

教育部高等学校材料科学与工程
教学指导委员会推荐用书

金属材料科学与工程 实验教程

主 编 潘清林
副主编 黄继武 薛松柏
主 审 汪明朴

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属材料科学与工程实验教程/潘清林主编. —长沙:
中南大学出版社,2006.9
ISBN 7-81105-438-8

I. 金... II. 潘... III. 金属材料—材料科学—教材
IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 112281 号

金属材料科学与工程实验教程

主编 潘清林

☐责任编辑 周兴武
☐责任印制 汤庶平
☐出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
☐印 装 湖南华商文化商务有限公司

☐开 本 730×960 1/16 ☐印张 17.5 ☐字数 317 千字
☐版 次 2006 年 9 月第 1 版 ☐2006 年 9 月第 1 次印刷
☐书 号 ISBN 7-81105-438-8/TO• 013
☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 简 介

本实验教材以材料类专业典型的共性实验为基础,主要包括金属学(材料科学基础)、金属材料及热处理、金属塑性加工原理与技术、材料力学性能与物理性能、金属 X 射线衍射及电子显微分析(材料近代分析测试方法)、有色金属熔炼与铸造、金属腐蚀与防护等专业主干课程的 56 个实验。实验内容主要涉及以全面提高学生实验技能为主的常规基础实验,按照金属材料熔铸、塑性加工与热处理实验,金属材料力学性能、物理性能及腐蚀与防护实验,金属材料近代测试方法及微观组织分析实验进行分模块排序。另一方面,根据学科专业发展的需要,还特意编写了以培养学生实验研究能力、创新能力为目的的“三性”实验,即综合性、设计性与研究创新性实验。每个实验既介绍了实验目的、基本原理与实验内容,又说明了实验仪器设备、实验步骤与方法,同时提出了对实验报告的要求,旨在为材料类系列专业课程的实验教学提供指导。

本教材可作为高等院校材料类专业如材料学、材料加工工程、材料物理、材料化学及其他相关专业的本科生系列课程实验教学用书,也可供有关教师、研究生和工程技术人员参考。

前言

实验教学是实现素质教育和创新人才培养的重要环节,对培养学生实验技能、创新能力和综合研究能力有着不可替代的作用。材料科学与工程类专业要求培养的学生既有深厚的基础理论知识,又具备多方面的实验研究能力,因而实验教学越来越受到重视。传统的实验教学分别属于十几门专业课程,不仅相互联系不够密切,而且实验内容有部分重复。为了使实验教学与专业课程教学紧密联系,同时又具有相对的独立性和针对性,并能满足现代开放实验室对实验教学的要求,我们编写了本书。

本实验教程以材料类专业典型的共性实验为基础,主要包括金属学(材料科学基础)、金属材料及热处理、金属塑性加工原理与技术、材料力学性能与物理性能、金属 X 射线衍射及电子显微分析(材料近代分析测试方法)、有色金属熔炼与铸造、金属腐蚀与防护等专业主干课程的实验。在实验内容的选择上,我们尽可能安排以全面提高学生实验技能为主的常规基础实验,并按照金属材料的熔铸、塑性加工与热处理实验,金属材料力学性能、物理性能及腐蚀与防护实验、金属材料近代测试方法及微观组织分析实验进行分模块排序,以实现内容编写的系统性和科学性。另一方面,根据学科专业发展的需要,还特意编写了主要以培养学生综合实验研究能力、创新能力为目的的“三性”实验,即综合性、设计性与研究创新性实验。

本实验教程的主要特点是:第一,根据材料学科发展的最新动态和各专业实验教学的要求,坚持面向一级学科,拓宽专业面,加强常规的基础实验。注重协调材料科学与工程一级学科中材料学、材料加工工程、材料物理与化学三个二级学科专业共性与个性的关系,实现同一学科多专业知识的交叉与渗透,满足培养宽口径材料人才的需要。第二,注重实验教材体系新结构的探索。在实验内容的编排上,尽可能安排以全面提高学生实验技能为主的常规基础实验,同时又根据学科专业发展的需要,特意编写了以提高综合研究能力、创新能力为主的“三性”实验。第三,本实验教程吸取了国内同类实验教材的精华,实验内容深度与广度适中,既增强了该实验教材的适用性和针对性,又把握了该教材的科学性和系统性。

