

失效分析技术

吴连生著



四川科学技术出版社

责任编辑：崔泽海
封面设计：曹辉禄

失效分析技术

吴连生编著

四川科学技术出版社出版 重庆印制一厂印刷
新华书店重庆发行所发行

开本850×1168毫米 1/32 印张9.875 字数275千字
1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷
印数：1—6,325册

书号：15298·70

定价：2.80 元

内 容 简 介

本书主要介绍了金属材料及机械构件断口的宏观分析、光学显微镜分析、电子显微镜分析和特殊分析技术的基本原理、试验方法及具体应用等；并较详细地介绍了各种断裂机理、影响因素及断口形貌特征、裂源位置及裂纹扩展方向的判别。另外，还着重地介绍了机械构件断裂失效的类型、原因及分析程序等，并且还列举了轴类、容器、轮类、叶片、管道及基础件等大量的零部件断裂失效实例及其分析。可供工厂试验室工程技术人员、从事失效分析及质量检验的技术人员参考，也可供高等院校材料、机械、金相等专业的师生做参考用书。

前 言

随着现代科学技术的飞跃发展,失效分析已经成为一门综合性学科,正蓬勃崛起,在工程上正得到日益广泛的应用和普遍的重视。为了提高机械产品质量及使用寿命,国内外对机械构件的断裂失效现象进行了大量的分析和研究,积累了丰富的经验和教训,日益完善了失效分析技术及其基本理论。应用失效分析技术,可以指导机械产品规划、设计、选材、加工、检验及质量管理等方面的工作;同时失效分析技术又是制定技术规范、科学发展规划、法律仲裁等的重要依据之一。大力开展失效分析研究,对全面实现我国农业、工业、国防和科学技术的现代化,具有极其重要的作用。

本书将结合近年来国内外失效分析技术的进展和本人从事失效分析工作实践的心得和研究成果,较为系统、深入地介绍了有关机械构件失效的基本概念、类型、过程、原因、分析程序和方法等;还列举了轴类、轮类、叶片、容器、管道及基础件等等大量的分析实例,并结合我国的实际情况,采用了宏观断口分析、光学显微镜分析、电子显微镜分析及断口特殊分析技术等;另外,还阐述了各种断裂失效机理、失效影响因素及机械构件断口宏观及微观形貌特征等,特别是有关断裂失效构件的裂源位置及裂纹扩展方向的判别等,其论述尤为周详。

本书既介绍了金属材料组织与性能,机械构件的设计水平、加工状态、使用条件及所处环境介质等对产品质量和使用寿命的影响,又着重分析探讨了构件失效的内因和外因,把握规律,吸取经验教训,以避免类似失效现象的重复发生。

在本书的写作过程中,承蒙上海材料研究所、中国机械工程学会材料学会及理化检验学会等单位给予大力支持和鼓励。四川省机械工

程学会等单位对本书的编辑出版工作，曾给予很大的帮助与指导。四川省机械工程学会周志光同志参加了书稿的审理工作等，在此致以衷心感谢。

由于本人水平所限，书中一定存在缺点和错误，请广大读者批评指正。

编著者

一九八四年元月于上海

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 断口分析.....	1
第二节 失效分析.....	4
第三节 断口学发展简史.....	8
第四节 应用的主要测试技术.....	14
第二章 断口的选择、清洗及保存	16
第一节 断口试样的选择.....	16
第二节 断口试样的清洗.....	21
第三节 断口试样的保存.....	27
第三章 断口一般分析技术.....	29
第一节 宏观断口分析技术.....	29
第二节 光学显微镜断口分析技术.....	32
第三节 电子显微镜断口分析技术.....	34
第四章 断口特殊分析技术.....	49
第一节 光学显微镜断口复型.....	49
第二节 断口立体观察方法.....	52
第三节 断口剖面分析技术.....	53
第四节 断口金相分析方法.....	56
第五节 断口腐蚀坑分析技术.....	60
第六节 断口定量分析.....	64
第七节 断口浮凸测量技术.....	65
第五章 金属的断裂	70
第一节 断裂分类.....	70
第二节 断口三要素.....	74
第三节 断裂强度.....	84

