

多功能应力腐蚀试验机实验技术与方法开发

裴恺, 王慧, 朱勤为, 王彬, 万春阳, 陈琦峰, 孙国峰, 崔喆珉

(浙江国检检测技术股份有限公司, 浙江省嘉兴市 314300)

摘要: 应力腐蚀由于具有不易被察觉的特点, 常常会对设备带来灾难性的毁坏。为避免应力腐蚀的影响, 工程上常参考应力腐蚀试验测量结果对危险点进行管控。在主流的应力腐蚀裂纹扩展速率测试技术中, 直流电压降技术测量结果准确性较好。但该技术面临着信号容易受到干扰, 试验环境精准控制的问题。针对信号问题, 采用多个公频周期内积分的方式提升信号精度, 并使用过零加热和固态继电器电桥翻转电流技术减少杂乱信号。利用背压阀、蠕动泵、气体质量流量计和各类传感器, 结合计算机软件实现环境参数的实时反馈与控制, 保证试验环境稳定。以此方案开发的多功能应力腐蚀试验机稳定性、可靠性均有提高, 并在实际项目中得到验证与应用。

关键词: 应力腐蚀试验机; 裂纹长度; 直流电压降技术; 改进; 优化

Development of Experimental Technology and Method for Multi-functional Stress Corrosion Testing Machine

PEI Kai, WANG Hui, ZHU Qinwei, WANG Bin, WAN Chunyang

(Zhejiang Guojian Testing Technology Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

Abstract: Stress corrosion, due to its subtle and difficult-to-detect nature, often leads to catastrophic damage to equipment. To mitigate the effects of stress corrosion, engineers frequently refer to the results of stress corrosion tests to manage and control critical points. Among the mainstream testing techniques for stress corrosion crack propagation rate, the direct current voltage drop technique demonstrates relatively high accuracy. However, this technique faces challenges such as susceptibility to signal interference and the need for precise control of the testing environment. To address the signal issues, we employ integration over multiple mains frequency cycles to enhance signal precision, and utilize zero-crossing heating and solid-state relay bridge current flipping techniques to reduce noise signals. By utilizing back pressure valves, peristaltic pumps, gas mass flowmeters, and various sensors, combined with computer software, we achieve real-time feedback and control of environmental parameters, ensuring a stable testing

environment. The multifunctional stress corrosion testing machine developed based on this approach has improved stability and reliability, and has been validated and applied in practical projects.

Keywords: Stress corrosion testing machine; Crack length; DC voltage drop technology; improvement; optimization

0 引言

应力腐蚀是一种危害极大的环境腐蚀，通常是由应力+腐蚀介质引起的穿晶腐蚀^[1]。由于有腐蚀产物覆盖且宏观特征不明显，应力腐蚀通常不易被发现，具有一定的隐蔽性^[2-3]。在长期的应力腐蚀情况下，零部件会突然发生脆性断裂对于压力容器^[4]、管道^[5]、钢架^[6]等结构具有极大安全隐患。为避免灾难性的毁坏发生，应力腐蚀裂纹扩展速率测试技术应运而生^[7]。该技术主要用于评估材料在相应应力腐蚀环境下裂纹扩展情况，为工程设计提供参考，保证产品安全稳定运行。

应力腐蚀裂纹扩展速率测试技术有多种，恒位移法、恒载荷法、慢应变速率法、直流电位降法、声发射技术等^[8-9]。而国内外有研究表明，采用直流电压降(DCPD)技术测量的应力腐蚀裂纹长度的准确性较好。但该技术面临着输入、输出信号不稳定，信号容易受到干扰，试验环境精准控制等问题。为解决上述问题，需要在检测方法和检测设备上进行优化和改进。为此基于现有设备（上海直树 SCF-50KN-PWR）进行实验技术与方法开发。

1 设备改进与方案优化

1.1 整体方案与技术路线

通过有限元模拟手段确定裂纹长度、应力强度因子、外载荷与电源信号的关系，得到相应关系方程，进一步以此关系式为基础进行设计。针对信号干扰问题，利用过零加热的方式，减少杂乱信号。此外，采用搭建固态继电器电桥翻转电流方法，增强所需信号强度。对于信号不稳定问题，由原先基于单个公频周期得到电压降信号，优化到 10 个公频周期内积分得到电压降信号，得到的信号更加精准。整体实施方案如图 1 所示。

