还原介质对镍渣直接还原提铁的影响

郑江华[1,2]，宗红星[1,2]，李 彬[3]，任学根[1,2]，申莹莹[3]，杜雪岩[3]
（1. 镍钴共伴生资源开发与综合利用全国重点实验室，甘肃 金昌 737100；2. 金川镍钴研究设计院，甘肃 金昌 737100；3. 兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，甘肃 兰州 730050）

摘要：如何从富铁镍渣中高效提铁是该资源综合再利用的关键。本文采用焦炭和烟煤作为还原剂，对镍渣进行直接还原提铁试验研究，对比两种还原剂在镍渣还原过程中产生有效还原介质的差异，借助热力学软件对不同还原介质的还原能力进行热力学分析，然后通过试验及表征研究两种还原剂对镍渣还原过程金属化率变化及微观结构演变的影响。结果表明：烟煤含有的高挥发分会产生 CO-H_2 混合的还原介质，而焦炭则主要以 CO 还原介质为主；热力学分析结果表明，CO-H_2 混合气对铁氧化物的还原能力优于纯 CO。镍渣还原焙烧试验结果显示，使用烟煤作为还原剂，1 300 ℃下还原 20 min，镍渣球团的金属化率可达 90.20%；而采用焦炭作为还原剂时其金属化率仅达到 72.97%，烟煤对镍渣的还原能力优于焦炭。

关键词：镍渣；还原介质；金属化率；微观结构
中图分类号：TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0096－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.080

Effect of reducing medium on iron extraction by direct reduction of nickel slag

ZHENG Jianghua[1,2], ZONG Hongxin[1,2], LI Bin[3], REN Xuegen[1,2], SHEN Yingying[3], DU Xueyan[3]
(1. State Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchang 737100, Gansu, China; 2. Jinchuan Nickel-Cobalt Research and Design Institute, Jinchang 737100, Gansu, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: How to efficiently extract iron from iron-rich nickel slag is the key to the comprehensive reuse of this resource. Coke and bituminous coal are used as reducing agents to carry out a direct reduction of nickel slag to extract iron, to compare the differences of the two reducing agents in the reduction process of nickel slag, to analyze the thermodynamic analysis of the reduction capacity of different reducing media with the help of thermodynamic software, and then to study the effects of the two reducing agents on the change of metallization rate and microstructure evolution of nickel slag reduction process through experiments and characterization. The results show that the high volatile content of bituminous coal will produce the reducing medium mixed with CO-H_2, while the coke is mainly CO reducing medium. The results of thermodynamic analysis show that the reducing ability of CO-H_2 mixture to iron oxide is better than that of pure CO. The results of nickel slag reduction roasting test show that, when bituminous coal is used as reducing agent, the metallization rate of nickel slag pellets could reach 90.20% after 20 min of reduction at 1 300 ℃. When coke is used as the reducing agent, its metallization rate only reaches 72.97%, and the reducing ability of bituminous coal to nickel slag is better than that of coke.

Key words: nickel slag; reducing medium; metallization rate; microstructure

收稿日期：2023－09－26；**修回日期**：2023－12－25
基金项目：国家自然科学基金联合基金资助项目(U22A20175)；甘肃省重点研发计划资助项目(23YFGA0055)；甘肃省联合科研基金重点项目(23JRRC0018)
作者简介：郑江华(1977—)，男，高级工程师，从事镍、铜、钴、贵等有色金属火法冶炼工艺优化和冶炼炉渣综合利用方面的研究。

镍渣是镍冶炼过程中产生的一种工业废弃物，其全铁(TFe)质量分数高达 35%~40%，且还赋存少量 Ni、Co、Cu 等有价金属元素[1-2]。目前，镍渣的综合利用率较低，绝大多数以堆存为主。我国现有的镍渣堆存量已超过 4 000 万吨，且每年还在以 200 万吨的速度增长[3]。大量镍渣的闲置堆存，不仅造成渣中赋存有价金属资源的浪费，还引起环境污染、土地占用等一系列严重的社会问题[4-6]。镍渣含铁量远高于我国可采铁矿资源的平均品位(28% 左右)，如果能将其中的铁资源高效回收再利用，不仅能为企业创造巨大的经济效益，还能有效解决固废排放引发的社会问题。因此，如何高效提铁成为镍渣资源化综合利用的关键，亟待研究解决。

