

# 铜冶炼烟气脱硫技术应用现状

陈少林<sup>1</sup> 程喜梁<sup>2</sup> 张强<sup>1</sup> 邵朱强<sup>1</sup> 谢刚<sup>1</sup> 王怀国<sup>3</sup>

(1. 中国有色金属工业技术开发交流中心, 北京 100038; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;  
3. 中国有色金属工业协会, 北京 100038)

**[摘要]** 本文就铜冶炼烟气脱硫工艺方案选择, 从原理、工艺流程、脱硫效率、工艺成熟程度、副产物综合利用、投资费用、运行成本等方面, 综合比较石灰石-石膏法、双碱法、钠碱法、氨法、双氧水法、有机胺法、柠檬酸钠法等湿法脱硫技术, 喷雾干燥法和循环硫化床法等半干法脱硫技术, 以及活性焦脱硫法等干法脱硫技术, 认为湿法脱硫仍是铜冶炼行业应用最广泛可靠的技术, 其中以双氧水法、有机胺法等技术发展前景良好。

**[关键词]** 铜冶炼; 烟气脱硫; 湿法脱硫; 干法脱硫; 半干法脱硫; 有机胺法; 柠檬酸钠法

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-5122(2021)05-0060-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.05.013

## Application Status of Copper Smelting Off-Gas Desulphurization Technology

CHEN Shao-lin, CHENG Xi-liang, ZHANG Qiang, SHAO Zhu-qiang, XIE Gang, WANG Huai-guo

**Abstract:** In this paper, for the selection of process solutions of copper smelting off-gas desulphurization, from the aspects of principle, process flow, desulphurization efficiency, process maturity, by-product comprehensive utilization, capital cost, operative cost, etc., comprehensive comparison was made between limestone-gypsum process, double alkali process, sodium-alkali process, ammonia process, hydrogen peroxide process, organic amines process, sodium citrate process and other wet desulphurization process, spray drying method and circulating fluidized bed method and other semi-dry desulphurization process and active coke desulphurization method and other dry desulphurization technologies. It was considered that the wet desulphurization process was still the most widely used and reliable technology in the copper smelting industry, of which the hydrogen peroxide process, organic amines process and other technologies have good development prospect.

**Key words:** copper smelting; off-gas desulphurization; wet desulfurization process; dry desulphurization process; semi-dry desulphurization process; organic amines process; sodium citrate process

## 0 前言

铜广泛应用于电力、交通运输、建筑、国防及电

子信息等领域。我国精炼铜产量占全球产量超过40%, 是世界第一大铜生产国与消费国。2010—2020年, 国内精炼铜产量从454万t增长至1 002.5万t, 年均增长率为8.24%<sup>[1]</sup>。目前, 全球火法炼铜比例约为80%, 而中国火法炼铜占比高达98%。近年来, 国家对于工业“三废”的管理更多聚焦在废气, 因此开展火法铜冶炼废气治理研究, 对于促进铜冶炼行业的绿色发展具有重要意义。

铜是一种典型的亲硫元素, 硫化铜矿分布最广,

**[收稿日期]** 2021-08-30

**[作者简介]** 陈少林(1993—), 男, 安徽六安人, 硕士, 助理工程师, 主要从事有色行业科技管理工作。

**[引文格式]** 陈少林, 程喜梁, 张强, 等. 铜冶炼烟气脱硫技术应用现状[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(5): 60-64.

目前世界约85%精炼铜产量的原料为硫化铜矿<sup>[1]</sup>。因此,火法炼铜过程中会产生高浓度SO<sub>2</sub>烟气(7%~28%),其首选处理方案是生产工业硫酸,回收硫资源。铜冶炼烟气进入制酸系统,经烟气净化、转化、吸收后,SO<sub>2</sub>浓度降至400 mg/Nm<sup>3</sup>以下,满足《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB 25467—2010)的排放要求。但随着环保标准日益严格,针对重点区域,国家已经提出更高的污染物排放要求,如《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020年修订版)》提出,以铜精矿为主要原料的A级铜冶炼企业要求SO<sub>2</sub>排放浓度不高于50 mg/Nm<sup>3</sup>。此外,根据《铜冶炼行业规范条件》(2019年),制酸尾气需设治理设施。

