



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

金属材料工程实验教程

主编 仵海东



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高

规划教材

金属材料工程实验教程

主 编 仵海东

副主编 李春红 曹献龙 周安若

常州大学图书馆
藏书章

北 京

冶金工业出版社

2017

林建以 王三才 王高 曹 内容提要

本书根据金属材料工程专业人才培养目标的要求,以金属材料和表面工程方向的典型共性实验为基础,兼顾综合性、特色性实验,选择了80个实验项目进行介绍。内容涉及“材料科学基础(金属学)”、“金相分析”、“金属力学性能”、“金属物理性能”、“热处理原理与工艺”、“材料制备”、“材料现代分析测试技术”、“金属腐蚀原理”、“涂装工艺学”、“涂料制造工艺”、“电镀工艺学”、“涂层检测技术”等专业主干课程,每个实验包含了实验目的、实验设备及材料、实验原理、实验方法与步骤、注意事项和实验报告要求等内容,并且列出了与实验内容相关的思考题。

本书可作为高等院校材料科学与工程、金属材料工程及相关专业的实验教材,也可作为研究生及其他专业人员的参考书或培训教材。

袁安周 沈炳曹 王春李 陈主隔

图书在版编目(CIP)数据

金属材料工程实验教程/仵海东主编. —北京:冶金工业出版社, 2017.7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7530-7

I. ①金… II. ①仵… III. ①金属材料—实验—高等学校—教材 IV. ①TG14-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 118268 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 赵亚敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7530-7

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
2017年7月第1版,2017年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21印张; 505千字; 325页

42.00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 yjcs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

金属材料工程是一个理论与实践联系非常紧密的专业,实验教学作为理论与实践联系的重要环节,对于培养实际动手能力和分析与解决问题的能力非常重要。

本实验教材根据金属材料工程专业的金属材料方向和表面工程方向的人才培养目标的要求,以金属材料和表面工程的典型共性实验为基础,兼顾综合性、特色性实验,旨在培养学生的实验技能、动手能力、研究能力和创新能力。本教材汇集了材料科学基础(金属学)、金相分析技术、金属力学性能、金属物理性能、热处理原理与工艺、材料制备、材料现代分析测试技术、金属腐蚀原理、涂装工艺学、涂料制造工艺、电镀工艺学、涂层性能检测等金属材料与表面工程的专业主干课程的相关实验。每个实验包含了实验目的、实验设备及材料、实验原理、实验方法与步骤、注意事项和实验报告要求等内容,并且列出了与实验内容相关的复习思考题,以供学生加深对相关实验的理解和相关背景知识的学习。

全书按照金属材料制备、工艺(热处理)、组织结构分析、性能测试和应用(表面处理)进行分类编排,以实现内容编写的系统性和科学性。在实验项目的选择上,既考虑了金属材料工程专业的基础性和通用性实验,又兼顾学科发展的最新成果,如原子力和磁力显微镜的应用。实验内容具有一定的深度和广度,可作为高等院校材料科学与工程、金属材料工程及相关专业的实验教材,也可作为相关专业人员的参考书。

本书由仵海东担任主编,李春红、曹献龙、周安若担任副主编。全书分6章共80个实验项目。编写人员分工为:仵海东编写第2章实验1~11,第4章实验1~6,第6章实验1~6;李春红编写第1章实验1~8,第2章实验12,第3章实验11,第4章实验7~11;曹献龙编写第5章实验1~12,第6章实验7~

19; 周安若编写第3章实验1~10, 第3章实验12~18。全书由仵海东、李春红统稿。

本书在编写过程中, 参考了国内公开出版的相关教材、论著和论文等内容, 在此向各位作者表示衷心感谢! 本书编写过程中得到了重庆科技学院冶金与材料工程学院许多老师的支持和帮助, 在此向他们表示诚挚的谢意! 同时感谢重庆科技学院给予的鼎力支持!

