文章编号：1004-0609(2014)06-1616-07

辉钼矿的造锍熔炼与吹炼

刘旭恒，陈星宇，赵中伟，马 飞

(中南大学 冶金与环境学院，长沙 410083)

摘 要：利用重金属冶金中的熔炼技术，采用辉钼矿与白冰铜造锍熔炼、富氧吹炼使钼氧化挥发的新方法，实现辉钼矿中钼的提取，研究造锍过程中白冰铜溶解辉钼矿的行为以及物料配比、吹炼温度和空气流量等因素对 MoO_3 挥发率的影响。结果表明：当冰铜与辉钼矿的质量比不低于 12:5、吹炼温度不低于 1150 ℃时，辉钼矿能完全溶解到白冰铜中形成共熔体；优化后的吹炼条件如下：按白冰铜与辉钼矿的质量比为 150:30 配料混合均匀，将混合物在 1300 ℃下保温 5 h，再以 10 L/h 的气流量吹炼 1 h，MoO_3 的挥发率达到 70.79%。

关键词：辉钼矿；冰铜；造锍；吹炼

中图分类号：TF111 **文献标志码**：A

Treatment of molybdenite by matte smelting-converting method

LIU Xu-heng, CHEN Xing-yu, ZHAO Zhong-wei, MA Fei

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A novel method of recovering molybdenum directly from gas phase was proposed. A smelting and converting process was put forward based on the new idea, during which molybdenite dissolved in white copper matte and was extracted from the copper molybdenum matte after its oxidization and volatilization. The behavior of molybdenite dissolution in copper matte and the effects of mixture ratio, smelting temperature and air flow were investigated. The results show that molybdenite can be digested completely into copper matte when *m*(copper matte)/*m*(molybdenite) is not less than 12:5 (mass ratio) and smelting temperature is above 1150 ℃. The optimum converting condition is determined as follows: The matte smelting was carried out at 1300 ℃ for 5 h when the mixture ratio of copper matte to molybdenite is 150:30, and then the air was blown into the melt with air flow of 10 L/h at 1300 ℃ for 1 h. The evaporation rate of MoO_3 from the molybdenite is up to 70.79% under the optimum condition.

Key words: molybdenite; copper matte; matte smelting; converting

辉钼矿是钼冶炼行业的主要原料，目前处理辉钼矿的方法主要有焙烧分解法[1−2]、硝酸分解法[3−4]、氧压煮法[5−6]、次氯酸钠分解法[7−8]、电氧化分解法[9−10]和生物浸出法[11]等。其中，焙烧分解法是目前工业上处理辉钼矿的主要方法。用该方法处理辉钼矿时，反应前期由于矿物中大量硫被氧化而放出大量热量，使焙烧温度急剧升高，而 MoO_3 的熔点和沸点都比较低，过高的焙烧温度使一部分 MoO_3 升华，造成 Mo 的损失，因此，焙烧前期需要鼓入大量空气以降低焙烧温度来减少钼的损失[12]，但大量空气的鼓入会降低烟气中 SO_2 的浓度而无法满足制酸的要求，导致低浓度 SO_2 的烟气排入空气中造成环境污染；到焙烧后期，由于大部分硫已被消耗，焙烧温度无法再依靠硫的氧化放热来维持，需要利用外部能量来维持温度以实现钼的充分氧化。该方法操作简单，但流程长、能耗高、钼回收率低，特别是焙烧时生成的 SO_2 对大气污染非

基金项目：国家自然科学基金面上项目(50974137)

