镍冶炼渣矿物学特征对浮选回收镍、铜的影响

李恩光[1]，翟启林[2]，李 雄[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要：为回收利用镍冶炼渣中的镍和铜等有价金属，本文以我国某镍冶炼渣为研究对象，利用多种矿物学特征分析手段，深度解析镍冶炼渣的矿物学特征对浮选回收渣中镍、铜回收的限制，并提出利用源头焙烧改性优化有价金属镍、铜的结晶状态，进而提高镍、铜浮选回收率。研究结果表明，镍冶炼渣中主要的有价金属镍、铜的品位分别为 0.88% 和 0.31%，在可浮性较差的氧化态和残余态中的占比达 20% 左右，可浮性较好的镍、铜主要赋存于镍黄铁矿、斑铜矿和硫镍矿中，但是这三种矿物相多以微细粒不规则状散乱分布在硅酸盐矿物相间，难以实现单体解离；镍、铜较差的结晶状态导致其浮选回收率分别仅有 24.61% 和 38.77%，优化镍铜在渣中的结晶状态成为提高其浮选回收率的关键所在。在焙烧改性后，镍、铜在可浮性较好的金属态和硫化态中的占比均高达 90% 以上，其浮选回收率也分别提高了 41.55% 和 41.23%。

关键词：镍冶炼渣；矿物学特征；浮选；焙烧改性
中图分类号：TD952 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)02－0083－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.028

Influence of mineralogical characteristics of nickel smelting slag on recovery of nickel and copper by flotation

LI Enguang[1], ZHAI Qilin[2], LI Xiong[2]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;
2. School of Minerals Processing Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to recycle valuable metals such as nickel and copper in nickel smelting slag, a nickel smelting slag in China is taken as the research object, the limitations of mineralogical characteristics of nickel smelting slag on the recovery of nickel and copper in flotation are deeply analyzed, and it is proposed to optimize the crystallization state of valuable metals nickel and copper by source roasting modification, so as to improve the recovery rate of nickel and copper flotation. The results show that, the grades of nickel and copper are 0.88% and 0.31%, respectively, accounting for about 20% of the oxidation state and residual state with poor floatability, and the nickel and copper with good floatability are mainly found in nickel pyrite, bornite and polydymite, but these three mineral phases are mostly scattered among the silicate minerals in the form of fine grains and irregularities, and it is difficult to achieve monomer dissociation, and the poor crystalline state of nickel and copper leads to the flotation recovery rate of only 24.61% and 38.77%, respectively. Optimizing the crystallization state of nickel-copper in the slag has become the key to improving the flotation recovery. After roasting modification, the proportion of nickel and copper in the metal state and sulfide state with good floatability is over 90%, and the flotation recovery rate is also increased by 41.55% and 41.23% respectively.

Key words: nickel smelting slag; mineralogical characteristics; glotation; roasting modification

收稿日期：2023－07－13；**修回日期：**2023－11－01
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2018YFC1901601)
作者简介：李恩光(1978—)，男，高级工程师，从事新能源电池材料技术方面的研究与应用。
通信作者：翟启林(1997—)，男，硕士研究生，从事二次资源循环利用方面的研究。

镍在现代社会发展中起着不可替代的作用，广泛应用于机械制造、航空、建筑和国防等领域[1]。随着社会经济的快速发展和城镇化率的提高，我国对金属镍的需求不断增加，已经成为世界上最大的镍资源消费国家[2]。我国90%的镍都是硫化镍精矿通过火法冶炼所得，富氧顶吹工艺作为一种能源消耗低和原料适应性强的火法冶炼工艺被广泛应用于镍冶炼行业[3]。但是，富氧顶吹过程中会产生大量的镍冶炼渣，每生产1 t金属镍就会产生6～16 t镍冶炼渣，我国仅金川集团每年就会产生约120万吨的镍冶炼渣，其累计堆存量已经超过3 000万吨[4]。大量堆存镍冶炼渣不仅占用了土地资源，对环境造成潜在的威胁，也会使因机械损失或化学溶解在渣中的有价金属镍、铜永久流失，造成资源浪费[5]。因此，镍冶炼渣的资源化利用对于实现可持续发展具有极其重要的意义。