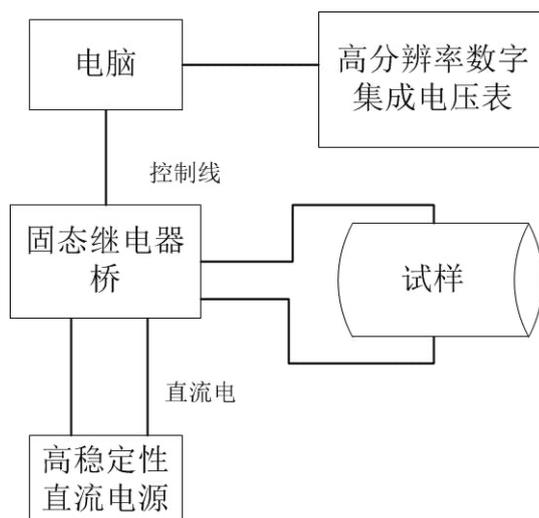


图1 DCPD方法测量原理示意图

1.2 高温高压水化学控制回路系统设计

由于应力腐蚀对环境有一定特殊要求，故需要搭建高温高压水化学控制回路系统，同时实时监控回路中温度、电压、溶解氧、pH 值等参数。该系统主要分为：温度控制、高压控制、水化学环境控制、应力加载控制、数据采集处理系统，具体实施过程如下：

(1) 温度控制：使用循环加热装置对整个回路进行加热，并通过温度传感器时刻监控温度情况，及时做出调整，确保温度基本恒定。

(2) 高压控制：使用背压阀，可供实验装置在 0~25Mpa 范围内自动调剂压力，满足不同实验条件需求。并在阀口前加入了冷却系统，防止高温对阀体的破坏，延长设备使用寿命。

(3) 水化学环境控制：设置不同化学药剂溶液容器，通过蠕动泵将药剂按需加注到水回路系统中。氧气、氢气、氩气等气体则由气体质量流量计进行调配控制。

(4) 应力加载控制：采用软件编程进行可视化控制，使得万能拉伸试验机可实现 $1 \times 10^{-8} \sim 10 \text{mm/s}$ 不同速率的移动以及提供最大 20kN 的外载荷（拉伸或压缩）的精准控制。同时，还可以对波形、频率、K 值、载荷比（R）等进行设置，可以满足恒定应力强度因子（K）、升降 K 模式等实验要求。

(5) 数据采集处理系统：设计软件利用计算机上的 GPIB 接口与设备上的 DCPD 系统进行信息传输，收集试验设备上的电流、电压、温度、压强、pH 值等信息（图 2 所示）。软件通过这些相关信息，利用关系式计算得到相应环境下应力腐蚀裂纹长度情况，设定每隔 0.1 秒测量一次即可实现实时监控。对于需要恒定应力强度因子（K）、升降 K 模式的试验条件，软件利用计算机网口与万能拉伸试验机的加载系统连接，通过参数进行控制。控制参数则由软件根据实时裂纹长度，计算得到相应参数，并传输给万能拉伸试验机载荷（图 3 所示）。

Rec#	No.	Time(h)	V	Vr	a/W	V+	V-	Vr+	
3852	25/500	961.07...	100131	89863	0.45071	-111950	88313	-106737	7
3852	26/500	961.08...	99825	89731	0.45072	-111454	88196	-106398	7
3852	27/500	961.08...	100022	89770	0.45072	-111496	88548	-106542	7
3852	28/500	961.08...	99625	90207	0.45064	-111144	88107	-107040	7
3852	29/500	961.08...	100154	90100	0.45064	-112429	87878	-107719	7
3852	30/500	961.08...	100050	89838	0.45065	-111842	88257	-106756	7
3852	31/500	961.08...	99942	90612	0.45060	-111708	88176	-107058	7
3852	32/500	961.08...	100639	89883	0.45063	-111119	90159	-105704	7

