

含钴铜精矿沸腾焙烧试验研究

李健

(长春黄金研究院有限公司)

摘要:采用沸腾焙烧工艺处理国外某含钴铜精矿,考察该矿石沸腾焙烧最佳工艺技术参数。结果显示,最佳沸腾焙烧温度630℃,空气气氛,气料比2.2 m³/kg(工况),物料停留时间6~7 h,焙砂产率为76.70%,粉尘产率为33.11%。连续沸腾焙烧产生的混合砂经硫酸浸出,铜、钴浸出率分别为96.58%、89.57%;烟气中氧气浓度为2.95%,SO₂浓度为60 900 mg/m³,CO浓度为2 130 mg/m³。回收粉尘在重力收尘、旋风收尘、布袋收尘的相对产率分别为52.52%、31.62%、15.86%。粉尘中铜、钴金属相对含量分别为19.34%、13.53%。试验结果为该含钴铜精矿的沸腾焙烧工业设计提供了可靠的数据依据。

关键词:含钴铜精矿;沸腾焙烧;焙烧温度;气料比;焙砂;浸出

中图分类号:TF81

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)04-0054-05

doi:10.11792/hj20250411

引言

铜和钴是科技发展不可或缺的重要有色金属^[1-2]。在自然界中,铜主要存在于硫化矿和氧化矿中;而钴则多以伴生矿物形式出现在这些矿石中^[3],其在三元电池、航空航天等高新技术领域拥有广阔的应用前景^[4]。中国虽然拥有丰富的有色金属矿产资源,但可工业利用的矿产资源储量却相对匮乏^[5]。尽管如此,中国的粗铜消费量已超过全球消费量的一半,钴的消费量亦居世界首位^[6]。全球的铜钴复杂共生伴生矿产资源主要集中在非洲地区,这些资源大多分布在赞比亚及刚果(金)边界的沉积物型层状铜矿床中,这一区域也被称为“非洲铜钴矿带”^[7]。

目前,铜和钴的提炼方法主要分为火法冶炼和湿法冶炼两大类。湿法冶炼的主要流程为氧化预处理(针对硫化矿)—酸浸—萃取—电积^[7-14]。沸腾焙烧工艺是氧化预处理工业应用中的关键技术,它广泛应用于各种硫化矿的处理,如金精矿沸腾焙烧^[15]、原矿沸腾焙烧^[16-17]、锌精矿沸腾焙烧^[18-19]及硫精矿沸腾焙烧^[20]等。本文旨在研究含钴铜精矿的沸腾焙烧工艺,通过试验确定获得铜、钴最佳浸出效果的沸腾焙烧工艺参数,以期为沸腾焙烧工艺的工业设计提供坚实的数据支持。

1 试验原料

试验原料为国外某含钴铜精矿,其化学成分分析

结果如表1所示,矿物组成分析结果如表2所示。

表1 含钴铜精矿化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of cobalt-bearing copper concentrate

成分	Cu	S	C	Fe	Co	As	CaO
w/%	16.29	16.02	5.46	12.92	3.14	0.010	0.20
成分	Ag ¹⁾	Pb	SiO ₂	Zn	MgO	Bi	Al ₂ O ₃
w/%	5.14	0.010	27.55	0.011	2.61	<0.005	8.31

注:1)w(Ag)/(g·t⁻¹)。

表2 含钴铜精矿矿物组成分析结果

Table 2 Mineral composition analysis results of cobalt-bearing copper concentrate

金属矿物	相对含量/%	非金属矿物	相对含量/%
黄铜矿	33.93	石英	23.23
硫铜钴矿	7.17	正长石、斜长石、钠长石、透长石	12.36
斑铜矿	3.55	绢云母、白云母	5.71
辉铜矿	0.93	方解石、白云石、铁白云石	1.07
铜蓝	0.51	菱镁矿	0.48
辉钴矿	0.04	橄榄石、铁橄榄石、钙镁橄榄石	1.95
黄铁矿、毒砂	0.39	铁铝榴石、镁铝榴石	5.59
磁铁矿、赤铁矿	0.13	金红石、重晶石、锆石	1.02
自然铁、自然钛	0.37	磷灰石	1.57

