

# 合金钢断口分析金相图谱

冶金工业部钢铁研究院  
北京钢厂合编  
齐齐哈尔钢厂

科学出版社

# 合金钢断口分析金相图谱

冶金工业部钢铁研究院  
北京钢厂合编  
齐齐哈尔钢厂

---

科学出版社

1979

## 内 容 简 介

本图谱共分四部分：第1部分以文字为主，介绍各种研究断口的方法，包括断口宏观分析和应用光学显微镜、透射电子显微镜、扫描电子显微镜进行断口微观分析，并指出断口宏观分析与微观分析是相辅相成不可偏废的；第2部分至第4部分以照片为主，从各种典型断口的微观形态谈起，然后在第3部分详细地介绍本图谱的重点，即我国冶金和机械工业所见到的各种合金钢断口的宏观形貌和微观形态；观察时基本属于同一试样，除形貌外，为了说明断口的本质，对断口表面的第二相颗粒还做些X射线能谱分析及电子衍射花样分析；最后，扼要地叙述较常用性能试验的试样断口的宏观形貌和微观形态。

本书可供从事冶金、机械和国防工业等有关部门的技术工人、工程技术人员和科研、教育工作者参考。

## 合金钢断口分析金相图谱

冶金工业部钢铁研究院  
北 京 钢 厂 合编  
齐 齐 哈 尔 钢 厂

\*  
科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*  
1979年7月第 一 版 开 本：787×1092 1/16  
1979年7月第 一 次 印 刷 印 张：5 1/4 插 页：36  
印 数：0001—18,310 字 数：113,000

统一书号：15031·230

本社书号：1407·15—2

定 价：2.25 元

# 引 言

合金钢断口系合金钢材或合金钢构件断裂后,破坏部分外观形貌的通称。断口记录着裂纹的发生、扩展和断裂的过程,所以,长期以来人们通过断口主要进行下列研究:第一,分析合金钢材组织或缺陷的特征、本质及其对使用性能的影响,以正确判定钢材质量;第二,探讨金属构件断裂事故的内因和外因而吸取经验,避免事故再现;第三,研究金属断裂过程的微观机制,以阐明断裂过程的基本理论。

断口研究的发展情况,概括地说,可分为用肉眼,低倍率放大镜或光学显微镜直接观察阶段;用透射电子显微镜(简称透射电镜)观察断口复型的间接观察阶段;以及用扫描电子显微镜(简称扫描电镜)直接观察阶段。在这三个阶段中,国外对金属材料断口进行了大量研究工作,近年来,曾分别总结了这些工作,并汇编了一些断口分析金相图谱。

解放以后,随着我国冶金工业和各种机械工业的迅速发展,金属材料的研究工作不断深入。我国冶金工作者和机械工作者以较短的时间走过了国外研究金属断口的三个阶段。在第一阶段,主要对厚钢板和厚壁钢管的试样进行断口宏观形貌的研究,因为有些厚钢板以断口形貌作为主要的验收条件,有些钢管除要求力学性能外,并以断口形貌作为主要的参考技术指标。这一阶段,某些工厂研究了含稀土合金结构钢板的化学成分、冶炼工艺、热处理工艺对断口宏观形貌的影响;汇编并解释了某些断口缺陷的图片。但是,由于历史条件的限制,某些参考国外资料而定名的断口,定义欠严格,本质欠明确,经过一段时间实践后许多工厂要求统一名称,严格地定义。然而要做到这点,必须从微观上研究断口形态并寻找产生这种形态的内因。当透射电镜在金属材料的研究中得到广泛应用后,我国断口研究工作者成功地利用复型技术,对有冶金缺陷的断口进行微观形态的研究,把断口研究工作推进到第二阶段,即间接观察断口的阶段。大冶钢厂对平炉与电炉混炼的18Cr2Ni4WA钢过热断口的研究是第二阶段断口研究工作的典型例子之一。

我国进入断口研究发展的第三阶段,即用扫描电镜直接观察断口的阶段,时间仅约五年,但由于使用这种设备观察断口有制备试样简单、分辨率高、放大倍数可以从小到大连连续变化等优点,所以不论在研究项目的数量上,还是在研究内容的深度上,都有明显的变化。一些工厂、科研单位和使用单位开展了探讨断口本质的工作,取得了较显著的成绩。例如:第一,基本查明了电炉冶炼的一些合金结构钢中细而密“偏析线断口”的本质,通过采用合适的冶炼手段后,这种断口的严重程度可显著减少。第二,找到了电渣重熔钢锭的“贝壳状”断口与柱状晶的相应关系,阐明了以铸代锻的可能性与现实性。第三,探讨了“白点”焊合前后的微观形态,丰富了国内外研究白点微观形态的内容。第四,提出了“紊状断口”与“石状断口”的“过热”共性以及这两种断口形貌与试样晶界和晶粒本身的相对强度的关系,指出对过热一词要下严格的定义等等。

当前全国人民正在团结一致,为实现二十世纪中国工人阶级和中国人民的历史使命——建成伟大的社会主义的现代化强国而努力奋斗。广大冶金和机械工业的干部、工人和科学技术人员迫切要求编写一本适合于我国情况的合金钢断口分析金相图谱。为了

满足这一需要,我们几个单位在大冶钢厂、金属研究所等单位的帮助下,用生产与科研相结合的方式,总结了过去几年的工作,编写了这本《合金钢断口分析金相图谱》。它包括:常见的合金钢断口组织与缺陷的宏观形貌与微观形态;冶金厂较常用的一些性能试验后的试样断口的宏观形貌与微观形态。不包括合金钢构件断裂后的断口形貌。这是由于后者牵涉面很广,需另行组织协作编写。在图谱中微观形态以扫描电镜拍摄的断口图象为主,配合一定比例的透射电镜、光学显微镜拍摄的断口图象或金相组织,同时收入一些电子衍射花样和能谱曲线。

