

有色金属工业 科技创新

中国有色金属学会第十届学术年会

【论文集】

主办：中国有色金属学会

主编：康义

编委：张洪国 杨焕文 周景琦



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

有色金属 工业科技创新

主编：康义
编委：张洪国 杨焕文 周景琦
主办：中国有色金属学会

——中国有色金属学会第十届学术年会【论文集】



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

有色金属工业科技创新:中国有色金属学会第十届学术年会论文集/
康义主编. —长沙:中南大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5487-2033-1

I.有... II.康... III.有色金属冶金-中国-学术会议-文集
IV.TF8-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第270834号

有色金属工业科技创新:

中国有色金属学会第十届学术年会论文集

YOUSEJINSHU GONGYE KEJI CHUANGXIN;

ZHONGGUO YOUSEJINSHU XUEHUI DISHILIE XUESHU NIANHUI LUNWENJI

主 编 康 义

编 委 张洪国 杨焕文 周景琦

☐责任编辑 胡业民 刘小沛

☐责任印制 易红卫

☐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:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 湖南地图制印有限责任公司

☐开 本 880×1230 1/16 ☐印张 36 ☐字数 1293千字 ☐光盘 1张

☐版 次 2016年5月第1版 ☐印次 2016年5月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2033-1

☐定 价 228.00元(含光盘)

图书出现印装问题,请与经销商调换

序

有色金属是国民经济发展的重要基础原材料。有色金属工业在国民经济、国防军工和高新技术等领域具有重要的战略意义。新中国成立后，我国建立了比较完整的有色金属工业体系。改革开放以来，有色金属工业取得长足发展。新世纪以来，是有色金属工业发展速度最快、经济效益最好、结构调整和产业升级最显著、综合实力全面提升的时期。2015年，我国十种有色金属产量5090万吨，产量和消费量均占世界总量的50%以上，对推动世界有色金属工业可持续发展将发挥越来越重要的作用。

我国有色金属工业科技创新和技术进步取得了重大成就。通过自主创新、协同创新和联合攻关，成功研发了一大批具有自主知识产权的核心技术，突破了制约发展的一大批新工艺、新技术、新材料和新装备，极大增强了我国有色金属工业的国际竞争力。自主研发的旋浮铜冶炼、平行射流铜电解、氧气底吹铜熔炼；液态高铅渣直接还原工艺、“三连炉”等炼铅新技术；湿法炼锌氧压、常压直接浸出技术等，使我国重金属冶炼技术达到了世界先进水平。400 kA、500 kA 特大型铝电解技术已广泛应用，600 kA 超大型铝电解技术属于世界首创，已在两家企业系列生产，使我国铝冶金技术一跃达到了世界领先水平。近几年来，我国先后新建了一批最先进的铜铝加工生产线，生产出高质量、高附加值的产品，有的还出口国外，正在逐步改变我国高端产品依赖进口的局面。

当前，我国有色金属工业发展正处在新常态阶段，即发展速度由前十多年的高速增长转入中高速增长；固定资产投资下降，但投资结构优化；实现利润大幅下降，国有企业亏损；转型升级加快，技术创新能力增强，产业迈向中高端水平。

今年是“十三五”规划的开局之年，我们一定要认真学习贯彻党的十八大、十八届五中全会和中央经济工作会议精神，牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享这一新的发展理念，抓好供应侧结构性改革；结合有色金属工业发展实际，把“去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板”的任务落实到实处，着力推进创新驱动、资源包装、绿色发展、高端发展、两化融合和国际产能合作；继续发扬顽强拼搏、奋发有为、勇于担当、乐于奉献的精神，为促进全行业的持续健康发展，实现有色金属工业强国梦做出积极贡献。



2016年2月

目 录

矿业篇

矿产资源强国战略之管见	于润沧	唐 建	(1)
大型浮选机研究进展及 680 m ³ 浮选机研究	沈政昌	樊学赛 谭 明 吴 峰	(7)
甘肃某地含砷金多金属矿石综合回收选矿工艺研究	李 青	吴天骄 郭月琴 万宏民	(13)
黑龙江某铜矿浮选工艺研究	方 昊	刘之能	(17)
Dimine 软件在地质学教学中的应用与实践	刘晓明	肖厚藻 陈 辉 徐志强	(21)
粗颗粒磷矿物大型浮选机工业试验研究	姚明钊	张 明 史帅星 李世凯	(26)
德兴铜矿采区运输道路管理实践的探讨	毛耀怀		(30)
浓密机中不等质矿物颗粒有序混凝的理论分析	韩登峰	王青芬 陈 东 冯天然	(33)
充填采矿技术应用及存在问题探讨	周 旭		(37)
磁浮选柱用于高质量铁精矿生产的试验研究	冉红想	李国平 连晓圆 成 磊	(41)
黄岗铁矿深孔爆破成井的试验研究	宁俊杰	孙家驹 史海明 康 巍	(45)
iVent 软件在矿井通风教学中的应用与实践	刘晓明	吕太含冰 陈 辉 徐志强	(48)
上盘三角矿采矿工艺的研究与实践	史海明	任兴民 宁俊杰 张嘉宁	(52)
分段空场法降低矿房大块率的措施	陆 云		(56)
基于 AHP 的充填体假顶稳定性影响因素综合评价	熊国雄		(60)
三角对边测量在矿山的应用	李积炯	赵 勇	(64)
中深孔磁探法在临沂会宝岭铁矿中的应用	李君阁	王广文 尹高龙 徐小磊	(67)
高炉炉渣磁选系统的改造应用	虞薛敏	刘仕桃 周 平 麦吉昌 罗新生	(73)
中深孔剖面法在开采矿块“二次圈定”估算中的应用	徐小磊	李君阁 尹高龙	(76)
小煤窑采空区地表残余沉降验证分析	冯爱国	吴圣林 曾凡伟 戚家艳	(80)
多孔球状药包爆破一次成井技术试验研究	刘广兴		(84)

冶金篇

侧吹浸没燃烧熔池熔炼工艺的开发和应用	陈学刚	王忠实	(90)
氧气底吹炼铜机理及过程强化	郭学益	王亲猛 田庆华 张永柱	(98)
伴生稀土磷精矿磷酸浸出液稀土提取研究	汪胜东	蒋开喜 蒋训雄 冯林永 范艳青	(105)
锂离子筛前驱体中锂脱出的动力学研究	冯林永	蒋训雄 范艳青 汪胜东 张登高	(110)
富氧双侧吹熔炼铜过程的物理模拟研究	李小龙	王东兴 刘冠廷 刘 燕 张延安	(115)
仲钨酸铵结晶母液一步回收钨与氨工艺	李义兵	罗 鲲 唐 鑫 刘崇宇	(125)
火法炼铜技术方法概述	王东兴	李小龙 刘 燕 张延安	(129)
氧气底吹熔炼—底吹煤粉熔融还原炼铅工艺	索云峰		(133)
铜双侧吹熔炼过程的数值模拟	刘冠廷	刘 燕 张延安	(138)
铜底吹过程中气液两相流的数值模拟	邵 品	张延安 刘 燕 张子木 王东兴	(145)
澳斯麦特炉熔炼过程中泡沫渣及玻璃渣形成与控制的探讨	万 军	向 阳 王成国 李 立	(154)
大涡模拟技术在搅拌反应器中的应用进展	郭旭桓	张子木 赵秋月 张延安	(158)
富锂电解质铝电解低电压生产的研究	刘 驰		(163)