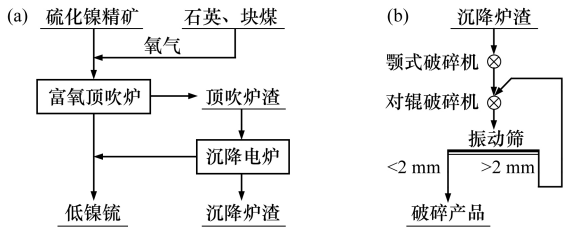
镍和铜是镍冶炼渣中最主要的有价金属，其回收是镍冶炼渣资源化利用的重要研究方向。目前，常用于回收渣中镍、铜的方法可以分为湿法浸出、火法贫化和泡沫浮选三种工艺[6-7]，其中，泡沫浮选因其成本低、流程简单和周期短等优点一直被认为是最具有工业化潜力的镍冶炼渣有价金属回收工艺[8]。周怡玫[9]以镍、铜品位分别为20.20%和3.10%的反射炉镍冶炼渣为研究对象，以煤油、丁基黄药和丁胺黑药的组合药剂作为捕收剂，通过“二粗二扫一精”浮选闭路流程得到了镍、铜率回收率分别为81.82%和93.00%的镍铜混合精矿。陈志新等[10]以镍、铜品位分别为0.47%和0.35%的镍冶炼渣为研究对象，以硫酸铜作活化剂、丁基黄药作捕收剂，通过“二粗二扫二精”浮选闭路流程得到了镍、铜回收率分别为59.46%和66.73%的镍铜混合精矿。泡沫浮选虽然能在一定程度上回收镍冶炼渣中的有价金属，但其回收效果深受镍冶炼渣矿物学特征的限制[11]。而受冶炼工艺的影响，镍冶炼渣的性质往往不支持使用泡沫浮选法从渣中回收有价金属，因此，目前关于浮选回收镍冶炼渣中有价金属的研究较少。

本文以我国某冶炼厂沉降炉产生的镍冶炼渣为研究对象，通过X射线荧光分析、衍射分析和矿物解离分析等测试手段，对该冶炼渣的化学组成、矿物组成、主要有价矿物的粒度组成、嵌布关系和有价金属的赋存形式等矿物学特征进行全面的剖析，阐明镍冶炼渣矿物学特征对浮选回收渣中有价金属镍、铜的限制，提出焙烧改性优化渣中镍、铜的结晶状态，进而为提高镍、铜的浮选回收率提供可行性方案。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

我国甘肃省某冶炼厂采用的“富氧顶吹”镍冶炼工艺如图1(a)所示[12]。该冶炼厂沉降炉排出渣(温度约为1 400 ℃)，经水淬冷却后堆存在露天渣场。为保证样品的均匀性，本文所用的100 kg样品采集自10个批次的沉降炉渣。采集的样品经图1(b)所示的流程被全部破碎至<2 mm，并被均匀分装在50个真空密封袋中，以尽量降低样品的氧化程度。



(a) 富氧顶吹镍冶炼工艺；(b) 沉降炉渣样品破碎流程

图1 富氧顶吹镍冶炼工艺和沉降炉渣样品破碎流程

Fig. 1 Oxygen enriched top blowing nickel smelting process and flow chart of nickel sedimentation slag crushing preparation

1.2 试验方法

1.2.1 镍冶炼渣矿物学特征分析

本文采用多种分析测试技术来深度分析镍冶炼渣的矿物学特征。X荧光光谱分析(XRF)用以测定样品的化学组成，X射线衍射分析(XRD)用以定性地分析样品中的晶型矿物组成，矿物解离分析仪(MLA)用于综合分析样品中的矿物含量、有价矿物粒度分布及嵌连关系，顺序提取试验用以研究样品中有价金属的赋存形式。

1.2.2 镍冶炼渣浮选试验

取500 g镍冶炼渣，将其在型号为XMQ－∅240×90(武汉某机械厂)的球磨机中磨至

<45 μm粒级质量分数为 92.02%，随后按照“一粗一精三扫”流程进行浮选作业。浮选作业在 XFD 系列浮选机中进行，浮选中采用五水硫酸铜和戊基黄药分别作为渣中有价矿物的活化剂和捕收剂，具体的药剂制度和浮选流程如图 2 所示。