本书分四部分:其中第1部分介绍合金材料断口的分类及各种研究断口的方法,后者包括:断口宏观分析,应用光学显微镜研究断口,应用透射电镜研究断口以及应用扫描电镜研究断口等。编写本部分的目的是让读者注意到,每种研究手段都是一分为二的,各有其优点与缺点。例如:光学显微镜投资少,但景深浅;透射电镜分辨率高,但工序繁复,宏观区域和微观区域难于对应;扫描电子显微镜操作方便,但价格高,分辨率不如透射电镜等……。此外,也让从事断口研究的人员考虑到就地取材,因陋就简地选用测试设备,解决问题。

第2部分介绍各种典型断口的微观形态。

第3部分系本图谱的重点,较详细地介绍目前我国冶金和机械工业常见的各种合金钢断口的形貌。本章所称某种断口,基本上系指含有该种冶金缺陷的断口(但也包括个别的正常断口,如纤维状断口)。例如:“白点断口”系指含有白点缺陷的断口。图片的编排是先宏观形貌(包括酸浸低倍图片),后微观形态(包括金相组织)。并且尽量做到两者属于同一块试样。除形貌外,为了说明断口的本质,对断口表面的第二相颗粒,还做些必要的X射线能谱分析及电子衍射花样分析。

第4部分扼要地介绍各类试样断口的形貌,也采用先宏观后微观的形式编排。

全书基本上以图为主,断口说明力求简明扼要。但是,为了让读者对断口分析方法有较完整的概念,根据征集得的建议第一部分的内容叙述得详细一些。

书末图谱照片外侧点线中的数字,是指本页上照片在文中属于第几部分或第几节。

在编写这本图谱的过程中,自始至终得到钢铁学院柯俊教授的指导,并得到该校金属物理教研室全体同志的支持,他们在百忙中审阅了书稿,提出许多宝贵的意见,对此我们表示衷心的感谢。

由于经验和水平有限,书中不妥之处在所难免,欢迎广大读者批评、补充、指正。

**编者**

1978年6月

# 目 录

引言	iii
<b>第 1 部分 断口分类及研究断口的方法</b>	<b>1</b>
(1) 合金材料断口的分类方法	1
i. 按断裂性质分类	1
ii. 按断裂途径分类	1
iii. 按断口形貌和材料冶金缺陷性质分类	1
(2) 断口宏观分析	2
i. 断口宏观分析的意义	2
ii. 断口宏观分析方法的基本概念及其应用	2
iii. 断口宏观分析的手段	6
iv. 断口表面的保护与清洗	7
(3) 光学显微镜在断口研究中的应用	8
i. 光学显微镜的基本原理	8
ii. 光学显微镜观察断口的方法	9
(4) 透射电镜在断口研究中的应用	10
i. 透射电镜——研究断口微观形态的主要手段之一	10
ii. 透射电镜的基本原理	11
iii. 透射电镜在断口研究中的应用之一——形貌观察	13
iv. 透射电镜在断口研究中的应用之二——物相分析	15
v. 透射电镜与扫描电镜的比较	22
(5) 扫描电镜在断口研究中的应用	23
i. 扫描电镜的基本原理	23
ii. 扫描电镜在断口研究中的应用	29
<b>第 2 部分 各种典型断口的微观形态及其简释</b>	<b>40</b>
(1) 解理断口	40
(2) 准解理断口	41
(3) 韧窝断口(延性断口)	41
(4) 晶界断裂断口	42
(5) 疲劳断口	42
(6) 环境介质侵袭下的断口形态	43
i. 应力腐蚀开裂断口	43
ii. 氢脆断口	43
iii. 液态金属脆化和固态金属脆化断口	44
iv. 腐蚀疲劳断口	44
v. 高温蠕变断口	44
(7) 其它断口	44

<b>第 3 部分 合金钢冶金缺陷断口(包括一些正常断口)的宏观形貌和微观形态</b> .....	45
(1) 纤维状断口.....	45
(2) 萁状断口.....	45
(3) 结晶状断口.....	47
(4) 横列结晶断口.....	48
(5) 瓷状断口.....	49
(6) 贝壳状断口.....	49
(7) 缩管残余断口.....	50
(8) 非金属夹杂(肉眼可见)断口.....	51
(9) 偏析线断口.....	52
(10) 台状断口.....	53
(11) 轴心裂纹断口.....	54
(12) 内裂断口.....	56
(13) 木纹状断口.....	57
(14) 气泡断口.....	58
(15) 亮点或亮线断口.....	59
(16) 撕痕状断口.....	60
(17) 异金属夹杂断口.....	61
(18) 石状断口.....	61
(19) 黑脆断口.....	63
(20) 分层断口.....	64
(21) 中心碳偏聚断口.....	64
(22) 白点断口.....	66
<b>第 4 部分 较常用性能试验的试样断口的宏观形貌与微观形态</b> .....	68
(1) 拉伸试验的试样断口.....	68
i. 纤维状.....	68
ii. 星形.....	68
(2) 不同温度下试验的冲击试样断口.....	68
(3) 疲劳试验的试样断口.....	69
(4) 断裂韧性试验的试样断口.....	70
(5) 回火脆性试验的试样断口.....	70
(6) 应力腐蚀试验的试样断口.....	71
(7) 氢脆试验的试样断口.....	71
<b>参考文献</b> .....	72
<b>中英对照表</b> .....	74
<b>照片</b> .....	77

# 第 1 部分 断口分类及研究断口的方法

## (1) 合金材料断口的分类方法

断口分类方法很多,可归纳为以下三方面:

