

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN SHIXIAOFENXI

● 基础 — 6

脆断失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



TB302.3
C50

369714

机械产品失效分析丛书

(基础—6)

脆断失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

陈南平 顾守仁 沈万慈 编著



机械工业出版社

(京)新登字054号

EA 10 / 14

机械零部件的主要失效形式是断裂、腐蚀及磨损。脆性断裂是断裂失效的重要形式，它是一种突发性失效，因在其发生之前没有明显的预兆，或很难进行监控，故往往造成灾难性的后果，造成人民生命财产的重大损失。本书详细论述了影响脆性断裂事故的外部（应力状态；环境温度；环境介质和加载速率等）和内部（材料的组织性能和缺陷等）原因，并通过具体案例分析阐明如何对脆性断裂的实际问题进行分析的思路和方法及如何采取措施防止脆性断裂事故的发生、提高产品质量、保证安全生产、增加经济效益。本书可供质量管理人员，机械产品的设计、生产、试验、维修及使用人员，专职和兼职失效分析工作者使用，亦可供从事机械和材料方面研究的科研人员及有关大专院校师生参考。

机械产品失效分析丛书

(基础—6)

脆断失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

陈南平 顾守仁 潘万慈 编著

责任编辑：张绪江 责任校对：韩 晶

封面设计：郭景云 版式设计：王 颖

责任印制：王国光

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张 7·字数 180千字

1993年 9月北京第1版·1993年 9月北京第1次印刷

印数 0 001—1 900·定价：12.50元

*

ISBN 7-111-03445-7/TG·755

前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性的技术, 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、管理等的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招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, 就是对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员也都是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式、发生的条件、控制及预防措施等有深刻的理解, 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又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, 扩大失效分析工作队伍, 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《机械产品的失效分析》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，同时适当地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设计、制造、使用、维修的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，并可做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

1992

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

主任委员：王仁智

副主任委员：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

概论	1
第一章 材料的冷脆性及脆性转变温度判据	3
第一节 研究低应力脆性断裂事故的历史回顾	3
第二节 应力集中问题	8
第三节 低温脆性——脆性转变温度判据	21
一、脆性转变温度判据	27
二、冲击试验中加载速率的影响	30
三、钢材脆性转变温度的估算	31
四、冷脆断裂事故实例	34
第二章 断裂力学判据	37
第一节 线弹性断裂力学问题	37
一、线弹性断裂力学简介	37
二、线弹性断裂力学应用中的塑性区修正	45
三、断裂模式的转换——平面应变与平面应力	48
四、温度与形变(加载)速率对断裂韧度的影响	50
五、冲击韧度与断裂韧度的关系	54
六、断裂韧度 K_{I0} 与其他力学性能的关系	55
七、线弹性断裂力学应用举例	58
第二节 弹塑性断裂力学判据及其应用	63
一、临界裂纹张开位移 $COD(\delta_e)$	63
二、 J 积分	66
三、 J 积分与 COD 关系	67
第三章 环境导致的脆断失效	69
第一节 应力腐蚀断裂	70
一、应力腐蚀断裂现象	70
二、应力腐蚀断裂的基本规律	74
三、防止发生应力腐蚀断裂的途径	79

四、失效分析实例	80
第二节 氢脆	82
第三节 腐蚀疲劳	90
第四节 液态金属脆化	94
第五节 辐照脆化	98
第四章 脆性断裂的裂纹与断口分析	101
第一节 裂纹与断口的分析方法	101
第二节 裂纹分析	103
一、主裂纹判断	103
二、裂纹分类	105
三、脆性断裂裂纹与应力方向的关系	109
第三节 断口分析	110
一、脆性断裂断口的宏观特征	111
二、脆性断口的微观形貌	117
第五章 因材料的冶金质量引起的脆性断裂失效	124
第一节 材料不连续性缺陷引起失效	124
一、孔洞	124
二、裂纹	129
第二节 冶金因素对材料韧性的影响	138
一、晶体结构与变形方式	140
二、炼钢脱氧制度的影响	142
三、晶粒度的影响	143
四、化学成分的影响	146
五、组织的影响	154
第六章 脆性断裂事故分析的思路与方法	161
一、失效事故的调查	161
二、事故分析中的思维方法	161
三、脆性断裂事例	163
附录	167
一、各种受力情况下应力计算	167
二、冲击试验方法	170
(一) 金属夏比 (U型缺口) 冲击试验方法	
(根据GB229—84)	170

