doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.05.009

检验与维护

核电用现场金相双模态酸膏腐蚀性能技术及其应用

段志伟[1],刘盛波[1],敬仕煜[2],刘素红[1],镇　乐[1]
(1.东方电气(广州)重型机器有限公司,广州 511455;2.东方电气集团东方锅炉股份有限公司,四川自贡 643001)

摘　要:针对核电装备现场金相检测中传统液态腐蚀剂带来的安全隐患及设备污染问题,开发了双模态酸膏腐蚀技术。该技术包括电解腐蚀酸膏与敷料腐蚀酸膏,分别适用于不锈钢、镍基材质(电解腐蚀酸膏)和碳钢、合金钢材质(敷料腐蚀酸膏)。通过引入膨润土载体,实现了腐蚀剂的膏状固化,显著提高了操作安全性和环保性。试验结果表明,使用新型腐蚀酸膏后,工件表面清洁度高,无酸液残留,腐蚀效果理想,例如不锈钢(SA-240 MTP316LN)和碳钢(SA-508M)材质的腐蚀面组织形貌清晰,晶界完整。研究证实,双模态酸膏腐蚀技术兼具高效刻蚀、易清洁和无污染特性,填补了核电在役原位检测领域的技术空白,对提升核电装备检测效率与安全性具有重要意义。

关键词:双模态酸膏;现场金相;液态腐蚀剂;安全环保
中图分类号:TH49;TG115.21　　**文献标志码:**B

Dual-mode acid paste etching technology for on-site metallography of nuclear power equipment and its applications

DUAN Zhiwei[1],LIU Shengbo[1],JING Shiyu[2],LIU Suhong[1],ZHEN Le[1]
(1.Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co.,Ltd.,Guangzhou 511455,China;
2.Dongfang Boliler Co.,Ltd.,Zigong 643001,China)

Abstract: To address the safety hazards and equipment contamination caused by traditional liquid etchants in on-site metallographic testing of nuclear power equipment, a dual-mode acid paste etching technology was developed. This technology includes electrolytic etching paste and coating etching paste, which are suitable for stainless steel and nickel-based materials (electrolytic etching paste) and carbon steel and alloy steel materials (coating etching paste), respectively. By introducing bentonite as a carrier, the etchant was solidified into a paste form, significantly improving operational safety and environmental friendliness. Test results show that after using the new acid paste etchant, the workpiece surface exhibits high cleanliness with no acid residue, and the etching effect is ideal. For example, the microstructures of stainless steel (SA-240 MTP316LN) and carbon steel (SA-508M) materials are clearly revealed with intact grain boundaries. The study confirms that the dual-mode acid paste etching technology combines efficient etching, easy cleaning, and pollution-free characteristics, filling the technical gap in the field of in-situ inspection of nuclear power equipment. This advancement is of great significance for improving the efficiency and safety of nuclear power equipment testing.

Key words:dual-mode acid paste; on-site metallography; liquid etchant; safety and environmental protection

0　引言

现场金相分析是一种在材料或设备现场进行的原位金相检验方法,主要用于评估焊接部位材料的微观组织及缺陷等,其作业流程为:先对受检工件表面进行研磨、抛光,然后使用腐蚀剂以揭示材料的微观结构,最后用现场金相显微镜进行观察分析,或通过金相覆膜后在显微镜上观察[1-3]。

收稿日期:2025-02-18　**修回日期:**2025-04-21
基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFB3713405)

随着我国“华龙一号”等新一代核电技术取得突破，核电装备制造及质量要求日益提高，现场金相检测成为保障核电等大型设备从制造到运行全周期安全的关键技术之一。

组织及缺陷的显示，即受检面腐蚀过程，是现场金相原位检测的核心部分[4-6]。目前，在核电装备领域，现场金相原位检测的腐蚀通常采用电解和擦拭2种方法，腐蚀剂均为流动性强的酸液，如核级不锈钢、镍基材料常用不含卤素的铬酸水溶液电解腐蚀[7-9]，碳钢、合金钢使用硝酸水溶液擦拭，2种酸液均具有强氧化性、强腐蚀性。

