

富铁镍渣综合利用的研究与进展综述

马泳波, 杜雪岩, Alibek Kakimov, 申莹莹, 李国洲

(兰州理工大学有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 富铁镍渣(含铁约40%)难以被直接提取利用,只能进行堆置处理,在造成资源浪费的同时还占用了大量的场地。介绍了近年来对于镍渣的综合利用研究与进展,包括还原提铁、提取镍钴铜、冶炼钢铁合金、制作微晶玻璃、用于建筑领域以及矿山填埋,并归纳总结了这些利用方法的不足之处,最后对镍渣综合利用的发展要求进行了展望。

关键词: 镍渣;综合利用;提铁;微晶玻璃;矿山填埋

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.06.005

中图分类号: TD982; TF09 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2018)06-0025-07

镍渣是指在镍火法冶炼过程中排放的一种工业固体废弃物,即在镍冶炼过程中形成以FeO、SiO₂为主要成分的熔融物经水淬后形成的粒化炉渣。矿石来源和冶炼工艺的不同导致其化学成分存在着较大的差异,但主要的金属元素包括镍、钴、铜和铁。表1为不同单位的镍渣成分,据此可知渣中的铁含量较高,远超我国铁矿石平均品位^[1](TFe>25%),并且还有微量的镍、钴、铜等元素。

表1 不同镍渣的化学成分表/%

Table 1 Composition of different nickel slags

名称	FeO	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Ni	Cu	Co
金川公司 ^[2]	43.01	34.61	8.86	3.37	2.26	0.23	0.16	0.03
云南某厂 ^[3]	57.72	25.51	0.75	0.78	-	3.39	1.01	1.36
某厂 ^[4]	44.31	33.41	9.67	2.60	2.64	0.90	0.34	0.12

随着各镍冶炼单位产能的进一步提升,每年在大量生产镍产品的同时,也产生了很多的副产品-富铁镍渣。据报道,仅金川公司2009~2011年就产生含铁约40%的镍冶炼渣约512万t^[5],再加上早期堆存的以镍渣为主的2100万t镍铜混合渣,已经成为渣山。尽管研究表明金川镍渣腐蚀性、浸出毒性、放射性小于国家标准限值,在自然水

环境中各主要金属元素的化学性质稳定^[6],但是如山般的富铁镍渣不仅占用场地,还形成了资源的浪费。另一方面,中国从2003年开始已经成为全球最大的铁矿石进口国,并且国内面临着铁矿石求大于供、贫矿多且富矿少的局面,兼之铁矿石的不可再生性,国内冶金工作者已经开始着眼于寻求铁矿石的替代资源^[7-8]。因此,倘若能对镍渣中的铁、镍、钴、铜进行充分的回收再利用,在经济方面可以变废为宝、降本增效,创造更高的利润;在环保方面可以满足绿色发展理念和可持续发展的要求,有利于促进资源循环利用。

1 镍渣的理化性能分析

由表1可知,镍渣中约含40%的铁,同时含有高附加值的镍钴铜元素。倪文对金川镍渣进行了SiO₂饱和度计算,结果表明金川镍渣的SiO₂饱和度为0.704,据此判断渣中的铁应以铁橄榄石形态存在,而XRD谱也表明渣中铁的确以铁橄榄石相存在^[2]。刘晓民对金川镍渣进行了工艺矿物学分析,结果表明渣中的铁主要以铁橄榄石相存在;

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划

作者简介: 马泳波(1987-),男,助理工程师,博士研究生,研究方向为冶金资源回收再利用。

通讯作者: 杜雪岩(1971-),男,教授,博士,研究方向为冶金资源回收再利用。E-mail: duxy@lut.cn

铜镍主要以星状微细粒的铜镍硫化物随机分布在硅酸盐基体中；钴的分布并未呈现出规律性^[9]。曹战民^[14]对金川镍渣中铜镍的分布研究表明镍渣中镍存在于铜镍铁硫化物相和镁铁橄榄石相中，而铜则仅以硫化物的形式存在于铜镍铁硫化物中。