(二) 金属夏比 (V型缺口) 冲击试验方法(根据GB2106—80)	172
(三) 金属低温夏比冲击试验方法(根据GB4159—84)	175
三、金属材料平面应变断裂韧度 K_{Ic} 试验方法(根据GB4161—84)	177
四、利用 J_R 阻力曲线确定金属材料延性断裂韧度的试验方法(根据GB2038—80)	185
五、裂纹张开位移(COD)试验方法(根据GB2358—80)	201
参考文献	211

概 论

机械零部件或构件的主要失效形式是断裂、腐蚀及磨损。美国在1983年估计这三类失效方式造成的当年国民经济的损失都超过1000亿美元，断裂是首当其冲的，年损失近1400亿美元。

断裂失效按其断裂部位的形貌可粗分为韧性断裂和脆性断裂两大类。韧性断裂指断口部位有明显的塑性变形，例如拉伸试样断口部位有明显颈缩现象，或高温蠕变试样有明显的伸长。脆性断裂是断口部位无宏观的塑性变形痕迹，断口表面相对比较平齐。在断裂失效事故中，主要危险是脆性断裂事故。

上述的断裂方式分类尚嫌粗放，特别是对脆性断裂，因为这样分类时，脆性断裂方式中除低应力脆断、应力腐蚀断裂等外，还包括了在断裂事故中占很重要地位的疲劳断裂事故。疲劳断裂的断口部位在宏观上也没有明显塑性变形，断口表面也比较平齐，但是因为这类断裂事故发生较多，断裂过程又有特殊性，故在工程界常把这种断裂方式不列入脆性断裂范围。以下讲的脆性断裂，也不包括疲劳断裂内容，只讲比较狭义的脆性断裂。

脆性断裂(狭义)包括以下两类：

1. 低应力脆断

是指通常在弹性应力范畴，在许用应力条件下一次加载引起的脆性断裂事故。这类事故的发生常常有外在原因或有内部原因，外在原因包括受载时的加载速率；环境温度对材料性能的影响；零部件或构件形状设计中引起的应力集中等。材料的内部原因包括材料内部存在的宏观缺陷(裂纹、空洞、大块夹杂、疏松等)；材料本身的质量问题，如钢的低温脆性、蓝脆、回火脆、不锈钢中的475℃脆， σ 相脆性等。

2. 环境介质条件下的脆断

实际上也是一种低应力脆断事故，在上述情况下增加环境介质因素，是指零部件或构件在受载情况下同时接触到会使材料性能或表面状态恶化的环境条件，例如潮湿空气、水介质、熔盐、硫化氢气氛、融熔金属、辐照环境等。这种环境介质条件下的断裂事故可分为应力腐蚀开裂；氢致开裂；融熔金属脆；碱脆；辐照脆等几种。这类断裂事故的发展过程包含了时间因素，因之与疲劳断裂在这一点上有相似之处，都有个裂纹形成和发展的时间过程，都不是受载后立即发生断裂，属滞后破坏断裂范畴，这与上述受载后立即断裂的低应力断裂事故是有差别的。

低应力脆断事故发生带有突发性，事故前预兆监测通常很困难，发生预兆到事故发生时间很短，因之这类事故常常造成灾难性后果。例如70年代初辽阳化工厂压力容器爆破事故，就造成数十人伤亡。环境介质脆断事故，大都属于滞后断裂问题，事故的发展有个过程，通过监测或定期检查，观察裂纹的亚临界扩展，在达到临界裂纹长度以前及时更换零部件或采取适当措施，对防止恶性事故发生还有一定的可能性，但由于这类亚临界裂纹扩展的距离通常很短，故预防监测难度很大。

