不同种类膨润土对球团性能影响的试验与应用

韦 东[1]，胡 钺[2]，胡梦杰[2]，罗艳红[2]，周仙霖[2]
(1. 武钢资源集团有限公司，湖北 武汉 430070；2. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；
b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点试验室，湖北 武汉 430081)

摘要： 膨润土特殊的层状结构与黏土特性使其成为球团矿生产的主要黏结剂，但是其主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3，所以向球团中添加膨润土相当于加入了酸性脉石矿物，会降低成品球的铁品位，增加生铁冶炼的成本，因此，在球团生产中应尽量降低膨润土的用量。为此，本文采用复合膨润土进行实验室小型试验和工业应用试验，分析不同种类膨润土对球团性能影响。结果表明：与常规膨润土相比，配加复合膨润土能够有效提高生球、预热球及成品球性能，其中生球落下强度从2.4次/(0.5 m)提高到4.3次/(0.5 m)，爆裂温度从360 ℃上升到500 ℃以上，成品球抗压强度的提升最为明显，从3 480 N/P增加到3 774 N/P；复合膨润土的配比要比常规膨润土低1.0%左右，经济效益显著。

关键词： 球团；膨润土；黏结剂；烧结杯；工业试验
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0052－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.023

Experiment and application of effect of different types of bentonite on performance of pellets

WEI Dong[1], HU Yue[2], HU Mengjie[2], LUO Yanhong[2], ZHOU Xianlin[2]
(1. WISCO, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The special layered structure and clay characteristics of bentonite make it the main binder for pellet production, but its main chemical components are SiO_2 and Al_2O_3, so adding bentonite to the pellets is equivalent to adding acid gangue minerals, which will reduce the iron grade of the finished pellets and increase the cost of pig iron smelting, therefore, the amount of bentonite should be reduced as much as possible in pellets production. Therefore, the composite bentonite is used for small-scale laboratory tests and industrial application tests to analyze the effects of different types of bentonite on the performance of pellets. The results show that, compared with conventional bentonite, the addition of composite bentonite can effectively improve the performance of fresh pellets, preheated pellets and finished pellets, among which the falling strength of fresh pellets is increased from 2.4 times/(0.5 m) to 4.3 times/(0.5 m), the bursting temperature increases from 360 ℃ to more than 500 ℃, and the compressive strength of finished pellets is the most obvious, from 3 480 N/P to 3 774 N/P. The ratio of composite bentonite is about 1.0% lower than that of conventional bentonite, and its economic benefits are remarkable.

Key words: pellet; bentonite; binder; sintering cup; commercial test

收稿日期： 2022－01－06；**修回日期：** 2022－08－11
基金项目： 湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20191110)
作者简介： 韦 东(1972—)，男，高级工程师，从事选矿及造块方向的研究。
通信作者： 周仙霖(1986—)，男，博士，讲师，从事资源综合利用及铁矿造块方向的研究。

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

膨润土是一种已经广泛应用于球团生产中的黏结剂，其不仅能够改善物料的成球性，提高生球强度、爆裂温度和干球的“三耐”能力，还能降低高炉中熔剂和焦炭的用量，提升高炉生产能力[1]。但膨润土的主要成分是酸性的 SiO_2 和 Al_2O_3，在球团生产中加入膨润土，不仅会带入酸性脉石，降低球团矿品位，而且会造成高炉渣量增大，影响高炉生产[2-3]，因此，降低膨润土配比，对于球团生产具有重要的意义。相关研究表明，在球团生产中使用有机物 + 膨润土组成的复合黏结剂，不仅会降低膨润土用量，而且还能提高物料的成球性和生球强度，该做法不会提高球团矿的生产成本，经济和社会效益都十分明显[4-6]。

湖北某球团厂使用的自产铁精矿由于粒度较粗，该铁精矿即使经过高压辊磨预处理，仍需要添加大量的膨润土才能满足球团生产需要，而高配比使用膨润土会对成品球造成不利影响；同时，该厂使用的膨润土为 62.5% 印度膨润土 + 37.5% 常规膨润土混合而成的复合膨润土，其中印度膨润土价格贵且运输距离远，这进一步增加了生产成本。针对该问题，本文在相同条件下，对不同种类的常规、印度和复合膨润土进行造球试验，对比不同膨润土种类和用量条件下的生球、预热球和成品球的性能，从而得到球团生产中最优的膨润土添加条件，为实际生产降低膨润土用量进而降低生产成本提供一种解决思路。

