

引文格式: 杨慧兰,王玮,何峰.一种特殊的高铜低铁铜精矿冶炼工艺探讨[J].铜业工程,2022(6):79-82,91.

一种特殊的高铜低铁铜精矿冶炼工艺探讨

杨慧兰, 王 玮, 何 峰

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 江西 南昌 330031)

摘 要: 一种含铜高达64%, 含铁仅2.2%的特殊铜精矿, 通过分析其成分及物相, 表明主要矿物为辉铜矿。针对这种特殊的高铜低铁铜精矿, 提出了几种工艺可行的冶炼方案, 包括闪速炉一步直接炼铜、侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼火法工艺和焙烧+浸出+电积的湿法工艺, 并从外部建设条件、技术经济指标等方面对火法工艺方案和湿法工艺方案进行对比及评价, 对冶炼工艺的选择给出了建议。

关键词: 特殊铜精矿; 闪速炉一步直接炼铜; 侧吹熔炼; 湿法工艺; 工艺对比

中图分类号: TF111

文章编号: 1009-3842(2022)06-0079-04

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1009-3842.2022.06.016

Discussion on the Smelting Process of a Special High Copper and Low Iron Copper Concentrate

YANG Hui-lan, WANG Wei, HE Feng

(China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330031, Jiangxi, China)

Abstract: There is a special copper concentrate which containing up to 64% copper and only 2.2% iron. The analysis of its composition and phase indicates that its main mineral is chalcocite. For this special copper concentrate with high copper and low iron, several feasible smelting schemes are proposed, including the flash furnace direct-to-blister copper smelting and side-blow smelting + top-blow converting, hydrometallurgy and roasting + leaching + electrowinning. And by comparing and evaluating of pyrometallurgy with hydrometallurgy from the aspects of external construction conditions, technology and economy, suggestions are given for the process selection.

Keywords: special copper concentrate; flash furnace direct-to-blister copper smelting; side-blow smelting; hydrometallurgy; process comparison

1 引言

铜精矿分为硫化铜精矿和氧化铜精矿两大类^[1], 根据其类别冶炼方法大致分为火法工艺和湿法工艺。一般来说, 硫化铜精矿采用熔炼-吹炼-精炼的火法工艺路线^[2], 且占据主导地位, 而氧化铜精矿采用浸出-萃取-电积的湿法工艺路线。

常见的硫化铜精矿含铜品位在20%~28%之间, 根据生产规模的大小, 单套系统年生产能力>30万t铜的主流冶炼工艺是闪速熔炼+闪速吹炼

“双闪”工艺, 单套系统年生产能力≤30万t铜的主流冶炼工艺是侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼工艺^[3]。不论采用哪一种工艺, 都有造钎熔炼过程, 即在熔炼过程中加入石英熔剂造渣, 产物为冰铜和熔炼渣, 其中冰铜中铜含量为55%~70%, 需进一步吹炼处理, 熔炼渣为CaO-FeO-SiO₂, 系三元渣, 渣中铁硅比在1~2之间, 熔点约1200℃。

非洲某矿区产出的一种铜精矿(本文中称其为“特殊铜精矿”), 铜含量高达64%, 而铁含量很少, 仅为2.2%, 矿石中Fe/SiO₂低至0.28, 不能像常规

收稿日期: 2022-08-04

作者简介: 杨慧兰(1984—), 女, 苗族, 湖南城步县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事有色冶炼工程设计及研究。E-mail: yanghui lan@nerin.com

硫化铜精矿熔炼一样，通过加入 SiO₂ 造出低熔点、低黏度的渣型，因此该特殊铜精矿的冶炼不适合直接采用常规的熔炼－吹炼－精炼的工艺方案。随着非洲地区类似的矿石不断被大量开采，探索一种环保、节能、成熟可靠的冶炼工艺，将具有极大的工程应用价值。