### i. 按断裂性质分类

(a) 脆性断口 脆性断口是断裂前不产生明显的宏观塑性变形,即材料在达到屈服点之前便发生断裂的断口。脆性断口主要是指解理断口、准解理断口和冰糖状晶界断口。

(b) 韧性断口 韧性断口是材料在断裂时有明显的塑性变形,断口的宏观形貌为纤维状,颜色发暗,有明显的滑移现象。韧性断口的微观特征是韧窝。

(c) 疲劳断口 由循环载荷或重复载荷引起断裂的断口称为疲劳断口。在工作中断裂的机械零件大多数属于这种断裂类型。

疲劳可分为机械疲劳、冷热疲劳、高周疲劳和低周疲劳等等。

(d) 由介质和热的影响而断裂的断口 属于这类的断口有:应力腐蚀开裂的断口,氢脆断口,液态金属脆化和固态金属脆化的断口,腐蚀疲劳断口和高温蠕变断口等。

### ii. 按断裂途径分类

(a) 穿晶断口 穿晶断口是大多数合金材料在常温下断裂时的形态,例如,由微孔聚集而形成的韧窝断口、解理断口、准解理断口、撕裂断口及大多数疲劳断口等。

穿晶断口可以是韧性的,例如韧窝断口,亦可以是脆性的,例如,解理断口和准解理断口。

(b) 晶界断口 晶界断口可分为脆性的和韧性的。

晶界脆性断口包括回火脆性断口、氢脆断口、应力腐蚀断口、淬裂断口、液态金属脆化和由脆性析出相在晶界上的析出而形成的晶界断口等。晶界脆性断口微观上多为冰糖状。

晶界韧性断口包括由过热引起的沿原始奥氏体晶界开裂的断口和某些沿柱状晶晶粒边界开裂的断口,例如贝壳状断口、横列结晶等。

疲劳断口大多数为穿晶的,但亦有沿晶界的。

(c) 混合断口 在生产和科研实践中所遇到的断口,往往不是单一机制的穿晶断裂或晶界断裂,而常常是混杂存在,例如在穿晶断口的基体上有部分区域为晶界断口或反之,我们称这种断口为混合断口。

### iii. 按断口形貌和材料冶金缺陷性质分类

根据断口宏观形貌特征或在断口上所显露的冶金缺陷的性质而命名的断口名称很多。目前我国各冶金厂认识较为统一的断口名称是:纤维状,结晶状,瓷状(干纤维状)。



石状, 茶状, 白点, 黑脆(石墨状), 内裂, 横列结晶, 偏析线, 气泡, 非金属夹杂(肉眼可见的)和夹渣及缩管残余(收缩疏松)等十余种。认识尚不统一的断口名称有撕痕状, 台状, 木纹状, 分层, 贝壳状, 亮线, 中心碳偏聚(中心增碳)等十来种。

这种分类法是目前工厂企业进行断口检验时较常用的方法。但是由于对其本质认识尚欠统一, 定义不够严格, 所以叫法不一致, 需要加以分析并统一。

## (2) 断口宏观分析

### i. 断口宏观分析的意义

断口分析分断口宏观分析和断口微观分析两种。断口宏观分析系指用肉眼、放大镜或低倍率光学显微镜来研究断口特征的一种方法, 是断口分析过程中的第一步, 是整个断口分析的基础。因为它简便易行, 早在中世纪(1540年)就被用来评价金属的性质<sup>[1]</sup>。约在一百多年前, 一些学者对金属试样的几何形状, 热处理条件和加载速度的变化对断口形貌特征的影响, 已有较明确的结论。现在人们运用断口宏观分析, 可以确定金属断裂的性质(例如: 是脆性断裂、韧性断裂还是疲劳断裂); 可以分析金属材料断裂源的位置和裂纹传播的方向; 可以判断钢材的冶金质量和热处理质量。但断口宏观分析的结果一般需进一步地深化, 必须用其它手段观察宏观不能见到的断口的细节, 探讨宏观不能得到的裂纹形成和扩展的机理。这些手段中重要的手段之一是使用透射电镜或扫描电镜观察断口, 即所谓断口微观分析。就断口的观察过程来说, 断口宏观分析和断口微观分析是整个断口分析过程的两个阶段。如果对断口只做宏观分析, 不做微观分析, 犹如只见森林不见树木, 反之如果对断口只做微观分析, 不做宏观分析, 犹如只见树木不见森林。因此它们是相辅相成, 不可偏废的。

### ii. 断口宏观分析方法的基本概念及其应用

断口形貌十分真实地记载了断裂过程, 断口宏观分析就是用宏观的方法分析断口的形貌特征, 断裂源的位置, 裂纹扩展方向, 以及各种因素(如材料强度水平、试样或构件的几何形状、试验温度、工作环境、热加工及热处理工艺等)对断口形貌特征的影响。

因此, 首先应熟悉金属材料断裂的基本特征。通过对断口(试样断口或事故断裂部件断口)的宏观观察, 人们注意到这样一个事实: 尽管材料不同, 断裂的方式不一样, 从断裂力学的观点看, 断裂过程总是存在着共同的特征: 即裂纹生核及缓慢生长区, 裂纹快速扩展区和瞬时断裂区。现以拉伸和冲击两类试样断口为例, 介绍材料断裂的这些基本特征。照片1.1和照片1.2分别为无缺口拉伸试样和冲击试样的断口及三个断裂区域的示意图。

第一, 裂纹生核及缓慢生长区: 在应力作用下, 材料内部第二相粒子、晶界或有缺陷的地方产生显微空洞, 随着应力的提高新的显微空洞继续产生, 原有的显微空洞不断长大, 互相联接, 使裂纹继续缓慢长大, 并在断口上留下许多变形痕迹, 呈粗糙的纤维状, 因此称“纤维区”。

