

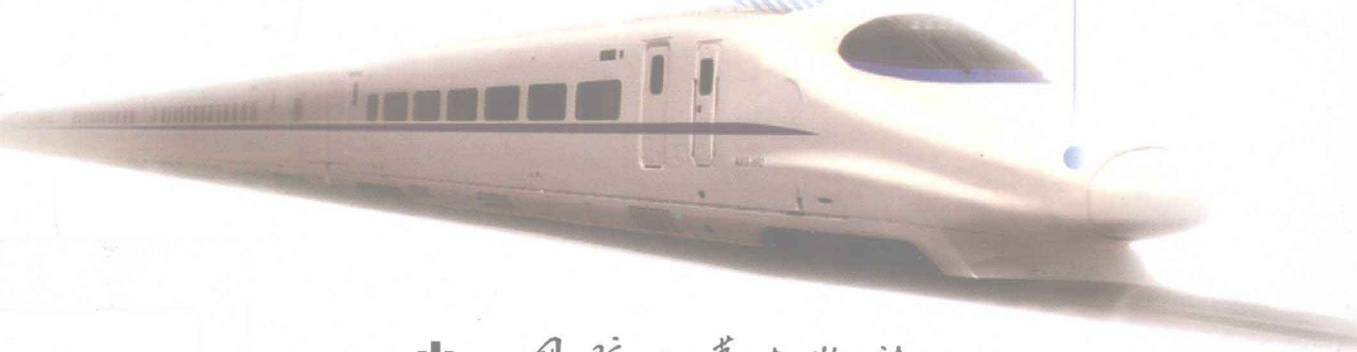
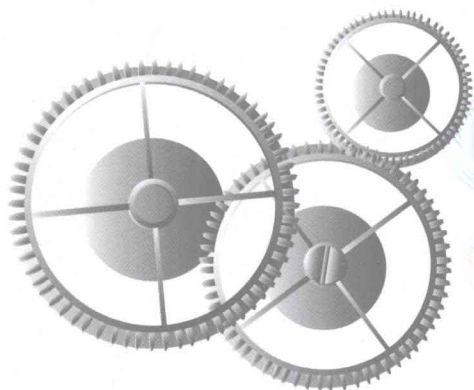
# 金属材料

JINSHU CAILIAO  
LINGBUJIAN SHIXIAO  
FENXI ANLI

# 零部件失效分析案例

——涉及大量铁路、汽车零部件

杨川 高国庆 崔国栋 吴大兴 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 金属材料零部件失效分析案例

## ——涉及大量铁路、汽车零部件

杨川 高国庆 崔国栋 吴大兴 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书提供了大量金属零部件失效分析实际案例,这些失效分析的案例大部分是涉及汽车与铁路领域的零部件,希望对初步涉及失效分析领域的科技工作者,尤其是在汽车与铁路部门工作的科技人员提供一定的帮助。本书首先对进行失效分析时所需的基础知识及在失效分析过程中需要注意的问题进行概括,尤其是对如何进行金相组织分析给出比较详细的说明,随后分类对多种零部件失效原因进行论述。最后对于一些大型失效部件,如何将各个学科知识有效结合分析其失效原因提供典型案例。

本书主要供从事失效分析工作的一线科技人员作为参考资料,同时可以作为高等院校材料专业高年级学生学习“材料力学性能”“失效分析”等课程学习的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属材料零部件失效分析案例/杨川等编著. —北京:  
国防工业出版社,2012.7  
ISBN 978-7-118-08073-5

I. ①金... II. ①杨... 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(2012)第102020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)

三河市鑫马印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 368 千字  
2012年7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

工程中零部件的失效,对相关的科技工作者来说是一个不得不考虑,不得不解决的重要问题。对失效的工程零件进行正确的分析确定其原因,找到改进方法是工程中极为重要的一个方面。目前关于失效分析的专著并不少见,但我们仍想从事这方面的工作,其目的如下:

(1) 将多年来进行过的多种零部件的失效分析结果进行系统地总结,期望与广大同仁进行共同探讨,求得批评指正。

(2) 书中的许多失效分析的案例是关于铁路与汽车相关的零部件,因而期望本书能够对对在铁路与汽车系统工作的科技人员有更直接的帮助。尤其是希望对我国高速铁路的建设有一定的裨益。

(3) 对于一些失效分析工作中的基本理论与常采用的简单分析技术进行了较详细的说明(例如宏观分析与金相组织分析等问题),希望对初进入该领域的工作者尤其是毕业不久的大学生有所帮助。

