

[钟群鹏 周煜 张峥 编著]

裂 纹 学

钟群鹏
周煜
张峥



Liewen Xue

裂 纹 学

[钟群鹏 周煜 张峰 编著]

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

裂纹学 / 钟群鹏, 周煜, 张峥编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2014.9

(中国工程院院士文库)

ISBN 978-7-04-040926-0

I. ①裂… II. ①钟… ②周… ③张… III. ①裂纹-研究 IV. ①O483

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 192886 号

策划编辑 王国祥 黄慧靖

责任编辑 黄慧靖 张 冉

封面设计 顾 斌

责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京汇林印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm
印 张 20.75
字 数 430 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

版 次 2014 年 9 月第 1 版
印 次 2014 年 9 月第 1 次印刷
定 价 128.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 40926-00

《中国工程院院士文库》编辑委员会

主 任：樊代明

副主任：苏雨恒 刘德培

委 员：谭建荣 何新贵 袁士义 屠海令

邹德慈 丁一汇 侯保荣 傅廷栋

王红阳 殷瑞钰 白玉良 杨 祥

李仁涵 安耀辉

编辑部：刘 静 姬 学 王国祥 黄慧靖

总 序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用，是经济发展和社会进步的强大动力。自20世纪下半叶以来，工程科技以前所未有的速度和规模迅速发展，其重要作用日益突显，并越来越受到人们的重视。

中国工程院是中国工程科技界的最高荣誉性、咨询性学术机构。中国工程院院士是中国工程科技领域的最高荣誉性称号，授予对中国工程科技发展做出杰出贡献的工程科技工作者。院士们充分发挥群体优势，围绕国家、产业和地方经济社会发展迫切需要解决的重大科学技术问题，开展宏观性、战略性、前瞻性、综合性的咨询研究，为国家决策提供支持。他们的研究代表中国在该领域中的最高学术水平。院士们视发展工程科技、促进国家经济发展和社会进步为己任，勤奋工作在各自的专业领域，为祖国的繁荣富强、为国防建设和国家安全做出了重要的贡献。院士的学术著作，是院士多年刻苦钻研和辛勤劳动的成果，是他们智慧的结晶，也是整个社会的宝贵财富。这些学术著作，不仅对我国工程科技工作有重要的指导作用，而且具有极高的学和参考价值，对于促进年轻工程科技人才成长，造就出类拔萃的青年科学家和工程师，推动我国工程科技事业不断发展具有重要作用。

感谢高等教育出版社设立中国工程院学术著作出版基金，资助出版《中国工程院院士文库》，把院士们的学术成果向全社会推广。此举不但有力地支持了我国优秀科学技术著作的出版，也对促进我国科技事业发展、繁荣科技出版事业具有重大意义。

徐匡迪

2005年8月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

1 绪论	1
1.1 失效与失效学	1
1.2 裂纹与裂纹学	3
1.3 裂纹学的重要性	5
1.4 裂纹学的主要内容	6
2 裂纹萌生与扩展机理	12
2.1 穿晶脆性裂纹	12
2.1.1 断口特征	12
2.1.2 包络线再生核模型	17
2.1.3 穿晶脆性裂纹萌生及其扩展机理	20
2.1.4 影响裂纹行为的因素	25
2.2 穿晶延性裂纹	28
2.2.1 断裂特征	28
2.2.2 穿晶延性裂纹萌生及其扩展机理	30
2.2.3 影响裂纹行为的因素	36
2.3 沿晶脆性裂纹	38
2.4 沿晶延性裂纹	42
2.5 疲劳裂纹萌生及扩展机理	43
2.5.1 疲劳研究的历史发展	44
2.5.2 循环加载下的材料疲劳行为	47
2.5.3 疲劳裂纹的萌生	53
2.5.4 疲劳裂纹的扩展	60
2.5.5 疲劳问题的物理数学模型	66
3 裂纹的力学问题	77
3.1 裂纹萌生力学	77
3.1.1 损伤的定义	78
3.1.2 裂纹萌生判据	79
3.1.3 脆性裂纹萌生	80
3.1.4 延性裂纹萌生	82
3.1.5 构件中的裂纹萌生	84
3.2 裂纹扩展力学	85
3.2.1 宏观裂纹的力学问题	85
3.2.2 疲劳裂纹扩展力学问题	113
3.2.3 疲劳短裂纹扩展力学	122

