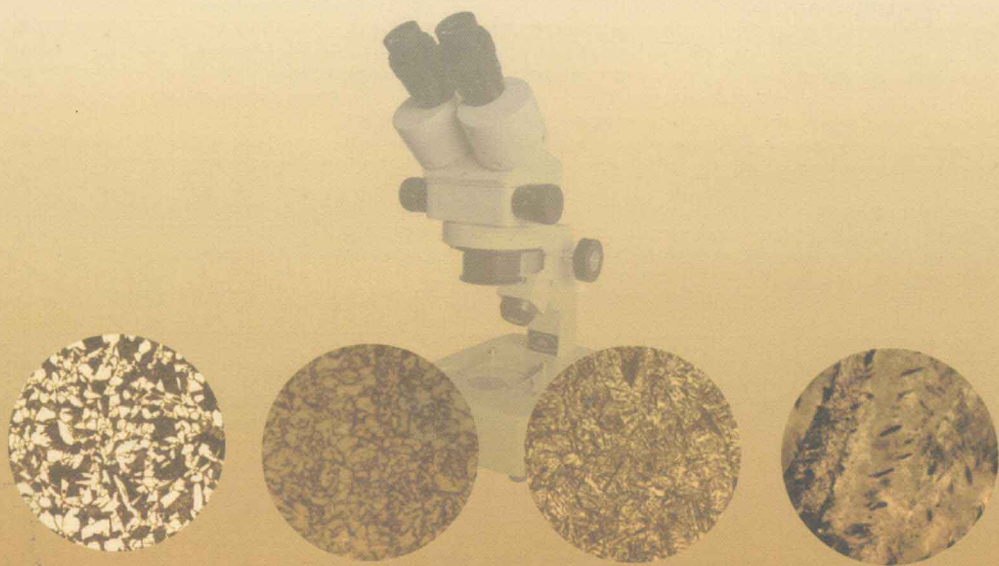




普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料类专业 实践教学指导

杨爱民 姚婷珍 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料类专业实践教学指导

杨爱民 姚婷珍 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了金属材料类专业的基础、性能测试、铸造、塑性成型、热处理、表面处理以及石油特色等方面的 55 个实验, 共八章内容。每个实验包括实验目的、实验内容、实验原理、实验材料和设备、实验方法和步骤、实验报告要求及思考题等内容, 力求完整, 既有实践过程, 又有理论深度。

本教材既可作为涉及金属材料的相关专业如材料科学与工程、金属材料工程、材料物理、材料成型及控制工程等专业的本科学生的实验教学用书, 也可供教师、研究生、工程技术人员等进行培训、试验和研究时阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料类专业实践教学指导 / 杨爱民, 姚婷珍主编. —北京: 中国石化出版社, 2011. 9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-1172-3

I. ①金… II. ①杨… ②姚… III. ①金属材料—高等学校—教学参考资料 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 180453 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭,
或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 13 印张 320 千字

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

定价: 26.00 元

前 言

高校的教学分为理论教学和实验教学两大块,但理论教学资源比实践教学的资源要丰富很多。随着时代的发展,实践教学需要不断发展,也需要一些系统的教材,这是本书编写的出发点。

本书的大致结构是:在绪论部分,分析了实验教学的性质和利用网络平台管理实验教学的模式,在第八章,编写了数据分析和处理方法的内容,中间是55个专业实验。本书是在提倡培养本科应用型人才的大背景下,以培养学生的动手能力、创新能力和研究能力为主要目标,为高校进行开放性实验做准备。本书的编写力求内容完整、实用性强,不仅具有一定的理论深度,还具有实用性和对学生的启发性。每个实验项目既可以自成体系作为一个单独的实验,也可以根据需要将其中的几个实验串联成一个综合性的实验系列,这种方法适合于单独开设实验课程的实验教学。在设备缺乏的情况下可以由老师演示做一般的验证实验,也可以在有条件的情况下让学生按照本教材的要求自己动手完成实验。在完全让学生动手的开放式实验中,可以借助网络进行预约和管理,本书在网络平台分层次实验教学和管理方面进行了实践探索,可供从事实验教学的教师参考。

本书由西安石油大学杨爱民和姚婷珍主编。其中第一章绪论由姚婷珍编写,第二章由张瑞峰编写,第三章由张钧、许天旱和姚婷珍共同编写,第四章、第五章由杨爱民和王党会共同编写,第六章由张瑞峰和姚婷珍共同编写,第七章由张瑞峰、许天旱和姚婷珍共同编写,第八章由王党会编写。全书由杨爱民和姚婷珍主审。

在本书编写过程中,参考引用了大量的文献,由于条件所限,本书未能将所有参考文献一一列出,在此对所有文献的作者表示衷心的感谢。此外,本书在编写过程中得到了西安石油大学材料科学与工程学院及教务处的大力支持,在此也表示感谢。

