doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.12.005

安全分析

炼化装置绝热材料腐蚀评价方法与性能研究

王奕璇,段永锋,李晓炜
(中石化炼化工程(集团)股份有限公司洛阳技术研发中心,河南洛阳 471032)

摘　要:针对绝热材料吸湿导致绝热层下腐蚀的问题,采用标准对比分析与试验测试相结合的方法,系统梳理了12项国内外腐蚀评价标准(7项模拟试验标准、5项浸出液测评标准),探讨不同标准在评价指标选取、测试流程设计、结果判定准则等方面的差异与特征;明确当前评价标准体系存在的适用性缺陷与完善空间。基于上述标准分析结果,选取GB/T 17393—2008,ASTM C871-18(2023)及ASTM C795-08(2023)标准为参照,设计并开展多种绝热材料浸出液定量评价试验,重点对比分析新型纳米绝热材料与传统绝热材料的关键腐蚀性能指标。研究结果表明:新型纳米绝热材料中,纳米气凝胶毡样品的pH值低于7(呈弱酸性)的占比达67%,其余关键腐蚀性能指标(如电导率、氯离子含量等)均满足相关评价要求。本研究成果为完善绝热材料腐蚀评价标准体系、科学指导工业绝热材料选型提供了关键依据,对保障工业设备长效安全运行具有重要的理论与实践价值。

关键词:绝热材料;浸出液;pH值;腐蚀性离子
中图分类号:TH145;TB37;T-65　　**文献标志码:**A

Corrosion evaluation methods and performance study of insulating materials in refining units

WANG Yixuan, DUAN Yongfeng, LI Xiaowei
(Luoyang R&D Center of Technology, Sinopec Engineering (Group) Co., Ltd., Luoyang 471032, China)

Abstract: To address the issue of corrosion under insulation caused by moisture absorption of insulating materials, a method combining standard comparative analysis and experimental testing was adopted. Twelve domestic and international corrosion evaluation standards (seven simulation test standards and five leachate evaluation standards) were systematically reviewed. The differences and characteristics of various standards regarding the selection of evaluation indicators, test process design, and result judgment criteria were explored. The applicability defects and areas for improvement in the current evaluation standard system were identified. Based on the analysis results of the aforementioned standards, GB/T 17393—2008, ASTM C871-18(2023), and ASTM C795-08(2023) were selected as references. Quantitative evaluation tests on the leachate of various insulating materials were designed and conducted, focusing on the comparative analysis of key corrosion performance indicators between new nano-insulating materials and traditional insulating materials. The research results indicate that among the new nano-insulating materials, 67% of the nano-aerogel felt samples have a pH value below 7 (weakly acidic), while other key corrosion performance indicators (such as electrical conductivity, chloride ion content, etc.) all meet the relevant evaluation requirements. The outcomes of this study provide a crucial basis for improving the corrosion evaluation standard system for insulating materials and scientifically guiding the selection of industrial insulating materials, offering significant theoretical and practical value for ensuring the long-term safe operation of industrial equipment.

Key words: insulating materials; leachate; pH value; corrosive ions

收稿日期:2025-03-06　**修回日期:**2025-08-11
基金项目:中石化总部课题“绝热层下腐蚀检测评估及控制技术研究与应用”(CHG23040)

0 引言

为实现节能环保,炼油化工装置在设计和施工阶段需要对高低温设备和管道施加绝热结构。绝热材料大多具有多孔、易吸水的材质特点,若绝热材料安装不合格或在使用过程中产生破损,极易在潮湿环境中吸潮,从而在绝热层和被保护设备之间形成潮湿的腐蚀环境;绝热材料本身含有氯、硫、氟等杂质溶于该腐蚀性电解质溶液,产生严重的绝热层下腐蚀(corrosion under insulation,CUI)[1-3]。从行业现状来看,绝热层下腐蚀已成为国内外炼化行业普遍面临的共性难题。炼化企业中受绝热层下腐蚀困扰的炼化设备占比高达60%~80%,其中储罐、管道、反应釜等关键设备的腐蚀发生率尤为突出。绝热层下腐蚀会导致设备壁厚减薄、密封失效,轻则引发介质泄漏、装置非计划停工,重则诱发火灾等重大安全事故[4-7]。

随着科技的发展,目前市场生产的绝热材料种类繁多、品质参差不齐;不同种类的绝热材料其腐蚀性相关性能也存在差异[8-14]。炼化企业在面对市场中丰富多样的绝热材料时容易首先考虑购买经济性,而忽略绝热材料在特定环境和工况下的腐蚀性带来的生产安全隐患。此外,企业在采购绝热材料时,对绝热材料的腐蚀性评价标准缺乏明确认知。因此,明确绝热材料腐蚀性评价标准的具体方法,并对其进行分类整理,对指导炼化企业合理选型、规避安全风险具有重要意义。当前,国内外相关绝热材料腐蚀性评价标准呈现多元化发展态势,各标准的评价指标体系侧重点不同:部分标准通过模拟实际服役环境开展加速老化试验,实现对材料腐蚀性能的长效评估;另有部分标准借助检测绝热材料浸出液的腐蚀性能指标,快速判定材料的腐蚀等级。