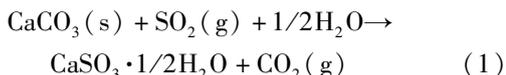
根据工艺过程中水的参与情况,烟气脱硫技术分为三种:湿法、干法和半干法。我国铜冶炼烟气脱硫工艺主要为湿法,其占市场份额的90%左右。本文简要介绍上述几类脱硫工艺技术,并对其优缺点进行总结比较。

## 1 湿法脱硫工艺技术

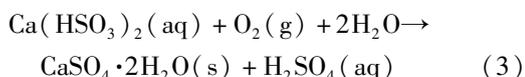
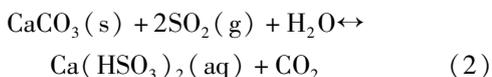
烟气湿法脱硫工艺技术因具有高效、可靠的特点,在电力、钢铁、有色等行业得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。不同湿法脱硫工艺,其适用范围和特点也不同。烟气脱硫技术的选择,应从吸收剂来源、工艺适用性、副产物的综合利用和技术经济等方面综合考虑<sup>[3]</sup>。

### 1.1 石灰石-石膏法

石灰石-石膏法是使用石灰石作为脱硫剂,脱硫副产物为石膏的一种湿法脱硫技术。此工艺的反应区域一般可以分为气-液接触区和氧化反应区<sup>[4]</sup>。在气-液接触区,pH值一般控制在5~6,总反应方程式如下:



在氧化反应区,pH值一般控制在4.5~5.5,SO<sub>2</sub>经过吸收后,酸碱中和反应的初始产物为Ca(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>;在O<sub>2</sub>作用下,经过一定的停留时间,SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>被氧化为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。反应方程式如下:



为了保证脱硫效果,在氧化反应区补充新鲜的

石灰石浆液;同时,将部分脱硫浆液排出脱硫体系。

石灰石-石膏脱硫工艺适用于SO<sub>2</sub>浓度为0.05%~2%的烟气,脱硫效率大于90%,工艺技术成熟、简单、运行稳定,且脱硫剂价廉。但该方法存在系统占地面积大、设备及管道易积垢堵塞、脱硫废水处理难度大等问题,其中亟待解决的是脱硫副产物石膏的处理问题。此外,采用石灰石脱硫剂,在吸收反应过程中会释放CO<sub>2</sub>,不利于碳减排。该工艺在云锡铜业、白银有色、和鼎铜业等铜冶炼企业广泛应用。

### 1.2 双碱法

双碱法脱硫工艺以钠-钙双碱法为代表,其脱硫原理如下:首先使用第一种碱NaOH或Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>作为脱硫剂吸收烟气中的SO<sub>2</sub>,生成Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>进入置换池;然后Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>在置换池中与第二种碱Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成CaSO<sub>3</sub>沉淀和NaOH溶液,NaOH溶液循环至脱硫塔使用,CaSO<sub>3</sub>经氧化后生成石膏<sup>[5]</sup>。

双碱法是石灰石-石膏法的改良,可缓解石灰石-石膏法烟气脱硫工艺的结垢和堵塞问题,适用于SO<sub>2</sub>浓度为0.05%~1.0%的烟气,脱硫效率大于95%,工艺成熟,脱硫石膏品位较高,但存在工艺复杂、一次性投资高和系统运行复杂的特点,且该工艺未彻底解决设备结垢的问题。

### 1.3 钠碱法

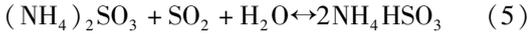
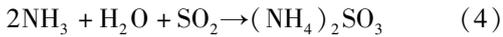
钠碱法是使用NaOH或Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>作为脱硫剂的湿法脱硫技术,脱硫副产物为Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>或Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。钠碱法原料NaOH与SO<sub>2</sub>的亲合力高,因此脱硫效率很高(>98%)。与石灰石-石膏法相比,钠碱法使用的脱硫剂和副产物的溶解度高,解决了设备结垢、堵塞等问题;与双碱法相比,钠碱法脱硫工艺相对简单、易操作。