2 特殊铜精矿分析

铜精矿各类矿物及其主要组成、铜含量见表 1^[1]。其中硫化铜矿有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等，以黄铜矿最为常见；氧化铜矿有孔雀石、赤铜矿、黑铜矿等。

表 1 铜精矿类别及特点

类别	矿物	组成	铜含量 /%	颜色	密度 /(g·cm ⁻³)
硫化铜矿	辉铜矿	Cu ₂ S	79.8	铅灰至灰色	5.50~5.80
	铜蓝	CuS	66.4	靛蓝或灰黑色	4.60~4.76
	斑铜矿	Cu ₃ FeS ₄	63.3	铜红至深黄色	5.06~5.08
	砷黝铜矿	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃	51.6	铜灰至铁黑色	4.37~4.49
	黝铜矿	Cu ₂ As ₄ S ₁₃	45.8	灰至铁灰色	4.6
氧化铜矿	黄铜矿	CuFeS ₂	34.5	黄铜色	4.10~4.30
	赤铜矿	Cu ₂ O	88.8	红色	6.14
	黑铜矿	CuO	79.9	灰黑色	5.80~6.40
	蓝铜矿	2CuCO ₃ ·Cu(OH) ₂	68.2	亮蓝色	3.77
	孔雀石	CuCO ₃ ·Cu(OH) ₂	57.3	亮绿色	4.03
	硅孔雀石	CuSiO ₃ ·2H ₂ O	36.0	绿蓝色	2.00~2.40
	胆矾	CuCO ₃ ·4H ₂ O	25.5	蓝色	2.29

非洲某矿区产出的一种特殊铜精矿，与常见的黄铜矿相比，具有铜高、铁低、硫低^[4]、铁硅比很低的特点，成分对比见表 2。

表 2 铜精矿成分对比

	Cu	Fe	S	SiO ₂	其他	Fe/SiO ₂
黄铜矿	25	27	31	6	11	4.5
特殊铜精矿	64	2.2	14	7.9	12	0.28

特殊铜精矿与常见黄铜矿的主要成分含量差

异很大。一是特殊铜精矿含铜高达 64%，甚至超过了熔炼产物冰铜的品位。二是特殊铜精矿中 Fe/SiO₂ 过低，不能通过加入 SiO₂ 造出低熔点、低黏度的渣型，高熔点炉渣将大大增加能源消耗和降低设备寿命。三是特殊铜精矿中 S 含量低，热值少，熔炼过程中需要加入大量燃料。

特殊铜精矿的化学物相分析结果如表 3 所示^[5]。

表 3 特殊铜精矿的化学物相分析结果

相别	含量	分布率/%
辉铜矿	51.15	78.69
赤铜矿	6.82	10.49
其他氧化铜	6.69	10.29
铁矿物包裹铜	0.21	0.32
其他矿物包裹铜	0.13	0.20
总量	65.00	100.00

分析结果表明，该特殊铜精矿中约 80% 的铜以辉铜矿形式存在，另含有少量的黑铜矿和赤铜矿。

3 特殊铜精矿可行的冶炼工艺

3.1 闪速炉一步直接炼铜

由于该特殊铜精矿的主要矿物是辉铜矿，其成分为硫化铜，类似于常规的造锍熔炼产物——冰铜，因此从理论上来说，采用直接吹炼的一步炼铜法是较为合适的工艺。一步炼铜技术具有流程短、环保效益好、投资成本低等优势，符合当前短流程冶炼技术的发展方向^[6]。

目前有成熟工业实践的一步炼铜工艺只有奥托昆普闪速炉一步直接炼铜，该工艺由于其连续性及短流程化，炉体漏风少、烟气量少且烟气中 SO₂ 浓度高，能有效节省熔炼生产系统和制酸生产系统的投资及运行成本。Glogow、Olympic Dam 冶炼厂的生产实践表明：产生渣量少的精矿，如高品位的低铁辉铜矿和斑铜矿，采用闪速一步炼铜工艺是一种经济可行的选择^[7]。