基于此,本文旨在全面梳理并整合现有绝热材料腐蚀性评价标准,系统阐述各标准的核心检测方法、技术参数及适用范围,客观评价不同标准的实用性与局限性,剖析各标准间的关联与差异。同时,重点关注传统绝热材料与新型纳米绝热材料的腐蚀性差异,通过试验数据支撑新型纳米绝热材料的腐蚀性评价结论,为该类新型材料的工程化推广与应用提供技术支撑。研究成果可为规避绝热层下腐蚀风险、优化绝热材料选型提供科学依据,进而延长绝热结构服役周期、保障炼化装置安全平稳运行。

1 绝热材料腐蚀性能评价方法

绝热材料的腐蚀性可通过模拟试验或腐蚀性能指标检测两种途径确定:腐蚀模拟试验包括定性检测和定量检测;腐蚀性能指标包括绝热材料浸出液pH值、电导率和腐蚀性离子含量,绝热材料吸水性。

1.1 腐蚀模拟试验

1.1.1 定性评价试验

针对钢、铜、铝等金属材质,ASTM C665-17(2017) *Standard Specification for Mineral-fiber Blanket Thermal Insulation for Light Frame Construction and Manufactured Housing* 和GB/T 11835—2016《绝热用岩棉、矿渣棉及其制品》附录F介绍了绝热材料对其腐蚀性的实验室评估方法:将测试金属试板用固定装置(一般为钢丝网和橡皮筋)夹在两片绝热材料之间,采用消毒无菌棉片作为对照组。将组合件挂置在相对湿度为95%±3%,温度为120±3 °F(49±2 °C)试验箱内,试验周期(钢96±2 h,铜和铝720±5 h)结束后取出,观察金属板和无菌棉对照组的腐蚀程度及腐蚀特征。若试验组金属试板的腐蚀程度没有明显比无菌棉片对照组更严重,则判定试验绝热材料腐蚀性达标。该判定通过非参数统计法验证把控,其置信水平应达到90%(α=0.10)。用此方法可获悉不同绝热材料对钢、铜、铝等金属材质的腐蚀性强弱。

标准GB/T 17393—2008《覆盖奥氏体不锈钢用绝热材料规范》参考了标准ASTM C795-08(2023) *Standard Specification for Thermal Insulation for Use in Contact with Austenitic Stainless Steel* 和 ASTM C692-13(2023) *Standard Test Method for Evaluating the Influence of Thermal Insulations on External Stress Corrosion Cracking Tendency of Austenitic Stainless Steel*,其附录A规定了评估绝热材料对奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂影响的试验方法:将预处理过的奥氏体不锈钢板弯曲成U型试件,人为制造外部应力。将不锈钢试件开口向下放置在加热管上,待测绝热材料试样块用水浸润放置在不锈钢试件上,保证每天滴注250 ml去离子水,试验周期28 d±6 h。此外设置氯化钠溶液滴注对照组。去离子水将绝热材料中存在的氯、氟等腐蚀性离子带出并在不锈钢试件

上浓缩，在外部应力存在的情况下破坏不锈钢奥氏体结构，造成点蚀，严重时形成腐蚀裂纹。此外，GB/T 25996—2019《绝热材料对奥氏体不锈钢外部应力腐蚀开裂的试验方法》还给出了芯吸法（达纳法）测试绝热材料对奥氏体不锈钢腐蚀性的具体步骤：将清洗干净的不锈钢板制成U型试件，4个一组用铜电导线焊接。将U型试样组放置在绝热材料凹槽中，热电偶的测温端用铝粉和环氧胶固定在不锈钢试样的凹槽底部，将此装置放入盛有蒸馏水或去离子水的结晶皿中，在试验过程中维持结晶皿中的水位略低于不锈钢凹槽底部13 mm，加热至水沸点温度开始计时，试验仍维持28 d±6 h。两种试验方法结束后观察U型试样表面是否有裂纹，除肉眼观察外，还可用显色剂着色、显微镜观察等方式观察确认不锈钢试件是否产生外部应力腐蚀裂纹。

1.1.2 定量评价试验

在后文2.1节中描述的绝热层腐蚀性检测方法是通过客观观察对比试验组和对照组的腐蚀形貌确定绝热材料的腐蚀性能是否达标，是一种定性试验。标准ASTM C1617-24 *Standard Test Method for Quantitative Accelerated Laboratory Evaluation of Extraction Solutions Containing Ions Leached from Thermal Insulation on Aqueous Corrosion of Carbon Steel*提供了一种定量评价绝热材料对碳钢腐蚀性的实验室检测方法，如图1所示。

