



重要有色金属冶炼废渣的特征及处理技术

赵成¹, 朱军¹, 王正民², 崔旭东³

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西汉中锌业有限责任公司, 陕西 汉中 723000; 3. 陕西锌业有限责任公司商洛冶炼厂, 陕西 商洛 726000)

摘要: 重金属冶炼过程中会产生大量废渣, 大多属于危险固废。随着国家对涉重企业生产环保政策日益完善, 冶炼废渣的处理已经成为企业可持续发展的共性问题。针对铜、铅、镍冶炼工艺的技术特点, 在调研和文献的基础上, 通过分析各类冶炼渣的特点、性质和处理技术, 总结了重金属冶炼渣处理存在的问题及技术发展方向。

关键词: 重金属; 废渣; 火法熔炼; 综合利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.06.001

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 06-0001-06

近年来, 我国重金属冶炼规模迅速扩张, 技术水平不断进步, 产量逐年增长。2016年我国铅产量达467万t^[1], 精炼铜产量844万t^[2], 精炼镍产量42万t^[3]。金属在冶炼过程中, 均会不同程度产生各类废渣。其中重金属冶炼渣属于危险固体废物, 含有大量有价金属, 是重要的二次资源。但因成分复杂, 有价金属难以得到综合回收, 并且会对环境造成严重污染等原因, 导致近年来处理效果并不理想。重金属冶炼废渣与一般固体废弃物相比具有以下特点: (1) 成分复杂。不但含有价金属, 还含有部分有毒元素, 处理时要考虑废渣特征选择合理的回收技术。(2) 处理过程中可能会产生二次污染。处理时要同时考虑处理技术的先进性及经济性, 应尽量避免或减少二次污染。(3) 堆存渣量巨大。随着矿产资源的不足, 利用冶炼废渣是缓解资源不足的有效措施。

面对日益严峻的环境污染和资源短缺问题, 重金属冶炼废渣的处理已成为当前有色金属行业亟需解决的共性问题。本文重点介绍了铜、铅、镍三种重金属火法熔炼渣的来源, 及其冶炼过程产生的熔炼废渣特征以及相应的处理技术。

1 重金属废渣来源及特征

熔炼渣指火法冶炼过程中, 获得粗金属或铋以及粗金属精炼过程中所产生的炉渣。一般由多种氧化物组成, 并伴有少量硫化物和氟化物等, 渣中不但含有有色重金属、稀散金属, 同时还含有砷等剧毒元素。

1.1 铜熔炼渣

铜熔炼渣主要产生于铜精矿造钼熔炼过程, 渣中主要成分为Fe (30%~40%) 和SiO₂, 还含有Cu、Ni、Co、Au、Ag等有价金属及CaO、Al₂O₃和少量MgO等氧化物。据统计, 我国每年产出400~500万t铜炉渣, 至今累计上万吨^[4]。铜渣的矿物成分主要是铁橄榄石、磁铁矿及脉石形成的玻璃体, 铜主要以辉铜矿(Cu₂S)、金属铜、氧化铜形式存在, 铁主要以硅酸盐的形式存在^[5]。

1.2 铅熔炼渣

鼓风炉、底吹炉、烟化炉、反射炉、浮渣处理窑炉所产生的炉渣统称为铅熔炼渣, 铅渣中含有Pb、Zn、Cr、As等有回收价值的元素。铅熔炼渣通常由FeO、SiO₂、CaO、Al₂O₃、ZnO、MgO等多种氧化物及它们互相结合而成的化合物、固溶体、共晶混合物组成, 还含有硫化物、氟化物等。虽然因

收稿日期: 2018-08-21; 改回日期: 2018-09-28

作者简介: 赵成 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为有色冶金及冶炼废渣综合利用。

原料及冶炼工艺不同导致铅渣成分有所区别,但基本都在以下范围波动: Fe: 17%~31%、CaO: 10%~25%、Zn: 3%~20%、Pb: 0.5%~5%、 Al_2O_3 : 3%~7%、MgO: 1%~5%^[6]。铅熔炼渣特点是产量大、成分复杂,有价金属含量偏低,处理困难等。

