

齿轮传动的失效 及其对策

张展 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

齿轮传动的失效 及其对策

张 展 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了齿轮传动的失效形式与失效原因,并对失效形式逐一分析,给出预防措施及对策。本书编写时注重实用性、科学性和先进性,有很强的参考价值。

本书适合齿轮专业的技术人员阅读,也可供相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

齿轮传动的失效及其对策/张展编著. —北京:机械工业出版社, 2011.7

ISBN 978-7-111-34931-0

I. ①齿… II. ①张… III. ①齿轮传动 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第103025号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:高依楠

版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:路恩中 责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2011年8月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·16印张·319千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34931-0

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

策划编辑:(010) 88379770

网络服务

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

齿轮传动的失效是机械设备失效的形式之一，是指在运行中失去设计功能或者发生损伤失效。例如，一部机床失去加工精度，一台减速器齿轮断裂，都是失效，有时是部分失效，有时是整体失效。失效分析的任务就是找出失效的主要原因，并以此制定改进措施与对策，以防止同类失效的再次发生。失效分析是提高产品质量的重要手段。通过对大量事故（有些是灾难性事故）进行分析，人们认识到失效分析工作的重要性。在许多现代的先进企业中，失效分析已成为一项重要的工作。

材料科学、工程力学、断裂力学、断口金相学、摩擦学、腐蚀科学等学科和无损探伤等检测技术的飞速发展，尤其是电子显微镜的应用，为失效分析奠定了坚实的科学基础，使失效分析成为一门日臻完善的综合性技术。

零件的失效大致有如下几种形式：一是过量变形，以致在机构传动中失去功能，如高温工作条件下螺栓松弛；二是磨损或腐蚀造成齿面损失，影响机构的精度或灵敏度；三是断裂事故，往往造成灾难性后果。

导致失效的原因包括：设计不当，如强度核算、几何形状设计及选材不当；材料和工艺缺陷，如热加工、热处理或装配不当；服役条件不良，如磨损、腐蚀或载荷；运行维护不当等。

失效分析是一门综合性学科，对失效分析工作者，在业务素质上有较高的要求，知识面要广，要积累一定的经验，更重要的是要有良好的思想品格素质，因为失效分析的最后结果必然涉及到事故责任者，因而失效分析工作者必须具有高度的事业心和责任感，坚持原则。同时，失效分析是一门综合性技术，一个人的知识和经验毕竟有限，对失效事件特别是复杂失效事件的分析，必须与各方面专业人员合作，这就要求失效分析工作者要善于听取各方面的意见，既要敢于坚持真理，又要勇于修正自己的错误判断。一个失效分析工作者，如果没有良好的思想品格素质，主观武断或搞不正之风，那么再完整的科学思维方法也不可能运用自如。

为了适应科学技术的发展、教学、科研及生产的需要，我们编写了本书，对常见的失效形式作一分析，并提出预防措施及其对策。在编写时，我们坚持“技以新为贵，商以信为重，业以人为本，人以德为先”的精神。编写时，注重实用性、科学性和先进性。

本书由张展编著，在编写过程中，得到上海交通大学张国瑞教授，上海同济大学归正副教授，上海理工大学崔建昆副教授、麦云飞副教授，江苏上齿集团董事长、总经理张焰庆，荆州市巨枫传动机械厂总经理李运秋，上海努浩公司总经理张弘松，以及同行专家朱腊英、曾建峰、马凯、柯怡、唐兰苓的大力支持与合作，在此深表感谢！

齿轮传动的失效分析涉及面广，因素较多，有设计、制造、使用维护、应用环境等诸多因素，由于本人水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

张 展

目 录

前言

第 1 章 齿轮传动的失效形式及其分析方法	1
1.1 概述	1
1.2 机械零件失效形式及类别	4
1.3 失效分析方法	7
1.4 齿轮传动形式与受力分析	11
1.5 常见的齿轮失效方式与原因	19
第 2 章 零件的强度与刚度计算	25
2.1 概述	25
2.2 受力分析	26
2.3 应力状态分析与强度理论	30
2.4 动应力	44
2.5 应力集中	47
2.6 残余应力和装配应力	64
第 3 章 用有限元法计算圆柱齿轮的弯曲强度	70
3.1 齿轮传动强度的简化计算	70
3.2 用有限元法计算圆柱齿轮的弯曲应力	76
3.3 轮齿离散化模型	89
3.4 边界范围及约束条件	95
第 4 章 循环载荷作用下的断裂机理	98
4.1 疲劳的特点与疲劳曲线	98
4.2 经典疲劳设计方法及高周疲劳断裂失效原因判断	101
4.3 低周疲劳寿命估算	107
4.4 随机载荷谱的处理	110
4.5 断裂力学在疲劳问题上的应用	112
4.6 接触疲劳	116
第 5 章 裂纹与断口分析	128
5.1 概述	128
5.2 裂纹分析	129
5.3 断口分析	136
第 6 章 磨损失效及其对策	149
6.1 摩擦	149

