碱性全钒钛球团矿冶金性能试验及质量评价

周 平[1]，高艳宏[2]，麦吉昌[1]，罗清明[1]，胡 刚[1]，陆财天[1]，胡 林[2]
（1. 四川德胜集团钒钛有限公司，四川 乐山 614900；2. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院，重庆 401331）

摘要：为充分利用钒钛矿资源，改善球团矿的性能并提高其在高炉中的占比，本文通过加入生石灰调节钒钛球团矿的碱度，研究碱性全钒钛球团矿的冶金性能，及其与碱度、膨润土配比、物相组成和微观结构的关系，并采用分层综合评价方法对球团矿的质量进行评价。结果表明：在预热温度为950 ℃，预热时间为20 min，焙烧温度为1 230 ℃，焙烧时间为25 min的条件下，所得球团矿的抗压强度大部分高于2 000 N/P，最大为3 340 N/P；试样的 $RDI_{+3.15\ mm}$ 均高于96%；55%以上球团矿的 *RI* 高于70%，最高可达89.9%；自由膨胀指数均低于13%。分层综合评价结果显示，碱度为0.6、0.8和1.0的球团矿，当分别配入2.0%、1.5%和1.8%的膨润土后，综合性能最佳。综合考虑，建议生产球团矿的碱度为0.8，膨润土配比为1.5%。

关键词：钒钛球团矿；碱性；抗压强度；还原性；还原膨胀性能
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0030－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.021

Metallurgical performance test and quality evaluation of alkaline all-vanadium-titanium pellet

ZHOU Ping[1], **GAO Yanhong**[2], **MAI Jichang**[1], **LUO Qingming**[1], **HU Gang**[1], **LU Caitian**[1], **HU Lin**[2]
(1. *Sichuan Desheng Group Vanadium and Titanium Co., Ltd., Leshan* 614900, *Sichuan*, *China*; 2. *School of Metallurgy and Materials Engineering*, *Chongqing University of Science and Technology*, *Chongqing* 401331, *China*)

Abstract: In order to make full use of vanadium and titanium ore resources and improve the performance of pellets and increase their proportion in the blast furnace, the metallurgical properties of alkaline all-vanadium and titanium pellets and the its relationship with alkalinity, bentonite ratio, physical phase composition and microstructure are researched by adding quicklime to adjust the alkalinity of vanadium and titanium pellets, and the quality of pellets is evaluated by using a stratified comprehensive evaluation method. The results show that: under the conditions of preheating temperature of 950 ℃, preheating time of 20 min, roasting temperature of 1 230 ℃ and roasting time of 25 min, the compressive strength of most obtained pellets is obove 2 000 N/P and the maximum is 3 340 N/P; the $RDI_{+3.15\ mm}$ of the specimens is higher than 96%. The *RI* of more than 55% pellet is higher than 70%, up to 89.9%; the free swelling index is all lower than 13%. The stratified comprehensive evaluation results show that the pellets with alkalinity of 0.6, 0.8 and 1.0 have the best overall performance after adding 2.0%, 1.5% and 1.8% bentonite, respectively. On balance, it is suggested that the alkalinity of pellets production should be 0.8 and the ratio of bentonite should be 1.5%.

Key words: vanadium-titanium pellet; alkalinity; compressive strength; reducibility; reduction swelling characters

球团矿因具有强度高、还原性好、工序能耗低等特点，已成为现代高炉冶炼的重要入炉原料[1]。我国高炉所用球团矿基本为酸性球团矿，存在自由膨胀指数高、软熔性能差等问题，

收稿日期：2021－08－06；**修回日期**：2021－09－15
作者简介：周 平(1974—)，男，高级工程师，从事烧结球团生产技术方面的工作。
通讯作者：高艳宏(1975—)，女，副教授，从事冶金资源利用、节能与环保方面的研究。