1.3 镍熔炼渣

镍熔炼渣产生于火镍法治炼造钼及吹炼过程,渣中含有 Fe、Ni、Cu、Co 等有价金属,镍熔炼渣通常由 FeO 和 SiO_2 及少量 CaO、MgO、 Al_2O_3 等组成,属于 FeO- SiO_2 -CaO (MgO) 三元渣系。铁主要以铁橄榄石形式存在。据资料显示,每生产 1 t 镍约排放 6~16 t 镍渣,累计堆存量上千万 t。渣排量大、有用成分回收效益低是镍熔炼渣的特点。

2 冶炼废渣处理技术

按照废渣的物理化学性质,目前国内处理废渣的技术主要可分为:火法处理、湿法浸出、直接利用以及稳定化/固化。

表 1 总结了各种方法的优缺点。

表 1 不同处理技术对比

Table 1 Comparison of different processing technology

技术类别	原理	特点
火法处理	火法熔炼使金属还原或以蒸汽形式得到目标金属。	优点是对原料适应性强、处理量大、工艺简单但能耗高、污染严重投资高等。
湿法浸出	利用浸出剂,使废渣有用成分或有害杂质分离	优点能耗低、环保好、回收率高。但操作流程复杂、浸出剂用量大、设备腐蚀严重。
稳定化/固化	采用物理或化学方法使危废在自然环境下稳定。	具有工艺简单运行可靠等优点,并未实现有价金属回收。
直接利用	用作生产微晶玻璃、水泥、建材等	利用效果好、简单但炉渣余热未利用。

2.1 铜熔炼渣处理技术

由于铜渣中含有铜及大量铁,因此近年来研究主要集中在铜的回收,其次还包括铁、锌和银的回收,但由于铜渣中硅、锌、铅等元素高于炼铁原料入炉标准,以及铁在铜渣中主要以铁橄榄石形式存在,导致铜渣中铁难以直接利用。铜熔炼渣处理技术主要有火法贫化、湿法提取以及选矿处理。

2.1.1 火法贫化

火法贫化的目的是降低铜渣铜的含量,将 Fe_3O_4 还原降低渣密度、黏度和熔点,促使渣与冰铜彻底分离,渣中其他金属元素可通过烟化、湿法浸出等工艺回收。常见的贫化方法见表 2^[7]。

表 2 铜渣火法贫化常用方法

Table 2 Common methods of copper slag fire dilution

技术类别	原理	特点
电炉贫化法	在高温作用下使熔渣黏度降低加快铜液滴长大,加快与熔炼渣分离。	优点是废气少、易控制,一次性投资少,但电耗及电极材料消耗高、金属回收率偏低
真空贫化法	真空有利于 SO_2 气泡长大、上浮对熔渣起强烈搅拌作用,促进铜液长大	适宜处理高品位铜渣,但成本高,操作复杂
渣桶法	利用渣的潜热实现铜滴的沉降和晶体的粗化	处理方法简单、可充分利用铜渣潜热
电场富集法	通过电场改变渣-金属界面表面张力实现铜富集	处于试验研究阶段,操作存在一定困难
选择性还原	向铜熔渣中加入炭粉搅拌促进铜沉降,再鼓入氧化性气体,提高 Fe_3O_4 含量,缓冷磁选铁	不需外加热、工艺简单残渣含铜可降低至 0.35% 以下

叶钟林等^[8]对转炉渣进行了高温还原贫化法试验并进行了工业生产实践,生产实践表明:渣含铜由 7.76% 降低至 3.95%,实现降低成本,减少金属损失的目的。

内蒙华鼎铜业公司^[9]采用电炉贫化法处理氧底吹熔炼炉渣使渣含铜达到 0.6% 的良好水平。

金昌冶炼厂^[10]采用电炉贫化法处理 Ausmelt 炉渣,生产实践表明贫化后炉渣可降低至 0.6% 左右。

火法贫化作为目前运用较广泛的炉渣处理技术,实现了对铅、钴、锌等元素回收,但存在能耗高,渣中铁并未回收利用、渣含铜较高 (0.6%~0.8%) 且不适用于处理低品位铜渣等问题。

