

第 8 篇 失效分析和故障诊断

主 编 何德芳
编写人 何德芳
虞和济
审稿人 蔡春源

第 1 章 总 述

1 机械产品的失效(故障)类型及影响因素

1.1 失效类型

1.1.1 机器或系统的失效类型

- 1)运动、动力的故障类型 停动、失速、乏力、失控等。
- 2)失效结果模式类型 出轨、撞坏、坠毁、爆炸、

泄漏等。

1.1.2 零部件失效类型

为便于分析诊断和处理失效事件,可按以下三方面进行分类:

- 1)按失效机理模式的失效类型 见表 8.1-1。
- 2)按产品质量控制状况的失效类型 见表 8.1-
- 3)按因果关系的失效类型 见表 8.1-3。

表 8.1-1 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	分模面锻造裂纹	剥落	误换畸变	晶间腐蚀	蠕变翘曲
低周(低循环)					
疲劳断裂	龟裂	撞击磨损	超过盈畸变	接触腐蚀	腐蚀疲劳
高温疲劳断裂	焊接裂纹	腐蚀磨损	修补畸变	选择腐蚀	蠕变疲劳
热疲劳断裂	冷、热焊接裂纹	冲蚀磨损	泡胀畸变	生物腐蚀	应力腐蚀
撞击疲劳断裂	再加热焊接裂纹	(流体侵蚀磨损)		气穴腐蚀	撞击微动
微动疲劳断裂	异常偏析焊接裂纹	微动磨损		冲刷腐蚀	微动腐蚀磨损
环境致断	应变脆化焊接裂纹	电蚀磨损			
应力腐蚀断裂	延迟焊接裂纹	气蚀磨损			
氢损伤致断	热处理裂纹	变形磨损			
液体金属致脆	过急冷却热处理裂纹				
辐射损伤致断	过热淬裂				
热冲击致断	结构(形貌)异常淬裂				
冷脆致断	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 8.1-2 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 8.1-3 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)	破坏性失效	完全失效
外界影响失效	恶性失效	部分失效
人员素质失效	致命(灾难)	系统失效
误用失效	性失效	零(部)件失效
超容限失效(生理、心理)	退化失效	
正常磨损失效		

1.2 失效的基本影响因素

无论是机械设备或其零部件,影响其失效的基本因素总可以归结为设计制造过程因素(原始因素)和运转维修过程因素(工况使用因素)两大方面:

1.2.1 设计因素

为了保证产品质量,必须精心设计、精心施工。而通常施工的技术文件的根据,就是设计图纸以及设计计算说明书。设计计算的核心是根据所设计的机器和零件在特定工况、结构、材质和环境等条件下可能发生的基本失效模式而建立的相应设计计算准则,即保证在给定条件下正常工作(不失效)的准则;从而定出合适的结构、形状、尺寸、材质与有关技术要求,提出必要的技术条件,如图纸、说明书、软件等。

1.2.2 制造工艺因素

实际上,相当数量的零件,尽管其原始设计是正确的,但如果工艺制造条件不满足设计要求,仍会发生各式各样的故障模式而导致失效。

从普通零件的大致制造工艺过程看,可能会产生:锻造起层、冷热裂纹等;焊接未焊透、异常偏析、冷热裂纹等;铸造疏松、夹渣等;机加工的尺寸、公差、形位公差和表面粗糙度不合格、表面鳞翅等;热处理工艺缺陷如淬裂、回火脆裂、硬化表层的组织缺陷、硬度不足、厚度不合适、硬软层硬度梯度过大等;精加工磨削中的烧伤与磨削裂纹等。

1.2.3 装配调试因素

在零部件组装成机器以及机器安装过程中,如不

能保证要求的质量指标,即“装配不良”,也是导致机器发生某种失效的重要因素。相应于通用机械零件的基本部分,其装配不良通常表现为:

啮合传动件(如齿轮、蜗杆、螺旋等)的啮合间隙不合适(过松或过紧),接触状态未调整好;

联接零件的必要“防松”不可靠,铆焊结构的必要探伤检验不良等;

轴与轴承配合不良,间隙调整不妥,联轴器定位与对心不良等;

润滑与密封装置不良。

由安装装配失误而造成故障的情况也时有发生,有时甚至很严重。例如,轴承组 7000 要求应为“外八字”安装于轴两端,但由于疏忽而装成“内八字”组合,均将使结构严重恶化而造成严重故障(如装拆困难、甚至无法定位等)乃至机器被迫停车。又例如,往基础上安装某大型电机的减速机时,由于未按设计要求在减速机底座与基础之间漏放绝缘垫片,致使该减速机齿轮在开机很短时间内造成严重电蚀烧伤而失效。

此外,机器及其可动零部件(摩擦副)的装配过程,常需伴随调试和跑合工序才能保证正常运转。例如一根传动轴上的轴承组,其轴向、径向间隙是否合适,应以初步安装后的试转灵活程度(在要求严格时还应检查其跳度)为准,并利用某种调整装置(如调整垫、螺旋或液压调整器)予以适当调整。

对于机器经初步安装调试后,通常宜于进行逐级加载(例如,对于中重型减速器,常以 1/5~1/4,1/3~1/2 满载荷跑合运转几个小时)进行跑合运转,然后予以清洗及必要的调修。经跑合的机器设备,其性能与寿命较之未经跑合的会有明显提高,某些机器及零部件,经跑合过程才能达到其正常工作能力。

1.2.4 材质因素

相当多机器的主要失效原因与其关键零部件的材质因素密切相关。材质的内部缺陷实质上是其内部的应力集中源。当其在外界载荷作用下(有的甚至在未受外载的情况下)材质缺陷处呈现高应力水平而导致发生某种失效。材质造成的失效,可能由于设计选材不当,也可能由于毛坯(铸、锻、焊)工艺或冷热加工(特别是热处理)工艺过程产生的缺陷,也可能由于安装调试不当、材料未经“预炼”、“驯服”、“跑合”(“磨合”)以及检验不严而残留下缺陷。

1.2.5 运转维修因素

首先是对运转工况参数(载荷、速度等)的监控,使维修制度合理、先进。并应逐步由定期(大、中、小)维修向“视情维修”(即“预知维修”)过渡。

再者,润滑条件是否保证,也是一项重要因素。润滑条件通常包括:润滑剂选择是否合适、润滑装置功能是否正常以及润滑方法、冷却加热、过滤系统是否合理可靠等方面。

最后还应指出,以上失效的基本影响因素中不能忽视人的因素,特别是人的素质条件。

2 失效分析的基本内容与故障诊断的基本类型

2.1 失效分析的基本内容

2.1.1 失效分析对象与作用

机械设备失效分析对象当然是针对一个机械系统、一台机械设备,或其中关键零部件的失效。分析工作的目的主要是为了提高经济效益和社会效益。其作用或目的分列如下:

- 1)防止事故重复发生;
- 2)控制事故、不使扩展;
- 3)找出事故关键,提高产品质量,指导改进工艺;
- 4)提供技术改造和制订技术文件的科学依据;
- 5)提供事故仲裁、案件侦破、失效保险等的技术依据;
- 6)提供科学决策的信息依据(失效分析结果的统计积累)。

2.1.2 失效分析工作三要素

根据故障诊断与失效分析的定义与客观过程,一个失效(故障)事件分析的基本过程和内容常包括:查测(detection)、诊断(diagnosis)和处置与预测(prognosis)等三个阶段(要素):

1)查测 利用各种调查检测手段明确诊断分析的对象在现场环境、工况参数和有关信息。针对不同复杂程度的具体情况,进行不同层次的查测工作。较简单的情况是现场宏观调查和检测就可基本查明,则不需作进一步专项检测(如微观检析、理化检验、模拟反馈试验等);一般情况下,常在现场初检的基础上提出进一步检测方案与专项检查题目作进一步检验。具有监测装置(如转矩、应力、位移、温度等监控装置)的机械设备,对于查测诊断是很方便与有效的:因为无论对于待检验设备的失效前或失效当时的有关工况参数,均可查阅监测记录得到较为准确的数据与信息以利于诊断。可见,查测工作是诊断分析的基础。

