# 机械设计中的材料失效

## ——分析、预测、预防

〔美〕J. A. 柯林斯 著

机械工业出版社

# 机械设计中的材料失效

## ——分析、预测、预防

〔美〕 J. A. 柯林斯 著
谈嘉祯 关焯 廉以智 译
余梦生 校

机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍机械工程材料失效的基本理论和预防方法，对高循环和低循环的疲劳失效、累积损伤理论以及脆性断裂、蠕变、持久断裂、微动疲劳、微动磨损、撞击、翘曲和其它失效形式的介绍尤为详细，并应用了概率统计理论和断裂力学的基本概念解决机械设计中的实际问题，内容新颖、丰富和具体。此外，还有一定数量的例题和习题。

本书可供从事机械设计和机械工程材料研究的工程技术人员和科研人员使用，也可以作为高等院校的教科书和参考书。

Failure of Materials in Mechanical Design

Analysis

Prediction

Prevention

J. A. Collins

John Wiley & Sons, Inc. 1981

* * *

# 机械设计中的材料失效
## ——分析、预测、预防

〔美〕J. A. 柯林斯 著

谈嘉祯 关焯 廉以智 译 余梦生 校

*

责任编辑 蔡琳

封面设计 王伦

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本850×1168 $^{1}/_{32}$·印张21$^{3}/_{4}$·插页 2·字数 574 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—5,471·定价：8.10元

*

统一书号：15033·6722

# 译 者 序

本书是根据美国俄亥俄州立大学J. A. 柯林斯(J. A. Collins)教授所著的《Failure of Materials in Mechanical Design》1981年版翻译的。本书对有关材料失效的各种理论作了比较详细的介绍，对大多数失效形式进行了详细的分析，提供了各种失效预测方法，并对如何预防或推迟各种失效的出现，提出了多种方法或指出了努力方向。本书除了对工程金属材料疲劳失效的分析、预测和预防作了详细论述外，还对一般其它教科书中所不多见的蠕变失效、撞击失效、微动失效、翘曲失效以及各种磨损与腐蚀等重要的失效形式进行了分析，并对其预测方法和预防措施作了较详细的论述。此外，本书还对累积损伤理论、疲劳试验方法和数理统计在失效分析中的应用等作了系统的介绍。可以说，本书是一本内容十分丰富的教科书。它不仅是培养机械类各专业研究生和扩大高年级大学生知识面的一本适用的教材，并且对于从事高性能机械系统设计的工程技术人员全面考虑技术措施、预防潜在的失效，具有重要的参考价值。

在翻译本书时，我们力求忠实于原文，对原文中明显错误之处，都一一作了更正，有些还加注说明。原文中的图、表和例题中的数据均为英制单位，本拟改为国际单位制，但由于牵涉到印刷技术上的一些问题，未予更动，仅在书末附以单位换算表，供读者使用。书中所用的术语均采用比较通用的译名，但对一些容易发生歧义的译名，则在反复推敲原文含义的基础上，采用比较确切的译法。例如high-cycle fatique和low-cycle fatique，有译为“高周疲劳”和“低周疲劳”的，也有译为“高循环疲劳”和“低循环疲劳”的，我们采用了后一译法，书末附有英汉术语对照索引，便于读者需要时查对。

本书由关焯（前言、第七、八、九、十章）、廉以智（第一、二、三、四、五、六、十一章）、谈嘉祯（第十二、十三、十四、十五、十六、十七章）三位同志翻译，全书由谈嘉祯同志统稿，余梦生同志审校。由于译者水平有限，错误疏漏之处在所难免，恳请读者不吝指正。

1984年10月

# 前　言

本书要达到的目的有三个：给工程专业的高年级大学生和低年级研究生作教科书；给大学毕业的工程师作继续深造的基础；给从事工程实践的机械设计师作参考书。我们假定读者已经熟悉包括在传统的工科大学课程中的固体力学、材料力学和机械设计等基本原理，本书将以这些基本原理为基础，引导读者正确估计在机器零件中由于力、变形和输入能量的作用所产生的应力、应变和能量传送，从而引起机械失效的可能性。

