铁矿石微波烧结试验研究

李 建，毛晓明，熊 林
（宝山钢铁股份有限公司 中央研究院，上海 201900）

摘要：本文采用微波烧结研究了铁矿石微波升温特性、微波烧结矿碱度、矿相结构、孔隙结构、冶金性能等与传统烧结矿的差异。研究结果表明，微波烧结矿具有烧结温度低、矿物组成更合理、孔隙率高、冶金性能更好的特点，证实了采用微波加热生产烧结矿具备技术可行性，可为铁矿石微波烧结工业化提供理论支撑。

关键词：铁矿石；微波烧结；升温特性；冶金性能
中图分类号：TF046.4；TF55 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0080－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.011

Experimental study on microwave sintering of iron ore

LI Jian，MAO Xiaoming，XIONG Lin
（*Central Research Institute，Baoshan Iron & Steel Co.，Ltd.，Shanghai* 201900，*China*）

Abstract：Microwave sintering is used to study the differences between conventional sinter and iron ore in terms of microwave heating characteristics，microwave sinter alkalinity，ore phase structure，pore structure，metallurgical properties，etc. The results show that the microwave sinter has the characteristics of low sintering temperature，more reasonable mineral composition，high porosity and better metallurgical properties，which confirms the technical feasibility of using microwave heating to produce sinter. The results can provide theoretical support for the industrialization of microwave sintering of iron ore.

Key words：iron ore；microwave sintering；heating characteristics；metallurgical properties

烧结矿是中国高炉最主要的含铁炉料，具有透气性好、冶金性能优良的特点，是高炉提高利用系数、降低燃料的重要基础[1]。烧结工艺还具有原料适应性广的特点，可大量消纳传统钢铁流程中伴生的多种含铁、含碳尘泥。与此同时，由于废气量大、燃烧过程不充分，烧结工艺也产生了大量的有害气体，其 SO_2、NO_x、CO 产生量分别占钢铁全流程的 50%～90%，碳排放占全流程的15%左右[2-5]。

全球气候变化已经给全人类的可持续发展带来了严重的威胁和严峻的挑战，减排温室气体已经成为世界共识。2020年9月22日，习近平主席代表中国向世界作出了“2030年碳达峰、2060年碳中和”的庄严承诺。业内专家[6]通过深入分析，认为电气化是能源消费碳减排的方向，以电为中心的能源体系是中国实现碳中和的有效途径。对工业领域而言，终端用能电气化水平将从目前的30%提高到2060年的50%，才能实现碳中和的目标。鉴于烧结过程的污染物和碳排放主要来源于化石燃料的燃烧，众多研究者认为以电代碳加热，是实现烧结绿色生产的重要技术方向。

毛晓明[7]通过理论计算、实验室和扩大试验，证明了微波热风点火能耗仅约为煤气点火能耗的21.61%，点火废气中的 SO_2 和 NO_x 含量明显低于煤气点火时的含量，烧结矿产、质

收稿日期：2021－12－08；**修回日期**：2022－01－12
作者简介：李 建(1979—)，男，博士研究生，宝钢股份中央研究院高级主任研究员、正高级工程师，从事铁矿石烧结、球团造块、非高炉炼铁新技术研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量指标优于煤气点火烧结时指标。任伟[8-9]研究了加热时间、碱度、气氛等对 3 种磁铁矿微波烧结的影响，并探索了配少量碳粉后磁铁精矿的升温差异，得到了试验升温速率、液相量、中心温度等数据，认为微波加热机理、物质的电磁性能、电磁场分布需深入研究，微波穿透深度浅、烧结产物强度低是实现工业化的严峻挑战。陈津[10]对比了磁铁矿和赤铁矿、无烟煤和烟煤、石灰石的微波升温特性，开展了千克级微波加热还原含碳铁矿粉的研究，其金属化率达到 90%，时间大幅度缩短。胡兵[11]对比了常规加热与微波加热对氧化球团煤基还原的影响，结果表明：达到同样的金属化率，传统工艺需要 150 min，而微波加热仅需 65 min。澳大利亚卧龙岗大学 STANDISH[12]对“微波碳热还原铁矿”进行了研究，将含碳褐铁矿和磁铁矿采用微波加热进行还原，对比了 1 000 ℃时，传统加热还原和微波加热还原的差异，结果表明：传统加热 15 min，还原失重率为 15%，而微波加热还原失重为 80%。王晓远[13]等研究了微波焙烧对高磷铁矿气化脱磷的影响，通过添加煤粉后微波焙烧，气化脱磷率最大可达 27.71%。