2.1.2 湿法提取

湿法提取主要通过浸出剂浸出渣中的铜,达到铜回收的目的。按浸出方式分为直接浸出和间接浸出^[7]。直接浸出包括硫酸化浸出、氯化浸出、氰化浸出和生物浸出。

孙映^[11]、孙建军等^[12]采用硫酸浸出铜渣中铜, Cu 浸出率分别为 69.7% 和 91.2%; 铜渣氯化浸出分为氯气浸出和氯盐浸出,氯气浸出主要过程为氯气溶解和渣中含铜物相浸出^[13]。R. Nadirov 等^[14]采用氨化浸出的方法处理铜渣,得到锌和铜的回收率分别为 81.16% 和 56.48%。微生物浸出是利用某些微生物可将不溶性硫化物转化成可溶性硫酸盐,实现有价金属与有害成分分离。

间接浸出包括氧化或硫酸化焙烧-浸出、还原焙烧-氨化浸出、氧化焙烧-浸出-电积、酸浸-萃取等^[15]。

氧化焙烧酸浸利用铜渣中的 Cu、Ni、Co、Zn

等金属矿物在加压条件下可经氧气氧化溶于稀硫酸中的原理; 硫酸化焙烧 - 酸浸经过三个步骤即硫酸化焙烧、硫酸盐分解、硫酸浸出^[16]。

E. Rudnik 等^[17]对转炉铜渣进行还原焙烧后氨浸, 实现铁和铜、钴分离。

刘缘缘等^[18]选择硫酸 - 双氧水对奥斯麦特电炉缓冷渣浸出, 以 P204 和硫酸作萃取剂和反萃剂, 铜、锌的回收率分别为 84.97%、96.47%。

湿法提取技术可弥补火法贫化能耗高、污染严重、难以适用于低品位铜渣的不足, 还具有回收价值高, 选择性好的优点; 但浸出剂用量大、生产流程长且可能产生固液分离困难及后续废水处理困难等问题。

2.1.3 选矿技术

根据有价金属存在相的表面亲水及亲油性质、磁学性质和渣中各相密度差别, 可通过浮选、磁选和重选分离富集有价金属^[19]。浮选法主要用于回收铜渣中的铜, 磁选可以分离得到铁精矿而重选法适用于处理有用矿物与脉石间有较大密度差的矿石或其他原料。赵春燕^[20]选取缓冷 - 浮选工艺回收炉渣中的铜, 最终获得品位为 18.81%, 回收率 92% 的铜精矿。

河南豫光金铅股份有限公司^[21]采用浮选法对铜底吹熔炼渣中铜进行回收, 得到含铜 22.89% 的铜精矿, 生产实践表明: 采用浮选法处理铜底吹炉熔炼渣可获得较满意的生产指标。

此外贵冶的渣选矿车间, 每年可从铜冶炼渣中回收的铜 8000t, 实现尾矿含铜 0.24% 的良好指标^[22]; 大冶炉渣选矿厂采用“两段 - 闭路破碎、两段磨矿两段选别”工艺处理诺兰达炉渣, 使金、银富集于铜精矿中, Cu、Au、Ag 回收率分别达 94.18%、80.67% 和 69.89%; 澳大利亚芒特艾萨矿业公司采用浮选法处理铜转炉渣, 实现尾矿含铜 0.62%; 肯尼科特矿物公司处理诺兰达炉渣, 取得铜回收率 95%、尾矿含铜 0.42% 的技术指标^[23]。菲律宾 PASAR 铜炉渣选矿厂采用选矿法处理缓冷炉渣搭配水淬炉渣, 得到了铜精矿品位 25.63%, 尾渣含铜 0.32% 的良好生产指标。

选矿处理铜渣与传统贫化相比不但能耗低、环境污染小、富集比大、对渣型要求低而且尾渣含铜少 (0.2% ~ 0.4%)、粒度细、含铁高, 但应控制尾矿中硅含量, 否则在炼铁行业难以利用, 此外存在设备繁多、一次性投资大、占地面积广等缺点并且仅适用于处理硫化态铜渣。