第一章 材料的冷脆性及脆性转变温度判据

第一节 研究低应力脆性断裂事故的历史回顾

在机械零部件的静强度设计中,常用的办法是采用拉伸试验,首先确定所选用材料的屈服点 σ_s ,然后根据对该零部件服役条件所需要的安全可靠程度,由经验确定一个安全系数 n ,按 σ_s/n 定为设计中的许用应力 $\sigma_{\text{许用}}$,此时只要工件在受载中该部位的工作应力 $\sigma_{\text{工作}}$ 低于 $\sigma_{\text{许用}}$,便认为不会发生塑变,更不会导致断裂,因而是安全的。换言之,零部件在受载后,从发生变形到断裂的过程是要在大大超过许用应力的条件下才能发生。那种由塑变到断裂的情况称为过载下的变形和断裂,通常以韧性断裂的形式出现,即断口附近有宏观的明显塑性变形,断口表面比较粗糙,参差不齐,最后断口部位有明显的剪切变形特征。

低应力脆断是指在通常许用应力(至少是材料屈服点)以下发生的断裂事故。这种现象是超出了上述经典静强度设计思想的,这就迫使人们对大量发生的低应力脆断事故进行分析,寻找新的理论去解决低应力脆断事故问题。

低应力脆断事故大多有以下特征:

1. 脆断部位在宏观上塑性变形很小或几乎看不见,如图1-1及图1-2^[1]。起裂部位常常是在变截面地区,或该处有表面缺陷或内部缺陷处,即该处有应力集中;
2. 事故发生常常是在低温气候条件;
3. 有相当部分事故是存在动载荷时发生的,例如炮管在发射时自行爆裂,或有冲击负荷时发生。
4. 断裂过程是瞬间发生的。

根据上列脆断事故发生特征,人们首先是对应力集中现象进

行了研究。通过大量实验测试和理论计算，证明了在变截面处，在不同的受载条件下，该处的应力要比平均应力或名义应力大好几倍。即使这样，还不能说明脆断的普遍现象。所以应力集中只是其中一个因素。

由于脆性断裂时能量吸收率很低，动载时更易发生，所以发展了动载荷条件下的应力计算方法，但由于工件发生脆断时的载荷速率很难预测，推动了在冲击负载时测试材料断裂吸收功方面的研究工作。克鲁伯炮厂采用、夏比V型试样检测自爆炮管

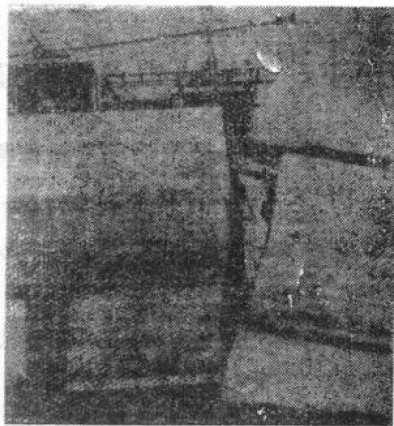


图1-1 S.S.Ponaganset船1947年12月在波士顿断裂。当时水温5°C，空气温度1°C

试样，得到了材料的冲击值应大于 $3\text{kg}\cdot\text{m}$ 就不会爆裂炸膛的经验判据，逐渐被公认并加以推广。到本世纪40年代，进行不同温度下的系列冲击试验，提出了材料的脆性转变温度概念，确立了脆性转变温度的经验判据，为防止低应力脆断作出了重大贡献。

到了本世纪50年代，由于二次大战期间几千艘美国焊接货轮发生脆断事故，加上导弹、飞行器等的脆断事故，人们已不能满足于脆性转变温度经验判据，因此试探了各种办法，例如落锤试验等，但这些都还只停留在经验判据上，后来在20年代格烈菲斯根据预裂纹脆性材料失稳的能量平衡导出的断裂应力概念基础上，在60年代发展了以断裂力学为基础的断裂判据 $K_I \geq K_{Ic}$ 。这是在理论上解决断裂问题的重大突破。到70年代，线弹性断裂力学的断裂判据已很成熟，对超高强度钢的脆性断裂问题解决起了很大作用，并成功地扩展到了处理疲劳、应力腐蚀断裂方面。但是对强度级别较低的材料，裂纹体在断裂前局部已发生了大面积屈

