球团

有机复合膨润土对铁矿球团生产影响的研究

韦振宁[1]，甘牧原[1]，墙 蔷[2]，莫龙桂[1]，代梦博[3]，春铁军[3]
（1. 柳州钢铁股份有限公司 烧结厂，广西 柳州 545002；2. 广西柳州钢铁集团有限公司 技术中心，广西 柳州 545002；
3. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要： 通过实验室和工业试验，探索了有机膨润土替代传统无机膨润土进行球团生产的可行性。结果表明：有机膨润土性能整体优于无机膨润土，使用有机膨润土后，膨润土单耗下降 4.30 kg/t，球团矿品位提高 0.2%，但同时也导致球团产量下降，消耗指标升高，成品球抗压强度有所下降。实际生产中，通过降低链算机机速、台时产量和提高焙烧温度来确保有机膨润土球团矿强度的稳定。此外，本文还从经济效益的角度给出了有机膨润土用于球团生产的可行性建议。

关键词： 有机膨润土；链算机—回转窑；球团；抗压强度；经济效益
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0033－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.068

Research on effect of organic composite bentonite on iron ore pellet production

WEI Zhenning[1], GAN Muyuan[1], QIANG Qiang[2], MO Longgui[1], DAI Mengbo[3], CHUN Tiejun[3]
(1. *Sintering Plant of Liuzhou Iron and Steel Co., Ltd., Liuzhou* 545002, *Guangxi, China*; 2. *Guangxi Liuzhou Iron & Steel Co., Ltd., Liuzhou* 545002, *Guangxi, China*; 3. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*)

Abstract: Through laboratory and industrial experiments, the feasibility of replacing traditional inorganic bentonite with organic bentonite for pellet production is explored. The results show that the performance of organic bentonite is generally better than that of inorganic bentonite. After using organic bentonite, the unit consumption of bentonite decreases by 4.30 kg/t, and the grade of pellets increases by 0.2%. However, at the same time, it also leads to a decline in pelletizing production, an increase in consumption indicators, and a decrease in the compressive strength of finished balls. In actual production, the stability of the strength of the organic bentonite pellets can be ensured by reducing the speed of the chain grate, the output per table, and increasing the roasting temperature. In addition, the feasible suggestion for pellet production of organic bentonite is given from the point of view of economic benefits.

Key words: organic bentonite; chain grate-rotary kiln; pellet; compressive strength; economic benefits

膨润土是铁精矿球团制备过程中重要的黏结剂，其主要成分为蒙脱石，具有良好的分散性，可改善铁精矿成球性能，提高成品球机械强度，具有来源广、价格低廉等特点，但同时也存在用量大、成本高、炼铁渣量多、焦比增大等不良影响[1-3]。为减少膨润土用量，提高球团铁品位，球团用膨润土大多须经钠化或有机改性以增强其吸水性、膨胀性。其中有机改性的膨润土，主要由无机膨润土配加部分有机成分制备而成，又称为有机复合膨润土[4-6]。有机官能团可替代部分膨润土层间可交换的阳离子或结构水，进而促进形成共价键、离子键、

收稿日期： 2021－11－16；**修回日期：** 2022－01－04
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51574002)
作者简介： 韦振宁(1987—)，男，工程师，从事烧结、球团工艺技术方面研究。
通信作者： 春铁军(1984—)，男，教授，从事烧结、球团理论与新技术方面研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

偶合键与范德华力[7]。有机复合膨润土在成球过程中可强化纤维结构，具有弱化絮凝的作用，改善膨润土亲水性，提高生球落下强度，降低其用量[8-9]。集无机和有机两种黏结剂优点于一体的有机复合膨润土，具有配加量少、杂质少、可提高球团矿品位等优点，但也存在混合添加困难、热稳定性差、干球及预热球强度低、生产成本高等问题，影响了其广泛应用[10-11]。