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

限制了其入炉比的进一步提高。而碱性球团矿，尤其是碱性钒钛球团矿能有效改善其低温还原粉化性、还原性、还原膨胀性和软熔性，正逐渐受到钢铁企业的青睐[2]。

我国攀西地区拥有丰富的钒钛磁铁矿资源[3-4]，将该钒钛铁精粉配入球团生产可有效减轻我国铁矿资源需求紧张的压力。严照照等[5]研究表明：随着碱度的增大，生球的落下强度和抗压强度逐渐下降，而成品球团矿的抗压强度也随之降低。李乃尧等[6]的试验表明，在碱度为 0.28 ~ 0.42 时，球团矿的抗压强度、还原膨胀指数均随 MgO 或 TiO_2 质量分数的增加而降低。杨杰康等[7]研究认为，在碱度低于 0.64 时，焙烧球的抗压强度随石灰石粉配比的增大呈现下降的趋势，但球团矿的还原性、软熔性和还原膨胀性得到改善。然而，上述研究均针对低碱度球团矿，且对于碱度高于 0.6，甚至达到 1.0 及以上的全钒钛球团矿的研究相对较少。

为此，本文采用钒钛磁铁精矿，配加生石灰、除尘灰和膨润土进行碱性全钒钛球团矿(0.6 ~ 1.0)造球、焙烧试验，分析球团矿的冶金性能、矿物组成和微观结构，得到适宜的碱度和膨润土配比，为钢铁企业的实际生产提供指导。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验原料均取自四川德胜公司生产现场，原料化学成分和粒度分布分别如表 1、2 所示。由表 1、2 可知：该钒钛磁铁精矿含有较多的 MgO、CaO、TiO_2 和 S，TFe 质量分数相对较低，成球性能差；该铁矿 -0.075 mm 粒级占比达 95% 以上，膨润土的 -0.075 mm 粒级占比超过 97%，均满足造球对原料粒度的要求[8-9]。此外，除尘灰的粒度偏粗，暂不进行下一步细磨；采用球磨机一段细磨生石灰，并筛分出 -0.380 mm 粒级备用。

表 1　试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials　　%

原料名称	TFe	S	P	SiO_2	MgO	CaO	TiO_2	V_2O_5	Al_2O_3	H_2O
铁精矿	55.949	0.504	0.018	3.703	2.119	1.093	9.840	0.616	2.742	3.110
除尘灰	47.190	0.539	—	4.130	—	1.168	—	—	—	0.105
生石灰	—	—	—	2.419	—	80.861	—	—	—	0.000
膨润土	2.410	—	—	61.680	0.100	0.010	—	—	13.800	14.720

表 2　试验原料的粒度组成(质量分数)

Table 2　Size distribution of raw materials　　%

原料名称	-0.050 mm	0.050 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 0.100 mm	0.100 ~ 0.150 mm	0.150 ~ 0.200 mm	+0.200 mm
铁精矿	92.000	5.400	1.750	0.780	0.068	0.02
除尘灰	21.224	21.520	19.217	24.882	9.873	3.284
膨润土	85.399	11.617	2.555	0.429	0.000	0.000

1.2　试验方法

以生产现场实际配矿为基础，采用生石灰来调节碱度，设计 9 组试验，试验配料方案如表 3 所示。采用圆盘造球机造球，直径为 1 000 mm，造球时间为 20 min，生球水分约为 8%。取直径为 10 ~ 12.5 mm 的生球(约 695 g)装入吊篮(∅75 mm × 100 mm)，并将吊篮从竖式、管式加热炉(内径为 80 mm，高度为 700 mm，气氛可控，加热元件为硅钼棒)上部放入炉内，使空气从加热炉下部通入(流量为 1.5 m^3/h)。

生球在炉内依次完成球团焙烧全过程，其中干燥时间为 14 min，950 ℃ 温度下预热 20 min，1 230 ℃ 温度下焙烧 25 min，1 130 ℃ 温度下均热 3 min，最后冷却(炉内通风冷却 + 炉外自然冷却)。成品球团矿的抗压强度、还原性、低温还原粉化性和还原膨胀性等均按照国家标