2 镍渣的综合利用研究进展

2.1 还原提铁

目前镍渣还原提铁主要分为两种：一种是直接用碳质还原剂还原镍渣中的铁橄榄石，并经磁选实现铁的分离；另一种是考虑到橄榄石结构致密，还原性较差，故先用 CaO 游离出铁橄榄石中的 FeO，再进行还原、磁选。这两种方法仅在物料的加入上存在差异，工艺路线见图 1。

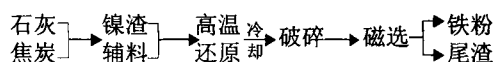
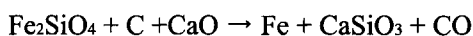
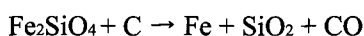


图 1 还原-磁选法回收镍渣中铁资源的工艺流程

Fig. 1 Flowchart of iron recycling by reduction-magnetic separation from nickel slag

提铁过程涉及的主要反应为：



作为我国最大的镍生产基地，金川公司早在 1987 年就开始与国内高校、科研院所以及其他单位一起攻关镍铜冶炼炉渣综合利用的关键技术，其主要成果之一就是通融熔融还原法提取镍渣中的铁资源，但是由于经济性等原因，成果并未实现工程化^[10]。白彦贵^[11]研究了弃渣提铁反应的动力学，对弃渣提铁反应的热力学进行了理论探讨。倪文^[2]在进行还原提铁热力学分析的基础上，通过实验表明还原铁的品味及收得率与温度、还原时间、碱度相关，在碱度 0.8 时于 1300℃ 还原 2 h，得到铁精粉的品味为 89.84%、全铁收得率为 93.21%。王树清^[12]向熔融镍渣中吹入富氧空气进行前期氧化，再加入石灰、煤粉以便于熔渣中的氧化铁还原为铁，得到铁回收率 ≥ 90% 的还原铁水，且二次渣含铁量小于 5%。李娟^[13]向镍渣加入还原剂、熔剂、粘结剂混合配料，压制成球团后烘干，再进行球团预热，最后在转底炉中进行还原，得到

热态金属化球团，将热球团加入到燃气炉进行熔分，实现终还原和渣铁熔化分离，得到的产物含 Fe 95.90%、Ni 0.61%、Cu 0.51%。Jung Ho Heo^[14]研究了 CaO 加入量对还原法从铜渣中回收铁的影响，结果表明在考虑泡沫渣的基础上，当 CaO 加入量为 20% 时，铁回收率达到 90% 的峰值，但是还原的铁颗粒分散在粘稠的渣中，导致回收困难。

尽管采用还原法提铁可以从富铁镍渣中提取铁资源，但是还原法具有以下缺点：①还原过程产生的 CO、CO₂ 等气体对人体和环境都有负面影响；②物料加入量和渣量都比较大，易产生泡沫渣，过程控制难度较大；③还原产物中混有铅、锌、砷等在炼钢过程无法去除且会对最终钢产品的性能产生影响的杂质元素。因此，还原法仅在实验室取得成功，并未进行工业化推广应用。

2.2 镍钴铜的提取

镍渣中微量的镍钴铜因其附加值较高而受到关注。目前从镍渣中回收镍钴铜的主要方法分为三种，即还原法、浸出法和浮选法。

2.2.1 还原法

还原法主要是利用镍渣中镍钴铜易还原的特性，通过抑制铁的还原，进而实现渣中镍钴铜的回收。芬兰 Harjavalta 镍厂^[15]于 1990 年进行过从镍渣中回收镍钴铜的相关试验，结果表明在 100kVA 的电弧炉中加入 7% 的碳后，镍钴铜的回收率分别为 97%、81% 和 78%，渣中有 80% 以上的铁残留在尾渣中。马永峰^[16]先选择性还原熔融态的镍铜渣，全部还原炉渣中的镍、钴、铜并抑制铁的还原，得到富含镍钴铜的中间合金；后还原熔渣中铁的硅酸盐得到含有微量镍、钴、铜的粗铁。Pan^[4]用煤粉作还原剂，控制合适的炉渣碱度以及还原温度等条件，将镍闪速炉渣中镍、铜优先还原为金属，缓冷后进行磁选分离，得到含镍 3.25%、铜 1.20% 的精矿，镍、铜的回收率分别达到 82.20% 和 80.00%。王玉芳^[17]在 1300℃ 的转炉中向加压镍浸出渣加入碳、硅、钙质熔剂，反应 30 min 后 Ni、Cu 的收率分别为 96.18% 和 96.85%。喻正军^[3]用还原硫化法从镍转炉渣中回收镍钴铜，

