

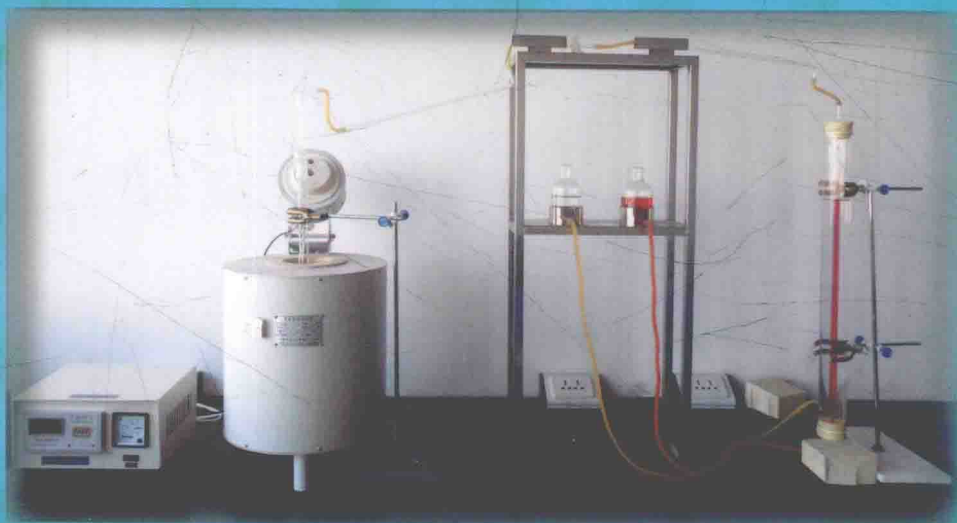


普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

无机非金属材料 工程专业创新实验

李志辉 罗旭东 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

无机非金属材料 工程专业创新实验

李志辉 罗旭东 编著

北 京
冶金工业出版社
2016

内 容 简 介

本书以无机非金属材料工程专业的主要理论课程和实践课程为章节编写,分为8章,共70个实验项目。本书实验主要包括材料科学基础实验、无机非金属材料热工基础实验、无机非金属材料基础实验、耐火材料岩相学实验、耐火材料化学分析实验、耐火材料原料实验、材料现代研究方法实验和无机非金属材料工艺实验。其中第1章~第7章为理论课程的课内相关实验,第8章为独立设置的实验课程。

本书为无机非金属材料工程、材料科学与工程、冶金工程、能源与动力工程、土木工程、功能材料、材料化学等专业的实验教材(配有教学课件),也可供相关生产、管理、科研、检测等工程技术人员和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料工程专业创新实验/李志辉,罗旭东
编著. —北京:冶金工业出版社,2016.12

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7434-8

I. ①无… II. ①李… ②罗… III. ①无机非金属材料
—实验—高等学校—教材 IV. ①TB321-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第312298号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杜婷婷 美术编辑 杨帆 版式设计 彭子赫

责任校对 禹蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7434-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016年12月第1版,2016年12月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;11.75印张;280千字;177页

33.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

当今世界经济和科学技术高速发展将人类文明推进到崭新的 21 世纪, 这些都是以信息科学、生命科学和材料科学的发展作为支撑的。材料是一切技术发展的物质基础, 也是人类进化的重要标志。材料科学是研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能及应用之间相互关系和变化规律的一门应用基础科学, 材料科学的发展对有机高分子、金属和无机非金属材料的研究与生产起到巨大的推动作用。

为了满足高等学校无机非金属材料工程专业创新实验教学改革的需求, 适应市场经济和时代发展的要求, 培养具有扎实专业知识、较强动手能力和创新精神的拔尖人才, 编者在多年教学经验的基础上编著了本教材。

实践教学是对学生进行业务技能教育和培养的必修课程, 它有助于学生将理论知识进行消化。实验教学是容易开展和行之有效的实践教学环节, 是培养学生掌握知识和提高能力的最佳方法之一。本教材的主要目的是对学生在进行实验方案设计时起指导作用, 为学生较早地参加科研和开展创新活动创造有利的条件, 使学生对无机非金属材料的研究工作有较完整和系统深刻的认识和掌握, 同时适应培养复合型人才的办学宗旨。

本教材的主要特点是: 以辽宁科技大学无机非金属材料工程专业的主要理论课程和实践课程为章节进行编排, 按照开课顺序共分为 8 章, 其中第 8 章为独立设置的实验课程, 其余各章为理论课程的课内相关实验, 共计 70 个实验项目。这种编排有助于学生有针对性地预习和选择实验项目, 加深对理论知识的理解与实践, 有助于学生综合能力的培养与提高。本教材不仅能够满足无机非金属材料工程专业的学生掌握全面、系统的专业实验技能和实验教学要求, 还可以为材料科学与工程、冶金工程、能源与动力工程、土木工程、功能材料、材料化学等相关专业的学生提供学习参考, 也可供从事与无机非金属材料有关的生产、管理、科研、检测等工程技术人员和科研工作者阅读。

本教材由辽宁科技大学李志辉、罗旭东编著, 全书由李志辉负责统稿。在部分章节的编著过程中得到了关岩、徐娜、李婷等教师的支持与帮助。在本教材的编著过程中, 参考了有关资料文献, 在此一并表示衷心的感谢。

本书配套教学课件,读者可从冶金工业出版社官网(<http://www.cnmp.com.cn>)教学服务栏目中下载。

由于编者水平所限,书中难免存在不妥或遗漏之处,敬请读者批评指正并提出宝贵意见,以便进一步修正。

李志辉于鞍山

2016年9月

目 录

1 材料科学基础	1
第 1 节 实验 1-1 材料的变形与再结晶	1
第 2 节 实验 1-2 铁碳合金平衡组织显微分析	3
2 无机非金属材料热工基础	8
第 1 节 实验 2-1 伯努利方程应用	8
第 2 节 实验 2-2 燃料油闪火点和燃烧点测定	12
第 3 节 实验 2-3 大空间外水平圆管空气自然对流传热	13
3 无机非金属材料基础	20
第 1 节 实验 3-1 失重分析	20
第 2 节 实验 3-2 固相反应	21
第 3 节 实验 3-3 黏土—水系统双电层	27
第 4 节 实验 3-4 黏土离子交换量测定	29
4 耐火材料岩相学	32
第 1 节 实验 4-1 偏光显微镜构造、调节和使用	32
第 2 节 实验 4-2 单偏光镜下晶体光学性质	35
第 3 节 实验 4-3 正交偏光镜下晶体光学性质	37
第 4 节 实验 4-4 锥光镜下晶体光学性质	39
第 5 节 实验 4-5 耐火材料岩相分析	40
5 耐火材料化学分析	43
第 1 节 实验 5-1 试样制备和药品配制	43
第 2 节 实验 5-2 重量法测定灼烧减量	44
第 3 节 实验 5-3 钼蓝光度法测定二氧化硅量	45
第 4 节 实验 5-4 铬天青 S 光度法测定氧化铝量	46
第 5 节 实验 5-5 络合滴定法测定氧化钙、氧化镁量	47
第 6 节 实验 5-6 邻二氮杂菲光度法测定三氧化二铁量	48
第 7 节 实验 5-7 二安替吡啉甲烷光度法测定二氧化钛量	49
6 耐火材料原料	51
第 1 节 实验 6-1 耐火原料形态和物理特征观察	51

第2节 实验 6-2	原料颗粒体积密度、显气孔率和吸水率测定	52
第3节 实验 6-3	轻烧氧化镁化学活性测定	53
第4节 实验 6-4	耐火原料辨识	55
7	材料现代研究方法	56
第1节 实验 7-1	热分析	56
第2节 实验 7-2	扫描电镜分析	64
第3节 实验 7-3	透射电镜分析	70
第4节 实验 7-4	激光粒度分析	73
第5节 实验 7-5	Zeta 电位分析	75
第6节 实验 7-6	X 射线衍射分析	76
第7节 实验 7-7	比表面积及孔径分析	84
8	无机非金属材料工艺实验	89
第1节 实验 8-1	耐火材料耐火度测定	89
第2节 实验 8-2	耐火材料真密度测定	90
第3节 实验 8-3	耐火材料透气度测定	92
第4节 实验 8-4	耐火材料热膨胀测定	94
第5节 实验 8-5	耐火材料抗渣性测定	96
第6节 实验 8-6	耐火材料抗热震性测定	98
第7节 实验 8-7	耐火材料抗氧化性测定	100
第8节 实验 8-8	耐火材料常温抗折强度测定	101
第9节 实验 8-9	耐火材料高温抗折强度测定	102
第10节 实验 8-10	耐火材料常温耐压强度测定	104
第11节 实验 8-11	耐火材料荷重软化温度测定	105
第12节 实验 8-12	耐火材料加热永久线变化测定	106
第13节 实验 8-13	耐火材料体积密度和气孔率测定	108
第14节 实验 8-14	耐火材料工艺创新性实验	110
第15节 实验 8-15	耐火和陶瓷制品冷等静压成型	114
第16节 实验 8-16	耐火和陶瓷制品真空热压烧结	116
第17节 实验 8-17	陶瓷配方设计	119
第18节 实验 8-18	陶瓷白度测定	121
第19节 实验 8-19	釉面光泽度测定	124
第20节 实验 8-20	陶瓷透光度测定	125
第21节 实验 8-21	陶瓷烧结温度范围测定	126
第22节 实验 8-22	陶瓷泥浆绝对黏度测定	128
第23节 实验 8-23	陶瓷体积密度、气孔率及吸水率测定	129
第24节 实验 8-24	陶瓷工艺创新性实验	132
第25节 实验 8-25	玻璃熔制	138

第 26 节	实验 8-26	玻璃热稳定性测定	143
第 27 节	实验 8-27	玻璃化学稳定性测定	144
第 28 节	实验 8-28	玻璃工艺创新性实验	145
第 29 节	实验 8-29	水泥熟料游离氧化钙测定	147
第 30 节	实验 8-30	水泥密度测定	149
第 31 节	实验 8-31	水泥细度测定	151
第 32 节	实验 8-32	水泥比表面积测定	153
第 33 节	实验 8-33	水泥标准稠度用水量测定	157
第 34 节	实验 8-34	水泥净浆凝结时间测定	160
第 35 节	实验 8-35	水泥安定性测定	161
第 36 节	实验 8-36	水泥胶砂强度测定	164
第 37 节	实验 8-37	水泥胶砂流动度测定	168
第 38 节	实验 8-38	水泥工艺创新性实验	170
第 39 节	创新性实验报告		173
参考文献			177

Foundation of Material Science

学科的发展必然带来教学体系的相应变化,自 20 世纪 60 年代起,美国高校开始出现以“材料科学与工程”系取代原先“冶金”系的变革,将专业范围由金属扩大到陶瓷,并进一步包含高分子材料。我国也于 20 世纪 80 年代初试办“材料科学”专业与国际接轨,后将“材料科学与工程”定为“材料类”,所属本科二级专业目录。而后,原属于“材料科学与工程”的三级“冶金工程”、“金属材料工程”、“无机非金属材料工程”、“高分子材料与工程”、“材料成型及控制工程”等专业纷纷独立招生。目前,这些专业都是以“材料科学基础”作为主要理论基础课程。它起到承上启下的作用,学生运用学过的基础知识,连接后续有关专业(基础)和实践课程,顺利完成自身的大学本科教学体系。本章是为无机非金属材料工程专业学生开设的两个实验项目。

第 1 节 实验 1-1 材料的变形与再结晶

一、实验目的

- (1) 学会材料经过冷塑性变形后显微组织的观察。
- (2) 掌握变形度与加热温度对再结晶后晶粒大小的影响。

二、实验原理

金属材料经过冷变形后,产生大量晶体结构上的缺陷,这些缺陷阻碍了变形的进一步发展,在性能上产生加工硬化现象,在显微组织上,则产生晶粒形状上的改变并出现滑移带。

(1) 冷变形后金属的显微组织与机械性能。冷加工变形后,晶粒的大小、形状及分布都会发生改变。晶粒沿外力方向被拉长(或被缩短),当变形度很大时晶界已不明显,分辨不出晶粒形状,看到的只是纤维状组织。

在变形过程中,由于滑移带的转动及晶粒的破碎,晶格弯曲和冷变形使位错密度增加,造成临界切应力提高,继续变形发生困难即产生所谓的加工硬化现象。

(2) 冷加工变形后金属再加热时的变化。金属经过冷塑性变形后,其金相组织处于不稳定状态,因而在随后的加热升温过程中,会出现回复、再结晶及晶粒长大三个过程。再结晶退火后金属发生软化,即加工硬化被消除。再结晶后金属的力学性能取决于晶粒大小,而晶粒大小则受预先冷变形度和再结晶温度的控制。

变形度对再结晶后晶粒长大的影响特别显著。金属存在一个能进行再结晶的最小变形度,此时会得到过大的晶粒,该变形度被称为临界变形度(铝约 3%)。当超过临界变形

度时,金属的变形度越大,再结晶后的晶粒越小,而超过 80% 变形度后晶粒又变大。

当变形度一定时,加热温度越高,再结晶进行得越快,再结晶后形成的新晶粒也越大。

三、实验设备及材料

- (1) 实验设备有切板机、箱式电阻炉、微机控制电液伺服万能试验机。
- (2) 实验材料有纯铝片、浓硝酸、浓盐酸、量杯、医用托盘、竹夹子。

四、实验步骤

(1) 试样准备。实验使用材料为纯铝片,先用切板机将铝板切成条状样片,拉伸前的铝片有一定变形,为消除在剪切过程中铝片所受的冷加工效应,避免影响随后得到的变形度,必须预先将铝片在箱式电阻炉中进行退火 (500℃、保温 1h),使铝片处于软化状态。

(2) 加工变形。首先,在退火软化的铝片上划好标距,如图 1-1 所示。然后,将铝片安放到微机控制电液伺服万能试验机的拉伸装置上,调整好后进行拉伸,当标距被拉长到需要的长度时即停止拉伸,变形严重不均匀者报废。

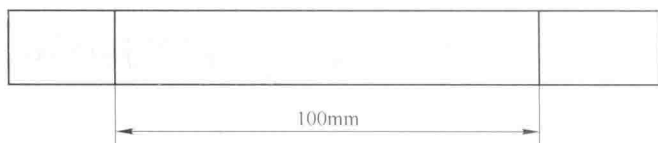


图 1-1 试样尺寸

拉伸变形度按式 (1-1) 进行计算:

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 δ ——变形度, %;

L_0 ——拉伸前标距长度, mm;

L ——拉伸后标距长度, mm。

实验所用变形度及试样编号由学生自行确定,应注意不要使铝片受到任何冲击和不应有的变形,以保证试验结果的准确。

(3) 再结晶退火。各组学生将拉伸后的铝片按各组制定的退火温度进行退火,加热时要等炉温升到规定的温度再放试样,保温 1h,试样取出后在空气中冷却。

(4) 酸侵蚀。将退火完的铝片用混合酸溶液进行侵蚀,待晶粒显出后即停止侵蚀,用水冲洗干净后吹干。

(5) 晶粒度测定。铝的形变再结晶晶粒比较粗大,因此肉眼可以直接观测,为了计算晶粒大小,有直接测量晶粒面积或直径法与标准图比较法。其中直径测定法方法如下:

首先在侵蚀好的铝片上用铅笔划 3~4 条线,每条线的长度以能割 10~20 个晶粒为限,大晶粒的可以直接目测,细小的可以用放大镜测。数出各直线所截完整的晶粒数及不完整的晶粒数的一半 (两个不完整的晶粒数算一个),代入式 (1-2) 即可求出晶粒的平均直

径 D_m 。

$$D_m = \frac{LP \times 10^3}{ZV} \quad (\mu\text{m}) \quad (1-2)$$

式中 L ——直线长度, mm;

P ——平行直线数目, 条;

Z ——总晶粒数, 个;

V ——放大倍数 (目测为 $V=1$, 放大镜测时 $V \neq 1$)。

五、思考题

- (1) 绘出材料经不同变形度后再结晶退火的组织示意图。
- (2) 分析材料经过冷塑性变形后显微组织及力学性能的变化。
- (3) 分析变形度与加热温度对材料再结晶后晶粒大小有何影响。

第2节 实验 1-2 铁碳合金平衡组织显微分析

一、实验目的

- (1) 观察和识别铁碳合金在平衡状态下的显微组织特征。
- (2) 了解含碳量对铁碳合金平衡组织的影响以及 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 状态图与平衡组织的关系。
- (3) 了解平衡组织的转变规律, 并能应用杠杆定律和显微组织示意图分析碳钢的种类。
- (4) 熟悉金相显微镜的使用。

二、实验原理

所谓平衡状态指的是铁碳合金在非常缓慢的冷却条件下完成转变的组织状态。在实验条件下, 可以将退火状态下的碳钢组织作为平衡状态下的组织, 典型的铁碳合金平衡组织如图 1-2 所示。

(一) 试样制备基本方法

为了观察金属的显微组织, 需要按下列方法制备试样:

(1) 取样。从所研究的部位截取试样, 试样尺寸最好是厚度及直径均为 10~15mm 的圆柱, 以便于制样和观察。对于薄板、细线材或需要研究边缘组织时, 可将试样镶在塑料中或装入特制的夹具中进行磨样。

(2) 磨制。试样经砂轮打平、倒角后, 用砂纸由粗到细依次将试样磨平, 磨制试样时考虑怎样磨制试样效率更高、效果更好。

(3) 抛光。抛光的目的在于去除试样表面的细磨痕, 得到平滑的镜面。抛光分为机械抛光和化学抛光。

(4) 侵蚀。抛光的试样在金相显微镜下只能看到夹杂物, 要看到金属组织还必须进行侵蚀。由于合金中不同相或不同部位的晶粒耐蚀性不同, 试样经侵蚀, 表面会出现凸凹不平的情况, 由于它们对光线的反射程度不同, 在光线下就会呈现不同的明暗区域或线

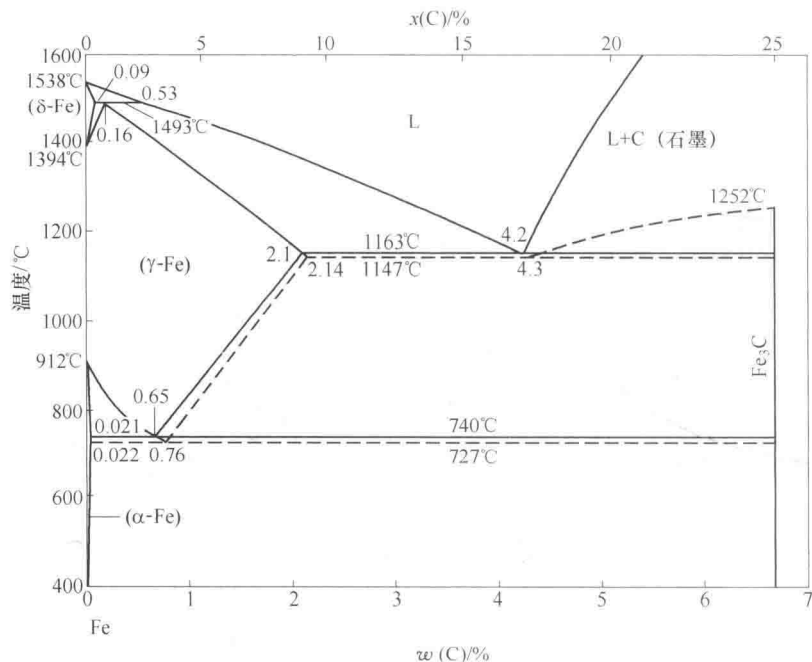


图 1-2 铁碳合金平衡组织图

条，这样就可看到金属的金相显微组织。

显示钢铁金相显微组织常用的侵蚀剂是 3%~5% 的硝酸酒精溶液。制备试样很费时间，所以要爱护制好的试样表面，更要避免被硬物划伤，在实验过程中不要用手去摸试样表面。

(二) 铁碳合金的各种基本组织特征

铁碳合金的基本组织有铁素体、渗碳体、珠光体和莱氏体，特征如下：

(1) 铁素体。碳在 α -Fe 中的固溶体，呈白色块状。

(2) 渗碳体。铁和碳的间隙化合物。抗蚀能力很强，故是白亮的。一次渗碳体呈板状，分布在莱氏体之间，二次渗碳体是从奥氏体中析出的，呈网状分布在珠光体的边界上。三次渗碳体分布在铁素体的边界上，量少极分散，一般看不到。

(3) 珠光体。它是碳钢含碳质量分数为 0.77% 的铁素体和渗碳体的机械混合物。铁素体和渗碳体都是片层状，边界易腐蚀，故显微镜下看到的是较密的黑条，若放大倍率较低，条间分不清楚，珠光体是黑色的块状。

(4) 莱氏体。它是铸铁室温时含碳质量分数为 4.3% 的铁素体和渗碳体的混合物，渗碳体基本是白亮的；珠光体是黑色棒状或条纹状。

各种铁碳合金在室温下的显微组织见表 1-1。

铁素体和渗碳体经 3%~5% 的硝酸酒精溶液浸蚀后都呈白色。若用苦味酸钠热蚀，渗碳体呈黑褐色。由此可以区分铁素体和渗碳体。

(三) 显微组织观察

观察碳钢显微组织所使用的常规仪器是金相显微镜，金相显微镜属于精密光学仪器，使用时要加以小心和爱护，避免将仪器损坏。

表 1-1 各种铁碳合金在室温下的显微组织

品 种	合金分类	含碳质量分数/%	显微组织
纯 铁	工业纯铁	低于 0.0218	铁素体 (F)
碳 钢	亚共析钢	0.0218~0.77	F+珠光体 (P)
	共析钢	0.77	P
	过共析钢	0.77~2.11	P+二次渗碳体 (C II)
白口铸铁	亚共晶白口铸铁	2.11~4.3	P+C II+莱氏体 (L'e)
	共晶白口铸铁	4.3	L'e
	过共晶白口铸铁	4.3~6.69	L'e+一次渗碳体 (C I)

三、实验设备及材料

(1) 实验设备：MDJ 数码金相显微镜，如图 1-3 所示。数码金相显微镜又称视频金相显微镜，是将精锐的光学显微镜技术、先进的光电转换技术、普通的电视机或者电脑完美地结合在一起而开发研制成功的一项高科技产品。数码金相显微镜将金相显微镜看到的实物图像通过数模转换，使其成像在计算机上。从而，我们可以对微观领域的研究从传统的普通的双眼观察到通过显示器上再现，从而提高了工作效率。显微镜是由一个透镜或几个透镜组合构成的一种光学仪器，是人类进入原子时代的标志，是用于放大微小物体成为人的肉眼所能看到的仪器。显微镜分光学显微镜和电子显微镜，数码金相显微镜就属于光学显微镜的范畴。光学显微镜是在 1590 年由荷兰的杨森父子所首创。现在的光学显微镜可把物体放大 1600 倍，分辨的最小极限达 0.1 μm 。普通金相显微镜的构造主要分为三部分：机械部分、照明部分和光学部分。



图 1-3 MDJ 数码金相显微镜

(2) 金相图谱。

(3) 金相标准试样有纯铁、20 钢、45 钢、T8 共析钢、T12 钢、亚共晶、共晶、过共晶白口铁。

四、实验内容

(1) 观察试样，根据铁碳合金状态图判断各组织组成物，区分金相显微镜下观察到的各种金相显微组织。观察的试样有各种含碳量的铁碳合金，通过观察金相组织，判断所观察的试样属于哪一类铁碳合金。

(2) 画出相应金相试样的组织示意图，标明各组织组成物名称。如图 1-4 所示为七种金相组织的典型显微形貌图。

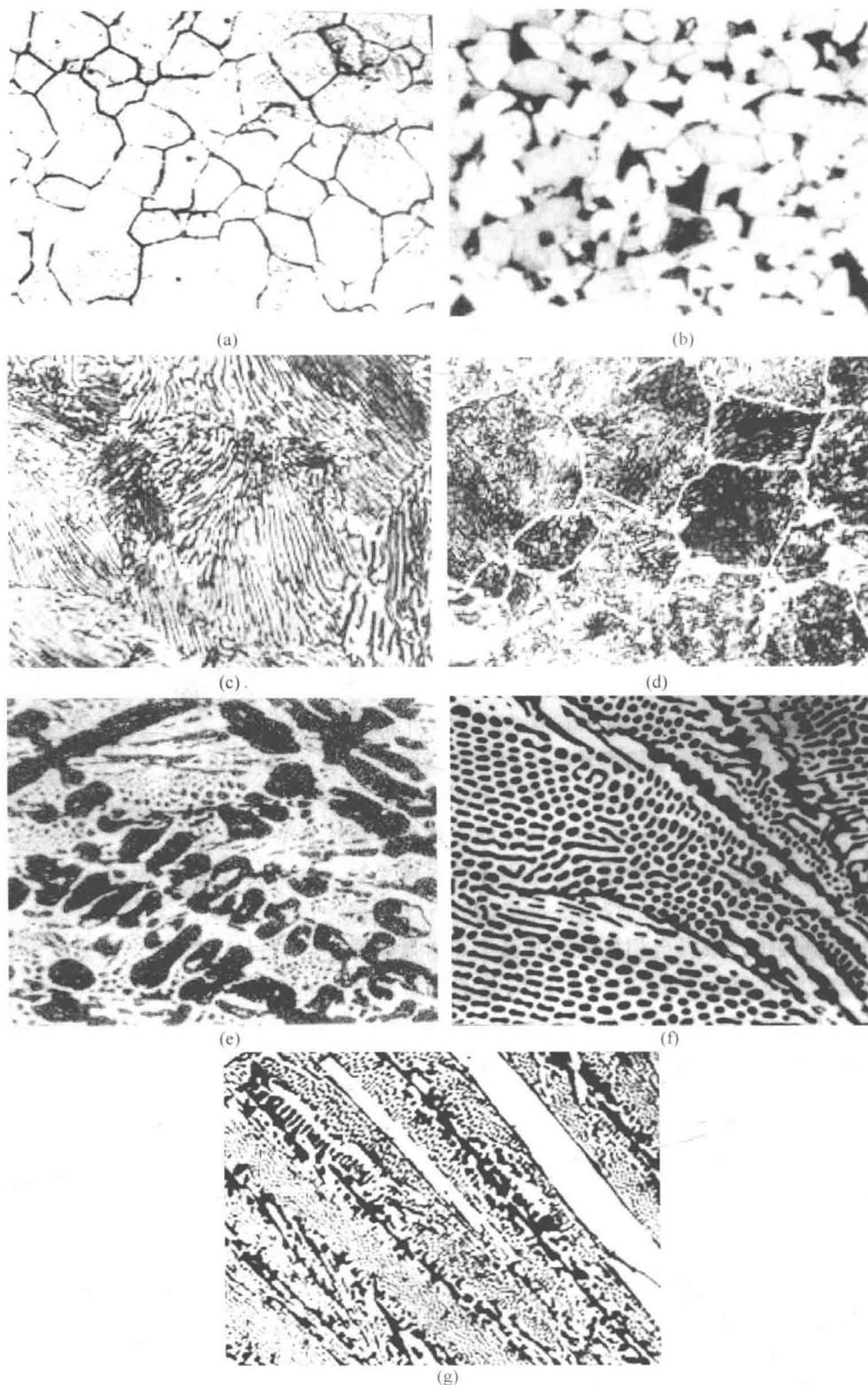


图 1-4 典型金相组织显微形貌图

(a) 工业纯铁; (b) 亚共析钢; (c) 共析钢; (d) 过共析钢; (e) 亚共晶白口铸铁; (f) 共晶白口铸铁; (g) 过共晶白口铸铁

五、思考题

- (1) 讨论铁碳合金含碳量与组织的关系。
- (2) 渗碳体有几种？它们的形态有什么区别？
- (3) 珠光体组织在低倍观察和高倍观察时有何不同？为什么？
- (4) 怎样鉴别 0.6% 碳钢的网状铁素体和 1.2% 碳钢的网状渗碳体？

Thermal Process Basis in Inorganic Non-metal Materials Industry

无机非金属材料热工基础是无机非金属材料工程专业两门重要的专业基础课程之一，其中重要的是气体力学在窑炉中的应用、传热原理和燃料及其燃烧三方面内容。本章相对应地为此课程设置了三个实验项目。

第1节 实验 2-1 伯努利方程应用

一、实验目的

- (1) 加深对理想流体伯努利方程的理解。
- (2) 验证伯努利方程在收缩、扩张形管道中的应用。
- (3) 了解气体由于黏性作用和附面层的产生，在运用伯努利方程式进行计算时造成的偏差。