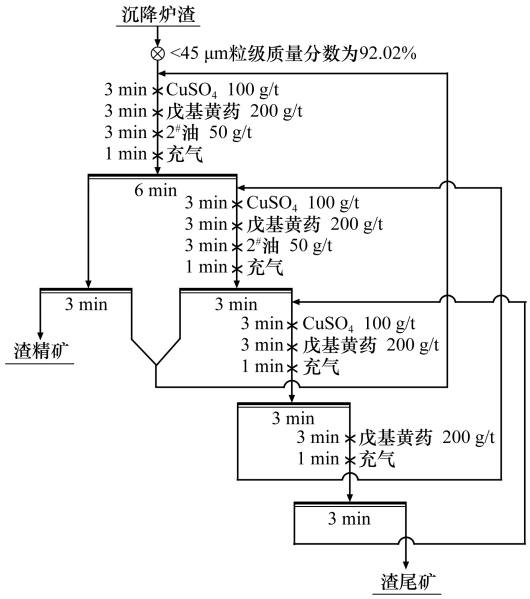


图 2　镍冶炼渣浮选闭路试验流程

Fig. 2　Closed-circuit flotation test flow chart of nickel smelting slag

1.2.3　镍冶炼渣焙烧改性试验

在可控制升温速度、保温时间和降温速度的氧化还原反应炉中进行焙烧改性试验。试验称取 200 g 粒度 <74 μm 的镍冶炼渣、4 g 固定碳质量分数为 69.11% 的无烟煤和 18 g 含硫量为 51.21% 的黄铁矿均匀混合，并置于 300 mL 的刚玉坩埚中。将坩埚置于氧化还原反应炉后，按照图 3 所示的流程进行焙烧。焙烧结束后，待炉腔冷却至室温后将样品取出坩埚，通过手工敲击将改性渣从刚玉坩埚中剥离出来，随后通过小型颚式破碎机将改性渣破碎至 <2 mm。值得说明的是，焙烧过程中的无烟煤和黄铁矿用量均是在前期的单因素条件探索试验中得到的最优结果，该探索试验以一段粗选所得的精矿指标作为判断焙烧改性是否有益的标准。

2　结果与讨论

2.1　镍冶炼渣矿物学特征

2.1.1　镍冶炼渣化学组成与矿物组成

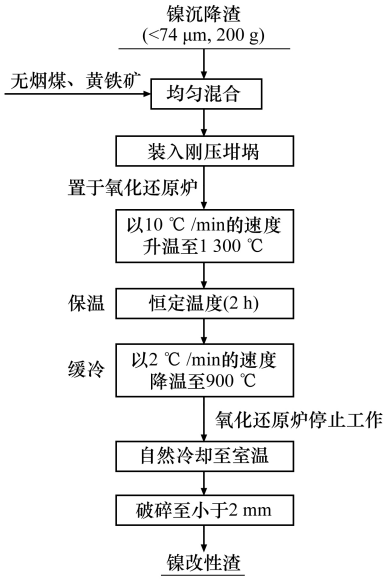


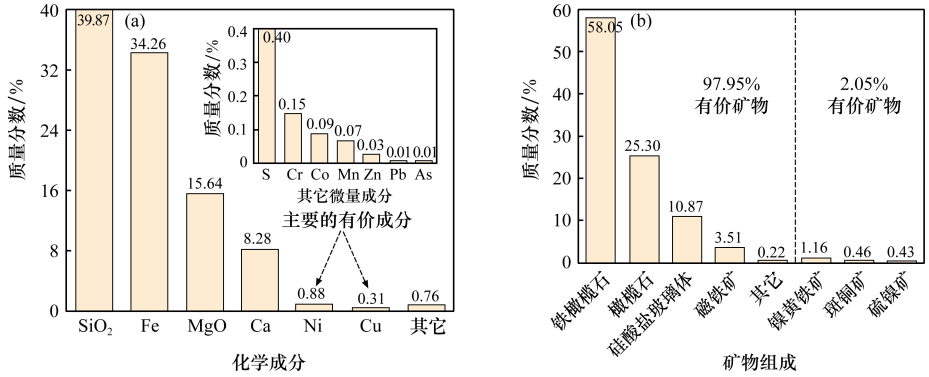
图 3　镍冶炼渣焙烧改性试验流程

Fig. 3　Roasting modification test flowsheet of nickel smelting slag

镍冶炼渣的化学组成和矿物组成如图 4 所示。由图 4(a)可知，镍冶炼渣中含有 39.87% 的 SiO_2、15.64% 的 MgO、8.28% 的 Ca 和 34.26% 的 Fe，这是因为渣中含有大量的铁橄榄石和硅酸盐玻璃体。镍冶炼渣中主要的有价元素 Ni 和 Cu 的质量分数分别为 0.88% 和 0.31%，这比我国一些正在开采的原生镍铜矿的品位还要高，表明本文所采集的镍冶炼渣具有巨大的回收潜力。此外，镍冶炼渣中还含有 Cr、Co、Mn 和 Pb 等微量元素(质量分数均低于 0.15%)。由图 4(b)可知，铁橄榄石、橄榄石、硅酸盐玻璃体和磁铁矿是镍冶炼渣中主要的脉石矿物，占比分别达到 58.05%、25.30%、10.87% 和 3.51%。镍冶炼渣中主要有价矿物的占比仅为 2.05%，其中，镍黄铁矿质量分数为 1.16%，斑铜矿质量分数为 0.46%，硫镍矿质量分数为 0.43%。从含量上可以判断，渣中有价矿物被脉石矿物充分稀释，如何有效地将有价矿物从脉石矿物中解离出来已成为有效浮选回收镍、铜的关键所在。

