钢药芯焊丝。焊接全程在反变形胎架上预置反变形,用U肋板单元反变形船位焊接机器人焊接,保证焊缝质量。

3 质量控制与检测

3.1 原材料检验

钢材、焊材、油漆等原材料,须按工艺规定采购并进场抽样复验,复验合格后附相关材料报监理批准方可使用。

3.2 加工精度控制

考虑到不锈钢原材的特殊性,工程采用空气等离子数控切割机进行下料,按设计要求进行精确切割。

组装时采用自动化组装与焊接技术,自动组装、定位焊一体式机床可以做到自动定位,同时配备液压夹紧机构,能够做到U肋精确定位,组装后U肋间距偏差在1 mm以内,组装间隙偏差在0.5 mm以内。

全程监控下料、U肋加工和组装等工序的精度,及时调整偏差。

3.3 焊接精度控制

不锈钢复合钢板的焊接需兼顾基层(碳钢/低合金钢)强度、复层(不锈钢)耐腐蚀性及过渡层冶金结合质量,其质量控制需从材料选择、工艺设计到过程监控全流程把控。

(1)材料选择。基层材料选用Q235B、Q345R等低合金钢,需满足抗拉强度 ≥ 490 MPa、屈服强度 ≥ 235 MPa,基层焊接选用E5015(J507)焊条,匹配碳钢强度,熔敷金属抗拉强度 ≥ 500 MPa;复层材料采用304、316L等奥氏体不锈钢,耐盐雾腐蚀性能较碳钢提升5~10倍,复层焊接使用E347-16(A132)焊条,添加Nb稳定化元素,防止晶间腐蚀;过渡层通过爆炸复合或真空轧制实现冶金结合,界面结合强度 ≥ 400 MPa,复层厚度公差 ± 0.3 mm,过渡层焊接采用E309 MoL(A302)焊条,含Cr23%、Ni13%,补偿基层对复层的稀释,避免马氏体组织生成。

(2)坡口控制。基层侧采用V形坡口(角度 $60^\circ \sim 70^\circ$),钝边2~3 mm,根部间隙0~1 mm,以减少过渡层熔深;复层侧设计I形坡口或弧形缺口,避免复层被过度切削,坡口表面粗糙度 $Ra \leq 6.3 \mu m$ 。需注意,等离子切割复层侧时,需清除氧化层(厚度 ≤ 0.1 mm),避免污染不锈钢层;坡口角度偏差应 $\leq \pm 1^\circ$,钝边公差 ± 0.5 mm,确保焊缝熔合良好。

(3)严格控制焊接参数。基层焊接参数范围:焊条电弧焊电流180~220 A,电压24~28 V,层间温度 $\leq 150^\circ C$,单层熔深 ≤ 2 mm;埋弧焊电流600~800 A,电压32~36 V,速度400~600 mm/min,减少飞溅对复层

的污染。过渡层焊接参数范围:小电流快速焊电流90~120 A,电压26~30 V,焊速300~400 mm/min,熔合比 $\leq 30\%$;短弧操作电弧长度 ≤ 3 mm,避免合金元素烧损,焊缝余高 ≤ 1.5 mm。复层焊接参数范围:氩弧焊打底电流80~100 A,氩气流量10~15 L/min,层间温度 ≤ 100 °C,强制冷却防止 σ 相析出;多道焊时每道宽度 $\leq$ 焊条直径的4倍,层间清理彻底,避免未熔合缺陷。

(4)焊接顺序。焊接时应遵循先基层后复层,然后过渡层填充的顺序,基层焊缝需完全覆盖复层,避免复层熔入基层焊缝形成脆性组织,在基层焊缝两侧对称施焊,补偿热膨胀差异,减少残余应力。做好防飞溅措施,复层坡口两侧100 mm范围内涂覆耐高温涂料,防止碳钢飞溅腐蚀不锈钢,使用铜制夹具固定,避免碳钢与复层直接接触,防止电偶腐蚀。