2)分析诊断 在查测的基础上,结合具体情况分析确定所诊断对象的状态(失效及其程度),故障或失

效的类型模式,大体过程和基本原因,决定性因素以及失效机理等。这种诊断,通常称为“精密诊断”。在现场,常只需指出所诊断设备的状态特征——正常性,而不作精确定性以及定量诊断;这种诊断称为“简易诊断”。因此,精密诊断可能是一开始就要求进行,例如对某些重要失效分析任务,也可能是由简易诊断发展而来。

3)处置与预测 诊断对象经精密诊断分析判定其状态性能、失效类型模式、失效主要因素和机理等,就可以提出相应的对策。后者应是分析诊断的目的。相应对策的提出不仅根据诊断的结论,还必须考虑到具体条件的可行性,其中应包括经济性因素。至于某项对策是否真正有效,当然应以实际效果为准,这就是所谓“反馈”。反馈的过程,可以说是认识更进一步逼近符合实际的过程。实际上,一次反馈工作就是针对原诊断的一次新的故障诊断与失效分析工作。

2.1.3 失效分析与其他学科的关系

从失效分析工作的发展阶段与现代科学技术的支持水平看,失效分析工作从通常的“事后分析”、“事先预防”已发展到“事中(运行)监控分析”。

从失效的典型模式与基本影响因素来看,失效分析涉及的工作领域与学科领域很广:

断口分析—断口学、断裂力学;
变形分析—材料力学、弹塑性力学;
表面损伤分析—摩擦学、腐蚀学等;
裂纹分析—裂纹学、工艺学;

其他功能分析—相关的学科,如摩擦元件失效分析为机械设计学、摩擦学;“泄漏”与机械密封与流体力学等;

理化分析—化学分析学、物性学、金属工艺学、金相学等;

工况分析—监控技术、材料学;

质量分析—质量管理与控制等。

因此,失效分析作为一门学科,即失效分析学,或简称“失效学”,它与其他学科有着内在的联系,如图8.1-1所示。由图可见,失效学是一门新兴的边缘学科;并且正在引入人工智能,发展失效分析与故障诊断的专家系统。

2.2 故障诊断的基本类型

工程中系统(机器、设备)的运行状态及环境条件多种多样,由此就产生了不同类型的故障诊断。

2.2.1 性能诊断和运行诊断

对于新安装的或刚维修好的系统(设备、机器及其部件等),需要诊断它的性能是否正常,并根据检查和

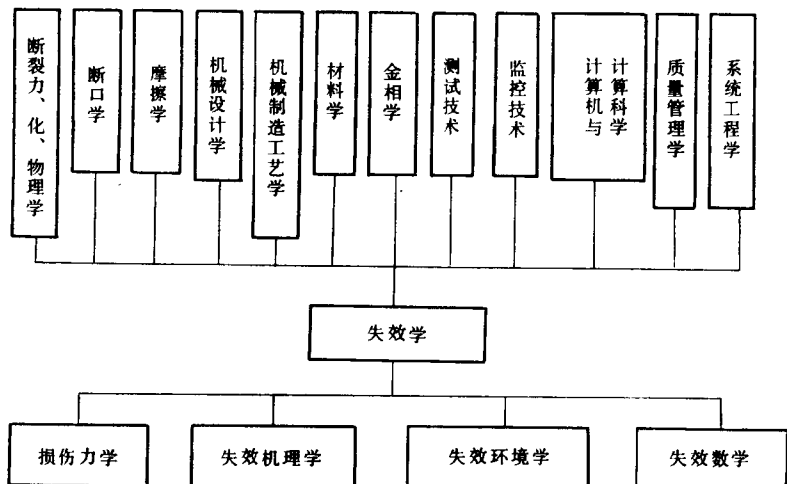


图 8.1-1 失效学与其他学科关系

诊断的结果对它进行调整,这就是性能诊断;而对正常服役的设备或系统则进行运行状态的监视,以便对故障的发生和发展能进行早期诊断。

2.2.2 定期诊断和在线监测

定期诊断是隔一定时间对服役的设备进行一次检查和诊断,而在线监测则是采用仪表和计算机信号处理系统对设备运行状态进行连续监视和检测。采用哪种诊断方式,需要根据设备的关键程度、设备故障影响的严重程度、运行中设备性能下降的快慢程度以及其故障发生和发展的可预测性来决定。

2.2.3 直接诊断和间接诊断

直接根据关键零部件的信息确定这些零部件的状态就是直接诊断,例如轴承间隙、齿面磨损、轴或叶片的裂纹以及在腐蚀条件下管道的壁厚等。至于间接诊断,可用于:在技术上(如设备具体结构、服役条件等)或经济上限制采用直接诊断的情况下。

前面已经提到间接诊断是通过二次诊断信息来间接判别关键零部件的状态变化。多数二次诊断信息属于综合信息,因此误诊断,也就是出现伪警和漏检的可能性会增大。

2.2.4 常规诊断和特殊诊断

在常规工况也就是在机器正常服役条件下进行的诊断叫常规诊断,大多数诊断都属于这一类。但在个别情况下需要创造特殊的服役条件来采集信息,例如动力机组的起动和停车过程要通过转子的扭振和弯曲振动的几个临界转速,就需要采集在起动和停车过程中的振动信号,而这些信号在常规诊断中是得不到的。

2.2.5 简易诊断和精密诊断

简易诊断相当于人的初级健康诊断,一般由现场作业人员实施,能对机械设备的状态迅速有效地作出概括的评价,它具备下列功能:

- 1)机械设备的应力状态和趋向控制,异常应力的检测(强度方面);
- 2)机械设备的劣化和故障的趋向控制及早期发现(性能和效率方面);
- 3)机械设备的监测与保护,及早发现有问题的设备(患者)。

精密诊断的目的是对用简易诊断判定的“大概有点异常”的机械设备进行专门的精密诊断,由精密诊断的专家来进行,它具备下列功能:

- 1)确定故障的部位和模式,了解故障产生的原因;
- 2)估算故障的危险程度,预测其发展;
- 3)确定消除故障,改善机械设备状态的方法。

3 失效分析的基本思路与方法

通常,对于某一失效或故障的本质影响因素较为简单的情况,可以通过具体失效模式的分析,由现象到本质,顺藤摸瓜,不难抓住要害。至于较为复杂的系统失效,则必须按失效分析系统工程方法来处理,才能查清根源、解决问题。

3.1 失效分析的一般思路

如果以 σ 表示广义的应力,例如各种力(拉力、压力、扭矩、摩擦力等)、各种应力、各类变形、压强、磨损量等;而以 $[\sigma]$ 表示广义的许用应力,例如各种许用力、各种许用应力、各类许用变形、许用压强、许用磨损量等;则根据失效的基本意义,失效可能发生的一般判据

为

$$\sigma > [\sigma] \quad (8.1-1)$$

相应可得正常工作(不失效)的判据为

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (8.1-2)$$

对于某一机械或其零部件是否发生失效,可由式(8.1-1)和式(8.1-2)来判定。也可由图 8.1-2 表示。

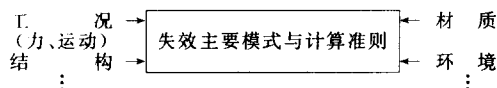


图 8.1-2 失效分析框图

例如,某轧机主减速器与轧辊之间的连接机人字齿轮轴失效,经初步诊断:其主要失效模式为断轴。断轴部位为在靠轧机一侧轴端(“扁头”),断口及断裂方位异常(后轴内部沿轴线方向延伸),因此该断轴为随机断裂,其失效框图见图 8.1-3。

