



- 大量的实例研究说明
分析工具
- 众多的插图
- 覆盖金属、陶瓷、塑料、
复合材料及电气材料

工程材料的 失效分析

Failure Analysis of Engineering Materials

(美) 查利R.布鲁克斯 著
阿肖克·考霍莱
谢斐娟 孙家骧 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工程材料的失效分析

TB3
2B746

(美) 查利 R. 布鲁克斯 著
阿肖克·考霍莱
谢斐娟 孙家骧 译



机械工业出版社

Charlie R. Brooks, Ashok Choudhury
Failure Analysis of Engineering Materials

ISBN: 0-07-135758-0

Copyright © 2002 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and China Machine Press.

本书中文简体字翻译版由机械工业出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:图字:01-2002-1877

图书在版编目(CIP)数据

工程材料的失效分析/(美)布鲁克斯(Brooks, C. R.),
(美)考霍莱(Choudhury, A.)著;谢斐娟等译. —北京:
机械工业出版社, 2003.4

书名原文: Failure Analysis of Engineering Materials

ISBN 7-111-11596-1

I. 工… II. ①布…②考…③谢… III. 工程材料-
失效分析 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007649 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:周国萍 版式设计:霍永明 责任校对:韩晶
封面设计:张静 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·17.5 印张·680 千字

0 001—4 000 册

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

阿肖克·考霍莱谨以本书献给我的阳光，
索娜（Sona）及波君（Puchun）

前 言

本书的前身 (Metallurgical Failure Analysis) 仅局限于介绍金属材料失效分析的原则与操作。但是, 随着聚合物及陶瓷材料日益增多地用作结构部件, 介绍这些物体中的失效过程已变得越来越重要。因此, 本书中的失效机理覆盖了陶瓷与聚合物。失效分析的另一个已变得很突出的领域涉及到电子材料与零件。这些固体装置由金属、聚合物及陶瓷材料构成, 所以它们的失效就包含了各单种材料的同样机理与模式。但是, 电子系统的失效中可能包含有另外的特点, 理解这一点很重要。这些装置中有许多具有另一个关键的特性, 即它们所使用材料的半导电性能。工艺过程或偶发事件破坏或误用了此性能就会引起电子装置的失效。例如, 由电弧所引起的物理与电损害可能诱发失效, 在进行失效分析时能检测出此现象, 这是很重要的。因此本书加入了关于电子材料失效分析这新的一章。

本书对于材料失效分析的基本原理与前书前言中所述的是相同的。必须指出, 现在失效分析已形成一个行业。涉及此项工业领域的公司与人员正在不断增加。本书会使材料工程师及材料科学工作者, 以及其他涉及零件设计、制定材料工艺规范及生产零件的工程师们受益。对于初学者, 本书可作为对材料分析的介绍, 对于那些已熟悉本专题的人则可作为进修课本或资料手册。本书所含的电子失效分析章节希望能对电气及电子工程师有所帮助。

作者: 查利 R. 布鲁克斯
阿肖克·考霍莱

译 者 的 话

据译者所知，从20世纪60年代以来，国内就有不少大学及科研院所在工程材料失效分析的领域内开展了工作，如对汽轮机叶片、火车轮、曲轴、齿轮等零件的开裂原因进行分析与仲裁，对失效机理也进行了探讨，取得了不少研究成果并发表了多篇科研论文，但是未见完整的、全面的专论问世。本书的翻译出版可在此领域中起到综合、提高与普及的作用。

由于译者水平有限，敬请专家及读者批评指正。

译 者
2002年8月

作者简介

查利 R·布鲁克斯：是冶金工程学教授，是美国田纳西大学有杰出贡献的名誉教授。曾获得多个教学奖，包括工程学院的 M. E. 布鲁克斯杰出教学奖和美国金属学会（国际）（ASM International）颁发的阿伯特·伊斯顿·怀特教学奖。他还是美国金属学会（国际）的会员。

