



TIANRANQIJING YOUGUANZHU
FUSHI POHUAI LIXUE

天然气井油管柱 腐蚀破坏力学

黄 桢 李鹭光 胡桂川 编著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

内容提要

本书以天然气井油管柱系统为研究对象,全面分析了某气田管柱系统的破坏情况, CO_2 、 H_2S 等介质对管柱系统的腐蚀疲劳破坏的机理,腐蚀破坏情况与介质中腐蚀性物质的含量、压力、温度等的关系,对管柱系统进行了应力腐蚀研究,利用损伤力学分析管柱系统的损伤机理,提出了利用腐蚀理论、冲蚀理论、损伤力学等综合利用进行天然气井油管柱系统疲劳寿命预测管柱系统疲劳寿命的方法。

本书适用于从事油、气井开发、研究、运行的科研人员,高等院校的研究人员、学生等。

图书在版编目(CIP)数据

天然气井油管柱腐蚀破坏力学/黄桢,李鹭光,胡桂川编著. —重庆:重庆大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5624-5270-6

I. ①天… II. ①黄…②李…③胡… III. ①采气井—井下管柱—腐蚀—损伤(力学)—研究
IV. ①TE983

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 244497 号

天然气井油管柱腐蚀破坏力学

黄 桢 李鹭光 胡桂川 编著

责任编辑:曾显跃 谢 芳 版式设计:曾显跃

责任校对:邹 忌 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×960 1/16 印张:12.75 字数:200千

2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-5270-6 定价:100.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

高温、高压、高产(“三高”),且具有强腐蚀性介质的天然气气井的开发是目前国内外天然气勘探开发中遇到的巨大挑战。在高温、高压、高产、腐蚀性环境中工作的气井完井管柱的可靠性,以及对管柱系统的腐蚀、疲劳寿命预测是企业界、学术界非常关注的技术难题和研究重点。恶劣的服役环境和复杂受力状况严重降低了完井管柱的强度和气井中作业的安全性。为了有效地预防“三高”且具有腐蚀性的气井完井管柱的失效问题,弄清引起完井管柱强度失效的原因和机理及其影响因素和相互作用关系,具有十分重要的现实意义。

环境腐蚀及其与应力耦合的损伤力学研究,对于探讨天然气气井管柱系统使用过程中结构性能的劣化演变规律,以及定量评估天然气气井管柱系统的日历年限寿命有着重要的理论与工程应用价值。本书开展以下几方面的研究:

①在分析某气田气井管柱系统腐蚀疲劳现状的基础上,总结管柱系统的腐蚀疲劳破坏与环境介质、气井产量、地层压力等的关系。

②根据某高压、高产、含 H_2S 气井管柱系统的破坏,采用现场失效案例调研分析与理论研究有机结合的研究方法,通过失效机理研究,找出管柱系统强度失效的根本原因,提出防止井口装置失效的技术方案和措施。

③进行 CO_2 对天然气气井管柱的腐蚀破坏分析,进行了 CO_2 对管柱系统的腐蚀机理研究,研究 CO_2 的分压、温度、流体的流速、管柱系统的材料的关系;进行了 H_2S 对天然气气井油管柱强度影响研究。

④开展了天然气气井管柱外壁腐蚀的分析研究,外壁腐蚀产生的必要条件及腐蚀稳定过程研究,外壁腐蚀的预测方法,进行实例计算。

⑤进行了管柱系统的应力腐蚀研究,通过对点蚀坑发展规律的研究,建立点蚀坑向应力腐蚀裂纹转化的判据、基于点蚀坑发展的应力腐蚀裂纹起始寿命模型、应力腐蚀裂纹起始寿命计算的损伤力学模型、基于断裂力学理论的应力腐蚀裂纹扩展模型;根据应力腐蚀破裂寿命的定义,指出了各种应力腐蚀损伤发展模型在工程实际中的应用方向。

本书对前几年的研究成果进行了提炼和整理,具有如下几个特点:

①内容新颖。本书对近几年的现场实践经验和近几年的研究成果进行了总结。

②理论和系统性强。本书紧紧围绕油气井管柱系统的可靠性研究为中心,研究管柱系统的破坏机理,影响管柱系统可靠性的各种因素。

③实用性强。本书的研究对象是天然气气井开采过程中的关键设备,利用腐蚀、疲劳理论对管柱系统的破坏进行定性和定量分析,可以在实际工作中得到成功应用。

④起点高。作者拟通过天然气开采过程中管柱系统腐蚀疲劳破坏的现象为研究对象,利用腐蚀理论、损伤力学、应力腐蚀理论进行分析,为工程实际提供参考。

由于作者水平有限,对书中观点不正确之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 油管柱腐蚀研究现状	3
1.2 损伤力学的发展及研究现状	12
第2章 某气田群井下油管破坏研究	16
2.1 气井油管腐蚀失效现场资料分析	17
2.2 气矿井下腐蚀的初步分析	32
第3章 高压、高产、含 H_2S 气井井口装置失效案例 调查分析	35
3.1 气井基本情况	38
3.2 腐蚀破坏试验分析	40
3.3 井口装置受损情况分析	55
第4章 油气开发过程中 CO_2 腐蚀研究	60
4.1 CO_2 性质及在油气藏中的存在形式	60
4.2 油气开发过程中 CO_2 腐蚀研究状况	64
4.3 CO_2 腐蚀产物膜的研究	85
4.4 CO_2 腐蚀防护技术研究进展	94
4.5 当前 CO_2 腐蚀与防护研究中存在的问题及 今后的研究方向	99
第5章 H_2S 腐蚀对管柱强度的影响	104
第6章 天然气井油管外壁腐蚀的本质及分析研究	110
6.1 油管外壁腐蚀的特点	110
6.2 油管外壁腐蚀的本质及特点	117
6.3 井下油管外壁腐蚀的必要条件及腐蚀稳定 过程研究	119
6.4 井下油管外壁腐蚀发生必要条件的预测方式	136

6.5 井下油管外壁严重抗蚀产生的条件分析	137
6.6 计算实例	140
6.7 结论	142
第7章 油管柱系统的应力腐蚀	144
7.1 应力腐蚀现象	144
7.2 点蚀坑向应力腐蚀裂纹的转化	147
7.3 应力腐蚀裂纹的起始寿命	151
7.4 应力腐蚀裂纹的扩展	159
7.5 应力腐蚀裂纹寿命	165
7.6 小结	167
第8章 腐蚀疲劳损伤	168
8.1 腐蚀疲劳现象	168
8.2 点蚀坑向腐蚀疲劳裂纹的转化	171
8.3 腐蚀疲劳裂纹的起始寿命	174
8.4 腐蚀疲劳裂纹的扩展	179
8.5 化学短裂纹	184
8.6 小结	188
参考文献	189

第 1 章

绪 论

油管柱的失效分析就是研究油管柱潜在的或显在的失效机理、失效的发生概率以及相应的影响因素,即是对油管柱的失效模式、失效机理和原因的分析。目前国内外尚无一套完善的理论和方法来对其进行分析,这是因为油管柱(在工作过程中,)在腐蚀性介质中工作,腐蚀性介质对管柱系统的腐蚀、流体通过油管柱时诱发油管柱震动、油管柱的塑性变形、在变载荷作用下的变应力等综合因素使油管柱发生腐蚀疲劳破坏。因此,进行油管柱失效分析技术研究的难度非常大。

影响油管柱失效的主要因素包括:内外腐蚀、运行管理、塑性变形、震动、管道缺陷等因素。长期以来国内外对由于腐蚀引起的管道失效作了大量的研究工作,提出了以介质含水量、含盐量、pH 值、电阻率等单项或多项指标评价介质的腐蚀性。对于管道内腐蚀而言,国内外都是通过实验对一些主要的因素进行模拟实验,寻求腐蚀因素对管道腐蚀的影响规律。同时,由于腐蚀原因而导致管道应力腐蚀裂纹,国外同行是通过建立物理模型和数学模型来分析管道失效的原因。由于管道失效并非单一因素造成,近年来,加拿大运用金相分析的方法研究出由于管材、焊接质量等造成管道失效,从而使引起管道失效的因素逐步细化。