为了降低炉渣熔点及黏度，需配入 CaO^[8]。图 1 和图 2 分别为渣含 CaO 为 12% 时闪速炉一步直接炼铜的炉渣相图及黏度。可以看出，渣含 CaO 为 12% 时可达到较好的熔炼条件：渣的熔化温度为 1250~1300 ℃；1244 ℃度时渣的黏度 < 0.5 Pa·s。

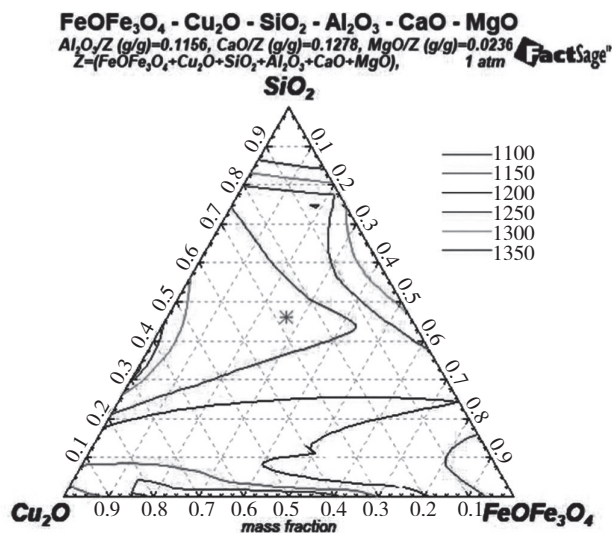


图1 闪速炉一步直接炼铜的炉渣相图

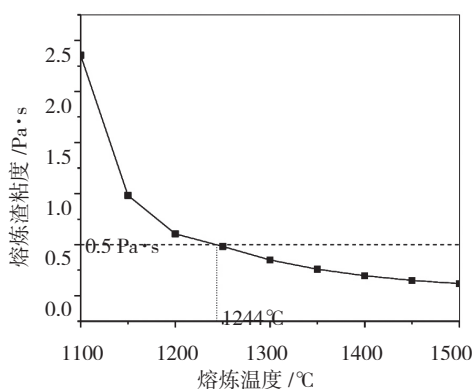


图2 闪速炉一步直接炼铜的炉渣黏度

闪速炉一步直接炼铜采用高氧势操作, 导致炉渣含铜高, 降低了铜的直收率, 需要对炉渣中的铜进行回收。而炉渣中的铜主要以氧化亚铜形态存在, 直接采用渣选矿并不能保证铜的回收率。从目前行业的普遍做法来看, 几座一步炼铜工厂都采用了还原电炉将渣中的氧化亚铜还原, 并与渣分离后得以回收。由此, 采用闪速炉一步直接炼铜的冶炼工艺流程为: 蒸汽干燥 + 闪速炉一步直接炼铜 + 电炉贫化 + 精炼。采用该工艺的一次投资大, 适合产能较大 (年产铜 > 30 万 t) 的冶炼项目。

3.2 侧吹熔炼 + 多枪顶吹连续吹炼

另一种适用于中等产能的主流工艺是侧吹熔炼 + 多枪顶吹连续吹炼。侧吹熔炼属于熔池熔炼, 高浓度富氧空气通过风口吹入炉渣层, 发生气-固-液三相反应, 强烈地搅拌强化了过程的传热传质, 送风氧的浓度同样可以高至 90%, 熔炼强度高, 单位生产能力大; 加入的铜精矿对炉渣进行还原、硫化、洗涤, 使得炉渣含铜低。该工艺对原料的适应性强, 不需要预处理直接入炉, 备料和熔炼厂房结

构简单, 投资低。经过长时间的生产实践检验, 侧吹熔炼工艺已经相当成熟。有几家冶炼厂采用此法, 投产后一周内即可达到设计产能, 且能稳定运行^[9]。

吹炼则采用与侧吹熔炼匹配的多枪顶吹连续吹炼。多枪顶吹炉具有炉体密闭、结构简单的特点, 和侧吹炉采用溜槽连接, 操作环境较高。该工艺因取消了吹炼主厂房的吊车, 还节省了投资。此外还具有吹炼烟气量较小、烟气成分和烟气量稳定, 有利于制酸等优点。此法同样有大量成功的生产实践。

