



机械零件失效分析

陈南平 顾守仁 沈万慈

清华大学出版社

机械零件失效分析

陈南平 顾守仁 沈万慈 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是清华大学《机械零件失效分析》课程教材。全书共十六章,分为两部分。第一部分是基础知识,从失效分析的角度,对机械零件的强度、刚度设计、断裂、疲劳、腐蚀、蠕变、磨损和环境破坏的基本规律及失效机理作了简要综述,并对失效分析中的断口、裂纹分析和材料性能估算作了较详细的叙述;第二部分是各类零部件的失效分析,包括轴、紧固件、齿轮、弹簧、起重运输机械、压力容器、电站设备等。各章中均有失效分析的实例。

本书可供高等工科院校金属材料、金属加工和机械制造等有关专业的师生作教材或教学参考书,也可供上述学科的工程技术人员和研究人员进修及参考。

机 械 零 件 失 效 分 析

陈南平 顾守仁 沈万慈 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: $24\frac{1}{8}$ 字数: 616 千字

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

印数: 00001-12000 定价: 平 4.00 元 精 7.00 元

平 ISBN7-302-00164-2/TH·6 (课)

精 ISBN7-302-00270-3/TH·11 (课)

序

机械设备的失效,是指该设备在运行中失去设计功能或者发生损伤破坏。例如,一部机床失去加工精度,一架飞机在空中失事,都是失效。失效分析的任务就是找出失效的主要原因,并据以制订改进措施,以防止同类失效再度发生。失效分析是提高产品质量的重要手段。通过许多事故,有些是灾难性的事故,人们认识了失效分析工作的重要性。现在在许多先进工业国家的现代化企业中,失效分析已经成为一项重要的业务内容。

科学技术的进步使失效分析的水平日益提高。反过来,失效分析的发展也促进了许多新学科的建立。十九世纪中叶,金属学的发展就是受到克服刀剑脆断的推动。十九世纪后期,发生了火车车轴低应力脆断事故,使新兴的铁路交通事业陷入危机,当时英国皇家学院悬赏攻关,后来由 Wöhler 解开了这个迷,用实验证明了车轴在低应力多次循环的工作条件下会发生“疲劳”而致断裂,并且提出了疲劳极限的概念。第一次世界大战时多次发生炮管炸膛事件,人们通过研究提出了用冲断小样品的能量消耗值作为判断炮钢质量和防止大炮炸膛的经验指标;到廿世纪四十年代又发展为脆性转变温度的判据;第二次世界大战期间及战后为解决大量自由轮(焊接结构船舶)断裂事故及火箭、导弹的脆断事故,促进了断裂力学的建立及发展。近廿多年来,由于材料科学、工程力学及断裂力学、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巨大发展,特别是电子显微镜的应用,为失效分析奠定了雄厚的科学基础,使失效分析作为一门综合性技术日臻完善。

整机的失效通常是由某个零部件首先损坏而引发的,因而失效分析的首要任务是判断哪一个零部件首先失效及其失效方式。但是在有些情况下,判断哪个零部件首先失效是一项十分艰巨的任务。如一架飞机失事后,残骸散落在广大的地域,收集全部残骸就是一件非常困难的事,像美国“挑战者号”航天飞机爆炸后,在大面积的海底收集残骸就更是费时、费力、费财的工作。往往要对全部残骸进行仔细的检查分析(以及对事故目击者的调查),才能判断各个零部件损坏的先后次序。对首先失效的零部件,还要判断其失效引发的部位及其破坏形式。对断裂性的破坏,就要找到初始的裂纹源及判断裂纹扩展的方式。这样才能找到真正的失效原因,从而制订正确的改进措施。六十年代中,某电站发生汽轮机破碎事故,飞逸碎片穿过一堵墙后飞出了 50 米。经过收集残骸仔细分析,发现第九级转子轮盘与轴配合的内孔键槽处断口有一片黑色区域,检验分析表明,正是由于该处发生应力腐蚀从而引发裂纹,裂纹扩展到临界值后,轮盘发生断裂,进而打坏其它轮盘、叶片,击破机壳发生飞逸。我们曾配合电力部门分析了五十年代制造的汽轮机叶轮的安全问题。据有关部门根据我们测定的裂纹扩展速度计算,有一批带伤运行的叶轮,到八十年代中期这些叶轮的裂纹将扩展至临界值,因此至少需要在八十年代初期更换这批叶轮,否则将会发生事故,影响发电能力。

