

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 基础—4

疲劳失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



机械产品失效分析丛书

(基础—4)

疲劳失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

王仁智 吴培远 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

机械零件的使用寿命在很大程度上取决于其疲劳特性，因零件的疲劳性能低劣而发生早期疲劳失效的数量一般约占其总失效数量的一半以上。因此，研究材料和零件的疲劳失效原因和对策，是提高机械零件质量的重要途径。本书系统地介绍了疲劳失效的各种规律和机制、分析和判断零件疲劳失效的方法；提高零件疲劳断裂抗力的途径以及典型零件的疲劳失效分析实例。

本书可供质量管理人员，机械产品的设计、生产、试验、维修、使用人员；专职和兼职失效分析人员及大专院校有关专业的师生参考。

机械产品失效分析丛书

(基础—4)

疲劳失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

王仁智 吴培远 编著

*
责任编辑：张绪江

封面设计：郭景云

*
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)

北京通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 850×1168¹/₃₂·印张9⁹/₁₆·字数246千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 00,001—4,100·定价：2.75元

*
统一书号：15033·6667

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合技术，在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。这是因为尽管人们所掌握的机械设计、材料、工艺、管理等知识不断地丰富与深化，所运用的技术手段不断地更新与完善，但机械产品的失效事故仍经常发生，一些重大的失效事件往往会导致生命和财产的巨大损失。所以必须系统地研究机件的失效类型、鉴别失效类型的技术、预测及监控失效的方法，改进与预防失效的措施等。这方面的知识不仅对专业失效分析工作者是不可缺少的，而且对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员，也是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式，其发生的条件、控制与预防等有深刻的理解，才可望在创造优质产品方面获得成功。

为了在我国开展失效分析工作，中国机械工程学会委托材料学会于1980年在北京召开了第一次全国机械产品失效分析学术会议。随后，中国机械工程学会材料学会组织过多次全国性的失效分析学术会议。为了广泛开展失效分析工作，普及失效分析的基本知识，提高失效分析的技术水平，扩大失效分析队伍，进一步促进失效分析工作在机械工业中的深入发展，使失效分析工作在国民经济的发展中发挥更大的作用，材料学会决定组织编写这套《机械产品失效分析》丛书，并责成材料学会编辑出版委员会负责组织丛书的编写工作。

丛书共分三大部分：第一部分为失效分析的基础知识，第二部分为常用机械零件的失效分析，第三部分为工艺失效分析。

丛书编写的特点是讲求实用性，强调综合分析，引导读者如何正确地进行失效分析工作。因此用较多的篇幅介绍近期的应用

实例，反应我国失效分析的技术水平，主要成果和经验，同时适当引入国外先进经验以资借鉴。

在丛书编写过程中，中国机械工程学会秘书长许绍高、中国机械工程学会出版编辑委员会主任陈元直给予了极大的关注和指导。在此对参加丛书编写人员所在单位的领导对本丛书编写所给予的大力支持表示感谢。

这套丛书是供从事机械产品的设计、制造、使用、维修具有中专以上程度的工程技术人员及技术管理人员使用，也可供科研人员和大专院校师生参考，并可作为组织失效分析训练班的教材使用。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正，以便进一步修改补充。

