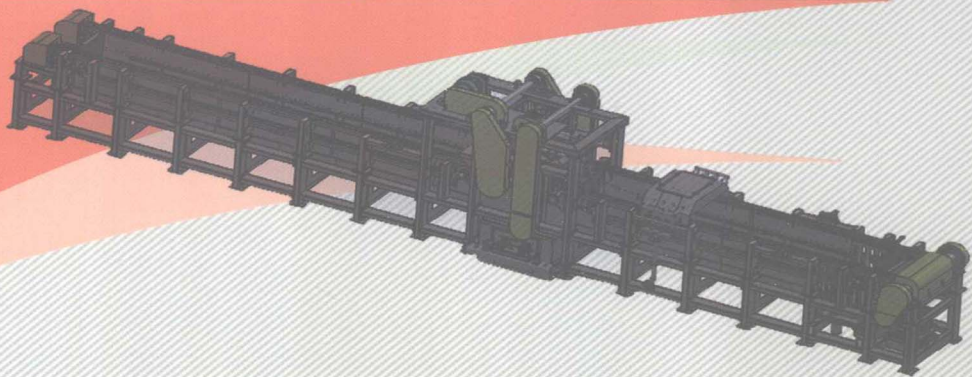




21世纪液压气动系统经典图书系列

有色金属冶炼设备 液压技术及其应用

机械工程学会流体传动与控制分会 组编
袁锐波 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书主要介绍当代有色金属电解冶炼的概况、设备特点、电解冶炼设备对液压技术的要求及应用前景；液压传动技术的基础理论、基本计算和主要计算公式；有色金属冶炼设备常用液压动力机构，并分析了各类动力机构的工作原理和应用场合；有色金属冶炼设备常用液压元件，包括高压柱塞泵，电液比例阀和冶金工程液压缸等；有色金属冶炼设备常用液压回路的分析和设计；有色金属冶炼设备电液集成控制技术及其系统；铜、铅、铝等有色金属冶炼设备液压系统的设计与分析方法，并给出了几种关键设备的工作原理和电液比例控制系统的设计实例；有色金属冶炼设备液压系统使用、维护及故障诊断；有色金属冶炼设备液压系统节能和环保技术。

本书既可供有色金属冶炼设备的设计、使用和维护人员参考，也可作为教材，供大专院校相关专业师生使用，同时也可作为有色冶金行业培训用书。

图书在版编目（CIP）数据

有色金属冶炼设备液压技术及其应用 / 袁锐波主编.

—北京：机械工业出版社，2012.6

（21世纪液压气动系统经典图书系列）

ISBN 978-7-111-38516-5

I. ①有… II. ①袁… III. ①有色金属冶金—熔炼设备—研究 ②有色金属冶金—液压技术—研究 IV. ①TF80

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 109100 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：张秀恩 责任编辑：张秀恩

版式设计：霍永明 责任校对：刘 岚

封面设计：陈 沛 责任印制：杨 曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·19.25 印张·2 插页·371 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-38516-5

定价：49.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

策划编辑（010）88379770

电话服务

社服务中心：（010）88361066

销售一部：（010）68326294

销售二部：（010）88379649

读者购书热线：（010）88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

有色金属作为国民经济和国防建设重要战略物资，使得有色金属工业获得了快速发展。作者长期工作在享有“有色金属王国”美誉的云南省，并在原中国有色金属工业总公司的重点院校——昆明理工大学（原昆明工学院）流体控制工程研究所从事教学和科研工作多年，有幸参加和承担了多种有色金属电解冶炼装备的理论研究、工程设计、制造调试和设备维护等工作，积累了许多有价值的信息资料、研究成果和宝贵的工程实践经验。因此，作者多年来一直有一个愿望，想把研究、教学科研团队在研发多种有色冶金高端装备的辛勤耕耘中所获感知感言归纳总结出来，写成一本专著，把信息和知识传播出去，希望能对同行有所帮助和借鉴。本书既可供有色金属冶炼设备的设计、使用和维护人员参考，也可作为教材，供大专院校相关专业师生使用，同时也可作为有色冶金行业培训用书。

本书有以下特色：

(1) 具有新颖性 全书在编写上注重体现现代液压技术在有色金属冶炼加工设备上的“移植”，实现了液气压传动与控制有色金属冶炼工艺及装备的有机结合，使有色金属冶炼设备获得很多意想不到的“欲求难觅”的高性能液压控制系统和先进的传动机构，其中许多内容是作者所在团队研发的。这样，便于读者掌握现代有色金属冶炼设备和现代液压传动的发展方向和最新应用技术，是目前国内外难得见到的专业著作。

