

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.04.007

含钼铜精矿氧化焙烧-浸出分离钼研究

肖军辉^{1,2,3}, 施哲¹, 陈金花³

(1.昆明理工大学 冶金与能源工程学院,昆明 650093;2.西南科技大学 环境与资源学院,
四川 绵阳 621010;3.四川省有色科技集团有限责任公司,成都 610081)

摘要:四川攀西地区的含钼铜精矿中,由于钼、铜矿物组成复杂,共生关系紧密,提出了氧化焙烧-浸出工艺进一步分离钼。将试样置入焙烧炉中进行氧化焙烧,使硫化物转化为 CuO、MoO₃、Fe₂O₃ 等氧化物后;添加 NaOH、H₂O 与 MoO₃ 反应生成可溶性 Na₂MoO₄,浸出渣作为铜精矿产品。研究结果表明:铜、钼等以氧化物形式赋存于焙烧矿中,氧化焙烧矿中的硫含量较低为 0.53%,硫以 SO₂ 气相形式挥发;在焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 120 min、氢氧化钠用量为 30%、浸出温度 60 ℃、浸出时间 120 min、浸出液固比 2:1 的综合条件下,钼的浸出率为 94.24%,铜精矿(浸出渣)中铜的质量分数为 24.27%,钼分离效果明显。

关键词:黄铜矿;辉钼矿;硫钼铜矿;氧化焙烧;浸出

中图分类号:TF19;TD954

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)04-050-07

Study on separation of molybdenum from molybdenum-containing copper concentrate by oxidizing roasting-leaching

XIAO Junhui^{1,2,3}, SHI Zhe¹, CHEN Jinhua³

(1. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P.R.China; 2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, P.R.China; 3. Sichuan Provincial Non-Ferrous Technology Group Co., Ltd., Chengdu 610081, P.R.China)

Abstract: An oxidizing roasting-leaching flowsheet was proposed to further separate molybdenum because of complex minerals composition and tightness paragenetic relationship of molybdenum and copper in the molybdenum-containing copper concentrate in western Panzhihua of Sichuan province. Samples were put into the roasting furnace to conduct oxidizing roasting, and sulphide ore was oxidized into CuO, MoO₃, Fe₂O₃, etc. Then, NaOH and H₂O were added to react with MoO₃, and Na₂MoO₄ was produced, and leaching residue was taken as the copper concentrate. Study results indicate that copper and molybdenum occur in the form of oxide in the roasting ores. The sulfur content is 0.53% in the roasting ores, and sulfur volatilizes in the form of SO₂. The leaching ratio of molybdenum is 94.24% and the copper mass fraction in the copper concentrate(leaching residue) is 24.27% when the roasting temperature is 650 ℃, roasting time is 120 min, NaOH dosage is 30%, leaching temperature is 60 ℃, leaching time is 120 min, and leaching liquid-solid ratio is 2:1. The effect of molybdenum separation is obvious.

Keywords: chalcopyrite; castaingite; molybdenite; oxidizing roasting; leaching

收稿日期:2016-03-01

基金项目:中国博士后科学基金项目(2014M560734)。

Supported by China Postdoctoral Science Foundation(2014M560734).

作者简介:肖军辉(1981-),男,博士(后),副教授,主要从事复杂难选矿选冶理论与工艺方面的研究,
(E-mail)xiaojunhui33@163.com。

某典型铜钼共生矿位于四川攀西地区,矿石中的矿物种类繁多,主要可回收矿物嵌布粒度不均匀,部分铜、钼矿物相互包裹,镶嵌关系较复杂。矿石中主要金属矿物为黄铜矿、辉钼矿、硫钼铜矿、黄铁矿等,脉石矿物主要为石英、长石及云母等矿物。前期主要针对矿床上部和中部进行开采,矿石性质组成比较简单,目的矿物主要为黄铜矿、辉钼矿;目前对矿床下部分进行开采,其矿石性质变化较大,目的矿物主要为黄铜矿、硫钼铜矿,辉钼矿所占比例很小,现有浮选工艺较难实现铜、钼的有效分离。目前,铜、钼分离工艺以单一的火法冶金或湿法冶金为主,存在的问题是铜、钼分离效果不理想^[1-5]。为此,本研究采用火法冶金和湿法冶金相结合的技术路线对含钼铜精矿开展分离钼研究,为攀西复杂难处理含钼铜精矿提供分离钼技术方案。

