文章编号: 1004-0609(2012)02-0553-07

从镍钼矿中提取镍钼的工艺

彭 俊,王学文,王明玉,肖彩霞,施丽华

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要:针对现行镍钼矿处理工艺存在的钼镍需要分别提取的缺陷,提出镍钼矿加钙氧化焙烧-低温硫酸化焙烧-水浸提取镍钼的新工艺。以贵州遵义镍钼矿为原料,对 CaO 加入量、氧化焙烧温度、氧化焙烧时间、硫酸加入量、 硫酸化焙烧温度、硫酸化焙烧时间以及焙砂水浸工艺参数对镍钼浸出率的影响进行研究。结果表明:在最佳工艺 条件下,钼的浸出率为 97.33%,镍的浸出率为 93.16%,且最佳工艺参数为 100 g 镍钼矿加入 35 g CaO,700 ℃ 氧化焙烧 2 h,得到的焙砂加入 70 mL 浓硫酸,再经 250 ℃硫酸化焙烧 2 h;硫酸化焙烧得到的焙砂按液固比 2:1 加水搅拌,经 98 ℃浸出 2 h。加入 CaO 不仅能有效减少镍钼矿氧化焙烧烟气对环境造成的污染,而且能显著提 高镍的浸出率。

关键词: 镍钼矿; 氧化焙烧; 硫酸化焙烧; 水浸 中图分类号: TF111.3; TF841.2 文献标志码: A

Extraction process of molybdenum and nickel from Ni-Mo ore

PENG Jun, WANG Xue-wen, WANG Ming-yu, XIAO Cai-xia, SHI Li-hua

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to leach molybdenum and nickel from Ni-Mo ore, the process of oxidation roasting with CaO, sulphation roasting and water leaching was proposed to extract molybdenum and nickel from the Ni-Mo ore. The process parameters effected the leaching rates of molybdenum and nickel, such as CaO addition, oxidation roasting temperature, and so on were investigated. The experimental results show that 97.33% Mo and 93.16% Ni are extracted from the Ni-Mo ore by oxidation roasting the mixture of 100 g Ni-Mo ore with 35 g CaO at 700 °C for 2 h, sulphation roasting the calcine with 70 mL 98% sulphuric acid at 250 °C for 2 h, and then water leaching at 98 °C for 2 h with the liquid and solid ratio of 2:1. CaO addition can not only protect the environment against SO₂ pollution effectively, but also increase nickel leaching rate observably.

Key words: Ni-Mo ore; oxidation roasting; sulphation roasting; water leaching

镍、钼是重要的战略金属,广泛应用于冶金、喷 涂、电子等行业^[1-3]。镍钼矿属于沉积型黑色页岩型矿 床,主要分布在我国贵州遵义、湖南张家界、湖北都 昌、云南曲靖和浙江富阳等地^[4-6]。镍钼矿是一种多金 属复合矿,其中钼含量约为 0.35%~8.17%,主要以碳 硫钼矿的形式存在;镍含量约为 0.17%~7.03%,主要 以硫镍矿、硫铁镍矿、针镍矿等形式存在^[7]。由于其成分复杂,品位相对较低,采用物理及化学选矿技术 很难将其中有用组分进行富集和分离^[8-10]。

目前,镍钼矿处理工艺主要有焙烧-矿热炉熔 炼-Ni-Mo-Fe 合金^[11],氧化焙烧-碱浸^[12],碳酸钠转 化处理^[13],氧化焙烧-N₂CO₃+NaOH 浸出^[14],焙烧活

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA06Z122);国家自然科学基金资助项目(51104186)

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-05-20

通信作者:王学文,教授,博士;电话: 0731-88830247;传真: 0731-88830143; E-mail: wxwcsu@163.com

氧碱浸出^[15],NaOH/NaClO 直接浸出等工艺提取 钼^[16-17],但镍留在渣中需要做进一步处理回收。焙 烧-矿热炉熔炼-Ni-Mo-Fe 合金工艺虽然具有工艺简 单、加工成本低且钼镍能同时回收的优点,但只能得 到初级产品,需进一步加工处理回收镍和钼。

