

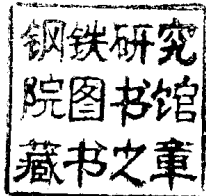
# 金属材料断口 分析及图谱

航空航天工业部航空装备失效分析中心 编著

科学出版社

# 金属材料断口分析及图谱

航空航天工业部航空装备失效分析中心 编著



科学出版社

1991

· 223776

## 内 容 简 介

本书内容分两大部分。文字叙述部分简要地介绍了断口金相分析常用的仪器和原理,断口样品的清洗、制备及存放,重点论述了金属材料在不同温度、应力、环境介质条件作用下的断裂机制、断口形貌特征以及断口定量分析的原理和技术;图谱部分收集了铝镁合金、钛合金、钢和高温合金共768张不同性能试样的光学低倍断口照片,扫描电镜和透射电镜的高倍断口照片。本书内容丰富,图文并茂,可供广大从事材料研究,产品设计、质量控制和失效分析的工程技术人员及有关高等院校的师生参考。

## 金属材料断口分析及图谱

航空航天工业部航空装备失效分析中心 编著

责任编辑 杨 岭

科 学 出 版 社

北京东黄城根北街15号

邮政编码,100717

四川省彭县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991年12月第 一 版 开本,787×1092 1/16

1991年12月第一次印刷 印张,25.5 插页,0

字数 96 千字,70万

ISBN7-03-002904-6/TG·8

定价:45.00元

## 编 者 的 话

近些年来,断口分析技术得到了较快的发展。为了满足工农业生产发展的需要,满足广大从事质量控制、失效分析的工程技术人员的要求,我们编著了这本《金属材料断口分析及图谱》。

本书分为两大部分。前面的文字叙述部分约8万字,简要地介绍了断口金相分析常用的仪器和原理,断口样品的清洗、制备及存放,重点论述了材料断口的宏观、微观形貌特征和断裂机制及其在不同的温度、应力、环境介质条件下的变化。随着断口金相技术的发展,断口分析日益从定性分析向定量分析发展,因此本书包含了断口定量分析方面的内容,并对新兴的分形分析的原理及其应用作了介绍。书的图谱部分约有786张照片,其中低倍断口照片154张,扫描电镜断口照片544张,透射电镜88张。这些照片反映了不同材料在不同条件下的断裂形貌特征,在一定程度上是对文字叙述部分结论的印证。本书是著者们长期从事断口金相和试验分析工作的经验总结,是集体劳动的结晶。断口图片对失效分析来说是可以直接参考的。我们期望该书的出版对广大从事断口金相、失效分析工作者能有所帮助。

本书第一章第一节由吴培远执笔,第一章第四节,第二章第四节,第四章第一、二节由陈英执笔,第三节由陈英和欧阳杰共同执笔,第四节由苏锡九和袁新泉共同执笔,其余章节由苏锡九执笔编写。欧阳杰、袁新泉对文字叙述部分的内容进行了详细地修改和补充。胡元凯参加了文字叙述部分的审查和修改工作。

本书扫描电镜图谱的作者(按姓氏笔划为序)有:马宏海、冯利增、李淑媛、苏锡九、袁新泉、孙淑珍、侯淑娥、鞠静敏。透射电镜图谱的作者有:王广生、王淑芝、杜玉荣、陈英、姚子平。

图谱审编者的分工如下:铝镁合金部分为苏锡九,钛合金部分为葛志明、吴培远,合金钢、不锈钢部分为王广生、钟培道,高温合金部分为周瑞发、陈英。

王峙南、刘才穆、钟群鹏对全书进行了审定。

颜鸣皋教授为本书写了序言。

这里我们特别向为我们提供断口样品的北京航空材料研究所有关研究室的同志以及部内有关工厂的同志表示衷心的感谢。如果没有他们提供的各种材料、状态的样品,就不可能有图谱中的大量照片。