微波冶金方面，前人已有的研究成果主要聚焦在铁矿石的还原方面，而涉及微波烧结方面的内容较少。本文对烧结物料微波升温特性、微波烧结矿矿相、微观结构等进行研究，以便从技术角度为铁矿石微波烧结工业化应用提供理论支撑。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用铁矿石主要化学成分如表 1 所示。其中：OCS 是一种产自巴西的高品质烧结用赤铁矿，铁品位为 65.18%，平均粒度为 2.68 mm；OHY、OYD 均产自澳大利亚，为褐铁矿，平均粒度分别为 3.62、3.78 mm；OCL 为产自加拿大的磁铁精粉，平均粒度为 0.28 mm，OOP 为产自澳洲磁铁精粉。

1.2　试验方法

试验采用钟罩式微波炉(图1)对铁矿石微波升温特性进行研究，其采用的微波频率为 2.45 GHz，最大功率为 9 kW，升温速度为 50 ~ 120 ℃/min，最高使用温度为 1 400 ℃，每次样品量为 0.5 ~ 3.0 kg；采用 X 射线衍射分析仪进行物相分析；采用全自动物理吸附仪对烧结矿孔隙分布及结构进行分析；采用 AC 转鼓对烧结矿强度进行分析；并分别采用 JIS M8720 和 GB/T 13241—2017 标准对低温还原粉化及还原度进行检测。

表 1　铁矿石主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of iron ore　%

铁矿石	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	LOI
OCS	65.18	1.00	1.54	0.02	0.05	1.38	3.27
OHY	58.32	0.27	4.60	0.08	0.10	1.46	10.18
OYD	56.54	0.25	6.43	0.06	0.11	1.74	10.71
OCL	65.76	8.73	4.65	0.38	0.31	0.28	0.26
OOP	65.80	24.00	3.63	1.19	1.16	0.19	−0.79



图 1　钟罩式微波炉

Fig. 1　Coverage microwave oven

2　试验结果与分析

2.1　铁矿石微波升温特性

材料对微波的吸收是通过与微波电场或磁场耦合，将微波能转化为热能来实现的。黄向东[14]等从麦克斯韦电磁理论出发，在理论上分析了微波与物质的相互作用机理，指出介质对微波的吸收源于介质对微波的电导损耗和极化损耗，高温下电导损耗将占主要地位。对于铁矿石的微波升温特性，不同的研究者[10,15-16]进行了详细测试，证明铁矿石属于吸波较好的材料，在微波场中升温速度较快。

采用钟罩式微波炉，恒定微波功率为 7.9

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

kW，考察不同粒度铁矿石升温至 1 000 ℃所需的时间及能耗，样品量为 1 kg，对比结果如图 2、3 所示。

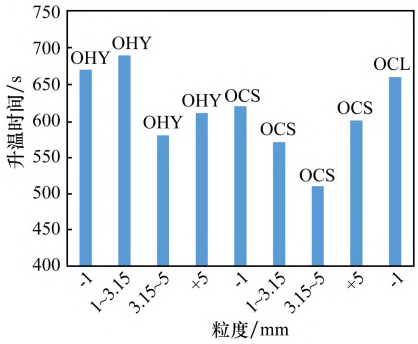


图 2 不同粒度铁矿石升温时间对比

Fig. 2 Comparison of different granular iron ore heating time

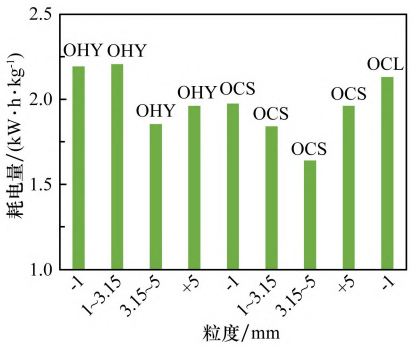


图 3 不同粒度铁矿石耗电量对比

Fig. 3 Power consumption of different granular iron ore heating time

由图 2 可知：OCS 升温速度最快，其粒径为 3.15 ~ 5 mm 的矿石在 510 s 就能由常温升至 1 000 ℃，升温速率达到 115 ℃/min，而 OCL 及 OHY 升温速度都比较慢，分别需 655、665 s 才能升至 1 000 ℃，升温速率为 88 ~ 90 ℃/min；每种粒度的 OCS 升温速率均高于 OHY；同一矿种，粒度为 3.15 ~ 5 mm 的矿石升温速度最快，因粒度不同，导致的升温时间差距最大可达到 100 s，即总时间的 20% 左右。

