

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering

HEP
MSE

合金钢 显微组织辨识

Microstructure
Identification
of Alloy Steels

刘宗昌 等 著

高等教育出版社

合金钢 显微组织辨识

Microstructure Identification of Alloy Steels

刘宗昌 李一鸣 冯佃臣 著
段宝玉 霍文霞 燕样样

HEJINGANG XIAO

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

合金钢显微组织辨识 / 刘宗昌等著. -- 北京 : 高等教育出版社, 2017.2
(材料科学与工程著作系列)
ISBN 978-7-04-046868-7

I. ①合… II. ①刘… III. ①合金钢-显微组织(金相学)-研究 IV. ①TG142.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281231 号

策划编辑	刘剑波	责任编辑	卢艳茹	封面设计	姜磊	版式设计	杜微言
插图绘制	杜晓丹	责任校对	殷然	责任印制	韩刚		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	21	版 次	2017年2月第1版
字 数	380千字	印 次	2017年2月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	66.00元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46868-00

前 言

准确地辨识钢的显微组织是材料科学研究和生产检测中一项重要的工作，极具理论研究价值和工程应用价值。

目前，许多从事金属材料研究和应用的工作者，例如工程师、研究员、教师、学生等，经常苦于不能正确辨识钢的显微组织，尤其是难以辨识在特殊成分、特殊工艺下获得的显微组织，因而阻碍了工程应用和理论研究工作。多年以来，国内外市场上一一直缺乏这类专业书籍。本书力图通过对大量显微组织实例的辨识，阐述钢铁材料显微组织的辨识程序，从理论和实践两方面提高材料工作者识别显微组织的能力。

掌握钢的显微组织辨识技术或技能具有重要的实际应用价值和意义，既能够促进材料理论研究，又能够指导工程应用。辨识钢的显微组织有时容易，有时很难。复杂的合金钢组织或在特殊工艺下获得的组织往往难以辨识，甚至无法识别。本书不在于普及常见显微组织的辨识方法，而是对于难以辨识的显微组织提出识别的程序，从本质上认清其组织结构及成因，以准确辨识显微组织。

金属学是研究金属材料的化学成分、组织结构、性能三者之间的关系及其变化规律的科学。因此，成分—组织—性能是一条关系链，如果切断了这条关系链，或不了解这条关系链，就难以准确辨识显微组织类型。显微组织辨识是一个系统工程，不管难易，均有基本的识别程序，并且应当使用“智能软件”辨识组织。

本书从钢的成分、加工履历、物理参数、相变原理以及检测设备等多方面分析阐述了钢的显微组织辨识程序，对各种钢的显微组织的形貌、结构进行了具体的辨识，或说明辨识的方法。全书内容包括检测设备的简单成像原理；奥氏体、铁素体、碳化物组织辨识；珠光体、贝氏体、马氏体组织辨识；淬火钢的回火组织和脱溶组织辨识；各种显微组织缺陷辨识和分析以及现代工业用典型特殊钢的组织辨识等。注重阐述各类显微组织的概念、类别、组织特征和本质以及成像原理。重点阐述合金钢或在特种工艺下获得的难以识别的组织。继承与创新相结合，以创新为主；普及与提高相结合，以提高为主。

本书可供高校、企业、科研院所等从事金属材料教学、科研的工程技术人员、教师、学生等阅读参考，也可作为金属材料专业的教学辅助教材或选修课

前言

教材。

全书共 11 章，由刘宗昌教授策划并统稿。第一章由李一鸣、段宝玉、霍文霞撰写，第二、三、五、六章由刘宗昌撰写，第四章由霍文霞撰写，第七章由李一鸣撰写，第八章由段宝玉撰写，第九章由冯佃臣撰写，第十章由陕西工业职业技术学院燕样样撰写，第十一章由李一鸣、刘宗昌撰写。