核电装备对工件表面清洁度有严格要求，制造及组装等环节必须满足ASTM A380/A380M-25：*Standard Practice for Cleaning, Descaling, Pickling and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems* 和 RCC-M-Edition 2007：*Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands* 等标准对清洁度的要求[10-11]。现场金相原位检测中，受检位置随机性大，流动或滴落的酸液不仅对操作人员的安全造成威胁，还会对工件表面造成腐蚀污染[12]，增加后续清洁工作难度。基于此研发新型腐蚀剂，通过引入膨润土载体，构建复合凝胶体系与微区腐蚀控制体系，得到安全环保的电解腐蚀酸膏-敷料腐蚀酸膏双模态腐蚀体系；电解腐蚀酸膏适用于不锈钢、镍基材质，敷料腐蚀酸膏适用于碳钢、低合金钢材质。这种新型腐蚀剂的配方及应用方法有助于推动现场原位金相检测技术的发展，促进新型腐蚀剂的应用，并为同行提供参考。

1 传统腐蚀方法

1.1 传统酸液电解腐蚀

采用100 ml蒸馏水及25 g三氧化铬配置传统电解腐蚀剂铬酸水溶液。受检材质为SA-240 MTP316LN，在电解腐蚀前使用磨抛仪对受检面打磨抛光，然后喷无水乙醇清洗，吹风机冷风吹干，随后用电解仪进行电解。将铬酸水溶液倒入电解液供给瓶，电极连接电池，将阳极连接受检工件，阴极连接电解液供给瓶，捏动电解液供给瓶，使电解液充分接触试样进行电解。电解参数为：电压10 V，电流3.5 A，电解时间120 s。电解完毕先用清水喷洗，再用无水乙醇喷洗电解面，最后用吹风机吹干。电解腐蚀后的检测面如图1所示，工件表面残留酸液，清水和酒精都难以清洗干净，工件表面被严重污染。用现场金相显微镜采集图像，检测面组织形貌如图2所示，组织显示为奥氏体，部分区域腐蚀不充分，晶界轮廓不清晰。

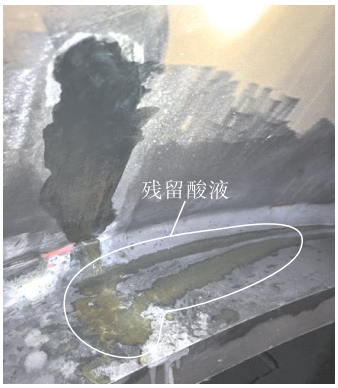

图1 传统酸液电解腐蚀后的检测面

Fig.1 The detection surface after traditional acid electrolytic etching

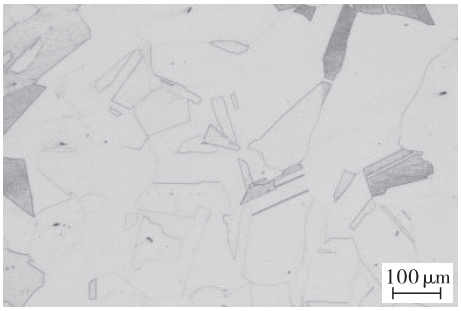

图2 传统酸液电解腐蚀后的检测面组织形貌

Fig.2 Microstructure of the surface after traditional acid electrolytic etching

1.2 传统酸液擦拭

采用100 ml蒸馏水及10 ml硝酸配置硝酸水溶液，进行酸液擦拭。受检材质为SA-508M，用磨抛仪对受检面进行打磨抛光，然后喷无水乙醇清洗，吹风机冷风吹干。用镊子夹住棉球，沾满配制好的硝酸水溶液，擦拭打磨好的检测面，擦拭时间为10~20 s，观察检测面腐蚀情况，充分腐蚀后用酒精棉球擦拭干净，无水乙醇喷洗后用吹风机吹干待检面。腐蚀完成后的检测面如图3所示，工件表面残留酸液，肉眼可见表面被污染。腐蚀完成后，用现场金相显微镜采集图像，检测面金相组织形貌如图4所示，该组织为回火索氏体，组织特征模糊且未见明显晶界。

