

# 中国氧化铝生产技术大型化发展现状与趋势<sup>\*</sup>

许文强<sup>1</sup>, 嫣艳<sup>1</sup>, 潘晓林<sup>2</sup>, 涂赣峰<sup>2</sup>

(1. 东北大学设计研究院(有限公司), 辽宁 沈阳 110013; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:**介绍了中国氧化铝生产核心技术的发展历程和主要现状,论述了系列化大型管道化溶出拜耳法技术处理中低等品位一水硬铝石型铝土矿的技术进展和大型化、短流程、集约化氧化铝生产技术的工程应用情况,同时介绍了非铝土矿资源提取氧化铝综合利用技术在大型化方面取得的技术进展;最后探讨了中国氧化铝工业发展面临的主要问题、发展趋势和相应对策。中国氧化铝生产技术的不断突破、技术装备水平的整体提高、运营管理水平整体提升是实现氧化铝工业绿色、健康、可持续发展的关键因素。

**关键词:**拜耳法;管道化溶出;大型化;铝土矿;氧化铝;中国

**中图分类号:**TD952.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2017)01-0108-05

**DOI:**10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.01.020

## Current Situation and Development Trend of Large-Scale Production Technology of Alumina in China

XU Wenqiang<sup>1</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, PAN Xiaolin<sup>2</sup>, TU Ganfeng<sup>2</sup>

(1. Northeastern University Engineering and Research Institute CO., LTD., Shenyang 110013, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The development history and main status of alumina production technology in China were introduced in this paper. The technology developments of refining low and medium grade diasporic bauxite ores by the Bayer process with serialization and large-scale tube digestion, and the engineering applications of alumina production technologies with enlargement, short process and intensification were also introduced. In addition, the achievements of refining alumina from non-bauxite resources were mentioned. Finally, the main problems, development trend, and countermeasures of China's alumina industry were discussed. The continuous breakthrough of China's alumina production technology, the overall improvement of technical equipment level, and the overall promotion of operation and management are the key factors to achieve green, healthy, and sustainable development of alumina industry.

**Key words:** Bayer process; tube digestion; large-scale equipment; bauxite; alumina; China

## 1 中国氧化铝生产基本概况

随着中国电解铝行业的突飞猛进,中国氧化铝行业也取得了飞速发展,到2015年底,中国氧化铝

产能约6 500万t/a,产量5 898万t/a,基本与电解铝生产规模相匹配。相比之下,同期世界氧化铝产量(含中国)为11 355万t/a,中国氧化铝总产量占世界52%,使得中国进口氧化铝的比例也由2006

\* 收稿日期:2016-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51104041);中央高校基本科研业务费资助项目(N130402010)

作者简介:许文强(1979-),男,硕士,高级工程师,主要从事轻金属设计研究工作。

通讯作者:潘晓林(1981-),男,博士,副教授,主要从事氧化铝生产理论和铝资源综合利用工作。

年的 34% 降低到 2015 年的 7% (见表 1)。中国氧化铝无论是市场容量、消费量,还是核心技术装备水平都已位居世界前列,中国氧化铝的发展对中国氧化铝市场的需求提供了强有力的支撑,这得益于生产规模大型化和主体装备大型化的良性互动发展。在国内总产能中,以一水硬铝石为原料生产氧化铝方面,从 2008 年至 2016 年,氧化铝单线 500 ~ 1 000 kt/a 大型化管道化溶出拜耳法系列技术贡献了中国

总产能的 33%,成为主流生产系列技术;以三水铝石为原料生产氧化铝方面,主流系列是单线 400 kt/a 氧化铝管道化溶出加停留罐拜耳法系列技术,约占目前中国总产能的 17%,氧化铝单线 500 kt/a 管道化溶出加停留罐拜耳法系列技术发展迅速,目前已占中国总产能的 14%,而过去从 1954 年至今约 60 年间投用的传统压煮溶出拜耳法技术和烧结法、混联法技术只占目前中国总产能的 36%。