本书在撰写过程中参考了一些书籍等资料，在此对原作者表示感谢！

内蒙古科技大学 刘宗昌

lzchang75@163.com

2016 年 10 月

目 录

第一章 检测设备的成像原理概述	1
1.1 光学显微镜的成像原理	1
1.1.1 明场成像	2
1.1.2 暗场成像	3
1.2 激光扫描共聚焦显微镜的成像原理	5
1.3 扫描电子显微镜的成像原理	9
1.3.1 二次电子像	10
1.3.2 背散射电子像	11
1.3.3 电子背散射衍射	13
1.4 扫描隧道显微镜的成像原理	16
1.5 透射电子显微镜的成像原理	19
1.5.1 成像原理	19
1.5.2 透射电子显微镜的组件	19
1.5.3 透射电子显微镜的结构	20
1.5.4 透射电子显微镜的电子衍射	21
1.5.5 透射电子显微镜的形貌像	24
参考文献	27
第二章 显微组织辨识程序	29
2.1 确定实验钢的牌号和化学成分	30
2.2 了解实验钢的加工履历	32
2.3 选择检测设备	34
2.4 建立和应用相变知识系统	35
2.5 小结	45
参考文献	45
第三章 奥氏体、铁素体、碳化物组织辨识	47
3.1 奥氏体组织辨识	47
3.1.1 奥氏体的组织形貌	47
3.1.2 奥氏体的亚结构	49
3.2 铁素体组织辨识	54

3.2.1 铁素体的组织形貌	55
3.2.2 铁素体的亚结构	61
3.3 碳化物组织辨识	63
3.3.1 片状碳化物	63
3.3.2 球状、颗粒状碳化物	65
3.3.3 针状碳化物	69
3.3.4 特殊形貌碳化物	71
3.3.5 莱氏体碳化物及液析碳化物	72
参考文献	73
第四章 珠光体组织辨识	75
4.1 片状珠光体组织辨识	76
4.2 类珠光体组织辨识	82
4.2.1 X45CrNiMo4 钢的类珠光体组织	82
4.2.2 P92 钢的类珠光体组织	83
4.3 粒状珠光体组织辨识	86
4.4 特殊珠光体组织辨识	91
参考文献	94
第五章 贝氏体组织辨识	95
5.1 贝氏体组织的分类	95
5.1.1 按贝氏体在中温区形成的位置分类	95
5.1.2 按贝氏体组成相分类	97
5.1.3 按贝氏体组织形态分类	97
5.1.4 按贝氏体碳含量分类	98
5.2 贝氏体组织的基本特征及定义	98
5.3 贝氏体组织的过渡性特征	99
5.3.1 从片状珠光体到羽毛状贝氏体的过渡性特征	99
5.3.2 从下贝氏体到片状马氏体的过渡性特征	99
5.3.3 亚结构的过渡性特征	100
5.4 上贝氏体组织辨识	102
5.4.1 粒状贝氏体	102
5.4.2 羽毛状贝氏体	111
5.5 下贝氏体组织辨识	116
5.5.1 有碳化物下贝氏体组织	116
5.5.2 无碳化物下贝氏体组织	129
5.6 贝氏体组织中的亚结构	134

5.6.1 亚片条、亚单元	135
5.6.2 较高密度的位错、孪晶	138
参考文献	141
第六章 马氏体组织辨识	143
6.1 马氏体及马氏体相变的定义	144
6.2 马氏体组织的分类	145
6.2.1 按碳含量分类	145
6.2.2 按组织形貌分类	145
6.2.3 按亚结构分类	145
6.2.4 按晶体结构分类	145
6.3 超低碳马氏体组织	146
6.4 低碳板条状马氏体组织	149
6.5 中碳马氏体组织	156
6.6 高碳马氏体组织	160
6.7 超高碳马氏体组织	166
6.8 隐晶马氏体组织	171
6.9 马氏体中脊	177
6.10 马氏体表面浮凸	180
6.10.1 马氏体浮凸形貌	180
6.10.2 产生浮凸的根本原因	185
参考文献	187
第七章 过饱和固溶体脱溶组织辨识	189
7.1 回火马氏体组织辨识	191
7.2 回火托氏体组织辨识	194
7.3 回火索氏体组织辨识	204
7.4 含铜钢的脱溶组织辨识	207
7.4.1 含铜钢的脱溶	207
7.4.2 富铜 GP 区的形貌和结构	209
7.4.3 脱溶强化和 ϵ -Cu 相的形成	212
参考文献	215
第八章 钢的显微组织缺陷辨识	217
8.1 带状组织辨识	217
8.2 热处理裂纹辨识	221
8.2.1 马氏体显微裂纹	221
8.2.2 宏观热处理裂纹	223