作为每一个机械设计师的基本任务——预测和防止机械失效来说，认识引起失效的可能性并判别在现实工程领域中所存在的机械失效形式是必不可少的。因此，本书开始是从外观上判别机械失效的形式，后面还用整章的篇幅讨论比较重要的失效形式。由于疲劳失效在整个工程实践中极端重要，所以本书广泛讨论了这个问题，并注意了高循环和低循环范围的疲劳失效，还相当详细地讨论了脆性断裂、蠕变、应力断裂、微动疲劳、微动磨损、撞击、翘曲和其它一些失效形式，并专门用一章讨论应力集中效应对失效反应的影响。而断裂力学的基本概念则与脆性断裂和疲劳失效等内容的讨论结合起来。

本书的形成和发展经历了十五年多的时间：开始是在亚利桑那州立大学，后来在俄亥俄州立大学给大学生和研究生讲授机械工程方面的课程；给工业部门工程设计人员主要在威斯康星-麦迪逊大学讲授时数不多的有关疲劳和失效的课程；以及在机械失效这一领域的咨询活动与研究工作中，经常就有关机械失效问题与工业部门工程师交换意见。

在亚利桑那州立大学和俄亥俄州立大学，都是以大体相同的方式形成这样的基本观点，即：主张使机械工程专业的学生对现实世界中的机械失效具有广泛而正确的洞察能力，同时，提高他

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

们的分析能力，使之能利用三维观点去分析应力和应变状态、失效理论的应用和失效的预测防止等，从而有机会应用固体力学和机械设计等基本课程内容。这样，就为在大学中已经学习了工程科学基本内容的大学生提供了一个同实际工程界比较紧密联系的纽带。来自工程部门的经理人员的许多好评已经证实上述基本观点是正确的，这些经理人员过去都是听过这门课程的大学生，并且在基本观点的各个形成和发展阶段用过这本手稿。

本书那些偏重实际应用的部分，希望能用作有关专业人员的参考书。这些部分是从作者在咨询、研究以及与工业部门的工程师的短期合作中所接触到的大量生产问题中归纳出来的。

我已经感到，随着时间的流逝，已经不可能把我自己的原始思想同那些通过阅读和讨论别人的著作而积聚起来的思想区别开来。许多其它著作的作者，将会在本书中找到他们著作中的要义，而本书未注明资料来源，我在此对他们表示衷心的感谢，尤其感谢我在学生时代的两位教授：W. L. 斯塔基（W. L. Starkey）教授和已故的 S. M. 马可（S. M. Marco）教授。当然，他们的许多基本观点已经被采纳在本书中。最后，我要向那些以前对本书提出过许多有益建议的研究生和生产部门的同事表示深切的谢意。

J. A. 柯林斯

于俄亥俄州，哥仑布城

1980 年 12 月

# 目　录

第一章　预防性失效分析在机械设计中的应用…… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　设计的定义 …… 1
1.3　一种挑战 …… 2
1.4　设计目标 …… 3
1.5　结论 …… 4
习题…… 5
第二章　机械失效的形式…… 6
2.1　失效形式的定义 …… 6
2.2　在实际中观察到的失效形式 …… 8
2.3　机械失效形式的名词术语汇编 ……10
习题……17
第三章　工程金属的强度和变形……18
3.1　引言 ……18
3.2　切应力作用时的应变反应 ……24
3.3　弹性变形 ……26
3.4　塑性变形 ……26
一、滑移……26
二、滑移所需要的临界剪切分应力……28
三、孪晶现象……33
四、晶界滑移和扩散性蠕变……35
五、多晶体中的晶界的作用……35
六、应变率的影响……36
3.5　断裂 ……36
3.6　位错理论引言 ……40
一、位错几何学……41
二、位错运动……46
三、位错的牵制、产生和相互影响……49

3.7 线性弹性断裂力学入门 ……54
3.8 断裂力学在设计中的应用 ……65
3.9 弹-塑性断裂力学 ……73
3.10 概念的应用 ……74
3.11 结论 ……77
习题 ……77
参考文献 ……80
第四章 应力状态 ……82
4.1 引言 ……82
4.2 一个点的应力状态 ……82
4.3 主正应力 ……88
4.4 主切应力 ……93
4.5 概念的应用 ……98
习题 ……103
参考文献 ……105
第五章 应力和应变之间的关系 ……106
5.1 引言 ……106
5.2 工程应力-应变和真实应力-应变的概念 ……106
5.3 弹性应力-应变的关系 ……113
5.4 塑性应力-应变的关系 ……121
5.5 概念的应用 ……126
习题 ……132
参考文献 ……136
第六章 组合应力失效理论及其在设计中的应用 ……137
6.1 引言 ……137
6.2 最大正应力理论（兰金理论） ……139
6.3 最大切应力理论（特瑞斯卡-格斯特理论） ……141
6.4 最大正应变理论（圣·维南理论） ……144
6.5 总应变能理论（贝尔特雷米理论） ……146
6.6 歪形能理论（休伯-冯·米塞斯-亨凯理论） ……149
6.7 在二向应力状态下失效理论的比较 ……155
6.8 莫尔失效理论 ……157

