

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOFENXI

● 基础—2

失效分析基础知识

机械工业出版社工程材料学教材主编

● 机械工业出版社



机械产品失效分析丛书

(基础—2)

失效分析基础知识

中国机械工程学会材料学会 主编

钟群鹏 田永江 编著



机械工业出版社

本书从力学、金属材料学、金属的断口分析和裂纹分析以及化学基础等四个方面阐述了失效分析所必需的基础知识。它是一本失效分析的入门书。

本书可供从事机械产品的设计、制造、使用、维修的工程技术人员和管理人员参考，对专职和兼职的失效分析人员及大专院校有关专业的师生也有参考价值，并可作为组织失效分析训练班的基础教材。

机械产品失效分析丛书

(基础—2)

失效分析基础知识

中国机械工程学会材料学会 主编

钟群鹏 田永江 编著

责任编辑：张绪江 责任校对：宁秀娥

封面设计：郭景云 版式设计：张世琴

责任印制：张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $15^{1/8}$ ·字数395千字

1990年4月北京第一版·1990年4月北京第一次印刷

印数0.001-1,430·定价：13.30元

ISBN 7-111-01213-5/TH·204

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技术、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

1989

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 栗 滋

顾问：周惠久 张协和 陶正跃

目 录

第一章 失效分析的力学基础	(1)
第一节 受拉、压零件的失效和失效的抗力指标	(1)
一、受轴向拉伸、压缩杆件的变形和断裂的过程、形式及其失效抗力指标	(1)
二、受拉、压零件的强度计算和设计准则	(10)
三、各种因素对拉、压杆件受力、失效抗力指标及失效形式的影响	(13)
(一) 应力集中和材料缺口效应的影响	(13)
(二) 加载速率或应变速率的影响	(18)
(三) 温度的影响	(20)
(四) 尺寸因素的影响	(26)
四、材料抗拉强度指标的粗略估算方法	(28)
(一) 硬度法及各种硬度值之间的数值关系	(28)
(二) 硬度和抗拉强度之间的换算关系	(31)
(三) 从钢的化学成分和显微组织估算其力学性能	(32)
(四) 真实断裂强度 S_r 与抗拉强度极限 σ_b 之间的关系	(35)
第二节 受剪、扭零件的失效和失效的抗力指标	(35)
一、受剪、扭零件变形和断裂的过程、形式及其失效的抗力指标	(37)
二、受剪、扭零件的应力分析、强度计算和断裂方式的判断	(39)
(一) 受剪、扭零件的应力分析和强度计算	(39)
(二) 受剪、扭零件失效方式和性质的判断	(42)
三、各种因素对剪切、扭转零件受力和失效的影响	(46)
四、材料抗剪、扭失效指标的估算	(47)
五、受剪、扭零件受力分析实例——螺旋弹簧的应力计算	(47)
第三节 受弯、弯冲零件的失效和失效抗力指标	(53)

一、弯曲时的应力分析和强度计算	(53)
(一) 弯曲时的正应力	(54)
(二) 弯曲时的剪应力	(57)
二、受弯零件的失效抗力指标及其估算	(59)
三、诸因素对受弯零件失效的影响	(63)
(一) 应力集中的影响	(63)
(二) 加载速率的影响——材料的冲击韧性	(64)
第四节 受复杂应力零件的失效和强度理论简介	(67)
一、应力状态和应变状态的分析	(69)
(一) 任意斜截面上的应力、主应力及最大剪应力	(73)
(二) 应力圆的构成及其应用	(75)
二、强度理论及其应用	(81)
(一) 最大拉应力理论 (第一强度理论)	(82)
(二) 最大拉应变理论 (第二强度理论)	(82)
(三) 最大剪应力理论 (第三强度理论)	(84)
(四) 均方根剪应力理论 (第四强度理论)	(84)
(五) 各种强度理论的适用范围	(86)
三、几种常见的组合变形杆件的强度计算	(87)
(一) 斜弯曲	(87)
(二) 弯曲与拉或压的组合	(88)
(三) 弯曲(或拉、压)与扭转的组合	(89)
四、在复杂应力状态下断裂类型的分析和判断—— 力学状态图及其应用	(91)
第五节 动载荷下零件的失效及其强度计算	(100)
一、承受冲击载荷作用零件的应力计算	(100)
(一) 冲击时动荷系数的概念	(100)
(二) 自由落体冲击时动荷系数的确定	(101)
(三) 弯曲冲击时的应力计算	(104)
(四) 扭转冲击时的应力计算	(105)
二、承受惯性力作用零件的应力计算	(106)
(一) 作等加速运动构件的应力计算	(106)
(二) 作等速转动构件的应力计算	(107)
(三) 制动惯性飞轮时的应力计算	(109)