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请广大读者批评指正。

作者

2017年1月

目 录

1 金属材料制备实验	1
实验 1 合金非真空高频熔炼	1
实验 2 合金真空感应熔炼	5
实验 3 合金电弧熔炼	9
实验 4 放电等离子烧结实验	14
实验 5 机械合金化法制备粉体材料	20
实验 6 快淬法制备非晶薄带材料	24
实验 7 磁控溅射法制备薄膜材料	27
实验 8 水热合成法制备纳米材料	31
2 金属材料热处理实验	33
实验 1 钢的退火与正火	33
实验 2 钢的淬火与回火	37
实验 3 钢的渗碳热处理	42
实验 4 钢的离子氮化	46
实验 5 软磁合金的真空热处理	50
实验 6 软磁合金的氢气热处理	54
实验 7 钢的淬透性测定	57
实验 8 钢的连续冷却转变 C 曲线测定	60
实验 9 材料热处理后组织性能分析	63
实验 10 材料选用与热处理工艺设计	69
实验 11 高频感应表面淬火	72
实验 12 材料的磁场热处理	75
3 金属材料组织与结构实验	77
实验 1 金相试样的制备	77
实验 2 金相显微镜的构造与使用	82
实验 3 铁碳合金平衡组织的观察	88
实验 4 钢的宏观组织与缺陷分析	93
实验 5 非金属夹杂物鉴别	100
实验 6 结晶实验	103
实验 7 X 射线物相定性分析	106

实验 8 X 射线物相定量分析	109
实验 9 X 射线测量点阵常数	113
实验 10 X 射线测量残余应力	115
实验 11 原子力显微镜的构造及形貌观察	119
实验 12 磁力显微镜观察磁性材料磁畴	125
实验 13 扫描电镜的构造、操作与观察	128
实验 14 金属材料断口扫描分析	131
实验 15 能谱仪的结构、原理与使用分析实验	133
实验 16 透射电镜试样的制备	137
实验 17 透射电镜的构造、操作与观察	142
实验 18 电子衍射花样的形成与标定	147
4 金属材料性能测试实验	152
实验 1 金属硬度测试	152
实验 2 金属冲击韧性实验	157
实验 3 金属拉伸性能实验	160
实验 4 金属压缩性能实验	165
实验 5 金属磨损实验	168
实验 6 金属疲劳实验	172
实验 7 永磁材料的磁性能测试	177
实验 8 软磁材料的磁性能测试	181
实验 9 铁磁材料居里温度测试	187
实验 10 材料电阻率测定	192
实验 11 综合热分析实验	198
5 金属腐蚀性能实验	203
实验 1 重量法和容量法测定金属腐蚀速度	203
实验 2 Tafel 区外延法测定腐蚀电流	208
实验 3 钝化体系的阳极极化曲线测定	212
实验 4 线性极化电阻法测定金属腐蚀电流	216
实验 5 金属电偶腐蚀实验	220
实验 6 奥氏体不锈钢晶间腐蚀实验	224
实验 7 奥氏体不锈钢点蚀实验	228
实验 8 临界点蚀电位的测定	232
实验 9 充电曲线法测定金属腐蚀速率	235
实验 10 缓蚀剂性能的循环伏安法评价	238
实验 11 腐蚀电化学阻抗谱测试	242
实验 12 中性盐雾腐蚀实验	246

6 金属表面处理实验	249
实验 1 钢铁表面脱脂与除锈	249
实验 2 钢铁氧化处理及耐蚀性能评价	254
实验 3 钢铁表调与磷化处理	258
实验 4 刷涂与空气喷涂	263
实验 5 阴极电泳涂装	266
实验 6 粉末静电喷涂	270
实验 7 硝基清漆配制及涂装	273
实验 8 铁红醇酸底漆配制及涂装	275
实验 9 乳胶漆的制备实验	277
实验 10 电镀锌实验	280
实验 11 电镀铜实验	284
实验 12 电镀铬实验	287
实验 13 化学镀镍实验	290
实验 14 镀液性能测试实验	294
实验 15 镀层性能测试实验	297
实验 16 铝合金阳极氧化实验	300
实验 17 镁合金的阳极氧化实验	303
实验 18 涂料性能测试实验	305
实验 19 涂层性能评价实验	311
附录	320
附录一 腐蚀试件的准备	320
附录二 腐蚀产物的清除	321
附录三 确定塔菲尔常数 (b 值) 的几种方法	323
参考文献	326