2.1.2　镍冶炼渣有价矿物的粒度分布

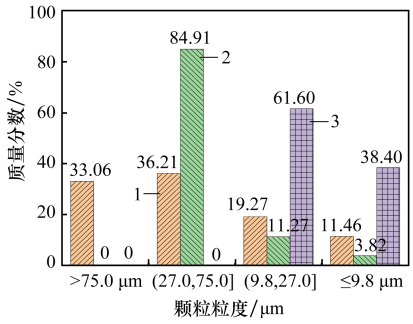
有价矿物是否容易实现单体解离，与其自身的粒度分布密切相关[13]。图 5 所示为镍冶炼渣中镍黄铁矿、硫镍矿和斑铜矿的粒度分布情况。由图5可知，镍黄铁矿的粒度最粗，>75.0 μm和



（a）化学组成；（b）矿物组成

图 4 镍冶炼渣的化学组成和矿物组成

Fig. 4 Chemical composition and mineral composition of nickel smelting slag



1—镍黄铁矿；2—硫镍矿；3—斑铜矿。

图 5 镍冶炼渣中有价矿物的粒度分布

Fig. 5 Particle size distribution of valuable minerals in nickel smelting slag

(27.0,75.0] μm 粒级质量分数分别为 33.06% 和 36.21%；硫镍矿的粒度次之，渣中硫镍矿颗粒均 ≤ 75.0 μm，硫镍矿的粒度主要集中在 (27.0,75.0] μm 粒级，其质量分数达到了 84.91%；斑铜矿的粒度最细，其颗粒全部 ≤ 27.0 μm，(9.8,75.0] μm 和 < 9.8 μm 粒级质量分数分别为 61.60% 和 38.40%。整体而言，渣中有价矿物的粒度都十分细小，这为有价矿物从脉石矿物中解离出来造成了一定的阻碍。

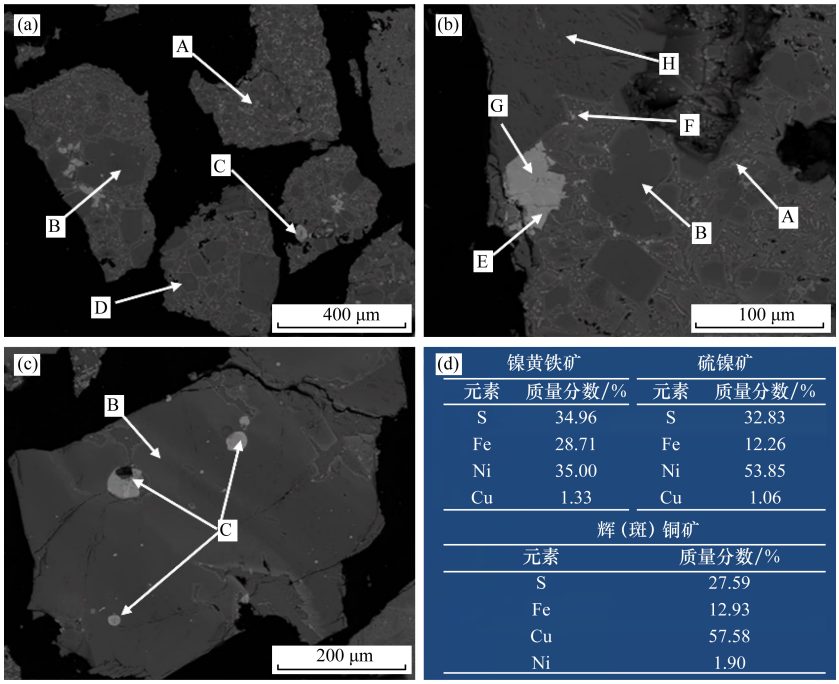
2.1.3 镍冶炼渣有价矿物的嵌连关系

图 6 所示为镍冶炼渣中不同矿物相之间的嵌连特征。由图 6 可知：铁橄榄石、橄榄石和玻璃体等硅酸盐相构成了渣中的嵌布基底，其它矿物散乱地分布于其中；磁铁矿粒度细小，呈细脉状和不规则状分布在硅酸盐矿物间；此外，镍黄铁矿、硫镍矿和斑铜矿多形成金属硫化物集合体，呈不规则状散乱分布于硅酸盐矿物之中。图 6 直观地显示了渣中有价矿物被紧密地包裹在脉石矿物之中，这为有价矿物的解离造成了极大的阻碍。