零件的失效大致有以下几种形式:一是过量变形,以致在机构中失去功能,如高温工作条件下的螺栓发生松弛,汽车板簧发生滞后塑变(冷蠕变)失去弹性等;二是磨损或腐蚀造成表面损伤,影响到机构的精度或灵敏度等;三是断裂事故,这往往造成灾难性后果。

造成失效的原因,可能是设计不当(强度核算及几何形状设计及选材不当等),材料及工艺缺陷(冷热加工或热处理或装配不当所致),服役条件(磨损、腐蚀或载荷等)及运行维护不当等。至于某一具体失效事故是什么原因,要根据损坏特征去分析判断,有时还要通过模拟试验才能最后判定。分析失效原因是一件细致的工作,对复杂情况下的工件,现已总结了一套称为“故障树”的科学分析方法,应用系统工程的基本概念,通过逻辑推理,整理出一套分析步骤,以便迅速、有效地解决复杂的失效问题。

我国的机械工业是在全国解放后从无到有逐步建立起来的,从开始仿制到六十年代自行设计,这一阶段,除安全性要求很高的航空、航天部门开始重视失效分析工作外,一般机械产品的失效分析工作还未引起人们的重视。十年动乱中,质量管理制度遭到严重破坏,产品质量大幅度下降,机械设备的失效事故频频发生,到七十年代,许多技术部门才重视开展失效分析工作。到八十年代初,机械工程学会成立材料学会时,召开了全国第一次失效分析学术会议,会上提出三百多篇报告,这是我国失效分析工作发展史上的一个里程碑。

失效分析是一门综合性的技术学科,涉及材料科学、力学、摩擦学、腐蚀学和机械制造工艺学等各方面的知识。我们开设这门课程,就是希望学生在较为精通材料科学的基础上综合掌握其它学科的基本知识,学会失效分析的基本思路和方法,以适应失效分析工作的需要,并且与各个学科的专家会商时能有共同语言去分析失效原因及讨论改进措施。

对失效分析工作者不仅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政治思想素质,因为失效分析的最后结果必然涉及到事故责任,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,严肃执法。同时失效分析是一个综合性技术,一个人的知识和经验毕竟有限,特别是复杂失效事件的分析,必须与各方面专门人员合作,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,又要勇于改正自己的错误判断。一个失效分析工作者如果没有良好的政治思想素质,主观武断,或者搞不正之风,那么再完善的科学思维方法也不可能运用自如。

本书写成两部分。第一部分是基础知识,主要从失效分析的角度,对力学、摩擦学、腐蚀学及材料学等有关学科的知识进行回顾和综合。对各门学科近期的新进展,在有关章节分别作了简要介绍,读者若需要,还可以参阅有关专著。第二部分是各类机械零部件的失效分析。书中各章节失效分析实例的选择努力作到有典型性,即事故的类别及分析的思路和方法有代表性。实例中一部分是我们自己的工作,大部分是别人的工作。对别人的工作,引用、说明中可能有体会不到之处。本书引用的许多经验公式中,计量单位很不一致,可能会给初学者带来一些麻烦。此外,本书还肯定有不少错漏及不足之处,敬希读者指出,以便修订时解决。在此,对关心、支持本书出版的同志以及为本书出版花费了辛勤劳动的清华大学出版社的同志表示谢忱。