阿肖克·考霍莱：是美国橡树岭国家实验室技术转让办公室的技术商品化经理，是多个教学奖和技术转让奖的获得者及一项研究与开发奖的共同获得者。

目 录

前言

译者的话

第 1 章 绪论	1
1.1 本书宗旨	1
1.2 解决材料失效分析的方法	1
1.3 失效分析的工具	6
1.3.1 光学显微镜	6
1.3.2 透射电子显微镜	11
1.3.3 扫描电子显微镜	13
1.3.4 光学显微镜、透射电子显微镜与扫描电子显微镜的比较	17
1.3.5 相关工具与技术	18
1.4 试样制备	25
1.4.1 清理表面	25
1.4.2 制备用于透射电子显微镜的复膜	25
1.4.3 制备用于扫描电子显微镜的试样	27
参考文献	28
参考书目	29
附录 1A 立体显微镜	30
附录 1B 断口的维护与保管	35
附录 1C 断口试样的制备与保存	36
附录 1D 断口表面的清理	47
附录 1E 考查用于失效后分析的清理技术	51
附录 1F 推荐用于金属断口的清理溶液	59
附录 1G 一种去除氧化锈皮的溶液	59
第 2 章 力学特性及断口表面的宏观组织结构	61
2.1 绪论	61
2.2 拉伸试验	61
2.3 主应力	67
2.4 应力集中	72

2.5	三向应力及约束	76
2.6	平面应力	79
2.7	平面应变	82
2.8	拉伸试样的断口	83
2.9	应变速率与温度的影响	87
2.10	裂纹扩展	89
2.11	韧性断裂与脆性断裂的含义	93
2.12	断裂力学与失效	94
2.13	疲劳载荷	98
2.14	蠕变变形	101
	参考文献	102
	参考书目	104
第3章	断裂机理及微观显微形貌	105
3.1	绪论	105
3.2	滑移与解理	105
3.3	孪晶	112
3.4	解理断口的形貌	115
3.5	空洞聚集	123
3.6	混合机理与准解理断口	135
3.7	呈撕裂形貌的断面	138
3.8	晶间分离	139
3.9	疲劳断口的形貌	140
3.10	高温断口的形貌	160
3.11	环境促成的断裂	166
3.12	凹槽	171
3.13	磨损	172
3.14	陶瓷的断裂	172
3.15	聚合材料的断裂机理	174
3.16	断口表面的立体检查	189
3.17	扫描电子显微镜与透射电子显微镜的断口组织显微照片的比较	194
3.18	人为产物	202
	参考文献	208
	参考书目	211

第4章 断裂模式及宏观断口检查的特征	213
4.1 绪论	213
4.2 拉伸过载	213
4.3 扭转过载	223
4.4 弯曲过载	227
4.5 疲劳断裂	230
4.6 微观及宏观断口组织特征的对比	244
参考文献	264
参考书目	265
第5章 复合材料的失效分析	266
5.1 绪论	266
5.2 以聚合物为基体的复合材料	274
5.2.1 连续的和连续的纤维	274
5.2.2 纤维脆性和抗压强度的影响	274
5.2.3 粘合程度的影响	275
5.2.4 空洞的影响	275
5.2.5 单向薄板的纵向抗拉强度	278
5.2.6 单向薄板的横向抗拉强度	280
5.2.7 单向薄板的纵向抗压强度	281
5.2.8 单向薄板的横向抗压强度	283
5.2.9 单向薄板的平面抗剪强度	284
5.2.10 环境条件对复合材料性能恶化的影响	284
5.2.11 纤维-基体的界面强度对断裂机理的影响	286
5.2.12 石墨纤维-环氧树脂复合材料断口的组织形态	287
5.2.13 短纤维强化的热塑性复合材料	292
5.3 陶瓷基体的复合材料 (CMC)	298
5.3.1 韧化机理	298
5.3.2 CMC 中的界面技术	299
5.4 金属基体的复合材料 (MMC)	300
5.4.1 金属基体复合材料的系列和界面的粘合	300
5.4.2 界面粘合	304
5.4.3 金属基体复合材料的失效模式随温度的变化	306
5.4.4 以颗粒或晶须强化的复合材料的疲劳	307
5.4.5 以纤维增强的复合材料的疲劳	308
5.4.6 受纤维性能和载荷状态影响的金属基体复合材料的断裂性能	311
参考文献	315