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

表3 配料方案

Table 3 Batching scheme

试验编号	球团矿碱度	原料配比(质量分数)/%			
		铁精矿	除尘灰	生石灰	膨润土
1#	1.0	2.0	91.50	1.8	4.70
2#	1.0	1.8	91.86	1.8	4.54
3#	1.0	1.5	92.38	1.8	4.32
4#	0.8	2.0	92.70	1.8	3.50
5#	0.8	1.8	93.02	1.8	3.38
6#	0.8	1.5	93.50	1.8	3.20
7#	0.6	2.0	93.90	1.8	2.30
8#	0.6	1.8	94.19	1.8	2.21
9#	0.6	1.5	94.63	1.8	2.07

准进行测定。并采用智能转靶X射线衍射仪(型号：SmartLab-9)、场发射扫描电镜(型号：JSM-7800F)分别进行物相分析和微观结构分析。

2 结果与讨论

2.1 化学成分

成品球团矿的化学成分如表4所示。由表4可知，由于球团矿中TiO_2质量分数较高，约为10%；而TFe质量分数较低，为52%～54%；FeO质量分数均未超过0.8%；S质量分数最高为0.013%，75%以上的试样均低于0.01%，脱S率高达97%以上。这说明在试验条件下，球团矿的氧化比较充分，脱硫效果较好，满足生产要求。

表4 成品球团矿的主要化学成分和碱度

Table 4 Main chemical composition and basicity of finished pellets

试验编号	化学成分(质量分数)/%										R
	S	TFe	SiO_2	CaO	MgO	TiO_2	V_2O_5	Al_2O_3	P	As	FeO	
1#	0.011	52.260	4.700	4.680	2.450	9.627	0.586	3.050	0.020	0.006	0.460	0.995
2#	0.008	52.330	4.560	4.560	2.400	9.740	0.574	3.120	0.018	0.006	0.800	1.000
3#	0.007	52.390	4.340	4.310	2.490	9.991	0.589	3.070	0.020	0.007	0.460	0.993
4#	0.006	52.810	4.620	3.730	2.440	9.798	0.589	3.120	0.017	0.006	0.460	0.806
5#	0.013	52.800	4.590	3.760	2.450	9.812	0.594	3.170	0.020	0.006	0.690	0.819
6#	0.009	53.040	4.370	3.660	2.440	9.836	0.588	3.070	0.020	0.007	0.460	0.838
7#	0.005	53.220	4.580	2.930	2.430	9.822	0.607	3.130	0.015	0.006	0.460	0.640
8#	0.008	52.930	4.540	2.920	2.510	10.044	0.599	3.190	0.020	0.007	0.460	0.643
9#	0.004	53.780	4.350	2.730	2.470	9.915	0.604	3.070	0.019	0.006	0.230	0.627

2.2 抗压强度

成品球团矿的抗压强度如表5所示。由表5可知，9组球团矿基本能够满足生产要求，试样中只有1组的抗压强度低于2 000 N/P，50%以上试样的强度均在2 300 N/P以上，最大值达到了3 340 N/P。只有达到足够的焙烧温度和时间，固结时铁氧化物的结晶和再结晶、晶体长大发育、球团矿体积收缩及结构致密化和矿物组成均匀化才可能充分完成，才能保证球团形成比较理想的均质结构。

表5 成品球团矿的抗压强度

Table 5 Compressive strength of finished pellets N/P

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
2 048	2 085	1 900	2 792	2 100	2 601	3 340	2 745	2 494

碱度和膨润土配比对抗压强度的影响如图1所示。由图1可知，在此焙烧制度下，膨润土配比不变时，随碱度增大，抗压强度降低。

球团矿的XRD图谱、微观结构分别如图2、3所示。由图2可见，9组球团矿的矿物组成相似，主要为Fe_2O_3、Fe_3O_4、$Ca_3Fe_2TiO_8$和$Fe_2Ti_3O_9$，且各球团矿相应物相的特征衍射峰强度均没有较大差异。结合图3可知，这些球团