8.3 网状碳化物辨识	226
8.4 液析碳化物辨识	229
8.5 退火球化不完全	232
8.6 钢中的白点	234
8.7 魏氏组织辨识	235
8.8 显微孔洞	238
8.9 脱碳层组织辨识	241
8.9.1 45 钢的脱碳组织	242
8.9.2 T8 钢的氧化与脱碳	244
8.10 非金属夹杂辨识	245
参考文献	249
第九章 典型特殊钢的显微组织辨识	251
9.1 H13 钢的组织辨识	252
9.1.1 H13 钢的退火组织	252
9.1.2 H13 钢的淬火、回火组织	254
9.2 P91/P92 钢的显微组织辨识	260
9.3 WB36 钢热处理后的组织辨识	268
9.4 34CrNi3MoV 钢的显微组织辨识	273
9.4.1 34CrNi3MoV 钢的贝氏体组织	274
9.4.2 34CrNi3MoV 钢的淬火马氏体组织	278
9.4.3 34CrNi3MoV 钢的等温转变组织	280
9.5 20CrMnTi 钢的显微组织辨识	282
9.5.1 钢的物理、化学参数	282
9.5.2 20CrMnTi 钢的退火组织	282
9.5.3 20CrMnTi 钢的淬火组织	285
9.6 球墨铸铁的显微组织辨识	286
9.7 W350 钢的退火组织辨识	290
参考文献	293
第十章 钢中的相似显微组织辨识	295
10.1 网状铁素体与网状渗碳体辨识	295
10.1.1 金相观察辨识	296
10.1.2 硬度法	297
10.1.3 应用“相变智能软件”判断	297
10.2 未溶铁素体与先共析铁素体辨识	297
10.3 淬火托氏体与回火托氏体辨识	299

10.4 高碳片状马氏体与针状下贝氏体辨识	300
10.4.1 从组织形态上辨识	300
10.4.2 根据热处理工艺辨识	301
10.5 退火粒状珠光体与淬火隐晶马氏体辨识	305
10.6 低碳钢板条状马氏体及其回火托氏体辨识	308
参考文献	309
第十一章 显微组织图片精选	311
11.1 P92 钢的铁素体的高分辨像	311
11.2 RE-Al-Fe 合金的鱼骨状组织	312
11.3 La-Mg-Ni-Sn 储氢合金的铸态组织	313
11.4 45Mn2 钢的铁素体-珠光体组织	314
11.5 20CrMnTi 钢的带状组织	315
11.6 $\text{Mg}_{23}\text{SmNi}_{10}\text{Cu}_2$ 储氢合金的铸态组织	316
11.7 37Mn5 低合金结构钢的羽毛状贝氏体组织	317
11.8 取向硅钢的退火组织	318
11.9 H13 钢的淬火组织	319
11.10 U75V 重轨钢的断口形貌	321
11.11 DH350 钢的球化退火组织	321
参考文献	322

第一章

检测设备的成像原理概述

观测金属显微组织使用的显微镜种类繁多,例如普通光学显微镜、激光扫描共聚焦显微镜、扫描电子显微镜、扫描隧道显微镜、透射电子显微镜、原子力显微镜、磁力显微镜、静电力显微镜、激光力显微镜、光子扫描隧道显微镜等,本书仅就钢铁材料显微组织观察中常用的几种显微镜的成像原理作简要概述。