1　试验原料与方法

1.1　原料性能

试验所用含铁原料、常规及印度膨润土由湖北某球团厂提供，1#、2# 复合膨润土由武汉某膨润土公司提供。铁精矿的主要化学成分、粒度等如表 1 所示。其中，小型试验所用铁精矿为现场高压辊磨预处理前、后的混合铁精矿，工业应用试验含铁原料由自产精矿（磁铁矿）和巴西红矿（赤铁矿）组成。由表 1 可知：混合铁精矿的铁品位较高，达到了 66.16%，其中磁铁精矿的占比较大，烧损为 1.57%；有害成分中，Al_2O_3 和 S 的质量分数偏高，分别达到了 1.56% 和 0.42%；该铁精矿的粒度较粗，其小于 0.074 mm 粒级质量分数仅为 79.56%，经高压辊磨预处理后该混合精矿的粒度组成有了较大改善，小于 0.074 mm 的粒级质量分数达到了 84.28%。

表 1　铁精矿的主要物化性能（质量分数）

Table 1　Physicochemical properties of iron concentrate　　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损	水分	<0.074 mm 粒级占比
混合铁精矿（预处理前）	66.16	26.89	3.52	1.56	1.41	0.98	0.01	0.420	1.57	9.14	79.56
混合铁精矿（预处理后）	66.45	26.95	3.13	1.63	1.22	0.87	0.01	0.450	1.49	8.32	84.28
程潮铁精矿（预处理后）	66.73	—	2.44	1.05	—	—	—	0.310	—	8.17	79.28
巴西红矿（预处理后）	59.89	—	5.43	1.40	—	—	—	0.035	—	11.49	85.56

试验所用 4 种膨润土的物化性能如表 2 所示。由表 2 可知：4 种膨润土的粒度较细，<0.074 mm 粒级质量分数分别为 97.72%、93.05%、95.23% 及 94.05%；1# 复合膨润土和印度膨润土的 2 h 吸水率均较高，都在 600% 以上，而且蒙脱石质量分数也都较高，分别达到了 79.53% 和 99.34%；2# 复合膨润土和常规膨润土的吸水率和蒙脱石质量分数略低。

1.2　试验方法

在实验室将膨润土配加到铁精矿中进行配料、造球、干燥、预热、焙烧等小型试验。试验流程如图 1 所示。试验采用人工配料，在直径为 800 mm、倾角为 47°、转速为 25 r/min 的圆盘造球机上进行造球，并对生球水分、落下强度、抗压强度、爆裂温度等指标进行检测；在 101 型电热鼓风干燥箱（设定温度为 105 ℃）中进行球团干燥，在 CWQ-55 型氧化焙烧管式炉中进行球团预热，并对预热球的抗压强度进行检测；在 CWQ-55 型氧化焙烧管式炉中进行球团焙烧，并对成品球抗压强度、还原度、还原膨胀等指标进行检测。

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

表2 膨润土的物化性能

Table 2 Physicochemical properties of bentonite

膨润土种类	质量分数/%							膨胀容/(mL·g^{-1})	吸兰量/[g·(100 g)$^{-1}$]
	Al_2O_3	SiO_2	烧损	蒙脱石占比	<0.074 mm粒级占比	水分	吸水率		
1#复合膨润土	13.35	60.89	11.76	79.53	97.72	8.05	607.78	20.0	35.15
2#复合膨润土	17.82	62.40	12.32	70.31	93.05	11.78	375.00	45.0	30.94
常规膨润土	14.06	53.36	10.42	64.43	95.23	7.78	230.00	18.0	28.35
印度膨润土	14.95	43.11	13.20	99.34	94.05	11.20	698.52	66.8	43.91

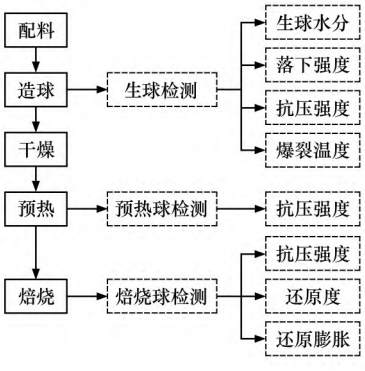


图1 实验室小型试验流程

Fig. 1 Flow chart of laboratory small-scale experiment

2 试验结果与讨论

2.1 造球、预热和焙烧优化试验

2.1.1 造球试验

(1) 膨润土用量。控制造球时间为13 min、生球水分质量分数为8%进行造球试验，得到1#复合膨润土用量对生球性能的影响如表3所示。由表3可知：随着1#复合膨润土用量的增加，生球的落下强度不断增强，生球抗压强度均维持在15 N/P以上，且生球爆裂温度均高于500 ℃，能满足生产干燥对爆裂温度的要求。当1#复合膨润土配比为1.60%时，生球的各项指标能够满足生产要求。

