

电解锌工业阴极铝板保护涂料的制备及性能研究

任江涛, 李清材, 颜维虎, 易智宏

(中昊北方涂料工业研究设计院有限公司, 兰州 730101)

摘要: 为解决湿法炼锌铝阴极板在电解沉积中的界面腐蚀及人工或自动化剥锌过程中的阴极铝材划破、划伤问题, 本文以酚醛乙烯基树脂/鳞片石墨/玻璃鳞片为复合体系, 通过云母粉和疏水性气相二氧化硅进行补强, 添加硅烷偶联剂提升附着力, 结合消泡剂、流平剂、分散剂及过氧化物固化, 制备了一种兼具高附着力、高硬度和高耐腐蚀性的阴极铝板保护涂料。同时, 探讨了酚醛乙烯基树脂、促进剂及固化剂的配比用量以及鳞片石墨和玻璃鳞片用量对涂层干燥性能、抗渗透性能和长效防腐性能的影响。研究表明: 涂层在阴极铝板上的附着力达 14.8 MPa, 铅笔硬度 4H, 在 38~42 °C 的强酸电解液中浸泡 90 d, 涂层无脱落、起皮、开裂, 具有优异的抗划伤性能, 可延长阴极铝板使用寿命 3 倍以上。

关键词: 电解锌; 阴极铝板; 腐蚀机理; 防腐涂层

中图分类号: TQ637

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2025)11-0005-05

Preparation and Performance Research of Protective Coatings for Cathode Aluminum Plates in Electrolytic Zinc Industry

REN Jiang-tao, LI Qing-cai, YAN Wei-hu, YI Zhi-hong

(North Paint & Coatings Industry and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

Abstract: To address the interfacial corrosion of aluminum cathode plates in zinc electro-winning and the scratching/damage issues during manual or automated zinc stripping, this study developed a protective coating for aluminum cathode plates. The coating system comprises phenolic vinyl resin/flake graphite/glass flakes reinforced with mica powder and hydrophobic fumed silica. A silane coupling agent was added to enhance adhesion, while defoamers, leveling agents, dispersants, and peroxide curing agents were incorporated. The formulation delivers high adhesion, hardness, and corrosion resistance. The effects of phenolic vinyl resin, accelerator, and curing agent ratios, as well as flake graphite and glass flakes content, on coating drying performance, anti-permeability, and long-term corrosion resistance were investigated. Results demonstrate that the coating achieves an adhesion strength of 14.8 MPa and a pencil hardness of 4H on aluminum cathode plates. After 90 days of immersion in strong acidic electrolyte (38~42 °C), the coating exhibited no delamination, blistering, or cracking. With exceptional scratch resistance, it extends the service life of aluminum cathode plates by more than threefold.

Key words: zinc electrolysis; aluminum cathode plate; corrosion mechanism; anti-corrosion coating

0 引言

湿法炼锌是利用电解质溶液中的电流进行电化

反应,使锌离子还原成锌金属的过程^[1]。电解过程中,阴极(还原反应):锌离子(Zn^{2+})从电解质溶液中获得电子,被还原为金属锌并沉积在阴极表面,反应式为: $Zn^{2+}+2e^{-}\rightarrow Zn\downarrow$;阳极(氧化反应):若使用可溶性阳极(如粗锌板),则阳极的锌原子失去电子,被氧化为锌离子进入溶液,反应式为: $Zn\rightarrow Zn^{2+}+2e^{-}$,电子通过外电路从阳极流回电源正极,形成电流回路^[2]。

收稿日期: 2025-06-09

作者简介: 任江涛(1995—),男,本科,工程师,主要从事航空航天涂料及特种防腐涂料领域研发工作。E-mail: 1522654289@qq.com。

在电沉积锌生产操作时,铝阴极板在电解沉积环节面临严重气液界面腐蚀问题。暴露在空气中的铝板部位因接触氧气、酸雾等介质,形成电化学腐蚀环境,导致表面局部腐蚀、锌剥离困难及极板损耗加速。我国年产锌 700 万 t 时,需更换 140 万~210 万块极板,显著增加生产成本^[3-4]。