本书所列实验共 56 个。每个实验的指导书由实验目的、实验原理、实验设

备及材料、实验步骤与方法、实验内容以及实验报告要求等组成。学生在具体实验时根据条件,可以有选择地完成部分内容。建议采用如下的实验教学方法:

1. 常规的基础实验部分可根据各专业方向,按照专业教学大纲和教材系列选择相关内容,每节可选做2~4个实验,其他实验可由学生自学或选做。

2. 实验重点应放在材料制备工艺技术、性能测试分析、微观组织观察与分析上。“三性”实验按组进行,采用轮换或每人做一部分,然后集中讨论分析实验结果的形式共同完成。

3. 实行实验室开放制度,鼓励学生自选实验教材内容或自行设计实验,解决实验教学内容与实验时间的矛盾。

本书由中南大学潘清林教授任主编,中南大学黄继武高级实验师和南京航空航天大学薛松柏教授任副主编。参加编写的有中南大学潘清林(实验7~12, 20~21, 52),黄继武(实验24~26, 45~49, 53),徐国富(实验33~34, 37~39, 42~44),曹显良(实验1~4),王德志(实验5~6),李世晨(实验40~41),梁英(实验30~32),伍汰沙(实验22~23),孟力平(实验54~55),何运斌(实验50~51),梁文杰(实验27~29);南京航空航天大学薛松柏(实验13~17),向定汉(实验18~19, 56),王蕾(实验35~36)。何运斌博士对本书的图表进行了校对。全书由汪明朴教授主审。

本书在编写过程中,参考了中南大学材料科学与工程学院所使用的实验指导书、兄弟院校的实验教材以及相关著作和论文,尹志民、易丹青、汪明朴、王德志四位教授对本书的初稿提出了宝贵的修改意见,本书的出版得到了中南大学教务处和材料科学与工程学院的大力支持,谨此一并深表谢意。

由于编者水平有限,实践经验不足,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2006年7月于中南大学

目 录

第一章 金属材料熔铸、塑性加工与热处理实验	(1)
第一节 金属材料熔铸实验	(1)
实验 1 铝合金的熔炼与铸造	(1)
实验 2 铜合金的熔炼与铸造	(6)
实验 3 铝硅合金的晶粒细化与组织变质处理	(10)
实验 4 铸造工艺对金属铸锭组织的影响	(13)
第二节 金属材料塑性加工实验	(17)
实验 5 金属塑性变形基本特点的观察	(17)
实验 6 平辊轧制前滑值的测定	(21)
实验 7 最大咬入角及摩擦系数的测定	(24)
实验 8 金属室温压缩的塑性及其流动规律	(27)
实验 9 挤压变形力变化规律与金属流动	(30)
实验 10 拉拔的安全系数及拉伸力的测量	(32)
第三节 金属材料热处理实验	(35)
实验 11 不同淬火温度对铝合金时效效果的影响	(35)
实验 12 铝合金时效硬化曲线的测定	(39)
实验 13 钢的普通热处理	(44)
实验 14 渗碳及渗碳层厚度的测定	(48)
实验 15 钢的淬透性测定	(52)
实验 16 热处理后碳钢显微组织的观察与分析	(55)
第二章 金属材料力学性能、物理性能及腐蚀与防护实验	(60)