由图 3 可知：粒径为 3.15 ~ 5 mm 的 OCS 矿石升至 1 000 ℃时耗电量最低，仅为 1.64 kW·h/kg；其次为粒径为 3.15 ~ 5 mm 的 OHY 矿石，为 1.86 kW·h/kg；耗电最高的为粒径为 -1 mm 与 -3.15 mm 的 OHY 两种铁矿石，达到 2.2 kW·h/kg；次高为粒径为 -1 mm 的 OCL 矿石，达到 2.14 kW·h/kg。

3 种铁矿石不同粒度失重率如图 4 所示。由图 4 可知：OHY 失重率最大，达到 9.5% ~ 10.5%，其次为 OCS，失重率约 4%，OCL 失重率最低，仅为 2%。同一矿种，细粒级的失重率最高，随着粒度增加，失重率降低，这主要是由于细粒级矿石脉石及含结晶水杂质含量高所致。

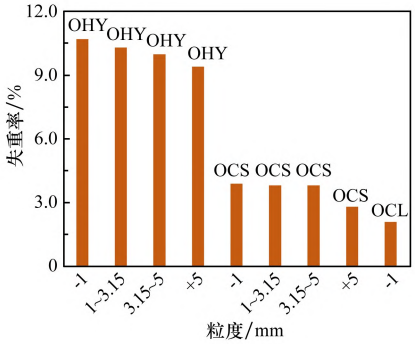
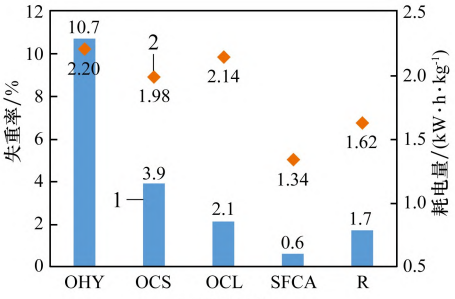


图 4 不同粒度铁矿石失重率

Fig. 4 Iron ore weight loss rate of different grain size

取粒度为 -1 mm 几种不同含铁原料进行微波升温特性对比，条件如前所示，结果见图 5。由图 5 可知，铁酸钙(SFCA)耗电量最低，仅为 1.34 kW·h/kg，其次为烧结返矿(R)，为 1.63 kW·h/kg。即经过高温焙烧后的铁原料，其电耗较低。



1—失重率；2—耗电量。

图 5 不同铁原料失重率及耗电量（-1 mm）

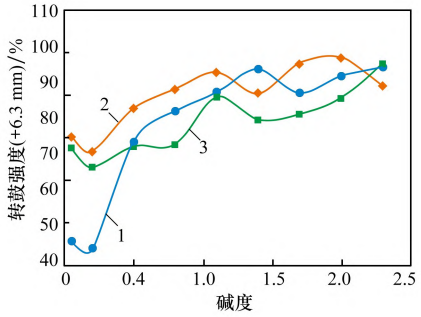
Fig. 5 Weight loss rate and power consumption of different iron raw materials (-1 mm)

2.2 烧结参数对强度的影响

在千克级微波钟罩炉中，以 60% 粒度为 5 ~ 10 mm 的 OYD 为核心，配入 40% 不同种类 -5 mm 的 OHY、OCS、磁铁矿(OOP)和熔剂，研究了碱度、矿种对微波烧结矿 AC 转鼓强度

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

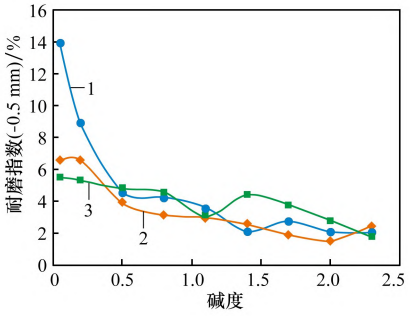
与耐磨指数的影响，结果分别如图 6、7 所示。由图 6 可知：OHY、OCS 微波烧结矿强度较高，而 OOP 微波烧结矿强度略低；与碱度为 1.8 的传统烧结矿(转鼓强度为 90%)对比，当 OHY 和 OCS 微波烧结矿碱度大于 1.1 时，其强度接近或高于传统烧结矿，而采用 OOP 微波烧结矿碱度需达到 2.4 时，其强度才能高于传统烧结矿。



1—OCS；2—OHY；3—OOP。

图 6　不同碱度、矿种对微波烧结矿转鼓强度的影响

Fig. 6　Drum strength effects of microwave sintering in different iron raw materials and different alkalinity



1—OCS；2—OHY；3—OOP。

图 7　不同碱度、矿种对微波烧结矿耐磨指数的影响

Fig. 7　Abrasion resistance index effects of microwave sintering in different iron raw materials and different alkalinity

另外，在自然碱度和 0.2 碱度条件下，OCS 因其 Fe_2O_3 质量分数高、熔点高，得到的烧结矿黏结相少，强度差，即该矿可作为微波烧结的铺底料和核心颗粒，发挥作用。

由图 7 可知，当微波烧结矿碱度大于 0.5 时，所得到的烧结矿耐磨指数优于碱度为 1.8 的传统烧结矿(其值为 6%)，即微波烧结矿因加热均匀、物相均匀，在耐磨方面指标更优。

微波加热属于体加热，加热方式与传统燃料燃烧存在较大的不同，本文研究了微波烧结温度对烧结矿强度的影响，结果如表 2 所示。由表 2 可知，在 1 275 ~ 1 320 ℃条件下，微波烧结矿强度高于烧结锅烧结矿。可见，从试验结果来看，微波烧结可降低烧结温度 60 ~ 150 ℃，分析其原因：① 微波加热均匀及具有活化作用，使得烧结温度降低；② 微波钟罩炉微波源布置在样品上方外沿，使得微波能量先穿过圆形坩埚外侧，而红外测温仪检测的是坩埚中心样品表面温度，可能存在一定的误差。后续还将进行深入分析铁矿石微波加热过程中的加热及能量转换机理。

表 2　千克级微波烧结矿强度及烧结温度对比

Table 2　Comparison of kg-grade microwave sintering ore strength and sintering temperature

样品	转鼓强度(+6.3 mm)/%	耐磨指数(-0.5 mm)/%	最高温度/℃
传统烧结矿	90.6	6.1	1 380 ~ 1 425
微波烧结矿 1	92.5	3.0	1 300
微波烧结矿 2	93.1	3.3	1 325
微波烧结矿 3	94.2	2.8	1 275

2.3　微波烧结矿质量分析

微波烧结矿与现场烧结矿主要化学成分和物相对比分别如表 3、4 所示。由表 3、4 可知：微波烧结矿因焙烧过程氧位高，FeO 质量分数

表 3　微波烧结矿与传统烧结矿主要化学成分(质量分数)

Table 3　Main chemical composition of microwave sintering and traditional sintering ore　%

样品	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	碱度
传统烧结矿	57.62	8.03	5.06	1.62	9.54	1.66	1.97
微波烧结矿(1 325 ℃)	59.74	4.82	4.42	1.60	7.55	0.94	1.71

表 4　微波烧结矿与传统烧结矿 XRD 物相对比(质量分数)

Table 4　Main chemical composition of microwave sintering and traditional sintering ore　%

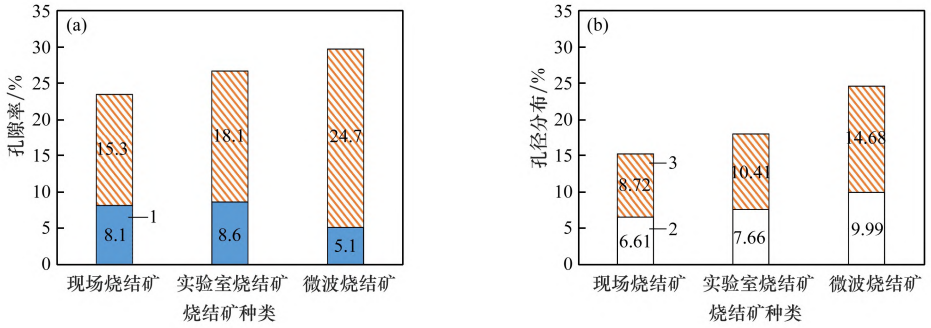
样 品	复合铁酸钙(SFCA)	赤铁矿	磁铁矿	其它
传统烧结矿	46.4	28.0	25.5	0.1
微波烧结矿(1 325 ℃)	34.6	47.0	18.4	0.1