铝阴极板由极板、导电梁(纯铝浇铸)、导电头(铝/铜板材)、提环和聚丙烯绝缘条组成。极板表面的平整光滑度是保证锌沉积均匀、避免粗糙的关键。导电梁和导电头分别承担主电流传导和外部连接功能。极板边缘的聚丙烯绝缘条设计用于双重防护:一是防止阴阳极间短路,二是避免锌在阴极边缘沉积包裹,从而有效解决由此引发的剥锌操作困难问题^[5]。

1 电解液的强腐蚀环境研究

1.1 强酸性化学腐蚀环境

电解锌的电解液以硫酸锌-硫酸体系为核心,其中游离硫酸的存在是引发腐蚀的基础。工业生产中,电解液中游离硫酸浓度通常维持在 100~200 g/L(pH 为 0.5~1.5),呈强酸性。其腐蚀机制为:铝表面虽天然形成一层致密的氧化膜(Al_2O_3),但在强酸性条件下,氧化膜会被硫酸溶解(反应式: $\text{Al}_2\text{O}_3+3\text{H}_2\text{SO}_4=\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+3\text{H}_2\text{O}$),导致新鲜铝基体暴露。裸露的铝会与硫酸直接发生化学腐蚀: $2\text{Al}+3\text{H}_2\text{SO}_4=\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+3\text{H}_2\uparrow$,生成可溶性铝盐并释放氢气,随电解液循环持续消耗铝板^[6-7]。

1.2 复杂的电化学腐蚀环境

作为电解阴极,铝板在电流作用下处于电化学不均一状态,加剧局部腐蚀。

电流密度的影响:电解过程中阴极电流密度通常为 300~600 A/m²,高电流密度易引发“浓差极化”,由于溶液传质速率的限制,阳极区产生的 H⁺无法及时疏散,导致该局部区域 H⁺浓度骤升(pH 可进一步降低至 0.3 以下),从而形成强酸性的“酸性微区”,加速铝板的电化学溶解。同时,阴极表面析出的金属锌层若存在缺陷(如针孔、裂纹),会使铝板与锌形成“铝-锌微电池”,铝作为阳极持续溶解($\text{Al}-3\text{e}^-=\text{Al}^{3+}$),导致局部坑蚀或沟槽腐蚀。

1.3 杂质离子的协同腐蚀作用

电解液中不可避免的杂质离子会显著增强腐蚀活性,主要包括:氯离子(Cl⁻),来源为原料锌精矿中的含氯杂质或工艺用水,浓度通常控制在 50~200 mg/L(超限时腐蚀剧增)。Cl⁻半径小、穿透性强,可优先吸附在铝氧化膜的缺陷处,取代膜中的氧离子形成可溶性 AlCl₃,破坏氧化膜的完整性,引发点蚀(点蚀坑深度可达 0.5~2 mm/周期);其他重金属离子(Fe³⁺、Cu²⁺、Pb²⁺

等),如 Fe³⁺会在阴极表面还原为 Fe²⁺,随电解液循环至阳极区又被氧化为 Fe³⁺,形成“Fe³⁺-Fe²⁺循环”,持续消耗铝板($\text{Fe}^{3+}+\text{Al}=\text{Fe}^{2+}+\text{Al}^{3+}$);Cu²⁺、Pb²⁺易在阴极析出并附着于铝板表面,形成“铝-铜/铅电偶对”(铜、铅为阴极,铝为阳极),加速铝的电化学腐蚀,导致局部区域出现“腐蚀斑”。

1.4 物理因素的叠加作用

温度影响:电解液需维持在 35~50 ℃(保证流动性和离子导电性),温度升高会使硫酸的化学活性增强(腐蚀速率随温度每升高 10 ℃提升 1.5~2 倍),同时加速离子迁移,促进电化学腐蚀。