(2) 具有突出的工程实用性 考虑到从事有色金属冶炼生产的科技人员一般不太熟悉液压技术，本书专门编写了液压传动的基础理论、基本计算方法和主要计算公式。此外，比较全面地介绍了铜、铅、铝等主要有色金属冶炼设备中液压技术的应用，列举了许多工程上成熟应用的实例，并给出了电液比例控制系统的一般设计和分析方法，读者只要掌握了本书的主要内容，根据书中的范例就可独立完成类似的有色金属电解冶炼设备装置的设计。

(3) 体系完整 本书按照“基础知识-基础原理结构-基本回路-系统集成-工程实际应用-环保节能技术”的体系结构进行阐述。既照顾到教学又照顾到工程实际应用的需要。同时，做到了由浅入深、通俗易懂。

(4) 内容丰富 著作内容一部分来自国内外专著、手册、教材、专业期刊、产品样本、国家技术标准等，更多的内容是作者长期从事液压技术和有色金属冶炼装备设计、制造、安装调试、使用维护经验和成果的提炼和总结，有些内容直接取自作者的科研成果、科研论文及专利，具有自己独特的视角和认知。

全书共 9 章, 其中第 1 章介绍当代有色金属电解冶炼的概况、设备特点、电解冶炼设备对液压技术的要求及应用前景; 第 2 章介绍液压传动技术的基础理论、基本计算和主要计算公式; 第 3 章介绍有色金属冶炼设备常用液压动力机构, 分析了各类动力机构的工作原理和应用场合; 第 4 章介绍有色金属冶炼设备常用液压元件, 包括高压柱塞泵, 电液比例阀和冶金工程液压缸等; 第 5 章介绍有色金属冶炼设备常用液压回路的分析与设计; 第 6 章介绍有色金属冶炼设备电液集成控制技术及其系统; 第 7 章介绍铜、铅、铝等有色金属冶炼设备液压系统的设计与分析方法, 并给出了几种关键设备的工作原理和电液比例控制系统的设计实例; 第 8 章介绍有色金属冶炼设备液压系统的使用、维护及故障诊断; 第 9 章介绍有色金属冶炼设备液压系统的节能和环保技术。

本著作由昆明理工大学袁锐波教授主编。参加撰写工作的有昆明理工大学袁锐波(第 1、2、7 章)、罗璟(第 4、5、6 章)、孙春耕(第 3、8 章), 云南广播电视大学许茂桃(第 9 章)。本书由昆明理工大学袁子荣教授主审。全书的文字输入、图形绘制由昆明理工大学的李荣、张利、张宜波、彭志飞、曾浩、易鹏 6 位研究生完成。许茂桃教授和昆明理工大学的龙威博士对本书做了最后审校。在此深表谢意, 并诚挚地感谢本书引用文献的所有作者、出版社、生产企业和业内同仁。衷心感谢昆明理工大学、云南冶金集团、云南驰宏锌锗股份有限公司、云南铜业股份有限公司、云南锡业集团股份有限公司、云南新立有色金属有限公司及铜陵有色金属集团股份有限公司金昌冶炼厂等单位对本书编著所提供的帮助。

由于作者水平有限, 书中难免存在缺点和错误, 恳请广大读者指正。

编 者
二〇一二年三月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 近代有色金属冶炼概述	1
1.1.1 金属冶炼的基本概念	1
1.1.2 常用有色金属冶炼工艺过程	2
1.1.3 有色金属冶炼新技术	6
1.2 有色金属工业及冶炼技术装备的现状与发展态势	9
1.2.1 有色金属工业发展的重要性及发展趋势	9
1.2.2 有色金属冶炼技术装备的现状与发展态势	10
1.3 有色金属冶炼设备与液压控制系统的对接	12
1.3.1 液压控制系统在有色金属冶炼设备上的应用优势	13
1.3.2 有色金属冶炼设备对液压控制系统的要求	14
第 2 章 液压传动与控制技术的基础知识	19
2.1 液压传动的工作原理及系统组成	19
2.2 液压传动的工作介质	20
2.2.1 工作介质的物理特性	20
2.2.2 工作介质的种类	24
2.2.3 工作介质的选用	25
2.3 压力和流量	26
2.3.1 压力	26
2.3.2 流量	27
2.4 液体的流动状态	28
2.5 液体的连续性方程	29
2.6 液体的能量方程（伯努利方程）	30
2.7 液体流动中的压力损失计算	31
2.7.1 沿程压力损失	32
2.7.2 局部压力损失	32
2.7.3 液压阀的压力损失	33
2.7.4 管路系统总的压力损失	33
2.8 液体流经小孔的流量方程	34