1.1 光学显微镜的成像原理

利用光学显微镜对钢材的显微组织进行观察已经有 100 多年的历史。虽然光学显微镜(optical microscope, OM)的放大倍数有限,但使用十分广泛和方便,因此,直到今天,光学显微镜仍然是材料研究中最常用和有利的工具。光学显微镜的观察对象基本为不透明的物体,需要通过观察面反射的光线成像,因此为反射式显微镜。当前光学显微镜的配置和性能均已有了长足的发展,特别是通过计算机的控制,金相照片的获取和组织定量分析均能够十分方便地进行。

光学显微镜的成像原理可用阿贝(Abbe)成像理论阐明^[1]。由于衍射效应的存在,光学显微镜的放大倍数难以超过 1 500 倍。加之各类像差的存在以及透镜的设计,实际的有效放大倍数在 1 000 倍左右。关于光学显微镜的成像原理、光路配置及其构造已有较多

详细的阐述。本节仅就光学显微镜最常用的明场成像方式和暗场成像方式及其特点进行简要说明。

1.1.1 明场成像

明场成像是光学显微镜最常用的成像方式。抛却光学显微镜成像的详细光路，简单描述明场成像的过程：入射光照射到样品表面，反射光沿原光路返回到物镜而成像，像的明暗衬度同其反射光的强度成正比。这样，样品表面不平整的区域在入射光照射后将发生部分漫反射，降低了返回物镜的光的强度，因此呈现较暗的衬度。对于表面平整度相近的样品，样品本身的反光能力也是影响明场像衬度的重要因素。图 1.1 所示为 20 钢(碳含量约为 0.2%，利用 4%的

