

材料的环境行为与失效机理*

关键词 材料, 腐蚀, 断裂, 失效

1 首席科学家

韩恩厚 中国科学院金属研究所研究员, 博士生导师, 美国麻省理工学院兼职研究员。在材料腐蚀与断裂的机理与控制方面做出了出色的工作。从断裂化学角度, 首次建立了描述扩展着的腐蚀疲劳裂纹内与裂纹尖端化学和电化学条件的两维数学模型, 创立了相应参量的连续测量技术。这是目前国际上惟一可以连续监测到和计算出扩展着的裂纹内及裂尖 pH 值和电极电位分布的方法。建立了可囊括多个理论与实验模型的非线性疲劳累积损伤理论模型; 提出了疲劳强度模糊可靠性设计方法学; 建立的管道损伤评价方法, 已成为我国在该领域的行业规范, 且优于国外的相应规范, “对保证管道的科学化管理和运行具有巨大的经济和社会效益”。主持并完成成果 10 余项, 发表论文 50 余篇。在全国性学术大会上做特邀报告 5 次。

2 科学内涵及意义

2.1 意义

材料的失效是材料与环境交互作用的结果。材料环境失效事故的隐患普遍存在, 失效造成的损失和后果十分严重。据统计, 发达国家每年因材料腐蚀、断裂和磨损而付出的代价各约占国民经济总产值的 4%, 其中约三分之一是可以避免的。在我国设备带“病”运行现象普遍, 失效监测系统落后, 已经发生过多起灾难性事故。材料环境失效产生的损失比发达国家严重得多。

因此, 从潜在的重大环境失效问题中抽出共性

的关键科学问题, 集中力量进行攻坚, 既是材料科学发展的必然, 又是目前产业界的迫切需要, 更是资源有效利用和经济社会可持续发展的保证。

2.2 总体设想

该项目着重研究在自然环境与典型特殊环境下的材料行为, 针对目前存在的共性关键科学问题, 从宏观、细观和微观方面探讨材料在复杂环境下的性能演化、多因素之间的交互作用原理以及失效的规律、机制和模型, 提出评价材料环境损伤的性能指标体系和科学使用材料的指导准则, 建立以材料特性为基础的有效的早期损伤检测技术、可靠的安全评估方法, 并提出先进的延寿技术, 为材料和构件环境失效事故的准确诊断、可靠预测、有效预防和性能恢复提供系统的理论、技术和方法。

2.3 关键科学问题

材料环境行为研究的最终目的是通过改进和提高材料的使用性能, 得到可靠的和较长的使用寿命。从目前国内外的发展情况看, 以下三个方面是制约本学科发展的亟待解决的关键科学问题。

(1) 环境因素与材料交互作用的非线性耦合理论。这种交互作用具有非线性、开放性的特征, 必须使用现代基础科学的新成就加以研究与描述。这里, 将以力学/化学/材料的交互作用原理为重点。

(2) 材料在环境中损伤演化的微细观理论。利用现代分析测试手段, 研究材料的形变局部化和腐蚀局部化与它们之间的交互作用过程(如裂纹顶端材料在原子尺度上的变化、裂纹尖端周围局部环境条件的变化过程以及在位错、原子、分子水平上材料与环境的交互作用行为等)、腐蚀电化学反应

* 收稿日期: 2001 年 8 月 23 日

动力学步骤、薄膜液下材料腐蚀损伤过程的动力学、双电层周围材料/溶液界面的动态变化过程、微裂纹的形成、联接和长大动力学过程等。

(3) 材料环境行为的模型与寿命预测和控制理论。当局部应力或化学驱动力大于原子键合力时微裂纹形成或微孔蚀坑形成。建立孔蚀形成与扩展的动力学模型、短裂纹的扩展与多裂纹的联接模型、复杂环境中材料与构件寿命预测模型、以腐蚀动力学为基础的日历寿命评估模型以及这些模型在不同阶段的主要控制参量,并研究材料微损伤的逆过程等。

3 研究进展及创新点

该项目的研究进展及创新点:

(1) 对航空铝合金结构材料 LY12 在 NaCl 和 Na_2SO_4 溶液中发生局部腐蚀(孔蚀)的过程,采用电化学噪声进行研究。用 FFT 和 MEM 方法得到的 SPD 曲线的三个特征参数(W 、 f 和 k)均不能正确地表征材料的腐蚀倾向和腐蚀强度,首次提出的新表征参数 SE 能正确表征材料的腐蚀强度和腐蚀倾向。首次发现从体系电化学阻抗和电化学导纳得到的时间常数表达式不同,由此可反推材料表面的状态,例如膜的厚度等。

(2) 分子动力学模拟表明,在加热或加压使裂纹愈合过程中伴随有位错发射和运动;预先存在位错可促进裂纹愈合;首次在透射电镜中观察到裂纹愈合过程。

(3) 提出表征防护层缺陷状态的阻抗幅值比系数 K 和阻值比系数 K_1 ,由此建立了埋地管道防护层缺陷(破损与剥离)检测的电化学技术和相应测试系统。

(4) 从理论上阐明了飞机机体日历寿命的组成,并建立了日历定寿的数学模型和理论框架;提出了飞机使用环境的三大类型,建立了一套比较实用的不同环境之间的当量化方法,初步解决了飞机环境当量化的难题;提出了飞机机体典型易腐蚀构件在当量环境谱下进行组合式加速腐蚀试验的方法并进行了试验;建立了一套由长期使用中的机体腐蚀损伤统计数据 and 加速实验数据来估算日历首翻期、日历翻修间隔、日历总寿命的方法和公式,并