实验教学的理论和实践都是不断发展的科学,教学方法和教学内容也会随着时代的发展不断更新和改进,加之编者的水平和学识有限,本书难免有一些不足之处,敬请读者能够批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 实践教学的性质、任务及重要性	(1)
第二节 网络平台分层次实验教学和管理	(2)
第二章 材料基础实验	(6)
实验1 Pb - Sn 二元相图的测定	(6)
实验2 金相试样的制备	(9)
实验3 金相显微镜的使用及铁碳合金的平衡组织观察	(12)
实验4 铸铁石墨形状及基体组织的观察与辨识	(18)
实验5 钢的晶粒度显示与评级方法	(21)
实验6 金属的塑性变形与再结晶	(23)
实验7 金属材料硬度的测定	(26)
实验8 金属材料冲击韧性的测定	(30)
实验9 金属材料平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测定	(33)
第三章 性能测试分析实验	(37)
实验1 焊接结构无损检测	(37)
实验2 典型断口的电子显微分析综合实验	(44)
实验3 透射电子显微镜(TEM)组织分析	(53)
实验4 X 射线衍射仪及物相定性分析	(58)
实验5 材料微区成分的 X 射线能谱分析方法	(61)
实验6 差热分析实验	(66)
实验7 金属材料的热学性能测试实验	(68)
第四章 铸造实验	(72)
实验1 铸造合金流动性的测定	(72)
实验2 铸造残余应力的测定	(75)
实验3 机械振动对铸件组织的影响	(77)
实验4 铸件动态凝固曲线的测定	(78)
实验5 原砂性能测试实验	(79)
实验6 型砂性能测试实验	(82)
实验7 铸造合金体收缩的测定	(85)
实验8 热裂倾向的测定	(86)
实验9 砂型浇注系统水模拟实验	(87)
实验10 浇注系统流量系数的水力模拟测定	(90)
实验11 铝合金变质处理实验	(91)
实验12 铝合金压铸、力学性能及组织观察综合实验	(92)

第五章 塑性成型实验	(94)
实验 1 塑性变形对金属性能的影响	(94)
实验 2 金属薄板拉伸试验	(95)
实验 3 板料塑性成型的应变测定试验	(98)
实验 4 镦粗不均匀变形和变形力试验	(99)
实验 5 板材包申格效应弯曲实验	(100)
实验 6 锻压时摩擦系数的测定	(102)
实验 7 镦粗时单位压力分布	(105)
实验 8 轧制过程咬入条件和摩擦系数的确定	(107)
实验 9 正向挤压金属流动规律分析	(110)
实验 10 正向挤压时挤压力变化规律分析	(112)
实验 11 冲裁加工实验	(113)
第六章 热处理及表面处理实验	(117)
实验 1 钢的整体热处理及其非平衡组织观察	(117)
实验 2 钢的淬透性测定	(121)
实验 3 钢的渗碳处理及渗碳层厚度的测定	(123)
实验 4 金属表面纳米化处理实验	(126)
实验 5 材料表面的物理气相沉积法镀铝实验	(129)
实验 6 金属铝的表面着色实验	(135)
第七章 石油特色实验	(140)
实验 1 金属材料在不同介质环境中的电化学腐蚀性能测定实验	(140)
实验 2 石油工程材料韧脆转变性能测试	(146)
实验 3 常用石油工程材料的微观组织分析	(152)
实验 4 焊接接头的金相分析	(157)
实验 5 焊接残余应力的测定	(162)
实验 6 焊缝金属中扩散氢含量的测定	(167)
第八章 数据分析及处理方法	(171)
第一部分 数据分析方法	(171)
第二部分 实验数据处理的 Origin 方法简介	(181)
第三部分 Origin 软件应用之高阶篇简介	(189)
附录 A 铂铑 - 铂热电偶分度表	(195)
附录 B LVDT 型位移传感器	(200)
参考文献	(202)

第一章 绪 论

第一节 实践教学的性质、任务及重要性

高校的实践教学是培养学生综合能力的一项系统工程，不仅包括培养计划所包含的必须进行实际操作实验，还包括各种实习环节，提供学生自己动手将理论和实际应用相结合，增加感性认识的机会。最终使学生不仅具备一定的理论知识，还具有实际的操作技能和感性认识。实践教学突出实践技能，强调对学科知识的整体把握，考察和提高学生综合运用学科知识的能力，对素质教育尤其重要。

21 世纪的高等教育发展方向是培养适应时代发展要求的、具有创新精神和创新能力的高素质人才。动手能力是创新精神和创新能力的重要体现，实验室是学生创新的摇篮，因此实践教学在高等教育中所扮演的角色就尤为重要，在这种要求下，需要赋予实验教学更深层次的内涵。

在高等学校的教学中，实践教学最主要的形式是实习和实验教学，实验教学是实践教学的重要环节，在实践教学中占很大比重，在实验教学中应该更新教学观念，做到“以人为本”。现今在我国高等教育体制下，大多数高等院校对实验教学的观念还停留在“实验教学依附理论教学”的思想下，或多或少忽略了实验教学的本质，导致重理论、轻实验的现象，对培养学生适应社会的能力不利。针对这一点，我们应以科学精神和创新能力的培养为主，以个性化塑造为特色，打破实验教学附属于理论教学的传统模式，建立“实验教学与理论教学同等重要”的教学观念，创建富有主动性、创新性和高效性的实验教学模式。改变现有应试教育、灌输式教育模式，树立“以人为本，以学生为主体”因材施教的思想观念。实践教学由于其方式的灵活性和传输知识的特殊性，更能拉近老师和学生的距离，更能激发学生的探索热情，通过采用讨论式、启发式并能动手实践的教学方式，能够形成良好的沟通氛围，尽量发挥学生的聪明才智，让学生敢于动手、勤于动手、勤于思索、善于表达不同的观点，敢于挑战权威，在做、学和交流中形成一种敢于钻研、敢于沟通的精神。老师的角色由传统的主导地位转变为指导、引导。教育是一门艺术，只有能够很好地掌握规律，才能有好的收益，才能够将素质教育与业务培养融为一体，让知识的传授在一种和谐的氛围中形成，达到培养能力的目的。

将实践教学与科研结合。实践教学能够与科研更好地融为一体，对学生的实践能力及分析问题、解决问题和创新能力是一个很好的提升。能够使学生更加深入地掌握理论知识，培养学生的科学素养。在教与学的互动过程中，通过以人为本的教学理念，立足于学生的接受能力和学习要求，改变传统的老师讲述、学生听讲的教学方式，考虑学生的需求和学生接受的程度，将传统的以教师为主的思想转变成以学生为主体、教师为主导的思想。充分尊重学生学习的主体地位，培养学生的自我意识、主体意识和自我控制、自我调节的能力，指导学生开动脑筋，积极探索、寻找问题的可能答案，养成对新问题、新知识的好奇心和求知欲，以及对问题主动、独立思考的质疑态度和批判精神。在实践教学过程中，实验课的开设、仪