三、提高构件抗冲能力的措施	(110)
四、在高速冲击载荷作用下材料变形和断裂的特征	(112)
第六节 交变应力下零件的失效(疲劳)和它的	
失效抗力指标	(117)
一、交变应力与交变应变的概念和若干定义	(119)
二、疲劳曲线、疲劳极限和疲劳寿命	(120)
三、疲劳抗力指标及其影响因素	(122)
(一) 疲劳极限	(122)
(二) 过负荷持久值和过负荷损害界	(130)
(三) 疲劳缺口敏感度	(132)
四、疲劳强度校核方法简介	(139)
(一) 单向应力下的疲劳强度校核	(140)
(二) 二向应力(弯曲应力和扭转应力)下的	
疲劳强度校核	(148)
五、疲劳寿命的估算方法简介	(151)
(一) Miner累积疲劳损伤线性方程式及其在疲劳	
寿命估算中的应用	(151)
(二) Basquin疲劳寿命与振幅之间的关系及其在	
疲劳寿命估算中的应用	(153)
(三) Manson-Coffin公式及其在疲劳寿命估算中的应用	(154)
(四) Paris公式及其在疲劳寿命估算中的应用	(155)
第七节 热应力引起的失效	(159)
一、热应力的来源和特点	(159)
二、简单情况下热应力的计算	(161)
三、热应力引起的塑性变形和蠕变	(166)
四、热冲击	(167)
五、热疲劳	(171)
第八节 断裂力学基础和金属的断裂韧性	(174)
一、断裂力学的基础知识	(176)
(一) 裂纹扩展能量率(裂纹扩展力)的概念	(176)
(二) 裂纹尖端附近的应力场和应力强度因子	(179)
(三) D-M模型和裂纹张开位移COD	(182)
(四) 用 J 积分确定材料的断裂韧性 J_{Ic}	(185)

二、断裂韧性的测定方法简介	(189)
(一) 试样制备	(189)
(二) 测试方法	(189)
三、金属材料断裂韧性的估算方法	(192)
四、断裂力学在断裂失效分析中的应用	(194)
(一) 判断断裂性质	(194)
(二) 估算剩余寿命	(195)
(三) 指导维修工艺	(196)
第二章 失效分析的金属材料学基础	(197)
第一节 金属材料的强化手段	(197)
一、概述	(197)
二、金属材料的强化手段	(198)
第二节 钢的基体组织对其失效抗力指标的影响	(202)
一、钢的分类	(202)
二、冶金因素对失效抗力指标的影响	(203)
(一) 回火温度对钢的力学性能的影响	(203)
(二) 合金元素对钢淬火-回火状态力学性能的影响	(205)
(三) 奥氏体化温度对钢的力学性能的影响	(206)
(四) 非金属夹杂物对钢的力学性能的影响	(207)
(五) 钢中微量元素对钢的力学性能的影响	(221)
三、钢的显微组织的最佳设计	(231)
(一) 最大韧性的最佳显微结构	(232)
(二) 净化组织	(234)
第三节 铝合金的基体组织对其失效抗力指标的影响	(235)
一、纯铝的特性	(235)
二、冶金因素对铝合金力学性能的影响	(237)
(一) 主要合金元素及其沉淀相对铝合金力学性能的影响	(237)
(二) 杂质相对铝合金力学性能的影响	(241)
(三) 微量元素对铝合金力学性能的影响	(242)
三、热处理和组织状态对铝合金力学性能的影响	(243)
(一) 退火组织对铝合金力学性能的影响	(243)
(二) 时效沉淀相对铝合金力学性能的影响	(244)