结果表明当还原剂、硫化剂与炉渣的质量百分比分别为3.5%、25%，熔炼温度为1360℃，保温时间为3h时，钴镍铜在钴冰铜中的回收率分别达到了91.50%、96.08%和92.89%。

2.2.2 浸出法

浸出法也已用于回收镍渣中镍钴铜的研究。Li Yunjiao^[18]采用图2工艺加压氧化浸出法回收镍冶炼渣中的有价金属，当酸用量为20%、固体含量为25%时，在200~300kPa的氧压于250℃反应2h后，镍钴收得率为99%以上，铜收得率大于97%，锌收得率大于91%，铁收得率不足2.2%。Baghalha^[19]用氧化酸浸法回收铁橄榄石渣中的有价金属镍钴铜锌，研究结果表明常压较好，否则渣中会有大约20%的金属残留；较高温度下浸出液中的Fe和Al含量也较低；当渣中二价金属（包括Mg）含量较高时，硫酸用量就会大于理论计算量，并且过量的硫酸似乎正比于浸出液中的二价金属含量。Huang^[20]用高压氧化酸浸法回收镍转炉渣中的镍钴铜，结果表明当颗粒粒度为-150+74μm时，0.3mol/L的硫酸用量和7mL/g的固液比以及600kPa的氧分压于200℃时反应80min后，镍钴的回收率大于97%，铜的回收率大于95%。

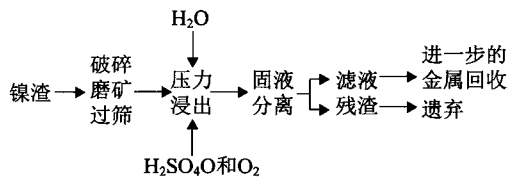


图2 加压氧化浸出法回收镍冶炼渣中有价金属的工艺

Fig.2 Flowchart of valuable metals recycling by pressure oxidative leaching from nickel slag

2.2.3 浮选法

浮选法主要是利用渣中各物相表面性质和密度的差异，从而实现镍钴铜的分离回收。周怡玫^[21]用浮选法从镍渣中综合回收镍和铜。

以上这些方法都尝试对低含量、高附加值的镍钴铜进行回收，但却未能实现对更高含量的铁元素的回收，对镍渣的价值利用不够充分。

2.3 冶炼钢铁产品

富铁镍渣中还含有微量的镍钴铜，因此同时利用其中的各种元素也受到关注，主方向就是冶炼特定成分的钢种或者合金。

2.3.1 用于钢铁冶炼

金川公司攻关镍渣综合利用技术的另一项成果就是利用镍渣进行钢铁生产，据报道^[22]，为了充分利用镍渣中的铁、镍、钴、铜元素，冶炼出化学成分合格的12MnCuCrNi钢。高惠民^[23]将镍渣在电炉中加热至1500~1550℃后，以煤粉作还原剂，并用石灰造渣，得到可用于生产耐蚀钢的还原铁水。袁守谦^[24]根据镍渣的成分特点，将铜选矿尾渣和碳质还原剂进行造块，在矿热炉中熔化还原得到牌号硅铁，再将热态的含硅铁水与镍熔渣兑入摇炉，通过控制碱度冶炼出还原铁水。据其分析：冶炼1t还原铁水需要加入的镍渣、铜渣、焦炭和石灰总量超过3.7t。