现有报道较多研究了不同种类有机膨润土的造球实验，但工业实践较少，有机膨润土在球团生产中的应用应综合考虑其对球团性能、工艺参数及成本的影响。本文通过比较分析无机膨润土和有机膨润土的理化性能，实验室造球实验研究了其对生球、成品球质量的影响，进而在某钢铁企业240万吨/年链算机—回转窑氧化球团生产线上进行工业试验，研究有机膨润土对球团生产中回转窑窑中温度、链算机机速等工艺参数的影响，分析其能耗及经济效益，以探索有机膨润土替代传统无机膨润土进行球团生产的可行性，为球团生产降低膨润土用量、提高球团品位、降低生产成本提供重要参考。

1 原料性能与试验方法

1.1 原料性能

试验用铁精矿为某钢铁企业球团生产所用原料，其主要化学成分与物理性能分别见表1和表2。由表1可知，试验所用铁精粉的TFe较高，均大于65%。由表2可知，铁精粉 -0.075 mm粒级占比均大于95%，比表面积除了智利精粉和巴西精粉较低外，澳精粉和乌克兰精粉比表面积均大于1 500 cm^2/g。

表1 铁精粉主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of fine iron concentrate %

铁精粉种类	TFe	SiO_2	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O
澳精粉	65.19	7.89	26.51	0.10	0.37	0.26	0.152	0.061
巴西精粉	67.11	2.97	0.62	0.02	0.01	0.63	0.031	0.015
乌克兰精粉	67.30	2.53	27.53	0.34	2.26	0.27	0.028	0.062
智利精粉	65.67	7.83	27.68	0.10	0.35	0.16	0.015	0.015

表2 铁精粉物理性能

Table 2 Physical performances of fine iron ore concentrate

铁精粉种类	粒度组成(质量分数)/%				比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	-0.038 mm	0.038~0.045 mm	0.045~0.075 mm	+0.075 mm	
澳精粉	89.59	7.36	2.35	0.70	1 650
巴西精粉	70.37	22.67	5.79	1.17	1 049
乌克兰精粉	81.17	13.95	3.58	1.30	1 511
智利精粉	65.62	26.83	4.53	3.02	812

试验所用膨润土包括有机复合膨润土和无机膨润土。膨润土的化学成分和理化性能分别见表3和表4。由表3和表4可知，有机复合膨润土相对无机膨润土烧损较高，SiO_2和CaO质量分数较低；吸蓝量、膨胀容、胶质价、2 h吸水率较高。有机膨润土的性能整体优于无机膨润土。

表3 两种膨润土主要化学成分(质量分数)

Table 3 Main chemical composition of the two bentonites %

膨润土种类	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	烧损
无机	52.73	9.05	2.96	16.00	2.20	1.26	5.91	7.30
有机	48.86	3.92	2.46	16.06	1.21	1.54	5.58	13.70

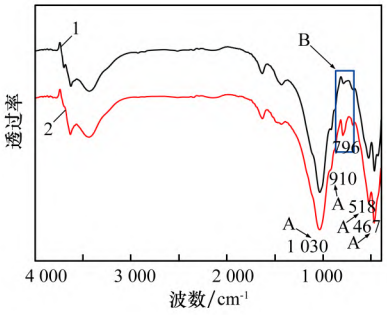
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　两种膨润土理化性能

Table 4　Physical and chemical properties of the two bentonites

膨润土种类	水分/%	吸蓝量/[g·(100 g)$^{-1}$]	膨胀容/[mL·(2 g)$^{-1}$]	胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	2 h 吸水率(质量分数)/%	-0.074 mm 粒级占比(质量分数)/%
无机	7.94	19.3	10	20	409	99.35
有机	8.30	21.9	12	30	530	99.70

图 1 所示为两种膨润土傅里叶红外光谱图，其中波数在 467、518、910、1 030 cm^{-1} 处为蒙脱石矿物典型吸收峰[12]。由图 1 可知，两种膨润土主要成分均为蒙脱石，而有机膨润土在波数为 795 cm^{-1} 时有着较为显著的吸收峰，此处主要是烯烃类或杂环类 C-H 键[13]。