采用侧吹熔炼 + 多枪顶吹连续吹炼的冶炼工艺流程为: 配料 + 侧吹熔炼 + 多枪顶吹吹炼 + 精炼。该工艺投资少, 适合产能中等规模 (年产铜 ≤ 30 万 t) 的冶炼项目。

对于辉铜矿的冶炼, 为了满足其熔炼造渣和热量适宜的需要, 需配入含 Fe、含 S 的矿种, 如黄铜矿或硫铁矿^[10]。图 3 和图 4 比较了不配入硫铁矿和配入硫铁矿的冶炼炉渣在不同温度下的黏度变化。可以得出, 不加硫铁矿时, 熔炼温度需达到 1500 °C 才能使炉渣黏度降低到 0.5 Pa·s, 这配入硫铁矿后, 炉渣黏度在温度达到 1359 °C 时降低至 0.5 Pa·s。这说明配入硫铁矿能有效降低炉渣的黏度, 从而降低熔炼温度, 改善生产操作条件。

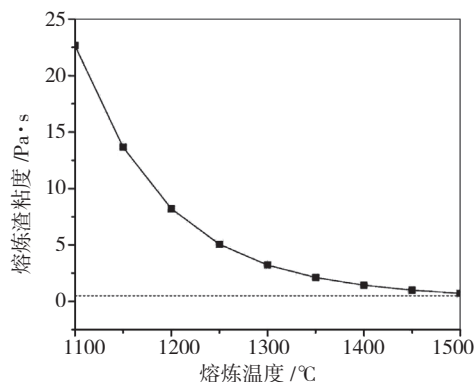


图3 不配硫铁矿时炉渣黏度

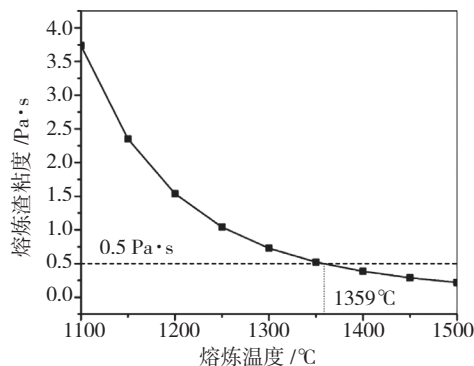


图4 配入硫铁矿时炉渣黏度

3.3 湿法工艺

湿法工艺适用于处理氧化铜精矿，而特殊铜精矿主要为硫化铜精矿，若采用湿法冶炼工艺，需要在冶炼前增加氧化焙烧工序，将其中的硫化铜转化成氧化铜。

采用湿法冶炼的工艺流程为：氧化焙烧 + 一段浸出 + 二段浸出 + 电积，产出电铜，氧化焙烧烟气收尘后制酸^[11]。

4 火法工艺和湿法工艺对比

工艺方案的选择与项目的规模有着很大关系。假定项目规模为 15 万 t，火法工艺采用侧吹熔炼 + 多枪顶吹连续吹炼，湿法工艺则采用氧化焙烧 + 一段浸出 + 二段浸出 + 电积。两个方案在发展潜能、外部建设条件、技经指标、环保等方面的对比见表 4。

通过比较可知，火法工艺和湿法工艺各有优劣，均有成功的工业实践。刚果金卢阿拉巴铜冶炼厂采用侧吹熔炼 + 多枪顶吹吹炼工艺处理辉铜矿并配入硫铁矿，使熔炼渣 $Fe/SiO_2 > 1$ ；华刚矿业二期采用氧化焙烧 + 一段浸出 + 二段浸出 + 电积的工艺；KAMOA 项目由于铜产能达到 50 万 t/a，采用的是闪速炉一步直接炼铜。