第 6 章 电子器件失效分析	317
6.1 绪论	317
6.2 失效机理	318
6.2.1 电子器件失效分析的术语	318
6.2.2 主要的失效机理	320
6.2.3 取决于事件的电应力失效	323
6.2.4 与材料有关的内部失效机理	328
6.2.5 外部失效机理	328
6.2.6 离子污染引发倒转的机理	339
6.3 失效分析过程	341
6.3.1 绪论	341
6.3.2 失效分析的步骤	342
6.3.3 不同产品失效分析步骤的顺序	345
6.4 电子器件失效分析的工具与技术	346
6.4.1 电子器件失效分析中所使用的技术	346
6.4.2 照相术和光学显微术	347
6.4.3 电子组件的 X 射线或射线照相检查 (微射线照相术)	348
6.4.4 红外热成像术或红外显微术	348
6.4.5 声显微成像术及声扫描显微术	352
6.4.6 金相技术	353
6.4.7 化学性能鉴定	354
6.4.8 电子和电学特性鉴定	354
6.4.9 透射电子显微镜、扫描电子显微镜、能量分散 X 射线分析仪 及波长分散谱仪	355
6.4.10 其他技术	363
6.4.11 微观显微技术的选择	364
6.5 电子封装物的失效分析	365
6.5.1 封装基础	365
6.5.2 零级封装的失效	368
6.5.3 一级封装的失效	368
6.5.4 二级封装的失效	378
6.5.5 三级封装的失效	391
6.5.6 钎焊料及钎焊焊接性	397
6.5.7 无铅钎焊料	413
6.5.8 无源元件的失效	414
参考文献	414

第7章 失效分析的典型案例	419
7.1 绪论	419
7.2 案例 A: 真空波纹管的开裂	419
7.2.1 引言	419
7.2.2 实验过程	420
7.2.3 实验结果	421
7.2.4 讨论	424
7.2.5 结论	426
7.3 案例 B: 大型空调通风机叶片的失效	426
7.3.1 引言	426
7.3.2 实验过程	426
7.3.3 实验结果	428
7.3.4 讨论	437
7.3.5 结论	441
7.4 案例 C: 汽车飞轮挠性板的开裂	441
7.4.1 引言	441
7.4.2 实验过程	441
7.4.3 实验结果	444
7.4.4 讨论	447
7.4.5 结论	448
7.5 案例 D: 焊接铁轨的失效	448
7.5.1 引言	448
7.5.2 实验过程	449
7.5.3 实验结果	450
7.5.4 讨论	453
7.5.5 结论	455
7.6 案例 E: 静电除尘器不锈钢丝的断裂	456
7.6.1 引言	456
7.6.2 实验过程	456
7.6.3 实验结果	457
7.6.4 讨论	459
7.6.5 结论	461
7.7 案例 F: 剪线钳的断裂	462
7.7.1 引言	462
7.7.2 实验过程	462
7.7.3 实验结果	464
7.7.4 讨论	468
7.7.5 结论	468

7.8 案例 G: 钢冲子的断裂	468
7.8.1 引言	468
7.8.2 实验过程	469
7.8.3 实验结果	469
7.8.4 讨论	473
7.8.5 结论	473
7.9 案例 H: 止回阀不锈钢铰链的断裂	473
7.9.1 引言	473
7.9.2 实验过程	474
7.9.3 实验结果	476
7.9.4 讨论	484
7.9.5 结论	484
参考文献	485
参考书目	487
附录 A 温度换算表	488
附录 B 米制换算系数	493
附录 C 英制—米制常用单位换算表	495
附录 D 钢的洛氏硬度 HRC 及 HRB 的值	499
附录 E 美国材料试验学会 (ASTM) 的晶粒尺寸与平均晶粒 “直径”的关系	503
附录 F 关于放大倍数的说明	504
附录 G 用于电子器件失效分析的缩略词	505
术语汇编	507
名词对照	529

第 1 章 绪 论

总的结论为——严寒既不会使铁（铸态或锻态）也不会使钢变脆，而事故的发生是由于在使用轮、轴及所有其他转动的零件之前，忽略了对它们进行实际的与足够的试验。

詹姆斯·普雷斯科特·朱尔

《自然科学杂志》，1871

1.1 本书宗旨

工程构件的失效分析是工程中极重要的一个方面。确定失效的原因可为改进设计、操作过程与构件的使用提供资料。同时明确失效的原因在确定诉讼的赔偿责任时能起决定性的作用。失效分析常是困难的并会遭遇失败，但是理解了如何解决分析方法以及如何阐明观察所得会为确保有意义的结果提供基础。