目前,各国对含缺陷管道失效的评定方法主要有:

①数值算法,采用有限元法分析计算,常用于科学研究,应用于工程上还有一

定的局限性。

②基于断裂力学理论的评定方法,这类评定方法主要是根据弹性断裂力学或塑性断裂力学的分析方法,对含缺陷管道的裂纹起裂和塑性破坏失效进行定量的分析描述,方法有多种,如 GE/EPRI 法、PARIS/TADA 法、LBBNRC 法,该方法比数值计算法简单。

③工程评定法,它是从简单的材料力学和塑性力学出发,在大量实验的基础上总结出工程上计算管道极限承载能力的经验公式。这种评定方法考虑了脆性断裂失效、塑性失稳失效,还考虑了弹塑性裂纹。

西方国家特别重视在役管道的腐蚀及剩余强度方面的研究。20 世纪 60 年代末 70 年代初,美国得克萨斯州东部运输公司和 AGA 的管道管理委员会提出了一项被称为 B31G 的准则,用于评价腐蚀管道的剩余强度。该准则只能处理单一腐蚀缺陷,且评价结果比较保守,针对这种情况,ARCO 阿拉斯加股份公司研究了一种评价腐蚀管道的方法,该方法对 B31G 进行了改进和扩充,可用于大面积金属损失、焊缝腐蚀、不连续点蚀群的剩余强度评价。

国外对管道的腐蚀寿命研究十分重视,开发了预测管道寿命的模型,主要从疲劳寿命模型和管材性能衰减寿命模型两个方面进行研究。国内在管道剩余强度评价、剩余寿命评估方面的研究尚处于起步阶段。国内学者对腐蚀管线的剩余寿命进行分析时,主要通过先确定裂纹尖端的应力强度因子,然后采用 Paris 公式计算裂纹的疲劳扩展寿命;有的通过试验对 SSAW, ERW, UOE 3 种焊管的疲劳裂纹内扩展特性进行了研究,确定了 3 种焊管各区的疲劳裂纹扩展速率的 Paris 方程表达式 ΔK 的变化范围,试验结果表明 SSAW 焊管表现出较低的疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 。

在油气管道可靠性分析方面,最先是以应力-强度干涉理论为基础,采用一阶二矩法、改进的一阶二矩法和 Monte-Carlo 数值模拟等方法计算管道的可靠性。有的科学家提出了两步抽样法的 Monte-Carlo 数值模拟法,但该方法必须已知随机变量的分布函数,因此应用受到限制;有些学者提出 Monte-Carlo 法和数值解法相结合的方法,但该方法仅适用于强度分布函数已知、应力分布函数未知的场合;有些学者也提出模糊概率断裂可靠性概念和 Monte-Carlo 数值模拟法计算可靠性指标的基本方法。

方华灿、廖柯熹等人运用故障树分析方法 FTA 分别建立了油气管道故障树,其中考虑的因素各有所偏重,前者主要针对海底管线,后者主要针对天然气管道,且其分析的层次因素不全,未考虑管道环境因素以及天然气管道中常常遇到的应力腐蚀开裂、裂纹的发育与扩展等因素,因此其故障树的结构需要进一步改进与完善。并且都未考虑到现场难以精确收集管道各因素的失效概率值或概率分布函数,直接进行计算存在着一定的困难。因此,需要进一步的失效分析技术研究,以寻求一种和工程实际相结合的管线失效分析方法。

从上面的管道失效评定方法中可以看出,并没有考虑天然气对管道的冲蚀,天然气在油管柱内流动过程中对油管柱诱发的震动,油管柱在变载荷作用下的疲劳破坏,油管柱系统的应力腐蚀等因素,其分析结果与工程实践有一定的差距,对工程实践指导意义有限。

1.1 油管柱腐蚀研究现状

1.1.1 金属腐蚀科学的发展及分类

差不多人类从开始使用金属时,就遇到了金属腐蚀问题,随后不久就提出了防腐蚀的方法。金属腐蚀防护的历史虽然悠久,但一直处于经验性阶段,远远没有与金属腐蚀研究紧密联系起来。