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

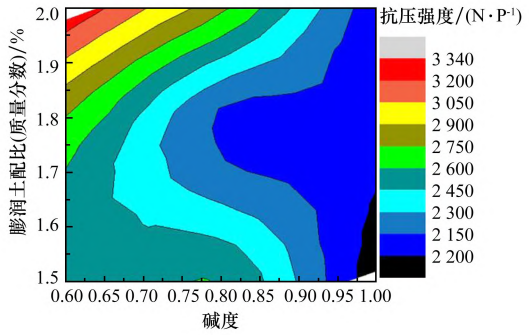


图 1　球团矿抗压强度与碱度、膨润土配比的关系

Fig. 1　Relationship of compressive strength of pellets and basicity, bentonite ratio

矿试样的矿物组成主要为赤铁矿，并含有一定量的硅酸盐和含钛矿物等。

此外，由图 3 可见，球团矿的结构相对致密，但部分球团矿存在明显的空隙和裂隙。适量 CaO 的存在，会促进球团矿微观结构的优化，使其具有稳定的晶体结构和较高的抗压强度；但是随着 CaO 的增多，导致液相量的进一步增加，如 $Ca_3Fe_2TiO_8$ 和 $Fe_2Ti_3O_9$ 等物质的生成，球团内部会产生由于收缩和内应力引起的大面积黏结和裂纹现象(图 3 中 1#、4#样品)，导致抗压强度下降[10]。如果此时膨润土配入量较少(如 1.5%)，这种影响将非常明显(图 3 中 3#、6#、9#样品)。而膨润土用量的增大，强化了焙烧时质点的扩散与黏结，使球团矿的裂隙和空隙均有所减少，导致在相同碱度的情况下，膨润土配入量大的球团矿的抗压强度会高于膨润土配入量少的球团矿(1#、2#球团矿的抗压强度比 3#大)。

2.3　低温还原粉化性

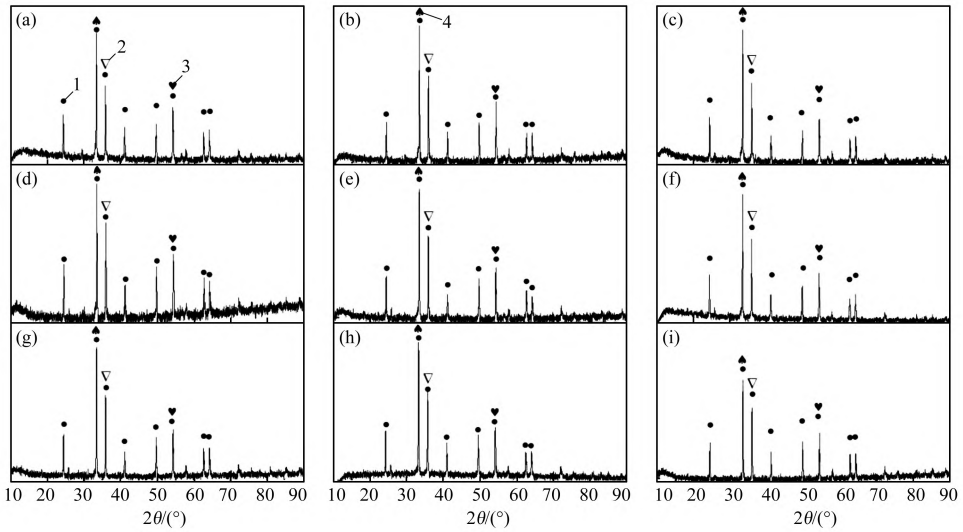
低温还原粉化性是评价铁矿冶金性能中的一项重要指标，其大小直接影响铁矿的质量，以及高炉的操作和产量。本文采用 $RDI_{+3.15\ mm}$ 表征球团矿低温还原粉化性的优劣。成品球团矿的 $RDI_{+3.15\ mm}$ 如表 6 所示，由此根据碱度和膨润土配比的变化，得到 $RDI_{+3.15\ mm}$ 的变化关系如图 4所示 。