服(指裂纹尖端塑性区较大),甚至塑性区已贯穿韧带(即整体屈服)才能发生断裂的情况下,已超越了线弹性断裂力学的 K_{Ic} 判据范围,于是发展了弹塑性断裂力学判据。英国人发展了以应变判据为根据的临界裂纹张开位移(简称COD或 δ_o)的方法,在造船工业和海洋平台上应用。美国人则由能量或能量率出发,提出了 J 积分概念的 J_{Ic} 判据和裂纹扩展阻力曲线(简称R-曲线)。但是谈及弹塑性断裂力学的判据,不论COD的 δ_o 或 J_{Ic} ,测试都是以起裂点作为判据的,起裂后裂纹并不是失稳扩展的,所以在设计中还需要经验,但作为失效分析,采用 δ_o 或 J_{Ic} 判据则趋于安全。



图1-2 比利时Hasselt大桥于1938年3月脆性断裂后的照片

J_{Ic} 的测试方法中,近年已有多人证明 J_{Ic} 不是材料常数,与试样裂纹前端的三轴应力比有关,应用 J_{Ic} 数据时应注意这个问题。上述为弹塑性断裂力学目前的情况。

脆性断裂中另一个重要分支是应力腐蚀断裂。应力腐蚀断裂有时间效应,在低于屈服点的恒载情况下。由于环境介质与载荷的联合影响,萌生裂纹,随之裂纹扩展到临界值,达到 $K_I \geq K_{Ic}$ 条件下发生瞬时断裂过程。在裂纹萌生和亚临界扩展过程中都有时间效应。

应力腐蚀问题在上世纪末已在冷拔黄铜管和弹壳中发现,当

时称为季节开裂。也在有碱溶液的锅炉钢中发生，称为碱脆。本世纪20年代，铝合金和高强度钢的应力腐蚀断裂也有报道，后来在奥氏体不锈钢、镁合金、钛合金，锆合金中也相继提出应力腐蚀断裂问题。这些与化工工业，核技术和宇航的发展密切有关，在超高强度钢中，应力腐蚀的敏感性更为突出。

应力腐蚀是指在工件受拉应力作用下，在一定的环境介质条件下，某些材料由于应力和环境介质中的某些组元的联合影响，导致表面损伤，引起应力集中而导致裂纹萌生扩展，最后发生断裂。也可因某些组元进入材料内部，如氢通过扩散溶入或粒子辐照，改变了材料的内部结构，以致使材料性能劣化。如溶解氢使原子结合力下降引起氢脆；辐照使空位缺陷增加导致脆性等。近年人们也用环境介质下的断裂去代替应力腐蚀这个名词，更为确切。

早期对应力腐蚀的判据模仿疲劳极限的办法，即在某应力水平，一定介质条件，在一定时间不发生断裂的应力 σ_0 作为临界条件。对预裂纹试样，则应用断裂力学判据，把长时间在一定介质条件下裂纹不发生亚临界扩展的最大应力强度因子定为临界值 K_{Isc} （或 K_{ISAC} ，EAC是环境协助开裂三个英文文字的缩写）。 $K_I < K_{Isc}$ ，表示不会发生环境诱导的开裂， $K_I \geq K_{Isc}$ 表示在该环境下会发生裂纹亚临界扩展，扩展到临界裂纹长度 a_0 时， $K_I \geq K_{Ic}$ ，发生瞬时断裂。

在和脆性断裂作斗争的过程中，以上提到的导致脆断事故发生的原因都只是从外部因素出发进行阐述的：样品几何形状引起的应力集中，加载速率、温度、环境介质条件等。另一个方面还有导致材料容易发生脆断的是内部因素，即材料的组织结构（包括组分）对脆性影响的研究。这方面的历史可渊源到钢的冶炼史。早期历史上钢是否冶炼成功就看在一定条件下锻造时钢材有无塑性来判断的。所以控制化学成分中含碳量是最早的贡献，后来是硫、磷含量问题、非金属夹杂数量问题，跟着发展了用冲击试验值的规定要求的办法控制这些组分以改善塑性，逐步扩展到