A—蒙脱石；B—烯烃类或杂环类 C-H 键；

1—无机膨润土；2—有机膨润土。

图 1　两种膨润土红外光谱

Fig. 1　Infrared spectra of the two bentonites

1.2　试验方法

实验室球团制备与检测：将 40% 乌克兰精粉、30% 澳精粉、20% 智利精粉、10% 巴西精粉混合后，分别配加 1.8% 无机与有机膨润土制备成混合料；再在直径为 1 000 mm、转速为 32 r/min、倾角为 45° 圆盘造球机上制备生球(造球时间为 13 min)后取直径为 10～12 mm 的生球进行水分、落下强度、抗压强度、爆裂温度等性能检测；最后取生球在 105 ℃ 恒温烘箱中进行烘干后置于高温管式炉中，于 1 075 ℃ 预热 15 min，1 250 ℃ 焙烧 15 min，分别检测预热球及焙烧球的抗压强度。

工业生产试验：在某钢铁企业年产 240 万吨链算机—回转窑氧化球团生产线进行工业验证试验。保持铁料品种配比不变，基准期使用无机膨润土，试验期使用有机膨润土，基准期和试验期均为 3 d。试验为保证球团矿质量，不影响高炉正常生产，实时调整膨润土配比，以满足现场生球落下强度 6 次/(0.5 m) 的要求；实时调整链算机—回转窑参数，以满足现场成品球抗压强度大于 2 000 N/P 的要求；每小时对生球和成品球取样进行强度检测。

2　结果与讨论

2.1　实验室试验

无机膨润土及有机膨润土造球试验结果如表 5 所示。由表 5 可知，在相同条件下，与无机膨润土相比，添加有机复合膨润土后，生球落下强度由 4.6 次/(0.5 m) 提高到 5.5 次/(0.5 m)，但抗压强度和爆裂温度分别由 22 N/P、543 ℃ 降低至 21 N/P、516 ℃。这主要是由于有机复合膨润土含有一定量的有机物，黏度较大，有利于改善生球的落下强度，但在干燥过程中也阻碍了水分的迁移，进而降低了爆裂温度。两种膨润土的球团抗压强度如表 6 所示。由表 6 可知，有机膨润土球团，其预热、焙烧后的抗压强度均较低，预热球抗压强度由 750 N/P 降低至 570 N/P，焙烧球团抗压强度由 3 346 N/P 降低至2 870 N/P，但其成品球抗压强度仍可满足现场大于 2 000 N/P 的生产要求。

表 5　两种膨润土生球的性能指标

Table 5　Performance indexes of green pellets of the two bentonites

膨润土种类	落下强度/[次·(0.5 m^{-1})]	抗压强度/(N·P^{-1})	生球水分/%	爆裂温度/℃
无机	4.6	22	8.02	543
有机	5.5	21	8.05	516

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 两种膨润土球团抗压强度

Table 6 Compressive strength of pellets of the two bentonites N/P

膨润土种类	预热球团	焙烧球团
无机	750	3 346
有机	570	2 870

2.2 工业试验

2.2.1 球团指标

工业试验验证期间生球性能指标见表7。由表7可知，在生球落下强度相近的情况下，试验期有机膨润土的配比较低，较基准期低约0.60%，可见使用有机膨润土可有效降低膨润土用量。由实验室试验结果(表6)可知，有机膨润土球团预热及焙烧强度均降低，为使试验期成品球抗压强度与基准期基本相同，可延长预热时间并提高预热温度。表8所示为工业验证试验期间干燥预热焙烧情况，及不同回转窑窑中温度和不同链算机机速下的成品球抗压强度。由表8可知，调控链算机机速下降0.13 m/min，调控回转窑窑中温度提高4 ℃，可使得链算机的回转窑热烟气预热段温度升高13 ℃，预热球团强度提高32 N/P，而焙烧球团强度基本相同。