收稿日期：2013-08-30；**修订日期**：2014-01-02

通信作者：赵中伟，教授，博士；电话：0731-88830476；E-mail: zhaozw@csu.edu.cn

常严重。因此，寻求一种既简单高效又能消除或减少对环境污染的辉钼矿冶炼工艺，成为冶金工作者们研究的重点。

孙培梅等[13]将辉钼矿加入到碳酸钠和硫酸钠的熔盐中，通过鼓入空气使 MoS_2 氧化并进一步与碳酸钠反应得到 Na_2SO_4 和 Na_2MoO_4 的共熔体，将共熔体用水溶解后，通过离子交换来提取Mo，硫以 SO_4^{2-}的形态进入溶液，消除了其对大气的污染。受此启发，结合相似相溶原理，本文作者推断：高温下冰铜与同为硫化物的辉钼矿应该能互熔形成共熔体。若如此，将空气或富氧空气通入共熔体中时，由于 Cu 对 S 的亲和力比 Mo 对 S 的亲和力更大，MoS_2 会优先被氧化成 MoO_3 和 SO_2，两者都进入烟气中，收集烟气中的 MoO_3 即可实现 Mo 的提取，而烟气中 SO_2 的浓度要远高于传统工艺烟气中 SO_2 的浓度，通过回收制酸即可解决 SO_2 的污染问题。在通气过程中，控制合理的空气流量以保证冰铜不被氧化，则吹炼后的冰铜可再生循环使用[14−16]。若此方案可行，不仅可以简化辉钼矿的处理工艺，而且有利于解决 SO_2 对环境的污染问题。基于这一新思路，本文作者提出采用造锍吹炼的工艺处理辉钼矿，研究工艺参数对造锍过程及钼挥发率的影响，考察新工艺处理辉钼矿的可行性。

1　实验

1.1　实验原料和试剂

实验的主要原料为辉钼矿和白冰铜，其成分如表 1 所列。

1.2　实验设备和方法

熔炼设备为 1 台 10 kW 的硅碳棒三相井式电炉，装料容器为刚玉坩埚，尺寸为 *d* 8 cm×20 cm。每次实验时，按一定比例将白冰铜和辉钼矿在研钵中混合均匀，装入刚玉坩埚中，将刚玉坩埚放入井式炉，按实验条件加热到一定温度下保温熔融；待物料完全熔融后，将刚玉管插进刚玉坩埚中鼓气吹炼一段时间，待反应完成后，移出刚玉管，冷却到室温后对反应产物进行取样分析。其中，钼含量用碱熔−钒酸铵滴定法分析，铁和铜的含量用酸溶−原子吸收分光光度计分析。

2　结果与讨论

2.1　温度对成锍的影响

按冰铜与辉钼矿的质量比为 60:15 的比例称取物料，混合均匀后加入坩埚中，分别在不同温度下保温 5 h，待熔体冷却后观察其共熔情况(见图 1)。由图 1 可以看出，当温度分别为 1000 和 1100 ℃时，经过高温处理的混合物料结构松散，没有出现明显的共熔体，表明在此温度下，辉钼矿和白冰铜无法实现共熔；而要实现辉钼矿的造硫吹炼提取钼，必须要使辉钼矿充分溶解到白冰铜中，才能促进后续吹炼过程中气−液反应的进行。当温度升高到 1150 ℃时，辉钼矿和白冰铜发生了共熔，表明辉钼矿和冰铜的共熔温度在 1100~1150 ℃之间。CHEN 等[17]采用步冷曲线法测定了 Cu_2S-MoS_2 二元系的相图，发现其共晶温度为 (1117±3) ℃，这与本实验的结果一致，因此，控制熔炼温度在 1150 ℃以上即可实现白冰铜与辉钼矿的共熔。从动力学角度考虑，温度较低时共熔速度偏慢，需要较长时间才能使两者完全共熔，因此，可以提高熔炼温度来加快共熔速度，提高生产效率。

2.2　温度对吹炼过程的影响

按冰铜与辉钼矿的质量比为 150:30 的比例称取物料，混合均匀后装入刚玉坩埚，分别在 1200、1250、1300 和 1350 ℃下保温 5 h，再以 10 L/h 的空气流量吹炼 1 h，所得实验数据如表 2 所列，并绘制吹炼渣及锍的组分含量与温度的关系曲线，分别如图 2 和 3 所示。由图 2 可以看出，渣中 Mo 含量随着温度的升高缓慢增加，由于随着温度的升高，MoO_2 转化为 MoO_3 的氧势也随之升高，因此，钼以 MoO_2 的形态残留在渣中的量也略有增加。而渣中铁的含量随着温度的升高明显降低，由于在温度较低时，硫化亚铁被氧化的趋势相对高温时明显，因此，低温时铁的硫化物更加容易

表 1　实验原料的化学成分

Table 1　Chemical compositions of experimental raw materials

Raw material	Mass fraction/%									
	Mo	S	Fe	Al	Si	Mg	Ca	Pb	Cu	Na
Molybdenite	44.84	30.30	0.70	0.28	1.58	0.34	2.00	1.32	0.03	0.07
Copper matte	−	18.28	0.77	−	0.103	−	−	1.01	77.80	−