表 1 2006 - 2015 年中国、全球氧化铝产量

| 年份         | 2006   | 2007   | 2008   | 2009   | 2010   | 2011   | 2012   | 2013    | 2014    | 2015    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 全球氧化铝/kt   | 73 778 | 78 211 | 83 217 | 77 730 | 85 310 | 92 049 | 95 601 | 103 280 | 104 160 | 113 550 |
| 世界其他/kt    | 60 082 | 58 863 | 62 151 | 54 142 | 56 355 | 57 971 | 58 014 | 59 327  | 56 386  | 54 572  |
| 中国产量/kt    | 13 696 | 19 348 | 21 067 | 23 588 | 28 955 | 34 078 | 37 587 | 43 953  | 47 774  | 58 978  |
| 中国占全球比例/%  | 19     | 25     | 25     | 30     | 34     | 37     | 39     | 43      | 46      | 52      |
| 中国增速比      | 0.61   | 0.41   | 0.09   | 0.12   | 0.23   | 0.18   | 0.10   | 0.17    | 0.08    | 0.23    |
| 中国出口/kt    | 0.0    | 0.0    | 36.7   | 55.0   | 57.0   | 76.3   | 43.3   | 186.3   | 120.0   | 293.0   |
| 中国进口/kt    | 6 911  | 5 195  | 3 667  | 5 584  | 4 312  | 1 881  | 4 691  | 3 831   | 5 280   | 4 654   |
| 中国净进口/kt   | 6 911  | 5 195  | 3 631  | 5 529  | 4 255  | 1 805  | 4 648  | 3 645   | 5 160   | 4 361   |
| 中国表观消费量/kt | 20 607 | 24 543 | 24 697 | 29 117 | 33 210 | 35 883 | 42 235 | 47 598  | 52 934  | 63 339  |
| 中国进口比例/%   | 34     | 21     | 15     | 19     | 13     | 5      | 11     | 8       | 10      | 7       |

数据来源:中国有色金属工业协会。

近年来,我国在处理一水硬铝石型铝土矿技术方面取得了巨大的进步,特别是近年来采用拜耳法大型管道化溶出技术处理中低等品位铝土矿,完成了主体核心技术装备及辅助装备大型化、国产化、短流程和集约化转变,从而实现了中低品位铝土矿的经济生产,主要技术和经济指标达到世界先进水平,一定程度上克服了处理一水硬铝石型铝土矿在成本方面的不足,其低成本特征在市场竞争中得到了全球氧化铝业界的认同。

2 中国氧化铝生产技术大型化

2.1 核心技术大型化

中国氧化铝生产技术从 1954 年起步,从 1954 年至 1995 年,中国处理一水硬铝石型铝土矿氧化铝主流系列是单线约 200 kt/a 氧化铝系列技术,生产技术主要有处理中等品位铝土矿的混联法和处理低品位铝土矿的烧结法等传统技术。从 1995 年至 2008 年,拜耳法技术在中国迅猛发展,氧化铝主流系列是处理 A/S≥7 ~ 9 的铝土矿单线≤400 kt/a 氧化铝压煮溶出拜耳法技术<sup>[1]</sup>,以上传统技术目前约

占中国总产能的 36%;2008 年以前氧化铝厂系列规模主要受核心单元压煮溶出技术的规模限制,单线最大产能只有 40 万 t。

中国铝土矿资源截止 2015 年达到 40.8 亿 t,多以难磨、难溶、A/S < 5 的一水硬铝石型铝土矿为主,经济高效地处理这部分低品位铝土矿一直是中国氧化铝行业面对的主要问题。

近几年,在总结氧化铝各阶段技术开发过程的经验基础上,通过致力于氧化铝节能减排技术及装备的开发,在氧化铝高压溶出核心技术装置大型化方面取得了突破性进展,东北大学设计研究院 (NEUI) 于 2007 年率先开发了当时国内单组产能最大的 500 kt/a 氧化铝大型管道化加停留罐溶出技术及装备<sup>[2]</sup>,并于 2008 年 12 月在孝义兴安化工有限公司投运,成功解决了氧化铝大型化的核心技术难题。这是当时中国拜耳法处理一水硬铝石型铝土矿第一条单组达到 500 kt/a 氧化铝的大型管道化加停留罐溶出机组,取得了溶出高压汽耗 1.5 t/t Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的领先技术经济指标。

