镍冶炼渣煤基氢冶金试验研究①

雷鹏飞，王建平，吴振中，寇明月
（甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司 钢铁研究院，甘肃 嘉峪关 735100）

摘　要：采用煤基氢冶金技术，将镍渣细磨至-0.038 mm 粒级占比 90.02%，配加磁铁精矿进行增氧调制，按镍渣∶磁铁精矿∶广汇煤∶膨润土质量比100∶10∶26∶2制备含煤球团，焙烧温度 1 280~1 300 ℃、焙烧时间 35 min 条件下，利用高挥发分煤热解产生的富氢气体及水煤气反应形成强还原耦合效应。结果表明，球团金属化率达 92.91%，磁选精矿铁含量为 85.80%。该技术显著改善了镍渣还原动力学条件，为镍渣中铁资源的高效利用提供了新途径。

关键词：镍渣；煤基氢冶金；金属化率；铁橄榄石；氢还原；水煤气反应；还原铁
中图分类号：TF19　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.028
文章编号：0253-6099(2026)02-0175-04

Experimental Study on Coal-Based Hydrogen Metallurgy of Nickel Smelting Slag

LEI Pengfei, WANG Jianping, WU Zhenzhong, KOU Mingyue
(*Iron and Steel Research Institute, Gansu Jiuquan Iron & Steel Group Hongxing Iron and Steel Co., Ltd., Jiayuguan* 735100, *Gansu*, *China*)

Abstract: By adopting coal-based hydrogen metallurgy technology, nickel smelting slag was ground to −0.038 mm (90.02% passing size), and magnetite concentrate was added for oxygen regulation. Coal-containing pellets were prepared with nickel slag, magnetite concentrate, Guanghui coal and bentonite at a mass ratio of 100∶10∶26∶2, a roasting temperature within 1 280−1 300 ℃ and roasting time of 35 min. A reaction between hydrogen-rich gas produced by the pyrolysis of high-volatile coal and the water gas resulted in a strong reduction coupling effect. The results show that the metallization rate of pellets reaches 92.91% and the iron content in magnetic separation concentrate is 85.80%. It is concluded that this technology significantly optimizes the reduction kinetics of nickel slag, providing a new route for the efficient utilization of iron resources in nickel slag.

Key words: nickel slag; coal-based hydrogen metallurgy; metallization rate; fayalite; hydrogen reduction; water-gas reaction; reduced iron

镍渣作为镍冶炼主要固体废物，其资源化利用研究已形成多领域协同攻关态势，主要聚焦于建材化应用[1-5]、有价金属回收[6-9]及功能材料开发[10]三大方向。在建材领域，研究集中于镍渣作为辅助胶凝材料的活化机制及性能优化；在金属回收方面，湿法冶金技术与火法富集工艺同步发展；在功能材料开发方面，利用镍渣多孔结构和成分特性，制备吸附剂、催化剂载体及固硫剂等环保材料。

针对镍渣中铁以铁橄榄石（$2FeO \cdot SiO_2$）及辉石（$FeO \cdot SiO_2$）等难还原硅酸盐形态存在，传统还原工艺所需温度偏高、时间偏长的问题[11-12]，本文引入煤基氢冶金技术开展试验研究。该技术利用高挥发分煤在球团内部热解产生富氢气体，借助水煤气反应与碳素熔损反应形成强烈的还原耦合效应，显著改善冶金动力学条件。在此基础上，通过对镍渣进行细磨增氧调制，增加颗粒比表面积，促进还原气体与铁橄榄石的充分接触，并配加磁铁精矿以优化物料组成。本文旨在探索一条高效还原镍渣、提升金属化率与铁回收率的新路径，为实现镍渣中铁资源的高效利用提供技术支撑。

1　试验

1.1　试验原料

试验原料为某公司闪速炉水淬镍渣，其粒径在 5 mm 以下。镍渣主要化学成分见表 1。由表 1 可知，

① **收稿日期**：2025-10-20
作者简介：雷鹏飞（1983—），男，甘肃玉门人，高级工程师，主要研究方向为氢冶金及氢能。E-mail:leipengfei@jiugang.com

