光伏助焊剂腐蚀性能的现场评估方法研究

王一品，黄朝志，徐文丽，万　振，何光耀，丁运虎
（中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司，湖北 武汉　430030）

[摘　要]针对光伏组件人工返修过程中光伏助焊剂引发电池片“断栅”失效的现场痛点，聚焦实用化、可落地的腐蚀性评价需求，建立了一套“快速检测+现场验证”的光伏助焊剂腐蚀性现场评价方法。通过对市售主流助焊剂的极化曲线、电导率测试发现：未引发断栅的助焊剂自腐蚀电流密度比引发断栅的低 1 个数量级，且低游离卤素、优化有机酸配比的助焊剂更易满足现场使用要求。基于此筛选的新助焊剂 CB-T 可完全避免断栅问题，为产线快速判断助焊剂适用性、规范返修作业提供直接指导。

[关键词]光伏助焊剂；电池片栅线；现场腐蚀评价；自腐蚀电流密度；电导率
[中图分类号] TG174.4　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2025.0039
[文章编号] 2097-5317(2025)06-0045-06

Research on On-Site Evaluation Methods for Corrosion Performance of Photovoltaic Soldering Flux

WANG Yipin，HUANG Chaozhi，XU Wenli，WAN Zhen，HE Guangyao，DING Yunhu
（China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co.，Ltd.，Wuhan 430030，China）

Abstract：Addressing the on-site pain point of "grid breakage" failure in solar cells caused by photovoltaic flux during the manual rework of photovoltaic modules，this paper focuses on the practical and implementable corrosion evaluation requirements，and establishes an on-site corrosion evaluation method for photovoltaic flux featuring "rapid testing + on-site verification". Through polarization curve and conductivity tests on mainstream commercial fluxes，it was found that the self-corrosion current density of fluxes that did not cause grid breakage was an order of magnitude lower than that of fluxes that do. Furthermore，fluxes with low free halogens and optimized organic acid ratios were more likely to meet on-site application requirements. The new flux CB-T selected based on this could completely avoid the grid breakage problem，providing direct guidance for production lines to quickly determine the applicability of fluxes and standardize rework operations.

Key words：photovoltaic flux；solar cell grid；on-site corrosion evaluation；self-corrosion current density；electrical conductivity

收稿日期：2025-11-09
Received：2025-11-09

通信作者：黄朝志，工程师，主要从事电镀添加剂的性能研究，邮箱：957666040@qq.com
Corresponding Author：HUANG Chaozhi，Engineer，Research Focus：Electroplating Additive Performance Research，E-mail：957666040@qq.com

0 前 言

随着 PERC、TOPCon、HJT 等高效电池技术迭代，电池片正面栅线向“更细、更密、更高”发展(线宽< 20 μm、主栅数达 12~20 BB)，在降低银耗的同时，也使得人工返修环节的助焊剂腐蚀风险急剧升高[1]。目前产线普遍采用“人工点涂助焊剂+局部补焊”返修漏焊、虚焊问题，但仅靠经验控制“涂抹量”，缺乏科学评价标准，常因助焊剂中游离卤素、有机酸在银/锡界面富集，诱发栅线电化学腐蚀，最终导致“断栅”(图 1)，严重影响组件可靠性。

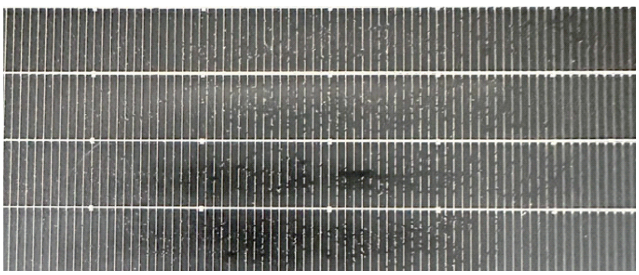


图 1 电池片经人工串返涂抹助焊剂后断栅情况
Fig. 1 The grid breaking of the cell after manual stringback application of flux