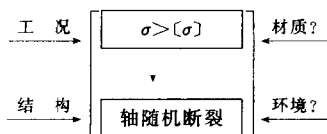


图 8.1-3 齿轮轴随机断裂框图

3.2 失效分析系统工程方法

对于影响因素较为复杂的失效分析对象,例如一个电站、一个化工厂、一个机组、一个传动系统,甚至某一相关因素很广的机件,特别是各影响因素之间存在着用一般分析方法难以综合分析的因素(人为因素、软件因素等)以及各种复杂逻辑关系的因素时,则需要应用“失效分析系统工程”的思路与方法来进行失效分析。其目的是为了正确反映其各层次影响因素的错综复杂关系,找出故障关键以及各种因素的严重程度与所起作用的大小。

随着现代科学技术的发展,人们的认识水平与手段(如计算机、电子显微镜、高速摄影机、热象仪等)也逐步趋向高科技化。这对复杂系统的失效分析提供了物质条件。因此,出现了一门把复杂设备和人的因素当作一个系统、运用数学方法和现代化工具来研究系统失效的因果之间的各种逻辑关系,并计算出系统失效与其组成部分失效之间定量关系的综合性管理工程技术。这就是失效系统的分析工程学也称为失效分析系统工程,或简称“失效系统工程”或“故障系统工程”。

系统失效分析方法很多,常用以下几类:

(1)按分析失效故障的关键因素分

1)主次图法 主次图又名排列图或巴雷托(Pareto)图。它可用于分析查明系统失效的主要模式及主要矛盾所在,以便缩聚分析范围,提高分析效率。

如图 8.1-4 所示,主次图是一个坐标曲线图。其横坐标 x 为所要分析对象,如某一系统中各组成部分的故障类别或某一设备失效部件的各种模式,或某一失效部件的各种原因等。各组成部分或因素均占相等的横距 Δx 。主次图的纵坐标为横坐标所标示的分析对象的量值,如失效系统中各组成部分的故障小时(左坐标线)及其相对频数,右侧纵坐标即各组成部分占该系统在某一阶段内的百分数。各 Δx 应按故障严重程度由左向右逐渐减轻排列,以便由各 Δx 为底边的矩形块的右上角作为坐标点绘制排列主次曲线,即巴雷托曲线,如图 8.1-4 中曲线 C 所示。

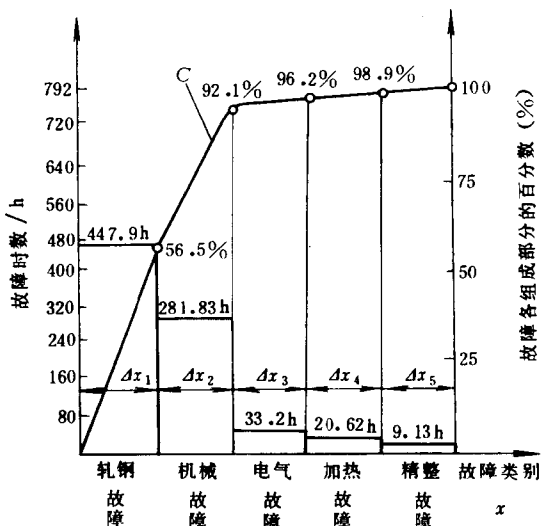


图 8.1-4 某轧钢系统故障主次图

2)特征—因素图法 这是把事故的“特征”(某一失效结果现象,如断齿、蠕变等)及其影响因素(失效原因)利用“鱼刺”状图形联系起来,比较明确地表示出了失效对象与其影响因素之间的因果关系。因此,特征—因素图法又称因果图法,有的称为“鱼刺图法”。图 8.1-5 为一焊接压力容器破裂事故的因果图。图中右侧方块为“特征事故”(破裂)。它是由左侧粗实线所连方框中“设计有误”、“材料有误”等所导致,而“设计有误”、“加工有误”等因素又由上下相连的细实线各因素所造成,从而明确了因果关系,便于对“特征”故障进行分析,找出关键。

(2)按失效模式的影响分

1)失效模式、影响及其后果分析(FMECA);

2)失效树分析(FTA);

3)事件树分析(ETA);

4)FMECA、FTA 与 ETA 的综合分析。

FMECA、FTA 和 ETA 这几种较复杂的分析方法详细说明见可靠性计算(本手册第 15 篇)。

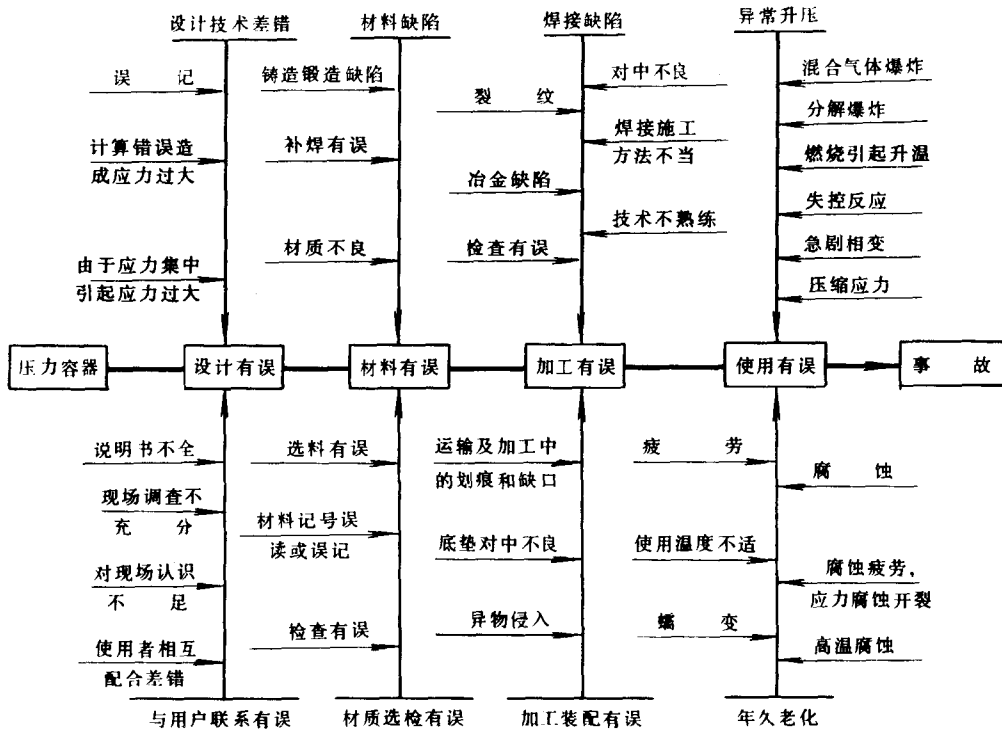


图 8.1-5 焊接压力容器破裂的因果图

以上常用的系统分析方法的功能特点见表 8.1-

(续)

4。

表 8.1-4 常用系统失效分析方法的功能特点

分析方法	主要功能特点
主次图分析	便于分析系统中的基本环节与关键,尚可用于质量管理
特征—因素图分析	从全面地分析,剔除决定特征(故障)的各次要因素,逐步地抓住主要或基本因素
失效模式分析(FMA)	从失效特征确定失效模式
失效影响分析(FEA)	从失效的各种模式中比较其对系统的不同影响
失效危害性分析(FCA)	从该失效的各种模式中确定危害性所在及严重程度
失效模式、影响和危害性分析(FMECA)	综合 FMA、FEA、FCA 的分析方法,可更全面分析故障原因,提出对策,可用于事前、事中与事后分析
失效树分析(FTA)	FTA 是一种对失效事件的图解演绎和逻辑推理方法,直观性好且逻辑性强
事件树分析(ETA)	ETA 是从原因事件到最终事故发生的顺时序分析方法;从时序因果关系上看,ETA 与 FTA 正好相反,功能上与 FTA 基本相同