还原法是镍渣提铁主要工艺手段之一[7]，通常采用煤或焦炭等碳质还原剂将镍渣中的铁组分还原为铁单质，进而通过熔分、磁选等方式实现渣铁分离，回收金属铁。还原法提铁又可以分为熔融还原提铁工艺和直接还原提铁工艺。熔融还原提铁工艺[8-10]的反应温度通常高达 1 400 ~ 1 600 ℃，采用工业焦炭或兰炭作为还原剂，还原设备主要为转炉和电炉，其工艺特点为可直接产出还原铁水，金属回收率高，但工艺能源消耗大，经济性较差，且工艺控制较难，产出还原铁水的产品品质不稳定，铁水中杂质含量较多，难以后续再利用。直接还原提铁工艺[11-12]通常采用煤作为还原介质，还原温度为 1 000 ~ 1 300 ℃，还原设备可采用回转窑、转底炉等，此工艺的还原产物为金属化球团，磨选可回收品位较高的还原铁粉，进一步熔分可获得高品质的精炼铁水，同时还可使镍渣中少量镍、钴元素共同富集回收。直接还原工艺的还原温度较低，过程控制相对简单，最终工艺产品为含镍、钴的铁合金，其杂质含量较少，有利于后续高值化再利用，工艺缺点是气固还原反应的效率相对较低，金属回收率较差[13-14]。综上所述，相关学者对于镍渣提铁进行了大量的试验研究，但由于工艺成本、经济性等原因，镍渣提铁技术一直未实现工业化应用。探索高效、低成本的镍渣还原工艺技术一直是镍渣综合利用研究的热点[15]。

本文选用低挥发分焦炭和高挥发分烟煤作为还原剂对镍渣球团进行直接还原工艺试验，研究两种不同还原剂所产生的还原介质(CO 气氛、CO 和 H_2 混合气氛)对镍渣球团还原过程及效果的影响规律。采用 FactSage 软件对不同还原介质下的还原热力学过程进行计算和分析，明确不同还原介质对镍渣中含铁物相的还原能力；进而通过试验表征球团金属化率、物相及微观形貌演变过程的变化，对镍渣球团还原过程机制及还原效率进行深入讨论，明确高挥发分烟煤可作为镍渣直接还原的最优还原剂，以期为镍渣高效提铁工艺探索提供理论和实践指导。

1　试验原料与方法

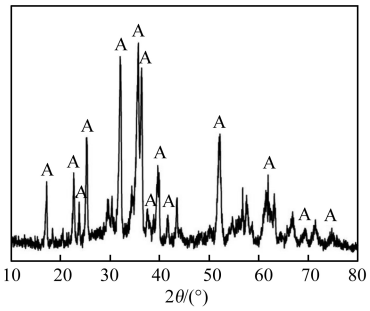
1.1　试验原料

试验原料选取兰州某公司镍冶炼厂的闪速炉水淬镍渣。经破碎后镍渣的粒径小于 0.074 mm，其成分分析如表 1 所示。由表 1 可见，其全铁质量分数高达到 36.74%，同时还含有微量镍、钴、铜等有价金属元素。XRD 分析结果如图 1 所示。由图 1 可见，该镍渣中主要含铁相为铁镁橄榄石相 $(Fe, Mg)_2SiO_4$。

表 1　镍渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of nickel slag　%

TFe(Fe^{2+})	Si	Mg	Ca	S	Ni	Co	Cu
36.74(33.42)	16.23	5.96	0.84	0.76	0.38	0.1	0.28



A—$(Mg,Fe)_2SiO_4$。

图 1　镍渣 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of nickel slag

还原剂采用工业焦炭和某煤矿生产的烟煤，其工业分析结果如表 2 所示。由表 2 可知，工业焦炭的主要成分为固定碳，质量分数高达 83.07%，挥发分很低，质量分数仅为2.06%；烟

表 2 焦炭和烟煤的工业分析结果(质量分数)