6.2	磨损机理	155
6.3	影响材料耐磨性的因素	159
6.4	磨损失效判断和改善耐磨性的措施	168
第7章	蠕变断裂	182
7.1	蠕变	182
7.2	金属材料的高温性能	187
7.3	应力松弛	189
7.4	高温工作条件下零件寿命预测	190
第8章	金属的腐蚀失效及其对策	195
8.1	金属的腐蚀失效	195
8.2	腐蚀失效的基本类型和影响因素	196
8.3	腐蚀失效分析方法	209
8.4	防止金属腐蚀的对策	211
第9章	环境破断失效	217
9.1	应力腐蚀断裂	217
9.2	氢脆	222
第10章	重载齿轮失效判据 (JB/T 5664—2007)	230
10.1	范围	230
10.2	失效的形式与判据	230
10.3	重载齿轮传动噪声和振动的监测	234
10.4	重载齿轮失效的检查方法	235
第11章	齿轮损伤的处理及其对策	237
11.1	齿轮损伤处理的根据与模式	237
11.2	失效齿轮修复的基本方法	241
11.3	轴的失效及其修复	246
参考文献	249

第 1 章 齿轮传动的失效形式及其分析方法

1.1 概述

齿轮是传递运动和动力的机械零件，被广泛的使用。自 1765 年欧拉 (L. Euler) 创立渐开线圆柱齿轮以来，至今已有 200 多年的历史。

目前齿轮技术可达到的指标：圆周速度 $v = 300\text{m/s}$ ，转速 $n = 10^5\text{r/min}$ ，传递功率 $P = 10^5\text{kW}$ ，模数 $m = 0.004 \sim 160\text{mm}$ ，直径 $d = 0.001 \sim 152.3\text{m}$ 。2009 年新加坡研制成功可控的微型齿轮 $d = 1.2\text{nm}$ ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)。

齿轮磨损是在啮合传动过程中，轮齿接触表面的材料摩擦损耗现象。齿轮的损伤是指齿轮在材料的材质、尺寸、精度、表面状态等基本要素的某一或若干方面，在工艺过程或（和）使用过程中所遭受的内外伤。齿轮损伤量的积累达到某一界限，即丧失了对其规定的某种功能，这就是齿轮的某种失效模式。判定某齿轮是否失效的定性、定量依据，即失效判据，或称失效准则。根据失效的统计，在传动装置中，齿轮失效占失效总数的 60% 左右，其中轮齿损伤又占主要部分。

齿轮损伤的影响因素很多，包括选材、设计计算、毛坯、加工、热处理、安装调整和使用维护等。齿轮承载能力的极限值主要取决于材质、表面状态、圆周速度、润滑条件、传动方式、齿轮种类以及轮齿参数等。为避免轮齿过早损伤，必须对具体轮齿的损伤作具体的分析，找出原因及对策。

关于齿轮损伤形式，有关学者早已开始了研究，如 1937 年白金汉 (Buckingham) 将齿面损伤分为 6 种形式；1939 年利第奥 (Rideout) 将齿面损伤分为 8 种形式；1953 年包索夫 (Borsoff) 和索莱姆 (Sorem) 将齿轮损伤分为六类。此外，自 20 世纪 50 年代以来，一些国家专门以标准的形式，对齿轮损伤形式进行了分类，如美国的 AGMA110.02—1951、AGMA110.3—1962 及 ANSI/AGMA110.04—1980；奥地利的 ONRMM6700—1968；德国的 3979—1979 等。我国由东北大学和北京科技大学负责起草的，于 1982 年提出和完成了该方面的国家标准 GB 3481—1983，现已修订为 GB/T 3481—1997，该标准将齿轮的损伤形式分为六大类，见表 1-1。