现有研究多聚焦腐蚀机理分析，难以直接指导产线操作。为此，本工作摒弃复杂理论推导，围绕现场可操作、结果可快速判定的核心目标，构建“关键参数检测-现场涂抹验证”的两步式评价体系：第一步通过简易电化学测试和电导率检测，快速筛选低腐蚀风险助焊剂；第二步通过模拟产线返修的涂抹试验，验证助焊剂实际使用效果，最终形成一套可直接用于产线的助焊剂腐蚀性评价流程，解决产线“选品难、判断难”的实际问题。

1 试 验

1.1 评价对象与核心目标

选取市售 4 款主流助焊剂(CB、WTO、TF、CR，占市场份额 95% 以上)及自主优化的 CB-T 助焊剂为评价对象。核心目标：提出无需复杂设备、可在产线或实验室快速开展的检测方法，明确助焊剂是否会引发断栅的判定标准，满足产线“快速筛选、即时验证”需求。

CB-T 助焊剂与优化前 CB 助焊剂的核心差异如下：

(1)有机酸体系调整 将 CB 助焊剂中高电离性的丙二酸(占有机酸总量的 60%)替换为低解离度的己二酸，同时优化有机酸总浓度至 12 g/L，降低焊后离子残留风险；

(2)卤素类型及含量优化 剔除 CB 助焊剂中的游离氯(含量 0.15 g/L)，采用非游离型卤素化合物替代，控制总卤含量<0.05 g/L，避免游离离子诱发点蚀；

1.2 关键参数检测方法

1.2.1 电化学快速检测(核心判定参数：自腐蚀电流密度)

电化学试验采用 CS2350M 双恒电位仪，三电极体系：工作电极为 25 μm 镀银铜板，测试前对工作电极用 1 000 号砂纸进行打磨，辅助电极为石墨，参比电极为饱和甘汞电极(SCE)[2]。扫描速率 0.5 mV/s，电位扫描范围-1~+1 V(相对开路电位 OCP)，电解液选择 CB、CR、WTO、TF 助焊剂。

1.2.2 电导率检测

采用 DDS-307A 电导率仪分别测试原液与水萃取液的电导率(25 ℃)。

原液电导率测试：直接取 5 mL 助焊剂原液，倒入干净烧杯，将电极浸入液面下 1 cm，待读数稳定后记录

水萃取电导率测试：(1)取 5 个 100 mL 烧杯、5 个表面皿，使用去离子水充分清洗干净。(2)在每个烧杯中装入 50 mL 去离子水，用电导率仪测量各烧杯中去离子水的电导率。(3)用表面皿覆盖烧杯口，分别在上述 3 个烧杯中加入 0.100±0.005 mL 助焊剂试液，取 2 个烧杯作为空白，用于核对。(4)同时加热 5 个烧杯至沸点，沸腾 1 min，冷却至室温，将冷却后的 5 个带表面皿的烧杯放在温度为 (25±2)℃的恒温槽内，使其达到恒温。(5)用去离子水充分清洗电导率仪的电极，然后浸入装有助焊剂的烧杯中测量电阻率并记录读数再用去离子水清洗电极。(6)然后浸入只装有核对去离子水的烧杯内，测试电导率并记录读数。