2.9	功、功率和效率	35
2.9.1	功	35
2.9.2	功率	36
2.9.3	液压力所做的功及功率	37
2.9.4	液压泵的功率	37
2.9.5	液压系统的总效率	37
第3章	有色金属冶炼设备常用液压动力机构	39
3.1	举升机构	39
3.1.1	单液压缸垂直举升机构	40
3.1.2	双液压缸举升机构	40
3.1.3	双铰接剪叉式举升机构	41
3.1.4	双液压缸四连杆举升机构	41
3.2	输送机构	42
3.2.1	I型输送机构	42
3.2.2	II型输送机构	43
3.2.3	III型输送机构	44
3.2.4	IV型输送机构	45
3.2.5	V型输送机构	45
3.3	分片移栽机构	46
3.3.1	带排板装置的分片移栽机构	46
3.3.2	倾斜式分片移栽机构	47
3.3.3	圆盘式分片移栽机构	48
3.3.4	凸轮式分片移栽机构	48
3.3.5	采用机械手的分片移栽机构	49
3.3.6	曲柄摇杆式分片移栽机构	50
3.3.7	顶板式分片移栽机构	50
3.4	步进机构	51
3.4.1	液压缸直驱式步进机构	51
3.4.2	液压马达间驱式步进机构	52
3.4.3	推板式步进机构	53
3.4.4	链传动步进机构	53
3.5	整形机构	54
3.5.1	卧式整形机构	54
3.5.2	立式整形机构	55
3.5.3	多点整形机构	56

3.6	翻转机构	57
3.6.1	摆动液压缸翻转机构	57
3.6.2	齿轮齿条缸翻转机构	58
3.6.3	直线液压缸翻转机构	58
3.6.4	曲柄连杆翻转机构	58
3.6.5	带液压平衡阀的翻转机构	59
3.7	对中机构	60
3.7.1	单块耳部对中机构	60
3.7.2	单块腰部对中机构	61
3.7.3	多块对中机构	61
3.8	铣削机构	62
3.8.1	立式铣削机构	63
3.8.2	卧式铣削机构	63
3.9	剥片机构	64
3.9.1	I型剥片机构	64
3.9.2	II型剥片机构	65
3.9.3	III型剥片机构	66
3.9.4	IV型剥片机构	67
3.9.5	V型剥片机构	67
3.9.6	VI型剥片机构	68
第4章	有色金属冶炼设备常用液压元件	70
4.1	高压液压泵(液压马达)	70
4.1.1	液压泵(液压马达)的工作原理、特点及性能参数	70
4.1.2	轴向柱塞泵	75
4.1.3	液压马达	88
4.2	电液比例控制阀	92
4.2.1	比例控制系统的工作原理、分类及组成	93
4.2.2	比例压力阀	95
4.2.3	比例流量阀	101
4.2.4	比例方向阀	104
4.2.5	比例伺服阀	108
4.3	冶金液压缸	109
4.3.1	有色冶金缸的典型结构	109
4.3.2	有色冶金缸的设计计算	112
4.3.3	有色冶金缸的缓冲装置	117

第 5 章 有色金属冶炼设备常用液压回路的分析与设计	120
5.1 极板制备、整形压力控制回路.....	120
5.1.1 溢流阀调压回路.....	121
5.1.2 减压回路.....	122
5.1.3 增压回路.....	124
5.2 物料输送速度控制回路.....	125
5.2.1 增速回路.....	127
5.2.2 速度切换回路.....	131
5.2.3 调速回路.....	133
5.3 重型拖链液压马达回路.....	138
5.4 油源卸荷回路.....	139
5.4.1 利用换向阀机能的卸荷回路.....	139
5.4.2 利用先导溢流阀的卸荷回路.....	140
5.4.3 插装阀卸荷回路.....	141
5.4.4 变量泵的卸荷回路.....	141
5.5 升降机平衡回路.....	141
5.6 多机构动作同步回路.....	142
5.7 保压和卸压回路.....	144
5.7.1 保压回路.....	144
5.7.2 泄压回路.....	145
5.8 插装阀控制回路.....	146
5.8.1 压力控制回路.....	146
5.8.2 方向控制回路.....	147
5.8.3 速度控制回路.....	147
5.8.4 复合控制回路.....	148
第 6 章 有色金属冶炼设备电液集成控制技术及系统	150
6.1 大功率、高精度液压控制系统.....	150
6.1.1 叠加集成技术概述.....	151
6.1.2 叠加阀的工作原理与性能特性.....	154
6.1.3 叠加阀基本回路.....	157
6.1.4 液压元件集成技术.....	162
6.2 电液比例控制技术及系统集成.....	164
6.2.1 比例控制系统的工作原理、分类及组成.....	165
6.2.2 电液比例控制基本回路与集成技术.....	168