18 世纪以后,腐蚀的理论研究才陆续出现。金属腐蚀现象的解释首先是从金属的高温氧化开始的。1748 年,俄国科学家罗蒙诺索夫指出,没有外界的空气进入,烧灼过的金属的重量仍然保持不变,金属的氧化是金属与空气中最活泼的氧化合所致。之后他又研究了金属的溶解及钝化问题。1830—1840 年间,法拉第首先确立了阳极溶解的金属量与腐蚀中通过电量之间的关系,这对腐蚀的电化学理论的进一步发展起着重要的作用。他还提出了在铁表面形成钝化膜的过程及金属溶解过程的电化学本质的假说。1830 年,德·拉·李夫在对锌在硫酸中溶解的研究中,第一次

明确提出了腐蚀的电化学特征的观念(微电池理论)。1881年,卡扬捷尔研究了金属在酸中溶解的动力学,指出了金属溶解的电化学本质。这些均为金属腐蚀学科的发展奠定了基础。但是直到20世纪初,金属腐蚀才发展成为一门独立的学科。由于化学工业的蓬勃发展及现代科学技术突飞猛进的需要,经过电化学、金属学等科学家的辛勤努力,通过一系列重要而又深入的研究,确立了腐蚀过程的基本电化学规律。特别是英国科学家、现代腐蚀科学的奠基人伊文思(Evans)及其同事们的卓越贡献,他们提出了金属腐蚀过程的电化学基本规律。前苏联科学家弗鲁姆金及阿基莫夫分别从金属溶解的电化学过程与金属组织结构和腐蚀的关系方面提出了许多新的见解,进一步发展充实了腐蚀科学的基本理论。

金属腐蚀是一个十分复杂的过程。首先,环境介质的组成、浓度、压力、温度、pH值等千差万别;其次,金属材料的化学成分、组织结构、表面状态等也是各种各样的;再有,由于受力状态不同,也会对腐蚀损伤造成很大的影响。因此存在着各种不同的腐蚀分类方法,如按腐蚀环境分类、按腐蚀机理分类、按腐蚀形态分类、按被腐蚀金属分类、按应用工业部门分类等。其中按腐蚀形态分类如图1.1所示。

全面腐蚀可视为均匀腐蚀,它对结构材料造成的损伤计算比较简单,可简化为结构件暴露在腐蚀环境中的部分尺寸随腐蚀时间延长而减小,从而使结构件性能下降进行处理。

局部腐蚀是相对于全面腐蚀而言的,腐蚀仅局限或集中在金属的某一特定部位。它是金属材料最常见的破坏形态,因为很难估算其腐蚀速度,而且其危害又很大,所以至今仍然是腐蚀与防护工作中的主要研究对象。

应力作用下的腐蚀可归类于局部腐蚀,它是局部腐蚀中有应力参与作用的一类。腐蚀环境在应力的协同作用下,会导致金属材料的一些特殊腐蚀破坏现象,严重地威胁着结构的安全。

有人对大量的腐蚀失效事故实例进行过统计,局部腐蚀占82.2%,其中应力腐蚀断裂为38%,点蚀为25%,缝隙腐蚀为2.2%,晶间腐蚀为11.5%,选择性腐蚀为2.4%,磨损腐蚀等其他腐蚀形态为3.1%。可见最常见的腐蚀破坏形式是应力腐蚀(包括腐蚀疲劳)和点蚀。