器设备的购置、实验室的管理、实习场所的选择、教学模式的采用等，都必须充分考虑学生的需要，兼顾学生的兴趣和特长，充分发挥学生的主观能动性。不要让学生的个性发展被统一的教学模式和教学手段阻碍，要变被动学习为主动要求多学习，变消极应付老师为主动请教老师、主动探索学习，由对仪器设备的一知半解到熟练掌握，从对实验过程各个环节的懵懂，到能够在书本中找到依据，理论联系实际，甚至质疑书本，形成自己的理论，达到科学的创新。放开手脚，信任学生的能力，借助实践教学给学生一个展现自我、体现兴趣和特长的平台，激发学生的学习热情，只有这样，才能将科学研究的任务继承并发扬下去。现代社会不断发展，对人才的素质提出了更高的要求，因而相应的高等教育也必须做出改革和创新，教学体制、教学方法和教学观念也必须跟上时代的步伐，必须更加重视学生学习新知识的独立性、学会独立分析问题和解决问题，并学会团队合作，在团队的合作中培养对社会的责任感。目前，大部分实验课的教学主要是验证理论课的内容或仅停留在教授某种仪器和设备的操作检测，没能教授学生学习有效地使用各种方法和设备研究解决生产、研究和应用中遇到的问题。传统的教学指导思想，很难培养学生的创新能力。以教学方法而言，过去一直强调培养学生的基本知识、基本技能、基本操作，实验讲义写得详详细细，实验中学生“照方抓药”，一直处于被动状态，这大大束缚了学生思维能力和创造能力的培养。此种模式不利于发挥学生的自主性和创造性，不利于培养学生的团队合作精神，不利于造就他们的才能。应该在实践教学中结合科研，合理利用现代化的手段，如网络和计算机等，通过实验室的开放式管理给学生搭建平台，转换教师的角色，提高学生主动实验的积极性，增强综合分析和解决问题的能力，逐步从依靠老师的讲解转换到脱离老师，独立探索。

只有这样，才能充分发挥实践教学的作用。实践教学，也才完成了它的使命，完成了从理论到实践，从实践到理论，再从理论到更高级理论的飞跃。

第二节 网络平台分层次实验教学和管理

随着计算机技术的飞速发展，网络已经在信息传递和交流方面起到了关键作用，如果能够利用网络平台，进行资源共享和信息传递，为学生提供更广阔的学习和交流空间，结合现有的实验教学模式，使学生的学习由被动接受变为主动学习，真正体现实验教学过程学生的主体地位，对培养学生的创新精神、实践知识和自学能力，对科学管理实验教学过程各个环节，使实验教师的工作重心由指导转化到引导和监督，增加老师和学生之间的互动、学生和学生的沟通交流，具有非常重要的实际意义。

一、理工类高校实验教学现状分析

传统实验教学中，高校普遍采用的教学模式是：由实验教师在每学期刚开学根据课表拟订实验教学计划，实验教学计划要与理论教学基本同步，将教学计划上交主管教学的教学办，并与任课教师沟通，通过任课教师与学生传达信息，才能使实验顺利进行。实验过程通常是老师已经准备好所需要的仪器和耗材，学生实验前预习实验指导书，教师讲述实验原理和实验步骤，学生按照老师的要求和所演示的步骤进行实验，实验过程中老师要监督学生的操作，保证实验的正确性及学生和设备的安全。实验完毕后，老师限定时间学生呈交实验报告，根据实验报告和实验过程中的表现，实验老师给出最终的实验成绩。

按照传统实验教学模式进行实验教学，存在以下不足：

首先，师生所能使用的教学资源有限。对于进行实验的学生，能得到的教学资源仅是一

本实验指导书，实验指导书由于篇幅所限，仅涉及一些简单的实验原理、实验步骤、实验结果分析方法，对实验相关知识、仪器的操作规范、实验操作说明和背景知识的介绍不系统，使教学效果受到影响，也不能满足当代大学生强烈的求知欲望和知识扩展需求。

第二，老师与学生、学生与学生之间缺少有效沟通。实验教师和学生的相处时间仅限于实验教学课堂，时间有限；由于实验资料有限，学生实验前没有进行充分的思考和准备，实验起来手忙脚乱，主要依赖老师的示范，仅限于完成实验任务，并不能达到提高动手能力、培养创新精神的目的；教师在实验期间疲于应对学生各种有关设备操作的问题，忙于关注影响学生人身和设备安全的监督工作，整个实验过程处于一种忙乱却没有有效沟通的尴尬境况，对学生的一些问题没有时间及时解决。学生的实验时间仅限于课堂，不能将理论和实践有机结合，造成学生只知其然，不知其所以然，这样不能启发学生的思维，使实验教学效果大打折扣。

第三，学生的分组人数不均匀。分组人数一般是实验教师与任课老师及学生班长联络，按照学号顺序分组，学生由于各种因素不想或不能按照名单的顺序进行实验，实验学生的人数和计划分组时的人数有出入，有些组人数多，有些组人数少，而仪器设备和配套实验设施的数量是一定的，导致人数多的组实验设备和配套工具不够分配，难管理，教学效果不理想。