2.3.2 用于合金生产

芬兰Harjavalta镍厂^[15]1993年在100~170kW的电弧炉中进行过用镍渣生产合金的试验，得到Co 4.5%~5.5%、Cu 5.5%~8.5%、Ni 25%~35%、Fe 35%~50%以及S 8%~10%的合金。芦越刚^[25]将镍渣在中频感应炉中熔化成铁水，再加入金属镍使之完全合金化，于雾化器内用高压水流击打合金液使之成为小液滴并冷却成为粉末粉末经过脱水、烘干、高温还原、粉饼破碎、筛分、合批工序精制而成FeNi₁₀水雾化预合金钢粉。卢学峰^[26]以金川公司镍渣和石英砂为主要原料，用混合加料法在自制的小型直流电弧炉中冶炼出Fe₃Si₃和Fe₃Si硅铁合金；卢学峰^[27]还以焦炭和木炭作为还原剂，用生石灰造渣，在小型直流电弧炉中分别得到同时含有CaSi与Fe_{0.905}Si_{0.095}或CaSi与Fe₃Si的产物。

生产铁水虽然可以充分利用热能，但是存在工艺复杂和二次渣量大的弊端，并且存在泡沫渣严重以及炉底上涨导致的炉容变小、炉龄降低等技术缺陷；而生产合金则存在工序过于繁琐的问题。

2.4 制作微晶玻璃

镍渣的主要组成有 FeO、SiO₂、CaO、MgO、Al₂O₃ 等，和玻璃同属硅酸盐体系，尽管二者在化学成分上体现出一定的差异性，但是只要引入其他物质就会使之缩小。

2.4.1 制作微晶玻璃

2004 ~ 2005 年，金川公司就镍铜渣的综合利用问题和北京科技大学展开过合作研究，该研究的主要成果就是用金川镍渣生产微晶玻璃。滕永波^[28]以镍渣和高炉渣及添加少量的分析纯 SiO₂ 制得主晶相为透辉石 - 钙铁辉石结晶系列的玻璃陶瓷。倪文^[29]用金川二次镍渣制备出密度 2.87 g/cm³、硬度 7.98、抗折强度 185 MPa、耐酸 99.1 %、耐碱 99.6 % 的微晶玻璃，工艺流程见图 3。周琦^[30]以富铁镍渣及粉煤灰为主要原料在还原铁的同时制备出性能良好的 R₂O-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 系微晶玻璃，并获得 71% ~ 87 % 的铁还原回收率。王习东^[31]向镍渣中加入还原剂和辅料将其中的铁氧化物还原为铁，分离出铁后，再加入添加剂，并经高速空气喷吹或离心甩丝，制得可应用于管道保温、工业耐火保温等领域的耐高温无机纤维。赵青林^[32]直接向富铁镍渣中加入氧化剂和澄清剂进行高温熔融，得到了基础玻璃。

虽然富铁镍渣中铁的化合物可替代微晶玻璃原料中的成核剂，有利于结晶，但它也有其不足之处：即结晶的不可控性。镍渣中高含量的铁会造成微晶玻璃结晶过程的不可控制，进而影响最终产品的力学和化学性能，因此利用镍渣制备微晶玻璃就需要解决体系内结晶不可控的难题。尽管以镍渣为原料制的的矿渣微晶玻璃在实验室已经获得成功，但是由于市场和成本等问题的限制，目前尚未实现工业化的推广应用。

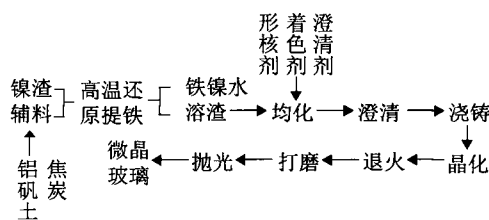


图 3 镍熔渣生产微晶玻璃的工艺流程

Fig. 3 Flowchart of the production of glass ceramics by nickel slag

2.5 用于建筑领域

2.5.1 生产水泥

研究表明^[33]水淬急冷的镍渣由于其玻璃相中含有少量的 CaO、Al₂O₃，因而在碱性介质的激发下具有潜在的水硬性，可以作为水泥的混合材，而慢冷的镍渣不具有水硬活性。因此主要化学成分为 SiO₂ 和 FeO 的镍渣完全可以作为生产水泥熟料的原料使用。