1.2.3 涂抹验证试验

取 15 片同批次电池片，分 5 组(每组 3 片，减少偶然因素)，分别涂覆 CB-T、CR、WTO、TF 助焊剂及空白对照(空白组不涂助焊剂，用于对比)。

涂抹方式：用产线常用的点胶笔，按实际返修的涂抹量(约 0.05 mL/cm^2)均匀点涂在栅线区域。

放置条件：室温静置 24 h(无需恒温恒湿箱，直接

模拟车间环境)。

判定标准:24 h 后用肉眼或普通放大镜(10 倍即可)观察,若栅线无断裂、无发灰、无腐蚀坑,则判定为“合格”;若出现任意一种现象,判定为“不合格”。

2 结果与讨论

测试 4 种市售主流助焊剂电化学极化曲线见图 2,图 3 为 CB-T 的极化曲线,拟合结果见表 1。

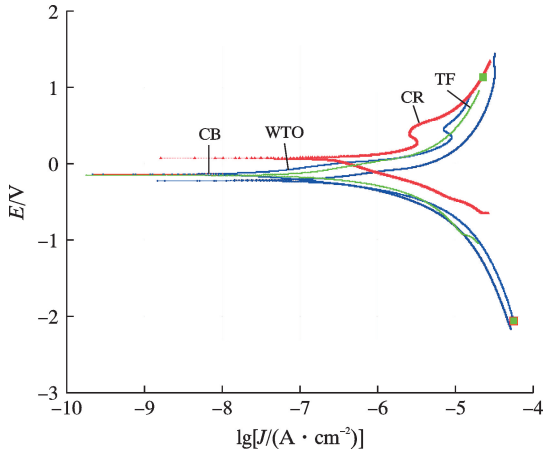


图 2 市售助焊剂 tafel 曲线

Fig. 2 Comparison of commercially available fluxes

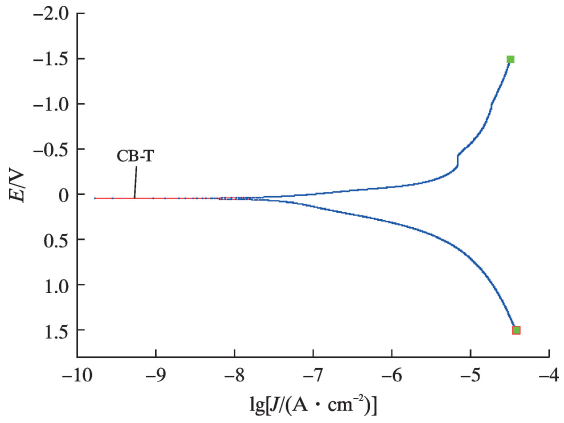


图 3 调整后 CB-T 的 tafel 曲线

Fig. 3 Tafel Curve of CB-T after adjustment

表 1 根据极化曲线拟合的电化学数据

Table 1 Comparison of electrochemical data

助焊剂名称	自腐蚀电位(vs SCE)/mV	自腐蚀电流密度/(A·cm^{-2})
CB	−225.76	2.65×10^{-7}
WTO	−143.27	2.74×10^{-8}
CR	−23.71	4.47×10^{-8}
TF	−103.43	1.78×10^{-8}
CB−T	−38.5	3.26×10^{-8}

根据试验结果,5 种助焊剂的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度存在显著差异,反映出其抗腐蚀性能优劣。CB 助焊剂自腐蚀电位最负[−225.76 mV (vs SCE)],自腐蚀电流密度最大(2.65×10^{-7} A/cm^2),表明其最易发生电化学腐蚀,保护性能最差[3,4]。相较之下,WTO、CR 与 TF 助焊剂及 CB-T 助焊剂的腐蚀电位明显正移,腐蚀电流降低 1 个数量级,显示出优异的抗腐蚀能力。从电化学腐蚀机理看,腐蚀电位越正,材料热力学稳定性越高;腐蚀电流越小,腐蚀动力学速率越低[5]。因此,除 CB 外,其余助焊剂在抑制阳极溶解、阻碍电荷转移方面表现最佳,显著降低了金属基体腐蚀倾向。

测试 CB、TF、WTO、CR 及 CB-T 助焊剂的原液电导率及水萃取电导率,结果见表 2 所示。

表 2 市售助焊剂电导率测试数据 μS/cm

Table 2 Commercially available flux conductivity test data

组别	CB	TF	WTO	CR	CB-T
X_0	65.8	27.6	33.2	39.8	18.3
X_1	38.7	28.6	30.9	30.4	8.6
X_2	36.9	30.0	28.7	31.8	9.2
X_3	39.8	29.6	28.4	32.1	8.9
X_4	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2
X_5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3

注:X_0代表原液电导率,X_1~X_3为水萃取电导率(X_1~X_3 即为前述 5 组实验中 3 个实验组的数据,对 0.100 mL 的助焊剂进行 3 次平行测量是为了保证数据没有出现较大的波动,降低测量误差。X_4,X_5 就是空白对照组,测出来的数据为纯水的电导率数据,测试温度 25 ℃)。