最后，实验成绩不易评定。由于师生共处的时间仅限实验课堂，知识的传授仅限实验指导教师，无法了解每一位学生的课堂具体表现，甚至只能将个别学生和姓名对上号。有时这组实验完了还有下一组学生等待实验，教师和学生的交流时间及空间有限，进行实验学生的人数较多，教师无法对每位学生的预习情况、操作及设备使用情况和结果的正确性等方面进行全面考查。实验的总评成绩应该是对预习、实验操作过程和实验报告这三部分的综合评定，缺少了对预习和操作过程的准确考核，实验成绩的评定就决定于实验报告，学生写实验报告的主要依据是实验指导书，每个学生的实验报告大同小异，很难正确对学生的实践能力和综合素质进行评定。

二、利用网络平台进行本科实验教学

为了解决以上传统实验模式中存在的问题，并顺应形势发展的需要，我校自行开发了网络教学平台管理软件，可以借助网络管理平台，根据不同情况对实验室的实验教学过程进行科学管理和改进。将计算机网络技术应用于本科实验教学，让网络成为广大师生传递和交流实验信息的平台，并对实验的预习、分组及报告等教学内容进行管理，对实验教学无疑是一个重大的突破，对实验教学水平的提高也会发挥很大的作用，就是对其他课程的教学也有借鉴作用。

1. 实验教学网络管理软件所具有的功能

网络实验教学管理系统作为网络实验教学平台，可以通过校园网使用，正常安装后即可通过页面进入，进入后的界面如图 1-1 所示：登陆的角色有三个，分别是学生、老师和管理员。学生的用户名是参与实验的学生，学生的信息需要管理实验的老师以管理员的角色进入后提前输入。学生进行注册，每个学生能够注册一次，实名注册，只要在实验学生的名单里有，就可以顺利注册。注册后可以更改自己的密码，输入随机产生的验证码后即可登录。

有时验证码的反应稍有滞后，显示输入的验证码不正确时刷新后再次进入即可。

以学生角色登录后的界面如图 1-2 所示，整个界面分为两部分，左边的黄色区域，红色字体是可以进入的链接，点击各链接即进入相关的区域，可以进行实验预约，查阅本人已

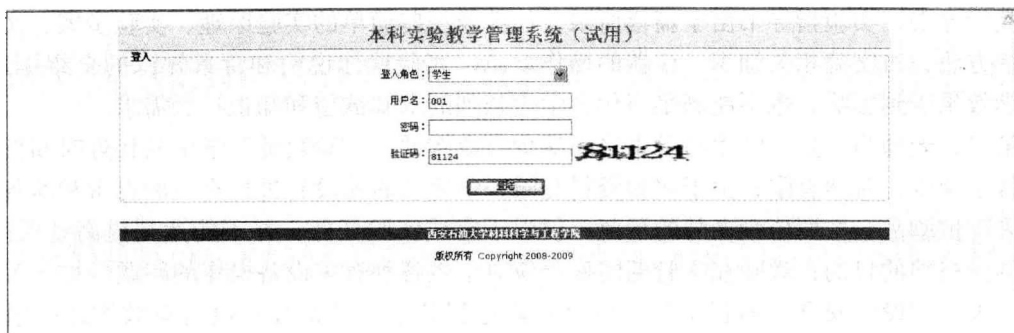


图 1-1 本科实验教学管理系统登录界面

经预约的实验及实验课表，可以下载仪器设备操作资料，还可以进行意见反馈或进入实验论坛，与老师学生进行实验交流，有权限更改密码，完成操作后选择退出，还可以重新登录。右边的蓝色区域是“欢迎使用本科实验教学管理系统”及本系统的使用说明。



图 1-2 以学生角色登录后的界面

除了学生可以登录，所有教师都可以进行登录。以教师角色登录后的界面如图 1-3 所示，教师登录后可以进行“预约批次管理”，可以查看学生预约实验的情况，也有权利确认符合预约身份的学生，并根据预约的情况安排实验。除了这些，还可以进入论坛，与学生进行交流，解答学生反馈的意见和建议。这样师生的交流就不受时间和空间的限制。在网络已经成为重要交流工具的今天，这个网络系统打开了老师和学生沟通的门户。

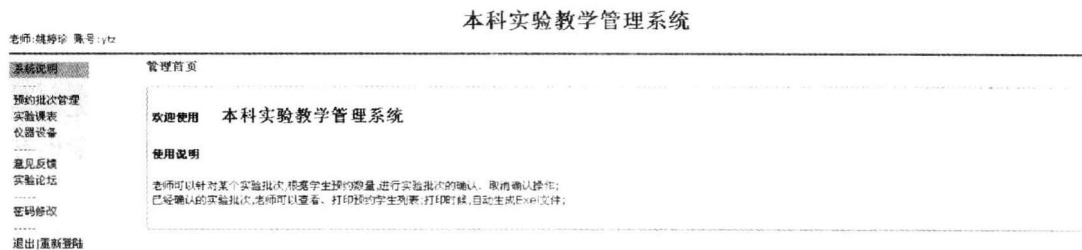


图 1-3 以教师角色登录后的界面

管理员是本系统中权限最大的角色，图 1-4 是以管理员角色登录后的界面，图 1-4 左边部分是角色的权限，登录后除了可以进行学期管理、实验项目管理及实验项目批次管理外，还可以对能够注册的老师、学生进行管理。老师的信息、学生的信息、实验信息和资料都是可以通过管理员改变的，可以根据不同的学期、不同的人员、不同的实验内容将资料上传，上传之后教师和学生就可以下载、查阅，实现资料的共享。