第六章	韧窝断裂	89
第一节	韧窝裂纹的萌生及扩展	89
第二节	韧窝断口的宏观形貌特征	92
第三节	韧窝断口的显微形貌特征	94
第七章	解理断裂	102
第一节	解理裂纹的萌生	102
第二节	解理裂纹的扩展	106
第三节	解理断裂的影响因素	107
第四节	解理断口宏观形貌特征	110
第五节	解理断口显微形貌特征	111
第八章	滑移分离	124
第一节	滑移系与滑移带	124
第二节	滑移的形式	128
第三节	滑移带分析	134
第四节	滑移分离断口形貌	138
第九章	准解理断裂	143
第一节	准解理断裂机理	143
第二节	准解理断口形貌特征	144
第十章	疲劳断裂	151
第一节	引言	151
第二节	疲劳断裂过程	152
第三节	疲劳裂纹萌生机理	155
第四节	疲劳裂纹的扩展	157
第五节	疲劳断口的宏观形貌特征	160
第六节	疲劳断口的显微形貌特征	169
第十一章	环境断裂	187
第一节	腐蚀疲劳	187
第二节	应力腐蚀及氢脆断裂	192
第三节	蠕变断裂及断口形貌特征	205
第四节	液态或固态金属脆	208
第五节	沿晶断裂及其它断裂	209

第十二章	裂源及裂纹扩展方向的判别	214
第一节	裂源位置的判别	214
第二节	显微裂纹局部扩展方向的判别	217
第三节	裂纹扩展方位的指标化	220
第十三章	断裂失效分析	236
第一节	断裂失效分析的一般程序	236
第二节	失效的主要原因	244
第十四章	疲劳断裂失效实例分析	247
第一节	由于设计不当引起的疲劳失效	247
第二节	由于加工不当引起的疲劳失效	252
第三节	其它原因引起的疲劳断裂失效	268
第十五章	环境断裂失效实例分析	274
第一节	腐蚀疲劳断裂失效	274
第二节	应力腐蚀断裂失效	284
第三节	氢脆断裂失效	299

第一章 概 述

机械产品在使用过程中常常发生断裂现象,从而造成不同程度的损失,尤其是突然断裂例如脆性断裂、疲劳断裂、应力腐蚀断裂等所造成的损失就更大。为了防止或延缓这些断裂故障,提高机械产品的使用寿命,人们长期以来,就非常重视断口的观察及其分析技术的研究,以找出断裂的原因和影响因素。

本书主要是介绍断口分析及断裂类型的判别方法,另外还结合近年来国内重大的机械产品断裂失效分析实例,较系统地介绍断裂失效分析方法及典型失效实例的具体分析技术。本书不仅较全面地介绍了电子显微术分析方法,而且还详细地介绍了宏观断口分析技术和应用光学显微镜进行失效分析的方法。为了使断裂失效分析方法能更好地为生产实际服务,在本书中较完整地论述了各种断裂失效机理、断口形貌特征、断裂原因及其主要影响因素、裂源位置和裂纹的宏观扩展方向或显微裂纹的局部扩展方向等问题的分析及判别。

另外,本书还着重地介绍了机械构件断裂失效类型及分析程序;并且还例举了轴类、容器、管道、轮类、叶片及基础件等大量的机械零部件失效分析实例。

目前,随着现代科学技术的飞跃发展,失效分析已经成为一门综合性学科。它不仅与断裂力学、断裂物理、断口学等学科相关联,而且还涉及产品质量全面管理等领域。研究和发展失效分析技术,无论是从基础理论或工程实用,都具有重要的现实意义。