第一节 金属材料力学性能实验	(60)
实验 17 金属室温拉伸力学性能的测定	(60)
实验 18 金属材料硬度测定	(67)
实验 19 金属缺口试样冲击韧性的测定	(74)
实验 20 金属平面应变断裂韧度 K_{Ic} 测定	(78)
实验 21 金属疲劳试验	(84)
第二节 金属材料物理性能实验	(93)
实验 22 差热分析实验	(93)
实验 23 金属材料热膨胀系数的测定	(97)
实验 24 双电桥法测量金属及合金的电阻	(102)
实验 25 磁性材料的直流磁特性测量	(107)
实验 26 共振法测量金属及合金的弹性模量	(112)
第三节 金属腐蚀与防护实验	(118)
实验 27 盐雾腐蚀实验	(118)
实验 28 线性极化法测定金属的腐蚀速度	(122)
实验 29 重量法测定金属的腐蚀速度	(126)
实验 30 极化曲线的测定与分析	(130)
实验 31 铝的阳极氧化与着色	(133)
实验 32 铝及铝合金氧化膜的封闭处理	(136)

第三章 金属材料近代测试方法及微观组织分析实验

(139)

第一节 金相显微分析实验	(139)
实验 33 金相显微镜的成像原理、构造与使用	(139)
实验 34 金相样品的制备与显微组织的显示	(151)
实验 35 二元和三元合金显微组织观察与分析	(158)
实验 36 铁碳合金平衡组织的观察与分析	(166)
实验 37 普通铸铁显微组织的观察与分析	(171)
实验 38 晶粒尺寸的测定及评级方法	(174)
实验 39 金属塑性变形与再结晶组织的观察与分析	(178)

第二节 电子显微分析实验	(182)
实验 40 透射电镜的结构、成像原理及操作	(182)
实验 41 金属薄膜样品的制备及典型组织的观察	(190)
实验 42 扫描电镜的结构、工作原理及操作	(199)
实验 43 扫描电镜成分衬度像及高倍组织观察	(207)
实验 44 能谱仪的结构、原理及其使用	(210)
第三节 X 射线衍射分析实验	(219)
实验 45 X 射线衍射技术及物相定性分析	(219)
实验 46 物相定量分析	(223)
实验 47 点阵常数的精确测量	(226)
实验 48 微观应力与亚晶尺寸的测量	(229)
实验 49 材料表面残余应力的测量	(231)
第四章 综合性、设计性与研究创新性实验	(235)
第一节 综合性实验	(235)
实验 50 热处理综合实验	(235)
实验 51 力学性能综合实验	(238)
实验 52 常用金属材料的显微组织观察与分析	(243)
实验 53 X 射线衍射技术在金属材料研究中的应用	(255)
第二节 设计性与研究创新性实验	(257)
实验 54 热膨胀法测定钢的连续冷却转变图	(257)
实验 55 动态热 - 力学模拟试验测定金属的高温力学性能	(261)
实验 56 金属压缩过程中摩擦系数的测定及数值模拟	(264)
参考文献	(268)

第一章 金属材料熔铸、塑性加工与热处理实验

第一节 金属材料熔铸实验

实验1 铝合金的熔炼与铸造

一、实验目的

1. 掌握铝合金熔炼与铸造的基本操作和方法。
2. 熟悉铝合金的配料比及其计算方法。

二、实验原理概述

铝合金的熔炼和铸造是铝合金生产过程中首要的、必不可少的组成部分。对于变形铝合金，熔铸不仅给后续压力加工生产提供所必需的铸锭，而且铸锭质量在很大程度上影响着加工过程的工艺性能和产品质量。铝合金熔铸的主要任务就是提供符合加工要求的优质铸锭。

1. 合金元素在铝中的溶解

合金添加元素在熔融铝中的溶解是合金化的重要过程。元素的溶解与其性质有着密切的关系，受添加元素固态结构结合力的破坏和原子在铝液中的扩散速度控制。元素在铝液中的溶解作用可用合金元素与铝的合金系相图来确定，通常与铝形成易熔共晶的元素易溶解；与铝形成包晶转变的，特别是熔点相差很大的元素难于溶解。如 Al - Mg、Al - Zn、Al - Cu、Al - Li 等为共晶型合金系，其熔点也比较接近，合金元素较容易溶解，在熔炼过程可直接添加到铝熔体中；但 Al - Si、Al - Fe、Al - Be 等合金系虽也存在共晶反应，由于熔点相差很大，溶解得很慢，需要较大的过热才能完全溶解；Al - Ti、Al - Zr、Al - Nb 等合金系具有包晶型相图，都属难熔金属元素，在铝中的溶解很困难，为了使其在铝中尽快溶解，必须以中间合金形式加入。