1

金属材料制备实验

实验1 合金非真空高频熔炼

一、实验目的

- (1) 熟悉非真空高频熔炼炉的工作原理、构造和应用。
- (2) 掌握非真空高频熔炼的操作方法。

二、实验设备及材料

(1) 实验设备：GGR-50-2-B-JL 型高频感应炉，箱式高温炉，坩埚，天平，搅棒，打渣瓢，抱钳。

(2) 实验材料：工业纯铁，电解钴，电解镍，电解铜，电解铝，海绵钛，铌铁，硫化亚铁，结晶硅，硅钙合金，电极碳。

三、实验原理

感应电炉熔炼是利用电磁感应和电流热效应原理进行工作的，当线圈通过各种频率交变电流时，线圈周围产生交变磁场，放入线圈中的金属材料在交变磁场的作用下产生感应电动势，从而在金属材料内形成感应电流，感应电流在金属中流动产生热量，使其融化并进一步使液态金属过热。这种熔炼加热快、温度高、搅动能力强，适用于需要较高熔炼温度的合金。

材料内形成的感应电流成漩涡状，涡流密度从坩埚的中心到表层分布不均匀，坩埚壁密度大，电流频率高，坩埚内部密度小，外部的感应电动势和电流比内部大，这种现象称为“集肤效应”。频率越高，“集肤效应”越明显，因此电流频率应与坩埚直径相适应。

感应熔炼依照频率不同可分为高频感应熔炼、中频感应熔炼。高频感应加热设备实际上是一个大功率的变频器，通过设备本身的电子装置，将 50Hz 的工频交流电变为几十到数百千赫兹的高频交流电，用来加热金属，所以又称它为电子管式高频发生器，工厂中常称为高频炉。

高频感应加热设备主要由三相可控整流器、电子管振荡器和控制电路三大部分组成，其结构方框图如图 1-1 所示。三相可控整流器的作用是将电压为 380V 的工频交流电先经过阳极变压器升压，升高到某一数值，例如 10kV，然后再由三相可控整流器整流为 6.75~13.5kV 连续可变的直流电压，并供电给振荡器。振荡器的作用是将高压直流电变换为高频高压交流电，其常用的频率范围是 90~300kHz（超音频振荡器的常用频率范围是 30~60kHz），再经高频高压 LC 振荡槽路柜连接到熔炼炉。当高频电流流过感应器时，

感应器内便产生强大的高频磁场，金属材料因感应涡流而发热，在极短时间内就被加热到所需的温度。控制电路的作用是保证高频感应加热设备按操作规程安全地运行，以及确保操作者的人身安全。