硫化矿加压浸出条件下氧气气含率的研究	田 磊 张延安 唐俊杰 刘 燕 赵秋月 吕国志(167)
金川钴精炼工艺优化与生产实践	常全忠(177)
碲渣综合回收碲的工艺研究	胡忠东(179)
高硅白云石皮江法炼镁试验	李 波 褚丙武(186)
镁电解多极槽技术在海绵钛生产中的应用与分析	姜宝伟(192)
高磷硫钒钛铁水提钒炼钢工艺中降低钢铁料消耗的途径及措施	尹 文 谢 超 徐 瑜(197)
富锂氧化铝对铝电解工业影响与应对措施探讨分析	黄海波 柴登鹏 罗丽芬(202)
铈冶炼炉渣中二氧化硅含量测定	符永际(207)
四川德胜集团钒钛有限公司 2 号高炉降低燃料比冶炼实践	王远征 王 平 郭林鹏 周 平(210)
氧化铝微量元素及杂质对铝电解生产的影响	温铁军 谷万铎(212)
双底吹炼铅工艺生产实践	徐培伦 周忠跃 韩开远 刘文君(217)
1.6 m ² 极板锌电解分时电流生产实践	陈 欢 孔凡永 张 辉 陈玲玲(221)
金峰双侧吹熔池熔炼技术进展	王国军 韩 智(225)
300 kA 电解槽电流效率与关键技术条件匹配分析	姬振国(231)
400 kA 电解槽多元电解质体系节能技术实践	申善俊 曹友宜 李 伟(234)
300 kA 预焙电解槽在复杂电解质体系下经济技术指标优化	杨正伟 张 涛 朱 光(237)
SY400 kA 预焙电解槽的管理探讨	范军锋 李艳卫(241)
敞开式环形阳极焙烧炉节能技术研究	程立国(245)
细结构石墨焙烧产生螺旋状层裂现象分析	徐向成(249)
富氧底吹炼铅工艺中效益化配料的生产实践	王武钧 杨卫东 李辰寅(251)
带盖焙烧炉多个炉室联动的应用与比较	李喜锋 徐向成(255)
锂盐富集型电解质体系管理工艺探讨及对策	王瑞奇 李长伟(258)
降低“双底”连续炼铜过程中渣含铜的实践	赵体茂 吴艳新 刘素红(262)
铝电解生产过程中炭渣产生的根源及预防	高文义 边友康(266)
铅精炼大极板工艺“泡沫铅”的产生及处理	武鹏举 王勇林 任开颜 张守红(269)
铅阳极泥的控电氯化选择性预处理浸出	闫相林(272)
湿法炼锌锗渣回收工艺改进	陈玲玲 朱志刚 代士平 张 辉(275)
提高铈白生产中铈直收率的生产实践	郭学彦 高冬生 宋宣都(278)

材料加工与设备篇

粉末冶金材料及其制备技术现状与新动向	周科朝(281)
KLM 型立磨机的研制与应用	何建成 卢世杰 周宏喜 袁树礼(291)
共沉淀法制备 NiZn 铁氧体包覆 Fe 软磁复合材料	彭元东 陈璐璐 艾恒宇(295)
HM 型磁性衬板的研究与应用进展	袁树礼 卢世杰 杨俊平 周宏喜(300)
稀土氧化物制备方法概述	吕 超 张延安 赵秋月 金 锐 豆志河(305)
WE71 稀土镁合金热变形行为	刘靖宝 张 奎 韩静涛 李兴刚 李永军 马鸣龙 李 蒙(311)
低成本短流程制备新型二氧化钛材料	王爱平 蒋训雄 汪胜东(318)
基于混沌蛙跳算法的立式淬火炉传感器优化配置研究	姚志远 贺建军(324)
汽车板气垫式热处理线控制系统开发与应用	李家栋 王昭东 李 勇 付天亮 韦云松(330)
一种超高强钛合金的组织性能研究	杨 奇 王庆娟 郭佳林 石卫民 魏寿庸(336)
球形氢氧化镍的制备工艺评价及展望	唐俊杰 张延安 田 磊 刘 燕 赵秋月 吕国志(341)
相关性模型在柴油机故障诊断中的应用研究	张 彤 汪长波 韩 静(345)
高压反应釜搅拌技术及设备在湿法冶金行业中的应用	Dr. Wolfgang Keller 博士(353)
宽幅 3102 铝合金铸轧板生产工艺研究	刘民章 白世森 张彦成(359)

偏振塞曼-火焰原子吸收光谱法测定钼及钼产品中镍含量	王郭亮	谢明明(363)
ICP-AES 测定四氯化钛中的锡		杨再江(366)
电镀锌阴极铝板使用寿命短的原因分析及采取措施		
..... 马高峰 陈超 陈志明 周 玺 王 军 黄开胤		同国兴(368)
粉煤灰管道输送的减阻作用	李 松 周 旭 杨陆海	林 强(372)
冷粘式滚筒包胶工艺流程的分析与应用	杜体涛 麦吉昌 罗清明	罗新生(375)
影响熔炼/保温炉炉衬使用寿命的因素探讨		刘民章(378)
原子吸收分光光度法测定锑原料中铅的不确定度评定		符永际(382)
抗氧冶炼型空分设备技术发展现状	谭 芳	倪凡乐(385)
3004 铝合金铸轧板坯生产工艺研究	冯伟峰	耿雪峰(391)
废旧钴酸锂电池制备钴蓝颜料方法研究	高冬生	王艳波(394)
哈兹列特 3102 合金空调箔生产工艺研究	张安乐 刘雪梅	张 果(397)
计算机信息化在电解生产管理中的应用	刘炎森 李红晓 王宏伟	王 锋(400)
铝箔针孔缺陷研究	郭 峰	钱志恒(405)
浅谈铝热连轧机刷辊应用对轧辊表面质量的影响		董 鹏(410)
浅析“W”火焰锅炉低负荷工况下的稳燃调整		张志民(414)
湿法炼锌压滤机设备改造实践	安 嘉	袁永峰(418)
提高铝电解用预焙阳极质量的探讨	侯飞瑞	范岩峰(421)
铝用阴极配方的规律探索——GS5-SY02 高石墨质阴极试验小结	王照阳	徐向成(426)
四道次生产双零铝箔轧制工艺浅析	李跃民	闫学宝(431)
锌焙烧电除尘器稳定运行的生产实践	张富兵	纪昌磊(436)
无线通讯在焙烧燃烧系统的应用	董宏观 夏百元	裴晓斐(439)
银电镀阳极不均匀溶解研究	孙 昊 尚维国 牛秀林 赵 伟	刘腾腾(443)