第一节 断口分析

断口分析又称为断口学。在通常情况下,它包括宏观断口分析、光学显微镜断口分析和电子显微镜断口分析等三部分内容。

1. 断裂与断口

断裂是指金属或合金或机械产品的一个具有有限面积的几何表面的分离过程。一个机械构件的断裂含义，是指引起这个构件分离成两块或多块的现象。这种分离能在各种不同的条件下和不同的应力类型下发生；并且受到负载状态和大小、环境介质等因素的影响。通常，材料的分离过程有四种宏观形式，如图1-1所示。其中(a)为脆性的拉伸正断断裂；(b)为延性的剪切断裂；(c)是介于前二者的混合断裂；(d)为延性的点状或线状的损坏形态，这种分离过程不属于断裂范畴；它是由于过度的滑移所引起的，此时材料是因为塑性流变而分开的。这种分离过程主要是塑性流变所引起的，一般称之为破裂，与断裂有区别。

断裂过程通常用“断裂方式”和“断裂性质”加以描述。断裂方式是指多晶材料中裂纹所取的途径：穿晶断裂、沿晶断裂及混晶断裂。断裂性质涉及在完全分离之前的形变量。脆性断裂表示变形较小，或没有变形的情况下所发生的断裂，或者是在消耗少量能量之后发生的；而延性断裂则意味着存在着大量的形变，或者是在消耗较多的能量之后发生的。脆性断裂和延性断裂的区分还是比较难的，在正常情况下，当施加的应力超过材料的强度和变形能力时，就发生断裂，这可根据对材料进行机械性能试验之后加以评定。然而，在应力水平较低的情况下也会发生断裂，这取决于材质或试验条件。例如，由于存在夹杂、硬化、低温、缺口或预裂纹、环境介质等因素的影响而出现的过早断裂。

断口指金属及合金或机械构件的断裂表面或者横断面。在图1-1中(a)为脆性的正断断口，(b)为延性的剪切断口，(c)为杯一锥状断口，(d)通常不称之为断口。

断口分析，通常包括宏观形貌特征和显微形貌特征两个方面的内容。并从这些形貌特征来分析研究断裂过程、断裂方式、断裂性质、断裂原因和断裂机理等问题。因此，断口形貌的特征是断口分析的重要依据。如果金属材料或断裂条件发生变化，则断口形貌也随之

改变。

不管断裂方式如何，通常断口总存在两个显著不同的形貌：裂源区与扩展区，因此断裂也可以理解为是裂纹的萌生和扩展的过程，而断口是裂纹所扫过的面积。断裂是个动态的变化过程，断口是断裂的静态反映。断口忠实地记录了断裂的动态变化过程。如果对断口形貌特征进行全面的分析研究，就可以了解断裂的全过程。这样，就可以将一个复杂的动态问题——断裂，化简为用静态方法——断口分析来研究。

2. 断口学

如前所述，断裂本身是比较复杂的，且具有统计性质的一种现象。断裂过程因条件不同而变化。因此，仅用实验方法来分析研究断裂过程及其机理是很困难的。不过在断裂后的断口上，常常留有能够反映断裂过程及其机理的特征标志，通过对这些特征标志的分析研究，能够获得断裂过程、断裂原因及断裂机理等的可靠情报。采用象法医学探索死亡原因一样的分析手段，对断口形貌特征进行分析研究的方法称之为断口学或断口分析。

断口学是一门分析研究材料或构件的断口形貌、断裂原因与断裂机理之间关系的科学。

断口学这一术语是在1944年由美国科学家 C. A. Zapffe 等人首先提出来的。当时，主要是用肉眼、放大镜及光学显微镜观察断口。从五十年代初电子显微镜（下文通称其为电镜）用于断口观察后，对断口显微特征的分析研究前进了一大步。尤其是近年来电镜的迅速发展完善，大大促进了断口分析技术的发展。目前断口学已形成了一门称之为电子显微镜断口学的独立学科。