2. 铝合金熔体的净化

(1) 熔体净化的目的：铝合金在熔炼过程中，熔体中存在气体、各种夹杂物及其他金属杂质等，往往使铸锭产生气泡、气孔、夹杂、疏松、裂纹等缺陷，对铸锭的加工性能及制品强度、塑性、抗蚀性、阳极氧化性和外观品质有显著影响。熔体净化就是利用物理化学原理和相应的工艺措施，除去液态金属中的气体、夹杂和有害元素，以便获得纯净金属熔体的工艺方法。根据合金的品种和用途不同，对熔体纯净度的要求有一定的差异，通常从氧含量、非金属夹杂和钠含量等几个方面来控制。

(2) 熔体净化方法：熔体净化方法包括传统的炉内精炼和后来发展的炉外净化。铝合金熔体净化方法按其作用原理可分为吸附净化和非吸附净化两种基本类型。吸附净化是指通过铝熔体直接与吸附体（如各种气体、液体、固体精炼剂及过滤介质）相接触，使吸附剂与熔体中的气体和固体氧化夹杂物发生物理化学的、物理的或机械的作用，达到除气、除杂的目的。属于吸附净化的方法有吹气法、过滤法、熔剂法等。非吸附净化是指不依靠向熔体中加吸附剂，而是通过某种物理作用（如真空、超声波、密度差等），改变金属-气体系统或金属-夹杂物系统的平衡状态，从而使气体和固体夹杂物从铝熔体中分离出来。属于非吸附净化方法有静置处理、真空处理、超声波处理等。

3. 铝合金铸坯成型

铸坯成型是将金属液铸成形状、尺寸、成分和质量符合要求的锭坯。一般而言，铸锭应满足下列要求：

(1) 铸锭形状和尺寸必须符合压力加工的要求，以避免增加工艺废品和边角废料；

(2) 坯料内外不应该有气孔、缩孔、夹渣、裂纹及明显偏析等缺陷，表面光滑平整；

(3) 坯锭的化学成分符合要求，结晶组织基本均匀。

铸锭成型方法目前广泛应用的有块式铁模铸锭法、直接水冷半连续铸锭法和连续铸轧法等。

三、实验设备及材料

1. 熔炼炉及准备

(1) 铝合金熔炼可在电阻炉、感应炉、油炉、燃气炉中进行，易偏析的中间合金在感应炉熔炼为好，而易氧化的合金在电阻炉中熔化为宜，本实验采用 SG-5-10 井式坩埚电阻炉。

(2) 铝合金熔炼一般采用铸铁坩埚、石墨黏土坩埚、石墨坩埚，也可采用

铸钢坩埚。本实验采用石墨黏土坩埚。

(3)新坩埚使用前应清理干净及仔细检查有无穿透性缺陷，坩埚要烘干、烘透才能使用。

(4)浇铸铁模及熔炼工具使用前必须除尽残余金属及氧化皮等污物，经过200℃～300℃预热并涂以防护涂料。涂料一般采用氧化锌和水或水玻璃调合。

(5)涂完涂料后的模具及熔炼工具使用前再经200℃～300℃预热烘干。

2. 实验材料

(1)配制合金的原材料见表1-1。

表 1-1 配制铝合金的原材料

材料名称	材料牌号	用 途
铝锭	Al99.7	配制铝合金
镁锭	Mg99.80	配制铝合金
锌锭	Zn-3 以上	配制铝合金
电解铜	Cu-1	配制 Al-Cu 中间合金
金属铬	JCr1	配制 Al-Cr 中间合金
电解金属锰	DJMn99.7	配制 Al-Mn 中间合金