由图 4 可见，当膨润土配比为 1.5% 时，随着碱度的增高，其在 0.8 左右时 $RDI_{+3.15\ mm}$ 出现峰值；而当膨润土配比为 1.8% 时，随着碱度增高，其在0.8左右时 $RDI_{+3.15\ mm}$ 出现最低值。

表 6　成品球团矿的 $RDI_{+3.15\ mm}$

Table 6　$RDI_{+3.15\ mm}$ of finished pellets　　%

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
98.68	98.54	96.43	99.20	98.05	99.56	99.20	98.94	98.56



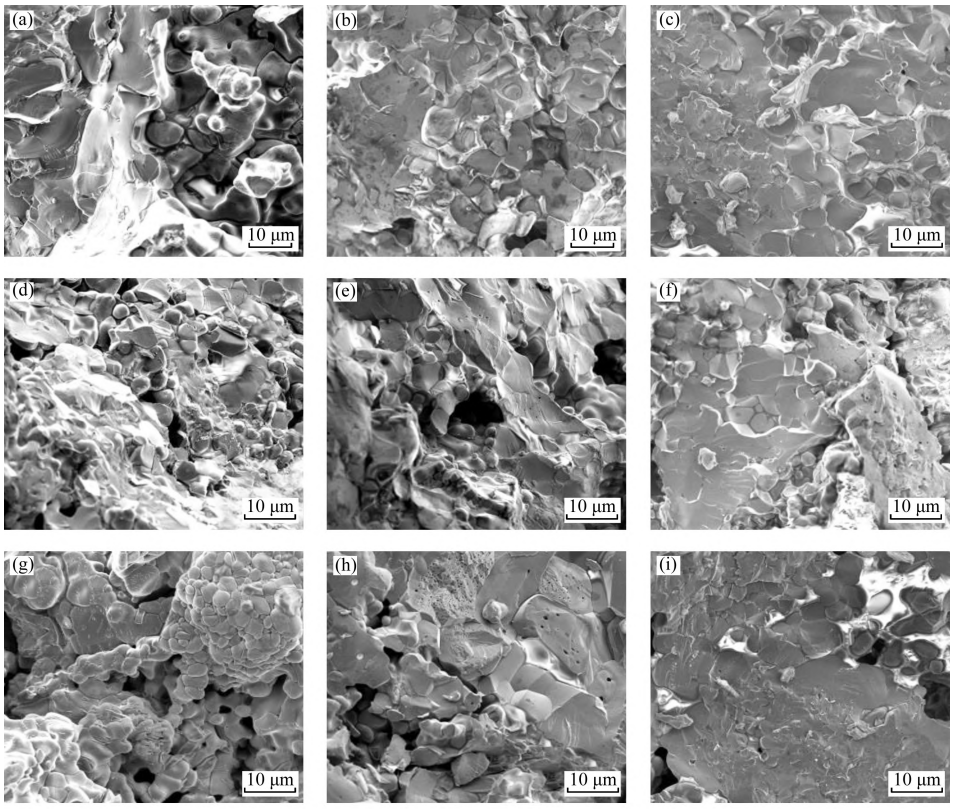
(a)～(i)分别对应 1#～9#试验样品

1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—$Fe_2Ti_3O_9$；4—$Ca_3Fe_2TiO_8$。