为了同时回收镍钼矿中的镍和钼,缩短工艺流程, 保护环境,降低生产成本和提高资源利用率,本文作 者采用镍钼矿加钙氧化焙烧-低温硫酸化焙烧-水浸 的镍钼提取工艺,对镍钼矿焙烧和水浸工序进行系统 研究。

1 实验

1.1 实验原料

实验所用原料为贵州遵义镍钼矿,其主要化学成 分 XRF 分析结果列于表 1。从表 1 可以看出,镍钼矿 中硫含量较高。为同时提取镍钼矿中镍和钼,并防止 镍钼矿氧化焙烧产生的烟气对环境造成污染,实验采 用了镍钼矿加钙氧化焙烧-低温硫酸化焙烧-水浸的 矿物分解工艺。实验所用的石灰为分析纯 CaO,硫酸 为分析纯 98%的浓硫酸,实验分析所用的试剂均为分 析纯。

表1 镍钼矿主要化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni-Mo ore (mass fraction,%)

Мо	Ni	Fe	Mg	Al	Si
5.42	3.01	7.66	1.48	3.67	11.02
S	Ca	Ι	D	V	As
10.21	7.91	2.	19	0.05	0.53

1.2 实验装置

试验装置主要包括 GM/F97 密封式化验制样粉碎 机;电热马弗炉;电子恒速搅拌器;真空抽滤设备; 电热恒温干燥箱。

1.3 实验过程

将镍钼矿与一定量的 CaO 混匀磨至粒径小于 75 μm,装入陶瓷钵内,放进马弗炉在预定温度下进行氧 化焙烧;待氧化焙砂冷却至室温后,加入一定量的浓 硫酸拌匀熟化 2 h 后,放进马弗炉在预定温度下进行 低温硫酸化焙烧;低温硫酸化得到的焙砂再按一定液 固比加入烧杯中水浸,电炉加热搅拌浸出,搅拌速度 控制为 500 r/min;浸出结束料浆真空抽滤,滤渣烘干 称量,分别测定滤液和滤渣中钼、镍的含量。钼的分析 用硫氰酸铵比色法,镍的分析用丁二酮肟分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 镍钼矿加钙氧化焙烧

2.1.1 CaO 加入量对镍钼浸出率的影响

图 1 所示为 100 g 镍钼矿粉加入一定量的 CaO 混 匀磨细,700 ℃下氧化焙烧2h;氧化焙砂冷却至室温 后,加入 70 mL 浓硫酸拌匀,室温熟化 2 h 后,再 250 ℃下焙烧 2h; 焙砂按液固比 2:1 加水, 98 ℃搅拌 浸出2h得到的实验结果。图1显示, 镍的浸出率随 CaO 加入量的增加而增加,当 CaO 的加入量增加到 35g 左右, 镍浸出率达到最大值 93.13%; 之后, 继续 增大 CaO 的加入量, 镍的浸出率基本保持不变; 但是, 当 CaO 加入量增大到 50 g 以后, 镍的浸出率随 CaO 加入量的增加而下降。钼的浸出率在 CaO 的加入量为 20 g 时已经达到最大值 98.35%, 之后, 随着 CaO 加 入量的增加略有下降,当CaO加入量超过50g之后, 钼的浸出率也随 CaO 加入量增加而下降。实验发现, CaO的加入量超过 50g之后,浸出液的 pH 值显著上 升。这说明 100 g 镍钼矿粉 CaO 的加入量超过 50 g 已 有过量,过量的 CaO 消耗硫酸,使镍钼与酸反应不完 全,故镍钼浸出率都随着 CaO 加入量增加而下降。因 此, 100g镍钼矿粉加入35gCaO为宜。