4 裂纹与环境的交互作用	133
4.1 应力腐蚀	133
4.1.1 电化学腐蚀	133
4.1.2 应力腐蚀特征	134
4.1.3 阳极溶解型机理	136
4.1.4 氢致开裂型机理	140
4.2 氢损伤	143
4.2.1 氢致开裂过程	143
4.2.2 氢脆特征与氢致裂纹扩展	145
4.2.3 其他氢脆机理	146
4.3 腐蚀疲劳	147
4.3.1 腐蚀疲劳特征	147
4.3.2 腐蚀疲劳机理	149
4.3.3 腐蚀疲劳裂纹的扩展特性	150
4.3.4 影响腐蚀疲劳的主要因素	152
4.4 材料的蠕变	153
4.4.1 蠕变的基本特征	153
4.4.2 蠕变机理	156
4.4.3 蠕变断裂机理	159
4.4.4 蠕变断裂力学	161
4.5 高温疲劳	166
4.5.1 高温疲劳损伤	166
4.5.2 高温疲劳裂纹扩展	168
4.5.3 高温疲劳寿命预测方法	170
5 裂纹的检测与分析技术	173
5.1 裂纹的宏观检查分析	173
5.1.1 光学方法检测	175
5.1.2 射线检测	179
5.1.3 渗透检测	183
5.1.4 磁学方法检测	184
5.1.5 声学方法检测	187
5.1.6 电学方法检测	198
5.1.7 热学方法检测	202
5.2 裂纹部位的力学分析及材质检验	203
5.2.1 裂纹部位的力学分析	203
5.2.2 裂纹部位的材质检验	204
5.3 裂纹的微观检查分析	204
5.4 裂纹形成原因综合分析	205
5.4.1 裂纹源位置分析	205

5.4.2	裂纹走向分析	206
5.4.3	裂纹周围及裂纹末端分析	208
6	含裂纹结构的安全评估	209
6.1	裂纹安全评估学的基本原理	209
6.1.1	结构完整性评定规范发展历史	209
6.1.2	结构完整性评定简介	210
6.2	确定性安全评定方法	217
6.2.1	设计曲线法	217
6.2.2	R6“双判据”法	221
6.2.3	EPRI 工程估算评定方法	235
6.2.4	含裂纹结构的疲劳评定	237
6.3	概率安全评定	238
6.3.1	结构可靠性理论	239
6.3.2	评定参数的分布特点	248
6.3.3	概率安全评定方法	251
7	工艺性裂纹	254
7.1	铸造缺陷	254
7.1.1	铸造缺陷分类	254
7.1.2	铸造缺陷的成因及分析方法	262
7.2	锻造裂纹	264
7.2.1	锻造缺陷分类	264
7.2.2	锻造裂纹的形成机理	265
7.3	热处理缺陷	269
7.3.1	热处理裂纹分类	270
7.3.2	影响淬火裂纹的因素	272
7.4	焊接裂纹	272
7.4.1	焊接裂纹分类	273
7.4.2	焊接裂纹形成机理及影响因素	275
8	裂纹的预测、控制及预防	280
8.1	裂纹的预测	280
8.1.1	疲劳裂纹萌生寿命	280
8.1.2	疲劳裂纹扩展寿命	285
8.2	裂纹的控制	287
8.2.1	裂纹止裂的基本原理	287
8.2.2	止裂的具体应用	290
8.2.3	疲劳裂纹的修复	292
8.2.4	蠕变损伤的修复	292
8.3	裂纹的预防	303
8.3.1	确定失效影响参数	304

1 绪 论

1.1 失效与失效学

失效是指产品丧失规定功能的现象。由于人的主观认识是有限的,客观时间是无限的,失效是人们的主观认识与客观事物相互脱离的结果,失效发生与否是不以人们的主观意志为转移的。因此,失效是绝对的,而安全则是相对的。从人类一开始能进行简单的生产活动,到如今工业朝自动化、智能化方向发展,失效就一直伴随着人类社会文明的发展与进步。即使是在科技高度发达的今天,在对产品质量采取各种严格法规和标准进行控制和提高之后,失效的发生仍难以避免,这是因为在产品的设计、制造、使用和维修这一系列过程中存在着各种难以估计的复杂因素。以美国的几起重大失效事故为例,1986年1月28日美国“挑战者”号航天飞机在升空后仅73 s即发生爆炸,7名宇航员全部罹难,爆炸起因是在航天飞机右侧固体火箭助推器中的一个O形密封圈的失效;1997年9月不到两个星期的时间内在美国发生了6起军用飞机坠毁事故;2002年2月1日载有7名宇航员的美国“哥伦比亚”号航天飞机在着陆前16 min发生解体坠毁。在我国工业发展历程中同样也出现了很多的失效事故,例如在90年代初我国航空装备上的WJ-5发动机叶片断裂、WP-7发动机一级涡轮叶片断裂以及运七飞机燃油泵在起飞阶段发生卡滞等^[1,2]。

在生产实践中发生这些失效事故之后,人们自然会提出如下三个疑问:事故为什么会发生?同类产品能否继续使用?如何保证同类事故不再发生?在感性认识上升到理性分析之后,人们提出并发展了一门解决上述问题的新兴学科,即失效学,它是研究产品失效的诊断、预测和预防理论及技术和方法的交叉性、综合性的分支学科,由失效诊断学、失效预测学和失效预防学三部分组成。失效学的实践基础是对大量的失效事故模式、失效原因及其机理的定性、定量的分析诊断和随后行之有效的预测预防的工程实践经验的积累和总结;失效学的技术和方法基础是现代检测仪器、可靠性技术和工程方法;失效学的理论基础是利用近代材料学、数学、力学和化学等知识对各种失效模式和失效机理进行的深入研究。

因此,在失效研究中针对具体失效事件的技术活动一般可分为三个层次:失效诊断、失效预测和失效预防。后两个层次是失效研究的目的,属于在失效发生之前的研究;失效诊断是失效研究的核心,属于失效发生以后的研究,它也是失效研究的首要任务之一,其准确与否决定了失效研究的成功与否。失效诊断的目的是诊断失效模式、失效原因和失效机理,为采取预防措施指明方向和提供依据。其中,失效模式诊

断是失效研究中首先需要解决的重要问题,具有“定向”的意义,它是指失效的表现形式或类型,一般可分为一级失效模式、二级失效模式和三级失效模式等。失效模式诊断得越具体、越准确,对失效原因诊断的准确性和预防措施制定的针对性和有效性就越有指导价值。而失效原因的诊断则是失效研究的核心和关键,也可分为一级和二级失效原因。其中,一级失效原因一般指酿成该失效事故的首先失效件(肇事件)失效的直接关键因素处于投入使用过程中的哪个阶段或工序(如设计原因、制造原因、使用原因和环境原因等);二级失效原因是指一级失效原因中的直接关键因素,如设计原因中又可分为设计原则、设计思路和方案、结构形状和受力计算、选材和力学性能等次级原因。失效机理是指在内因和外因的共同作用下最终导致失效事故发生的热力学、动力学和事故链,即失效内在的必然性和固有规律性。所以,失效机理的诊断是指对失效的内在本质、必然性和规律性的研究,是对失效性质的理论升华和提高。通常把应力、温度、气氛介质等作为影响失效的外因,而把材料成分、组织、缺陷、性能和它们的表现视为影响失效的内因。以人生病这一“事故”来打个比方,病症相当于失效模式,生病原因相当于失效原因,而病理则相当于失效机理。对于已发生的失效事故,只有揭示了失效的必然性和规律性,才能真正做到对同类失效事故的有效预防,做到“举一反三”和亡羊补牢,由此可见,研究失效机理是非常重要的一项课题。

作为失效研究的目的之一,失效预测是由安全评定、剩余寿命预测和可靠性预测三部分组成,前两个组成部分一般应用在结构件上,其中的安全评定又是失效预测中的重要组成部分,而可靠性预测往往应用于工程系统中。失效预防是失效研究的另一目的,它由失效的工程预防技术、抗失效设计准则技术和方法(如抗磨损设计、耐久性设计等)以及失效分析预测预防数据库和专家系统的建立和应用三个子部分组成。

总而言之,失效学是一门交叉性、边缘性和综合性的新兴学科,通过与不同的基础学科相结合形成了许多边缘学科。例如,失效学与物理学交叉诞生了失效物理学,与力学交叉形成了失效力学;与数学结合则促成了可靠性数学的问世。与此同时,失效学又与许多应用学科和技术有密切联系。“材料”是失效的载体,因而它自然会涉及材料科学与工程领域的各种知识;“环境”是失效发生的条件,所以失效研究与环境科学方面的知识有关;“检测”是在失效分析中获取信息的重要途径和手段,故失效学离不开与宏观检测有关的知识;“分析”是失效学的重中之重,所以失效学必然会涉及与逻辑学和数理统计有关的专门知识;此外,失效学不仅是一种“技术活动”,还是一种“管理活动”,所以失效学与管理学科也有着密切的关系。经过近几十年的发展,失效学逐渐成为相对独立的、十分活跃的学科。由于失效学是由失效诊断学、失效预测学和失效预防学三部分组成,故它的发展趋势和前景就是对这三个部分的理论、技术和方法系统深入的研究、逐渐融合并形成其学科体系的规划和展望。失效分析与预测预防是变失败(失效)为成功(安全)的关键,它在国民经济发展和高科技发展中有很强的实际需求,也扮演着非常重要的积极作用,是使我国科技发展少走

弯路、步入良性循环的重要手段之一。

1.2 裂纹与裂纹学

上一节曾指出失效模式诊断在整个失效分析和预防决策中起着“定向”的作用,是首先需要解决的问题。对于工程结构、机器或其零部件,如果它丧失了所规定的工程功能,我们称这一现象为机械失效,它包括三种主要的失效模式,即磨损、腐蚀和断裂。磨损失效模式是指由于机械摩擦(滑动、滚动或二者兼而有之)引起接触表面上的离散颗粒逐渐脱离导致的不希望得到的尺寸累积改变。它的二级失效模式一般可分为磨粒磨损失效、黏着磨损失效、疲劳磨损失效、磨蚀磨损失效和微动磨损失效等五类。腐蚀失效是一个非常宽范围的术语,是指由于材料与环境发生化学或电化学相互作用引起的材料劣化导致零部件丧失规定功能的现象。按照腐蚀形态一般可将腐蚀分为八大类,包括:均匀腐蚀、电偶腐蚀或双金属腐蚀、缝隙腐蚀、孔蚀、晶间腐蚀、选择性浸出、冲蚀或气蚀、应力腐蚀或氢损伤等。而断裂失效则是指材料由于所受载荷超过某一极限值时发生的原子间键的破坏,由此引起裂纹萌生并在进一步扩展中导致材料破断成两个或多个碎片,一般包括脆性断裂失效、韧性断裂失效和疲劳断裂失效。

在工程系统的各类失效中,断裂失效是最重要的也是危害性最大的,因为大多数断裂事故往往是不可预料、突然性且会产生灾难性的后果,造成重大的经济损失和人员伤亡。鉴于断裂失效在失效学中的重要地位以及裂纹在材料断裂过程中所起的决定性作用,本书将主要围绕断裂这种一级失效模式来展开介绍与裂纹有关的知识。

一般来说,材料的断裂过程往往包括裂纹萌生、裂纹扩展(包括稳态扩展和失稳扩展)及最终断裂等阶段,所以裂纹显然在材料的断裂失效行为中扮演着非常重要的角色。事实上,我们常说的裂纹并没有非常精确的定义,例如在一开始人们曾将一个无限狭长的椭圆孔视为一条裂纹,在工程结构中将具有一定长度而端点极其尖锐的裂缝视为裂纹,而在结构完整性理论中为保守起见有时也将制造缺陷视作裂纹来处理。从物理上来说,裂纹可能可以做这样的定义:以张开或滑开的方式而产生的一种材料分离,其分开的距离一般与某些微观结构尺度(如非金属夹杂)的水平相当,但它要远小于其分离的程度,即裂纹长度。裂纹分类依据有很多种,根据裂纹定义按照裂纹上下表面的位移特征可分为张开(I)型裂纹、滑开(II)型裂纹和撕开(III)型裂纹三类;根据裂纹在材料中所处位置可分为埋藏裂纹、表面裂纹和穿透裂纹等;根据裂纹产生的物理因素可将裂纹分为焊接裂纹、层状裂纹、疲劳裂纹、氢脆裂纹、应力腐蚀裂纹和蠕变裂纹等;根据裂纹尺寸与材料微观组织结构的特征尺度的相对大小,还可将裂纹分为宏观裂纹、细观裂纹和微裂纹等。图1-1描述了I、II和III型裂纹的基本特征,从中可知:I型裂纹承受与裂纹面垂直的正应力作用,裂纹上、下表面的位移相反,且相对位移垂直于裂纹面和裂纹扩展方向;II型裂纹承受位于裂纹面内、并

与裂纹前沿垂直的剪力作用,裂纹上、下表面的位移也相反,但都位于裂纹面内,相对位移与裂纹前沿垂直;III型裂纹承受离面剪力的作用,裂纹上、下表面的位移相反,但都位于裂纹面内,相对位移与裂纹前沿方向保持一致。值得指出的是,在实际工程结构中经常会遇到上述裂纹类型的复合形态,即复合型裂纹,例如在航空结构件和压力容器等承压设备中。

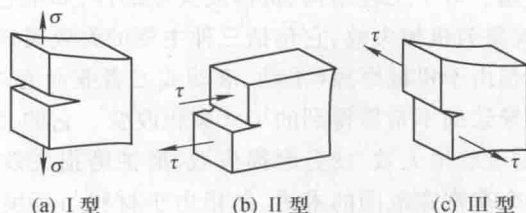


图 1-1 三种基本裂纹类型

值得一提的是,裂纹不仅会在结构服役过程中产生,还会在材料制造、成型以及结构装配阶段形成,有时也将在这些阶段所产生的局部薄弱点都归为缺陷一类。缺陷所涉及的范围比较广,在工程结构中由于平面型缺陷(如平面类裂纹缺陷、裂纹等)不仅会造成结构承载面积下降,还会在裂纹尖端产生局部应力集中,它对结构产生的危害性要大于体积型缺陷(如夹杂、气孔等),所以人们更为重视对平面型缺陷的研究。例如,在第二次世界大战期间美国发生了多起自由号舰艇和T-2油轮断裂破坏的事故,研究发现其失效是由于在焊接工艺中产生了类裂纹缺陷。尽管现代生产制造工艺采用了许多先进手段来保证产品朝无缺陷的方向发展,但对实际工程结构而言,完全消除缺陷是不太可能的,质量控制的目标应该是尽量减少有害缺陷的存在。裂纹不仅会在结构件的制造过程中产生,同时还会在其服役过程中以某种特定的机理萌生并发生不断的扩展,从而危及结构的安全运行。

广义地说,裂纹的形成和扩展是材料、载荷条件和环境因素三者交互作用的结果,可归为一大类材料损伤行为。研究在不同载荷条件和环境因素作用下各种材料的裂纹萌生及其扩展机理,预测裂纹萌生及其扩展行为,以及研究防止裂纹危及结构完整性的理论和工程技术方法的这样一门交叉性学科称为裂纹学,它的产生是与近现代科学技术的进步密切相关的。材料学和力学学科的发展为失效模式、失效机理以及与裂纹有关的力学研究积累了相当丰富的创新性观点和物理模型,为裂纹学的建立奠定了理论基础;现代检测仪器、仪表科学的迅猛发展以及检测技术的不断提高,为裂纹学奠定了技术基础;数理统计学科的完善和可靠性工程的发展应用为裂纹学的完善奠定了方法基础。这三者之间的有机贯通使裂纹学逐渐发展和完善成为一门相对独立的、综合性的新兴学科。图1-2描述了材料学与力学、化学之间的交互作用,在材料因素与化学因素的共同作用下需要研究与材料腐蚀有关的裂纹问题;在材料因素与力学因素的共同作用下需要研究与材料的断裂与疲劳等失效模式有关的

裂纹问题;在材料因素、化学因素和力学因素的共同作用下则需要研究引起应力腐蚀、腐蚀疲劳和高温断裂等失效行为的裂纹问题。

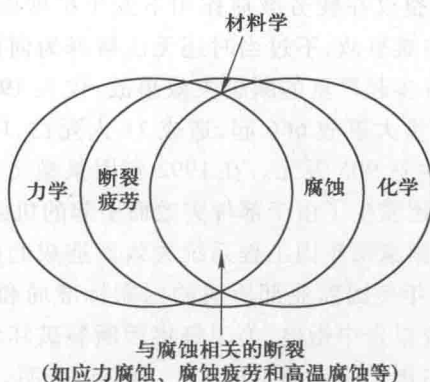


图 1-2 材料科学与力学、化学的交互作用示意图

总之,裂纹学的主要内容包括:研究裂纹萌生与扩展的机理,分析裂纹在载荷作用下的萌生与扩展规律,考虑裂纹与环境因素的相互作用,发展和利用现代无损检测手段对材料裂纹进行有效的定性检测和定量表征,保证工程中含裂纹结构的完整性,分析在制造生产工艺中产生的各种工艺性裂纹,以及对裂纹进行合理的预测、控制和预防。从这七个方面可以深入研究裂纹、材料、载荷条件和环境因素之间的相互关系,从而获得能对结构中裂纹进行有效、合理的预测和预防的理论和工程技术方法。

1.3 裂纹学的重要性

早期的工程结构设计理论首先考虑的是结构的静强度要求,即采用静强度设计准则。假设材料是均匀、连续和各向同性的,通过弹塑性力学分析确定结构危险截面的应力和应变后,在考虑安全系数的情况下,应用材料力学中经典的四个强度准则,确保其设计应力低于材料的许用应力值。传统的静强度设计准则便于工程应用,至今仍在一些结构设计理论中被采用。

随着生产力的不断发展,工程结构的服役条件变得非常苛刻,对材料的性能要求也逐步提高。与此同时,许多根据传统强度理论所设计的结构件发生断裂失效破坏的事故时有发生,如列车车轴发生疲劳断裂,压力容器发生爆炸,飞机机身和船体发生开裂等。其中,发生在第二次世界大战时期的美国自由号舰艇和 T-2 型油轮的失效事故引起了人们的关注,从 1943 年开始制造的 4000 多艘自由号全焊接舰艇和 530 艘 T-2 型油轮中有 1200 多艘的船体发生了脆性断裂,其中的 233 艘发生了灾难性破坏而无法继续使用,16 艘的船体裂成两半,其失效原因是在焊接工艺中产生了类裂纹缺陷和残余应力。另一起著名的断裂失效事故是由英国研制的世界上第一架喷

气式民航客机——“彗星”I型喷气式客机的失事,在1953年至1954年期间,“彗星”I型客机因连续发生3次坠毁事故而被迫停飞,随后的研究表明飞机断裂是由于“彗星”采用的增压座舱的微裂纹在疲劳载荷作用下发生扩展而引起的,这是民航史上首次因金属疲劳导致的空难事故,不过当时还无法解释为何微裂纹会导致最终的断裂。在我国同样发生了许多起严重的断裂失效事故,仅在1990年我国发生锅炉、压力容器事故800起,其中重大事故666起,造成71人死亡,142人受伤;统计其中的590起事故,直接经济损失达905万元。在1992年因某型飞机的叶片断裂事故而造成该型号飞机停运,甚至还发生了由于部件失效而引起的机毁人亡事故。

据统计,在工业发达国家每年因工程系统失效而造成的经济损失约占国民生产总值的5%~10%。1982年美国商业部所属的国家标准局和 Battelle Columbus 实验室向国会提交的一份调查报告中指出,美国每年因断裂破坏和防止断裂而耗费的资金高达1190亿美元,约占国民生产总值的4%;研究还表明,如果利用现有技术进行防断裂控制,则经济损失可减少一半。1991年,欧共体委托欧洲结构完整性协会对欧洲12个国家多个行业因断裂造成的经济损失的调查结果表明,如果每年投入2亿美元用于断裂和防止断裂研究,每年的潜在经济效益将是800亿美元。

前面提到的一些著名的断裂失效案例的断裂原因均与裂纹有关,舰艇和油船的失效是由全焊接结构中由焊接引入的类裂纹缺陷在局部应力集中区域引起的脆性断裂所致,而“彗星”型客机失事则是由疲劳裂纹扩展引起的疲劳断裂所致。事实上,工程结构中制造缺陷的存在是不可避免的,而且在服役过程中在载荷和环境的共同作用下材料性能会发生退化,在一些材料缺陷或存在局部应力集中的材料薄弱处容易产生损伤,随后以损伤累积的方式进一步演变成裂纹并发生稳态扩展,当材料的有效承载面积难以承受外加载荷时,裂纹就会发生快速失稳扩展并导致最终的断裂失效。因此,若要防止结构发生断裂失效事故,首先要在源头上进行控制,即对结构进行合理的防断裂设计。如果所设计结构在服役过程中仍可能出现裂纹萌生及其扩展,则需要采取适当的措施对裂纹进行止裂处理或修复处理;如果此时已无法保证裂纹进行安全扩展,则需要及时更换存在危险的结构件。

综上所述,要尽可能保证工程结构的完整性,尽可能减少工程失效事故的发生,就需要深入细致地研究裂纹学的内容,抓住结构发生失效的每一个可能的环节。通过对工程材料中的裂纹展开多方面的基础研究,分析它的力学行为和环境行为,探寻裂纹萌生和扩展可能的机理,找出裂纹萌生和扩展的规律,才能更好地、合理地指导结构的防断裂设计,控制和提高结构的产品质量,使其能最大潜能地、安全地发挥它的工程功能。

1.4 裂纹学的主要内容

对裂纹的研究最早始于对断口学的研究,它是研究断口的形貌、性质,进而分析

断裂类型和断裂方式(或断裂模式)、断裂路径、断裂过程、断裂性质、断裂原因和断裂机理的科学。对断口形貌的研究早在 16 世纪就已经开始,后来随着光学显微镜、透射电子显微镜和扫描电子显微镜等分析测试手段逐渐应用到断口形貌观察上,断口学的研究得到了飞速发展,也为裂纹机理的研究提供了确切的实验依据。随着位错理论的逐步成熟,人们发展了用于解释各种类型的裂纹萌生和扩展的物理机制及其模型。

实际上,研究裂纹的萌生及扩展机理是为了研究在材料破坏过程中因裂纹萌生和扩展所引起的物理或化学上的变化,是对裂纹萌生和扩展的内在本质、必然性和规律性的探索,是裂纹学的基础部分。它从裂纹类型入手,研究各种裂纹的萌生和扩展行为以及影响裂纹行为的一些因素。由于裂纹机理考虑的主要是在裂纹萌生和扩展过程中涉及的材料物理或化学上的变化,所以它肯定要考虑材料微观组织特征所扮演的角色,而且往往涉及宏、细、微观的多尺度问题的研究。在材料内部微观组织结构非常复杂,图 1-3 描述了金属材料的各种微观组织结构特征,如共格析出相、晶界析出相、刃位错、螺位错和滑移线等,它们对图示中的穿晶断裂和沿晶断裂等损伤行为有着不同性质、不同程度的影响。

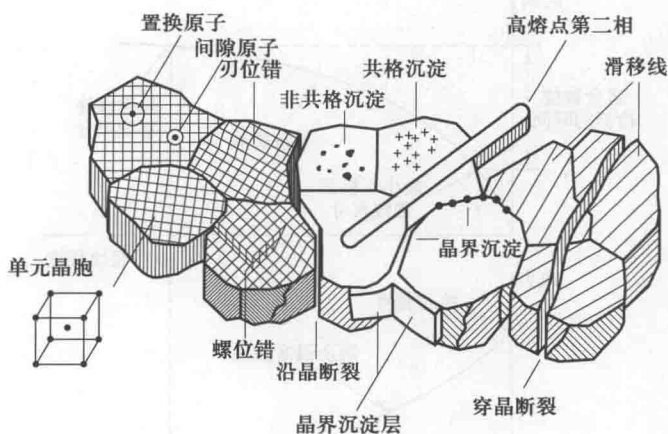


图 1-3 金属材料中的微观组织结构^[3]

在发生了多起著名的低应力脆性断裂事故之后,人们充分认识到结构件中往往存在着各种类型的缺陷或裂纹,它们对材料性能有着非常重要的影响,传统的静强度设计准则并不能保证结构的安全运行,必须要考虑裂纹对结构服役性能的影响,由此促进了一门新兴学科即断裂力学的诞生。在 20 世纪初断裂力学的出现在裂纹研究历程中是具有里程碑意义的,断裂力学理论不断发展表明人们对裂纹问题的认识不断加深。从 Inglis 最早对含椭圆孔(裂纹)无限大板的应力分析获得应力集中系