含钴铜精矿金属矿物主要为黄铜矿,其次为硫铜

收稿日期:2024-09-20;修回日期:2024-11-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904500)

作者简介:李健(1986—),男,高级工程师,从事贵金属冶炼研究工作;E-mail:472263019@qq.com

钴矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝。黄铜矿相对含量为33.93%，以中细粒为主；斑铜矿相对含量为3.55%，是相对含量最高的次生硫化铜矿物，普遍呈微细粒分布；辉铜矿与铜蓝合计相对含量为1.44%，辉铜矿嵌布粒度多为0.01~0.074 mm。

含钴铜精矿中，主要的钴矿物包括硫铜钴矿和少量的辉钴矿，以及部分含钴黄铜矿。硫铜钴矿相对含量为7.17%，主要以中细粒形式存在，含铜8.88%，含钴高达91.30%；辉钴矿作为次要的钴矿物，其相对含量仅为0.04%，呈微细粒分布，含钴0.34%；少量含钴黄铜矿嵌布于黄铜矿中，其相对含量为11.20%，占黄铜矿总量的33%，含钴8.36%。

硫物相、碳物相分析结果如表3、表4所示。

表3 硫物相分析结果

Table 3 Sulfur phase analysis results

相别	w(S)/%	分布率/%
硫化物	15.70	98.00
硫酸盐	0.31	1.94
自然硫	0.01	0.06
总硫	16.02	100.00

表4 碳物相分析结果

Table 4 Carbon phase analysis results

相别	w(C)/%	分布率/%
石墨	0.34	6.23
碳酸盐	0.16	2.93
有机碳	4.96	90.84
总碳	5.46	100.00

2 试验设备及方法

2.1 试验设备

试验设备形象联系图如图1所示。试验采用螺旋给料机作为给料装置，罗茨鼓风机作为鼓风设备，并配备外置空气加热装置以对供风进行预热处理。炉膛底部、炉膛及炉顶外部均设有加热装置，以维持设定的温度条件。沸腾焙烧炉配置了3个温度检测点，包括空气气室温度、焙烧炉膛风帽上部温度及炉顶温度的检测。炉顶设有烟气收集孔，同时在炉顶和炉底分别安装了压力检测装置。焙烧过程中产生的粉尘通过重力收尘器、旋风收尘器及布袋收尘器进行回收处理。焙烧烟气则通过碱液循环喷淋系统进行吸收。