试验数据显示,5 种助焊剂原液电导率差异显著,CB 最高(65.8 μS/cm),CB−T 最低(18.3 μS/cm)。助焊剂原液电导率差异的核心原因在于:① 可溶性离子含量,CB 助焊剂中游离卤素(0.15 g/L)和高电离有机酸(丙二酸)的存在导致离子浓度显著高于其他产品;②离子解离度,丙二酸的 pKa(2.83)远低于己二酸(4.43),更易解离产生游离离子。

水萃后,CB 电导率仍维持在~38 μS/cm,下降有限;而 TF、WTO、CR 均降至 30 μS/cm 左右及以下,CB-T则降至 9 μS/cm 以下,表明 CB 持续释放离子能力强,残留风险高,而 CB-T 经配方优化后,离子残留量显著降低。根据电化学腐蚀机理,离子残留可在金属表面形成导电电解液膜,促进氧浓差电池和微电池形成,加速阳极溶解反应[6,7]。高电导率意味着焊后更易吸附水分、形成电解质,从而显著增加腐蚀电流密度,降低腐蚀电位,诱发焊点腐蚀。因此,从电化学安全角度,应优先选用低电导率、低残留的助焊剂原

材料配方。

为明确有机酸对电导率的影响,将主要有机酸控制总量 12 g/L 浓度(未添加卤素)进行电导率测试,测试结果见表 3。

表 3 不同有机酸电导率测试结果 μS/cm

Table 3 Test results of conductivity of different organic acids μS/cm

组别	丁二酸	戊二酸	己二酸	丙二酸	空白对照纯水
X_0	0.62	0.45	0.20	3.73	1.30
X_1	35.20	27.60	24.80	85.40	1.30
X_2	36.30	26.20	26.00	79.80	1.20
X_3	33.90	27.80	25.80	89.70	1.50

注:X_0 代表原液电导率,X_1~X_3 为水萃取电导率,测试温度 25 ℃。

表 3 显示,4 种有机酸中丙二酸原液电导率最高(3.73 μS/cm),水萃后电导率骤升至 85.40 μS/cm,表明其极易电离并持续释放离子;丁二酸、戊二酸、己二酸水萃电导率稳定在 25~36 μS/cm,显著低于丙二酸。从电化学腐蚀机理看,丙二酸羧基间距小,pKa 低,水萃后几乎完全解离,生成大量游离 H^+ 和羧酸根,形成高导电电解液膜,促进阴极氧还原与阳极金属溶解,腐蚀电流密度大,腐蚀电位负移,极易诱发焊点及铜线路腐蚀[8,9]。相比之下,己二酸 pKa 高,解离度低,残留离子少,电导率最低,腐蚀驱动力最小。因此,在助焊剂配方中应优先选用己二酸等弱电离有机酸,避免使用丙二酸,以降低焊后离子残留,抑制微电池腐蚀,提升电子组装长期可靠性[10]。

为研究卤素对电导率的影响,以 0.05 g/L 浓度梯度逐步提升卤素含量,其中 CB1 加入游离卤素(环己胺氟盐),CB2 加入非游离卤素(氟碳表面活性剂),测试原液电导率及水萃取电导率,结果见表 4。

表 4 表明,游离卤素(CB1)使原液电导率随浓度呈线性陡升,0.5 g/L 时达 31.91 μS/cm,较空白提高 50 倍;水萃液电导率仅微增至 0.90 μS/cm,说明游离卤素几乎全部留在树脂相,焊后极易迁移至金属表面。非游离卤素(CB2)原液与水萃电导率均保持≤0.80 μS/cm,离子释放极微。按电化学腐蚀机理,游离卤素在潮湿环境中形成吸附层,破坏氧化膜,局部降低阳极过电位,诱发点蚀[11];同时提高电解液电导,加速氧阴极还原,腐蚀电流密度呈 10 倍放大。非游离卤素因共价键束缚,无游离离子,故几乎不增加腐蚀风险。因此配方应杜绝游离卤素,选用非游离型,并控制总卤<0.05 g/L,以抑制微电池形成,保障焊点长期可靠性[12]。