在本书编写过程中阎海、项梅作了不少工作,特此致谢,并感谢所有在本书编写过程中曾给予关心、帮助的同志。

由于我们水平有限,编写经验不足,书中难免有错误和不妥之处,请读者批评指正,以期再版中加以改进和补充。

一九九一年六月

## 序 言

随着工业的发展、大型运载工具的出现和应用,断裂失效所造成的后果,不仅危及人们的生命安全,而且对社会繁荣和稳定造成重大影响。因此,研究断裂、预测断裂、预防断裂已成为各国工程界所关注的重大课题和推动科学技术进步的动力。例如,“慧星”号的失事,F111机翼断裂等一系列重大事故的发生,引起了航空界对疲劳断裂研究的重视,促进了疲劳设计与损伤容限设计思想的确立和发展,从而产生了利用裂纹萌生、扩展至断裂的规律的设计方法,同时采取了系统化的工程措施来保证在预计的寿命期内不致发生灾难性事故。这是人们从血的教训中,高度发挥科学智慧的结晶。然而这些光辉的科学业绩的第一步都是从断口分析迈出的。

断口是试样或零件在试验或使用过程中断裂所形成的表面。它以形貌特征记录了材料在载荷与环境的作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹的萌生和扩展直至断裂的全过程。断口分析技术就是通过定性和定量分析来识别断口特征的技术。断口形貌特征受材料、结构、载荷、环境等因素的影响和制约,并与时间相关。若要正确地识别这些特征,必须综合利用这些方面相关的知识和经验(特别是材料科学与材料的力学行为及疲劳和断裂方面的知识),进行综合的分析和判断。反之,经过正确分析判断而反馈的信息,对从事材料科学及工程、力学与设计、生产和使用的人员,必然会有重要的应用价值和参考作用。

对断口的认识和利用的事例,在人类的生产历史中,可追溯到远古时代,但作为学科分支还是近半个世纪的事情。半个世纪以来,科学发展突飞猛进,作为断口分析的基础学科(材料科学与力学)的发展,断口观察仪器的迅速进步,特别是分辨率高、放大倍数大、景深长的透射和扫描电镜的先后出现,为断口分析技术的发展,创造了条件,铺平了道路,并取得了辉煌的成果。近半个世纪所积累起来的断口知识,千百倍于人类前期有关知识的总和。但是,这种知识并未就此终结,它必须随着人类生产实践和科学实验的发展而发展,这是一个永无止境的实践过程和认识过程。

建国以来,我国断口分析技术发展迅速。特别是近10年来,各有关单位在对疲劳断裂机制及其精细结构关系的研究,金属材料质量与断口形貌关系的研究,断口定量分析及失效分析的系统研究,都曾作出过许多很有水平的工作。北京航空材料研究所在60年代,就开始了对断口形貌的分析和研究。如对叶片断裂和槽底裂纹进行了大量的分析研究,70年代对钢中白点、夹杂物与断口形貌、钢的精细结构与疲劳三阶段的断口形貌特征进行了研究。70年代末与80年代对短裂纹与近门坎区断裂特征与扩展机制、疲劳初始质量的反推进行了研究。从60年代以来,对金属材料疲劳裂纹萌生与扩展的机制及过程进行了比较广泛的研究。与此同时对国内外发生的一些重大机械失效事故进行了卓有成效的分析,准确地判明了事故的性质与原因,提出了预防措施。这些研究成果都很好地区用于飞机、发动机等重要零部件的寿命评估、质量改进、延寿措施等方面,防止了一些重大事故的重复发生,取得了显著的经济效益和社会效益,并且培养出了一批素质好、经验丰富的科技人员。

这本书是由长期从事航空工业的失效分析和断口金相工作的同志们将多年积累的主要研究成果和典型断裂资料整理编撰而成,它所涉及的材料品种和状态多,内容丰富。近十几年来,定量断口金相学发展很快,这也是我国今后应该着重研究的方面。本书在断口定量金相方法、原理方面也作了些介绍。本书旨在为广大从事材料研究、产品设计、质量控制和失效分析的工程技术人员及有关高等院校师生提供一本金属材料断口分析方面的参考书。预计它对识别和分析各类断裂失效性质会有一定的帮助。