1 试样性质与研究方法

1.1 试样性质

研究试样采自四川攀西地区某选矿厂的浮选精矿,整体矿床为铜矿床,前期主要针对矿床的上部和中部开采,该部分富铜矿石资源平均含铜的质量分数为 1.82%。目前,在该矿床的下部分资源进行开采时发现铜的品位较低,平均含铜 0.52%,同时伴生有价金属钼,平均含钼的质量分数为 0.22%;现有选矿工艺以浮选工艺为主,已经不适合该部分低品位铜钼矿的处理;矿床下部分的低品位铜钼矿矿石中,铜和钼均以硫化矿为主,具有共生关系复杂、嵌布粒度细(部分粒度细至 5 μm)、钙镁含量高等特点;脉石矿物主要为钙铁辉石、斜长石、少量钾长石、方解石、少量白云石和石英,少量黑云母、绢云母、绿泥石、绿帘石及橄榄石等。试样主要化学成分如表 1 所示,铜物相分析如表 2 所示,钼物相分析如表 3 所示。

表 1 试样主要化学成分分析结果

%

Table 1 Main chemical composition analysis results of sample

%

成分	Cu	Mo	Fe	Pb	Zn	S	As	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO
质量分数	17.13	3.57	8.02	0.06	0.03	20.13	0.001	8.23	5.12	4.11	2.13	1.68

表 2 试样铜物相分析结果

%

Table 2 Copper phase analysis results of sample

%

物相	全铜	原生硫化铜	次生硫化铜	游离氧化铜	结合氧化铜
质量分数	17.13	10.02	6.78	0.18	0.15

表 3 试样钼物相分析结果

%

Table 3 Molybdenum phase analysis results of sample

%

物相	全钼	辉钼矿	硫钼铜矿	钼华	钼铅矿
质量分数	3.57	0.68	2.78	0.04	0.07

从表 1~3 可知:试样铜的质量分数为 17.13%,钼的质量分数为 3.57%,硫的质量分数较高为 20.13%。铜物相以硫化矿为主;钼的物相以硫钼铜矿和辉钼矿为主,并有少量的钼铅矿和钼华。其中,硫钼铜矿属于少见的钼矿物之一,属于铜、钼共生矿物,也进一步说明现有浮选工艺进一步分离含钼铜精矿,实现铜、钼的有效分离比较困难。

1.2 研究方法

试验试样中主要的硫化矿物为黄铜矿、硫钼铜矿、辉钼矿、黄铁矿,根据含钼铜精矿的性质,本研究采用氧化焙烧-浸出工艺分离含钼铜精矿中的 Mo,即在氧化焙烧过程中,硫化矿被氧化生成金属氧化物^[6-9],如式(1)~(4)所示;浸出过程中,MoO₃与强碱(NaOH、NaHCO₃、Na₂CO₃)反应生成钼酸钠进入液相,如式(5)所示;浸出后通过固液分离后得到钼酸钠溶液和铜渣,从而实现钼的有效分离,铜渣可作为铜精矿产品,原则工艺流程如图 1 所示。



试验研究过程中主要的仪器设备为: X 衍射仪、原子吸收仪、ICP-AES 分析仪、管式炉、电磁搅拌器、真空过滤机、干燥箱等。化学试剂为: 氢氧化钠(分析纯)、碳酸钠(分析纯)、碳酸氢钠(分析纯)。

2 结果与讨论

2.1 焙烧温度的影响

氧化焙烧过程中, 焙烧温度是影响焙烧产物形态的关键因素之一^[10-11], 由于含钼铜精矿在氧化焙烧过程中需要合理地控制温度来提高铜、钼氧化物的生成量, 这样有利于后续的碱浸分离铜、钼。试验条件: 焙烧时间 90 min、碳酸钠用量 20%、浸出温度 45 ℃、浸出时间 90 min、浸出液固比 $R=1.5:1$, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知: 提高焙烧温度, 有利于提高铜渣中的铜品位及钼的浸出率, 当温度超过 650 ℃ 时, 铜渣中的铜品位提高幅度很小, 钼的浸出率也趋于稳定, 因此, 焙烧温度为 650 ℃ 比较合适, 钼的浸出率为 72.68%, 浸出渣铜的质量分数为 21.23%。