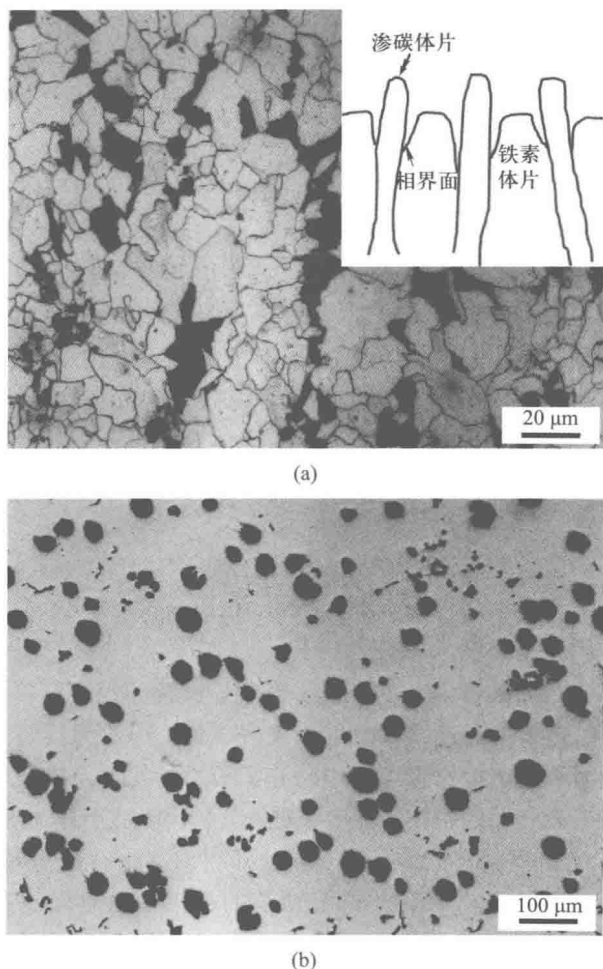


图 1.1 (a) 20 钢和(b) 球墨铸铁的明场像照片

硝酸酒精溶液浸蚀)和球墨铸铁(仅经过机械抛光)的明场像照片。20 钢中灰白色组织为铁素体,黑色组织为珠光体。虽然铁素体相对渗碳体更容易被浸蚀,但单相铁素体晶粒被浸蚀剂溶解的程度基本相近,因此,表面相对平整,反射光强度较高,故较亮。而珠光体中含有大量铁素体-渗碳体相界面,浸蚀后界面明显溶解,表面的沟壑起伏严重[如图 1.1(a)中的插图所示]。通常,光学显微镜的能力难以分辨铁素体片和渗碳体片,因此,在明场成像中,入射光多被整个珠光体团漫反射而表现较暗的衬度。图 1.1(b)中球墨铸铁未经浸蚀,抛光后基体和石墨相表面均较为平整,但仍可以清晰地观察到铸铁中的石墨组织。这是由于石墨反射光的能力低于铁基体。

总体上,材料的表面形貌是其像衬度来源的基础,但不能简单地认为明场像中的暗区即对应样品表面的凹陷或者浸蚀严重区域。在分析衬度时,需要考虑样品的情况,包括不同相在浸蚀剂下的溶解程度、组织的材料学特征等,同时也要顾及样品组织及光学显微镜的分辨能力等综合因素。光学显微镜下的钢的组织分析已非常成熟,具体例子详见本书后续章节的内容。

1.1.2 暗场成像

暗场成像和明场成像在光线经样品反射后的成像过程上是相同的,区别主要在于入射照明过程。暗场成像照明过程的光路如图 1.2 所示。入射光的中心

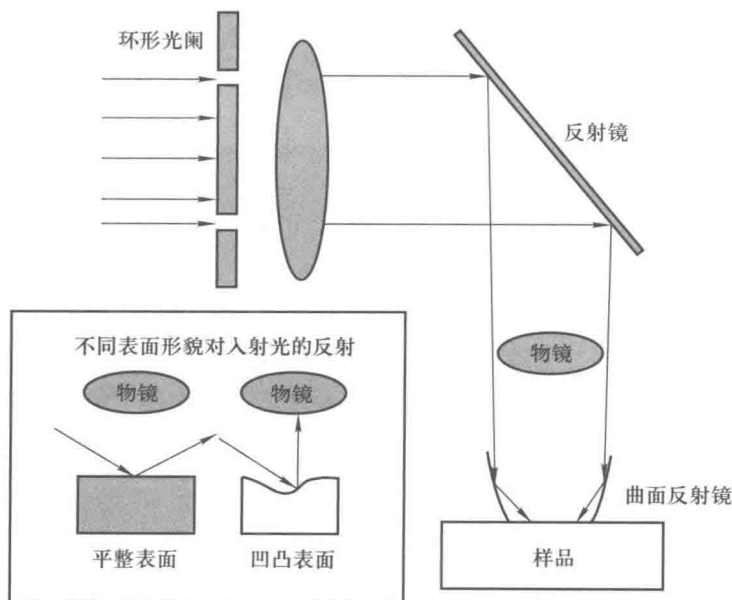
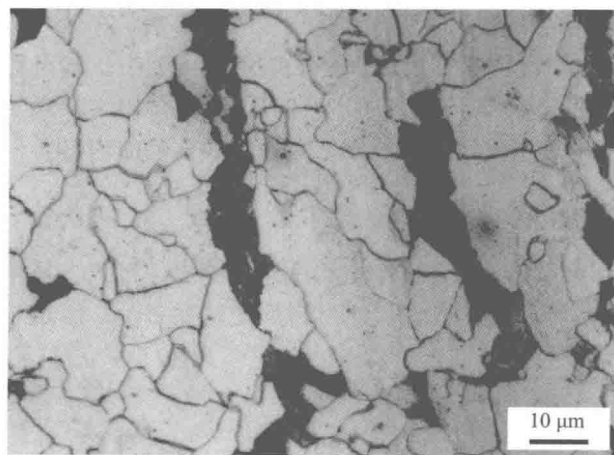