第二, 裂纹快速扩展区: 当裂纹慢速扩展到某一个临界尺寸后就向快速的不稳定扩展转化, 快速扩展区断口特征呈放射状花样; 因此称这个区域为“放射区”。放射方向与裂纹扩展方向相平行, 而垂直于裂纹前沿的轮廓线, 并逆指向裂纹源。

第三,瞬时断裂区:这是断裂过程的最后阶段,常形成剪切唇。剪切唇表面一般为纤维状,拉伸试样的剪切唇,与拉伸应力轴的交角约为 $45^{\circ}$ ,是一种典型剪切断口。

断口上纤维区,放射区,剪切唇三个区域的存在与否、大小、位置、比例、形态等等随着材料的强度水平,应力状态,尺寸大小,几何形状,内外缺陷及其位置,温度高低,外界环境等等的不同而有很大的变化。例如材料韧性好的,纤维区占的面积较大,甚至没有放射区,全是纤维区加剪切唇。而材料脆性大的,放射区增加,纤维区缩小。晶界断裂与解理断裂的脆性材料断口,甚至不存在纤维区和剪切唇,而且放射区具有与放射花样不同的特征,即呈“结晶状”,或“瓷状”,甚至“冰糖状”特征。

三个区域的相对位置也由于裂纹起始位置是在材料表面还是内部而发生改变。

同一种材料随着温度的降低,纤维区,剪切唇减少,放射区增大。

三个区域还随着材料或构件的几何形状而变,如裂纹主要沿宽度方向扩展的板材,纤维区呈椭圆形,放射区则出现“人字纹”花样。人字纹的尖顶指向纤维区,指向裂纹源。而且随着厚度的减小,剪切唇面积增大,放射区面积缩小,甚至出现全剪切断口。极脆材料有时就不存在纤维区。

由于钢材或构件的断口基本特征与其断裂过程及各种影响因素有着内在的联系,因而可以应用断口宏观分析方法进行下述三方面的工作:

第一,检验钢材质量:按照冶金工业部标准 YB 46-64 的规定进行。我国冶金工业和各种机械制造业用这种方法检验钢材质量时,所见到的断口宏观形貌有二十余种,有的已列入各类标准,有的未列入标准,其中大部分收入本图谱第三部分。

若材料内部存在着冶炼、热加工或热处理等过程所造成的缺陷,则在受力过程中缺陷附近产生应力集中,断裂时影响裂纹扩展,在断口上留下变形的痕迹;这些缺陷可能表现为点、线或片等不同形态。根据这些痕迹可以判断缺陷的性质和类型。由于采用不同的折断方式,材料缺陷在断口上呈现的特征也有变化,因此在断口检验标准 YB 46-64 中对检验钢材的刻槽位置,打断方式等均做了统一规定。

钢材质量宏观分析是从宏观上观察这些断口的形貌特征,判断断口是纤维状、瓷状,还是结晶状等等。一般韧性好的断口呈“纤维状”(断口呈暗灰色,无金属光泽,无结晶颗粒)。脆性的断口呈“结晶状”(无明显宏观变形,断口亮灰色,具有明显结晶颗粒,强金属光泽)或“瓷状”(呈亮灰色,致密,有绸缎光泽,类似细瓷碎片的断口)。分析缺陷的形状是以片、线还是点为主?呈什么颜色?分布在断口的全部还是局部?是边缘还是中部?是相当于钢锭的头部还是尾部?处于钢锭的柱状晶区还是等轴晶区等等。然后根据上述形状、颜色、分布等的特征和钢材的冶炼加工方法,参考已有图片,确定断口的类型和缺陷的性质及其程度。必要时补充微观分析。

第二,探讨力学性能不合要求的原因:当力学性能试验不合要求时,断口宏观分析有助于探讨原因。一般方法是,一方面从断口形貌上看上述三个区域是否受到冶金质量或热处理工艺等的影响。例如照片 1.3 是因元素偏析引起回火脆性的 40 Cr 钢冲击试样的断口形貌。这里放射区被许多低洼的亮坑所代替,用扫描电镜观察时这些亮坑是沿晶界断裂部分。另一方面应考虑这三个区域的相对大小随着试样的尺寸与几何形状、材料的强度水平和试验温度而变。分析时应先注意这些因素是否存在,然后再细加观察。这里应顺便指出,当钢材的各向异性严重时,横向冲击试样断口上的纤维状区或放射区会因取

样方向不同而有很大的变化。目前为了识别厚钢板的各向异性对纵横向试样断口形貌的影响,常在取样时用下述方法标明试样位置,如图 1.1<sup>[2]</sup>。

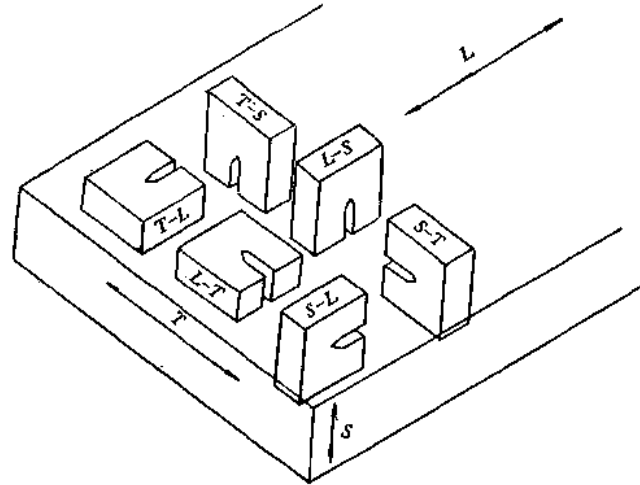


图 1.1 厚钢板纵横向试样标志法

T——板宽; S——板厚; L——轧制方向

第三,寻找断裂源:断口分析的一个重要方面,在于确定断裂源的位置及裂纹走向,以分析发生断裂的原因和断裂的性质。根据现代断裂力学的观点,金属构件的断裂不是突然发生的。即使对于脆性材料来说也有一个过程,这个过程就是:在应力作用下,构件的某个地方裂纹萌生,然后逐渐扩展到某一临界尺寸后,快速发展,导致构件最后断裂。即裂纹生核,扩展到瞬时断裂的三个过程。

