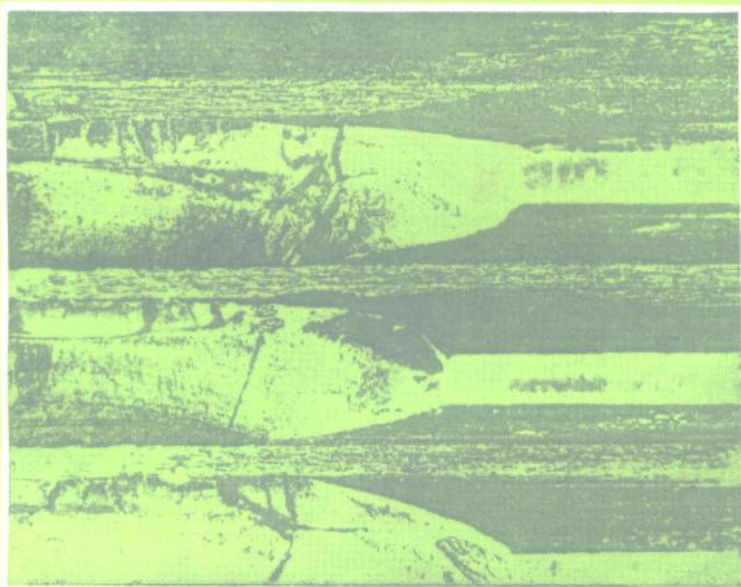


高等学校教学参考书

机械零件失效分析 与 预 防

●涂铭旌 鄢文彬 编著



高等教育出版社

高等学校教学参考书

机械零件失效分析 与 预 防

涂铭旌 鄢文彬 编著

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是涂铭旌教授和鄢文彬教授根据国家教育委员会“高等学校工科基础课程1986—1990年教材建设规划”要求和多年来在失效分析与预防的科研和教学中积累的资料，并吸取了国内外有关专家的经验 and 资料编写的。

本书阐述机械零件各类失效的规律与机制，介绍失效分析与预防的思路和方法，讲述失效机件的残骸分析、裂纹分析、以及宏观与微观断口分析。在讲述失效原因、失效预防对策时，均从服役条件分析入手，以结构设计、材料、工艺三者为主线进行分析，并引用了工程实践中的大量资料，以达到理论联系实际，深入浅出的效果。

本书是机械类专业的选修课教材，也可作为材料类专业的教学参考书，同时可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

高等学校教学参考书

机械零件失效分析与预防

涂铭旌 鄢文彬 编著

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

中国科学院印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张7.625 插页 4 字数190 000

1993年 8 月第1版 1993年 8 月第1次印刷

印数0001—2 264

ISBN7-04-003654-1/TH·295

定价 5.35 元

前 言

本书是根据国家教育委员会“高等学校工科基础课程1986—1990年教材建设规划”的要求而编写的，供机械类专业使用。

“机械零件失效分析与预防”是从机械内在质量因素和外在服役条件来研究机械失效与预防的，在国外，有的国家（如联邦德国）叫“失效学”，亦即把“失效分析与预防”从工程技术的地位提高到了学科的地位。从学科角度看，它将研究失效规律与机理，涉及到物理、化学、力学、材料学等多种学科。从工程角度看，它对机械设计、材料选择与应用、机械产品质量控制、机械的使用与维修等起着不同程度的指导作用。近年来，不仅对材料专业的本科生、研究生开设了失效分析课程，而且机械类专业的学生也在选修这门课程。

本书第一章讲解失效与失效分析的重要性，较详细地阐述了失效分析的目的、任务，可靠性分析在失效分析过程中应用的思路，以及“失效分析及预防”与其他学科之间的关系。第二章和第三章讲解失效分析的思路和处理问题的程序，详细阐述了过量变形失效、断裂失效和表面损伤失效的特点。第四章介绍失效的宏观断口分析和微观断口分析，其中包括残骸分析和裂纹形态分析、延性断口、脆性断口、疲劳断口等的宏观分析与微观分析。第五章从结构设计因素、材料因素和机械制造工艺因素三个方面分析了造成机械失效的原因。第六章讲述预防各类典型失效的对策。第七章是失效分析实例。

本书的特点是强调理论与实践相结合，阐述失效的规律和机制，注意讲述对各类问题分析的思路，以便让读者掌握失效分析的逻辑思维方法。同时结合大量事例介绍实践中的失效分析与预防问题。

