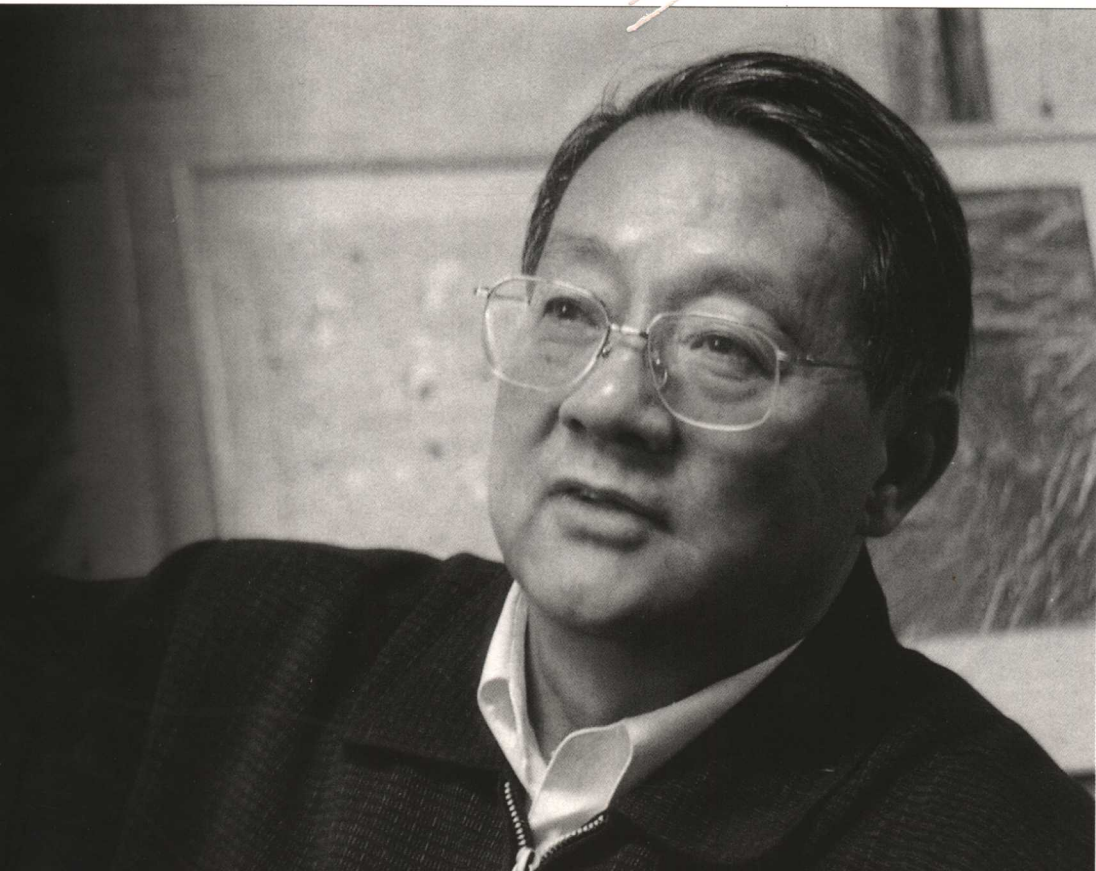


中
国
工
程
院
院
士
文
库

[钟群鹏 赵子华 编著]

断口学

钟群鹏



高等教育出版社

中
国
工
程
院
院
士
文
库

断口学

[钟群鹏 赵子华 编著]

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

断口学 / 钟群鹏, 赵子华编著. —北京: 高等教育出版社, 2006.6
ISBN 7-04-018949-6

I. 断... II. ①钟...②赵... III. 断口金相
IV. TG113

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第044764号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱静
版式设计 王莹 责任校对 张颖 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landrace.com
经销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landrace.com.cn
印刷	北京佳信达艺术印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开本	800×1050 1/16	版次	2006年6月第1版
印张	22.75	印次	2006年6月第1次印刷
字数	460 000	定价	54.00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 18949-00