2.2 焙烧时间的影响

焙烧时间也是影响焙烧产物组成的关键因素之一。增加焙烧时间, 氧化反应进行相对比较彻底, 但时间过长^[12-14], 容易生成其他副产物, 从而影响铜、钼的分离。试验条件: 焙烧温度 650 ℃、碳酸钠用量 20%、浸出温度 45 ℃、浸出时间 90 min、浸出液固比 $R=1.5:1$, 结果如图 3 所示。

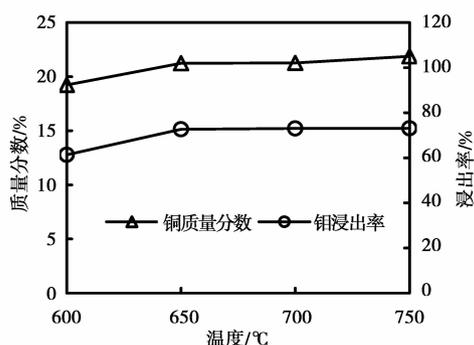


图 2 焙烧温度的影响

Fig.2 Effects of roasting temperature

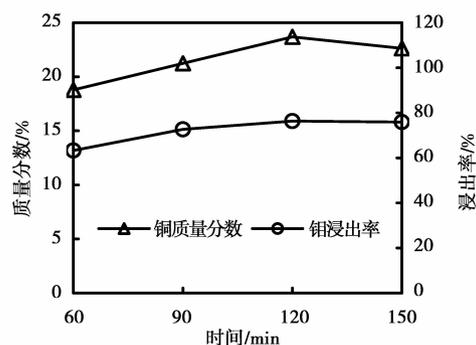


图 3 焙烧温度的影响

Fig.3 Effects of roasting time

由图 3 可知: 延长焙烧时间有利于提高钼的浸出率, 但时间增加至 150 min 时, 钼的浸出率反而降低至 75.89%。因此, 焙烧时间为 120 min 比较合适, 钼的浸出率为 76.32%, 浸出渣铜的质量分数为 23.68%。

2.3 浸出温度的影响

焙烧矿在浸出过程中, 钼的产物主要为钼酸钠, 铜进入渣相中, 提高浸出温度, 将有利于提高反应速度, 温度过高^[15], 将加大其他元素的溶解进入液体相中, 影响钼浸出液进一步提出分离钼。试验条件: 焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 120 min、碳酸钠用量 20%、浸出时间 90 min、浸出液固比 $R=1.5:1$, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 提高浸出温度, 有利于钼的浸出率, 温度为 25 ℃ 时, 钼的浸出率为 75.63%; 当浸出温度提高至 75 ℃ 时, 钼的浸出率与浸出温度 60 ℃ 时相比较, 提高幅度较小。因此, 浸出温度为 60 ℃ 比较合适, 钼的浸出率为 80.08%, 浸出渣铜的质量分数为 22.12%。

2.4 浸出介质种类的影响

常用的碱性浸出剂为碳酸钠、氢氧化钠、碳酸氢钠、氨水, 为考查不同浸出介质对钼浸出率的影响结果,

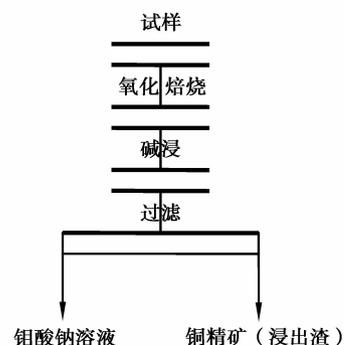


图 1 铜、钼分离原则工艺流程

Fig.1 Principal flowsheet of Separating copper and molybdenum

在焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 120 min、浸出剂用量 20%、浸出时间 90 min、浸出液固比 $R=1.5:1$ 的试验条件下,结果如表 4 所示。