2.1.4 选冶联合

浮选法适用于硫化矿物, 难以回收以氧化态铜渣, 磁选法适用于磁性铁矿物, 难以回收以铁橄榄形式的铁。因此, 采用多种技术“合用”往往会实现铁和铜综合回收的目的。

罗杰等^[24]选取“浮选 - 高温还原焙烧 - 磁选”工艺对云南某铜渣中 Cu、Ag、Fe 和 Zn 进行回收, 浮选精矿铜和银的回收率分别为 35%、30%; 还原焙烧磁选铁精矿品味 72%, 铁回收率 89%, 烟尘中锌回收率 96%。许冬等^[25]采取“高温还原焙烧 - 磁选”工艺从铜渣中回收铁, 得到品味 91.10%、金属化率 94.27% 的金属铁粉。郑鹏^[26]采用“直接还原 - 湿式磁选”工艺从冶炼铜尾渣中回收铜和铁, 铜、铁回收率为 90.56%、70.23%。郭秀建等^[27]选用“转底炉直接还原结合磨选”工艺对贫化铜渣中铁进行回收, 得到铁的回收率约 90%。

2.2 铅熔炼渣处理技术

铅熔炼渣回收的主要对象除铅以外, 还有锌、金、银及某些稀散金属。铅熔炼渣的处理方法主要有火法、湿法和选冶联合法。

2.2.1 火法处理

火法处理是将铅渣与铅精矿混合冶炼使铅进入粗铅中, 其他金属在还原熔炼过程中得到富集。铅渣处理方式分为铅渣还原炼铅和液态高铅渣还原炼铅; 前者主要是通过鼓风炉熔炼处理, 后者可分为卧式还原法、电热焦还原法和侧吹还原法。此外还有烟化法处理技术。

范燕青等^[28]对底吹炉产生的高铅渣用煤进行还原试验, 试验发现渣中铅含量小于 2%。

卧式还原法是将液态高铅渣送入卧式还原炉中, 配以天然气和辅料, 在恒定温度下熔炼。河南豫光金铅公司^[29]采用液态高铅渣直接还原工艺, 降低炼铅能耗、减少污染粗铅冶炼回收率高达 98.5%。

液态高铅渣在竖井炉里与焦炭柱进行两次还原反应产出粗铅和炉渣, 炉渣可用烟化炉回收锌、锗、铟等金属^[30]。

济源市金利冶炼有限公司和中国恩菲工程技术有限公司^[31]共同研发了“氧气底吹 - 侧吹直接还原”炼铅新工艺, 冶炼回收率达 97% 以上, 同时炉渣排放量少, 炉渣含锌高, 有利于烟化炉锌的回收。

株洲冶炼厂、鸡街冶炼厂、会泽铅锌矿用烟化挥发法处理铅鼓风炉渣取得较好效果, 铅挥发率分别为 75% ~ 80%、94% ~ 95%、90% ~ 96%。沈阳冶炼厂用烟化法处理高硅高钙铅炉渣, 铅锌

回收率为 94.89% 和 85.4%。

火法处理具有工艺简单、回收效果好等特点，但工作环境恶劣，污染物排放大，能耗高。

2.2.2 湿法处理

铅渣与浸出剂混合后，渣中有价成分或有害杂质进入溶液中，实现有价金属的回收。湿法处理主要用于回收铅渣中的 Pb、In、Au、Ag 及某些稀散金属。常用的回收方法主要包括酸性、碱性、氯化化和微生物浸出。

Shu Yuehong 等^[32]利用硝酸和氯化钠混合溶液对铅渣进行浸出，经草酸钠沉淀后煅烧制备出新型 PbO。

碱浸法是利用铅渣中铅能溶于碱性溶液而铜不溶的原理分离铅渣中的铅和铜。包崇军等^[33]采用“烧碱浸出-净化-碳酸化沉淀-煅烧”工艺以铜浮渣为原料生产出氧化铅，碱浸后的富铜渣可用于生产硫酸铜。