Table 2 Proximate analyses of coal and coke %

焦炭(收到基)			烟煤(空气干燥基)				烟煤水分(收到基)	烟煤挥发分(干燥无灰基)
固定碳	灰分	挥发分	水分	灰分	挥发分	固定碳		
83.07	14.87	2.06	5.91	5.49	45.34	43.26	13.90	51.17

煤中固定碳质量分数为 43.26%，但其挥发分质量分数高达 45.34%。

1.2 试验方法

在镍渣中加入适量的 CaO 进行调质，将其三元碱度调整为 0.6。将调质镍渣、还原剂(焦炭/烟煤)、造球剂(膨润土)、液相调质剂按一定比例混合，在圆盘造球机中加水充分混匀，制备成半径为 12 ~ 15 mm 的镍渣球团待用。采用立式电阻炉进行热装还原试验，试验装置如图 2 所示。将电阻炉以 5 ℃/min 的升温速率升至设定焙烧温度，在达到目标温度前，向炉膛中通入流量为 0.5 L/min 的氮气进行吹扫。当炉膛温度到达设定还原温度后，将装有镍渣球团的刚玉坩埚吊置于炉膛中部，开始还原试验。当到达预定还原时间后，立即取出刚玉坩埚，迅速在球团上部覆盖碳粉，以隔绝空气，并将其置于密闭容器中冷却至室温。然后对焙烧样品进行破碎，分析表征其金属化率、物相及微观结构。

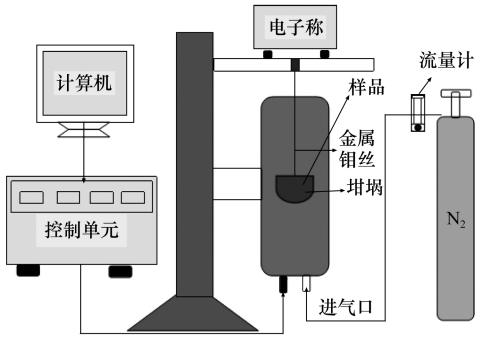


图 2 立式电阻炉示意

Fig. 2 Schematic diagram of vertical resistance furnace

1.3 表征检测

采用金属化率(R_M,%)表示镍渣球团中铁组元的还原程度，可由公式(1)计算：

$$R_M = \frac{w(\mathrm{MFe})}{w(\mathrm{TFe})} \times 100\% \quad (1)$$

式中：w(MFe)为球团中金属铁质量分数,%；w(TFe)为球团中总铁质量分数,%。

采用重铬酸钾滴定法测定样品中 MFe 的质量分数。采用《铁矿石全铁含量测定 三氯化钛还原后滴定法》(GB/T 6730.5—2022)测定样品中 TFe 质量分数，其所需溶液均按照国标要求配置。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES，型号为 ThermoFisher ICAP-7400)测定样品其它元素含量。采用携带能谱仪的场发射扫描电子显微镜(SEM-EDS，型号为 JSM-6700F JEOL)来表征样品的微观形貌和微区化学成分。采用 X 射线衍射仪(XRD，型号为 D/max-2400)对镍渣及还原产物的物相进行分析。

2 结果与讨论

2.1 热力学分析

由原料分析结果可知，镍渣中的主要含铁物相为铁橄榄石相(Fe_2SiO_4)。有研究表明，相同条件下 CaO 与 SiO_2 比 FeO 与 SiO_2 的亲和力更大，结合能力更强，所以向镍渣中加入碱性更强的 CaO 可以将 FeO 从硅酸盐中置换出来[16-18]。镍渣属于 FeO—MgO—CaO—SiO_2 四元体系。通过热力学软件计算 FeO、MgO、CaO 三种成分分别与 SiO_2 反应的吉布斯自由能变化，结果如图 3 所示。由图 3 可知，CaO 与 SiO_2 反应生成 Ca_2SiO_4 具有更低的 ΔG^θ，即在相同条件下生成 Ca_2SiO_4 的反应相较于 Fe_2SiO_4 更易发生，这表明在镍渣中加入适量

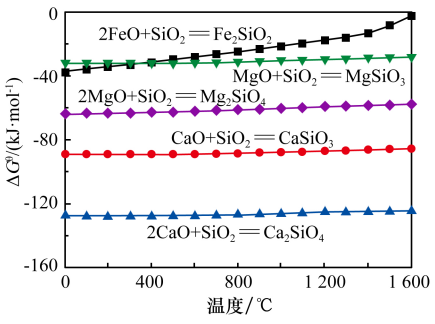


图 3 不同反应的 ΔG^θ 随温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of ΔG^θ with the temperature of different reactions