不同细度下镍冶炼渣中有价矿物的单体解离度和不同矿物之间的嵌连关系如表 1 所示。由表 1 可知：有价矿物的单体质量分数随着渣中 < 45 μm 粒级质量分数的增加而增加；当 < 45 μm 粒级质量分数由 64.99% 增加至 92.02% 时，镍黄铁矿、硫镍矿和斑铜矿的单体质量分数分别增加了 22.22%、16.84% 和 13.50%。由此可知，细磨更加有利于提高镍黄铁矿的单体质量分数，这归因于镍黄铁矿的粒度要比硫镍矿和斑铜矿的粒度更粗，这与图 5 的分析结果相一致。未解离的镍黄铁矿、硫镍矿和斑铜矿相互嵌连的占比较高。分析原因认为，三种物理性质相似的矿物在熔融态镍冶炼渣冷却过程中相互聚集在一起，形成了多金属硫化物集合体。此外，由于被硅酸盐矿物紧密包裹，未解离的有价矿物主要与铁橄榄石等硅酸盐矿物相互嵌连。尽管细磨能够提高有价矿物的单体解离度，但是，在 < 45 μm 粒级质量分数达到 92.02% 的超细磨矿细度下，仍然约有 20% 左右的有价矿物没有实现单体解离，未解离的有价矿物主要与以铁橄榄石为代表的硅酸盐矿物相互嵌连。因此，在通过浮选回收镍冶炼渣中有价金属镍铜的过程中，如何实现有价矿物的单体解离存在巨大的挑战。

2.1.4 镍冶炼渣有价金属镍、铜的赋存形式

除有价矿物的粒度外，有价金属镍铜的赋存形式也对其浮选回收效果有着重要的影响。一般而言，以金属态和硫化态存在的金属具有较好的可浮性，而以氧化态存在的金属很难在巯基类捕



(d)

镍黄铁矿		硫镍矿	
元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
S	34.96	S	32.83
Fe	28.71	Fe	12.26
Ni	35.00	Ni	53.85
Cu	1.33	Cu	1.06

辉(斑)铜矿	
元素	质量分数/%
S	27.59
Fe	12.93
Cu	57.58
Ni	1.90

（a）、（b）、（c）镍冶炼渣的 SEM 图；（d）主要矿物相的化学组成

A—磁铁矿；B—橄榄石；C—金属硫化物集合体；D—辉铁橄榄石；E—辉(斑)铜矿；F—硫镍矿；G—镍黄铁矿；H—玻璃相。

图 6　镍冶炼渣中主要矿物的嵌布关系

Fig. 6　Distribution relationship of main minerals in nickel smelting slag

表 1　不同磨矿细度镍冶炼渣中镍、铜矿物的单体解离度和不同矿物之间的嵌连关系(质量分数)

Table 1　Degree of liberation of nickel and copper minerals in nickel smelting slag with different grinding fineness and embedding relations between different minerals　%

矿物名称	细度(<45 μm 粒级质量分数)/%	单体质量分数/%	连生体				嵌连矿物					
			>3/4	[3/4,1/2)	[1/2,1/4)	≤1/4	硫镍矿	镍黄铁矿	斑铜矿	磁铁矿	铁橄榄石	玻璃体
硫镍矿	64.99	55.93	27.63	5.04	2.34	9.06	—	16.49	16.15	4.31	53.84	9.21
	87.86	72.55	13.62	6.14	4.38	3.31	—	32.65	15.97	3.05	39.39	8.94
	92.02	78.15	11.08	7.37	1.79	1.61	—	44.52	15.03	2.35	29.90	8.20
镍黄铁矿	64.99	55.38	6.27	1.93	4.79	31.63	0.82	—	2.11	4.61	69.59	22.87
	87.86	68.14	5.31	2.18	3.42	20.95	1.24	—	1.77	5.01	67.16	24.82
	92.02	72.22	4.08	3.54	3.06	17.10	1.49	—	1.61	5.06	66.61	25.23
斑铜矿	64.99	71.28	3.75	6.96	2.82	15.19	11.54	28.81	—	7.38	36.59	15.68
	87.86	80.95	3.63	2.82	2.44	10.16	14.07	30.31	—	6.17	37.86	11.59
	92.02	84.78	2.44	2.25	2.29	8.24	15.12	31.16	—	5.06	38.45	10.21

收剂的浮选体系中被回收[14]。镍冶炼渣中有价金属镍、铜在金属态、硫化态、氧化态和残余态中的分布率如表 2 所示。其中，残余态指的是化学溶解在硅酸盐矿物中的镍和铜，这部分金属很难被浮选回收。由表 2 可知，镍在金属态和硫化态中的分布率之和达到 86.14%，铜在金属态和硫化态中的分布率之和达到 79.66%，这表明渣中有 20% 左右的镍和铜难以被浮选回收。