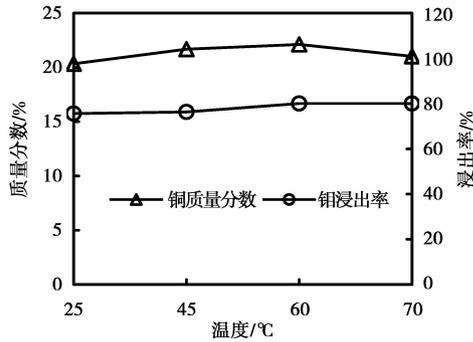


图 4 浸出温度的影响

Fig.4 Effects of leaching temperature

浸出介质	浸出渣铜品位	钼浸出率
Na_2CO_3	22.12	80.08
NaOH	22.65	82.15
NaHCO_3	21.52	76.87
$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	18.65	78.96

由表 4 可知:氢氧化钠作为浸出介质时钼的浸出率最高为 82.15%,其次为碳酸钠作为浸出介质时钼的浸出率为 80.08%;同时,氨水作为浸出介质时,浸出渣铜的质量分数为 18.65%,这主要是由于铜与氨也能形成络合物,导致部分铜进入液相。综合考虑,氢氧化钠作为浸出剂较为合适,钼的浸出率最高为 82.15%,浸出渣铜的质量分数为 22.65%。

2.5 浸出剂用量的影响

在浸出过程中,氢氧化钠与氧化钼反应生成钼酸钠,保证氧化焙烧产品在浸出过程中,钼生成可溶性钼酸钠,因此,其用量将对钼的浸出率有较大影响。在焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 120 min、浸出温度 60 ℃、浸出时间 90 min、浸出液固比 $R=1.5:1$ 的试验条件下进行氢氧化钠用量对钼浸出率的影响试验,结果如图 5 所示。

由图 5 可知:提高浸出剂用量,钼的浸出率提高比较明显,当用量为 30%时,钼的浸出率为 89.13%,随着用量的增加,铜渣中的铜品位区域稳定,钼的浸出率提高幅度也比较小,故浸出剂用量为 30%比较合适,钼的浸出率为 89.13%,浸出渣的铜品位为 24.35%。

2.6 浸出时间的影响

在浸出过程中,延长浸出时间对提高浸出率有利,但浸出时间过长,可能导致其他化学反应的进行^[16-17],影响浸出液中杂质的含量,对后续浸出液进一步分离提纯有一定的影响。在焙烧温度 650 ℃、焙烧时间 120 min、氢氧化钠用量为 30%、浸出温度 60 ℃、浸出液固比 $R=1.5:1$ 的试验条件下进行浸出时间对钼浸出的影响,结果见图 6。

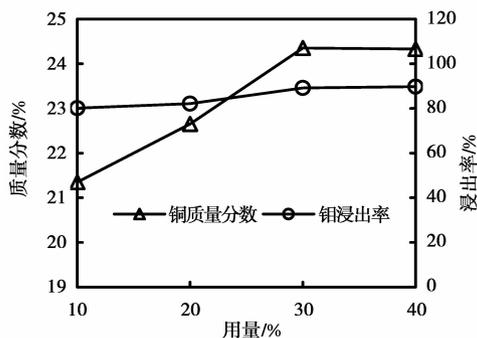


图 5 浸出剂用量的影响

Fig.5 Effects of dosage leaching agent

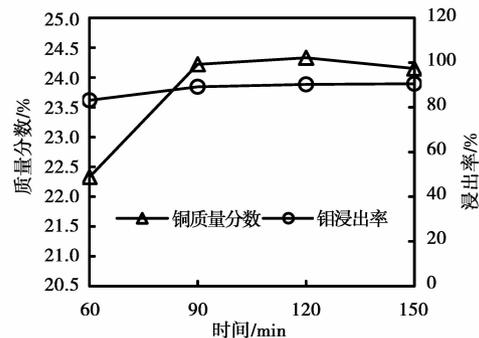


图 6 浸出时间的影响

Fig.6 Effects of leaching time

由图 6 可知:延长浸出时间对提高钼浸出率效果比较明显,当浸出时间超过 120 min 增加至 150 min 时,钼的浸出率仅提高 0.32%,浸出渣的铜品位反而降低了 0.18%,由此表明浸出时间为 120 min 比较合适,钼的浸出率为 90.23%,浸出渣铜的质量分数为 24.33%。