编 者

1987 春于清华园

目 录

序

第一篇 机械零件失效分析基础

第一章 机械零件失效形式及失效分析方法	1
§ 1-1 机械零件失效形式及失效原因	1
§ 1-2 失效分析方法	2
第二章 零件受力分析及强度刚度计算	11
§ 2-1 概述	11
§ 2-2 受力分析	12
§ 2-3 应力状态分析与强度理论	15
§ 2-4 动应力	27
§ 2-5 应力集中	30
§ 2-6 残余应力与装配应力	42
第三章 材料的韧性和断裂设计	47
§ 3-1 低应力脆断及材料的韧性	47
§ 3-2 缺口韧性及脆性转变温度	50
§ 3-3 线弹性断裂力学与断裂韧性	53
§ 3-4 断裂韧性在结构设计和失效分析中的应用	70
§ 3-5 弹塑性断裂力学简介	73
第四章 循环载荷下的断裂问题	76
§ 4-1 疲劳的特点及疲劳曲线	76
§ 4-2 经典疲劳设计方法及高周疲劳断裂失效原因判断	79
§ 4-3 低周(应变)疲劳寿命估算	85
§ 4-4 随机载荷谱的处理	88
§ 4-5 断裂力学在疲劳问题方面的应用	90
§ 4-6 接触疲劳	94
第五章 金属的腐蚀失效	99
§ 5-1 金属的腐蚀和腐蚀失效	99
§ 5-2 几种主要腐蚀失效类型的现象和特征	103

§ 5-3 防止金属腐蚀的措施	109
第六章 环境破断失效	114
§ 6-1 应力腐蚀断裂	114
§ 6-2 金属的氢脆	127
§ 6-3 腐蚀疲劳	129
§ 6-4 其它环境脆化问题	133
第七章 蠕变断裂	139
§ 7-1 蠕变	139
§ 7-2 金属材料的高温性能	144
§ 7-3 应力松弛	146
§ 7-4 高温工作条件下零件寿命预测	147
第八章 磨损失效	152
§ 8-1 摩擦	152
§ 8-2 磨损机理	157
§ 8-3 影响材料耐磨性的因素	160
§ 8-4 磨损失效判断和改善耐磨性的措施	169
§ 8-5 磨损失效分析案例	172
第九章 裂纹与断口分析	177
§ 9-1 概述	177
§ 9-2 裂纹分析	177
§ 9-3 断口分析	183
第十章 金属材料的组织与性能关系及钢材性能估算	207
§ 10-1 拉伸试验的性能指标	207
§ 10-2 疲劳性能	221
§ 10-3 缺口冲击韧性与脆性转变温度	239
§ 10-4 断裂韧性	250
§ 10-5 应力腐蚀特性指标	266

第二篇 各类零部件失效分析

第十一章 轴类零件及紧固件	275
§ 11-1 轴类零件的受力分析	275
§ 11-2 轴类零件的失效	285
§ 11-3 紧固件的受力分析及失效	289

第十二章 起重运输机械	295
§ 12-1 常见的失效方式	295
§ 12-2 各种零部件的失效分析及改进途径	296
第十三章 齿轮	309
§ 13-1 齿轮与齿轮传动	309
§ 13-2 常见齿轮失效方式与原因	312
§ 13-3 齿轮失效分析实例	317
第十四章 弹簧	325
§ 14-1 弹簧的受力分析	325
§ 14-2 弹簧的失效方式和引起失效的主要原因	334
§ 14-3 弹簧失效实例分析	335
第十五章 压力容器	343
§ 15-1 应力分析	343
§ 15-2 容器失效方式	349
§ 15-3 影响压力容器寿命的因素及改进途径	351
§ 15-4 典型失效事例分析	352
第十六章 电站设备	363
§ 16-1 失效分析过程和主要失效原因	363
§ 16-2 各类失效形式及其实例分析	364

第一篇 机械零件失效分析基础

第一章 机械零件失效形式及失效分析方法

§ 1-1 机械零件失效形式及失效原因

一、失效的定义

各种机械零件及构件(以下统称机械零件),都具有一定的功能,如承受某种载荷、传递能量,完成某种规定动作等。当机械零件丧失它应有的功能时,则称该零件失效。各种零件失效的形式,归纳起来可分为过量变形、断裂和表面损伤等几种类型。

二、失效形式的分类及引起各类失效形式的直接原因

失效形式一般分类如表 1-1。

表 1-1 失效形式分类

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	a. 扭曲(如花键) b. 拉长(如紧固件) c. 胀大超限(如石油射孔器) d. 高低温下的蠕变(如动力机械等) e. 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	a. 一次加载断裂(如拉伸、冲击和持久等) b. 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) c. 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。	由于载荷或应力强度超过当时材料的承载能力而引起。 由于环境介质、应力共同作用引起的低应力破断。 由于周期(交变)作用力引起的低应力破断。
3	表面损伤失效	a. 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) b. 腐蚀: 如腐蚀、冲刷、咬蚀和气蚀等	由于二物体接触表面在接触应力下有相对运动造成材料流失所引起的一种失效方式。 有害环境气氛的化学及物理化学作用引起。