2 新型电解腐蚀酸膏

2.1 电解腐蚀酸膏配制

量取100 ml蒸馏水，称取25 g三氧化铬，依次

将蒸馏水、三氧化铬倒入玻璃容器中用玻璃棒搅拌均匀,得到铬酸水溶液。称取40 g膨润土,将铬酸水溶液、膨润土混合均匀,得到铬酸酸膏。



图3 传统酸液腐蚀后的检测面

Fig.3 The detection surface after traditional acid etching

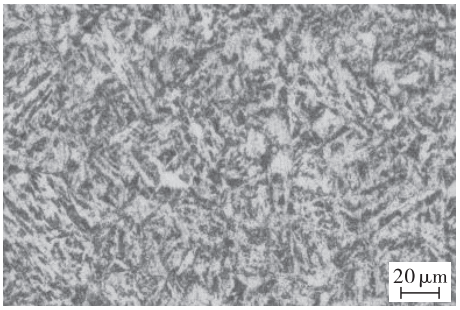

图4 传统酸液腐蚀后的检测面组织形貌

Fig.4 Microstructure of the surface after traditional acid etching

2.2 检测面准备

首先,定位检测区域;然后,使用便携式磨抛仪,依次用150#,300#,800#磨砂纸进行逐级打磨,从粗磨至细磨,每级打磨时间为1~2 min,打磨完毕用抛光绒布配合金刚石喷雾剂进行机械抛光至镜面效果;最后,喷无水乙醇清洗,吹风机冷风吹干。

2.3 新型电解腐蚀酸膏的应用

2.3.1 不锈钢材质

待检面材质为SA-240 MTP316LN,受检区域按照2.2节准备完毕后,将铬酸酸膏装满电解池,电极连接电池,阳极连接受检工件,阴极连接电解池进行电解,电解参数为电压7 V,电流4 A,电解时间100 s。电解完成用酒精棉球擦拭残留酸膏,无水乙醇喷洗后吹风机吹干,电解腐蚀后的检测面形貌见图5,工件表面未被污染。

用现场金相显微镜采集图像,如图6所示,检测区域为奥氏体组织,细节清晰、可观察到平直的孪晶条纹与晶界呈60°夹角,奥氏体晶界轮廓完整,不同位向的晶粒衬度高,显示效果理想。

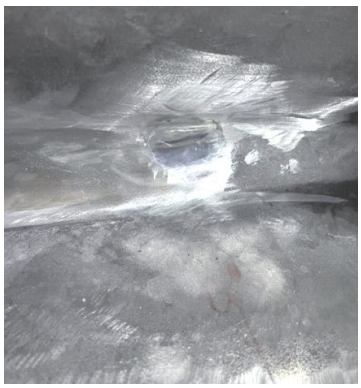

图5 使用电解腐蚀酸膏后的检测面

Fig.5 The detection surface after using electrolytic etching paste

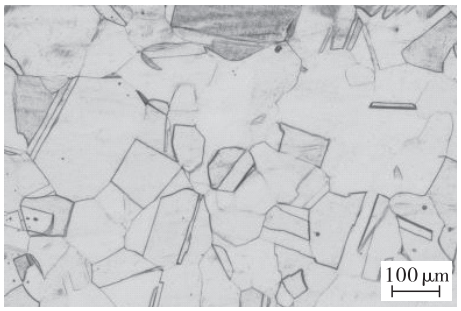

图6 使用电解腐蚀酸膏后的检测面组织形貌

Fig.6 Microstructure of the surface after using electrolytic etching paste

2.3.2 镍基材质

某反应堆压力容器焊接评定件的管子镍基角焊缝,焊接完成后进行渗透检测发现有缺陷PT显示,如图7所示。为确定PT显示性质,在焊接件上进行现场金相原位检测,PT显示位置经打磨仪磨制抛光后,采用新型铬酸酸膏电解腐蚀,其腐蚀后的缺陷形貌见图8。