CaO 能够使铁橄榄石分解并释放 FeO，有利于 Fe 组元的还原。

由以上分析可知，调质镍渣还原过程中，CaO 首先置换出存在于铁橄榄石结构里的 FeO。而 Ca_2SiO_4 形成的吉布斯自由能很低，表明 CaO 置换 FeO 的反应[式(1)]很容易自发进行。

$$Fe_2SiO_4 + 2CaO = 2FeO + Ca_2SiO_4 \quad (1)$$

当还原过程以焦炭作为还原剂时，镍渣球团中的碳首先与铁橄榄石释放出的 FeO 发生固－固还原反应[式(2)]，生成 Fe 和 CO，然后球团中产生的 CO 继续与 FeO 发生气－固还原反应[式(3)]，生成 Fe 和 CO_2，而 CO_2 与固体碳很容易反应生产 CO[式(4)]，进而持续为反应 3 提供还原介质。因此，焦炭还原镍渣球团的过程，以 CO 与 FeO 的气－固反应为主。

$$FeO + C = Fe + CO \text{（吸热反应）} \quad (2)$$

$$FeO + CO = Fe + CO_2 \text{（放热反应）} \quad (3)$$
$$\Delta G^{\theta} = -13\,160 + 17.21T$$

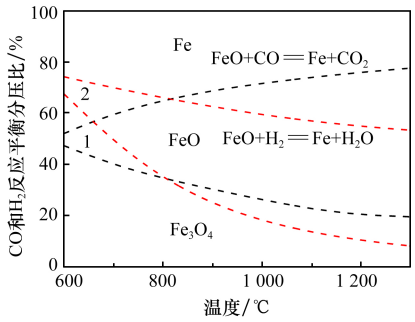
$$C + CO_2 = 2CO \text{（吸热反应）} \quad (4)$$
$$\Delta G^{\theta} = 172\,130 - 177.46T$$

而烟煤作为还原剂时，高挥发分烟煤首先会发生热解反应，在球团中产生大量 CO 和 H_2 的混合还原气体，此时镍渣球团中的铁组元还原反应除了 CO 还原过程(反应 3 和 4)外，还会存在 H_2 还原过程，整个镍渣球团的还原反应完全是 CO(或 H_2)与 FeO 的气－固反应。氢还原反应方程如下。

$$FeO + H_2 = Fe + H_2O \text{（吸热反应）} \quad (5)$$
$$\Delta G^{\theta} = 234\,30 - 16.16T$$

$$C + H_2O = H_2 + CO \text{（吸热反应）} \quad (6)$$
$$\Delta G^{\theta} = 135\,540 - 144.0T$$

利用 FactSage 热力学软件计算 CO 和 H_2 还原铁氧化物的反应平衡分压，并绘制反应分压平衡曲线，如图 4 所示。由图 4 可知，在 1 000 ℃以上 CO 将 FeO 还原为 Fe 的平衡分压远高于 H_2，这表明在此条件下 H_2 还原 FeO 的能力远高于 CO，而 CO-H_2 混合气的还原能力则介于两种纯气体之间，强于纯 CO 而弱于纯 H_2，即 H_2-CO 混合还原介质相比于纯 CO 更有助于提升球团的金属化率和还原效率[19-21]。由此可以推断，在反应介质当量相同的情况下，烟煤对镍渣的还原能力更强。