冲刷腐蚀:电解液通过泵循环(流速 0.5~1.5 m/s),在铝板表面形成持续冲刷。高速流动的液体会剥离表面的腐蚀产物(如 Al₂(SO₄)₃ 结晶),暴露新鲜铝基体,形成“冲刷-腐蚀”协同效应,尤其在铝板边缘、拐角处更为严重。

1.5 工艺周期的累积腐蚀效应

电解槽通常每 24~48 h 完成一次锌层剥离(剥锌),长期运行中,剥锌过程中机械力可能划伤铝板表面,破坏氧化膜,为下次电解的腐蚀提供起点;电解液中杂质(如 Cl⁻、Fe³⁺)随周期累积,浓度逐渐升高(如 Cl⁻超过 300 mg/L 时),腐蚀作用呈指数级增强;铝板表面残留的锌渣、油污等会导致局部电流分布不均,形成“高电流区”,引发严重的局部腐蚀(如穿孔)。

目前,行业内主要通过两种途径应对:1)优化电解液性能或增强铝板耐腐蚀性;2)有机涂层防护技术,在液面线位置涂覆保护层已成为欧美国家铝阴极板的标准生产工艺^[8]。该措施有效延长了阴极板使用寿命,成为解决腐蚀难题的关键方向。本文针对电解锌阴极铝板的防腐蚀问题,研制了一种兼具高附着力、高硬度和高耐腐蚀性的阴极铝板保护涂料。

2 试验部分

2.1 主要原料与仪器

主要原料:酚醛环氧乙烯基树脂(CH-720,固德树脂),促进剂(NS-2[#]),过氧化物固化剂(CH-730,固德树脂),鳞片石墨(青岛华泰),玻璃鳞片(400目,河北焯焯),云母粉(GA-2,安徽格锐),沉淀硫酸钡(TL-451,滁州格锐),氧化铬绿(GN,安吉瑞化工),疏水型气相二氧化硅(AEROSIL R202,赢创),消泡剂(BYK-066N,毕克),流平剂(BYK-306,毕克),分散剂(BYK-163,毕克),硅烷偶联剂(KH-560,康迪斯),苯乙烯(济南世纪通达)。

主要仪器设备:SFJ-500 多用机(天辰现代),HD-E804-45 烘箱(海达仪器),PR224ZH 电子天平(奥豪斯),SZZY-550S 附着力测试仪(耀壮检测),ZL-3086

铅笔硬度计(正蓝精密),CHI660F 电化学工作站(辰华仪器),Sigma 300 扫描电镜(ZEISS)。

2.2 涂料的制备

在配料罐中,按表 1 配方量先加入酚醛环氧树脂基树脂,开动搅拌至转速 500~1 000 r/min,随后依次加入鳞片填料(鳞片石墨、云母粉、硅微粉)、颜料(氧化铬绿)、纳米填料(疏水性气相二氧化硅)、助剂(消泡剂、流平剂、分散剂)、偶联剂(硅烷偶联剂)以及固化调节剂(抑制剂、促进剂);1 500~2 000 r/min 高速分散 30 min,上磨研磨至细度 50 μm 以下;将配料罐取下,在 300~600 r/min 下加入 400 目玻璃鳞片,1 500~2 000 r/min 高速分散 15 min 至玻璃鳞片分散均匀后过滤出料,即得到电解锌工业阴极铝板保护涂料 A 组分;B 组分为过氧化物固化剂;稀释剂为苯乙烯。