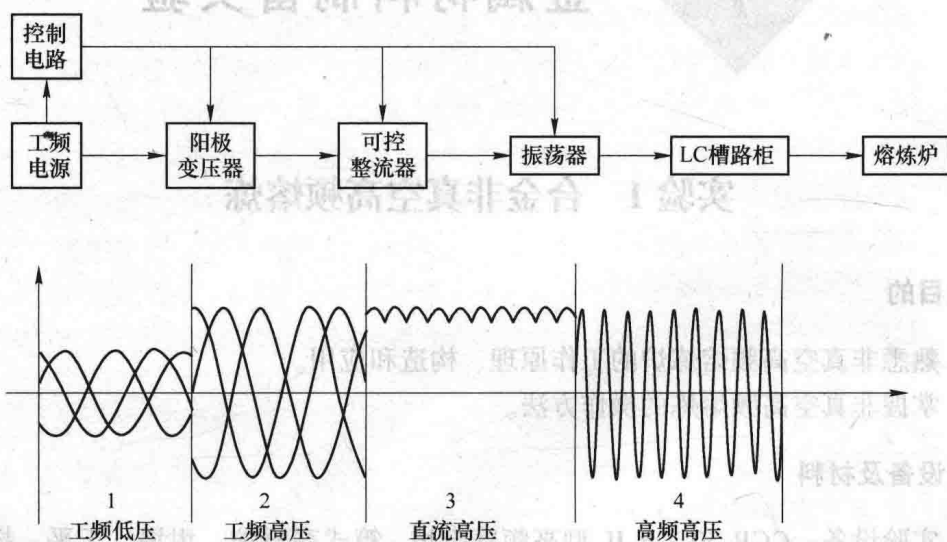


图 1-1 高频感应加热设备结构方框图及波形示意图

四、实验方法与步骤

1. 配料

配料是按规定的化学成分范围，根据原材料成分和单炉装入量进行计算称量的过程，配料过程如下：

(1) 金属原材料的外在质量要求：工业纯铁需光亮无锈；镍、钴、铜、铝材必须干燥，且洁净、无异物。

(2) 投料配比见表 1-1。

表 1-1 投料配比

成分	Al	Ni	Co	Ti	Cu	C	Nb	Si	S	Ca ₃₁ Si ₆₀	余
质量分数/%	7.5	14.5	34.5	5.1	3.2	0.03	1.0	0.3	0.25	0.10	Fe

(3) 铝、镍、钴、铜、钛、铁等金属料用量程为 10kg 台秤称量，铌铁、结晶硅、硫化亚铁、硅钙合金、电极碳等材料用量程为 0.5kg 药物天平称量，将称量好的料装入试样袋中。

2. 熔炼

(1) 先将钴片、镍块，工业纯铁和电解铜等材料同时加入炉内，大片料应顺炉壁摆放，电解镍板应放置在高层，装料力求紧实，以便迅速熔化。

(2) 启动高频加热设备，以最大功率进行熔化，熔化过程中，随时捅料，以防料悬空“架桥”。

(3) 材料全熔后，将硅钙合金粉倒入不锈钢小铲中，撒入钢液面进行预脱氧，捞去熔渣后，将炭粉均匀地撒在液面上，让其充分地进行碳氧反应，反应时间间隔 30s。

(4) 待碳氧反应完毕后, 将硫化亚铁放入不锈钢小铲中加入炉内, 随时捞出熔渣, 并顺次加入铈铁和结晶硅。

(5) 加入结晶硅后, 液面出现羽毛花纹, 待金属液面中仅剩 1/3 羽毛状花纹或全部消失时, 立即加入钛、铝金属, 并用经 950~1000℃ 烘烤后的搅拌棒对钢液进行充分地搅拌, 为使其成分均匀, 上下搅拌次数不少于 40 次, 搅拌后停电, 静置 2min 后升温, 搅拌出钢。

(6) 确认搅拌均匀后, 停电、抬炉、浇注, 浇注温度控制在 1650℃ 左右, 在高压 12~12.5kV, 阳极电流 3A 左右, 栅极电流 0.6A 左右时, 正常熔炼时间应控制在 0.8kg/min 以内。

3. 浇注

(1) 在搅拌钢液即将结束, 迅速地用大抱钳将高温成型模壳从 1350℃ 的高温炉中取出, 判定型模壳底部平整无开裂现象后, 立即放在定向结晶钢板上, 放上压铁。

(2) 迅速抬起坩埚, 大流量浇注, 同时将结晶器冷却水开至最大。10kg 钢力求控制在 5~6s 内浇完。夹型、施压、浇注、开水要求配合严密, 动作敏捷, 整个过程应在 1~2min 内完成。

(3) 浇注完后, 取出压铁, 从高温炉中夹出红砖, 放在取向型模盖上, 然后将整个浇注热型模用保温罩盖上, 静置不动, 钢液在型壳内结晶时间保持 20~30min。

(4) 浇注后用钢钎清理坩埚壁和炉底的熔渣。

4. 清砂

将经过定向结晶的磁钢铸件从型模中清理出来的过程叫清砂, 清砂按下列步骤进行:

(1) 用小钢钎去掉保温帽, 把浇注口上残余金属取下, 将完好的保温帽叠放好, 下次备用。

(2) 敲掉型模四周砂层, 露出铸件, 用榔头敲击铸件保温层金属, 使结晶取向的铸件沿保温层金属面自行掉落。

五、注意事项

(1) 环境要求:

1) 环境温度: 5~40℃。

2) 相对湿度: 最高环境温度 40℃ 时不超过 50%, 在正常环境温度 20℃ 以下不超过 90%。

3) 周围空气: 周围没有导电尘埃, 爆炸性气体及腐蚀性气体。

4) 没有明显的振荡和颠簸。

(2) 设备的供水要求: pH 值, 6.5~8.5; 硬度, 不大于 60mg/L; 电导率, 不大于 50 μ S/cm; 进水压力, 0.2~0.3MPa; 用水量, 160L/min; 进水温度, 9~30℃。