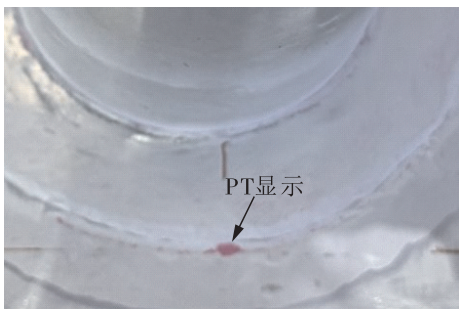

图7 PT显示位置

Fig.7 PT display position

检测面发现2条裂纹,其中裂纹1位于填充焊缝区,基本垂直于熔合线,裂纹细小,沿晶开裂,为热裂纹,组织形貌如图9所示;裂纹2贯穿隔离层、熔合线及填充焊缝,裂纹细小,沿晶开裂,为热裂

纹，组织形貌如图10所示；根据分析结果改进焊接参数，后续评定件未出现同类裂纹缺陷。

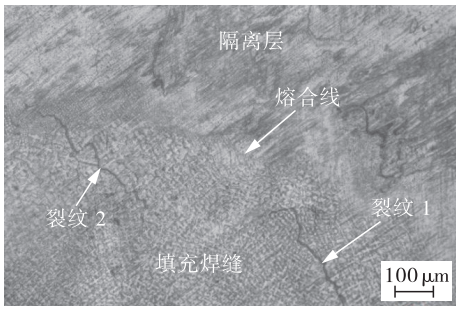

图8 电解酸膏腐蚀后形貌

Fig.8 Microstructure after using electrolytic etching paste

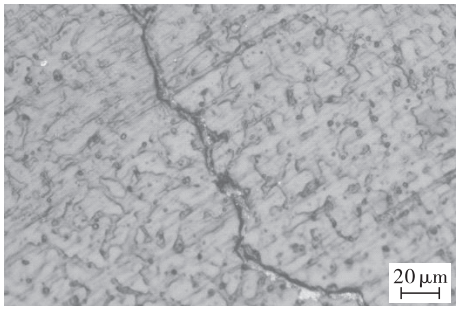

图9 裂纹1组织形貌

Fig.9 Microstructure of crack 1

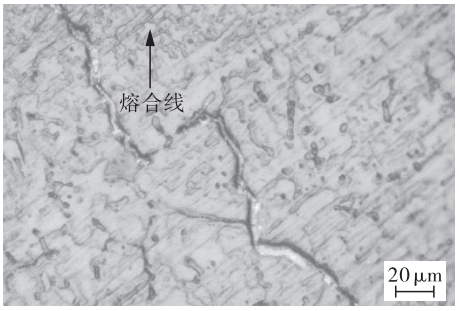

图10 裂纹2组织形貌

Fig.10 Microstructure of crack 2

3 新型敷料腐蚀酸膏

3.1 新型敷料酸膏配制

量取100 ml蒸馏水、10 ml硝酸，依次将蒸馏水、硝酸倒入玻璃容器中，用玻璃棒搅拌均匀后，得到硝酸水溶液。称取50 g膨润土，将硝酸水溶液和膨润土均匀混合，得到硝酸酸膏。