6.3	电液插装控制技术及其系统集成	170
6.3.1	概述	170
6.3.2	插装阀的结构和工作原理	172
6.3.3	插装阀控制的基本回路	176
第7章	有色金属冶炼设备液压系统的设计与分析	181
7.1	铜电解阳极板整形机电液比例压力控制系统	182
7.1.1	整形机结构和工作原理	182
7.1.2	整形机电液比例控制系统设计	183
7.2	铜电解阳极板矫耳铣耳机电液比例速度控制系统	185
7.2.1	矫耳铣耳机结构和工作原理	185
7.2.2	矫耳铣耳机电液比例速度控制系统设计	187
7.3	铜电解始极片制备机组冲铆机电液比例控制系统	189
7.3.1	冲铆机的结构和工作原理	189
7.3.2	冲铆机电液比例控制系统设计	190
7.4	铅电解阳极立模浇注成型机液压系统	192
7.4.1	立模浇注机工作原理	192
7.4.2	立模浇注机电液控制系统设计	193
7.5	铅电解残阳极洗涤机电液比例控制系统	195
7.5.1	残阳极洗涤机的结构和工作原理	195
7.5.2	铅电解残极洗涤机电液比例控制系统设计	197
7.6	铅电解阴极板抽棒洗涤机电液比例控制系统	199
7.6.1	抽棒洗涤机结构和工作原理	199
7.6.2	铅电解阴极板抽棒洗涤机电液比例控制系统设计	202
7.7	铝箔轧机电液伺服控制系统	204
7.7.1	液压压上调厚系统的工作原理	205
7.7.2	液压快速弯辊及平衡系统的工作原理	206
第8章	有色金属冶炼设备液压系统使用、维护及故障诊断	208
8.1	液压系统及管道的安装与清洗	208
8.1.1	液压泵的安装	208
8.1.2	液压阀的安装	209
8.1.3	液压缸的安装	210
8.1.4	液压管道的安装	210
8.2	液压系统的清洗	212
8.2.1	液压件装配中的污染控制	213
8.2.2	液压件运输中的污染控制	214

8.2.3	液压系统总装的污染控制	214
8.2.4	油箱加油	214
8.2.5	液压系统的组装	214
8.3	液压回路的循环冲洗	215
8.3.1	冲洗参数的确定	215
8.3.2	冲洗方法	215
8.4	液压系统的调试	216
8.4.1	液压系统调试前的准备工作	216
8.4.2	液压系统调试步骤	217
8.4.3	液压系统的验收	218
8.5	有色金属冶炼液压设备的使用与维护	218
8.5.1	液压设备的使用保养要求	218
8.5.2	定期维护内容与要求	220
8.5.3	液压设备的主动保养预防维护	221
8.6	液压元件常见故障分析与诊断处理	223
8.6.1	液压泵常见故障分析与诊断处理	223
8.6.2	液压阀常见故障分析与诊断处理	226
8.6.3	液压缸常见故障分析与诊断处理	232
8.6.4	液压马达常见故障分析与诊断处理	233
8.7	液压系统在线状态监控及故障诊断	235
8.7.1	液压系统在线状态监测的目的与内容	235
8.7.2	液压系统在线监测的基本要求	236
8.7.3	液压系统在线监测系统的框架	236
8.7.4	液压系统在线状态监测的软硬件组成	238
8.8	铅电解阴极抽棒机液压设备在线监测系统与故障诊断	242
8.8.1	铅电解阴极抽棒机的工况	242
8.8.2	液压系统的工作原理	242
8.8.3	系统硬件	243
8.8.4	在线监测画面	243
8.9	智能化电液控制铜电解阳极机组的在线监测与故障诊断	246
8.9.1	智能化电液控制铜电解阳极机组的工况	246
8.9.2	液压系统的组成	246
8.9.3	系统硬件	246
8.9.4	在线监测画面	246

第 9 章 有色金属冶炼设备液压系统节能和环保技术	252
9.1 节能和环保技术的重要性	252
9.1.1 产业绿色化的“绿色浪潮”势在必行	252
9.1.2 绿色液压系统的定义和要求	252
9.1.3 绿色液压传动技术迅速发展	254
9.1.4 绿色液压系统的分类及其发展趋势	256
9.2 环保节能技术基础理论	257
9.2.1 液压系统的能量损失	257
9.2.2 液压系统的效率	258
9.2.3 液压系统的振动和噪声	260
9.2.4 环保型液压工作介质	264
9.2.5 水压工作介质的特性	267
9.3 液压系统的节能方法和措施	274
9.3.1 节能途径	274
9.3.2 液压系统的功率匹配	275
9.3.3 能量的储存及回收	279
9.4 环境友好型液压系统的设计与分析	281
9.4.1 水压传动技术的发展历史与展望	281
9.4.2 水压传动基本回路	287
9.4.3 水压系统的应用实例	292
参考文献	294