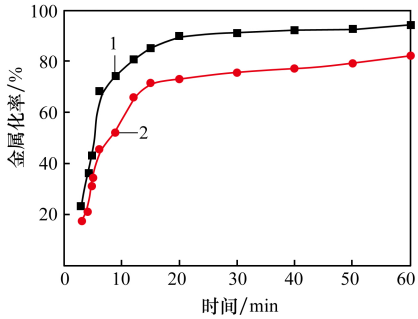
平衡曲线：1—CO；2—H_2。

图 4　CO 和 H_2 还原 FeO 的反应分压平衡图

Fig. 4　Partial pressure equilibrium diagram for reduction of FeO by CO and H_2

2.2　还原剂对镍渣球团金属化率的影响

将两种还原剂以相同的还原介质当量掺入调质镍渣中制备球团，在 1 300 ℃温度下热装等温还原一定时间后取出，测定其金属化率，得到镍渣球团还原的时间－金属化率曲线，如图 5 所示。由图 5 可知，两种还原剂镍渣球团的金属化率呈现相同的变化趋势：球团在 0～20 min 发生了剧烈的还原反应，金属化率曲线急剧升高，表明还原反应速度较快，而 20～60 min 金属化率曲线趋于平缓，表明此阶段属于还原反应末期，反应已进行较慢。图 5 中，烟煤作为还原剂的镍渣球团金属化率曲线处于焦炭曲线的上方，表明烟煤还原剂球团的金属化率高于焦炭。在 1 300 ℃温度下，烟煤镍渣球团还原20 min后Fe金属化率可达90.20%，



1—烟煤；2—工业焦炭。

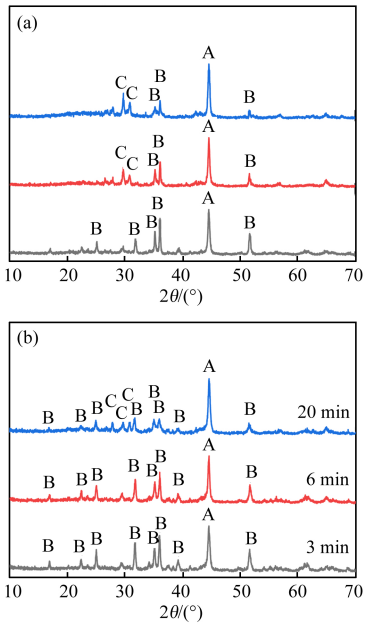
图 5　1 300 ℃下两种还原剂镍渣球团金属化率随时间的变化曲线

Fig. 5　Variation curve of metallization rate with time of nickel slag pellets with different reducing agents at 1 300 ℃

而在相同条件下，焦炭镍渣球团的金属化率仅有72.97%，两者金属化率相差17.23%。这表明，烟煤产生的CO-H_2混合还原介质的还原能力和效率都显著大于焦炭产生的CO还原介质，试验结果与热力学分析相一致。

2.3 镍渣球团还原过程的物相演变

对两种还原剂镍渣球团在不同还原时间(3、6、20 min)的还原样品进行XRD物相分析，如图6所示。由图6可以看出，在还原3 min时，两种还原剂镍渣球团的XRD图谱中除了铁橄榄石相(Fe_2SiO_4)外，已经出现了明显的单质铁(MFe)衍射峰，表明球团中已经反应生成了单质铁相。而随着时间的增加，烟煤还原6 min样品XRD图谱中铁橄榄石相的特征峰已逐渐减弱，同时，出现了辉石相[$(Ca,Mg)Si_2O_6$]的特征峰，这表明随着还原反应的进行，镍渣球团中富铁的橄榄石相逐渐开始反应，其中的Fe元素被还原为单质铁相，Si、Ca、Mg等形成了辉石相；但是，在焦炭还原6 min样品的XRD图谱中却并未出现辉石相衍射峰。在反应20 min时，两种球团中均存在单质铁、铁橄榄石和辉石相衍射峰，但烟煤还原样品中的辉石相衍射峰相对更强烈。通过对比两种还原剂球团的还原过程可知，两种球团物相的演变过程相似，但烟煤球团比焦炭球团的开始反应时间更早，以此可以推测，烟煤对镍渣中铁组元的还原效率比焦炭更高。



(a) 烟煤；(b) 焦炭

A—MFe；B—Fe_2SiO_4(铁橄榄石)；

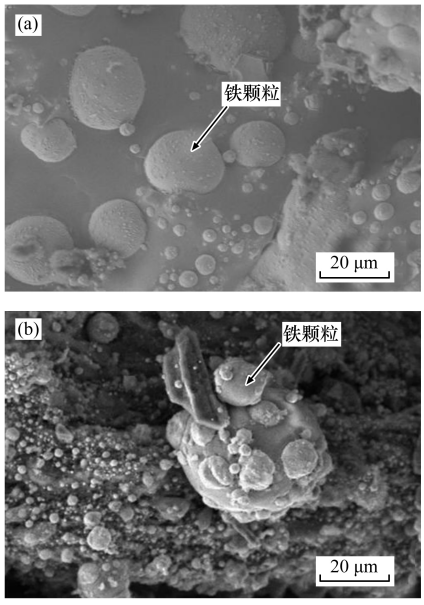
C—$(Ca,Mg)Si_2O_6$(易变辉石)。

图6 不同还原时刻镍渣球团的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of nickel slag pellets at different reduction times