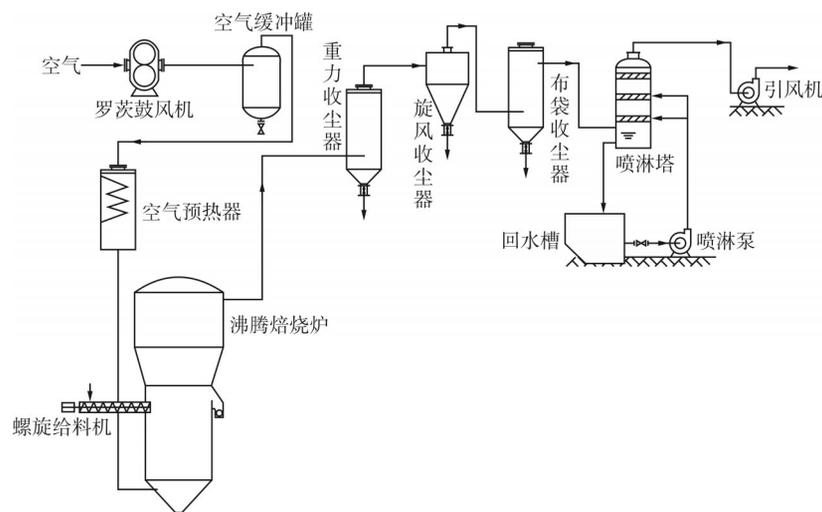


图1 试验设备形象联系图

Fig. 1 Schematic diagram for experimental equipment image connection

2.2 试验方法

研究所用物料加料装置为螺旋给料机，其加料速度可进行调节，以确保物料均匀地加入沸腾炉中。试验启动阶段，利用热空气（温度450℃）点燃矿石。在试验过程中，通过风冷和炉壁外部加热的方式对沸腾焙烧温度进行控制，温度精确度可达±15℃。

单炉沸腾焙烧条件试验时，物料以连续给料方式进行给料，且在试验过程中不进行排料，直至试验结束统一进行排料。加料过程条件统一设定为：加料时间5 h，加料速度1.2 kg/h，加料总质量6 kg。试验结束后，所获得的混合粉尘（包括重力粉尘、旋风粉尘、布袋粉尘）与焙砂分别采用酸浸处理，酸浸条件为：初始

酸度22 g/L，液固比4:1，浸出温度70℃，终止pH值1.1~1.2，浸出时间6 h。

在连续沸腾焙烧试验中，所得粉尘、溢流砂及混合砂采用酸浸和水浸2种方式进行浸出。酸浸条件与单炉沸腾焙烧条件相同，水浸条件为：液固比4:1，浸出时间4 h。

3 结果与讨论

3.1 单炉沸腾焙烧试验

3.1.1 沸腾焙烧温度

沸腾焙烧温度选择580℃、600℃、630℃、650℃、670℃，沸腾焙烧时间3.5 h（加料结束后继续沸腾时

间),沸腾焙烧气氛为空气,工况风量 $2.0\text{ m}^3/\text{h}$ 。试验结果如图2所示。

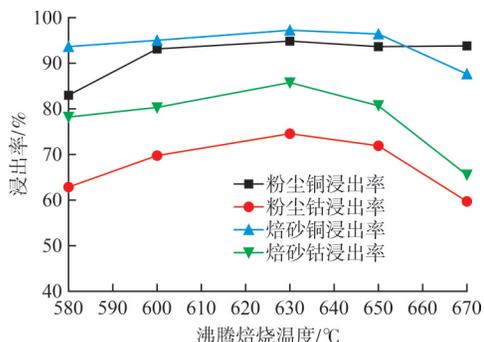


图2 沸腾焙烧温度试验结果

Fig. 2 Test results of fluidized bed roasting temperature

由图2可知:当沸腾焙烧温度低于 $630\text{ }^\circ\text{C}$ 时,焙砂和粉尘中铜、钴浸出率均随温度升高而增加。当沸腾焙烧温度为 $630\text{ }^\circ\text{C}$ 时,焙砂中铜、钴浸出率分别达到 97.29% 和 85.78% ,同时焙砂产率为 58.37% ,酸浸渣产率为 44.00% ;粉尘中铜、钴浸出率分别为 94.87% 和 74.56% ,粉尘酸浸渣产率为 55.40% 。沸腾焙烧温度超过 $630\text{ }^\circ\text{C}$ 后,铜、钴浸出率均下降。较低沸腾焙烧温度导致矿石氧化不充分,而较高沸腾焙烧温度易生成铁酸铜,均不利于浸出。因此, $630\text{ }^\circ\text{C}$ 为最佳沸腾焙烧温度。

3.1.2 沸腾焙烧时间

由于加料时间固定,沸腾焙烧时间主要考察保温沸腾时间,选择保温沸腾时间 0.5 h 、 1.5 h 、 2.5 h 、 3.5 h 、 5.5 h ,沸腾焙烧温度 $630\text{ }^\circ\text{C}$,沸腾焙烧气氛为空气,工况风量 $2.0\text{ m}^3/\text{h}$ 。试验结果如图3所示。