本书根据编著者多年来在失效分析与预防的科研和教学中积累的资料，同时吸取了国内外同行专家的经验 and 资料，由涂铭旌（第一、三、五章）、鄢文彬（第二、四、六、七章）共同编写。由鄢文彬负责统稿。

本书初稿经西北工业大学汤嘉吉教授审阅，提出了不少宝贵的意见，编著者在此致谢。

由于编著者学识水平有限，书中难免存在缺点与错误，恳请读者批评指正。

编著者

1991年5月

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
1.1 失效的定义	1
1.2 失效分析的重要性	1
1.3 失效分析的目的和任务	2
1.4 机械零件失效与机械产品的可靠性设计	4
1.5 失效分析与其它学科的关系	9
参考文献	11
第二章 机械零件失效的基本概念	13
2.1 失效的分类	13
2.2 引起零件失效的因素	13
2.3 弹性变形失效	24
2.4 塑性变形失效	26
2.5 脆性断裂	28
2.6 疲劳断裂失效	33
2.7 磨损、接触疲劳与微动损伤	39
2.8 环境介质作用下的失效	52
参考文献	56
第三章 失效分析的基本思路和方法	57
3.1 失效分析及失效预防的基本思路	57
3.2 失效分析的程序	68
3.3 失效分析的基本实验技术	77
参考文献	80
第四章 断口分析	81
4.1 断口分析的思路与步骤	81
4.2 残骸分析	81
4.3 宏观断口分析	84

4.4 裂纹形态分析	105
4.5 微观断口分析	109
参考文献	117
第五章 机械零件失效原因分析	118
5.1 从机械设计角度分析失效原因	118
5.2 材料因素所造成的失效	130
5.3 工艺因素所造成的失效	134
参考文献	156
第六章 预防机械零件失效的对策	158
6.1 机械失效综合分析、预防的思路	158
6.2 预防零件过量变形失效的对策	162
6.3 预防脆性断裂的对策	166
6.4 预防疲劳失效的对策	181
6.5 预防表面损伤失效的对策	190
参考文献	201
第七章 失效分析实例	202
7.1 80吨工矿电力机车从动齿轮脆断失效分析及改进措施	202
7.2 1Γ260/320型压缩机曲轴主轴颈断裂分析	215
7.3 轻型飞机起落架板簧断裂分析	225
7.4 含缺陷气瓶的安全与寿命估计	229
参考文献	236
附图 本书所用的照片图	

第一章 绪 论

1.1 失效的定义

机械产品的主要质量标志是：功能、寿命、重量/容量比、经济、安全和外观，其中功能是首要的。一般说来，发生下列情况之一时，机械产品被定义为失效：（1）完全失去原定的功能；（2）它仍然可用，但是不再能够良好地执行其原定的功能；（3）严重的损伤，使其在继续使用中失去可靠性及安全性，因而需要立即从服役中拆除进行修理或调换。

1.2 失效分析的重要性

机械设备发生失效事故，往往造成不同程度的经济损失，而且可能危及人身安全。根据美国1982年的统计，因为零件断裂、腐蚀、磨损失效，造成每年3400亿美元的损失。其中断裂失效的损失为1190亿美元。联邦德国前几年的统计，由于上述三项失效每年造成的国民经济损失约700亿马克。我国失效事故也很多，虽无完整的统计资料，但损失也十分惊人。例如矿山机械零部件由于磨料磨损及腐蚀失效，所造成的经济损失全国每年达十亿元以上。又如对化工厂压力容器的失效情况调查表明，国内51个中型合成氨厂，1971—1979年期间共发生重大事故260起，总计损失5400多万元。1979年我国某工厂，石油液化气贮罐爆裂引起大火，经济损失达600多万元，死33人，伤54人。根据我们的调查，在黑龙江省林区和矿山，每年冬季由于机器零件发生低温低应力脆断所造成的损失就达2400万元。