Mohammad Hasan 等^[34]对氯化浸出法从铅渣中回收铅进行了可行性分析，结果发现：在较佳工艺条件下，铅回收率高达 96%。

郭朝晖等^[35]采用微生物浸出法对铅锌冶炼废渣中的 Cu、Zn、In、Ga 元素进行浸出，得出其浸出率分别为 95.5%、93.5%、85% 和 80.2%，铅和银则富集在余渣中。由于微生物浸出法对反应条件要求高，菌种难驯化、浸出时间长、浸出率低等原因，在实际中应用较少。

除上述实验室研究外，湿法处理技术在实际生产中也有应用。如：贵溪冶炼厂采用氯化浸出法生产氯化铅。贵阳冶炼厂将铅渣湿法处理后生产金属铅，铅回收率达 97%~98%。鸡街冶炼厂盐酸浸出氧化渣中锡、铅回收率分别达 95%~96%、99%。

湿法处理技术虽可实现有价金属综合回收，但会消耗大量浸出剂、产生大量废酸，造成废水处理成本高；在处理含硅、铁等杂质元素较高的渣料时，目标金属浸出率低，可能出现固液难分离。

2.2.3 选冶联合

邹志强^[36]采用重选-浮选-浸出的方法对云南某鼓风炉渣中 Pb 进行了回收，经重选-浮选后铅品味为 40%，回收率 50%。肖军辉等^[37]利用云南某铅锌尾渣采用硫酸浸锌-浸渣重选选铅工艺，回收尾渣中的 Zn 和 Pb。结果表明：锌浸出率达 97.02%，重选后获得的铅精矿品味为 45.68%。杨慧芬等^[38]对某铅渣采用煤基直接还原-磁选技术回收其中的铁，获得品味 93.68%、回收率 77.59%的金属铁粉。此外还有磁化焙烧-弱磁选^[39]、转

底炉熔炼-磁选^[40]等方法。

选冶联合技术吸收了选矿和冶炼两种方法的优点，具有金属回收率高、污染小、能耗低等优点，但缺点是回收过程流程长。

2.3 镍熔炼渣处理技术

目前我国除了暂难以利用的氧化镍矿、硅酸盐镍矿、红土型镍矿以及贫矿外，已探明的大型硫化铜镍矿床大多已经开发利用，储量逐年减少，并且近年来中国镍矿资源对外依存程度达 80%^[41]。因此通过利用镍熔炼渣可以有效缓解我国镍资源不足。现有镍熔炼渣的综合利用方式有：回收有价金属、生产微晶玻璃和生产建材。

2.3.1 有价金属回收

镍渣中含有 40% 左右的铁及少量镍、铜、钴等有价金属，回收 Ni、Cu、Co 等元素目前常用方法有选择性还原和酸浸工艺；回收 Fe 常用方法有熔融还原、直接还原和磁选^[42]。

潘建等^[43]通过选择性还原-磁选技术富集镍渣中的 Ni 和 Cu，结合磨矿-磁选法，获得 Ni、Cu 和 Fe 的回收率分别为 82.20%、80.00% 和 42.17%。采用酸浸工艺可从镍渣中获得硫酸镍、硫酸钴和硫酸铜粗品。

郭亚光等^[44]借助熔融还原工艺对提镍尾渣中的铁元素进行提取研究。得出：在较佳条件下，金属化率为 97.01%，铁回收率为 96.58%。鲁逢霖等^[45]选用直接还原和磁选方法对镍渣提铁进行试验，结果表明，铁的回收率达到 89.80%。张培育等^[46]通过磁选-常压酸浸工艺对镍铁渣进行浸出探究，发现 Ni 浸出率为 91.5%，当用碳酸钠碱熔焙烧尾矿时 Cr 的浸出率达 94.1%。

还原-磁选实现镍铜相对于铁的富集，但还原产物选分效果差且 S、P 含量高；湿法工艺简单、操作容易，但处理含重金属的废酸、废水、废渣困难；熔融还原法铁回收率高，所得产品可直接用于电炉炼钢，但能耗高；直接还原法热能利用效率高、生产成本低；磁选的缺点是分选效果差。