(3) 设备供电: 3 相, 380V $\pm$ 10%, 50Hz $\pm$ 1%, 180kV $\cdot$ A。

(4) 设备的绝缘电阻: 控制电路不小于 0.5M Ω ; 栅极电路不小于 20M Ω ; 阳极电路不小于 100M Ω 。

(5) 电子管 FD-911S 使用时, 保证阳极电压为 13.5kV 时阳极电流不大于 12.5A, 栅极电流不大于 2.5A。

- (6) 设备停机, 切断灯丝电压 15min 后才能停风停水。
- (7) 在没有加上灯丝电压之前, 要先对电子管冷却, 在电子管各电极断电 15min 后才可以停止对电子管冷却。
- (8) 开始投入工作的新电子管或达 10 天以上未使用的电子管在使用时均应加正常灯丝电压 10~15min 后, 再加阳极、栅极电压。

六、实验报告要求

- (1) 每人一份实验报告, 报告应包括实验目的、实验原理、实验设备和材料、实验方法与步骤、实验结果与分析。
- (2) 分析讨论铝镍钴合金熔炼过程中出渣, 熔化时间控制, 合金放置顺序的作用和注意事项。
- (3) 指出实验过程中存在的问题, 并提出相应的改进方法。

七、思考题

- (1) 高频熔炼与中频熔炼有何区别?
- (2) 高频熔炼为什么能保障合金的化学成分? 合金添加顺序为什么从熔点高的到熔点低的?
- (3) 高频熔炼中电感调节器的作用是什么?

实验2 合金真空感应熔炼

一、实验目的

- (1) 熟悉真空感应熔炼炉的工作原理、构造和应用。
- (2) 掌握真空感应熔炼的操作方法。

二、实验设备及材料

CXZT-0.5 真空感应熔炼炉，真空电阻炉，坩埚，天平，砂纸，锰片，铋颗粒。

三、实验原理

1. 真空感应熔炼原理

真空感应熔炼 (Vacuum Induction Melting, VIM) 是在真空条件下，利用电磁感应在金属内产生涡流对炉料进行加热熔炼的方法，该工艺具有熔炼室体积小，抽真空时间和熔炼周期短，温度压力便于控制，材料的净化效果好，熔炼出的材料含气量低、氧化夹杂物少等特点。真空感应熔炼原理主要包括感应加热和真空环境两部分。感应加热原理包括法拉第电磁感应定律和焦耳-楞茨定律。

- (1) 法拉第电磁感应定律。法拉第电磁感应定律如公式 (1-1) 所示：

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1-1)$$

式中 ε ——闭合回路中感应电动势瞬时值，V；

Φ_B ——磁通数量，Wb；

t ——时间，s。

感应电动势的大小与穿过电路磁通量的变化率成正比。

当频率为 f 的交变电流通过一座无芯感应炉的感应线圈时，在感应线圈包围的空间和四周会产生一个交变磁场，该交变磁场的极性、磁感应强度与交变频率随着交变电流变化而变化。若将装满金属炉料的坩埚放入感应线圈内，则交变磁场的一部分磁力线将穿过金属炉料，磁力线的交变就相当于金属炉料与磁力线之间产生了切割磁力线的相对运动，于是，在金属炉料中将产生感应电动势 (E)，其大小通常由公式 (1-2) 确定：

$$E = 4.44 \Phi \cdot f \cdot n \quad (1-2)$$

式中 Φ ——感应线圈中交变磁场磁通量，Wb；

f ——交变电流频率，Hz；

n ——炉料所形成回路匝数，通常 $n=1$ 。

- (2) 焦耳-楞茨定律，又称为电流热效应原理。当电流通过导体时，定向流动的电子克服电阻的阻力所消耗的能量将以热能的形式放出，热量大小如公式 (1-3) 所示：

$$Q = I^2 R t \quad (1-3)$$

式中 Q ——焦耳-楞茨热，J；

I ——电流强度，A；

R ——导体电阻, Ω ;

t ——导体通电时间, s。

当交流电通过感应炉时, 在感应线圈内坩埚里的金属炉料产生感应电动势, 由于金属炉料本身形成的是一闭合回路, 于是在炉料中产生感应电流, 如公式 (1-4) 所示。根据焦耳-楞茨定律, 产生的感应电流将在炉料中放出热量, 使炉料被加热。

$$I = 4.44\Phi \cdot f/R \quad (1-4)$$

式中 R ——金属炉料的有效电阻, Ω 。

同时, 当炉料中流过感应电流时, 受电磁力的作用, 炉料产生定向运动, 即产生“电磁搅拌”作用, 可使熔化时金属液成分和温度均匀, 合金元素的烧损少, 预测成分较准确。