内 容 简 介

作为失效学体系的理论论著之一,本书是作者集 30 多年来在断口学领域的理论研究成果和实践经验撰写而成的一本专著。作者在吸取前人研究成果的基础上,全面系统地阐述了断口学研究的意义、方法和内容。本书简要介绍了断口学的理论基础——断裂力学基础和断裂物理基础,详细说明了断口分析所用的技术和分析思路,从断裂机理、断口特征、断口诊断和断口定量分析等方面着重介绍了韧性断裂形成的断口、脆性断裂形成的断口(包括环境促使脆性断裂形成的断口)和疲劳断裂形成的断口等三大类断口,同时还列举了一些实际例子来说明断口学在断裂失效分析中的应用。

本书是近 20 年来断口学领域的第一本专著,从宏观到微观,从定性到定量,从原因诊断到机理研究,阐述了断口学的形成和发展。书中加入了一些作者的研究成果,如以断裂事故宏观断口的定性和定量诊断判据为依据的断口分析诊断技术、金属疲劳断口宏观断口物理数学模型和定量反推分析、冷脆断裂机理和韧脆转移的工程应用等。另外,书中附有大量的断口图片,形象地说明断口的特征,便于读者对断口的理解。

本书对工程金属材料、机械、失效分析预测预防等领域的科技人员有较高的指导作用和参考价值。

《中国工程院院士文库》编辑委员会

主 任：徐匡迪

副主任：刘德培 柳百成 刘志鹏 肖培根

委 员：钟群鹏 梁骏吾 李正邦 陈毓川

梁应辰 李泽椿 何继善 董庆九

吴 向 王国祥 林金安

编辑部：董庆九 刘 静 王国祥 张海辰

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
且具有极高的学习和参考价值,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

序

材料在各种工程应用中的失效模式主要有断裂、腐蚀、磨损和变形等,其中断裂失效的危害性最大,也是材料失效研究的主要内容之一。断口是试样或零件在试验或使用过程中断裂后形成的相匹配的表面,是断裂失效最主要的残骸,也是断裂失效分析最重要的物证。断口忠实地记录了材料在载荷与环境作用下断裂前的不可逆变形以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程。因此,专门研究断口的断口学就成了失效分析学科体系中的重要基础和组成部分。

人类对断口的认识可以追溯到“铜器时代”,第一例有文字记载的专门的断口形貌研究发表在1540年,由于当时金相显微镜技术的快速发展,人们的研究兴趣集中于金属的微观组织。直到1944年,Carl A. Zapffe定义了断口学中最关键的名词——断口形貌学(fractography)之后,断口分析才进入了一个快速发展的时期。随着力学(特别是断裂力学、损伤力学和微观力学)、材料学、断裂物理和断裂化学等理论基础的发展,光学显微技术、电子显微技术等手段的应用,以及数学、统计学和计算机模拟等科学方法的引入,断口学的研究在20世纪后半叶进入了一个全新的发展阶段。

断口学作为一个专门研究方向,并发展成为一门学科,是工程科学迅猛进展和材料服役条件日益苛刻的必然结果,是材料理论研究与实证分析的良好结合,涉及断裂力学、断裂物理和显微分析技术,是工程科学中比较典型的一门交叉综合学科。《断口学》一书从理论与实践相结合的角度,首先介绍了断口学研究所需要的断裂力学和断裂物理的基础知识,然后较广泛地总结了近年来断口学研究所使用的技术、方法和思路,系统地阐述了韧性、脆性和疲劳断口的特征诊断及机理。该书内容丰富,重点突出,例证生动,文理通顺。特别应指出的是,书中给出的各种断口形貌图片,不仅具有典型性,而且非常清晰,质量很高,可以说是不可多得的。