2.3.2 制作微晶玻璃

微晶玻璃是一种含有大量微晶相和玻璃相的多晶固体材料，广泛应用于国防、化工、冶金等领域，借助镍渣制备微晶玻璃也是近年来的研究热点。周琦等^[47]以富铁镍渣及粉煤为主要原料制备 $R_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ 系微晶玻璃，制备的微晶玻璃致密，且还原铁质量较好。北京科技大学的高术杰^[48]以金川二次镍渣为主要原料，利用浇铸法制作微晶玻璃，加入适量的助熔剂和澄清剂，

可得到强度较大的微晶玻璃。镍渣制备微晶玻璃时通常要引入化学试剂或高纯度矿物, 因此如何提高镍渣掺量是未来的研究方向。

2.3.3 生产建材

在建材方面镍渣可用于混凝土制备、井下充填材料、矿物掺合料、水泥以及建筑砌块。杨志强^[49]、李克庆等^[50]研究了以镍渣作为原料制备矿山充填凝胶剂, 结果表明: 镍渣可代替水泥用于矿井充填料的生产。王朝霞^[51]分析了镍铁渣作为水泥混合材使用的可能性, 发现作为掺杂剂在生产水泥时只能少量添加。龚建贵等^[52]对内蒙某大型RKFE工艺镍铁生产厂的镍渣进行了检测、试验, 认为镍渣粉按一定比例与矿渣粉复合加以利用是一条很好的途径。唐天佼^[53]对比了镍渣代替天然砂配制的混凝土和普通混凝土之间的性能。结果表明, 镍渣符合建筑用砂的各项指标要求。利用镍渣生产建材较好的利用了有色冶金废渣, 不仅节省生产成本且符合冶炼废渣处理原则, 在利用时应避免环境问题的产生。

3 问题与展望

(1) 废渣综合利用率、处理水平低。大多数研究集中在单一元素回收, 应考虑尽可能最大化综合回收多种有价元素;

(2) 处理技术种类多、但不够完善。实验室研究大多未能考虑经济成本, 导致工业化程度不高, 同时, 由于部分应用于工业实践的技术不够成熟, 致使大量废渣仍存在不合理排放;

(3) 现有技术对冶炼废渣的有效处理能力不足。

国家应加强相关法律法规建设, 建立健全重金属废渣处理管理长效机制, 使得重金属冶炼渣处理更加合理、合法化; 并且应加强冶炼技术的研究, 使得矿石在冶炼过程中尽可能最大化利用以减少冶炼废渣排放; 同时企业要充分考虑相关技术的先进性及实用性, 强化相关冶炼企业之间的合作, 使冶炼废渣要尽可能集中处理。

参考文献:

[1] 王光辉, 王海北, 张帆, 等. 铅锌冶炼渣综合回收利用研究[J]. 江苏理工学院学报, 2017, 23(2): 7-12.
[2] 赖祥生, 黄红军. 铜渣资源化利用技术现状[J]. 金属矿山, 2017(11): 205-208.
[3] 钟菊芽. 2016-2017年镍的市场分析与展望[J]. 中国金属通报, 2017(6): 118-119.
[4] 韩彬, 童雄, 张国浩, 等. 某铜炉渣的工艺矿物学研究[J]. 矿产保护与利用, 2015(1): 63-68.