6.9 失效理论评价综述……161
6.10 作为设计方法的组合应力失效理论 ……162
6.11 概念的应用 ……164
习题 ……172
参考文献 ……177
第七章 高循环疲劳…… 178
7.1 引言……178
7.2 历史的回顾……179
7.3 疲劳的性质……181
7.4 疲劳载荷……185
7.5 实验室疲劳试验……187
7.6 $S-N-P$ 曲线——一个基本的设计工具……196
7.7 影响 $S-N-P$ 曲线的因素……201
一、材料成分 ……201
二、晶粒尺寸和晶粒方向 ……202
三、热处理 ……204
四、焊接 ……204
五、几何形状上的不连续性…… 211
六、表面状况…… 212
七、尺寸效应…… 216
八、表面残余应力…… 219
九、工作温度…… 223
十、腐蚀…… 223
十一、微动作用…… 227
十二、运转速度…… 228
十三、应力-时间模型的图形……231
十四、非零平均应力 ……233
十五、损伤累积 ……234
7.8 在设计中考虑的各种因素……235
7.9 非零平均应力的影响……236
7.10 概念的应用 ……244
7.11 多向疲劳应力…… 246

一、多向最大正应力疲劳失效理论…… 247
二、多向最大切应力疲劳失效理论…… 248
三、多向歪形能疲劳失效理论…… 249
7.12 多向疲劳失效理论的应用…… 251
7.13 概念的应用…… 253
习题…… 257
参考文献…… 260
第八章 累积损伤的概念，寿命预测和断裂控制…… 263
8.1 引言…… 263
8.2 线性损伤理论…… 264
8.3 累积损伤理论…… 267
一、马可-斯塔基累积损伤理论…… 268
二、亨利累积损伤理论…… 271
三、盖特斯累积损伤理论…… 273
四、科顿-多伦累积损伤理论…… 279
五、马林累积损伤理论…… 289
六、曼森双线性损伤法则…… 293
8.4 概念的应用…… 296
8.5 以局部应力-应变和断裂力学概念为基础的寿命预测…… 303
8.6 研究裂纹扩展的断裂力学方法…… 315
8.7 工作载荷模拟和全尺寸疲劳试验…… 324
8.8 损伤容限和断裂控制…… 326
8.9 概念的应用…… 331
习题…… 334
参考文献…… 345
第九章 统计在疲劳分析中的应用…… 349
9.1 引言…… 349
9.2 定义…… 349
9.3 总体的分布…… 352
9.4 抽样分布…… 357
9.5 统计假设…… 369
9.6 置信限…… 372

9.7 良好估计量的性质……374
9.8 满足置信度要求的样本容量……374
9.9 概率纸……375
9.10 均值和方差的比较 ……384
9.11 结束语 ……390
习题 ……390
参考文献……392
第十章 疲劳试验规程和数据的统计分析……393
10.1 引言……393
10.2 标准方法……393
10.3 恒定应力水平试验……394
10.4 响应法或存活法（概率单位法）……396
10.5 步进试验法……399
10.6 普洛特法……401
10.7 阶梯法或升降法……404
10.8 极值法……409
10.9 结束语……411
习题……411
参考文献……414
第十一章 低循环疲劳……415
11.1 引言……415
11.2 应变循环的概念……416
11.3 应变-寿命曲线和低循环疲劳的关系 ……420
11.4 非零平均应变和非零平均应力的影响……424
11.5 低循环疲劳中的累积损伤……427
11.6 多向应力状态的影响……427
11.7 热疲劳与低循环疲劳的关系……428
11.8 简要的结论……430
11.9 概念的应用……430
习题……435
参考文献……436
第十二章 应力集中……438