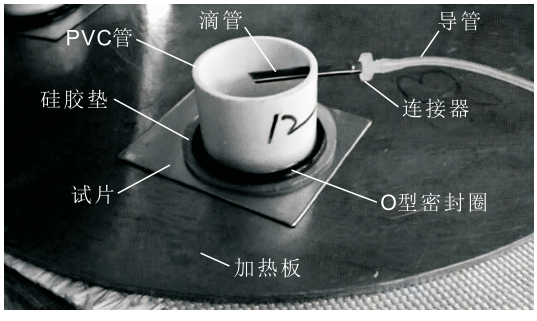


图1 定量评价绝热材料对碳钢试片的腐蚀性装置

Fig.1 Device for quantitatively evaluating the corrosiveness of insulating materials on carbon steel test coupons

将清洗洁净并提前称取重量的碳钢试片放置在金属加热盘上，用密封胶和O形圈将一段长为3 cm的PVC管固定在碳钢试片上，在PVC管上段开小孔固定塑料管，该塑料管连接蠕动泵在试验进行中不断输送绝热材料浸出液和对照组的腐蚀性水溶液，使其匀速滴至试片中心。加热盘温度维持在100±6 ℃，浸出液不断在碳钢试样上蒸发浓缩，结束后对试样进行称重，计算每个金属试样的平均质量损失腐蚀速率。其中绝热材料浸出液的制备方法参考标准ASTM C871-18（2023）*Standard Test Methods for Chemical Analysis of Thermal Insulation Materials for Leachable Chloride, Fluoride, Silicate, and Sodium Ions*。

1.1.3 小结

腐蚀模拟试验将石油化工、工业管道绝热装置缩小规模，并通过控制试验条件的方式使绝热层对金属的腐蚀现象加速重现，能够完整模拟绝热层下腐蚀的整个流程，是一种直观的定性模拟试验方式，有助于企业选择适合其使用环境及工况的绝热材料。但此方法试验周期较长，无法快速筛选、评估绝热材料的腐蚀性，尤其是企业在采购绝热材料时需要及时对材料进行性能评估，此方法无法满足实际需求。此外，实验室模拟的腐蚀环境难以完全还原绝热材料在实际工况中的腐蚀环境，如实际情况中随气候变化的温度、湿度、酸碱度等多种因素的综合作用。

1.2 腐蚀性能指标检测

在设备运行过程中，绝热结构在长期使用过程中难免发生破损，且设备和管道的弯头、三通等结构不连续处容易渗水。此时，潮湿的气候环境或工艺冷凝液的存在极易使绝热材料吸潮并在金属设备表面形成一层水膜，环境或绝热材料中的杂质离子溶于其中，产生电化学腐蚀。因此，检测绝热材料的吸水性、浸出液的pH值、氯离子、氟离子等腐蚀性离子的浓度是否达标是判断绝热层下腐蚀是否发生及程度强弱的重要手段。

1.2.1 绝热材料浸出液腐蚀性能指标检测

ASTM C871-18（2023）介绍了绝热材料可浸出氯化物、氟化物、硅酸盐和钠离子的标准化学分析试验方法：剪取20 g绝热材料至盛有400 mL去离子水的烧杯中搅拌30~60 s，充分混合后将混合液转移至圆底烧瓶中加热煮沸，保持沸腾30±5 min，冷却至室温后重新添加去离子水至100 mL。重新搅拌混合液至均匀，然后通过滤纸过滤得到澄清的滤液（必要时使用更细的滤纸进行二次过滤）。氯离子和氟离子易在奥氏体不锈钢表面沉积并集中，在没有抑制剂（Na^+和SiO_3^{2-}）的情况下导致外部应力腐蚀开裂（ESCC），ASTM C692-13（2023）和ASTM C871-18（2023）作为广泛使用的两种研究不锈钢ESCC的规范，可结合

其试验方法来评估绝热材料,得到绝热材料浸出液腐蚀性离子含量后,应参考标准评估绝热材料浸出液腐蚀性离子含量是否合格。ASTM C795-08(2023)及GB/T 17393—2008对Cl^-,F^-,Na^+,SiO_3^{2-}离子含量做出要求,见表1及图2。其余离子Ca^{2+},Mg^{2+},CO_3^{2-},SO_4^{2-}含量目前没有统一标准做定量要求,但一些研究给出了这4种离子的浓度对CUI的影响机理[3-8]。

表1 对可溶出氯离子和氟离子含量的要求

Tab.1 Requirements for the content of leachable chloride ions and fluoride ions

$[\omega(Na^+)+\omega(SiO_3^{2-})]$/%	$[\omega(Cl^-)+\omega(F^-)]$/%
0.005	≤0.001
>0.005~<0.90	$\leqslant 10^{-1.192+0.655\lg x}$
≥0.90	≤0.060

注:(1)x表示按JC/T 618—2019《绝热材料中可溶出氯化物、氟化物、硅酸盐和钠离子的化学分析方法》所测定的SiO_3^{2-}含量与Na^+含量的总和,即$[\omega(Na^+)+\omega(SiO_3^{2-})]$/%的测定值;(2)计算结果取两位有效数字。