对于上述六大类、26 种失效形式，除有些属于工艺、材质、组装和使用管理上的原因造成的损伤外，都应该有各自的承载能力计算方法。根据损伤出现的频率、严重程度以及人们对各种损伤机理的认识和研究的深入程度，有下列几种计算

方法:

- 1) 齿根弯曲强度计算式 (断齿)。
- 2) 齿面接触强度计算式 (点蚀)。

表 1-1 齿轮磨损和损伤的基本类型 (GB/T 3481—1997)

齿轮磨损和损伤的类别		齿轮磨损和损伤的基本模式
1	裂纹 Cracks (Fissures)	淬火裂纹 Hardening cracks (Quench cracks) 磨削裂纹 Grinding cracks 疲劳裂纹 Fatigue cracks 轮缘和辐板裂纹 Rim and web cracks
2	轮齿折断 Tooth breakage	过载折断 Overload breakage 脆性断裂 Brittle fracture 韧性断裂 Ductile fracture 半脆性断裂 Semi-brittle fracture 轮齿剪断 Tooth shear 塑性变形后折断 Breakage after plastic deformation (Smear fracture) 疲劳折断 Fatigue breakage 弯曲疲劳 Bending fatigue 齿端折断 Tooth end breakage
3	齿面疲劳现象 Surface fatigue phenomena	点蚀 Pitting 初期点蚀 Initial pitting 扩展性点蚀 Progressive pitting 微点蚀 Micropitting 片蚀 Flake pitting 剥落 Spalling 表层压碎 Case crushing
4	齿面耗损的迹象 Indications of surface disturbances	滑动磨损 Sliding wear 正常磨损 (跑合磨损) Normal wear (Running-in wear) 中等磨损 Moderate wear 磨光 Polishing 磨料磨损 Abrasive wear 过度磨损 Excessive wear 中等擦伤 Moderate scratching (Scoring) 严重擦伤 Severe scratching 干涉磨损 Interference wear 腐蚀 Corrosion 化学腐蚀 Chemical corrosion 微动腐蚀 Fretting 鳞蚀 Scaling 过热 Overheating

(续)

	齿轮磨损和损伤的类别	齿轮磨损和损伤的基本模式
4	齿面耗损的迹象 Indications of surface disturbances	侵 蚀 Erosion 气 蚀 Cavitation erosion 冲 蚀 Hydraulic erosion 电 蚀 Electric erosion
5	胶合 Scuffing	
6	永久变形 Permanent deformation	压痕 Indentation 塑性变形 Plastic deformation 滚压塑变 Plastic deformation by rolling 轮齿锤击塑变 Plastic deformation by tooth hammer 起皱 Rippling 起脊 Ridging 飞边 Burrs

3) 抗胶合强度计算式。

4) 抗磨损强度计算式。

这四种失效形式对齿轮承载能力的限制关系如图 1-1 所示。

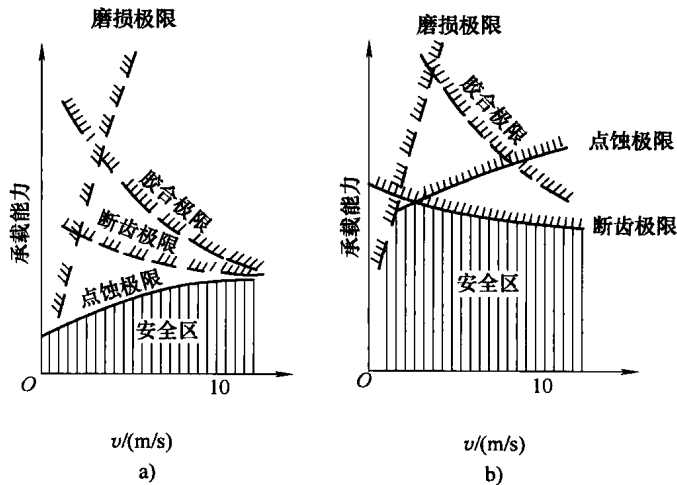


图 1-1 齿轮承载能力的限制关系

a) 软齿面齿轮 b) 硬齿面齿轮

由图 1-1 可知，除线速度极低 ($v < 1\text{m/s}$) 的齿轮有时需要计算其抗磨损强度之外，齿轮损伤的主要形式有断齿、点蚀、胶合三种。因此，在目前的齿轮承载能