表3 1#复合膨润土用量对生球性能的影响

Table 3 Influence of the dosage of 1# compound bentonite on the properties of green pellets

1#复合土配比/%	水分质量分数/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
1.2	8.71	3.6	16.4	>500
1.4	8.07	3.6	22.0	>500
1.6	8.10	4.3	19.8	>500
1.8	8.60	5.1	20.5	>500

(2) 造球时间。在1#复合膨润土配比为1.60%条件下进行造球时间的优化试验，结果如表4所示。由表4可知：在造球时间为13 min时，生球性能能够满足生产要求。延长造球时间可使铁精矿黏结更紧密，从而提高落下强度与抗压强度；同时，生球的孔隙率随着造球时间的延长而降低，致使干燥过程中水分向外迁移的阻力增大，从而降低其爆裂温度。

表4 造球时间对生球性能的影响

Table 4 Influence of pelletizing time on the performance of green pellets

造球时间/min	水分质量分数/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
10	8.32	4.0	20.0	>500
13	8.10	4.3	19.8	>500
16	7.59	5.0	23.7	435

(3) 造球水分。在1#复合膨润土配比为1.6%、造球时间为13 min条件下进行造球水分优化试验，结果如表5所示。由表5可知：在造球水分质量分数为8.10%时，生球的落下强度才能满足生产要求。当水分质量分数较低时，球团内部球核的聚结效果差，矿粒之间的毛细力不足，颗粒之间的结合非常脆弱，导致生球落下强度差。

表5 造球水分对生球性能的影响

Table 5 Influence of pelletizing moisture on performance of green pellets

水分质量分数/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
6.97	2.8	23.0	438
7.70	3.7	23.1	438
8.10	4.3	19.8	>500

综合上述试验结果，配加1#复合膨润土的最佳造球条件：配比为1.6%、造球时间为13 min、

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

造球水分质量分数为 8.10%，可获得落下强度为 4.3 次/(0.5 m)、抗压强度为 19.8 N/P、爆裂温度大于 500 ℃的生球。

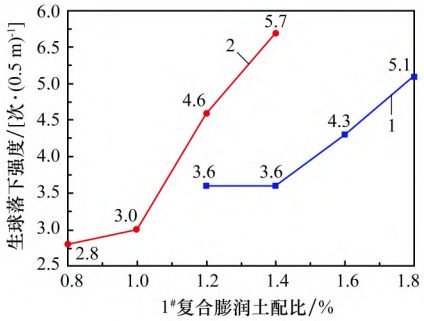
(4) 膨润土种类。在 1# 复合膨润土最佳的造球条件下，采用印度、常规膨润土为黏结剂进行造球试验，对比膨润土种类对生球性能的影响，试验结果如表 6 所示。由表 6 可知：1# 复合膨润土与印度膨润土的生球性能指标相差不大，而当常规膨润土配比为 2.6% 时，生球落下强度仅为 2.4 次/(0.5 m)，抗压强度为 13.7 N/P、爆裂温度为 360 ℃。由此可见，添加 1# 复合膨润土或印度膨润土可明显改善生球性能。

表 6　膨润土种类对生球性能的影响

Table 6　The influence of bentonite types on the performance of green pellets

膨润土种类	配比(质量分数)/%	生球水分质量分数/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
1# 复合膨润土	1.6	8.10	4.3	19.8	>500
常规膨润土	2.6	7.55	2.4	13.7	360
印度膨润土	1.6	7.70	3.6	21.6	438

(5) 高压辊磨预处理。在高压辊磨前，当 1# 复合膨润土配比为 1.2% 时，生球的落下强度为 3.6 次/(0.5 m)，抗压强度为 16.4 N/P，爆裂温度大于 500 ℃。在高压辊磨预处理后对生球进行取样，分析预处理对降低膨润土用量的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知，在高压辊磨预处理铁精矿后，当 1# 复合膨润土配比降低至 1.2% 时，生球的落下强度为 4.6 次/(0.5 m)，抗压强度为 24.5 N/P，爆裂温度为 420 ℃，能满足现场生产需求。



1—预处理前；2—预处理后。

图 2　高压辊磨预处理前后 1# 复合膨润土用量对生球落下强度的影响

Fig. 2　Influence of the dosage of 1# compound bentonite on the falling strength of green pellets before and after high pressure roller