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。根据有关调查,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。

§ 1-2 失效分析方法

一、什么是失效分析

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)件发生失效的原因,提出防止失效事故重复发生,提高其寿命的措施。

二、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,为准确的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。因为篇幅有限,这里只简要地介绍“故障树分析法”。

三、故障树分析法简介

故障树分析法是用数理逻辑符号,把不希望发生的各种现象(它们都是导致失效发生的潜在原因),沿其发生的经过而展开成树的形式,分析事故发生的途径、原因以及发生概率的方法。实际上是从已发生的失效事故出发逆着失效发生的过程进行分析,是一个从结果到原因的所谓逆方向分析。FTA 经常采用的逻辑符号如表 1-2 所示。FTA 的建立简述如下:

第一级:顶事件。即失效或故障事故。

第二级:导致顶事件发生的直接原因的故障事件。把它们用相应的符号表示出来。并且适合于它们之间的逻辑关系的逻辑门与顶事件相连接。

第三级:导致二级故障事故发生的直接原因的故障事件。把它们用适于其间的逻辑关系的逻辑门与第二级故障事件相连接。

如此继续下去,一直联接到底事件为止。这样建成顶事件在上(相当树根),有许多分枝的底事件在下(相当于树梢)倒置的具有 n 级的故障树。

对于复杂的系统,也可以把顶事件下的一级或二级故障事件建成几棵子故障树进行分析。最后再综合起来,这样可使问题简化,工作量减少。

由于建树者的知识范围、分析问题的依据及观点的不同,所建之“树”必然渗入了建树者的主观意见。所以不同的人对同一对象系统,可能建立起不同的“树”。因此,应邀请各方面技术工作者(如设计、工艺、材料、运行、检修等方面)来共同讨论,找出其中错误、遗漏

表 1-2 FTA 采用的符号

	序 号	符 号	名 称	说 明
事 故 符 号	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。
	4		转移符号	条件完全相同的故障,或同一故障在失效树上不同位置出现,为减少重复工作量使树简化,由一处转出,再一处转入。
逻 辑 符 号	5		“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。
	6		“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。
	7		“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。
修 正 门	8		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
	9		表决与门	m 个输入事件中有任意 n 个($m > n$)发生, 则输出事件 E 才发生。 n 称作表决与门。
	10		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。
	11		互斥或门	当或门中输入事件是互相排斥的即一个输入事件发生,而其它事件都不发生,则输出事件发生。
分析方法	12		方法符号	上、下通道间要采取的分析方法

之处,进行修改完善。

故障树要反映出系统故障的内在联系,同时使人一目了然。形象地掌握这种联系并进行正确分析。所以建树时要注意以下几点:

1. 为建好故障树,要选准建树流程。然后根据主流程确定几个分枝。
2. 合理处理好系统及部件的边界条件,即在建树前对系统部件的某些参量作出合理的模型,以确定故障树到何处为止。
3. 对系统中各事件的逻辑关系及条件必须分析清楚,不能有逻辑混乱及条件矛盾。
4. 故障事件定义要精确,不能在“树”中造成逻辑混乱和矛盾。

作为设计时的可靠性计算,在故障树建立后,还可以写出数学表达式通过概率计算,作出定性或定量的分析。

对于一个复杂的失效事故来说,利用 FTA 方法寻找事故原因可以避免遗漏。对于某个机械零件的失效,一般可以从以下四个方面去考虑 FTA 上的分枝建树过程:

1. 结构设计上的问题:因零件失效主要表现为过度变形、断裂和表面损伤。这些都与应力状态有密切关系,故此处应主要根据应力分析考虑部件的受力状态,特别是对邻近损伤部件的应力分析。除外载外,还应考虑工艺过程中可能存在的残留应力、装配应力及运行过程中的动荷的影响等。
2. 选材、加工工艺及材质上存在的问题:主要是考虑材料性能及尺寸、光洁度等是否能达到预期的设计要求,在加工或运行过程中材质是否发生变化。检验分析应重点放在引起损伤的部位。
3. 装配上的问题:装配不当可能造成局部过载,或紧配件发生松动等。
4. 使用维护中的问题:使用维护不当,如超载运行,操作错误,润滑条件变化,环境条件变化等。