环境安全与信息篇

我国有色金属效益分析及其宏观影响因素研究		张凌洁(446)
我国再生有色金属产业现状及问题	朱 军 朱明明 赵 奇 王 欢	赵兴红(453)
认识“新常态”、适应“新常态”、把握“新机遇”		王华俊(458)
浅析企业级移动应用的信息安全	张 璇	李志毅(461)
一种简单的尾矿库溃坝泥石流演进计算方法研究	李文新 郭朝阳 莫苏鹏	刘艳红(463)
锌冶炼浸出渣资源回收与环保		李若贵(469)
尾矿库溃坝研究现状及趋势思考		郭朝阳(477)
磷酸钠废渣玻璃固化研究	赵宗文 柴立元 闵小波 李 威	周波生(481)
地下水污染源识别与源强分析研究		祝怡斌(485)
重金属废渣硫化法回收研究现状及发展方向	周波生 闵小波	柯 勇(488)
复合纳米吸附剂深度处理含铈废水应用研究	胡建龙 邵立南 杨晓松	陈国强(496)
钼污染处理研究进展	钱冬旭 张亚雷 周雪飞 代朝猛 钱雅洁	苏益明(500)
重金属废渣水热硫化回收金属的基础研究	柯 勇 闵小波 柴立元 梁彦杰	张海静(508)
钙化赤泥碳化过程的物理模拟及实验研究	侯君洋 刘 燕	张延安(514)
企业级数据采集平台概述与规划	曾子力	文欣荣(519)
碳化过程对拜耳法赤泥回收氧化铝的影响	王 坤 刘 燕	张延安(523)
经营分析决策支持系统在铝工业集团化企业的应用研究		朱 亮(528)
运用 QC 工具,降低银靶生产损耗	冯斐斐	王秋霞(532)
立足设备管理 做好企业发展基石		何永刚(535)

浅谈铝产业链安全隐患探索及预防策略	陈亚华(547)
清洁生产审核对企业环保管理工作的促进作用	刘艳华 张 博 赵 峰 许丹丹(551)
控制转炉倾动的安全技术分析与改进	任华金 谢 超 尹 文 罗新生(554)
乘“一带一路”之风 筑“豫光腾飞”之梦	李飞燕 丛万通 孙降龙(562)

矿业篇

矿产资源强国战略之管见

于润沧 唐 建

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京, 100038)

摘 要: 矿产资源是国家经济发展的物质基础,也是国家安全的重要保障。中国的大宗金属矿产资源总量较丰富,但高品质的储量少,人均占有量低。在工业化高速发展阶段,大宗金属资源需求量激增,铁矿石、铜、铝等资源对外依存度较高。中国矿业企业与国际矿业巨头相比,竞争力不强,资源占有水平不高。中国矿山企业“走出去”战略中的大规模开发利用海外优质资源将是必然趋势。抓住“一带一路”建设的战略机遇,实行互利共赢的方针,多渠道保障资源可持续供应,以示范工程引导生态环境友好、作业安全舒适的现代化矿业开发,将是中国矿业由大变强的重要途径。

关键词: 矿产资源;大宗金属;资源可持续供应;全球矿产资源战略;矿业强国

中国是世界上矿产资源品种比较齐全的少数国家之一。目前全球发现的 200 余种矿产资源中,我国有 172 种,具有查明资源储量的矿产 161 种。从生产和消费角度看,中国已成为全球大宗金属产消大国。截至 2014 年底,全国钢产量和消费量已连续 19 年居世界首位,有色金属产量也连续 13 年居世界首位。主要有色金属消费量,锌从 1998 年开始连续 16 年居世界第一、铜从 2001 年开始连续 13 年居世界第一、铝从 2004 年开始连续 10 年居世界第一、铅从 2005 年开始连续 9 年居世界第一。受经济发展周期阶段性特征的影响,中国大宗金属矿产资源需求增速在此期间逐步进入峰值期。峰值期间,需求增速下滑,经济结构调整,转型升级,经济发展进入新常态,但矿产资源需求量规模依然巨大。

1 矿产资源的战略地位

矿产资源是人类赖以生存和社会进步的物质基础,是国家安全和经济发展的重要保障。没有矿产资源持续稳定的供应,就没有现代经济与社会的发展。

人类经历了石器时代、青铜时代、铁器时代等,

一直发展到现在的知识经济时代,矿产资源一直是人类生存和发展的重要物质基础,它为人类提供了 95% 以上的能源、80% 以上的工业原料和 70% 以上的农业生产资料。它不但影响工农业生产、高新技术发展、航空航天、国防建设等各行各业的正常运行,而且也与国家安全息息相关,例如海湾战争的经济动因很难与石油割裂开来,近年南海问题呈现国际化态势,各国对深海矿产资源的开发利用竞争加剧。矿产资源过去一直是今后也仍将是世界各国采用政治的、经济的、甚至是军事手段争夺和控制的对象。

2 我国大宗矿产资源的供应消费格局

2.1 我国资源禀赋评述

我国矿产资源有 5 大特色:①品种丰富、总量较大,但人均拥有量远低于世界平均水平;②用量较少的矿产资源丰富,大宗消费的矿产资源储量不足;③贫矿多,富矿少,共、伴生矿多,开发利用难度大,成本较高;④中小矿床多、大型超大型矿床少,矿山规模偏小;⑤区域资源分布不均。

我国基础储量居世界第一、第二位的金属矿产有

钨、钼、锑、钛、稀土；许多大宗消费矿种如铁、铜、铝、镍、金等占世界总储量的比例均小于5%，且资源保障年限远低于世界水平。主要金属矿产已探明人均储量不足世界人均值的1/4。铜和铝的人均储量分别只有世界平均水平的1/6和1/9。

我国铁矿平均品位不足30%，比目前铁矿石供应大国平均水平低30%以上，可直接入炉炼铁、炼钢的富铁矿资源储量仅占全国铁矿资源储量的2.7%。占铜矿45.5%的斑岩型铜矿平均品位一般为0.5%，智利铜矿出矿品位为0.94%（2013年），铝土矿几乎全为为难溶出的一水硬铝石。

铁矿、铜矿多元素共生的复合矿石较多，矿体复杂，利用难度大。重庆及晋北等地区铝土矿需要浮选脱硅，利用成本高。选矿工艺流程复杂，精矿生产成本较高。

与世界相比，我国已经发现的矿床规模偏小，大型超大型矿床少，客观上增加了集约化大规模高效矿山开发的难度。以铜矿为例，我国迄今发现矿产地900个，其中大型矿床仅占2.7%，中型矿床8.9%，小型矿床多达88.4%，我国目前铜矿产量不及智利埃斯康迪塔铜矿2005年年产量的2倍（117万吨铜，含13.9万盎司金，590万盎司银，2005/2006财年）。