借助网络管理平台，将计算机网络技术与本科实验教学相结合，使教学资源得以共享，

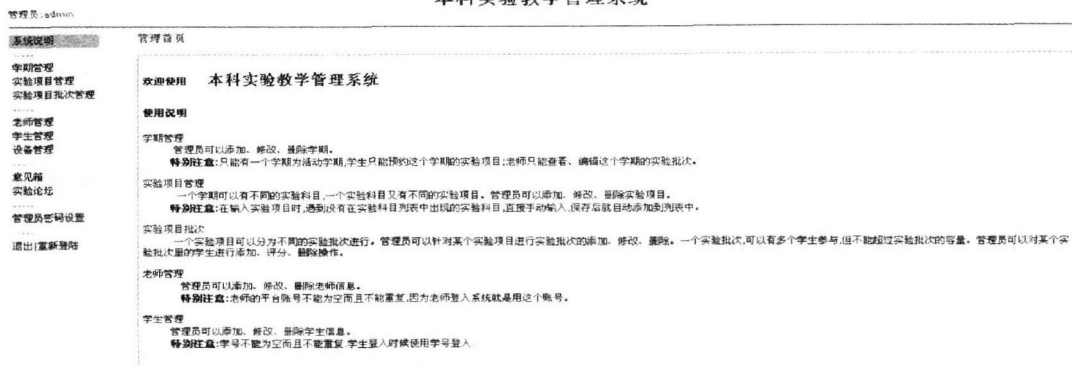


图 1-4 以管理员身份登录的界面

资源不仅来源于实验指导教师,还有任课老师和同学,所有有关的资料都可以借助网络平台共享,实验教师的工作还可以接受大家的监督,增加了师生的交流,有利于实验教学工作的开展和改进。

随着学校规模和学生人数的扩大,实践教学环节中对学生和设备管理的难度加大,要保证实践教学质量,做到因材施教、个性化教育、开放教育,对实验教学过程提出了更加苛刻的要求。网络教学、网络管理已经逐步渗入到教学的各个环节,能够借助网络平台进行仪器设备和实验教学过程的管理,将使实验分组、预习检查、实验报告提交、成绩评定等繁杂的琐事都在网上进行,无疑对实验教学是一个很大的改进。以预习检查为例进行说明,实验预习情况在平时的实验教学中很难掌握,实验前根本没有时间一一确认每个学生的预习情况,就是检查出某些学生没有预习或预习得不好,也不能临时更改实验时间和分组情况。借助网络进行实验预约时,可以以简单问题的形式检查预习情况,问题不能基本答对的就不能进行预约。每批次的实验人数可以进行控制,预约人数已经达到了实验室的容纳量,就不能进行预约,等本批次实验进行完了,才可以重新预约。在实验之前,学生已经通过网络了解了实验设备的性能和原理及实验要求,带着要解决的问题进入实验室,实验就可以更顺利地进行。在实验环节中老师的地位由原来的主导地位(指导、准备)变为从属地位(监督),能更大地发挥学生的主观能动性,提高实践能力和创新能力。

利用网络平台进行实验教学改革的尝试,既是顺应现代化技术对人才培养的要求,又符合现代教育适应个性发展的要求。一直以来,老师是教学的主导,学生是知识被动的承受体,随着教育事业的开放和学生主体意识的加强,如何让老师的主导地位变为从属的引导地位,是现代教育面临的一个大问题。实验教学在培养学生的动手能力和自主创新能力方面非常重要,能借助网络平台,培养学生的自主创新意识,使被动的学习变为主动的探索,并进而提高科研能力,无疑是一个值得探索的方向。

第二章 材料基础实验

实验1 Pb-Sn 二元相图的测定

一、实验目的

- (1) 学会用热分析法测定金属与合金的临界点，并根据临界点绘出二元合金相图。
- (2) 了解热分析法的测量技术与热电偶测量温度的方法。

二、实验内容

本实验用热分析法测定 Pb-Sn 二元金属体系的相图。实验中用热电偶作测温元件，通过保温电炉来控制体系的冷却速度。

三、实验原理

1. 相图及其测定

相图是多相体系处于相平衡状态时体系的某物理性质(如温度)对体系的某一自变量(如组成)作图所得的图形，图中能反映出相平衡的情况(相对数目及性质等)，故称为相图。二元或多元体系的相图常以组成为自变量，物理性质则大多取温度。由于相图能反映出多相平衡体系在不同自变量条件下的相平衡情况，因此，研究多相体系的性质以及多相体系相平衡情况的变化，都要用到相图。

到目前为止，几乎所有的相图都是通过实验测定出来的。金属及合金的状态发生变化将引起其性质发生变化，例如液体金属结晶或固态相变时将会产生热效应，合金相变时其电阻、体积、磁性等物理性质亦会发生变化。金属及合金发生相变时(包括液体结晶和固态相变)引起其某种性质变化所对应的温度称为临界温度，又称临界点。因此可以通过测定金属及合金的性质来求出其临界点。把这些临界点标注在以温度为纵坐标、成分为横坐标的图上，然后把各个相同意义的临界点连接成线，就构成了完整的相图。可见，相图的建立过程就是金属与合金临界点的测定过程。

测定金属与合金临界点的方法很多，如热分析法、热膨胀法、电阻测定法、显微分析法、磁性测定法、X 射线分析法等，但其中最常用、最基本的方法是热分析法。

热分析法是通过测量、记录金属或合金在缓慢加热或冷却过程中温度随时间的变化来确定其临界点。测定时将金属自高温缓慢地冷却，在冷却过程中每隔相等时间测量、记录一次温度，由此得到温度与时间的关系曲线，称为冷却曲线。

金属或合金在缓慢冷却过程中，当没有发生相变时，温度随时间增加而均匀地降低；一旦发生了某种转变，则由于有热效应产生，冷却曲线上就会出现转折，该转折点所对应的温度就是所求的临界点。因此，测出冷却曲线就可很容易地确定相变临界点。图 2-1 就是根据测定的一组冷却曲线建立相图的实例。

由于合金凝固时的结晶潜热较大，结晶时冷却曲线上的转折比较明显，因此常用热分析法来测合金的结晶温度，即测液相线、固相线。实际在相图的测定中，通常是几种方法配合使用以保证测试的精度。

