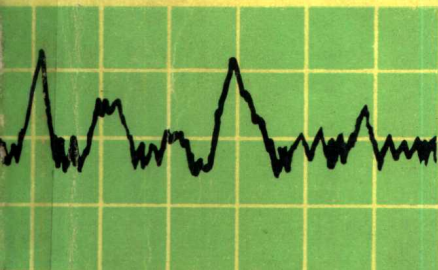
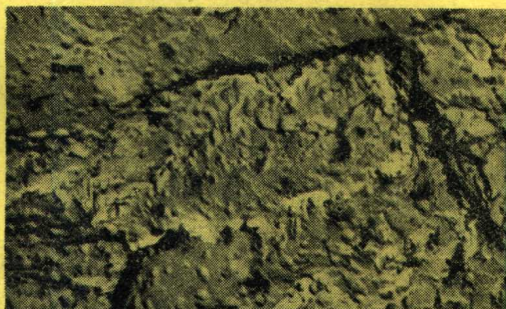


金属构件断裂分析与防护

郑文龙 编著



上海科学技术出版社

金属构件断裂分析与防护

郑 文 龙 编 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书应用金属学、金属物理以及力学观点与方法,论述了工程中金属构件常见的几种断裂类型的宏观和显微特征。这些断裂类型主要包括疲劳断裂、应力腐蚀断裂、过载断裂、蠕变断裂、氢脆断裂、材料脆性断裂以及混合断裂等。同时提出了分析工程中金属构件断裂事故的一般步骤与方法。最后列举了工程中数件较为重大的金属构件断裂事故分析实例,并提出了防止发生类似断裂事故的相应措施。

本书可供与金属材料研究有关的工程技术人员、金属学及金属物理专业师生参考。

金属构件断裂分析与防护

郑文龙 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.75 字数 234,000

1980年9月第1版 1980年9月第1次印刷

印数 1—6,000

书号: 15119·2071 定价: (科四) 1.00 元

前 言

断裂已经成为工程上重要的研究课题之一，因为断裂直接关系到工程零部件的寿命和整个工程的安全。由于金属具有优良的性能，在工程上被广泛地应用着，因此在整个工程断裂事故中金属构件的断裂占主要地位。近年来，国内外在金属断裂的研究方面做了大量的工作。研究的目的是通过对工程中金属构件断裂原因的分析，研究各种断裂的微观机理，最后找出防止发生断裂的有效措施，以使工程安全运行。

金属构件断裂的主要类型有：过载断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂、蠕变断裂、氢脆断裂、材料的脆性断裂及混合断裂等。这些断裂涉及到材料、热处理、加工、运行等问题，所以断裂的研究是属于多科性的边缘学科的问题。目前对各种断裂的机理还在研究之中，结论尚未统一。但对各种断裂方式、性质和形貌特征做了大量的研究工作，研究的成果足以判断工程中金属构件断裂的类型。这在工程上是极其有用的，是制定防止各种断裂的有效措施的依据。所以，工程上对断裂构件的分析具有相当重要的实际意义。

本书着重叙述了各种常见断裂类型的形态特征，以及如何应用光学仪器、X光、电子显微镜、电子扫描显微镜、电子探针俄歇能谱仪等电子光学仪器，以及化学和力学测试方法进行综合性的研究和分析工程中金属构件的断裂现象。概述分析了工程中金属构件断裂事故的一般步骤、方法，以及如何正确处理断裂事故的现场、断口、数据与图片。书中举出了十二

个工程上较为重大的金属构件的断裂事故分析实例。一方面介绍了各种类型的实际断裂形貌特征，同时也说明了应该如何去分析不同的断裂事故。

作者在筹写本书时得到了柯俊教授的鼓励和支持，完稿后，周惠久教授在百忙中给予审阅和指教，同时还得到桂立丰工程师、吴民达工程师、徐克薰工程师的审阅和指教，作者在此向他们表示衷心的感谢。