由于断口分析技术是一门正在发展中的学科,受工作和认识的局限,本书难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

顏鳴琴

一九九一年六月十五日

主 编

苏锡九 陈 英

编 委

(以姓氏笔划为序)

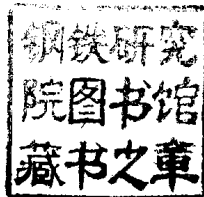
王广生 陈 英 吴培远 苏锡九

欧阳杰 周瑞发 胡元凯 钟培道

袁新泉 葛志明

审 定

王峙南 刘才穆 钟群鹏



# 目 录

<b>第一章 断口分析时常用仪器简介</b> .....	6
第一节 光学仪器在断口分析中的应用.....	6
第二节 扫描电子显微镜基本原理及其在断口分析中的应用.....	8
第三节 能谱仪基本原理及其在断口分析中的应用.....	13
第四节 透射电子显微镜基本原理及其在断口分析中的应用.....	19
<b>第二章 断口分析技术</b> .....	22
第一节 断口的保护.....	22
第二节 断口的清洗.....	22
第三节 扫描电子显微镜样品的制备.....	24
第四节 透射电子显微镜样品的制备.....	25
<b>第三章 断口的宏观分析</b> .....	27
第一节 拉伸断口的宏观形貌特征.....	27
第二节 冲击断口的宏观形貌特征.....	30
第三节 疲劳断口的宏观形貌特征.....	31
第四节 其他类型断口的宏观形貌特征.....	33
<b>第四章 断口的微观分析</b> .....	36
第一节 韧窝断口.....	36
第二节 解理断口.....	40
第三节 疲劳断口.....	45
第四节 沿晶断口.....	55
<b>第五章 断口的定量分析</b> .....	71
第一节 断口表面的分类和观察方向.....	71
第二节 投影法.....	72
第三节 体视法.....	83
第四节 剖面法.....	84
第五节 分形法.....	85
<b>第六章 断口图谱</b> .....	91
第一节 铝、镁合金(苏锡九,侯淑娥).....	91
Ly12, Ly16, LD5, LD7.....	91
LC9.....	119
ZL101, ZL201, ZL205.....	133
MB15.....	151
ZM5.....	159
第二节 钛合金(马洪海,王淑芝、陈英、姚子平、王广生、鞠静敏、冯利增).....	163



	TC4 .....	163
	TC11 .....	171
	ZTC4 .....	189
第三节	结构钢, 不锈钢(侯淑娥、苏锡九、姚子平、王广生、王淑芝、杜玉荣、陈英)	
	12Cr2Ni4A .....	205
	30CrMnSiA .....	226
	40CrMnSiM <sub>0</sub> VA(GC—4) .....	241
	1Cr <sub>12</sub> Ni <sub>2</sub> WM <sub>0</sub> VNb(Gx—8) .....	271
	Cr <sub>17</sub> Ni <sub>2</sub> .....	267
第四节	高温合金(李淑媛、袁新泉、孙淑珍、苏锡九、陈英、杜玉荣、姚子平、王广生、王淑芝)	
	GH1015, GH1016, GH1140 .....	271
	GH3044, GH99 .....	291
	GH2036, GH2123 .....	305
	GH4037, GH4049 .....	323
	GH4133, GH4169 .....	333
	GH63, GH118, GH143, GH220, GH698 .....	359
	K403, K405 .....	377
	DZ3, DZ22 .....	387
	DD3 .....	399
主要参考文献	.....	403

## 编 者 的 话

近些年来,断口分析技术得到了较快的发展。为了满足工农业生产发展的需要,满足广大从事质量控制、失效分析的工程技术人员的要求,我们编著了这本《金属材料断口分析及图谱》。