本书宗旨为介绍与工程构件失效有关的重要方面。重点放在分析破损的构件，这时对断口表面的观察起关键的作用。因此给出了对断口表面进行宏观与微观观察的处理方法。由于加载条件常常是导致失效的重要方面，所以列出了对有关机构的简单处理方法。需要指出的是，对断口表面总的宏观结构进行细致的观察常可发现某些前期加载条件的信息。本章也有一节回顾在材料失效分析中普遍使用的试验方法。本书考察了金属、陶瓷及聚合材料的失效，并在第 6 章介绍了电子材料的特殊处理方法。最后介绍了金相失效分析的实例研讨，所采用的方法与其前面章节中所述的方法有关。

1.2 解决材料失效分析的方法

失效分析用于确定工程零部件失效的原因。精确地说，“失效”可定义为一构件不能正确行使其功能，此定义并不意味着“断裂”。“失效分析”可以定义为考察一失效的构件及失效的情景，以确定失效的原因。失效分析的目的是明确失效的机理与原因，并通常对此问题推荐一个解决办法。

失效的原因可分解为下列各项：

1. 用法不当, 构件在非设计条件下运行。这是失效的一个普遍原因。要确立这点, 需要先明确构件的组装与设计是正确的, 这才能使“用法不当”成为可疑的原因。

2. 组装错误及不恰当的维护。组装错误包含这些因素, 如少了一个螺栓或采用不正确的润滑剂。设备维护的范围从油漆表面到清理及润滑, 对此不重视会导致失效。同时也需指出, 有的失效是因为系统中其他一些零件工作不正常而引起的, 这样使此构件处于非设计的条件下导致失效。因此某构件的失效可能会指出系统中其他地方所存在的问题。

3. 设计错误。这是失效的很普遍的一个原因。可根据设计程序列出以下几条:

- a. 零件的尺寸与形状。这些通常决定于应力分析或几何约束。
- b. 材料。这关系到化学成分及为获得所要求的性能而必需的处理方法 (例如热处理)。
- c. 性能。这是有关应力分析的性能, 但是其他性能如抗腐蚀性能也必须加以考虑。

有意义的是要考察关于失效原因的资料并与以上所列的进行比较。

1. 材料选择不当。表 1.1 说明材料选择不当为一通病。
2. 不恰当的维护。表 1.2 说明不恰当的维护是航空构件失效的主要问题。

表 1.1 在一些工程工业中调查的失效原因的比例

起 因	(%)
材料选择不恰当	38
装配错误	15
错误的热处理	15
机械设计错误	11
未预见的操作条件	8
环境控制不够充分	6
不恰当的或缺少监测与质量控制	5
材料混杂	2

注: 引自: Davies^[1]。

表 1.2 航空零件失效原因的比例 (实验室数据)

起 因	(%)
保养不恰当	44
安装错误	17
设计缺陷	16
不正确的维修损坏	10
材料缺陷	7
未定原因	8

注: 引自: Davies^[1]。

3. 错误的设计考虑。失效的原因为错误的设计考虑或错误的使用材料, 可分为下列几种情况: (引自 Dolan^[2])

- a. 韧性失效 (过度变形, 弹性的或塑性的; 撕裂或剪切断裂)。
- b. 脆性断裂 (由于裂缝或临界尺寸提升了应力)。
- c. 疲劳失效 (载荷循环变化、应变循环变化、温度循环变化、腐蚀疲劳、滚动接触疲劳及磨损疲劳)。
- d. 高温失效 (蠕变、氧化、局部熔化及翘曲)。

- e. 静态延时断裂（氢脆、腐蚀脆性、环境因素促进的裂纹的缓慢生长）。
- f. 设计中固有的过度严重的应力提升。
- g. 不充分的应力分析，或者在一个复杂零件中不能做到合理的应力计算。
- h. 错误地在静态抗拉性能的基础上进行设计，并以此代替用以衡量材料对各个可能失效模式所具有的抗力的重要性能。