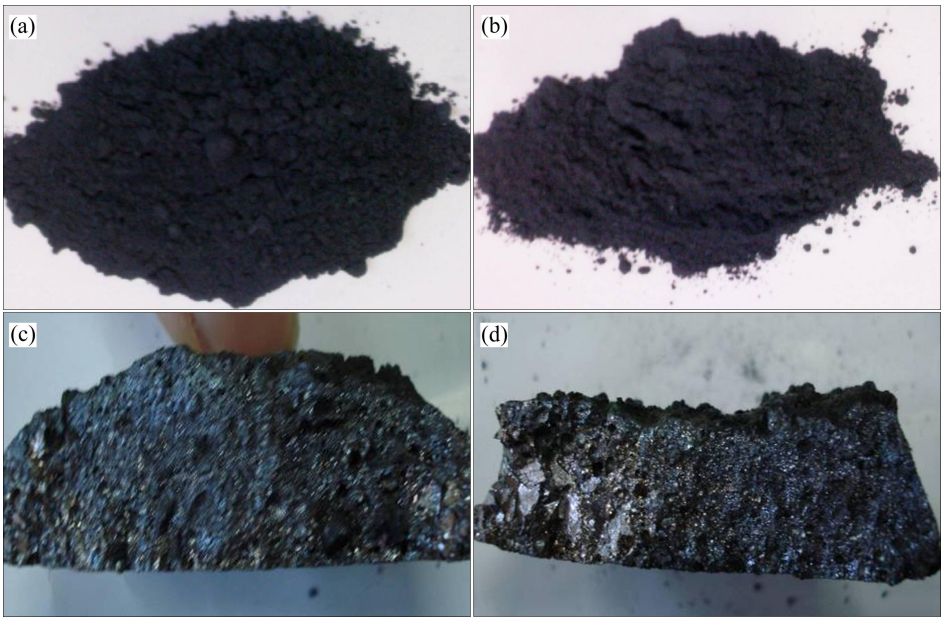


图 1 白冰铜和辉钼矿混合物在不同温度下的共熔效果

Fig. 1 Melting status of mixture of matte and molybdenite under different temperatures: (a) 1000 ℃; (b) 1100 ℃; (c) 1150 ℃; (d) 1200 ℃

被氧化进入渣中，这与图 3 中所示的锍中铁的含量随温度的升高而增加的趋势是一致的，表明温度较低导致冰铜中的硫化亚铁损失更加严重，不利于冰铜的循环使用，因此吹炼温度控制在 1300 ℃为宜。

表 3 所列为 MoO_3 挥发率随吹炼温度的变化。由表 3 可知，吹炼温度对 MoO_3 的挥发率有很大影响。温度较高时不利于 MoO_3 的挥发，这是因为吹炼温度的升高使 MoO_2 转化为 MoO_3 所需的氧势也随着升高，使 MoO_2 更加难以转化为 MoO_3 而挥发；但温度较低

表 2 不同吹炼温度下产物中的主要元素含量

Table 2 Main element contents of products obtained at different converting temperatures

Sample	Temperature/℃	Mass/g	*w*(Mo)/%	*w*(Fe)/%	*w*(Cu)/%
Slag	1200	34.72	7.91	46.89	1.62
Matte		114.46	0.04	1.76	76.42
Slag	1250	24.23	11.09	47.03	2.65
Matte		124.96	0.63	6.92	69.23
Slag	1300	23.78	13.54	41.78	1.63
Matte		133.86	0.68	6.73	70.04
Slag	1350	15.65	23.74	38.78	2.09
Matte		135.16	0.69	8.84	66.75