钠碱法在金冠铜业、大冶有色、烟台国润铜业等企业均有应用。以金冠铜业为例<sup>[6]</sup>,该企业有2套钠碱法脱硫装置,均采用液体NaOH为脱硫剂,冶炼尾气脱硫塔为动力波洗涤器,环集烟气脱硫塔为空塔,冶炼尾气和环集烟气脱硫效率均超过99%,投产以来运行成本较低且稳定。但该方法的脱硫剂成本较高,脱硫废水和设备腐蚀问题仍然存在。

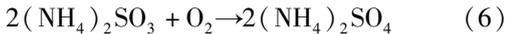
### 1.4 氨法

氨法脱硫工艺利用碱性脱硫剂(氨或氨水)与酸性气体SO<sub>2</sub>发生化学反应,脱硫产物(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>经氧化转变为化学性能稳定的(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。氨法脱硫主要包括吸收和氧化两个基本的化学反应过程<sup>[7]</sup>。

吸收反应方程式如下:



氧化反应方程式如下:



氨法脱硫适用于  $\text{SO}_2$  浓度不大于 0.5%、温度低于 150℃ 的烟气, 脱硫效率大于 95%, 无废水、废渣产生, 适用性强, 还具有辅助脱硝的作用, 且脱硫副产品硫酸铵可利用。然而, 氨法市场占有率低, 主要局限性在于氨法适用于液氨供应充足和配备硫酸铵下游应用企业的企业, 且液氨储存、运输装置存在氨气溢出风险, 增加了环境风险管理的难度。

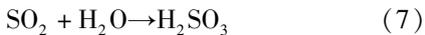
### 1.5 氧化镁法

氧化镁法的脱硫原理是利用  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  作为吸收剂吸收  $\text{SO}_2$  生成  $\text{MgSO}_3$ ,  $\text{MgSO}_3$  既可以经高温煅烧分解生成  $\text{MgO}$  和  $\text{SO}_2$  气体, 也可与稀硫酸反应, 生成  $\text{MgSO}_4$  和  $\text{SO}_2$  气体, 还可进行强制氧化, 得到  $\text{MgSO}_4$ 。 $\text{MgSO}_4$  经水熟化生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  作为脱硫剂循环使用, 煅烧产生的  $\text{SO}_2$  气体经除尘后用以制酸或制硫, 脱硫副产物为  $\text{MgSO}_4$ 。氧化镁法适用于  $\text{SO}_2$  浓度不大于 0.5%、温度低于 150℃ 的烟气, 脱硫效率大于 95%, 存在设备结垢、堵塞以及废液处理的问题。该方法于 2013 在金隆铜业投入使用, 运行效果良好<sup>[8]</sup>。

### 1.6 双氧水法

双氧水法是基于  $\text{H}_2\text{O}_2$  的强氧化性, 在脱硫塔内利用双氧水溶液将  $\text{SO}_2$  氧化成硫酸并使其进入循环液中, 从而实现烟气脱硫的方法。双氧水法脱除烟气中  $\text{SO}_2$  的过程分两步完成。

第一步是水合过程:



第二步是氧化吸收反应:



副反应是双氧水分解反应:



双氧水法通常将浓度 27.5% 的过氧化氢溶液稀释到 8.5% 左右的安全浓度后进行塔内脱硫。该方法无设备结垢、堵塞等风险, 提高了工艺的稳定性, 减少了维修与维护成本。同时, 双氧水法脱硫副产物稀硫酸既可直接用于制酸系统的干吸工段, 也可作为产品出售, 实现硫的循环或资源化利用, 但  $\text{H}_2\text{O}_2$  属于强氧化剂, 其储存、运输存在一定的安全风险。

双氧水法适用于  $\text{SO}_2$  浓度不大于 0.5% 的烟气, 脱硫效率大于 98%。双氧水法在紫金铜业、江西铜业、阳谷祥光铜业、赤峰云铜、山东方圆有色等铜冶炼企业实践效果良好<sup>[9-12]</sup>, 烟气排放指标满足《铜、镍、钴工业污染物排放标准》(GB 25467—2010) 的特别排放限值, 且脱硫成本适中, 废水零外排, 具有推广价值。