中国机械工程学会材料学会
1986年

中国机械工程学会材料学会

机械产品失效分析丛书编委会成员

主任：王仁智

副主任：钟群鹏

委员（按姓氏笔划序）

王仁智，方婉莹，刘民治，陈玉民，陈南平，张绪江，
赵 坚，钟群鹏，唐汝钧，涂铭旌，虞 鹏，粟 滋

顾问：周惠久，张协和，陶正跃

目 录

第一章 概论	(1)
第二章 疲劳断裂现象及特征	(5)
第一节 静载断裂与疲劳断裂	(5)
第二节 疲劳断裂现象及一般特征	(7)
第三节 疲劳断口特征	(11)
一、疲劳源区的断口形貌	(11)
二、疲劳裂纹扩展区的断口形貌	(13)
三、瞬时断裂区的断口形貌	(14)
第三章 疲劳断裂规律	(16)
第一节 疲劳断裂的宏观规律	(16)
一、高周疲劳	(16)
二、低周疲劳	(64)
三、疲劳裂纹扩展	(77)
第二节 循环硬化与循环软化	(83)
第三节 疲劳断裂的微观规律	(89)
一、疲劳裂纹的萌生(产生、成核)	(89)
二、疲劳断裂过程	(101)
第四章 疲劳失效的判断	(109)
第一节 判断疲劳失效的根据	(109)
一、工作条件	(109)
二、疲劳裂纹源的位置	(110)
三、疲劳断口的宏观形貌	(110)
四、疲劳断口的微观形貌	(130)
五、小结	(166)
第二节 各种类型疲劳失效的特征	(167)
一、高周疲劳	(167)
二、低周疲劳	(169)

三、腐蚀疲劳	(175)
四、微振疲劳	(179)
五、热疲劳	(185)
第三节 疲劳失效分析途径(思路)	(189)
一、疲劳失效类型的分析途径	(189)
二、疲劳失效原因的分析途径	(189)
第五章 提高机械零件疲劳强度的途径	(194)
第一节 疲劳设计	(194)
第二节 零件选材	(199)
第三节 制造工艺	(201)
一、表面粗糙度	(201)
二、表面薄壳淬火	(202)
三、表面化学热处理	(203)
四、表面形变强化	(204)
五、表面激光强化	(212)
六、表面复合强化	(213)
第六章 疲劳失效分析实例	(215)
一、压气机转子钢叶片的失效	(215)
二、压气机转子铝合金叶片的失效	(226)
三、内燃机摇臂件的失效	(232)
四、柴油机连杆的失效	(238)
五、波纹管的失效	(243)
六、扭力弹簧的失效	(251)
七、燃油总管的失效	(255)
八、发动机连杆的失效	(260)
九、防扭臂的失效	(264)
十、人工关节的失效	(270)
十一、油泵柱塞的失效	(275)
十二、汽轮机组轴系法兰螺栓的失效	(281)
十三、地铁列车车箱构架的失效	(289)
参考文献	(296)

机械产品疲劳失效分析，研究预防疲劳失效的各种措施和手段，对于正确地进行机械零部件的设计、提高机械产品质量，具有十分重要的意义。

人类对机械零件疲劳失效的认识和研究，经历了漫长的道路。早在十九世纪中叶，随着铁路工程的迅速发展，火车轮轴在运行中，在其轴颈圆角根部处发生突然断裂，而在断裂之前轮轴没有显示出任何的宏观可见的塑性变形。从断裂轴上取样作静强度检验，结果表明轮轴材料完全符合设计规定的要求。从此，人们开始对这种新的失效形式进行分析研究，并把这类承受交变载荷零件所发生的断裂称为疲劳断裂。

为了适应铁路工程的迅猛发展，从设计上避免由轮轴疲劳失效而导致灾难性事故的发生，Wöhler (1819~1914) 对钢材的疲劳性能作了大量系统的研究，从中获得了评定材料疲劳性能的 $S-N$ 曲线，并且至今这种曲线仍是疲劳设计中应用的最基本的数据⁽²⁾。Wöhler 的研究有两条重要的结论：第一，钢材的疲劳断裂寿命取决于交变应力范围而不是交变应力的最大值；其次，存在一个最低应力范围极限，在低于此极限时，钢材则不再发生疲劳断裂。以后，开始对各种金属材料的疲劳 $S-N$ 曲线进行大量的试验测定，并且又进一步考虑温度、加载频率、平均应力、应力集中、环境等各种因素对 $S-N$ 曲线的影响，把由试验获得的疲劳性能数据汇编成册，供设计者使用。由此可见，机械零件在服役中出现的失效以及对这种失效所进行的分析研究，推动了由静强度到疲劳强度这一设计思想上的进步。