表 4 卤素对电导率的影响

Table 4 Effects of halogens on conductivity μS/cm

序号	电导率/(μS·cm^{-1})				浓度/(g·L^{-1})
	CB1 原液	CB1 水萃取	CB2 原液	CB2 水萃取	
0	0.62	0.62	0.62	0.62	0
1	7.20	0.63	0.63	0.63	0.05
2	11.71	0.65	0.66	0.66	0.10
3	15.43	0.67	0.67	0.68	0.15
4	18.32	0.70	0.71	0.70	0.20
5	21.06	0.71	0.71	0.72	0.25
6	23.64	0.78	0.76	0.74	0.30
7	26.05	0.84	0.77	0.76	0.35
8	28.37	0.87	0.78	0.78	0.40
9	30.33	0.90	0.80	0.80	0.45
10	31.91	0.91	0.81	0.82	0.50

CB-T 配方优化后,自腐蚀电位由 CB 的-225.0 mV (vs SCE)大幅正移至-38.5 mV,自腐蚀电流密度从2.65×10^{-7} A/cm^{2}降至 3.26×10^{-8} A/cm^2,降幅了 1 个数量级,表明其热力学稳定性与动力学耐蚀性同步提升[13]。通过以己二酸取代丙二酸、以非游离卤素替代游离卤素并降低总卤<0.05 g/L,树脂相可电离离子减少,焊后残留电导率<0.80 μS/cm,腐蚀微电池难以形成[14]。结果使腐蚀电流密度显著减小,腐蚀倾向接近市售助焊剂水平,验证了低离子、无游离卤素设计对提高焊点可靠性的有效性。

将 CB-T 改善后助焊剂做涂抹试验,电池片涂抹助焊剂种类编号见表 6,结果见图 4。

表 6 电池片编号列表

Table 6 List of cell numbers

种类	编号		
CB-T	1	2	3
CR	4	5	6
WTO	7	8	9
TF	10	11	12
空白	13	14	15

经涂抹验证,CB-T 助焊剂在电池片表面静置 24 h后未出现断栅、发灰或腐蚀坑,宏观形貌与市售低腐蚀助焊剂 TF、CR、WTO 相当。结合前期电化学数据,其自腐蚀电位显著正移、自腐蚀电流密度大幅降低,水萃电导率<0.90 μS/cm,微电池反应受阻,故无局部点蚀扩展成裂纹。据此建立的“关键参数检