电镜断口学主要是应用透射电镜和扫描电镜来分析研究断口形貌特征。透射电镜需制备断口复型。复型法不需要破坏断口表面。除了可以进行多次复型外，还可以根据情况，对断裂后的机械构件在现场进行复型，然后将复型带回研究室观察，从而达到断口分析的目的。扫描电镜不需复型，可直接观察断口的宏观或微观形貌特征。

3. 断口分析技术的应用

随着科学技术的飞跃发展,断口分析技术越来越得到广泛的应用。断口分析不仅可以用来研究金属材料的断裂与断口问题,而且还可以分析研究非金属材料的断裂与断口问题。断口分析技术的应用主要有下列几方面:

(1) 断口分析技术是断裂失效分析的最主要工具。

在断裂失效过程中,机械构件一般都要断裂而形成断口;即使是不完全断裂的机械构件,也要用人工将它压开形成断口。断口是断裂全过程的直接反映,因此对断口形貌特征进行分析研究就能找出断裂原因,并为改进设计、材料和工艺等提供依据。

(2) 应用断口分析技术来研究脆性断裂、韧性断裂、疲劳断裂及环境断裂等的机理,并且可以提出各种断裂模型。

(3) 应用断口分析来研究金属、合金、高分子材料及各种复合材料的断口形貌特征。

(4) 通过断口分析可以研究微量或痕量化学元素对断裂的影响,例如对回火脆断口的分析研究,发现产生脆性的主要原因是由于低熔点元素在晶界上析出的结果。

第二节 失效分析

1. 什么是失效

所谓失效,主要指机械构件(或产品)由于尺寸、形状、或材料的组织与性能发生变化而引起的机械构件不能完满地完成任务。也有人称这为事故或故障。

一个机械零部件被认为是失效,应该根据是否具有以下三个条件中的一个为判据:

(1) 当它完全不能工作;

(2) 虽仍能工作,但不能完成指定的任务;

(3) 当发现有严重损伤,不能再继续安全使用,应及时拆下调换或修补。

2. 失效分析

机械构件在使用过程中经常发生磨损、腐蚀、变形及断裂等失效现象，从而造成不同程度的危害，其中以断裂失效现象所造成的危害就更大。为了防止这种断裂失效现象的重复发生，提高机械产品质量，人们早在本世纪初就开始对构件断裂失效现象进行分析研究，到了六十年代，随着电子光学仪器的发展，在断口分析的基础上，逐渐形成了一种新的分析技术，即断裂失效分析或失效学。

失效分析指分析研究机械构件的断裂、腐蚀、磨损及变形等失效现象的特征及规律，并从中找出产生失效的主要原因的一门新的学科或分析技术。也有人称之为事故分析或故障分析等。

常见的失效类型有：

- a. 断裂失效；
- b. 腐蚀失效；
- c. 磨损失效；
- d. 变形失效，包括弹性变形失效和塑性变形失效。
- e. 材质变化所导致的失效，如冶金因素、化学作用和辐射效应等等。

引起失效的因素很多，其中主要有应力、时间、温度和环境介质等四种。

在进行失效分析时，要注意收集与失效有关的全部资料及数据，不仅要找出失效的主要原因，而且还要提出改进措施。

3. 断裂失效分析方法

由于机械构件的材质、形状、尺寸、负载及其加载方式、环境介质等直接影响构件的断口形貌变化，并能如实地反映断裂的全过程，因此断口分析是构件断裂失效分析的一个重要手段。但为了取得更好的分析效果，还必须辅以一系列其它的检测方法，如无损检测、机械性能试验、金相检验、化学分析、断裂力学试验及模拟试验等等。

失效分析是门多学科的边缘科学，它不仅包括断口学及材料学，而且它还与力学、化学、腐蚀科学、摩擦学、工艺学及设计基础等学

料有关连。由此可见,影响机械构件断裂失效的因素是比较复杂的。它不仅与材质、环境介质、受力状态等因素有关,而且它还受设计水平、加工状态(包括冷、热加工)、装配精度、服役条件、操作方法等因素的影响。