本书分为两大部分。前面的文字叙述部分约8万字,简要地介绍了断口金相分析常用的仪器和原理,断口样品的清洗、制备及存放,重点论述了材料断口的宏观、微观形貌特征和断裂机制及其在不同的温度、应力、环境介质条件下的变化。随着断口金相技术的发展,断口分析日益从定性分析向定量分析发展,因此本书包含了断口定量分析方面的内容,并对新兴的分形分析的原理及其应用作了介绍。书的图谱部分约有786张照片,其中低倍断口照片154张,扫描电镜断口照片544张,透射电镜88张。这些照片反映了不同材料在不同条件下的断裂形貌特征,在一定程度上是对文字叙述部分结论的印证。本书是著者们长期从事断口金相和试验分析工作的经验总结,是集体劳动的结晶。断口图片对失及刀研来说是可以直接参考的,我们期望该书的出版对广大从事断口金相、失效分析工作者能有所帮助。

本书第一章第一节由吴培远执笔,第一章第四节,第二章第四节,第四章第一、二节由陈英执笔,第三节由陈英和欧阳杰共同执笔,第四节由苏锡九和袁新泉共同执笔,其余章节由苏锡九执笔编写。欧阳杰、袁新泉对文字叙述部分的内容进行了详细地修改和补充。胡元凯参加了文字叙述部分的审查和修改工作。

本书扫描电镜图谱的作者(按姓氏笔划为序)有:马宏海、冯利增、李淑媛、苏锡九、袁新泉、孙淑珍、侯淑娥、鞠静敏。透射电镜图谱的作者有:王广生、王淑芝、杜玉荣、陈英、姚子平。

图谱审编者的分工如下:铝镁合金部分为苏锡九,钛合金部分为葛志明、吴培远,合金钢、不锈钢部分为王广生、钟培道,高温合金部分为周瑞发、陈英。

王峙南、刘才穆、钟群鹏对全书进行了审定。

颜鸣皋教授为本书写了序言。

这里我们特别向为我们提供断口样品的北京航空材料研究所有关研究室的同志以及部内有关工厂的同志表示衷心的感谢。如果没有他们提供的各种材料、状态的样品,就不可能有图谱中的大量照片。

在本书编写过程中阎海、项梅作了不少工作,特此致谢,并感谢所有在本书编写过程中曾给予关心、帮助的同志。

由于我们水平有限,编写经验不足,书中难免有错误和不妥之处,请读者批评指正,以期再版中加以改进和补充。

一九九一年六月

## 序 言

随着工业的发展、大型运载工具的出现和应用,断裂失效所造成的后果,不仅危及人们的生命安全,而且对社会繁荣和稳定造成重大影响。因此,研究断裂、预测断裂、预防断裂已成为各国工程界所关注的重大课题和推动科学技术进步的动力。例如,“慧星”号的失事,F111机翼断裂等一系列重大事故的发生,引起了航空界对疲劳断裂研究的重视,促进了疲劳设计与损伤容限设计思想的确立和发展,从而产生了利用裂纹萌生、扩展至断裂的规律的设计方法,同时采取了系统化的工程措施来保证在预计的寿命期内不致发生灾难性事故。这是人们从血的教训中,高度发挥科学智慧的结晶。然而这些光辉的科学业绩的第一步都是从断口分析迈出的。

断口是试样或零件在试验或使用过程中断裂所形成的表面。它以形貌特征记录了材料在载荷与环境的作用下断裂前的不可逆变形,以及裂纹的萌生和扩展直至断裂的全过程。断口分析技术就是通过定性和定量分析来识别断口特征的技术。断口形貌特征受材料、结构、载荷、环境等因素的影响和制约,并与时间相关。若要正确地识别这些特征,必须综合利用这些方面相关的知识和经验(特别是材料科学与材料的力学行为及疲劳和断裂方面的知识),进行综合的分析和判断。反之,经过正确分析判断而反馈的信息,对从事材料科学及工程、力学与设计、生产和使用的人员,必然会有重要的应用价值和参考作用。