本书是作者多年来从事这方面工作所积累的一些资料和实践体会。但由于水平有限，难免有错误之处。恳切希望广大读者多提宝贵意见，以便改正。

作者 一九七九年五月

目 录

前言

第一章 概述1

第二章 金属构件断裂事故的类型及其特征6

§ 2.1 金属构件断裂的分类方法及比例6

一、金属构件断裂的分类方法6

二、各种金属构件断裂所占的比例8

§ 2.2 疲劳断裂12

一、疲劳断裂的定义12

二、疲劳断裂的宏观特征18

三、疲劳断裂的显微特征24

§ 2.3 应力腐蚀断裂38

一、应力腐蚀断裂的定义38

二、应力腐蚀断裂的宏观特征49

三、应力腐蚀断裂的显微特征50

§ 2.4 过载断裂57

一、过载断裂的定义57

二、过载断裂的宏观特征58

三、过载断裂的显微特征60

§ 2.5 蠕变断裂66

一、蠕变断裂的定义66

二、蠕变断裂的宏观特征68

三、蠕变断裂的显微特征68

§ 2.6 氢脆断裂71

一、氢脆断裂的定义71

二、氢脆断裂的宏观特征	84
三、氢脆断裂的显微特征	86
§ 2.7 材料的脆性断裂	90
一、回火脆性断裂	90
二、低温脆性断裂	91
三、解理断裂	93
四、第二相引起的脆性断裂	95
§ 2.8 混合断裂	96
第三章 金属构件断裂事故分析步骤与方法	100
§ 3.1 断裂事故的现场处理	100
一、断裂事故的现场记录	100
二、断裂构件的处理及断口的保存	101
§ 3.2 对断裂构件制造和运行历史的调查	104
§ 3.3 断裂构件性能的测定和无损检测	105
一、断裂构件性能测定及无损检测的必要性	105
二、断裂构件的无损检测	105
三、断裂构件的性能测定	106
§ 3.4 断裂构件主断面的断口分析	106
一、断口的宏观分析(断裂源的寻找与判断)	107
二、断口的微观观察	111
三、断裂途径与显微组织的关系	115
四、断口产物的分析	121
五、断口分析简介	121
§ 3.5 断裂原因的判定及重现性实验	131
一、检验数据的处理	131
二、图片处理	133
三、重演性实验	134
§ 3.6 防止断裂措施的提出及断裂力学的应用	135
一、防止断裂措施的提出	135

二、断裂力学在构件断裂方面的应用	146
§ 3.7 总结及分析报告	155
第四章 金属构件断裂事故分析实例	157
§ 4.1 合成氨厂高压管爆炸事故分析	157
一、破裂高压管的情况	157
二、破裂面的观察	158
三、高压管破裂的原因	158
四、防止措施	160
§ 4.2 飞机主梁断裂事故分析与防止措施	160
一、主梁断裂的概况	160
二、主梁材料性能的检验	162
三、断口分析	166
四、主梁断裂起因的判断和分析	171
五、引起主梁应力腐蚀开裂原因的进一步分析	178
六、结论	180
七、防止措施	181
§ 4.3 14MnMoVB 钢制造多层式高压容器开裂 事故分析	181
一、14MnMoVB 钢制造多层式高压容器开裂的情况	181
二、断裂分析	182
三、防止措施	186
§ 4.4 氨基甲酸铵泵泵体开裂分析与防止措施	186
一、概况	186
二、断裂分析	188
三、现场试验	195
四、结论	198
五、防止措施	198
§ 4.5 汽轮机叶轮飞裂事故分析与建议	199
一、飞裂叶轮的原始资料	200

二、断口分析	206
三、制造问题	228
四、腐蚀介质的探讨	238
五、断裂力学试验及其估算	242
六、结论	246
七、几点建议	246
§ 4.6 高温炉辊龟裂破裂	248
一、概况	248
二、炉辊破裂原因的分析与建议	249
§ 4.7 解吸塔 12Cr2AlMoV 焊缝硫化氢应力腐 蚀开裂分析与防止措施	251
一、解吸塔开裂的情况	251
二、塔顶开裂部位的剖析	253
三、开裂原因的分析	256
四、结论与防止措施	260
§ 4.8 12.5 万千瓦汽轮机末级叶片断裂分析与 防止措施	261
一、叶片损坏的情况	261
二、断裂叶片的基本参数	262
三、叶片的材料与性能	262
四、断裂叶片的断口分析	263
五、断裂原因的分析	264
六、结论与防止措施	268
§ 4.9 脱硫塔腐蚀破裂事故分析	268
一、天然气脱硫的一般情况	268
二、对渗漏区的剖析	270
三、引起塔体发生应力腐蚀开裂的原因	277
四、结论与防止措施	278
§ 4.10 大型水轮机叶片水下疲劳开裂分析	279