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

12.1 引言…… 438
12.2 应力集中效应…… 441
12.3 弹性范围内的应力集中系数…… 442
12.4 塑性范围内的应力集中系数和应变集中系数…… 452
12.5 复合切口的应力集中系数…… 453
12.6 疲劳应力集中系数和切口敏感指数…… 455
12.7 概念的应用…… 460
习题…… 471
参考文献…… 474
第十三章 蠕变、持久断裂和疲劳…… 475
13.1 引言…… 475
13.2 长期蠕变特性的预测…… 477
13.3 预测蠕变特性的理论…… 480
13.4 单向应力状态下的蠕变…… 482
13.5 多向应力状态下的蠕变…… 488
13.6 累积蠕变的概念…… 490
13.7 蠕变和疲劳的组合…… 494
习题…… 514
参考文献…… 522
第十四章 微动、微动疲劳和微动磨损…… 524
14.1 引言…… 524
14.2 微动过程中的主要参数…… 525
14.3 微动疲劳…… 526
14.4 微动磨损…… 536
14.5 微动腐蚀…… 540
14.6 减少或防止微动损伤的措施…… 542
习题…… 543
参考文献…… 544
第十五章 冲击和撞击…… 546
15.1 引言…… 546
15.2 求撞击载荷下的应力和变形量近似值的能量法…… 547
15.3 撞击载荷下的应力波的传播…… 553

15.4 质点速度和波的传播速度…… 558
15.5 自由端和固定端的应力波特性…… 562
15.6 受突加轴向力的杆中的应力波的传播…… 565
15.7 由于滞后阻尼作用而引起的应力波衰减…… 567
15.8 运动质量撞击杆端时，杆中应力波的传播…… 572
15.9 杆端受运动质量撞击时的杆内最大应力…… 581
15.10 应力超过材料屈服限时的应力波的传播 …… 586
15.11 材料性能在撞击载荷下的变化 …… 587
15.12 撞击载荷下的鳞剥或痂剥 …… 595
15.13 撞击载荷下的应力集中效应和应变集中效应 …… 598
15.14 概念的应用 …… 601
15.15 结束语 …… 604
习题…… 604
参考文献…… 608
第十六章 翘曲和失稳…… 609
16.1 引言…… 609
16.2 简单铰接机构的翘曲…… 609
16.3 端部铰接支柱的翘曲…… 611
16.4 端部支承对支柱翘曲的影响…… 616
16.5 支柱翘曲中的非弹性性状…… 619
16.6 概念的应用…… 622
16.7 受弯曲的窄高梁的侧向翘曲…… 626
16.8 受扭转的细圆轴的侧向翘曲…… 630
16.9 其它翘曲现象…… 633
习题…… 634
参考文献…… 636
第十七章 磨损、腐蚀及其它重要的失效形式…… 637
17.1 引言…… 637
17.2 磨损…… 637
一、粘附磨损…… 638
二、磨粒磨损…… 645
三、腐蚀磨损…… 649

四、表面疲劳磨损…… 650
五、变形磨损、微动磨损和撞击磨损…… 651
17.3 零磨损的经验模型…… 652
17.4 概念的应用…… 657
17.5 腐蚀…… 660
一、直接化学腐蚀…… 661
二、电腐蚀…… 663
三、裂隙腐蚀…… 665
四、点蚀…… 666
五、晶界腐蚀…… 666
六、选择性浸析…… 667
七、冲刷腐蚀…… 668
八、气穴腐蚀…… 668
九、氢损伤…… 669
十、生物腐蚀…… 669
17.6 应力腐蚀破裂…… 670
17.7 结束语…… 671
习题…… 672
参考文献…… 674
单位换算表…… 675
英汉术语对照索引…… 676

# 第一章　预防性失效分析在机械设计中的应用

你可曾听说过，有一辆奇妙的用一匹马拉的四轮小马车，它选得是如此合理，以致它跑了一百年，一直到某一天——？

它突然全部变成了碎片——一切都是那么突然，以致没有一个零件提前损坏，就好象肥皂泡一样，全部一起破碎——小奥利弗·温德尔·霍姆斯（Oliver Wendell Holmes, Jr.），《执事者的杰作》(Deacon's Masterpiece)

## 1.1 引　言

某一结构、机器或机器零件的尺寸、形状或材料性能发生改变而不能满意地执行预期的功能，就称为**机械失效**。任何一个设计师，他的主要职责就是确保他的设计能在预定的使用期内，按照预期的要求进行工作，同时在市场上有竞争力。只有能辨认和评价可能影响设计的全部潜在的失效形式，才能始终成功地设计一种能够防止过早出现机械失效并且有竞争能力的产品。如果设计师想辨认各种失效形式，他至少应该熟悉能在现场观察到的各种失效形式，以及产生这些失效形式的条件。如果设计师想有效地避免失效，就必须在失效预测的分析技术和实验技术方面具有丰富的知识，这样，他才能在设计时预防在规定的设计使用期内发生失效。因此很明显，对任何一个设计师来说，如果要想取得成功，进行失效分析、失效预测和失效预防都是极为重要的。