重点发展哪个分枝,要根据初步整理的失效资料去判断,切忌在缺乏全面资料整理的情况下就主观肯定去发展某个分枝。只有在有把握否定哪个分枝导致事故的原因后,才能切断这个分枝。故在建树过程和初步判断时,应遵循下列步骤:

1. 调查收集原始资料:包括设计依据、材料选择、制造工艺、使用条件、环境条件、操作状况及有关样品等。
2. 残体分析:首先应对损伤部位进行表面(宏观和微观)观察及进行必要的测量,然后观察关键剖面(因此时要破坏样品,所以应在对表面观察清楚并摄影后进行),必要时进行成分分析等。在观察过程中,宏观分析(包括使用放大镜和立体光学显微镜)是非常重要的,它基本可看出断裂问题中的断口基本形貌或磨损表面、磨屑形态等。要进一步看到细节则要借助扫描电镜或透射电镜(在要知道微区或表面成分时则用带能谱仪或 X 光光谱仪的扫描电镜最方便)。

残体分析时,大多数情况下还应进行性能测定,如在残体上取样测定力学性能等,也可在残体上测量硬度。

这些数据配合收集的原始资料,根据力学、材料科学、工艺学等方面的基本原理,就可以建立故障树。然后根据故障树的各个分枝逐一判断造成顶事件的底事件(即失效原因)。在进行这类判断中,还要进行计算(如应力应变分布状态、温度场等)和实验,甚至进行模拟试验。总之,就是确定底事件到顶事件的通道。通道被切断,便说明这类失效原因

可排除。

由于收集到的资料可能不全,或者建树中判断有问题,因此可能造成分析失误,这样就应尽可能在模拟(甚至实物)试验中去再次观察失效过程,取得更多的资料来改正错误。

3. 失效分析的最终目标是提出防止失效的措施。按前面所述零件失效的原因可能是设计、工艺、材质和使用维护等。故障树分析指出的是特定条件下发生失效的主要原因,例如是设计不合理或是选材不合理。针对失效原因,采取措施可以防止再发生这类失效。但要注意,是否这个条件的改变有可能会导致另一类失效形式的发生。再有,即使分析得到设计不合理是造成失效的主要原因,但改变设计可能造成经济或其它问题,则可通过改进工艺或改善材质来解决。所以,采取的措施不一定是针对造成失效的主要原因,而是根据实际生产条件采取最经济的方法。