上述事例说明，失效分析与预防问题，应当引起工程技术部门和管理部门的高度重视，采取措施防止或减少类似失效事例的

再发生。

1.3 失效分析的目的和任务

任何一个机械产品都必须保证预期的功能和寿命,安全可靠,并且技术先进,价格低廉。为此,机械产品必须遵循一套完整的生产规程和科学质量管理。亦即从产品设计开始,经材料选择、冷热加工(包括锻、铸、焊、热处理、机加工等)、零件检验及可靠性与耐久性试验、装配等生产过程,最终制成质量合格的机械产品。然而每个生产环节,诸如设计、材料、工艺是否合适,只有产品在实际服役过程中,方能被发现。如果在服役过程中发生故障,便要进行失效分析。通过失效分析,找出失效原因,提出防止失效的措施,然后反馈到产品设计、制造部门,以提高产品的质量、可靠性与耐久性。这是一个完整的产品生产—服役—生产循环,如图1-1所示。从图中可见,失效分析在机械工程上所占的地位是十分重要的。失效分析成果的反馈,提供了

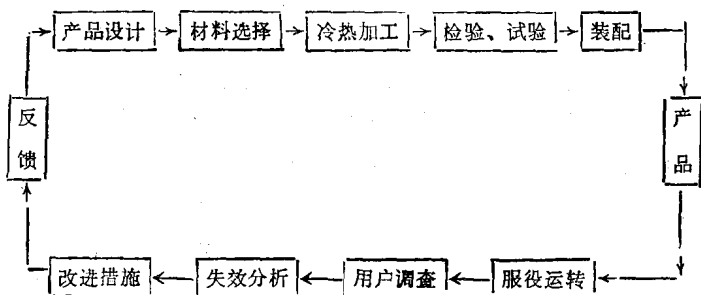


图1-1 机械产品生产—服役—生产循环示意图

从设计、制造、使用和维护、管理等方面防止和减少同类失效事故发生的依据和对策。

1.3.1 反馈到设计方面,可以促进产品结构设计的改进,或新的安全设计规范和技术标准的制订

失效分析的大量事实证明:许多情况下只要在结构设计方面

作少量的改进，就会避免恶性、早期断裂事故，而且比改进材料、工艺的作用更大、更经济。但是，有时某种失效的发生，甚至要求对机械零件的结构设计方案作较大的变动，或修订和制订新的设计规范和标准。例如：我国从国外引进的30万吨合成氨成套设备，在运行投产后，汽轮机转子叶片不断发生疲劳断裂。经国内组织专家进行断裂分析后，认为主要是叶片根部结构设计不合理，于是将原来的棕树形叶根改为叉形叶根，从此，叶片没有再发生断裂事故。

有些国家为了防止电站转子飞逸造成的严重事故，在失效分析的基础上，已经制订了透平转子延寿和寿命保险的方法。

过去，在评定形状复杂的大型轴类零件的疲劳强度，预防疲劳断裂时，只是使用近似的计算方法，利用一定的关系式来考虑尺寸、形状因素的影响，将小型标准试样的数据转换到大型实际零件上。这样作往往不一定安全可靠，仍有可能发生疲劳断裂事故。现在，国外对柴油机曲轴、汽轮机和发电机转子及其它机器零件进行全尺寸零件疲劳试验，用来确定它们的疲劳强度。这种方法，对于合理确定零件的许用应力、零件的尺寸和形状，以及选择材料与制定工艺规范，都是更为可靠的方法。

1.3.2 反馈到材料方面，可以促进老材料的改进和新材料的开发以及正确合理选材

本世纪二、三十年代，由于机械的大型化和高参数化，造成许多用普通碳钢制造的零部件因强度不足而失效，这就促进了对合金钢的研究，并在内燃机、汽车、锅炉、汽轮机上广泛应用。随着机械工业的发展，人们通过机械零件的失效研究，对合金结构钢进行了化学成分及金相组织调整，同时又研究出许多高性能的、适合于复杂工况条件的新钢种，促进了新材料的发展。

应当着重指出，在国内不少机械零件失效分析的案例中，有些机械零件失效主要是由于选材不当而造成的；但是有些事例说明，即使选用了A3钢、45钢，假若能采用合理的热处理工艺，

也能够防止某些零件的断裂事故。因此,对于机械设计来说,除了应有合理的零件结构设计之外,还必须正确选材、合理用材。

1.3.3 反馈到制造工艺,可以促进生产工艺的改进及新工艺的应用

在后面的章节里,我们可以看到,由于工艺的不合理而造成机械失效的事例是大量的。通过失效分析,则可以判断制造工艺、质量标准及其控制方法的合理性,同时提出克服零件失效的工艺措施。

对某一失效事例的分析,有时能促进工艺的变革。而工艺是与材料、结构密切相关的。有的新工艺的采用,又可能造成新的失效类型。例如,用焊接代替铆接后,船舶和桥梁都发生过多起断裂事故,这促使了焊接工艺和焊接材料的改进。