对断口的认识和利用的事例,在人类的生产历史中,可追溯到远古时代,但作为学科分支还是近半个世纪的事情。半个世纪以来,科学发展突飞猛进,作为断口分析的基础学科(材料科学与力学)的发展,断口观察仪器的迅速进步,特别是分辨率高、放大倍数大、景深长的透射和扫描电镜的先后出现,为断口分析技术的发展,创造了条件,铺平了道路,并取得了辉煌的成果。近半个世纪所积累起来的断口知识,千百倍于人类前期有关知识的总和。但是,这种知识并未就此终结,它必须随着人类生产实践和科学实验的发展而发展,这是一个永无止境的实践过程和认识过程。

建国以来,我国断口分析技术发展迅速。特别是近10年来,各有关单位在对疲劳断裂机制及其精细结构关系的研究,金属材料质量与断口形貌关系的研究,断口定量分析及失效分析的系统研究,都曾作出过许多很有水平的工作。北京航空材料研究所在60年代,就开始了对断口形貌的分析和研究。如对叶片断裂和槽底裂纹进行了大量的分析研究,70年代对钢中白点、夹杂物与断口形貌、钢的精细结构与疲劳三阶段的断口形貌特征进行了研究。70年代末与80年代对短裂纹与近门坎区断裂特征与扩展机制、疲劳初始质量的反推进行了研究。从60年代以来,对金属材料疲劳裂纹萌生与扩展的机制及过程进行了比较广泛的研究。与此同时对国内外发生的一些重大机械失效事故进行了卓有成效的分析,准确地判明了事故的性质与原因,提出了预防措施。这些研究成果都很好用于飞机、发动机等重要零部件的寿命评估、质量改进、延寿措施等方面,防止了一些重大事故的重复发生,取得了显著的经济效益和社会效益,并且培养出了一批素质好、经验丰富的科技人员。

这本书是由长期从事航空工业的失效分析和断口金相工作的同志们将多年积累的主要研究成果和典型断裂资料整理编撰而成,它所涉及的材料品种和状态多,内容丰富。近十几年来,定量断口金相学发展很快,这也是我国今后应该着重研究的方面。本书在断口定量金相方法、原理方面也作了些介绍。本书旨在为广大从事材料研究、产品设计、质量控制和失效分析的工程技术人员及有关高等院校师生提供一本金属材料断口分析方面的参考书。预计它对识别和分析各类断裂失效性质会有一定的帮助。

由于断口分析技术是一门正在发展中的学科,受工作和认识的局限,本书难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

顏鳴序

一九九一年六月十五日

# 目 录

<b>第一章 断口分析时常用仪器简介</b> .....	6
第一节 光学仪器在断口分析中的应用.....	6
第二节 扫描电子显微镜基本原理及其在断口分析中的应用.....	8
第三节 能谱仪基本原理及其在断口分析中的应用.....	13
第四节 透射电子显微镜基本原理及其在断口分析中的应用.....	19
<b>第二章 断口分析技术</b> .....	22
第一节 断口的保护.....	22
第二节 断口的清洗.....	22
第三节 扫描电子显微镜样品的制备.....	24
第四节 透射电子显微镜样品的制备.....	25
<b>第三章 断口的宏观分析</b> .....	27
第一节 拉伸断口的宏观形貌特征.....	27
第二节 冲击断口的宏观形貌特征.....	30
第三节 疲劳断口的宏观形貌特征.....	31
第四节 其他类型断口的宏观形貌特征.....	33
<b>第四章 断口的微观分析</b> .....	36
第一节 韧窝断口.....	36
第二节 解理断口.....	40
第三节 疲劳断口.....	45
第四节 沿晶断口.....	55
<b>第五章 断口的定量分析</b> .....	71
第一节 断口表面的分类和观察方向.....	71
第二节 投影法.....	72
第三节 体视法.....	83
第四节 剖面法.....	84
第五节 分形法.....	85
<b>第六章 断口图谱</b> .....	91
第一节 铝、镁合金(苏锡九,侯淑娥).....	91
Ly12, Ly16, LD5, LD7.....	91
LC9.....	119
ZL101, ZL201, ZL205.....	133
MB15.....	151
ZM5.....	159
第二节 钛合金(马洪海,王淑芝、陈英、姚子平、王广生、鞠静敏、冯利增).....	163