力计算方法中就以此三种较为成熟。

自蒸汽机带来工业革命以来, 齿轮传递功率不断增大, 齿轮强度就自然成为人们研究的重要课题。自 1785 年瓦特 (Watt) 把齿轮轮齿作为矩形截面的悬臂梁计算轮齿的弯曲强度开始, 世界上许多著名学者先后对此进行了逐步深入的研究, 到 1890 年路易斯 (Lewis) 提出的计算弯曲强度的 Lewis 公式和 1891 年赫兹 (Hertz) 提出的计算接触强度的 Hertz 公式, 奠定了齿轮弯曲、接触强度计算的理论基础。在此基础上, 各种齿轮承载能力计算方法不断被提出, 并陆续被不少国家、公司和机构定为标准。如前苏联库德略采夫 (B. H. Кудрявцев) 方法、基斯茨杨 (Я. Г. Кистьян) 方法, 德国的尼曼 (G. Niemann) 方法、A. K. Thomas 方法, 英国的 W. A. Tuplin 方法, 法国的 G. Henriot 方法, 瑞士的马格 (MAAG) 公司方法, 英国的戴维-布朗 (David Brown) 公司的方法, 以及英国的国家标准 BS436、德国国家标准 DIN3990、前苏联的国家标准 ГОСТ1354、美国的齿轮制造者协会 AGMA 标准、日本齿轮制造者协会 JGMA 标准等。

近年来, 我国相应颁布了下列标准: GB/T 19406—2003 渐开线直齿和斜齿圆柱齿轮承载能力计算方法 工业齿轮应用; GB/T 10062—2003 锥齿轮承载能力计算方法; GB/Z 6413.1—2003 圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮 胶合承载能力计算方法 第 1 部分: 闪温法; GB/Z 6413.2—2003 圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮 胶合承载能力计算方法 第 2 部分: 积分温度法。

在强度计算研究这一领域中, 人们对齿轮强度理论的研究越深入, 对各种因素的考虑也越全面, 使得齿轮强度的计算与实际越接近。在这一过程中, 强度理论由经典的刚体啮合理论发展到了实体 (弹塑性体) 的啮合理论的新阶段; 并不断地引入了齿形、线速度、制造精度和安装精度、工作状况、弹性变形与热变形、润滑剂、表面粗糙度及材料性质等因素的影响系数; 引入了弹塑理论和弹流理论, 使齿轮强度计算发展成为一种多学科、跨学科的边缘科学。

1.2 机械零件失效形式及类别

1. 失效的定义

各种机械零件及构件 (含齿轮在内), 都具有一定的功能, 如承受某种载荷、传递转矩, 完成某种规定动作等。当机械零件丧失其应有的功能时, 则称为该零件失效。各种零件失效的形式, 归纳起来可分为过量变形、断裂及表面损伤等几种类型。

2. 失效形式的分类及原因

失效形式一般分类见表 1-2。

表 1-2 失效形式一般分类

序号	失效类型	具体失效形式	引起失效的直接原因
1	过量变形失效	扭曲(如花键) 拉长(如紧固件) 胀大超限(如石油射孔器) 高低温下的蠕变(如动力机械等) 弹性元件发生永久变形	由于在一定载荷条件下发生过 量变形,零件失去应用功能不能 正常使用
2	断裂失效	一次加载断裂(如拉伸、冲击和持久等)	由于载荷或应力强度超过当时材 料的承载能力而引起
		环境介质引起的断裂(应力腐蚀、氢脆、液 态金属脆化、辐照脆化和腐蚀疲劳等)	由于环境介质、应力共同作用引起 的低应力破断
3	表面损伤失效	疲劳断裂:低周(应变)疲劳(如压力容 器),寿命 $< 10^4$ 次循环。高周(应力)疲 劳(如轴类、螺栓类、齿轮类零件)。疲劳又可 按载荷类型区分为弯曲、扭转、接触、拉-拉、 拉-压、复合载荷谱疲劳与热疲劳、高温疲 劳等不同情况	由于周期(交变)作用力引起的低 应力破坏
		磨损:分粘着磨损和磨粒磨损,主要引起几 何尺寸上的变化或表面损伤(如齿轮轮齿、 轴颈、轴承及挖掘、钻探和粉碎机械中的易损 件)	由于两物体接触表面在接触应力下 有相对运动而造成材料流失所引起 的一种失效方式
		腐蚀:如冲刷、咬蚀和气蚀等	有害环境气氛的化学及物理化学作 用引起