图 2　9 组球团矿的 XRD 图谱

Fig. 2　XRD patterns of 9 sets of pellets

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



(a)～(i) 分别对应 1#～9#试验球团矿的环带结构

图 3 9 组球团矿的显微结构

Fig. 3 Microstructure of 9 sets of pellets

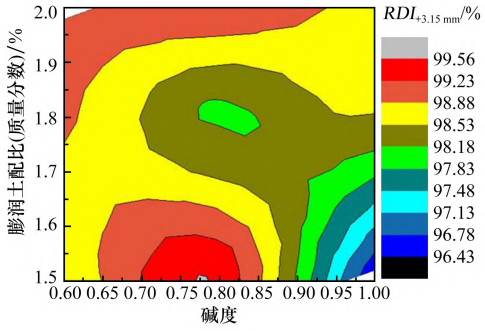


图 4 球团矿 *RDI* +3.15 mm 与碱度、膨润土配比之间的关系

Fig. 4 Relationship of *RDI* +3.15 mm and basicity, bentonite ratio

在此焙烧制度下球团矿的还原粉化指标均很好，*RDI* +3.15 mm 全部超过 98%，平均为 98.51%，能够满足生产要求。

2.4 还原性

根据高炉冶炼试验结果，钒钛磁铁球团矿具有很好的中温还原性，较差的高温还原性，与一般酸性球团矿的还原规律类似。随着球团矿碱度的提高，炉腰以上铁的还原度升高，而炉腰以下高温区的还原速度降低[11]。成品球团矿的 *RI* 如表 7 所示。由此得到，球团矿 *RI* 与碱度、膨润土配比之间的关系如图 5 所示。

表 7 成品球团矿的 *RI*

Table 7 *RI* of finished pellets %

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
70.4	89.7	45.5	53.9	77.2	93.3	64.1	45	71

由图 5 可见：当膨润土配比为 1.5% 时，在碱度为 0.75～0.8 附近 *RI* 达到峰值(93.3%)，在碱度为 1.0 附近 *RI* 降到最低值(45.5%)；当膨润土配比增加到约 1.7% 以上时，*RI* 随碱度的增加而增大，最大值为 89.7%(在膨润土配比为1.8%、碱度为1.0处)。这主要归因于碱

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

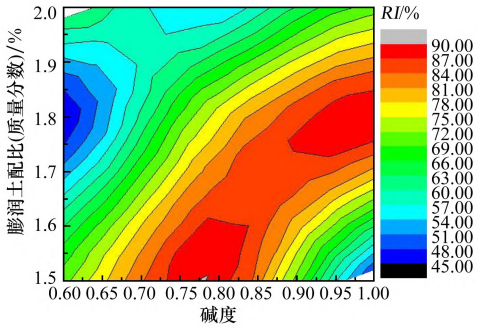


图 5　球团矿 *RI* 与碱度、膨润土配比之间的关系

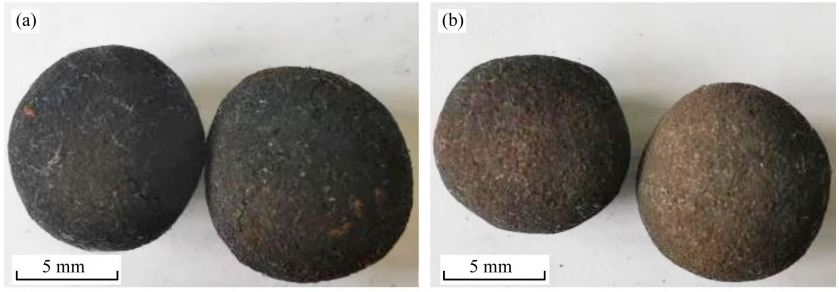
Fig. 5　Relationship of *RI* and basicity, bentonite ratio

度增大后，球团矿内空隙和裂隙较多(图 3 中 2#、5#样品)，对还原度指数的上升有促进作用[12]。

2.5　还原膨胀性

在还原过程中由于 Fe_2O_3 的晶格转变和 Fe_xO 还原可能出现的铁晶须，导致球团矿体积膨胀[13]。一般认为，球团矿的自由膨胀指数高于 20% 时，还原时易粉化并使高炉料柱透气性降低，使高炉冶炼技术经济指标下降；而当自由膨胀指数低于 20% 时，球团矿作为高炉原料的优越性是十分显著的。