2.4 镍渣球团的微观形貌分析

采用扫描电镜对两种还原剂镍渣球团在1 300 ℃还原焙烧20 min样品的内部微观形貌进行表征，结果如图7所示。由图7可以看出：当烟煤作为还原剂时，镍渣球团中形成的还原铁颗粒生长形貌饱满，尺寸较大，最大粒径达20 μm；而焦炭作为还原剂所形成的还原铁颗粒多为细小碎粒，最大尺寸不超过10 μm。这表明烟煤还原球团中，还原铁颗粒更易形成并长大，且生长速度更快，而形成较大的还原铁颗粒有利于后继渣铁分离。通过微观形貌对比可知，烟煤还原形成还原铁颗粒的尺寸明显优于焦炭。



(a) 烟煤；(b) 焦炭

图7 镍渣球团等温还原20 min的SEM照片

Fig. 7 SEM photos of nickel slag pellet isothermal reduction for 20 min

3 结 论

(1) 烟煤作为还原剂时，在1 300 ℃热装等温还原焙烧20 min镍渣球团的金属化率可达90.2%，比相同条件下焦炭作为还原剂时的镍渣

球团高出 17.23%。

（2）烟煤对镍渣的还原能力优于焦炭，主要原因是烟煤中的挥发分在高温下热解生成的 $CO\text{-}H_2$ 混合还原气对镍渣中含铁物相的还原能力大于焦炭生成的 CO 还原气。

（3）镍渣球团还原过程中，铁橄榄石中的 Fe 元素还原为单质铁，渣中 Si、Ca、Mg 等形成辉石相。

参考文献：

[1] 何焕华,蔡乔方. 中国镍钴冶金[M]. 北京:冶金出版社,2000.
HE Huanhua,CAI Qiaofang. Nickel and cobalt metallurgy in China. Beijing:Metallurgy Industry Press,2000.

[2] 马泳波,杜雪岩,KAKIMOV A,等. 富铁镍渣综合利用的研究与进展综述[J]. 矿产综合利用,2018(6):25 - 31.
MA Yongbo, DU Xueyan, KAKIMOV A, et al. Research and progress of nickel slag's comprehensive utilization [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2018(6):25 - 31.

[3] LI X M,LI Y,ZHANG X Y,et al. Growth characteristics of metallic iron particles in the direct reduction of nickel slag[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2020,51(3):925 - 936.

[4] SHEN Y Y, TIAN J K, GUO W B, et al. Precipitation behavior of magnetite phase during modified nickel slag treated by molten oxidation[J]. ISIJ International,2023,63(3):419 - 428.

[5] 王树清,马晓东,马永峰. 金川镍铜冶炼炉渣综合利用研究综述[J]. 有色冶金节能,2015,31(4):47 - 49;54.
WANG Shuqing, MA Xiaodong, MA Yongfeng. Research overview of Jinchuan nickel-copper smelting slag comprehensive utilization[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2015,31(4):47 - 49;54.

[6] LI B,RONG T L,DU X Y,et al. Preparation of Fe_3O_4 particles with unique structures from nickel slag for enhancing microwave absorption properties[J]. Ceramics International,2021,47(13):18848 - 18857.

[7] 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.

[8] 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.
GUO Yaguang, ZHU Rong, WANG Yun, et al. The fundamental research to extract iron from the nickel slag by smelting reduction process [J]. Industrial Heating, 2015,44(6):40 - 43.

[9] SUN W, LI X, LIU R Q, et al. Recovery of valuable metals from nickel smelting slag based on reduction and sulfurization modification [J]. Minerals, 2021, 11 (9): 1022.

[10] 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.