第1章 绪 论

1.1 近代有色金属冶炼概述

近代工业生产中，把金属分为黑色金属和有色金属两大类，黑色金属是指铁、铬、锰三种金属，其余的金属都属于有色金属。铁、铬、锰及其合金的生产称为黑色金属冶金，又称为钢铁冶金。而各种有色金属的生产统称为有色金属冶金。

1.1.1 金属冶炼的基本概念

从矿石或其他原料中提取金属或金属化合物，并通过冶金方法获得具有一定性能的金属原料，可采用不同的方法和工艺流程，常用的方法有以下三种。

(1) 火法冶金 是指在高温下矿石经熔炼与精炼反应及熔化作业，使其中的金属和杂质分离，获得较纯金属的工艺过程。不同的有色金属有不同的火法冶炼工艺流程，所需要的冶炼工序也有所不同。如选矿、干燥、焙烧、球团、熔炼、精炼等。

(2) 湿法冶金 是指在常温或 100℃ 以下，用溶剂处理矿石和精矿，使有价金属溶解于溶液中，而其他杂质不溶解，然后再从溶液中将金属提取的工艺过程。常用的工序有浆化、浸出、沉降过滤、换热、蒸发、结晶、萃取和溶液电解等。

(3) 电冶金 是指利用电能精炼并提取金属的方法。借助电化学反应使金属从含金属的盐类水溶液或熔体中析出，称为电解精炼。一般可分为水溶液电解和熔盐电解两种。水溶液电解是在水溶液电解质中，插入阴极和阳极，通入直流电，使水溶液电解质发生氧化还原反应，这个过程称为水溶液电解。由于使用的阳极不同，电冶金可分为可溶性阳极电解与不可溶性阳极电解，前者称为电解精炼，后者称为电解沉积。可溶性阳极电解的过程是，阳极在电解液中进行化学溶解，阳极离子附着到阴极上，阳极不断减小而阴极不断增大。杂质则进入阳极泥和电解液中，从而实现金属与杂质的分离，如铜电解、铅电解等。不可溶性阳极电解的过程是，当通以直流电时，电解液进行化学反应，阴极上沉积纯金属，阳极上释放氧气，阳极在电解液中是不溶解的，因而不消耗阳极。熔盐电解是用熔融盐作为电解质的电解过程。熔盐电解主要用于提取轻金属，如铝、镁、钙、锂、钠等。由于轻金属的化学活性很大，通过电解轻金属的水溶液得不到金属。为了使固态电解质成为熔融体，电解过程要在高温条件下进行。

1.1.2 常用有色金属冶炼工艺过程

有色金属品种繁多，但通常把它们分成四类，即重金属、轻金属、贵金属和稀有金属。有色重金属一般是指密度在 4.5g/cm^3 以上的金属，包括铜、铅、锌、锡、镍、钴等；有色轻金属是指密度在 4.5g/cm^3 以下的金属，包括铝、镁、钙、钠、锶、钡等；贵金属包括金、银和铂族元素（钌、铑、铂、钯、铱、钯等）；稀有金属是指那些在自然界中含量较少或分布稀散的金属（锂、铷、铯、钽、钽、钼、钨、镓、铟、锗、镉、铀等）。

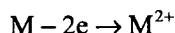
在工业生产中，使用最多最普遍的是有色重金属和轻金属，如铜、铅、锌、铝等。本节重点介绍这些金属电解精炼的生产工艺过程。

1. 铜电解精炼

火法冶金产出的精铜品位一般为 $99.2\%\sim 99.7\%$ （质量分数，后同），其中含有 $0.3\%\sim 0.8\%$ 的杂质，为了提高铜的品位并回收其中的贵金属和稀有金属，需要进行电解精炼（阴极铜品位能达到 99.99% ）。铜的精炼方法通常有三种：常规电解精炼法、永久性阴极法和薄形阳极板法。但这三种方法的作业工艺过程基本相同，所不同的是永久性阴极法所采用的阴极为反复使用的永久性阴极，一般阴极板选用 $4\sim 6\text{mm}$ 厚的不锈钢板或钛板来制作。阴极铜从阴极板上剥离而得。薄形阳极板法与常规电解精炼法的唯一区别只是阳极板的浇注方法不同。前者是将铜溶液连续浇注成薄形板材，后者是借助模具浇注成厚度较大的单块阳极。薄形阳极板需经过冲剪机切成所需形状和尺寸的阳极板，由于薄形阳极板的厚度仅有 20mm 左右，只有浇注机浇注的阳极板厚度的一半，因此，残极率较高，已经很少使用。