测+现场涂抹验证”光伏助焊剂腐蚀性现场评价方法，无需复杂理论分析，可直接用于产线，实现助焊剂腐蚀风险的快速判定。

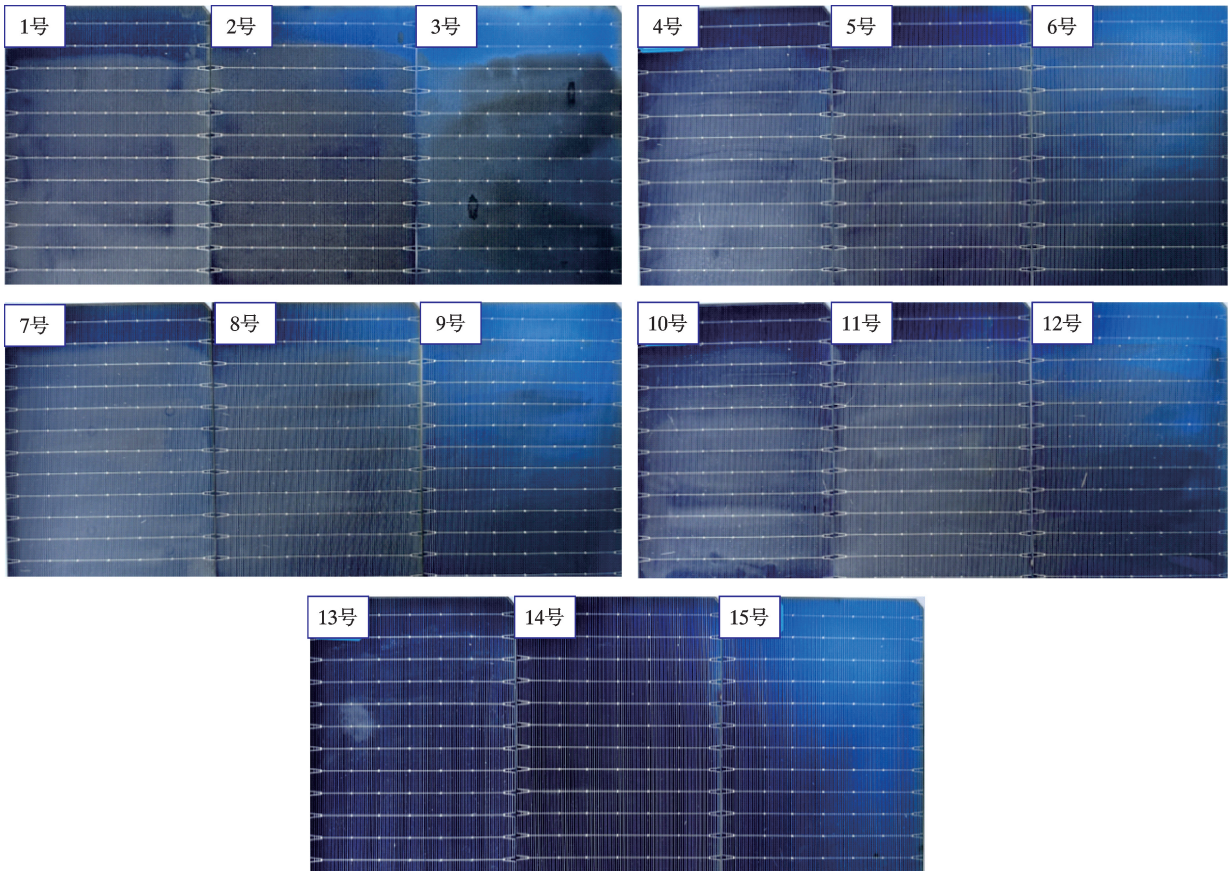


图 4　涂抹电池片静置 24 h 后表面状态
Fig. 4　Surface state of the coated cells after 24 hours of rest

3　结　论

(1)建立了“关键参数检测+现场涂抹验证”光伏助焊剂腐蚀性现场评价方法，无需复杂理论分析，可直接用于产线，实现助焊剂腐蚀风险的快速判定。

(2)通过降低游离卤素并优化有机酸比例，可将自腐蚀电流密度降低至安全区间，避免断栅。

(3)本工作提出的方法操作简单、成本低、耗时短，为光伏组件人工返修环节的助焊剂选品、作业规范提供直接指导，具备较高的现场应用价值。

[参 考 文 献]

[1] 周卫新，袁永健，石俭莉，等.浅谈太阳能晶硅组件用免洗助焊剂[J].精细与专用化学品，2008，16(22)：3.
ZHOU W X，YUAN Y J，SHI J L，et al. A Brief Discussion on No-Clean Soldering Flux for Solar Crystalline Silicon Modules[J]. Fine and Specialty Chemicals，2008，16(22)：3.

[2] 魏志朝，胡　斌.水的电化学处理对碳钢腐蚀行为的影响[J].上海化工，2024，49(6)：28-33.
WEI Z C，HU B. Effect of Electrochemical Treatment of Water on Corrosion Behavior of Carbon Steel[J]. Shanghai Chemical Industry，2024，49(6)：28-33.

[3] 唐兰兰，张鹏涛，姜　倩，等.光伏电池片焊接的匹配性影响原因分析[J].集成电路应用，2023，40(1)：120-121.
TANG L L，ZhANG P T，JIANG Q，et al. Analysis of Influencing Factors for Welding Compatibility of PV Cells[J]. Application of Integrated Circuits，2023，40(1)：120-121.

[4] 曹楚南.腐蚀电化学原理[M].北京：工业装备与信息工程出版中心，2004.
CAO C N. Principles of Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing：Industrial Equipment and Information Engineering Publishing Center，2004.

[5] 王力伟，李晓刚，杜翠薇，等.微区电化学测量技术进展

及在腐蚀领域的应用[J].中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6):7.
WANG L W, LI X G, DU C W, et al. Progress in Micro-area Electrochemical Measurement Technology and Its Application in Corrosion Field[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(6):7.