杨全兵^[34]对镍渣的粉磨特性和活性进行了研究，结果表明镍渣的易磨性和活性较差，但其活性指数随比表面积的增加而提高，且镍渣活性的发挥会随养护时间而变显著；掺镍渣粉后，砂浆强度降低非常明显，但是随着养护龄期的增加，强度降低幅度变小。汪潇^[35]研究了镍渣掺量对硅酸盐水泥物理力学性质的影响，结果表明当将预处理后的镍渣以 0-20 % 等量取代水泥熟料时，水泥的标准稠度用水量下降，凝结时间增长，强度有所降低，但主要指标均满足水泥基本性能的要求。王琳琳^[36]用机械球磨、强碱激发、高温养护等手段对镍渣进行了激发活化处理，发现处理后的镍渣可替代水泥或砂子。刘玉峰^[37]利用湿粉煤灰、镍渣、铁矿石生产水泥，制得的水泥产品质量符合国标要求。

表 2 水泥的试验结果
Table 2 Test results of cement

项目	编号	日期		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		生产	成型	3 [#] d	28 [#] d	3 [#] d	28 [#] d
P·C32.5R 水泥	B114	12.14	12.15	5.1	8.6	23.3	50.9
	B115	12.15	12.16	4.8	8.6	23.6	51.7
	B121	12.21	12.22	5.4	8.7	24.4	53.3
P·O32.5R 水泥	B126	12.26	12.27	5.5	9.3	26.2	55.5
	B127	12.27	12.28	5.3	8.5	23.2	53.3
		12.28	12.29	5.1	8.4	23.0	50.7

2.5.2 生产混凝土生产

李浩^[38]将镍渣作为掺合料用于混凝土生产中，结果表明比表面积为 480 m²/kg 和 538 m²/kg 的镍渣粉用于混凝土掺合料时效果最好，适用的掺量范围是 10% ~ 20 %。周敏^[39]将镍渣粉用于配制彩色混凝土，结果表明镍渣粉细度增大后，拌合物性能和抗压强度均得到改善，但超过 450 m²/kg 后，

改善效果不明显;此外,镍渣掺量不宜超过10%,否则会影响抗压强度。宗浩^[40]通过研究发现镍渣可替代同量粉煤灰作为矿物掺和料应用到混凝土中。孟渊^[41]利用镍渣高密度的特性配置出表观密度大、热容值高以及传热性能良好的储热混凝土材料,可用于太阳能热利用过程中的储热。吴其胜^[42]将镍渣用于制备水泥和混凝土砌块,结果表明镍渣粒度的增加能促进抗压强度和抗折强度的提高,细度为520 m²/k的镍渣以15%的比例掺入水泥熟料后,水泥性能较好;此外,制成的混凝土砌块性能也较好。

2.5.3 生产纤维棉

刘国庆^[43]以镍渣为原料,通过加入添加剂生产出矿渣棉。镍渣用于建筑领域,但是利用的主要是Fe、Al、Mg、Ca、Si等元素,并未对其中高附加值的镍、钴、铜进行利用。

2.6 矿山填埋

为了稳定山体 and 地表强度,必须对开采矿石后的矿山坑洞进行回填,以防因塌陷造成地面下沉。而资源开发和利用过程中又不可避免的会产生大量尾砂、废石和矿渣,如何处置这些废弃物也早就受到普遍关注。因此,用这些废弃物进行矿山坑洞回填,可以在降低填充成本的同时,实现固体废弃物的资源化利用。

赵铁城^[44]研究了水淬镍渣的凝胶机理,认为利用水淬镍渣在胶结充填中取代部分水泥是经济合理的,只是水淬渣的胶凝性低于水泥,在一般情况下还不宜完全取代水泥,当对充填体早期强度要求较高时应加入早强剂。高术杰^[45]向镍渣提铁后的尾渣中掺入激发剂,制得的胶结充填采矿专用胶凝材料可以满足矿山胶结充填采矿要求。李克庆^[46]以活化处理的水淬镍渣为主要原料,制得的胶结剂可作为水泥的替代品用于矿井充填料的生产。金川集团公司等^[47]单位开展的试验研究表明:在水泥用量不变,使用少量粉煤灰的条件下,闪速炉水淬镍渣可代替充填骨料用于井下充填,其抗压、抗拉强度均可以满足矿山充填体的强度要求,同时还可降低30%左右的充填成本。杨志