常规电解精炼仍然是目前应用最广的一种方法，铜的电解精炼是以火法精炼产出的粗铜浇注成阳极，以电解产出的精铜薄片（始极片）为阴极，以硫酸铜和硫酸的水溶液作电解液。在直流电的作用下，阳极铜进行化学溶解，以离子形式向阴极迁移聚积，产生纯净的金属，杂质则进入阳极泥和电解液中，从而实现铜与杂质的分离。铜电解精炼生产原理如图 1-1 所示。

电解精炼时，阳极上进行的氧化反应为：



式中，M 是指 Fe、Ni、As、Sb 等比铜更负电性的金属，因其浓度很低，其电解电势将进一步降低，从而优先进入电解液。

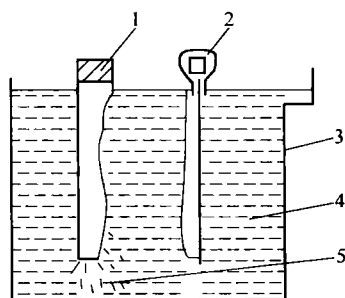
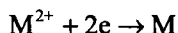
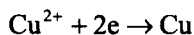


图 1-1 铜电解精炼生产原理图

1—阳极板 2—阴极板 3—电解槽
4—电解液 5—阳极泥

阴极上进行的还原反应为:



精炼时, 标准电位比铜低而浓度又小的电负性金属 M, 不会在阴极上析出。

2. 铅电解精炼

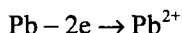
铅是蓝灰色金属。纯铅是重金属中最软的金属, 其密度为 $11.27 \sim 11.48 \text{g/cm}^3$, 熔点为 327.5°C , 沸点为 1525°C 。铅的硬度小、展性好、延性和导电性及导热性差, 液态铅的流动性好。在高温下铅容易挥发, 造成冶炼时的金属损失和环境污染。

铅是电气企业制造蓄电池、汽油添加剂和电缆的原材料, 由于铅有很高的抗酸、碱性能, 被应用于化工、冶金设备作电解槽内衬材料。铅能吸收放射性射线, 所以用作原子能工业和医学中的防护屏。铅与许多金属熔炼成的合金材料被广泛应用于工业的各个部门中。

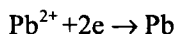
铅电解精炼与铜电解精炼的工艺过程极其相似。电解时, 比铅更负电性的金属如锌、铁、镉、钴、镍、锡等能与铅一道溶解, 但因其含量很小, 对电解液不会造成污染, 所以电解液无需进行特殊净化处理。而比铅更正电性的金属如铋、铟、砷、铜、金、银等不溶解, 形成阳极泥, 再从阳极泥中回收这些金属。

铅电解精炼时, 以硅氟酸和硅氟酸铅的水溶液作电解液, 用粗铅作阳极, 纯铅作阴极。阳极的制备首先是通过火法冶炼的艾萨炉和鼓风机获得粗铅, 在粗铅中还含有 $1\% \sim 4\%$ 的其他金属和杂质。粗铅经过铅锅熔炼后浇注成阳极板。阳极板有平模浇注和立模浇注两种方法。近年来国内开始采用立模浇注, 立模浇注方法极大地提高了阳极板的质量。阴极由纯铅制作成铅卷, 再由阴极制片机制作成带导电棒的阴极。阴、阳极按一定的等间距排列后即可入电解槽进行电解作业。在直流电的作用下, 阳极在电解液中溶解并以离子形式向阴极聚积, 得到高纯度的阴极铅; 稀贵金属则进入阳极泥中:

电解精炼时, 阳极上进行氧化反应:



阴极上进行还原反应:



3. 锌的电解沉积

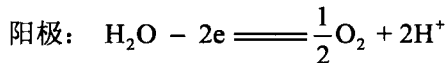
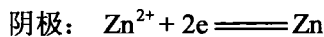
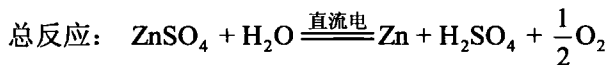
锌是一种白色而略带蓝灰色的金属, 光泽度好, 锌的熔点为 419.5°C , 沸点为 906°C , 密度为 $6.9 \sim 7.2 \text{g/cm}^3$, 莫氏硬度为 2.5, 质软, 有展性。但经过加工后则变硬, 熔化后的流动性好。锌是比较活泼的金属, 在潮湿空气中容易被氧化, 生成一层灰白色的致密性好的薄膜, 可阻止锌继续被氧化。