	TC4 .....	163
	TC11 .....	171
	ZTC4 .....	189
第三节	结构钢, 不锈钢(侯淑娥、苏锡九、姚子平、王广生、王淑芝、杜玉荣、陈英)	
	12Cr2Ni4A .....	205
	30CrMnSiA .....	226
	40CrMnSiM <sub>6</sub> VA(GC—4) .....	241
	1Cr12Ni2WM <sub>6</sub> VNb(Gx—8) .....	271
	Cr17Ni <sub>2</sub> .....	267
第四节	高温合金(李淑媛、袁新泉、孙淑珍、苏锡九、陈英、杜玉荣、姚子平、王广生、王淑芝)	
	GH1015, GH1016, GH1140 .....	271
	GH3044, GH99 .....	291
	GH2036, GH2123 .....	305
	GH4037, GH4049 .....	323
	GH4133, GH4169 .....	333
	GH63, GH118, GH143, GH230, GH698 .....	359
	K403, K405 .....	377
	DZ3, DZ22 .....	387
	DD3 .....	399
主要参考文献	.....	403

# 第一章 断口分析时常用仪器简介

## 第一节 光学仪器在断口分析中的应用

金属材料的断口表面具有的断裂形貌和颜色特征,忠实地记录了材料在不同载荷和环境作用下发生的变形和断裂的全部过程。因此,断口分析是失效分析的基础,它能为试样过早断裂和零件提前失效的原因提供最直接和最可靠的信息和证据。近年来,人们对金属材料断口分析技术的提高和分析仪器的发展十分重视,研制出了许多先进的断口分析仪器,但是光学仪器在断口分析中仍是不可缺少的。

对断口表面直接进行目视观察和借助放大镜进行观察(1~20X)是最经典的断口分析方法,至今仍是断口分析必经的第一步。其最大的优点是直观、简易、快速和全面。通过观察整个断口的宏观形貌特征,可以初步分析判断材料断裂的基本性质和全过程,为进一步放大观察和深入分析提供线索。为了记录断口的宏观形貌,必须进行照相。常用的照相设备有:

### 一. 座机

若需将目的物缩小或稍加放大( $\sim 2X$ )时,采用座机拍照,不仅可获得良好的景深效果,还因采用多光源,使目的物各部分获得均匀的照明。

成像景深可通过调节光圈大小来控制(图1)。

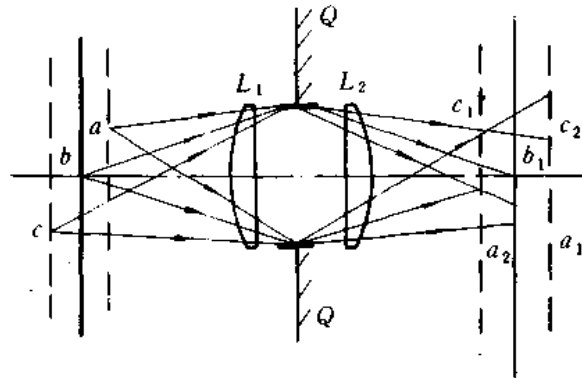


图1 光圈大小对景深的影响示意图

当光圈未缩小时,目的物不在一个平面上的  $a, b, c$  三点经过透镜  $L_1$ 、光圈  $Q$  和透镜  $L_2$  之后,投向毛玻璃板  $D$ ,但不能同时都在  $D$  板平面上清晰聚焦成像,三点中总有两点呈模糊的光斑。