随着运载工具和动力机械的迅速发展，许多零件承受的交变载荷由简单的对称循环发展到非对称循环。为满足这类零件的疲劳设计需要，Goodman (1862~1935) 试验建立了考虑平均应力的疲劳等寿命图，它是疲劳设计中应用的另一种基本数据⁽³⁾。

与此同时，材料工作者对材料的疲劳断裂机制也展开了广泛而深入地研究。本世纪初，用光学显微镜来观察材料在疲劳过程

中的滑移现象，近年来又利用电子显微镜观察材料在疲劳过程中变化的微观机制，研究疲劳裂纹萌生及扩展的机制。这些研究的目的，都是为了寻求并提供具有高疲劳断裂抗力的各种工程材料，以满足机械设计上的需要。此外，工艺人员还从各种加工工艺角度来研究它们对机械零件疲劳性能的影响。许多行之有效的工艺相继被引入到工业生产中来（如表面渗碳，渗氮，氰化，薄壳淬火，表面喷丸强化，表面滚压强化，表面激光处理，高温等静压处理，等等），许多加工工艺在提高零件的疲劳断裂抗力、延长服役寿命方面，已经发挥或正在发挥着极为明显的效果。

然而，使疲劳设计工作者，材料工作者，工艺工作者以及力学工作者等共同卷入到疲劳领域中来，并逐渐形成了一支由宏观到微观、由试验测定到理论计算的庞大队伍，这还是在五十年代初航空工业获得迅速发展并接连发生重大失效事件之后才发展起来的新局面。1954年，英国的“彗星”号飞机失事堕入地中海，由打捞的残骸上进行的失效分析以及随后的验证性疲劳试验结果指出，飞机的失事是由于飞机充压舱疲劳断裂而引起的。这一重大的失效事件以及随后的若干次失效事件，不仅吸引了各界人士对疲劳破坏的极大关注，而且大大地加速并扩大了对疲劳破坏的研究。

随着燃气涡轮发动机、高性能飞机、压力容器以及核工业的发展，零件在新的服役条件下又表现出新的疲劳失效形式，即大应变低周疲劳失效。Manson和Coffin总结并提出了评定材料的低周疲劳断裂规律，即 $\Delta\epsilon-N$ （应变范围-断裂循环数）曲线^(4,5)。由试验测定出的各种材料的 $\Delta\epsilon-N$ 曲线，是低周疲劳设计的又一个基本数据。

随着现代工业的发展，疲劳设计思想也在不断地发展和演变；由传统的无限寿命设计发展到安全寿命设计，又进入到现代的破损安全设计（或损伤容限设计）。本世纪60年代发展并建立起来的断裂力学，很快地被用来研究材料的疲劳裂纹扩展特性。

Paris的研究指出⁽⁶⁾，裂纹尖端的应力场强度是控制疲劳裂纹扩展速率 (da/dN) 的主要参量，由此建立了裂纹扩展速率与应力强度因子范围 (ΔK) 之间的一般关系，即 $da/dN-\Delta K$ 曲线。试验测定获得的各种材料的 $da/dN-\Delta K$ 曲线，是损伤容限设计的基本数据。

由上述可见，人类从发现疲劳破坏这一现象以后，逐渐地认识和部分地掌握了疲劳断裂的一些规律，并且遵循这些规律在机械设计、选材以及制造工艺等各个环节中去寻求改善机械零部件疲劳断裂抗力的各种途径，在整个历程中的每一个进步，都与失效分析工作密切相关。

