



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

有色金属冶金 新工艺与新技术

俞娟 王斌 方钊 崔雅茹 袁艳 编著



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

内 容 提 要

本书共7章,主要介绍了目前国内外有色金属冶金新工艺、新技术及新方法。第1章介绍了铜冶金新技术及铜精矿伴生有价金属的增值冶金;第2~3章介绍了镍、铅冶金新技术;第4章介绍了湿法炼锌新技术及新进展;第5章在传统铝电解工艺弊端的基础上介绍了惰性阳极及惰性可润湿阴极的研究进展;第6章介绍了高纯五氧化二钒、钒铁、氮化钒及钒铁等产品的制备进展;第7章介绍了海绵钛、致密钛、钛铁的生产新技术及进展等内容。

本书可作为高等学校相关专业的教学用书及职业技术培训教材,也可供从事冶金行业的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

有色金属冶金新工艺与新技术/俞娟等编著. —北京:

冶金工业出版社, 2019.9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8187-2

I. ①有… II. ①俞… III. ①有色金属冶金—高等学校—教材 IV. ①TF8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 176544 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 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 张熙莹 王 双 美术编辑 彭子赫 版式设计 禹 蕊

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8187-2

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
2019年9月第1版,2019年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15.5印张; 371千字; 236页

56.00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

有色金属是国民经济、国防工业、科学技术发展和人民日常生活必不可少的基础材料和重要的战略物资。工业现代化、农业现代化、国防和科学技术现代化都离不开有色金属。为了强化有色金属冶金过程,国内外产业界和学术界发展了一系列新理论、新技术和新方法,如富氧底吹连续炼铜技术、闪速炉短流程一步炼铜技术、常压富氧直浸技术、基夫赛特直接炼铅技术、铝电解惰性阳极技术、电解法制备金属钛、氮化钒的非真空制备技术等,极大地丰富了冶金学的理论和工艺,推动了有色金属冶金工业的发展和变革。

本书系统归纳和总结了常用的有色金属冶金新技术与新方法,全书共分为7章。第1章介绍了铜火法冶金新技术、铜湿法冶金新技术、铜电解精炼技术进展及铜精矿伴生有价金属的增值冶金;第2~3章介绍了镍、铅火法冶金新技术及湿法提取新技术;第4章介绍了湿法炼锌新技术及新进展;第5章在传统铝电解工艺弊端的基础上介绍了惰性阳极及惰性可润湿阴极的研究进展;第6章介绍了高纯五氧化二钒、钒铁、氮化钒及钒铁等产品的制备进展;第7章介绍了海绵钛、致密钛、钛铁的生产新技术及进展。本书是一本内容比较全面充实的教材。

本书各章分别由俞娟、王斌、方钊、崔雅茹、袁艳编写,研究生黄文龙、孟必成参与文字整理及校对工作。俞娟、王斌主编。

本书的编写得到西安建筑科技大学教材项目的支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2019年6月