(3) 真空环境。真空熔炼具有除气、除渣、防氧化作用。熔体中气体的溶解度满足公式 (1-5):

$$S = k\sqrt{P} \quad (1-5)$$

式中 S ——金属熔体的气体溶解度;

P ——金属与气体接触处的气体分压;

k ——比例常数, 与金属、气体及温度条件有关。

因此通过真空熔炼可降低外界压力, 减少气体在熔体中的溶解度, 同时根据分压差原理, 降低压力使溶解在熔体中的气体具有强烈的析出取向, 因此, 真空熔炼具有除气作用。生成的气泡在析出过程中, 能吸附非金属夹杂物, 把夹杂物带出熔体外, 具有除杂作用。另外, 熔炼环境为真空, 能减少金属熔体的氧化倾向, 防止熔料被氧化。

熔炼过程中, 当反应生成物中气体摩尔数大于反应物中的气体物质的量, 通过增加真空度来减小系统压力, 可使平衡反应向着增加气体物质的反应移动, 促使反应完全, 熔炼彻底。

2. 设备介绍

感应炉的基本电路由变频电源、电容器、感应线圈和坩埚中的炉料组成。真空感应熔炼炉构造主要包括真空感应熔炼炉体和电控两部分, 分别如图 1-2、图 1-3 所示。

真空感应炉熔炼的整个周期可分为以下几个主要阶段, 即加料、熔化、精炼、浇注。

(1) 加料: 真空熔炼的料需经过特别的清洁处理, 以除去沾污、油脂, 并烘烤去掉水分。过分复杂的铸件回收料等应破碎, 并清除表面氧化皮和非金属物等。

装料原则是下紧上松, 较长的棒料和形状复杂的料放在下面, 并用小块料将空隙填满, 坩埚上口放形状较规则的料, 以免熔炼过程中产生“结桥”。装料动作要轻, 以免碰伤坩埚和形成金属液中间渣。锭模放入真空熔炼炉前应将其内表面清刷干净, 并在加热炉中 200°C 下烘烤, 彻底去除水分。

(2) 加料结束后, 按照抽真空操作顺序, 将炉内抽到高真空就可以开始送电。

一般情况下开始时先送入较小功率, 避免过大功率造成炉温急剧上升, 以致短期内炉内大量放气而造成真空度显著下降, 所以一般功率的增加速度是以不使真空度大幅度下降为准。