表 1 电解锌工业阴极铝板保护涂料配方

组分	原料名称	规格型号	质量分数/%
A 组分	酚醛环氧树脂基树脂	CH-720	55~75
	鳞片石墨	200 目	2~6
	云母粉	GA-2	3~5
	沉淀硫酸钡	TL-451	1~3
	氧化铬绿	GN	5~10
	疏水性气相二氧化硅	AEROSIL 202	0.5~1.5
	玻璃鳞片	400 目	15~25
	消泡剂	BYK-066N	0.5~0.8
	流平剂	BYK-306	0.3~0.6
	分散剂	BYK-163	0.5~1
	硅烷偶联剂	KH-560	0.5~1.5
	促进剂	NS-2 [#]	1.5~3.5
B 组分	过氧化物固化剂	CH-730	2~5
稀释剂	苯乙烯	工业净水	3~5

2.3 涂层的制备

在 80~100 $^{\circ}\text{C}$ 的三乙醇胺与 NaOH 混合碱液中,将铝板碱洗 5~10 s,清除铝板表面的油污和腐蚀产物后,用去离子水冲洗 3~5 min;随后在常温的 30% HNO_3 酸液中,将铝板浸泡或刷洗 20~30 s,清除铝板表面的氧化层后,用去离子水冲洗 3~5 min,最后将铝板表面的水分及残留的少部分酸擦拭干净,放入 45~65 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘箱中烘干备用⁵。

将电解锌工业阴极铝板保护涂料(A 组分)与过氧化物固化剂(B 组分),按照质量比 100:(2~5)进行配制,加入苯乙烯调整涂料黏度,采用刷涂的方式均匀地涂装在铝板表面,漆膜厚度为 1.5~2 mm;将涂装完成的样板,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下放置 7 d,充分干燥后进行性能测试。

2.4 测试与表征

干燥时间按 GB/T 1728—2020 中乙法测表干、甲法测实干;拉开法附着力按 GB/T 5210—2019,测试样板在 38~42 $^{\circ}\text{C}$ 电解液浸泡前后的附着力变化;硬度按 GB/T 6739—2006,测试样板在 38~42 $^{\circ}\text{C}$ 电解液浸泡前后的漆膜硬度变化;抗氯离子渗透性按 TS 153—2015 附录 F.2 进行;耐磨性按 GB/T 1768—2006 中 1 000 g/1 000 r,CS-17 进行;耐盐雾性按 GB/T 1771—2007,测试后冲洗晾干,按 ISO 4628-1~5:2003 评定老化;电化学性能:使用 CHI660F 工作站,三电极体系(涂层/铝板为工作电极,铂为辅助电极,饱和甘汞为参比电极),强酸性电解液(含特定离子,38~42 $^{\circ}\text{C}$, pH \approx 2)作为电解质⁶。

3 结果与讨论

3.1 涂层性能优化

通过调整酚醛乙烯基树脂(CH-720)、促进剂(NS-2[#])与过氧化物固化剂(CH-730)的比例,研究其对涂层固化速度、附着力及硬度的影响,见表 2。

表 2 树脂/固化体系对比对涂层性能的影响

CH-720 /%	NS-2 [#] /%	CH-730 /%	表干时间 /min	实干时间 /h	附着力 /MPa	铅笔硬度 /H
55	2.5	3.0	35	7.5	11.2	3
65	2.5	3.0	45	8.0	14.8	4
75	2.5	3.0	60	10.0	13.5	4
65	1.5	3.0	>90	>12	13.0	3
65	3.5	3.0	25	7.0	12.8	4

由表 2 可以看出,树脂含量过低(<60%),交联密度不足,导致硬度下降(\leq 3H)且附着力降低(<12 MPa);树脂含量过高(>70%),固化收缩率增大,涂层内应力积累,易引发微裂纹;促进剂/固化剂比例失衡,NS-2[#] 过量时表干过快(<30 min),流平性差;CH-730 过量则实干时间延长(>24 h),影响施工效率。当树脂为 65%、NS-2[#] 为 2.5%、CH-730 为 3.0%时,表干时间 45 min,实干时间 8 h,附着力 14.8 MPa,铅笔硬度 4H,涂料性能达到最优。