(三) 晶粒尺寸对铝合金力学性能的影响	(248)
(四) 晶界无析出物区对铝合金力学性能的影响	(248)
四、其它因素对铝合金力学性能的影响	(250)
(一) 铝合金试样取样方向对力学性能的影响	(250)
(二) 低温对铝合金力学性能的影响	(251)
第四节 钛合金的基体组织对其失效抗力指标的影响	(252)
一、纯钛的特性和断裂失效	(252)
二、钛合金的特性和断裂失效	(256)
(一) α 型钛合金的特性和断裂失效	(256)
(二) $\alpha+\beta$ 型钛合金的特性和断裂失效	(257)
(三) 介稳定 β 型钛合金的特性和断裂失效	(264)
三、微量元素对钛合金力学性能的影响	(265)
(一) 氢对钛合金力学性能的影响	(265)
(二) 氧、氮对钛合金力学性能的影响	(267)
(三) 辐对钛合金力学性能的影响	(268)
四、钛合金的断裂机制图	(269)
第五节 镁合金的基体组织对其失效抗力指标的影响	(271)
第六节 铜合金的基体组织对其失效抗力指标的影响	(274)
第三章 金属的断口分析及裂纹分析基础	(277)
第一节 延性断裂机理及断口分析基础	(278)
一、延性断裂断口的宏观分析	(279)
二、延性断裂断口的微观分析	(281)
(一) 滑移和延伸	(281)
(二) 韧窝	(284)
三、实际延性断裂断口的分析方法	(297)
(一) 对造成延性断裂的载荷性质的判断	(297)
(二) 对材料塑性的估计	(300)
(三) 延性断裂断口分析的思路	(301)
第二节 脆性断裂机理及断口分析基础	(302)
一、脆性断裂断口的宏观分析	(303)
(一) 脆性断裂断口的宏观特征	(303)
(二) 板材脆性断裂断口特征	(304)
二、脆性断裂断口的微观分析	(305)

(一) 解理裂纹的萌生.....	(305)
(二) 解理断裂断口的微观特征.....	(307)
(三) 准解理.....	(311)
三、沿晶脆性断裂	(314)
四、脆性断裂断口分析方法	(316)
(一) 断裂起点位置和走向的确定.....	(316)
(二) 对材料的性质和加载速度的估计.....	(318)
(三) 对载荷类型的判断.....	(318)
(四) 脆性断裂断口的分析思路.....	(319)
第三节 疲劳断裂机理及断口分析基础	(322)
一、疲劳断裂断口的宏观分析	(322)
(一) 疲劳断口的宏观结构.....	(322)
(二) 疲劳断口的宏观特征.....	(323)
二、疲劳断口的微观分析	(324)
(一) 疲劳裂纹的萌生(成核)	(324)
(二) 疲劳裂纹的稳定扩展.....	(327)
(三) 疲劳断口的微观特征.....	(328)
三、疲劳断裂断口分析方法	(331)
(一) 疲劳断裂源位置的判断.....	(331)
(二) 对疲劳载荷性质的分析.....	(333)
(三) 疲劳断裂断口分析思路.....	(337)
第四节 金属的裂纹分析基础	(340)
一、裂纹分析方法	(340)
(一) 裂纹的检查及宏观分析.....	(340)
(二) 裂纹的微观分析.....	(341)
(三) 裂纹产生的部位与形态特征.....	(342)
(四) 力学性能检验.....	(342)
(五) 材料化学成分分析.....	(342)
二、裂纹的起始位置	(343)
(一) 材质原因所引起的裂纹.....	(343)
(二) 零件的形状因素所引起的裂纹.....	(344)
(三) 受力状况不同所引起的裂纹.....	(345)
三、裂纹的宏观形貌	(345)