表 2　镍冶炼渣中有价金属镍铜的赋存形式(质量分数)

Table 2　Occurrence state of nickel and copper in nickel smelting slag　%

有价金属名称	金属态	硫化态	氧化态	残余态
镍	3.64	66.59	19.55	10.22
铜	23.33	56.33	8.00	12.34

2.2　镍冶炼渣中有价金属镍、铜的可浮性

采用单因素条件试验研究磨矿细度、活化剂

用量和捕收剂用量对浮选回收渣中镍、铜的影响，并确定如图2所示的“一粗一精三扫”闭路浮选流程和药剂制度。通过该流程得到的浮选试验结果如表3所示。由表3可知，通过浮选从镍冶炼渣中回收镍、铜的效果较差，精矿中镍和铜的品位分别为5.21%和2.85%，二者的回收率分别仅有24.61%和38.77%。值得注意的是，尾矿中仍然含有0.65%的镍和0.18%的铜，这意味着尾矿仍然具有一定的回收潜力。由前述镍冶炼渣的矿物学特征分析可知，渣中有价金属难以被浮选回收的原因在于该有价矿物的结晶状态较差。一是有价矿物的嵌布粒度细小，难以实现单体解离；二是约有20%的有价金属以难浮选富集的氧化态和残余态的形式存在。因此，仅通过优化浮选流程和药剂制度无法进一步提高有价金属的浮选回收率，改善渣中有价矿物的结晶状态已经成为提高有价金属浮选回收率的关键所在。

表3 镍冶炼渣闭路浮选试验结果

Table 3 Closed-circuit flotation test results of nickel smelting slag

矿石名称	产率/%	镍品位/%	镍回收率/%	铜品位/%	铜回收率/%
精矿	3.94	5.21	24.61	2.85	38.77
尾矿	96.06	0.65	75.39	0.18	61.23
原矿	100.00	0.83	100.00	0.29	100.00

2.3 焙烧改性提高镍、铜浮选回收率

刚排出的熔融态镍冶炼渣中蕴含巨大的热能，可以用于重塑镍冶炼渣中有价矿物的结晶状态[15]。本文设想在熔融态镍冶炼渣冷却过程中加入还原剂和硫化剂诱导渣中氧化态的镍和铜转化为金属态或硫化态；此外，通过保温、缓冷措施促进渣中有价矿物聚集形成粗颗粒，简化有价矿物的嵌布状态，降低残余态中有价金属的分布率。在之前的研究中，保温、缓冷已被证明可以诱导有价矿物颗粒聚集长大，因此，本文在实验室条件下着重探讨熔融态镍冶炼渣的热能结合还原剂和硫化剂优化有价金属赋存状态的可行性，镍冶炼渣焙烧改性的具体流程如图3所示。

2.3.1 焙烧改性后有价金属镍、铜的赋存形式

镍改性渣中有价金属镍、铜在金属态、氧化态、硫化态和残余态中的分布率如表4所示。由表4可知，还原硫化焙烧对镍冶炼渣的物相产生了显著的影响，渣中镍和铜在氧化态和残余态中的占比之和明显下降，分别下降了27.13%和11.70%，镍和铜更多的是向金属态或硫化态转化。其中，渣中镍主要以金属态的形式存在(62.12%)，其次以硫化态的形式存在(34.85%)；渣中90.91%的铜都是以硫化态的形式存在，而以金属态存在的铜为0.45%。镍改性渣中的镍和铜主要以金属态或硫化态的形式存在，这将会对浮选回收渣中的镍和铜的回收产生积极的影响。

表4 改性后镍冶炼渣中有价金属镍和铜的赋存形式(质量分数)

Table 4 Occurrence state of nickel and copper in modified nickel smelting slag %

有价金属名称	金属态	硫化态	氧化态	残余态
镍	62.12	34.85	0.67	2.36
铜	0.45	90.91	0.91	7.73

2.3.2 焙烧改性后有价金属镍、铜的可浮性

通过图2所示浮选流程对镍改性渣进行浮选试验，结果如表5所示。由表5可知，镍改性渣通过“一粗一精三扫”浮选闭路试验可回收得到镍品位为5.55%、镍回收率为66.16%，铜品位为2.18%、铜回收率为80.00%的精矿。与原镍冶炼渣相比(表3)，精矿中镍和铜的品位无明显变化，但二者的回收率分别提高了41.15%和41.23%。值得一提的是，尾矿中镍的品位由0.65%降低到了0.24%，而铜的品位由0.18%降低到了0.05%。试验结果证明，镍冶炼渣中有价金属镍和铜的可浮性经还原硫化改性后得到了明显的改善。