暂难利用的铁矿、铜矿等，限制了国内大宗资源的供给。其暂难利用的因素包括：难采、难选，多组分难以综合利用；矿石品位低、矿体厚度薄；矿山开采技术条件和水文地质条件复杂；矿区基础设施不完善、交通不便；矿体分散难以规划；开采经济指标不合理；矿产地属自然保护区等。

矿产资源分布不均也在一定程度上限制了供给。我国镍矿资源的第一个特点是储量分布高度集中，仅甘肃金川镍矿，其储量就占全国总储量的63.9%，新疆喀拉通克、黄山和黄山东三个铜镍矿的储量也占到全国总保有储量的12.2%。储量高度集中，而且埋藏深，不能露采，因此对扩大产量，提高经济效益带来了影响。我国氧化镍矿较少，而且品位较低，与国外氧化镍矿储量大、品位高的一些国家，如新喀里多尼亚、印度尼西亚相比，缺乏竞争力。

2.2 消费峰值及对外依存度

从20世纪90年代开始，我国逐步进入工业化、城镇化的高速发展阶段，2014年创造的GDP总量相当于60年前GDP总量的314倍。这种GDP增长速度需要消耗大量矿产资源来支持。基于我国许多大宗矿产资源的禀赋特点，大宗消费矿种如铁、铜、铝、镍等都已成为紧缺资源，对外依存度均在50%以上，有的甚至高达70%~80%。预计未来十年内对外依存

度会小幅波动，总体变化不大。2014年我国的粗钢消费为7.38亿吨，精铜消费872万吨，原铝消费2805万吨，镍消费量93万吨，较上年分别增长-3.4%、6.3%、12.0%和6.8%；占全球消费量的比重分别为6.2%（钢材）、38.9%、51.1%和48%。

“十二五”末期以来，中国经济逐渐进入“新常态”，GDP增长趋缓，以钢铁为代表的大宗金属消费开始减速。根据发达国家的发展规律，人均GDP与人均大宗金属消费量之间存在“S”规律，即农业社会人均资源消费呈低缓增长趋势，工业化发展阶段呈快速增长趋势，之后随着经济结构的转变、社会财富积累水平不断提高和基础设施日趋完善，资源的人均需求陆续达到顶点，不再增长，保持一段时间后，趋于下降。目前，中国人均GDP已超过8000美元，铁、铜、铝等消费强度位于峰值区，需求增速开始减缓。有研究表明，我国钢铁消费量已“见顶”，到达峰值区，为7~8亿吨；精铜消费峰值期约在2023—2028年，消费量1350~1650万吨；铝消费峰值期约在2018—2023年，消费量3000~3300万吨；镍消费峰值期在2020—2025年，消费量130~150万吨。

3 矿业企业的基础竞争力

3.1 基本观点

以矿产资源为基本生产资料的企业均属于矿业企业。矿业企业的基础竞争力，在于占有矿产资源，尤其是优质资源的数量与能力。我国受“重治轻矿”传统观念的影响，企业看中的是直接体现经济价值的冶金产品，这种类似“无米之炊”的经营理念，导致了冶炼产能的过剩，刺激了大宗消费矿产对外依存度的不断攀升。这种发展模式是不可持续的。在市场价格持续低迷的环境下，很多企业将面临难以生存的窘境。

3.2 国内外企业对比

以铁矿石市场“三大巨头”为例，通过研究他们的资源拥有量以及品质，研究他们的储（量）产（量）比，我们就不难理解他们何以具有很强的竞争力，及为什么可以在市场上“呼风唤雨”。必和必拓（BHP Billiton）仅在本土的纽曼、扬迪和戈德沃斯这三个矿区的总探明储量就约为29亿吨，铁矿石的年产量为1亿吨。此外这个公司还有开采煤、铜、铝、镍、铀、石油、液化天然气、镁、钻石的业务，拥有Antanina、EScondida、Olympic Dam等多家露天、地下铜矿和镍、铀矿控股或参股股份，以及澳大利亚本土多个煤矿，还有本土、墨西哥、美国的油气和加拿大的钾盐矿。力拓（RioTinto）不仅是世界三大铁矿石供应商之一，

还提供包括铝、铜、钻石、能源产品、黄金、工业矿物等产品。它在几内亚、巴西参股控股铝土矿和氧化铝厂，拥有美国、蒙古、智利、印尼铜矿山，在本土和南非拥有 6 个热煤、焦煤矿山。拥有巴西淡水河谷 (Vale) 本土铁矿，澳大利亚、莫桑比克煤矿，本土、加拿大、印尼及新喀里多尼亚镍、铜、锰、钾盐、能源等。

要加快我国矿业企业走向国际的步伐，需要从观念上转变对矿业企业基础竞争力的理解。紫金矿业集团是我国比较重视占有资源的矿业企业，其特点与纽蒙特矿业公司相似，除拥有国内金铜矿山外，在俄罗斯、吉尔吉斯斯坦、澳大利亚、塔吉克斯坦、刚果(金)、秘鲁等国也有由购、参、控股，合资等方式获得的铜、金等多金属矿山。据称其在全球有色金属企业排名第 12 位、全球黄金企业排名第 3 位。

4 加强资源储备，保证国家经济安全

在我国经济发展需消费大宗金属的时期，拥有资源对国家经济安全的保障作用十分重要，因此需要通过各种途径保障资源持续供应。

4.1 历年的勘探投入与成果

21 世纪以来，我国的勘查投入基本呈现逐年增加趋势(见图 1)。2003 年以后，勘查投入的增速提高。其中能源油气的勘查投入占到总投入的 70% ~ 95%，而金属、非金属资源勘查投入的增长相对滞后，最高增幅出现在 2008 年，增长率达 248%。总体上，2013 年以来勘查投入开始下滑。勘查投入的增长与资源市场价格升高相关，2013 年全球矿业处于调整态势，非燃料固体矿产勘查较上年下降了 29%。

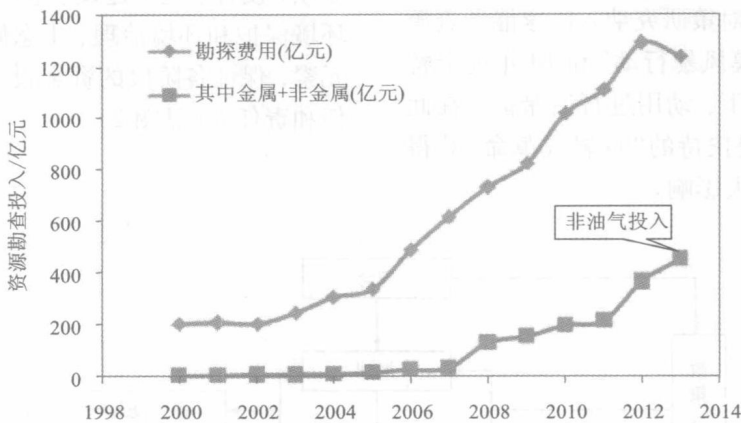


图 1 21 世纪以来我国资源勘查的投入状况

2011—2013 年我国黑色金属查明资源储量普遍增长，其中钒矿和锰矿增长明显；有色金属多数增长，其中铜、铅锌、钨钼矿增幅超过 10%；贵金属的金矿和银矿增加 30% 左右；多数非金属矿也有所增长(见表 1)。