(4) 西南交通大学目前承担国家精品课程“材料力学性能”建设任务。该课程与材料失效分析密切相关,学生在学完“材料力学性能”课程后将学习后续课程“材料失效分析”。

本书可作为学生学习这些课程的参考书。

一本论著的问世总希望有其自身的特点,本书在“成型”过程中想“打造”哪些特色?我们试图归纳出以下三点:

(1) 目前对零件进行失效分析的方法众多,方法越来越先进,视野越来越微观。但多年的实践经验表明:提出进行零部件失效分析的企业,均希望尽快地得到结果,均希望采用的方法越简单越迅速、分析成本越低越好。而很多的失效部件通过宏观调查,配合宏观断口分析、金相组织分析(包括宏观缺陷分析)及扫描电镜分析一般就可以解决问题。这是最基本的分析手段。熟练掌握这些技巧对失效分析工作意义重大。目前对一些刚涉及失效分析领域的技术人员而言,在这些最基本分析手段中,最难掌握的是对金相组织进行正确的判断。金相显微镜下观察到的图像到底说明什么问题?如果分辨不清应如何解决?本书试图在此方面进行一些独特的阐述。

(2) 宏观断口分析是失效分析的重要方面,实际是它的形成与微观组织及性能间有一定的联系。本书试图在这方面进行一定的总结与探索。

(3) 如何将力学与材料学及工程方面的实际情况有机结合,进行大型构件的失效分析无疑是十分重要的。本书第6章给出具体的实际例子,以期在此方面起到推动作用。

本书第1章由杨川、高国庆编写,第2章由杨川、崔国栋编写,第4章由崔国栋编写,其余章由杨川编写。本书中的照片主要由高国庆、崔国栋提供。

第6章6.1节中空压机运动计算由西南交通大学李仁宪教授完成。6.2中的有限元计算由西南交通大学康国政教授完成,西南交通大学陈辉教授负责此项目并进行残余应力测定及对其中文字图片进行整合。

由于作者水平有限,本书要达到的目的不一定能够达到,试图打造的特色也可能并非特色,然书中的不妥与错误之处一定存在,敬请读者指正。

编 著 者

2012年2月

# 目 录

<b>第 1 章 失效部件的宏观部件与金相分析原理及方法</b> .....	1
1.1 零部件失效分析的基本步骤与目的 .....	1
1.2 材料宏观缺陷的分析方法 .....	2
1.2.1 宏观缺陷分析的重要意义 .....	2
1.2.2 常用的检查方法与目的 .....	2
1.2.3 无损检测技术的应用 .....	4
1.3 材料断裂宏观现象分析 .....	6
1.3.1 宏观分析的目的与意义 .....	6
1.3.2 宏观断口分析目的 .....	7
1.3.3 根据宏观断口形貌确定裂纹源区域的方法 .....	8
1.3.4 根据宏观断口判断断裂类型 .....	11
1.3.5 典型的拉伸断口形貌与材料性能间的关系 .....	12
1.3.6 断裂面与载荷方向间夹角和材料性能间关系 .....	14
1.3.7 典型疲劳断口形貌与材料性能与载荷间的关系 .....	15
1.3.8 疲劳宏观断口形貌与微观断口形貌关系 .....	16
1.4 光学显微镜成像原理及金相组织分析 .....	18
1.4.1 分析的目的 .....	18
1.4.2 阿贝成像原理 .....	18
1.4.3 利用阿贝原理分析金相组织 .....	20
1.5 力学分析方法的应用 .....	22
1.6 失效分析中值得注意的两种倾向 .....	23
参考文献 .....	25
<b>第 2 章 铁路及汽车小型配件失效分析案例</b> .....	26
2.1 地铁单趾弹条断裂分析 .....	26
2.2 铁路 II 型弹条断裂分析 .....	28
2.3 铁路 II 型弹条制造过程中裂纹分析 .....	31
2.4 车辆弹簧断裂失效分析 .....	35
2.5 铁路 I 型弹条断裂分析 .....	37
2.6 铁路 I 型弹条淬火硬度偏低原因分析 .....	39
2.7 铁路轴承装配时挤压力偏低原因分析 .....	40