## 1.2 设计的定义

**工程设计**是一个反复作出判断的过程，他的目标是对新的或

改进的工程系统和装置创新和优化，以满足人们的需要和愿望，并且对资源的保护和对环境的影响给予应有的重视。以上的定义正是包括了那些能表征所有的设计活动、并对本书内容的叙述方式有重大影响的主要思想。任何一项工程设计方案的首要目标都是满足人类的需要和愿望。否则，作为工程设计师来说，就会浪费自己的时间。一名设计师，不管他是创造一项新的装置或是改进某个现有的设计，他必须根据市场所提出的时间和金钱方面的限制，力求提供一个“最好的”或最佳的设计。遗憾的是，在一个复杂的工程系统中，是不可能对一个绝对最佳的设计下定义的，更不用说制造了。即使能够对一个最佳的设计下定义，但是要做出来，花费也常常是昂贵的。可是，竞争常常要求改善性能、延长寿命、减轻重量和降低成本。也就是说，竞争常常要求把工程项目做得更好一些，能在实现保护资源和地球环境这一职责的同时，根据对性能、寿命、重量、成本等所有这些要求的评价准则，做出最佳设计。

## 1.3 一种挑战

在过去三、四十年中，技术进步是如此经常地冲击着我们的社会，以致我们总是习惯地期望着将来有很多重大的进展。如果设计师要想满足日益增长的社会需要，他们就会面临着前所未有的挑战。采用新材料，要求更高的转速、适应更高的温度、更轻的重量、更小的体积、更长的寿命、更低的成本以及改善生态平衡。所有这一切，都需要更好的设计技术。

例如，轴的转速达到每分钟 30000 转或更高，现在已经是司空见惯的事。[1]工作温度达到 2000°F 或更高的情况越来越普遍。超音速飞行状态和太空环境使很多设计师感到困难。核环境加上高的工作温度、长期的动载荷和长期运转，对许多设计师来说，已经是当今的难题。在人的心血管系统或人体器官中，装置超小型仪器或代用的假体，也是同样迫切需要解决的问题。

这些苛刻的工作条件，迫使设计师去更仔细地研究材料的性

能，更好地确定实际工作条件的性质，更好地熟悉各种机械失效形式。设计师不得不去更准确地推测在不利环境下由动载荷引起的应力和应变，以及由制造过程产生的残余应力场的影响。对全部现有材料和结构中的裂缝状原始缺陷的识别，促使人们发展了一种新的设计手段，以处理在单调载荷和变动载荷这两种条件下的裂纹扩展问题。可检查性和可维修性与可靠性和有效性相结合，已成为一个重要的设计准则。

要想满足功率大和尺寸小这两个相互矛盾的需要，可以（1）研制强度更高和刚度更好的材料，或者（2）更有效地利用现有材料的强度和刚度。第一种方案属于材料科学家的领域，我们在这里不打算去研究。第二种则是向设计师提出的任务，并且确实也是写本书的推动力。在更有效地利用现有材料的强度和刚度以满足未来技术日益增长的要求方面，如果设计师想取得成功，他就必须利用他的分析手段去进行最详尽的测量，积累可用性和准确度最高的经验，并且发挥聪明才智、独创性和工程判断能力。这就是一种挑战。

## 1.4 设 计 目 标

从某种意义上来说，一个“理想的”设计是指这样一种设计：在到达预定的寿命时，整个机器将全部损坏。也就是说，在设计时，要使所有构件的每个零件在刚刚达到预定的寿命时，全部碎裂成粉末。虽然这样的设计能充分利用材料的性能，但是许多实际常识说明，这种设计是不可能的，而且也许还是不需要的。

如果作出这种“理想的”设计是可能的话，那就肯定需要有高精度的分析、广泛的实验结果、非常均匀的材料性能、精确规定的工作条件，而且还要有一位细致的设计师来协调这些工作。由于高精度的设计工作在时间和金钱上的花费都是可观的，因此，一个要想取得成功的工程设计师，必须针对每一种具体情况，在分析工作和设计工作的费用与其必要性之间进行平衡。显然，一个所谓“理想的”设计，如果它在市场上的销售价格是竞争对手

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com