表5 改性后镍冶炼渣闭路浮选试验结果(质量分数)

Table 5 Closed-circuit flotation test results of modified nickel smelting slag %

矿石名称	产率	镍品位	镍回收率	铜品位	铜回收率
精矿	7.94	5.55	66.16	2.18	80.00
尾矿	92.06	0.24	33.84	0.05	20.00
原矿	100.00	0.67	100.00	0.22	100.00

3 结 论

(1) 镍沉降渣中镍和铜的品位分别为0.88%和0.31%，主要赋存在镍黄铁矿、斑铜矿和硫镍矿中，三种有价矿物的质量分数分别为1.16%、

0.46% 和 0.43%，均以微细颗粒紧密嵌布于磁铁矿、铁橄榄石和玻璃体硅酸盐中；此外，镍和铜在可浮性较差的氧化态和残余态中的分布达到了 20.00% 左右。

（2）受原镍沉降渣矿物学特征的限制，通过浮选仅能从原渣中回收 24.61% 的镍和 38.77% 的铜。

（3）镍沉降渣通过焙烧改性后，渣中镍和铜在可浮性较好的金属态和硫化态中的占比之和显著升高，均达到了 90.00% 以上；镍和铜的结晶状态得到了优化，精矿中的镍铜浮选回收率分别达到了 66.16% 和 80.00%，尾矿中的镍、铜品位也显著降低，分别仅有 0.24% 和 0.05%。

参考文献：

[1] 刘贵清,张邦胜,张帆,等. 中国镍矿资源与市场分析[J]. 中国资源综合利用,2020,38(7):102 - 105.
LIU Guiqing, ZHANG Bangsheng, ZHANG Fan, et al. China's nickel ore resources and market analysis[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7):102 - 105.

[2] 邢佳韵,陈其慎,张艳飞,等. 新能源汽车发展下锂钴镍等矿产资源需求展望[J]. 中国矿业,2019,28(12):67 - 71.
XING Jiayun, CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, et al. Related mineral demand forecast under the development of global new energy automobile[J]. China Mining Magazine,2019,28(12):67 - 71.

[3] 马松勃. 金川镍闪速炉渣深度还原高效回收有价金属基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2017.
MA Songbo. Basic research on efficient recovery of valuable metals by deep reduction of Jinchuan nickel flash furnace slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

[4] 李国洲,张燕云,马泳波,等. 镍冶金渣综合利用现状[J]. 中国冶金,2017,27(8):1 - 5.
LI Guozhou, ZHANG Yanyun, MA Yongbo, et al. Comprehensive utilization of nickel metallurgical residue [J]. China Metallurgy,2017,27(8):1 - 5.

[5] 王宁,施捍东. 有色金属工业冶炼废渣 - 镍渣的综合利用[J]. 环境工程,1994,12(1):58 - 59.
WANG Ning,SHI Handong. Comprehensive utilization of nickel slag from non-ferrous metal industry smelting[J]. Environmental Engineering,1994,12(1):58 - 59.

[6] 倪文,马明生,王亚利,等. 熔融还原法镍渣炼铁的热力学与动力学[J]. 北京科技大学学报,2009,31(2):163 - 168.
NI Wen, MA Mingsheng, WANG Yali, et al. Thermodynamic and kinetic in recovery of iron from nickel residue[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2009,31(2):163 - 168.

[7] 肖景波,夏娇彬,陈居玲. 从炼镍废渣中综合回收有价金属[J]. 湿法冶金,2014,33(2):124 - 127;135.
XIAO Jingbo, XIA Jiaobin, CHEN Juling. Recovery of value metals from waste residue from nickel metallurgy[J]. Hydrometallurgy of China,2014,33(2):124 - 127;135.

[8] 傅作健. 提取冶金中应用浮选法的几个问题讨论[J]. 有色金属(冶炼部分),1983(1):8 - 13.
FU Zuojian. Discussion on several issues concerning the application of flotation method in extracting metallurgy [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 1983 (1):8 - 13.

[9] 周怡玫. 从反射炉镍渣中综合回收镍、铜的研究[J]. 矿产综合利用,1998(6):6 - 11.
ZHOU Yimei. The comprehensive recovery of Ni and Cu from nickel bearing reverberatory furnace slags[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,1998(6):6 - 11.