5 结论及建议

- (1) 由于特殊铜精矿铁含量少， Fe/SiO_2 低至 0.28，难以正常造渣，不适合直接采用传统的熔炼 + 吹炼的火法工艺。
- (2) 采用闪速炉一步直接炼铜工艺处理特殊铜精矿是一种经济可行的选择，但该工艺一次投资大，适合产能较大（年产铜 > 30 万 t）的冶炼项目。

表 4 工艺对比及评价结果

对比项目及指标		火法工艺	湿法工艺	评价结果	
				火法	湿法
(1) 发展潜能					
①	与企业战略发展的契合性	项目更具有成长性，可利用非洲未来的硫化矿资源逐步壮大	氧化矿资源可获得量总体呈下降趋势，项目未来发展潜力有限	√	
②	扩产能力	扩产弹性大，主体设备稍加改造可适应更大产能	产能缺乏扩产弹性，扩产要增加新的系统	√	
③	对原料波动的适应性	强	差	√	
(2) 外部建设条件					
①	原料的可获得性	需要配入黄铜矿，当前获得性略差	原料供应有保障		√
②	电力系统安全生产要求	对稳定供电要求高，需设置应急供电系统	对电力供应要求低		√
(3) 技术经济类指标					
①	金属回收率	较高	较低	√	
②	建设投资	较低	较高	√	
③	年耗电量	低	高	√	
④	耗新水量	高	低		√
⑤	单位加工成本	低	高	√	
⑥	盈利能力	较优	较差	√	
(4) 其它比较项					
①	环保	三废排放多	三废排放少		√
②	劳动定员	多	少		√
③	占地面积	大	小		√

(下转第 91 页)

(上接第 82 页)

(3) 侧吹熔炼 + 多枪顶吹连续吹炼是一种适用于中等产能的主流工艺,但处理特殊铜精矿时,造渣需要配入含 Fe、含 S 的矿种,如黄铜矿或硫铁矿。

(4) 采用湿法工艺处理特殊铜精矿之前,需要经过氧化焙烧工序,将其中的硫化铜转化成氧化铜。

(5) 火法工艺和湿法工艺各有优劣,冶炼工艺的选择应该从项目的战略定位出发,综合考虑生产规模、建设条件、企业发展战略等具体情况,在成熟可靠、安全环保、技术先进的工艺中选取最合适的工艺。

参考文献:

- [1] 王树清. 铜冶炼工艺与冶金炉综述[J]. 有色设备, 2015(4):4-10.
- [2] 蒋继穆. 连续炼铜杂谈[J]. 中国有色冶金, 2020,49(5):1-8.
- [3] 李良斌,代红坤,李强,等. 旋浮熔炼 + 旋浮吹炼与富氧侧吹熔炼 +

多枪顶吹连续吹炼工艺比较[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(2):51-59.

- [4] 王松. 辉铜矿一步炼铜理论分析及实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
- [5] 曾培,陈兴海,杨永强. 某硫化铜精矿焙烧浸出过程铜元素赋存状态研究[J]. 世界有色金属, 2022(2):21-24.
- [6] 周世伟,郭祥,张克仑,等. 高品位铜精矿短流程一步炼铜基础研究[J]. 过程工程学报, 2021,21(12):1473-1480.
- [7] Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport. Extractive Metallurgy of Copper[D]. fifth edition. Kidlington, Oxford, Elsevier, 2011:179-190.
- [8] 郭祥. 辉铜矿混黄铜矿短流程炼铜理论研究及最优渣型实验验证[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
- [9] 周俊. 铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8):1-10.
- [10] 林荣跃. 高品位硫化铜精矿冶炼工艺方案探讨[J]. 价值工程, 2016, 35(31):232-233.
- [11] 曾培,陈兴海,马鑫铭. 高铜低铁硫化铜精矿预浸出 - 焙烧 - 酸浸试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2022,40(3):7-9.