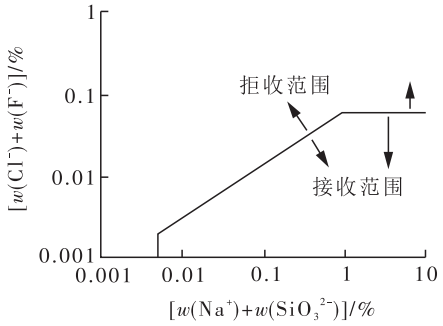


图2 Cl^-+F^-和$Na^++SiO_3^{2-}$含量的可接受性示意

Fig.2 Schematic diagram of the acceptability of Cl^-+F^- and $Na^++SiO_3^{2-}$ content

此外,GBT 17393—2008中规定了绝热材料浸出液的pH值在25 ℃时应为7.0~11.7。翁永基[5]以16Mn钢为研究对象发现金属在潮湿绝热材料中的腐蚀程度与绝热材料浸出液电导率值相关:电导率值为10 μs/cm左右时,常呈现带浅坑的一般腐蚀;电导率值为10^2 μs/cm左右时,常为小面积深坑状的腐蚀;电导率值为10^3 μs/cm左右时,往往呈现出现点蚀的形态。

1.2.2 绝热材料吸水性检测

标准GB/T 5480—2017《矿物棉及其制品试验方法》提供了绝热材料吸水性和吸水性的检测方法。其中,吸湿率的测试方法为:将试样在105±5 ℃的电热鼓风干燥箱内下烘干至恒重,然后将试样放置在温度为50±2 ℃、相对湿度为95±3 ℃并具有空气循环流动的调温调湿箱内保持96±4 h。取出冷至室温后称量质量吸湿率/体积吸水率。吸水率的测试方法为:将试样在105±5 ℃的电热鼓风干燥箱内下烘干至恒重后全压入水中2 h,后取出沥干10 min计算体积吸湿率,以%表示。其中,GB/T 30805—2024《建筑用绝热制品 部分浸入法测定短期吸水量》参考国际标准EN ISO 29767:2019 *Thermal Insulating Products for Building Applications-Determination of Short-term Water Absorption by Partial Immersion*修订,给出绝热材料短期吸水率的测定方法;GB/T 30807—2014《建筑用绝热制品浸泡法测定长期吸水性》给出绝热材料部分浸入/全部浸入水中28 d的单位面积吸水率/体积吸水率的试验方法。

1.2.3 小结

通过对绝热材料浸出液腐蚀性能指标的检测过程简便、高效、适用性广,可以快速得到绝热材料的腐蚀性信息,评估不同腐蚀环境下绝热材料的腐蚀潜力,识别潜在的腐蚀风险。从而帮助企业在短时间内获取结果,快速筛选和评估不同绝热材料的腐蚀性,更快做出采购决策。但不同类型绝热材料的亲水性有差异,即使加热相同时间也无法确保绝热材料的浸出程度一致,如岩棉、复合硅酸盐材料在沸水中也保持浮于水面之上,由此对比绝热材料腐蚀性是否准确仍有争议。此外,炼化企业的生产环境复杂多变,不同装置、部位的绝热材料可能面临不同的腐蚀环境。因此,即使检测结果表明某种绝热材料具有良好或较差的耐蚀性,也无法保证其在所有使用环境下都会表现出相同的性能。该方法获取的结果可作为绝热材料腐蚀性判断的辅助参考,应结合实际腐蚀案例及老化加速模拟试验结果全面分析绝热材料的实际腐蚀性。

2 新型纳米绝热材料腐蚀性测评

石油化工企业现在常用的绝热材料依旧以传统的无机材料为主导,包括硅酸铝针刺毯、复合硅酸盐、岩棉等;现阶段发展出一些新型的绝热材料如气凝胶、纳米纤维绝热毯、高性能真空绝热板、石墨烯增强绝热材料、生物基绝热材料等纳米级绝热材料,这些新型绝热材料大部分以可再生资源为原料,环保可降解;孔径提升为纳米级,更好地隔绝空气和热量的流通,提升绝热隔热效果[15-18]。其中,纳米微孔复合绝热毡和纳米气凝胶毡作为新型纳米绝热材料已由厂家批量生产,

用于炼油化工设备及管道的绝热隔热[19-20]。

基于上述标准的研究基础，结合本实验室实际条件及技术能力，选取6类绝热材料作为试验对象，其中涵盖纳米气凝胶毡、CAS纳米微孔复合绝热毡2种新型绝热材料。试验过程中，参照GB/T 17393—2008、ASTM C871-18（2023）及ASTM C795-08(2023)中的评价方法，开展绝热材料浸出液腐蚀性指标的系统测试。实践验证标准中提及的评价方法，明确不同绝热材料的腐蚀性能指标和新型绝热材料腐蚀性能测评结果的优越性。