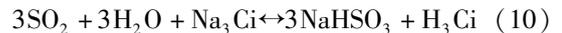
### 1.7 有机胺法

有机胺法是基于缓冲剂有机胺能增加水溶液中  $\text{SO}_2$  溶解度的原理吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ , 常见的有机胺脱硫剂有乙二胺和哌嗪类有机胺等<sup>[13]</sup>。有机胺对  $\text{SO}_2$  气体具有良好的吸收和解吸能力: 在低温下吸收  $\text{SO}_2$ , 在高温下将吸收剂中  $\text{SO}_2$  解吸出来, 从而达到脱除和回收烟气中  $\text{SO}_2$  的目的。该技术可得到纯度大于 99% 的  $\text{SO}_2$  气体, 可用于制酸或生产其他硫产品, 有利于提高硫资源的回收率。

有机胺法适用于  $\text{SO}_2$  浓度为 0.05% ~ 5% 的烟气, 脱硫效率大于 99%。该方法实现了脱硫剂的循环利用, 无二次污染, 不存在设备结垢、堵塞等问题, 但脱硫剂价格相对较高, 且脱硫再生过程需要消耗大量的蒸汽, 存在能耗成本高等问题。目前, 有机胺法已在阳谷祥光铜业、金川集团、江铜贵溪冶炼厂、铜陵有色、山东恒邦等企业应用<sup>[12-14]</sup>。如广西金川有色金属公司制酸尾气采用有机胺法脱硫, 其脱硫效率高达 99%, 排放尾气  $\text{SO}_2$  浓度低于 100  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 环保效果良好。

### 1.8 柠檬酸钠法

柠檬酸钠法利用柠檬酸 - 柠檬酸钠溶液的多级缓冲特性, 在低温条件下吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ , 吸收液可通过蒸汽加热再生<sup>[15]</sup>。吸收  $\text{SO}_2$  时发生如下反应:



式中, Ci 为柠檬酸根, 该反应为可逆反应, 吸收反应向右进行, 解吸反应向左进行。低温有利于吸收, 高温则有利于解吸。该方法采用蒸汽加热再生吸收液, 产出 90% 左右的高浓度  $\text{SO}_2$  气体。

柠檬酸钠烟气脱硫技术适用于  $\text{SO}_2$  浓度为 0.3% ~ 7% 的烟气, 脱除效率大于 90%。柠檬酸钠法工艺和设备简单、占地小、操作方便, 且柠檬酸钠无毒、无异味、不易燃烧, 生产操作安全, 但价格昂贵, 脱硫经济性较差。

## 2 半干法脱硫工艺技术

半干法烟气脱硫技术是将生石灰或熟石灰悬浮

液喷射进反应塔内吸收  $\text{SO}_2$  的技术,在电力、钢铁等行业均有应用,但在铜冶炼行业未见应用于烟气脱硫的报道。常见的方法有喷雾干燥法和循环硫化床脱硫法等。

喷雾干燥法将  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaO}$  等物料制浆喷入反应塔内,经喷雾形成的细小雾滴与烟气中的  $\text{SO}_2$  接触,发生吸收反应生成  $\text{Ca}_2\text{SO}_3$ 。均匀而细小的颗粒为吸收反应提供了很大的反应比表面积,脱硫产品经反应余热干燥后排出<sup>[16]</sup>。该工艺流程简单,设备不易腐蚀,投资运行成本较低,但是脱硫效率略低(80%左右),雾化器易磨损,不适用于高浓度  $\text{SO}_2$  的脱除。

循环硫化床法<sup>[17]</sup>通常采用消石灰作为脱硫剂,其原理类似于喷雾干燥法,脱硫产物为  $\text{CaSO}_3$  和少量  $\text{CaSO}_4$ ,具有投资低、运行成本低、耗水少、腐蚀性小和运行稳定可靠等优点,但存在脱硫剂利用率低(约90%)、烟尘量大、增大除尘器负荷的问题。

综上,半干法烟气脱硫技术具有不产生废水、操作简便、充分利用烟气的显热、投资低和占地小等优点,但副产品主要是亚硫酸钙,以及少量的硫酸盐、碳酸盐和氯化物,不易处理利用。