3.4.7 重性熔体浸出法 116

3.4.8 Flubar 工艺 117

3.4.9 电化学浸出法 118

参考文献 120

铜冶金新技术 122

1 铜冶金新技术 1

1.1 铜冶金概述 1

1.1.1 铜矿物资源 1

1.1.2 铜的冶炼方法 2

1.2 铜火法冶炼新技术 3

1.2.1 现代铜火法熔炼工艺的特点 3

1.2.2 现代铜冶炼厂的特征 5

1.2.3 我国铜冶金技术发展现状 5

1.2.4 火法炼铜发展趋势 7

1.2.5 闪速炼铜技术的进展 10

1.2.6 富氧顶吹炼铜工艺进展 15

1.2.7 铜钼吹炼技术的进展 21

1.2.8 一步炼铜技术 26

1.2.9 再生铜冶炼技术 26

1.3 铜湿法冶金新技术 27

1.3.1 黄铜矿的压力氧化浸出 28

1.3.2 黄铜矿的氯介质浸出 29

1.3.3 硫化铜矿常压氨浸法 (阿比特法) 30

1.3.4 离子液体浸出黄铜矿的研究 30

1.3.5 重金属吸附材料对浸出液的富集纯化 31

1.3.6 矿浆电解的发展 31

1.4 铜电解精炼技术进展 33

1.4.1 永久阴极铜电解工艺 33

1.4.2 铜电解液自净化技术 34

1.4.3 平行射流电解新技术 34

1.4.4 旋流电解新技术 37

1.5 铜精矿伴生有价金属的增值冶金 41

1.5.1 铜矿中有价元素综合利用现状 41

1.5.2 铜冶炼过程中砷的回收研究现状 41

1.5.3 铜冶炼过程中铈的回收及其综合利用现状 44

1.5.4 铜冶炼过程中铋的回收及其综合利用现状 45

1.5.5 铜冶炼过程中铟的回收及其综合利用现状 47

参考文献	50
2 镍冶金新技术	52
2.1 镍冶金概述	52
2.1.1 炼镍原料	52
2.1.2 镍的生产方法	54
2.2 镍火法冶金技术及进展	54
2.2.1 硫化镍矿的火法冶金新技术	54
2.2.2 红土镍矿的火法冶炼	57
2.2.3 羰基镍的生产	61
2.3 镍的湿法冶金新技术	62
2.3.1 红土矿还原焙烧—氨浸法	63
2.3.2 红土镍矿硫酸加压浸出工艺	64
2.3.3 常压盐酸浸出工艺	67
2.3.4 盐酸常压酸浸—还原熔炼镍铁技术	68
2.3.5 红土镍矿硝酸加压浸出	69
2.3.6 红土镍矿生物浸出	71
2.3.7 外场作用下的红土镍矿湿法冶金新技术	71
2.3.8 镍钼精矿湿法冶金工艺进展	75
参考文献	77
3 铅冶金新技术	80
3.1 铅冶金概述	80
3.2 直接炼铅的基本原理	81
3.3 铅火法熔炼新工艺	83
3.3.1 QSL 直接炼铅工艺	83
3.3.2 水口山 (SKS) 直接炼铅工艺	87
3.3.3 液态高铅渣直接还原工艺	90
3.3.4 顶吹浸没熔炼工艺	94
3.3.5 卡尔多炉熔炼工艺	97
3.3.6 基夫赛特直接炼铅工艺	99
3.3.7 富氧闪速熔炼新技术	108
3.4 铅湿法提取新技术	113
3.4.1 三价铁盐浸出法	114
3.4.2 碱浸法	115
3.4.3 氰盐浸出法	115
3.4.4 固相转化法	116
3.4.5 胺浸法	116
3.4.6 加压浸出法	116

481 3.4.7 氨性硫酸铵浸出法	116
481 3.4.8 Flubor 工艺	117
481 3.4.9 电化学浸出法	118
参考文献	120
4 锌冶金新技术	122
4.1 锌冶金概述	122
4.1.1 锌矿物资源	122
4.1.2 锌冶炼方法概述	124
4.2 湿法炼锌新工艺	126
4.2.1 ZPL 新工艺	127
4.2.2 ADL 新工艺	137
参考文献	145
5 铝冶金新技术	147
5.1 铝冶金概述	147
5.2 现行 Hall-Héroult 铝电解工艺的根本弊病	149
5.2.1 碳素阳极消耗及其带来的问题	149
5.2.2 炭素阴极与铝液不润湿及其带来的问题	150
5.2.3 炭素内衬材料带来的其他问题	150
5.2.4 Hall-Héroult 电解槽的水平式结构及其带来的问题	151
5.3 惰性阳极的研究进展	151
5.3.1 惰性阳极的优点	151
5.3.2 惰性阳极的性能要求与研究概况	153
5.3.3 金属氧化物陶瓷阳极	154
5.3.4 合金阳极	158
5.3.5 金属陶瓷 (Cermet) 阳极	160
5.3.6 低温铝电解—惰性阳极的必由之路	174
5.4 惰性可润湿性阴极的研究进展	177
5.4.1 惰性可润湿性阴极的优点	177
5.4.2 惰性可润湿性阴极的要求与研究概况	177
5.4.3 TiB ₂ 陶瓷可润湿性阴极材料	178
5.4.4 TiB ₂ -C 复合可润湿性阴极材料	179
5.4.5 TiB ₂ 可润湿性阴极涂层材料	180
参考文献	181
6 钒冶金新技术	183
6.1 钒冶金概述	183
6.1.1 钒矿物资源	183

6.1.2	钒提取概述	184
6.2	五氧化二钒生产工艺	184
6.2.1	冶炼工艺	184
6.2.2	焙烧工艺	186
6.2.3	湿法提钒	189
6.2.4	其他新工艺	191
6.2.5	浸出液净化	191
6.2.6	沉钒	193
6.2.7	钒沉淀物处理	195
6.3	高纯五氧化二钒制备进展	195
6.4	钒铁研究进展	196
6.5	氮化钒研究进展	198
6.6	氮化钒铁研究进展	200
6.7	金属钒的制取	200
6.7.1	钙热还原法	200
6.7.2	铝热还原法	201
6.7.3	钒氯化物的镁热还原法	201
6.7.4	氯化钒的碳热还原	202
6.7.5	钒化合物的氢还原	202
6.8	钒的精炼	202
6.8.1	热真空处理	203
6.8.2	高温真空精炼	204
6.8.3	电解精炼	205
	参考文献	206
7	钛冶金新技术	207
7.1	钛冶金概述	207
7.1.1	钛矿物资源	207
7.1.2	钛生产方法概述	207
7.2	我国克劳尔工艺现状及发展方向	208
7.2.1	富钛料生产	208
7.2.2	氯化工序	209
7.2.3	精制	212
7.2.4	还原-蒸馏生产	214
7.2.5	电解镁的生产	215
7.3	致密钛生产进展	215
7.3.1	真空自耗电弧熔炼法	216
7.3.2	冷床炉熔炼技术	217
7.3.3	粉末冶金法	222