(2) 配制 Al-Cu、Al-Mn、Al-Cr 中间合金时，先将铝锭熔化并过热，再加入合金元素，实验中主要采用的中间合金见表1-2。

表 1-2 实验所采用的中间合金

中间合金名称	组元成分范围/%	熔点/℃	特性
Al-Cu 中间合金锭	48～52 Cu	575～600	脆
Al-Mn 中间合金锭	9～11 Mn	780～800	不脆
Al-Cr 中间合金锭	2～4 Cr	750～820	不脆

3. 熔剂及配比

铝合金常用熔剂包括覆盖剂、精炼剂和打渣剂，主要由碱金属或碱土金属的氯盐和氟盐组成。本实验采用50% NaCl + 40% KCl + 6% Na₃AlF₆ + 4% CaF₂混合物覆盖，用六氯乙烷(C₂Cl₆)除气精炼。

4. 合金的配料

配料包括确定计算成分，炉料的计算是决定产品质量和成本的主要环节。配料的首要任务是根据熔炼合金的化学成分，加工和使用性能确定其计算成分，其次是根据原材料情况及化学成分，合理选择配料比。最后根据铸锭规格尺寸和熔炉容量，按照一定程序正确计算出每炉的全部料量。

配料计算：根据材料的加工和使用性能的要求，确定各种炉料品种及配比。

(1) 熔炼合金时首先要按照该合金的化学成分进行配料计算，一般采用国标的算术平均值。

(2) 对于易氧化、易挥发的元素，如 Mg、Zn 等一般取国标标准的上限或偏上限计算成分。

(3) 在保证材料性能的前提下，参考铸锭及加工工艺条件，应合理充分利用旧料。

(4) 确定烧损率。合金易氧化、易挥发的元素在配料计算时要考虑烧损。

(5) 为了防止铸锭开裂，硅和铁的含量有一定的比例关系，必须严格控制。

(6) 根据坩埚大小和模具尺寸要求配料的质量。

根据实验的具体情况，配置两种高强高韧铝合金：

①2024 铝合金：Cu 3.8% ~ 4.9% , Mg 1.2% ~ 1.8% , Mn 0.3% ~ 0.9% , 余 Al。

②7075 铝合金：Zn 5.1% ~ 6.1% , Mg 2.1% ~ 2.9% , Cu 1.2% ~ 2.0% , Cr 0.18% ~ 0.28% , 余 Al。

在实验中，根据实验要求具体情况来配料，如熔铸 2024 (Al - 4.4Cu - 1.5Mg - 0.6Mn) 铝合金，根据模具大小需要配制合金 1000g。配料计算如下：

Cu 的质量： $1000\text{g} \times 4.4\% = 44\text{g}$ ，铜的烧损量可以忽略不计，采用 Al - 50Cu 中间合金加入，那么需 Al - 50Cu 中间合金： $44\text{g} \div 50\% = 88\text{g}$ 。

Mg 的质量： $1000\text{g} \times 1.5\% = 15\text{g}$ ，镁的烧损按 3% 计算，那么需 Mg 的总重： $15\text{g} \times (1 + 3\%) = 15.6\text{g}$ 。

Mn 的质量： $1000\text{g} \times 0.6\% = 6\text{g}$ ，锰的烧损量可以忽略不计，采用 Al - 10Mn 中间合金加入，那么需 Al - 10Mn 中间合金： $6\text{g} \div 10\% = 60\text{g}$ 。