断裂失效分析方法就是用物理及化学的测试技术来寻求影响断裂失效的主要因素,并提出改进办法及预防措施。

4. 失效分析的目的

(1)通过对失效的机械产品进行分析研究,可以测定机械产品失效的原因及其影响因素,并且根据这些测定结果,制订改进措施,以防同类失效现象的重复发生。

(2)失效分析为改进设计、制造、加工、选材、装配及使用条件等提供了依据,并可防止或减少断裂事故的发生。

失效分析在整个机械产品制造过程中占据着重要地位,如图1-2所示。

(3)失效分析可以消除隐患,即时发现机械产品的缺陷,克服薄弱环节,确保产品安全可靠。通过失效分析还可以预测可靠性,特别是利用“失效树”(或称“故障树”)来预测系统的安全和可靠性更为有力。

所谓“失效树”是指由各种可能引起系统失效的事件和连接这些事件的逻辑门组成的图形,并显示出它们相互之间的关系。

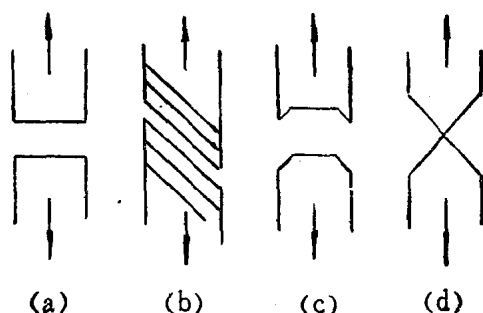


图1-1 在宏观范围的断裂分类

(4) 失效分析可以提高机械产品的信誉，并且还能起到技术反馈的作用，明显地提高经济效益。

机械产品信誉的提高与失效分析之间的关系如图1-3所示。

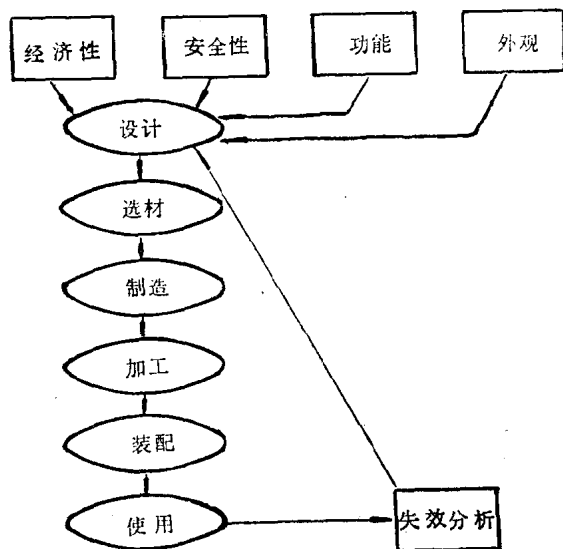


图1-2 失效分析与产品设计、制造之间的关系

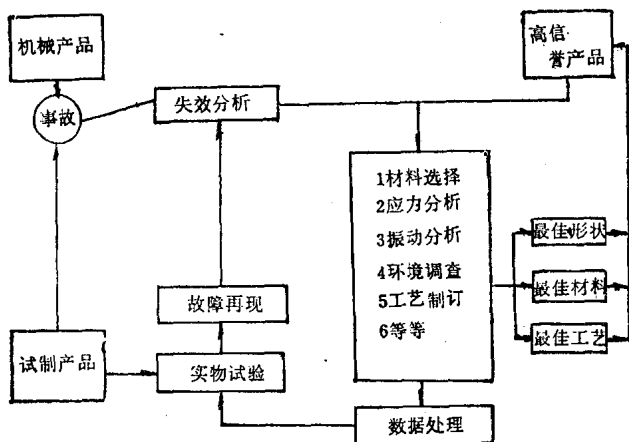


图1-3 机械产品信誉提高与失效分析之间的关系

第三节 断口学发展简史

1. 断口学的古代史简介

(1) 中国古代情况：我国对断裂及断口的分析研究是世界上最早的国家之一。早在北宋时期(大约公元1100年)，著名的科学家沈括就从事大量的断裂及断口形貌的分析研究工作。在他的《梦溪笔谈》中，曾记载过有关断裂过程及断口形貌的分析研究结果。例如，沈括对制盐过程中发现的“太阳玄精”即是含两个结晶水的硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 即石膏)晶体作了较系统的分析研究。他不仅对晶体外形进行了细致观察，而且对晶体受敲击、火烧等情况，均做了大量的实验，其结果为：“叩之则直理而拆，莹明如鉴，折处亦六角，如柳叶，烧过则悉解析，薄如柳叶，片片相离，白如霜雪，平洁可爱。”

现在知道，石膏的晶体外形有六棱，即“悉皆六角”，受击“直理而折”，就是指呈脆性的解理断裂。