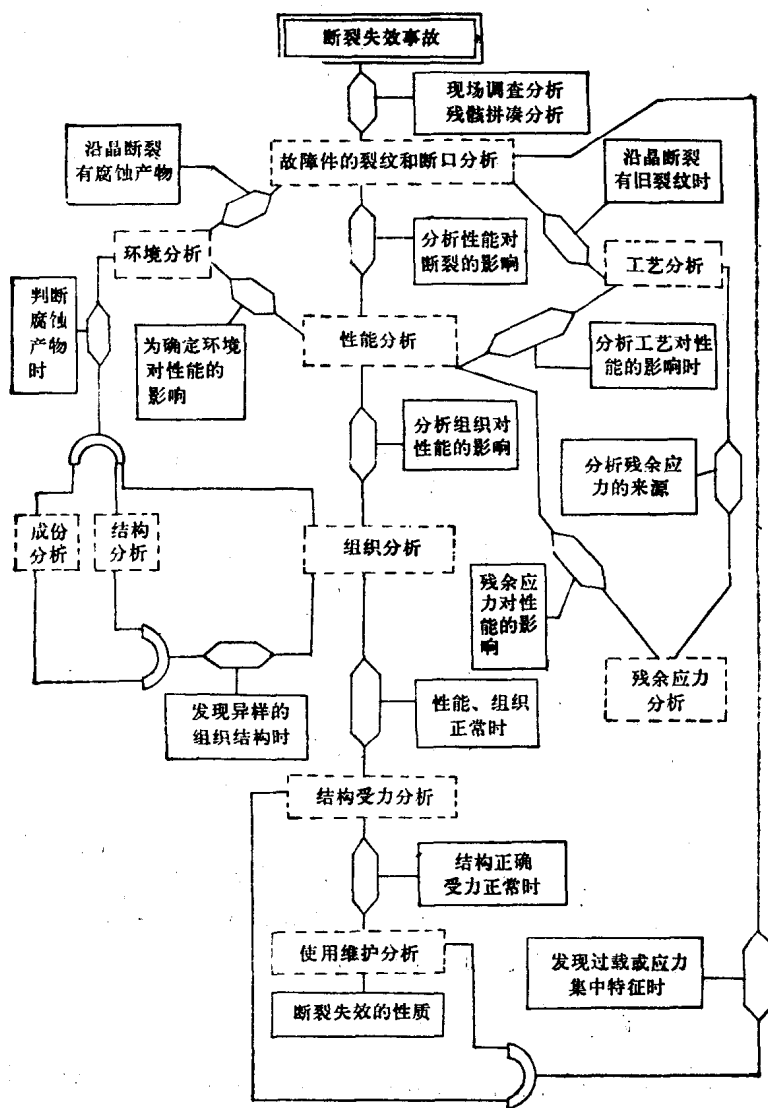


图 1-1 断裂失效分析思路图——断裂失效分析故障树

393710

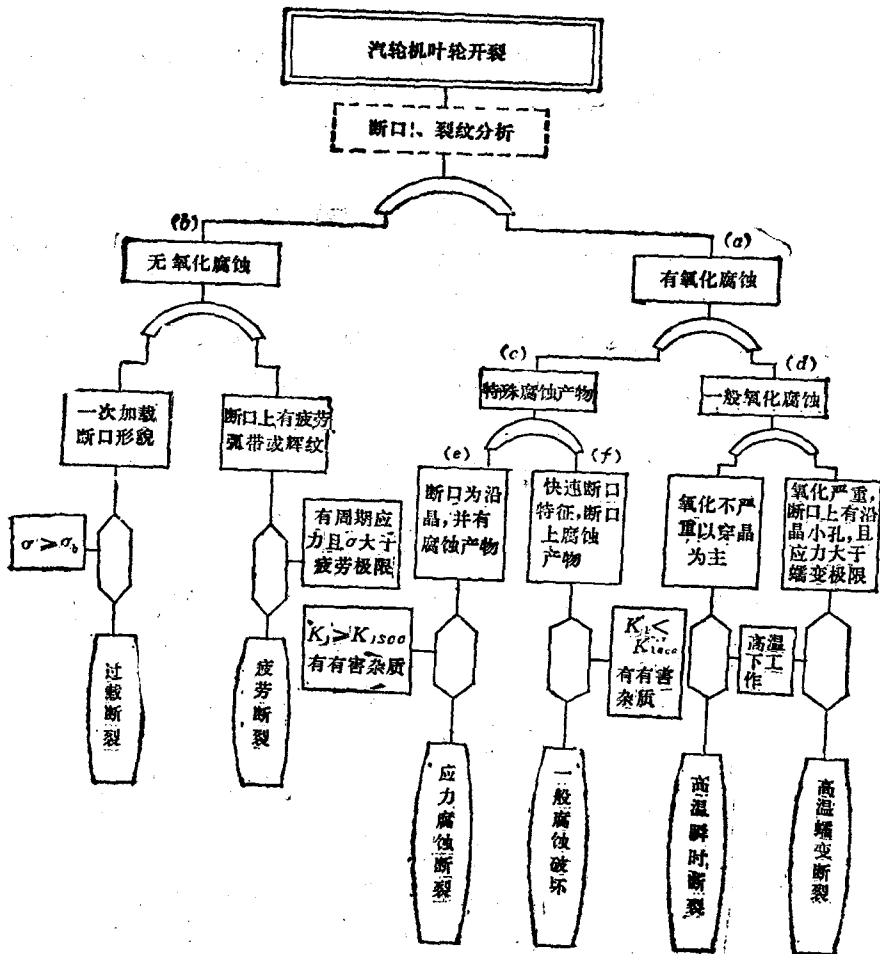


图 1-2 汽轮机叶轮开裂失效分析的“故障树”