疲劳失效是一个复杂的过程。在一个庞大机器中的某个零件，可能引起疲劳失效的因素繁多，因此失效分析工作者必须全面地观察、收集、判断可能导致零件疲劳失效的各种原因。与其它类型的失效分析一样，一个迅速、准确的疲劳失效分析结论的获得，不但要求分析人员了解和掌握有关疲劳设计、材料、加工工艺以及疲劳断裂的理论知识，具备一定的疲劳失效分析的实际经验，而且还要求分析人员了解和熟悉其它类型的失效方式以及与机械产品质量有关的各种条例和法规。只有具备上述要求的疲劳失效分析人员，同时又持有客观的立场，才有可能排除分析结论中的片面性，得出反映失效事件本质的正确结论，为改进产品质量应采取的措施提供可靠的依据。

第二章 疲劳断裂现象及特征

第一节 静载断裂与疲劳断裂

金属材料在外加静载荷作用下，逐渐发生变形，直至最后断裂。通常用试样长度的变化来表征应变变量，其描述方法有两种，一种是工程应变变量，即

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2-1)$$

式中 l_0 、 l ——分别代表变形前后的试样长度。

另一种是真实应变，即

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2-2)$$

当应变变量在 2% 以内时， δ 值近似地等于 ε ，而超过 2% 以后，它们之间的差别逐渐增大。由 (2-1) 和 (2-2) 式可知，真实应变与工程应变之间有以下关系：

$$\varepsilon = \ln(1 + \delta) \quad (2-3)$$

金属材料的应力与应变之间在不同的应变范围内存在着不同的关系。在弹性应变范围内，应力与应变之间呈线性关系，并遵循虎克定律：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-4)$$

式中 E ——杨氏弹性模量。

当材料的应变变量超出弹性应变范围时，晶体便发生塑性流动，由此产生永久性变形。为了方便，工程上规定产生 0.2% 永久变形（即塑性变形）所对应的应力值为材料的屈服强度 ($\sigma_{0.2}$)。

材料进入塑性变形后，应力与应变之间不再呈线性关系，对于幂硬化材料，它们呈指数关系：

$$\sigma = k\epsilon^n \quad (2-5)$$

式中 n ——材料的应变硬化指数；
 k ——与材料有关的系数。

图2-1所示为塑性金属材料的工程应力-应变和真实应力-应变曲线。工程应力-应变曲线上的最高载荷除以试样的初始截面积，就是材料的极限拉伸强度，通常称为抗拉强度 (σ_b)。材料达到抗拉强度时，便开始发生塑性失稳，但还不是断裂。试样断裂时的载荷除以断口处的最小截面积，才是材料发生断裂的真实应力 (σ_f)。

根据以上所述，在静载条件下，材料在发生断裂之前，通常需要经历弹性变形、塑性变形和塑性失稳等几个阶段。断裂后的塑性变形总量取决于材料的塑性以及环境条件。上述就是塑性材料在静载条件下发生断裂过程的主要特征。但是，如果材料承受的不是静载荷，而是交变（循环）载荷，加在材料上的交变应力的最大值即使是低于材料的弹性极限 (σ_e)，经过若干次应力循环之后，材料也会发生断裂。在交变载荷作用下发生的断裂，称