2.7 浸出液固比的影响

浸出液固比增加,浸出体系中 OH^- 、 CO_3^{2-} 的电离度增加,有利于化学反应的进行,促进钼酸钠的生成。在焙烧温度 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧时间 120 min 、氢氧化钠用量为 30% 、浸出温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、浸出时间 120 min 的试验条件下进行浸出液固比的影响试验,结果如图 7 所示。

由图 7 可知:浸出液固比提高,钼的浸出率呈上升规律变化,液固比提高至 2.0 时,钼的浸出率为 93.67% ;当液固比位 2.5 时,钼的浸出率提高 0.08% ,变化较小。因此,液固比 $R=2.0$ 比较合适,钼浸出率为 93.67% ,浸出渣铜的质量分数为 24.32% 。

2.8 氧化焙烧-浸出工艺综合条件试验

通过对含钼铜精矿的焙烧-浸出条件试验,得到了综合条件为:

焙烧温度 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧时间 120 min 、氢氧化钠用量为 30% 、浸出温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、浸出时间 120 min 、浸出液固比 $R=2:1$,并得到铜的质量分数为 24.32% 的铜精矿(浸出渣),钼的浸出率为 93.67% ,实现了含钼铜精矿中钼的初步分离,同时也得到了铜品位较高的浸出渣,可直接作为铜精矿产品。为进一步验证铜、钼分离工艺的可行性与可重复性,将试验规模增加至 1 kg/次 ,焙烧矿经过浸出后的铜渣主要化学成分分析如表 5 所示。

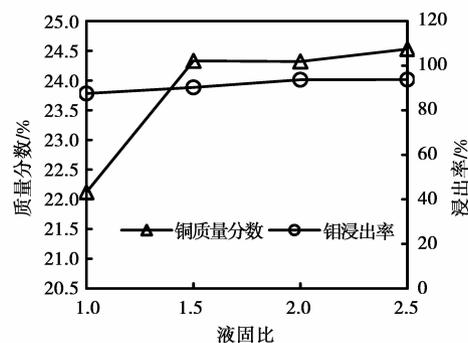


图 7 浸出液固比影响

Fig.7 Effects of leaching-solid ratio

表 5 铜渣化学成分分析结果

Table 5 Main chemical composition analysis results of copper residue

成分	Cu	Mo	Fe	Pb	Zn	S	As	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO
质量分数	24.27	0.24	14.33	0.06	0.03	2.07	0.001	5.25	2.98	2.68	1.33	0.64

由表 5 可知:氧化焙烧前,含钼铜精矿中铜的质量分数为 17.13% 、钼的质量分数为 3.57% ;氧化焙烧-浸出后,浸出渣中铜的质量分数提高至 24.27% 、钼的质量分数降低至 0.24% ,钼的综合浸出率为 94.24% ,优于单一条件试验的钼浸出率指标,这表明氧化焙烧-浸出处理四川攀西地区含钼铜精矿较为合理,且钼的分离效果明显。

2.9 讨论

通过氧化焙烧和浸出工艺条件对铜、钼分离的影响试验,得到了钼浸出率为 94.24% ,铜质量分数为 24.27% 的铜精矿产品(浸出渣)的分离指标,铜、钼分离效果显著。为从理论上进一步验证氧化焙烧-浸出工艺处理该含钼铜精矿的可行性,对主要目的矿物黄铜矿、辉钼矿和硫钼铜矿在焙烧前后的矿相变化规律进行分析研究,借助扫描电镜(SEM)和电子探针(EPMA)分析检测手段,对含钼铜精矿和氧化焙烧矿进行形貌和微区成分分析,结果如图 8 所示和表 6 所示。