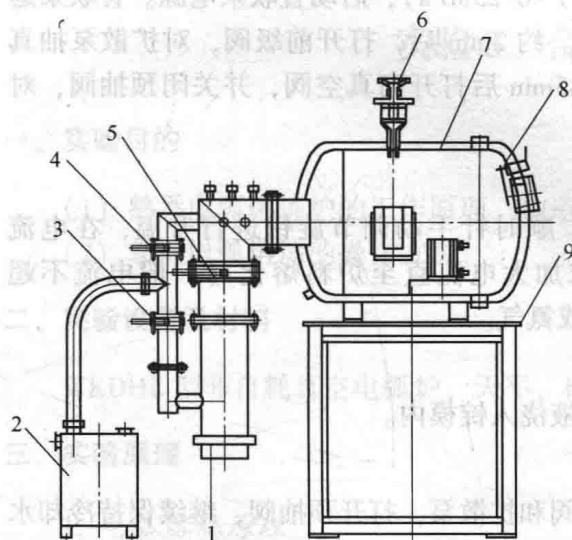


图 1-2 真空感应熔炼炉示意图

- 1—扩散泵；2—直联泵；3—前级阀；4—预抽阀；
5—手动高真空蝶阀；6—二次加料装置；
7—炉盖；8—炉体；9—炉架

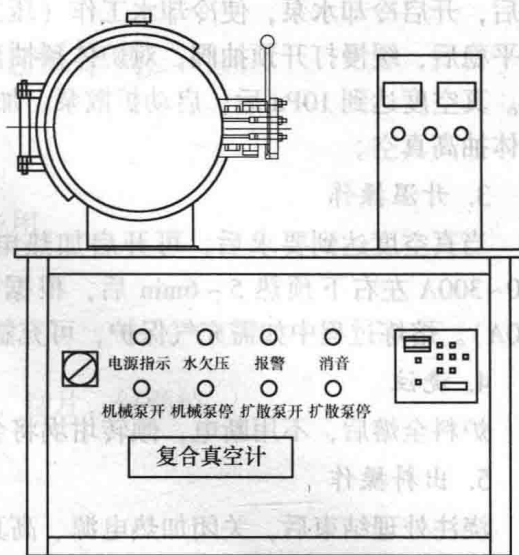


图 1-3 真空感应熔炼电控示意图

在炉料温度不断提高时，功率因数也将不断变化，这时要不断调整功率因数至最佳值，电炉功率的最大值应以中频电压和电流最大值为限制。在功率因数调整至最佳值时，由于炉料和感应器的匹配关系，电压和电流数值不一定都能同时升到最高值，因此最大输送功率应以电压和电流中其中一个参数到顶为限制。一般来说，如熔炼炉料的电阻率较大，炉料尺寸合适，装料密实，坩埚用旧而造成壁较薄等情况下功率输送较大，反之，则功率较低。

(3) 精炼：炉料全熔后需要加入合金料时，可以旋动合金加料器上的手轮，使合金料落入加料翻斗内，用手轻轻转动翻斗的操作手柄就能按需要的速度往坩埚内添加合金料。

有些合金加入坩埚时很易引起溅射，这时就要注意合金加入的速度不能太快，有时甚至采取“结膜加料”的办法，即先降低功率，使液面略微冻结，然后加入合金料，以减少溅射。

(4) 浇注：精炼结束后，可不用断电，倾转坩埚将金属液浇入锭模内。

四、实验方法与步骤

1. 实验准备

(1) 查阅资料，制定实验方案。

(2) 备料。采用纯度为 99.0% 的金属铋颗粒和 99.0% 的电解锰为原料，电解锰表面的氧化皮用砂纸去除。

(3) 配料。总质量 2kg，Mn 与 Bi 原子比为 1:1，将配好后的料混合均匀放入坩埚中，在真空电阻炉中低温烘烤去除水分。

2. 抽真空操作

将试样在坩埚内装好后，关闭锁紧炉门，检查各真空阀门（预抽阀、前级阀、高真空阀）应处于关闭状态，各水冷阀门应处于开启状态（此时冷却水泵处于关闭状态）。无

误后,开启冷却水泵,使冷却水工作(压力 $0.1\sim 0.25\text{MPa}$),启动直联泵电源。直联泵运行平稳后,缓慢打开预抽阀,对炉体预抽真空。约 2min 后,打开前级阀,对扩散泵抽真空。真空度达到 10Pa 后,启动扩散泵。加热 45min 后打开高真空阀,并关闭预抽阀,对炉体抽高真空。

3. 升温操作

当真空度达到要求后,可开启加热电源,顺时针手动调节旋钮进行升温,在电流 $200\sim 300\text{A}$ 左右下预热 $5\sim 6\text{min}$ 后,根据要求加大电流直至炉料熔化(一般电流不超过 600A)。熔炼过程中如需充气保护,可充氩气或氮气。

4. 浇注

炉料全熔后,不用断电,倾转坩埚将金属液浇入锭模内。

5. 出料操作

浇注处理结束后,关闭加热电源、高真空阀和扩散泵,打开预抽阀,继续保持冷却水畅通和直联泵工作。 90min 后待扩散泵冷却到常温,炉内温度不高于 60°C 时,才可关闭直联泵和冷却水。炉内温度接近室温后,打开手动放气阀以破坏炉内真空,开启炉门,进行出料操作。