此后,NEUI 对氧化铝大型化技术进行了持续优化开发,相继开发出 NEUI 600 ~ 1 000 kt/a 管道化

加停留罐溶出技术<sup>[3]</sup>。2012 年,山西兆丰铝业有限公司 NEUI 700 kt/a 率先投入产业化应用,这是目前中国最大的大型管道化加停留罐溶出技术氧化铝企业。同传统溶出技术相比,该技术节能效果达 1.71 GJ/t  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,节约占地 30%,减少劳动定员 36%,降低投资 35%。

随着 NEUI 大型管道化加停留罐溶出技术的持续开发,为进一步优化氧化铝厂核心技术,NEUI 相继开发出 600 ~ 1 000 kt/a 全管道化溶出技术及装备,2014 年,NEUI 800 kt/a 在山西复晟铝业率先投入产业化应用,是目前中国最大的全管道化溶出技术大型化氧化铝企业,成功完成了氧化铝大型化核心技术的再创新;2016 年 4 月,NEUI 1 000 kt/a 在山西灵石项目投入产业化应用,再次开创了中国氧化铝厂全管道化溶出技术大型化的先河。

近 10 年中国氧化铝拜耳法生产技术的发展经历了从单线小规模、高能耗、低效率向单线大规模、低能耗、高效率发展的过程。从 2008 年至今,氧化铝单线 500 ~ 1 000 kt/a 系列化一水硬铝石大型管道化加停留罐溶出拜耳法技术和大型全管道化溶出拜耳法技术发展迅速,目前已占中国总产能的 33%,该技术使低品位的一水硬铝石型铝土矿实现了经济生产,生产装置的大型化促成了投资成本和运行成本的大幅降低。特别是随着 NEUI 1 000 kt/a 大型管道化溶出拜耳法技术于 2016 年投产,氧化铝大型化技术的产能占比将会进一步提升。

中国一水硬铝石型铝土矿生产氧化铝技术的进步,也促进了近年以进口三水铝石矿为原料的氧化铝企业的技术进步。以三水铝石矿为原料的氧化铝主流系列是单线 < 400 kt/a 氧化铝系列技术,约占目前中国总产能的 17%,主要采用单流法大型管道化溶出技术和新型二段分解生产砂状氧化铝技术,2011 年 7 月,山东南山集团铝业公司 NEUI 400 kt/a 率先投入产业化应用,是目前中国单线最大的三水铝石管道化溶出和唯一的二段分解生产砂状氧化铝企业。近年来,氧化铝单线 500 kt/a 系列技术发展迅速,目前已占中国总产能的 14%,主要采用单流法大型管道化加停留罐溶出拜耳法技术。2012 年,在山东魏桥铝业 NEUI 500 kt/a 率先投入产业化应用,是目前中国最大的单流法大型管道化溶出、一段分解氧化铝企业。

## 2.2 辅助技术大型化

在实现氧化铝核心技术装备大型化的基础上,中国配套辅助装备技术大型化方面也取得了高效进展,在溶出料浆沉降装备、铝酸钠溶液蒸发装备和氢氧化铝焙烧装备方面均取得了举世瞩目的成果。主要大型化氧化铝生产辅助技术装备如下:

(1)  $\Phi 24$ 、 $\Phi 26\text{m}$  高效深锥沉降槽成套技术,沉降槽从  $\Phi 12\text{m}$  发展到  $\Phi 24\text{m}$ 、 $\Phi 26\text{m}$ ;实施了分离粗液自流短流程技术,集成分离槽强制稀释技术、高效进料混合技术。同比传统工艺节约占地 25%,降低投资 20%。