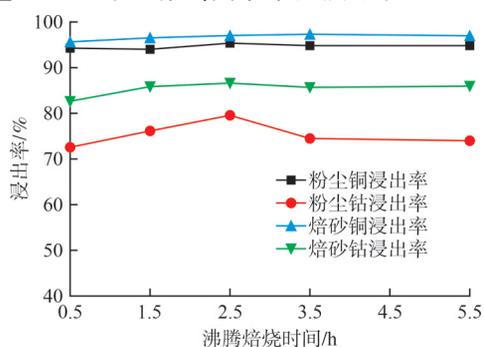


图3 沸腾焙烧时间试验结果

Fig. 3 Test results of fluidized bed roasting duration

由图3可知:当沸腾焙烧时间低于 2.5 h 时,焙砂中铜、钴浸出率随沸腾焙烧时间的缩短而降低,主要原因是沸腾焙烧时间不足导致铜精矿硫酸化反应不完全,部分粉尘残留在焙砂中。沸腾焙烧时间为 2.5 h 时,焙砂中铜、钴浸出率分别达到 97.10% 、 86.75% 。延长沸腾焙烧时间后,焙砂中铜、钴浸出率无明显提升,表明铜精矿的沸腾焙烧时间不应少于 2.5 h 。由于试验中的沸腾焙烧时间为加料结束后的时间,而加

料过程中部分物料已开始反应,加料时间为 5 h ,假设物料平均反应时间为 2.5 h ,因此沸腾焙烧过程中物料的最佳停留时间应不少于 5 h 。试验结果表明,延长沸腾焙烧时间对焙烧效果无显著影响,故连续沸腾焙烧试验中物料停留时间应不少于 6 h 。

3.2 连续沸腾焙烧试验

3.2.1 气料比

进行气料比试验时,必须确保系统处于连续出料状态,以溢流砂和粉尘为试样。针对特定沸腾炉的尺寸,工况风量 $2.8\sim 3.0\text{ m}^3/\text{h}$,给料速度 $1.35\sim 1.6\text{ kg/h}$,沸腾焙烧温度 $630\text{ }^\circ\text{C}$,物料停留时间 $6\sim 7\text{ h}$ 。试验开始前,向系统中加入 5 kg 炉底料,该炉底料为前期试验产物。气料比试验参数如表5所示,试验结果如图4所示。

表5 气料比试验参数

Table 5 Gas-to-feed ratio test parameters

工况风量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	给料速度/ $(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	气料比/ $(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$
2.8	1.6	1.75
3.0	1.5	2.0
3.0	1.35	2.2

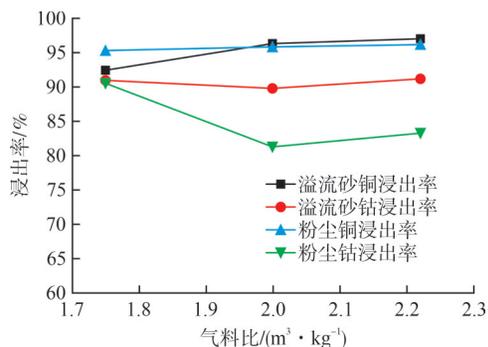


图4 气料比试验结果

Fig. 4 Gas-to-feed ratio test results

由图4可知:随着气料比的提高,溢流砂及粉尘中铜、钴浸出率提高,当气料比提高至 $2.2\text{ m}^3/\text{kg}$,溢流砂中铜浸出率为 97.02% ,粉尘中铜浸出率为 96.17% 。对比单炉沸腾焙烧试验结果,说明气料比为 $2.2\text{ m}^3/\text{kg}$ 时已经达到最佳沸腾焙烧效果。因此,连续沸腾焙烧试验气料比为 $2.2\text{ m}^3/\text{kg}$ 。