为了便于分析诊断和处理失效事件,也可按下列三方面进行分类:

- 1) 按失效机理模式的失效类型,见表 1-3。
- 2) 按产品质量控制状况的失效类型,见表 1-4。
- 3) 按因果关系的失效类型,见表 1-5。

引起零件早期失效的原因是很多的,主要有以下几方面:①设计与选材上的问题。②加工、热处理或材质上的问题。③装配上的问题。④操作和维护不当的问题。调查发现造成失效的原因中,设计和制造加工方面的问题占 56% 以上,因此设计和制造加工方面是否存在问题是失效分析中需要考虑的重要方面,当然要根据零件失效的具体情况进行具体分析,这样可大大缩短分析时间,减少分析工作量。

表 1-3 按失效机理模式的失效类型

断裂	裂纹	磨损	畸变	腐蚀	其他失效
韧性、脆性断裂	铸造裂纹	粘着磨损	过量变形	化学腐蚀	打滑
过载断裂	冷、热铸造裂纹	热胶合磨损	撞击过量变形	电化学腐蚀	松脱
撞击过载断裂	机械铸造裂纹	冷胶合磨损	静载过量变形	均匀腐蚀	(松动)
静强过载断裂	锻造裂纹	磨粒磨损	纵弯失稳	局部腐蚀	泄漏
疲劳断裂	加热、冷却锻造裂纹	接触疲劳磨损	蠕变	点腐蚀	烧损
高周(高循环)	折叠痕(起层)裂纹	点蚀	使用畸变	缝隙腐蚀	复合损伤失效
疲劳断裂					
低周(低循环)	分模面锻造裂纹	剥落	误换畸变	晶间腐蚀	蠕变翘曲
疲劳断裂					
高温疲劳断裂	龟裂	撞击磨损	超过盈畸变	接触腐蚀	腐蚀疲劳
热疲劳断裂	焊接裂纹	腐蚀磨损	修补畸变	选择腐蚀	蠕变疲劳
撞击疲劳断裂	冷、热焊接裂纹	冲蚀磨损	泡胀畸变	生物腐蚀	应力腐蚀
微动疲劳断裂	再加热焊接裂纹	(流体侵蚀磨损)		气穴腐蚀	撞击微动磨损
环境致断	异常偏析焊接裂纹	微动磨损		冲刷腐蚀	微动腐蚀磨损
应力腐蚀断裂	应变脆化焊接裂纹	电蚀磨损			
氢损伤致断	延迟焊接裂纹	气蚀磨损			
液体金属致脆	热处理裂纹	变形磨损			
辐射损伤致断	过急冷却热处理裂纹				
热冲击致断	过热淬裂				
冷脆致断	结构(形貌)异常淬裂				
	夹杂致裂				
	机加工裂纹				
	磨削裂纹				
	鳞翅裂纹				
	振动裂纹				
	使用裂纹				
	冲击裂纹				
	疲劳裂纹				
	蠕变裂纹				
	氢脆裂纹				
	应力腐蚀开裂				
	热撕裂裂纹				

表 1-4 按产品质量控制状况的失效类型

按质量控制水平	按产品失效发展过程	按失效发生的速度	按可修复性
弱控(弱网)失效	早期失效	突发性失效	永久性失效
漏控(漏网)失效	偶然性失效	渐进性失效	暂时性失效
失控(无网)失效	磨损失效	间歇性失效	非永久性失效

表 1-5 按因果关系的失效类型

按失效责任	按失效后果	按失效程度
产品本质缺陷失效(设计、材质、制造) 外界影响失效 人员素质失效 误用失效 超容限失效(生理、心理) 正常磨损失效	破坏性失效 恶性失效 致命(灾难)性失效 退化失效	完全失效 部分失效 系统失效 零(部)件失效

1.3 失效分析方法

1. 失效分析

失效分析(也叫故障分析)的目的是研究机械设备、结构及其零(部)件发生失效分析的原因,提出防止失效事故重复发生,提高其使用寿命的措施。

2. 失效分析内容

失效分析这门学科所包含的内容可分为两大方面:一是失效分析方法的研究,即失效分析方法本身——失效分析思维方法的研究;另一个是失效分析的实验技术,即采用各种仪器设备对失效零件进行实验检测,为准确判断失效发生的原因提供实验依据。目前,国内外在失效分析方法研究方面做了不少的工作,已取得一定的成就,创造了诸如“失效事故的形式及影响分析”(Failure Mode and Effect Analysis,简称FMEA)、“故障树分析”(Fault Tree Analysis,简称FTA)、“现象树分析”(Event Tree Analysis,简称ETA)和“特性要因图”等方法。至于“故障树分析法”请见参考文献[2]。