镍渣中 Fe 含量为 36.74%,绝大多数铁以 Fe^{2+} 形式存在。

表 1 镍渣主要化学成分(质量分数)

Table 1 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	0.10	0.28

试验所用煤样购自新疆广汇新能源有限公司(简称广汇煤),广汇煤工业分析结果见表 2。磁铁精矿主要成分见表 3。

表 2 广汇煤工业分析结果(质量分数)

Table 2 Analysis results of Guanghui coal %

挥发分	灰分	固定碳	水分	硫分
48.54	7.56	45.28	4.84	0.39

表 3 磁铁精矿主要成分(质量分数)

Table 3 Main components of magnetite concentrate %

TFe	FeO	SiO_2	CaO
62.55	26.50	9.45	1.06

1.2 试验原理

由经典冶金学原理可知,物料中铁化合物被还原与还原剂(CO、H_2)含量、温度有关[13]。为将镍渣中的 FeO($2FeO \cdot SiO_2$ 和 $FeO \cdot SiO_2$)还原成金属 Fe,在常压下须有强还原性气氛。

煤基氢冶金核心机理在于:煤热解气中的 H_2O 和 CO_2,可在煤热解炭作用下通过水煤气反应和碳素熔损反应实现气体循环,持续转化为 H_2 和 CO,为还原过程提供稳定的还原势能。

以水煤气反应为媒介的氢循环过程为:

$$H_2O + C = H_2 + CO \quad (1)$$

$$FeO + H_2 = Fe + H_2O \quad (2)$$

$$FeO + C = Fe + CO \quad (3)$$

以碳素熔损反应为媒介的碳循环过程为:

$$CO_2 + C = 2CO \quad (4)$$

$$FeO + CO = Fe + CO_2 \quad (5)$$

$$FeO + C = Fe + CO \quad (6)$$

1.3 试验方法

根据试验要求,将细磨后的富铁镍渣、还原煤粉与铁精粉、膨润土等辅料按一定质量比配料混匀后,制备 Φ15~20 mm 的球团,置于鼓风干燥箱中进行干燥。将干燥球团分 3 层装入 Φ130 mm×105 mm 焙烧罐中,待马弗炉温度达到预定温度后,将装好球团的焙烧罐置于马弗炉中,按照特定的焙烧温度进行焙烧试验。焙烧完成后将焙烧罐从炉内取出,迅速在物料上部覆盖一定量直径 5~10 mm 的残炭;将焙烧罐放入特制水封无氧冷却装置中进行冷却。冷却至室温后,取出金属化球团,进行磨选及后续处理。水封冷却装置简图如图 1 所示。

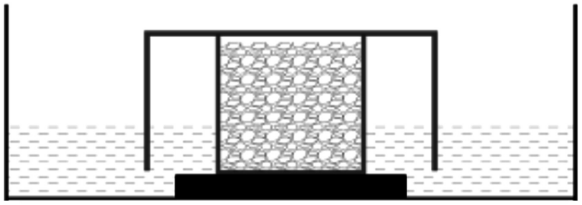


图 1 水封冷却装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of water-sealed cooling device

2 结果与讨论

2.1 含煤球团的煤基氢冶金过程

掺煤镍渣球团直接置于高温环境中,球团表面优先被加热升温,表层还原煤中的挥发分析出进入炉膛进行热解及燃烧。当球团表层温度升高至约 900 ℃时,表层的铁氧化物温度达到还原温度,球团芯部的煤也由浅层到深层逐渐开始热解,热解产生的挥发分经过球团表层或浅层的高温环境时充分热解为 H_2O、H_2、CO 和 CO_2。在球团内碳充足的情况下,H_2O 和 CO_2 会迅速发生碳气化反应生成 H_2 和 CO;H_2 和 CO 还原铁氧化物后重新生成的 H_2O、CO_2,再次与碳发生气化反应生成新的 H_2 和 CO,产生剧烈的还原耦合效应。