3.2.2 连续试验

沸腾焙烧温度 $630\text{ }^\circ\text{C}$,物料停留时间 $6\sim 7\text{ h}$,空气气氛,给料速度 1.35 kg/h ,气料比 $2.2\text{ m}^3/\text{kg}$,工况风量 $3.0\text{ m}^3/\text{h}$,试验开始时先添加 5 kg 炉底料(该炉底料为前期试验获得焙砂),然后添加含钴铜精矿,沸腾焙烧时间为 720 min ,取最后 80 min 获得的溢流砂及粉尘作为试验浸出对象,并将两种产品按照获得的质量比例混合形成混合砂,该混合砂的浸出效果为连续试验结果,试验结果如表6所示。

表6 连续试验结果

Table 6 Continuous test results

沸腾焙烧时间/ min	加料量/kg	m(溢流砂)/g	m(粉尘)/g
0~180	5(炉底料)	0	156.7
180~640	10(含钴铜精矿)	5 108.2	2 359.4
640~720	2(含钴铜精矿)	1 447.7	827.3
布袋收尘			629.9
合计	17	6 555.9	3 973.3

忽略试验前加入的炉底料与试验后产生的炉膛砂质量差异,计算连续沸腾焙烧产品产率,结果如表7所示。

表7 连续沸腾焙烧产品产率计算结果

Table 7 Calculation results of product yield from continuous fluidized bed roasting

产物	质量/kg	产率/%
焙砂	9.203 8	76.70
粉尘	3.973 3	33.11
合计	13.177 1	109.81

将沸腾焙烧640~720 min后产出的溢流砂、粉尘及二者按一定质量比混合形成的混合砂作为原料开展酸浸及水浸试验,试验结果如表8所示,烟气成分检测结果如表9所示。

表8 连续沸腾焙烧640~720 min产品浸出结果

Table 8 Leaching results of products from continuous fluidized bed roasting (640-720 min)

原料	浸出工艺	浸渣产率/%	铜浸出率/%	钴浸出率/%
混合砂	水浸	55.40	87.63	87.03
	酸浸	49.03	96.58	89.57
溢流砂	水浸	55.70	84.36	88.37
	酸浸	47.41	97.02	91.15
粉尘	水浸	55.01	90.79	80.87
	酸浸	53.48	96.17	83.26

表9 连续沸腾焙烧烟气成分检测结果

Table 9 Flue gas composition analysis results from continuous fluidized bed roasting

成分	O ₂ ¹⁾	CO	SO ₂
ρ /(mg·m ⁻³)	2.95	2 130	60 900

注:1) ρ (O₂)/%。

由表6~9可知:沸腾焙烧温度630℃,气料比2.2 m³/kg,物料停留时间6~7 h,焙砂产率为76.70%,粉尘产率为33.11%。连续沸腾焙烧产生的混合砂经过硫酸浸出,铜、钴浸出率分别为96.58%、89.57%;混合砂水浸时,铜、钴浸出率分别为87.63%、87.03%。连续沸腾焙烧过程中烟气中氧气浓度为2.95%,SO₂浓度为60 900 mg/m³,CO浓度为2 130 mg/m³。

3.2.3 粉尘金属量

在连续沸腾焙烧过程中,粉尘的回收主要采用重力除尘、旋风除尘及布袋除尘相结合的方式。粉尘中金属相对含量分析结果如表10所示。

表10 粉尘中金属相对含量分析结果

Table 10 Analysis results of relative metal content in dust

回收方式	产率/%	相对产率/%	铜相对含量/%	钴相对含量/%
重力除尘	17.39	52.52	13.13	10.01
旋风除尘	10.47	31.62	5.04	2.83
布袋除尘	5.25	15.86	1.17	0.69
合计	33.11	100.00	19.34	13.53