3.2 检测面准备

首先定位检测区域，然后使用便携式现场磨抛仪，依次用150#，300#，800#磨砂纸进行逐级打磨，从粗磨至细磨，每级打磨时间为1~2 min，打磨完毕用抛光绒布配合金刚石喷雾剂进行机械抛光至镜面效果，最后喷无水乙醇清洗，吹风机冷风吹干。

3.3 新型敷料酸膏腐蚀应用

3.3.1 SA-508M材质

待检面材质为SA-508M，受检区域按照3.2节准备完毕后，将硝酸酸膏轻轻平敷于打磨好的检测面上，静置约30 s，用酒精棉球擦拭残留的酸膏，用无水乙醇喷洗后吹风机吹干，腐蚀后的检测面形貌如图11所示，工件表面未被污染。



图11 敷料酸膏腐蚀后的检测面

Fig.11 The detection surface after using coating paste etching

敷料腐蚀完成后，用现场金相显微镜进行图像采集，如图12所示，检测面组织为回火索氏体，晶界显示充分，铁素体与渗碳体对比鲜明，铁素体呈浅灰色，渗碳体颗粒呈深黑色，明暗对比显著，组织层次分明。

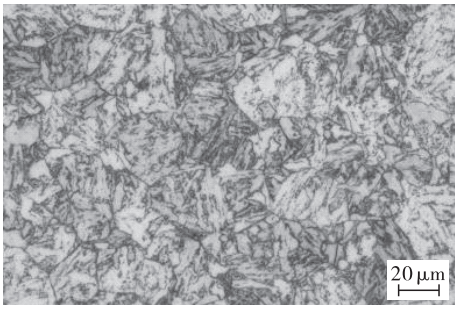

图12 使用敷料酸膏腐蚀后的组织形貌

Fig.12 Microstructure after using coating paste etching

3.3.2 18MND5材质

某蒸汽发生器试验工件材质为18MND5，焊材为低合金钢焊丝，焊接完成后MT和UT检查发现存在超标缺陷显示，对超标缺陷显示位置进行现场金相原位检测。打磨仪磨制抛光后，采用新型硝酸酸膏进行腐蚀，腐蚀后宏观形貌见图13。

用现场金相显微镜采集检测位置形貌，观察发现超标显示缺陷为裂纹，位于热影响区的粗晶区，裂纹呈“之”字形、沿晶加穿晶扩展，扩展范围未超出粗晶区，且未扩展入焊缝，粗晶区组织为回