当光圈缩小时,使  $b$  在  $b_1$  位置聚焦成像, $a$  和  $c$  随着光圈的缩小,在  $D$  板平面上投影

光斑的尺寸也随之缩小。当该尺寸小于人眼的最佳分辨率(0.1—0.2mm)时,  $a, b, c$  三点在 D 板平面上将同时清晰成像, 即  $a, b, c$  均处于同一焦面上。同时, 光圈缩小以后, 对比度相应增加, 但过小的光圈会使影像出现“双影”, 而且过高的反差会减少影像的层次和细节, 所以在实际应用中要灵活掌握。一些低倍物镜, 如数值孔径  $NA=0.09\sim 0.10$ , 放大率 3~5X, 光圈大小与成像景深之间的关系亦遵循此原则。

## 二. 低倍照相机

1. 结构: 简单的低倍照相机由三部分组成: 照相部分(包括毛玻璃、蛇皮箱和物镜)、底座、支撑杆(图 2)。此结构由于可换镜头、放大率可在 0.5~20X 范围内变化, 加之镜头朝下, 便于放置样品、配光, 因而运用起来灵活方便。

2. 照相方式: 半斜照明适用于粗糙表面(如断口表面)、反光差的表面(如氧化腐蚀、灰黑色表面)的显示。垂直照明适用于反光强的光滑表面的显示。

3. 光源及背景选择: 白炽灯提高影像对比, 但层次细节差; 荧光灯使影像柔和、层次丰富。

影像背景选择的原则是相互衬托。如目的物颜色深、反光性差, 宜用白色背景; 反之, 用黑色背景。有时为净化背底, 消除物与影之间的相互干扰, 可将试样放在架空的玻璃板上, 并以斜光照明, 可以获得无背景的影像。

为了弄清材料断裂的性质和原因, 仅用目视观察分析往往是不够的, 还必须借助实体显微镜和光学显微镜(如 Neophot-1 型和 Metallux-3 型等)的低倍部分, 对断裂源区和其它区域进行放大观察分析。它们的优点是具有与目视观察相衔接的适中的放大倍率(一般为 4~100X)和较好的影像立体感, 并能把局部观察和整体观察较好地结合起来。在没有电子显微镜的单位和地方, 也可以用光学显微镜的高倍部分, 对断口的微观形貌进一步放大观察分析。