3851: Kmax=24.96, V标准偏差=400, Vr标准偏差=356

图 2 裂纹扩展在线数据采集

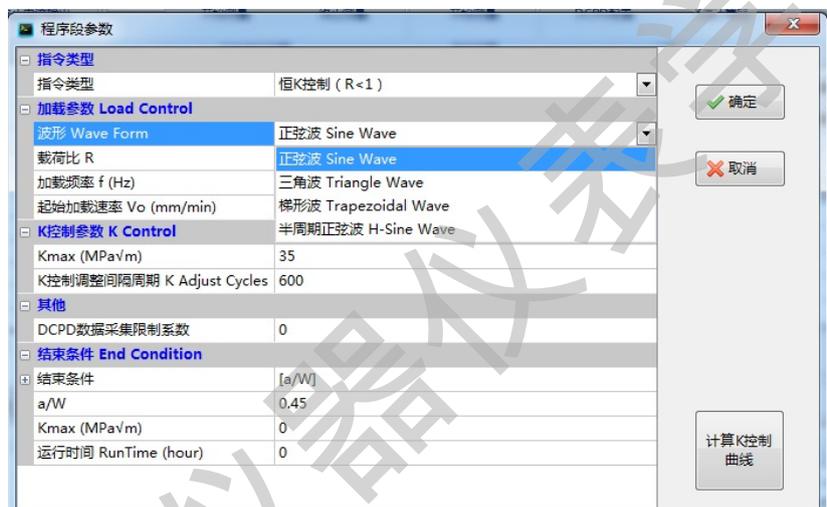


图 3 裂纹扩展程序编辑

2 试验方案设计与过程

2.1 试验整体流程

整个试验流程如图 4 所示：（1）第一步对 CT 试样在空气中进行预制裂纹，获得预制疲劳裂纹长度通常为 1-1.5mm。（2）第二步完成高压釜、回路环境设置等（3）第三步将 CT 试样在高压釜内水（310℃、15Mpa 的去离子水）中进行过渡。（4）第四步实时监控数据，直至试验结束，对实验数据进行处理。

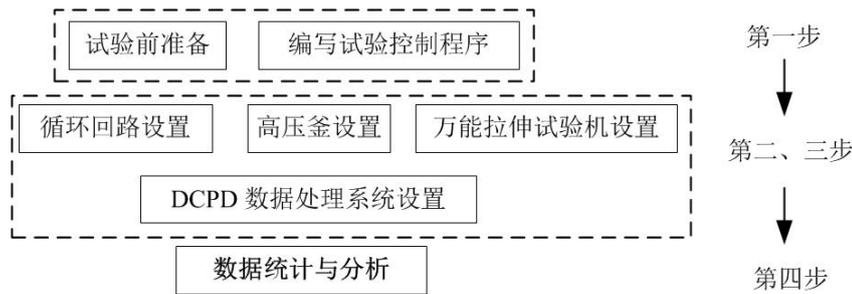


图 4 应力腐蚀裂纹扩展速率试验流程图

2.1 试验前准备

根据应力腐蚀标准加工出带裂纹引导侧槽的 CT 试样，同时完成对原始数据的记录，包括试样件的初始 a/w 、质量、尺寸等。随后将测量线（电压测量线、电压基准线）以焊接形式连接到试样上。确保测量线连接牢靠稳固后，将试样安装到万能拉伸试验机上，并利用绝缘片进行绝缘处理（空气中使用四氟乙烯材料，高压釜中使用氧化锆陶瓷材料）。

2.2 编写试验控制程序

试验总共分为两个阶段，第一阶段在空气中，主要是为了通过疲劳载荷在试样上产生一道原始裂纹，为后续应力腐蚀创造条件，疲劳载荷通过公式 $K_{max}=20\text{Mpa}\sqrt{m}$ 得到，部分程序如表 1 所示。第二阶段在高压釜（高温高压水环境中）进行应力腐蚀，试样前期加载正弦波型疲劳载荷，后续加载变频率、变周期的梯型波疲劳载荷，实现应力腐蚀（ $R=1$ ），部分程序如表 2 所示。

表 1 空气中预制裂纹程序

恒 K 控制	Wave form	R	f	V0	Kmax	Kadjust Cycle	End Condition a/W
$R < 1$	sine	0.3	1	2	20	300	0.423
$R < 1$	/	/	/	2	25	300	0.4320

表 2 高温高压水环境中应力腐蚀裂纹扩展程序

恒 K 控制	Wave form	R	f	V0	Kmax	Kadjust Cycle	End Condition a/W
$R < 1$	sine	0.8	0.1	2	20	300	0.452
$R = 1$	/	/	/	2	25	600	0.490