强^[48]针对金川水淬镍渣尾砂的潜在活性,开发出可满足金川矿山安全采矿对充填体强度要求的新型充填胶凝材料。

3 总结

(1) 国内外综合利用镍渣的方法主要分为还原提铁、提取镍钴铜、冶炼钢铁产品、制作微晶玻璃、用于建筑领域以及矿山填埋六大类。目前金川公司有少量镍渣用于矿山填埋,但是这种方法未能形成对镍渣中高附加值的镍钴铜的应用,致使其不能实现产业化。

(2) 镍渣的综合利用还存在以下问题:①未能实现绿色冶金,有二次污染存在。如还原提铁和冶炼钢铁产品方面产生的CO、CO₂气体以及大量二次固体尾渣,提取镍钴铜的过程中产生含有有机物或者废液等。②资源利用不够充分,利用率有限。如微晶玻璃、建筑产品和矿山填埋等方法并未体现出对高附加值的镍钴铜的利用。③利用途径较为单一,未能充分结合新兴技术。如已有许多生物冶金技术的研究报道,而镍渣中有价金属的利用基本都还停留在酸浸和高压浸出等常规方法上。④实用性不强,仅能作为技术储备。各种方法的提出未能结合企业生产一线的实际情况,导致利用过程存在成本过高、工艺复杂、操作困难等一系列的缺点,最终难以进行工业化生产应用。

(3) 镍渣的综合利用应实现以下几点:①处理量 and 处理能力的最大化;②镍渣资源和能源充分利用的合理化;③经济和环保方面实现成本的最优化。只有充分利用镍渣的这些潜在价值,才能够经济有效的解决镍渣的堆存问题,使其实现高效利用。

参考文献:

- [1] 朱苗勇. 现代冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.17.
- [2] 倪文,贾岩,郑斐,等. 金川镍弃渣铁资源回收综合利用[J]. 北京科技大学学报,2010,32(8):975-980.
- [3] 喻正军,冯其明,欧乐明,等. 还原硫化法从镍转炉渣中富集钴镍铜[J]. 矿冶工程,2006,26(1):49-55.