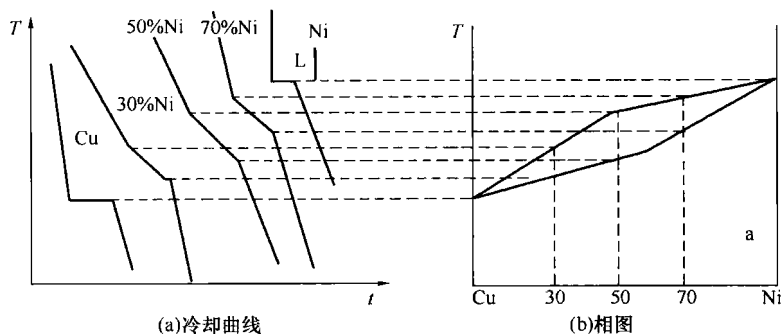


图 2-1 用热分析法建立 Cu - Ni 相图

2. 热电偶的测温原理

热电偶是由两种不同金属丝所组成，这两种金属丝一端被焊接在一起形成热接点，而未焊接的一端是冷接点（又称自由端），一般用补偿导线连接在电位差计（或温控器）上。若将热接点加热，则电路中就会产生热电势，它的数值可由电位差计测定。热接点的温度愈高，热电势就愈大，电位差计指针所指的数值也就愈大。

在两端相联的热电偶中所产生的热电势，可由下式决定：

$$E_{(t_1, t_0)} = E_{(t_1)} - E_{(t_0)} \quad (2-1)$$

式中， $E(t_1)$ 为热接点的热电势，其数值由热接点的温度 t_1 而定； $E(t_0)$ 为冷接点的热电势，其数值由冷接点的温度 t_0 而定。

当 t_0 为常数，例如 0°C 时， $E(t_1, t_0) = E(t_1)$ 。这时，热电势可直接由热接点的温度（即加热温度）来决定。当冷接点不是 0°C ，而增加为 t'_0 时，由 (2-1) 式可知，因冷接点温度的改变，热电偶所产生的热电势也发生改变。因而，必须对冷接点的温度进行修正。修正可按下式进行，即

$$E_{(t_1, t_0)} = E_{(t_1, t'_0)} + E_{(t'_0, t_0)} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 的实际应用如图 2-2 所示。

例如：设 $t'_0 = 60^\circ\text{C}$ ， $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ，已测知 t_1 温度时热电偶中所产生的热电势为 $E(t_1, 60^\circ\text{C}) = 31\text{mV}$ ，求 $E(t_1, 0^\circ\text{C})$ 。此时，若应用图 2-2 所示的热电偶特性曲线，必须先求出冷接点温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 时的热电势数值：

$$E(t_1, 0^\circ\text{C}) = E(t_1, 60^\circ\text{C}) + E(60^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C})$$

由图 2-2 可查出 $E(60^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 4.03\text{mV}$ ，所以

$$E(t_1, 0^\circ\text{C}) = 31 + 4.03 = 35.03\text{mV}$$

根据图 2-2 中所示曲线， 35.03mV 的热电势相当于热接点的温度为 441°C 。

热电偶有很多类型，常用的热电偶如表 2-1 所示。

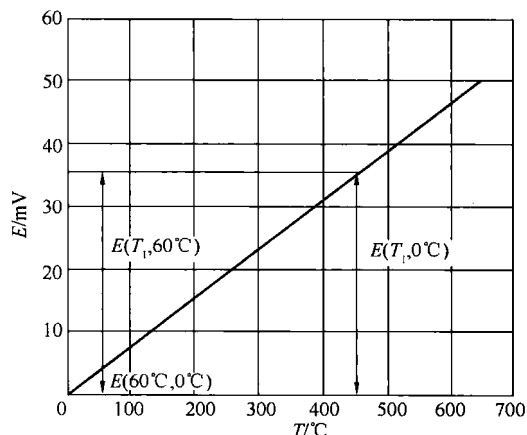


图 2-2 用图解法对冷接点温度进行修正

表 2-1 常用的热电偶

热电偶的种类	热电偶的化学成分 /%	热电偶导线直径 /mm	测温的上限温度/℃	
			短期工作	长期工作
铜-康铜	100% Cu 及 60% Cu + 40% Ni	0.5 ~ 3	500	400
铁-康铜	100% Fe 及 60% Cu + 40% Ni	0.5 ~ 4	800	600
镍铬-镍铝	89% Ni + 10% Cr + 1% Fe 及 95% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si	1.0 ~ 5.0	1100	950
铂铑-铂	90% Pt + 10% Rh 及 100% Pt	0.3 ~ 0.5	1600	1300

注：热电偶中前一种金属或合金为正极。

四、实验材料及设备

(1) 被测样品 铅、锡及其合金共 5 种(纯 Pb、30% Sn70% Pb、62% Sn38% Pb、80% Sn20% Pb、纯 Sn)。

(2) 实验设备 立式加热保温坩埚炉 10 台(炉内坩埚盛放被测样品)、镍铬-镍硅($\Phi 7 \times 220\text{mm}$)热电偶 10 支、XMZ101 型数显指示仪 10 个。

五、实验方法和步骤

(1) 全班同学分为 2 个大组共 10 个小组(每小组 2~3 人)，每小组作出一种成分合金的冷却曲线。试验时，各组将合金放在坩埚电炉中加热，待合金熔化后，将热电偶连同保护瓷套管插入金属液中，热电偶的工作端应位于金属液中部，不要靠近坩埚壁、坩埚底或金属液面。热电偶的自由端用补偿导线直接接到数显指示仪上(但此时应考虑自由端的温度补偿问题，即 $t'_0 = 20^\circ\text{C}$)。