(一) 龟裂.....	(346)
(二) 直线状裂纹.....	(352)
(三) 其他形状裂纹.....	(354)
四、裂纹的走向	(355)
五、裂纹周围及裂纹末端形貌	(357)
第四章 失效分析的化学基础	(359)
第一节 概述	(359)
一、机械产品失效与环境的关系——研究环境失 效的重要性	(359)
二、机械产品环境失效——腐蚀的分类及其破坏形式	(359)
(一) 化学腐蚀.....	(359)
(二) 电化学腐蚀.....	(360)
第二节 金属化学腐蚀的基础知识	(362)
一、金属化学腐蚀的特征	(363)
二、金属化学腐蚀的原因	(371)
第三节 金属热腐蚀的基础知识	(376)
一、金属热腐蚀的现象和重要性	(376)
二、金属热腐蚀的原因	(379)
(一) 保护性表面氧化层的化学溶解理论.....	(380)
(二) 机械作用引起保护性氧化层破碎机理.....	(387)
三、热腐蚀的改进措施	(388)
(一) 合金化.....	(389)
(二) 涂层.....	(391)
第四节 金属电侵蚀的基础知识	(392)
一、接触材料的表面“晦暗”	(393)
二、接触材料的有机污染	(396)
三、接触材料的电侵蚀	(398)
(一) 电侵蚀的原因.....	(399)
(二) 电侵蚀的影响因素.....	(402)
(三) 减少或预防电侵蚀的方法.....	(406)
第五节 金属电化学腐蚀的基础知识	(408)
一、腐蚀电池和微电池概念	(408)
二、产生电位差的原因和对它的影响因素	(410)

(一) 金属的电极电位的产生和它们的标准电化序.....	(410)
(二) 金属电极电位的影响因素和电极的极化作用.....	(415)
三、判断金属在水溶液中的腐蚀倾向的方法——	
电位-pH图	(423)
第六节 常见的电化学腐蚀	(431)
一、金属的大气腐蚀	(431)
二、金属的局部腐蚀	(433)
(一) 小孔腐蚀(孔蚀或点蚀).....	(433)
(二) 缝隙腐蚀.....	(437)
三、金属在海水中的腐蚀	(439)
第七节 金属汽蚀的基础知识	(446)
一、汽蚀现象和它的重要性	(446)
二、汽蚀的原因和过程	(446)
三、汽蚀的影响因素和材料的选择	(454)
四、汽蚀的控制及预防方法	(458)
参考文献.....	(464)

第一章 失效分析的力学基础

从广义来说,零件或构件失效的原因有设计、材料、制造和使用(包括环境)等方面的问题,而设计则是首要问题。一个零件或构件的设计主要是指构件功能设计、机械强度设计(包括材料的选用)、外观美工设计等等,而其关键则是机械强度设计。在常规的零件强度设计中,首先要分析零部件中所承受的载荷和它所产生的应力,其次是根据失效类型确定其许用应力,最后要通过计算使得零部件中的实际工作应力不超过许用应力 $[\sigma]$,即 $\sigma \leq [\sigma]$ 。这就是保证所设计的机械能安全运行的强度判据,据此设计计算出零件的合理尺寸与结构。

由此可以看出,机械零件采用什么强度判据要凭它的失效形式来确定。失效分析是机械强度设计的根据。因此,作为一个合格的失效分析工作者,必须掌握机械强度设计中的基本知识——失效分析的力学基础。

第一节 受拉、压零件的失效和失效的抗力指标

在工程实际中,承受拉伸或压缩的杆件是很常见的。例如,紧固螺栓(图1-1a),地脚螺钉,起重机吊索(图1-1b)及其桁架中的杆1(图1-1d),是承受拉伸的杆件;油压千斤顶活塞杆中的支承杆2(图1-1e),是承受压缩的杆件。

这些杆件的结构形式各有差异,加载方式各不相同,但其受力特点是:作用于杆端外力的合力作用线与杆件的轴线重合;其变形特点是:沿轴线方向伸长或缩短,故称为轴向拉伸或轴向压缩。