7.4 钛冶金其他制备方法	223
7.4.1 $TiCl_4$ 电解法	223
7.4.2 FFC 工艺	225
7.4.3 可溶性固溶体阳极电解法	227
7.4.4 熔盐电解制取液态金属法	227
7.4.5 OS 工艺	228
7.4.6 预成型还原工艺	229
7.4.7 MHR 工艺	230
7.4.8 SOM 工艺	230
7.4.9 离子液体法	231
7.5 钛铁生产新技术	231
7.5.1 重熔法制备高钛铁	232
7.5.2 金属热还原法制备高钛铁	232
参考文献	235

矿 (Cu_2S)、黄铜矿 ($CuFeS_2$)、铜蓝 (CuS) 和斑铜矿 (Cu_5FeS_4)。

据 USGS 统计全球已探明铜金属储量约 7.2 亿吨, 图 1-1 所示为全球已探明的铜资源分布情况, 主要分布于南美洲、北美洲, 所占比例约 62%。其中智利和秘鲁为全球前二的铜矿生产国。

表 1-1 为截至 2017 年全球产能前二十的铜矿山, 其中排名第一的为智利的 Escondida 矿山, 2016 年产能达 127 万吨金属量。相比海外的矿山, 我国的铜矿山单体储量较小, 品位较低, 多以共生矿为主, 开采成本较高。表 1-2 为截至 2017 年国内主要的铜矿山, 排名第一的是中铝位于西藏阿坝地区的玉龙矿。

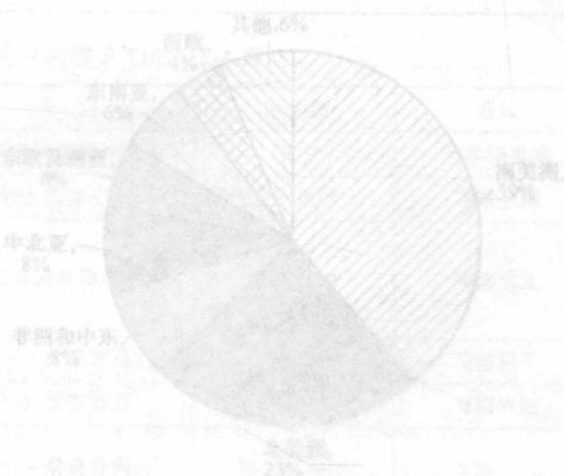


图 1-1 全球已探明铜资源分布

表 1-1 2017 年全球主要铜矿山及其产能

排名	矿 山	国家 (地区)	设计产能 (金属量)/a	最低品位/%
1	Escondida	智利	127	0.57
2	Grasberg	印度尼西亚	780	0.82
3	Morococ	美国	520	0.27
4	Banahuera Cobres	墨西哥	510	0.34
5	Cerro Verde II	秘鲁	500	0.39
6	Collahuasi	智利	454	0.88
7	Antamina	秘鲁	450	0.88

1

铜冶金新技术

1.1 铜冶金概述

1.1.1 铜矿物资源

铜在地壳中的丰度为 $7.0 \times 10^{-5} \text{g/t}$ ，已发现铜矿物 250 多种，有工业开采价值的仅 10 余种。自然界中的铜矿物有自然铜、硫化铜矿物和氧化铜矿物。其中，硫化铜矿物是最主要的含铜矿物，世界上 90% 的铜均产自硫化铜矿物。自然界中主要的硫化铜矿物有辉铜矿 (Cu_2S)、黄铜矿 (CuFeS_2)、铜蓝 (CuS) 和斑铜矿 (Cu_5FeS_4)。

据 USGS 统计全球已探明铜金属储量约 7.2 亿吨，图 1-1 所示为全球已探明的铜资源分布情况，主要分布于南美洲、北美洲，所占比例约 62%。其中智利和秘鲁为全球前二的铜矿产国。

表 1-1 为截至 2017 年全球产能前二十的铜矿山，其中排名第一的为智利的 Escondida 矿山，2016 年产能达 127 万吨金属量。相比海外的矿山，我国的铜矿山单体储量较小，品位较低，多以共伴生矿为主，开采成本较高。表 1-2 为截至 2017 年国内主要的铜矿山，排名第一的是中铝位于西藏阿里地区的多龙矿。

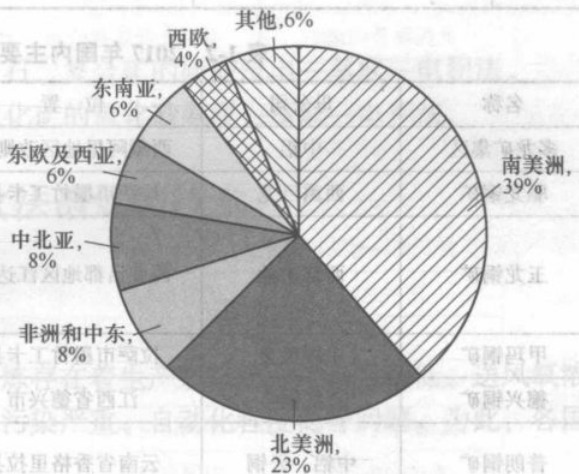


图 1-1 全球已探明铜资源分布

表 1-1 2017 年世界主要铜矿山及其产能

排名	矿 山	国家 (地区)	设计产能 (金属量)/kt	储量品位/%
1	Escondida	智利	1270	0.57
2	Grasberg	印度尼西亚	750	0.82
3	Morenci	美国	520	0.27
4	Bucaavista Cobre	墨西哥	510	0.34
5	Cerro Verde II	秘鲁	500	0.39
6	Collahuasi	智利	454	0.80
7	Antamina	秘鲁	450	0.84