(2) 加热升温至金属与合金熔点以上 20°C 左右，然后关闭电源(坩埚炉断电后仍能升温 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 以上)，为防止金属氧化，应在熔化的金属液面上覆盖一层木炭粉或石墨粉。

(3) 当合金开始冷却时，若用人工测温，则需每隔 1min 记录 1 次数显指示仪的读数，在临界点附近，也可以每隔 0.5min 作一次记录。

(4) 根据所得数据，以温度-时间为坐标系作出冷却曲线，根据冷却曲线确定临界点；以每大组为单位依据各小组所测得的临界点，建立 Pb-Sn 二元合金相图。

六、实验报告要求

(1) 每小组将所选定的合金在冷却过程中温度随时间的变化数据记录于表 2-2 中。

表 2-2 单组份合金在冷却过程中温度随时间的变化记录

读次	温度/℃	读次	温度/℃	读次	温度/℃	读次	温度/℃	读次	温度/℃

(2) 根据表 2-2 记录的数据，用方格纸绘出所测合金的冷却曲线，并注明合金成分，

确定发生转折和停顿时的临界点，将其温度值填入表 2-3 中。

表 2-3 临界点的温度值

样 品	Pb	30% Sn70% Pb	62% Sn38% Pb	80% Sn20% Pb	Sn
开始析晶/℃					
全部凝固/℃					

(3) 根据各种成分合金的临界点，按比例绘出 Pb-Sn 二元合金相图。

(4) 对实验结果进行分析和总结。

七、思考题

(1) 样品在冷却过程中会出现过冷现象，其原因是什么？

(2) 为什么样品在冷却过程中又会出现温度回升现象？

实验 2 金相试样的制备

一、实验目的

(1) 学会金相试样的制备方法。

(2) 熟悉常用化学浸蚀试剂及其使用方法。

二、实验内容

按照金相试样的制备方法，每人制备出碳钢金相试样一块，用金相显微镜观察自己制备的试样，要求试样在显微镜下观察应没有磨痕且组织清晰。

三、实验原理

要对金属材料的显微组织进行观察，首先就必须制备金相试样。一般金相试样的制备过程包括取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等步骤。

1. 取样

取样时应根据零件的特点及检验目的分别选取具有代表性的部位。例如，分析机械零件失效原因时应在破坏最严重处和远离破裂处分别切取，从而有利于观察显微组织的变化，分析失效的原因。研究铸件组织时，由于组织的不均匀性，应从表层到中心同时切取几个试样，分析各个部位显微组织的差异，了解结晶组织的变化。研究退火处理的机械零件时，由于其内部组织比较均匀，可切取任意截面试样进行分析。

切取试样时，应小心操作，不得因加工过热而改变其组织。取样的常用方法有：锯、车、刨、气割、砂轮切割和线切割等。试样的大小视具体情况而定，以便于握持、易于磨制为准。通常方形试样的边长为 12~15mm，圆柱形试样尺寸为 $\phi(12 \sim 15) \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ，如图 2-3 所示。

2. 镶嵌

对于细小和形状特殊的试样(如丝、带、片等)，不利于磨制和抛光时，须将其镶嵌在塑料及低熔点的合金中或用专用夹具夹持，以便进行磨制和抛光操作。

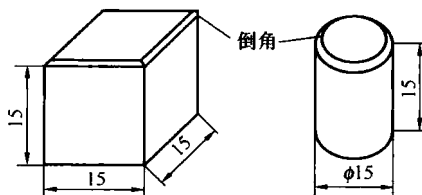


图 2-3 金相试样的尺寸

镶样多采用热压镶样法和机械镶样法。热压镶样法是将试样放在电木粉或塑料粒中加热至 110 ~ 150℃ 左右，在镶样机中热压完成。机械镶样法的优点是使用专门的夹具夹持试样以克服热压对试样组织产生的影响。

3. 磨制

磨制试样是为了得到平整的磨面，为抛光做准备。磨制分为粗磨和细磨。

(1) 粗磨 用锉刀、砂轮或粗砂纸将试样表面磨平、修整成平整合适的形状，不做表面层金相检验的试样应倒角，以免抛光时撕裂抛光布。注意磨制时应不断用冷却液进行冷却以免试样表面过分发热而引起内部组织变化。

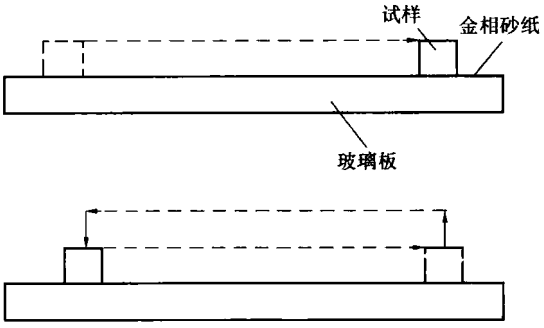


图 2-4 金相试样磨制示意图

(2) 细磨 试样的细磨一般在由粗到细的金相砂纸上进行，细磨的目的是为了消除粗磨过程中产生较粗、较深的磨痕，为抛光做好准备。手工操作时应注意将砂纸平铺在玻璃板上，一手将砂纸按住，一手将试样轻压在砂纸上，向一个方向推进，如图 2-4 所示。细磨时，从粗砂纸到细砂纸依次进行（金相砂纸标号依次为 W50、W28、W14、W10、W5 五级）；每更换一次砂纸，试样须转 90° 与前次磨制方向垂直并保持一个方向

磨至旧磨痕完全消失、新磨痕均匀一致时为止；每次磨制后更换新砂纸前、试样必须用清水冲洗，以免将上一道工序的粗沙砾带到细砂纸上而形成深的划痕。磨削时不可用力过重，否则容易产生过深的划痕。