6. 熔炼后的合金进行扫描电镜观察及磁性能测试

五、注意事项

(1) 扩散泵未完全冷却前,不能关闭前级阀和直联泵。

(2) 浇注过程中不要使金属液浇在锭模外面。

(3) 熔炼炉停止使用时,应对炉内进行清洁处理,然后抽成真空状态保存。

(4) 熔炼时,应经常注意各部分冷却情况,冷却水出水温度不应超过 50°C 。如果水压不足或局部地方温升过高,应该停止送电,并找出原因,恢复正常后再用。冷却水质应注意硬度不要太高,不要含有泥沙。

(5) 为了防止坩埚渗漏钢液造成危害,首先要保证坩埚有良好的质量,不能使用的坩埚不要勉强使用。如果对坩埚的寿命没有把握,则应在炉壳底部放一个耐火材料或金属制的托盘,以防渗漏钢液导致损坏。

六、实验报告要求

(1) 每人一份实验报告,报告应包括实验目的、实验原理、实验设备和材料、实验方法与步骤、实验结果与分析。

(2) 分析讨论真空感应熔炼锰铍合金中真空环境的作用及注意事项。

(3) 指出实验过程中存在的问题,并提出相应的改进方法。

七、思考题

(1) 真空熔炼与非真空熔炼有何差异?

(2) 感应熔炼中炉料的熔化速度影响因素有哪些?

(3) 感应熔炼炉的特点有哪些?

实验3 合金电弧熔炼

一、实验目的

- (1) 熟悉电弧熔炼炉的工作原理、构造和应用。
- (2) 掌握电弧熔炼的操作方法。

二、实验设备及材料

WKDHL 型非自耗真空电弧炉, 天平, 砂纸, 锰片, 铋颗粒。

三、实验原理

1. 电弧熔炼原理

真空电弧熔炼 (Vacuum Arc Melting) 是在真空或惰性气体氛围中, 利用电弧放电 (电极与电极或电极与被融物之间) 所产生的热量对金属或其他材料进行加热和熔炼的一种冶金技术。金属或其他材料在电极的直流电弧高温作用下迅速熔化, 然后在水冷结晶器内凝固, 通过机械搅拌的方式可使被熔炼的材料混合均匀。真空电弧熔炼的优点是: 熔炼过程不受耐火材料、大气和铸模的污染; 能够快速定向结晶, 有利于消除缩孔、偏析和中心疏松等缺陷。

常用的电弧炉根据电极的消耗方式不同可分为自耗型熔炼炉和非自耗熔炼炉。自耗熔炼炉的电极是由被熔材料制成的, 会在熔炼过程中逐渐被消耗掉, 材料熔化后通过滴进结晶器中冷凝成锭。而非自耗熔炼炉的电极则是由钨等高熔点材料制成的, 被熔材料添加到熔炼坩埚中, 引弧后, 随着熔炼温度的升高, 被熔材料被熔化后凝结成锭, 在此过程中, 电极基本不消耗。真空非自耗电弧熔炼炉用水冷铜作为坩埚, 电极电弧作为热源, 因而坩埚的材料不会对被熔材料产生沾污。但是这种熔炼炉的缺点是其电弧稳定性差且生产效率低。

WKDHL 型真空电弧炉是在真空条件下熔炼各种金属样品的专用设备。它的主要特点是熔炼温度高、含氧量低、杂质少。该设备具有功率大、性能稳定、真空度高、使用操作方便等优点。主要用于各种高熔点金属和合金的熔炼, 用于相图、金属学等各种物性研究的样品制备。

非自耗真空电弧炉工作时大电流产生巨大的热能, 其中心温度可达几千摄氏度。利用电弧所产生的高温熔化金属, 将两块或几块金属材料熔化在一起, 形成合金或化合物。真空电弧炉熔炼金属材料一般都不能一次熔炼均匀, 翻转样品反复熔炼多次方能达到理想程度。

2. 设备构造

该装置是由炉体, 电源控制柜, 直流电源, 真空系统等组成。

(1) 炉体。该设备采用卧式真空室, 前面开门, 真空室内空间大, 装取样品和清洗坩埚方便, 结构紧凑合理。该部分由炉体、真空系统、水冷系统、操作台等组成。炉体由样品室、钨电极、机械手、坩埚盘冷却水槽和炉座组成。电极和电极杆用螺纹固定在一