断裂失效分析的 FTA 的形式示例见图 1-1。图 1-2 为某汽轮机叶轮裂纹分析的 FTA 图。该汽轮机运行 10 万小时后, 9 级叶轮键槽底部圆角处开裂。通过裂纹与断口分析确认是沿晶断口, 有腐蚀现象, 故沿 (a) 枝进行分析。经探针分析, 断口上富集 Cl、Na 及 S 等元素, 形成特殊腐蚀产物, 故沿 (c) 枝往下分析。经受力及应力分析, 发现由于应力集中的缘故, 在键槽底部圆角处应力很大, 因此沿 (e) 枝往下分析。对 9 级叶轮工作环境进行分析, 此处蒸汽为 $< 100^{\circ}\text{C}$ 的湿蒸汽, 且锅炉用水中含微量的 NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 等杂质。由于键槽底部圆角处存在缝隙, 故 Cl、Na、S 等元素有机会在该处富集, 再加上较高拉应力作用, 从 (e) 枝往下得出发生应力腐蚀的结论。这样就沿 FTA 的许多枝系中的一个枝系找到开裂原因。

四、一般零件失效分析步骤

一般在故障树的思路指导下, 常采用下述步骤对具体零件进行失效分析(以一个零件发生断裂为例):

(一) 调查研究收集原始背景材料,包括:

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。

(二) 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它缺陷;
- (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它外来物。

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,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,在宏观观测检验的基础上分析需要进一步了解的内容,决定需要进行何种试验分析。

(三) 零件受力和失效部位应力分析计算,必要时实验方法测定。

(四) 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,要看具体情况而定,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可能的附着物类型、微区成分、超薄表面层($10\sim 50\text{ \AA}$)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。

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。

(五) 综合分析找出失效原因,提出防止和改进措施的建议。

根据原始资料,应力分析和所作各种观察试验的结果数据,运用机械学和材料学等知识进行综合分析,找出导致失效的主要原因,并针对这些原因提出切实可行并且有效的改进措施的设想,防止失效的措施应根据失效的原因,并往往首先从选材、设计、制造和处理工艺、环境介质条件等方面去找。

为了验证所得结论的可靠性,在重大问题上,在条件许可的情况下,应做模拟实验或

(1) 形态分析方法

方 法 性 能	宏观、肉眼($\sim 40\times$ 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 $\sim 40\times$ 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: $\sim 110\times$ 2. 光学显微镜: 金相 $1500\times$ 断口 $400\times$ a. 分辨率 $<2000\text{ \AA}$ b. 景深 $<0.2\text{mm}$ 3. 光学复型断口分析术对断口分析有效。	1. 放大 $10\times\sim 2000\times$ 2. 分辨率 $100\text{ \AA}$ 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 $1000\times\sim 1000000\times$ 2. 分辨率 $\sim 1.4\text{ \AA}$ 3. 不能直接观察断口可用一次或二次复型。 4. 当电压 $>100\text{kV}$ 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,基础的和十分有效的。	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. 用于微观结构的观察

(2) 相结构、晶面晶向和应力分析方法

性 能 \ 方 法	宏观应力分析方法	微区应力分析方法	相结构分析方法	晶面晶向分析方法
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成。	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): 可测相的成份和结构。 电子衍射法(定性)	蚀坑法、二面角法电子衍射花样 x 射线
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	用于光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

(3) 成分分析方法

性 能 \ 方 法	常规的和局部的成分分析方法	微区的成分分析方法	表面的成分分析方法
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 ₂ O	电子探针: 1. 区域: $\phi \geq 0.5$ 毫米 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. < 100 ppm 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 $< 30 \text{ \AA}$ 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 $\phi 1 \sim 50$ 微米 3. 深度 $< 20 \text{ \AA}$ 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 3000 $\text{\AA}$ 用 γ 射线深 12.7 微米。
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

实物试验来进行验证。如试验结果与预期结果基本一致, 则说明分析结论基本正确, 可推广到生产实践中去进一步考验。如试验结果与预期的不一样, 则需进一步分析。