2.1 试验方法

选取27家企业47种绝热材料，传统绝热材料包括硅酸铝针刺毯、硅酸铝管壳、复合硅酸盐、岩棉共42个样品，纳米气凝胶毡3个样品，和CAS纳米微孔复合绝热毡2个样品。采用GB/T 17393—2008中的试验方法开展绝热材料浸出液离子含量检测，参考标准ASTM C871-18(2023)、ASTM C795-08(2023)和相关参考文献[2,13-14]测评浸出液离子含量、pH值和电导率是否合格，对比分析不同绝热材料腐蚀性能指标。

2.2 测评结果

2.2.1 pH值

按照GB/T 17393—2008规定，绝热材料浸出液的pH值在25 ℃时应为7.0~11.7。图3示出不同企业绝热材料浸出液pH值(25 ℃)。可以看出，有20种绝热材料浸出液的pH值不能满足标准要求，占比42.6%。其中，包括14个硅酸铝针刺毯样品，占硅酸铝针刺毯样品总数量(31种)的45.2%；3个复合硅酸盐板样品，占复合硅酸盐板样品数量(5种)的60%；2个纳米气凝胶样品，占纳米气凝胶毡样品数量(4种)的50%；1个CAS纳米微孔复合绝热毡样品，占CAS纳米微孔复合绝热毡样品数量(2种)的50%。硅酸铝管壳(2种)和岩棉板(3种)的浸出液的pH值均满足标准要求，且pH值相对较高，均在9.0以上。新型绝热材料和传统绝热材料pH值不达标比例均在50%左右，无太大差别。

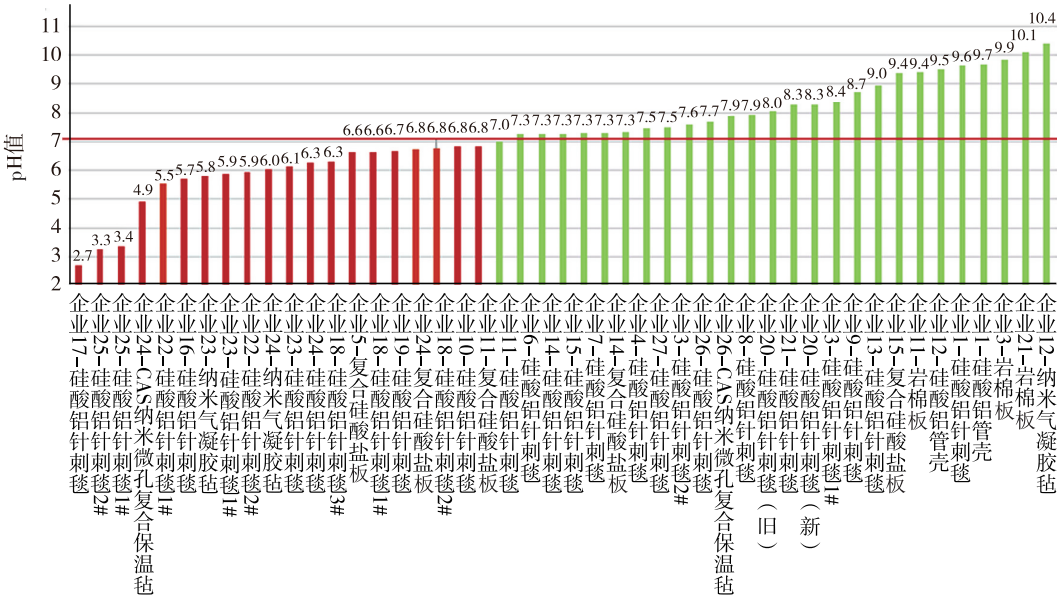


图3 不同企业绝热材料浸出液pH值(25 ℃)

Fig.3 pH value of insulating material leachate from different enterprises (25 ℃)

2.2.2 电导率

绝热材料浸出液电导率可反映其CUI的腐蚀类型及严重程度：电导率值为10^3 μs/cm左右时，往往呈现出点蚀的形态；电导率值为10^2 μs/cm左右时，常为小面积深坑状的腐蚀；电导率值为10 μs/cm左右时，常呈现带浅坑的一般腐蚀[5,14]。图4示出各炼化企业绝热材料浸出液的电导率测试结果。可以看出，浸出液电导率超过100 μs/cm的样品有13种，占样品总数的27.7%；其中，5个复合硅酸盐板样品和2个硅酸铝管壳样品的浸出液电导率均超过100 μs/cm。硅酸铝针刺毯样品的浸出液电导率超过100 μs/cm的样品有3个，占总数(31种)的9.7%，其中，企业17的硅酸铝针刺毯浸出液电导率超过了1 000 μs/cm；岩棉板样品的浸出液电导率>100 μs/cm的有2个，占总数(3种)的66.7%。4个纳米气凝胶毡样品中仅有1个样品