表7 基准期和试验期生球性能指标

Table 7 Performance indexes of green pellets in the base period and test period

项目	质量分数/%		落下强度/[次·(0.5 m^{-1})]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
	膨润土配比	水分			
基准期	1.92	9.03	6.1	24	528
试验期	1.33	9.20	6.2	22	506

表8 基准期和试验期预热焙烧情况

Table 8 Preheating and roasting in the base period and test period

项目	链算机机速/(m·min^{-1})	预热温度/℃	预热球抗压强度/(N·P^{-1})	回转窑窑中温度/℃	成品球抗压强度/(N·P^{-1})
基准期	3.26	1 021	698	1 195	2 437
试验期	3.13	1 034	730	1 199	2 440

2.2.2 不同窑中温度的影响

根据现场生产经验，将回转窑窑中温度划分为6个区间：小于1 180 ℃区间、大于1 220 ℃区间、1 180～1 220 ℃每10 ℃为一个区间。各温度区间对应的链算机机速及成品球抗压强度如表9所示。由表9可知，使用有机膨润土时，各区间成品球抗压强度总体上与使用无机膨润土时接近，抗压强度偏差不大于100 N/P，但链算机机速均比使用无机膨润土时低，表明在焙烧温度接近的情况下，要使成品球抗压强度不变，使用有机膨润土所需干燥预热焙烧的时间更长。

表9 不同回转窑窑中温度下的成品球抗压强度及链算机机速

Table 9 Compressive strength of roasted pellets and grate speeds at different rotary kiln temperature

项目	回转窑窑中温度/℃	<1 180	1 180～1 190	1 190～1 200	1 200～1 210	1 210～1 220	>1 220
基准期	抗压强度/(N·P^{-1})	2 408	2 422	2 355	2 407	2 497	2 760
	链算机机速/(m·min^{-1})	3.10	3.24	3.26	3.31	3.30	3.21
试验期	抗压强度/(N·P^{-1})	2 357	2 522	2 417	2 349	2 588	2 691
	链算机机速/(m·min^{-1})	3.08	3.17	3.13	3.17	3.07	2.80

2.2.3 不同链算机机速的影响

将链算机机速每间隔0.1 m/min划分为一个区间，各区间对应的成品球抗压强度和链算机机速如表10所示。由表10可知，试验期链算机机速较低，为2.7～3.4 m/min；而基准期链算机机速为3.0～3.5m/min。当链算机机速为3.1～3.2 m/min和3.3～3.4 m/min时，回转窑窑中温度相近，但试验期成品球抗压强度

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 10　不同链算机机速下的成品球抗压强度及窑中温度

Table 10　Compressive strength of finished pellets and rotary kiln temperature at different grate speeds

项目	链算机机速/(m·min^{-1})	2.7～2.8	2.8～2.9	2.9～3.0	3.0～3.1	3.1～3.2	3.2～3.3	3.3～3.4	3.4～3.5
基准期	抗压强度/(N·P^{-1})	—	—	—	2 365	2 612	2 520	2 340	2 394
	回转窑窑中温度/℃	—	—	—	1 157	1 192	1 212	1 193	1 209
试验期	抗压强度/(N·P^{-1})	2 858	2 576	2 682	2 376	2 458	2 431	2 275	—
	回转窑窑中温度/℃	1 197	1 196	1 209	1 203	1 198	1 197	1 197	—