分析方法	主要功能特点
FMECA 与 FTA 综合分析	具有 FMECA 与 FTA 的综合功能
FTA 与 ETA 综合分析	具有 FTA 与 ETA 的综合功能

3.3 失效分析的一般过程与步骤

尽管机械设备及其零部件种类繁多,功能各异;但其失效模式及对其分析方法又具有相对的典型性。因此,可以对某一机械设备或零部件的失效分析提出一般分析过程与步骤。当然,对于某些较为简单的情况也可简化而不必逐条照搬。

3.3.1 失效对象的现场调查

现场调查所得是认识失效对象的第一手材料。查得是否真实、全面、及时是决定该项失效分析的首要问题。

为要查实,首先应注意必要的现场保护,以备调查失效瞬间的现场实况以及追踪线索。例如,失效发生时现场的工况监测状态(不应随意变动或复位);断裂失

效的断口副^①不应碰或擦擦;断口锈蚀等残留物不应随便去除。因为,失效的重要原因有时可能与上述状态有本质联系。

现场调查的一般内容有:

- 1)故障设备及其最严重零部件的损伤情况,例如传动系统断轴的断口情况及其相关件的情况;
- 2)故障发生过程及其影响;
- 3)故障发生前的异常情况、工况(载荷、速度等)、环境条件、运行条件等;
- 4)与故障有关的人证、物证、时空条件;
- 5)设备及关键故障部件的结构原理、类型、原始设计图样及说明书、材料检验证书或TQC证明;
- 6)现场集取必要的试样,取样时应注意记下所截取的部位(试样与本体的关系)、进行编号、标明取样的方法(线切割、气割或锯开、敲裂等)、截取部分的保护(防锈蚀、防油污染等),但不宜涂油脂、清漆等覆盖层而应以温热风吹干、并封入干燥皿内。

现场初步调查材料的记录设备除手记外,常用照像机(对于特别重要的物象,宜用一次成像相机以便就地获得像片)、微型录音机(录取重要证词及异常环境声响等)、摄像机等。

3.3.2 现场初步分析

初步分析的首要任务在于找到失效对象的关键部位,并初步确定其失效模式和可能的影响因素。

对于常见的疲劳断裂模式,可通过断口宏观分析找到源区、疲劳扩展区与瞬断区,并在这三个区的大小及形貌可大致看出其影响因素中,过载因素、应力集中因素所起作用的大小。

对于磨料磨损,其环境因素或润滑因素以及材质因素的影响在宏观初步分析时应予考虑。

对于不正常的变形,特别是局部塑变,则常可追溯到严重过(偏)载以及材料硬度偏低的问题上去。

对于摩擦功能失效,例如制动摩擦力矩不足而接触表面局部磨损很严重,则可能是制动闸块与轮面的接触不均,尽管材料副也是重要的。

失效宏观分析常常是整个失效的关键或基础:因为在某些情况下,只需宏观分析就可以满足要求了;而在另一些情况下,宏观分析的初步意见和线索可以提供作进一步微观或其他分析。

现场初步观察分析可利用肉眼以及放大镜、显微镜和现场金相等手段来进行。

然后,提出进一步分析的计划,特别应明确供进一步的力学或材料测试分析用的试件取样计划。

如果失效分析涉及法律问题,则现场调查与初步分析,特别是现场资料的各种记载,应由有关方面共同

签署并指定有关方面协商同意的专人保管。

3.3.3 检测试验、查清失效原因

根据不同失效类型及其基本影响因素,有针对性地进行分析以确定基本的并进而抓住主要原因。虽然对于每一个具体机械设备失效故障的分析应有相应的检测、试验及分析的内容;但总是离不开“直接”与“间接”两个基本方面。直接方面:力学(载荷、应力、变形等)、材质(材料种类与组织状况、化学分析、力学性能、表面状态等)、环境(高、低温、化学作用、辐射等);间接方面:控制功能(机、电、液等控制功能、安全装置、软件等)、人员素质(责任感、生理极限等)、社会(法规、公共关系等)以及自然灾害等。

以上各项有关检测试验的内容,对于具有现代化监控装置的机械设备,则可方便而较准确地查出失效前的载荷谱、变形量、温度变化率等资料而不必再进行那些(在失效后有不少情况也难以复现的、但对事后失效分析具有重要作用的)检测与试验。

1)力和应力检测 由失效设备,特别是失效部位的损伤情况调查,追溯其受载历史并初步分析其受载状态(外力大小、方位、性质,如静载或动载,有无冲击和疲劳等)。还应查明失效部位的应力状态与应力水平是正常的还是异常的(热应力、装配应力、有害的残余应力或是腐蚀应力等)。并进行初步应力估算。对于不明确的情况,可以进行可能的测试(如电测),或以载荷系数加以简化处理。

2)材质检验 首先应分清材料品种,再辅以化学成分定性(光谱)分析与定量化验,判断其是否符合设计要求的成分与材质。

同时,应检查失效件的表面状态,如加工粗糙度、原始裂纹情况、腐蚀、磨损、点蚀、剥落、胶合、擦伤以及塑变等(定性与定量)。

此外,在宏观分析基础上,对试件进行金相组织检验,例如对表面失效件进行表层检测:硬化层深、表层组织状态(类型、晶粒度及其均匀度)、表层缺陷状况(夹渣、疏松等)。对疲劳断口进行源区检查时,如发现有异常状态(如微裂纹)常定向(如垂直该微裂纹)切取小块材料,进行裂纹源追踪及金相组织分析,以找到重要的裂纹源线索(例如某种夹渣)。

3)力学性能试验 它常包括硬度、抗拉强度 σ_b 、屈服点 σ_s 、冲击吸收功 a_k 、疲劳限 σ_{-1} 、断裂韧性 K_{Ic} 或 J_{Ic} 等。根据这些能检验失效件材质的力学性能是否满足

① 断口副是指断裂体的两断裂处对应部分,例如轮齿断口副是指齿轮的已断下齿的断裂处与相应的断齿齿轮母体的断裂处。——作者注

设计要求,以便找出其薄弱环节。

在失效件进行力学性能试验中,最简便可行的是硬度试验。通常,除了测微区的显微硬度时,需要制备一个粗糙度值 $Ra > 3.2$ (对重要表面)的待测表面以外,其他均可在待测面上方便地测得。如应用超声硬度计等无损检测工具时,则被测表面压痕,用肉眼几乎观察不到。硬度试验值的功能较多;评价表面处理(或未经处理)的规定硬度值是否达到;硬度可间接近似地反映该种材料的拉伸强度近似值,还可检查加工硬化或加工软化的程度。在使用硬度计时,有一点应特别注意,即所用测量触头必须与被测表面保持垂直,否则误差会很大、所得重复数据的离散性大。

上述检测项目中,对失效分析,尽可能采用无损检测。对于表面状态及缺陷(表面或表层的裂纹及不连续缺陷等),除前述检查硬度可用超声硬度计外,对黑色金属,常采用磁粉检验、液体渗透剂检验、超声波检验以及导电材料的电磁(涡流)检验。面对于材料内部缺陷和应力测定,无损检测方法常采用射线法(x 射线法和 γ 射线法),因为这类射线能直接透过试样并达到照相机的底片上。

应力的无损简易检测法常用:涂层法、光弹法、 x -射线衍射法等。后者可用以测定零件的残余应力。

3.3.4 提出结论与报告

分析调查与检测、试验所得的结论,应实事求是,力求全面、明确、公正地列入失效分析报告中。

失效分析报告除有明确的结论外,还应有足够的事实与科学试验的结果以及必要的分析与对策。通常失效分析报告包括如下几个基本部分:

- 1)对失效机件的实况说明(包括机件失效时及失效前的工况条件与环境条件等);
- 2)失效件的力学(含必要的摩擦学)分析,即“广义应力”分析;
- 3)失效件的材质分析,即“广义许用应力”分析;
- 4)失效机理综述与失效分析结论;
- 5)失效的对策建议。

以上内容是对一般情况而言的,不一定对每个报告都必要。此外,为使报告内容突出重点,通常在开头写一个简明摘要;对于报告中各种实验、计算等的全部内容可摘列于报告的附录中。

第2章 金属断裂与断口分析

1 金属零件的脆性断裂

金属零件,由于制造工艺失误或由于使用工况条件(环境、温度等)不当,都可使其材质变脆而发生脆性断裂(简称脆断)。脆断是一种危险的突然事故,危害性很大。

1.1 基本特点

1.1.1 低应力断裂

脆断的零件,其工作应力较低,通常不超过材料的屈服限,甚至还低于按常规设计程序确定的许用应力,故脆断常称为低应力脆断。

1.1.2 裂纹源

脆断常是从材质缺陷为断裂源开始并扩展而造成的。这种宏观裂纹源可来自:工艺过程缺陷,如轧钢时未消除马氏体时效钢组织上的不均匀性而导致产生细裂纹;结构设计不当使局部结构应力过度集中而产生裂纹;使用中产生疲劳或应力腐蚀裂纹。这类裂纹常在远低于屈服限的应力下逐渐扩大并导致突然断裂。

1.1.3 韧性转变脆性

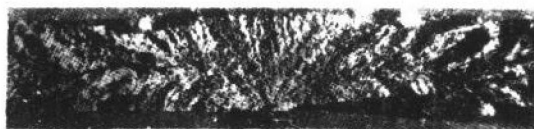
中低强度钢在工况温度低于 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 时,常发生韧性状态向脆性断裂的转变。如体心立方晶格的金属当温度降低时,强度明显增加,韧性相应降低。钢的结构以铁素体钢、珠光体钢和马氏体钢对于“温度效应”最为敏感,高强度钢则不敏感。此外,随着晶粒尺寸增大及杂质在晶界上的偏析,都对金属的韧脆转变有影响。

1.1.4 宏观断口形貌

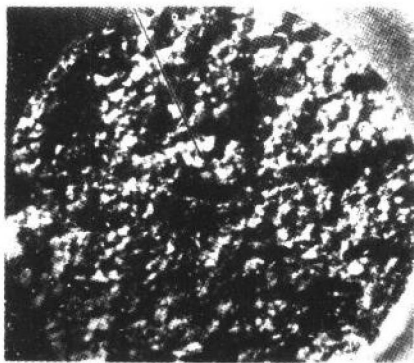
脆断断口通常平齐而光亮,且与正应力相垂直;断面收缩率一般低于3%,断口常有放射花样或人字纹,如图8.2-1a所示。若材料处于极脆状态下断裂,则放射线将消失,即为纯解理断裂,其宏观断口呈晶粒状,如图8.2-1b所示。

1.2 微观机理

脆断断口有解理断裂和准解理断裂两类。



a)放射花样断口



b)晶粒状断口

图8.2-1 金属零件的脆性断口

1.2.1 解理断裂

解理(包括准解理)断裂在金属断裂故障中是经常遇到的。解理断裂不产生或很少产生塑变。

典型的解理断口电子显微照片,见图8.2-2。其特征如下:

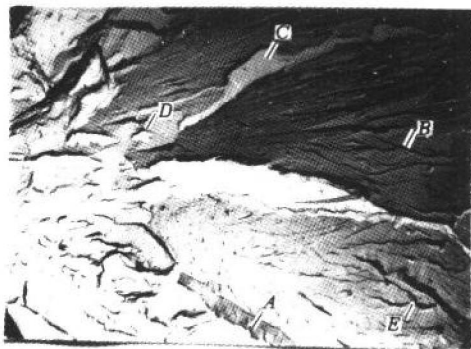


图8.2-2 解理断裂(显微照片)

1)解理面与解理台阶 解理断裂很少沿一个晶面开裂;多数情况下,解理裂纹跨越若干个相互平行的解理面,且以不连续的方式开裂。如果解理断裂是沿着一族相互平行(具有相同晶面指数)、位于不同高度的晶面扩展,则在不同高度的平行解理之间可能形成解理台阶(如图8.2-2中A处);当解理裂纹由一个晶粒

向相邻晶粒扩展时,两晶粒的交界处也将形成台阶。

2)河流花样 解理裂纹扩展过程中,众多交汇的台阶便形成“河流花样”。这是解理断口最重要的微观形貌特征。通常,河流花样起源于晶界和孪晶界处。河流花样在裂纹扩展时倾向于合并(图 8.2-2 中 B 处):在其“上游”的许多较小的台阶汇合成较大的台阶;而到“下游”较大的台阶又汇合成更大的台阶。河流的流向正好与裂纹扩展的方向一致。所以可根据河流花样的流向,判断解理裂纹在微观领域内的扩展方向。并且在解理裂纹由一个晶粒向相邻晶粒扩展穿过晶界时,如晶粒的位向相差不大,即解理裂纹前沿穿过晶界时变化不大,如越过倾斜晶界时,河流花样仍呈连续变化,仅由一个晶粒延伸到下一个晶粒,见图 8.2-3a;但解理裂纹穿过扭转晶界时,扭转作用使相邻晶界面出现某一角度的位向差,这使裂纹不能简单地越过晶界,而必须重新形核并沿着新组成的解理面扩展区,致使台阶激增,河流线增多,如图 8.2-3b 所示。

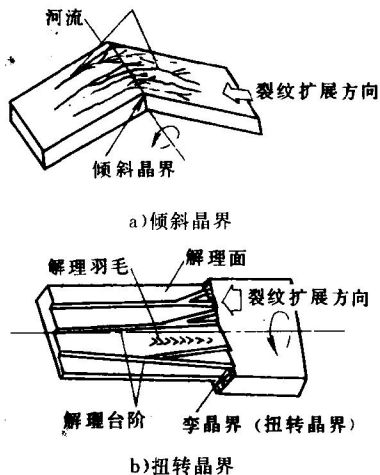


图 8.2-3 河流花样与倾斜及扭转晶界的关系

3)解理“舌”状花样 解理舌也是解理断裂的典型微观形貌特征之一。如图 8.2-2 中 C、D 处所示。它是解理裂纹沿形变孪晶—基体界面扩展时发生的;而形变孪晶又是当解理裂纹以很高扩展速度(并常在低温条件)下发生的。

4)二次裂纹 它几乎是在所有解理断口(电子金相图)上呈现。如图 8.2-2 中 E 所示,二次裂纹是与主裂纹面成某一角度的裂纹分枝。

1.2.2 准解理断裂

准解理属于解理断裂,但有以下特点。

1)准解理小断面 准解理断裂其断裂基本过程一般在一个个小断面内进行,称该小断面为准解理断小断面。而解理断裂则以河流花样等形态穿晶过界地扩

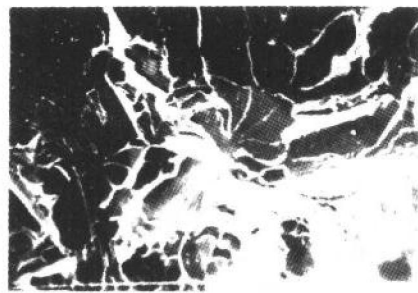
展,不呈现这种小断面。

2)裂纹源在准解理小断面内部 准解理断裂的裂纹源常来自小断面内部的微观结构缺陷,如孔洞、夹杂等。而解理断裂常起源于解理面的边界。准解理小断面内裂纹源可不止一个。

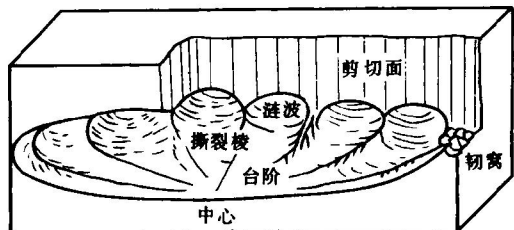
3)裂纹扩展呈放射状 准解理断裂的裂纹源扩展,常由小断面内部呈放射但不连续河流状向小断面边界扩展。当多裂源扩展时,几条放射线相互连接时撕裂而形成许多撕裂棱,并使准解理小断面稍向内凹。因此,准解理断裂比解理断裂具有较明显的塑变。