在实际飞机的日历寿命估算中得到初步应用,将日历寿命预测方法应用于某飞机的寿命预测中,由原来的 30 年延长至 35 年,日历首翻修期和翻修间隔也相应延长,具有重大的军事意义和经济效益。

(5) 创造性地提出了《在役工业压力管道安全状况等级评定推荐方法》,并已得到成功试用。研究结果为国家制定在役工业压力管道安全监察规程提供了重要的科学依据。

以下工作为后续突破奠定了基础:

(1) 将纳米粉与高效的电刷镀技术结合,制备出了镍基镍包纳米 Al_2O_3 、SiC 和金刚石粉的复合镀层。提出了在油基原位合成稳定的纳米分散系的思想、方法和路线,获得了摩擦学综合性能好,并具有自修复功能的润滑油纳米添加剂。制备了具有较高硬度和耐磨性的透明纳米硅基复合聚氨酯涂料和透明纳米硅基复合环氧涂料。该研究成果具有良好的工程应用前景。

(2) 采用多种材料/溶液体系,均发现应力腐蚀敏感性随外加电位以及 pH 值的变化规律与疏松层引起附加应力的变化完全一致。可以认为,膜应力可能是应力腐蚀的新表征参量。准三维分子动力学模拟也证实了腐蚀脱合金层能产生附加拉应力,它和外应力叠加促进位错发射。

(3) 发现了地面模拟加速辐照试验的等效区间,给出了对真空、温度及辐照等环境因素的裁剪与选择原则。获得了等效区间与等效流密度这两个重要的参量的确定方法。因而通过提高辐照强度或束流密度,可以用短时实验室辐照模拟实际空间带电粒子的长期作用。

(4) 研究了低合金钢、不锈钢和双相不锈钢在含沙和不含沙自来水和蒸馏水溶液中的气蚀行为、气蚀和腐蚀联合作用以及气蚀、腐蚀和冲蚀磨损三者联合作用。考察了含沙量和沙粒粒径等因素对金属材料的影响,发现低成本的 CrMnN 不锈钢经改性有望代替 0Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢而成为更好的抗磨蚀水轮机用材。对 Mn 钢作了冲击接触磨损规律研究,发现冲击接触表面生成纳米结构和高应变率增塑效应,对提高抗冲蚀与空蚀非常有利。

(相关图片请见彩插二)

国家重点基础研究发展规划项目

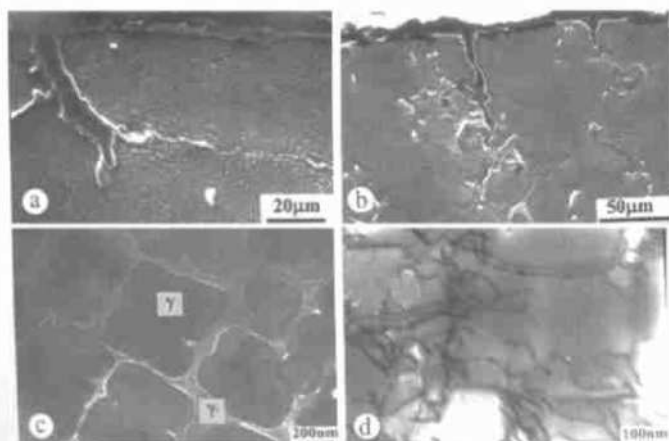
材料的环境行为与失效机理



▲ 柯伟院士(右)与项目首席科学家韩恩厚(中)在材料试验现场



▲ 王中光研究员(前)在材料疲劳实验室工作



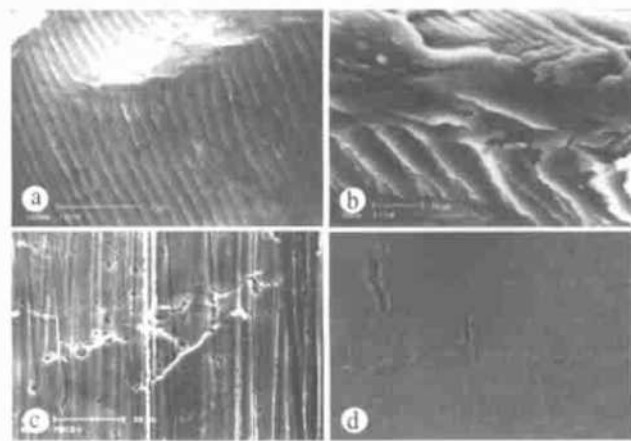
材料使用过程中的微观组织变化与裂纹萌生

(a)晶界裂纹萌生

(b)晶界裂纹萌生

(c)不同的微观相结构

(d)位错结构



铝合金与管线钢的开裂行为

(a)铝合金在空气中的疲劳断口花样 (b)铝合金在盐水中的腐蚀疲劳断口

(c)铝合金的点状腐蚀坑与裂纹萌生 (d)管线钢的表面裂纹萌生

(详细内容请见本期373页)