由表10可知:连续沸腾焙烧过程中,52.52%的粉尘通过重力除尘装置回收,其中,铜、钴相对含量分别为13.13%、10.01%;31.62%的粉尘通过旋风除尘装置回收,其中,铜、钴相对含量分别为5.04%、2.83%;15.86%的粉尘通过布袋除尘装置回收,其中,铜、钴相对含量分别为1.17%、0.69%。

4 结论

1)国外某含钴铜精矿采用沸腾焙烧处理,最佳沸腾焙烧温度630℃,空气气氛,气料比2.2 m³/kg(工况),物料停留时间6~7 h,焙砂产率为76.70%,粉尘产率为33.11%。连续沸腾焙烧产生的混合砂经过硫酸浸出,铜、钴浸出率分别为96.58%、89.57%;沸腾焙烧过程产生的烟气中O₂浓度为2.95%,SO₂浓度为60 900 mg/m³,CO浓度为2 130 mg/m³。

2)在连续沸腾焙烧过程中,52.52%的粉尘通过重力除尘装置被回收,其铜、钴相对含量分别为13.13%和10.01%;31.62%的粉尘通过旋风除尘装置回收,铜、钴相对含量分别为5.04%和2.83%;剩余15.86%的粉尘通过布袋除尘装置回收,铜、钴相对含量分别为1.17%和0.69%。

[参考文献]

- [1] 刘忠胜,邢飞,段英楠.某钴铜精矿硫酸化焙烧试验研究[J].矿冶工程,2014,34(5):108-112.
- [2] 鲁力,马奎,张响荣,等.中非某铜钴精矿工艺矿物学特性及影响分析[J].有色金属(选矿部分),2023(5):10-15.
- [3] 王建政,朱德兵,孔令强,等.某铜钴精矿硫酸化焙烧—酸浸试验研究[J].黄金,2020,41(12):69-71.
- [4] CHEN J Y, CHU B B, LI G X, et al. Improving the electrochemical performance of ultrahigh-nickel-based layered LiNi_{0.95}Mn_{0.05}O₂ cathode through cobalt modification for next-generation highenergy Li-ion batteries[J].Electrochemistry Communications, 2023, 152: 107514.
- [5] 沈镭,武娜,钟帅,等.经济新常态下中国矿业供给侧改革发展战略研究[J].中国人口·资源与环境,2017,27(7):8-17.
- [6] 李祥,马保中,马玉天,等.复杂铜钴共生伴生矿有价金属回收综述[J].工程科学学报,2024,46(8):1 349-1 357
- [7] CRUNDWELL F K, DU PREEZ N B, KNIGHTS B D H. Production

- of cobalt from copper-cobalt ores on the African Copper belt—An overview[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 156: 106450.
- [8] 余群波, 韦其晋, 郭持皓. 非洲某铜钴精矿焙烧试验研究[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(1): 19-22.
- [9] 汪云华, 董海刚, 范兴祥, 等. 两段硫酸化焙烧—水浸从红土镍矿中回收镍钴[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2012(2): 16-18.
- [10] 汤玉和, 汪泰, 李杏英, 等. 云南某铜钴矿的选冶试验研究[J]. *矿冶工程*, 2011, 31(5): 53-55.
- [11] 梁建龙, 刘惠娟, 史文革, 等. 某含钴铜尾矿的浸出研究[J]. *矿冶工程*, 2006, 26(5): 37-39.
- [12] 陈晓军, 孙彦文, 郭持皓. 高硫铜钴精矿焙烧—酸浸试验[J]. *云南化工*, 2021, 48(7): 39-40.
- [13] 孟祥龙, 张海宝, 陈燕杰, 等. 刚果(金)铜钴矿处理方法综述[J]. *有色冶金设计与研究*, 2022, 43(1): 1-4.
- [14] 韦其晋, 霍松龄, 孙留根, 等. 非洲某高铜低硫铜精矿焙烧—酸浸试验研究[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(6): 27-31.
- [15] 霍明春, 陆兆锋, 杨晓龙, 等. 某金精矿焙烧氧化—氰化浸金试验研究[J]. *黄金*, 2023, 44(11): 44-47.
- [16] 张清波. 原矿焙烧提金技术分析[J]. *黄金*, 2020, 41(9): 108-112.
- [17] 李健, 王鹏, 赵国惠, 等. 某含金原生矿石沸腾焙烧—氰化提金工艺试验研究[J]. *黄金*, 2021, 42(8): 71-75.
- [18] 郭韵, 张福建, 张栩宁, 等. 复杂锌精矿沸腾焙烧的行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(4): 71-74.
- [19] 邓蕊, 曾鹏, 陈国木, 等. 锌精矿富氧焙烧工业试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019(6): 11-14.
- [20] 裴增文, 吴文辉, 尹福兴, 等. 含金高品位硫精矿沸腾焙烧工业试验研究[J]. *黄金*, 2022, 43(4): 58-64.