2.1.2　预热试验

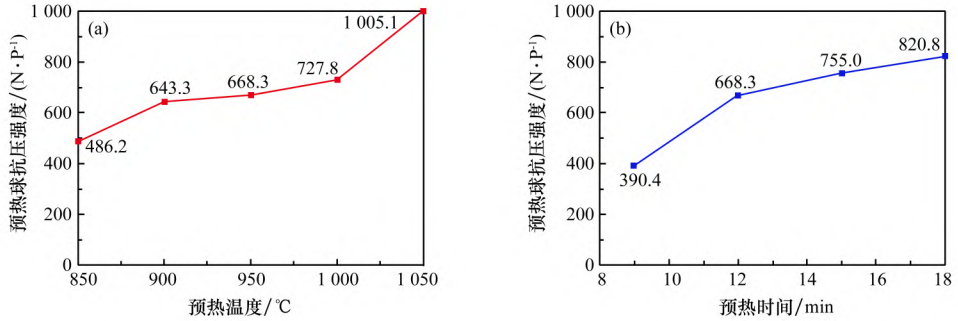
(1) 预热制度。在 1# 复合膨润土配比为 1.6%、预热时间为 12 min 时进行预热温度对预热球强度的影响试验，结果如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可知：随着预热温度的升高，预热球的抗压强度也提高，该值在预热温度为 850 ℃时达到 486.2 N/P，可以满足链箅机—回转窑工艺的生产要求。综合考虑预热球强度及现场生产工艺实际，在预热温度为 950 ℃条件下进行后续预热制度的优化试验。

在 1# 复合膨润土配比为 1.6%、预热温度为 950 ℃时进行预热时间对预热球强度的影响试验，结果如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可知：随着预热时间的延长，预热球强度大幅提高。在预热时间为 12 min 时，预热球抗压强度达 668.3 N/P，可满足生产要求。

(2) 膨润土种类及用量。在预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min 时进行膨润土用量对预热球抗压强度的影响试验，结果如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知：随着 1# 复合膨润土配比从 1.2% 提高至 1.6%，预热球的抗压强度从 319.9 N/P 提高至 668.3 N/P；继续增加配比至 1.8% 时，预热球抗压强度反而降低至 513.5 N/P。这是由于复合膨润土中含有一定量的有机物，在预热条件下该有机物发生分解，在原来位置上留下空隙，导致预热球强度下降[7]。

在预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min 时进行膨润土种类对预热球强度的影响试验，结果如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知：配加 1# 复合膨润土能够显著改善预热球的抗压强度，但配加印度膨润土的预热球也能满足生产要求。

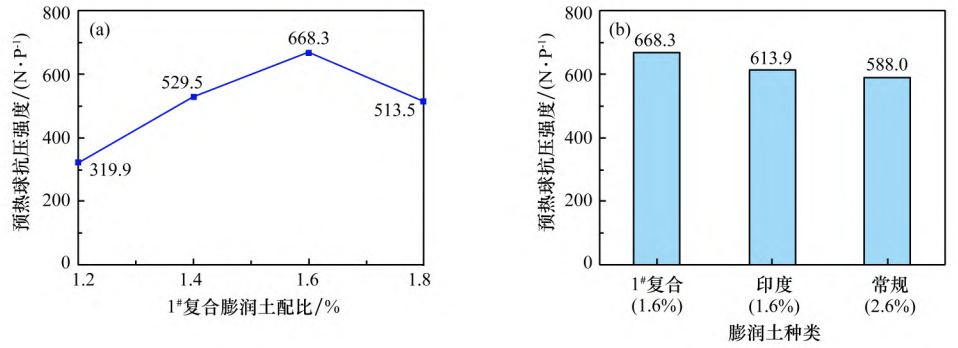
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 预热温度; (b) 预热时间

图 3 预热制度对预热球强度的影响

Fig. 3 Influence of preheating system on preheating pellets strength

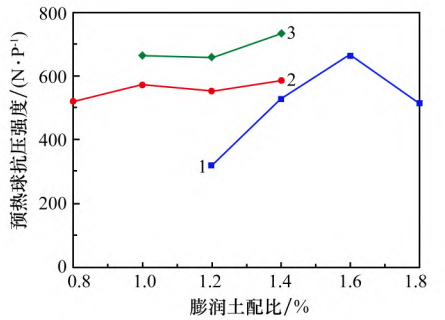


(a) 膨润土配比; (b) 膨润土种类

图 4 膨润土用量及种类对预热球强度的影响

Fig. 4 Influence of the dosage and type of bentonite on the strength of preheated pellets

(3) 高压辊磨预处理。进行高压辊磨预处理对预热球抗压强度的影响试验，结果如图 5 所示。由图 5 可知：当 1# 复合膨润土配比为 1.2% 时，高压辊磨预处理铁精矿可使预热球抗压强度达到 552.9 N/P，预处理效果明显；对比配加 1# 复合膨润土和印度膨润土在高压辊磨预处理后铁精矿的预热球强度，后者略高于前者。由此可知，在相同膨润土用量条件下，高压辊磨预处理可改善预热球抗压强度。



1—1# 复合膨润土(不进行预处理); 2—1# 复合膨润土(预处理后); 3—印度膨润土(预处理后)。

图 5 高压辊磨对预热球抗压强度的影响

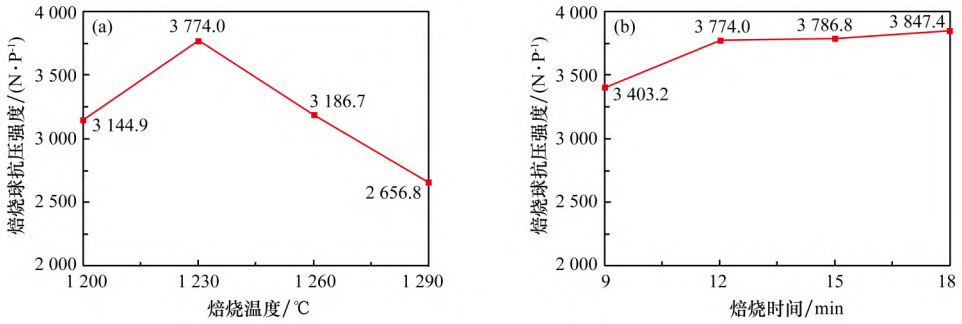
Fig. 5 Influence of high pressure roller grinding on compressive strength of preheated pellets

2.1.3 焙烧试验

(1) 焙烧制度。在 1# 复合膨润土配比为 1.6%、预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min、焙烧时间为 12 min 时进行焙烧温度对焙烧球抗压强度的影响试验，结果如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知：随着焙烧温度从 1 200 ℃ 提高至 1 230 ℃，焙烧球的抗压强度从 3 144.9 N/P 提高至 3 774.0 N/P，可满足大型高炉对球团抗压强度的要求；随着焙烧温度继续提高至 1 290 ℃，焙烧球的抗压强度降低至 2 656.8 N/P，这是由于焙烧温度过高，球团内产生部分低熔点物质，影响了成品球的抗压强度[图]。

在 1# 复合膨润土配比为 1.6%、预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min、焙烧温度为 1 230 ℃ 时进行焙烧时间对焙烧球抗压强度的影响试验，结果如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知：焙烧时间的增加有利于提高焙烧球的抗压强度，当焙烧时

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



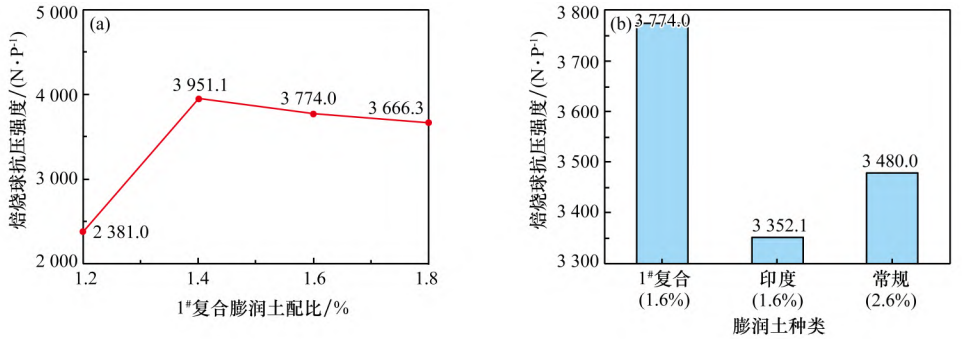
(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

图 6　焙烧制度对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 6　Influence of calcination system on compressive strength of calcined pellets