续表 1-1

排名	矿 山	国家 (地区)	设计产能 (金属量)/kt	储量品位/%
8	Las Bambas	秘鲁	450	0.62
9	Polar Division	俄罗斯	450	1.11
10	El Teniente	智利	432	0.56
11	Los Bronces	智利	410	0.44
12	Los Pelambres	智利	400	0.51
13	Chuquicamata	智利	350	0.48
14	Radomiro Tomic	智利	330	0.36
15	Sentinel	赞比亚	300	0.72
16	Bingham Canyon	美国	280	0.52
17	Kan san shi	赞比亚	270	0.78
18	Toromocho	秘鲁	250	0.45
19	Olympic Dam	澳大利亚	225	0.79
20	Mutanda	刚果 (金)	225	1.47

表 1-2 2017 年国内主要铜矿山及产能情况

名称	母公司	位 置	储量 (金属量)/万吨	产 能
多龙矿集区	中铝	西藏阿里地区改则县	>2000	未开采
驱龙铜矿	西钼巨龙	拉萨市墨竹工卡县	1036	每天 10 万吨矿石
玉龙铜矿	西部矿业	西藏吕都地区江达县	650	一期年产 3 万吨金属, 二期年产 5 万~10 万吨金属
甲玛铜矿	中国美金	拉萨市墨竹工卡县	613.8	年产 180 万吨矿石
德兴铜矿	江铜	江西省德兴市	578.77	每天 13 万吨矿石
普朗铜矿	中铝、云铜	云南省香格里拉县	480	年产 1250 万吨矿石
雄村铜矿	金川	西藏日喀则谢通门县	393.2	年产 1200 万吨矿石
乌奴格吐山铜铝矿	中国黄金	内蒙古新巴尔虎右旗	267	年产 6.97 万吨金属
多宝山铜矿	紫金	黑龙江黑河市嫩江县	179	每天 2.5 万吨矿石
尼水县厅官铜矿	紫金、金川	西藏尼水县	137.35	不详
冬瓜山铜矿	铜陵有色	安徽省铜陵市	105	每天 1.3 万吨矿石

1.1.2 铜的冶炼方法

1.1.2.1 火法炼铜

火法炼铜是将铜矿 (或焙砂、烧结块等) 和熔剂一起在高温下熔化, 直接炼成粗铜,

或先炼成铜锍（铜、铁、硫为主的熔体）然后再炼成粗铜。其原则工艺流程为造锍熔炼—锍的吹炼—粗铜火法精炼—阳极铜电解精炼。

传统火法炼铜工艺是将含铜 20%~30% 的铜精矿在密闭鼓风机、反射炉、矿热电炉或者白银炉中进行造锍熔炼，然后将熔融铜锍转入到转炉进行吹炼产出粗铜，再经反射炉氧化精炼浇注成阳极板，最后进行电解精炼产出含铜 99.95% 电铜。传统火法炼铜工艺具有工艺成熟简短、适应性强、铜回收率高的特点。但存在热效率低、能耗高、环保差、自动化程度低、生产效率低、二氧化硫废气回收率低、污染大的问题。此工艺属于典型高能耗高污染工艺。

随着环保要求的日趋严格，以闪速熔炼、艾萨熔炼、奥斯麦特熔炼、三菱熔炼及富氧底吹熔池熔炼为代表的现代火法炼铜新工艺具有短流程连续炼铜、高富氧、连续化与自动化、高效节能和清洁环保等优点，因此，越来越受到关注。

1.1.2.2 湿法炼铜

湿法炼铜是在常温、常压或高压下用溶剂将铜从矿石中浸出，然后从浸出液中除去各种杂质，再将铜从浸出液中沉淀出来。

湿法炼铜工艺根据铜矿石的矿物形态、铜品位、脉石成分的不同，主要分以下三种：

(1) 适于处理硫化铜精矿的焙烧—浸出—净化—电积法，此法是将硫化铜矿石焙烧变成氧化铜后再进行湿法溶浸提铜。

(2) 适于处理氧化矿、尾矿、含铜废石、复合矿的硫酸浸出—萃取—电积法。

(3) 适于处理高钙、镁氧化铜矿或硫化矿的氧化氨浸—萃取—电积法。

1.2 铜火法冶炼新技术

1.2.1 现代铜火法熔炼工艺的特点

反射炉、鼓风机、电炉等传统工艺熔炼存在着生产效率低、熔炼强度低、送风氧浓度低、铜锍品位低、能耗高、成本高、环境污染严重、自动化程度低等问题。为此，各国纷纷开展铜强化熔炼工艺研究。

近年开发的先进炼铜技术如闪速炼铜法、诺兰达法、艾萨法和奥斯麦特法、三菱法以及富氧底吹熔池熔炼等，其主体工艺流程为：铜精矿熔炼—铜锍吹炼—粗铜火法精炼—阳极铜电解精炼—阴极铜（见图 1-2）。