研究发现,当100g镍钼矿粉加入35gCaO混匀 磨细,700 ℃氧化焙烧时,烟气中SO2的最大浓度为







1073 mg/m³,已低于工业废气中 SO₂的排放标准。此 外,若镍钼矿未加 CaO 氧化焙烧得到的焙砂经硫酸化 焙烧后水浸,镍的浸出率最多也只有 80%左右^[18]。因 此,CaO 的加入量不仅能有效减少镍钼矿氧化焙烧时 对环境造成的污染,而且能显著提高镍的浸出率。 2.1.2 氧化焙烧温度对镍钼浸出率的影响

图 2 所示为加钙氧化焙烧温度对镍钼浸出率的影 响。实验条件为 100 g 镍钼矿粉加入 35 g CaO 混匀磨 细,在指定温度下氧化焙烧 2 h;待焙砂冷却至室温, 加入 70 mL 的浓硫酸拌匀熟化 2 h 后,于 250 ℃焙烧 2 h; 焙砂按液固比 2:1 加水搅拌,在 98 ℃浸出 2h。 在 500~700 ℃的温度区间,镍和钼的浸出率均随着焙 烧温度的升高而增大;达到 700 ℃时,镍和钼的浸出 率分别为 93.16%和 97.42%;继续提高焙烧温度,钼 的浸出率有所降低,镍浸出率变化不大。这说明在 500~700 ℃的温度区间,镍钼矿氧化焙烧反应速度随 温度的升高而增大。实验发现,温度超过 750 ℃物料 明显烧结,这不利于钼的氧化,从而导致钼的浸出率 下降,因此在后续的实验中镍钼矿氧化焙烧温度定为 700 ℃。

2.1.3 焙烧时间对镍钼浸出率的影响

图 3 所示为焙烧时间对镍钼浸出率的影响。实验 数据获得的条件如下: 100 g 镍钼矿粉加入 35 g CaO 混匀磨细,在 700 ℃下氧化焙烧一定时间;待焙砂冷 却至室温,加入 70 mL 的浓硫酸拌匀,熟化 2 h 后在 250 ℃下焙烧 2 h; 焙砂按液固比 2:1 加水搅拌,98 ℃ 浸出 2 h。从图 3 可以看出,在 0.5~2 h 的范围内,镍 和钼的浸出率都随焙烧时间的延长而增大,当焙烧时







图 3 加钙氧化焙烧时间对镍钼浸出率的影响 Fig. 3 Effect of calcification roasting time on leaching rates of metals

间为 2 h 时, 镍和钼的浸出率分别达到 93.21%和 97.36%, 继续延长焙烧时间, 镍和钼的浸出率变化不 大, 所以 2 h 是最佳的焙烧时间。

2.2 低温硫酸化焙烧

2.2.1 硫酸加入量对镍钼浸出率的影响

156g加钙氧化焙砂(最佳焙烧条件下,100g镍钼 矿粉加入35gCaO得到的焙砂质量为156g)加入一定 量的浓硫酸拌匀熟化2h后,放进马弗炉250℃焙烧 2h;焙砂按液固比2:1加水搅拌,98℃浸出2h。图 4所示为硫酸加入量与镍钼浸出率的关系。由图4可 看出,浓硫酸用量在50mL之前,镍和钼的浸出率都 随硫酸用量的增加而显著增大;之后,继续增加硫酸



图4 硫酸加入量对镍钼浸出率的影响

Fig. 4 Effect of sulphuric acid volume on leaching rates of metals

用量,镍和钼的浸出率的增幅变小。当硫酸用量为70 mL时,镍和钼的浸出率分别达到93.16%和97.23%。 实验发现,当硫酸用量大于70 mL之后,虽然镍和钼的浸出率还会略有增大,但杂质Fe和Al等大量浸出, 这给后续的镍、钼回收带来困难。因此,浓硫酸的加入量被定为100g镍钼矿粉加入70 mL。

2.2.2 硫酸化焙烧温度对镍钼浸出率的影响

图 5 所示为最佳焙烧条件下得到的 156 g 加钙氧 化焙砂加入 70 mL 浓硫酸拌匀熟化 2 h 后,放进马弗 炉在预定温度下焙烧 2 h,焙砂按液固比 2:1 加水搅 拌,于 98 ℃浸出 2 h 得到的实验结果。由图 5 可以看 出,当温度为 100~250 ℃时,镍和钼的浸出率都随温 度升高而增大,250 ℃左右时,镍和钼的浸出率达到 最大,分别为 93.18%和 97.21%,之后,镍和钼的浸 出率均随 焙烧温度 的升高而减小。这是因为在 100~250 ℃时,硫酸与加钙氧化得到的焙砂反应速度 随温度的升高而增大,在一定的焙烧时间内,焙烧反 应随温度升高趋于完全;当焙烧温度升至 250 ℃以上 时,由于硫酸的分解和挥发,造成硫酸的有效利用率 降低,进而导致镍和钼的浸出都下降,故硫酸化焙烧 的最佳温度为 250 ℃。常规硫酸化焙烧的温度一般为 550~650 ℃,因此本研究采用的是低温硫酸化焙烧。



图 5 硫酸化焙烧温度对镍钼浸出率的影响

Fig. 5 Effect of sulphation roasting temperature on leaching rates of metals

2.2.3 硫酸化焙烧时间对镍钼浸出率的影响

图 6 所示为硫酸化焙烧时间对镍钼浸出率的影响。实验条件如下:将 156 g 加钙氧化焙砂加入 70 mL 浓硫酸拌匀熟化 2 h 后,放进马弗炉 250 ℃焙烧一段 时间,焙砂按液固比 2:1 加水搅拌,于 98 ℃浸出 2 h。 由图 6 可以看出,250 ℃的温度下硫酸化焙烧的反应 速度很快,在 0.5~2.0 h 的时间区间内,镍和钼的浸出 率随硫酸化焙烧时间的延长增幅较小;焙烧 1 h 后, 镍和钼的浸出率分别达到 93.05%和 97.13%;焙烧 2 h 后,镍和钼的浸出率分别为 91.86%和 97.13%。继续 延长焙烧时间,镍和钼的浸出率都几乎不变,故硫酸 化焙烧的最佳时间为 2 h。

2.3 水浸

2.3.1 浸出温度对镍钼浸出率的影响

图 7 所示为最佳工艺条件下得到的硫酸化焙烧的 焙砂,按液固比 2:1 加水搅拌,在预定温度下浸出 2 h



图 6 硫酸化焙烧时间对镍钼浸出率的影响

Fig.6 Effect of sulphation roasting time on leaching rates of metals



图 7 浸出温度对镍钼浸出率的影响

Fig. 7 Effect of water leaching temperature on leaching rates of metals

得到的实验结果。从图 7 可以看出, 焙砂中的镍和钼 较容易浸出,其浸出率都随温度的升高缓慢增加, 但 浸出温度对镍浸出率的影响要明显大于对钼的影响; 当浸出温度到达 98 ℃时,镍和钼的浸出率分别达到 93.12%和 97.21%。钼、镍的浸出过程实际上是其硫酸 盐的溶解过程,温度的升高有利于硫酸盐的溶解,所 以在一定浸出时间内温度越高,镍和钼的浸出率越高。 2.3.2 液固比对镍钼浸出率的影响

图 8 所示为硫酸化焙烧得到的焙砂 98 ℃浸出 2 h 液固比对镍钼浸出率的影响。由图 8 可以看出,液固 比由 1:1 增至 2:1,镍和钼的浸出率分别由 91.58%和 95.41%升至 93.15%和 97.25%,此时,浸出液的 pH≈ 1,说明低温硫酸化焙烧过程酸的利用率很高;之后, 继续增大液固比,镍和钼的浸出率都显著减小。这是 因为液固比太小,硫酸盐溶解困难;液固比增大到 2:1 之后,随着液固比增大,浸出液的酸度随之降低,浸 出液中的 Fe³⁺等杂质水解造成镍和钼的浸出率下降。 因此,水浸液固比选 2:1 为宜。



图 8 液固比对镍钼浸出率的影响

Fig. 8 Effect of liquid to solid ratio on leaching rates of metals

2.3.3 浸出时间对镍钼浸出率的影响

图 9 所示为硫酸化焙烧得到的焙砂按液固比 2:1 加水 98 ℃浸出得到的实验结果。从图 9 可以看出, 在 0.5~2 h 内,镍和钼的浸出率都随浸出时间的延长 急剧增大;浸出 2 h 后,镍和钼的浸出率分别达到 93.15%和 97.21%,基本达到最大值;之后,继续延长 浸出时间,由于铁、硅等水解造成镍和钼的浸出率均 有不同程度的下降。因此,浸出时间应选择 2 h 较合 适。



图9 水浸时间对镍钼浸出率的影响

Fig. 9 Effect of water leaching time on leaching rates of metals

2.4 镍钼提取过程晶相变化

图 10 所示为镍钼矿处理过程的 XRD 谱。从图 10(a)可以看出, 原矿中存在的矿相为石英(SiO₂)、黄 铁矿(FeS₂)、钾云母(K(Al,V)₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂)、方解 石(CaCO₃)和羟磷灰石(Ca₅(PO₄)₃OH), 不存在镍和钼 的晶相,也就是说镍和钼都是以非晶态形式存在。由 图 10(b)可看出,经加钙氧化焙烧后,镍钼矿中的黄铁 矿、钾云母及方解石晶相均消失,并产生了赤铁矿、 熟石膏、钼钙矿及氧化镍的新物相。比较图 10(b)和(c) 可以看出,经低温硫酸化焙烧后,焙砂中只留下熟石 膏(CaSO₄)和石英(SiO₂) 的晶相,钼钙矿、氧化镍、赤 铁矿和羟磷灰石晶相都消失。再经水浸后,浸出渣中 含有熟石膏(CaSO₄)、生石膏(Ca(SO₄)(H₂O)₂)和石英 (SiO₂)(见图 10(d))。由此看出,镍、钼等在低温硫酸 化焙烧过程形成了非晶态的硫酸盐:

 $NiO+H_2SO_4 = NiSO_4 + H_2O\uparrow$ (1)

 $Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O\uparrow$ (2)

 $CaMoO_4 + 2H_2SO_4 = CaSO_4 + MoO_2SO_4 + 2H_2O\uparrow$ (3)

 $2Ca_{5}(PO_{4})_{3}(OH)+H_{2}SO_{4}=CaSO_{4}+3Ca_{3}(PO_{4})_{2}+2H_{2}O\uparrow$

(4)

2.5 综合性试验

根据最佳实验条件进行了综合性实验。实验过程如下: 先将 105 g CaO 加入 300 g 镍钼矿粉混匀磨细,放进马弗炉 700 ℃氧化焙烧 2 h; 焙砂冷却后焙砂分成 3 等份,每份加入 70 mL 浓硫酸拌匀熟化 2 h,再放进马弗炉 250 ℃焙烧 2 h; 焙砂按液固比 2:1 加水搅拌,98 ℃浸出 2 h,搅拌速度为 500 r/min。实验得



图 10 镍钼矿处理过程的 XRD 谱

Fig. 10 XRD patterns of experimental samples: (a) Raw Ni-Mo ore; (b) Calcification roasted ore; (c) Sulphation roasted ore; (d) Leached cake

到的结果列于表 2。表 2显示,在最佳工艺条件下, 镍钼矿经加钙氧化焙烧-低温硫酸化焙烧-水浸后,镍 和钼的浸出率分别可达 93.16%和 97.33%。

表2 综合性试验结果

Table 2Results of com	prehensive experiments
-----------------------	------------------------

Test No.	Leaching rate of Mo/%	Leaching rate of Ni/%
1	97.53	93.22
2	97.18	93.08
3	97.27	93.22
Average	97.33	93.16

3 结论

1) 镍钼矿经加钙氧化焙烧-低温硫酸化焙烧-水

浸可同时有效提取其中的镍和钼,在100g镍钼矿粉加入35gCaO混匀磨细,先在700℃焙烧2h,得到的焙砂冷却后加入70mL浓硫酸拌匀熟化2h后,再经250℃焙烧2h,由此得到的焙砂按液固比2:1加水搅拌,98℃浸出2h,搅拌速度为500r/min的最佳工艺条件下,钼浸出率可达97.33%,镍浸出率可达93.16%。

2) 镍钼矿加钙氧化焙烧不仅能有效减少镍钼矿 氧化焙烧烟气对环境造成的污染,而且能显著提高镍 的浸出率。

3) 低温硫酸化过程可以有效强化矿物分解过程, 提高酸的利用率和镍钼的浸出率,缩短反应时间。

REFERENCES

 许洁瑜,杨晓明. 2008 年中国钼工业发展报告[J].中国钼业, 2009, 33(2): 11-18. XU Jie-yu, YANG Xiao-ming. Report of China molybdenum industry development in 2008[J]. China Molybdenum Industry, 2009, 33(2): 11–18.

- [2] ARCHANA S, KHURANA U, YADAV S K, TANDON S N. Thiophosphinic acids as selective extractants for molybdenum recovery from a low grade ore and spent catalysts[J]. Hydrometallurgy, 1996, 41(1): 99–105.
- [3] AGRAWAL A, BAGCHI D, KUMARI S, KUMAR V, PANDEY B D. Recovery of nickel powder from copper bleed electrolyte of an Indian copper smelter by electrolysis[J]. Powder Technology, 2007, 177(3): 133–139.
- [4] 鲍正襄, 万榕江, 包觉敏. 湘西北镍钼矿床成矿特征与成因
 [J]. 湖北地矿, 2001, 15(l): 14-32.
 BAO Zheng-xiang, WAN Rong-jiang, BAO Jue-min. Metallogenic characteristics and genesis of the Ni-Mo deposits in north-western Hunan[J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2001, 15(l): 14-32.
- [5] 曾明果. 遵义黄家湾镍钼矿地质特征及开发前景[J]. 贵州地质, 1998, 15(4): 305-310.
 ZENG Ming-guo. Geological feature of the Huangjiawan Ni-Modeposit in Zunyi of Guizhou and its prospect for development[J].
 Guizhou Geology, 1998, 15(4): 305-310.
- [6] 夏庆霖,赵鹏大,陈永清,成秋明,周云满.云南德泽下寒武 统黑色岩系中 Ni-Mo-V-PGE 多金属矿化[J].中国地质大学学 报:地球科学,2008,33(1):67-77.

XIA Qing-lin, ZHAO Peng-da, CHEN Yong-qing, CHEN Qiu-ming, ZHOU Yun-man. Ni-Mo-V-PGE mineralization in the lower cambrian black shale series from the Deze Area, Yunnan Province, Southwest China[J]. Journal of China University of Geosciences: Earth Scinece, 2008, 33(1): 67–77.

[7] 潘家永,马东升,夏 菲,陈少华,曹双林,郭国林,谢贵珍.
 湘西北下寒武统镍-钼多金属富集层镍与钼的赋存状态[J].
 矿物学报,2005,25(3):283-288.
 PAN Jia-yong, MA Dong-sheng, XIA Fei, CHEN Shao-hua,

CAO Shuang-lin, GUO Guo-lin, XIE Gui-zhen. Study on nickel and molybdenum minerals in Ni-Mo sulfide layer of the lower cambrian black rock series, Northwestern Hunan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(3): 283–288.

- [8] 陈礼运,宋 平,高晓宝.高品位原生钼矿的综合利用[J].中 国钼业,2003,27(3):17-18.
 CHEN Li-yun, SONG Ping, GAO Xiao-bao. Comprehensive utilization of molybdenum ore with high content[J]. China Molybdenum Industry, 2003, 27(3): 17-18.
- [9] 陈代雄, 唐美莲, 薛 伟, 徐 艳, 谢 超. 高碳钼镍矿可选 性试验研究[J]. 湖南有色金属, 2006, 22(6): 9-11.
 CHEN Dai-xiong, TANG Mei-lian, XUE Wei, XU Yan, XIE Chao. Study on dressing concentrate of high carbon

nickel-molybdenum ore[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2006, 22(6): 9-11.

[10] 何旭初.一种选冶结合的镍钼矿镍、钼分离方法:中国, 951190744.5[P].1996-11-06.

HE Xu-chu. Separating nickel and molybdenum from Ni-Mo ore by mineral dressing combined with smelting: China, 951190744.5[P]. 1996–11–06.

- [11] 王学文,肖连生,龚柏凡,李青刚. 一种高杂质钼铁合金生产 钼酸铵的方法:中国,200610031634.9[P].2006-10-25.
 WANG Xue-wen, XIAO Lian-sheng, GONG Bo-fan, LI Qing-gang. A techniques for producing ammonium molybdate with high impurity molybdenum-iron alloy: China, 200610031634.9[P].2006-10-25.
- [12] 贺青花,何旭初,何金初.湘西镍钼富矿氧化焙烧研究[J].湖 南冶金,1999,3(2):14-17.
 HE Qing-hua, HE Xu-chu, HE Jin-chu. Study on oxidizing roasting of the west Hunan nickel molybdenum richened[J]. Hunan Metallurgy, 1999, 3(2): 14-17.
- [13] 秦 纯. 用碳酸钠转化处理黑色页岩分离钼镍的工艺: 中国, 97107568.9[P]. 1998-03-25.
 QIN Chun. Separating nickel and molybdenum from cambrian black shale by sodium carbonate conversion: China. 97107568.9[P]. 1998-03-25.
- [14] WANG Ming-yu, WANG Xue-wen, LIU Wan-li. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni-Mo ore[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(1/2): 126–130.
- [15] 皮关华,徐 微,陈白珍,石西昌,李俊丽.从难选镍钼矿中 回收钼的研究[J]. 湖南有色金属,2007,23(1):9-12.
 PI Guan-hua, XU Hui, CHEN Bai-zhen, SHI Xi-chang, LI Jun-li. Study on recovering molybdenum from rocky-select Ni-Mo ores[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2007, 23(1): 9-12.
- [16] 李青刚,肖连生,张贵清,张启修. 镍钼矿生产钼酸铵全湿法 生产工艺及实践[J]. 稀有金属,2007,31(S1):85-89.
 LI Qing-gang, XIAO Lian-sheng, ZHANG Gui-qing, ZHANG Qi-xiu. Process and practice of ammonium molybdate production from Ni-Mo ore by hydrometallurgy[J]. Chinese J Research Met, 2007, 31(S1): 85-89.
- [17] 吴海国. 含碳镍钼矿提取镍钼冶炼新工艺试验研究[J]. 湖南 有色金属, 2008, 24(2): 16-18.
 WU Hai-guo. Ni-Mo carbon molybdenum smelting of nickel ore to test new technology research[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2008, 24(2): 16-18.
- [18] WANG Ming-yu, WAN Xue-wen. Extraction of molybdenum and nickel from carbonaceous shale by oxidation roasting, sulphation roasting and water leaching[J]. Hydromrtallurgy, 2010, 102: 50–54.

(编辑 李艳红)