(5)前后热处理。焊接前应先将碳钢基层预热至150~200 °C(厚度 > 20 mm时),降低冷裂纹风险,基层焊接时过渡层区域同步加热,避免温差过大导致层间剥离。焊后若需消除应力,温度需控制在550~600 °C(不锈钢敏化区为400~850 °C),保温时间 ≤ 2 h。复层焊接后采用喷水冷却,缩短高温停留时间,防止晶间腐蚀。

3.4 创新检测技术

(1)采用X射线探伤(RT)检测,灵敏度达AB级,重点检查过渡层与复层界面。复层表面检测采用渗透检测(PT),灵敏度 ≥ 2 级,发现微裂纹需打磨补焊;过渡层采用相控阵超声(PAUT)检测,分辨率达到0.1 mm,可实现对复合界面结合质量的精确评估。

(2)红外热成像检测:用于焊接过程温度场监控,检测灵敏度0.05 °C。

(3)数字图像相关技术(DIC):用于全场变形测量,测量精度0.01像素。

4 应用效果与工程实例分析

4.1 济阳公铁两用特大桥桥面板应用效果

4.1.1 工程质量

针对不锈钢层焊接质量,专门开展晶间腐蚀试验^[16],结果显示,不锈钢焊缝及热影响区均未出现晶间腐蚀裂纹,腐蚀速率 ≤ 0.02 mm/年,符合不锈钢耐蚀性设计标准,进一步验证了不锈钢层焊接的耐蚀可靠性,长期服役期间的抗腐蚀能力满足要求。

4.1.2 耐久性表现

桥梁正式投入运行后进行持续监测。经过24个

月运营监测:表面腐蚀速率 < 0.002 mm/年,远低于传统钢桥面板;焊缝区域未发现应力腐蚀裂纹;预计使用寿命可延长至50年以上。

监测表明,桥面板未出现明显锈蚀现象,耐蚀性良好,可以有效减少后续的维护成本。

5 结论与展望

5.1 研究成果总结

济阳公铁两用特大桥的成功实践表明,不锈钢复合钢桥面板制造技术在提高生产效率、保证工程质量方面具有显著优势。通过下料、U肋加工、组装、焊接多环节的工艺创新,形成了全流程数控化、自动化的制造技术体系,为类似工程提供了可借鉴的经验。本研究形成正交异性不锈钢复合钢桥面板制造技术体系,提高生产效率和质量,在实际工程中效果良好。

5.2 未来研究方向展望

不锈钢复合钢桥面板加工制造技术是铁路桥梁领域的一项重要创新。通过优化下料、U肋加工、自动化组装与焊接工艺,显著提升了桥面板的制造效率和耐久性。未来,随着材料科学和制造技术的进一步发展,不锈钢复合钢桥面板的应用范围将进一步扩大,为铁路桥梁的长期安全运营提供有力保障。未来可研究超薄复层材料的制造技术、高强韧性复合钢材的开发、智能焊接质量诊断系统等技术,推动铁路桥梁建设发展。

参考文献:

- [1] 李凤芹,马胜双,王俊杰.客运专线斜交刚构连续梁桥研究[J].铁道标准设计,2007(2):29-32.
- [2] 苏伟,王俊杰.秦沈客运专线刚构连续梁桥设计[J].铁道标准设计,2001(11):12-14.
- [3] 马胜双.铁路客运专线斜交刚构连续梁桥设计研究[J].铁道标准设计,2005(11):12-16.
- [4] 杨严华.刚架桥的构造特点及类型[J].黑龙江交通科技,2012,35(3):83.
- [5] 许颖.钢桥面铺装使用情况调查及病害分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [6] 谢伟伟.钢桥面铺装病害分析及修复材料研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [7] Ole Øystein Knudsen, Unni Steinsmo, Marit Bjordal. Zinc-rich primers—Test performance and electrochemical properties[J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 54(3): 224-229.
- [8] Gergely, András, Bertóti, et al. Corrosion protection with zinc-rich epoxy paint coatings embedded with various amounts of highly dispersed polypyrrole-deposited alumina monohydrate particles[J]. Progress in Organic Coatings, 2013, 76(1): 17-32.

(下转第368页)