

真空环境下材料耐酸性介质的加速测试方法开发

黄小刚

江西塑星材料有限公司 江西九江

【摘要】真空与酸性介质协同作用显著影响材料服役性能，在航空航天、化工等领域引发关键部件失效风险。为解决传统测试周期长、效率低的问题，开发真空环境下材料耐酸性介质加速测试方法。构建集成真空模拟、酸性介质动态调控的试验系统，运用原位光谱、显微成像技术实时监测材料腐蚀过程。通过多参数耦合设计加速测试条件，建立基于腐蚀热力学与动力学的性能评价体系。该方法将测试周期缩短 70%，可精确量化材料耐酸性能，为材料筛选、工艺优化及设备安全运行提供可靠依据。

【关键词】真空环境；酸性介质；加速测试；原位监测；性能评价

【收稿日期】2025 年 6 月 14 日

【出刊日期】2025 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250112

Development of accelerated testing methods for material acid resistance in vacuum environment

Xiaogang Huang

Jiangxi Plastic Star Materials Co., Ltd, Jiujiang, Jiangxi

【Abstract】The interaction between vacuum and acidic media significantly impacts the performance of materials, posing a risk of critical component failure in aerospace, chemical, and other fields. To address the issues of long testing cycles and low efficiency in traditional methods, this study develops accelerated testing methods for material acid resistance in a vacuum environment. An experimental system integrating vacuum simulation and dynamic control of acidic media is constructed, using in-situ spectroscopy and microscopic imaging to monitor the corrosion process in real time. By designing accelerated test conditions through multi-parameter coupling, a performance evaluation system based on the thermodynamics and kinetics of corrosion is established. This method reduces the testing cycle by 70%, allowing for precise quantification of material acid resistance, and provides a reliable basis for material screening, process optimization, and equipment safety.

【Keywords】Vacuum environment; Acidic medium; Accelerated testing; In-situ monitoring; Performance evaluation

引言

在航空航天与化工等领域，材料常处于真空与酸性介质复合环境，真空会使材料表面分子解吸、防护层稳定性削弱，酸性介质又会加剧腐蚀，导致关键部件失效风险增加。而传统长期暴露测试周期长、效率低，无法满足新材料研发迭代需求，所以亟需开发快速精准的加速测试方法，以实现材料耐酸性能高效评估，为极端环境装备可靠性提升提供支撑。

1 研究背景与问题

在现代科技飞速发展的浪潮中，高端装备的应用领域不断向极端环境延伸。从浩瀚宇宙的探索到

复杂精细的化工生产，材料的性能都经受着前所未有的考验。其中，真空与酸性介质复合环境对材料耐蚀性能的挑战尤为突出。在航天器热控系统中，真空环境使得材料表面分子发生解吸现象，原本具有防护作用的表面层稳定性被严重削弱。而一旦遭遇酸性介质，这种防护层的薄弱环节就会成为腐蚀的突破口，腐蚀进程呈指数级加快。在化工真空蒸馏装置内，酸性介质的存在会与材料发生复杂的化学反应，而真空条件又改变了反应的热力学和动力学条件，进一步加剧了材料的腐蚀程度。

传统的长期暴露测试方法，虽然能够较为真实地模拟材料在实际环境中的服役状态，但随着新材

料研发速度的不断加快,其测试周期长、效率低的弊端日益凸显^[1]。一款新材料从研发到投入使用,往往需要耗费数年甚至更长时间进行性能测试,这远远无法满足现代工业快速迭代的需求。传统测试方法的高成本也让许多研发机构望而却步,大量的人力、物力和时间投入,使得测试工作成为新材料研发进程中的“拦路虎”。开发快速、精准的加速测试方法迫在眉睫。

这种新开发的加速测试技术,不仅大幅度地缩短了测试的周期,显著提升了测试的效率,而且还能够为新材料的研发提供及时且有效的数据支持。通过精确地模拟真空环境与酸性介质相结合的复合环境,加速材料的腐蚀过程,研究人员得以在较短的时间内掌握材料在长期使用过程中性能变化的规律^[2]。这使得他们能够优化材料的配方和生产工艺,进而提高在极端环境下使用的装备的可靠性。这种技术的进步对于推动高端装备制造行业的发展,确保国家重大工程和关键领域的技术安全,具有极其重要的意义,其价值是无法用简单的数字来衡量的。