该书可供从事机械制造、材料科学与工程失效分析的工程技术人员参考,也是高等工科院校中上述相关专业师生的良好教学图书。

全国政协副主席
中国工程院院长

徐匡迪

2005年12月26日

前 言

机电装备的断裂失效,直接威胁着人民的生命和财产安全,危害着社会的稳定和繁荣。断裂失效原因的诊断至关重要,而装备断裂失效后形成的断口具有重要性、全信息性、唯一性和可分析性,是失效诊断最主要的物证之一,是断裂失效模式、原因和机理诊断的“钥匙”。经过我国几代科技工作者的努力,失效分析从一门技术飞跃成为一门交叉综合的分支新兴学科——失效学,而断口学就是失效学体系的重要组成部分。本书是失效学体系的理论论著之一。

本书以断口为研究对象,全面、综合、系统地介绍了断口学研究的内涵和外延,可作为材料、机械、失效分析及相关专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供从事上述专业的科技人员和管理人员参考。

全书共九章,第一章介绍断口分析的地位、作用及历史发展,第二章介绍断口学研究中所用的断裂力学知识,第三章介绍断口学研究中所用的断裂物理知识,第四章介绍断口分析技术,第五章介绍断口分析思路,第六章介绍韧性断裂形成的断口及其分析,第七章介绍脆性断裂形成的断口及其分析,第八章介绍疲劳断裂形成的断口及其分析,第九章介绍断口学在断裂失效分析中的应用。

本书是在总结前人知识的基础上完成的,书中的一些断口图片引自同行的劳动成果,其中有些在参考文献中并未注明,特此声明并表示感谢。同时衷心感谢北京航空航天大学吴素君教授对本书的审校及提出的宝贵意见,衷心感谢中国科学院院士高镇同先生和中国工程院院士高金吉教授对本书的高度评价。

由于受工作和认知的局限,本书一定存在一些不妥之处,希望读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 断口分析的重要性	(1)
1.2 历史、现状和展望	(13)
1.3 断口的分类	(21)
参考文献	(22)
第二章 断裂力学基础	(24)
2.1 断裂力学的起源和发展	(24)
2.2 断裂力学准则判据及相互之间的关系	(39)
2.3 材料的断裂韧度	(46)
参考文献	(53)
第三章 断裂物理基础	(54)
3.1 断裂宏观理论	(54)
3.2 断裂微观理论	(62)
参考文献	(77)
第四章 断口分析的技术	(78)
4.1 断口的制备保存技术	(78)
4.2 断口宏观分析技术	(84)
4.3 光学显微镜断口分析技术	(86)
4.4 断口的电子显微分析技术	(88)
4.5 断口辅助分析技术——剖面术、蚀坑术、金相术	(97)
4.6 断口的分形分析技术	(100)
4.7 断口的定量分析技术和自动诊断分析技术的发展	(106)
参考文献	(122)
第五章 断裂失效分析的思路	(124)
5.1 断裂失效分析思路的思想方法	(124)
5.2 断裂失效分析思路	(126)
参考文献	(129)
第六章 韧性断裂的断口及其分析	(131)
6.1 韧性断裂的机理及其影响因素	(131)
6.2 韧性断口的特征和诊断	(140)
6.3 韧性断口的定量分析	(161)

6.4 韧脆转移及其机理	(164)
参考文献	(174)
第七章 脆性断裂的断口及其分析	(176)
7.1 脆性断裂的重要性	(176)
7.2 脆性断裂的机理和影响因素	(178)
7.3 脆性断口的形貌特征	(184)
7.4 环境促使脆性断裂	(203)
7.5 脆性断口的诊断	(228)
7.6 脆性宏观断口的数学物理模型分析——人字纹	(235)
参考文献	(240)
第八章 疲劳断裂的断口及其分析	(242)
8.1 概述	(242)
8.2 疲劳断裂机理	(244)
8.3 疲劳断裂的影响因素	(260)
8.4 疲劳断口的特征	(270)
8.5 疲劳断裂的诊断	(291)
8.6 疲劳断口的物理数学模型及定量反推分析	(310)
参考文献	(326)
第九章 断口学在断裂失效分析中的应用	(329)
9.1 设计原因造成的断裂失效	(329)
9.2 材质原因造成的断裂失效	(331)
9.3 工艺原因造成的断裂失效	(335)
9.4 环境原因造成的断裂失效	(341)
参考文献	(349)

第一章 绪 论

断口是试样或零件在试验或使用过程中断裂后所形成的相匹配的表面。断口学是研究断口的形貌、性质进而分析断裂类型、断裂方式、断裂路径、断裂过程、断裂性质、断裂原因和断裂机理的科学。它记录了材料在载荷与环境作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程。断口的形貌、色泽、粗糙度、裂纹扩展途径等受断裂时的应力状态、环境介质及材料性质的制约,并与时间相关。对断口进行分析可用来推断断裂过程,寻找断裂原因,评定断裂的性质。断口学在工程实践和理论研究中有着十分重要的作用。

1.1 断口分析的重要性

1.1.1 断口分析在工程实践中的重要性

据统计^[1],在发达国家每年因为工程系统的失效造成的损失大约占国民生产总值的5%~10%;如果正确应用已有的技术进行失效预防,大约有一半的损失是能够避免的。失效分析在现代工业技术中占有十分重要的地位。在经济和管理上,失效分析是防止失效事故的再发生、减少经济损失或人员伤亡的必由之路,是对国内外经济纠纷进行仲裁或判决、索赔的科学技术依据,是创建优质名牌产品、提高产品的质量和更新换代的重要途径,能为各级领导提供反馈和进行技术经济规划和决策的重要参考依据。在社会生活上,失效分析是促进安全生产、保护生产力的有效武器,是贯彻“安全第一”、“预防为主”方针的一项重要工作,是社会安定、经济持续发展的重要保证,是社会主义市场经济体制优越性的重要体现。在工程技术上,失效分析是机电产品维修工作的技术基础和前提条件,是可靠性工程的基础技术工作之一,是发展和完善安全工程技术的重要实践基础,是修改和完善产品和技术标准的科学实践依据。在科技进步上,失效分析是认识客观世界事物本质的重要知识源泉,是发展新学科、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法的重要窗口,是发展科学技术包括发展高科技的不可避免的机遇和挑战,是从失败入手着眼于成功和发展的科技领域,是从过去入手着眼于未来和进步的科技领域,可以认为是第一生产力中的最活跃的因素之一。

在机械装备的各类失效中以断裂失效最主要、危害最大。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,美国因断裂和防止断裂而付出的总代价是每年1190亿美元,约占国民经济总

产值的4%。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进行了调查,其报告指出,如果每年投入2亿美元用于断裂和防止断裂研究,潜在的经济效益为每年800亿美元^[2]。在对断裂失效长期的分析和研究中,人们总结归纳出一系列行之有效的失效分析技术,大致可分为如图1.1所示的几类。