3.2 鳞片填料对屏蔽性能的影响

鳞片石墨与玻璃鳞片的复配构建了多层平行堆叠屏障。当鳞片石墨占比为 0、玻璃鳞片占比为 10%时,电解液严重腐蚀漆膜直至铝基体,漆膜大量起泡,出现严重的点蚀现象;当石墨占比为 2%、玻璃鳞片占比为 15%时,电解液易渗透至铝基体,导致漆膜边缘起泡;当石墨占比为 6%、玻璃鳞片占比为 25%时,两者用量过多,使得层间间隙增大,离子扩散通道增多,导致漆膜出现局部微裂纹,见表 3。

表3 鳞片填料比例对耐蚀性的影响

鳞片石墨 /%	玻璃鳞片 /%	氯离子渗透率 / ($\times 10^{-14} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	电解液浸泡 90 d 后外观
0	10	13.8	漆膜大量起泡,发生点蚀现象
2	15	8.7	边缘起泡
4	20	1.2	完好
6	25	1.5	局部微裂纹

不同鳞片填料比例对耐蚀性的影响形貌见图1,其中:a为0鳞片石墨+10%玻璃鳞片,b为2%鳞片石墨+15%玻璃鳞片,c为4%鳞片石墨+20%玻璃鳞片,d为6%鳞片石墨+25%玻璃鳞片。

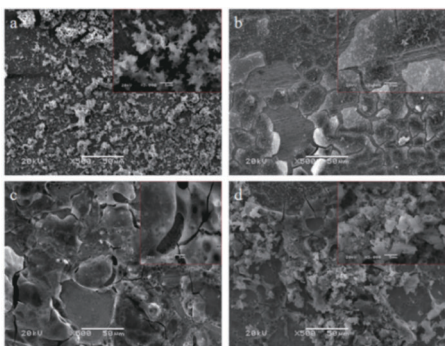


图1 不同鳞片填料比例对耐蚀性的影响形貌

由图1可以看出,当鳞片石墨占比4%、玻璃鳞片占比20%时,漆膜在阴极铝板上的状态最好,漆膜完整,无缺陷出现。相比较图a、b、c来看,d涂层漆膜裂缝较前面少,这是由于适量的鳞片石墨与玻璃鳞片在复合体系中产生了显著的协同效应,使得不同尺寸和性质的鳞片填料相互交织,形成更致密曲折的“迷宫”屏障,大幅提升防腐抗渗性;同时,鳞片石墨赋予绝缘的玻璃鳞片体系关键的导电/防静电能力;两者在力学性能上互补(玻璃鳞片增强刚性耐磨,石墨改善韧性抗裂),并可优化热性能。

3.3 耐腐蚀性能与机理分析

强酸电解液浸泡测试涂层在模拟电解液(硫酸 195 g/L, 锌 55~60 g/L, 铜 0.2 mg/L, 镉 0.2 mg/L, 钴 0.2 mg/L, 锆 0.022 mg/L, 砷 0.01 mg/L, 铋 0.01 mg/L, 氟 15 mg/L, 氯 1 000 mg/L)中浸泡 90 d 后,宏观表现为:漆膜无脱落、起皮、开裂(ISO 4628 评级为 0 级);附着力由 14.8 MPa 降到 14.5 MPa,仅下降 2%;铅笔硬度由 4H 降到 3H,仍满足剥锌机械强度需求。这是由于酚醛乙烯基树脂本身的芳香环结构抵抗 H^+ 侵蚀,玻璃鳞片/石墨层阻断 H_2SO_4 扩散路径,KH-560 偶联剂提升树脂-铝基体结合力($\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 键形成),R202 二氧化硅减少电解液润湿。