(2) 国外情况：国外从事断裂及断口的分析研究较早的科学家是法国人Reaumur。他早在1722年开始用光学显微镜分析研究金属材料的断口形貌。Reaumur将观察到的断口宏观形貌标志绘制成草图，用来说明断裂过程及断口形貌特征。1750年Gellert利用断口的宏观形貌特征来识别钢、纯铁及生铁。1875年Percy提出了结晶状、颗粒状、纤维状及丝状等断口的宏观形貌特征及其区别等。1878年Martens报导了解理断口所特有的河流花样。1903年Ewing等人在对铁进行分析研究后，报导了疲劳过程中，在低于屈服应力下进行循环时，滑移带变得越来越明显。1904年，Osmond等人弄清了伴随着解理断裂的同时有孪晶滑动等等。

2. 显微断口学形成时期

从1940年到1950年，美国科学家C.A.Zapffe等人，用10年的时间，基本上完成了利用光学显微镜对断口的分析研究。Zapffe对En、Nb、Sb、Mo、W、Fe-Si合金、Fe-Cr合金的解理断口，结晶位向与显微组织对断口形貌特征的关系；第二相的影响及疲劳断口的条纹形

貌等特征，进行较全面的分析研究。同时，Tipper对Fe-Si合金材料的解理断口，Weill对Zn的解理断口等也进行了分析研究。在此期间，由Zapffe和Clagg提出的“断口学”这一专门术语，发展成为新的术语：“显微断口学”。

1950年以后，人们开始使用电子显微镜来观察断口形貌的显微特征。在1951年Zapffe和Worden等人发表了他们的研究成果，利用电镜来研究疲劳断口及凹凸比较大的塑性断口，比较早的提出疲劳辉纹及韧窝花样等形貌特征。后来，人们把使用电镜来分析研究断口的显微形貌特征的这一新技术，称之为“电子显微断口学”，简称为“电子断口学。”

3. 电子断口学

电子断口学的研究工具主要是电镜等电子光学仪器，因此在这里简介一下电子光学仪器情况。

早在1900年人们就成功地获得用电子束放大的图象。1926年，人们对电子透镜有了进一步的了解。后来根据电子波动理论，开始做电磁透镜及电子显微镜的实验。1932年，由德国柏林大学教授M. Knoll与E. Ruska制成了世界上第一台电镜。初期的电镜按电子透镜的型式，可分为电磁式电镜及静电式电镜二种类型。目前世界上应用的电镜，大多数都是电磁式。而静电式电镜，由于分辨本领不高，所以应用得较少。

按照作用原理及特性，基本上可将电镜分为下列四种类型：

- a. 透射电镜；
- b. 扫描电镜；
- c. 反射电镜；
- d. 发射电镜。

在断裂失效分析中，主要是使用前两种类型的电镜，后两种则很少使用。最近，人们又将扫描原理应用到透射电镜中，形成了一种新式的电镜，即扫描-透射电镜。

(1) 透射电镜：透射电镜是利用电子束从样品中透射的电子成