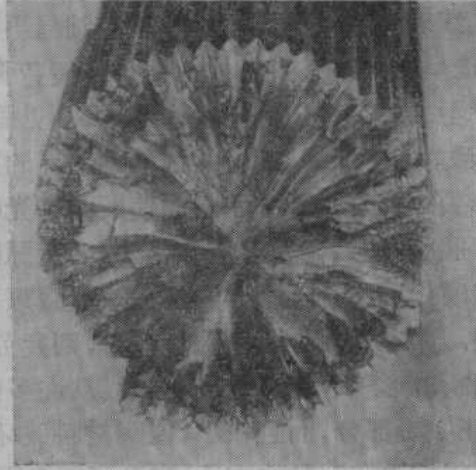
一般说来,如果事先知道构件的几何形状和应力状态,也就易于查明断裂源的位置。例如旋转弯曲疲劳试样,表面应力最大,因此裂纹往往从表面某个薄弱的地方开始,逐渐扩展,产生疲劳断裂。寻求断裂源还有一些可以利用的标志,例如裂纹快速扩展造成的“放射状”或“人字形”特征总是背指纤维区或断裂源。因此我们可以根据这样一些标志来确定裂纹源的位置。例如照片 1.4 疲劳断裂源在表面部分位于图的下部,照片 1.5 断裂源在试样的左下侧。但应注意,在表面伤痕的底部,接近平面应变状态以致局部的  $K_1$  接近  $K_{Ic}$  的情况下,可能产生反人字形花样。厚度远小于长度和宽度的构件或试样产生快速断裂时,常常会出现人字形花样。观察一些具体的断口形貌时,应注意这些花样的变化。

疲劳断口的研究十分重要,在全部结构零件的破坏中,疲劳断裂占 80—90%。疲劳断裂有两种:(1)低周疲劳(疲劳应力高于屈服应力,每周期所产生的塑性变形量相当大,疲劳寿命较低,在  $10^2$ — $10^5$  次之间);(2)高周疲劳(疲劳应力低于屈服应力,每周期所产生的塑性变形量小,疲劳寿命较高,在  $10^6$  次以上)<sup>[3]</sup>。疲劳断口按照断裂过程同样有三个区域,即疲劳核心区,疲劳裂纹扩展区,瞬时断裂区。相应的断口特征是疲劳源,疲劳弧线或疲劳沟线(实际是纤维区的变态),放射区和剪切唇。

疲劳源用肉眼或低倍放大镜就能大致判断其位置,疲劳源是疲劳破坏的起点。它一般总是发生在表面,但如果构件内部存在缺陷,如脆性夹杂物、空洞、化学成分的偏析等,也可在构件皮下或内部发生。疲劳源数目有时不只一个而有数个。



图 1.2 40CrNiMoA 钢主联杆断面形貌，疲劳源在左上角



LM 1X  
图 1.4 40Cr 钢转向垂直管轴的断面形貌



LM\* 3X

图 1.3 主连杆断面，外表碰伤处是源区，由此向四周以放射状疲劳沟线扩展，放射状背指断裂源

LM: 光学显微镜照片;  
TEM: 透射电镜图像;

凡未注明图像均为扫描电镜 (SEM) 图像。

疲劳裂纹扩展区是疲劳断口上最重要的特征区域,断口常有疲劳弧线和疲劳沟线(疲劳弧线标志着机器开动与停止,应力发生变化时,疲劳裂纹扩展过程中所留下的宏观变形痕迹。疲劳沟线表明裂纹扩展不是在一个结晶平面上,而具有台阶)。它们是从疲劳源开始,向四周推进呈弧形线条或呈放射线条。疲劳弧线垂直于疲劳裂纹扩展方向,见图 1.2,疲劳沟线平行于裂纹扩展方向,背指裂纹源,见图 1.3。有时,在疲劳源周围,存在着非常光滑、非常细致,疲劳弧线、疲劳沟线均不明显的狭小区域。这是由于疲劳裂纹在该区扩展速度很慢,裂纹反复张开和闭合而使断面磨光的缘故。尽管这个区域从本质上看应属于疲劳裂纹扩展区,但人们常习惯称它为“疲劳源区”,见照片 1.6。表面硬化处理的构件,疲劳源一般在硬化层和心部交界的地方。受载频率较低,或匀速旋转的疲劳断口可能看不到疲劳弧线。如果有几个断裂源存在时,则疲劳断口常常具有锯齿形的台阶,图 1.4 是转向垂臂轴的断口形貌,可以看到放射线从许多键槽的底部往中心发展,是多源疲劳断裂,最后断裂在中心部分,而且较小,说明材料破坏时超载不大,根据这种分析,机械厂用改变热处理工艺或改变钢种的方法,避免了断裂现象。

氢脆和应力腐蚀的断口形貌,通常是难以分辨的。但应力腐蚀的开始点往往是在构件表面的某个地方。而氢脆则在内部产生。如果有腐蚀产物存在的话,在氢脆断口上往往是均匀分布的,而在应力腐蚀断口上,腐蚀产物主要集中断裂源的地方。