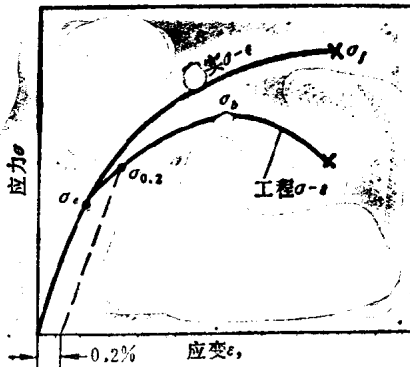


图2-1 塑性金属材料的工程应力-应变和真实应力-应变曲线

为疲劳断裂。通常，用 $S-N$ 曲线（应力-断裂循环数）来表征材料的疲劳断裂行为。材料承受的交变应力越高，则发生断裂的循环数就越少；反之，其断裂循环数就越多。

以往有不少的试验研究，企图在材料的静强度与疲劳强度之间建立起某种经验关系，这样便可通过材料的静强度去推断或定量地给出其疲劳强度。这些工作所获得的结果为机械疲劳设计提供了在工程上可使用的若干图表，但未曾获得任何有普遍意义的精确关系。这方面的许多研究结果指出，静载断裂和疲劳断裂是两种互相区别的断裂过程，它们分别受控于各自的断裂机制，所以材料的静强度和疲劳强度都是在一定条件下材料所表现出的力学特性。因此，了解和掌握疲劳断裂的各种特性，是进行疲劳失效分析工作的最基本的条件。

第二节 疲劳断裂现象及一般特征

疲劳断裂的各种特征是与静载断裂和其它方式断裂的特征相比较而存在的，可以归纳成如下各种。

1. 脆性断裂方式

零件或试样在整个疲劳过程中，不发生肉眼可见的宏观塑性变形。对于应力疲劳（即高循环疲劳），甚至发生疲劳断裂之后，整个零件或试样也不呈现出宏观塑性变形。所以，可以将一般的疲劳断裂归入“脆性断裂”。在多数情况下零件的疲劳断裂是突然发生的，这种断裂方式给零件失效前的预报和预防工作带来极大的困难。

图2-2所示为疲劳断裂的发动机连杆，连杆整体和疲劳断口附近地区均无宏观塑性变形。

2. 断口形貌

疲劳断裂具有区别于其它任何性质断裂的断口形貌，呈现出独特的断口花样。一个典型的疲劳断口往往由裂纹源区、裂纹扩展区和瞬时断裂区三个部分组成。疲劳断口上的这种独特形貌是

区别于其它任何性质断裂的极为重要的凭证，这给疲劳失效的鉴别工作带来极大的帮助。关于疲劳断口形貌的各种细节将在下一节中详细论述。

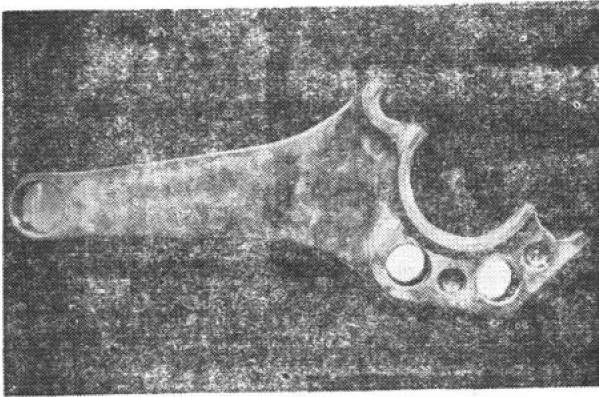


图2-2 疲劳断裂的连杆外貌

3. 表征疲劳性能的 $S-N$ 曲线

疲劳断裂寿命（即断裂循环数）随交变应力值的降低而增高。对于低碳钢， $S-N$ 曲线在低应力区逐渐趋于水平，而低于该水平线的交变应力，不会再使低碳钢引起疲劳断裂，通常将此水平线上的交变应力称为疲劳强度极限，或简称为疲劳极限，以 σ_0 （或 σ_w ）表示（图2-3）。除了低碳钢之外，合金钢、铝合金、钛合金、镍基合金等金属材料，它们的 $S-N$ 曲线不存在水平线段。对于这类材料，通常以 $N = 10^7$ 或 $N = 10^8$ 次循环不发生断裂所对应的交变应力值定义为条件疲劳强度极限，或简称为条件疲劳极限（图2-3）。

4. 疲劳强度的分散性

在同一个交变应力下，试样（或零件）的疲劳断裂寿命呈现出一定的分散性。材料的表面完整性（其中包括表面粗糙度，残余应力，表层的组织结构等）、材料的组织结构均匀性、试样尺寸波动、缺口效应以及环境等，都是引起断裂寿命出现分散性的

