

编写组

辅机零件

失效及缺陷分析

《航空与航天》编辑部

辅机零件失效及缺陷分析

辅机零件失效及缺陷分析编写组

江苏工业学院图书馆
藏书章

《航空与航天》编辑部

前 言

在产品制造和使用过程中,零部件的失效及工艺缺陷时有发生,有的甚至造成重大事故。因此,搞好失效及缺陷分析,将分析结论及时反馈到设计、工艺及使用部门,采取有效措施,杜绝故障再现,对提高产品质量、确保使用安全、延长使用寿命,将起着重要作用。

辅机厂产品种类多、材料品种多、工艺方法多、失效及缺陷类型多,为使失效及缺陷分析工作准、快、好,迫切需要将辅机厂近三十年的经验收集、整理,加以提高,指导生产实践。本书在收集五十多个工厂、100多个典型实例的基础上,经系统归纳与充实,最后以40万余字、800余张图片、内容丰富而实用性强的《辅机零件失效及缺陷分析》一书结束了编写任务。

本书包括辅机零件失效及工艺缺陷分析两部份。失效分析部份介绍了试验方法、疲劳断裂、延性断裂、脆性断裂、腐蚀失效及高分子透明材料断裂分析。工艺缺陷部份,包括了锻、铸、焊、热处理和冷加工缺陷分析。在编写上突出了以下几方面:

一、在分析方法上,强调了实用性、正确性与经济性。在介绍各种方法的基本原理、适用范围及方法特点上,帮助分析者正确选择合理的分析方法。并用了较多文字,重点介绍了运用光学金相进行断裂分析的简易、实用与经济的某些独特性。

二、在断裂分析上,以大量的图片说明断裂形貌、特征及原因,并对断裂机理进行了阐述。这与单从机理入手进行失效分析的方法相比,有更广泛的实用性。

三、在工艺缺陷分析中,除了介绍常见缺陷的形态、特征外,还概述了形成机理、产生原因及预防措施。这对分析者得出正确结论,提出改进措施,将有一定帮助。

四、书中收集的典型实例都是来源于生产、装配试验及外场使用中发生的故障,而不是来源于试验室范围内制造的一些实例,所以它具有广泛的实际指导意义。

本书不仅对从事机械零件失效分析者是一份有价值的参考资料,而且,对从事冷热加工、产品设计、装配试验、检验、使用及维修的有关科技人员,也有一定的参考价值。

为本书提供实例及图片较多的单位有:621所、114厂、511厂、174厂、133厂、113厂、514厂、101厂、103厂、221厂、125厂等。经整理补充,全书共十二章:第一~七章由吴培远(621所)编写;第八章由杨武鸣(114厂)、周振生(133厂)编写;第九章由阎晓峰(114厂)编写;第十章由詹孝慈(114厂)编写;第十一章由王景林(174厂)、黄蓉基(113厂)编写;第十二章由丁惠麟(511厂)编写。在编写过程中,我们得到了航空工业部有关领导的关怀及科技局冶金处的帮助,有关兄弟厂所的广大科技工作者热情提供实例和图片,给予我们的工作以极大的支持和关注,在此表示衷心感谢!

由于编写成员水平有限,在编写中,缺点和错误在所难免,诚恳地希望广大读者给予批评指正。

编 者 1985年9月

目 录

第一章 概 述

- 1.1 失效分析的意义和目的…………… (1)
- 1.2 失效形式和原因分类…………… (1)
 - 1.2.1 失效形式…………… (1)
 - 1.2.2 失效原因…………… (1)
- 1.3 失效分析步骤…………… (1)

第二章 分析方法

- 2.1 宏观分析…………… (3)
 - 2.1.1 宏观分析的意义…………… (3)
 - 2.1.2 宏观分析手段及方法…………… (3)
- 2.2 微观分析…………… (8)
 - 2.2.1 光学显微镜…………… (8)
 - 2.2.2 扫描电镜…………… (13)
 - 2.2.3 透射电镜…………… (18)
- 2.3 模拟对比试验…………… (20)
- 2.4 断口清洗方法…………… (21)

第三章 疲劳失效分析

- 3.1 疲劳断裂分类…………… (23)
- 3.2 疲劳裂纹萌生…………… (26)
- 3.3 疲劳裂纹的扩展…………… (27)
- 3.4 疲劳断口的形貌特征…………… (29)
 - 3.4.1 高周疲劳断口…………… (29)
 - 3.4.2 低周疲劳…………… (34)
 - 3.4.3 腐蚀疲劳…………… (36)
 - 3.4.4 晶间疲劳…………… (37)

- 3.4.5 微振疲劳…………… (38)
- 3.4.6 热疲劳…………… (38)
- 3.5 影响疲劳性能的因素…………… (39)
 - 3.5.1 抗拉强度…………… (39)
 - 3.5.2 切口效应…………… (39)
 - 3.5.3 表面状态的影响…………… (40)
 - 3.5.4 冶金因素…………… (41)
 - 3.5.5 腐蚀介质…………… (42)
- 3.6 疲劳失效实例…………… (42)
 - 3.6.1 双金属涡圈断裂分析…………… (42)
 - 3.6.2 垂直齿轮失效分析…………… (43)
 - 3.6.3 齿圈断裂分析…………… (44)
 - 3.6.4 主连杆失效分析…………… (46)
 - 3.6.5 软轴的失效及其喷丸强化…………… (47)
 - 3.6.6 减震弹簧断裂分析…………… (50)
 - 3.6.7 吊架失效分析…………… (51)
 - 3.6.8 耳片接头失效分析…………… (53)
 - 3.6.9 起落架外筒失效分析…………… (54)
 - 3.6.10 拉力弹簧断口分析…………… (55)
 - 3.6.11 煤油导管疲劳失效分析…………… (56)
 - 3.6.12 防扭臂失效分析…………… (57)
 - 3.6.13 卡箍轴颈的微振疲劳失效…………… (59)
 - 3.6.14 配重卡箍的微振疲劳失效…………… (60)
 - 3.6.15 斜盘轴承钢球失效分析…………… (60)

第四章 延性断裂失效分析

4.1 延性断裂的宏观特征.....	(62)
4.1.1 拉伸断口.....	(62)
4.1.2 冲击断口.....	(63)
4.1.3 沿晶韧断断口.....	(63)
4.2 延性断裂的微观特征.....	(64)
4.2.1 韧窝的形状.....	(64)
4.2.2 影响韧窝尺寸大小的 因素.....	(64)
4.2.3 沿晶韧断.....	(64)
4.3 延性断裂分析实例.....	(65)
4.3.1 转子轴断裂失效分析	(65)
4.3.2 小轴断裂失效分析.....	(66)
4.3.3 花键轴断裂失效分析	(67)
4.3.4 分配杆破断失效分析	(68)

第五章 脆性断裂失效分析

5.1 穿晶脆断.....	(70)
5.1.1 宏观特征.....	(70)
5.1.2 微观特征.....	(70)
5.1.3 影响解理开裂的因素	(70)
5.2 穿晶脆断失效分析实例.....	(72)
5.2.1 ML15铆钉掉头分析	(72)
5.2.2 磁钢片校正断裂分析	(74)
5.2.3 铍青铜弹簧片断裂分析	(75)
5.3.4 黄铜螺钉断裂分析.....	(76)
5.3 沿晶脆断.....	(77)
5.3.1 沿晶脆断特征.....	(77)
5.3.2 应力腐蚀开裂.....	(78)

5.3.3 氢脆.....	(79)
5.3.4 液体金属致脆.....	(80)
5.3.5 三轴向应力的作用.....	(82)
5.3.6 过热、过烧及回火脆 断口特征.....	(83)
5.3.7 其他原因导致的沿晶 脆断.....	(84)
5.4 沿晶脆断失效分析实例.....	(84)
5.4.1 联接螺栓断裂分析.....	(84)
5.4.2 苏制联接螺栓断裂分析	(86)
5.4.3 弹簧氢脆断裂分析.....	(86)
5.4.4 螺钉断裂分析.....	(88)
5.4.5 螺栓氢脆断裂分析.....	(88)
5.4.6 T8A弹簧片脆断分析	(89)
5.4.7 伊尔18铝铆钉应力腐蚀 开裂.....	(90)
5.4.8 QBe1.9波纹管应力腐蚀 开裂分析.....	(91)
5.4.9 燃油泵斜盘失效分析	(92)
5.4.10 分油盘磨损裂纹分析	(94)

第六章 腐蚀失效

6.1 腐蚀失效分类.....	(96)
6.2 影响腐蚀的因素.....	(96)
6.3 点蚀.....	(97)
6.3.1 影响点蚀形成因素.....	(97)
6.3.2 点蚀形貌特征.....	(97)
6.3.3 点蚀的预防.....	(97)
6.4 剥蚀.....	(98)
6.4.1 剥蚀的形貌特征.....	(98)
6.4.2 改善剥蚀的途径.....	(99)
6.5 应力腐蚀.....	(99)

6.5.1	应力腐蚀开裂的特点	(99)
6.5.2	应力腐蚀开裂的形貌特征	(100)
6.5.3	预防措施	(101)
6.6	局部腐蚀对材料疲劳强度的影响	(101)
6.7	腐蚀失效实例	(102)
6.7.1	活门开裂分析	(102)
6.7.2	螺帽裂纹分析	(103)
6.7.3	扭力弹簧失效分析	(103)
6.7.4	助力器后壳体裂纹分析	(105)
6.7.5	小油缸表面起泡分析	(109)
6.7.6	助力器活塞裂纹分析	(110)
6.7.7	GR—13 型热电偶失效分析	(112)
6.7.8	柱塞弹簧断裂失效分析	(113)
6.7.9	二级叶片折断分析	(114)
6.7.10	铝叶片剥蚀损伤及其预防	(115)
6.7.11	传动小轴失效分析	(117)

第七章 高分子材料PMMA、PC 断口分析

7.1	断口研究方法	(119)
7.1.1	宏观研究方法	(119)
7.1.2	微观研究方法	(119)
7.1.3	断口清洁方法	(121)
7.2	断口形貌特征分析	(121)
7.2.1	静载断口	(121)
7.2.2	动载断口	(122)
7.3	实例分析	(126)

7.3.1	舱盖爆破分析	(126)
7.3.2	舱盖螺栓孔裂纹分析	(127)

第八章 锻造缺陷

8.1	过热过烧	(129)
8.1.1	过热	(129)
8.1.2	过烧	(130)
8.1.3	防止过热过烧的方法	(133)
8.2	锻造裂纹	(133)
8.2.1	原材料缺陷引起的裂纹	(134)
8.2.2	锻造工艺不当引起的裂纹	(135)
8.2.3	热脆和铜脆	(138)
8.2.4	锻造裂纹的预防	(139)
8.3	锻造折叠	(140)
8.4	锻造流线缺陷	(142)
8.5	铝锻件的氧化膜	(143)
8.6	锻造缺陷分析实例	(145)
8.6.1	铝青铜粗晶环引起锻造裂纹	(145)
8.6.2	镉铜热轧裂纹分析	(146)
8.6.3	航向陀螺铜转子裂纹分析	(147)
8.6.4	导架锌脆	(148)
8.6.5	天线杆断裂分析	(148)
8.6.6	排气门摇臂失效分析	(149)
8.6.7	牵引电机轴的低周疲劳失效	(151)
8.6.8	液压泵斜盘分析	(151)
8.6.9	滚珠破裂失效分析	(153)

第九章 铸造缺陷

9.1	缩孔、缩松	(155)
9.2	气孔	(158)
9.3	铝合金针孔	(160)
9.4	缩裂—线性缩松	(160)
9.5	热裂	(161)
9.6	冷裂	(163)
9.7	夹杂	(164)
9.8	冷隔、冷豆	(166)
9.9	偏析	(167)
9.10	燃烧	(199)
9.11	铸造缺陷实例	(170)
9.11.1	左鱼鳞板裂纹分析	(170)
9.11.2	缓冲器硬质点分析	(170)
9.11.3	螺栓断裂分析	(170)
9.11.4	轮毂裂纹分析	(172)
9.11.5	轮毂断裂分析	(172)
9.11.6	活塞裂纹分析	(173)
9.11.7	ZL—401压铸件脆断及 切削困难分析	(174)
9.11.8	接头裂纹分析	(174)
9.11.9	精铸件裂纹分析	(175)
9.11.10	轮毂漏气分析	(176)
9.11.11	壳体裂纹分析	(176)

第十章 焊接缺陷

10.1	熔化焊缺陷	(177)
10.1.1	焊接裂纹	(177)
10.1.2	气孔	(186)
10.1.3	未焊透	(187)
10.1.4	夹渣	(187)
10.2	压力焊缺陷	(188)
10.2.1	裂纹	(188)
10.2.2	飞溅	(189)
10.2.3	未焊透	(189)
10.2.4	过热、过烧、熔化与 烧穿	(190)

10.3	钎焊缺陷	(190)
10.3.1	间隙未填满	(191)
10.3.2	裂纹	(191)
10.3.3	钎缝金属中小气孔	(192)
10.3.4	夹渣	(192)
10.4	焊接缺陷实例分析	(193)
10.4.1	液化石油气钢瓶爆裂 形态分析	(193)
10.4.2	端盖组件裂纹分析	(196)
10.4.3	分级活塞断裂分析	(197)
10.4.4	电磁铁芯高频钎焊缺 陷分析	(197)
10.4.5	空气压力感受器中不 锈钢挡板掉落原 因分析	(198)
10.4.6	助力器试验台弹簧断 裂分析	(200)
10.4.7	加力总管开裂失效 分析	(201)
10.4.8	电机轴断裂失效分析	(202)
10.4.9	起落架摇臂失效分析	(202)

第十一章 热处理缺陷

11.1	热处理应力	(205)
11.1.1	热应力	(205)
11.1.2	相变应力(组织应力)	(205)
11.1.3	热应力和相变应力的 叠加	(205)
11.2	影响零件淬火应力的因素	(206)

11.2.1 冷却速度	(206)	析	(232)
11.2.2 形状尺寸	(206)	11.8.2 活塞杆“梅花斑”缺陷分析	(233)
11.2.3 化学成份	(206)	11.8.3 传动轴齿断裂分析	(235)
11.3 热处理应力与缺陷	(207)	11.8.4 压缩弹簧裂纹分析	(236)
11.4 淬火裂纹的类型	(207)	11.8.5 尾炮塔环圈裂纹分析	(237)
11.4.1 纵向裂纹	(208)	11.8.6 DT4衔铁弯曲皱纹	(238)
11.4.2 横向裂纹	(209)	11.8.7 连接销的失效分析	(238)
11.4.3 表面裂纹	(209)	11.8.8 波纹管的失效分析	(240)
11.4.4 磨 裂	(210)	11.8.9 Cr17Ni2叶片失效分析	(243)
11.4.5 剥离裂纹	(210)	11.8.10 柴油机连杆裂纹分析	(247)
11.4.6 显微裂纹	(212)	11.8.11 助力器固定销失效分析	(248)
11.5 热处理裂纹的鉴别	(212)		
11.6 影响热处理裂纹的诸因素	(214)		
11.6.1 材 料	(214)		
11.6.2 热处理工艺	(215)		
11.6.3 零件的几何形状与切削加工	(216)		
11.7 热处理常见缺陷	(216)		
11.7.1 氧化脱碳	(216)		
11.7.2 残余奥氏体	(217)		
11.7.3 过热过烧	(219)		
11.7.4 淬火软点和硬度不足	(221)		
11.7.5 回火脆	(221)		
11.7.6 石墨化脆性	(223)		
11.7.7 球化不良	(224)		
11.7.8 过时效	(224)		
11.7.9 腐 蚀	(225)		
11.7.10 渗碳常见组织缺陷	(225)		
11.7.11 气体氮化常见组织缺陷	(228)		
11.7.12 碳氮共渗常见组织缺陷	(230)		
11.8 热处理缺陷实例	(231)		
11.8.1 氮化螺杆断裂失效分			

第十二章 冷加工成型缺陷

12.1 磨削损伤	(250)
12.1.1 常见磨削损伤	(250)
12.1.2 磨削烧伤的检查方法	(252)
12.1.3 磨削损伤对性能的影响	(253)
12.1.4 磨削损伤的影响因素及其预防	(255)
12.2 切削加工缺陷	(259)
12.2.1 常见加工缺陷及其对性能影响	(259)
12.2.2 常见加工缺陷的成因及其预防	(260)

12.3 其他加工缺陷	(262)	12.4.5 后罩冲压拉伸破裂.....	(269)
12.3.1 冷墩、挤压和拉伸成型		12.4.6 螺栓滚丝裂纹	(269)
缺陷	(262)	12.4.7 铆钉开裂	(270)
12.3.2 冲裁、弯曲和滚压收		12.4.8 柱塞收口开裂	(271)
口缺陷	(263)	12.4.9 轴颈加工硬块分析	
12.3.3 线切割加工缺陷	(264)		(272)
12.3.4 电解加工缺陷	(264)	12.4.10 滑油管咀失效分析	
12.3.5 加工中常见原材料缺			(273)
陷	(266)	12.4.11 包端管裂纹分析	(273)
12.4 冷加工成型缺陷实例	(267)	12.4.12 镀锌件表面“白霜”	
12.4.1 冷墩硬化引起的加工		和发黑	(275)
困难	(267)	12.4.13 电枢轴裂纹分析.....	(276)
12.4.2 冷墩折叠	(267)	12.4.14 轴颈断裂失效分析	
12.4.3 HPb59—1黄铜零件滚			(277)
丝“掉渣”	(268)	12.4.15 鼓风叶轮失效	(278)
12.4.4 导套加工表面鳞刺		12.4.16 螺栓断裂分析	(279)
.....	(268)	12.4.17 壳体失效分析	(281)

第一章 概 述

1.1 失效分析的意义和目的

凡机械零件丧失其规定功能则称为失效。工程界零件失效可分为三种情况：

- 1) 零件完全折断或破裂；
- 2) 零件严重损伤，危及安全工作；
- 3) 零件能安全工作，但不能起到应有的作用。

进行失效分析的目的在于通过试验分析，确定零件失效的性质和原因，反馈到设计等主管部门，以提出相应的、切实可行的预防和改进措施，避免重大故障的重复发生。此外，通过失效分析，还为提高产品质量、设计新产品提供切实的依据。

失效分析与零件设计、制造的关系如图 1—1 所示：

1.2 失效形式和原因分类

1.2.1 失效形式

常见零件的失效形式分类如图 1—2 所示：

1.2.1 失效原因

机械零件失效原因大致可分为设计、材料、制造、维护使用等四个方面。如图 1—3 所示。

1.3 失效分析步骤

根据试验人员的水平，失效件分析的复杂和难易程度，提出下述几个主要的分析程序：

一、准备工作

- 1、零件失效过程的现场调查，收集失效件断口，并注意保护，避免进一步受到污染和损伤。
- 2、若属整机或某一部件的零件断裂失效，在分解拆卸前应照相记录。
- 3、分析肇事零件一般多为疲劳或脆断失效件。

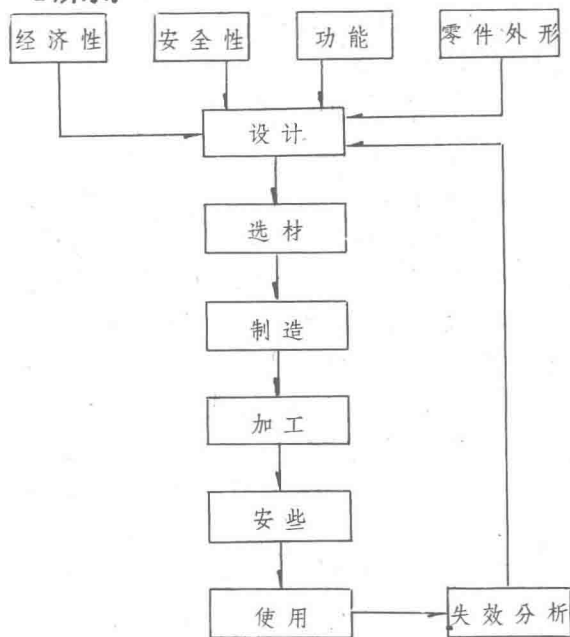


图1—1 失效分析与设计、制造间的关系方框示意图

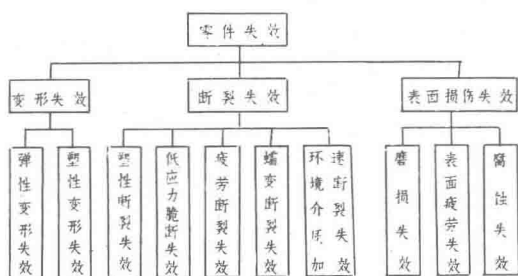


图1-2 失效形式分类

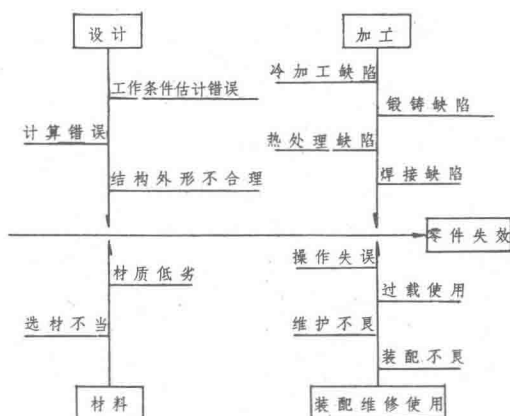


图1-3 失效原因分类

二、试验项目

1、复验失效件成份，组织，性能及特

殊要求的技术指标。

2、无损探伤 对失效件的同批零件检查，可全面了解和掌握零件存在问题的数量和范围，通过统计分析失效的规律性，大致的性质和原因；此外，如容器、导管零件上很小的裂纹即导致泄漏失效，为确定部位和便于分解取样分析，亦需采用探伤方法。

3、断口分析

在机械零件失效分析中，断口分析是一个重要的试验项目。通常它能提供零件失效的性质和原因及其有关的其它方面的信息。

断口分析有两个方面的内容：

(1) 宏观分析

a、确定零件的断裂性质，是韧性的或脆性的，或是疲劳的。

b、确定裂纹源部位，裂纹走向及扩展的全过程。

c、确定断口上的色彩，氧化腐蚀等情况。

d、对无裂纹源的断口，如晶间腐蚀，均匀腐蚀，过热，过烧等脆性断口，作出初步判断分析。

(2) 微观分析

在宏观分析的基础上，对断口微观形貌、微区成份或结构等进行分析。以便深入了解和掌握零件失效的断裂机制及原因。

4 模拟试验 借以探索和验证零件断裂的性质和原因。由于零件材料，结构形状，受力状态，环境介质的复杂性，模拟多是在简单化的条件下进行，所以模拟断口只能与失效件接近或相似，验证的影响因素也只是主要的或基本的。

三、排除措施及总结

通过失效分析明确了零件失效的性质和原因，则应相应地采取防范措施，这才能达到失效分析的目的。对于某些复杂而重大的失效事例进行分析，并采取措施获得解决之后，通过全面系统的总结，写出一份实事求是，有分析、有论证的技术资料，对设计、工艺、材料和使用等有关人员，均可起到借鉴和参考的作用，而对机械产品的革新换代，提高经济效益，以及保证安全性，可靠性方面则更有着积极的意义。

第二章 分析方法

无论机械零件失效，还是在制造加工过程中暴露发现的损伤或缺陷，总是要通过一定的方法或手段作鉴别分析，确定它们的性质、成因、危害性和预防办法等等。采用何种方法为宜，需依据分析目的、设备条件等因素确定。实际上各种手段和方法都各有其优缺点，不可忽视的是操作技术，判断分析水平，往往影响着最终的结论。

本章拟就零件失效和缺陷分析常采用的一些基本实用手段和方法作初步介绍。

2.1 宏观分析

2.1.1 宏观分析的意义

宏观分析是零件失效和缺陷分析的基础。通过宏观分析，a) 可确定零件失效部位，裂纹源的位置及裂纹扩展的宏观全过程；b) 可确定零件断裂的性质，是塑性的、脆性的、或者属于疲劳的；c) 可确定断口表面的色泽、氧化腐蚀等；d) 可确定缺陷部位、外形轮廓、色彩及分布特征等。

宏观分析常指用肉眼、放大镜、实体显微镜、光学显微镜和扫描电镜，在放大率小于50倍下所作的研究考查。

2.1.2 宏观分析手段及方法

在肉眼、放大镜、实体显微镜考查的基础上，常需照相记录。此时可用座机、低倍照相机或带低倍附件装置的光学显微镜等设备。

一、座机

由于座机镜头孔径大，景深长、放大率约2倍（实际上多作缩小用），并可采用多光源照明来获得较大面积的均匀照明效果，所以广泛用于拍摄大尺寸零件外形和断口全貌等。

光圈与成像景深的关系，可由图2—1说明。

当光圈未缩小时：物体不在一个平面上的a、b、c三点，经过透镜 L_1 、光圈Q及透镜 L_2 之后投向毛玻璃板D，但不能都在D板上清晰成像，总有两点呈模糊的光斑。

当光圈缩小时：让b在 b_1 位置聚焦成像，a和c随着光圈的缩小，在D板上投影的光斑尺寸也随之缩小，当该尺寸小于人眼的最佳分辨率 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 时，a、b、c三点在D板上清晰成像，即 a_2 、 b_1 、 c_2 处于同一焦面。

此外，光圈小，景深大，对比度也高；但

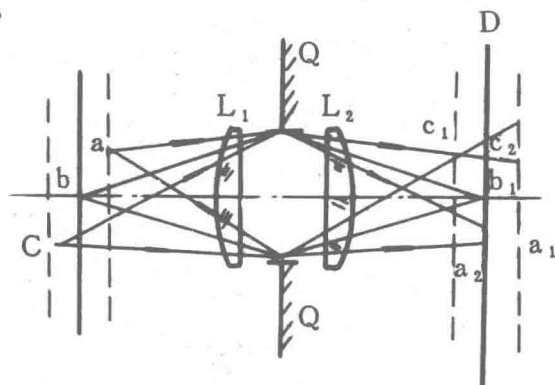


图 2-1 光圈对景深的影响示意图

过小的光圈会使影像出现“双结构”，过于黑白分明的照片缺少层次细节。所以，实际操作中需掌握适当。

二、低倍照相器

1、结构 小于20倍的放大成像显示，可采用结构简单、应用方便的低倍照相器（图2—2）。其中1底座，2万向接头，3支杆，4镜头，5接头，6蛇皮箱，7毛玻璃。

该照相器可选用 $F=135$ ， $F=75$ ， $F=45\text{mm}$ 等多种镜头。放大率可通过更换镜头，调整蛇皮箱位置来实现。所用软片尺寸为 $9\times 12\text{cm}^2$ 。

2、应用方法

（1）斜照明 成像方法的特点是入射光线以一定的倾角投射于目的物表面，该光线经表面浮雕结构漫反射后进入透镜成像。如此可明显地提高物像对比度、清晰度和体视感。

入射光倾角的大小直接影响成像细节显示和对比度。倾角大，对比度和体视感强；反之，细节层次好（图2—3）。

斜照明时，入射光投射方向对成像细节显示有上述类似现象。原因是断口上的浮雕细节总是高低不齐，只有合适的投射方向才能获得良好的成像效果。

对于实物零件或断口，欲获得背景洁白的无倒影像，则需用透明玻璃将目的物托住架空，然后采用适当倾角的入射光斜照明，目的物的倒影即远离拍摄视域，可获得清晰的无倒影像（图2—4）。

（2）垂直照明 垂直照明的光路布局如图2—5所示：为使入射光垂直射达目的物表

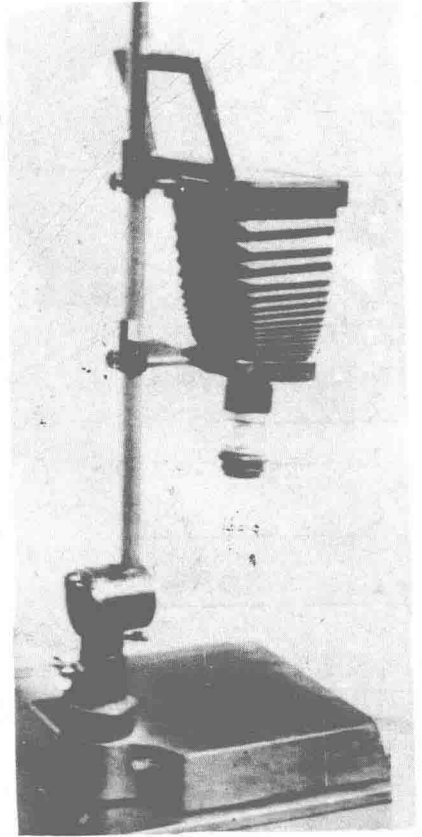
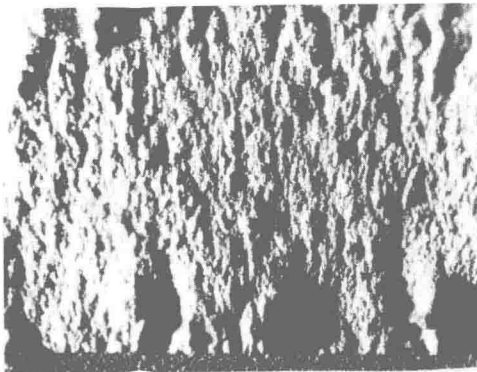
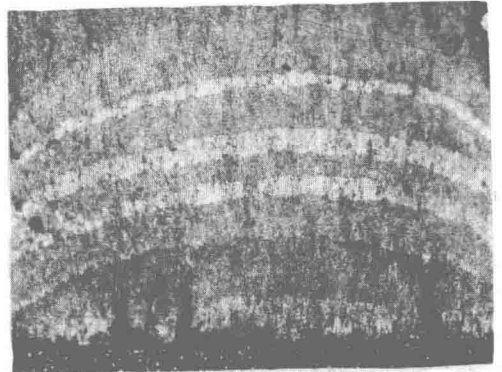


图2—2 低倍照相器外形结构

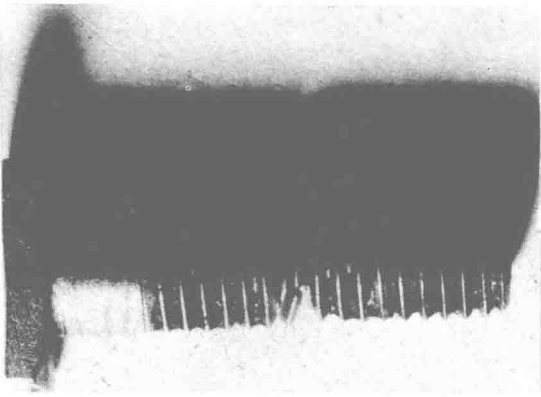


a 疲劳断口、大倾角入射光照明 $\times 8$

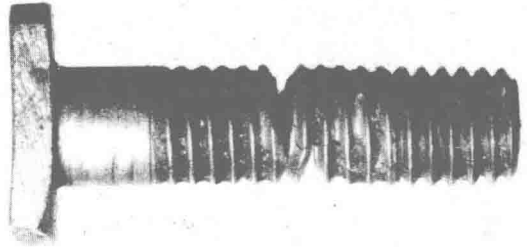


b 同图2—3 a 断口小倾角入射光照明 $\times 8$

图2—3 入射光倾角对成像的影响



a 带倒影的物像 ×3



d 无倒影的物像 ×3

图2-4 倒影、无倒影成像比较

面，随后反射进入物镜成像，需在光路中以 45° 角放置一块透明玻璃。垂直放于光路中的毛玻璃还可使入射光变得均匀。

垂直照明的效果示于图2—6。拍摄样品取自BT—9钛合金，为磨片未浸蚀观察，显示未溶解的全属钼呈不规则的块状，外形轮廓线以垂直照明显示清晰，而斜照明却具较强的体视感。

(3) 灯源、背景及照明方式的选择

座机和低倍照相器均采用外光源。白炽灯提高成像对比；荧光灯成像柔和。应针对目的物选择使用。

成像背景对拍摄目的物有陪衬作用。目的物色深，反光性能差，宜用白背景；目的物色浅，反光性强，宜用黑背景。

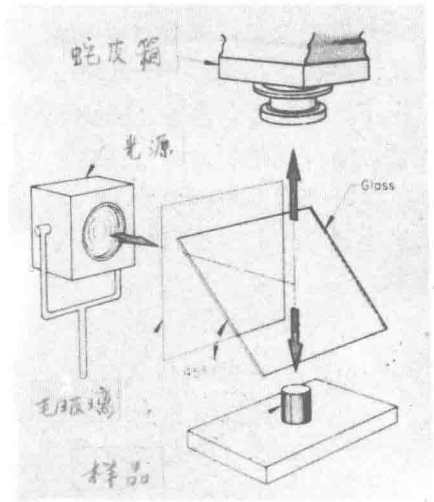
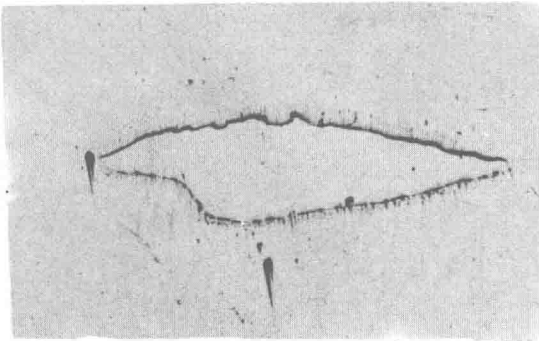
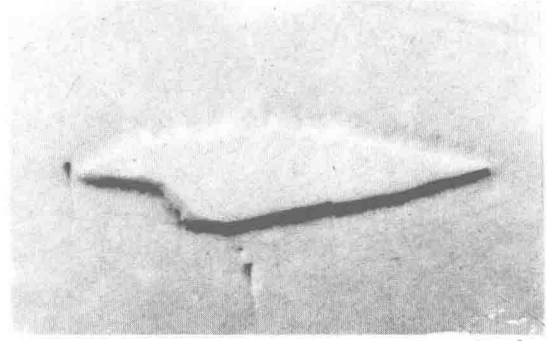


图2-5 垂直照明的光路布局



a 垂直照明 ×15



b 斜照明 ×15

图2-6 Mo夹杂的不同照明成像

断口表面粗糙、色深宜用斜照明；样品表面平坦光滑、色浅宜用垂直照明。

三、显微镜附件装置——全斜照明

若干显微镜带有数值孔径 $NA=0.06\sim0.10$ 的物镜，可在倍率大于20倍下作全斜照明成像显示。其成像原理系利用大倾角的空心锥形光照明，当光线投射到粗糙的、凹凸不平的或反光能力很差（如氧化或腐蚀所致）的表面时，所产生的漫射光可进入物镜成像。影像的对比度、清晰度均十分优异，分辨影像细节能力也强。

1、全斜照明的光路

它的光路即暗场照明光路，即出自灯源的光首先射达孔径光栏聚焦成像（此时采用平行光照明），在孔径光栏、视场光栏完全张开，插入环形透光挡块的情况下，光线以环形空心光束的方式经平面反射镜反射，不经过物镜后透镜而射达抛物面反光镜，这样光束变成空心锥形投向目的物（图2—7）。若目的物表面十分光滑，如此大角度入射的光线几乎全被反射，不能进入物镜成像；若目的物表面粗糙，或反光性能差，则会产生大量的漫射光进入物镜成像，获得清晰的断口或其它表面特征（包括结构，缺陷等）的影像。

图2—7 全斜照明光路

2、全斜照明的应用效果

（1）滑移带显示

滑移带是金属在外力作用下产生变形的结果。由于一组组滑移带间仅存在一定的微高差、没有显著的明暗区别，所以垂直照明只能显示粗大的滑移带，全斜照明显示更多更细的滑移带，而且影像清晰、层次分明（图2—8）。

（2）裂纹显示



a 垂直照明 ×50



b 全斜照明 ×50

图2—8 滑移带显示

不同性质的裂纹（如应力腐蚀、疲劳等），或者裂纹尺寸十分细小（如 $<1\text{mm}$ 以下），用一般方法成像显示十分困难，特别是使用零件、表面总有氧化腐蚀等干扰，唯用全斜照明效果最好（图2—9）。

（3）表面孔洞和损伤缺陷显示（其效果参见第六章）

（4）断口特征显示

利用全斜照明显示断口低倍特征，不仅在光学成像领域具有独特的优点，即使与现代的电子光学成像（如扫描电镜的二次电子像）相比，在色彩、特征细节和特征区域显示成像方面也很突出。

a、疲劳弧线

这是疲劳断口的重要特征之一，只要断口上有这种特征，用全斜照明总能显示。应用其它手段和方法难于保证特征细节显示的准确性和可靠性（图2—10）

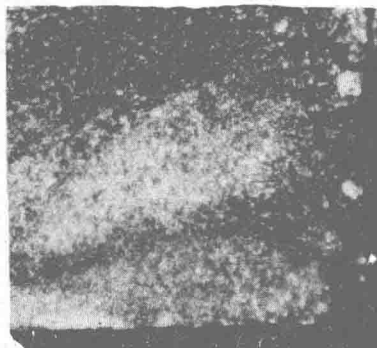
b、疲劳源



图2—9 全斜照明显示裂纹 $\times 25$



a 扫描二次电子像 $\times 50$



b 光学垂直照明成像 $\times 50$



c 光学全斜照明成像 $\times 50$

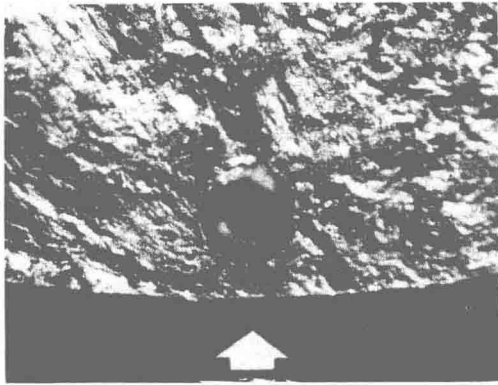
图2—10 同一断口的疲劳弧线用不同方法显示成像效果比较

疲劳断口分析，常需显示导致疲劳裂纹萌生的损伤缺陷，如冶金材质，冷热加工或维修使用过程中带来的种种损伤和缺陷。应用全斜照明成像显示其真实而清晰的形貌，即可判别损伤缺陷的性质。

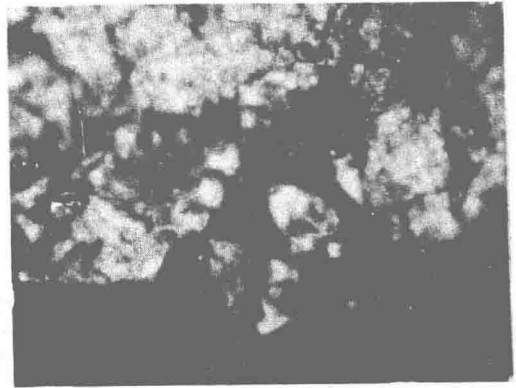
图2—11分别显示出了铸钢和铸铝零件疲劳失效，裂纹源于亚表面的气孔和暴露于表面的显微疏松缺陷。

c、沿晶断口

沿晶断口的特点是断裂沿晶粒间界进行，结果导致断面织构十分粗糙。全斜照明可在其表面产生大量的漫射光成像，所以能清晰的显示晶粒轮廓的外形，而显著地区别于穿晶断口。例如沿晶型的应力腐蚀、氢脆、过热、过烧断口，无论是整个断口或是断口结构的一部份区域具有沿晶分离行为，均可区别显示。图2—12所示系铝合金构件、焊接超温使近表层部位



a 铸钢亚表面的气孔 ×50



b 铸铝表面的显微疏松 ×80

图2-11 冶金材质缺陷导致的疲劳裂纹源

出现过烧现象，导致沿晶分离。特征是晶粒粗大，晶粒间因出现氧化裂纹而变得松脱。

2.2 微观分析

在失效分析中，微观一词的尺度泛指100~10000倍以上所能分辨的，以 $\text{\AA}$ 或 μm 为单位计算的结构细节。除形貌分析外，还包括微区成份和结构分析。因此采用的手段主要是扫描电镜、透射电镜以及光学显微镜等一些现代的多功能设备。



图2-12 沿晶分离形貌 ×80

微观分析的目的在于探索断裂失效过程中，应力、环境介质以及材料结构相互作用的结果，通过研究其微观形貌、微区成份或结构变化情况，为确定失效性质和原因提供微观分析情报。

2.2.1 光学显微镜

采用可见光波、并按几何光学原理设计成像。其点间分辨率公式可表达为

$$d = \frac{\lambda}{NA} = \frac{\lambda}{2\eta \sin \theta} \dots \dots \dots (2-1)$$

在上式中：

d —即点间分辨率，指可分辨的两点间的最小距离；

λ —可见光波长，常取 $\sim 5500 \text{\AA}$ ；

η —介质折射率，空气 $\eta = 1$ ，松柏油 $\eta = 1.515$ ；

θ —孔径角，属透镜特性；

$NA = 2\eta \sin \theta$ —称物镜数值孔径；

从公式(2-1)看出， λ 值一定， d 值随 NA 值增大而减小，即数值孔径大，分辨能力高，这在磨片分析和断口分析中都一样，但断口表面远不如磨片样品平坦光滑，所以作形貌