

金属零部件

JINSHU
LINGBUJIAN
SHIXIAO FENXI JICHU

失效分析基础

杨川 高国庆 崔国栋 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014008265

TG14
108

金属零部件失效分析基础

杨川 高国庆 崔国栋 编著



TG14
108

国防工业出版社

·北京·



北航

C1695717

014008582

内 容 简 介

失效分析技术属于跨学科技术。零部件进行失效分析不但是提高产品质量必需的技术,也是培养工程技术人员综合利用多学科知识解决工程问题,提高自身学术水平有效途径。作为一门跨学科技术,也有需要学习者必须牢固掌握的基础知识与基本技能。本书作者根据自身的实践经验及对失效问题的理解,对失效分析技术中的基础知识进行系统归纳,并尽可能详细的介绍给读者。

金属材料零部件失效有多种类型,其中断裂是最让设计者与使用者担心的问题。在断裂失效中,疲劳断裂又是最常见的断裂类型。因此本书将疲劳断裂作为重点内容论述,并将近年来发展的关于疲劳断裂定量分析及疲劳图的应用内容尽作者所能介绍给读者。书中设计了不同类型的练习题,目的是帮助读者掌握失效分析技术的基础知识与基本技能。

本书可作为高等院校材料科学与工程、机械设计与制造等专业学生失效分析课程的教材,可作为其他专业学生学习或自学失效分析技术的教材及参考书。同时可供从事金属材料研究、金属零部件设计与制备及对金属零部件进行失效分析的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

金属零部件失效分析基础/杨川,高国庆,崔国栋编
著. —北京:国防工业出版社,2014. 1
ISBN 978-7-118-09059-8

I. ①金... II. ①杨... ②高... ③崔... III. ①
金属材料—零部件—失效分析 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 233538 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 字数 368 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

工程中金属构件的失效对相关的工程技术人员来说是一个不得不考虑、不得不解决的重要问题。对重大失效事故必须进行分析,其目的是为了探明原因,找出改进的措施,避免同类事故再次发生,同时也是为了判明责任。

失效分析技术是一门跨学科的技术,在进行失效分析过程中必须综合应用多学科知识。由于新材料在现代工程中大量使用,失效分析已经覆盖陶瓷、聚合物及电子材料领域。虽然不同领域失效分析有着不同的特点,但是也存在众多共同之处。金属材料构件的失效分析技术应该说是最成熟的。熟练掌握金属零部件失效分析技术,不但有实际应用价值,同时也为分析其他新材料失效问题奠定基础。

由于失效分析技术属于跨学科技术,所以对零部件进行失效分析,不但是提高产品质量必需的技术,也是培养工程技术人员综合利用多学科知识、提高学术水平的有效途径。因此在大学阶段,对本科生进行此方面的培养与训练,对提高本科生综合应用多学科知识能力解决工程实际问题是非常有帮助的。

西南交通大学多年来将失效分析作为材料专业的必修课程,也有机械、力学、土木等专业的学生选修该课程。本书作者多年来从事金属零部件失效分析方面的工作,在此基础上编写了此教材。一本教材会引用他人的研究成果与各类相关资料,但也应该有自身的特点。本教材在编写过程中试图形成下面一些特点:

1. 作为一门技术类的教材,应该有基础知识。

由于失效分析是一门跨学科的技术,对于哪些内容属于基础知识,不同的学者有不同的见解。在本书的第二章作者根据实践经验做出归纳,供广大同仁批评指正。

2. 作为一门要讲授的教材,应该有重点教学内容。

零部件的失效一般是指使用功能的丧失,包括过度变形、超常磨损、严重腐蚀、断裂等多种类型,其中断裂是最可怕的。在断裂失效中,公认疲劳断裂是最常见的断裂类型。因此将疲劳断裂作为重点内容论述,并尝试引入近年来发展的关于疲劳断裂定量分析内容。

3. 作为一门供学习的教材,应该有练习思考题。

本教材根据一些实际案例,编制出一些能够启发学生思考、掌握关键内容的练习思考题。

本书由西南交通大学杨川、高国庆、崔国栋编著。第1章、第2章由杨川执笔,第3章由杨川、崔国栋、高国庆共同执笔,第4章由崔国栋执笔,第5章由高国庆执笔。本教材引用了许多专家与学者发表的资料与论著,在此向他们致以真诚的谢意。

本书的出版得到西南交通大学学科建设基金的资助,对此表示感谢。

本书出版得到国防工业出版社大力支持,对程邦仁,于航等编辑辛勤工作表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,编书过程中难免存在不足之处,敬请读者与同仁批评指正,笔者必将及时纠正,避免误人子弟。

编著者

2013年5月于西南交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 失效出现的宏观原因	1
1.2 失效分析的基本方法	9
1.2.1 常规分析方法	9
1.2.2 系统分析方法	11
1.3 失效分析的主要目的与值得注意的两种倾向	19
1.4 失效分析的进展	22
习题	27
参考文献	29
第 2 章 失效分析基础与基本技能	30
2.1 金属材料典型力学性能试验条件下的应力分布与断裂过程	30
2.1.1 拉伸试验金属材料应力分布断裂特征	31
2.1.2 弯曲试验金属材料应力分布与断裂特征	32
2.1.3 扭转过载试验金属材料应力分布与断裂特征	33
2.1.4 剪切过载试验金属材料应力分布与断裂特征	35
2.1.5 冲击试验金属材料断裂过程	35
2.1.6 交变载荷应力分布特点与断裂过程	37
2.1.7 实际零部件疲劳强度影响因素	39
2.2 应力集中与三向应力	40
2.3 残余应力产生原理与分析方法	43
2.3.1 钢在热处理过程中的残余应力	44
2.3.2 经过表面技术处理后残余应力分布	48
2.3.3 铸造残余应力	54
2.3.4 焊接残余应力	56
2.4 断口宏观形貌分析方法	58
2.4.1 宏观断口分析目的与意义	58
2.4.2 裂纹源与裂纹扩展方向确定方法	59
2.4.3 圆柱形与片状样品拉伸过载断裂断口分析	62
2.4.4 圆柱样品扭转过载断裂断口分析	66
2.4.5 弯曲过载断裂断口	67
2.4.6 剪切过载断裂断口	69
2.4.7 冲击过载断裂断口	71

2.5	断口微观形貌分析方法	72
2.5.1	分析目的	72
2.5.2	扫描电镜(SEM)成像原理与典型用途	73
2.5.3	典型断口微观形貌	75
2.6	断口宏观形貌与断口微观形貌间关系	82
2.6.1	韧性材料拉伸断裂宏观与微观断口	82
2.6.2	脆性材料拉伸断裂宏观与微观断口	85
2.6.3	韧性材料扭转断裂宏观与微观断口	86
2.6.4	冲击断裂宏观与微观断口	87
2.6.5	弯曲载荷作用下断裂断口宏观形貌与微观形貌	90
2.6.6	剪切断裂宏观断口形貌与微观断口形貌	92
2.7	金相组织分析方法	93
2.7.1	分析目的	93
2.7.2	阿贝原理	94
2.7.3	利用阿贝原理分析金相组织	96
	习题	98
	参考文献	103
第3章	疲劳失效	104
3.1	疲劳断口形成过程与形貌分析	104
3.1.1	疲劳断口形成与断口宏观形貌特征	104
3.1.2	宏观形貌对失效原因提供的信息	106
3.1.3	疲劳断口微观形貌特征及对失效原因提供的信息	109
3.1.4	疲劳断口宏观形貌与微观形貌间关系	111
3.2	疲劳断口定量分析	119
3.2.1	利用宏观断口进行定量分析	119
3.2.2	利用微观断口形貌特征(疲劳条纹间距)进行定量分析	121
3.3	疲劳图在疲劳失效分析中的应用	127
3.4	利用材料表面技术提高疲劳强度	131
3.5	疲劳断裂实际案例	133
	案例1 柴油机中盘簧断裂原因分析	133
	案例2 柴油机汽缸水套失效分析及对策	137
	习题	141
	参考文献	145
第4章	磨损失效	146
4.1	磨损与摩擦力	146
4.2	磨损机理	148
4.2.1	粘着磨损机理	148
4.2.2	磨粒磨损机理	150
4.2.3	氧化磨损	150

4.2.4 微动损伤	151
4.3 判断磨损机理的方法	155
4.4 实际案例分析	161
案例1 反击式破碎机锤头耐磨性偏低分析	161
习题	167
参考文献	168
第5章 失效分析案例	169
5.1 柴油机“机破”事故分析	169
5.2 铁路Ⅱ型弹条制造过程中裂纹分析	176
5.3 压力容器罐体表面裂纹分析	181
5.4 高速轧钢机用轧辊表面剥落原因分析	192
5.5 镀金铍青铜导电弹簧断裂分析	197
5.6 深层渗碳轴承套圈与滚子失效分析	202
5.7 TDK 空压机机破事故分析	214
习题	228
附录1 应力集中系数图与表	236
附录2 材料性能数据	244
附录3 大型构件不同位置疲劳条纹照片	246

第1章 绪论

1.1 失效出现的宏观原因

零部件失效现象在工程中并不少见。失效可以一般定义为：零部件不能按照设计要求正确地行使其功能。失效并不一定是断裂，但是工程上最为关注的失效问题往往是断裂问题。进行失效分析的目的是确定失效原因，为改进设计、加工过程或改变材料等提供依据，同时也是为了确定事故责任提供科学依据。

目前在机械装备、冶金设备、铁路、机车车辆等领域最重要及最广泛使用的材料仍然是金属材料，零部件发生失效往往是在各类应力作用下发生的。腐蚀失效问题一般有专门论述，本书不包括这部分内容。造成早期失效的常见的宏观原因归结如下：

1. 设计中问题(零部件几何形状设计问题)

一些失效问题是由设计不当造成的，例如人为的设计缺口。工程中有大量的轴类零件(受弯曲或扭转载荷)、孔类零件，设计者往往将变截面处的圆角半径取值过小，就属这类设计缺点。这种设计在零件进行热处理时，往往容易引起该处有很大残余应力，同时在服役过程中引起应力集中。重新设计就可以避免失效。

例 1-1 不合理的尖角设计引起失效问题

重载轴承滚柱如图 1-1 所示。材料采用 G20Cr2Ni4A，进行深层渗碳 + 淬火 + 回火处理。在滚柱中部有一个圆孔如图中虚线所示。在圆孔靠近表面处有一个台阶，该台阶在原设计时是 90° 直角，导致在滚子使用过程中很容易在此处产生裂纹。后来改进设计将此处设计为圆弧过渡，大幅度降低开裂情况。

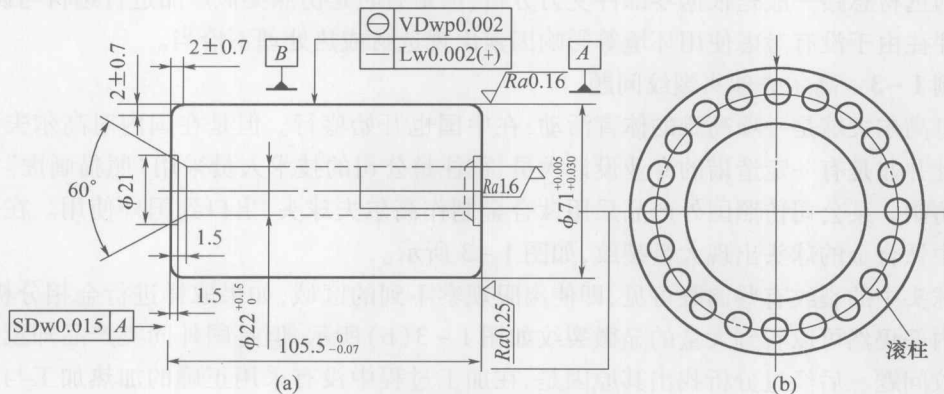


图 1-1 轴承形状图与滚子图

(a) 滚柱加工图；(b) 轴承示意图。

例 1-2 零部件服役条件判断有误，导致设计依据不符合实际情况

标准件(即俗称螺栓)是最常见的零部件，在各类机械中大量使用。对于标准件的设

计,一些设计者的思路是依据标准件承受的拉应力进行设计,即以材料的强度指标作为设计依据。图 1-2 是某典型设备上使用的直径 30mm 螺栓断裂的断口宏观照片与金相组织照片。

据了解设计人员的出发点是保证螺栓有高的强度,依据材料的强度指标进行设计。选择材料 GCr15 进行加工(并没有选择合适的热处理)。从图 1-2(a)可见实际服役条件下螺栓的断裂属于疲劳断裂(如何判断见 3-1 节),由于设计思想有误,导致螺栓早期断裂。对于螺栓的设计,许多情况下设计者往往选用高强螺栓。但是在螺栓受到疲劳载荷作用情况下,并没有达到设计要求。

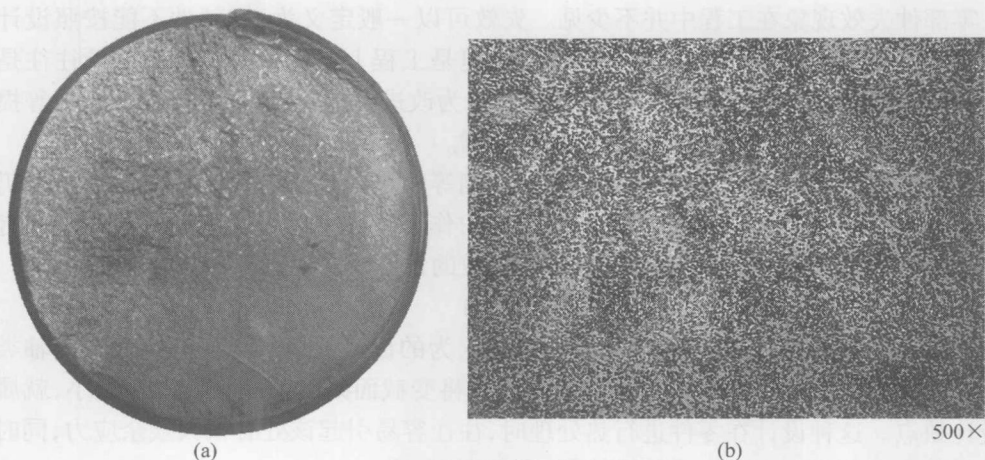


图 1-2 螺栓疲劳断口照片
(a) 断口宏观照片;(b) 螺栓金相组织照片。

2. 设计中选材或热处理选择不当

这类问题实际也可以归类为设计问题。对于零部件进行设计时必须进行选材,设计人员的选材思路一般是根据零部件受力分析,但是有时是仿照类似产品进行选材与设计,这时往往由于没有考虑使用环境等影响因素出现选材或热处理不恰当。

例 1-3 高尔夫球头裂纹问题

打高尔夫球是一项高雅的体育活动,在中国也开始盛行。但是在国内对高尔夫球头的设计并非是有一定造诣的专业设计人员,往往是公司的技术人员采用“照猫画虎”方式进行仿制。某公司仿照国外产品采用钛合金制作高尔夫球头,出口到国外使用。在使用过程中钛合金的球头出现大量裂纹,如图 1-3 所示。

球头中的裂纹有些肉眼可见,即使肉眼观察不到的区域,如果取样进行金相分析,在组织内部仍然可以看到大量的显微裂纹如图 1-3(b)所示,但是国外同类产品却没有出现裂纹问题。后经过分析找出其原因是,在加工过程中没有采用正确的加热加工与热处理工艺。

众所周知中碳钢(尤其是 45 钢)与中碳合金钢进行调质处理是机械设计中常用的典型工艺,然而却存在下面不合理的设计案例。

例 1-4 45 钢轴类件的不合理设计问题

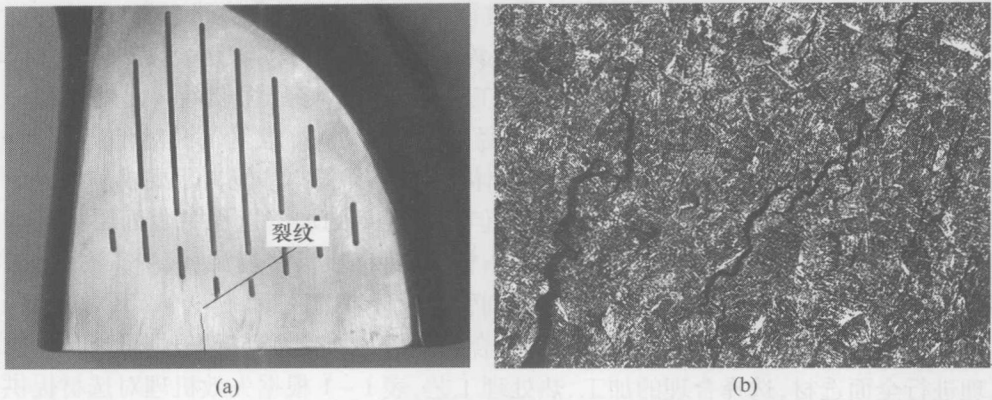


图 1-3 钛合金制作的高尔夫球头使用过程中出现大量裂纹照片
(a) 肉眼可见宏观裂纹; (b) 材料内部出现大量裂纹。

设计一根 45 钢材料轴类零件如图 1-4 所示, 采用下面加工路线:

下料→粗加工→调质处理→精加工→产品

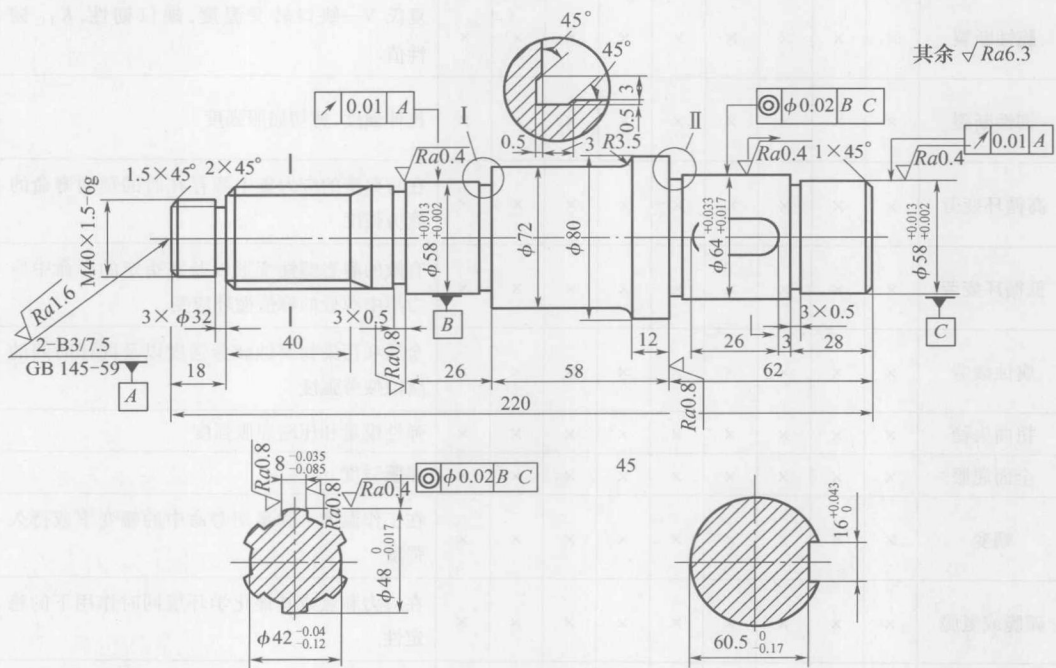


图 1-4 轴类零件设计图纸

设计图纸从机械制图角度看是非常规范的、加工路线也是合理的。由于热处理变形问题,在进行粗加工时,往往留有较大的加工余量,否则难于达到图纸的公差要求。这种设计成为一些设计者轴类件的典型设计图纸。但是从材料学的角度分析,这个设计并不合理,原因就在于没有选用合理的热处理工艺。

众所周知,调质是淬火 + 高温回火两种热处理工艺的总称。此工艺与正火等工艺比较,可以得到更好的强韧性,所以受到设计者重视,在结构件设计中大量采用。

但是为了获得良好的强韧性,首要问题是淬火后的组织必须满足要求(获得马氏体组织)。如果淬火后不能得到要求的组织,该工艺不会有良好的强韧性。此处存在一个淬透性问题。对于一般的 45 钢而言,淬透直径仅 10mm 左右,也就是说对于直径 80mm 的轴,仅表面很薄的一层淬火后能够得到马氏体组织,心部根本不能满足要求。回火后仅表面可能有良好的强韧性,心部不可能获得。但是在随后的加工过程中表面层又被加工掉。所以这种设计不会达到设计者希望性能指标,同时存在浪费能源、浪费工时、增加零部件开裂危险等问题。因此淬透性问题要特别引起设计者的注意。

所以正确的设计应该是,对零部件进行符合实际情况的受力分析,根据可以预测的断裂机理进行全面选材,选择合理的加工、热处理工艺,表 1-1 根据失效机理对选材提供一般性判据,对于正确选择材料与热处理有一定指导意义^[1]。

表 1-1 针对可能的失效机理、载荷类型、应力类型和指定的工作温度进行选材时应用的一般判据

失效机理	载荷类型			应力类型			工作温度			选材的通用判据
	静态	重复	冲击	拉伸	压缩	剪切	低温	室温	高温	
脆性断裂	×	×	×	×	×	×	×	×	×	夏氏 V-缺口转变温度, 缺口韧性, K_{Ic} 韧性值
韧性断裂	×	×	×	×	×	×	×	×	×	拉伸强度, 剪切屈服强度
高循环疲劳	×	×	×	×	×	×	×	×	×	在有典型的应力集中源存在时的预期寿命的疲劳强度
低循环疲劳	×	×	×	×	×	×	×	×	×	有效的静态塑性变形以及在指定的寿命中应力集中源处的峰值循环应变
腐蚀疲劳	×	×	×	×	×	×	×	×	×	金属和污染物腐蚀疲劳强度以及同样时间的腐蚀疲劳强度
扭曲失稳	×	×	×	×	×	×	×	×	×	弹性模量和压缩屈服强度
全面屈服	×	×	×	×	×	×	×	×	×	屈服强度
蠕变	×	×	×	×	×	×	×	×	×	在工作温度下和预期寿命中的蠕变率或持久强度
碱脆或氢脆	×	×	×	×	×	×	×	×	×	在应力和氢或其他化学环境同时作用下的稳定性
应力腐蚀开裂	×	×	×	×	×	×	×	×	×	残余或附加应力, 对介质的腐蚀抗力, K_{Ic} 值

1. 摘自“实验力学”1970. 1. P. 1 - 14, T. J. Dolan 的文章。
2. 仅适用于韧性金属。
3. 几百万周。
4. 与经历的时间密切有关的量

3. 装配中失误

失效有时是由于在装配中失误造成的。这类失效一般都不会在检验中发现,而且装配好的产品初次工作时也不会明显出现问题。这类失效往往与机械组装件的转动部分有关,而且在结构件中,有许多由装配失误引起的失效。例如,在铆钉孔的布局中,由于不太合理,在飞机机翼结构件中引起疲劳失效^[1]。例 1-5 说明由于装配不当引起的断裂问题。

例 1-5 汽车皮带张紧轮开裂问题

汽车皮带张紧轮是汽车中一个必备零部件,由铝合金制造,内部安装一卷簧用于张紧汽车皮带使用。某公司制备的张紧轮在使用过程中,用户反映出现断裂情况,如图 1-5 所示。

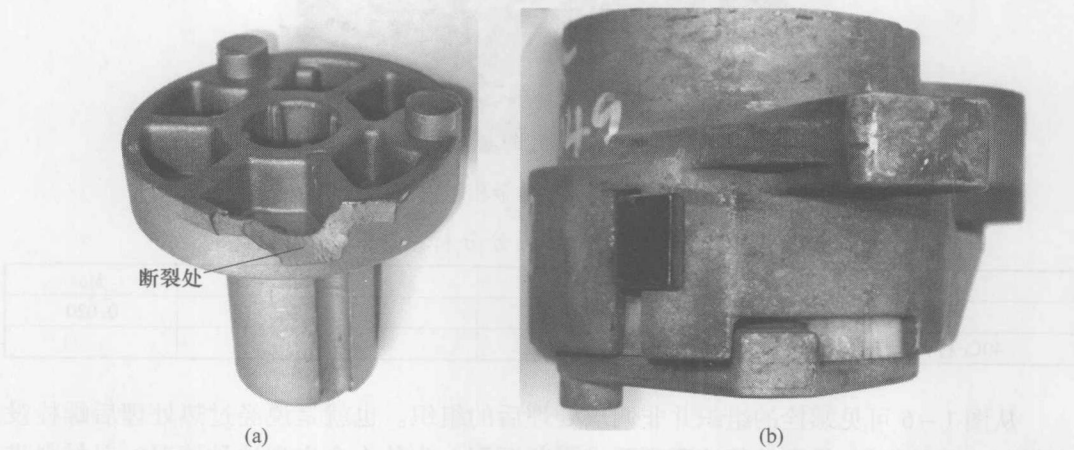


图 1-5 断裂的张紧轮及张紧轮组装后照片

(a) 断裂的张紧轮;(b) 张紧轮组装后照片。

用户怀疑是材料出问题造成断裂。根据裂纹形貌分析、受力分析、断裂现象的宏观分析最后断定,断裂是因为在安装卷簧过程中受到不应有的敲击,在铝合金张紧轮内部产生裂纹,导致使用过程中断裂,与材料本身无关。

4. 不合理的服役条件

不合理的服役条件有两种情况:一种情况是设备在服役过程中受到超过设计要求的载荷作用,或者材料内部存在残余应力没有引起设计者注意,再累加上服役应力造成失效。常见的是一些机动车辆的超载运行引起的事故。另一种情况是在设计时没有考虑到实际工况的某些恶劣环境的影响。例如很多零部件受到交变载荷作用,设计者将材料的抗疲劳性能作为设计主要依据。疲劳裂纹源一般在表面位置,如果实际工况条件下存在腐蚀介质与表面发生作用,将加速裂纹的形成。由于设计者没有考虑到腐蚀作用,即使材料有高的疲劳强度仍然发生断裂情况。

5. 材料内部组织不当或缺陷引起失效

例 1-6 铁路道岔用高强螺栓断裂分析

某公司研制 M26 一种特制高强螺栓用于紧固铁路上的道岔。根据公司技术人员介绍,他们设计的该高强螺栓材料选用 40Cr,采用下面的技术路线制造:

下料→粗加工→调质处理→精加工→成品

初期试用共制造了 13 根螺栓安装在某车站附近,进行考核试验。安装后三个月左右,在 13 根螺栓中有一根发生了断裂,剩余的 12 根螺栓没有问题,还在继续使用。公司有些技术人员认为:由于螺扣处加工精度不够,造成应力集中引起断裂。断裂螺栓的金相组织照片如图 1-6 所示。

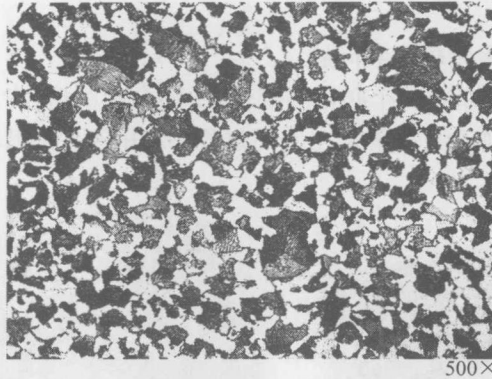


图 1-6 断裂螺栓金相组织照片

表 1-2 螺栓材料化学成分分析结果(质量%)

化学元素	C	Cr	Mo
含量/%	0.55	0.075	0.020
40Cr 材料标准值	0.37~0.45	0.8~0.10	

从图 1-6 可见螺栓的组织并非调质处理后的组织。也就是说经过热处理后螺栓没有得到正确的组织,导致性能达不到要求引起断裂。为什么会出现这种情况?对材料进行化学成分分析结果如表 1-2 所列,可见断裂螺栓并非 40Cr 材料而是类似 50 钢。由于淬透性不够所以淬火时,没能得到正确的组织。

应当说明的是:在实际失效零部件中,由于这种原因引起的失效确实时有发生。再加上进行失效分析的技术人员往往是材料专业毕业的科技人员,所以往往一遇到失效问题,就认为一定是材料内部出问题,从这点出发设计试验方案、寻找失效分析原因,但是如前面所论述,材料内部组织结构原因造成的失效,仅仅是引起失效的一种情况。依据寻找内部组织缺陷的思路进行失效分析,并不是科学的分析思路。表 1-3~表 1-6 统计了造成失效原因的比例^[2]。

表 1-3 在一些工程工业中调查的失效原因的比例

起因	比例/%
材料选择不恰当	38
装配错误	15
错误的热处理	15
机械设计错误	11
未预见的操作条件	8
环境控制不够充分	6
不恰当的或缺少监测与质量控制	5
材料混杂	2

表 1-4 航空零件失效原因的比例(实验室数据)

起因	比例/%
保养不恰当	44
安装错误	17
设计缺陷	16
不正确的维修损坏	10
材料缺陷	7
未定原因	8

表 1-5 在一些工程工业中调查的失效原因的比例

原因	比例/%
腐蚀	29
疲劳	25
脆性断裂	16
过载	11
应力腐蚀/腐蚀疲劳/氢脆	6
蠕变	3
磨损、擦伤、冲刷	3

表 1-6 航空零件失效原因的比例

原因	比例/%
疲劳	61
过载	18
应力腐蚀	8
过度磨损	70
腐蚀	3
高温氧化	2
应力破坏	1

从上述分析及表 1-3 ~ 1-6 可得到下面基本概念:

(1) 失效分析是一个多学科综合性的技术问题,这就决定了对于一些大型复杂设备的失效问题为获得正确结论,必须是多学科的技术人员联合在一起,对失效原因进行全面分析。

(2) 从表 1-3 可见,由于材料、热处理问题引起的失效所占比例高达 55%,所以对于零部件的失效问题往往是具有材料专业学术背景的技术人员进行分析。但是对于材料专业毕业的技术人员一定要牢记,由于材料与热处理问题引起的失效所占比例虽然较高,但绝不是全部。在进行失效分析时必须要考虑其他可能原因、必须掌握其他相关学科必要的基础的知识、必须合理设计试验方案,否则难以获得正确结果。这些交叉学科知识构成的基础就成为对零部件进行失效分析的人员必须掌握的基础知识。基础知识应包括哪些内容?不同学者会有各自观点,本书根据作者的认识在第 2 章进行了归纳。

(3) 对于生产实践中的失效问题大致可以分成零部件的失效与复杂设备的故障。对于这两类不同的失效问题采用的分析方法一般是不同的。对于一般零部件的失效问题往往采用常规实验程序进行,而对于大型复杂设备的故障问题一般要采用系统工程的方法进行分析,其中典型的方法是故障树分析方法。

(4) 断裂问题是人们最关注的失效问题,这是本书的重点分析内容。而根据表 1-3 与 1-4 可知疲劳断裂与腐蚀失效又是失效问题中最引人注意的问题。为突出教学重点,本教材以疲劳断裂分析作为教学重点,以此为突破口培养使初学者掌握失效分析技术的技能。至于腐蚀问题一般有专门的课程进行教学,本书不再做论述。

(5) 对于典型机械零部件服役条件及可能的失效方式见表 1-7^[3]

表 1-7 典型机械零部件服役条件与常见失效方式

零部件类型	服役条件										常见失效方式							材料选择的一般标准 (主要失效抗力指标)			
	负荷种类及速度		应力状态				磨损	温度	介质	振动	过量变形	脆断	表面变化	尺寸变化	疲劳	咬蚀	腐蚀疲劳		蠕变	腐蚀	应力腐蚀
	静	疲劳	冲击	拉	压	弯															
紧固螺栓	△	△		△								△		△	△			△			疲劳、屈服及剪切强度
轴类零件		△	△		△	△				△		△	△	△	△						静强度、弯、扭复合疲劳强度
齿轮		△	△		△	△				△		△	△	△	△						弯曲和接触疲劳、耐磨性;心部屈服强度
螺旋弹簧		△				△				△		△	△	△	△						扭转疲劳、弹性极限、受扭弹簧是弯曲疲劳
板弹簧		△				△				△		△	△	△	△						弯曲疲劳、弹性极限
滑动轴承		△	△		△				△			△	△	△	△						疲劳、耐磨性、耐腐蚀性
滚动轴承		△	△		△				△			△	△	△	△						接触疲劳、耐磨性、耐腐蚀性
曲轴		△	△		△	△			△			△	△	△	△						扭转、弯曲疲劳、耐磨性、循环韧性
连杆		△	△		△							△		△	△						拉压疲劳
活塞销		△	△									△	△	△	△						疲劳强度、耐磨性
连杆螺栓		△	△							△		△		△	△						拉压疲劳、缺口偏斜拉伸强度、剪切和屈服强度
汽轮机叶片		△				△			△			△		△	△						高温弯曲疲劳、蠕变及持久强度、耐腐蚀性、循环韧性

1.2 失效分析的基本方法

上述失效的宏观原因决定了进行失效分析的基本程序。失效分析采用的方法大致分成两大类：一类是常规分析方法（即下面论述的失效分析一般程序），另一类是系统分析方法，其中典型方法是故障树分析方法，分别论述如下。

1.2.1 常规分析方法

生产实际中对于一般零部件的失效分析常按照下面程序进行操作。

1. 现场了解情况、收集背景材料

尽可能详细地了解失效零部件的历史资料。例如零部件设计、使用情况、失效的数量，是第一次设计使用就出现问题还是原来使用没有出现问题仅是本次出现问题？并且尽可能对失效现场情况进行详细拍照。

很多情况下制造方都怀疑由于原材料有冶金缺陷、夹杂物过多等内部质量问题造成零部件失效。这时可以通过了解失效零件的数量来进行初步的判断。如果一批原材料制造的同种零件中，仅少数几件发生破坏，一般可初步判断与原材料冶金质量关系不大。因为如果这批原材料存在严重质量问题（如成分不对、大量冶金缺陷），一般是分布在整批材料中。缺陷仅集中在材料某一个部位的几率并不大，所以应该有很多零件均会受到原材料的影响，造成发生破坏零件的数量就不会太少。

2. 肉眼或放大镜观察详细断裂现象

观察失效零部件的总体形貌并做详细记录。如果是断裂零部件要仔细观察断口、断裂位置、断裂位置上是否有特征（如在台阶部位等）、断裂位置与服役状态下应力的关系等。

例 1-7 断裂位置与材料内部缺陷关系

某大型设备中安装了一批固定零部件的螺栓，在使用过程中发生断裂，一共断裂了 9 件。观察发现螺栓发生断裂的位置基本一致，均在距离螺帽顶端一定距离的部位，如图 1-7 所示。

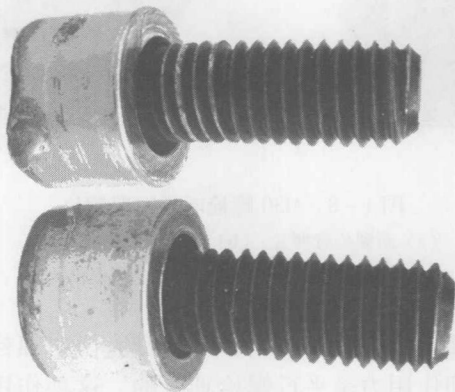


图 1-7 将断裂成两段的两件螺栓断口复原螺栓形状照片（测定断裂位置基本相同）