(2) 大型六效降膜蒸发器成套技术,从蒸水量 200 t/h/套、汽水比 0.26 发展到蒸水量 400 t/h/套、汽水比 0.20 ~ 0.22。

(3) 大型旋流分离式两段七效降膜蒸发成套技术,从蒸水量 200 t/h/套、汽水比 0.24 发展到蒸水量 400 t/h/套、汽水比 0.18 ~ 0.21。

(4) 大型气态悬浮焙烧炉成套技术,从焙烧氧化铝产能 1 350 t/d,热耗 3.18 GJ/t  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,发展到产能 3 500 t/d,热耗 2.85 ~ 3.01 GJ/t  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

## 2.3 区域融合、短流程、集约化生产技术

在实现氧化铝核心技术装备和辅助装备大型化的基础上,拜耳法技术进一步向区域融合技术、短流程、集约化技术方向发展,在拜耳法氧化铝很多环节均实现了氧化铝生产的短流程、集约化生产技术。主要的区域融合、短流程、集约化生产技术包括:(1) 矿浆制备及预脱硅系统集约化、短流程技术;(2) 三水铝石矿磨矿进料系统短流程技术;(3) 种子分解新型短流程集约化新技术<sup>[4]</sup>;(4) 综合过滤系统集成一体化节能新技术<sup>[5]</sup>;(5) 大型落地式流态化氧化铝储仓短流程输送新技术;(6) 无挡墙氢氧化铝仓及自动进取料技术<sup>[6]</sup>。

## 2.4 非铝土矿资源提取氧化铝大型化利用技术

中国铝土矿保有储量较低,人均占有量仅为世界平均水平的 1.5%;然而,中国拥有丰富的高铝粉煤灰、拜耳法赤泥等非铝土矿资源,这为中国氧化铝工业的可持续发展提供强有力的支撑。2013 年 10 月,NEUI 率先开发的改良预脱硅碱石灰烧结法处理粉煤灰生产氧化铝技术成功应用于内蒙古大唐国际再生资源开发有限公司综合利用粉煤灰生产铝硅钛

合金示范项目,生产冶金级氧化铝 200 kt/a,消耗粉煤灰 520 kt/a,是世界首例商业化运行的高铝粉煤灰提取氧化铝企业。以高铝粉煤灰综合利用为代表的非铝土矿综合利用技术持续成熟和完善,对我国缓解天然铝土矿短缺具有战略示范意义。目前,中国开发的非铝土矿资源提取氧化铝综合利用技术主要包括:(1)预脱硅碱石灰烧结法处理高铝粉煤灰提取氧化铝及其综合利用技术<sup>[7]</sup>;(2)创新石灰烧结法处理低品位含铝资源提取氧化铝及其综合利用技术<sup>[8]</sup>;(3)高铝粉煤灰烧结水热法生产硅酸钙粉体及氧化铝技术<sup>[9]</sup>;(4)亚熔盐法处理粉煤灰提取氢氧化铝技术<sup>[10]</sup>;(5)低温低钙烧结法粉煤灰综合利用技术开发<sup>[11]</sup>;(6)霞石矿烧结生产氧化铝及其综合利用技术<sup>[12]</sup>。

### 3 中国氧化铝生产技术大型化发展存在的主要问题

尽管中国氧化铝的产能、产量和我国自主研发的大型化管道化溶出拜耳法系列技术和管道化溶出加停留罐拜耳法系列技术在容量和能耗等部分技术经济指标处于世界领先水平,但我国的氧化铝行业仍处于需要“持续强化”的状态,行业的可持续性发展仍然需要核心技术的进一步突破。

中国氧化铝核心技术与国际综合一流技术水平相比,主要差距如下<sup>[13-18]</sup>:

(1)单系列产能:目前,国外氧化铝单系列生产规模已达到 1 500 kt/a,而国内仅达到 1 000 kt/a。

(2)氧化铝核心技术:由于中国一水硬铝石型铝土矿和国外三水铝石矿理化特性的差异,中国氧化铝普遍采用高温高碱单流法管道化溶出技术,而国外普遍采用低温低碱单流法列管溶出技术和双流法列管溶出技术。