[5] 姜平国, 吴朋飞, 胡晓军, 等. 铜渣综合利用研究现状及新技术的提出[J]. 中国矿业, 2016, 25(2): 76-79.
[6] 李凯茂, 崔雅茹, 王尚杰, 等. 铅火法冶炼及其废渣综合利用现状[J]. 中国有色冶金, 2012, 41(2): 70-73.
[7] 李博, 王华, 胡建杭, 等. 从铜渣中回收有价金属技术的研究进展[J]. 矿冶, 2009, 18(1): 44-48.
[8] 叶钟林, 史谊峰, 施哲, 等. 铜转炉渣火法还原贫化与生产实践[J]. 云南冶金, 2014, 43(6): 28-31+49.
[9] 边瑞民, 袁俊智, 陈俊华. 铜熔炼渣贫化方法及技术经济分析[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(3): 14-17.
[10] 汪和僧. 金昌冶炼厂贫化电炉生产实践[J]. 中国有色冶金, 2004(3): 21-22, 30.
[11] 孙映, 纪苏, 封亚晖, 等. 铜渣中有价金属酸溶出试验研究[J]. 上海金属, 2016, 38(6): 54-58, 70.
[12] 孙建军, 黄自力, 杨龔, 等. 铜冶炼渣硫酸浸出回收铜试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(6): 102-107.
[13] 李磊, 胡建杭, 魏永刚, 等. 铜渣中铜的回收工艺及新技术[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 21-26.
[14] R. Nadirov, L. Syzdykova, A. Zhussupova. Copper smelter slag treatment by ammonia solution: Leaching process optimization[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(12): 2799-2804.
[15] 朱茂兰, 熊家春, 胡志彪, 等. 铜渣中铜铁资源化利用研究进展[J]. 有色冶金设计与研究, 2016, 37(2): 15-17, 27.
[16] 朱心明, 陈茂生, 宁平, 等. 铜渣的湿法处理现状[J]. 材料导报, 2013, 27(S2): 280-284.
[17] Rudnik E, Burzyńska L, Gumowska W. Hydrometallurgical recovery of copper and cobalt from reduction-roasted copper converter slag[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(1): 88-95.
[18] 刘缘缘, 黄自力, 秦庆伟. 酸浸-萃取法从炉渣中回收铜、锌的研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(2): 76-79.
[19] 边瑞民, 袁俊智, 陈俊华. 铜熔炼渣贫化方法及技术经济分析[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(3): 14-17.
[20] 赵春艳. 某铜炉渣缓冷处理的浮选试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2015(02): 55-58.
[21] 赵高峰, 杜新玲, 常艳兵. 铜底吹熔炼渣选矿回收铜的生产实践[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(2): 14-16.
[22] 徐国华. 贵冶渣选指标的影响因素及分析[J]. 铜业工程, 2018(01): 62-66.
[23] 王红梅, 刘四清, 刘文彪. 国内外铜炉渣选矿及提取技术综述[J]. 铜业工程, 2006(4): 19-22+86.
[24] 罗杰, 张锦仙, 文娅, 等. 云南某铜冶炼渣资源化综合回收工艺技术研究[J]. 云南冶金, 2017, 46(4): 24-27.
[25] 许冬, 春铁军, 陈锦安. 铜渣高温快速还原焙烧-磁选回收铁的研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(1): 89-91, 95.
[26] 郑鹏. 铜渣直接还原制取铜铁合金的研究[J]. 有色矿冶, 2016, 32(1): 36-38.
[27] 郭秀键, 倪晓明, 马丁, 等. 铜渣处理与综合利用[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(2): 23-26.
[28] 范艳青, 张登高, 蒋训雄, 等. 高铅渣还原清洁炼铅试验研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2013(9): 7-10.