从生产现场的油管柱系统的腐蚀情况进行分析,发现油管的均匀腐蚀量很小,

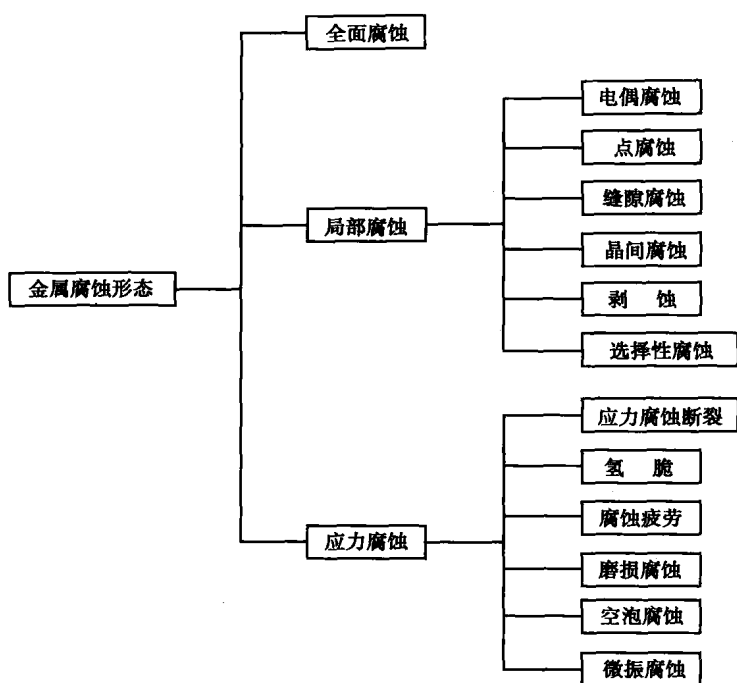


图 1.1 金属腐蚀的分类

可以忽略不计。油管柱通常会发生点蚀、晶间腐蚀、剥蚀、应力腐蚀及腐蚀疲劳,其中点蚀最为普遍。金属的应力腐蚀与腐蚀疲劳之间没有明显的界线,它们都会导致构件中裂纹的产生以致断裂。对应力腐蚀及腐蚀疲劳损伤的研究,通常都与点蚀紧密地联系在一起。因为应力腐蚀裂纹与腐蚀疲劳裂纹一般都是从点蚀坑开始形核,由点蚀坑引起的疲劳裂纹形核和扩展是老龄结构中最常见的结构机械性能下降因素。在油气井的油管柱结构中,广泛分布在结构表面以及隐藏在连接件处的点蚀坑是重要的结构多处损伤源,疲劳裂纹通常是从这些损伤源处形核发展的。并且这种从点蚀坑开始形核的裂纹严重地影响着结构的寿命。有的学者将结构在腐蚀性环境中断裂过程分为4个阶段:点蚀坑形成阶段、点蚀坑发展阶段、裂纹形成阶段和裂纹扩展阶段。点蚀坑被看作是裂纹的先兆,即裂纹由点蚀坑开始。

基于以上观点,本书将针对油管柱的点蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳这些最常见的腐蚀造成的结构损伤进行研究。

1.1.2 应力腐蚀研究

应力腐蚀破裂是一种自发过程,当金属或合金处在特定的环境中,同时承受一定的应力,就可能产生应力腐蚀破裂。关于应力腐蚀破裂现象,科学上最早的记载是在 20 世纪初。当时英国殖民军在印度储存的黄铜弹壳经常开裂,因为每到雨季破裂特别频繁,人们就称之为“季节性破裂”。在 20 世纪初,已经了解引起黄铜破裂的因素是大气中含有的微量氨,也发现黄铜弹壳由于冷加工引起残余应力集中,向弹头皱缩的部位是裂缝集中的部位。但在当时在裂缝中没有发现明显的腐蚀产物,而且在大气中存放的黄铜制品表面看上去并不总是潮湿,所以没有把这种破裂与腐蚀联系起来。直到 1918 年 Bassett 指出了它和腐蚀的关系,并建议改名为“腐蚀破裂”。