表 1 近年我国主要矿产资源查明资源储量与变化

矿产名称	单位	2010 年	2013 年	变化/%
石油	亿吨	31.7	33.7	6.3
天然气	亿立方米	37793.2	46428.8	22.8
铁矿	矿石/亿吨	727	798.5	9.8
锰矿	矿石/亿吨	8.86	10.3	16.3
钒矿	V ₂ O ₅ /万吨	4381.9	5713.4	30.4
铜矿	金属/万吨	8040.7	9111.9	13.3

续表 1

矿产名称	单位	2010 年	2013 年	变化/%
铝土矿	矿石/亿吨	37.5	40.2	7.2
铅矿	金属/万吨	5509.1	6737.2	22.3
锌矿	金属/万吨	11596.2	13737.7	18.5
镍矿	金属/万吨	938	901.1	-3.9
金矿	金属/吨	6864.8	8974.7	30.7
银矿	金属/万吨	17.2	22.3	29.9
钾盐	KCl/亿吨	9.3	10.1	8.6

4.2 资源储备的分级

矿产资源储备是指为保障国家安全(包括国家安全和经济安全)及在国际上保持独立自主地位，由国家实施对存在供应脆弱性战略矿产资源和急需矿产资

源进行的储备。矿产资源储备从资源产业链方面可分为两大类：一是矿产地储备；二是矿产品储备。从储备用途或性质方面看可分为经济储备和战略储备。

历史上美国、日本、法国、韩国等国都建立了较为完善的矿产品战略储备制度。美国从 20 世纪 20—30 年代起就颁布了行政命令，日本的资源储备制度可追溯到 20 世纪 70 年代，大量的案例均从石油储备开始。美国在之后的几十年中，不断完善充实储备制度，储备品种也逐渐扩充到铀、钍、钨等稀有金属。日本在随后的一二十年里建设了多个国家石油储备基地，由于资源匮乏，同时还逐步实施了稀有金属和有色金属的储备战略。日本在储备战略中还实施了民间企业储备配合措施，许多品种的储备量定为国家储备与民间储备量的相加，如钒、锰、钴、镍等 7 种稀有金属，国家储备 42 天的国内基本消费量，民间储备 18 天的基本消费量。近年来日本还将稀土、铟、铂等新兴材料金属稳定供应的对策研究纳入国家能源资源战略规划中。美国在“沙漠风暴行动”和 10 年前卡特里娜飓风来袭的紧急状态下，动用过石油储备。在此期间，美国用 20 多年发展扶持的“页岩气革命”获得成功，对能源供应产生重大影响。

我国近年来在舟山建立了国家石油储备油库，并适时实施过铜等金属的储备。

与矿产品储备相辅相成的是矿产地储备。美国实施矿产地储备的做法由来已久。美国长期禁止开发国内石油，在中东等地变相建立石油供给体系；美国国内稀土停产，全部依靠进口；大量进口铜铝等金属，少量进行国内开采生产。近年美国铝的消费量在 400~500 万吨/年，年净进口量在 200 万吨以上，国内多个铝厂关闭。几十年前日本在全球范围实施勘查资助，选择合适的项目投融资参股获取资源储备。

4.3 构建生态矿业工程

生态工程这一新的科学概念从提出到现在也只有 40 多年的历史，其目的就是解决社会经济发展和生态环境保护相协调的问题，即可持续发展问题。倡导生态矿业工程的理念，就是要做到在矿业项目规划、立项、设计、施工建设、生产、闭坑的全过程，将环境保护和环境治理、生态修复融为项目的有机组成元素，保证各阶段的资金投入，落实各阶段的社会责任和责任人(见图 2)。

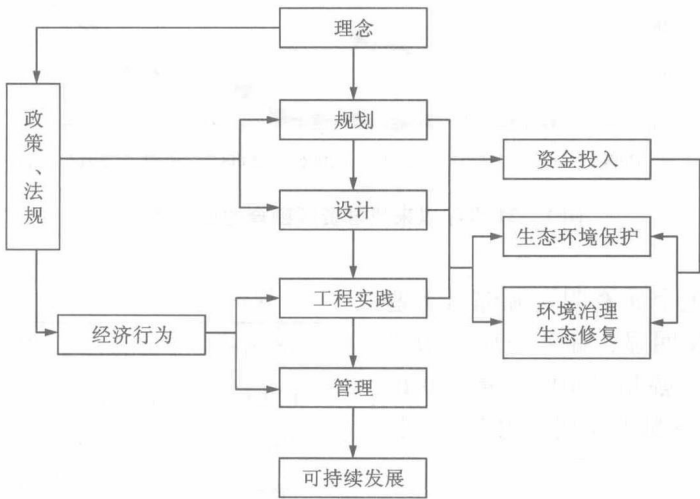


图 2 生态矿业工程的理论框架

矿产资源开发之前的生态环境本底调查是构建生态矿业工程的基础，其内容主要包括：环境空气质量现状评价；地表水环境质量现状调查与评价；地下水现状监测与分析；生态系统类型及特征调查；植物区系及特点调查分析；野生动物资源及水生生物调查与分类评价；土壤环境质量现状调查；土壤浸湿和水土流失现状调查；土地利用现状调查等生态环境现状总体评价。

根据评价，分析开发潜在的破坏因素，制定从源头上控制干扰和破坏的技术路线与措施，计算出不同阶段所需资金，根据具体情况分别纳入基建投资的环保基金或计入生产成本。生态保护和修复的费用应不低于基建投资的 15%~20%，视分类、内容及地域不同有所差异。

4.4 2015 年中国渡过 WTO 十五年保护期后对中国矿业的影响

2015 年中国渡过 WTO 十五年保护期后,对矿业最根本的影响是:中国必须对外开放各行各业,允许外资进入中国所有行业,包括目前国家控制的矿业、交通、直销等。这对于中国矿业来说是机遇,也是挑战。

首先,成本低廉的矿产品免税进入中国。享受低价矿产品的同时,国内矿业企业面临着生存的挑战,如同当下的铁矿石,进口矿价格可能低于国产矿价格。

二是矿业从勘查到建设、生产经营整个产业链都允许国外企业进入、参与,国内企业将与外企同台共舞,使得竞争加剧。同时国际化矿业企业的进入也带来了国际化的经营管理理念、模式,对我国矿业深度融合国际矿业会起到积极的推进作用。

三是更加注重可持续发展。强调可持续发展主要包括以下内容:

(1)实施生态矿业工程,加强环保投入。发达国家的矿业开发中,环境保护和治理是重要环节和内容,设计、建设和运营期间工作内容较多,工作量和历时均较长。

(2)社区关系。除了征地等一次性经济补偿外,关注对当地经济的带动:就业、医疗、文化教育、通讯、运输等以及社会公益事业,强调履行企业的社会责任。

四是倡导安全舒适的工作环境,强化矿业企业的信息化建设。远程遥控和自动化采矿将是矿业发展方向。

5 立足“一带一路”战略,制定全球矿产资源战略的顶层设计

当前国家做出“一带一路”和支持“两洋铁路”建设的战略部署,通过基础设施互联互通、经贸合作和外交关系深度发展,为走出去开发利用海外沿线国家资源提供了重大战略机遇。

5.1 矿业企业“走出去”的概况

近二十年来,中国的海外资源开发取得了可喜的进展,为中国的工业化进程和企业国际化作出一定的贡献。获得了铜金属生产能力 72 万吨/年,在建铜矿山项目设计铜金属生产能力 81 万吨/年,海外铝土矿项目投产合计产能 280 万吨,在建氧化铝设计生产能力 200 万吨/年的成果。海外资源开发推动了当地经济发展,为当地创造了就业机会,带去了福祉和发展

活力,大大提升了中国的国际形象。

我国的金属矿山企业走出去始于 20 世纪 80 年代末,中钢与澳大利亚恰那铁矿合作经营。90 年代首钢收购秘鲁铁矿,中国中冶承建并经营巴基斯坦山达克铜矿,中国有色收购赞比亚谦比西铜矿,五矿与美铝签订长期协约,以平均生产成本 40 万吨/年的氧化铝供应 30 年。

2008 年以后,我国矿业企业开始大规模投资开发海外金属矿产资源项目,至今已投入几百亿美元。但从效果看,成绩并不理想,对海外资源的获取能力比较弱,成功率仅 20% 左右,至今没有形成对国内资源需求的有效供给,或矿业企业竞争能力的显著提高。

5.2 应重视风险管理

我国矿业企业海外资源开发成功范例较少的主要原因在于企业国际化水平很差,对海外开发(投资)项目风险评估不足,缺乏风险防控手段。

我国企业境外资源开发多在发展中国家,经济欠发达地区,面临信息真实性参差不齐,矿业政策继承性差,政局不稳,基础设施、环境保护、社区关系要求高,以及法律、信用风险等问题,因此必须特别重视项目的风险评估和管理。项目并购前,应做详尽的调查,明了要购买的股份或资产的全部情况,以及企业的历史数据和文档、管理人员的背景等。认真进行项目资源风险、市场风险、建设条件风险、管理风险、技术风险、资金风险和政情风险的评估。区别风险的类别,评价风险的等级,按等级及出现概率排序。研究风险防控措施,化解风险的措施以及处理风险的补救措施。对国际经济软法依然应给予必要的关注与应对。为判断并购项目的质量,确定必要性和可行性,可先初步进行前期尽职调查。

5.3 严格执行互利双赢共同发展方针

我国的海外资源开发战略要树立可持续发展的理念。宗旨之一,应该是互通有无,互利互惠。

我国提出“一带一路”战略,就是依靠中国与有关国家既有的双多边机制,借助既有的、行之有效的区域合作平台,主动地发展与沿线国家的经济合作伙伴关系,共同打造政治互信、经济融合、文化包容的利益共同体、命运共同体。

目前中国产能过剩,外汇资产富余,能源、矿产资源缺乏,对外依存度高,东西部发展不均衡。“一带一路”沿线涵盖 50 多个国家,发展极不平衡,一些发展中国家基础设施相对落后,但拥有丰富的资源,中国一些银行愿意进行海外投资,或者通过亚投行获得资金支持,这是互利双赢的。

5.4 适当仿效日本机制

日本是一个资源十分匮乏的国家,20世纪80—90年代,日本以“财团”模式进行资源扩张战略,通过综合商社联合体统领日本企业,对外高度地集中统一,在资源国家积极参与资源项目融资、参股、收购活动,对保障矿产资源供应起了关键作用。

参股包销是资源匮乏的日本快速发展的成功经验之一。其风险小,受市场波动影响小,与大股东利益分享、风险共担,对解决资源紧缺的燃眉之急甚为有益。同时,日本虽然资源对外依存度高,但是日本的资本早就渗入了世界各地的矿产资源地,在很大程度上日本可以对冲掉进口矿产特别是在高价位时进口矿产资源的代价,优势显而易见。尽管国际经济环境时过境迁,但如果机制改革适当,机遇仍然存在。20世纪80年代末期,我国与澳大利亚合资开发恰那铁矿,包销全部产品,也起到了缓解我国快速工业化时期铁矿石供应的燃眉之急。

6 强化矿业企业的信息化建设

随着大型智能化采掘设备的出现,互联网、通讯技术的进展,矿业企业提升信息化建设水平已成为可能。矿业企业特别是地下矿山作业环境较恶劣,强化信息化建设的需求更为迫切。

6.1 自动化采矿是矿业发展的方向

远程遥控和自动化采矿开辟了这样的途径,一是它可以提高劳动生产率,根据发达国家示范采区的资料介绍,劳动生产率大概最少可以提高90%;二是可以降低生产成本,改善劳动条件;三是可以真正实现安全生产,基本达到“采矿办公室化”。

国际上的一些矿业强国,已经在这个领域进行了20多年的探索,在加拿大、智利、印尼、澳大利亚、瑞典、芬兰、南非等国都建立了示范矿山或示范采区,使远程遥控和自动化采矿的发展初具规模。近年

来,国际上著名的几家采矿设备公司,不仅成批生产了智能化采掘设备,还开发出智能矿山技术和系统,如AutoMine系统、AutoMine-Lite系统、OptiMine系统和MineLan系统,利用这些技术,这些公司正逐步由原来单一的设备供应商向技术解决方案供应商转变。

6.2 用示范工程引领推动我国矿业信息化建设

我国的自动化采矿发展已有一定基础。远程遥控和自动化采矿技术以通讯、网络和信息化技术发展为依托。目前我国的通讯、网络信息技术的发展水平接近世界水平。“互联网+”、大数据云端等技术迅速发展,“工业化、信息化”两化融合的大潮涌动,将助推远程遥控和采矿自动化的起步。近年来,我国地下矿山以保障人员作业安全为宗旨的“六大系统”建设,使多数矿山建成了井下光纤主干通信网络。视频监控、环境监测等已在许多大中型矿山付诸实施。部分固定安装设备的无人值守远程监控也在某些重点矿山得到应用。微震监测系统在少量深部矿山投运。矿业仿真、模拟技术和软件在业界得到普遍应用。部分国家支持的专项课题研究,取得一定成果,都为自动化采矿奠定了良好基础。

不过,远程遥控和自动化采矿示范工程在我国至今仍为空白。要想在这方面实现零的突破,为打造矿业强国提供技术支撑,重要的是勇于创新的精神,在金属价格持续疲软的环境下,也需要政府在政策与资金上的大力支持。当前国家做出“一带一路”的重大战略部署,走出去开发利用海外沿线国家资源将是一种趋势。毋庸置疑,采用先进、安全、高效的开采工艺是实施海外资源开发的基准。在矿业信息化建设上的重大突破,会使我们“走出去”在技术上如虎添翼,也会成就我们的矿业从大变强的中国梦。