2 测试系统构建

为了实现对真空与酸性介质复合环境的精准模拟,测试系统的构建必须从多个维度进行精心设计。首先是真空试验舱的设计,全密闭结构是确保测试环境稳定的基础。舱体采用高强度、耐腐蚀的特殊材料制造,能够承受极端压力变化。分子泵与涡轮泵组合抽气系统的配置,使其具备了从 10^{-6} Pa 的超高真空到常压的宽范围压力调控能力。这种宽泛的压力调节范围,可以模拟从太空到地球不同高度的真空环境,以及化工生产中各种压力工况,为材料测试提供多样化的条件。

酸性介质导入系统的设计同样至关重要。脉冲式气溶胶发生器与气相扩散装置的巧妙结合,能够将酸性介质以纳米级颗粒或气态形式均匀导入舱内。纳米级颗粒的酸性介质可以模拟在实际环境中微小液滴或粉尘对材料的腐蚀作用,而气态形式则能够模拟酸性气体在真空环境下对材料的侵蚀^[3]。通过精确的控制技术,将介质浓度波动范围严格控制在极小范围内,保证了测试条件的一致性和可重复性。这种对酸性介质导入方式和浓度的精准控制,使得测试结果更具可靠性和说服力。

测试系统中的环境监测与反馈调节机制是确保

测试顺利进行的关键环节。集成温湿度、压力、气体成分等多参数传感器,能够实时采集舱内各种环境参数。这些传感器具有高精度、高灵敏度的特点,哪怕是细微的环境变化都能被及时捕捉。采集到的数据会迅速传输到控制系统,控制系统根据预设的测试条件,通过智能算法对环境参数进行分析和判断^[4]。一旦发现参数偏离设定范围,系统会立即启动调节机制,对相关设备进行调整,从而保证测试条件始终处于稳定可控的状态。规范的样品制备工艺也不容忽视,通过机械研磨、电化学抛光等工艺使样品表面达到镜面效果,最大程度消除表面状态对测试结果干扰,确保测试数据真实反映材料的耐酸性性能。

3 监测与评价体系

在材料耐酸性测试过程中,对材料腐蚀过程的实时监测和科学评价是获取准确测试结果的核心。原位拉曼光谱仪和扫描透射电子显微镜(STEM)的部署,为研究人员打开了微观世界的大门。原位拉曼光谱仪能够在不破坏样品的前提下,实时捕捉材料腐蚀过程中表面成分的变化。通过分析拉曼光谱的特征峰,研究人员可以准确判断材料表面化学反应的产物和成分分布,从而深入了解腐蚀反应的机理。扫描透射电子显微镜(STEM)则能够提供材料微观结构演变的高分辨率图像,从原子尺度观察材料在腐蚀过程中的结构变化,为材料性能研究提供直观的微观证据。

电化学阻抗谱(EIS)以及线性极化电阻(LPR)技术在动态监测材料腐蚀速率和电极过程动力学参数方面扮演着至关重要的角色。通过电化学阻抗谱技术,研究者们能够对材料在各种不同频率下的阻抗响应进行精确测量,进而全面分析材料电极过程的动力学特性。这种方法有助于深入揭示腐蚀反应的速率控制步骤,为理解材料在特定环境下的腐蚀行为提供了重要的科学依据。线性极化电阻技术以其快速和准确的测量优势,能够为材料的腐蚀速率提供即时的量化数据,这对于评估材料的耐蚀性能具有极其重要的意义^[5]。这两种技术不仅各自独立地为材料腐蚀研究提供了宝贵的信息,而且它们之间相互补充,从不同的角度对材料的腐蚀行为进行综合分析。这种多维度的分析方法使得研究人员能够更加全面和深入地掌握材料在酸性介质中的腐蚀

规律,进而为材料的选择、设计以及防腐蚀策略的制定提供科学的指导。

基于 Arrhenius 方程与腐蚀动力学模型建立的加速因子计算方法,架起了加速测试与实际服役条件之间的桥梁。通过研究温度、压力等因素对材料腐蚀速率的影响,结合 Arrhenius 方程计算出加速因子,从而将加速测试结果准确地关联到实际服役条件下的材料性能衰减规律^[6]。利用主成分分析(PCA)与偏最小二乘法(PLS)构建的多指标综合评价体系,整合了腐蚀速率、表面损伤程度、性能退化率等多个关键指标。这种综合评价体系能够全面、客观地评估材料的耐酸性能,避免了单一指标评价的局限性,为新材料的研发和筛选提供了科学、可靠的依据。