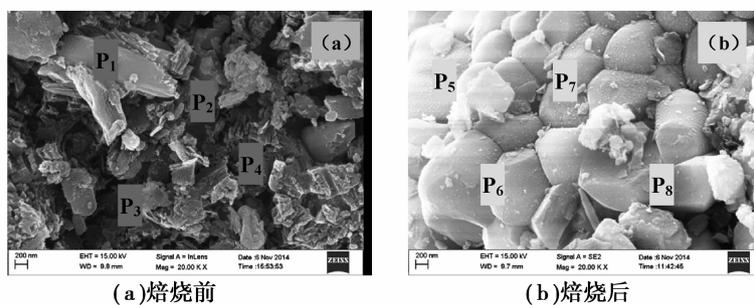


图 8 SEM 形貌分析

Fig.8 SEM images analysis

表6 电子探针成分分析结果
Table 6 Composition analysis results of electron probe

试样	位置	质量分数			
		Cu	Mo	Fe	S
含钼铜精矿	P_1	17.568	3.972	8.175	21.238
	P_2	18.213	3.421	9.126	19.678
	P_3	14.679	2.875	7.874	23.156
	P_4	17.521	4.673	10.236	19.874
	平均	16.995	3.735	8.852	20.987
氧化焙烧矿	P_5	21.694	4.452	15.237	0.228
	P_6	18.976	4.678	13.976	0.189
	P_7	19.137	3.986	14.573	0.237
	P_8	20.132	4.675	15.112	0.209
	平均	19.985	4.448	14.725	0.216

由图8和表6可知:含钼铜精矿经过氧化焙烧后,黄铜矿、硫钼铜矿、辉钼矿、黄铁矿等硫化矿被氧化后生成其金属氧化物;从电子探针对不同位置的成分分析显示,氧化反应进行较为彻底,氧化焙烧矿中硫的含量很低,这表明大部分硫经过焙烧以二氧化硫形式挥发,为后续采用氢氧化钠浸出提供了有利条件。由此表明,该含钼铜精矿在浮选过程分离较为困难,但通过火法和湿法冶金相结合的手段,能够很好地实现铜、钼分离,且分离钼后产生的浸出渣可以作为单独的铜精矿产品,钼酸钠溶液可通过后续的处理工艺制备相应的钼产品。

3 结 论

1)四川攀西地区某选矿厂的含钼铜精矿中,原矿铜的质量分数为17.13%、钼的质量分数为3.57%,铜以黄铜矿为主,钼的赋存状态较为复杂,以硫钼铜矿为主,其次为辉钼矿,由于硫钼铜矿既属于铜矿,又属于钼矿物,导致现有浮选工艺进一步分离钼比较困难。

2)采用氧化焙烧-浸出工艺处理该含钼铜精矿,实现铜、钼分离。氧化焙烧、浸出条件试验结果表明:在焙烧温度650℃、焙烧时间120min、氢氧化钠用量30%、浸出温度60℃、浸出时间120min、浸出液固比 $R=2:1$ 的综合工艺条件下,钼的浸出率为94.24%,铜精矿(浸出渣)中铜的质量分数为24.27%,铜、钼分离指标比较理想。

3)扫描电镜(SEM)形貌及电子探针成分(EPMA)分析表明:含钼铜精矿经过氧化焙烧后,铜、钼、铁的金属硫化物转变为其金属氧化物,为氢氧化钠浸出分离钼生成钼酸钠提供有利条件;同时,焙烧矿中的硫含量较低,进一步说明氧化焙烧产物中铜、铁、钼绝大部分以氧化物形式赋存,硫以 SO_2 气相形式挥发,从理论上验证了氧化焙烧-浸出分离该含钼铜精矿的合理性。

参考文献:

- [1] 张文钰. 钼选矿学技术发展现状与展望[J]. 中国钼业, 2011, 35(1):1-6.
ZHANG Wenzheng. Current situation and prospect of technological development for molybdenum ore dressing[J]. China Molybdenum Industry, 2011, 35(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 王立刚. 含次生铜的铜钼矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2009(6): 7-10.
WANG ligang. The mineral processing research on copper-molybdenum ore including secondary copper[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2009(6): 7-10. (in Chinese)