间为 12 min 时，焙烧球抗压强度为 3 774.0 N/P，能满足一般高炉要求。

(2) 膨润土用量及种类。在预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min、焙烧温度为 1 230 ℃、焙烧时间为 12 min 时进行膨润土用量及种类对焙烧球强度的影响试验，结果如图 7 所示。由图 7(a) 可知：当 1# 复合膨润土配比从 1.2% 提高至 1.8% 时，焙烧球的抗压强度呈现先增加后降低的趋势。当配比较低时，膨润土可使铁精矿粉黏结更紧密，使高温焙烧后的成品球强度更高；但继续提高配比后，膨润土中有机物的质量分数增加，经过高温焙烧后这些有机物挥发并在球团内留下孔隙，影响了焙烧球的抗压强度[9]。由图 7(b) 可知：对比印度膨润土，配加 1# 复合膨润土的焙烧球抗压强度较高，且能满足大型高炉对球团抗压强度的要求。

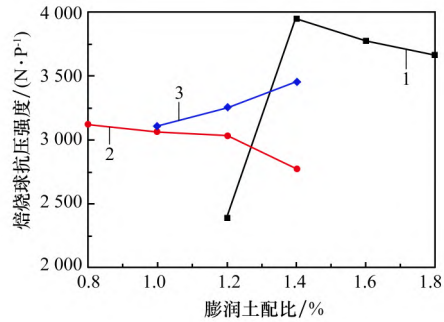


(a) 膨润土配比；(b) 膨润土种类

图 7　膨润土用量及种类对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 7　Influence of the dosage and type of bentonite on compressive strength of roasted pellets

(3) 高压辊磨预处理。在预热温度为 950 ℃、预热时间为 12 min、焙烧温度为 1 230 ℃、焙烧时间为 12 min 时，进行高压辊磨预处理对焙烧球抗压强度的影响试验，结果如图 8 所示。由图 8 可知，在高压辊磨预处理后，焙烧球的抗压强度有一定程度的降低，这是由于高压辊磨处理将铁精矿的粒度变细，使生球内部更加致密，造成焙烧过程中球团氧化不充分[10]。为了消除这种不利影响，进行焙烧时间对高压辊磨预处理焙烧球抗压强度的影响试验，分别设置焙烧时间为 12、15、18 min，得到焙烧球的抗压强度分别为 3 039.8、3 191.6、3 421.8 N/P，由此可知，延长焙烧时间



1—1# 复合膨润土(不进行预处理)；2—1# 复合膨润土(预处理后)；3—印度膨润土(预处理后)。

图 8　高压辊磨预处理对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 8　Influence of high pressure roller mill pretreatment on compressive strength of roasted pellets

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

对焙烧球抗压强度有一定程度的提高。

2.2 不同种类膨润土对球团性能的影响

在最佳的造球、预热和焙烧工序下，两种复合膨润土对球团性能的影响如表 7 所示。由表 7 可见，2# 复合膨润土的球团性能优于 1# 复合膨润土。

表 7 复合膨润土种类对球团性能的影响

Table 7 Influence of compound bentonite types on pellets performance

膨润土种类	配比(质量分数)/%	生球			预热球强度/(N·P^{-1})	焙烧球强度/(N·P^{-1})
		落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃		
1# 复合膨润土	1.6	4.3	19.8	>500	668.3	3 774.0
2# 复合膨润土	1.2	8.3	24.8	600	641.5	3 552.1

配加不同膨润土后成品球的主要化学成分如表 8 所示。由表 8 可知：由于复合膨润土用量低于常规膨润土，所以球团矿的铁品位提高约 1%，同时 Al_2O_3 及 SiO_2 质量分数降低；而印度膨润土中铁品位较高，因此以印度膨润土为黏结剂的球团矿铁品位略高于复合膨润土。通过对成品球冶金性能的检测可知，当 2# 复合膨润土配比为 1.2% 时，球团的还原度为 76.98%，还原膨胀系数为 13.56%，达到一级品质球团矿要求。

表 8 膨润土种类对成品球化学成分的影响(质量分数)

Table 8 Influence of bentonite types on chemical composition of fired pellets %

膨润土种类	配比	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S
1# 复合膨润土	1.6	65.06	0.80	3.82	1.28	0.90	1.68	0.025	0.002
2# 复合膨润土	1.2	65.10	0.70	3.78	1.22	0.91	1.60	0.025	0.002
常规膨润土	2.6	64.07	0.94	4.92	1.23	0.98	1.87	0.026	0.002
印度膨润土	1.6	65.14	0.63	3.76	1.20	0.92	1.75	0.025	0.002