2.2 高挥发分煤热解产物分析

表 4 为广汇煤热解产物收率。由表 4 可知,焦、焦油、水和煤气 4 种产物收率均值分别为 46.96%、10.33%、17.75%和 24.96%。

表 4 广汇煤热解产物收率

Table 4 Pyrolysis products yield of Guanghui coal

热解产物	收率均值/%
焦	46.96
焦油	10.33
水	17.75
热解煤气	24.96

广汇煤热解气体组成见表 5。热解煤气主要由 H_2、CO、CH_4 和 CO_2 组成,对应的体积分数分别为 52.03%、17.26%、16.98%、9.67%。

表 5　广汇煤热解气体组成(体积分数)

Table 5　Composition of pyrolysis gas from Guanghui coal　%

H_2	CO	CH_4	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	C_2H_2	C_4H_{10}
52.03	17.26	16.98	9.67	1.52	1.39	0.57	0.32	0.14	0.12

在高温条件下,一次热解煤气中的含碳和氢的大分子物质会发生再次分解,转变为 $C_{(s)}$ 和 H_2,反应见式(7)~(11)。广汇煤充分热解的气体比例见表 6。由表 6 可知,经充分热解后的煤气,具有更高的 H_2 含量,热解气中 H_2 占比可达到 78.13%。

$$CH_4 = C_{(s)} + 2H_2 \quad (7)$$

$$C_2H_4 = 2C_{(s)} + 2H_2 \quad (8)$$

$$C_2H_6 = 2C_{(s)} + 3H_2 \quad (9)$$

$$C_3H_6 = 3C_{(s)} + 3H_2 \quad (10)$$

$$C_3H_8 = 3C_{(s)} + 4H_2 \quad (11)$$

表 6　广汇煤充分热解的气体比例(体积分数)

Table 6　Component ratio of gases from fully pyrolyzed Guanghui coal　%

H_2	CO	CO_2
78.13	14.02	7.85

掺煤球团自还原时,煤粉在球团内部热解产生气体,导致球团内部的气体压力增加,促使还原性气体由内向外扩散逸出,在动力学条件上大大减少了还原性气体扩散阻力对反应过程的影响,加大了球团的还原速率,因此掺煤球团的还原速率明显大于普通矿粉球团。

2.3　镍渣的改性试验

固态镍渣为致密的玻璃相,还原气体在颗粒内部的扩散较为困难,在氢冶金过程中,镍渣颗粒表面温度首先达到氢冶金温度,并能很快产生金属铁,颗粒芯部的铁橄榄石很难被还原,因而金属化率较低。为改善还原效果,需对镍渣进行改性。通过细磨的方式,增加颗粒的比表面积,使 H_2 与铁橄榄石接触机会大幅增加。分别将镍渣细磨至以下 4 个粒级:A(-0.05 mm 粒级占 40.23%)、B(-0.05 mm 粒级占 83.59%)、C(-0.038 mm粒级占 88.88%)、D(-0.038 mm 粒级占 90.02%),按照镍渣:磁铁精矿:广汇煤:膨润土质量比100:10:26:2制备球团,在焙烧温度1 280~1 300 ℃、焙烧时间 35 min 条件下焙烧,不同磨矿细度条件下还原指标对比结果见图 2。由图 2 可知,A、B、C、D 金属化球团金属化率分别为 82.08%、89.97%、91.88%、92.91%,其磨选后精矿铁品位分别为 64.88%、76.70%、81.91%、85.80%。细磨可有效提高镍渣的还原效率。

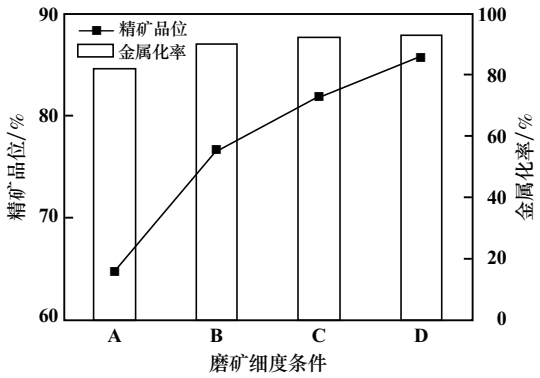


图 2　不同磨矿细度条件下还原指标对比结果

Fig. 2　Comparative analysis of reduction indicators under conditions of different grinding fineness

2.4　镍渣焙烧过程中颗粒长大

为了进一步验证镍渣含煤球团还原后颗粒长大情况,对磨矿细度-0.038 mm 粒级占 90.02%条件下金属化球团样品进行 SEM-EDS 表征。图 3 为金属化球团 SEM 图片。图 4 为金属化球团外层元素面扫描照片。由图 3 和图 4 可知,还原球团内部与外部的铁颗粒在形貌特征上较为相似,但外层颗粒的尺寸略大于核心

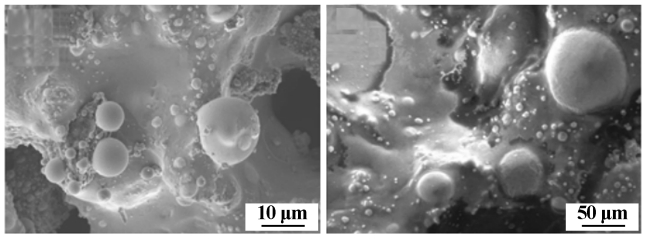


图 3　金属化球团 SEM 图片

Fig. 3　SEM images of metallized pellets

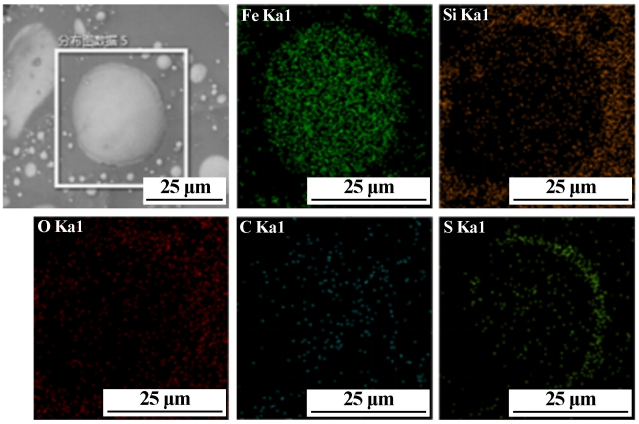


图 4　金属化球团外层元素面扫描照片

Fig. 4　Elemental mapping images of outer layer of metallized pellets

区域颗粒的尺寸。铁元素主要集中于颗粒相,硅元素则赋存于基体相中;在铁颗粒与基体的界面处存在硫元素的局部富集,而碳元素在铁颗粒表面的含量显著降低,其余元素未表现出明显的富集现象。

3 结论

1) 将镍渣细磨至-0.038 mm 粒级占 90.02%,并配加磁铁精矿对镍渣进行增氧调制,在焙烧温度 1 280~1 300 ℃、焙烧时间 35 min 条件下,球团金属化率为 92.91%,磁选精矿 TFe 含量为 85.80%。

2) 含煤球团自还原时,煤粉在球团内部热解产生气体,导致球团内部的气体压力增加,促使还原性气体由内向外扩散逸出,在动力学上大大减少了还原性气体扩散阻力对反应过程的影响,加速了球团的还原速率,因此含煤球团的还原速率明显大于普通矿粉球团。

3) 还原球团外层比内层具有更高的还原效率和还原度,外层还原金属铁颗粒的尺寸明显大于内层颗粒的尺寸。

参考文献(References):

[1] 王有良,于璞垚,尹新城,等. 镍渣改质及其在磁性复合流体抛光中的应用[J]. 光学精密工程, 2025,33(1):84-95.
WANG Youliang, YU Puyao, YIN Xincheng, et al. Modification of nickel slag and application in magnetic compound fluid polishing[J]. Optics and Precision Engineering, 2025,33(1):84-95.