Al 的质量： $1000\text{g} \times 93.5\% - (44 + 56)\text{g} = 835\text{g}$ 。

四、实验步骤与方法

1. 熔铸工艺流程

原材料准备→预热坩埚至发红→加入纯铝和少量覆盖剂→升温至 $750^{\circ}\text{C} \sim$

760℃待纯铝全部熔化→加中间合金→加覆盖剂→熔毕后充分搅拌→扒渣→加镁→加覆盖剂→精炼除气→扒渣→再加覆盖剂→静置→扒渣→出炉→浇铸

2. 熔铸方法

(1)熔炼时，熔剂需均匀撒入，待纯铝全部熔化后再加入中间合金和其他金属，并压入溶液内，不准露出液面。

(2)炉料熔化过程中，不得搅拌金属。炉料全部熔化后可以充分搅拌，使成分均匀。

(3)铝合金熔体温度控制在 720℃ ~ 760℃。

(4)炉料全部熔化后，在熔炼温度范围内扒渣，扒渣尽量彻底干净，少带金属。

(5)镁的加入在出炉前或精炼前，以确保合金成分。

(6)熔剂要保持干燥，钟罩要事先预热，然后放入熔体内，缓慢移动，进行精炼。精炼要保证一定时间，彻底除气除渣。

(7)精炼后要撒熔剂覆盖，然后静置一定时间，扒渣，出炉浇铸。浇铸时流速要平稳，不要断流，注意补缩。

3. 实验组织和程序

每班分成 6 ~ 8 组，每组 4 ~ 5 人，任选 2024 或 7075 铝合金进行实验。每小组参照上述配料计算方法和熔铸工艺流程，领取相应的原材料进行实验，熔铸出合格的铝合金铸锭。

五、试验报告要求

1. 简述铝合金熔铸基本操作过程。

2. 分析讨论铝合金熔炼过程中除气、除渣的作用及注意事项。

实验2 铜合金的熔炼与铸造

一、实验目的

1. 了解中频感应电炉工作原理和结构。
2. 掌握感应电炉熔炼铜合金基本操作方法。

二、实验原理概述

感应电炉是金属材料的主要熔炼设备之一，它是利用电磁感应和电流热效应原理而进行工作的，即由电磁感应在金属材料内部产生感应电流，感应电流在金属材料中流动时产生热量，使金属材料加热和熔化，这种电炉加热快、温度高，熔炼温度可达 $1600^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，有较强的搅动能力，适于熔炼温度较高且不需造渣熔炼的合金以及中间合金等。

感应电炉熔炼铜合金的主要过程包括装料、熔化、精炼及出炉浇铸等。

1. 装料原则及熔化顺序

(1) 炉料最多的金属应首先入炉进行熔化。炉料较多的金属先熔化，形成金属熔池后再逐渐地加入其他金属元素，这样可以减少金属元素的熔损。

(2) 易氧化、易挥发的合金元素应最后入炉熔化。如熔炼黄铜时要先加铜，铜熔化后再加锌，因为铜的熔点是 1083°C ，而锌的熔点是 417°C ，锌的沸点是 907°C ，熔炼时若先加锌就会造成锌的大量挥发烧损，而熔炼时先加铜，铜熔化后再加锌，锌在铜液中迅速溶解，当合金液达到浇铸温度时，即可出炉浇铸，这样可以减少锌的熔炼烧损。

(3) 合金熔化时放出大量热量的金属，不应单独加入到熔体中，而应与预先留下的基体冷料同时加入。如熔炼铝青铜时，将铝加入到铜液中时会发生放热反应，使铜液剧烈地过热，因此熔炼时应先加 $2/3$ 的铜，熔化后再加铝，并同时加入剩余的 $1/3$ 的铜，这样加铝所放出的热量为后加入的铜所利用，可以避免合金熔体过热。

(4) 两种金属熔点相差较大时，应先加入易熔金属，形成熔体时，再加入难熔金属，利用难熔金属的溶解作用，逐渐溶解于熔体中。如熔炼含铜 80%，含镍 20% 的白铜时，先将铜熔化，并加热至 1300°C 左右，再将镍加入（镍块要小些，容易熔化）熔体中，逐渐熔化。这样缩短熔炼时间，又保证合金成分。