准解理断裂在回火马氏体钢中常可发现,其准解理小断面的取向不一定沿铁素体的解理面断裂,也不沿马氏体针方位扩展延伸,而是在多个方向散射解理,但总是在各自的小断面内进行。

准解理断裂典型形貌如图 8.2-1 所示。



a)照片图



b)示意图

图 8.2-4 准解理断裂的典型断口

2 金属零件的过载断裂

工程上当外加载荷超过机械零件危险截面所能承受的极限应力时,零件将断裂,这种断裂称为过载断裂,其断口称为过载断口。

过载断裂按其宏观上有无明显塑变可有脆性过载断裂与韧(延)性过载断裂之分。

脆性过载断口的宏、微观特点见上节(金属零件的脆性断裂)。

韧性过载断口,其宏观特征为断口上有明显塑变;其微观特征为由大量韧窝组成(塑变区)。

2.1 韧窝的形成和性质

韧断过载断裂是材料超过屈服限然后再发生韧断。拉伸载荷下典型韧断断口为杯锥状断口。杯锥状断口是由于在断裂过程中,缩颈处出现显微空穴并集聚长大即形成断裂时的杯锥状断口,在宏观上呈现纤维状,在微观上即为韧窝。因而可见,韧窝是塑变造成的而不管从宏观上看断裂是脆性或是韧性的。

在韧窝的内部常有夹杂物或第二相质点。这说明断裂首先是从夹杂等质点形核再扩展的。因此,对同类材质,如果韧窝尺寸越大越深,说明此零件材质的塑性越好;但另一方面,当韧窝内的夹杂物或某些脆性相质点较多较大时,使断裂源的数目增加,使韧窝变得小而浅,材料的塑性也要下降,甚至完全变脆。如无夹杂物存在,韧窝也可在材料中原有显微空穴或位错堆集等应变不连续处形成。

2.2 韧窝的类型与应力状态

相应于断裂时所受应力状态的不同,断口上可出现三种不同的韧窝:正交韧窝(图 8.2-5)、剪切韧窝(图 8.2-6)、撕裂韧窝(图 8.2-7)。

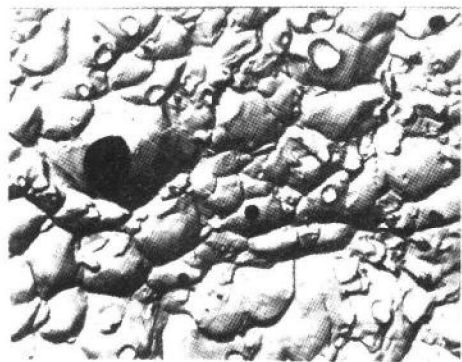


图 8.2-5 等轴韧窝

2.2.1 正交韧窝

应力垂直于断裂表面、且均布于整个断口表面,裂纹扩展的速度比较缓慢,显微空穴在各个方向上的长大速率是相等的,故形成圆形等轴或锥状韧窝。

2.2.2 剪切韧窝

这是在剪切应力作用下形成的韧窝,故其形状呈抛物线。通常出现于拉伸断口的剪切唇上。



图 8.2-6 剪切韧窝

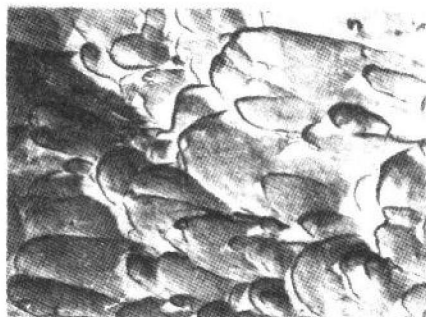


图 8.2-7 撕裂韧窝

2.2.3 撕裂韧窝

这是在撕裂应力(相当于断口在弯曲应力)作用下形成的。常见于尖锐裂纹前端及平面应变条件下作低能量撕裂的断口。由于其在受力较大的方向上被拉长,形成抛物线状韧窝。

为了区别剪切韧窝与撕裂韧窝的类同抛物线形状,则需要观察两个相配的韧窝断口上的抛物线状态,若断口副上抛物线韧窝方向相同即为撕裂韧窝,如图 8.2-8c 所示;若断口副上抛物线韧窝方向相反,则为剪切韧窝,如图 8.2-8b 所示。

综上,对于断口上出现韧窝,一般可提供韧性的信息;但还应注意韧窝形核的脆性相质点是否严重以及韧窝是否在晶界上分布。如有后者,则应把产生的断裂认为脆性断裂。因为一般常温下晶界强度大于晶内强度,所以过载断裂常是穿晶断裂;只有当材料由于合金元素偏析、氢及其他气体在晶界上富集时,才会使过载断裂沿晶界发生。

3 金属零件的疲劳断裂

疲劳断裂是指金属在交变应力持续作用下发生的断裂,其断口称为疲劳断口。疲劳断裂在工程失效中占的比例最大。

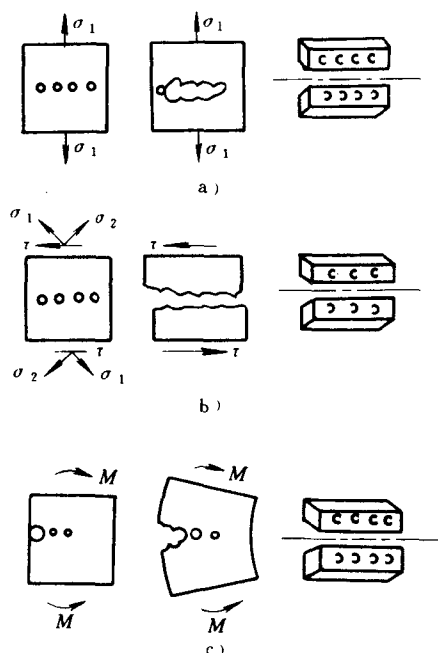


图 8.2-8 应力状态与断口切窝状态的关系
a) 等轴切窝 b) 剪切切窝 c) 撕裂切窝

3.1 疲劳断裂的基本类型

3.1.1 按疲劳断裂的不同产生基因分

1) 机械疲劳断裂 由外加变载荷作用下产生的疲劳断裂。它未计及微弱的环境影响因素。它按加载方式和类型不同又可分为：拉压(轴向)疲劳、弯曲疲劳、扭转疲劳及接触疲劳、微动磨损疲劳等。

2) 热疲劳 金属零件、构件因其温度变化引起的膨胀或收缩受到约束时，其材料内部因变形受阻而产生热应力；当温度反复变化时，引起的热应力也反复变化，其材料由此而造成的失效称热疲劳。所以热疲劳也可以说是由于温度循环变化而引起的失效。热应力的大小取决于零件的温度分布及结构形状尺寸。热疲劳按变形约束的来源又可分为热机械疲劳(约束来自构件外界，如锅炉中一些管道发生的热疲劳)和热应力疲劳(约束由构件本身造成，如厚壁零件和异型截面构件等)。对于热应力循环次数较低的热疲劳称为热冲击，如脆性材料的热疲劳。零件发生热疲劳，在其表面上常呈现“龟裂”。