[11] LI X M, YANG H B, RUAN J B, et al. Effect of mechanical activation on enhancement of carbothermal reduction of nickel slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2020,27(11):1311 - 1321.

[12] 马松勃,韩跃新. 煤基还原法从镍冶炼渣中提取有价金属的研究[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(2):305 - 308.
MA Songbo, HAN Yuexin. Study of extracting valuable metals from nickel smelting slag by a coal-based reduction method [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(2):305 - 308.

[13] 张小兵,王明华,寇明月. 煤基氢冶金绿色短流程制钢新工艺探索性试验研究[J]. 矿冶工程,2021,41(6):174 - 177.
ZHANG Xiaobing, WANG Minghua, KOU Mingyue. New technology of coal-based hydrogen metallurgy for green and short-flow steelmaking[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2021,41(6):174 - 177.

[14] 朱德庆,薛钰霄,潘建,等. 气基直接还原工艺研究进展和发展思考[J]. 烧结球团,2022,47(1):1 - 9;86.
ZHU Deqing, XUE Yuxiao, PAN Jian, et al. Research progress and development thinking of the gas-based direct reduction process [J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):1 - 9;86.

[15] 张馨艺,李小明,臧旭媛,等. 预氧化镍渣直接还原铁

颗粒生长动力学[J]. 中国有色金属学报,2021,31(8):2218 – 2226.
ZHANG Xinyi, LI Xiaoming, ZANG Xuyuan, et al. Growth kinetics of metallic iron particles in coal-based direct reduction of pre-oxidized nickel slag[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(8): 2218 – 2226.

[16] CAO Y Y, XU C Y, TIAN Y C, et al. Effect of roasting temperature on phase transformation in co-reduction roasting of nickel slag[J]. Metals, 2020, 10(4): 550.

[17] MA Y B, DU X Y. Effects of CaO addition on the iron recycling from nickel slags by oxidation-magnetic separation[J]. Metals, 2018, 8(11): 956.

[18] 王冬青,青格勒,潘文,等. w(CaO)对球团矿高温液相生成的热力学分析[J]. 烧结球团,2020,45(1):29 – 34.
WANG Dongqing, QING Gele, PAN Wen, et al. Thermomechanical analysis of w(CaO) on the formation of high temperature liquid phase of pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(1): 29 – 34.

[19] YI L Y, HUANG Z C, PENG H, et al. Action rules of H_2 and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2291 – 2296.

[20] WANG Z C, CHU M S, LIU Z G, et al. Effects of temperature and atmosphere on pellets reduction swelling index[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19(10): 7 – 19.

[21] 闫树芳,孙体昌,许言. 煤种对嘉峪关某菱铁矿直接还原的影响[J]. 中国有色金属学报,2012,22(5):1462 – 1467.
YAN Shufang, SUN Tichang, XU Yan. Effects of coals on direct reduction roasting of siderite ore from Jiayuguan [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1462 – 1467.

(上接第55页)

[18] 王大林. 激光辐照下半透明体光热信号模拟及内部参数重构[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG Dalin. Optothermal signal simulation and parameter reconstruction for semi-transparent media under the laser irradiation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[19] 尹学,李绍铭,闫成忍. 基于GA-PSO-BP神经网络的烧结终点预测模型[J]. 烧结球团,2020,45(6):35 – 39;46.
YIN Xue, LI Shaoming, YAN Chengren. Prediction model of BTP based on GA-PSO-BP neural network[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(6): 35 – 39; 46.

[20] 徐照松,元建. 基于BP神经网络的语音情感识别研究[J]. 软件导刊,2014,13(4):11 – 13.
XU Zhaosong, YUAN Jian. Speech emotion recognition based on BP neural network[J]. Software Guide, 2014, 13(4): 11 – 13.

[21] 于洪军. 链箅机—回转窑制煤系统节能改造及自动喷煤控制算法研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2013.
YU Hongjun. Chain grate-rotary kiln coal preparation system energy-saving design and automatic coal injection control algorithm research [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2013.

[22] 冯震,付敬奇,熊南. 一种快速的离群点检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(11):1726 – 1734.
FENG Zhen, FU Jingqi, XIONG Nan. A novel method for rapidly outlier detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(11): 1726 – 1734.