4. 抛光

细磨后的试样用水冲洗后就可进行抛光。抛光的目的是去除试样磨面上经细磨所产生的均匀而细微的划痕，使检验面呈光亮的镜面。

机械抛光在金相试样抛光机上进行，抛光机的电动机带动抛光盘高速旋转。抛光时要握紧试样，将被磨面轻压在旋转的抛光盘上，用力要轻，并应使试样沿着抛光盘半径方向上来回移动，要不断地在抛光盘上加抛光液（抛光液是微粒磨料加水而成的悬浮液），抛光时间不宜太长，到划痕完全消失为止。抛光后的试样表面用水冲洗干净，浸以酒精备用。

不论采用何种方法切取的试样，经粗磨、细磨、抛光后加工影响面（损伤层）逐渐消除，得到平整光滑的磨面，其磨痕变化如图 2-5 所示。

抛光好的磨面如镜面，在低倍显微镜下观察应没有明显的刻痕和蚀坑，这时就可以进行浸蚀了。

5. 浸蚀

抛光后的试样在金相显微镜下观察，只能看到光亮的表面及某些非金属夹杂物。要想观察金属的显微组织，则必须用浸蚀剂浸蚀试样表面。最常用的浸蚀方法是化学浸蚀法，常用化学浸蚀剂如表 2-4 所示。浸蚀时可用棉花蘸上浸蚀剂在磨面上轻轻擦试，或将磨面完全浸入浸蚀剂中。浸蚀时间一般由浸蚀剂浓度及金属材料本身而定。若选 45 钢试样，则浸蚀剂选用 4% 的硝酸酒精溶液，浸蚀的时间约为 8 ~ 15s（浸蚀时

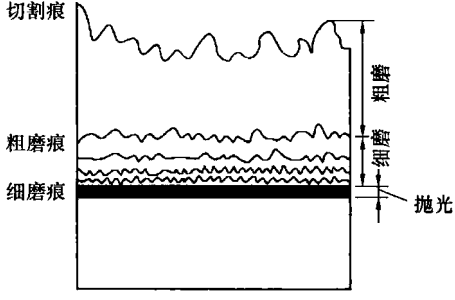


图 2-5 试样表面磨痕变化示意图

间与浸蚀剂浓度有很大关系)。若浸蚀不足可继续浸蚀;但浸蚀过度则需重新抛光。

对于不同的材料,可选用不同的浸蚀剂,其选用可查相关手册。

表 2-4 常用化学浸蚀试剂

浸蚀试剂名称	成 分	浸蚀条件	适用范围
1. 硝酸酒精溶液	HNO_3 (1.42g/ml) 2~5ml 乙醇 100ml	浸蚀几秒~1min	浸蚀铸铁、碳钢及低合金钢组织
2. 苦味酸酒精溶液	苦味酸 5g 乙醇 100ml	同上	同上
3. 碱性苦味酸溶液	NaOH 25g 苦味酸 5g H_2O 100g	加热到 100℃ 使用,浸蚀 5~25min	显示钢中的碳化物,碳化物被污成黑色
4. 混合酸甘油溶液	HNO_3 (1.42g/ml) 10ml HCl (1.19g/ml) 20~30ml 甘油 30~20ml	用时稍加热	显示高速钢、高锰钢、镍铬合金等组织
5. 氯化铁盐酸水溶液	FeCl_3 5g HCl (1.19g/ml) 50ml H_2O 100ml	浸蚀 1~2min	显示奥氏体镍钢及不锈钢组织
6. 硫酸铜盐酸水溶液	CuSO_4 4g HCl (1.19g/ml) 50g H_2O 20ml	用时稍加热	显示不锈钢组织
7. 氯化铁盐酸水溶液	FeCl_3 5g HCl (1.19g/ml) 50ml H_2O 100ml	揩试法浸蚀	铜、黄铜、青铜、磷青铜
8. 氢氟酸盐酸水溶液	HF 10ml HCl 15ml H_2O 90ml	浸蚀 1~2s	铝及铝合金
9. 草酸溶液	草酸 2g H_2O 98ml	揩试法浸蚀 1~2s	显示铸造及形变后镁合金组织

对于纯金属或单相合金而言,浸蚀仍是一个纯化学溶解过程。由于晶界处缺陷和杂质较多,原子排列混乱且具有较高的自由能,易被浸蚀而呈凹陷;同时每个晶粒中原子排列的位向不同,各自的溶解速度也各不相同,致使被浸蚀的深浅程度也有区别。因此在显微镜下观察时,反射光线变化较大:晶界处的反射光线发生散射没有进入显微镜物镜而呈黑色;晶粒未被浸蚀,反射光线垂直进入显微镜物镜故呈白亮色。所以,在显微镜下观察到黑色的晶界和白色(各晶粒之间略有差异)的晶粒,如图 2-6 所示。

对于两相以上的合金组织,浸蚀主要是一个电化学腐蚀过程。由于各组成相的成分不同,具有不同的电极电位,当试样浸入具有电解液作用的浸蚀剂时,就在两相之间形成无数对“微电池”:具有负电位的组成相成为阳极,它被迅速腐蚀而呈凹洼;具有正电位的另一组成相成为阴极,在正常的电化学作用下不受浸蚀而保持原有的光滑表面。当入射光线照射到凹凸不平的试样

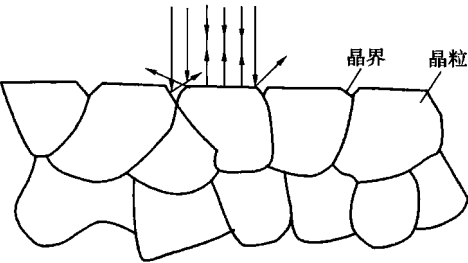


图 2-6 纯金属的化学浸蚀