了钢中常见的各种组元以及晶粒度对材料塑性影响的研究。也涉及工艺中发现的脆性问题，如蓝脆(指钢材加热到350℃左右的脆性)，应变时效脆性(指低碳钢有冷变形历史，再经250℃左右几十分钟时效后产生的脆性，用铝终脱氧或有钒钛的低碳钢不会产生这种现象)，铬不锈钢的475℃脆性(指在475℃左右加热后析出脆性相引起)和 σ 相脆性(高Cr并含Mo、W的不锈钢在650℃加热后有 σ 相析出，引起塑性下降)还有回火脆性。

对于钢中有回火脆性，知道得还是比较早的，手工艺铁匠在回火后采用水冷，第一次世界大战初，克虏伯就采用了铬镍钢300~600℃回火后要水淬的工艺，后来狄更荪在1917年提出回火脆性这个名词。现在对回火脆性分为二类，一类是淬火钢在300~350℃间回火后，不论冷速快慢都会出现的冲击值或断裂韧性下降，称为低温回火脆性。避免出现低温回火脆性的唯一办法是躲开这个回火温度范围。另一类是在450~650℃温度范围回火，回火后慢冷才出现的高温回火脆性，主要是由于在原奥氏体晶界上磷偏聚引起，在铬镍合金结构钢中最显著，添加钼后可减少这种脆性发生的倾向。回火后快速冷却(水冷)，可避免高温回火脆发生。已经存在高温回火脆的工件，如重新回火再水冷，可使这类回火脆性现象消失。因之高温回火脆是可逆的。回火脆的断口基本上都是沿晶断裂。由于脆性转变温度过高出现的低温脆性断口，则是穿晶解理断口。

由以上简要的历史回顾可以看到，脆性断裂的发生有外部条件：应力状态、加载(或应变)速率、环境介质条件和内部因素：材料的组分、工艺所引起的内部组织结构变化，涉及有害元素组元的偏聚或出现脆性析出相，特别是分布形态影响。目前对外部条件的影响和内部组织结构变化的规律已基本清楚，当然对机理方面的研究还有待进一步深入，如何对材料进行韧化处理也是重要课题。对防止脆断目前已有许多办法可供选择，基本思路就是通过改变某一个外部条件，如改变变截面处圆角以改善应力集中状态，改变环境条件等；或者是改变合金组分、组织状态及其结

构。通常是根椐实际状况选择改变一个条件，便可有效抑制脆断事故的发生。

第二节 应力集中问题

由于事故发生在零部件某些特殊部位，且断裂处塑变很小，起裂点部位几何形状特殊或具有宏观缺陷，因此要分析该部位的应力状态分布和应力集中问题。

图 1-3 是一根带切口的拉伸圆试棒，在轴向拉力 P 作用下，由于切口部位直径 d 小，故比直径 D 部位的应力要大，在轴向应力作用下，切口根部直径收缩量比粗直径处大，但因彼此连接在一起，故切口处收缩受到限制，就发生横向拉力 T ，因此就会在缺口部位形成三向拉应力，阻止缺口部位发生塑性变形。与此同时，在缺口根部引起应力集中，此时缺口根部应力 σ_r 为粗直径 D 部位的平均应力 σ 的 α_σ 倍，即 $\sigma_r = \alpha_\sigma \cdot \sigma$ 。 α_σ 称为应力集中系数，是与缺口几何形状有关的函数。

对各种几何形状和不同受力状态的应力集中系数可参考图 1-4 ~ 图 1-30。图中 α_σ 表示以远处无孔截面上应力为基准的应力集中系数， α_σ 表示以过圆孔中心净截面上名义应力为基准的应力集中系数。

由于缺口根部的三向拉应力使应变受到拘束，同时应力集中大大超过平均应力，因此为脆断事故发生创造了条件。

相当一部分脆断事故可以用应力集中解释，但还有一大部分低应力脆断事故不能用应力集中解释。事实证明与温度应变速率（加载速率）和环境介质条件的影响有关。

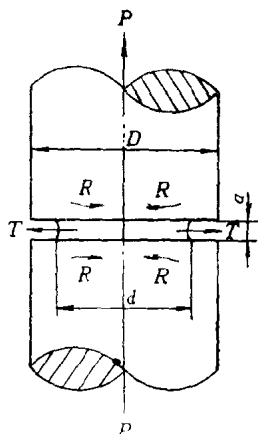


图1-3 带有周边缺口的圆试棒在拉伸时的应力状态示意图