[10] 陈志新,苏晓晖,张燕,等. 一种电炉镍渣回收镍铜金属的浮选方法:CN109569893A[P]. 2019 - 04 - 05.
CEHN Zhixin,SU Xiaohui,ZHANG Yan,et al. A flotation method for recovering nickel and copper metals from nickel slag in electric furnaces: CN109569893A[P]. 2019 - 04 - 05.

[11] 印万忠,王余莲. 金属、非金属选矿技术问答[M]. 北京:化学工业出版社,2016.
YIN Wanzhong,WANG Yulian. Q&A on metal and non-metal mineral processing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2016.

[12] 马永峰. 金川冶炼炉渣中回收提取镍铜铁等有价金属的研究[D]. 兰州:兰州大学,2014.
MA Yongfeng. Recovery and extraction of nickel,copper, iron and other valuable metals from Jinchuan smelting slag[D]. Lanzhou:Lanzhou University,2014.

[13] 汪金良,周瑞,刘远,等. 底吹熔炼渣工艺矿物学研究[J]. 金属矿山,2021(3):142 - 147.
WANG Jinliang, ZHOU Rui, LIU Yuan, et al. Study on process mineralogy of bottom blown smelting slag[J]. Metal Mine,2021(3):142 - 147.

（下转第 98 页）

与生产实践[J]. 矿产综合利用,2012(5):57 – 59.
ZHONG Yi, HU Chengfan. On-line recovery technology and practice of iron mineral from the tailings in Daye iron mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(5):57 – 59.

[9] 李冰,唐彪,马振. 铁尾矿资源综合利用状况探讨[J]. 内蒙古煤炭经济,2023(18):28 – 30.
LI Bing, TANG Biao, MA Zhen. Discussion on comprehensive utilization of iron tailings resources[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2023(18):28 – 30.

[10] 孙建恒,陈若妤,袁敬. 大体积铁尾矿粉混凝土水化热试验研究及数值模拟[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(3):440 – 446.
SUN Jianheng, CHEN Ruoyu, YUAN Jing. Tailings concrete experimental study and numerical simulation on hydration heat of large-volume iron tailings concrete [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),2023,54(3):440 – 446.

[11] 吴丽萍,王军. 铁尾矿粉 – 硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 矿产综合利用,2023(2):184 – 190.
WU Liping, WANG Jun. Effect of iron tailings powder-silica powder mineral admixture on concrete performance [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(2):184 – 190.

[12] LIU X,XU H,LI B,et al. Investigation of the mechanical properties of iron tailings concrete subjected to dry-wet cycle and negative temperature [J]. Materials, 2023, 16(13):4602.

[13] 王艳艳,朱月雷,丁益,等. 铁尾矿砂替代率对混凝土性能的影响[J]. 安徽建筑,2023,30(9):102 – 103;109.
WANG Yanyan, ZHU Yuelei, DING Yi, et al. Effect of iron tailings sand replacement rate on concrete performance [J]. Anhui Architecture, 2023, 30(9): 102 – 103;109.

[14] 李莉. 铁尾矿微粉在硅酸盐胶凝体系中的作用及机理研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
LI Li. Study on the effect and mechanism of iron tailings powder in silicate gel system[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2017.

(上接第16页)

[13] 周昊,蒋朝辉,叶飞强,等. 基于图像多元特征的高炉物料料种识别[C]//2020中国自动化大会论文集. 上海:中国自动化学会,2020:806 – 811.
ZHOU Hao, JIANG Chaohui, YE Feiqiang, et al. Recognition of blast furnace materials based on image multi-feature[C]//CAC2020. Shanghai:Chinese Association of Automation,2020:806 – 811.

(上接第30页)

[7] 臧保文,罗双华. 提高FeO对烧结矿质量的研究[J]. 山西冶金,2021,42(2):10 – 11;33.
ZANG Baowen, LUO Shuanghua. A study on improving FeO quality of sinter by increasing carbon allocation[J]. Shanxi Metallurgy,2021,42(2):10 – 11;33.

[8] 陆洋,张薇. 氧化钙活性对固相烧结反应的影响[J]. 无机盐工业,2012,44(7):16 – 18.
LU Yang, ZHANG Wei. Influence of activity of calcium oxide on solid state sintering reaction[J]. Inorganic Chemicals Industry,2012,44(7):16 – 18.

[9] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(4):1179 – 1188.

(上接第89页)

[14] 王聪兵. 难选氧化锌矿硫化焙烧 – 浮选理论与技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
WANG Congbing. Theoretical and technological research on sulphide roasting-flotation of difficult-to-select zinc oxide ores[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2019.

[15] LIU R, ZHAI Q, WANG C, et al. Optimizing the crystalline state of Cu slag by Na_2CO_3 to improve Cu recovery by flotation[J]. Minerals,2020,10(9):820.