(5) 能够减少熔体大量吸收气体的合金元素，应先入炉熔化。

2. 熔炼时金属的损耗和氧化

熔炼过程中,一些合金元素不可避免地要产生挥发和氧化,造成金属浪费和引起合金化学成分变化,影响金属材料质量。

(1) 金属的挥发主要取决于其蒸气压的高低,在相同的熔炼条件下蒸气压高,金属就易挥发,易烧损,如锌、磷等。

(2) 金属被氧化的程度主要取决于金属的性质。与氧结合能力强的元素容易被氧化,如铝、磷、铜等。金属氧化还与温度有关,熔炼温度越高则氧化烧损越多。

3. 除气精炼

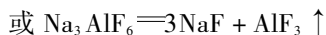
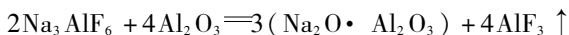
金属的氧化和吸气会使金属材料在熔炼及轧制过程中产生一系列问题。在熔炼过程中熔体中经常含有少量的有害气体和夹渣等,因此精炼任务就是去除熔体中的气体和夹渣。

(1) 气体的去除

熔炼铜合金的除气方法常有:气体除气法、熔剂除气法、沸腾除气法。

① 气体除气法:采用惰性气体,它与金属液不发生作用,不溶解在金属液内,也不与溶解在金属液内的气体作用,如氮气、氩气。惰性气体除气就是将氮气(N_2)用钢管通入到金属液的底部,放出很多气泡,气泡上升时,能将溶解在金属液中的气体带出来。这是因为当氮气泡在金属液中上升时,溶解在金属液中的氢气就会向氮气泡中扩散,随氮气泡的上升而带走。

② 熔剂除气法:熔剂除气是利用熔盐的热分解或与金属进行置换反应产生不溶于熔体的挥发性气泡而将氢除去。如铝青铜用冰晶石(Na_3AlF_6)除气,其反应式为:



反应产物 AlF_3 为气体,起除氢作用,另外两种反应产物为熔渣,通过扒渣除去。由此可见,用熔剂除气时,还具有除渣作用。

③ 沸腾除气法:沸腾除气是在工频有芯感应电炉熔炼高锌黄铜时常用的一种特殊除气方法。熔炼黄铜时锌的蒸发可以将溶解在合金熔体中的气体去除。当熔化温度较高、超过锌的沸点(907°C)时,熔炼时会出现喷火现象,即锌的沸腾,这样有利于气体的去除。

(2) 除渣精炼

铜合金熔炼过程中产生的炉渣主要为氧化物。氧化物的来源很多,首先是金属在熔炼过程中的氧化物和炉料带进的夹杂物,其次是炉气和大气灰尘、炉衬和操作工具带入的夹杂物等。由于这些氧化物的物理化学性质和状态不

同，其在熔池中的分布情况各不相同。如不在浇铸前进行除渣精炼，将严重影响合金的加工和性能。除去熔体中的夹渣方法通常有以下三种。

①静置澄清法：静置澄清过程一般是让熔体在精炼温度下，保持一段时间使氧化及熔渣上浮或下沉而除去。

②浮选除渣法：浮选除渣是利用熔剂或惰性气体与氧化物产生的某种物理化学作用，即吸附或部分溶解作用，造成浮渣而将氧化物除去。

③熔剂除渣法：在熔体中加入熔剂，通过对氧化物的吸附、溶解、化合造渣，将渣除去，熔剂的造渣能力越强，除渣精炼的效果越好。

4. 影响铸模铸锭质量的主要因素

(1)浇铸温度：浇铸温度过高或过低都是不利的，因为采用较高的浇铸温度，势必就要使炉内熔体的温度作相应的提高，这将引起铜合金在熔化和保温过程中大量的吸气，同时也会增加烧损，在浇铸时会使氧化加剧。此外，过高的浇铸温度也会对铸模的寿命产生不利影响，尤其是平模浇铸时模底板更容易遭到破坏。当浇铸温度偏低时，熔体流动性变差，不利于气体和夹渣上浮，也易使铸锭产生冷隔缺陷。因此，必须根据合金的性质，结合具体的工艺条件，制定适当的浇铸温度范围。