一、叶片断裂概况	280
二、断口分析	281
三、水下疲劳试验	288
四、结论	295
§ 4.11 高温镍基合金持久断口的观察	295
一、断口的观察	296
二、X 光相分析	298
§ 4.12 不锈钢热交换器的应力腐蚀开裂及防止 措施	301
一、热交换器的结构、材质及主要运行参数	301
二、热交换管子开裂的形态与分析	302
三、开裂原因的进一步分析与防止措施	306
结束语	314

第一章 概 述

材料的断裂问题很早就引起了人们的重视。例如，对于金属材料疲劳断裂问题的研究早在 100 多年前就开始了。1920 年 Griffith 对材料的脆性开裂进行了研究，他发现在玻璃和陶瓷等脆性材料中存在着微裂纹。由于这些微裂纹的存在，使材料的断裂强度大大降低了。他通过大量的实验，成功地推导出脆性材料的断裂应力 σ_f (公斤/毫米²) 与所存在的裂纹深度 a (毫米) 的关系^[1]：

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a(1-\nu^2)}}$$

式中： E ——材料的杨氏模量(公斤/毫米²)；

γ ——断裂表面能(公斤/毫米)；

ν ——材料的泊松比(无量纲)。

此式就是著名的 Griffith 脆性断裂判断依据，也是现代线弹性断裂力学的基础。

自第二次世界大战以来，陆续发生过许多重大的工程断裂事故，而每次对重大断裂事故的分析研究都促进了材料科学的发展。如在第二次世界大战期间，发生了严重的船舶脆性断裂事故，经过对 5000 艘船舶的调查结果，其中在 1942 年至 1946 年之间发生断裂的船舶达 1000 艘，1946 年至 1952 年有 200 艘发生严重断裂事故^[2,3,4]。图 1-1 就是 1943 年 1 月美国的一艘 T-2 油船停泊在装货码头时断裂成两半的情景^[5]。当时计算的甲板应力仅为 7 公斤/毫米²，远远低于船

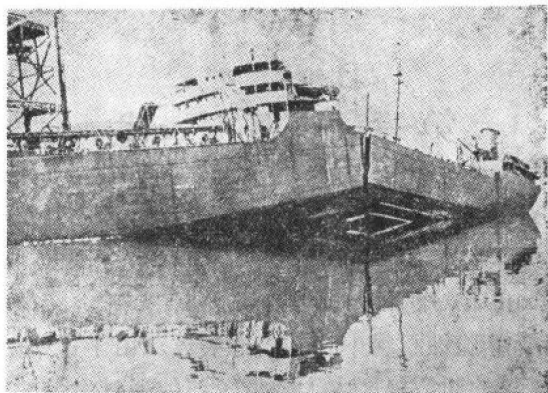


图 1-1 美国 T-2 油船开裂的情景

板钢的强度极限。1945 年至 1948 年美国国家标准局认真分析和研究了第二次世界大战中焊接船舶的断裂事故，找出了却贝 V 型缺口试样的试验室测量能量水平与钢材实际使用性能之间的关系，如图 1-2 所示。从图中曲线的变化可以看出，当温度降低时，钢材

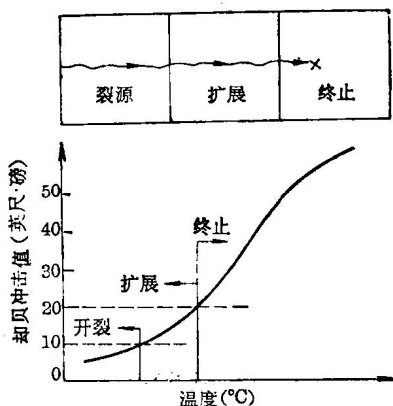


图 1-2 却贝 V 型缺口数据与第二次世界大战期间船舶钢工作性能之间的关系

存在着一个无塑性转折温度 (NDT)，在低于这个温度时将发生低应力脆性破坏，从而指出钢板钢低温性能的重要性，并确定了这个转折温度的却贝 V 型缺口试验临界值为 15 英尺·磅。使钢材的检验标准由常温发展到低温。