二、实验原理

伯努利方程 (Bernoulli Equation, 另译为柏努利方程) 是理想流体定常流动的动力学方程，意为流体在忽略黏性损失的流动中，流线上任意两点的压力势能、动能与位势能之和保持不变。

这个理论是由瑞士数学家丹尼尔·伯努利在 1726 年 (另说 1738 年) 提出的，当时被称为伯努利原理。后人又将重力场中欧拉方程在定常流动时沿流线的积分称为伯努利积分，将重力场中无黏性流体定常绝热流动的能量方程称为伯努利定理，这些统称为伯努利方程，是流体动力学基本方程之一。伯努利方程实质上是能量守恒定律在理想流体定常流动中的表现，即不可压缩的理想流体在管道中作稳定等温流动时必须遵守的，它是流体力学的基本规律。在一条流线上流体质点的机械能守恒是伯努利方程的物理意义。

当均匀的空气通过实验管段，在实验管段的入口和出口处任取 2 个截面，可以写出管流的伯努利方程式：

$$z_1 \rho g + P_1 + \frac{w_1^2}{2} \rho = z_2 \rho g + P_2 + \frac{w_2^2}{2} \rho \quad (2-1)$$

式中 z_1, z_2 ——气体在截面 1、2 处的高度，m；

P_1, P_2 ——气体在截面 1、2 处的静压力，Pa；

w_1, w_2 ——气体在截面 1、2 处的速度, m/s;

ρ ——气体密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²。

考虑空气的密度很小, 在高度变化不大的情况下, 忽略位能的影响, 则任意截面的全压力为:

$$P_{\text{whole}} = P + \frac{w^2}{2}\rho \quad (2-2)$$

于是, 任一截面的速度可求, 即:

$$w = \sqrt{\frac{2(P_{\text{whole}} - P)}{\rho}} \quad (2-3)$$

由于实际气体都具有黏性, 在流动过程中产生附面层, 因此空气流过实验管段时有能量损失 h_{loss} , 在截面 2 处的全压不等于截面 1 处的全压, 存在:

$$P_{\text{whole}2} = P_{\text{whole}1} + h_{\text{loss}} \quad (2-4)$$

为了更清楚地表明能量转换关系, 选取实验管段的喉管处为特征截面, 此处的流速最大, 设喉管处的静压力为 P' , 全压力为 P'_{whole} , 速度为 w' , 由式 (2-3) 可得喉管处的空气流动速度:

$$w' = \sqrt{\frac{2(P'_{\text{whole}} - P')}{\rho}} \quad (2-5)$$

将式 (2-3) 与式 (2-5) 相除, 可得:

$$\frac{w}{w'} = \sqrt{\frac{P_{\text{whole}} - P}{P'_{\text{whole}} - P'}} \quad (2-6)$$

根据实验装置条件 (在管路上设置了整流装置), 空气在实验管段任意截面的流动都可视为均匀的。设实验管段任意流通截面的面积为 A , 喉管处流通截面积为 A' 。由连续性方程, 任意截面的空气流量与喉管处的流量都相等。于是有 $wA = w'A'$ 。

$$\text{即} \quad \frac{w}{w'} = \frac{A'}{A}$$

在实验管段厚度相等的情况下, 上式可写为:

$$\frac{w}{w'} = \frac{B'}{B} \quad (2-7)$$

式中 B, B' ——实验管段的任一截面和喉管截面的宽度, mm。

式 (2-6) 与式 (2-7) 是有区别的。为了加以区别, 令式 (2-6) 为测量值, 写成:

$$\left(\frac{w}{w'}\right)_{\text{measure}} = \sqrt{\frac{P_{\text{whole}} - P}{P'_{\text{whole}} - P'}} \quad (2-8)$$

将式 (2-7) 称为计算值, 写成:

$$\left(\frac{w}{w'}\right)_{\text{count}} = \frac{B'}{B} \quad (2-9)$$

测量实验管段各截面的速度分布, 将测量结果代入式 (2-8) 计算, 并与式 (2-9) 加以比较, 可验证伯努利方程式能量转换的关系。