3 工业应用试验与效益分析

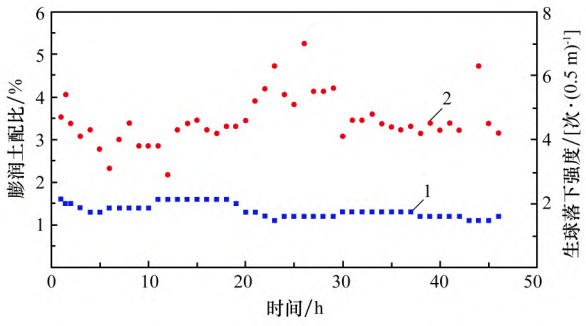
3.1 工业应用试验

工业应用试验在湖北某球团厂进行，试验期为 2021 年 4 月 27 日—5 月 1 日，基准期为试验前 7 d。基准期采用复配膨润土(1.0% 印度膨润土 + 0.6% 常规膨润土)。试验期所用黏结剂为 2# 复合膨润土。工业应用试验包括调整期和稳定期两个阶段。在调整期，采用膨润土配比为 1.8% 进行配料，以实际检测的生球性能参数为条件进行调整。若生球落下强度低于 4 次/(0.5 m)，则上调膨润土配比至 2.0%；若生球落下强度达到 4 次/(0.5 m) 以上，则连续观察生产 12 h；若球团性能满足生产要求，则进一步降低膨润土配比。在稳定期，设置连续生产时间不少于 72 h，并检测生球、预热球及成品球的性能指标。

经上述调整期试验后，确定合适的复合膨润土配比，进行稳定期的全系统试验，并采集 4 月 28 日上午 8 点至 4 月 30 日上午 10 点的 50 h 数据进行分析。

3.1.1 生球性能

试验期间，自产精矿、巴西红矿的配比随时间变化，在 0 ~ 16 h 时为 80%、20%，在 17 ~ 40 h 时为 76%、24%，在 41 ~ 50 h 时为 78%、22%。试验期的生球性能如图 9 所示。



1—2# 复合膨润土配比；2—生球落下强度。

图 9 工业应用试验期间的生球性能

Fig. 9 Performance of raw pellets during industrial tests

由图 9 可知：2 ~ 15 h 为试验调整期，此时复合土膨润土的配比最高为 1.6%，最低为 1.3%，生球的落下强度不太稳定，该值最高为 5.4

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

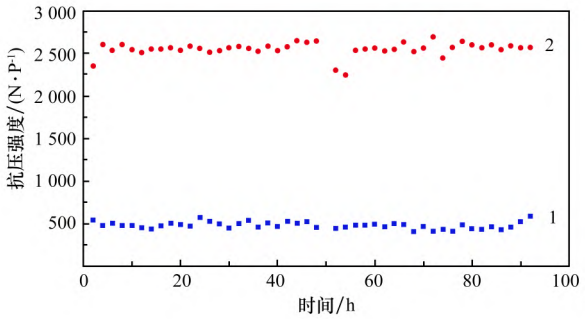
次/(0.5 m)，最低为 3.1 次/(0.5 m)；11～14 h 时，由于高压辊磨机故障停止运行，生球的落下强度明显下降；24～34 h 时，高压辊磨机正常运行，复合膨润土配比可降低至 1.1%，生球的落下强度能保持在 5.0 次/(0.5 m) 以上；35 h 后生球强度下降。其主要原因：干灰配入混合料中，使生球中存在内外核，降低了生球的落下强度，但仍能满足生产要求。48～49 h 时，高压辊磨机正常运行，复合膨润土的配比可降低至 1.1% 左右，生球落下强度能保持在 7.4 次/(0.5 m) 以上。之后，由于高压辊磨机的定辊发生故障，混合料的成球性变差，因此生球落下强度下降，但生球的落下强度仍为 4.2 次/(0.5 m) 以上，满足生产要求。

3.1.2　预热球与成品球强度

试验期间预热球与成品球的抗压强度如图 10 所示。由图 10 可知，预热球和成品球的平均抗压强度分别为 480 N/P 和 2 550 N/P，可满足现场生产需求。使用复合膨润土期间，成品球的部分化学成分平均值与试验前的生产数据对比如表 9 所示。由表 9 可见，与使用复配膨润土相比，使用 2# 复合膨润土后，成品球的 SiO_2 质量分数降低了 0.36%，这对高炉降低渣量具有积极的意义。

3.2　效益分析

2020 年该球团厂的年产量为 108.20 万吨，膨润土用量为 24.32 kg/t。根据常规、印度和复合膨润土价格为 400、1 000、800 元/t 进行计算，则该厂现用复配膨润土的价格为(1 000×1.0%+400×0.6%)/(1.0%+0.6%)=775 元/t。若采用复合



1—预热球；2—成品球。

图 10　工业试验期间预热球及成品球强度变化趋势

Fig. 10　Strength variation trend of preheated pellets and finished pellets during industrial test