2.3 循环回路设置

由于试验环境为高温高压，而循环回路管道各个连接部位均由焊接方式连接，具有一定安全隐患，故试验前需进行气密性检查，方法如下：在各连接位置涂抹肥皂水，查看是否有气泡产生，有则表明有漏气、漏液情况。同时还需对监测水质情况的仪器仪表进行检查与校准，确保其准确性。

2.4 高压釜设置

高压釜使用前首先需对设备完整性进行检查，确保高压釜没有破损、密封面完整。随后进行清洗，共分为两步：第一步使用酒精清洗，除去油污；第二步用超纯水进行清洗，保证高压釜内无其他杂质（测量釜内水质的电导率 $<0.1\mu\text{c}/\text{cm}$ 即为合格）。接着利用循环泵和树脂床，对整个循环回路进行清洗和净化，直至高压釜出口水质电导率与进口水质相近。然后进行加压，将高压泵打开，同时调节背压阀，使高压釜内压力达到指定值，并保压 30 分钟，期间对高压管路进行反复检查，确保设备无泄漏。最后打开高压泵以及各回路的阀门，慢慢使整个系统的压力达到指定值，打开加热器，等待试验设备达到设定温度。

2.5 万能拉伸试验机设置

使用万能拉伸试验机前，检查并确认设备电源连接是否正常、软件与设备通信是否正常、载荷和位移传感器是否正常。随后打开设备，等待软件指令控制。

2.6 DCPD 数据处理系统设置

将 DCPD 仪表打开，同时通过应力腐蚀试验软件对电脑与仪表通讯连接是否正常进行检查，检查无误后，运行 DCPD 采集系统，保证其正常工作。

2.7 数据统计与分析

对收集到的信息进行处理，得到裂纹扩展曲线、裂纹扩展路径等。

3 经济及社会效益分析

通过对设备改进与测试方案优化，直流电压降法应力腐蚀裂纹扩展速率测定试验系统的可靠性、试验数据准确性得到了提升。并已在与上海交通大学合作的核电相关科研测试项目中得到验证与应用^[10]。近年来受到碳中和、能源危机等情况的影响，大量核电项目获批，之后将有大量材料、零部件需要进行应力腐蚀试样。本研发与改进的多功能应力腐蚀试验机，将为核电企业群，在核相关设备的可靠性设计、腐蚀与防护等方面提供实验数据支撑，为推动核电产业集群行业技术创新及可持续发展提供软硬件保障。

参考文献:

- [1] 李东兴,曹晗,高俊宣,等. 模拟压水堆一回路环境下冷应变对 321 不锈钢高温电化学行为和应力腐蚀开裂行为的影响[J]. 原子能科学技术,2024,58(8):1671-1678.
- [2] 程博,安喆,张让威,等. 航空发动机管路应力腐蚀断裂分析及防治措施[J]. 航空发动机,2024,50(4):169-174.
- [3] 何祯,拜斌,张小明,等. 航空用 6061 铝合金恒载荷应力腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2023,44(2):64-69.
- [4] 招晶鑫,淡振华,孙中刚,等. 增材制造 316L 不锈钢应力腐蚀研究进展[J]. 材料工程,2023,51(5):1-13.
- [5] 刘雄伟,李芳,龙武,等. P110 油管应力腐蚀开裂失效的原因[J]. 腐蚀与防护,2024,45(7):108-113.
- [6] 朱婷,孟不凡,赵建平. 湿 H₂S 环境下 X80 管线钢焊接接头应力腐蚀试验研究[J]. 特种设备安全技术,2024(1):61-64.
- [7] 未来,迟成芳,姚长慧. C 环应力腐蚀试验机的研制与应用[J]. 工程与试验,2015,55(3):86-88.
- [8] 周成,刘海滨,褚言会,等. S32168 在氯离子环境中的应力腐蚀试验研究[J]. 压力容器,2015,32(5):18-23,49.
- [9] 黄毓晖,司晓法,翁硕,等. 疲劳损伤对核电汽轮机焊接转子接头应力腐蚀开裂敏感性的影响[J]. 焊接学报,2020,41(4):12-19,37.
- [10] 陆辉,杜东海,陈凯,等. 高温水中氯离子对 316L 不锈钢应力腐蚀裂纹扩展速率的影响[J]. 原子能科学技术,2015(10):1849-1854.