相比基准期分别低 154 N/P 和 65 N/P。这也表明在焙烧温度接近的情况下，提高有机膨润土球团强度需增大链算机机速。

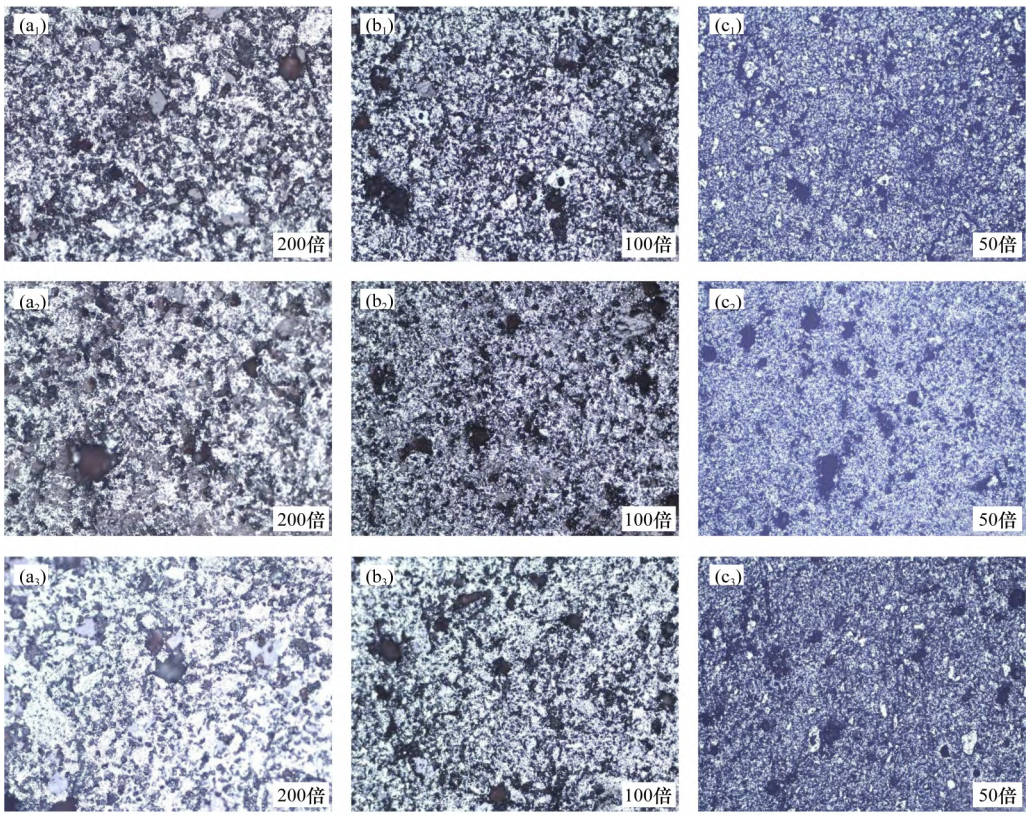
2.3　球团微观结构

本文分别取基准与试验期球团矿样进行磨片抛光(所取球团矿的参数见表 11)，采用扫描电子显微镜分别观察放大 50、100 和 200 倍的矿相，结果如图 2 所示。氧化球团的固结机理主要是 Fe_2O_3 的再结晶，影响强度因素主要表现在 Fe_2O_3 晶粒的大小和晶粒间连接的紧密性[14]。由图 2 可知，1#成品球的 Fe_2O_3 晶粒(白色)连接较为紧密，孔洞(黑色)相对较少。对比 2#和 1#成品球，链算机机速与窑中温度相近，有机膨润土球团矿 Fe_2O_3 的再结晶效果与无机膨润土的相当，但气孔明显较多，整体晶粒

表 11　成品球生产参数

Table 11　Production parameters of finished pellets

序号	种类	链算机机速/(m·min^{-1})	窑中温度/℃	抗压强度/(N·P^{-1})
1#	基准期	3.26	1 213	2 635
2#	试验期	3.27	1 209	2 256
3#	试验期	2.95	1 213	3 084



1#球团：(a$_1$)～(c$_1$)；2#球团：(a$_2$)～(c$_2$)；3#球团：(a$_3$)～(c$_3$)

Fe_2O_3—白色，互联状；钙铁橄榄石—深灰色，胶结状；Fe_3O_4—棕色，点状；孔洞—黑色，不规则。

图 2　成品球显微结构

Fig. 2　Microstructure of finished pellets

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

之间连接较为分散，进而影响成品球团强度。而在窑中温度相近时，3#成品球相对1#成品球降低了链算机机速，延长了干燥、预热及焙烧时间；3#成品球矿相出现了较大的结晶面积(白色)，而气孔大小及分布状态与无机膨润土的差别不大，说明使用有机膨润土的球团，Fe_2O_3 的再结晶效果较好。