- [4] Pan Jian, Zheng Guo-lin, Zhu De-qing, Zhou Xian-lin. Utilization of nickel slag using selective reduction followed by magnetic separation[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3421-3427.
- [5] 王玉芳, 郑华江. 某公司冶金渣资源经济利用分析[J]. 铜业工程, 2013, (1): 13-14.
- [6] 孔令军, 赵祥麟, 刘广龙. 红土镍矿冶炼镍铁废渣环境安全性能研究[J]. 铜业工业, 2014, 125(1): 61-64.
- [7] ZHANG Ya-li, Li Huai-mei, Yu Xian-jin. Fe extraction from high-silicon and aluminum cyanide tailings by pretreatment of water leaching before magnetic separation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 1165-1173.
- [8] 郑雅杰, 龚昶, 孙召明. 氰化尾渣还原焙烧酸浸提铁及氰化浸金新工艺[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2426-2433.
- [9] 刘晓民, 高双龙, 李杰, 等. 金川镍沉降渣的工艺矿物学[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 349-353.
- [10] 王树清, 马晓东, 马永峰. 金川镍铜冶炼炉渣综合利用的研究综述[J]. 金川科技, 2011(1): 15-16.
- [11] 白彦贵, 朱果灵, 张柏汀. 金川提镍弃渣提铁基础研究[J]. 钢铁研究学报, 1994(6) 增刊: 65-72.
- [12] 王树清, 芦越刚, 樊昱, 等. 一种镍冶炼炉渣喷吹还原提铁的方法[P]. 中国: 201310677737.2, 2013.
- [13] 李娟, 程永红, 李维舟, 等. 一种处理镍冶炼炉渣的方法[P]. 中国: 201310559523.5, 2013.
- [14] Jung Ho Heo, Byung-Su Kim, Joo Hyun Park. Effect of CaO addition on iron recovery from copper smelting slags by solid carbon[J]. Metallurgical and materials transactions B, 2013, 44(12): 1352-1363.
- [15] Jones, R.T., Hayman, D.A., and Denton, G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology[C]. Montreal, Canada, 24-29 August 1996, pp.451-466.
- [16] 马永峰, 聂文斌, 周民, 等. 一种镍铜熔融渣中选择还原回收有价金属的方法[P]. 中国: 201210340521.2, 2012.
- [17] 王玉芳. 回收镍浸出渣中有价金属的工艺研究及应用[J]. 铜业工程, 2010, 104(2): 44-46.
- [18] Li Yunjiao, Perederiy I, Vladimirov G P. Cleaning of waste smelter slags and recovery of valuable metals by pressure oxidative leaching[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152: 607-615.
- [19] Baghalha M, Papangelakis V G, Curlook W. Factors affecting the leachability of Ni/Co/Cu slags at high temperature[J]. Hydrometallurgy, 2007, 85(1): 42-52.
- [20] Huang Feirong, Liao Yalong, Zhou Juan, Wang Yiyang, Li Hui. Selective recovery of valuable metals from nickel converter slag at elevated temperature with sulfuric acid solution[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 156(12): 572-581.
- [21] 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): 4-9.
- [22] 郝文义. 金川冶炼弃渣综合利用研究钢铁冶金部分试验初步小结[J]. 甘肃冶金, 1995(2): 23-27.
- [23] 高惠民, 谢国威. 一种熔融还原镍渣提铁的方法及装置[P]. 中国: 200810013552.0, 2008.
- [24] 袁守谦, 董洁, 王超, 等. 综合处理铜选矿尾渣和镍熔渣的工艺研究[J]. 稀有金属, 2014(1): 108-114.
- [25] 芦越刚, 王树清, 杨艳, 等. 一种利用冶炼炉渣还原铁生产水雾化合金粉末的方法[P]. 中国: 201310673276.1, 2013.
- [26] 卢学峰, 南雪丽, 郭鑫. 利用废渣冶炼回收硅铁的研究[J]. 铸造技术, 2008(12): 1689-1691.
- [27] 卢学峰, 南雪丽, 郭鑫. 利用镍渣冶炼回收硅钙合金的研究[J]. 矿产保护与利用, 2009(4): 55-58.
- [28] 滕永波, 王中杰, 倪文. 富铁冶金渣玻璃陶瓷的制备及结晶现象研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 2(2): 395-400.
- [29] 倪文, 于晓霞, 兰华龙, 等. 一种综合利用高温镍冶炼熔渣的方法[P]. 中国: 200616156309.5, 2006.
- [30] 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, 5(10): 14-18.
- [31] 王习东, 赵大伟, 张作泰, 等. 一种利用镍渣提铁和制备纤维的方法[P]. 中国: 201210050302.0, 2012.
- [32] 赵青林, 万利, 康俊峰, 等. 富铁镍渣微晶玻璃及制备方法[P]. 中国: 201310557303.9, 2013.
- [33] 盛广宏, 翟建平. 镍工业冶金渣的资源化[J]. 金属矿山, 2005(10): 68-71.
- [34] 杨全兵, 罗永斌, 张雅钦, 等. 镍渣的粉磨特性和活性研究[J]. 煤灰综合利用, 2013(2): 23-26.
- [35] 汪潇. 镍渣掺量对硅酸盐水泥物理力学性质的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3850-3854.
- [36] 王琳琳. 镍矿渣的活化研究[J]. 河南建材, 2014(4): 34-37.
- [37] 刘玉峰, 朱小东. 利用湿粉煤灰、镍渣、铁矿石配料及用工业废渣做混合材双掺生产水泥的研究[J]. 中国水泥, 2004(4): 43-48.
- [38] 李浩. 镍渣掺合料混凝土性能的研究[M]. 江苏: 扬州大学, 2016.
- [39] 周敏. 镍渣粉制备彩色混凝土的正交试验研究[J]. 新型建筑材料, 2016(7): 35-37.
- [40] 宗浩, 吴波玲, 谢小元. 镍渣粉在混凝土中作矿物掺和料的应用研究[J]. 混凝土世界, 2015(2): 76-79.
- [41] 孟渊, 田斌守, 邵继新, 等. 利用冶炼工业废弃物镍渣