### iii. 断口宏观分析的手段

对断口进行宏观观察的手段简单而容易得到。常用的是放大镜,低倍率立体显微镜和深景照相显微镜。图 1.5 是带有照相设备的低倍率立体显微镜。它主要由主体、载物台、光源和照相机所组成。在主体的下端装有可更换放大倍数的物镜。在主体的上端装有双目镜筒并配有适当的目镜。镜筒可依观察者双目瞳孔距离调整其间距。在主体上还有变换放大倍数用的旋钮和调节焦距用的粗动和细动旋钮。在右(左)眼获得清晰图象后,再稍转动左(右)目镜筒的滚花螺旋可获得清晰图象。载物台形式多样,为便于从各方位观察整个断口的形貌,在条件允许时最好有能在 X、Y 两方向移动的载物台,或作任意倾斜的球形载物台。光源可直接安装在主体的折臂上或单独支架上。为获得匀称照明并富有立体感,除有一个倾斜照明的主光源外应添设 1—2 个辅助光源。照相机可依具体条件配用。近来为了可在现场观察和拍摄不易取样的大型部件的断口,有的立体显微镜还附有可以拧在部件上的辅助支架。

进行断口宏观分析时,一般先用肉眼或低倍率放大镜观察整个断口各区的概貌及其相互方位,然后选择要看细节的地方,再逐渐增加显微镜的放大倍数,以便仔细观察细致结构。

主光源的光线宜以适当的倾角(一般为 30—45°),投射到断口面上,使产生阴影,增加组织的衬度,产生立体感,辅助光源避免断口凹凸悬殊的地方明暗反差太大,产生失真现象。只要条件许可就应拍摄断口宏观照片。拍摄之前要全面而详细地观察断口,确定哪些特征是主要的,哪些特征是次要的,做好记录划出示意图,标明拍摄视场在整个断口上的位置。然后拍摄主要区域。

断口形貌多高低不平,为真实记录它,常拍摄“立体对”照片。立体对的原理是:人的两眼同时观察同一物体所反映的深度感觉称为“实体灵敏性”,或称为“体视效应”。常人



的两眼相距 64 毫米,每眼均是由不同的观点来观察物体,因此在每眼的网膜上所形成的映象亦彼此不同.如图 1.6,左眼看到的视野是  $\widehat{AB}$ ,右眼看到的视野是  $\widehat{A'B'}$ ,经过人的思维活动,将两图象合成为一个图象,显示其立体性和完全性,这就有了立体效应.立体对照片的立体感就是模仿人眼观察物体产生立体感时的条件,即是在物体位置不变,采光条件不变,放大倍数相等的条件下拍摄与左右眼观察时有相同视野的两张照片.拍摄立体对照片的方法是将断口试样置于低倍率立体显微镜下,在清晰地观察到它的立体图象后,两架照相机同时或一架照相机分别在两个目镜筒上拍摄,得到一对照片.这一对断口照片就是立体对.照片 1.7 和照片 1.8 是偏析线断口和横列结晶断口的立体对照片.

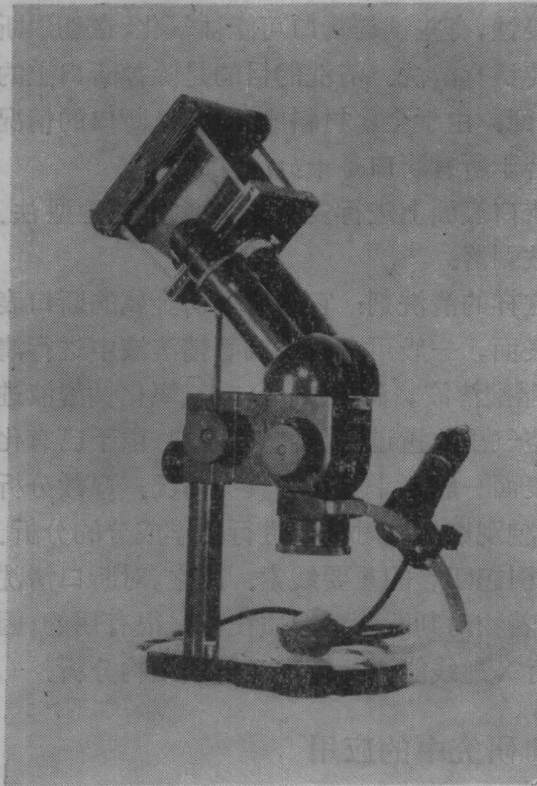


图 1.5 低倍率立体显微镜

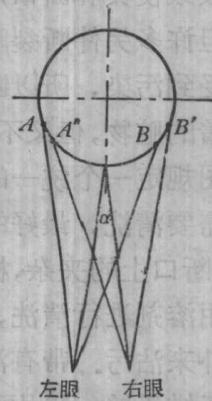


图 1.6 立体对成像原理示意图

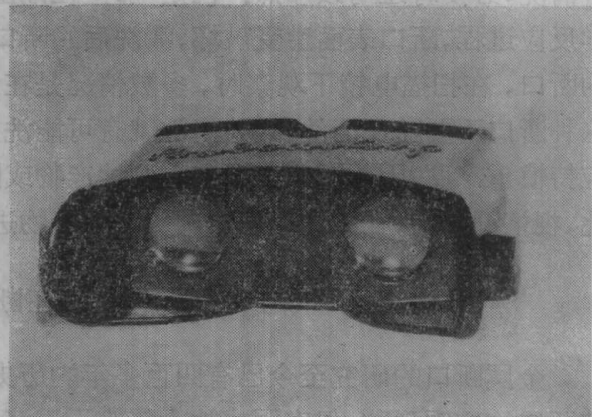


图 1.7 双目立体观片镜

观察立体对照片时可以应用“双目立体观片镜”见图 1.7,这种双目立体观片镜可以用两块放大镜片自制,见图 1.8.最简单的方法是用一个硬纸板或者把两张纸卷成两卷长约 200 毫米,直径约 25 毫米的纸筒.将立体对照片放在双目立体观片镜里或自制双纸筒下观察,当左右眼分别看到的两张照片的图象发生重叠时,在观察者的眼前就出现有立体感的断口形貌.