[6] 梁彩凤,侯文泰.大气腐蚀与环境[J].装备环境工程, 2004, 1(5):49-52.
LIANG C F, HOU W T. Atmospheric Corrosion and Environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(5):49-52.

[7] 汪的华.缓蚀剂吸附行为研究进展与展望[J].材料保护, 2000, 33(1):4.
WANG D H. Research Progress and Prospect of Corrosion Inhibitor Adsorption Behavior[J]. Materials Protection, 2000, 33(1):4.

[8] 刘福国,杜 敏.新型复配缓蚀剂对 G105 钢在 NaCl 溶液中缓蚀行为的影响[J].金属学报, 2007, 43(9):5.
LIU F G, DU M. Effect of a Novel Composite Corrosion Inhibitor on Corrosion Inhibition Behavior of G105 Steel in NaCl Solution [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(9): 5.

[9] 李海清,钱 静,王 彤.一种气相缓蚀剂的密闭空间定量评价方法[J].包装工程, 2012, 33(19):5.
LI H Q, QIAN J, WANG T. A Quantitative Evaluation Method for Vapor Phase Corrosion Inhibitors in Confined Spaces[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19):5.

[10] LEWIS G .The corrosion inhibition of copper by benzimidazole[J].Corrosion Science, 1982, 22(6):579-584.

[11] LI X H , DENG S D , FU H ,et al.Inhibition by tween-85 of the corrosion of cold rolled steel in 1.0 M hydrochloric acid solution [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2009, 39(7):1 125-1 135.

[12] PILLAI K C , NARAYAN R .Inhibition of Corrosion of Iron in Acids by Thiourea and Derivatives[J].Journal of The Electrochemical Society, 1978, 125(9): 1 393-1 397.

[13] 司士辉,肖 辉.无铅焊锡线中无卤素免清洗助焊剂的研制[J].电子工艺技术, 2007, 28(5):264-267.
SI S H, XIAO H. Development of Halogen-Free No-Clean Soldering Flux for Lead-Free Solder Wire[J]. Electronic Process Technology, 2007, 28(5):264-267.

[14] 刘士纯,徐博坤.一种光伏用免清洗助焊剂及其制备方法.CN202210384935.9[P].[2026-01-06].
LIU S C, XU B K. A No-Clean Soldering Flux for Photovoltaic Applications and Its Preparation Method. CN202210384935.9 [P]. [2026-01-06].

[编校:魏兆军]

(上接第 31 页)

LIU X C, NI Z H, CUI Y C, et al. Research Progress on Welding Technology Based on Friction Between Workpieces and External Consumable Tools[J]. Journal of Welding, 2022, 43(7): 14-27.

[7] 任永川, 周 科, 陈依洁, 等. 45 钢/Q355 钢异种钢连续驱动摩擦焊接工艺研究[J]. 机械, 2025, 52(3): 11-18.
REN Y C, ZHOU K, CHEN Y J, et al. Research on Continuous Drive Friction Welding Process for Dissimilar Steel Joints of 45 Steel/Q355 Steel [J]. Machinery, 2025, 52(3): 11-18.

[8] BU Z Q, MA X P, WU J Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Continuous Drive Friction Welded Ti AlNb Alloy under Different Rotational Rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(10): 3 221-3 232.

[9] 刘春柏, 宋春来, 戴俊良, 等. 铝合金气缸体表面气泡修复技术研究[J]. 汽车工艺师, 2024(10): 49-50.
LIU C B, SONG C L, DAI J L, et al. Research on Surface Bubble Repair Technology for Aluminum Alloy Cylinder Blocks [J]. Automotive Technician, 2024 (10): 49-50.

[10] SMITH M, BICHLER L, GHOLIPOUR J, et al. Mechanical properties and microstructural evolution of in-service Inconel 718 superalloy repaired by linear friction welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5): 1 931-1 946.

[11] 张 晗, 朱志明. 连续驱动摩擦焊接技术的研究与工程应用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(6): 1 002-1 013.
ZHANG H, ZHU Z M. Research and Engineering Applications of Continuous Drive Friction Welding Technology [J]. Journal of Engineering Science, 2022, 44(6): 1 002-1 013.

[编校:陈 鸣]