- 研制混凝土储热材料 [J], 混凝土与水泥制品, 2015(2):93-95.
- [42] 吴其胜, 王顺祥, 闵治安, 等. 富硅镁镍渣掺和料对水泥基材料性能的影响 [C]. 江苏盐城, 2016:58-59.
- [43] 刘国庆. 冶炼渣的综合利用 [J]. 创新科技, 2013(5):87-88.
- [44] 赵铁城. 镍水淬渣的胶凝机理 [J]. 有色金属: 矿山部分, 1994(1):9-12.
- [45] 高术杰, 倪文, 李克庆, 等. 用水淬二次镍渣制备矿山充填材料及其水化机理 [J]. 硅酸盐学报, 2013, 5(5):612-618.
- [46] 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, 1(1):1-6.
- [47] 刘广龙. 金川集团公司二次资源综合利用 [J]. 中国矿山工程, 2004, 33(2):41.
- [48] 杨志强, 王永前, 高谦, 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.

Research and Progress of Nickel Slag's Comprehensive Utilization

Ma Yongbo, Du Xueyan, Alibek Kakimov, Shen Yingying, Li Guozhou

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,
School of Materials Science and Engineering, Lanzhou, Gansu, China)

Abstract: The iron-rich nickel slag, which contains 40% of iron, is difficult to be used directly, but to be stacked. Not only does the stacking process occupies a lot of ground, but also makes a waste of resources. This paper mainly introduce the progress of disposing iron-rich nickel slag, including iron-recovery by reduction methods, recycling of nickel, cobalt and copper, smelting of steels and irons, production of glass-ceramics, using in building fields and the landfilling of mining in the end. The authors of this paper summarized the shortcoming of methods above, and the requirements of nickel slags' comprehensive utilization in the future was also forecasted.

Keywords: Nickel slag; Comprehensive utilization; Iron recovery; Glass-ceramics; Landfilling

////////////////////////////////////
(上接 56 页)

Study on Direct Reduction of Vanadium and Titanium Iron Ore Concentrate

Li Jun, Wu Enhui, Hou Jing, Huang Ping

(Panzhuhua University Panxi Science and Technology Innovation Center, Panzhuhua, Sichuan, China)

Abstract: Comparative study on direct reduction of Indonesian sea water sandy vanadium titanium iron ore concentrate and Panzhuhua Hongge vanadium and titanium iron ore concentrate was carried on. Test results show that the pellet performance of the Indonesian vanadium and titanium iron ore concentrate is much better than Panzhuhua Hongge vanadium and titanium iron ore concentrate through direct reduction comparative study. Pellets of Indonesian vanadium titanium iron concentrate could meet the transport requirements of industrial production process. Metallization rate of Indonesian vanadium and titanium iron ore concentrate could reach 90% and residual carbon content was 6% at a reduction temperature was 1350°C and a reduction time was 15 min, which could meet the requirements of furnace melting and separation. Theory content of molten titanium slag could reach about 48% after the direct reduction-melt fractions when the content of TiO₂ reach about 12% after regrinding and selected, which could be used as raw materials of sulfuric acid titanium dioxide. The study shows that the Indonesian vanadium-titanium iron concentrate was very suitable for the direct reduction-electric furnace melting process, and its beneficial elements such as Fe, V and Ti could be well recovered. Indonesia vanadium-titanium iron concentrate has more market competitiveness compared with Panzhuhua Hongge vanadium-titanium iron concentrate because of its simple ore dressing process and low cost.

Keywords: Indonesian mine; Direct reduction; Metallization rate; Residual carbon content