锌是用途很广泛的金属, 在电镀作业中, 锌作为覆盖材料以保护钢铁制品不被氧化。锌能和很多有色金属形成合金, 例如, 由铜锌形成的黄铜、铜锡锌形成

的青铜、铜锡铅锌形成的抗磨合金、锌与铝、镁、铜形成的压铸合金等。这些合金被广泛应用于机械制造业、国防工业和交通运输业等各个工业领域中。在化学工业中，锌可作为制造颜料的添加剂，氧化锌可用于橡胶制造业，氯化锌可用作木材防腐剂，硫酸锌用于制革、纺织和医药等。在冶金工业中，锌可用来从含金溶液中置换金，在湿法冶金中，用锌粉净液除铜、镉等。

锌的冶炼方法可分为火法和湿法两种，火法炼锌的基本原理是，将氧化锌在高温下用碳质还原剂还原，并利用锌沸点低的特点，使锌以蒸气挥发，然后冷凝为液态锌。火法炼锌包括焙烧、还原、蒸馏和精馏三个过程。焙烧得到的粗锌，含有较易挥发的镉、铅等杂质，还要进一步精炼提纯。精炼的方法是利用锌与其他金属的沸点不同，采用蒸馏的方法来提纯。锌的精馏精炼是在一种专门的精馏塔内进行的，精馏精炼后可得到 99.99% 以上的纯锌。

湿法炼锌的实质是用稀硫酸将焙烧中的锌浸出，浸出液再进行净化除去其中的杂质，然后电解析出锌。湿法炼锌包括焙烧、浸出、净化和电解沉积四个过程。下面主要介绍锌的电解沉积工艺过程，锌的电解沉积是将净化后的纯硫酸锌溶液与一定比例的电解废液混合，作为电解液注入电解槽内，用 Pb-Ag 合金板（0.5%~1% Ag，质量分数）作阳极，压延纯铝板作阴极。通入直流电后，在阴极上析出金属锌，阳极上释放出氧气。溶液中硫酸再生，锌电解沉积总反应、阴极反应、阳极反应如下：



随着电解过程的进行，电解液中锌离子浓度不断降低，硫酸浓度相应增加。为了维持电解液中锌和硫酸浓度稳定，必须连续地抽取一部分电解液作为废电解液返回浸出工段作溶剂，同时又将净化后的中性硫酸锌溶液连续地注入电解槽内，以保持锌和硫酸的平衡。

当电解达到一定的周期后，阴极板上沉积的纯锌片经剥片机剥离后，经熔铸机浇注成锌锭即为阴极锌产品。阴极板经处理后返回电解槽继续使用，电解过程中并不消耗阳极板，但经过一定的电解周期后，需要对阳极板进行处理，消除附着在其表面上的各种杂质，以提高电解效率。

4. 铝的电解生产工艺过程

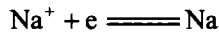
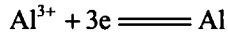
铝是银白色的金属，精铝的密度为 2.7g/cm^3 （纯度为 99.99%），熔点为 600.24°C ，沸点为 2500°C 。铝具有良好的延展性，可以拉成铝线，压成铝板和铝箔；铝的导热性能良好，它的导热能力比铁大 3 倍；铝的导电性能仅次于银和铜；

铝的化学稳定性很强，其表面有致密的氧化物保护膜，不易被腐蚀，被广泛用于食品机械、医疗器械、冷冻装置、石油精炼装置、石油和天然气管道等。

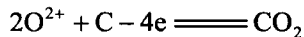
由于氧化铝是典型的两性化合物，既可以用碱性溶液也可以用酸性溶液使铝土矿中的氧化铝溶出。但在工业上都是采用碱性溶液获取氧化铝。

金属铝的生产主要采用融盐电解法，也就是在电解槽中以冰晶石——氧化铝熔体为电解质，通入直流电后，电解过程在电解槽内进行。在炭素阳极及阴极的参与下，电解质发生电化学反应而产出液态金属铝，用真空台包定期从电解槽中将金属铝液吸出，经精炼后浇注成铝锭，即得到纯铝产品。

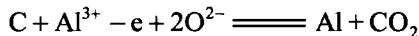
电解铝时，铝电解槽阴极上产生的电化学反应是铝氧氟络合离子中的铝放电析出。除此以外，在一定条件下还有钠析出，阴极上的电化学反应如下：



在纯冰晶石溶体或在冰晶石—氧化铝熔体中，在 940~1010℃时，铝是比钠更正电性的金属。因此，在阴极上发生的一次电解过程中主要是铝离子（ Al^{3+} ）放电析出。但由于 Al 和 Na 的电位相差只有 0.1~0.2V，故在一定条件下仍有 Na 同时析出。电解时，在阳极上的电化学反应比较复杂，因为炭阳极本身也参加电化学反应。阳极上的一次反应是铝氧氟络合离子中的氧离子在炭阳极放电，生成二氧化碳的反应，即