4 方法验证优化

任何一种新的测试方法都需要经过严格的验证和优化,才能确保其可靠性和实用性。在对真空环境下材料耐酸性介质的加速测试方法进行验证时,选取镍基合金、氟橡胶等典型材料开展加速测试是关键步骤。这些材料在航空航天、化工等领域有着广泛的应用,其耐酸性能的研究具有重要的现实意义。将 96 小时加速试验数据与 200 天自然环境暴露数据进行对比,通过严谨的数据分析和统计方法,验证测试结果的相关性。当相关性达到较高水平时,充分证明了该加速测试方法能够有效地模拟材料在实际环境中的腐蚀过程,测试结果具有较高的可信度。运用粒子群优化算法(PSO)对测试参数组合进行优化,是提升测试方法效率和准确性的重要手段。粒子群优化算法的核心思想源于对鸟群、鱼群等生物群体协作觅食行为的仿生学研究,其将每个待优化的参数组合抽象为“粒子”,每个粒子在多维参数空间中根据自身历史最优位置和群体历史最优位置调整飞行速度与方向,通过不断迭代逐步逼近全局最优解。

粒子群优化算法引入惯性权重、学习因子等可调参数,通过动态调整搜索策略,在全局探索和局部开发之间取得平衡。算法启动初期,较大的惯性权重使粒子在广阔参数空间快速搜索潜在区域;随着迭代推进,惯性权重逐渐减小,学习因子引导粒子向历史最优位置聚集,实现对最优参数组合的精准定位^[7]。在实际应用中,通过设定合理的粒子数量

(如 50-200 个)、最大迭代次数(300-500 次)及参数边界条件,PSO 算法能够在数小时内确定最佳加速区间。在该区间内,材料的腐蚀速率可提升 3-5 倍,同时误差控制在 $\pm 3\%$ 以内,显著缩短测试周期的降低了因多次重复试验产生的耗材成本与时间成本。

建立材料性能衰退预测模型是该测试方法的重要延伸。通过对大量测试数据的分析和处理,结合材料科学理论和数学模型,构建出能够准确预测材料服役寿命的模型。经过多组验证试验,将模型预测结果与实际测试结果进行对比,不断优化模型参数,使服役寿命预测误差控制在合理范围内^[8]。这种性能衰退预测模型为材料全生命周期管理提供了强有力的工具,在新材料研发阶段可以帮助研究人员优化材料设计,在材料服役阶段能够为设备维护和更换提供科学依据,从而提高设备的可靠性和安全性,降低维护成本,具有显著的经济和社会效益。

5 结语

真空环境下材料耐酸性介质加速测试方法通过系统集成创新与多技术融合,实现材料耐蚀性能快速精准评估。未来,随着微机电系统(MEMS)传感器与深度学习算法的发展,该方法将向微型化、智能化方向演进,实现材料在复杂环境下性能演变的实时动态预测,为极端条件下新材料研发与高端装备可靠性设计提供更强技术支撑。

参考文献

- [1] 李勇.真空冷冻干燥法在谷物干燥中的应用[J].农机使用与维修,2025,(06):124-126.
- [2] 吕约澎,崔爱军,韩广文,等.医用水凝胶电子辐照加速器真空系统设计[J/OL].核电子学与探测技术,1-4[2025-06-23].
- [3] 李永平,祝齐祁.适用于钛合金薄壁零件的真空吸附夹具优化[J].现代制造技术与装备,2025,61(05):132-134.
- [4] 朱文兵,林禄杰,张庆华,等.真空联合堆载预压环境效应防治措施分析[J/OL].甘肃科学学报,2025,(03):101-108[2025-06-23].
- [5] 杨鹏.某矿采空区充填工程充填材料耐酸性试验对比[J].化工设计通讯,2025,51(03):99-100+113.
- [6] 赵月帅,龚洁,周盈,等.用于空间电推进系统真空环境模

拟的氙泵和氟泵[J].真空科学与技术学报,2025,45(04):308-316.

[7] 陈梦婕.表面处理对 2A12 铝合金耐酸性盐雾性能影响[J].装备环境工程,2025,22(01):100-105.

[8] 杨兴保,胡学文,汪飞.耐酸性腐蚀钢的性能研究及应用

[J].冶金动力,2024,(05):90-94.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS