

普通高等院校材料类“十四五”重点建设教材

# 金属材料零部件失效分析 基础与应用

蒋小松 杨 川 高国庆 崔国栋 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内容简介

失效分析技术属于跨学科技术。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解决工程问题，提高自身学术水平的有效途径。作为一门跨学科技术，也有需要让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，并尽可能详细地介绍给读者。

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作为失效分析课程的教材，也可作为其他专业学生学习或自学失效分析技术的教材或参考书，同时还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作为参考资料使用。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

金属材料零部件失效分析基础与应用 / 蒋小松等编  
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.12  
ISBN 978-7-5643-8265-0

I. ①金… II. ①蒋… III. ①金属材料—零部件—失效分析—高等学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第190290号

---

Jinshu Cailiao Lingbujian Shixiao Fenxi Jichu yu Yingyong

### 金属材料零部件失效分析基础与应用

蒋小松 杨川 高国庆 崔国栋 编著

---

责任编辑 李华宇

封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段111号  
西南交通大学创新大厦21楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都中永印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 20.75

字数 518 千

版次 2021年12月第1版

印次 2021年12月第1次

定价 59.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8265-0

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 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—方面是探明原因，找出改进的措施，避免同类事故再次发生，另一方面是判明责任。

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。熟练掌握金属材料零部件失效分析技术，不但有实际应用价值，而且也能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。作为一本教材自然要大量引用他人的研究成果与各类相关资料，但也应该有一些自身的特点。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，不同的学者一定有不同的见解。在本书的第2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蒋小松、杨川、高国庆、崔国栋编著。第1章、第2章由杨川执笔，第4章由崔国栋执笔，第5章由高国庆执笔，第3章由杨川、崔国栋、高国庆共同执笔；在2013年9月出版的《金属零部件失效分析基础》的基础上，蒋小松对教材整体内容进行了修改，增加了部分实际案例。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。

本书出版得到西南交通大学学科建设基金的资助以及西南交通大学出版社的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书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**

2021年7月

# 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 .....	8
1.2.1 常规分析方法 .....	8
1.2.2 系统分析方法 .....	10
1.3 失效分析的主要目的与值得注意的两种倾向 .....	17
1.4 失效分析的进展 .....	20
1.4.1 失效的定量分析技术 .....	20
1.4.2 新材料的失效分析 .....	20
1.4.3 失效分析专家系统 .....	22
习 题 .....	25
参考文献 .....	26
第 2 章 失效分析基础与基本性能 .....	28
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 .....	28
2.1.1 拉伸试验金属材料应力分布与断裂特征 .....	29
2.1.2 弯曲试验金属材料应力分布与断裂特征 .....	30
2.1.3 扭转过载试验金属材料应力分布与断裂特征 .....	31
2.1.4 剪切过载试验金属材料应力分布与断裂特征 .....	32
2.1.5 冲击试验金属材料断裂过程 .....	33
2.1.6 交变载荷应力分布特点与断裂过程 .....	34
2.1.7 实际零部件疲劳强度影响因素 .....	36
2.2 应力集中与三向应力 .....	38

2.3	残余应力产生原理与分析方法 .....	40
2.3.1	钢在热处理过程中的残余应力 .....	41
2.3.2	经过表面技术处理后残余应力 .....	45
2.3.3	铸造残余应力 .....	52
2.3.4	焊接残余应力 .....	53
2.4	断口宏观形貌分析方法 .....	55
2.4.1	宏观断口分析的目的与意义 .....	55
2.4.2	裂纹源与裂纹扩展方向的确定方法 .....	56
2.4.3	圆柱形与片状样品拉伸过载断裂断口分析 .....	58
2.4.4	圆柱样品扭转过载断裂断口分析 .....	63
2.4.5	弯曲过载断裂断口 .....	64
2.4.6	剪切过载断裂断口 .....	65
2.4.7	冲击过载断裂断口 .....	67
2.5	断口微观形貌分析方法 .....	68
2.5.1	分析目的 .....	68
2.5.2	扫描电镜成像原理与典型用途 .....	69
2.5.3	典型断口微观形貌 .....	71
2.6	断口宏观形貌与断口微观形貌间的关系 .....	78
2.6.1	韧性材料拉伸断裂宏观与微观断口 .....	78
2.6.2	脆性材料拉伸断裂宏观与微观断口（螺旋道钉断裂断口） .....	81
2.6.3	韧性材料扭转断裂宏观与微观断口 .....	81
2.6.4	冲击断裂宏观与微观断口 .....	83
2.6.5	弯曲载荷作用下断裂断口宏观形貌与微观形貌 .....	85
2.6.6	剪切断裂宏观断口形貌与微观断口形貌 .....	86
2.7	金相组织分析方法 .....	87
2.7.1	分析目的 .....	87
2.7.2	阿贝原理 .....	87
2.7.3	利用阿贝原理分析金相组织 .....	89

2.8	实际案例分析 .....	92
2.8.1	案例 1——车辆铆钉非正常拉伸断裂原因分析 .....	92
2.8.2	案例 2——绝缘铁帽半拉力试验断裂原因分析 .....	95
	习 题 .....	107
	参考文献 .....	110
第 3 章	疲劳失效 .....	111
3.1	疲劳断口形成过程与形貌分析 .....	111
3.1.1	疲劳断口形成与断口宏观形貌特征 .....	111
3.1.2	宏观形貌对失效原因提供的信息 .....	113
3.1.3	疲劳断口微观形貌特征及对失效原因提供的信息 .....	116
3.1.4	疲劳断口宏观形貌与微观形貌间的关系 .....	117
3.2	疲劳断口定量分析 .....	125
3.2.1	利用宏观断口进行定量分析 .....	125
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 .....	126
3.3	疲劳图在疲劳失效分析中的应用 .....	133
3.4	利用材料表面技术提高疲劳强度 .....	137
3.5	疲劳断裂实际案例 .....	140
3.5.1	案例 1——柴油机中盘簧断裂原因分析 .....	140
3.5.2	案例 2——柴油机气缸水套失效分析及对策 .....	143
3.5.3	案例 3——E4G15B 排气凸轮轴台架试验 出现裂纹现象的原因分析 .....	148
3.5.4	案例 4——澳车 SDA1-005 主发电机风扇叶片断裂 .....	175

习    题 .....	195
参考文献 .....	198
第 4 章 磨损失效 .....	199
4.1 磨损与摩擦力 .....	199
4.2 磨损机理 .....	201
4.2.1 黏着磨损机理 .....	201
4.2.2 磨粒磨损机理 .....	203
4.2.3 腐蚀磨损 .....	203
4.3 判断磨损机理的方法 .....	208
4.3.1 黏着磨损失效磨损面形貌特征 .....	208
4.3.2 磨粒磨损失效磨损面形貌特征 .....	210
4.3.3 微动磨损磨面的形貌 .....	213
4.4 实际案例——反击式破碎机锤头耐磨性偏低分析 .....	214
习    题 .....	220
参考文献 .....	221
第 5 章 失效案例分析 .....	222
5.1 案例 1——柴油机“机破”事故分析 .....	222
5.2 案例 2——车钩用 E 级钢拉伸样品形成非正常断口的原因分析 .....	229
5.3 案例 3——铁路 II 型弹条制造过程中裂纹分析 .....	237
5.4 案例 4——压力容器罐体表面裂纹分析 .....	241
5.5 案例 5——高速轧钢机用轧辊表面剥落原因分析 .....	253
5.6 案例 6——镀金铍青铜导电弹簧断裂分析 .....	257



5.7	案例 7——深层渗碳轴承柱表面剥落原因分析 .....	263
5.8	案例 8——TDK 空压机机破事故分析 .....	268
5.9	案例 9——K3SH 型减速器轴承座断裂原因分析 .....	282
5.10	案例 10——汽车离合器圆柱压缩螺旋弹簧断裂原因分析 .....	296
	习 题 .....	306
附录 A	应力集中系数图与表 .....	312
附录 B	材料性能数据 .....	320
附录 C	大型构件不同位置疲劳条纹照片 .....	322



# 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：一是确定失效原因，为改进设计、加工过程或改变材料等提供依据；二是为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，大幅降低了开裂情况。

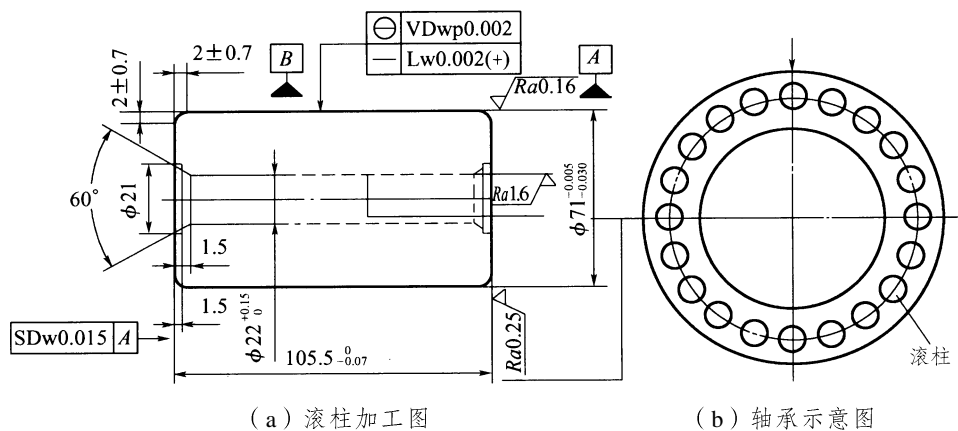


图 1-1 轴承形状图与滚子图

**【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（如螺栓）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为 30 mm 的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。选择了 GCr15 材料进行加工（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。但是在螺栓实际是受到疲劳载荷作用的情况下，并没有达到设计要求。高强度常常有损于工件，使工件出现严重的应力增高区域。

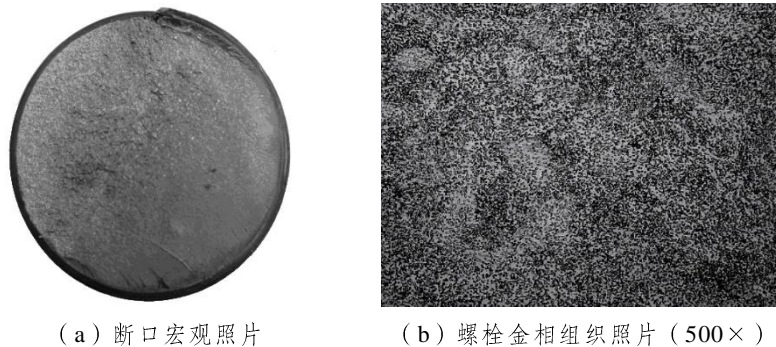


图 1-2 螺栓疲劳断口照片

## 2. 设计中选材或热处理选择不当

这类问题实际上也可以归类为设计问题。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当问题。

**【例 1-3】** 高尔夫球头裂纹问题。

高尔夫球运动是一项具有特色魅力的运动，在我国也开始盛行。某公司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。

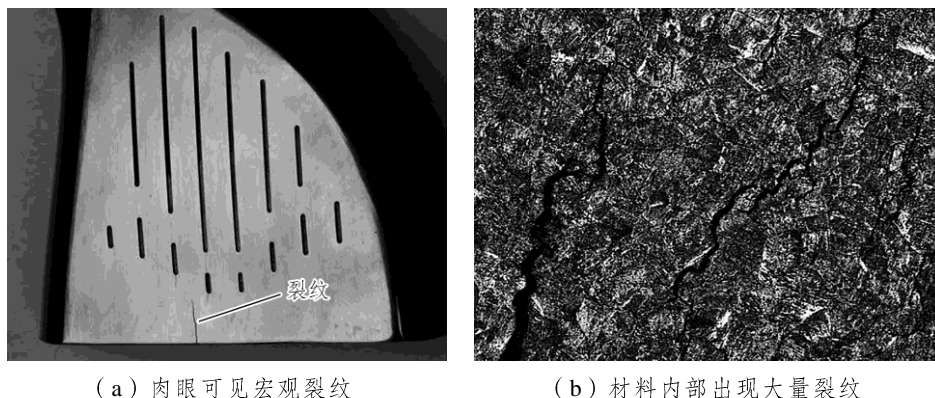


图 1-3 钛合金制作的高尔夫球头使用过程中出现大量裂纹照片

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，见图 1-3 (b)。但是其他公司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，然而却存在以下不合理的设计案例。

**【例 1-4】 45 钢轴类件的不合理设计问题。**

设计一根材料为 45 钢的轴类零件，如图 1-4 所示，采用以下加工路线：

下料→粗加工→调质处理→精加工→产品

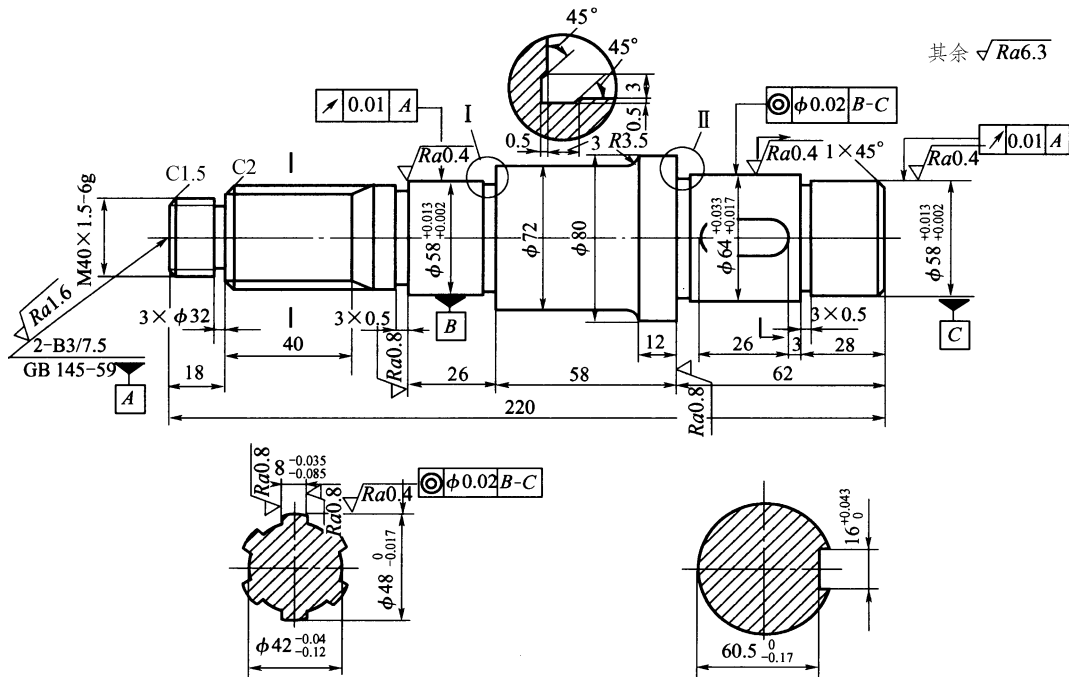


图 1-4 轴类零件设计图纸

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，否则难以达到图纸的公差要求。这种设计成为一些设计者设计轴类件的典型设计图纸。但是从材料学的角度分析，这种设计并不合理。原因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，在结构件设计中被大量采用。

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，淬透直径仅为 10 mm 左右；也就是说对于直径为 80 mm 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的性能指标，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<sup>[1]</sup>。

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性判据

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 形缺口转变温度，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

注：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 与经历的时间密切相关的量。

### 3. 装配中的失误

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出现明显的问题。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<sup>[1]</sup>。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的零部件，由铝合金制造，内部安装一件卷簧，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，用户反映出现了断裂情况，如图 1-5 所示。

用户怀疑是材料问题造成断裂。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。

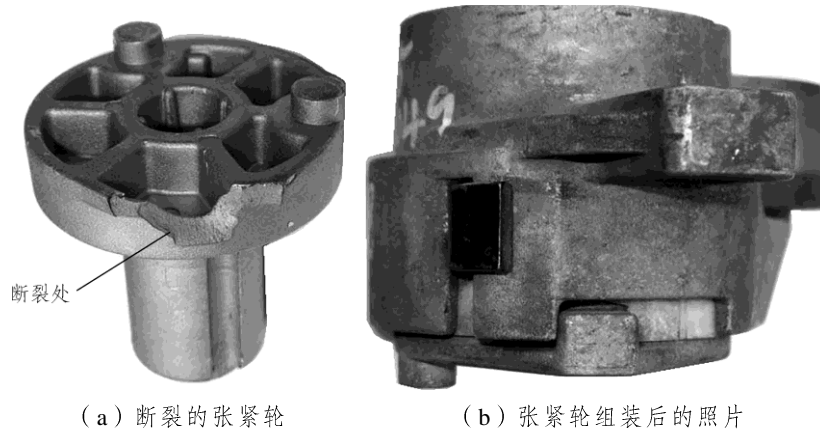


图 1-5 断裂的张紧轮及张紧轮组装后的照片

#### 4. 不合理的服役条件

存在两种情况：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 是关于此方面的案例。

**【例 1-6】** 铁路道岔用高强螺栓断裂分析。

某公司研制一种特制高强螺栓 M26，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，采用以下技术路线制造：

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。过了 3 个月左右，在 13 根螺栓中有 1 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。要求对断裂的螺栓进行分析，说明为什么这根螺栓发生断裂，对断裂螺栓的金相组织进行分析，如图 1-6 所示。

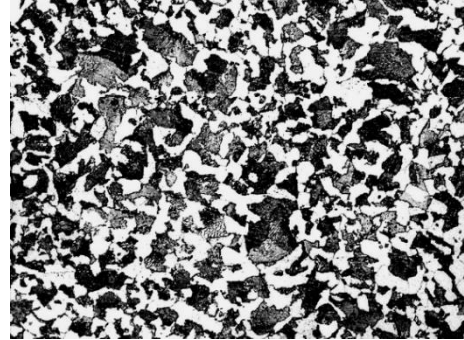


图 1-6 断裂螺栓金相组织

由图 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？对材料技能型分析结果见表 1-2，可见断裂螺栓并非 40Cr 材料而是类似 50 钢。因为淬透性不够，所以淬火时没能得到正确的组织。

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	

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的技术人员，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<sup>[2]</sup>。

表 1-3 在一些工程工业中调查的失效起因的比例 表 1-4 航空零件失效起因的比例（实验室数据）

起 因	比例/%	起 因	比例/%
材料选择不恰当	38	保养不恰当	44
装配错误	15	安装错误	17
错误的热处理	15	设计缺陷	16
机械设计错误	11	不正确的维修损坏	10
未预见的操作条件	8	材料缺陷	7
环境控制不够充分	6	未定原因	8
不恰当的或缺少监测与质量控制	5		
材料混杂	2		

表 1-5 在一些工程工业中调查的失效原因的比例

表 1-6 航空零件失效原因的比例

原 因	比例/%	原 因	比例/%
腐蚀	29	疲劳	61
疲劳	25	过载	18



脆性断裂	16	应力腐蚀	8
过载	11	过度磨损	70
应力腐蚀/腐蚀疲劳/氢脆	6	腐蚀	3
蠕变	3	高温氧化	2
磨损、擦伤、冲刷	3	应力破坏	1

从上述分析及表 1-3 ~ 表 1-6 可得到以下基本概念：

(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) 由表 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知识，必须合理设计试验方案，否则难以获得正确的结果。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呢？不同学者会有各自的观点，本书根据笔者的认识在第 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。根据表 1-3 与表 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，本节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) 典型机械零部件服役条件与常见失效方式见表 1-7<sup>[3]</sup>。

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	塑断	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	扭	切																	接触
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、耐蚀性
滚动轴承		△	△		△						△	△	△	△										△	△	△	△													接触疲劳、耐磨性、耐蚀性
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就决定了进行失效分析的基本程序。进行失效分析，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以下程序进行操作。

#### 1. 现场了解情况并收集背景材料

尽可能地详细了解失效零部件的历史资料，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。

例如，很多情况下制造方都怀疑是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），一般是会分布在整批材料中，缺陷仅集中在材料某一个部位的概率并不大，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. 肉眼或放大镜详细观察断裂现象

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，则要详细观察断口、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的关系。

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。通过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。

根据这个现象初步判断，螺栓的断裂不大可能是材料内部的组织缺陷问题，这是因为不可能每颗螺栓中的材料缺陷均集中在同一个位置上。因此，断裂位置的确认对于分析原因、设计试验方案有重要的启示作用。



图 1-7 将断裂成两段的两颗螺栓断口复原的螺栓形状照片（测定断裂位置基本相同）

### 3. 了解零部件在整个机构中的作用及受力分析

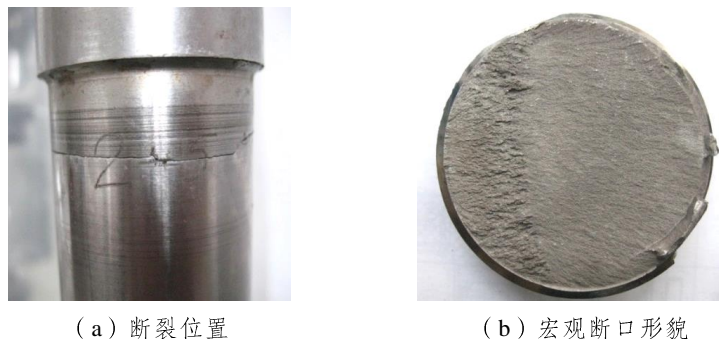
零部件发生失效往往是在力作用下发生的，因此应该尽可能根据零件的形状与服役条件对零部件受力情况进行分析，至少要定性分析。目的是确定零件的受力状态，判断零件是在何种应力作用下失效的。首先需要了解零部件在机构中的作用。如果失效不是在零件受力最大的部位，就有理由怀疑材料的组织可能存在问题，或者在服役过程中受到不应有的外力作用。对于一些大型构件破坏往往需要采用有限元等方法对构件各个部位的受力情况进行定量分析，将各个部位受到的应力值与材料性能指标进行对比分析，从中得到关于零部件失效原因的重要信息。在一些情况下定量分析可以直接获得失效原因，即使不能获得原因，对后面的分析也有直接的指导作用。在很多情况下，可以通过断口宏观分析、断裂位置分析，对零部件的受力情况得到定性概念。

【例 1-8】 根据图 1-7 中断裂螺栓的变形情况进行受力分析。

对于螺栓类标准件而言，一般情况下是按照仅受拉应力进行设计的。但是从图 1-7 可见，将螺栓断口对合后，螺栓发生弯曲变形。所以有理由认为在本案例中螺栓在服役状态下，螺栓除受到拉应力作用，还受到了弯曲载荷。至于弯曲载荷是一次性作用还是交变载荷，还需要作进一步分析。

【例 1-9】 根据断口进行受力分析。

大型设备中 M30 螺栓发生断裂，断裂位置与断口形貌如图 1-8 所示。



(a) 断裂位置

(b) 宏观断口形貌

图 1-8 M30 螺栓断裂情况

由图 1-8 可见，螺栓断裂后并没有发生弯曲变形，说明螺栓在服役状态下受到的拉应力基本是垂直于断口的，即作用力是平行螺栓轴线的。这种作用力是一次性作用力还是交变载荷？从断口上可以得到初步判断。如果是一次性作用力，螺栓断裂应该是拉伸过载断裂，断口具有拉伸过载断裂的特征；如果是交变载荷，则会有疲劳断裂的特征（见第 2 章、第 3 章）。根据宏观断口分析原理，该断口形貌与疲劳断裂断口特征接近，所以初步判断螺栓在服役条件下受到的是疲劳载荷。断口分析仅是初步分析，必须要进一步了解螺栓在设备中的作用与设备运行过程中，螺栓可能受到的各类应力。这就需要设计人员密切配合进行深入分析。

由上述例子可见，断裂现象宏观分析、断口宏观形貌分析对于失效原因的判断，具有不可替代的重要作用，在失效分析时务必充分注意。这些分析技能应该是失效分析的基本技能。

#### 4. 材料化学成分分析

目的是：在认定选材合理的前提下，判断实际材料成分与标准要求的成分是否吻合。一般来说，如果原材料化学成分不符合技术要求，往往认为是失效的主要原因，供货商要承担责任。

#### 5. 对失效的零部件进行性能测定

目的是：与要求的性能指标进行对照，判断是否达到设计要求。在可能的情况下应尽量在出现问题的部位附近截取样品（如断口附近、裂纹附近等）。问题是选择何种性能进行测试？测试的依据是什么？主要根据断裂机制进行确定。如果判断其断裂属于脆性断裂，一般要测定零部件的冲击性能，判断是否由于材料韧性低造成断裂？如果判断其断裂属于疲劳断裂，就需要测定零部件的疲劳性能。

#### 6. 金相组织分析

目的是：判断是否与要求的组织吻合，有时要配合扫描电镜甚至透射电镜进行分析。这一步是非常关键的一步，也往往是最难的一步，许多初学者由于没有掌握正确的分析方法及经验不足，很难对金相组织进行正确的判断。金相组织分析属于失效分析必备的基础知识，在第 2 章中将专门介绍。

#### 7. 断口微观形貌分析与组织的电镜分析

采用扫描电镜对断口进行分析，目的是根据断口上显示的微观形貌，进一步明确断裂的机理。有时采用光学显微镜难以确定材料内部微观组织，此时可以采用扫描电镜甚至透射电镜对材料微观组织进行分析。

#### 8. 在模拟条件下进行失效模拟实验

目的是：对失效原因及断裂机理进行验证。在一般失效分析中不会进行。

在制定试验方案时务必明确每一步的目的，应该说明的是生产实践中很多失效分析并不是均要完整地进行上述全部步骤，有些情况下仅做其中的几个步骤就可以判断出失效的原因。但是在一般失效分析中，1、2、3、5 这几个步骤往往是必须要做的。

### 1.2.2 系统分析方法

一些复杂设备系统发生失效，其失效因素一定会非常多，根据系统工程的原理，将系统分析方法应用于失效分析，其中最典型的方法是故障树分析法，又称为 FTA<sup>[4-5]</sup>。该方法的特点是：通过对造成系统失效的各类因素进行分析，画出框图，从而确定系统失效原因的各种可能的组合或发生概率的。该方法是用特定符号将可能导致失效发生的各种因素，沿着发生经过将这些因素联系起来，用一种树的形式表现出来。从已经发生的故事出发逆着失效发生过程进行分析。该过程与编写计算机程序时首先画出一个框图有类似之处。

众所周知，一个复杂设备投入使用一般会经历以下生产过程：

整体设计（结构设计、力学分析）→零部件设计（形状尺寸设计、材料选择、加工方法与各类热处理选择）→零部件加工（材料购买、热加工、热处理、冷加工等）→零部件组装成设备→投入使用

如果该设备在使用过程中发生失效，则上述各个过程的每一个环节均有可能存在潜在事故发生的原因，因此可沿着与制造过程相反的方向进行分析。故障树建立方法如下：

第一级：顶事件，即失效事故。需根据情况进行定义，实际上是对失效分析的目的进行定位。例如，一个大型设备出现故障，当然可以将此事故定义为顶事件，但是如果确定这起事故的发生主要是某一个部件出现问题，也可以将此部件定义为顶事件，这样分析就简化多了。

第二级：导致顶事件发生的直接原因的故障事件，并且将它们与顶事件间的逻辑关系用符号连接起来。

第三级：导致二级故障发生的直接原因的故障事件，并且将它们与二级事件间的逻辑关系用符号连接起来。

如此继续，一直到底事件为止（一般是追到整体设计）。对于复杂系统，也可以将顶事件下的一级或二级故障树建成几个子故障树进行分析，最后进行综合，这样有时可以使分析简化。

建立故障树时一定会掺杂建树者的观点，对于同一失效问题建立的故障树也会有所不同，因此应该邀请各方面技术人员共同参加讨论。建立故障树的目的是反映出系统故障的内在联系，并且形象地表达出来。建树要注意以下几点：

（1）充分了解设备的使用过程与设计原理（尤其是关键零部件的受力分析），这样才能选准建树的流程。

（2）充分了解故障的宏观现象，这样才能合理确定出顶层事件。

（3）对系统中的逻辑关系及条件必须分析清楚，不能有逻辑混乱与条件矛盾。

（4）故障事件定义要准确。

对于一个复杂的设备出现故障，很多情况下通过宏观分析可以确定出是由于哪些主要零部件出现问题而导致整个系统出现故障，所以归结于一些主要零部件的分析。因此，对于主要零部件的正确建树就显得非常重要。根据 1.1 节中失效可能出现的各类宏观原因，一般可从以下几个方面考虑 FAT 上的分枝建树：

（1）使用过程中的问题：充分了解零部件在服役条件下的受力情况与服役条件，最好是有定量数据，至少要有定量概念。是受到交变载荷还是纯拉、纯扭？是低温下使用还是常温？是否有残余应力的作用？是否有错误操作问题？是否有腐蚀环境没有充分考虑到（如要求在润滑条件下使用，但是实际情况没有加润滑油）？对于这些问题的重要性必须要有充分认识。

（2）结构设计问题：失效主要表现为断裂、过度变形与表面损伤。这些问题的出现均与

零部件在服役过程中受应力有密切关系。因此，要与设计人员配合详细分析该零部件进行设计的依据，是否进行过详细的受力分析计算？这种计算是否合理、全面？在设计时除考虑零部件在服役条件下的应力外，是否考虑加工过程中的残余应力、装配应力等。同时对零部件的形状改变引起的应力集中也要充分考虑。

(3) 选材、加工工艺及材质存在的问题：主要考虑选材是否合理？材料的性能及尺寸等能否满足设计要求？在加工过程中是否会引起材质变化？材料最终的组织结构是否达到要求？

(4) 装配上存在问题：在装配过程中是否引起额外应力？是否损伤工件等。

在上述资料尽可能充分的条件下，需要认真分析重点研究哪个分支。建立故障树所用符号见表 1-8。

表 1-8 故障树中所用符号及其含义

序号	符号	名称	说明
1		要说明的故障 (顶事件)	最终要说明的故障
2		基本事件 (底事件)	发生故障的根本原因，即可以单独获得发生故障的概率的基本现象(底事件)。有时用虚线，表示人为错误引起的底事件
3		故障现象 (故障事件)	由底事件到顶事件中间的故障现象(事件)。其上、下应与逻辑门连接

续表

序号	符号	名称	说明
4		“与”门	输入现象 A、B、C 同时存在时，输入现象 D 才必然出现的逻辑乘法
5		“或”门	输入现象 A、B 中，无论哪一个存在时，输出现象 C 均能出现的逻辑加法
6		“禁”门	表示只有因素 B 存在时，A 现象的输入才能导致 C 的输出
7		优先与门	输入事件中某一事件要优先输入，输出事件才能发生，图例中 B 要优先输入。 $B \cap A$ 或 C, D
8		相依与门	输入事件 A、B 互相依存，A 输入时 B 必然发生，则顶事件就发生，称之相依与门
9		不发展事件	不再发展的事件

下面用案例说明 FTA 图的建立思路与过程。

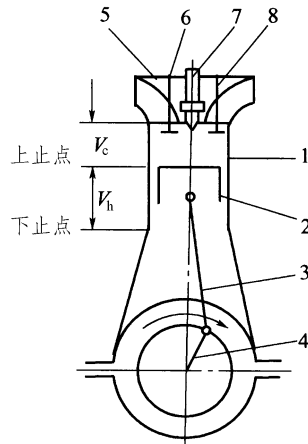
【例 1-10】 建立柴油机“机破”事故分析的 FTA 图。

某机务段配属的 DF<sub>4</sub> 型内燃机车，经过大修后仅运行 8 万千米就在运行期间发生“机破”事故。此事故涉及铁路安全运行问题，有关部门提出必须要进行认真分析，其目的是探明事

故发生的具体原因，杜绝今后出现类似事故。同时也要明确事故的责任主体单位。

要建立 FTA 图，首先需要组成一个分析团队，包括柴油机专业教师、材料专业教师、柴油机制造设计师、柴油机大维修厂工程师、提供各类配件的企业的工程师。为了进行失效分析，第一步要了解柴油机的工作原理。

如图 1-9 所示的柴油机为四冲程柴油机，共 16 缸，采用废气涡轮增压。其基本工作原理与一般的柴油机类同。



1—气缸；2—活塞；3—连杆；4—曲轴；5—气缸头；6—进气门；7—喷油嘴；8—排气门。

图 1-9 柴油机结构

工作时将空气和燃油分别按一定的规律定时、定量地输入气缸，在气缸内进行压缩，达到一定的温度与压力后，由一定比例组成的空气与燃油混合物自行燃烧，产生高温与高压的燃气，然后利用燃气的膨胀推动活塞上下运动实现对外做功。活塞通过连杆与曲轴连接，通过曲柄连杆机构转动曲轴，将活塞的上下运动转换成曲轴的圆周运动，实现机车运行。如图 1-9 所示，在气缸盖上设有进、排气门与喷油器。进、排气门由配气结构控制，喷油器由供油装置控制。燃烧后的气体必须及时通过排气门排出，然后将新鲜的空气和燃油送入气缸进行下一次的燃烧、做功。可见要使柴油机连续工作，必须在气缸内不断重复实现进气、压缩、燃烧、膨胀四个工作过程，构成一个整体的工作循环。

活塞在气缸中运动有两个极限位置，处于离曲轴中心最大距离的位置称为上止点；处于离曲轴中心最小的位置称为下止点。活塞由一个止点位置运动到另一个止点位置间的距离称为活塞行程（也称为冲程）。

为了提高柴油机功率，采用废气涡轮增压装置，将气缸内膨胀终了排除气缸的燃气送入涡轮增压器中，在涡轮内再进行膨胀做功，驱动压气机工作，将进入气缸前的空气预先进行压塑，从而使单位体积内空气的质量增加，再通过空气中间冷却器对压缩空气进行冷却，进一步提高空气的密度，然后再输入气缸。这样便增加了每次循环进入气缸空气的量，在相同的气缸体积下可以多喷入燃油，提高了柴油机的功率。

值得提出的是，柴油机零部件中有两组螺栓非常关键，一组螺栓是连杆螺栓，它承受活塞连杆组往复运动的惯性力、连杆运动产生的离心力。它是柴油机受力最严重的关键部件之一，对材料、热处理、机加工、预紧力均有严格要求。如果它出现断裂势必造成柴油机“机

破”的发生。另一组螺栓是活塞下穿螺栓。为了减轻重量，活塞采用铝合金制造。由于与燃气接触的活塞顶部处于高温，铝合金材料难以在高温条件下工作。为了保证高温下活塞能正常工作，活塞顶部采用钢制造，称为钢顶，下部铝合金活塞称为铝裙，钢顶与铝裙用四件螺栓按照要求的预紧力连接。可见如果这组螺栓出问题，必造成分离，出现“机破”事故。

第二步是要详细了解事故的情况。团队成员共同到现场了解详细状况，拍摄各种照片，获得的观察结果如下：

(1) 活塞下穿 4 颗连接螺栓均折断，见图 1-10 (a)。其中 2 颗螺栓 (编号为 DJ96093888、DJ9609311) 断口齐平，另一颗编号为 DJ96093 的螺栓弯曲变形，头部有明显挤伤痕迹。编号为 DJ96093888 的螺栓断口边缘能看到因高温受热产生的蓝色痕迹，见图 1-10 (b)。图中发生弯曲的下穿螺栓显然只有受到横向力作用才会发生弯曲。所以在 4 颗活塞下穿螺栓中，发生弯曲的 2 颗螺栓应该是后发生断裂的。而 2 颗没有弯曲、断口平齐的下穿螺栓应该是先发生断裂的。

(2) 两颗连杆螺栓均断裂，其中 CS96.03-119-1 螺栓断口较平齐，而 CS96.03-11-2 螺栓有明显颈缩现象，见图 1-10 (c)。显然发生明显颈缩现象的连杆螺栓应该是后断裂的，而断口平齐的连杆螺栓是先发生断裂的。

(3) 连杆弯曲严重，弯曲方向与连杆运动平面垂直，在弯曲处有明显受挤压变形后留下的痕迹，边缘已变成蓝色，见图 1-10 (d)、(e)。

(4) 活塞顶裙分离，裙部碎成多块，其中两块较大，上面分布着 4 个螺栓孔及定位销孔。4 个螺栓孔内基本保持圆形，在孔内上部可看到螺纹，见图 1-10 (f)。钢顶发生严重变形，有明显受挤压痕迹，且冷却腔表面已变成蓝色，见图 1-10 (g)。钢顶侧面有受摩擦而留下痕迹，见图 1-10 (i)。钢顶内残留下的 4 颗断裂螺栓中，有 3 颗 (平齐剪切断口) 用手拨动可使其转动。

(5) 活塞裙碎片上可发现距活塞销挡环槽约 4.5 mm 与 13.5 mm 处有两道较深的磨痕。

(6) 活塞销端部有明显碰伤痕迹，外圆表面凸棱有手感但没有发现表面有烧伤变色痕迹。



(a) 断裂的 4 颗活塞下穿螺栓 (b) DJ96093888 活塞下穿螺栓断口 (c) 断裂的连杆螺栓





(d) 连杆挤弯



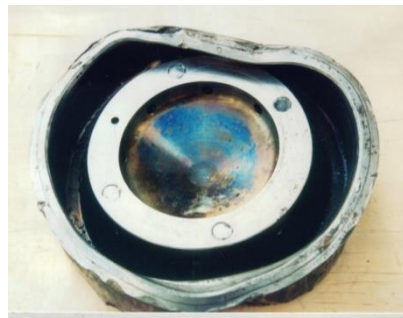
(e) 连杆受挤磨痕



(f) 铝裙螺栓孔内螺纹



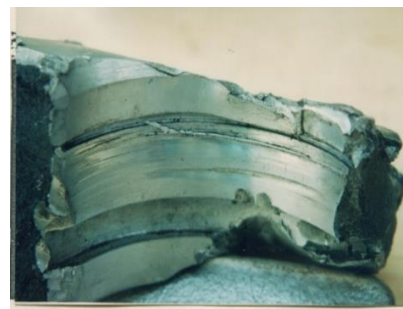
(g) 铝裙全部破碎



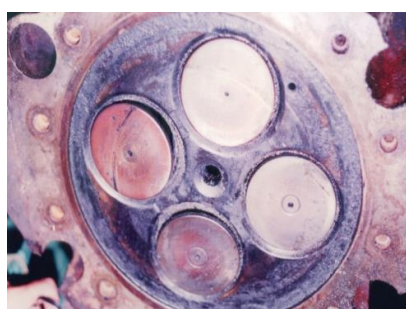
(h) 钢顶冷却腔表面变成蓝色



(i) 钢顶一侧的边缘受摩擦留下痕迹



(j) 铝裙上留下的磨痕照片



(k) 缸盖破损宏观照片

图 1-10 柴油机破损典型零部件照片

(7) 曲轴弯曲严重，最大径向跳动可达 0.48 mm，轴颈磨损最严重处出现凸棱，且小了 0.2 mm。连杆轴颈未贴附减摩合金和烧损变色。

(8) 缸盖受到严重撞击, 见图 1-10 (k), 两个排气门对应于避伐坑内边缘处有明显碰撞痕迹。两个排气门比两个进气门扭曲严重。

在上述工作的基础上, 建立 FTA 图, 如图 1-11 所示。

(1) 顶事件是柴油机“机破”, 它可能与设计、选材、使用、装配等四个第二级事件有关, 用“或”门与顶事件相连。团队人员一致认为, 此次“机破”事故与设计、使用过程无关, 依据是: 这种类型柴油机数以千计使用多年均无问题, 说明设计不会导致事故。此类机车自动化程度较高, 操作均是按照规程进行, 即使有误操作也不会导致“机破”。因此, 将设计与操作定为“不发展事件”。

(2) 在第二级事件“零部件断裂”中, 团队人员一致认为, 如果出问题只能在柴油机的“运动件”上, 其中包括活塞组、连杆组、曲轴及其附件、半刚性联轴器、减振器等。其中曲轴及其附件、半刚性联轴器、减振器与本次事故无关, 所以与“零部件断裂”有关的第三级事件包括连杆断裂、铝裙断裂、连杆螺栓断裂、活塞下穿螺栓断裂等四种零部件。

(3) 在第二级事件“装配失误”中, 团队通过讨论认为, 引起事故的三级事件中最常见的是未实现正确安装, 如应该安装的部件没有装配上、产生了额外的装配应力及零部件高温工作等。在是否正确装配上, 大修厂工程师提出: 他们实现了正确装配。依据是: 如果出现应该安装的部件没有安装上, 在厂内试车过程中就会发现, 机车也不可能运行 8 万千米。团队大多数人同意此意见, 所以为不发展事件。三级事件中出现“零部件高温工作”是因为在宏观分析中发现缸顶与下穿螺栓表面有发蓝现象。

(4) 在定义四级事件之前首先要进行断口分析。例如如何确定与三级事件中“连杆螺栓断裂”相关的四级事件。对断口分析后发现两颗断裂的连杆螺栓断口不同, 一颗螺栓是疲劳断口, 另一颗螺栓是一次拉伸过载断口。显然是发生疲劳断裂后, 才引起拉伸断裂。所以将一次拉伸过载断口定义为不发展事件, 仅沿疲劳断裂分枝向下分析。对“活塞下穿螺栓断裂”采用同样方法建立分枝。

(5) 在定义铝裙断裂的四级事件前, 首先要对断口与断裂现象进行分析。铝裙断裂成多个碎块, 从各个碎块的断口上看不到疲劳破坏的形貌, 所以认为不是先产生疲劳裂纹再破碎的, 故将疲劳断裂定义为不可发展事件。铝裙破碎一种可能是由于活塞运动已经超过其极限位置, 与气缸盖发生碰撞后击碎。发生这种情况的可能性较大。另有一种可能是因为材料本身韧性极低, 在服役条件下脆断。后者虽然可能性小, 但是也作为事件进一步分析。

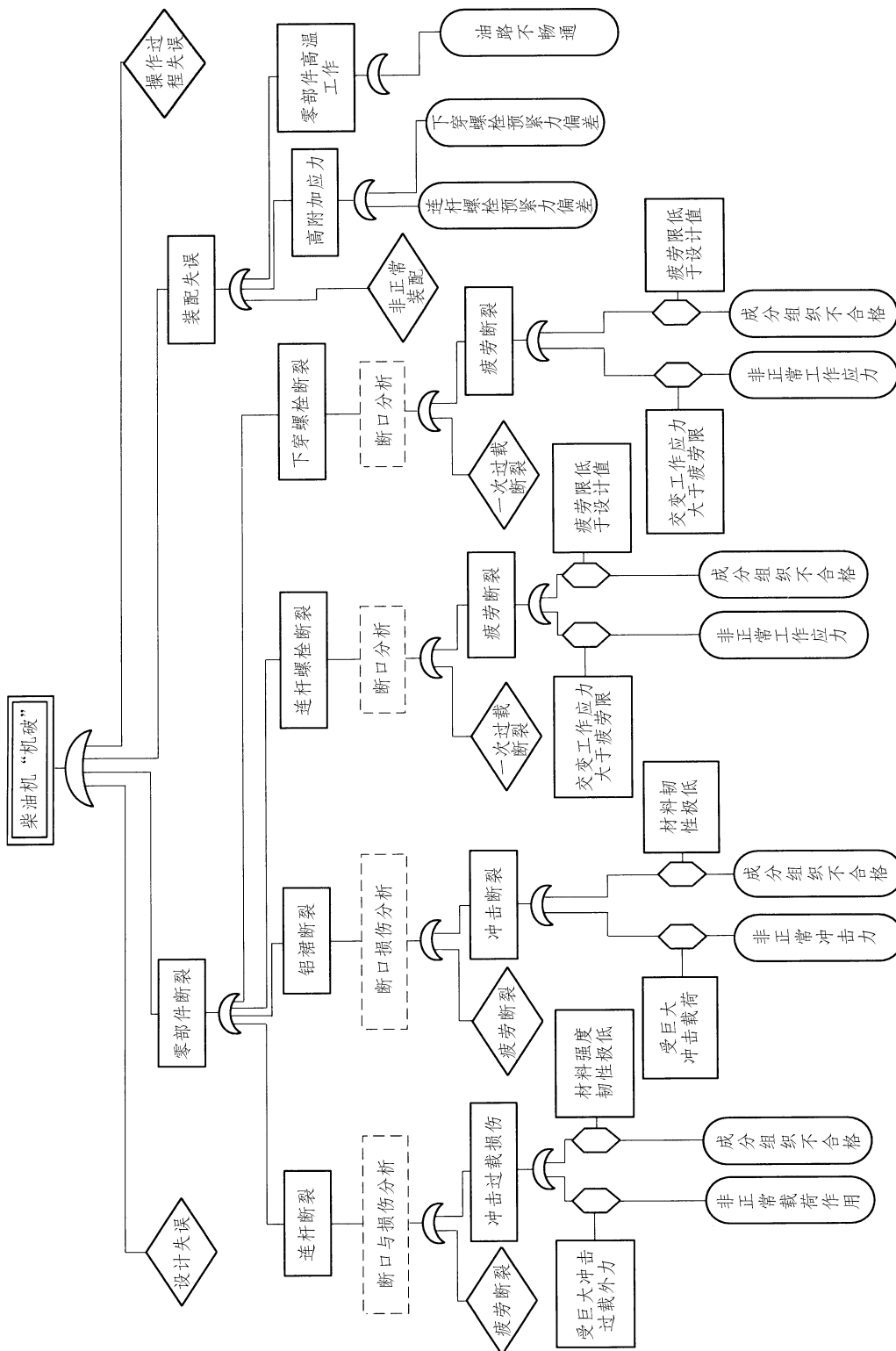


图 1-11 柴油机“机破”事故分析的 FTA 图

(6) 从 FTA 图可见, 从“连杆螺栓断裂”分枝分析与“下穿螺栓断裂”分枝分析各自可找到“机破”原因, 它们均与非正常的高应力相关。因此, 要进一步分析下面两个问题:

- ① 连杆螺栓与活塞下穿螺栓哪一组先产生疲劳裂纹。
- ② 非正常高应力的来源。

在上述 FTA 指导下进行试验与分析, 具体案例分析结果见 5.1 节。

大型设备的破损一般是首先从某些零部件破损开始, 所以寻找出首先出问题的零部件非常重要。利用零部件的断口分析及宏观损伤现象分析获得的结论, 可以大幅度简化 FTA 的分支。所以对大型设备的破损建立 FTA 时应该尽可能与断口分析、宏观损伤现象分析紧密结合。常用的方法是首先从断口判断哪些零部件属于疲劳断裂, 再寻找到与这些零部件发生联系的其他零部件, 这些零部件往往是重点分析的对象, 这样就可以简化 FTA 的分支。这表明常规分析方法的熟练应用与基本技能的掌握, 是进行失效分析工作最关键的基础。如果不具备断口分析、宏观断裂现象分析的基本技能, 则无法简化 FTA 的分支。

根据例 1-10 可见, 构建故障树时是“由上而下分布”的, 在故障树建立中掌握: “下面事件”是“上面事件”的原因。因果关系不能混淆。同时可以看到:

在构建故障树时根据失效分析的目的, 对基本事件的定义也会有所不同。如例 1-10 中将“油路不畅通”“下穿螺栓预紧力偏差”“连接螺栓预紧力偏差”等均作为本次“机破”事故的基本事件。这是因为事故分析团队认为追溯到此即可达到分析目的。当然也可以继续追溯, 例如什么原因引起“油路不畅通”等, 如果这样追溯, 该事件就不是基本事件了。

### 1.3 失效分析的主要目的与值得注意的两种倾向

失效分析课程往往是为材料专业学生开设的, 对于材料专业的学生, 在初次接触到失效分析课题时, 往往存在一种错误认识, 认为失效分析目的就是找出材料内部的组织缺陷。实际在很多情况下这并非失效分析的主要目的。失效分析的主要目的可归纳为以下几点:

(1) 判断零部件失效机理, 包括断裂机理(韧性断裂、疲劳断裂等)、磨损失效、变形机理等, 为避免发生类似事故奠定最重要的基础。

(2) 在明确失效机理的基础上, 判断引起失效的应力方向和应力类型。最好是能够定量分析出其应力值, 这点是非常关键的分析目的。只有在清楚了解引起失效的各类应力(服役应力、附加应力及残余应力等)情况下才有可能提出正确的改进措施。

(3) 对比制备零部件材料的力学性能与引起失效的应力值, 判断失效原因。

(4) 分析是否因为材料内部存在组织结构缺陷, 降低了材料应具备的性能导致失效。

值得提出的是, 虽然材料内部组织缺陷是引起零部件失效的原因, 但是并非唯一的原因, 在很多情况下, 发生失效的零部件材料内部的组织结构是满足设计要求的。

为达到上述目的, 就必须正确设计试验方案。对于初步涉及失效分析领域的材料专业毕业生而言, 在设计试验方案时存在两种不正确的倾向:

第一种倾向是: 在选用失效分析方法时, 存在的轻视宏观分析与金相分析倾向。对任何失效问题均采用 SEM、TEM 等手段进行分析。实际上宏观分析在失效分析中起到不可替代的作用。很多情况下, 只需要采用宏观分析方法配合用光学显微镜分析显微组织就能够得到正确结论。同时宏观分析是微观分析的基础, 在实际工作中必须引起足够的重视。

第二种倾向是：材料专业的技术人员因为牢记“材料的组织结构决定性能”基本概念，在进行材料失效分析工作时，往往仅从找到材料本身的缺陷入手，总是希望从材料上找出缺陷，发现一些材料方面不正常现象，如夹杂物过多、材料化学成分不合格、金相组织不合格、存在冶金缺陷等问题，据此得出零部件失效的结论。

例如：众所周知，材料内部的夹杂物会严重降低疲劳性能。因此，对于发生疲劳断裂的部件，就应集中精力分析夹杂物。一旦发现夹杂物超过标准，就认为零件的疲劳断裂是夹杂物造成的。实际上即使材料内部夹杂物超过标准要求，如果在断口尤其是裂纹源处，没有观察到夹杂物的存在，就不能说是因为夹杂物引起的疲劳断裂。

实践表明：依据寻找材料内部非正常组织结构的思路设计实验方案、分析失效原因，在很多情况下难以获得零部件失效的真正原因。

一个零部件发生失效（开裂、变形与断裂等），一定是在服役过程中在一定外加应力（包括服役应力、残余应力、附加应力、摩擦力等）作用下出现的。出现零部件失效的基本规律是：材料所受到的应力超过材料本身的强度极限（包括疲劳强度、抗拉强度、屈服强度、断裂韧性等）而发生的。这个思路是设计零部件失效分析方案的基本出发点，必须将力学分析与材料组织结构分析耦合在一起设计失效分析试验方案。

根据上述思路，在进行失效分析工作时必须注意以下几点：

（1）首先要详细分析零部件的受力状态，最好定量分析，至少是定性分析（包括残余应力状态）。尤其注意服役状态的应力方向与失效工件间的关系，如裂纹是否沿最大应力方向扩展等。

（2）分析在服役过程中哪些因素可能造成受力状态的不正常，而产生非正常的应力。

（3）分析零部件在加工过程中，哪些工艺会产生较大的应力（如锻造应力、淬火应力等）及残余应力状态。尤其注意分析残余应力与失效工件间的关系。

（4）在上面基础上再进行材料成分、组织结构等分析。

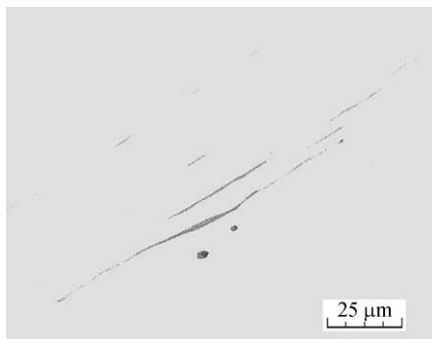
为说明此问题举例如下：

**【例 1-11】 钢脚件裂纹分析。**

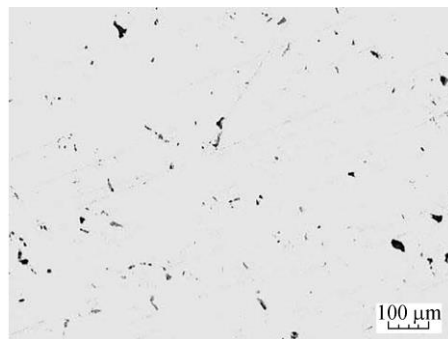
钢脚件是电力系统用来架设电线的一个部件，材料采用 45 钢制作，热处理工艺如下：

锻造→正火→淬火→回火

在一次生产中发现钢脚件中出现裂纹，需要分析原因。分析人员开始希望从材料缺陷角度寻找原因，分析了材料中的夹杂物，如图 1-12 所示。



(a) 硫化物夹杂



(b) 硫化物+氧化物+硅酸盐+铝化物夹杂

图 1-12 钢脚件中的夹杂物

在材料中确实发现存在较多夹杂物，已经超过标准要求。开始认为是由于夹杂物问题引起淬火时裂纹。根据这个结果厂方采用夹杂物少的 45 钢制作钢脚件，同样发生裂纹。后改变分析思路，首先详细观察裂纹形貌，如图 1-13 所示。

由图 1-13 可见，裂纹源处于工件的次表面。结合工件的生产工艺分析应力从何而来？从生产工艺可见裂纹产生只有可能出现在锻造与淬火过程。由于裂纹两侧没有脱碳层与夹杂物，说明是在淬火过程中由于淬火应力过大造成开裂。淬火时由组织应力与热应力构成合成应力，裂纹源处于次表层，说明合成应力最大值处于次表层。根据试验结果分析思路改变为集中精力分析：为什么淬火时会产生超常规的合成应力？

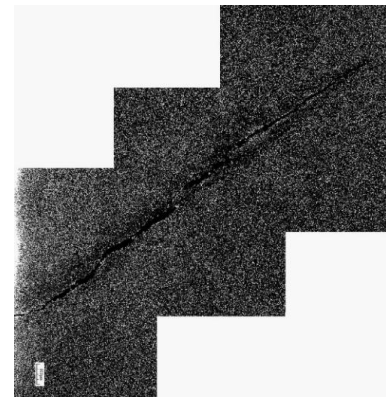


图 1-13 钢脚件裂纹形貌照片

详细了解淬火工艺后发现：厂方淬火时采用箱式炉加热淬火，为提高工效，淬火保温时间较短，造成心部没有完全奥氏体化就淬火，减少组织应力作用，使合成应力最大值处于次表面，同时应力值超过材料强度极限断裂。因此，建议厂方延长保温时间，问题便可得到解决。最后将上述分析方法进行总结，见表 1-9。

表 1-9 常用的材料分析方法与采用目的

分析方法的名称	分析方法的功	采用该方法的目的	在使用中要求掌握的能力	在失效分析中使用的频率
材料宏观冶金质量与成分分析	检查材料的冶金质量与化学成分	判断是否达到要求的质量	样品制备技术，腐蚀液的选择，标准图谱对比	较高
断裂现象宏观分析	分析断裂位置、裂纹形貌、断口宏观形貌等	判断裂纹源位置、断裂性质，为进一步深入分析奠定基础	宏观断口分析技能	很高
金相显微镜 (OM)	观察材料的显微组织形貌	判断是否达到标准要求，判断裂纹的走向，判断处理工艺	制备样品的能力及组织分辨能力	很高
扫描电子显微镜 (SEM)	观察破断零件的断口；配合能谱装置，分析断口上成分，观察组织	判断断裂机理；进一步分析微观组织	各类典型断口形貌；各类微观组织的特征	较高
透射电子显微镜 (TEM)	观察微观区域的组织与结构	判断微区的组织与结构对零件失效的影响	熟悉原理；会进行结构的标定	一般
力学性能测定	测定零件的各类机械性能	判断失效零件的性能是否满足标准要求	明确所测定性能指标的物理意义	很高
外载荷定性分析	确定应力类型及最大应力的部位与应力方向	分析断裂位置与最大应力、应力类型的关系，为断裂机理分析提供依据	掌握材料力学一般知识	很高
加工过程中应力分析	确定最大应力发生的部位及方向	分析应力方向与裂纹断口的关系	掌握应力产生原理	很高
有限元方法	定量计算关键部位的应力及变形数值	判断零件工作状态下应力具体值及对失效的影响	熟悉有限元理论，会使用大型软件	应该很高，但是目前很少

## 1.4 失效分析的进展

### 1.4.1 失效的定量分析技术

目前对于零部件的失效分析，主要依靠材料学、力学、断口学等基础知识，结合裂纹分析、金相组织分析、残余应力分析等方法进行经验性的分析，主要是定性分析，获得的结论一般均是定性的结论。虽然定性分析能解决大量的实际问题，但是失效工作中定量分析一直是人们梦寐以求的。近年来我国学者为对疲劳断裂过程进行定量分析，建立了金属疲劳断口数学物理模型<sup>[7]</sup>，根据断口形貌定量反推原始疲劳质量，推算疲劳寿命与疲劳应力<sup>[8]</sup>取得很大进展。在对零部件进行失效分析过程中，应尽可能利用这些成果进行定量分析，即使有不完善、甚至不准确之处，也是应该努力的发展方向。本书第3章将对疲劳断裂定量分析进行初步论述。

### 1.4.2 新材料的失效分析

由于金属材料在工业生产中占有举足轻重的地位，金属材料制备的零部件数量远多于其他材料。因此，对于金属材料零部件的失效分析是最成熟的。当前由于各类新材料的大量使用，一些新材料的失效问题也不断出现，构成新的研究方向。例如在航天航空领域，采用树脂基、金属基复合材料可以大幅度提高比强度、比刚度，在降低飞机结构质量系数方面起到举足轻重的作用，所以复合材料的失效分析越来越受到人们的重视。

对于这些新材料的失效分析，基本思路和基本分析方法与金属材料是一致的。但是由于新材料有自身的特殊性，在进行失效分析时必须引起注意。以下以金属基复合材料为例来说明。

20世纪60年代初，美国航天局研究者利用纤维对铜进行强化取得成功，并在航天及其他军事领域获得成功应用，引发了人们对金属基复合材料的研究兴趣。金属基复合材料提高性能的基本原理是：复合材料受力时，基体将外载荷通过界面传递给增强体（如纤维、晶须等），使增强体承受外力。由于增强体本身强度、弹性模量等远高于基体材料，所以能大幅度提高性能。从强化机理可以看到，金属基复合材料的界面问题是关键问题，因此在进行失效分析时，除采用常规分析思路与方法进行分析外，还必须考虑界面的影响。举例说明如下：

**【例 1-12】** 20世纪80年代，日本丰田公司采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维增强汽车活塞材料（类似国产ZL109铝合金）用于柴油机活塞第一环槽，取得了良好的效果。随后国内外一些机构便开展了对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维增强Al基复合材料的研究。采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维增强ZL109铝合金与Al-5.5%Mg合金制备成复合材料后，测定力学性能，获得完全不同的力学性能数据，见表1-10和表1-11。

表 1-10  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 短纤维增强Al-5.5%Mg复合材料强度测定结果

纤维体积分数/%	抗拉强度/MPa	延伸率/%
0	290	13
8	309	4.8
15	334	2.4
20	351	2.0

表 1-11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 短纤维增强 ZL109 复合材料强度测定结果

纤维体积分数/%	抗拉强度/MPa	延伸率/%
0	300	2.3
8	210	0.8
15	180	0.7
20	160	0.6

可见纤维加入不同的铝合金中，起到的强化效果完全不同。对于 Al-5.5%Mg 合金，纤维加入能起到强化效果，且随纤维的体积分数增加强化效果增强。但是对于 ZL109 合金则完全相反，随着纤维体积分数的增加，强度不断下降（相当失效）。为了分析原因，可以采用常规方法分析断口、金相组织，但是最关键的是分析界面。图 1-14 是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 短纤维增强 ZL109 合金界面的透射电镜照片。

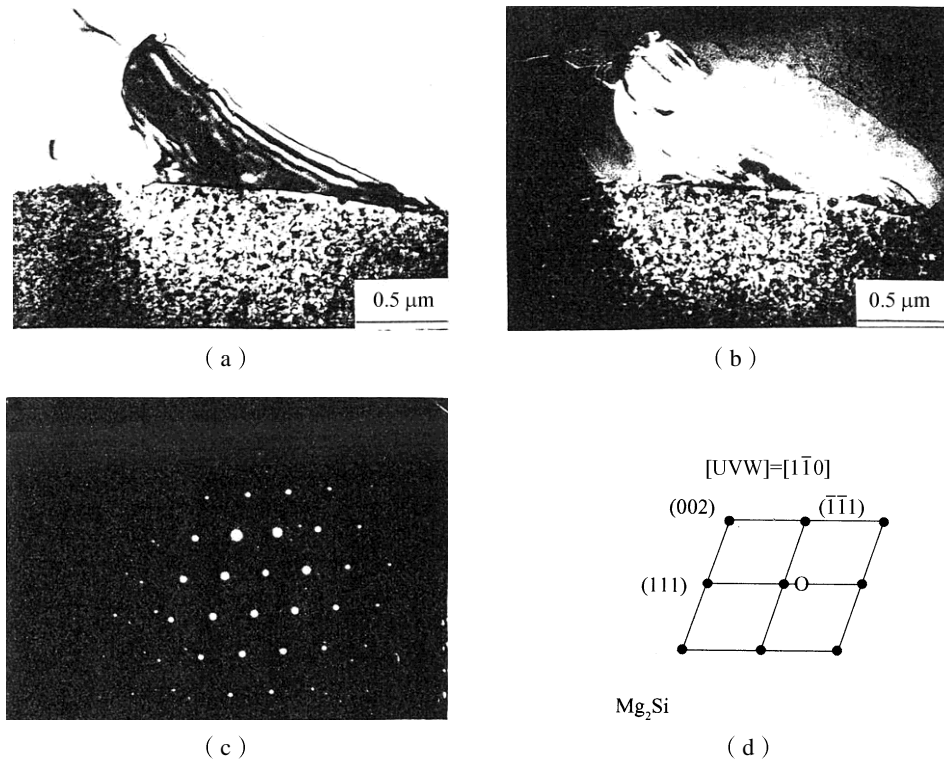


图 1-14 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 短纤维增强 ZL109 复合材料界面透射电镜照片

由图 1-14 可见，在纤维与基体界面分布有大块状的化合物，通过电子衍射分析证明该化合物是 Mg<sub>2</sub>Si。当复合材料受到拉伸载荷时，在理想情况下应该是基体将载荷通过界面传给纤维，使纤维承受载荷。由于纤维本身强度远高于基体（纤维强度约为 2 000 MPa），故提高了强度。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 短纤维增强 Al-5.5%Mg 复合材料就是这种情况。但是对于 ZL109 合金，由于纤维与基体界面处化合物的存在，受外载荷时界面处产生应力集中，造成界面处纤维与基体分离，



纤维不能承受载荷，反而造成界面处形成微裂纹，导致强度降低。又如定向凝固合金具有特定的微观组织结构的各向异性材料。定向凝固合金的主干、枝晶杆及枝晶间有不同的强度与韧性，在受力作用下，当合金的主杆、枝晶处于弹性变形范围时，枝晶间已经处于塑性变形甚至开裂<sup>[9]</sup>。

### 1.4.3 失效分析专家系统

失效分析是包括事故分析、失效机理的提出与事故的预防等在内的综合研究。到目前为止，人们主要依据经验和已经获得的断口、裂纹、金相图谱等经验资料进行分析。现有的图谱与案例集基本上是针对具体情况的“特殊分析”的分析，并且是定性的分析。这种分析的准确性取决于分析人员的素质。初步涉入失效分析领域的技术人员，分析出的结论往往可靠性偏低。只有长期从事失效分析工作的专家，得到的分析结果才具有很高的可靠性。

为了使一般的工程技术人员也能够进行失效分析，并且达到快速、准确的目的，从 20 世纪 60 年代开始，人们将失效分析获得的大量经验构建成数据库并与计算机结合，构建了利用计算机对结构件进行失效分析的专家系统，这是失效分析领域最引人注目的进展。

所谓专家系统，是指在某一特定领域内，将人类失效专家积累的丰富经验与计算机强大计算能力结合，通过一定的逻辑推理编制出的计算机求解的应用程序系统。理论上希望系统具有该领域专家级水平的知识、经验和能力，可以求解出只有高级专家才能解决的问题，使一般的工程技术人员在计算机的帮助下，具有专家的思路、知识系统、经验，能解决实际问题。

可见专家系统实际上是模拟人类专家，对失效的结构件进行失效分析的计算机系统。因此专家系统的构建，是模拟人类专家的知识结构、解决问题的思路和方法进行构建的。

所谓专家，只能是某一领域的专家，不可能成为各个领域的专家。因此，建立失效分析专家系统均是针对某个特定区域建立的系统。这是因为尽管构件失效分析所采用的手段类似、分析过程类似，但是由于不同的构件所处的工作环境不同、受力状态不同，所以失效分析所需要的基础知识有很大差别，为某个特定系统服务而建立的计算机专家系统，很难用于另一个系统之中。原因是：建立计算机专家系统所需要的基础知识、专业知识等有很大的系统依赖性。目前专家系统软件虽然很多，但是真正能够实际应用、很好地解决实际问题的却很少。一个原因是系统本身需要不断地发展与完善，另一个原因是在建立系统前，均希望尽可能多地解决各类问题，结果是大而不精，影响实际应用效果。针对这种现状，美国 T. W. Liao 针对化工设备常见的失效模式开发了专家系统<sup>[10-11]</sup>，我国学者针对特定的航空发动机多发事故的现状，专门构建一个适用于航空发动机故障的专家系统<sup>[12]</sup>，对航空发动机中的零部件（如轴、叶片、盘等）故障进行智能化分析。建立专家系统的思路简介如下<sup>[12-13]</sup>：

#### 1. 人类专家进行失效分析时需要具备的素质与分析基本思路

首先人类专家必须具备深厚的知识结构，这种知识结构可以分成两大类，一类是在此领域的基础知识，另一类是丰富的实践经验，即他本人分析过的大量的案例。为模拟人类专家，专家系统也必须具备这样的“素质”，即通常所说的计算机中的数据库。

对于一个具体的失效构件，人类专家对其进行分析的基本思路是：以失效分析的规律、相关基础知识作为分离的理论依据，将通过调查、试验获得的信息（失效现象、分析结果）分别加以考察，然后有机地将相关信息进行结合，作为一个整体进行综合考察，利用头脑中的知识结构，应用逻辑推理方法对具体失效构件进行分析判断。在分析判断时分成两种情况：以前是否遇到过类似的失效案例（需要分析的失效案例称为目标案例）？如果遇到过类似案例，就采用类比推理的方法进行分析，即比较目标案例与之前遇到过的案例在材料加工、断裂方式、断口特征、金相组织等方面有哪些相同之处？有哪些不同之处？再利用基础知识、专业知识进行推理分析，在分析过程中不可避免地要查阅一些资料并进行必要的讨论，最后得出结论与改进措施（即对失效问题求出解）。

如果没有遇到过类似案例，就采用逻辑推理方式进行分析。所谓逻辑推理方式，是指运用专家在此领域深厚的基础知识，如相关学科基础知识、断口学知识、力学知识、微观组织分析知识等对失效构件进行分析，推出结论包括失效模式、失效机理、失效原因和改进措施等。同样在分析过程中，也需要查阅一些资料并进行必要的讨论。为模拟人类专家，专家系统也必须具备“调用知识的能力”与这种“逻辑推理能力”。

## 2. 失效分析专家系统模型构建思路

专家系统是模拟人类专家进行分析求解，因此也必须具备人类专家的“知识结构”“调用知识的能力”与“分析问题的能力”。模拟人类专家的知识结构就是建立数据库。人类专家的知识结构在头脑中，表达这些知识内容是用人类的语言、数字及各种数学表达式。计算机要利用这些知识必须将人类专家的这些知识转换成计算机可以识别的形式。文献 7 采用了综合失效分析知识获取方法，见图 1-15。

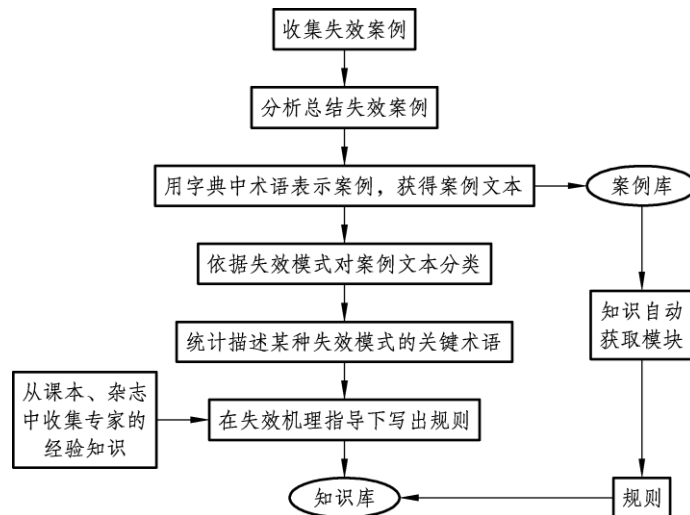


图 1-15 知识获取及表达方式

在收集大量案例的基础上，分析、总结、归纳这些失效案例，用字典库中术语描述案例，得到以框架形式表达的案例文本，存入案例库中。对案例文本进行分类，用归纳法找出失效

特征与失效机理间的关系，根据失效机理建立起规则。这些规则由一系列 if...then...else...组成，对数据进行分类，存入知识库中。同时开发自动知识获取模块，应用于失效分析领域。