1.3.4 反馈到使用、维修方面,可以从使用、操作、维修、保养方面制订预防失效的措施

通过失效分析,可以判明机器的使用、维修对失效事故是否应负责任,判明操作规程和有关参数限额的合理性,指导安全操作规程的修订。通过失效分析还可以提供一些原则,以便制订机器设备的延寿措施。

通过上述四方面的分析,正确的失效分析是解决零件失效、提高机器承载能力和使用寿命的先导及基础环节。失效分析的目的在于失效原因的分析和判断,而更重要的还在于为积极预防失效找到有效的途径。为了提高机械产品在国内外市场的竞争能力,可以说,失效分析及失效预防技术是发展机械工业的重要基础技术之一。这就是失效分析的目的和任务。

1.4 机械零件失效与机械产品的可靠性设计

1.4.1 机械产品的可靠性评价

各种机械产品(以下简称“产品”)或某一机械零件(以下简

称“零件”) 在一定的条件下使用, 完成其原定的功能的时间往往是有限的。例如零件会逐渐被磨损, 产生裂纹, 材料被腐蚀或者老化等, 以致失效。从失效分析角度谈产品的可靠性, 是指使用的可靠性, 它既包括了在设计和制造中所保持的产品的固有可靠性, 也包括了使用、维修后所体现出来的可靠性。由此看出, 产

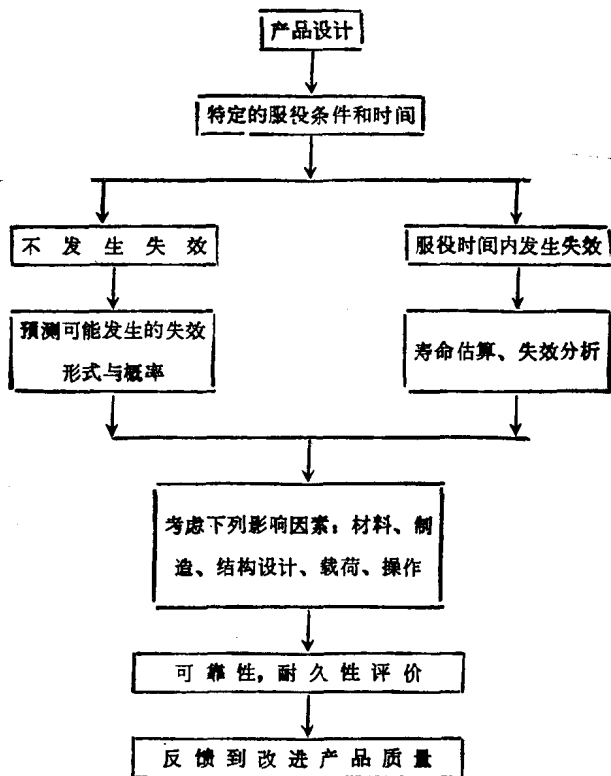


图1-2 产品可靠性评价的思路

品的可靠性是相对于失效而言的概念, 并包含有时间的因素, 反映着产品质量的时间效应。

可靠性技术一般分为三个领域: (1) 可靠性工程, 主要是系统

(这里指产品)可靠性分析、系统可靠性设计和评价;(2)可靠性分析,包括可靠性试验、失效分析与防止;(3)可靠性数学。

由图1-2可见,可靠性评价有两个方面的任务。第一是对产品的可靠度进行研究;第二是寻求提高产品可靠度的最佳途径(研究失效原因,改进产品质量)。

1.4.2 衡量可靠性的尺度

可靠性在工程上应用时,需要用量来表示。衡量可靠性的尺度有二:即概率指标和寿命指标。可靠性用概率表示时称为可靠度,即完成规定功能的概率。反之,完不成规定功能的概率,就叫做不可靠度,或称失效率。可靠性的寿命指标有平均故障间隔MTBF(Mean Time Between Failures)和失效前平均时间MTTF(Mean Time To Failure)。

平均故障间隔(MTBF)是指经过多次修理过的产品相邻故障间隔的平均时间。这个指标表示了产品可在多长时间间隔内无故障地使用,以及使用多长时间间隔后进行修理较为合适。如果预先知道这些参数,那就非常方便。