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

远低于传统烧结矿，仅为4.82%；难还原磁铁矿质量分数低，仅为18.4%；易还原赤铁矿和铁酸钙质量分数合计达到81.6%，而传统烧结矿为74.4%。可见，微波烧结矿的化学成分与矿物组成较传统烧结矿更合理。

鉴于液相可控性强、成矿机理不同，会造成烧结矿结构存在不同，因此对微波烧结矿孔隙结构和孔径分布进行了研究和对比，结果如图8~10所示。由图8可知，微波烧结矿总孔隙率高、开孔多、微孔发达，开孔孔隙率比传统烧结矿高24%~36%，还原过程中反应界面多24%~36%，局部更接近“区域反应模型”，还原速度将更快。

由图9可知：微波烧结矿、现场烧结矿比

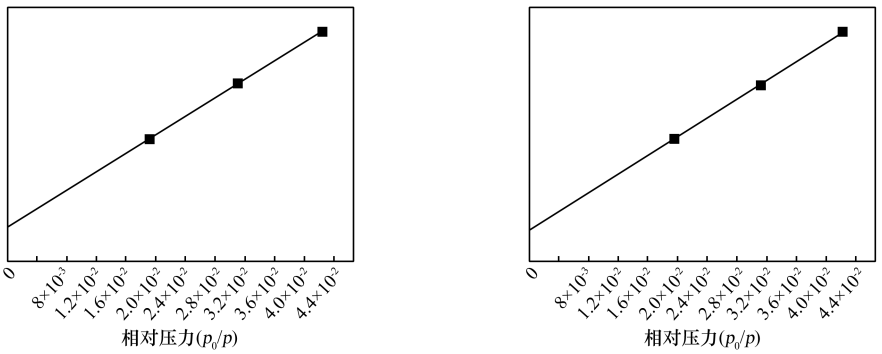


（a）孔隙率；（b）孔径分布

1—闭孔率；2—大孔，介孔（>2 nm）；3—微孔（<2 nm）。

图8 不同烧结矿孔隙特征对比

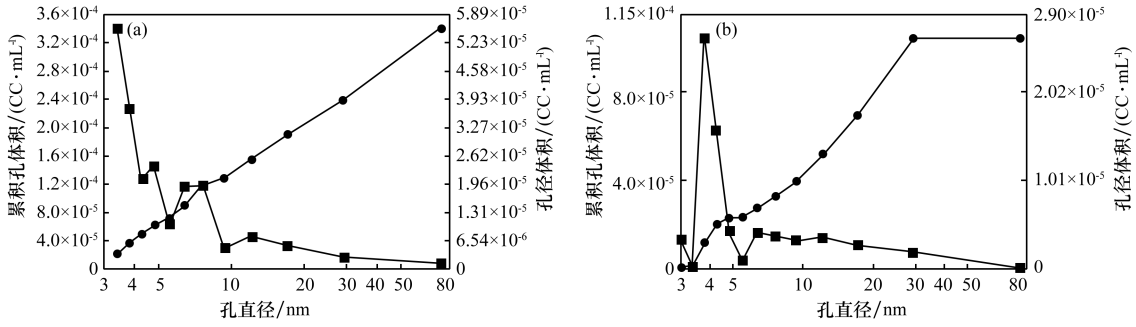
Fig. 8 Comparison of the pore characteristics of the different sintering ore



（a）微波烧结矿；（b）现场烧结矿

图9 微波烧结矿与传统烧结矿比表面积BET吸附图谱

Fig. 9 BET adsorption map on the specific surface area of microwave sintering and traditional sintering ore



（a）微波烧结矿；（b）现场烧结矿

图10 微波烧结矿与传统烧结矿孔径分布

Fig. 10 Distribution on pore size of microwave sintering and traditional sintering ore

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表面积分别为 0.166、0.124 m^2/g，即微波烧结矿比表面积比传统烧结矿多 33.9%。