的浸出液电导率超过100 μs/cm,CAS纳米微孔复合绝热毡的浸出液电导率均低于100 μs/cm。

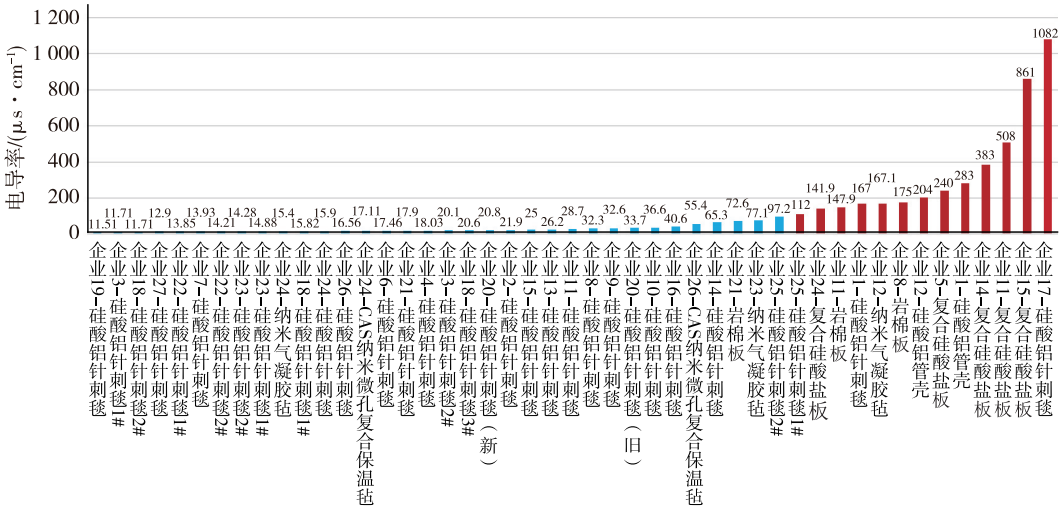


图4 不同企业绝热材料浸出液电导率

Fig.4 Electrical conductivity of insulating material leachate from different enterprises

整体来看,各类绝热材料浸出液电导率的大小顺序为:复合硅酸盐板>硅酸铝管壳>岩棉板>硅酸铝针刺毯/纳米气凝胶毡/CAS纳米微孔复合绝热毡。

2.2.3 浸出液离子含量

Cl^-和F^-易引起奥氏体不锈钢和双相不锈钢发生点蚀或应力腐蚀开裂,此外,Cl^-还会活化碳钢表面生成的铬化物钝化膜,引起碳钢表面的均匀腐蚀。按照标准ASTM C795-08(2023)中对Cl^-,F^-,Na^+,SiO_3^{2-}等离子含量的要求,47种绝热材料均满足要求,如图5所示,图中的编号1~47分别代表各炼化企业的绝热材料样品。

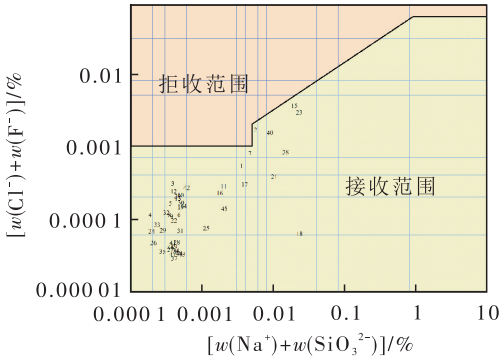


图5 各企业绝热材料浸出液腐蚀性离子结果对比(ASTM C795)

Fig.5 Comparison of corrosive ion results in insulating material leachate from various enterprises (ASTM C795)

按照ASTM C795-08(2023)中的要求,在浸出液中(Na^++SiO_3^{2-})>50 mg/L时,(Cl^-+F^-)<10 mg/L。不同企业绝热材料浸出液氯离子含量如图6所示。可以看出,有3家企业使用的复合硅酸盐板Cl^-浓度超过10 mg/L,占样品总数量(5种)的60%,剩余两家Cl^-浓度分别为8 mg/L和3.8 mg/L,均高于平均水平;企业1的硅酸铝管壳Cl^-浓度超过10 mg/L,其余企业所用绝热材料的Cl^-浓度均低于10 mg/L。

2.3 小结

综上,复合硅酸盐板绝热材料pH值不达标率达60%;3家企业使用的复合硅酸盐板浸出液Cl^-+F^-含量明显高于其他产品;5个复合硅酸盐板样品的浸出液电导率均超过100 μs/cm。企业最常用的硅酸铝针刺毯绝热材料浸出液电导率、Cl^-含量表现均较好,但不同供应商的绝热材料浸出液pH值相差较大。新型绝热材料方面,纳米气凝胶毡有67%样品的pH值低于7,其余指标表现均良好。需要注意的是,炼化企业绝热材料主要以硅酸铝针刺毯为主,而新型绝热材料应用规模较传统产品相对较小,本次测试样本数量相对有限。