3. 一般零件失效分析步骤

通常按下列步骤对具体零件进行失效分析(以一个零件发生断裂为例):

(1) 调查研究收集原始背景材料

①零件名称,用于何机器、何部位。

②该零件的功能、要求及设计依据,包括材料选择。

③使用经历,包括使用寿命、操作温度、环境条件、负荷情况、载荷谱形式、拉力或压力、加载速度、超载情况等。

④原材料、处理工艺和性能情况。

⑤表面处理情况。

⑥制造工艺。

⑦失效零件的样品收集。

(2) 残骸拼凑分析与低倍宏观检查

1) 残骸分析——寻找最先发生破坏的零件或部位。有时一个较复杂的设备发生断裂破坏，不只是个别零件的破坏，而是许多零部件都发生破断，所以首要任务是找到最先破坏的零件或部件，这往往采用残骸拼凑分析的方法，根据裂纹走向、断口情况，以及各零部件互相间碰撞划伤的情况，可判断哪一部分是最先破断的零件或部位。

2) 对整个零件进行检查，包括以下内容：

①断裂形式、部位及塑性变形情况，并注意裂纹的源区、发展情况及其终止点。

②主裂纹以外的裂纹或其他缺陷。

③有无腐蚀痕迹（如局部腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、电化学腐蚀、高温剥蚀或应力腐蚀裂纹）。

④有无磨损迹象（过热、擦伤和磨蚀）。

⑤表面状况如何（有无机械损伤、应力集中部位和颜色变化、起皮的过烧现象等）。

⑥原材料质量、加工缺陷，如锻件和铸件质量、焊缝质量（裂纹、疏松和夹杂等）及其与断裂部位的相对位置。

⑦裂纹与零件表面有无腐蚀产物和其他外来物。

3) 对断口进行宏观检查：

①裂纹源与终止点。

②裂纹源附近的表面应力集中区和材料与加工的缺陷。

③断口附近的塑性变形情况。

④从断口估计平均应力的大小。

⑤断裂面、裂纹扩展方向与应力类型、大小和方向的关系。

⑥断口是清洁光亮还是氧化锈蚀及回火色。

⑦断口结构和疲劳条带情况，以及终断区大小。

4) 摄影和画草图，注明所观察的结果。

5) 尺寸测量。

6) 妥善保管好断口及附着其上的物质，在宏观检验的基础上分析需要进一步了解的内容，决定进行何种试验分析。

(3) 零件受力和失效部位应力分析计算 必要时实验方法测定。

(4) 深入实验分析 用来进行进一步实验分析的实验技术是各种各样的，尤其是现代分析仪器的的发展，使实验手段更多、更精密、更微观，但对于某一具体失效零件要采取何种实验技术，要视具体情况而定，原则是为了揭示主要矛盾，用尽可能少的实验，较简单的仪器设备，获得进行分析所必须的足够信息。可供选择使

用的实验技术概括起来有以下几大类:

1) 力学性能方法。测定零件材料的力学性能,即应力应变特性和断裂韧性(有的要包括环境温度和介质条件,以便能对零件的承载能力作出评价)。

2) 断口和裂纹附近剖面磨片的微观分析。对零件材料的金相组织、显微硬度、晶粒度、夹杂物、表面处理、加工流线、裂纹起源和走向等进行观察和评定,对选材、制造、热处理、焊接工艺等是否合适作出判断。如果配合立体显微镜观察还不能确证,则可利用透射电镜、扫描电镜、探针、能谱仪、X射线衍射等方法,对断口微观形貌和断口上的附着物类型、微区成分、超薄表面层1~5nm或表面成分微量变化进行详细观察分析,对断裂性质、应力类型、可能的断裂原因作出初步判断。