如今的铜火法熔炼工艺已逐渐采用新技术，向短流程连续炼铜、高富氧、连续化与自动化、高效节能和清洁环保方向发展。其主要特点概括如下：

(1) 一般铜精矿 80% 粒度小于 $74\mu\text{m}$ （200 目），通过工业氧可以实现强化熔炼，产能大，一般单套系统最大铜产能超过 40 万吨/年。

(2) 先进炼铜熔炼过程采用富氧操作，送风氧浓度高，如 Inco 闪速熔炼氧浓度可达到 90%，ISA 炉、三菱法以及诺兰达熔炼的富氧浓度分别达到 60%、55% 和 45%（见表 1-3）。

(3) 先进炼铜新技术能够有效利用硫化矿物燃烧所产生的热量，精矿中的 S 和 Fe 与氧反应，大量放热，过程可以实现自热或半自热熔炼，无需过多添加额外燃料。

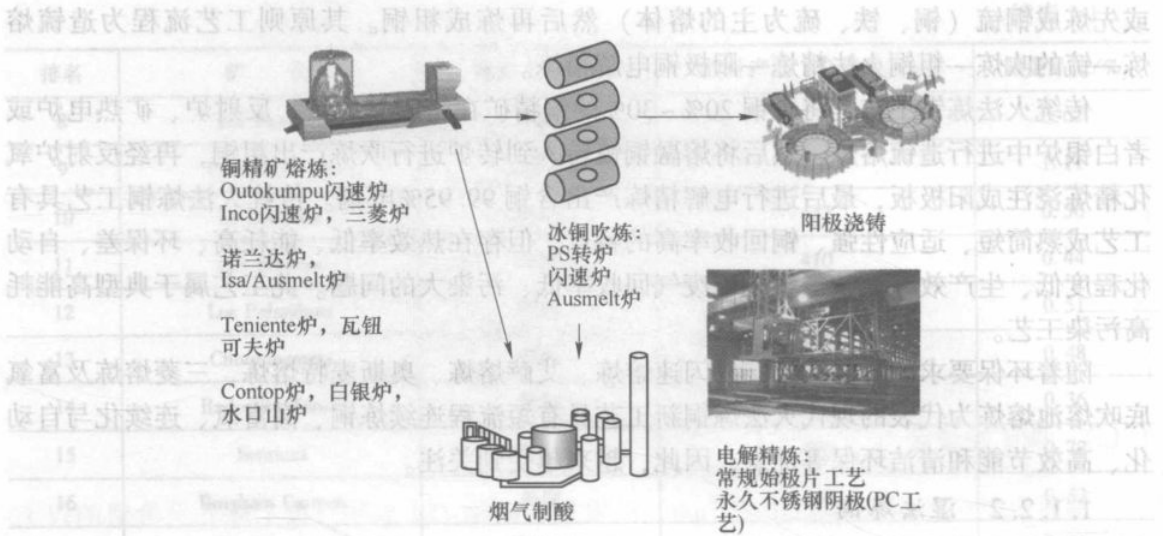


图 1-2 现代火法熔炼工艺流程示意图

表 1-3 现代火法炼铜强化熔炼工艺比较

方法	类型	研发者	原料	产物	送氧方式/浓度/%
闪速熔炼法	奥托昆普闪速炉	芬兰奥托昆普公司	铜精矿	铜铕	顶送风/21~70
	Inco 闪速炉	加拿大国际镍公司	铜精矿	铜铕	顶送风/60~90
	漩涡顶吹熔炼炉	澳大利亚的奥林匹克坝和波兰的格沃古夫	铜铕/白铜铕	粗铜	顶送风/50~95
熔池熔炼法	艾萨熔炼法	澳洲芒特·艾萨矿物	铜精矿	铜铕	顶吹/40~60
	奥斯麦特熔炼法	澳大利亚奥斯麦特	铜精矿	铜铕	顶吹/40~50
	诺兰达法	加拿大诺兰达公司	铜精矿	铜铕	侧吹/约 45
	三菱法	日本三菱公司	铜精矿	铜铕	顶吹/45~55
	特尼恩特炼铜法	智利特尼恩特公司	铜精矿	铜铕	侧吹/约 35
	瓦纽柯夫炼铜法	苏联诺里尔斯克公司	铜精矿	铜铕	侧吹/50~80
	水口山炼铜法	中国水口山	铜精矿	铜铕	底吹/70~75
	顶吹旋转转炉法	加拿大铜崖冶炼厂	镍铕	镍铕	顶吹/80~100
	富氧底吹熔炼法	中国东营	铜精矿	铜铕	底吹/70~75

(4) 造铕熔炼获得的铜铕的品位较高, 一般超过 50%~60%, 最高可以高达 75%。

(5) 熔炼强度高, 如闪速熔炼单炉铜精矿处理量首先突破 100 万吨/年以上; ISA 炉单炉铜精矿处理量达到 130 万吨/年; 三菱炉精矿处理量将超过 100 万吨/年(温山)。

(6) 先进铜熔炼新技术在熔炼过程中硫的捕集率高, 超过 95%, 环保效应好。如闪速熔炼和三菱熔炼法硫的利用率都超过 99%, 吨铜硫排放量不到 2kg, 是最清洁的铜冶炼工艺。