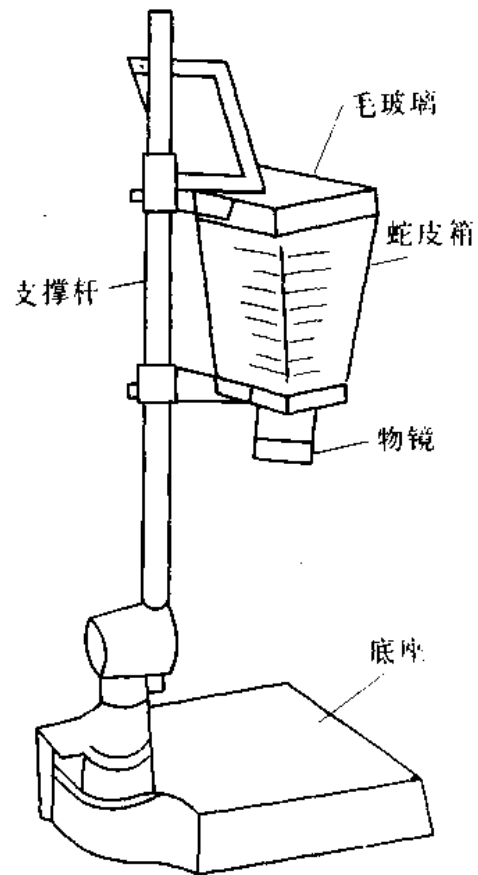


图 2 低倍照相机结构示意图

图 3 为 OLYMPUS 变焦距实体显微镜外观照片, 其型号为 SZ-Tr。

实体和光学显微镜一般直接观察断口样品。但是, 如果断口太大, 又不允许切割取样, 也可对欲观察的局部区域复型后间接观察。复型的材料与方法和透射电子显微镜二次(塑料—碳)复型的基本相同。不同点是: (1) 塑料纸较厚(一般约 0.15~0.25mm, 具体选多大厚度, 视断口粗糙度而定) 以便保持复型样品的刚性和平整度; (2) 可不用重金属投影; (3) 为提高亮度和影像清晰度, 塑料复型上可真空喷涂铝层, 厚度约为 100~200 Å, 太厚会掩



盖断口的显微形貌特征。为提高光学显微镜对断口及其复型样品观察和照相的影像质量，最好采用全斜照明。

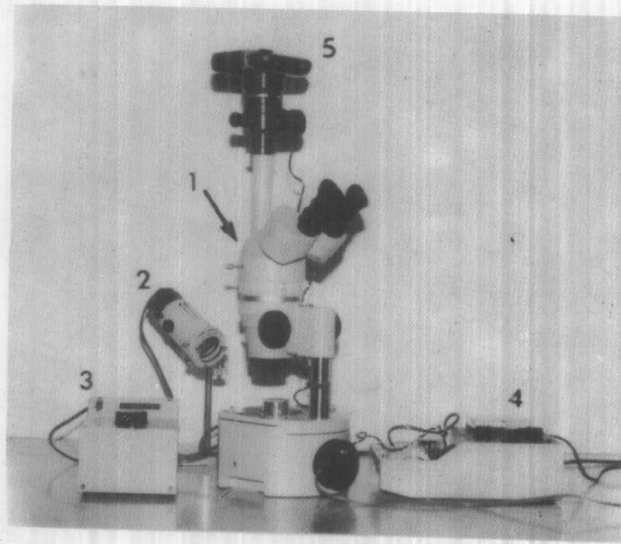


图3 SZ-Tr 实体显微镜及其附件外观照片

1. SZ-Tr 实体显微镜； 2. 照明器； 3. 变压器； 4. 显微照相测光表； 5. 照相机。

光学显微镜的景深随放大倍率增加而减小，在较高的放大倍数(如 200X 以上)只能粗略地观察某些较平整的断口表面(如解理断面和疲劳断面)，而不能观察具有明显塑性变形的穿晶断口和沿晶断口。即使对平整断口，也很难进行大面积的连续观察而且影像的分辨率也很低(大于  $2000\text{Å}$ )。与扫描电镜和透射电镜相比，这是它最大的不足，但其优点是能对断口上某些组织结构进行偏振光分析；还可观察断口不同区域的颜色变化，这对分析断裂性质及过程具有独特的作用。

## 第二节 扫描电子显微镜的基本原理及其在断口分析中的应用

### 一. 性能特点

扫描电子显微镜(简称扫描电镜或 SEM)是 60 年代发展起来的一种仪器，它是电子光学、真空技术和电学控制的综合体，是详细研究三维结构表面的有力工具。与光学显微镜和透射电子显微镜相比，具有以下优点：

1. 聚焦景深很大，可以研究粗糙的样品表面，获得清晰的图像；
2. 放大倍数可以连续地在 10 倍到 10 万倍之间变化，便于对样品细节进行观察；
3. 一般商品仪器的分辨率可达  $60\text{Å}$  左右；
4. 样品制备方法简单。可直接观察实物样品是它的最大优点；
5. 可观察三维的形貌特征，图像清晰，立体感强，观察过程对样品无损伤；
6. 如果与 X 射线能谱仪、波谱仪和电子计算机配合使用，可直接定性和定量探测样

• 8 •