由图 10 可知：微波烧结矿、现场烧结矿占比最大的孔分别为 3.5、4.0 nm。两种烧结矿小于 10 nm 的孔累积体积分别为 0.000 12、0.000 04 cc/mL；其平均孔径分别为 3.385、3.795 nm。

由以上分析可知：微波烧结矿孔径更小、微细孔体积更大、比表面积更大，其微细孔的数量将大于传统烧结矿，这有利于提高气固还原反应速度。

采用日本工业标准（Japanese Industrial Standards，JIS），对微波烧结低温还原粉化率、还原度进行检测，其结果如表 5 所示。由表 5 可知：微波烧结矿因矿物组成合理、孔隙率高，还原粉化、还原性明显优于传统烧结矿，其低温还原粉化率为 24.7%，因低温粉化产生的粉末量比传统烧结矿减少 26.9%；还原度为 88%，还原速度比传统烧结矿快 35%，这将有利于改善高炉内 CO 的间接还原，提高产量、降低燃料消耗。

表 5　烧结矿还原性能(质量分数)

Table 5　Reducing properties of sintered ore　%

样品	还原性(RI)	低温还原粉化率($RDI_{-3\ mm}$)
现场烧结矿	65.0	33.8
微波烧结矿	88.0	24.7

微波烧结矿与现场常用烧结矿及自熔性球团的熔滴性能如表 6 所示。由表 6 可知，微波烧结矿软化开始温度低于现场烧结矿和自熔性球团，软熔区间和熔融区间也大于现场烧结矿，但其最大压差小、软熔层厚度薄，综合特征指数(S)仅为 318 kPa·℃，仅为传统烧结矿的 1/5，甚至优于自熔性球团熔滴性能。可见，微波烧结矿用于生产，可大幅降低高炉压差，改善其透气性，提高喷煤量，对炉况顺行、降低燃料成本均具有积极的意义。

表 6　不同炉料熔滴性能对比

Table 6　Comparison of melting droplet performance of different furnace materials

指标	软化开始温度/℃	软化终了温度/℃	软熔区间/℃	熔融开始温度/℃	熔融终了温度/℃	熔融区间/℃	最大压差/kPa	软熔层厚度/mm	S/(kPa·℃)
微波烧结矿	966.0	1 106.7	140.7	1 149.2	1 471.6	322.4	3.9	26.3	318
现场烧结矿	1 094.0	1 200.0	106.1	1 209.7	1 485.8	276.1	14.8	34.9	1 589
自熔性球团	1 063.1	1 146.7	83.6	1 160.9	1 381.4	220.5	9.5	34.1	432

3　结　论

（1）在微波场内，赤铁矿升温速度较快，升温速率可达到 115 ℃/min，磁铁矿和褐铁矿略低。高温焙烧后的返矿、铁酸钙升温速度比原生铁矿石更快，耗电量更低。

（2）微波烧结可适当降低烧结温度，且得到的微波烧结矿强度高于传统烧结矿。

（3）微波烧结过程料层内氧浓度高，使得烧结矿内 FeO 质量分数低、易还原赤铁矿、铁酸钙比例高，矿物组成更为合理，有利于改善烧结矿冶金性能。

（4）微波烧结矿微孔发达，总孔隙率高，故其还原性能、熔滴性能明显优于传统烧结矿。

参考文献：

[1] 全钰嘉. 中国冶金百科全书,钢铁冶金卷[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
QUAN Yujia. Encyclopedia of Chinese metallurgy, volume of iron and steel metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2001.

[2] 杨晓东,张丁辰,刘锟等. 球团替代烧结——铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究,2017,9(1):44－52.
YANG Xiaodong, ZHANG Dingchen, LIU Kun, et al. Subsitituted pellting for sintering an important approach of energy-saving, low-carbon and emission reduction before ironmaking [J]. Journal of Engineering Studies,2017,9(1):44－52.

[3] 王锋,郅俊懋,吴保华,等. 烧结烟气污染物排放的计算方法[J]. 钢铁,2019,54(1):92－98.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

WANG Feng, QIE Junmao, WU Baohua, et al. Calculation methods for air pollutants emission of sinter flue gas[J]. Iron and Steel,2019,54(1):92 – 98.

[4] 朱德庆,何奥平,潘建,等. 铁矿烧结过程温室气体 CO_x 排放规律的研究[J]. 钢铁,2006,41(2):76.
ZHU Deqing,HE Aoping,PAN Jian,et al. Rule of greenhouse gas CO_x emission in iron ore sintering process[J]. Iron and Steel,2006,41(2):76.