3 总结和展望

针对市场上众多用于检测绝热材料腐蚀性的标准,将其在方法上进行了归类,主要划分为3类检测方法。其中ASTM C665-17(2017)、GB/T 11835—2016、GB/T 17393—2008等标准通过加速老化试验检测绝热材料腐蚀性。此过程可掌握腐蚀速率、选择性组合影响因素,加速腐蚀进程,进而完成对目标绝热材料的金属腐蚀性评估,

腐蚀结果呈现更为直观。其中，ASTM C1617-24给出了更为精密的定量评价试验方法，用于计算绝热材料浸出液针对碳钢的腐蚀速率。ASTM C692-13和ASTM C871-18(2023)给出的绝热材料腐蚀性能指标检测是通过测定绝热材料吸水性、浸出液pH值、浸出液电导率以及浸出液腐蚀性离子含量等各项腐蚀性能指标，参照经验标准值或通过相互对比间接反映绝热材料对金属的腐蚀性。检测方法更加便捷快速，适合需要快速得到绝热材料腐蚀性相关数据的情况。

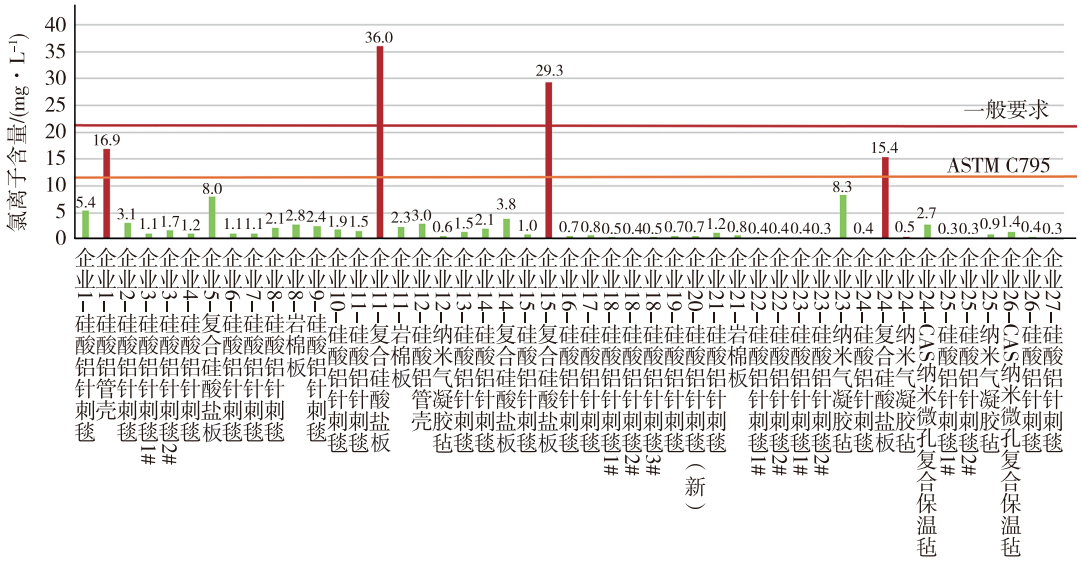


图6 不同企业绝热材料浸出液氯离子含量

Fig.6 Chloride ion content in insulating material leachate from different enterprises

通过系统梳理现行相关标准，采用、整合部分标准中的分析方法，针对6类绝热材料的浸出液腐蚀性能指标开展了系统性实验室研究，有效弥补了传统研究中对新型绝热材料浸出液腐蚀性能关注不足、相关数据匮乏的短板。为多种类材料的安全应用与性能评估提供了重要的试验依据与技术支撑。企业采购前也可利用此方法对收到的绝热材料进行参数检测核验，确保绝热材料关键指标合格。针对不同需求可选择或组合适用的检测方法。

以上标准的检测方法和评估结果更多依赖于理论分析和短期试验，缺少长期动态跟踪监测，忽略实际工况下腐蚀影响因素的多样性和协同性，在腐蚀性评估方面缺乏足够的实际使用数据，使评估结果与实际情况存在一定的偏差。行业内需尽快建立起完善的绝热材料腐蚀性数据库，为评估工作提供丰富的数据参考。通过数据库可实现全面、准确的材料性能数据和历史案例信息的实时抓取，提高评估的效率和准确性；此外，探索通过大数据技术训练模型，用于分析材料成分、结构、环境因素等与腐蚀性之间的关系，快速、准确预测材料耐腐蚀性，不仅为炼化企业在材料选型上提供前瞻性指导，还可通过调整优化绝热材料性能定制更适用的绝热材料。

参考文献：

[1] 姜莹洁，巩建鸣，唐建群.保温层下金属材料腐蚀的研究现状[J].腐蚀科学与防护技术，2011，23(5)：381-386.
JIANG Y J，GONG J M，TANG J Q.Current status of research on corrosion of metallic materials beneath insulation coat[J].Corrosion Science and Protection Technology，2011，23(5)：381-386.