3 经济效益分析

工业试验期间成品球团主要化学成分见表12。由表12可知，试验期球团矿品位提高0.2%，其他化学成分无明显变化。

表12 成品球团主要化学成分(质量分数)

Table 12 Main chemical composition of finished pellets %

项目	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O
基准期	63.00	6.72	0.36	0.48	0.66	0.117	0.094
试验期	63.20	6.62	0.37	0.48	0.68	0.119	0.093

工业验证期间消耗指标情况见表13。由表13可知，试验期有机膨润土总用量为209.50 t，球团矿总产量为20 916 t，台时产量为248 t/h，膨润土单耗为10.02 kg/t。与基准期相比，台时产量下降10 t/h，膨润土单耗下降4.30 kg/t。因台时产量较低、焙烧温度较高，有机膨润土试验期煤气单耗上升1.66 m^3/t，电单耗上升1.20 kW·h/t。

表13 基准期和试验期消耗指标情况

Table 13 Consumption indexes in the base period and test period

项目	膨润土总量/t	总产量/t	台时产量/(t·h^{-1})	膨润土单耗/(kg·t^{-1})	煤气单耗/(m^3·t^{-1})	电单耗/(kW·h·t^{-1})
基准期	263.20	18 379	258	14.32	30.36	24.60
试验期	209.50	20 916	248	10.02	32.02	25.80
对比	-53.70	2 537	-10	-4.30	1.66	1.20

为了进一步探讨有机膨润土用于实际生产的可行性程度，对其进行了生产效益分析。分析条件：假设高炉炉料结构大致为70%烧结矿、20%球团矿、10%块矿，高炉焦比为350 kg/t，焦炭价格为3 000元/t，无机膨润土价格、煤气单价、电单价分别按600元/t、0.6元/m^3、0.6元kW·h/t计算。有机膨润土球团矿TFe质量分数提高0.2%，按照每提高1%入炉料品位，焦比降低2%计算，使用有机膨润土后：

(1) 能耗增加的成本：1.66 m^3/t × 0.6元/m^3 + 1.20 × 0.6元·kW·h/t = 1.72元/t；

(2) 降低焦比效益：0.2% × 2 × 20% × 3 000元/t × 350 kg/t × 0.001 = 0.84元/t；

(3) 使用有机膨润土的盈亏点：(14.32 kg/t × 600元/t × 0.001 - 1.72元/t + 0.84元/t) / 10.02 kg/t × 1 000 = 770元/t；

因此，在当前原、燃料价格下，当有机膨润土的价格低于770元/t时，生产成本降低；高于770元/t时，生产成本上升。

4 结 论

(1) 有机膨润土性能整体优于无机膨润土，其吸蓝量、膨胀系数、2 h吸水率较高。

(2) 实验室和工业生产结果均表明，与无机膨润土相比，使用有机膨润土后，成品球抗压强度有所下降，同等条件下，其成品球的显微结构气孔明显较多，整体晶粒之间连接较为分散。可以通过降低链算机机速、台时产量与提高焙烧温度来确保球团矿强度的稳定。

(3) 与无机膨润土相比，使用有机膨润土时，烧结台时产量下降10 t/h，膨润土单耗下降4.30 kg/t，煤气单耗上升1.66 m^3/t，电单耗上升1.20 kW·h/t。同时，使用有机膨润土可以降低膨润土单耗，提高球团矿品位0.2%，但引起的产量下降，消耗指标升高值得注意。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 郑长文，管俊芳，郑佳敏，等．矿业领域膨润土应用的研究进展[J]．矿产综合利用，2020，223(3)：22－27.
ZHENG Changwen，GUAN Junfang，ZHENG Jiamin，et al. Progress in the application of bentonite in mining industry [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2020，223(3)：22－27.