列管溶出技术与管道化溶出技术相比,具有单系列产能大 2 倍,占地面积少 30%,综合造价低 35%,运营成本低 20% 以上等优势。

双流法列管溶出技术相比以上两种单流法技术,更是具有巨大优势,由于采用了母液、矿浆单独加热技术,可以有效避免系统结疤,可提高热利用率约 50%,同时大幅提高清理检修周期达到 6 个月,大幅提高了劳动生产率。

(3)分解技术:目前国内仍然主要采用一段分解生产氧化铝技术,产品多为中间状氧化铝,而国外

普遍采用二段分解生产技术,氧化铝理化指标达到优于国内产品,为电解铝电流效率的提高创造了条件。

(4)难于加工处理。中国一水硬铝石型铝土矿的理化特性,决定了其拜耳法生产氧化铝溶出技术必须采用高温高碱条件,这既提高了生产能耗和投资成本,也加大了中国氧化铝单系列生产规模大型化的难度。

(5)全员劳动生产率严重偏低。国外氧化铝企业全员劳动生产率是中国企业平均水平的三倍以上。

(6)综合能耗高。国外氧化铝企业处理三水铝石型铝土矿,综合能耗一般在 7.0 ~ 8.0 GJ/t Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;而国内氧化铝企业由于处理一水硬铝石型铝土矿的先天劣势,综合能耗一般在 8.0 ~ 9.5 GJ/t Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

因此,尽管近年国内大型管道化加热停留罐溶出拜耳法技术、大型全管道化溶出拜耳法技术等大型化、短流程、集约化技术研发成功后,迅速在市场上得到推广和持续创新,有效降低了投资和运行成本,但从综合技术经济指标和长期运行结果看,中国氧化铝技术仍然落后于国外先进水平。同时,中国氧化铝企业在健康、安全、环保等方面,仍然与国外氧化铝企业相比有很大的差距。

究其原因,正是由于中国市场容量的巨大、高企的能源价格以及低劳动力成本,促使中国氧化铝行业工作者把注意力均集中在企业规模的持续扩展、节能降耗、单系列产能持续大型化等方面,围绕这些目标进行了广泛深入的研究和探索,并取得了值得骄傲的成就。但同时,也应注意到,中国氧化铝技术起步较晚,初期技术基本都是在引进国外技术基础上进行的消化吸收再创新,目前在新技术开创方面虽然取得了一定成就,但未来在核心技术的巨大突破上仍然有漫长的艰辛之路,同样,受到一次性投资能力的制约以及对投资与总体运营成本关系的把握不合理,乃至对健康、安全和环保重视不够,致使企业建设的选材质量较低,整体装备水平较低,健康、安全和环保投入较小,未来我国的氧化铝行业仍然具有不断完善的巨大空间。

### 4 中国氧化铝生产技术大型化的发展趋势

近十年,中国氧化铝技术的发展快速完成了对

中国氧化铝市场需求的强有力支撑。然而,大量技术水平同质化基础上的放量无序扩张,造成了目前氧化铝产能的相对严重过剩。未来氧化铝行业将在较长时间里,处于成本线上下小幅震荡运行。

近几年,在中国进入转型升级发展时期,基础原材料工业必将向资源、能源、物流和人力资源等成本要素具有竞争力的地区进行有序转移,这种转移势必伴随着整体技术装备水平的升级才能支撑行业良好的可持续性发展。目前,在国内进行产能转移或替代产能的起步阶段,部分企业对整体技术装备水平升级逐步明确了认识,在重视成本要素、资源要素优势的同时也在逐步追求技术装备水平的升级;但也不乏在短时间出现大规模、技术同质化的重复建设现象。这种追求短期效益的行为无益于氧化铝行业的可持续性健康发展,相反,氧化铝行业的可持续健康发展,应依赖于成本要素整体最优和整体技术装备水平持续改进的支撑。