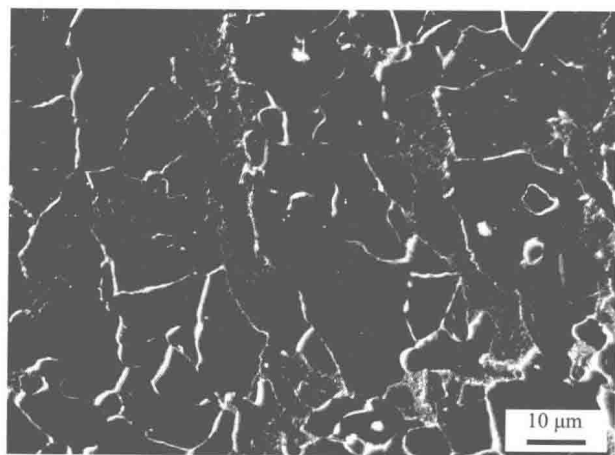
图 1.2 光学显微镜暗场成像的光路图

部分被环形光阑阻挡，只有边缘的光能够进入镜筒。这部分边缘的光线通过反射镜反射后不经过物镜，而是投射到物镜外的曲面反射镜(或者一定的棱镜和反射镜组合，其作用同样为增大反射的倾角)上，以很大的倾角照射到样品表面。入射光经平整表面的反射后仍以较大的角度射出，无法进入物镜以及后续整个成像光路，因此，平整表面在暗场像中没有影像，表现为一片黑暗。但对于表面不平整的区域，由于漫反射的存在反而会有部分光线进入物镜成像，从而被观察到。

图 1.3 所示为 20 钢同一区域的明场和暗场金相组织对照。铁素体在暗场相中呈黑色，而珠光体和晶界这样的凹凸处有部分亮度。珠光体的层片形貌在



(a)



(b)

图 1.3 20 钢的(a)明场和(b)暗场金相照片

暗场像中显示得更为清晰。总体来看,暗场像与明场像的衬度正好相反,可以作为明场像的补充,对样品的形貌作进一步鉴别。除此之外,暗场像还存在如下优点:

(1) 入射光较大的倾角增大了物镜的数值孔径,提高了分辨率,故能够观察到更为细微的形貌。

(2) 入射光不经过物镜,减小了反射效应和炫光效应,暗场像的衬度更好。

(3) 夹杂在暗场成像中能够显示其透明度和本身的色彩,可以更准确地被鉴别。

1.2 激光扫描共聚焦显微镜的成像原理

激光扫描共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope, LSCM)的成像光路与光学显微镜的类似,其主要区别在于光源和“共焦切片-重构”成像模式^[2-4]。激光扫描共聚焦显微镜采用激光作为光源,其波长更短,衍射效应更小,而且激光单色性更好,像差更小。因此,相对于可见光光源,其分辨能力更高。另外,激光扫描共聚焦显微镜在其光路中设置了光源照明针孔和探测器针孔。其中,照明针孔保证光源为点光源,通过物镜聚焦后照射到样品上的光也是点光束,这样就避免了场光源照明造成的相邻干扰;而探测器针孔阻挡了离焦物面的出射光,只允许正焦物面的光进入探测器,进一步排除了离焦物面上杂光的干扰。两套针孔互为共轭,在聚焦面上,光能够同时聚焦于照明针孔和探测器针孔,即所谓的共聚焦。激光扫描共聚焦显微镜的光路示意图如图1.4所示。上述这些配置使得激光扫描共聚焦显微镜的实际分辨率较普通光学显微镜的更高(OLS4000的分辨率为120 nm,光学显微镜的分辨率通常为300 nm)。图1.5所示为20MnCrNi2Mo钢经500℃回火后其上贝氏体组织的激光扫描共聚焦显微镜照片和光学显微镜照片。光学显微镜的有效放大倍数仅为1 000倍,而激光扫描共聚焦显微镜可有效放大3 000倍,图中清晰地显示出回火之后的碳化物。显然,相对于普通光学显微镜,激光扫描共聚焦显微镜具有更好的图像分辨能力。