[2] 蒋林林，张彦军，张红磊，等.保温材料浸出液成分及腐蚀性分析[J].天然气与石油，2018，36(5)：80-85.
JIANG L L，ZHANG Y J，ZHANG H L，et al.Analysis of components and corrosivity of aqueous extractfrom thermal insulation materials[J].Natural Gas and Oil，2018，36(5)：80-85.

[3] 安洋.不锈钢及碳钢在工业循环冷却水中腐蚀行为的研究[D].天津：天津大学，2010.
AN Y.Corrosion behavior of stainless steel and carbon steel in industrial circulating cooling water[D].Tianjin：Tianjin University，2010.

[4] 许立铭，罗逸，董泽华，等.钙离子对碳钢在油田污水中腐蚀的影响[J].油田化学，1996，13(2)：66-69.
XU L M，LUO Y，DONG Z H，et al.The influence of

calciumions on corrosion of mild carbon steel in oilfield produced water[J]. Oilfield Chemistry, 1996, 13(2):66-69.

[5] 翁永基.钢质管道在受潮保温材料中的腐蚀[J].腐蚀与防护,1989(3):7-9.
WENG Y J. Corrosion of steel pipes in moisture insulation materials [J]. Corrosion & Protection, 1989(3):7-9.

[6] PARROTT W G. Two corrosion under insulation failure case studies [J]. Loss Prevention Bulletin, 2016(TN.250):2-6.

[7] NACE International. Systematic approach to controlling corrosion under thermal insulation and fire protection materials:NACE SP0198—2017[S].

[8] CAINES S, KHAN F, SHIROKOFF J. Analysis of pitting corrosion on steel under insulation in marine environments [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6):1466-1483.

[9] 郑莹莹,邹妍,王佳.海洋环境中锈层下碳钢腐蚀行为的研究进展[J].腐蚀科学与防护技术.2011, 23(1):93-98.
ZHENG Y Y, ZOU Y, WANG J. Research progress on corrosion of carbon steels under rust layer in marine environment [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(1):93-98.

[10] 黄锦花,李自刚,钱余海.低合金耐海水腐蚀钢在模拟腐蚀环境下的耐蚀性能研究[J].上海金属, 2006, 28(4):6-8.
HUANG J H, LI Z G, QIAN Y H. Accelerated corrosion behavior of seawater corrosion resistant Q345C-NHY3 steel in artificial simulated environments[J]. Shanghai Metals, 2006, 28(4):6-8.

[11] 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.

[12] AUNG N N, WAI W K, TAN Y J. A novel electrochemical method for monitoring corrosion under insulation [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2006, 53(3):175-179.

[13] DE SOUSA F V V, DA MOTA R O, QUINTELA J P, et al. Characterization of corrosive agents in polyurethane foams for thermal insulation of pipelines [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(27):7780-7785.

[14] SHEKARI E, KHAN F, AHMED S. Probabilistic modeling of pitting corrosion in insulated components operating in offshore facilities [J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, 2017, 3(1):011003.

[15] 封金鹏,冯霞,黄强.纳米孔超级绝热材料研究现状及进展[J].宇航材料工艺,2014,44(1):24-28.
FENG J P, FENG X, HUANG Q. Research status and development of nanoporous superthermal insulation material[J]. Aerospace Material & Technology, 2014, 44(1):24-28.

[16] POCO J F, SATCHER JR. J H, HRUBESH L W. Synthesis of high porosity, monolithic alumina aerogel [J]. Joumal of Non-Crystalline Solids, 200l, 285(1/2/3): 57-63.

[17] 穆锐,刘元雪,欧忠文,等.气凝胶复合材料的制备及保温隔热应用进展[J].材料导报,2024,38(14): 295-308.
MU R, LIU Y X, OU Z W, et al. Progress in aerogel composite's preparation and thermal insulation application [J]. Materials Reports, 2024, 38 (14): 295-308.

[18] 张尚武,陈叔平,陈联,等.真空失效下变密度多层绝热传热性能试验研究[J].压力容器,2024, 41(9):23-30.
ZHANG S W, CHEN S P, CHEN L, et al. Experimental study on the insulation performance of variable density multilayer insulation under vacuum failure[J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(9):23-30.

[19] DORCHEH A S, ABBASI M H. Silica aerogel, synthesis, properties and characterization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 199(1/2/3): 10-26.

[20] REIM M, REICHENAUER G, KÖRNER W, et a1. Silica-aerogel granulate-structural, optical and thermal properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 350:358-363.

作者简介:王奕璇(1994),女,工程师,主要从事炼油化工腐蚀与防护工作,通信地址:471000河南省洛阳市涧西区河洛路6号,E-mail:wangyixuan.segr@sinopec.com。

本文引用格式:
王奕璇,段永锋,李晓炜.炼化装置绝热材料腐蚀评价方法与性能研究[J].压力容器,2025,42(12):40-47.
WANG Yixuan, DUAN Yongfeng, LI Xiaowei. Corrosion evaluation methods and performance study of insulating materials in refining units[J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(12):40-47.