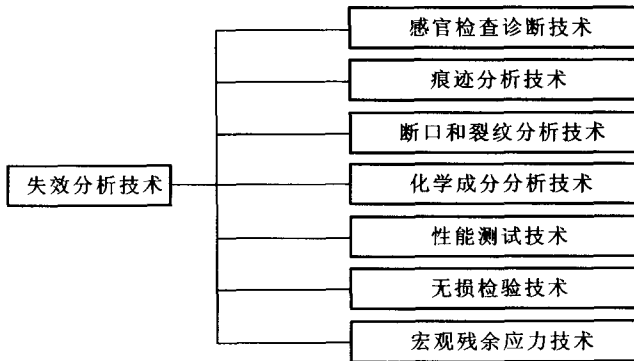


图 1.1 失效分析技术分类

1856年,R. Mallet研究了断裂的加农炮管,他把断口细节和凝固方式联系起来考虑;可见,第一例失效分析事件就是和断口分析密切相关的。

断裂失效分析可分为残骸分析、参数分析和资料分析。残骸分析包括断口分析、裂纹分析、痕迹分析。参数分析包括力学、环境、材料性能等参数的分析。资料(案例)分析是参考已有案例进行分析,包括统计、综合和专家系统等分析。在各种断裂失效分析手段中,断口分析是最主要的工具,因为断口记录了材料在载荷与环境作用下发生的不可逆变形,以及裂纹萌生和扩展直至断裂的全过程。断面的形成不仅与材料的成分、组织及试样或零件的结构有关,而且与试样或零件断裂失效过程中的受力状态和环境有关,包含了试样或零件断裂失效过程中的大量信息,而且这些信息是可以分析的。因而通过断口分析可以找到断裂的原因及影响因素,因此断口分析在断裂失效分析中具有极其重要的作用,是断裂失效分析的向导,可指导断裂失效分析少走弯路。

断口的重要性——断口是断裂失效(事故)最主要的残骸,是断裂失效(事故)分析的物证。在有些断裂故障分析中,裂纹痕迹有时是不存在的或找不到的;另外,把裂纹打开就是断口,此时裂纹分析实际上就变成了断口分析。因而,断口分析在断裂失效(事故)分析中是十分重要的。

断口的全息性——断口记录了从裂纹萌生、扩展直到断裂的全过程,是全信息的。断口可以说是断裂故障的“第一裂纹”,而其他裂纹可能是第二甚至第三生成

的。第一与第二裂纹的模式、原因和机理有时是相同的,有时是不同的,也就是说裂纹有可能只记录了断裂后期的信息,因此断口分析在断裂事故分析中具有核心的地位和作用。

断口有时具有唯一性——断口有时是断裂失效(事故)唯一的“物证”,人证有时是不可靠的,只能作为辅助信息或证据。

断口信息的可分析性——利用现代分析技术和方法,断口包含的信息是可以“破译”的,分析断口可以获取失效的信息。

失效诊断是失效分析的主要任务之一。失效诊断依其目的要求和内容深度可分为三个层次:失效模式的诊断、失效原因的诊断和失效机理的诊断。

下面分别介绍断口分析的步骤及各自的依据。

1. 首断件的判定

首断件的判定,即从众多的断口中寻找首先破坏件,这对于断裂失效分析是至关重要的,是断裂失效诊断成功与否的关键。断口残骸分为首断件(绝大多数情况下为肇事件)、随后断裂件(可能是裂纹残骸,也可能是断口残骸)以及被动断裂件(瞬断件)。其中,首断件和随后断裂件为主动断裂件。主动断裂件一般为脆性断裂、疲劳断裂或工艺老裂纹断裂,因此要从众多(有时也有可能成千上万个断口,例如飞机残骸断口)的断口中寻找出脆性断口、疲劳断口和工艺老裂纹断口,再从中进行分析,找出整个事故的首断肇事件。准确找到首断件后,有时因首断件上有多个断口(或裂纹),这就要求找到首先开裂的断口,即主断口。主断口的确定有 T 型法、分叉法、变形法、氧化颜色法、疲劳裂纹长度法等。

2. 断裂性质(或断裂模式)的分析及其依据

断裂性质(或断裂模式)分析是指对首断件性质的分析。断裂模式分为一级、二级、三级等断裂模式,其中一级断裂模式是首要的^[3]。

一级断裂模式主要有脆性断裂、塑性断裂、疲劳断裂三大类。区别脆性断裂和塑性断裂的主要依据是宏观塑性变形的大小;区别脆性断裂和疲劳断裂的主要依据是断裂特征。

二级、三级断裂模式的诊断依据主要是断口的形貌,断口的颜色,断口上的腐蚀产物、断口晶面晶向和显微组织,断口的宏观走向与主应力方向、与零件形状、与轧制锻造流线方向的关系,断口的成分和元素的分布,断口边缘情况和变形情况等^[4]。下面我们分宏观断口和微观断口两个方面来简单叙述断口诊断的主要依据。宏观断口诊断的依据主要如下:

- 1) 断口的平直情况和断口的主要特征形貌。
- 2) 断口的颜色(氧化色、腐蚀产物颜色、夹杂物颜色、光亮情况等)。
- 3) 断口与主正应力(或主切应力)方向的关系。
- 4) 断口与成形方向(轧制方向、流线方向)的关系。

微观断口诊断的依据主要如下:

- 1) 断口周围的塑性变形大小或有无。
- 2) 断口的边缘锐利情况。
- 3) 断口与零件形状或应力集中的情况。
- 4) 断口各特征形貌面积的比例。
- 5) 断口与晶面、晶向之间的关系。
- 6) 断口与晶界的关系。
- 7) 断口与显微组织的关系(是否沿相界面或弱相断裂)。
- 8) 断裂源区的情况(是否有材质缺陷或几何缺陷等)。
- 9) 断口的化学成分或杂质环境元素的分布情况。
- 10) 断口上二次裂纹的有无或多少、分布情况。

表 1.1^[5]列出了断裂失效信息(与断裂失效有关的对象、现象和环境统称为断裂失效信息)与断裂模式的关系。每一种断裂失效信息都是断裂失效的一个特征,或反映影响断裂失效的一个因素或条件。综合几种断裂失效信息可以诊断出断裂失效的模式。

以脆性(解理)断裂失效模式为例来介绍一下断裂失效模式与断裂失效信息的关系。与脆性(解理)断裂失效模式相关的断裂失效信息有:从宏观上看,裂纹一般起源于应力集中处(R 处),并且与接触介质无关,裂纹扩展方向与主正应力垂直;从微观上看,裂纹一般起源于晶内或相内,沿特定的晶面或晶向扩展。裂纹宏观上以点放射或沿线分布,啮合好,间隙小,裂尖尖锐,断口附近残留宏观塑性变形小,断口比较平直;断口为本体材料颜色;断口宏观形貌呈结晶状(颗粒状)或放射状(人字纹);典型的微观断口形貌为解理(河流、扇形、台阶等)。应力条件为冲击载荷($a \geq a_c$ 或 $k_1 \geq k_{1d}$)。

对于那些过渡的、多因素作用的、非典型的二级、三级失效模式的诊断,虽然单从断口分析不能得到最终的结论,但是其断口分析是必不可少且尤其重要的。如对于沿晶断裂失效模式,它的断裂特征和断口诊断依据如表 1.2 所示。

另外需要指出的是,断口图谱是人们研究断口经验的总结和智慧的结晶,是断口学内容的重要组成部分。虽然断口图谱只是说明特定条件下的断口特征形貌,但是在断裂失效模式的诊断中,人们常依据断口图谱来进行“看图识字”的特征诊断。

3. 断裂原因的分析及其依据

断裂原因是指酿成断裂的主要因素。从责任上来看,断裂原因可以分为设计原因、材质原因、工艺原因、环境(使用或老化)原因等。断裂原因的诊断是在断裂模式诊断基础上进行的。

从力学观点来看,断裂原因是判断材料抗力过小还是载荷动力过大。不同的断裂模式其断裂原因中的材料的抗力指标不同。塑性断裂的抗力指标一般指抗拉强度;脆性断裂的抗力指标是材料的冲击韧性或断裂韧度;疲劳断裂的抗力指标则是疲