(2)浇铸时间：不同牌号的铜合金都有最适宜的铸造温度，高于或低于这个温度将直接影响铸锭的质量。对于铸模铸锭方式来说，铸造温度的控制与浇铸时间密切相关，因为浇铸时间越长，先后浇铸的金属熔体的温度差越大。对于铸造温度范围较窄的合金来说，浇铸时间越长，浇铸温度也就越难控制。

(3)浇铸速度：浇铸速度通常以铸模内金属熔体每秒钟上升的毫米数来表示。浇铸速度的选择原则是：①在保证铸锭产品质量的前提下，适当提高浇铸速度；②对于某一确定的合金，若合金化程度低，结晶温度范围小，导热性好，可适当提高浇铸速度；③若铸模的冷却速度大，铸锭直径较小，浇铸速度可适当提高。

三、实验设备及材料

铜合金熔炼通常采用工频或中频感应电炉，本实验采用无芯中频感应炉 GW-10。使用的原材料主要有：电解铜(Cu-1)，锌锭(Zn-3以上)，铝锭(Al 99.7)。

熔炼铜合金常用木炭、米糠等作覆盖剂，既可保温防氧化又可结渣和改善熔体流动性；除气采用铜磷中间合金(Cu-8%P)；除渣采用冰晶石(Na_3AlF_6)或80%冰晶石和20%氟化钠的混合物；浇铸模采用机油或石墨+机油润滑，烤干后使用。

四、实验步骤和方法

1. 黄铜熔炼工艺

熔料准备→预热坩埚至发红→加铜和木炭→升温至 1200℃ 熔化→加锌(分批加入到熔体中)→搅拌→加中间合金(Cu-8% P)→搅拌→静置→出炉→扒渣→浇铸

2. 铝青铜熔炼工艺

熔料准备→预热坩埚至发红→先加 2/3 电解铜→加熔剂(冰晶石)→升温至 1200℃ 熔化→加纯铝→熔化后再加余下的电解铜→加熔剂→熔化→搅拌→静置→出炉→扒渣→浇铸

3. 操作要点

(1) 锌能很好地除气和脱氧, 加入少量 Cu-P 中间合金的目的是改善合金熔体的流动性。

(2) 为了减少熔炼损耗, 要在低温加锌。

(3) 铝青铜中铝为强氧化元素, 在熔炼过程中极易氧化, 生成高熔点 Al_2O_3 , 形成悬浮渣液, 极不易除去, 加入冰晶石熔剂除去 Al_2O_3 的效果好。

(4) 冰晶石熔剂的加入量为炉料量的 0.1% ~ 0.3%, 分 2 次加入。

(5) 浇铸时要掌握好浇铸温度和浇铸速度, 确保铸锭质量。

4. 铜合金的配料

根据铸模尺寸大小要求合金配料总量为 1200g

(1) 黄铜(H68) 纯铜: $1200\text{g} \times 68\% = 816\text{g}$

锌: $1200\text{g} \times 32\% = 384\text{g}$ (需考虑烧损量 1.5% ~ 2%)

(2) 铝青铜(QAl10) 纯铜: $1200\text{g} \times 90\% = 1080\text{g}$

铝: $1200\text{g} \times 10\% = 120\text{g}$

5. 实验组织与程序

(1) 每班分成 6 组, 每组 4 ~ 5 人, 其中 3 组熔炼黄铜, 另 3 组熔炼铝青铜。按上述合金的配料成分, 每组领取电解铜、纯锌、纯铝, 进行配制合金。

(2) 合金配料完毕后, 按上述工艺流程进行熔炼操作, 每组浇铸出合格的铜合金锭坯。

五、实验报告要求

1. 简述中频感应电炉熔炼铜合金基本过程。

2. 分析讨论铜合金熔炼过程中除气、除渣的作用及注意事项。