3.4 电化学行为验证

不同鳞片石墨和玻璃鳞片含量制备的电解锌阴极铝板保护涂层的动电位极化曲线和电化学阻抗分析见图3。

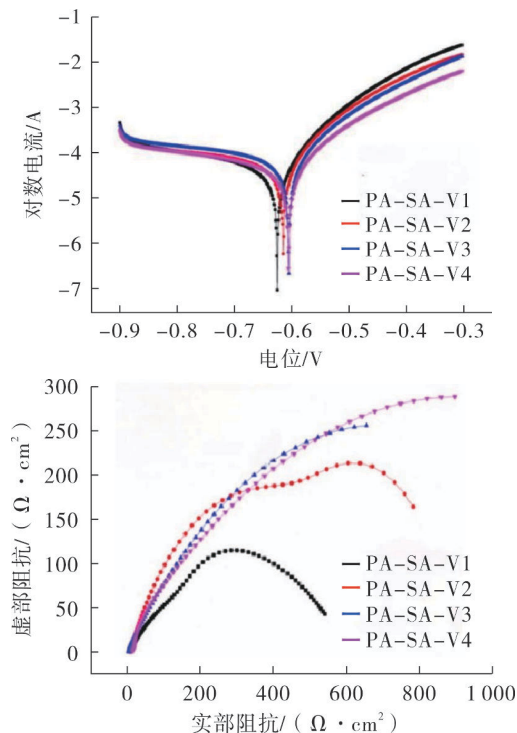


图2 不同鳞片石墨和玻璃鳞片用量复合涂层的动电位极化曲线及电化学阻抗分析

通过电解锌阴极铝板保护层曲线分析可见:当鳞片石墨与玻璃鳞片含量从 PA-SA-V1(0%、10%)增至 PA-SA-V2(2%、15%)时,复合涂层的腐蚀电流降低、腐蚀电位升高、阻抗值增大,表明两者含量在该区间内提升可增强涂层抗腐蚀能力;而当含量进一步从 PA-SA-V4(4%、20%)增至 PA-SA-V3(6%、25%)时,腐蚀电流上升、腐蚀电位下降、阻抗值减小,说明过量添加鳞片石墨与玻璃鳞片会导致涂层抗腐蚀性能减弱。整体呈现“适量增强、过量削弱”的双向作用规律。因此,最优加量为 4% 鳞片石墨与 20% 玻璃鳞片,此时电流降低、腐蚀电位升高、阻抗值增大,涂层具有更优异的防腐蚀性能。

3.5 涂料综合性能分析

涂料的综合性能见表4。

酚醛环氧乙烯基树脂提供高交联密度和耐化学性;玻璃鳞片与鳞片石墨通过物理阻隔和导电性调控抑制局部腐蚀;硅烷偶联剂与分散剂优化填料分散性并增强界面结合;消泡剂与流平剂确保涂层施工后的表面平整度,减少缺陷。上述组分的合理配比使涂层兼

表 4 电解锌工业阴极铝板保护涂料的综合性能

检验项目	技术指标	检验结果	检验方法
在容器中状态	搅拌混合后,无硬块,呈均匀状态	搅拌混合后,无硬块,涂料状态均匀	目测
不挥发物含量/%	≥75	79.6	GB/T1725—2007
漆膜外观	正常		目测
表干时间/h	≤4	1.5	GB/T 1728—2020
实干时间/h	≤24	18	GB/T 1728—2020
拉开法附着力/MPa	≥8	14.6	GB/T 5210—2006
铅笔硬度/H	≥3	4	GB/T 6739—2006
耐磨性(1 000 g /1 000 r,CS-17)/mg	≤250	113.4	GB/T 1768—2006
耐酸性(25% H_2SO_4 ,168 h)	无异常	无异常	GB/T 9274—1988 甲法
耐碱性(25% $NaOH$,168 h)	无异常	无异常	GB/T 9274—1988 甲法
耐盐雾性(1 000 h)	不起泡、生锈、脱落,附着力≥5 MPa	无起泡、生锈、脱落,附着力 14.8 MPa	GB /T 1771—2007