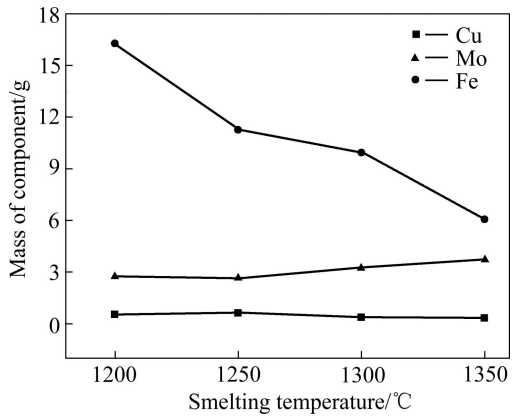


图 2 吹炼温度对渣中组分的影响

Fig. 2 Effect of converting temperature on element content in slag

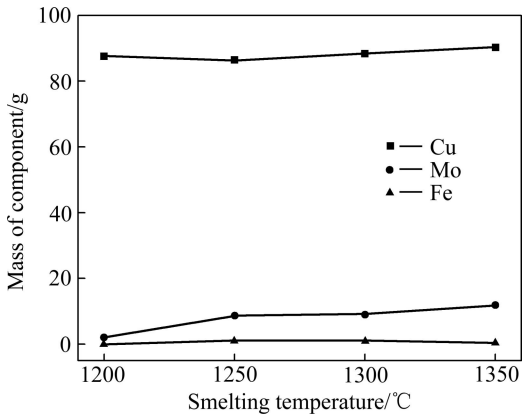


图 3 吹炼温度对锍中组分的影响

Fig. 3 Effect of converting temperature on element content in matte

在动力学上不利于反应的快速进行，同时还使得熔体的黏度大，流动性差，渣和锍的分层困难，造成钼的夹杂损失。在实验过程中发现，当温度为 1200 和 1250 ℃时，熔体分层比较困难，容易造成刚玉管的堵塞；而温度过高时，MoO_3 的挥发率降低，能量消耗增加，因此，综合考虑，选择吹炼温度为 1300 ℃。

表 3　不同温度下 MoO_3 的挥发率

Table 3　Evaporation rates of MoO_3 at different temperatures

Temperature/℃	Evaporation rate of MoO_3/%
1200	79.41
1250	74.29
1300	70.79
1350	69.33

2.3　配料比对成锍效果的影响

按不同质量比称取白冰铜和辉钼矿，将物料混合均匀后装入坩埚中，在 1300 ℃下保温 5 h，待熔体冷却后观察其熔融效果，并分析其中 Mo 的含量，所得结果见表 4。由表 4 可知，不同配料比的混合物料都出现了共熔的现象，当白冰铜与辉钼矿的质量比控制在不小于 60:25 时，冷却后的物料形成一个熔融体，没有出现分层的现象，表明此时辉钼矿已完全溶解到白冰铜中，共熔体中 Mo 含量最高达到 9.45%；而当白冰铜与辉钼矿的质量比为 3:2 时，由于辉钼矿用量已超过了白冰铜对辉钼矿的饱和溶解量，因此，辉钼矿无法完全溶解到白冰铜中，熔体出现分层现象；对于单纯的共熔造锍过程，辉钼矿溶解的量越多越好，但辉钼矿含量的增加会导致熔体黏度增大，流动性变差，这不利于后续的富氧吹炼过程，同时也使得锍和渣的分层更加困难，因此，辉钼矿的加入量需要结合其对吹炼过程的影响来进行选择。

表 4　不同配料比物料的熔融情况

Table 4　Melting status of products with different mixture ratios of matte to molybdnite

Sample No.	Mass ratio of matte to molybdenite	*w*(Mo)/%	Melting status of products
1	60:10	4.97	Completely Co-molten
2	60:15	6.96	Completely Co-molten
3	60:20	8.55	Completely Co-molten
4	60:25	9.45	Completely Co-molten
5	60:40	Completely Co-molten: 9.93 Non Co-molten: 17.07	Partly Co-molten

2.4　配料比对吹炼过程的影响

将冰铜 150 g，辉钼矿质量分别为 15、20、30、40 和 50 g 进行混合配料，在 1300 ℃下保温 5 h 后进行吹炼，吹炼时间为 1 h，空气流量为 10 L/h。待熔体冷却后分析其组分含量，并绘制出辉钼矿加入量与吹炼渣组分含量与锍组分含量的关系曲线，分别如图 4 和 5 所示。由图 4 可知，辉钼矿的加入量对吹炼渣中 Mo 含量影响较大。辉钼矿加入量的增加导致 MoO_2 量的增加，使得其与铁氧化物反应生成 $FeMoO_4$ 的量也增加。MoO_2 和 $FeMoO_4$ 均难溶解于冰铜与辉钼矿的硫化物共熔体中，同时又无法转化为易挥发的 MoO_3 进入烟气中，导致 MoO_2 和 $FeMoO_4$ 进入吹炼渣中，造成渣中 Mo 含量不断升高，这一过程不利于 Mo 的挥发提取。而如图 5 所示，在不同辉钼矿用量的条件下，吹炼后锍中 Mo 含量都低于 1%，表明此时锍中绝大部分的 Mo 已反应生成了氧化物。辉钼矿加入量越大，Mo 氧化进入渣中的量越多，Mo 的损失也随之增大，最终导致 MoO_3 的挥发率逐渐降低，由表 5 所列的 MoO_3 挥发率结果可以看出，当辉钼矿的加入量为 20 g 时，MoO_3 的挥发率达到 75.33%；而加入 50 g 辉钼矿时，MoO_3 的挥发率仅为 47.6%。因此，辉钼矿的加入量越少，对 MoO_3 的挥发越有利，但从生产的角