[5] 朱廷钰,刘青,李玉然,等. 钢铁烧结烟气多污染物的排放特征及控制技术[J]. 科技导报,2014,32(33):51.
ZHU Tingyu,LIU Qing,LI Yuran,et al. Emission characteristics of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas and review of control technologies[J]. Science and Technology Review,2014,32(33):51.

[6] 中国南方电网. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R/OL]. [2021 – 4 – 24]. Http://China smart grid. com. cn/special/? id = 63842.
China Southern Power Grid. Digital power grid promotes the construction of a new power system with new energy as the main body[R/OL]. [2021 – 4 – 24]. Http://China smart grid. com. cn/special/? id = 63842.

[7] 毛晓明. 微波加热技术在铁矿烧结点火中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
MAO Xiaoming. Research on the application of microwave heating technology in iron ore sintering ignition[D]. Changsha:Central South University,2013.

[8] 任伟. 磁铁精矿的微波烧结研究[D],重庆:重庆大学,2006.
REN Wei. Study on microwave sintering of magnetite concentrates[D]. Chongqing:Chongqing University,2016.

[9] 任伟,张立国,袁慧. 少量碳粉对磁铁精矿微波加热的影响[J]. 烧结球团. 2007,32(4):10 – 13.
REN Wei, ZHANG Liguo, YUAN Hui. The analysis of the effect of carbon on microwave heating of magnetite concentrates[J]. Sintering and Pelletizing. 2007,32(4):10 – 13.

[10] 陈津,刘浏,曾加庆,等. 微波加热还原含碳铁矿粉试验研究[J]. 钢铁,2004,39(6):1 – 5.
CHEN Jin, LIU Liu, ZENG Jiaqing, et al. Experimental research of microwave heating on iron ore concentrates containing coal and lime[J]. Iron and Steel,2004,39(6):1 – 5.

[11] 胡兵,黄柱成,王兆才,等. 氧化球团微波加热煤基直接还原过程微观机制[J]. 钢铁研究学报,2016,28(10):43 – 49.
HU Bing, HUANG Zhucheng, WANG Zhaocai, et al. Microscopic mechanism of oxidized pellets during coal-based direct reduction by microwave heating[J]. Journal of Iron and Steel Research. 2016,28(10):43 – 49.

[12] STANDISH N, WOMER H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon[J]. Iron and Steehnaker. 1991,18(5):59 – 61.

[13] 王晓远,邢宏伟,田铁磊,等. 微波焙烧对高磷铁矿气化脱磷的影响[J]. 烧结球团. 2016,41(4):45 – 48.
WANG Xiaoyuan, XING Hongwei, TIAN Tielei, et al. Influence of microwave roasting on high phosphorus iron ore gasification dephospororization[J]. Sintering and Pelletizing. 2016,41(4):45 – 48.

[14] 黄向东,李建保,谢志鹏,等. 微波与无机非金属介质的相互作用[J]. 无机材料学报,1998,13(3):282 – 289.
HUANG Xiangdong LI Jianbao,XIE Zhipeng,et al. Microwave interaction with inorganic nonmetallic substance[J]. Journal of Inorganic Materials. 1998,13(3):282 – 289.

[15] 代林晴,朱红波,彭金辉,等. 微波加热在钢铁冶金中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(增刊):182 – 185.
DAI Linqing,ZHU Hongbo,PENG Jinhui,et al. Application of the microwave heating technology in ferrous metallurgy[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition),2011,36:182 – 185.

[16] 彭金辉,夏洪应. 微波冶金学[M]. 北京:科学出版社,2017.
PENG Jinhui,XIA Hongying. Microwave metallurgy[M]. Beijing:Science Press,2017.

(上接第9页)

[36] SONG X P, GUO Z C. Technologies for direct production of flexible H_2/CO synthesis gas[J]. Energy Conversion and Management,2006,47(5):560 – 569.

[37] TOWHIDI N. Influence of direct reduction condition of hematite pellets with H_2/CO on the oxidation behaviour of DRI in air[J]. Steel Research International,2003,74(10):595 – 600.

[38] TANG J,CHU M S,LI F,et al. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2020,27(6):713 – 723.

[39] SPREITZER D,SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen-A review[J]. 2019,90(10):1900108.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net