20 世纪 20 年代,化工工业中广泛使用的奥氏体不锈钢在水溶液中受应力状态下很容易产生破裂,这引起了人们对应力腐蚀破裂的普遍重视。从 1940 年起,一系列研究报告的研究证实了应力腐蚀破裂和电化学腐蚀之间的关系。此后,在高强度铝合金、钛合金、镍合金、贵金属合金以及高强度钢的使用中都陆续发现了许多应力腐蚀破裂事故。铝合金和铁合金是广泛应用于航空航天工业中的优良材料,高强度钢也在其他工业中大受欢迎。但是那些突然的破裂影响了它们的使用。不锈钢、钛合金、铝合金、铜合金等一般都被认为是优良的耐腐蚀材料,然而却在通常认为腐蚀性不太严重的环境中破裂,例如在含少量 Cl^- 的水中,甚至在蒸馏水或潮湿大气中。因此应力腐蚀破裂这个具有重要现实意义的问题,迅速吸引了众多科学研究工作者的注意。

应力腐蚀破裂是一个力学因素与环境因素交互作用而导致的一个复杂的破裂过程,如图 1.2 所示。它是近 30 年来腐蚀领域中研究得最多的问题。最初的研究工作主要是从物理冶金(金属学)角度来解释应力腐蚀破裂的原因,如用氢的吸入和晶界多相等来解释,对环境的作用考虑得比较少,腐蚀(化学反应)的作用仅考虑到生成氧化膜和放出氢。这种状态持续了相当长一段时间,其间应力腐蚀的研究发展较慢。从 Dix 提出电化学腐蚀——活性通路理论以后,研究者的注意力逐渐转移到环境因素——电化学效应。特别是近一二十年,出现了突破性研究。

例如对裂纹尖端的化学和电化学状态有了一些了解,发现溶液 pH 值下降, Cl^- 及其他阴离子迁入后浓度增大,发现对每一个体系存在一个破裂临界电位(或电位范围);对特性离子的作用也有了解释。这些成就使得对应力腐蚀破裂这种突发性灾难有了预测的可能。对环境因素的研究,也推动了对力学因素和冶金因素更好的理解。力学方面的研究也取得了显著进展,如将断裂力学引入应力腐蚀研究中,找出了在许多体系中裂尖应力强度因子 K 和裂纹扩展速度的关系;利用慢应变率试验法快速选材;发现某些体系存在一个临界破裂应力或应力强度和临界破裂应变率。在冶金学方面,对滑移过程、位错、堆垛层错能的作用,以及各种合金元素的作用等都进行了研究。不论是环境因素、力学因素或冶金因素,它们都互相影响,存在着错综复杂的关系。

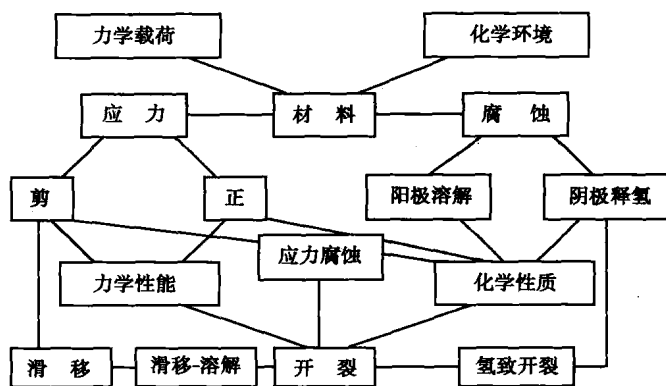


图 1.2 应力腐蚀中的力学与化学因素交互作用

与腐蚀疲劳不同,应力腐蚀是静载荷与腐蚀环境共同作用的结果。对应力腐蚀力学因素的实验研究表明,这个静载荷可以是外加载荷、结构件装配载荷、焊接或是机加工成型时产生的残余应力。通常认为金属只有在拉伸载荷的作用下才会产生应力腐蚀。另一些研究工作发现,压力在某些情况下也可以产生应力腐蚀裂纹,只是裂纹的孕育时间更长一些。在一些实验中观察到,当材料出现应力腐蚀裂纹后,即使去除外加载荷,应力腐蚀裂纹仍能继续扩展,究其原因因为裂尖处腐蚀产物的楔入作用引起了局部附加应力,这个附加的应力也可导致应力腐蚀裂纹的扩展。