应区别热疲劳与高温疲劳，热疲劳需要两个条件，一是温度循环变化、二是机械约束；而高温疲劳只是由循环应变引起的，是高温作为零件、构件的一种工作环境。

3) 腐蚀疲劳 这是一种在循环应力与腐蚀介质共

同作用下产生的失效。例如石油、化工、海洋机械的很多零件、构件是在腐蚀性液体或气体中工作的；各种露天机械设备经受风吹雨淋及空气中各种污染介质、湿度变化等侵蚀等。

腐蚀疲劳断裂应与应力腐蚀破(开)裂虽然都有腐蚀介质的环境条件才失效；但是腐蚀疲劳是由循环应力作用所致，而应力腐蚀是由非循环应力作用下产生的。

腐蚀疲劳的显著特征：由于受腐蚀介质的影响，疲劳曲线向低值方向移动。一方面腐蚀作用促使疲劳源容易形成，即腐蚀疲劳的孕育期较短；另一方面，腐蚀环境也使疲劳裂纹扩展速率增大。所以，腐蚀疲劳较常规疲劳的寿命为短。

3.1.2 按疲劳断裂寿命分

1) 高周疲劳(应力疲劳) 金属材料在低于屈服强度的循环应力作用下而有较高寿命的疲劳现象，称为高周疲劳。

2) 低周疲劳(应变疲劳) 金属材料在循环的高应力(局部应力可超过屈服点)或大应变作用下，在断裂过程中产生较大的塑性变形、断裂时的总循环次数很少(一般低于 $10^4 \sim 10^5$ 以下)的疲劳现象称为低周疲劳。

通常，不特别指明是低周疲劳的情况，疲劳断裂、疲劳断口等都是指高周疲劳断裂、高周疲劳断口等。

3.2 疲劳断口的宏观形貌特征

在一般情况下，疲劳断裂，即使是韧性很好的材料，其宏观断口也无明显变形而在宏观上表现为脆性断口。

疲劳断口的典型形貌主要体现为其上有疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区(简称“疲劳断口三区”)的特点和相互关系上。

3.2.1 疲劳断口三区的宏观一般特征

1) 疲劳贝壳纹 贝壳纹弧线是金属宏观疲劳断口的典型特征，是鉴别疲劳断口并从而确定疲劳源以及区分疲劳区和瞬断区的依据和线索。

贝纹线的形成有二，常温下是由于载荷幅度的突然变化或材料局部机械性质的变化导致裂纹扩展速率变化，而使断口的纹痕或放射状条痕方向改变，于是在宏观断口上留下裂纹扩展的痕迹，故也称为疲劳裂纹“休止线”。中温工况条件下，随着裂纹的扩展，断口氧化的时间逐渐缩短，断口颜色渐渐改变，便在断口上留下裂纹扩展前沿弧形痕迹。

贝纹线的形状总是由疲劳源出发的“圆弧”。在原始

单源的情况,由于裂纹逐渐扩展,断裂面与表面相交的两端出现新的(一般更为严重的)应力集中源,使贝纹线圆弧的曲率逐渐变小,即圆弧逐渐变平、甚至反向(由凹面朝向原始源区变成凸向)。同理,在多源相邻的情况比单源的贝纹线要曲率小些。总之,贝纹线的形状受疲劳源(零件形状、应力集中、材料缺陷等)的位向与严重程度而异、总的趋向都是由“源”出发的凹面朝向源区的弧线,多源时,诸弧线若相交,则在汇交处按合成法矢构成新的曲率弧向前推进。并且贝纹线与裂纹扩展方向垂直,同时常与裂纹扩展方向同向的由源向外放射的放射线相推并进,构成疲劳扩展区的典型特征。

疲劳贝纹弧线的间距与载荷谱变化相对应。

疲劳贝纹的清晰度与载荷变化剧裂程度和材质缺陷严重程度、甚至环境介质的影响有关。对于脆性材料、载荷幅值无明显变化或载荷过大、温度过高等条件下,就可能没有明显的疲劳贝纹线。这时疲劳扩展区与瞬断区没有明显分界线,疲劳扩展区极少甚至没有。在确定这种断口的性质时,应根据零件受力状态来分析。

2)疲劳源判定 疲劳源区一般用目测或低倍放大镜即可判定其位置。在疲劳源周围,存在着以疲劳源为焦点的非常光滑、细洁、贝纹线不明显,但为贝纹线族的焦点区和为放射台阶(线)中心的小区——疲劳源区。疲劳源区可在零件的表面(如结构形状骤变、加工刀痕、表面损伤等)或表层和内部(材质缺陷,特别是表面硬化处理缺陷等)。加载类型和载荷水平对疲劳源的位置也有影响:弯曲疲劳、扭转疲劳加载时,零件表面应力最大,易成为裂纹源,轴向加载情况下,当平均应力较大时,可能在内部缺陷处形成疲劳源;载荷水平高(加载大)时,疲劳源可出现多处。尤其低周疲劳,其应变幅值较大,断口上常有若干个位于不同位置的疲劳源。这时,疲劳多源往往是一条呈锯齿状的微裂纹,当然也可能是多源构成一疲劳源小区。

3)瞬断区 瞬断区是当疲劳危险截面的剩余有效截面不再能承受外载荷时形成的。所以,它具有过载断口的基本特征,也可以说,疲劳断口上的瞬断区是疲劳断口上的过载断口区。基本特征都是由此而来。

3.2.2 加载类型对疲劳断口三区的影响

不同加载类型(拉—拉或拉—压、单向弯曲、反复弯曲、旋转弯曲、扭转),不同应力水平(高名义应力、低名义应力)以及不同程度应力集中条件下的疲劳断口三区特征,如图 8.2-9 所示。下面说明几种典型断口。

(1) 旋转弯曲疲劳断口

如果危险截面处材质无内部缺陷,则其断口有如下特点:

1) 贝纹线间距外宽内窄,因应力分布必然是外层

大,表层最大,故疲劳源在其两侧裂纹发展速度较中部快,因此其贝纹线间距近表面处宽、中心较窄密,如图 8.2-10 所示。

2) 逆偏转现象是指旋转疲劳断口的瞬断区虽然位于疲劳源的对面,但总是相对于轴的旋转方向逆偏转一角度 θ ,如图 8.2-10 所示。此现象可提供:疲劳源、瞬断区和旋转方向之间已知两项推断第三项。

3) 高应力集中(外层)、高名义应力时瞬断区愈向中心移。

4) 变截面(如大轴肩)应力集中时,断口呈皿型。这是因为弯曲疲劳裂纹扩展方向总是与拉伸正应力相垂直。如图 8.2-11 所示,其断口常不呈平面,而是皿状曲面,称为皿型断口。

(2) 扭转疲劳断口

扭转疲劳条件下,裂纹形核后可能沿两个方向扩展。沿与最大拉伸正应力相垂直的方向扩展,称正断型(常发生于脆性材料);沿最大切应力方向扩展,称剪断型或切断型(常发生于延性材料)。当然也有复合型,例如开始为切断型,然后在发展过程中又转变成正断型。以上各种断口形态见图 8.2-12。正断型扭转疲劳的常见断口为锯齿状断口(图 8.2-13)及星形断口(图 8.2-14)。

(3) 弯-扭疲劳断口

在弯曲疲劳条件下呈现的典型断口(锯齿状断口),由于扭矩的作用裂纹将在大于原锯齿状断口(见图 8.2-13)的 45° 方向扩展而形成棘轮断口(图 8.2-15)。

综上可见疲劳断口的宏观分析是很重要的。

1) 从源区本身的光洁小区特征、贝纹线族的焦点和放射台阶的发射点等方面,确定疲劳裂纹起始源区;

2) 从宏观疲劳区和瞬断区的面积与部位等因素,确定外载荷水平与断定是高周疲劳还是低周疲劳;

3) 从贝纹弧线的形状分布及间距,确定材料的缺口敏感性、应力集中状况、疲劳源状况以及断口所受载荷谱的基本情形等;