失效前平均时间(MTTF)是指发生故障就不能修理的产品,从开始使用到发生故障的平均时间。不能修理的产品一般是指零件和材料等。

1. 可靠度

可靠度是指产品在规定时间内及规定的使用条件下,无故障地完成规定功能的概率。对可靠度的定义,应明确下列诸要点:

(1)可靠性所指的对象是什么?是零、部件或是设备,或是系统,或是人机都在内的大系统。(2)这些对象(零、部件,设备或系统)的功能是什么?丧失功能(即发生失效)是如何定义的。例如在一个复杂的产品中,如有一个对全局无大影响的零件损坏了,产品勉强可以运行,这时,就产品而言,可以不算是失效。(3)关于时间的规定。时间随对象而有所不同,有的要求在几十年后仍能正常发挥作用,有的只要求保证在极短时间内发挥

作用，有的要求在存放期间性能不下降等等。(4)关于使用条件的规定，除了温度、湿度、气压、冲击、振动和腐蚀环境等条件外，操作方法和维修方法对设备或系统的可靠性都有很大的影响，都应具体指明。(5)可靠度用概率表示，如可靠度为99.9%或99.99%等。

由于把抽象的可靠性用概率形式表示后，在技术上有了衡量可靠性程度上的统一明确的尺度，使产品的可靠程度的测量、比较、选择、保证和管理等有了基础。现在，对产品失效预测，运行时间预测等工作已进入实用阶段，就是由于采用了概率这一概念的结果。

2. 失效率

失效率是指产品工作到某一时刻时，在单位时间内发生失效的概率。典型的失效率曲线如图1-3所示。图中区域Ⅰ为早期失效期，区域Ⅱ为偶然失效期，区域Ⅲ为耗损失效期。 P_1 为规定的失效率，由此得到有效使用寿命。

在早期失效期Ⅰ中，产品因在设计和制造工艺上的缺陷等因素而导致失效。如原材料有缺陷，制造工艺措施不当，生产设备发生故障，质量控制不严等，都可能造成早期失效。可以通过加强对原材料和工艺的检验，对产品进行质量管理，进行可靠性筛选等办法来淘汰早期失效的产品，从而提高产品的可靠性。这一时期的失效率，随着时间的增长而降低。在有缺陷的零部件早期失效之后，产品的失效率就基本稳定下来，进入区域Ⅱ。在这一时期因为故障的发生是随机的，故称为偶然失效期。在这期间产品的失效率是最低的，而且是稳定的，相当于产品的最佳运行状态时期。这个时期的长短程度，决定了有效使用寿命。

最后是失效率再度上升的时期，称为耗损失效期。耗损失效主要是由于产品的老化、疲劳、磨损和其它耗损造成的，因而失效率上升。若能事先知道耗损失效期开始的时间，并在此之前适时更换零部件，就可延长可修复产品的有效使用寿命。假使修

复需要花很大费用或故障仍然很多，就不如把它报废更为合算。

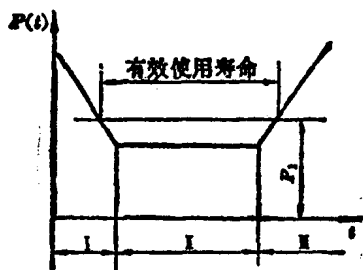


图1-3 失效率曲线

失效率，即 $(1 - \text{可靠度 } R)$ ，多用 $\%/(10^3 \text{小时})$ ($\sim 10^{-5}/\text{小时}$) 为单位，也有用 $\%/(小时)$ 为单位的。对可靠度高，失效率特小的零件，亦可采用 Fit ($Fit = 10^{-9}/\text{小时}$) 为单位。其它作为失效率单位的还有 $\%/(次数)$ 和 $\%/(距离)$ 等。

1.4.3 机械零件可靠性设计的必要性

常规的机械强度设计不能回答零部件在运行中的破坏概率，一是因为设计中所用的载荷及材料性能等数据，是它们的平均值，而实际上这些数据都有不同程度的分散性。二是为了保证机械零件有一定的安全裕度，在设计中引入了远大于1的安全系数（即使是计算了可靠度，也需要这个安全裕度）。这个安全系数的数值，可以从机械设计手册中查到，或者由设计人员根据经验确定。如果设计人员经验不足，或者对机械实际工况条件估计太粗略，则这种安全系数不是偏小就是偏大。

对于非常重要的设备（例如原子能工程中的压力容器），或者对要求重量轻、可靠性高的零部件（如飞行器的重要零部件），它的破坏会造成严重的事故，所以要求设计者在设计时预测设备在运行中的失效率，并希望失效率限制在一个很小的给定范围之内，这就必须进行可靠性设计。