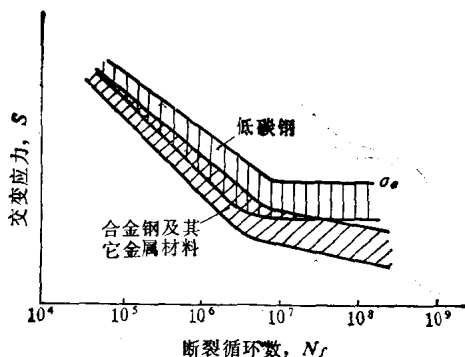


图2-3 各种金属材料的疲劳 $S-N$ 曲线示意图

因素。所以，材料的 $S-N$ 曲线是一个具有一定分散度的曲线（如图2-3所示）。每一应力水平下试样的断裂寿命分布服从统计规律（图2-4），长寿命和短寿命的试样数目都小，而靠近平均断裂寿命的试样数目最多。所以，可以将 $S-N$ 曲线分散带按不同存活率划分为若干条相互平行的 $S-N$ 曲线，其中越靠近纵坐标轴的 $S-N$ 曲线，它的存活率越高。设计者根据零件承载的重要性，选择一定存活率的 $S-N$ 曲线，由此进行疲劳强度设计和寿命估算。

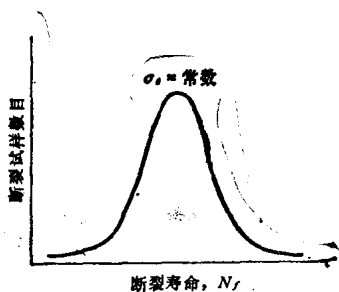


图2-4 同一交变应力下试样断裂寿命分布图

5. 缺口效应

塑性材料在静载条件下，缺口试样的抗拉强度通常高于光滑试样。但是在交变载荷条件下，缺口试样的疲劳强度通常低于光滑试样的疲劳强度。材料的塑性越高，缺口试样的疲劳强度越接近于光滑试样；而材料的塑性越低，则两种试样疲劳强度的差距就越大，这是因为材料的塑性越低，其疲劳缺口敏感性越高的缘故。

6. 表面粗糙度的影响

表面粗糙度对材料的静强度几乎没有多大的影响，但对疲劳强度却有非常明显的影响。在一般情况下，任何材料的疲劳强度都随其表面粗糙度的降低而增高。

7. 环境因素的影响

腐蚀性环境对材料的静强度虽有一定的影响，但其影响程度远不如它对疲劳强度的影响。一般情况下，对材料敏感的腐蚀环境能够显著地降低材料的疲劳强度。对于一般中等强度的合金结构钢，腐蚀环境可使其疲劳强度极限下降 $1/3$ 到 $1/2$ ，甚至能使碳钢的疲劳强度极限消失。

8. 表面滑移带形式

与单调加载（静载）的情况相似，在交变载荷下材料表面也出现滑移带，但其分布形式及密集程度各不相同；交变载荷下形成的滑移带比单调加载下形成的更为密集，滑移带之间的台阶高度，前者远比后者为高。此外，均质材料的光滑表面，在交变载荷作用下会出现“挤出”或“挤入”现象（详见第三章），而在单调加载条件下则不会出现这种现象。

9. 疲劳裂纹扩展门槛值

材料的疲劳 $S-N$ 曲线上存在着一个疲劳强度极限值，而疲劳裂纹的扩展也存在着一个极限值，通常称为疲劳裂纹扩展门槛值（ ΔK_{th} ）。断裂力学的研究指出〔7〕，对于一个长疲劳裂纹（其长度约大于 0.5mm ），当裂纹尖端的应力场强度因子范围（ ΔK_I ）超过材料本身的 ΔK_{th} 时，疲劳裂纹便开始扩展，而当 $\Delta K_I < \Delta K_{th}$