激光扫描共聚焦显微镜成像的另一特点是其光学切片(optical section)-重构成像。成像时点光束首先在平面内作 x 、 y 方向的高速扫描,从而得到在二维特定焦面上的一层形貌,即切片。通过移动 z 轴,激光扫描共聚焦显微镜能够得到一系列不同高度的光学切片,利用计算机图像重构技术对连续层面上的切片进行叠加,从而得到样品的三维形貌特征。图1.6所示为玻璃浸蚀后的表面二维形貌和三维形貌,可以清楚地观察到腐蚀后的沟状形貌,并提供表面起

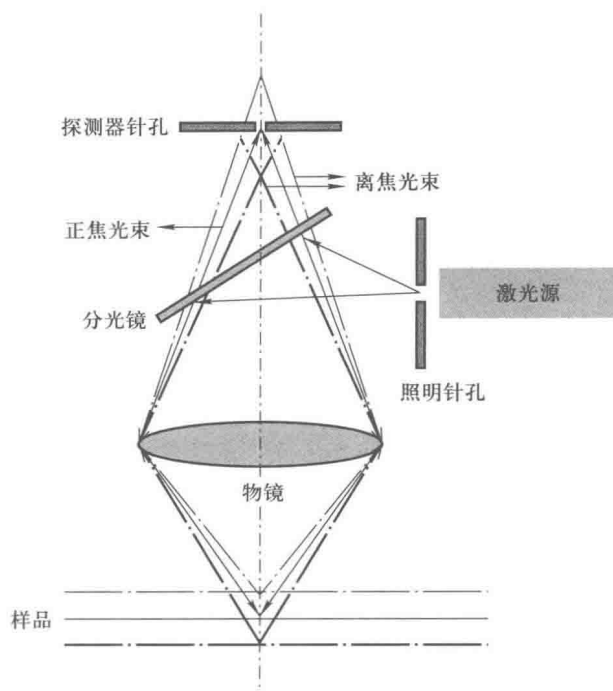


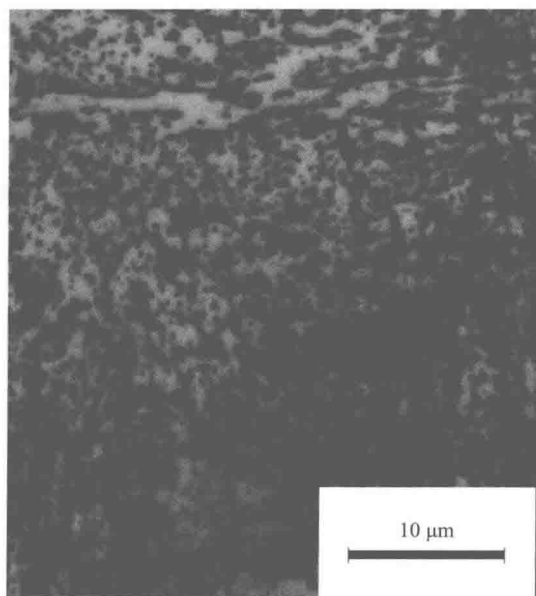
图 1.4 激光扫描共聚焦显微镜的光路示意图

伏的分布信息。

总体上来说，激光扫描共聚焦显微镜经过叠加重构后的图像与普通光学显微镜的图像类似。但需要注意的是，在单层快速成像时(单独一个切片)，由于针孔只允许正焦物面成像，因此图像中亮的衬度仅反映了正焦物面的物像。这一点与普通反射式光学显微镜图像中的白亮区域代表样品中平整且反光能力强的区域是不一样的。图 1.7 示出了高速钢在单层快速成像时不同切片中的衬度差别，图 1.7(a) 中白亮色的点在图 1.7(b) 中的衬度变为灰黑色，这是由不同图层处于不同的聚焦位置所导致的。



(a)



(b)

图 1.5 20MnCrNi2Mo 钢经 500 °C 回火后其上贝氏体组织的 (a) 激光扫描共聚焦显微镜照片和 (b) 光学显微镜照片