对于处于交变应力状态的零件,需进行疲劳强度设计。工程上应用的疲劳强度设计准则有:(1)无限寿命设计。传统的寿命设计是从材料的 $\sigma-N$ 曲线为依据的(σ 表示循环应力, N 表示应力循环次数)。这种 $\sigma-N$ 曲线也是材料、工艺研究以及疲劳失效分析的依据。然而,材料的疲劳性能有一定的分散性,同种材料,在同一交变应力下,几个试样的疲劳断裂寿命 N_f 不尽相同,它们的对数 $\log N_f$ 与试样断裂数目间服从正态分布,或威布尔(Weibull)分布(在疲劳设计中常假设疲劳寿命服从正态分布)。因此,同一材料的 $\sigma-N$ 曲线不只有一条,实际上存在一族 $\sigma-N$ 曲线,而其中每一条代表一定的失效率 P 。对于一定的失效率 P 的 $\sigma-N$ 曲线称作 $P-\sigma-N$ 曲线,如图1-4所示。 $P=50\%$ 的 $P-\sigma-N$ 曲线称为中值疲劳曲线。通常以中值 $\sigma-N$ 曲线来判断材料和工艺的优劣;而对于疲劳强度设计,则需要根据零件在结构或整机中所处地位的重要性,选择合用的 $P-\sigma-N$ 曲线。对于重要的零件,应采用失效率 P 低或可靠度 R 高($R=1-P$)的 $P-\sigma-N$ 的曲线进行疲劳强度设计,以保证零件具有足够的可靠性。例如,工程师们常以10%失效率为设计滚动轴承疲劳寿命的基础。

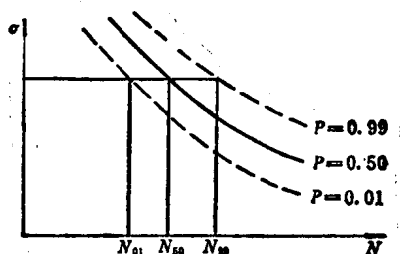


图1-4 具有不同失效率(或可靠度)的 $P-\sigma-N$ 曲线

1.5 失效分析与其它学科的关系

一台机器从原材料生产开始,到零件的加工制作、装配,直

到服役使用，过程繁杂，影响因素甚多。因此，机械失效问题就显得相当复杂，涉及的原因很多。图1-5以断裂失效为例，列出了各种因素与断裂之间的相互关系。从图可见，断裂是一个受到多方面因素作用而产生的复杂过程。所以，失效分析是一项综合性较强的技术工作，它所涉及的知识面较广，所需掌握的分析技术也较多。图1-6列出了失效分析与其它学科的关系。

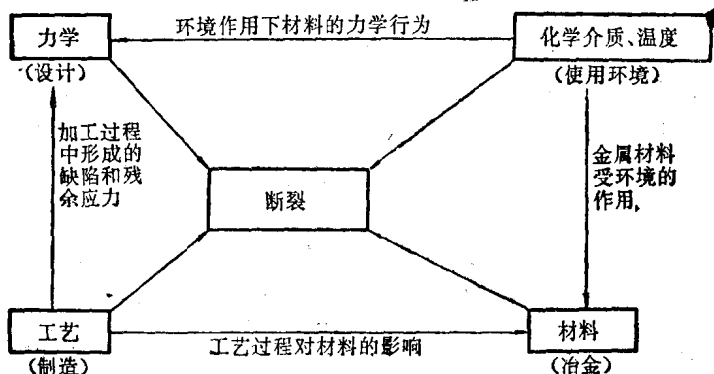


图1-5 影响断裂的诸因素

在进行一个较重大的失效事故分析研究时，就往往需要几个方面的工程技术人员的密切配合，同心协力方能作出正确的判断，找出正确的失效原因。

综上所述，机械设计既要保证所设计零件的功能，又要保证它的预期寿命和可靠性。失效分析的积极作用是找出机械失效的原因，并提出预防失效的措施。应当说明，图1-6在于强调失效学是一门综合性较强的研究领域，它的发展有赖于图中所列举的学科和技术的发展，但这并不意味着强调“失效学”的中心地位。

本书以“机械零件失效分析”为主题，试图达到下列目的：

(1)使机械设计人员获得必要的失效分析基础知识。