2.8	车辆铆钉拉伸时非正常断裂原因分析	46
2.9	车辆铆钉拉伸断口不平整原因分析	49
2.10	汽车转向直拉杆早期断裂原因分析	54
2.11	汽车扭簧断裂分析	59
2.12	汽车锥齿轮断齿原因分析	64
	参考文献	67
<b>第3章</b>	<b>柴油机及零部件失效分析案例</b>	<b>68</b>
3.1	柴油机汽缸水套失效分析及对策	68
3.2	柴油机“机破”事故分析1	73
3.3	柴油机活塞铝裙延伸率偏低分析	77
3.4	柴油机中连接杆低应力下脆断原因分析	81
3.5	柴油机曲轴氮化后表面硬度偏低分析	85
3.6	油泵内溢流阀断裂分析	88
3.7	柴油机凸轮轴磨削裂纹分析	94
3.8	柴油机盘簧断裂分析	96
3.9	柴油机“机破”事故分析2	100
3.10	细晶粒车轴钢断裂韧性偏低分析	110
3.11	50车轴钢中异常组织对疲劳性能的影响	114
	参考文献	118
<b>第4章</b>	<b>表面处理零件失效分析案例</b>	<b>119</b>
4.1	20CrNi3 活塞杆镀铬层表面网纹分析	119
4.2	挡油环氮化后磨削裂纹分析	121
4.3	壳体电穿加工刻痕形成原因分析	123
4.4	导线夹弹性偏低分析与热处理工艺设计	125
4.5	轴承钢锻造后粗大魏氏体组织对渗碳组织的影响	131
4.6	铁路轴承磷化后表面出现红色区域原因分析	135
4.7	深层渗碳轴承套圈与滚子失效分析	140
4.8	镀金铍青铜导电弹簧断裂分析	152
	参考文献	158
<b>第5章</b>	<b>零部件失效分析案例</b>	<b>159</b>
5.1	铁路供电 TJ-95 铜绞线断裂原因分析	159
5.2	铁路供电铜银导线损伤原因分析	162
5.3	紧固铁路道岔用的高强螺栓断裂分析	166
5.4	吊弦线夹中的螺孔夹板断裂分析	170
5.5	高速轧钢机上用轧辊失效分析	175
5.6	H13 铝型材挤压模具断裂分析	181
5.7	高速轧钢机用轧辊表面剥落原因分析	183

5.8	建筑螺纹钢断裂分析 .....	189
5.9	铸造 IN718 合金延伸率偏低原因分析 .....	193
5.10	道岔用高强螺栓断裂分析 .....	197
5.11	9Cr2Mo 材料轴热处理裂纹分析 .....	200
5.12	输电线路中用钢脚铁裂纹分析 .....	203
	参考文献 .....	207
<b>第 6 章</b>	<b>大型构件失效分析案例 .....</b>	<b>208</b>
6.1	案例 1 TDK 空压机机破事故分析 .....	208
6.1.1	空压机零部件断裂情况概述 .....	208
6.1.2	试验方案设定 .....	208
6.1.3	试验结果与分析 .....	209
6.1.4	空压机断裂过程分析 .....	217
6.1.5	连杆螺栓疲劳断裂原因分析 .....	219
6.1.6	连杆螺栓使用寿命估算 .....	220
6.1.7	结论与建议 .....	220
6.2	案例 2 电站汽轮机高压大轴推力盘断裂原因分析 .....	221
6.2.1	事故发生情况概述 .....	221
6.2.2	试验方案制定 .....	222
6.2.3	试验结果与分析 .....	222
6.2.4	分析讨论 .....	247
6.2.5	结论 .....	248
	参考文献 .....	248



# 第1章 失效部件的宏观部件与金相分析原理及方法

## 1.1 零部件失效分析的基本步骤与目的

### 1. 现场了解情况,收集背景资料

目的是对失效零件的工作状态与整体情况有一个宏观的定性了解。宏观资料的收集对失效分析的整体判断有重要的意义。一般要进行以下几方面工作:首先要了解失效零件的服役状况,分清失效零件与其他零件的关系,初步判断受力状态与发生破坏的位置,了解失效零件占整个出厂同类零件的数量,详细了解失效零件的材料与加工工艺等。

无论如何强调此项工作的重要性也不会过分。例如很多情况下制造方都怀疑由于原材料有冶金缺陷等质量问题造成产品失效。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,一般就可以初步判断与原材料冶金质量关系不大。因为如果一批原材料质量有问题,质量缺陷不会仅集中在材料某一个部位,一般是分布在整批材料中。所以很多零件均会受到原材料的影响,发生破坏零件的数量就不会太少。

### 2. 对失效的零件及相关的零件进行宏观分析

利用肉眼或者放大镜对断裂的样品进行观察。必须要仔细观察断口的形貌及表面颜色等,分析断裂的位置,尽量找到裂纹源位置并记录与照相。目的是帮助判断断裂的原因。同时一个正确的失效原因分析应该能够对宏观现象提供一个合理的解释。

### 3. 进行定性或定量的力学分析

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。如果不是在零件受力最大的部位发生破坏,就有理由认为材料的组织可能存在问题,或者在工作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进行构件各个部位受力情况的定量分析,将各个部位受到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。

### 4. 对失效的零部件进行性能测定

目的是与要求的性能标准值进行对照,判断是否达到要求。在可能的情况下尽可能在断口附近截取样品。

### 5. 金相组织分析

目的是判断是否与要求的组织相吻合,有时要配合扫描电镜甚至透射电镜进行分析。

### 6. 化学成分分析

目的是判断与样品标准要求的成分是否符合。

### 7. 断口与组织的电镜分析

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于确定材料内部微观组织,此时可以采用透射电镜对材

料微观组织进行分析。

8. 在模拟条件下做实验,失效模拟

目的是对失效分析的机理进行验证。在一般失效分析中不会进行。

应该说明的是并不是所有情况下均要完整地进行上述全部的步骤,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。但是在一般金属材料的失效分析中,1、2、3、5这几个步骤往往是必须要做的。

目前有多种先进的分析测试手段,对正确地进行失效分析起到重要作用。但是如何合理地使用,降低失效分析的成本,提高失效分析的效率也是重要的问题。

对于一些初次涉及失效分析领域的科技人员存在一种倾向,轻视宏观分析与金相分析。对任何失效问题均采用 SEM、TEM 等手段进行分析,实际上这样分析往往达不到理想效果。实践经验表明目前许多失效零部件,只需要采用宏观分析方法配合使用光学显微镜分析组织,就能够得到正确结论。这些试验方法对现场技术人员是有条件实现的,而且是最实用的。同时宏观分析也是进行 SEM 分析的基础,因此本章仅对这些最基本的试验方法进行论述。对于一些先进试验手段(如透射电镜、扫描电镜分析等)已有许多专门论著,本书中不做阐述。

## 1.2 材料宏观缺陷的分析方法

### 1.2.1 宏观缺陷分析的重要意义

宏观缺陷一般是指用肉眼或者经过低倍放大,对材料的组织进行观察后发现的缺陷。其特点是设备简单,操作方便,能够在较大面积上发现材料的组织缺陷。随着科学技术的发展,提供了多种对材料组织缺陷进行分析的先进的设备与方法,因此出现了对宏观分析削弱甚至忽略的倾向。目前一些高等院校材料专业的毕业生,甚至不知道有这些宏观检测材料缺陷的方法。目前的生产实践仍充分表明,在失效分析过程中,对材料进行宏观分析有不可替代的作用。

(1) 通过对材料低倍缺陷的检查可以对失效零件的材质做出一般性的评价。一般说来材料在出厂前均进行了低倍缺陷的检测,不合格的材料是不允许出厂的。所以用来制造零件的材料应该不存在严重的低倍缺陷。但是实践告诉我们,由于多种低倍缺陷问题导致零件的失效并非少数。

(2) 根据低倍缺陷的检查结果可以决定进一步分析的方向与方法。例如:如果失效的零件存在严重的低倍缺陷,一般情况下可以认为是失效的重要原因。

因此对于失效的零件建议首先对材料进行低倍缺陷分析。

### 1.2.2 常用的检查方法与目的

#### 1. 硫印试验<sup>[1]</sup>

目的:硫在材料中(尤其是钢中)一般被认为对性能有不利影响。采用化学分析方法或者金相检验方法可以使我们了解材料中硫含量与硫化物夹杂的分布情况。但是上述方法取得的结果均是针对样品而言的。要了解硫在整个零件上的分布情况必须多处取样,

这在很多情况下不现实。同时化学分析得出的是硫在材料中的总含量,并不反映硫在材料中的分布情况。进行硫印实验主要目的是可以帮助我们了解硫化物在材料中的分布情况。

操作要点:首先将材料进行磨光(表示表示粗糙度  $0.8\mu\text{m}$ ),然后将经过 3% - 5% 的硫酸水溶液中浸泡的印相纸的药膜面贴在磨光的表面上,经过 3min ~ 5min 后将相纸取下用水进行冲洗,然后按一般的照相处理过程进行定影、冲洗与烘干。经过这样处理后,材料中的硫化物就与硫酸反应,生成硫化氢。而硫化氢与相纸上的药膜(银盐)发生反应生成硫化银,成棕色的斑点。根据印相纸上这些斑点的分布情况,按一定的参考标准进行评级,从而得知材料中硫的分布状况。在进行实验时样品的面积应尽量大,表面粗糙度要尽量低,相纸与样品的接触面间应尽量避免气泡存在。

图 1-4 为 Q235 钢硫印试验结果照片。

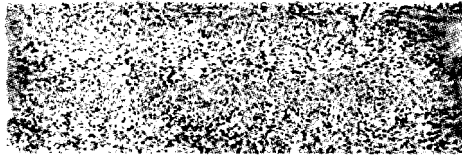


图 1-1 Q235 钢硫印试验结果照片

## 2. 磷印试验<sup>[2]</sup>

目的:磷在材料中(尤其是钢中)一般也被认为对性能有不利影响。进行磷印试验的主要目的是帮助我们了解磷在材料中的分布情况。

操作要点:将表示粗糙度  $0.8\mu\text{m}$  的样品表面清洗干净,放入含有 1g 焦亚硫酸钾 ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) 的 50ml 饱和硫代硫酸钠 ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 溶液中浸泡 8min ~ 10min。取出样品后将样品用酒精清洗干净吹干。然后将经过 3% 盐酸水溶液中浸泡的印相纸的药膜面贴在磨光的样品表面上。其余操作与硫印相同。相纸上较深的褐色斑痕处为含磷低的区域,颜色浅或者白色区域为磷的偏析区。

图 1-2 为 Q235 钢磷印试验结果照片。

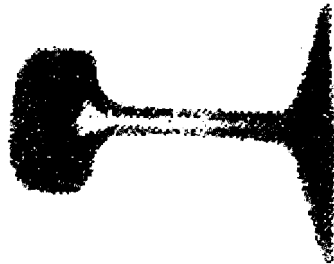


图 1-2 Q235 钢磷印试验结果照片<sup>[3]</sup>

## 3. 液体渗透着色法<sup>[2]</sup>

目的:材料中的微裂纹、气孔等缺陷对性能有重要影响。采用渗透着色法的目的就是使我们了解这些缺陷。该方法操作简单,无需专用设备,同时检验结果直观可见。尤其是它是一种无损检测方法,对成品的检验可以提供重要信息。基本原理是由于渗透液的润

湿作用与毛细现象,使液体着色渗透剂渗入试样表面的开口的缺陷中,再通过显像处理将缺陷显示出来。

操作要点:将零件清洗干净,然后将渗透剂覆盖在零件的表面。渗透剂使用温度一般在  $15^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ,渗透时间  $5\text{min} \sim 20\text{min}$ 。然后将表面多余的渗透液清除掉,用热风吹干样品。再将显像剂涂敷在零件表面上。显像后的零件可以直接在自然光下观察或者在荧光下进行观察。对观察结果可以拍摄成照片。渗透着色剂与显像剂有不同型号可以购买。图 1-3 是一个采用液体渗透着色法显示微裂纹的例子。

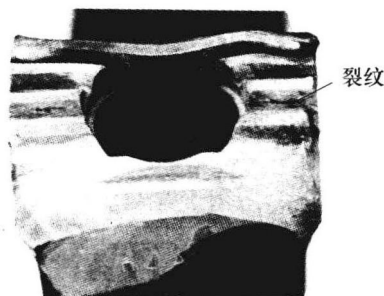


图 1-3 柴油机连杆定位齿上裂纹显示照片

#### 4. 热蚀试验<sup>[3]</sup>

目的:主要用于显示材料偏析、疏松、白点等缺陷。

操作要点:将样品表面磨光(表面粗糙度  $1.6\mu\text{m}$ ),表面清洗干净,放入热浸蚀液中。常用的热浸蚀液是 50% (体积) 盐酸水溶液,温度控制在  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  的范围内,时间  $5\text{min} \sim 10\text{min}$ 。取出样品后将样品用清水进行清洗,也可以采用 3% ~ 5% 的碳酸钠水溶液清洗。然后用冷水清洗,进行烘干防止生锈。

图 1-4、图 1-5 为热蚀试验的例子。

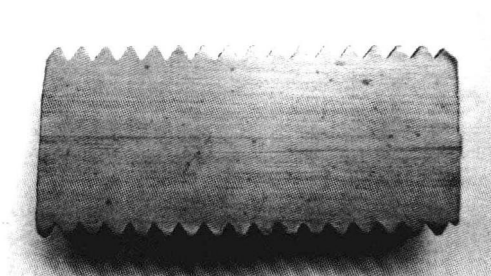


图 1-4 建筑钢筋热蚀试验后材料存在严重疏松照片

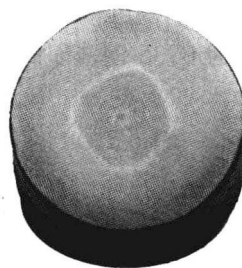


图 1-5 材料内部存在中心方框偏析照片

### 1.2.3 无损检测技术的应用

一些大型零部件发现了裂纹,要进行失效分析。常常要回答这样的问题:造成零部件失效的原因是原材料问题还是加工过程中产生的问题?如果是加工过程中的问题,是铸造问题、锻造问题还是热处理问题?首先要对零件内部是否有缺陷的情况进行判断。需要采用无损检测技术,用途最广的是超声波探伤技术<sup>[4-7]</sup>。

该技术的基本原理如图 1-6 所示。超声波设备关键部件是探头。探头是由压电晶体材料制作,压电晶体的特点是在晶片两侧加交变应力使晶片厚度发生微小变化产生交变电压。这种材料还具有逆压电效应,即在晶片两端加交变电压,厚度会反复微小变化产生机械振动,因此产生超声波。超声波对金属材料可穿透数米,如果存在缺陷(白点、夹杂物等)就会出现新的界面,超声波将产生反射,根据荧光屏上反射波信号,判断缺陷的位置、数量及大小。

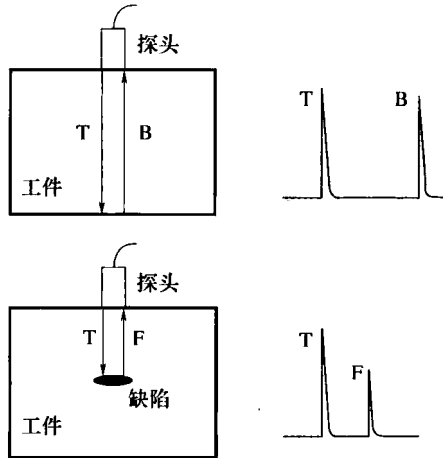


图 1-6 超声波探伤原理图

**应用实例:**

某厂生产大型渗碳轴承圈,主要工艺路线:锻造→正火→粗加工渗碳→淬火→低温回火→精加工。在某次生产中发现,经过处理的 8 个轴承圈有 4 个渗碳后外表面出现圆周状裂纹,最大深度达到 0.5mm,具体形状见图 1-7。

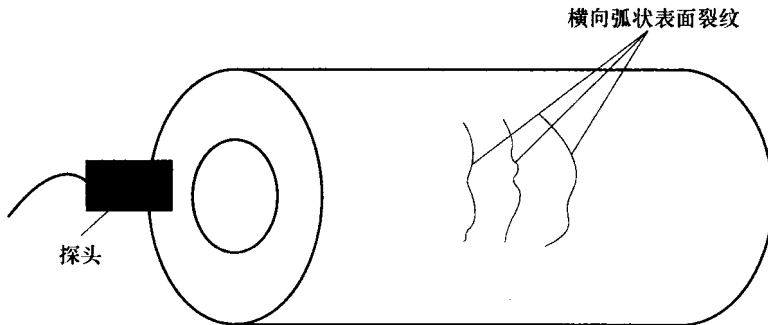


图 1-7 渗碳轴承圈表面裂纹示意图

对现场人员而言一个重要的问题是,该裂纹的出现是因为渗碳前轴承圈中就有缺陷还是完全由于渗碳过程中不当产生的裂纹。在这个问题确定后才可能进一步分析原因。为达到这样目的必须检查轴承圈内部组织。但是不可能将轴承圈切割成多个小片后,再按前述的宏观检测方法进行宏观缺陷分析。

因此决定采用超声探伤技术进行检测。首先对裂纹的深度最大 0.5mm 部位,垂直裂纹方向沿轴承圈轴向进行超声探伤,再选取无裂纹部位进行探伤。探伤结果发现:

凡是产生表面裂纹的部位,探伤后内部均有缺陷,而无表面裂纹的部位探伤后均没有发现内部缺陷。又选取两件同批处理没有产生裂纹的轴承圈进行同样探伤,结果是均没有发现内部有缺陷。因此断定轴承圈在渗碳前存在内部缺陷,该缺陷是裂纹形成的主要原因。

## 1.3 材料断裂宏观现象分析

### 1.3.1 宏观分析的目的与意义

断裂的宏观分析一般是指用肉眼或放大镜对宏观断口形貌、断裂位置及裂纹形貌等进行的分析方法。微观分析一般是指用扫描电镜分析断口或者透射电镜分析微观组织。对于初始从事失效分析的工作者往往存在一种倾向,即不论何种问题均进行大量微观分析,而忽视宏观分析。实际上不同分析各有不同的目的,对某些问题而言宏观分析可以提供非常重要信息,同时对微观分析有重要的指导意义,甚至仅进行宏观分析就可以解决问题,达到简单、快速、可靠的目的。下面举两个例子说明宏观分析的重要性。

#### 例1 空压机螺栓断裂问题

某厂大型空压机发生多个零部件断裂事故,其中断裂的零件中有一件是连杆螺栓。从现场情况了解,断裂的连杆螺栓对空压机中多个零部件断裂起到引导作用。因此连杆螺栓的断裂分析成为此次事故原因分析的关键。断裂连杆螺栓的宏观断口与断裂现象如图1-8所示。

如果仔细进行宏观分析,就可以初步得出一个结论:断裂的连杆螺栓与加工质量有一定关系。这是因为:断裂的连杆螺栓的宏观断口是疲劳断裂,裂纹源位置如图1-8所标示。仔细观察断裂连杆螺栓的侧面可以看到,为便于安装,将连杆螺栓圆柱型的尾部加工成一个平面。而在平面处有一道很深的加工刀痕。刀痕出现的位置恰好是疲劳源出现的位置。因此有理由认为,连杆螺栓在交变载荷作用下,刀痕处由于应力集中的作用产生更大的应力,所以在刀痕处首先产生疲劳源。在没有做其他分析的情况下,当然不能判断这根螺栓的组织与成分等是否也存在问题,但是起码可以提醒厂家,在采用加工螺栓尾部平面时,为确保寿命,对平面加工精度应该提出一定要求。

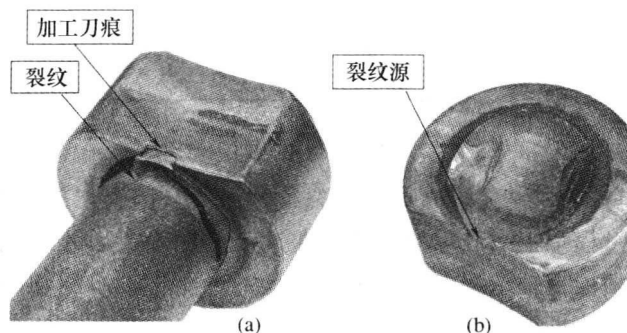


图1-8 空压机断裂连杆螺栓断口与断裂位置照片

## 例2 铁路弹条断裂分析

钢轨是依靠弹条、螺旋道钉等多个工务配件固定在轨枕上。弹条是固定钢轨重要部件,材料采用60Si2CrVA经过淬火+中温回火后使用。某厂生产的弹条在安装一定时间后发生断裂,需要对断裂原因进行分析。断裂弹条的宏观断口如图1-9所示。



图1-9 断裂弹条的宏观断口照片

通过宏观断裂现象仔细观察基本可以断定:这件弹条早期断裂的主要原因是弹条在热加工成形过程中存在明显的加工缺陷。这是因为从图1-9可以清楚看到断裂开始的启裂点位置(启裂点位置确定见1.3.3节)。而在启裂位置处,弹条存在明显的加工留下的缺陷。由于该缺陷的存在,使弹条在交变应力作用下,该处产生裂纹快速扩展使其断裂。

从上述两例子可以看出断裂宏观分析的重要性。在对断裂零件进行宏观分析时主要进行下面几方面的工作:

(1) 断裂位置分析。特别注意断裂位置与零件受力的关系。断裂位置是否是零件受力最大部位。如果断裂位置不是零件受力最大部位,就有足够理由怀疑材料内部的组织存在问题。可以不做其他方面试验(如微观断口分析、力学性能分析等),首先进行金相组织分析。

(2) 宏观断口分析。这是最重要的宏观分析内容,从中可以得到对断裂原因非常有用的信息,指导下一步分析工作,下面专门进行讨论。

(3) 裂纹宏观形貌分析。根据裂纹的形貌也可以得到非常有用的信息,下面也将专门进行讨论。

微观分析同样有重要作用,在许多文献均有详细阐述。本章的目的是想提醒初期从事失效分析的工作者对于断裂宏观现象引起足够重视。

### 1.3.2 宏观断口分析目的

断口是材料断裂后留下的自然表面,一般说断裂发生在材料中性能最薄弱部位或者是零件中应力最大的部位。所以断口分析在失效分析中占有重要的地位。对宏观断口进行分析主要目的如下:

(1) 根据宏观断口的形貌可以判断裂纹源的位置。这对进一步分析及防止失效有重要的意义。例如裂纹源出现在表面,则应强化零件的表面性能,如果裂纹源出现在材料内部则应强化整体性能。找到裂纹源后才可以有的放矢地对裂纹源处的组织结构进一步深入分析。

(2) 根据宏观断口形貌判断载荷类型与断裂方式。这为进一步提高材料的力学性能、分析断裂的机理提供了方向。例如判断出是疲劳断裂,就要求进一步提高疲劳强度,

分析疲劳断裂原因重点是分析影响疲劳强度的因素。目前已经掌握了许多断口形貌与载荷的关系,最成熟的是疲劳断口与拉伸断口的形貌与载荷之间关系。

(3) 宏观断口的形貌与微观断口形貌存在一定的联系。

(4) 宏观断口形貌与材料的组织性能有一定联系。用放大镜就可以对宏观断口进行分析,有观察面积大、结论可靠的优点。这是非常重要的分析手段。一些情况下根据宏观断口的分析就基本可以断定断裂的原因。总之,宏观断口分析为金属材料的断裂失效分析提供了最基本信息,为进一步深入地分析奠定了基础。