Experimental study on fluidized bed roasting of cobalt-bearing copper concentrate

Li Jian

(Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: This study investigates the fluidized bed roasting process for treating a cobalt-bearing copper concentrate from overseas, focusing on investigating the key technical parameters of the ore during fluidized bed roasting. Results demonstrate that the optimal fluidized bed roasting conditions include a temperature of 630 °C, air atmosphere, gas-to-feed ratio of 2.2 m³/kg (operational), and material retention time of 6–7 h. Under these conditions, the roasting slag yield reaches 76.70 %, with a dust generation rate of 33.11 %. Subsequent sulfuric acid leaching of the mixed slag after continuous fluidized bed roasting achieves leaching rates of 96.58 % for copper and 89.57 % for cobalt. Flue gas analysis reveals an oxygen concentration of 2.95 %, SO₂ concentration of 60 900 mg/m³, and CO concentration of 2 130 mg/m³. Relative productivity of recovered dust via gravity, cyclone, and bag filter systems are 52.52 %, 31.62 %, and 15.86 %, respectively. The relative metal contents of copper and cobalt in the dust account for 19.34 % and 13.53 %, respectively. These results provide solid data for the industrial-scale fluidized bed roasting design of cobalt-bearing concentrates.

Keywords: cobalt-bearing copper concentrate; fluidized bed roasting; roasting temperature; gas-to-feed ratio; roasting slag; leaching

(上接第53页)

Experimental study of the beneficiation of the ores on the southern ore belt in a gold deposit, Minxian, Gansu

Kang Chengxin^{1,2}, Yang Ke^{1,2}, Ji Shengjun^{1,2}, Hao Baisong^{1,2}, Hui Baoyi^{1,2}

(1. Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey;

2. Innovation Center for Gold Exploration Technology, China Geological Survey)

Abstract: A gold deposit in Minxian, Gansu, features fine-grained pyrite as the primary gold-bearing mineral, with elevated hazardous arsenic content and gold predominantly occurring as encased gold. To optimize gold recovery from the ores, beneficiation tests of the ores on the southern ore belt were conducted comparing the recovery effects of flotation, gravity separation, carbon-in-leach (CIL), and roasting, both individually and in combination. Results indicate that flotation effectively recovers gold and silver from the ores on the southern ore belt, yielding a gold concentrate grade of 45.41 g/t Au and 134.00 g/t Ag, with recovery rates of 73.76 % Au and 84.05 % Ag. However, due to high average arsenic levels in gold-bearing pyrite and the presence of arsenopyrite, the gold concentrate retains 1.00 % arsenic through the flotation of the ores on the southern ore belt. Exploratory arsenic reduction tests revealed a strong correlation between gold and arsenic, rendering effective separation unfeasible.

Keywords: resources utilization; arsenic-bearing; flotation; encased gold; refractory ore; Carlin-type gold deposit