表 9　复合膨润土与复配膨润土成品球部分化学成分对比(质量分数)

Table 9　Comparison of chemical composition of pellets from compound bentonite and compound soil　%

膨润土种类	TFe	FeO	Al_2O_3	SiO_2	S
2# 复合膨润土	64.10	1.55	1.45	4.01	0.017
复配膨润土	64.14	1.52	1.41	4.37	0.016

注：复配膨润土为 1.0% 印度膨润土 +0.6% 常规膨润土，采集时间为 4 月 21 日—27 日。

膨润土，配比可下降至 1.1%～1.3%，则每年可降低膨润土费用为 $108.20\times24.32\times10^{-3}\times775-108.20\times24.32\times10^{-3}\times(1.1\sim1.3)/1.6\times800=328.928\sim592.070$ 万元。由此可知，采用优化方案进行生产的经济效益十分明显。

4　结　论

(1) 实验室小型试验结果表明：在相同造球、预热、焙烧条件下，配加复合膨润土的生球性能略优于配加印度膨润土，预热球和焙烧球的强度则配加印度膨润土略优；对比两种复合膨润土的综合性能可知，2# 复合膨润土优于 1# 复合膨润土。

(2) 工业应用试验结果表明：复合膨润土具有比复配膨润土(0.6% 常规膨润土 +1.0% 印度膨润土) 更好的成球性能；在高压辊磨正常运行以及巴西红矿配比为 22%～24% 的条件下，2# 复合膨润土的配比可降低至 1.1%～1.3%，可保证生球落下强度大于 4.2 次/(0.5 m)，同时，预热球、成品球的平均抗压强度分别为 479.5、2 550.6 N/P，可满足现场生产需求。此外，采用复合膨润土后成品球的平均铁品位、SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数分别为 64.10%、4.01% 和 1.45%，符合球团生产现有的质量标准，并且实际生产的经济效益十分明显。

参考文献：

[1] 刘新兵. 冶金球团用膨润土性能指标的探讨[J]. 烧结球团，2010，35(4)：12－16.
LIU Xinbing. Discussion on performance index of bentonite used for metallurgical pelletizing [J]. Sintering and Pelletizing，2010，35(4)：12－16.

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

[2] FAN X H,GAN M,JIANG T. Decreasing bentonite dosage during,iron ore pelletising [J]. Ironmaking & Steelmaking: Products and applications,2011,38(8):597 – 601.

[3] SANDRA L D,JOSE R B,JOAO B F. Effect of colloidal agents in iron ore pelletizing [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2018,39(6):414 – 419.

[4] 朱德庆,李慧敏,余为,等. 铁矿球团中有机复合膨润土的强化机理 [J]. 重庆大学学报(自然科学版),2009(5):582 – 588.
ZHU Deqing,LI Huimin,YU Wei,et al. An organic activated bentonite mechanism for improving pelletization [J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition),2009(5):582 – 588.

[5] 李彩霞,任瑞晨,刘健,等. 有机物/膨润土复合球团黏结剂的研究 [J]. 硅酸盐通报,2011(4):809 – 812.
LI Caixia,REN Ruichen,LIU Jian,et al. Study on organics/bentonite compound pellet binder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2011(4):809 – 812.

[6] 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(4):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(4):40 – 44.

[7] 朱德庆,熊守安,潘建,等. 有机复合膨润土强化磁铁矿氧化球团机理及应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(2):279 – 286.
ZHU Deqing,XIONG Shouan,PAN Jian,et al. Improving pelletization of magnetite concentrate by organic complex bentonite and its industrial application [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2011,42(2):279 – 286.

[8] 王永刚,杨大兵. 黏结剂对程潮铁精矿球团质量的影响 [J]. 烧结球团,2011,36(4):20 – 27.
WANG Yonggang,YANG Dabing. Influence of binder on quality of chengchao iron concentrate pellet [J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(4):20 – 27.

[9] 郑银珠,彭志坚. 铁矿球团复合黏结剂的试验研究 [J]. 烧结球团,2009,34(5):28 – 33.
ZHENG Yinzhu,PENG Zhijian. Experimental study on iron ore pelletizing composite binder [J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(5):28 – 33.

[10] 许宝科,胡文祥,易安南,等. 高压辊磨机边料循环工艺在球团生产中的应用 [J]. 中国冶金,2021,31(8):49 – 53;59.
XU Baoke,HU Wenxiang,YI Annan,et al. Application of high pressure grinding roller edge recycle process in pellet production [J]. China Metallurgy,2021,31(8):49 – 53;59.

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