### 3 干法脱硫工艺技术

所谓干法,即脱硫剂为固态,且整个脱硫过程中没有水参与的脱硫方法<sup>[18]</sup>。活性焦脱硫法是目前应用较多的干法脱硫技术,该方法利用活性焦的物理吸附和化学吸附作用脱除  $\text{SO}_2$ 。当烟气中不含水蒸气和  $\text{O}_2$  时,活性焦由于比表面积大,通过物理吸附脱除  $\text{SO}_2$ ;当有水蒸气和  $\text{O}_2$  存在时,吸附在活性焦中的  $\text{SO}_2$  会与  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$  反应生成  $\text{H}_2\text{SO}_3$  和  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,从而增大对  $\text{SO}_2$  的吸附量<sup>[19]</sup>。活性焦脱硫工艺如图1所示。

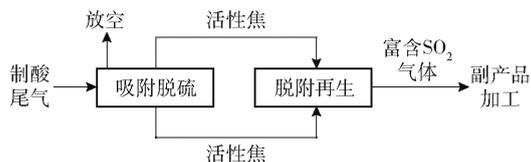


图1 活性焦脱硫工艺示意图

该技术脱硫效率大于95%,适用于  $\text{SO}_2$  浓度不大于0.5%、烟尘含量低、有一定湿度的烟气,工艺流程简单,且兼具脱尘、脱硝、除汞等功能。此外,活性焦廉价易得,再生过程中副反应少。化学再生和物理循环过程中,部分活性焦会粉化,需要定期补

充。该技术适用于厂内蒸汽供应充足、场地宽裕、副产物  $\text{SO}_2$  可回收利用的冶炼企业。需要注意的是,活性焦属于易燃物品,需强化消防。目前活性焦法烟气脱硫技术已在江西铜业、紫金铜业等企业应用<sup>[14,20]</sup>。

### 4 结束语

虽然目前国内适用于铜冶炼烟气脱硫的技术较多,但应研判国家环保政策的发展趋势,在脱硫技术的选择上应有超前意识,从脱硫效率、工艺技术适用性、吸收剂来源、副产物的综合利用、投资和运行费用等方面综合考虑,同时要协同考虑脱硝、降碳等功能。

当前,湿法脱硫仍是我国铜冶炼烟气脱硫的主要技术手段,应加大对现有湿法烟气脱硫技术的研究。石灰石-石膏法虽然效率高且操作简单,并应用广泛,但副产物处理困难;双碱法、氨法及氧化镁法前期投入少,且其副产物可进行综合利用,比较适合铜冶炼中低浓度  $\text{SO}_2$  烟气的处理,但废液的处理成本相对较高;低浓度  $\text{SO}_2$  烟气脱硫方法如双氧水法、有机胺法等技术工艺已日趋成熟,是目前处理铜冶炼低浓度  $\text{SO}_2$  烟气的较为理想的脱硫方法,值得推广。此外,应在现有的湿法烟气脱硫技术上研究采用高效的液相脱硫剂及反应催化剂,进一步强化传质效果,提高脱硫效率。同时,还要研究新型的防腐材料、防结垢材料以及湿法烟气脱硫装置中的内衬材料。

#### [参考文献]

- [1] 中国有色金属工业协会. 2021 中国有色金属发展报告[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- [2] REZAZI Fateme, ROWNAGHI Ali A, MONJEZI Saman, et al.  $\text{SO}_x/\text{NO}_x$  removal from flue gas streams by solid adsorbents: a review of current challenges and future directions[J]. Energy Fuels, 2015, 29(9): 5467–5486.
- [3] 彭静安,曹明庚,雷建日. 湿法烟气脱硫中的几个问题探讨[J]. 有色冶金节能, 2007, 24(5): 35–37.
- [4] LIU Sen, LIU Wei, JIAO Fen, et al. Production and resource utilization of flue gas desulfurized gypsum in China-A review [J]. Environmental Pollution, 2021, 288(5): 1–14.
- [5] 马玥玲. 钠-钙双碱法烟气脱硫技术在锅炉上的应用[J]. 有色冶金节能, 2010, 26(4): 56–58.
- [6] 汪满清,王翔. 金冠铜业“双闪”冶炼升级改造方案研究与应用[J]. 硫酸工业, 2021(3): 27–29, 38.