具高附着力、高硬度和长效耐腐蚀性,为电解锌工业阴极板的防护提供了创新解决方案。

4 结语

1)本研究通过优化酚醛环氧乙烯基树脂复合涂料配方,结合玻璃鳞片、鳞片石墨及硅烷偶联剂等关键组分的协同作用,成功制备了一种适用于电解锌工业阴极铝板的高性能防护涂层。

2)涂层在铝板表面的附着力达 14.8 MPa,铅笔硬度为 4H,显著优于传统防护材料,可有效抵御剥锌过程中的机械损伤。

3)在含高浓度硫酸、氯离子(1 000 mg/L)的强酸电解液中浸泡 90 d 后,涂层无脱落、起皮或开裂,证明其具有优异的化学稳定性与电化学保护能力。

4)微观结构分析表明,玻璃鳞片与石墨形成的“迷宫效应”、云母粉的层状补强作用以及硅烷偶联剂的界面增强效应,共同构建了涂层致密且持久的物理/化学屏障。

本研究为电解锌工业中铝阴极板的腐蚀防护提供了创新解决方案,其配方设计与性能优化思路亦可拓展至其他苛刻工况下的金属防护领域。未来将进一步

探索涂层的超长期服役稳定性,以推动其工业化应用。

参考文献:

- [1] 耿君伟,彭浩平.石墨烯-玻璃鳞片环氧复合涂料的制备与防腐性能研究[J].材料保护,2020(10):1-4.
- [2] 徐科,王秀娟,方健君,等.高性能酚醛环氧玻璃鳞片涂料的制备及性能研究[J].涂料工业,2022(3):38-43.
- [3] 刘树博,田青亮,樊红丽,等.酚醛环氧乙烯基树脂复合涂料的制备及性能研究[J].广东化工,2020(9):81-82.
- [4] 贾梦秋,毛永吉,高双之,等.交流阻抗法评价玻璃鳞片乙烯基酯树脂涂料的耐蚀性[J].腐蚀科学与防护技术,2007(2):106-109.
- [5] 周华,张明哲.新型乙烯基酯树脂玻璃鳞片涂料对电解铝板的防护[J].中国涂料,2013(8):41-44.
- [6] 赵光瑞.海洋平台腐蚀控制措施应用进展[J].现代涂料与涂装,2023(4):31-34.
- [7] 吴津成,张剑飞,王进忠,等.一种新型乙烯基酯防腐涂料的研究[J].现代涂料与涂装,2022(3):1-3.
- [8] 房昂,杨瑞,杨亮,等.石墨烯冷涂锌防腐涂料的制备及性能[J].科技导报,2022(5):44-51.

(上接第 4 页)

- [6] 精对苯二甲酸氧化反应尾气非贵金属催化剂催化燃烧中试研究[D].南京:南京工业大学,2015.
- [7] 牟维琦.挥发性有机物催化燃烧整体式催化剂研究与中试方案设计[D].北京:北京化工大学,2010.
- [8] CHEN C, YE H, CARGNELLO M, et al.Methane oxidation on Pd@ZrO₂/Si-Al₂O₃ is enhanced by surface reduction of ZrO₂[J].ACS Catalysis,2014,4(11):3902-3909.
- [9] JIANG Z, YU J, CHENG J, et al.Catalytic combustion of methane over mixed oxides derived from Co-Mg/Al ternary hy-

- drotalcites[J].Fuel Processing Technology,2010,91(1):97-102.
- [10] 杨柏龄,杨红梅,王磊,等.对中科院石油化工行业重大科研项目产业化的思考[J].政策与管理研究,2009(1):52-60.
- [11] 田蕊.探索原料药合成工艺设计的安全性能[J].化工管理,2020(18):201-202.
- [12] 孙发群.石化装置有机废气处理[J].石油化工安全环保技术,2010(4):53-56.
- [13] 王芳丽,刘凯,潘微,等.民机结构绿色维修技术应用与发展[J].航空学报,2023(11):24-42.