(7) 现代先进炼铜技术的自动化控制程度高, 如闪速炉实现计算机在线控制。(表 1-3)

(8) 铜精矿中的金、银、铂、钯等稀贵金属在铜冶炼中随铜有效富集, 回收率可以达到 98%。

1.2.2 现代铜冶炼厂的特征

国家统计局数据显示,2016年全国精炼铜产量为843.7万吨,12家上市的铜冶炼厂的2016年产量共532.30万吨,占全国电解铜产量的63.09%,铜冶炼的集中度在上升。现代铜火法冶炼厂正向着大规模、连续化、自动化、技术密集型方向发展,其特征体现为:

(1) 企业生产规模大、成本低、能耗低、无公害、技术经济指标先进。

(2) 现代铜冶炼厂是技术密集型企业,普遍采用标准化管理、计算机在线控制,并拥有高素质的技术和管理团队队伍。例如贵溪冶炼厂,先后选派近700人到国外进行培训,近2000人国外专家来厂进行技术指导。

(3) 现代化铜冶炼厂必须实行国际化的经营。

我国各种规模的铜冶炼厂(包括处理精铜矿和废杂铜)近80家,近几年我国的铜冶炼工厂起步建设规模开始增大,比较典型的是山东阳谷祥光铜冶炼厂、金川广西防城港铜冶炼项目,起步规模均达40万吨/年电解铜产品。目前,江西铜业集团、安徽铜陵有色金属集团股份有限公司、云南铜业(集团)有限公司、山东祥光铜业有限公司、金川有色金属集团公司等年产量都超过了40万吨,并实现了无公害生产。

1.2.3 我国铜冶金技术发展现状

近30年来我国铜冶金技术发展迅速,已集中了世界上几乎所有的现代铜熔炼、吹炼、铜电解和再生铜的冶炼技术和装备,荣获“世界铜冶金技术的博物馆”称号。先进的熔炼设备如闪速熔炼炉、艾萨法、奥斯麦特法及三菱法等在国内得到广泛应用。业内认可的先进熔炼工艺主要有Outokumpu型闪速熔炼、浸没喷枪式熔炼(ISA/Ausmelt)以及三菱熔炼技术,可以实现短流程连续炼铜、高富氧、连续化与自动化、高效节能和清洁环保。

国内先进铜冶炼工艺工厂应用实例见表1-4。

近年来我国引进的先进火法炼铜技术主要包括:

(1) 江西铜业、贵溪冶炼厂及安徽金隆铜业公司的闪速炉熔炼技术;山东阳光祥光铜业、金川有色冶金集团广西防城港项目以及铜陵有色金冠铜业分公司的闪速熔炼+闪速吹炼“双闪”技术。

(2) 采用氧气顶吹熔炼技术(包括ISA和Ausmelt)有4家,还有5家正在建设,氧气顶吹炉最大处理能力达每年30万吨精矿;安徽铜陵集团金昌冶炼厂、湖北大冶的奥斯麦特熔炼及山西中条山公司侯马冶炼厂的奥斯麦特熔炼+奥斯麦特吹炼“双奥”技术。

(3) 金川有色金属集团公司的顶吹旋转转炉法(卡尔多炉)。

自主研发的技术主要包括:山东方圆集团的富氧底吹熔炼技术、水口山炼铜法、白银炼铜法以及金川“合成炉”等。

近年来,江西铜业集团每年的产量均在100万吨以上;铜陵有色金属集团控股有限公司铜产量(含金隆铜业有限公司)也在100万吨以上(产能120万吨);山东阳谷祥光铜业有限公司产量40万吨;云南铜业股份有限公司产量45万吨;金川集团股份有限公司(含防城港项目)产能60万吨,实际40万吨左右,广西金川项目正逐步达产;大冶有色金属集团产量40万吨以上,白银有色铜产量13万吨左右,这些大型规模企业铜产量已占全国90%以上。国内大型企业的改扩建及产业升级情况可归纳如下。