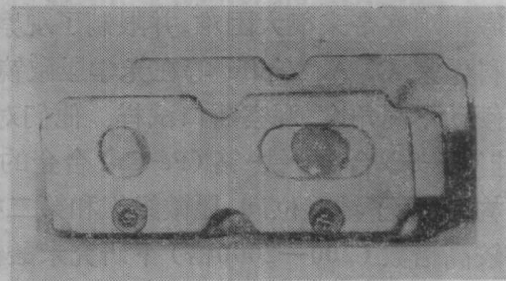


图 1.8 自制的双目立体观片镜

#### iv. 断口表面的保护与清洗

为了研究造成断裂的原因,就要求断口表面保持断裂瞬时的真实状态,否则会引引起分

析上的困难。为此,保护断口,不让它受损变质,就成为一个很重要的问题。保护断口要遵循既不增加外来物也不使断口上原有的东西失掉为原则,必须强调指出的是,断口面绝不能受冲撞或磨损,因为这是对断口形貌无可挽回的破坏。所以,打断的新鲜断口,应立即放在干燥器里,以免断口受潮,氧化变质。用于扫描电镜观察的断口试样,一般都要进行切割。切割之前,一定要采取措施将断口表面保护起来。通常采用两种方法:第一,用5%的火棉胶醋酸异戊脂溶液均匀地涂在断口表面上,干后切割,再泡在醋酸异戊脂溶液里面,使断口上的火棉胶完全溶净,再用丙酮进行清洗,热风吹干后观察。第二,如果断口试样不须使用切片或线切割机,只用钢锯就可以切割时,就在断口上覆盖一层干净的纸,再用塑料胶纸使其和断口周围表面牢牢粘住。避免在切割过程中锯屑或其他脏物落在断口表面。但许多零件断裂时常被环境介质侵蚀,有些试样断口可能被氧化,在切取断口试样时可能受到污染,所以断口在分析之前要认真清洗。清洗的目的是除掉断口上的腐蚀产物或附着的脏物,但又不损伤断口本身特征。由于金属材料成分不同,断口的情况也不相同。企图规定一个统一的清洗规程以适合于所有断口是十分困难的。

如果断口需要清洗,最好的方法是反复在断口表面上进行复型即所谓空白复型法。不过应该注意,断口上的夹杂,析出相等可能会剥落。

如果需要用溶剂进行清洗,就要注意选择这样的清洗剂:它既不损伤金属的断口表面,又能除去外来沾污。带有油脂或油的断口表面,一般可在丙酮或酒精溶液中进行清洗。如果这样还嫌不够,可用弱酸(草酸溶液,醋酸溶液,磷酸溶液)或氢氧化钠溶液进行清洗,必要时还可以加热。但是,那些在潮湿空气里放置过久,生锈的断口,由于已有化学反应过程,断口表面遭受破坏,清洗后的断口表面一般不是原先的真实情况。事故分析的断口,在扫描电镜下观察时,多数情况是在形貌观察的同时又要进行化学成分的分析。这种断口不要随便清洗,因为清洗就有可能洗掉引起断裂的重要线索。总之,对断口清洗应持慎重态度,因为断口表面上的腐蚀产物或附着物对判断断口性质往往是很有用的,因此,视情况需要,在清洗前应对锈层或附着物进行X射线能谱分析或X射线结构分析。

### (3) 光学显微镜在断口研究中的应用

金属断口的研究至今已有四百多年的历史,最初是用肉眼或放大镜(小于20倍)研究断口的宏观形貌,但肉眼或放大镜难于看清单断口的细微结构。1722年法国科学家R.A. F. de Réaumur开始用光学显微镜研究金属的断口,但是以后发现金属断口的粗糙表面给光学显微镜观察带来很大困难,并限制了观察时的放大倍数(一般只能达到50倍)。1945年美国科学家C. A. Zapffe等在光学显微镜载物台上安装了转动断口试样的辅助设备,将断口倾动不同角度,观察断口试样。他们对锌(Zn),铋(B),锑(Sb),钼(Mo),钨(W),铁-硅(Fe-Si)合金,铁-铬(Fe-Cr)合金的解理断口进行了研究,发现解理面上有许多细致结构,阐明了结晶位向,显微组织和第二相与断口特征的关系。随后就有人用光学显微镜在较高倍数(200—2000倍)下研究未酸蚀和酸蚀的高铬不锈钢和其它金属的解理面。

#### i. 光学显微镜的基本原理

光学显微镜的光源是采用可见光波,它是运用几何光学的原理而设计的。图1.9是光学显微镜的简单工作原理。物体OA放在显微镜的物镜前焦面(经过焦点的平面) $F_A$ 和

两倍焦距之间,经物镜放大后的倒立实像  $O'A'$  位于目镜前焦面  $F_B$  略向里一些。通过目镜  $B$  观察实像  $O'A'$  时,在明视距离(250毫米)处出现一个仍然倒立的再经放大的虚像。这个最后映现在人眼中的虚像是经过物镜与目镜两次放大的结果。显微镜放大倍数  $M = \text{物镜放大倍数} \times \text{目镜放大倍数}$ ,因而放大倍数远较放大镜为高。光学显微镜能将断口的细致结构清晰地放大到什么程度,主要取决于它的分辨率  $d$ 。

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}$$

式中:  $d$ ——可分辨的两点间的最小距离,埃( $\text{\AA}$ );

$\lambda$ ——波长,埃;

$n$ ——折射率;