4) 从典型断口形貌(星形、锯齿状、棘轮状等),判定相应的加载与应力集中类型(花键轴受扭、大轴肩受扭、大轴肩受弯-扭等)。

3.3 疲劳断口的微观形貌特征

疲劳断口微观分析一般是在宏观分析的基础上来进行,其作用:进一步确定断裂源的性质、查明断裂的原因(例如夹杂形核),由疲劳辉纹与宏观贝纹的关系与断裂历程可为裂纹扩展速率、疲劳寿命及载荷谱分析提供重要信息;为断裂方式与机理的理论研究提供有力证据。

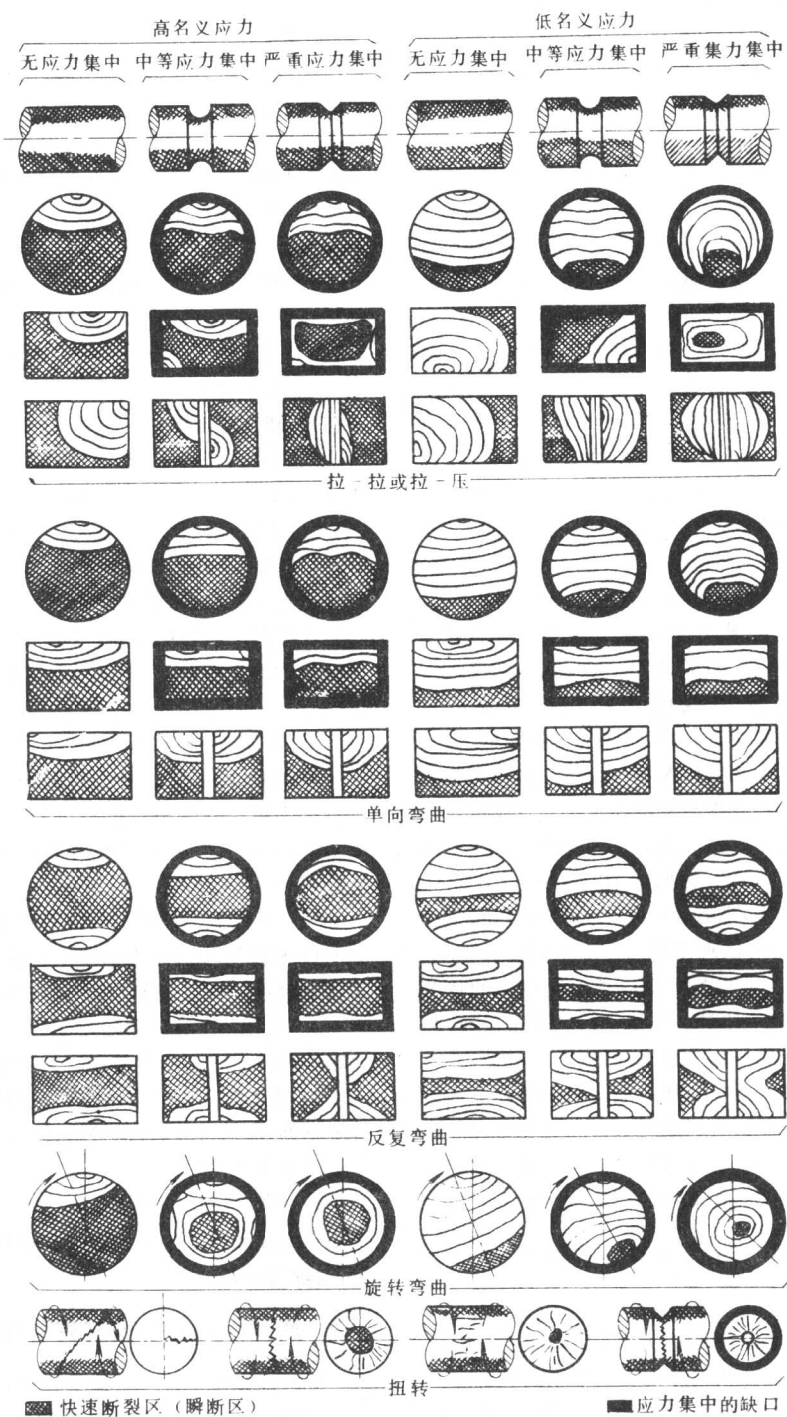
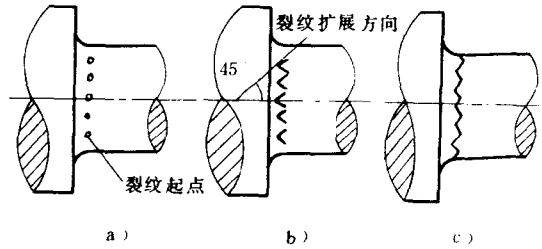
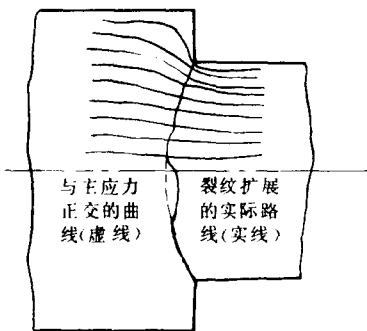
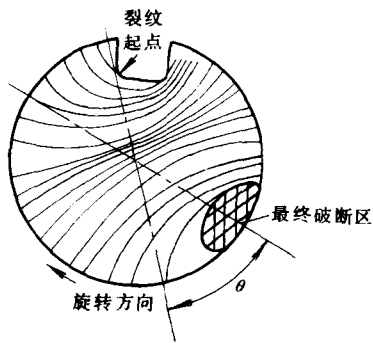
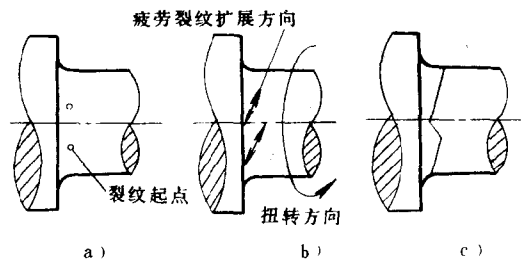
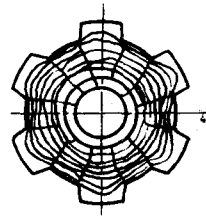


图 8.2-9 疲劳断口三区的宏观特征示意图



a) 初始微裂纹 b) 裂纹沿与轴线呈45°的双向扩展
c) 锯齿状断口



a) 裂纹起点 b) 裂纹扩展方向 c) 断口形状

扭转断裂类型	基本型	变异型	
		1	2
正断型			
剪断型			
复合型			

图 8.2-12 扭转疲劳断口的各种形态

3.3.1 疲劳源的典型微观特征

首先分析成核。金属零件表面(表层)或内部有严重缺陷处都可能产生疲劳源。通常,在零件的危险截面处,工作应力接近材料的极限应力并经多次循环后,在部分晶粒的薄弱部(“软带”)出现由细逐渐变宽的滑移带(驻留滑移带)。其“驻留”特征表现为即使其经机械磨去一层,也仍不消失。由于载荷及应力是交变的,所以这种滑移带是不均匀的。这种不均匀性常集中体现在零件表面(或表层)材料的晶界以及含夹杂、第二相粒子等处。在工作应力高于材料的疲劳极限下,在这些宽度与间距均相应加大的驻留滑移软带处,即比基体金属薄弱区,在交变应力的作用下,导致不均匀滑移。这样,便在表面形成“挤出脊”及“挤入沟”,如图 8.2-16 上部所示。第一阶段裂纹萌生从挤入沟开始,并沿驻留滑移带和晶界扩展。

有的零件表层相界面由于位错塞积而引发裂纹:表层材料中含第二相粒子以及非金属夹杂等时,因位