从技术经济层面分析,我国氧化铝单系列产能大型化和国际综合一流技术水平还有较大差距,同时在综合能耗和全员劳动生产率等方面还有较大发展空间,无论是理论计算还是实践都表明,在氧化铝单系列 2 000 kt/a 级别上的系列产能大型化和规模大型化还能持续发挥降低单位产能投资和提高生产效率的作用,从这方面来看,中国氧化铝技术进一步大型化还有较大空间。未来氧化铝升级版技术将体现在以下几个方面:

(1)通过进一步优化升级以核心管道化溶出技术为标志的大型化一水硬铝石生产氧化铝系列技术,以及升级开发以核心双流法列管溶出技术为标志的大型化三水铝石生产氧化铝系列技术,采用超大型管道化和列管加热装备技术和节能型闪蒸系统,以实现氧化铝系列产能大型化、能量利用高效化的大幅提高。

(2)采用新型氧化铝二段分解生产工艺,使氧化铝理化指标达到国际标准,为电解铝电流效率的提高创造条件。

(3)通过研发、生产、运营、主体装备制造等多领域技术人员的密切合作,应用信息化技术,实现工艺操作机械化、工艺过程控制智能化、运营管理信息化,从而大幅提高劳动生产率。

(4)在工程建设方面,牢固树立“以人为本”的观念,按国际标准进行健康、安全和环保(HSE)设施

建设,加大 HSE 的投资力度。

## 5 结语

在氧化铝行业市场持续低迷的大环境下,氧化铝企业正处于资源、市场和环境等诸多不利因素的发展时期,中国氧化铝生产技术的不断突破、技术装备水平的整体提高、运营管理水平整体提升将是实现氧化铝行业绿色、健康、可持续发展的关键因素。

### 参考文献:

- [1] 毕诗文. 铝土矿的拜耳法溶出[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:51-54.
- [2] 陈万坤,彭英才. 一水硬铝石型铝土矿的强化溶出技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:217-218.
- [3] 许文强,邢国春,李保霖. 一种一水硬铝石型铝土矿的大型管道加停留罐的溶出工艺:2009103125525[P]. 2012-06-13.
- [4] 鄢艳,郭建强. 一种氧化铝生产过程中的分解过滤方法:2011104340704[P]. 2014-08-06.
- [5] 王宁,许文强,杨影,等. 一种拜耳法生产氧化铝的过滤集成一体化装置及方法:2013103824352[P]. 2015-02-11.
- [6] 许文强,刘吉. 一种氧化铝储仓系统及其输送存储方法:2013106754703[P]. 2014-03-19.
- [7] 张生,孙俊民,公彦兵. 一种由高铝粉煤灰生产氧化铝的方法:2013100060578[P]. 2015-03-18.
- [8] 于海燕,潘晓林,王波,等. 采用低铝硅比含铝资源干法或半干法生产氧化铝的方法:2012100699638[P]. 2014-07-16.
- [9] 李光柱,崔德成,于海燕,等. 一种粉煤灰烧结水热法生产雪硅钙石及氧化铝的方法. 中国:2014108460925[P]. 2016-03-16.
- [10] 刘中凯,马淑花,郑诗礼,等. 亚熔盐法粉煤灰脱铝渣水热处理后碱含量的影响因素[J]. 过程工程学报,2014,14(6):947-954.
- [11] 杨雪,邹丹,刘浩,等. 一种处理含铝原料的改良碱石灰烧结的方法:2010106174051[P]. 2013-05-22.
- [12] 吴晓华. 霞石生产氧化铝的研究进展[J]. 世界有色金属,2014(12):46-47.
- [13] Smith P. The processing of high silica bauxites—review of existing and potential processes[J]. Hydrometallurgy, 2009,98:162-176.