参考文献(略)

大型浮选机研究进展及 680 m³ 浮选机研究

沈政昌 樊学赛 谭 明 吴 峰

(北京矿冶研究总院矿物加工科学与技术国家重点实验室,
北京市高效节能矿冶技术装备工程技术研究中心, 北京, 100160)

摘 要: 大型浮选机在提高选别指标、降低基建投资、智能控制、节约能耗等方面优势明显, 浮选机的大型化是浮选机发展的重要方向。目前, 320 m³ 浮选机已在工业应用中取得成功, 500 m³、600 m³ 浮选机也都完成了设计研发, 浮选机大型化进程显著加快。本文应用 CFD 方法研究了我国最新最大的 680 m³ 浮选机, 通过分析浮选机内部流型, 表明设备形成了适宜矿物分选的动力学环境, 对比了不同容积浮选机的功率准数 N_p 、弗劳德常数 F_r 、流量准数 N_a 等动力学特征参数, 研究表明, 680 m³ 浮选机具有优异的流体动力学特性。

关键词: 放大; CFD 仿真; 浮选机; 动力学分析

Advances in the Large Scale Flotation Cells and Research in 680 m³ Mechanical Agitation Flotation Cell

Shen Zhengchang, Fan Xuesai, Tan Ming, Wu Feng

(Beijing Engineering Research Center on Efficient and Energy Conservation Equipment of Mineral Processing,
State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China)

Abstract: The large size cell has obvious advantages in improving mineral processing index, reducing capital cost, intelligent control and saving power. It is an important developing direction for flotation cell scale - up. Nowadays, 320 m³ flotation cells have proved to be successful in the industrial application, and 500 m³, 600 m³ flotation cells have been designed and researched. The largest and latest flotation cell with effective volume 680 m³ in China is researched by CFD simulation. It is demonstrated that the flotation cell forms suitable hydrodynamic environment for separating mineral particles by analyzing flow pattern. The impact of volume on the power number N_p , the Froude number F_r , the air flow number N_a and so on are investigated. It is indicated that the large flotation cell is with excellent hydrodynamic characteristics. This research proves that the cell has good fluid dynamics.

Keywords: scale - up; CFD simulation; flotation cell; hydrodynamic analysis

浮选法适用于 90% 的有色金属和 50% 以上的黑色金属的选别, 是矿物加工领域重要的选别方法^[1]。浮选机是实现浮选过程的关键装备, 浮选机的性能优劣直接决定着整个选矿厂的生产指标, 因此不断提高浮选机对不同矿物的适应性、优化浮选机的性能对提高选矿厂生产效益、改善矿物资源利用率至关重要。近年来, 矿产资源贫、细、杂化日益严重、禀赋恶化明显, 这对浮选机的处理能力、多样化、单体性能提出了更高的挑战。大型浮选机在提高选别指标、降低基建投资、智能控制、节约能耗等方面优势明显, 而且选矿厂规模日益扩大, 因此, 浮选机的大型化是浮选机发展的重要方向^[2]。自 20 世纪 40 年代, 浮选机

的研究人员就开展了浮选机大型化的基础研究, 经过长期的技术研究和积累, 以及 CFD 技术的引入^[3-9], 近 20 年来浮选机的大型化进程明显加快。

1 大型浮选机的研究进展

近年来, 随着国际及国内经济的高速发展, 工业生产对矿产资源的需求量日益增大, 浮选机的大型化成为了各主要浮选机研发机构的研究重点和热点。芬兰 Outotec 公司实现了 Tank Cell、Skim Air 型浮选机的大型化, 并在澳大利亚进行了适应性研究。丹麦 FLsmidth 公司完成了 Wemco Smart Cell、Dorr - Oliver 和 XCELL 型浮选机的大型化, 且在美国进行了性能对

比试验研究;北京矿冶研究总院研发了 KYF-320 m³ 浮选机,并取得了成功的工业应用,为当前世界上工业应用中最大的浮选机;其他浮选机研发机构,如美卓、Bateman 等公司,也深入开展了相关方面的研究。本文重点介绍具有代表性的 OK-TankCell 型浮选机、Wemco 1+1TM 浮选机、BGRIMM 浮选机的放大原则。

1.1 OK-TankCell 型浮选机

Outotec 公司以浮选柱为原型,加入了机械搅拌装置,研发成功了 OK-TankCell 型充气机械搅拌式浮选机,并于 1983 年在皮哈萨米选矿厂取得了工业应用。OK-TankCell 型浮选机(见图 1)开发了 FloatForce 搅拌机构,实现了叶轮区矿浆和空气的分区流动;设计了内部周边环形溢流槽、外部周边环形溜槽、内部中央多纳圈型溜槽、内部径向溜槽和混合型溜槽。世界范围内,OK-TankCell 型浮选机总安装台数达 2000 多台。Outotec 公司在浮选机放大过程中应用了自身的浮选机放大技术,其主要包括:转子-定子系统结构参数的放大;槽体几何形状的放大;矿物悬浮能力相似;泡沫特性相似。以此为基础,Outotec 公司根据浮选机放大原则先后研发了 100 m³、200 m³、300 m³ 浮选机,并在矿山取得了成功的工业应用,500 m³ 浮选机也已完成设计研发,并在芬兰完成了工业试验,并初步完成了 620 m³ 浮选机研究设计工作。

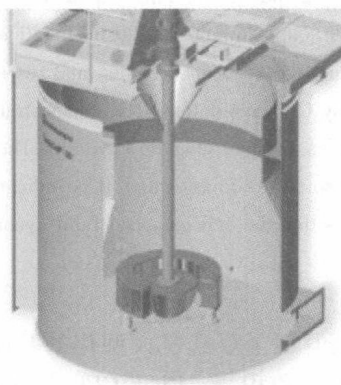


图 1 OK-TankCell 型浮选机结构示意图

1996 年,美国 Phelps Dodge 公司莫伦西-麦特卡尔夫铜矿选矿厂在铜浮选粗选回路中以“2-2-2”方式配置了 6 台 100 m³ 的 OK-TankCell 型浮选机。由于厂房空间原因,回路设计中将浮选槽按“U”形布置,功率消耗有了明显的降低,浮选指标优异。1999 年 5 月,80 台 100 m³ OK-TankCell 型浮选机在智利 BHP/RTZ 埃斯康迪达铜矿选矿厂投入生产,与以前所用浮选机相比,OK-TankCell 型浮选机的应用使

BHP 的精铜矿铜品位和回收率有了很大程度的提高。2007 年,新西兰 Macraes 金矿选矿厂粗选作业中选用了 3 台 300 m³ 的 OK-Tankcell,回收率提高了 3%^[10]。