[2] 徐杰,林梦,尹明干,等. 矿渣掺量对镍渣基地聚合物抗冻性能的影响[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2024,37(4):66-70.
XU Jie, LIN Meng, YIN Minggan, et al. Influences of slag content on the frost resistance of nickel slag-based geopolymer[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2024, 37(4):66-70.

[3] 袁学锋,王花. 镍渣—粉煤灰基地质聚合物力学性能及耐久性能的研究[J]. 金属矿山, 2022(11):259-264.
YUAN Xuefeng, WANG Hua. Study on mechanical and durability properties of nickel slag and fly ash based geopolymer[J]. Metal Mine, 2022(11):259-264.

[4] 阮靖,王思明,江晓波,等. 原状磷石膏-富镁镍渣基胶凝材料制备及性能评价[J]. 水泥工程, 2022(3):86-90.
RUAN Jing, WANG Siming, JIANG Xiaobo, et al. Preparation and performance evaluation of undisturbed phosphogypsum-high magnesium nickel slag cementitious material[J]. Cement Engineering, 2022(3):86-90.

[5] 刘旭宏. 掺复合镍铁渣混凝土工程应用中若干问题研究[D]. 福州:福州大学, 2021.
LIU Xuhong. Analyses on several issues concerning concrete containing composite ferronickel slag in engineering application[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.

[6] 杨永坤,申雯婷,王冠杰,等. 铁橄榄石高温矿相重构协同富集NiO[J]. 中国有色金属学报, 2025,35(1):270-281.
YANG Yongkun, SHEN Wenting, WANG Guanjie, et al. Synergistic enrichment of NiO by high temperature mineral phase reconstruction of iron olivine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(1):270-281.

[7] 李小明,李怡,邢相栋. 镍渣煤基直接还原过程中金属铁颗粒的生长特性[J]. 钢铁, 2020,55(3):104-109.
LI Xiaoming, LI Yi, XING Xiangdong. Particle growth characteristics of metallic iron in direct coal-based reduction of nickel slag[J]. Iron & Steel, 2020,55(3):104-109.

[8] 秦树辰,周起帆,郑朝振,等. 复杂硫化铜镍渣中温氧压浸铜镍-同步沉铁研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(10):141-146.
QIN Shuchen, ZHOU Qifan, ZHENG Chaozhen, et al. Study on medium temperature oxygen pressure leaching of complex sulfide copper nickel slag and synchronous iron precipitation[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(10):141-146.

[9] 李雄. 选冶联合技术综合回收镍冶炼渣中有价金属[D]. 长沙:中南大学, 2022.
LI Xiong. Comprehensive recovery of valuable metals from nickel smelting slag by mineral processing and metallurgy technology[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[10] 满世甲. 镍渣衍生 Fe_3O_4/导电聚合物复合材料的制备及吸波性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2022.
MAN Shijia. Preparation of composites from nickel-slag-derived Fe_3O_4 and conducting polymers and research of microwave absorption properties[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.

[11] 刘晓民,杨书航,张晓亮,等. 金川镍渣的工艺矿物性质分析[J]. 矿产综合利用, 2018,39(1):82-85.
LIU Xiaomin, YANG Shuhang, ZHANG Xiaoliang, et al. Process mineralogy analysis of Jinchuan nickel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018,39(1):82-85.

[12] 马泳波,杜雪岩,Alibek Kakimov,等. 富铁镍渣综合利用的研究与进展综述[J]. 矿产综合利用, 2018,39(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, 2018,39(6):25-31.

[13] 权芳民,王明华. 铁矿石直接还原现状及提高质量的对策[J]. 甘肃冶金, 2021,43(1):30-34.
QUAN Fangmin, WANG Minghua. The status and the improving quality countermeasures of Fe ore direct reduction technology[J]. Gansu Metallurgy, 2021,43(1):30-34.

引用本文:雷鹏飞,王建平,吴振中,等. 镍冶炼渣煤基氢冶金试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):175-178.
LEI Pengfei, WANG Jianping, WU Zhenzhong, et al. Experimental study on coal-based hydrogen metallurgy of nickel smelting slag[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):175-178.