表 1-4 国内先进铜冶炼工艺应用工厂实例

公司	原料种类	年产能/万吨	阴极铜	技术类型	先进铜冶炼工艺技术				评价
					熔炼/吹氧方式	吹炼	火法精炼	电解精炼	
贵溪冶炼厂	硫化铜精矿	100	大极板 高纯阴极铜	3项引进	闪速熔炼/顶吹	—	回转式阳极炉(国产)+自动定量浇铸(芬兰)	永久不锈钢阴极电解法(艾萨法,澳大利亚)	国际先进
金隆铜业	硫化铜精矿	40	大极板 高纯阴极铜	2项引进	闪速熔炼/顶吹	—	回转式阳极炉(国产)+自动定量浇铸(芬兰)	永久不锈钢阴极电解法(OK法,芬兰)	国际先进
铜陵金昌冶炼厂	硫化铜精矿	20	中极板 高纯阴极铜	1项引进	奥斯特熔炼/顶吹	—	—	—	国内先进
云南铜业	硫化铜精矿	60	大极板 高纯阴极铜	2项引进	艾萨熔炼炉/顶吹	—	回转式阳极炉(国产)+自动定量浇铸(国产)	—	国际先进
湖北大冶	硫化铜精矿	40	大极板 高纯阴极铜	2项引进	诺兰达熔炼/侧吹奥斯特熔炼/顶吹	—	回转式阳极炉(国产)+自动定量浇铸(国产)	—	国际先进
侯马冶炼厂	硫化铜精矿	20	中极板 高纯阴极铜	2项引进	奥斯特熔炼炉/顶吹	奥斯特吹炼炉(澳大利亚)	—	—	国际先进
山东祥光铜业	硫化铜精矿	40	大极板 高纯阴极铜	4项引进	闪速炉熔炼/顶吹	闪速炉吹炼(美国)	回转式阳极炉(国产)+自动定量浇铸(国产)	永久不锈钢阴极电解KIDD法(加拿大引进)	国际先进
东营方圆集团	硫化铜精矿、金银精矿等	40	中极板 高纯阴极铜	1项自主研发	富氧底吹熔炼炉/底吹	底吹吹炼/底吹	底吹精炼/底吹	—	国际领先
金川有色金属集团	铜镍精矿	20	大极板 高纯阴极铜	1项引进	顶吹旋转炉法(卡尔多炉)/顶吹	—	—	—	国内先进
金川防城港	铜镍精矿	40	大极板 高纯阴极铜	1项引进	闪速熔炼/顶吹	闪速吹炼/顶吹	回转式阳极炉+自动定量浇铸	永久不锈钢阴极电解法	国际领先
水口山	硫化铜精矿	20	中极板 高纯阴极铜	1项自主研发	水口山炼铜法/富氧底吹	—	—	—	国内领先

(1) 产量规模最大最典型的江西铜业公司贵溪冶炼厂先后通过 5 次改扩建, 历时 30 年, 年产能达到了 100 万吨阴极铜。

(2) 安徽铜陵有色金属集团股份有限公司 2013 年“铜冶炼工艺技术升级改造项目”采用当今世界最先进的闪速熔炼—闪速吹炼工艺技术, 总投资 80 亿元 40 万吨阴极铜项目。项目达产后铜陵有色阴极铜的产能达到每年 120 万吨左右, 目前, 公司铜冶炼产能 135 万吨/年, 成为全国阴极铜产能最大的铜冶炼加工企业。

(3) 金隆铜业有限公司(由铜陵有色金属集团股份有限公司、住友金属矿山株式会社、住友商事株式会社、平果铝业公司共同组建的中外合资企业)通过 4 次改扩建, 历时 13 年, 年产能达 45 万吨阴极铜。

进入 2017 年, 铜陵新增产量达 29.16 万吨, 江铜铜业的江铜富冶和鼎新增 10 万吨, 中金黄金拟扩产的 15 万吨和西部矿业的青海铜业 10 万吨也计划于 2017 年 7 月投产。然而实际上于 2017 年新投产的铜冶炼厂还包括山东祥辉 10 万吨、葫芦岛宏跃 15 万吨、广西南国 15 万吨和瑞昌西矿铜业 20 万吨, 合计 60 万吨。

1.2.4 火法炼铜发展趋势

根据我国《有色金属工业中长期科技发展规划(2006~2020年)》和有色金属工业“十二五”“十三五”科技发展规划相关内容和精神, 我国铜精矿火法冶金发展的前沿技术主要包括以下四点:

(1) 短流程连续炼铜清洁冶金技术。缩短铜冶炼工艺流程是解决冶炼低空污染和节能的重要途径。由于铜冶炼工艺流程长、不连续, 熔炼和吹炼两个阶段需在两个独立的炉子中进行, 造成铜冶炼工艺流程长、能耗高、投资大等一系列问题。流程工业重大节能减排效果的取得, 必须在流程上有重大创新。

国外在铜连续冶炼方面获得成功的有三菱法连续炼铜工艺和“双闪”工艺。但上述两种连续炼铜工艺虽解决了吹炼作业的环保问题, 但也存在如投资较高或运行成本高或不能处理粗铜冷料等问题。同时, 引进这两种国外的技术工艺不仅费用高, 而且技术上受制于人。目前, 国内除了山西侯马冶炼厂采用 Ausmelt 吹炼和山东阳谷祥光铜业和金川有色冶金集团广西防城港项目采用“双闪”工艺之外, 其他炼厂几乎都是采用 PS 转炉吹炼, 或者已被国家列为淘汰的鼓风机+连吹炉工艺。因 PS 转炉间断操作, 存在烟气量波动大、炉口漏风率高、二氧化硫烟气泄漏等问题。采用连续炼铜技术, 缩短冶炼工艺流程或取消 PS 转炉吹炼, 是未来解决冶炼低空污染的重要途径。

为解决该技术难题, 国内目前已经实施及在建的有两种新型工艺技术路线, 一是氧气底吹连续炼铜技术; 二是闪速炉短流程一步炼铜技术。

1) 氧气底吹连续炼铜工艺技术。氧气底吹铜熔炼技术在国内已经成熟, 借鉴氧气底吹熔炼和其他连续吹炼的成功经验, 开发底吹连续炼铜技术已经具备工业化试验基础。氧气底吹连续炼铜技术开发的核心是铜连续吹炼。工业化试验开发的内容主要包括: 连续炼铜工艺技术, 工艺条件、工艺参数和过程控制等; 包括喷枪、炉体在内的连续吹炼炉规格和结构的选择开发; 熔炼炉与连吹炉相配套的成套装置的研究开发。