1.2 Wemco 1+1TM 浮选机

Wemco 1+1TM 自吸气机械搅拌式浮选机(见图 2)以其独特的浮选机放大规则为依据。1987 年,Degner 等人提出以一系列流体动力学参数为核心的 Wemco 1+1TM 自吸气式浮选机放大规则,放大规则能够保证其结构放大的同时其流体动力学特性相似^[11]。其放大规则包括:

(1)槽体液面单位面积的表观气体流速。它由进入浮选槽中的气体流量决定。浮选机液面处的单位面积气体流量小,会导致疏水矿物的回收率降低,而单位面积气体流量过大,则会出现矿浆表面扰动或翻花现象。为了保证泡沫层平稳,一般浮选机作业时所允许的最大单位面积气体流量为 10.67~12.2 m³/min。

(2)分散器区域气体和矿浆的停留时间。它可以表征气泡与矿粒的碰撞接触时间,由单位时间内处于分散器区域中的矿浆和气体总体积决定。浮选机分散器的体积就是分散器腔所包含的容积。

(3)分散器的功率强度。表示每立方英尺分散器体积的功率,是由分散器区域所决定的另外一个参数。

(4)浮选槽的循环强度。循环强度表示矿浆在浮选槽内穿过吸气机构的机会。浮选槽内循环强度越大,分散器区域内矿浆与进入的气体接触机会越多。

(5)矿浆在竖管中的速度。该速度为矿浆在竖管中的单位面积的流量,它取决于通过竖管横截面的液体速度。为了改善大型浮选机中固体悬浮特性,避免大型浮选机沉槽的问题,浮选机规格增大的同时需适当提高矿浆速度。因此,这个参数可对浮选机内矿物的悬浮效果定量化。

(6)气体流量数(Q/DN^3 ; Q 为气体流量, N 为转子转速, D 为转子直径),表示搅拌系统的吸气能力,直接决定自吸气式浮选机进气速率的大小,决定了浮选机的吸氧量。

Wemco 1+1TM 自吸气机械搅拌式浮选机中,130 m³ 的浮选机有 400 多台已用于世界多地的矿山,160 m³ 浮选机也已在南美洲投入生产。2004 年,FLSmidth 公司研制的 SmartCell-250 m³ 浮选机,在 Mineral Los-Pelambres 矿进行了工业试验,代替了粗选回路中的 SmartCell-160 m³ 浮选机,能耗费用减少了 7%,安装功率降低了 15%。试验成功后,Mineral Los-

Pelambres 公司为提高处理率, 采购了 10 台 257 m³ 的浮选机, 将日处理量由 12 万吨提高到 14 万吨。2014

年, FLSmidth 公司在 IMPC 国际选矿会议上公布了其 660 m³ Super Cell 浮选机。

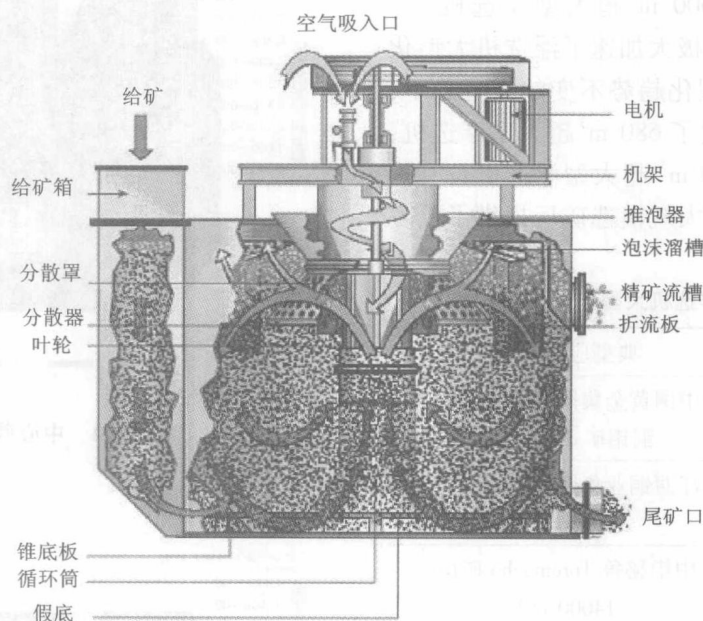


图 2 Wemco 浮选机工作原理与结构示意图

1.3 BGRIMM 浮选机

BGRIMM 型浮选机是由北京矿冶研究总院研发的充气机械搅拌式浮选机, 如图 3 所示, 已在国内各大矿山取得了成功的工业应用, 并已走入国际市场。

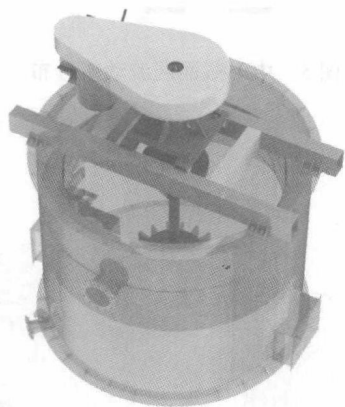


图 3 BGRIMM 型浮选机结构示意图

BGRIMM 型浮选机的主要特点在于: 独特的叶轮-定子系统, 叶轮采用后倾高比转数叶片, 大循环量低压头, 矿浆充分悬浮, 矿粒分布均匀; 低阻尼直悬式定子, 改变矿浆流向, 起导流定向作用; 双推泡锥槽体结构、创新的双泡沫槽, 内泡沫槽不仅可以推送泡沫, 而且保证了浮选泡沫及时顺利排出, 增加了

泡沫厚度, 缩短了泡沫输送距离, 有利于泡沫层稳定; 预分配定向流动空气分配器能够使空气分散均匀, 充气矿浆混合物流动路线合理, 气泡比表面积大, 增大了气泡和颗粒的碰撞黏附概率^[12]。

BGRIMM 充气机械搅拌式浮选机的放大方法可概括为:

充气量: 大小可以调节, 浮选机放大时充气部件不变。

槽体放大: 以槽体横截面面积与叶轮直径的比值 $\frac{S}{D}$ 为放大因子, 槽体放大遵守放大规则: $\frac{S}{D} = a_1 V^{b_1}$ 。

叶轮放大: 包括叶轮尺寸放大和叶轮搅拌雷诺数放大。叶轮尺寸放大的放大因子为叶轮直径, 放大规则为: $D = a_2 V^{b_2}$ 。叶轮搅拌雷诺数放大在一定程度上取决于浮选机规模的大小: 当浮选机容积较小时, 整个系列的浮选机叶轮设计可以依据浮选槽内悬浮准数相等的原则; 当浮选机容积较大时, 以悬浮准数为放大因子, 其放大规则为: $J = a_3 \cdot V^{b_3}$ 。

槽内流体动力学特征相似: 以 S/D 倍的叶轮线速度为放大因子, 其放大依据为: $\frac{S}{D} \nu = a_4 V^{b_4}$ 。

上述方法不仅适用于充气机械搅拌式浮选机, 也适用于自吸气机械搅拌式浮选机, 不同点在于自吸气机械搅拌式浮选机放大过程还应考虑吸气部件的