在环境因素方面,侧重于电化学效应的研究。金属材料的腐蚀与防护研究表明;非均匀应力作用于金属材料将产生以应力集中处为负极、其余部分为正极的应力腐蚀电池,由此导致材料的非均匀腐蚀。材料的非均匀腐蚀在应力的继续作用下将导致材料的脆裂,脆裂引起的微裂纹裂尖处于应力集中状态,从而又产生闭塞应力腐蚀电池。

对力学和环境因素交互作用的研究发现,应力腐蚀中同时存在着力学化学效应和化学力学效应;力学和电化学因素同时作用于一个体系时,应力会提高腐蚀反应中金属的电化学活度,从而加速腐蚀;应力腐蚀裂纹尖端的应力强度因子也影响着腐蚀电流的大小。利用原子力显微镜(AFM)研究应力腐蚀时表面滑移线的变化,观察发现在应力腐蚀裂纹形核前,腐蚀过程本身促进局部塑性变形;在裂纹形成后,腐蚀促进位错从裂尖发出、增殖和运动,这也是腐蚀促进局部塑性变形的证明。

关于应力腐蚀机理的论述也多种多样,不同的合金-环境组合就可能有不同的应力腐蚀损伤机理,很难找出一种通用于各种体系的统一理论。应力腐蚀发生的两个主要理论是:晶粒边界的优先溶解(阳极溶解);晶界吸收氢原子,使晶间结合力下降导致开裂;钝化膜破膜理论。不过对于高强度铝合金,应力腐蚀机理主要为阳极溶解型开裂,已被广泛接受。

1.1.3 腐蚀疲劳

金属材料及其合金在受到循环应力或应变作用的同时暴露于腐蚀环境中,通常它的疲劳性能会大大下降。甚至在相对温和的环境中,如干燥空气、室温的情况下,金属及其合金的疲劳裂纹扩展率也会比在真空中的实验结果大。如果是在湿润的环境中,疲劳裂纹的扩展将会更加快。这种腐蚀介质与交变应力协同作用所引起的材料加速破坏的现象,称为腐蚀疲劳。

自从1917年Haigh首次提出腐蚀疲劳现象以来已进行了很多研究,过去对腐蚀疲劳的认识不多,多认为是意外的破坏现象。随着科学技术的发展,对腐蚀疲劳的影响因素有了进一步的了解,注意到腐蚀产物的影响、应力波、高应力比、高强材料的应力腐蚀与腐蚀疲劳的重叠作用等。在1960年以后,世界各国再次提出研究腐蚀

疲劳现象。腐蚀疲劳的外形特征是:有许多深蚀孔,裂缝通过蚀孔可以有若干条,其方向和应力垂直,是典型的穿晶型(在低频率周期应力下也有晶间型),没有分支裂缝,缝边呈现锯齿形。震动部件如泵轴和杆、螺旋桨轴、油气井管、吊索以及由于温度变化产生周期热应力的换热管和锅炉管等,都容易产生腐蚀疲劳。腐蚀疲劳在工程上的重要性使它成为有着极大潜力的研究方向。

金属的腐蚀疲劳本质是电化学过程和力学过程的相互作用,这种相互作用远远超过交变应力和腐蚀介质单独作用的数学累加和,是一种非常严重的破坏形式。腐蚀疲劳是一个综合了力学因素、环境因素以及冶金因素的复杂过程。在力学因素研究方面,沿用断裂力学的理论体系,研究循环载荷的应力波形、应力比、加载频率对腐蚀疲劳的影响,裂纹尖端应力强度因与腐蚀疲劳裂纹扩展速率之间的关系;环境条件下疲劳应力—寿命曲线、应变—寿命曲线和裂纹扩展速率曲线的实验及分析,以及通过对加速预腐蚀试件的疲劳实验对结构的腐蚀疲劳性能进行分析评定。在环境因素方面,研究腐蚀疲劳裂纹尖端的电化学过程,包括 pH 值、缓蚀剂、外加电化学极化电位等因素对腐蚀疲劳损伤的影响等。