- [29] 李卫锋, 陈会成, 李贵, 等. 低碳环保的豫光炼铅新技术——液态高铅渣直接还原技术研究 [J]. 有色冶金节能, 2011, 27(2): 14-18.
- [30] 王传龙. 铅渣中有价金属铜铁铅锌镉综合回收工艺及机理研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [31] 杨华锋, 翁永生, 张义民. 氧气底吹-侧吹直接还原炼铅工艺 [J]. 中国有色冶金, 2010, 39(4): 13-16.
- [32] Yuehong Shu, Cheng Ma, Longguan Zhu, Hongyu Chen. Leaching of lead slag component by sodium chloride and diluted nitric acid and synthesis of ultrafine lead oxide powders [J]. Journal of Power Sources, 2015, 281.
- [33] 包崇军, 贾著红, 吴红林, 等. 转炉处理铜浮渣的工业试验 [J]. 中国有色冶金, 2009(3): 27-28+73.
- [34] Mohammad Hasan GOLPAYEGANI, Ali Akbar ABDOLLAHZADEH. Optimization of operating parameters and kinetics for chloride leaching of lead from melting furnace slag [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(12).
- [35] 郭朝晖, 程义, 邱冠周, 等. Pb/Zn 冶炼废渣中有价金属生物浸出条件优化 [J]. 中国有色金属学报, 2008(5): 923-928.
- [36] 邹志强. 鼓风炉铅渣选矿试验研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
- [37] 肖军辉, 王进明, 傅开彬, 等. 选冶联合工艺回收云南某铅锌尾渣中 Pb 和 Zn [J]. 金属矿山, 2017(6): 192-196.
- [38] 杨慧芬, 张露, 马雯, 等. 铅渣煤基直接还原—磁选选铁试验 [J]. 金属矿山, 2013(1): 151-154.
- [39] 王光辉, 王海北, 张帆, 等. 铅锌冶炼渣综合回收利用研究 [J]. 江苏理工学院学报, 2017, 23(2): 7-12.
- [40] 江苏省冶金设计院有限公司. 处理铅锌废料的方法和系统: [P] 中国 CN201610619367.0. 2016-11-09.
- [41] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 中国镍资源开发现状与可持续发展策略及其关键技术 [J]. 矿产保护与利用, 2016(2): 58-69.
- [42] 李小明, 沈苗, 王翀, 等. 镍渣资源化利用现状及发展趋势分析 [J]. 材料导报, 2017, 31(5): 100-105.
- [43] 潘建, 郑国林, 朱德庆, 等. 选择性还原-磁选回收镍渣中的有价金属 [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3421-3427.
- [44] 郭亚光, 朱荣, 王云, 等. 镍渣煤基熔融还原提铁工艺基础研究 [J]. 工业加热, 2015, 44(6): 40-43.
- [45] 鲁逢霖, 郭玉华, 张颖异, 等. 镍渣直接还原磁选提铁试验 [J]. 钢铁, 2014, 49(2): 19-23.
- [46] 张培育, 郭强, 宋云霞, 等. 从红土镍矿镍铁渣中分离浸取镍铬工艺 [J]. 过程工程学报, 2013, 13(4): 608-614.
- [47] 周琦, 南雪丽, 易育强, 等. 镍渣微晶玻璃制备及铁的回收利用 [J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(5): 14-18.
- [48] 高术杰. 熔态提铁二次镍渣制备微晶玻璃及热处理制度研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [49] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 利用金川水淬镍渣尾砂开发新型充填胶凝剂试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1498-1506.
- [50] 李克庆, 冯琳, 高术杰. 镍渣基矿井充填用胶凝材料的制备 [J]. 工程科学学报, 2015, 37(1): 1-6.
- [51] 王朝霞, 焦晓飞. 用镍铁渣做水泥混合材的试验研究 [J]. 四川水泥, 2016(1): 10.
- [52] 龚建贵, 宓振军, 张颖, 等. RKEF 工艺镍渣用作水泥混合材初探 [J]. 水泥, 2016(10): 18-20.
- [53] 唐天佼. 镍渣在混凝土中的应用研究 [J]. 商品混凝土, 2014(2): 49-50.

Characteristics and Treatment Technology of Non-ferrous Heavy Metal Smelting Slag

Zhao Cheng¹, Zhu Jun¹, Wang Zhengmin², Cui Xudong³

(1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi, China; 2. Shaanxi Hanzhong Zinc Industry Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi, China; 3. Shangluo smelter, Shaanxi Zinc Industry Co., Ltd., Shangluo, Shaanxi, China)

Abstract: A large amount of smelting waste residue is produced in the heavy metal smelting process, most of which are classified as hazardous solid waste. As the country's environmental protection policies involving heavy metal smelting enterprises become increasingly strict, the disposal of smelting waste has become a common problem for sustainable development of enterprises. In view of the technical characteristics of heavy metal smelting processes such as copper, lead and nickel, this paper summarizes the problems and technical development of heavy metal smelting slag treatment by analyzing the characteristics, properties and treatment techniques of various smelting slags on the basis of research and literature.

Keywords: Heavy metal; Waste residue; Fire smelting; Comprehensive utilization