火马氏体，如图14所示。经分析，超标显示为裂纹，是高硬度的粗大淬硬组织在应力作用下产生的冷裂纹。根据分析结果调整焊后冷却速度，后续工艺试验未出现同类裂纹缺陷。

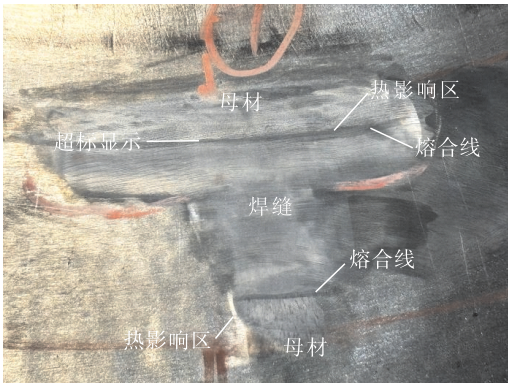

图13 超标缺陷位置形貌

Fig.13 The morphology of the location of the defects exceeding the standard

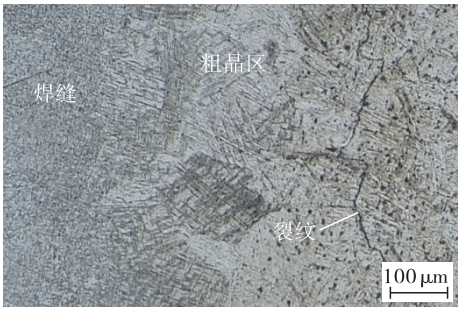

图14 超标缺陷裂纹形貌

Fig.14 The morphology of the location of the cracks exceeding the standard

4 讨论

通过以上应用实例可以发现，双模态腐蚀体系：电解腐蚀酸膏（铬酸酸膏）与敷料腐蚀酸膏（硝酸酸膏），2种酸膏在现场腐蚀操作过程中，通过流性改变技术锁定于膏体状态，避免了酸液流动的风险。在腐蚀完毕后，用酒精棉球即可将少量残留腐蚀酸膏擦拭干净，具备易清洗、零污染的特性，满足标准对核电装备工件表面高清洁度的严苛要求。传统液体腐蚀剂在腐蚀过程中存在酸液流动的风险，在仰面操作的工况下，腐蚀剂滴落会对操作人员造成伤害，且流动残留的酸液会对工件非检测区域造成腐蚀污染。

新型腐蚀酸膏通过引入膨润土载体反应体系[13]，使腐蚀剂呈膏体状态，在腐蚀过程中铬酸根或硝酸根离子持续固定在原位产生高效刻蚀，显示出真实准确的组织形貌。通过与液体腐蚀剂显示的检测面组织形貌对比可知，由于酸膏腐蚀过程中的稳定性，新型腐蚀剂的检测面整体腐蚀均匀，无过度腐蚀或腐蚀不足的区域，组织显示对比度高，晶界轮廓清晰完整，腐蚀效果优于传统液体腐蚀剂。此外，新型酸膏腐蚀剂配方简单方便，现场转运安全，可反复使用，可长期密封保存。

5 结论

（1）成功开发双模态酸膏腐蚀技术，包括电解腐蚀酸膏（适用于不锈钢、镍基材质）和敷料腐蚀酸膏（适用于碳钢、合金钢），通过膨润土载体实现腐蚀剂膏状锁定，显著提升现场检测安全性和环保性。

（2）试验证明在不锈钢（SA-240 MTP316LN）和碳钢（SA-508M）等材质上，该技术具有高效刻蚀、易清洁和无污染特性，腐蚀面组织形貌清晰，晶界完整，满足核电在役检测要求。

（3）解决了传统液态腐蚀剂的安全隐患和设备污染问题，为核电装备检测提供了新方法，并推广应用于锅炉制造、石油管道等领域[14-15]，增加了现场金相的应用前景。

参考文献：

[1] 徐晓东.承压特种设备现场金相检验技术探究[J].品牌与标准化，2023(2)：122-124.
XU X D.Research on on-site metallographic inspection of special pressure equipment [J]. Brand & Standardization，2023(2)：122-124.

[2] 李国政，王振江，张爱庆.特种设备现场金相检验中常见异常组织及原因分析[J].中国特种设备安全，2020，36(11)：34-39.
LI G Z，WANG Z J，ZHANG A Q.Common abnormal metallographic structure and its cause analysis in on-site metallographic examination of special equipment[J].China Special Equipment Safety，2020，36(11)：34-39.

[3] 肖冬飞，王瑄，韦中悬，等.现场金相复型技术浅析[J].理化检验(物理分册)，2021，57(1)：19-24.
XIAO D F，WANG X，WEI Z X，et al.Brief analysis of field metallographic replica technology [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A：Physical Testing)，2021，57(1)：19-24.

[4] 张雪涛，魏超，王艳芳，等.现场金相检验技术及误判案例分析[J].理化检验(物理分册)，2019，55(9)：639-642.
ZHANG X T，WEI C，WANG Y F，et al. Field

metallographic examination technology and misjudgment case analysis[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A: Physical Testing), 2019, 55(9):639-642.

[5] 秦雪源,何巍杨,刘勇,等.吸收氧化塔腐蚀机理分析及防腐策略[J].压力容器,2024,41(8):56-63.
QIN X Y, HE W Y, LIU Y, et al. Analysis of corrosion mechanism and anti-corrosion strategy for absorption oxidation tower[J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(8):56-63.