- [7] WANG Baowei, YAO Shumei, PENG Yeping. Simultaneous desulfurization and denitrification of flue gas by pre-ozonation combined with ammonia absorption [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020(28): 2457 - 2466.
- [8] 吴新民. 金隆铜业有限公司冶炼烟气制酸节能环保的发展回顾[J]. 硫酸工业, 2020(7): 6 - 9, 41.
- [9] 刘科. 双氧水脱硫技术在倾动炉的应用实践[J]. 铜业工程, 2021(2): 46 - 51.
- [10] 刘珊珊, 谢桂芳, 李传祥. 双氧水法脱硫在冶炼烟气制酸系统中的应用[J]. 硫酸工业, 2020(10): 38 - 41, 45.
- [11] 黄建洪, 陈珊, 陈全坤, 等. 双氧水法和氨法在铜冶炼制酸尾气脱硫工程应用中的比较[J]. 环境工程学报, 2020(6): 1688 - 1697.
- [12] 曹汝俊, 董木森, 曾庆晔, 等. 祥光铜业废水处理与烟气超低排放技术的发展历程[J]. 硫酸工业, 2021(1): 11 - 16.
- [13] 易瑞强. 有机胺脱硫在铜冶炼中的高效运用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(2): 84 - 88.
- [14] 孙治忠, 谢成, 彭国华, 等. 金川公司烟气脱硫工艺浅析[J]. 硫酸工业, 2015(2): 63 - 66.
- [15] 石林, 李孟飞, 兰惠生, 等. 柠檬酸钠法烟气脱硫技术中硫酸钠的生成控[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007(6): 111 - 115.
- [16] ZAREMBA T, MOKROSZ W, HEHLMANN J, et al. Properties of the wastes produced in the semi-dry FGD installation[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2008, 93(2): 439 - 443.
- [17] 史元良, 童震松, 宋存义. 球团烟气密相干塔脱硫-除尘一体化系统优化[J]. 钢铁, 50(12): 72 - 79.
- [18] KOECH L, RUTTO H, LEROTHOLI L, et al. Spray drying absorption for desulphurization: a review of recent developments[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2021(23): 1665 - 1686.
- [19] ABDULRASHEED A A, JALIL A A, TRIWAHYONO S, et al. Surface modification of activated carbon for adsorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>: A review of existing and emerging technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018(94): 1067 - 1085.
- [20] 王召启, 施群. 紫金铜业 820 kt/a 铜冶炼烟气制酸及尾气脱硫装置的设计[J]. 硫酸工业, 2013(4): 1 - 5.

(上接第 55 页)

## 4 结论

1) 不同工艺产出的铜炉冶炼渣采用的选矿工艺及流程不尽相同, 应根据炉渣性质特点进行合理选择, 以获得最佳选别指标, 使其中的有价资源得到更为充分合理的利用。

2) 对于含铜品位较低、铜矿物嵌布粒度细的电炉贫化渣, 采用连续磨浮流程, 更有利于获得较好的选别指标; 对于含铜品位较高、铜矿物粗细粒嵌布不均匀的转炉渣及其与其他炉渣的混合渣的选矿, 采用阶段磨浮选流程, 有利于选别指标和选矿效率的

提高。

3) 铜冶炼炉渣总体嵌布粒度较细, 铜矿物比重大, 因此细磨、高浓度浮选有利于选矿指标的提高。

### [参考文献]

- [1] 唐广群, 王朝阳. 铜炉渣几个主要选矿特性的成因[J]. 中国矿山工程, 2014, 43(3): 33 - 34, 46.
- [2] 张林楠, 张力, 王明玉, 等. 铜渣的处理与资源化[J]. 矿产综合利用, 2005(5): 22 - 27.
- [3] 张体富, 邓戈, 解琦. 铜冶炼渣的资源化利用[J]. 冶金能源, 2012, 31(5): 48 - 52.
- [4] 王红梅, 刘四清, 刘文彪. 国内外铜炉渣选矿及提取技术综述[J]. 铜业工程, 2006(4): 19 - 22, 86.