表 1.1 断裂失效信息与断裂失效模式的关系

项目信息	失效信息名称		主要失效模式和特征	
裂纹信息	裂纹起源位置和扩展方向	与零件应力、焊缝的关系	① 在应力集中处(R处)—— ② 在焊缝区—— ③ 在非应力集中区——	
		与接触介质的关系	① 在介质接触的表面—— ② 在点蚀(磨蚀)坑处—— ③ 与接触介质无关——	
		与主正应力或主切应力方向的关系	① 与主正应力方向垂直—— ② 与主切应力方向平行—— ③ 与主正应力、主切应力无关——	
		与显微组织的关系	① 在夹杂物处—— ② 在某一相组织处—— ③ 与显微组织无关——	
		与晶粒边界的关系	① 在晶粒边界或相界处—— ② 在晶内或相内—— ③ 在晶界也在晶内处——	
		与晶面、晶向的关系	① 在某一特定的晶面或晶向—— ② 非特定的晶面、晶向—— ③ 混合情况——	
	裂纹分布和形貌	宏观	按点、线分布情况	① 以点放射分布—— ② 沿线分布—— ③ 不规则分布——
			数量和平直情况	① 单条、“平直”状—— ② 分叉或台阶或锯齿状—— ③ 网状或龟裂形貌——
			啮合和间隙情况	① 啮合好、间隙小、裂尖尖锐—— ② 啮合差、间隙大、裂尖圆钝——
		微观	与“裂纹起源和扩展方向”的微观相同	
断口的形貌和特征	宏观	断口附近的残留塑性变形	① 塑性变形大、断口凹凸不平—— ② 塑性变形小、断口比较平直——	
		断口的颜色	① 断口为本体材料颜色—— ② 断口上有氧化物或其他腐蚀产物的颜色——	
		断口的形貌特征	① 纤维状(鹅毛绒状)—— ② 结晶状(颗粒状)—— ③ 放射状(人字纹)—— ④ 贝壳状(弧状)——	
			① 韧窝(撕裂棱、微孔等)—— ② 解理(河流、扇形、台阶等)—— ③ 沿晶(岩石、冰糖块等)—— ④ 条带(辉纹、“轮胎”痕迹等)—— ⑤ “鸡爪状”形貌—— ⑥ 腐蚀产物(氧化物、腐蚀产物、泥纹等)—— ⑦ 其他形貌——	
	微观	断口的形貌特征		
	腐蚀信息	材料与腐蚀介质	① 碳钢及合金钢在 HCl、碱、硝酸盐、HNO ₃ 、海岸大气、工业大气、H ₂ S、H ₂ SO ₄ + HNO ₃ 等中—— ② 铬不锈钢在 NaCl、氧化物、氟化物、溴化物、碘化物、HCl、海岸大气、工业大气、水及蒸汽、H ₂ S 等中—— ③ 奥氏体不锈钢在氟化物、氯化物、碱、海岸大气等中—— ④ 奥氏体不锈钢在碱、FeCl ₂ 、FeCl ₃ 、H ₂ SO ₄ 等中——	
腐蚀形貌特征		① 材料上有腐蚀性的介质—— ① 腐蚀产物附着、剥离—— ② 表面颜色发暗、敲击声音频率降低—— ③ 腐蚀坑——		
应力信息	应力性质和特征	① 静载荷 ($\sigma \geq \sigma_b$ 或 $k_1 \geq k_{1c}$)—— ② 交变载荷 ($\sigma \geq \sigma_{-1}$)—— ③ 冲击载荷 ($a \geq a_c$ 或 $k_1 \geq k_{1d}$)——		

脆性(解理)断裂
脆性(沿晶)断裂
脆性(沿夹杂物)断裂
脆性(沿晶)断裂
应力腐蚀(穿晶)断裂
应力腐蚀(沿晶)断裂
疲劳断裂
塑性断裂
腐蚀疲劳断裂

表 1.2 沿晶断裂失效模式的断裂特征和断口诊断依据

沿晶断裂失效模式和原因	断裂特征和断口诊断依据
低熔点金属脆断	沿晶或准解理断口上有低熔点金属痕迹
晶间腐蚀脆性	沿晶间、晶界 Cr 元素密集,晶间贫 Cr 元素
选择性腐蚀脆性	沿晶界或相界断口上有腐蚀产物
碱性脆性	沿晶断口上有碱化物
第二相沿晶析出脆性	沿晶断口上有第二相成分
石墨化脆性	断口上有石墨形态
氢脆	沿晶或准解理断口上有氢聚集花样
应力腐蚀脆性	沿晶或准解理断口上有腐蚀产物
过热	晶粒长大,准解理或沿晶韧窝,有硫化物析出
过烧	沿晶、氧化、晶粒长大,有低熔点相析出
焊接热脆性	沿焊缝枝晶断裂,有氧化,杂质元素多
焊接冷脆性	有时沿晶,与焊接热脆性相比,断口亮,杂质元素少