3) 化学及电化学方法。对物料及断口附着物的成分和材料在环境介质中的稳定性、电极电位等进行评定。

4) 物理性能方法。利用对材料的电磁、膨胀、热性能的测试,了解零件材料组织结构及其变化规律。常用的分析方法见表1-6~表1-8。

表1-6 形态分析方法

物理性能	宏观、肉眼 (~40×放大镜)	立体显微镜及 光学显微镜	扫描电子 显微镜	透射电子 显微镜
特点	1. 放大~40× 2. 能了解全貌 (花样、颜色、边缘、走向、断口各部分比例等) 3. 对断裂源位置和断裂性质的确定为有效,它是进一步微观分析的基础	1. 立体显微镜:~110× 2. 光学显微镜:金相1500×断口400× a. 分辨率<200nm b. 景深<0.2mm 3. 光学复型断口分析术对断口分析有效	1. 放大10×~2000× 2. 分辨率10nm 3. 能直接观察断口 4. 能从低倍到高倍连续观察 5. 能倾斜观察(对源区的观察有利) 6. 景深大 7. 带光谱或能谱的还可作成分分析 8. 断口+组织联合观察	1. 放大1000×~1000000× 2. 分辨率~0.14nm 3. 不能直接观察断口,可用一次或两次复型 4. 当电压>100kV时,可做电子衍射,可对夹杂物等作定性结构分析 5. 透射扫描——薄膜透射扫描,可对微区(晶粒边界)的成分偏聚进行分析研究
应用范围	初步的,常用的,基础和十分有效的	1. 一般用于组织形态和裂纹形态分析 2. 光学复型断口分析术对断口分析有一定的价值	用于断裂失效分析十分方便和有效	1. 用于机理研究 2. 用于细微结构的观察

各种现代化分析仪器对失效分析十分有用,为了合理有效地选用各种仪器,现对不同分析内容应选用何种仪器和工具,作一简要说明。

表 1-7 相结构、晶面晶向和应力分析方法

物理性能	宏观应力分析	微区应力分析	相结构分析	晶面晶向分析
特点	脆性涂料法(定性): 1. 找最大应力区 2. 找主应力方向 3. 测应力应变近似值 应变片法(定量): 弹性范围 光弹法(定量): 1. 要有模拟件(有机玻璃) 2. 弹性范围内估算应力应变值 密栅云纹法 1. 可在实物上进行 2. 弹性范围问题可处理 3. 塑性范围只能定性,定量计算要本构关系确定才行	X射线法: 用于晶体材料,微区范围一般在4~6mm区域,由X射线斑点确定	X射线法(定量): 可测相的成分和结构 电子衍射法(定性)	蚀坑法、二面角法 电子衍射花样 X射线法
应用范围	1. 应力状态的分析 2. 主应力、应变方向的测定 3. 用于应力、应变值的初步估计	用于第Ⅲ类残余应力和工作应力的测定	用于只靠化学分析不能确定的异相,氧化物、腐蚀产物、第二相,一般用于断裂机理的研究	用于断裂面的晶面指数和裂纹走向的分析,对裂纹机理有用

表 1-8 成分分析方法

物理性能	常规的和局部的成分分析	微区的成分分析	表面的成分分析
特点	定性: 点滴法: 分析 Cr、Ni、Co、Fe、Mo 等 衍射法(哈纳沃特指数法) 荧光分析法(亦可用于定量分析) 半定量: 红外线和紫外线光谱——用于分析有机物质 光谱分析(发射和吸收光谱) 定量: 湿法: 大多数元素及阴离子 Cl^- , NO_3^- , S^{2-} 等 燃烧法: C, S, N, H, O	电子探针: 1. 区域: $\phi \geq 0.5\text{mm}$ 2. 从 Be 到 U 都适用 3. 精度极限 $\leq 0.1\%$ 4. 可重复分析 离子探针: 1. $< 10^{-2}\%$ 2. 有损于表面,不能重复分析 3. 可做剥层分析 薄膜透射扫描: 1. 区域 $< 3\text{nm}$ 范围内 2. 可作晶界的成分分析	俄歇能谱仪: 1. 除 H 外所有元素 2. 面积 $\phi 1 \sim 50\mu\text{m}$ 3. 深度 $< 2\text{nm}$ 穆斯鲍尔谱仪: 用于识别铁合金中氧化物、硫化物、碳化物、氮化物及稀有金属的氧化物 用背散射电子深 300nm 用 γ 射线深 $12.7\mu\text{m}$
应用范围	1. 防止混料 2. 化学成分是否合格 3. 查明有害元素 (As, Sb, Bi, Pb, Sn, P, S 等)	1. 电子探针作微区成分分析 2. 离子探针作剥层分析 3. 薄膜透射扫描作超微观的成分分析	用于表面的成分分析