一、受轴向拉伸、压缩杆件的变形和断裂的过程、形式及其失效抗力指标

受轴向拉伸杆件的变形和断裂形式可用单轴拉伸的试样模

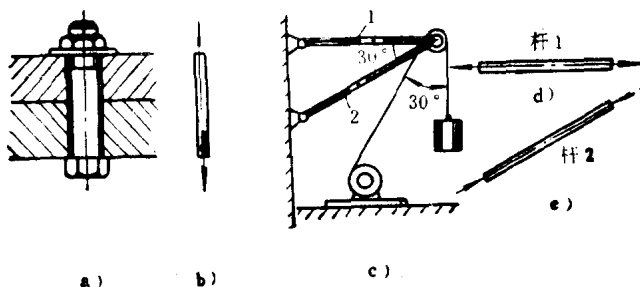


图1-1 受拉构件示意图

拟,如图1-2所示。根据材料延性的大小,受轴向拉伸杆件的变形和断裂具有不同的形式。当材料很脆时,在拉伸破坏时只伴随着少量或基本上没有断面收缩(图1-2a),整个宏观断口为垂直于轴向拉伸应力的平断口,即断裂发生在可测量的塑性变形之前,这种断裂方式叫做脆性断裂;随着材料延性的提高,在承受轴向拉伸载荷作用时,形成杯-锥状断裂(图1-2b),双杯状断裂(图1-2c),剪切状断裂(图1-2d),这些断裂方式一般都有宏观的塑性变形——缩颈,或在剪切断口附近有较大的剪切塑性变形;当材料极纯或延性极大时,会产生严重颈缩后才破断(图1-2e)。这时,断裂处的断面收缩率基本上达到100%,即收缩成一点。实验表明,聚合物和无机玻璃在玻璃化温度时、韧性很好的单相金属、或某些金属和合金在高温进行慢拉伸时,往往会发生这种形式的断裂。

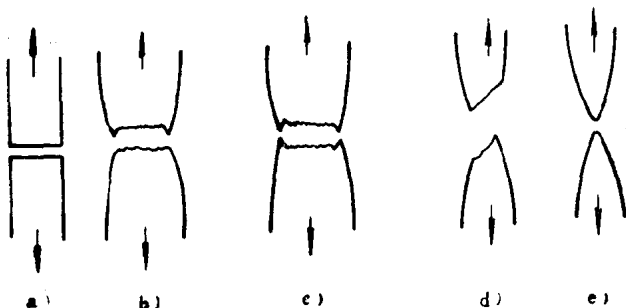


图1-2 圆试棒单轴拉伸时变形和断裂形式示意图

受轴向拉伸杆件的变形和断裂过程是用拉伸图（或叫拉伸曲线）或应力-应变图来描述的。

受轴向拉伸杆件的变形和断裂过程与拉伸试样的情况相似。拉伸试样的拉伸试验可以在材料试验机上进行。一般的材料试验机都带有自动记录装置，可把作用在试样上的力和所引起的伸长自动记录下来，绘出载荷-伸长曲线，这种曲线叫做拉伸图或拉伸曲线。图1-3a是退火低碳钢的拉伸图，图的纵坐标表示载荷 P ，单位是 N ；横坐标表示绝对伸长 Δl ，单位是 mm 。如果用试样（杆件）原始截面积 F_0 去除纵坐标载荷 P ，则得到应力 σ ，即 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ N/mm^2 （或 MN/m^2 ， MPa ）。以试样的计算长度 l_0 去除横坐标绝对伸长 Δl ，得到相对伸长（应变） δ ，即 $\delta = \frac{\Delta l}{l_0}$ 。应力与应变的关系曲线叫做应力-应变曲线（图1-3b），应力-应变曲线的形状与拉伸图相似，只是坐标不同而已。在应力-应变曲线上，可以直接读出材料的力学性能。当外力达到材料的某种力学性能时，即发生拉伸（或压缩）弹性畸变、塑性畸变或断裂失效。

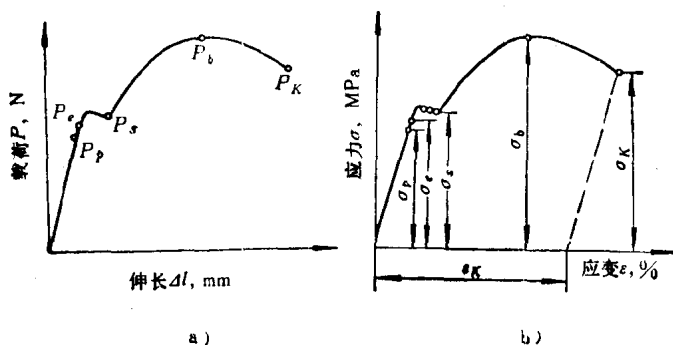


图1-3 拉伸图

① 比例极限 σ_p 是应力与应变成正比关系的最大应力，即在应力-应变曲线（图1-3b）上开始偏离直线时的应力，即在 $\sigma \leq \sigma_p$ 时， $\sigma = E\varepsilon$ 。