这样构建的数据库相当人类专家知识结构系统，并且计算机可以调用。

专家系统具备知识结构后，还要运用这些知识进行推理分析的能力。专家系统也采用类比推理与逻辑推理两种方式进行分析，构建两个系统。

将需要解决的失效分析问题（目标案例）与数据库中存储的案例（称为源案例）进行对比，如果目标案例与某个源案例完全一致，就可以将源实例的结论与解决问题的方案，作为目标实例的解决方案。否则选取与目标案例接近的案例作为参考，对源案例进行改编，以获得对目标案例的解决方案。这就是类比推理。类比推理系统的实现包括实例的表示与索引、实例检索、目标案例的自学习。图 1-16 所示为类比推理方式的求解过程<sup>[7]</sup>。

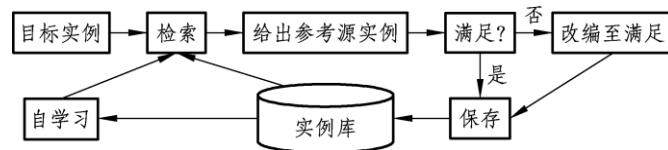


图 1-16 类比推理的求解过程

当没有检索到与目标案例类似的源案例，只能采用逻辑推理方式进行分析。在专家系统中有大量失效规律及相关学科的基础知识，并且均转换为计算机可以识别与调用的形式。计算机调用这些知识对目标案例进行分析，推出需要的结论，如失效模式、原因与失效机理及改进措施。这就是逻辑推理。

失效分析过程中包含很多不确定的因素，不确定性的来源主要是知识的不确定性与证据的不确定性。为使计算机模拟与人类思维更接近，专家系统采用不确定性推理，对于逻辑推理采用置信度方法对不确定性进行评价。推理具体过程如下：

$$\text{前提事实的置信度} \times \text{规则置信度} = \text{结论事实的置信度}$$

其中规则置信度由专家给出，前提事实的置信度由用户提供。

$$\frac{CF_1}{\text{前提}} (\frac{CF_2}{\text{规则}}) \frac{CF}{\text{结论}} = ?$$

$$CF = CF_1 \times CF_2$$

对于多个事实则激活同一规则所产生的新事实的不确定性。

$$\frac{\frac{CF_1}{CF_2}}{CF_3} (CF_4) CF = ?$$

根据上述思路构建立专家系统，具体内容包括：

(1) 首先根据失效分析领域的知识特点和表达方式、失效分析推理过程，以及建立专家系统需要考虑的各方面因素进行规划，确定构建系统的各个功能模块。

(2) 在对失效分析领域知识进行分析的基础上，确定知识的获取与编辑模块。将相关理

论基础、经验知识编入此模块，并将它们用规则表达出来，构建成知识库。

(3) 建立案例模块，案例知识用框架的形式表示出来，构建成案例库。

(4) 为使专家系统的术语统一，以提高系统的性能，还要建立存放统一术语的字典库。在字典库与规则库、案例库及推理机之间建立联系。

(5) 确定失效分析专家系统的推理机制。一般是逻辑推理与类比推理。从已有的知识推出未知的知识，从一个或几个已知的判断，推出另一个新的判断。只要推理的前提是真实的，推理前提和结论的关系符合思维规律要求，得到的结论就是真实的。

(6) 专家系统除要有知识库、案例库、推理机、知识存储与推理功能，还要有知识查询、解释功能。系统的解释能力也是评价系统性能的一个重要方面。同时用户界面要友好。图 1-17 所示为航空机械零部件失效分析专家系统的结构<sup>[13]</sup>。

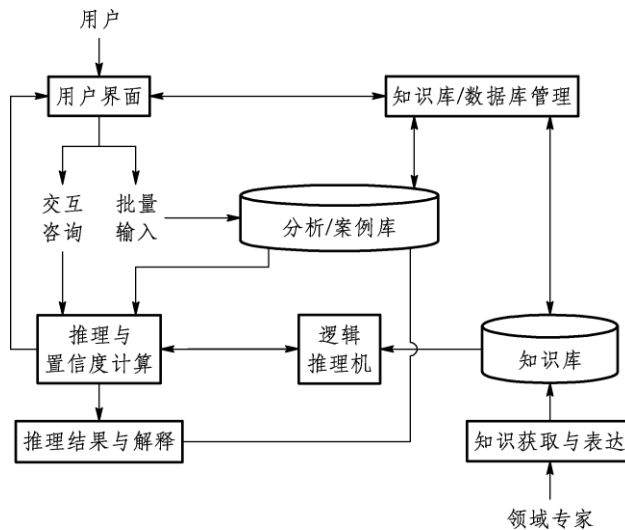


图 1-17 失效分析专家系统的结构

失效分析专家系统属于失效分析领域中的前沿研究内容，已引起人们极大的研究兴趣，但是目前尚处于研究阶段，并不是很完善，在知识的获取、表达与智能推理方面均需要加强研究，但是失效分析专家系统无疑是今后失效分析领域发展的一个极为重要的分支。

## 习 题

1. 某公司采用德国材料 60S20（相当我国 60 钢）制造电机的蜗杆，直径为 10 mm，采用的加工路线如下：

下料→粗加工→调质→精加工→表面经过高频淬火处理→磨削加工→成品

安装在电机上使用后运行 10 万次左右就发生断裂，远小于设计要求，试分析原因并提出改进建议。

- (1) 查阅资料了解蜗杆类零件服役条件下受到何种载荷？
- (2) 设计失效分析的试验方案。

2. 某厂采用 2Cr13 材料生产医用海绵钳（见图 1-18），生产工艺如下：

直径为 12 mm 的棒料通过油炉加热锻造成毛坯→760 °C 高温回火→成型→1 000 °C 加热  
淬火→250~300 °C 回火→电解去氧化皮→铆接校正→抛光

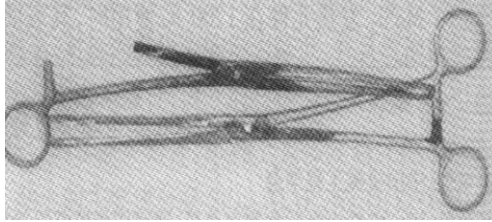


图 1-18 海绵钳形状图 (表面存在黑斑与裂纹)

海绵钳在使用过程中发生断裂, 试设计失效分析的试验方案。提示: 断裂的海绵钳表面有黑色斑, 往往此处断裂。锻造油炉无测温度装置, 凭颜色确定温度。

3. 某厂采用 25 钢与 45 钢对焊方法制备汽车连接杆 (见图 1-19), 工艺如下:

下料→感应加热锻造中部六方螺母→机加工→电阻堆焊 (与另一个直径为 30 mm 的杆  
25 钢材料的配件连接)→电镀



图 1-19 汽车连接杆

采用对连接杆直接进行拉伸的方法评定产品质量。按规定对实物连接杆的拉伸力要达到 8 kN。用上述工艺生产产品近 1 年基本满足性能要求, 一般零件的拉伸力可达到 23 kN。最近生产了一批产品, 对成品进行拉伸实验后发现约 20% 的产品小于 5 kN 就断裂, 部分零件甚至用手拿住, 向地下进行敲击便会发生断裂。对此问题曾请有关单位进行分析, 得到的结论是: 由于电镀时采用氰盐又没有进行去氢退火, 所以会产生氢脆造成断裂。厂方根据此结论进行了改进: 对电镀后的连接杆进行 150 °C × 30 min 的去氢退火, 然后再用碱性电镀液进行电镀。但是测定的结果是: 仍然有部分连接杆出现小于 5 kN 就拉断的现象。厂方技术人员曾怀疑原材料存在问题。因此, 对这批原材料进行了成分与冶金质量评定, 结果均符合要求。同时此批原材料在以前的生产中也使用过, 连接杆也并没有出问题。试设计失效分析试验方案。



扫码查看本章彩图

## 参考文献

- [1] 美国金属学会. 金属手册 (第八版, 第十卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [2] 查利 R. 布鲁克斯, 阿肖克·考霍来. 工程材料失效分析 [M]. 谢斐娟, 孙家骧, 译. 北京: 机械

工业出版社，2003.

- [ 3 ] 涂铭旌，鄢文彬. 机械零件失效分析与预防[M]. 北京：高等教育出版社，1993.
- [ 4 ] 陈南平，顾守仁，沈万磁. 机械零件失效分析[M]. 北京：清华大学出版社，1988.
- [ 5 ] 孙智，江利，应展鹏. 失效分析基础与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
- [ 6 ] 钟群鹏，田永江. 失效分析基础[M]. 北京：机械工业出版社，1988.
- [ 7 ] 钟群鹏，赵子华. 断口学[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
- [ 8 ] 刘新灵，张铮，陶春虎. 疲劳断口定量分析[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
- [ 9 ] 张栋，钟培道，陶春虎，雷祖圣. 失效分析[M]. 北京：国防工业出版社，2004.
- [10] T WARREN LIAO, Z H ZHAN, C R MOUNT. Integrated Database and Expert system for Failure Mechanism Identification: Part I Automated Knowledge Acquisition[J]. Engineering Failure Analysis, 1999, 6: 387-406.
- [11] T WARREN LIAO, Z H ZHAN, C R MOUNT. Integrated Database and Expert system for Failure Mechanism Identification: Part The system and Performance Testing[J]. Engineering Failure Analysis, 1999, 6: 407-421.
- [12] 陶春虎，刘新灵，张卫方. 失效分析专家系统研究进展[J]. 材料导报，2004，18（8）：311-313.
- [13] 陶春虎，何玉怀，刘新灵. 失效分析新技术[M]. 北京：国防工业出版社，2011.