劳极限或条件疲劳应力。断裂原因的诊断就是要分清在哪个过程中造成的断裂应力过大或材料抗力过低。

在断裂原因的诊断中,除了要对断口进行认真、仔细、微观的分析之外,还要对材料本身的性能、受力情况和大小、环境因素及其后果等方面进行全面、系统和深入的分析、比较、综合和判断。“断裂失效模式和原因的特征判据的对比综合分析诊断法”是一种很有意义的研究方法,表 1.3 列出了断裂失效模式和原因相结合的 54 种实用分类。

由表 1.3 可见,断裂失效的原因繁杂多样。为了正确地诊断断裂失效的原因,对单一断裂模式和原因的分析诊断是非常重要的,这是断裂失效(事故)原因分析的基础,我们必须着眼于它们各自特征判据的分析和识别,而特征判据只有进行相互比较才能加以鉴别。实际的断裂模式和原因往往不是单一的、而是复合的,对这些疑难断裂模式和原因的诊断应特别强调其调查研究、科学试验和综合分析。

表 1.3 断裂失效模式和原因相结合的实用分类

模式 原因		一级断裂模式		
		韧性断裂	脆性断裂	疲劳断裂
一级断裂原因	设计原因	① 选材错误 ② 强度不够或应力过大	① 选材错误	① 选材错误 ② 过渡圆角半径过小 ③ 设计交变应力过高
	材质原因	③ 成分不合格 ④ 强化元素少	② 夹杂物脆性 ③ 缺口敏感性引起的脆性	④ 夹杂物 ⑤ 材料具有疲劳缺口敏感性 ⑥ 材料疲劳软化
	工艺原因	⑤ 未(或不完全)热处理强化	④ 马氏体脆性 ⑤ 低温回火脆性 ⑥ 高温回火脆性 ⑦ 475℃脆性 ⑧ 过热过烧脆性 ⑨ 冷作硬化脆性 ⑩ 应变时效脆性(蓝脆) ⑪ 焊接热脆性 ⑫ 焊接冷脆性	⑦ 缺口(如刀痕)引起的疲劳 ⑧ 装配应力过大引起的疲劳 ⑨ 热处理不合格引起的疲劳
	环境原因	⑥ 使用中“软化”,如高温局部“软化”	⑬ 高速脆性 ⑭ 低温脆性 ⑮ 低熔点脆性 ⑯ 氢脆性 ⑰ 应力腐蚀脆性 ⑱ 晶间腐蚀脆性 ⑲ 选择腐蚀脆性 ⑳ 碱脆性 ㉑ 高温硫化脆性 ㉒ 低温硫化脆性 ㉓ 辐照脆性 ㉔ 相变脆性(如锡瘟) ㉕ 第二相沿晶析出脆性 ㉖ 石墨化脆性 ㉗ 蠕变脆性	⑩ 接触疲劳 ⑪ 低熔点金属引起的疲劳 ⑫ 腐蚀疲劳 ⑬ 热疲劳 ⑭ 高温疲劳 ⑮ 蠕变-疲劳交互作用 ⑯ 弯曲共振疲劳 ⑰ 扭转共振疲劳 ⑱ 弯、扭组合共振疲劳 ⑲ 声疲劳 ⑳ 油膜振动疲劳 ㉑ 微振疲劳

断裂源是裂纹成核或萌生的部位,一般在试验试件或机械零部件的表面、次表面、应力集中处(如缺口、凹槽、油孔、尖角、焊缝等)或材料内部缺陷处。

在断裂失效分析中主要利用断口的宏观形貌特征,如同心的纤维状标志、放射状标志、海滩标志以及反映裂纹扩展方向(扩展逆方向指向断裂源方向)的人字纹标