4. 错误的工艺过程。由错误的工艺过程而导致的失效原因包括以下几条：（引自 Dolan^[2]）

- a. 由错误的成分而产生的缺陷（夹杂物、脆性杂质、错误的材料）。
- b. 最初产生在铸锭及铸造过程中的缺陷（偏析、不致密、疏松、缩孔及非金属夹杂物）。
- c. 加工产生的缺陷（皱皮、裂缝、破碎开裂、热裂、起皮及过度的局部塑性变形）。
- d. 由机加工、磨削或锻造所引起的不正规物及错误（擦伤、过烧、撕裂、飞边、裂纹、脆性）。
- e. 由焊接引起的缺陷（疏松、咬边、开裂、残余应力、未焊透、焊道下开裂、热影响区）。
- f. 由热处理引起的不正常现象（过热、过烧、淬火裂纹、晶粒粗大、过量的残留奥氏体、脱碳及偏析）。
- g. 由表面淬火引起的缺陷（晶间碳化物、软心、错误的热循环）。
- h. 不小心的组装（配合件的错误匹配、带入灰尘或磨料、残余应力、零件擦伤或损坏）。
- i. 由于横向性能差而在锻件中出现分离线的失效现象。

5. 服役过程中质量恶化。在服役条件下由于质量恶化而产生失效的原因包括以下几条（引自 Dolan^[2]）：

- a. 过载或未预见的加载条件。
- b. 磨损（磨蚀、因过度磨损而咬住、粘住、擦伤、气蚀）。
- c. 腐蚀（包括化学接触、应力腐蚀、腐蚀疲劳、脱锌、铸铁石墨化、大气污染）。
- d. 不够充分的或非直接的维护或不适当的修理（例如焊接、磨削、冲孔、冷校直）。
- e. 剥蚀，由化学接触、液态金属接触或高温下电镀所致。
- f. 射线损害（有时必须去除试验所留下的污染，它可能毁坏失效原因的要害性的证据）；随时间、温度、环境与剂量而变化。
- g. 偶然性条件（如不正常的操作温度、剧烈的振动、声振、冲击或不可预见的碰撞、烧蚀、热冲击）。

绝大多数的失效涉及构件的断裂，因此绝大多数的失效分析涉及到考察机械的加载情况。在本书中，术语“断裂模式”用以反映有关载荷的类型，例如拉伸过载、疲劳或蠕变，在第4章中论述。术语“断裂机理”用以定义材料断裂的微观进程的类型。断裂机理涉及到的进程如解理或空洞聚集在第3章中进行详细论述。不同类型的断裂模式所出现的频率在表1.3及表1.4中用数据予以说明。

表 1.3 在一些工程工业中调查
的失效原因的比例

原 因	(%)
腐蚀	29
疲劳	25
脆性断裂	16
过载	11
高温腐蚀	7
应力腐蚀/腐蚀疲劳/氢脆	6
蠕变	3
磨损、擦伤、冲刷	3

注：引自 Davies^[1]。

表 1.4 航空零件失效
原因的比例

原 因	(%)
疲劳	61
过载	18
应力腐蚀	8
过度磨损	7
腐蚀	3
高温氧化	2
应力破坏	1

注：引自 Davies^[1]。

进行失效分析的步骤与顺序取决于失效情况。完成此事的一套程序包括下列8步：

1. 描述失效情况。必须在文件中记述失效的历史情况。任何与失效有关的资料，诸如构件的设计（包括材料与性能），以及此构件的使用情况，这些都很重要。特别有用的是零件及与之关联的构件的照片。

2. 肉眼观察。零件的总的形貌应记入文件。摆弄零件时应小心，不要对断口表面或其他重要特征造成任何损害。

3. 机械设计分析（应力分析）。当此零件明显地与机械设计有关，是一个重要的设计构件时，应进行应力分析。这会有助于确定此零件是否具有足够的尺寸与合适的形状，以及需满足何种力学性能。在某些情况下，此分析可能会确定失效的原因。例如，如果可以确定一零件上的载荷并作出其力学性能的评估，这样也许就有可能明确此零件对此载荷太小了。

4. 化学成分设计分析。这一步关系到考察此材料从抗腐蚀的观点是否适用。

5. 断口的显微组织试验。为了确定断裂机理，应对断口表面进行肉眼的、光学显微镜的以及电子显微镜的检查。

6. 金相检验。这一步需要进行切片与金相制备。这可能要求有关各方在切片前取得一致。这一步会有助于明确这些事实，如此零件是否经过正确的热处理等。