[6] 李沁霏,张蒲根,罗志,等.基于导波频散补偿的多腐蚀损伤无基线智能检测方法研究[J].压力容器,2024,41(11):57-65.
LI Q F, ZHANG P G, LUO Z, et al. Research on intelligent detection method for multiple corrosion defects without baseline based on guided wave dispersion compensation [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(11):57-65.

[7] 顾佳磊,李晓冬,夏侯俊招.一种自制的简易现场金相检验电解抛光腐蚀装置[J].理化检验(物理分册),2018,54(8):587-589.
GU J L, LI X D, XIAHOU J Z. A simple self-made field electrolytic polishing & corrosion device for metallographic examination [J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A: Physical Testing), 2018, 54(8):587-589.

[8] 顾佳磊,陆连萍,纵海.电解抛光技术在现场金相检测中的应用探索[J].金属热处理,2019,44(S1):10-12.
GU J L, LU L P, ZONG H. Application of electrolysis polishing technology in on-site metallographic inspection [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1):10-12.

[9] 王洪涛,江国焱,王海沦,等.一种奥氏体不锈钢的电解液及其应用:CN114486460B[P].2024-07-12.
WANG H T, JIANG G Y, WANG H L, et al. An electrolyte for austenitic stainless steel and its application: CN114486460B[P]. 2024-07-12.

[10] 薛进.核电设备制造和安装中的清洁度控制策略的分析[J].工程技术研究,2019,4(19):116-117.
XUE J. Cleanness control in manufacturing and installation of nuclear power equipment [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(19):116-117.

[11] 徐文镜,刘鸣宇,王小刚,等.清洁度控制对核电蒸汽发生器管子-管板焊缝质量的影响[J].热加工工艺,2013,42(1):201-204.
XU W J, LIU M Y, WANG X G, et al. Influence of cleanliness control on steam generator tube to tubesheet weld quality[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1):201-204.

[12] 宋冠宇,赵杰,程从前,等.核电用奥氏体不锈钢表面铁素体污染的影响及对策[J].腐蚀与防护,2011,32(10):813-816.
SONG G Y, ZHAO J, CHENG C Q, et al. Influence of iron contamination on the surface of austenitic stainless steels for nuclear power industry and the countermeasures [J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(10):813-816.

[13] 文志朋,韦毅,侯向华,等.膨润土基功能材料在电化学储能中的研究进展[J].无机材料学报,2024,39(12):1301-1313.
WEN Z P, WEI Y, HOU X H, et al. Research progress of bentonite-based functional materials in electrochemical energy storage [J]. Journal of Inorganic Materials, 2024, 39(12):1301-1313.

[14] 杨峥山,邱志军,林炜,等.高温低碳钢管道在役组织分析及监督要点[J].化学工程与装备,2017(8):244-247.
YANG Z S, QIU Z J, LIN W, et al. Microstructure analysis & monitoring focus for high-temperature low-carbon steel pipelines in service [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(8):244-247.

[15] 陈思思.电站锅炉珠光体铁素体耐热钢薄壁管的现场金相检验方法[J].理化检验(物理分册),2021,57(1):25-28.
CHEN S S. Field metallographic examination method of pearlitic ferrite heat resistant steel thin-walled pipe for utility Boiler [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2021, 57(1): 25-28.

作者简介:段志伟(1981),女,工程师,主要从事核电装备制造理化检测及失效分析工作,通信地址:511455广东省广州市南沙区连溪大道313号,E-mail:838621524@qq.com。

本文引用格式:
段志伟,刘盛波,敬仕煜,等.核电用现场金相双模态酸膏腐蚀性能技术及其应用[J].压力容器,2025,42(5):79-84.
DUAN Zhiwei, LIU Shengbo, JING Shiyu, et al. Dual-mode acid paste etching technology for on-site metallography of nuclear power equipment and its applications[J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(5):79-84.