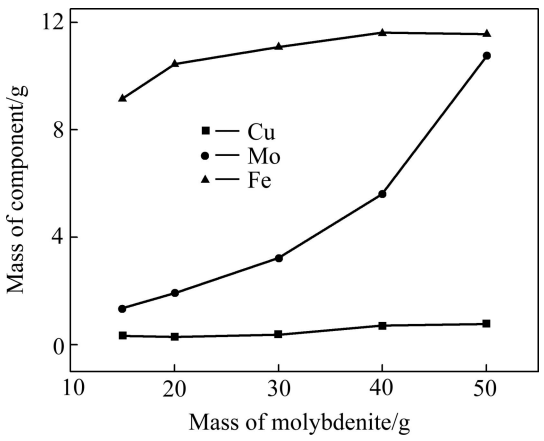


图 4　辉钼矿加入量对吹炼渣组分的影响

Fig. 4　Effect of amount of molybdenite on element content in slag

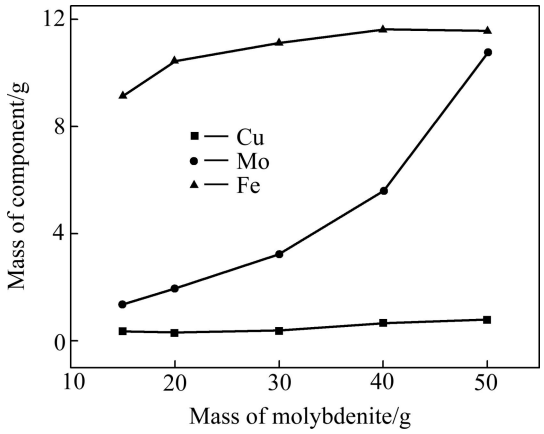


图 5 辉钼矿加入量对锍中组分的影响

Fig. 5 Effect of amount of molybdenite on element content in matte

度来考虑，辉钼矿用量太少会导致能耗的增加，综合考虑，选取配料比为白冰铜与辉钼矿的质量比为 150:30。

2.5 空气流量对吹炼过程的影响

将 150 g 冰铜和 30 g 辉钼矿混合均匀后装入刚玉坩埚，在 1300 ℃下保温 5 h，分别按不同流量通空气吹炼 1 h，待反应结束后分析吹炼产物中 Mo、Cu 和 Fe 的含量，其结果如表 6 所列。由表 6 可知，当气流量为 10 L/h 时，MoO_3 的挥发率最高。对于低价 Mo，氧浓度越高，氧气量越大，对 Mo 的氧化过程越有利，因此，当空气流量较小时，由于鼓入氧气量的不足，无法将 Mo 彻底氧化成 MoO_3，使得 MoO_3 的挥发率较低，如在空气流量为 5 L/h 条件下，MoO_3 的挥发率仅为 25.33%。

吹炼过程中，在富氧条件下，冰铜中的硫化亚铁可以被氧化成 FeO、Fe_3O_4 和 Fe_2O_3，如果 MoO_2 未被彻底氧化成 MoO_3，则可能与 FeO、Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 反应生成 $FeMoO_4$ 进入渣中，造成 Mo 的损失，其反应

表 5 不同辉钼矿加入量条件下 MoO_3 的挥发率

Table 5 Evaporation rates of MoO_3 with different amount of molybdenite

Mass of molybdenite/g	Evaporation rate of MoO_3/%
15	73.78
20	75.33
30	70.79
40	65.83
50	47.6

表 6 不同空气流量条件下造锍产物中的元素含量

Table 6 Element contents of converting product obtained at different air flows

Sample	Air flow/ ($L \cdot h^{-1}$)	Mass of converting product/g	w(Mo)/%	w(Fe)/%	w(Cu)/%	Evaporation rate of MoO_3/%
Slag	5	39.6	23.89	34.64	1.84	25.33
Matte		120.2	0.53	4.07	71.06	
Slag	7	34.4	24.58	35.02	1.63	31.04
Matte		115.7	1.60	3.78	73.02	
Slag	10	23.8	13.54	40.19	1.65	70.79
Matte		133.9	0.68	7.76	69.04	
Slag	16	29.0	20.92	37.98	1.77	64.41
Matte		109.8	0.33	4.93	76.73	
Slag	20	28.53	24.87	32.49	2.49	42.81
Matte		119.46	0.53	7.25	70.32	
Slag	24	31.47	24.66	40.12	2.03	38.07
Matte		123.86	0.49	5.31	69.15	
Slag	28	30.34	24.83	37.86	3.42	40.52
Matte		125.41	0.395	5.92	70.2	
Slag	32	27.38	28.03	30.92	3.16	38.89
Matte		124.43	0.471	7.93	71.01	

方程式如下：

$$FeO+MoO_2+1/2O_2=FeMoO_4 \quad (1)$$

$$Fe_3O_4+O_2+3MoO_2=3FeMoO_4 \quad (2)$$

$$Fe_2O_3+MoO_2=FeMoO_4+FeO \quad (3)$$

由表 6 可知，空气流量为 16 L/h 时，MoO_3 的挥发率低于空气流量为 10 L/h 时 MoO_3 的挥发率。这是由于鼓入的氧气量较多，Fe 的氧化比较充分，此时铁主要以氧化物的形态存在，促进式(1)~(3)所示的化学反应进行，使 Mo 以 $FeMoO_4$ 的形态进入渣中，降低了 MoO_3 的挥发率。因此，吹炼过程中要合理控制空气流量，既保证 Mo 能被充分氧化成 MoO_3 挥发到烟气中，同时又不至于因空气流量过大造成 Fe 过分氧化，使其与 MoO_2 反应生成 $FeMoO_4$ 造成 Mo 的损失；且空气流量太大会带走大量的热，增加能量消耗，同时，还会使烟气中 SO_2 浓度的降低，增加 SO_2 回收制酸的难度，综合考虑，空气流量以 10 L/h 为宜。

3　结论

1) 采用造锍熔炼–吹炼方法处理辉钼矿，熔融实验结果表明，控制白冰铜与辉钼矿的质量比不低于 12:5、温度不低于 1150 ℃时，辉钼矿能完全溶解到白冰铜中形成铜钼锍，证实了造锍熔炼–吹炼法处理辉钼矿的可行性。

2) 在白冰铜与辉钼矿的质量比为 150:30 进行混合配料，混合物在 1300 ℃下保温 5 h，再在空气流量为 10 L/h 的条件下吹炼 1 h，在此条件下，MoO_3 的挥发率达到 70.79%。

3) 大部分氧化而未挥发的 Mo 以 $FeMoO_4$ 的形态存在于渣中，$FeMoO_4$ 与黑钨矿的结构类似，用烧碱或苏打即可将其中的 Mo 浸出，这为将来的工作提供了新的研究方向。

REFERENCES

[1] 任宝江. 钼精矿焙烧工艺与钼焙砂后续加工的探讨[J]. 中国钼业, 2002, 26(5): 14−16.
REN Bao-jiang. Discussion on the roasting technology of molybdenum concentrates and subsequent deep performance of commercial molybdenum oxide[J]. China Molybdenum Industry, 2002, 26(5): 14−16.

[2] 刘成西, 张　干. 采用回转窑焙烧钼精矿[J]. 工业炉, 2004, 26(2): 18−20.
LIU Cheng-xi, ZHANG Gan. Rotary dryer for roasting molybdenum concentrate[J]. Industrial Furnace, 2004, 26(2): 18−20.

[3] 张启修, 赵秦生. 钨钼冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 163−177.
ZHANG Qi-xiu, ZHAO Qin-sheng. Tungsten and molybdenum metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 163−177.

[4] 杨洪英, 俞　娟, 佟琳琳, 罗文杰. 低品位复杂钼精矿的提纯工艺[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 2012−2018.
YANG Hong-ying, YU Juan, TONG Lin-lin, LUO Wen-jie. Purification process of low-grade complex molybdenite concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 2012−2018.

[5] 彭建蓉, 杨大锦, 陈加希, 阎江峰. 原生钼矿加压碱浸试验研究[J]. 稀有金属, 2007, 31(S1): s110−s113.
PENG Jian-rong, YANG Da-jin, CHEN Jia-xi, YAN Jiang-feng. Experimental study on alkaline leaching of crude molybdenite under pressure of oxygen[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(S1): s110−s113.

[6] KETCHAM J. Pressure oxidation process for the production of molybdenum trioxide from molybdenite: US, 6149883[P]. 2000−11−21.

[7] 符剑刚, 钟　宏, 吴江丽, 卜向明. 常温常压条件下辉钼矿的湿法浸出[J]. 金属矿山, 2004, 12: 35−38.
FU Jian-gang, ZHONG Hong, WU Jiang-li, PU Xiang-ming. Wet leaching molybdenite at atmospheric temperature and pressure[J]. Metal Mine, 2004, 12: 35−38.

[8] 都基峻, 田　刚, 张　凡. 钼冶炼工艺的循环经济探讨[J]. 环境工程, 2011, 29: 381−384.
DU Ji-jun, TIAN Gang, ZHANG Fan. The analysis of molybdenite decomposition technologies using recycling economic method[J]. Environmental Engineering, 2011, 29: 381−384.

[9] CAO Zhan-fang, ZHONG Hong, LIU Guang-yi. Electric-oxidation kinetics of molybdenite concentrate in acidic NaCl solution[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2009, 87(6): 939−944.

[10] 徐海清, 刘代云, 刘慧勇. 电氧化湿法分解钼中矿工艺[J]. 过程工程学报, 2010, 10(3): 554−558.
XU Hai-qing, LIU Dai-yun, LIU Hui-yong. Hydrometallurgical electro-oxidation process of molybdenum middings[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(3): 554−558.

[11] ABDOLLAHI H, SHAFAEI S Z, NOAPARAST M, MANAFI Z, ASLAN N. Bio-dissolution of Cu, Mo and Re from molybdenite concentrate using mix mesophilic microorganism in shake flask[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 219−230.

[12] 李洪桂. 稀有金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001: 68−76.
LI Hong-gui. Rare metal metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001: 68−76.

[13] 孙培梅, 刘茂盛, 黄永忠, 李洪桂, 李运姣. 辉钼精矿熔盐氧化工艺——Na_2CO_3-Na_2MoO_4-Na_2SO_4 体系[J].中南工业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(5): 407−410.
SUN Pei-mei, LIU Mao-sheng, HUANG Yong-zhong, LI Hong-gui, LI Yun-jiao. Study on melting salt oxidation technology of molybdenite concentrate[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2000, 31(5): 407−410.

[14] 彭容秋. 铜冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004: 55−70.
PENG Rong-qiu. Copper metallurgy[M]. Changsha: Central South University Press, 2004: 55−70.

[15] 刘 柳, 闫红杰, 周孑民, 高 强, 张振杨, 刘方侃, 崔志祥. 氧气底吹铜熔池熔炼过程的机理及产物的微观分析[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2116−2124.
LIU Liu, YAN Hong-jie, ZHOU Jie-min, GAO Qiang, ZHANG Zhen-yang, LIU Fang-kan, CUI Zhi-xiang. Mechanism of copper smelting process by oxygen bottom blowing and microanalysis of smelting products[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2116−2124.

[16] 金开生, 张振健, 王 忠, 张国栋. 铜精矿与金精矿混合熔炼对诺兰达工艺条件影响的研究[J]. 矿冶, 2004, 13(2): 65−67.
JIN Kai-sheng, ZHANG Zhen-jian, WANG Zhong, ZHANG Guo-dong. Study on influence of copper concenyrate co-smelted with gold concentrate in Noranda furnace[J]. Mining & Metallurgy, 2004, 13(2): 65−67.

[17] CHEN Xing-yu, ZHAO Zhong-wei, HAO Ming-ming, LIU Xu-heng. Measurement of binary phase diagram of Cu_2S-MoS_2 system[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 271−275.

(编辑 陈卫萍)