在本世纪五十年代

初，美国北极星导弹固体燃料发动机壳体在实验时发生了爆炸成许多小块的事故(图 1-3)^[6]。事故发生以后引起了普遍重视。壳体是原先经过严格检查的，它所使用的材料是 140 公斤/毫米²屈服强度的高强度钢，并经过韧性检验，认为完全合格才使用的。当时组织了 20 多个单位进行研究，指出破坏的原因是由于材料中存在 0.1~1 毫米宏观的裂纹源扩展所致。因而对经典的材料力学检验提出了疑议，注意到原始微裂纹的重要性，促进了新学科——断裂力学的发展。

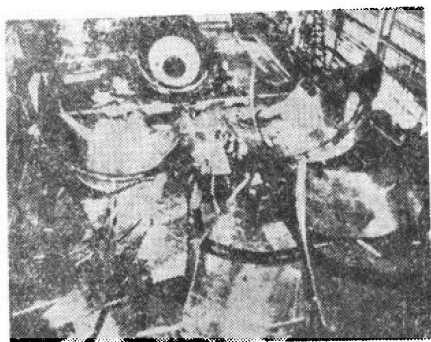


图 1-3 美国 260 英寸导弹固体燃料发动机在水压试验时发生爆炸后的残骸

由上述事例可以看出，对工程来说，断裂事故的分析是相当重要的。可以说金属材料的研究就是在与断裂作斗争中发展起来的。特别是近代，随着宇航、原子能、海洋开发、石油化工等工程的发展，工程中的各种金属构件在运行中的条件(如载荷、环境、温度等)愈来愈差，发生断裂的几率也在增加，所以构件的可靠性及构件运行的寿命已成为工程上严重关注的问题。虽然，人们为此曾采取了各种措施，例如为了保证工程中金属构件的冶金因素，利用快速分析、理化检验，使成分控制在规定的范围之内；通过各种加工成型工艺，应用无损探伤方法，控制金属构件的缺陷大小和数量；最后通过合理的设计步骤使金属构件在其所能承受的运行条件下安全运行。

尽管人们从各方面采取措施,但是在工程上金属构件的断裂事故依然发生,而且往往是灾难性的,经济上的损失也是极大的。如就电站设备来看,西德从1971年至1974年蒸汽轮机设备共发生过1393起事故。法国核电站的压力容器和英国核电站的大型锅炉都发生过爆炸事故,如1965年英国原子能发电站就发生过叶轮飞裂爆炸事故^[7]。1970年ASTM曾作过统计,美国每年在工程上因疲劳断裂或应力腐蚀开裂所造成的损失超过3千万美元^[8]。1979年5月25日,美国一架DC-10大型客机在芝加哥奥黑尔国际机场起飞后不久坠毁。机上279人全部遇难。这是美国民航史上死亡人数最多的一次坠毁事件。为此美国政府在6月6日下令无限期地停止所有DC-10飞机飞行。显然,何时重发DC-10大型客机的飞行合格证,要看对这次事故分析的结果及能否采取有效措施而决定。据说这次大型客机坠毁的原因是由于挂飞机发动机的螺钉疲劳断裂所引起的。是否确实还有待于进一步调查研究。

由腐蚀导致金属构件的失效也是相当严重的,美国每年由于腐蚀造成损失达700亿美元(1975~1977年),占国民经济总收入的40%。英国每年损失也达65亿英镑。据估计世界上冶炼出来的金属有十分之一是被腐蚀而无法回收。图1-4为潜艇指挥舱因应力腐蚀而发生开裂的实物照片。而有许多断裂构件不加分析就被丢掉,反复地更换上新的构件,束手无策,给生产上带来巨大的困难。

为了避免断裂事故的发生,应该认真研究各种断裂事故发生的原因,只有把引起构件断裂的真正原因找出来,并制定出有效的防止措施,才能避免构件的再次断裂。因此,世界各国都在普遍研究这个问题。美国的ASM(美国金属学会)最

近先后出版了金属手册第九卷和第十卷，都是关于金属的断裂问题。美国的杜邦公司(Dupont)为了避免发生断裂事故，从1968年开始，每两年进行一次破坏事故的分析与统计，从中寻找对策^[9]。