### 1.3.3 根据宏观断口形貌确定裂纹源区域的方法<sup>[8-9]</sup>

确定断裂的启裂点在失效分析中占有重要地位。只有确定启裂点后才能有的放矢地从断裂部件上截取样品进行组织结构分析。确定启裂点位置往往是根据宏观断口形貌确定。因为零部件发生断裂往往是在拉伸载荷、交变应力、扭转载荷、冲击载荷或上述载荷组合作用下发生的破坏(腐蚀、氧化等破坏除外)。因此宏观断口形貌与在做力学性能试验时样品的拉伸断口、疲劳断口、冲击断口、扭转断口均有密切联系。这些断口共同的特征是:在宏观断口上均可以观察到放射线,如图 1-10 所示。因此可以根据放射线推断裂纹源的位置。具体的方法是:放射线汇聚成的“交点区域”就是裂纹源形成的区域。具体的例子分析如下。

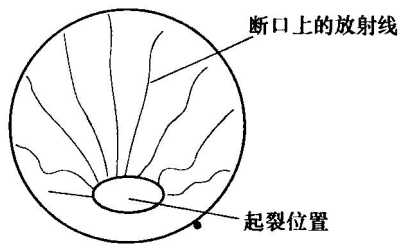


图 1-10 断口上放射线示意图

**例 3** T8 钢材料经过淬火 + 低温回火的样品,加工成冲击样品进行冲击。断口形貌如图 1-11 所示。

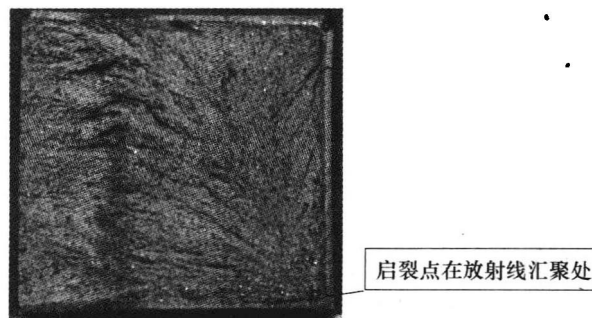


图 1-11 冲击样品裂纹源断口形貌照片

分析:材料受到冲击载荷作用,断口呈现出明显的放射线,其汇聚交点区域在右下角顶角处,如图 1-11 所示。可以断定启裂点就在该顶角处。根据启裂点位置可以推测,材



料经冲击载荷作用时,在不同部位受到的应力是不相同的。应该是在尖角处受到更大的应力作用,所以在该处首先开裂。因此提示我们对承受冲击载荷的部件,尖角处存在破坏的危险性,在设计时应该引起足够重视。

**例4** 60Si2CrVA 材料制造的铁路弹条,经过淬火 + 中温回火安装在铁路上,固定钢轨。经过短期使用后发生断裂。断口形貌如图 1-12 所示。

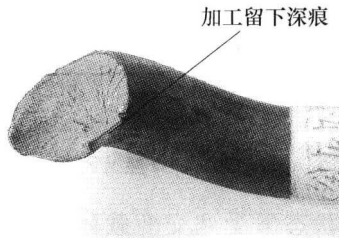


图 1-12 铁路弹条存在原始裂纹造成早期脆断的断口形貌照片

分析:弹条在服役状态下受到交变的扭转载荷作用。本应呈疲劳断口特征。该样品断口并非典型疲劳断口,属于非正常的脆性断裂。断口上放射线明显,汇聚区域如图 1-12 所示,可确定启裂点位置。启裂点处可以看到一个小断面,断面呈灰色氧化皮,因此可以认为由于加工原因,在弹条安装前就存在原始裂纹,服役过程中在外力作用下裂纹迅速扩展,造成弹条的早期脆性断裂。

**例5** 铁路配件采用铸钢材料制作,该铸钢件在服役状态下受到拉伸载荷作用。安装使用很短时间发生断裂。断口形貌如图 1-13 所示。



图 1-13 铸钢件断口形貌

分析:断口上可以看到明显的放射线,在放射线汇聚区域恰好有一个孔洞,显然这是铸造缺陷。断裂就从缺陷处开始,因此从断口宏观观察就可以断定该铸件失效原因是存在铸造缺陷。

**例6** 大型滚柱轴承在使用时滚柱发生断裂。滚柱的形状是圆柱体,中心有一个圆孔。使用过程中滚柱体破碎,断口形貌如图 1-14 所示,确定启裂点位置。