- [3] 黄彦龙, 文书明, 柏少军, 等. 黑色页岩系钼镍矿脱碳试验研究[J]. 矿冶, 2013, 22(3): 39-42.
HUANG Yanlong, WEN Shuming, BAI Shaojun, et al. Experimental study on black shale molybdenum nickel ore decarbonization[J]. Mining and Metallurgy, 2013, 22(3): 39-42. (in Chinese)
- [4] 王立刚, 刘万峰, 孙志健, 等. 蒙古某铜钼矿选矿工艺技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(1): 10-13.
WANG Ligang, LIU Wanfeng, SUN Zhijian, et al. The mineral processing technological research on a copper-molybdenum ore in mongolia[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(1): 10-13. (in Chinese)
- [5] 赵应征. 某低品位铜钼矿可选性研究[J]. 企业技术开发, 2012, 31(8): 27-28.
ZHAO Yingzheng. Study on the washability of a low grade copper molybdenum [J]. Technological Development of Enterprise, 2012, 31(8): 27-28. (in Chinese)
- [6] 谭欣, 王中明, 赵杰, 等. 含钼、铜、锌、铋多金属硫化矿无氰分离工艺研究[J]. 稀有金属, 2015, 39(4): 350-356.
TAN Xin, WANG Zhongming, ZHAO Jie, et al. Cyanide-free separation process of polymetallic sulfide ores containing Mo, Cu, Zn and Bi[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(4): 350-356. (in Chinese)
- [7] 王磊, 郭培民, 庞建明, 等. 钼精矿真空分解工艺热力学分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 190-196.
WANG Lei, GUO Peimin, PANG Jianming, et al. Thermodynamic analysis of vacuum decomposition process of molybdenum concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 190-196. (in Chinese)
- [8] 康维刚, 郭鹏志, 邱沙, 等. 河北某难选钼矿硫酸浸钼试验[J]. 金属矿山, 2015(7): 77-79.
KANG Weigang, GUO Pengzhi, QIU Sha, et al. Experiments on molybdenum acid leaching of a refractory molybdenum ore in hebei[J]. Metal Mine, 2015(7): 77-79. (in Chinese)
- [9] Lee J Y, Kumar J R, Jeon H S, et al. Up-gradation of MoO_3 and separation of copper, iron, zinc from roasted molybdenum ore by a leaching process[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(2): 391-397.
- [10] 俞娟, 杨洪英, 方钊, 等. 某难分离铜钼混合精矿的分离研究[J]. 稀有金属, 2014, 38(3): 494-501.
YU Juan, YANG Hongying, FANG Zhao, et al. Separation of a refractory copper-molybdenum bulk concentrate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(3): 494-501. (in Chinese)
- [11] Li L F, Cao Z F, Zhong H, et al. The selective leaching and separation of molybdenum from complex molybdenite concentrate containing copper[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2013, 30(4): 233-237.
- [12] Tan X, Wu W G, Wang Z M, et al. Experimental study on comprehensive recovery of valuable minerals from flotation tailings in copper-molybdenum mine[J]. Advanced Materials Research, 2014, 878: 234-243.
- [13] Khoshnevisan A, Yoozbashizadeh H, Mohammadi M, et al. Separation of rhenium and molybdenum from molybdenite leach liquor by the solvent extraction method[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2013, 30(1): 53-58.
- [14] Padilla R, Letelier H, Ruiz M C. Kinetics of copper dissolution in the purification of molybdenite concentrates by sulfidation and leaching[J]. Hydrometallurgy, 2013, 137: 78-83.
- [15] Lou Z, Wang J, Jin X, et al. Brown algae based new sorption material for fractional recovery of molybdenum and rhenium from wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 273: 231-239.
- [16] Chen J H, Lan L H, Liao X J. Depression effect of pseudo glycolylthiourea acid in flotation separation of copper-molybdenum[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 824-831.
- [17] Ge B, Liu S, Nie Q, et al. Applying one-stage grinding and flotation to improving copper recovery of a fine-grained Cu-Mo sulphide ore[J]. Separation Science and Technology, 2013, 48(12): 1900-1905.

(编辑 王维朗)