在阴极和阳极上总的电化学反应为：



铝电解槽是炼铝的主要设备，主要由阳极和阴极组成。铝电解中阳极和阴极的制备与铜、铅、锌电解精炼中阳极和阴极的制备是不同的。在铝电解槽设备中，阴极是一个长方形外壳，底部用耐火砖绝热，耐火砖上部铺设炭块，炭块中间插入一根钢棒称为阴极棒，阴极棒伸出钢制外壳，并与阴极母线连接。阳极是用炭素粉及粒子做骨料，用煤沥青做粘结剂混成糊状，经冷却制成块状阳极糊，加入电解槽中而形成。由于阳极形成的方法不同，电解槽也有两种不同的结构形式，现分述如下：

(1) 自焙阳极电解槽 如图 1-2 所示，其主要结构是在电解槽上支撑一个钢制阳极框套 6，将阳极糊加入框套中，插入阳极棒 4（称为侧插棒式电解槽）通过阳极母线 3 通入直流电。阳极糊靠电解过程中自身产生的热量，焙烧成坚固的块状，因此称为自焙阳极电解槽。若阳极棒从阳极框套顶部插入则称为上插棒式电解槽。这两种电解槽的特点是必须有一个钢制的阳极框套，而且要插入阳极棒。

(2) 预焙阳极电解槽 如图 1-3 所示，它是把阳极糊用成型机制成块状，预

先在焙烧炉中焙烧好，再与铝导杆，钢爪等构件组装成阳极组，称为阳极块，然后直接挂在电解槽的阳极母线梁 2 上，因此称为预焙阳极电解槽。这种电解槽的特点是上部结构简单，便于密闭和烟气净化，有利于环境保护。因此近代铝工业生产中采用大型预焙阳极电解槽的比较多。但由于自焙阳极电解槽不需阳极成型及焙烧炉等设备，阳极生产简单，建设费用低，因此仍有部分企业采用。

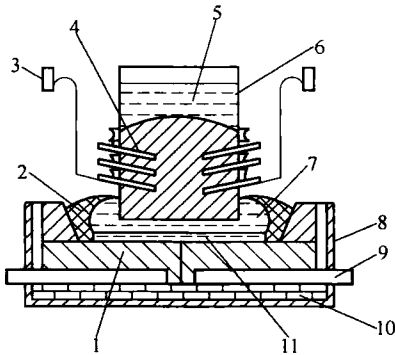


图 1-2 自焙阳极电解槽结构简图

- 1—阴极炭块 2—电解质结壳 3—阳极母线
4—阳极棒 5—自焙阳极 6—阳极框套
7—电解质 8—电解槽槽壳 9—阴极棒
10—绝热层 11—铝液

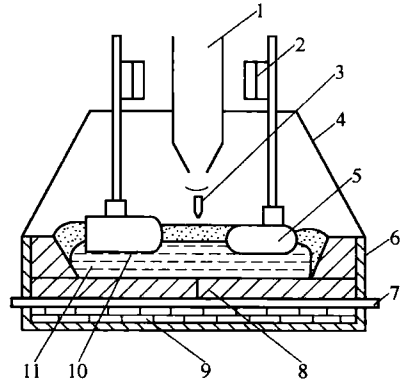


图 1-3 预焙阳极电解槽结构简图

- 1—氧化铝料斗 2—阳极母线梁 3—打壳加料机构
4—槽罩 5—预焙阳极 6—电解槽槽壳
7—阴极棒 8—阴极炭块 9—绝热层
10—电解质 11—铝液

1.1.3 有色金属冶炼新技术

随着科学技术的不断发展和进步，国家产业结构调整战略的实施，有色金属工业生产中的新技术、新工艺、新装备不断涌现。本节着重介绍几种冶炼工艺新技术。

1. 铜冶炼新技术

(1) 艾萨法 (ISasmelt) — 永久性阴极冶炼技术 艾萨法是一种氧气顶吹浸没熔池熔炼技术，其核心设备是艾萨炉，其结构为立式圆柱形炉，内衬耐火材料，喷枪从炉顶直接插入渣层。完成铜矿氧化熔炼，产出粗铜，生产效率高。

永久性阴极电解精炼是近代发展起来的新技术。美国伊利诺斯州奥尔顿的麦特柯工厂率先采用了这种方法。澳大利亚 ISA 公司的汤斯威尔铜精炼厂改进并完善了这种方法，故又称为 ISA 法。

永久性阴极的生产工艺过程与常规的电解精炼法基本相同，但永久性阴极法采用的阴极是可以反复使用的永久性阴极。一般永久性阴极选用 4~6mm 厚的不锈钢板或钛板来制作。同时，在阴极板的底边和两侧面上涂蜡或用聚乙烯塑料包