(下转第 118 页)

## 5 结语

(1) 锌资源主要以硫化矿为主, 主要矿物是闪锌矿。锌矿床类型主要有沉积岩容矿的海底喷气沉积矿床(SEDEX)、密西西比河谷型(MVT)。全球锌矿床分布较为集中, 主要分布在北美西部、加拿大地盾上提敏斯矿田、南美主要有秘鲁中北部多金属矿带、澳大利亚芒特艾萨内等地区。

(2) 全球锌资源储量、产量分布相对集中, 澳大利亚、中国和秘鲁三个国家的储量约占全球的 58.18%, 产量占全球总锌产量的 55.88%, 世界前十大锌生产企业的锌产量基本保持稳定。从资源角度看, 在产大型锌矿山的资源保障程度不高, 需要新建矿山以满足经济发展对锌资源的需求。

(3) 全球的锌矿以地下开采为主, 露采和联合开采的矿石量占比较低; 随着优质资源的大量开发以及锌资源开发利用技术水平的提高, 全球锌的平均入选品位从 2000 年的 7.0% 下降到 2014 年的 5.5%。国内锌资源入选品位为 4.25%, 低于全球平均水平, 但开采回采率、选矿回收率等重要采选指标与国外持平。

(上接第 112 页)

- [14] Hind A R, Bhargava S K, Grocott S C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review[J]. Colloids and Surfaces A, 1999, 146: 359 - 374.
- [15] H. A 特洛依茨基. 氧化铝的工艺计算[M]. 吕扬, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1977. 10.
- [16] Pan X L, Yu H Y, Tu G F. Reduction of alkalinity in bauxite residue during Bayer digestion in high - ferrite diasporic bauxite [J]. Hydrometallurgy, 2015, 151: 98 - 106.
- [17] Klauber C, Gräfe M, Power G. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108: 11 - 32.
- [18] Power G, Loh J S C, Vernon C. Organic compounds in the processing of lateritic bauxites to alumina Part 2: Effects of organics in the Bayer process [J]. Hydrometallurgy, 2012, 127 - 128: 125 - 149. [14] Hind A R,

## 参考文献:

- [1] 田尤, 刘廷, 曾祥婷, 等. 我国锌资源产业形势及对策建议[J]. 现代矿业, 2015(4): 5 - 9.
- [2] USGS. Mineral Commodity Summaries - Zinc [R]. Virginia: USGS, 2015.
- [3] 代涛, 陈其慎, 于汶加. 全球锌消费及需求预测与中国锌产业发展[J]. 资源科学, 2015(5): 951 - 960.
- [4] 刘三军, 欧乐明. 中国锌冶炼工业现状[J]. 矿产保护与利用, 2003(6): 36 - 40.
- [5] 戴自希. 世界铅锌资源的分布、类型和勘查准则[J]. 世界有色金属, 2005(3): 15 - 23.
- [6] 吴荣庆. 铅锌资源形势及政府支持企业"走出去"的发展战略[J]. 中国金属通报. 2006(37): 2 - 8.
- [7] 2013 - 2015 年全球十大矿业公司锌精矿产量[J]. 中国铅锌, 2016(6): 66.
- [8] 2013 - 2015 年全球十大冶炼公司精锌产量[J]. 中国铅锌, 2016(6): 67.
- [9] 马志伟. 全球十大在产锌矿概览 2030 年前储量将基本耗竭[EB/OL]. (2016 - 10 - 22) [2016 - 12 - 10]. <http://xianhuo.cnfol.com/jinshu/20161022/23673334.shtml>.
- [10] 冯安生. 全国重要矿山"三率"综合调查与评价研究报告[R]. 郑州: 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 2015: 537 - 540.

Bhargava S K, Grocott S C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review [J]. Colloids and Surfaces A, 1999, 146: 359 - 374.

- [15] H. A 特洛依茨基. 氧化铝的工艺计算[M]. 吕扬, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1977. 10.
- [16] Pan X L, Yu H Y, Tu G F. Reduction of alkalinity in bauxite residue during Bayer digestion in high - ferrite diasporic bauxite [J]. Hydrometallurgy, 2015, 151: 98 - 106.
- [17] Klauber C, Gräfe M, Power G. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108: 11 - 32.
- [18] Power G, Loh J S C, Vernon C. Organic compounds in the processing of lateritic bauxites to alumina Part 2: Effects of organics in the Bayer process [J]. Hydrometallurgy, 2012, 127 - 128: 125 - 149.