[2] 曹立刚，王洪波，王杰．复合黏结剂(QNP)在包钢球团中的应用[J]．烧结球团，2007，32(2)：49－53.
CAO Ligang，WANG Hongbo，WANG Jie. Application of composite binding gagent(QNP) in the pelletizing plant，BAOTOU I&S Co. [J]. Sintering and Pelletizing，2007，32(2)：49－53.

[3] 李金莲，刘万山，任伟，等．配加高铁赤泥降低球团矿膨润土用量的研究[J]．烧结球团，2012，37(3)：31－34.
LI Jinlian，LIU Wanshan，REN Wei，et al. Experiment study on decreasing bentonite consumption of pellets by adding high iron red mud [J]. Sintering and Pelletizing，2012，37(3)：31－34.

[4] 魏国良，付国伟，吕志义，等．包钢球团配加复合粘结剂替代膨润土研究[J]．包钢科技，2020，46(3)：19－22.
WEI Guoliang，FU Guowei，LV Zhiyi，et al. Study on substituting bentonite with cobinder for pellet of baotou steel [J]. Science & Technology of Baotou Steel，2020，46(3)：19－22.

[5] 黄艳芳．复合黏结剂铁矿球团氧化焙烧与还原行为研究[D]．长沙：中南大学，2012：4－6.
HUANG Yanfang. Investigation on oxidizing roasting and reduction behaviors of iron concentrate pellets prepared with composite binder [D]. Changsha：Central South University，2012：4－6.

[6] 姜涛．铁矿造块学[M]．长沙：中南大学出版社，2016：299－301.
JIANG Tao. Iron ore caking science [M]. Changsha：Central South University Press，2016：299－301.

[7] 王抚抚，陈泉水，罗太安，等．膨润土的改性研究进展[J]．应用化工，2017，46(4)：775－779.
WANG Fufu，CHEN Quanshui，LUO Taian，et al. Research progress of modification on bentonite [J]. Applied Chemical Industry，2017，46(4)：775－779.

[8] 侯恩俭，翁兴洋，范晓慧．纤维化复合膨润土强化氧化球团制备研究[J]．烧结球团，2019，44(5)：40－44.
HOU Enjian，WENG Xingyang，FAN Xiaohui. Study on strengthening preparation of oxide pellets with fibration composite bentonite [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(5)：40－44.

[9] 翁兴洋．六偏磷酸钠对球团中钙基膨润土改性及其作用机理[J]．烧结球团，2020，45(6)：69－74.
WENG Xingyang. Research on sodium hexametaphosphate influence to calcium betonite modification and its mechanism from pellets [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(6)：69－74.

[10] 侯静，吴恩辉，李军，等．改性有机黏结剂对球团性能的影响分析[J]．烧结球团，2017，42(5)：35－38.
HOU Jing，WU Enhui，LI Jun，et al. Analysis of effect of modified organic binder on pelletizing properties [J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(5)：35－38.

[11] 李金莲，任伟，张立国，等．降低球团用膨润土配比的研究[J]．鞍钢技术，2015(3)：12－15.
LI Jinlian，REN Wei，ZHANG liguo，et al. Study on decreasing proportioning ratio of bentonite in pellets [J]. Angang Technology，2015(3)：12－15.

[12] 彭文世．矿物红外光谱图集[M]．北京：科学出版社，1982.
PENG Wenshi. Mineral infrared spectrum atlas [M]. Beijing：Science Press，1982.

[13] 谢晶曦，常俊标，王绪明．红外光谱在有机化学和药物化学中的应用[M]．北京：科学出版社，2001.
XIE Jingxi，CHANG Junbiao，WANG Xuming. Application of infrared spectroscopy in organic and medicinal chemistry [M]. Beijing：Science Press，2001.

[14] DAI Mengbo，GU Baoshu，RUAN Zhiyong，et al. Influence of specific surface area on the strength of iron oxidized pellets [J]. Minerals，2022，12：921.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net