2012 年, 中国恩菲工程技术有限公司(以下简称“中国恩菲”)牵头完成研发、结题并利用该成果, 在河南豫光及山东东营方圆氧气底吹熔炼多金属捕集技术”项目二期

工程分别设计年产电铜 10 万吨和 20 万吨的两家底吹连续炼铜产业化示范工厂。富氧底吹熔炼设备示意图如图 1-3 所示, 豫光底吹连续炼铜示范工程于 2014 年、东营方圆于 2015 年相继建成投产。

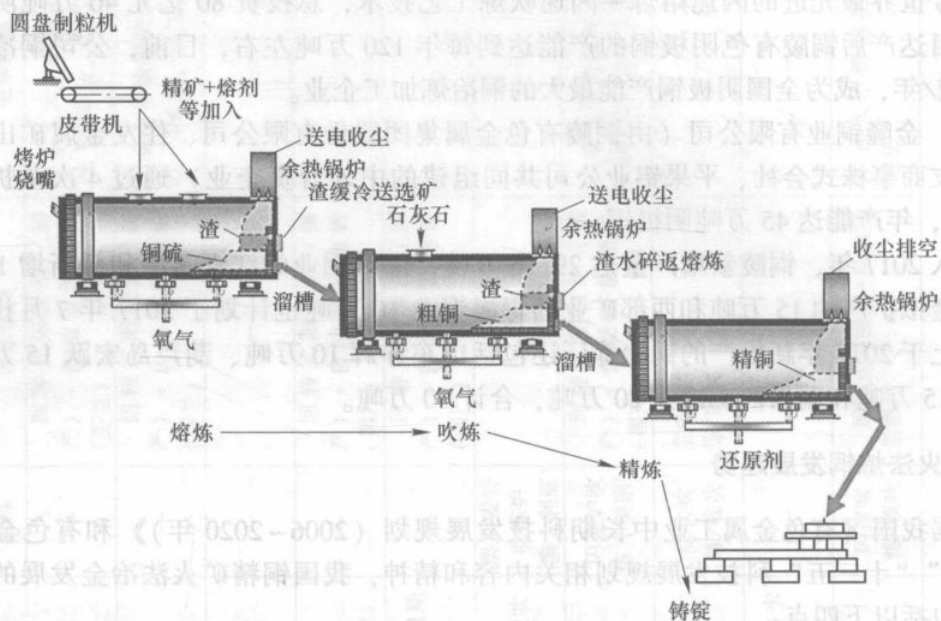


图 1-3 铜精矿富氧底吹熔炼设备示意图

2) 闪速炉短流程一步炼铜工艺技术。中国恩菲设计并采用技术集成及优化方法, 将白银炉、闪速炉及粗铜连吹炉进行工程性结合, 将“闪速炉短流程一步炼铜”新技术在甘肃百银有色集团股份有限公司进行产业化示范。达到取消节能排放瓶颈——PS 转炉吹炼工序, 实现在一个冶金炉装置中完成铜精矿到粗铜产出的整个冶炼过程, 创造出一种具有我国自主知识产权的“连续炼铜”短流程新工艺, 可实现重大的节能效果, 提升我国铜铅冶炼工业整体技术装备水平和竞争力。技术指标: 铜钨品位 70%, 粗铜品位 98%, 每吨粗铜综合能耗 260kg 标煤, 硫控制率 99.7%, 初期产业化规模 10 万~20 万吨/年粗铜。新型闪速炉短流程一步炼铜工艺设备示意图如图 1-4 所示。

(2) 实现无碳底吹连续炼铜清洁生产。国内第一家底吹炼铜厂建于山东东营, 以铜钨捕集黄金为主, 是山东东营方圆铜业集团和金属中国恩菲联合开发的。第一期工程 2008 年底投产, 实际产能规模已提高到每小时 85t 炉料, 实现全自热熔炼, 每吨粗铜能耗小于 200kg 标煤, 处理含铜 20% 左右的精矿, 回收率: 铜 97.98%、金 98%、银 97%、硫 96%。

东营方圆集团第二期工程是年产 20 万吨粗铜、100 万吨多金属铜精矿的冶炼, 于 2012 年建设投产。方圆利用两台底吹吹炼炉同时工作, 交替作业, 吹炼炉将铜钨吹成粗铜后继续在吹炼炉中完成应在阳极炉中进行的氧化、还原精炼工序, 直接生产阳极铜, 取消了阳极炉, 将传统的四步炼铜法简化为: 熔炼—吹炼加精炼—电解精炼三步炼铜 (方圆不算电解将其称为两步炼铜)。经过近 4 年的生产实践, 已实现产业化运行, 并积累了操作经验, 可供新建工厂选择。

无论双底吹还是三底吹 (四步或三步) 连续炼铜, 不用吊包装铜钨在车间内倒运,