工程中金属构件断裂的原因往往不是单一的，经常是一个或几个因素共同作用的结果，而各个因素之间又是互相关联的，它涉及到工程中金属构件的材料、加工、制造、运行环境条件、运行历史等问题。所以，断裂事故分析是一门综合性的学科，任何贪图省力，单凭一张照片或一个数据来判断工程中金属构件断裂的原因，都是危险的，而且是很不可靠的。只有实事求是地、认真地从各方面去考察和实验，并将得到的各种数据(包括图片)加以处理，进行去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里的分析；再根据分析结果，找出有效的措施，以防止类似断裂事故的发生。总之，必须全面地运用各学科的知识，使用各种方法进行综合研究，方可得出符合客观事实的结论。

本书主要阐述金属构件断裂的几种主要类型的特征；当发生金属构件断裂事故时，如何有效地分析事故的原因及提出有效的工艺措施。全文共分三大部分：第一部分介绍常见的金属构件断裂的类型及特征；第二部分叙述断裂事故分析的步骤及所采用的方法；第三部分列举了数起工程中较为重大的金属构件断裂事故分析实例。

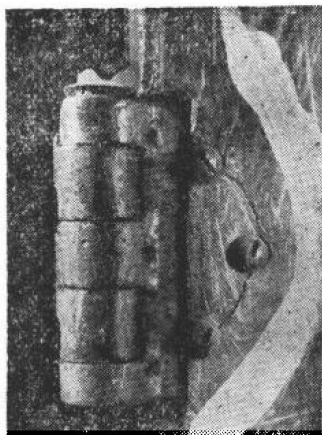


图 1-4 潜艇指挥舱处壳体的
应力腐蚀开裂损坏

第二章 金属构件断裂事故的类型及其特征

§ 2.1 金属构件断裂的分类方法及比例

一、金属构件断裂的分类方法

金属构件断裂的分类方法繁多,且常常有交叉、混乱的现象,这主要是由于区分的角度不同所致。如从事力学工作的人员是从力学的角度出发,按金属构件在断裂时的变形量大小,把断裂分为两大类^[10]:

(一)脆性断裂

从宏观上判断在断裂前几乎不发生显著的塑性变形。断裂时构件的几何尺寸不变,断口齐平,断裂后把断裂构件的两边裂口对接时,裂口吻合完好,断面上常呈现出冰糖状结晶颗粒,没有明显的显微范性流变的痕迹。

(二)塑性断裂

从宏观上判断,在断裂前产生显著的塑性变形,断裂构件的几何尺寸发生明显的变化。把断裂的二部分对接时,裂口不能很好地吻合,在断面上常呈现暗灰色的纤维状特征。从微观上判断有明显的范性流变痕迹。

从事金相学研究的工作人员则常从裂纹与组织的关系来描述断裂的形貌和特征,并从显微角度来区分它们。最常见的是把断裂的途径与显微组织联系起来,分为两大类;

(一)穿晶断裂

裂纹穿过组织的晶粒内部或相的内部所发生的断裂。这种断裂包括一般的塑性断裂、解理断裂、大气中的疲劳断裂等。

(二)沿晶断裂

裂纹沿着组织的晶界或相界扩展所发生的断裂。这种断裂包括材料的回火脆性、相析出脆性、应力腐蚀开裂等所引起的断裂。

在实际工程上还常按金属断裂构件的形态特征来区分构件的断裂类型:

(一)宏观形貌

常用的描述断裂构件的断面形态特征用:“冰糖状”、“结晶状”、“刻面”、“贝壳状”、“人字形”、“纤维状”、“山形状”、“杯锥状”、……。

(二)微观形貌

在显微上,常用“韧窝状”、“河流状”、“背脊状”、“舌头状”、“岩石状”、“龟裂状”、“蛇行状”、“轮胎状”、“海滩状”等来描述断口的特征。

以上这些区分方法,无非是从断裂的方式、性质和形貌来划分的,而且都是描述断裂的后果,并不能指出断裂的原因。而工程上则要求判明引起金属构件断裂的原因,并按其原因制定出防止断裂的措施,所以一般是按断裂原因来进行分类的。但由于工程上金属零部件的种类很多,金属构件的材料、加工、制造及运行条件各不相同,使得工程上对断裂的分类非常繁琐,除按断裂原因来区分外,还有按构件的材料来区分(如碳钢、不锈钢、合金钢等);按构件的成型工艺区分(如铸件断裂、锻件断裂、型材断裂、板材断裂等);还有按金属构件的