9 组球团矿的自由膨胀指数均低于 13%，属于正常膨胀。试验球团矿低于 10%(满足优质球团对自由膨胀指数的要求)的达到 77% 以上，可以充分发挥球团矿的优越性。其中，自由膨胀指数低于或高于 10% 的两组球团矿还原膨胀后的照片如图 6 所示。由图 6 可知：自由膨胀指数低于 10% 的球团矿外观形态基本没有变化，保持较好的状态；而自由膨胀指数高于 10% 的球团矿，还原后开始出现少量裂纹。



自由膨胀指数/%：(a) 大于 10；(b) 小于 10

图 6　球团矿还原膨胀后照片

Fig. 6　Photographs of pellets after reduction and expansion

球团矿的自由膨胀指数如表 8 所示，由此得到该参数与碱度、膨润土配比之间的关系如图 7 所示。由图 7 可见，球团矿的自由膨胀指数随膨润土配比的增大而减小，其主要原因为焙烧有利于形成硅酸盐，从而减轻还原膨胀。值得注意的是，碱度为 0.8 ~ 0.85 的球团矿，添加不同配比的膨润土，自由膨胀指数存在极值。如碱度为 0.8、膨润土配比为 1.5% 时，球团矿的自由膨胀指数最大，达到了 12.69%；而当膨润土配比为 2.0% 时，自由膨胀指数最小为 4.39%。此外，膨润土配比较低，且碱度较高的球团矿，其自由膨胀指数相对较大，这说明碱度较高时，若膨润土添加量不足，容易引起球团矿的还原膨胀。如碱度为 1.0、膨润土配比为 1.5% 时，球团矿的自由膨胀指数达到了 12%。

3　球团矿质量综合评价

本文采用分层综合评价的方法对 9 组球团矿的质量进行综合评价。评价方法分为 2 层：① 包括球团矿化学成分、冶金性能和物理性能3个评价指标；②第一层各评价指标的子项

表 8　成品球团矿的自由膨胀指数(质量分数)

Table 8　Free swelling index of finished pellets　　%

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
9.01	8.90	12.05	4.39	7.40	12.69	8.26	9.68	8.15

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

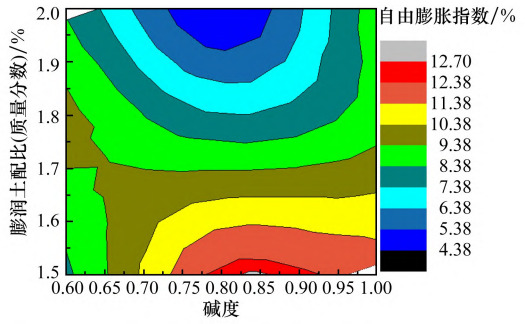


图 7 球团矿自由膨胀指数与碱度、膨润土配比之间的关系

Fig. 7 Relationship of free swelling index and basicity, bentonite ratio

(9 个评价指标)，其中球团矿化学成分对应 5 个子项[w(S)、w(TFe)、R、$w(Al_2O_3)$、$w(TiO_2)$]，冶金性能对应 3 个子项(RI、$RDI_{+3.15\ mm}$、自由膨胀指数)，物理性能对应 1 个子项(抗压强度)。在前人研究的基础上，本文结合球团矿各指标对其质量的影响程度，确定各层评价指标的权重值[14]，如表 9 所示。

球团矿质量综合评价指标计算方法如式(1)所示。为消除各指标间量纲的差异，对其进行标准化处理。由式(1)计算 9 组球团矿的综合评价指标，并进行排序，结果如表 10 所示。

$$P = 100 \times \sum_{i=1}^{3}\left[\left(\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij} \times p_{ij}\right) \times \omega_i\right] \quad (1)$$