由于高强度铝合金材料在航空领域的广泛应用,随着现役飞机的老龄化,铝合金的腐蚀疲劳问题引起了人们的关注。尤其是对高强度铝合金腐蚀疲劳寿命的研究,发展了多种腐蚀疲劳寿命模型。这些模型都是基于这样一个实验事实:腐蚀疲劳裂纹起源于点蚀坑,点蚀坑生长到一定尺寸,发展为腐蚀疲劳裂纹。腐蚀疲劳寿命由 3 部分组成:点蚀坑生长寿命、短裂纹扩展寿命及长裂纹扩张寿命。也有的文献中将总的寿命划分得更细,如点蚀坑的生长寿命还可分为点蚀坑的形核时间和扩展时间两部分。

与应力腐蚀类似,腐蚀疲劳的机理也是多种多样的,没有适用于所有情况的统一理论,同样,对于一个腐蚀疲劳体系,也存在多种损伤机理共存的情况。

从外部条件看,腐蚀疲劳可以看作应力腐蚀的一种特殊形式(应力是交变的)。应力腐蚀与腐蚀疲劳的区别在于:

①一般认为,应力腐蚀在特定的环境-合金组合及特定的应力下发生,而腐蚀疲劳则任何材料都有可能发生;

②应力腐蚀是在静载荷(如恒载荷、恒应变)或单调动载拉伸(如慢应变速率)条

件下进行研究,而腐蚀疲劳是在非单调动载条件下进行研究;

③应力腐蚀破裂有一个临界应力强度因子(有的材料不明显),在这个临界值以下应力腐蚀就不会发生,但腐蚀疲劳的破裂不存在临界极限应力强度因子。

1.1.4 腐蚀损伤的评估方法

金属在遭受腐蚀后,其重量、厚度、机械性能、组织结构及电极过程等都会发生变化。这些物理或力学性能的变化率可用来表示金属腐蚀的程度,作为金属腐蚀损伤评定的依据。有多种方法可用于评价腐蚀损伤的程度,传统的评估方法有:质量变化法、弹性模量下降率、断裂强度下降率、屈服强度下降率等。几种腐蚀损伤评估方法的损伤单位见表1.1。

表 1.1 腐蚀损伤单位

腐蚀损伤影响	单 位
质量变化	$\text{g m-l/year}, \text{Mg dm-l/day} = \text{mdd}$
腐蚀深度	$\mu\text{m/year}$
腐蚀电流密度	mA/cm^2
断裂强度下降 屈服强度下降 延伸率下降 弹性模量下降	Percent/year(of initial value)

(1)质量变化法

使用腐蚀前后金属试件质量的变化来评定腐蚀的程度,包括增重法和失重法。腐蚀速度计算式为:

$$v_{\text{失}} = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}$$

$$v_{\text{增}} = \frac{m_2 - m_0}{S \cdot t} \quad (1.1)$$

式中 m_0 ——试件腐蚀前的质量, g;
 m_1 ——试件清除掉腐蚀产物后的质量, g;
 m_2 ——试件带有腐蚀产物的质量, g;
 S ——试件表面积, m^2 ;
 t ——腐蚀时间, 小时、天、月、年。

(2) 腐蚀深度法

腐蚀深度或构件腐蚀变薄的程度直接影响该部件的寿命, 在衡量不同密度金属腐蚀程度时, 更适合使用这种方法。

腐蚀速度:

$$V = \frac{K \cdot W}{S \cdot T \cdot \rho} \quad (1.2)$$

式中 常数 $K = 3\,650$;
 W ——重量损失, g;
 S ——试样面积, cm^2 ;
 T ——试验时间, d;
 ρ ——材料密度, g/cm^3 。

(3) 腐蚀电流法

电化学腐蚀中, 金属腐蚀是由阳极溶解引起的。金属的腐蚀量, 即阳极的溶解量和腐蚀电流成比例, 按照法拉第定律:

$$W = \frac{tM}{Fn} I \quad (1.3)$$

式中 W —— t s 内溶解的金属质量, g;
 M ——金属的原子量;
 n ——金属离子的电荷(即腐蚀作用中金属的原子价);
 F ——法拉第常数(96 500 库仑);
 I ——腐蚀电流, A。若设腐蚀电池阳极的面积为(cm^2), 腐蚀电流密度 i 。可