$\theta$ ——孔径角。

从上述关系式中可以看到,分辨率  $d$  与波长  $\lambda$  成正比,与物镜的数值孔径  $n \sin \theta$  成反比。在采用白光照明时,光学显微镜的分辨率为 2500 埃左右,相应的放大倍数为 1600—2000 倍。由于受到光的衍射作用的影响,分辨率受到限制,因此进一步提高放大倍数是无益的,它并不能帮助我们看清晰断口的更细致结构。尽管如此,光学显微镜完全可以对断口作许多深入细致的研究工作。

用光学显微镜进行断口研究时,更为重要的是显微镜的景深。根据推导:

$$\text{景深} = \frac{1}{7M \sin \theta} + \frac{\lambda}{2n \sin^2 \theta}$$

由上式可以看出当放大倍数  $M$  增高时,景深必然减小。放大倍数为 500~1000 倍时研究比较平坦的疲劳断口和解理断口是可行的,而对断口上凹凸相差很多的浮雕就难以同时有清晰的图像。所使用物镜的放大倍数愈高时,物镜与断口之间的工作距离愈短,在选择观察视场而移动断口试样时易损坏物镜。可见光学显微镜景深小,限制了光学显微镜在断口研究中的适用范围。

光学显微镜按光学行程的布置可分为两类:直立式——试样磨面(或断口面)朝上,物镜朝下;倒立式——试样磨面(或断口面)朝下,物镜朝上。要获得良好的观察效果,必须使被观察的部分垂直于光轴。因此,如果采用倒立式光程,最好在载物台上安装可以转动断口试样的辅助设备。如果采用直立式光程,应将试样置于胶泥上,使其可以转动不同角度,让断口上要观察的部位垂直于光轴。

## ii. 光学显微镜观察断口的方法

用光学显微镜观察断口的方法可分为下列三种:

(a) 直接观察法 此法系将断口试样直接在光学显微镜下观察,断口试样的大小可与金相试样尺寸相近。若断口试样尺寸过大,应将所需观察的部分用光滑而干净的纸盖

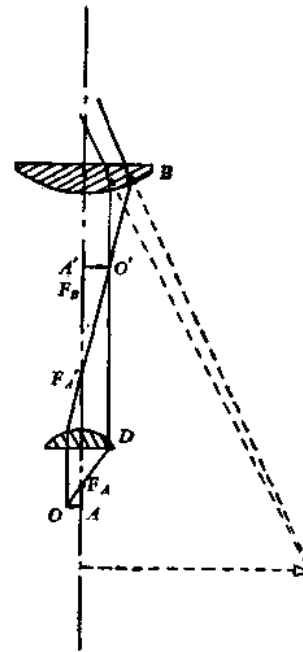


图 1.9 光学显微镜的简单工作原理



上,再用胶纸包裹好,然后切取,要保证取下的断口干净无损,若稍有沾污可用丙酮清洗。观察时先将断口倾动不同角度,使断口上较平坦的小平面对准物镜光轴,然后调焦。通常先用低倍数然后对感兴趣的区域再用高倍数观察。用光学显微镜直接观察拍摄的断口特征见照片 1.9 和照片 1.10。它们是电炉冶炼的 GCr 15 轴承钢,在热轧状态下出现的结晶状断口的解理断裂特征。解理是沿一定结晶学平面发生。理想情况下,解理断面应形成无特征的十分平坦的分离面。但实际上裂纹常在一个晶粒内不同的解理面上发生,并相互连接起来形成台阶,产生所谓“河流花样”或“扇形花样”。

照片 1.11 是白点断口的特征。照片 1.12 是旋转疲劳断裂的疲劳断口特征。由于光学显微镜景深限制,后一种断口图象由暗区(模糊)和亮区(清晰)两部分组成。暗区是低凹处,亮区系一系列条带。

(b) 间接观察法 这方法是用复型把粗糙不平的断口形貌展平,从而有效地利用了光学显微镜的分辨率。对于大型断裂件,由于很难在其上截取小的断口试样,用此法是很方便的。复型方法是将厚度约 0.1 毫米的醋酸纤维薄膜,用丙酮软化后贴在断口表面上,待溶剂蒸发后揭下醋酸纤维薄膜,然后置于真空喷镀仪上喷镀一层 100 埃左右的铝或铬层(也可以喷镀一层碳或金)。喷镀层的反射能力强,大大提高成象亮度及反差,观察时置于物镜下,最好采用倾斜反射光和透射光,照片 1.13 是用复型法观察摄得的结晶状断口的解理特征。

(c) 镀镍法 此法先在断口表面镀一层镍,以完整地保存断口的形貌特征,然后在垂直于断口的方向制成金相磨面,在光学显微镜上观察。这种方法一般是观察裂纹(即断口表面)走向与晶界的关系,分析裂纹是沿晶界发展的还是穿晶的,以及裂纹处的夹杂物情况等。断口镀镍后的情况见照片 1.14。

所用的镀镍剂如下:

1. 硫酸镍	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	(工业纯) 35 克
2. 次亚磷酸钠	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4$	(工业纯) 20 克
3. 醋酸钠	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{Na} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	(工业纯) 20 克
4. 柠檬酸钠	$\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(工业纯) 15 克
5. 硫酸镁	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	(工业纯) 15 克
6. 水	$\text{H}_2\text{O}$	1000 毫升

药品按顺序溶解,溶液应加热到 90—95℃,试样镀镍前需清洗,试样放入溶液 3 小时左右,镀层一般可达 0.01 毫米。

除上述结晶状断口和疲劳断口外,有人将高强度低合金钢的纤维状断口在光学显微镜下观察,效果也较好。

光学显微镜已经在工厂中普遍使用,只要可能,就应充分发挥光学显微镜在断口研究中的作用。

#### (4) 透射电镜在断口研究中的应用

##### i. 透射电镜——研究断口微观形态的主要手段之一

在第(2)节中我们曾经指出,断口宏观形貌与断口微观形态犹如森林之与树木,在断