式中：P 为球团矿质量综合评价指标值；p_{ij}、ω_{ij}分别代表第一层第 i 个评价指标所对应的第 j 个子项(第二层)及其权重值；其中，i 代表球团矿化学成分时，$n=5$，i 代表冶金性能时，$n=3$，i 代表物理性能时，$n=1$；ω_i 为第一层第 i 个评价指标的权重值。

表 9 球团矿评价指标和权重值

Table 9 Evaluation indexes and weight values of pellet

化学成分(0.50)					冶金性能(0.25)			物理性能(0.25)
w(S)	w(TFe)	R	$w(Al_2O_3)$	$w(TiO_2)$	RI	$RDI_{+3.15\ mm}$	自由膨胀指数	
0.10	0.55	0.15	0.10	0.10	0.50	0.20	0.30	1.0

表 10 球团矿指标的标准化处理及综合评价指标

Table 10 Standardization processing of pellet index and comprehensive evaluation index

项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
化学成分	74.82	74.15	74.37	78.33	73.70	81.87	81.49	72.17	90.67
冶金性能	82.39	90.78	61.14	83.04	86.13	88.00	81.99	70.77	83.59
物理性能	64.11	65.14	60.00	84.78	65.56	79.47	100.00	83.47	76.50
综合评价指标	74.03	76.06	67.47	81.12	74.77	82.80	86.24	74.65	85.36
排名	8	5	9	4	6	3	1	7	2

由表 10 可知：碱度为 0.6 的球团矿中，7# 球团矿(膨润土配比 2.0%)的综合性能最好；碱度为 0.8 的球团矿中，6#球团矿(膨润土配比 1.5%)的综合性能最佳，其还原性能、低温还原粉化性能和抗压强度均不错，自由膨胀指数虽略高，但低于 13%，满足生产要求；碱度为 1.0 的球团矿中，2#球团矿(膨润土配比 1.8%)的综合性能最优，其还原性能、低温还原粉化性能和膨胀性能都比较好，但抗压强度略低，稍高于 2 000 N/P，但能满足生产基本要求。

4 结 论

(1) 膨润土配比不变时，球团矿抗压强度随碱度增大而降低；当膨润土配比为 1.5% 时，$RDI_{+3.15\ mm}$、RI 和自由膨胀指数在碱度为 0.8 附近出现峰值；当膨润土配比超过 1.7% 后，$RDI_{+3.15\ mm}$、RI 随碱度增大而增大，而自由膨胀指数在碱度为 0.8 附近达到最低。

(2) 9 组碱性钒钛球团矿的抗压强度大部分高于 2 000 N/P，最高为 3 340 N/P；还原度指数达到 70% 的球团矿占 55%，最高为 89.9%；低温还原粉化指数均高于 96%；自由

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

膨胀指数指数均低于 13%。

（3）综合生产情况，以及膨润土配比、球团矿碱度、球团矿质量和生产成本，实际生产中建议采取 6#球团矿方案（碱度为 0.8、膨润土配比为 1.5%）来组织生产。

参考文献：

[1] 张淑会，王宝勇，兰臣臣，等. 球团矿化学成分控制现状及展望[J]. 钢铁，2020，55(8)：19－26.
ZHANG Shuhui，WANG Baoyong，LAN Chenchen，et al. Prospects and present status of pellets chemical composition control[J]. Iron and steel，2020，55(8)：19－26.

[2] 信自成，李杰，韩闯闯，等. 镁质熔剂性球团抗压强度研究[J]. 烧结球团，2018，43(5)：56－60.
XIN Zicheng，LI Jie，HAN Changchang，et al. Study on compressive strength of magnesia fluxed pellets[J]. Sintering and pelletizing，2018，43(5)：56－60.

[3] LIU Zhenggen，CHU Mansheng，WANG Hongtao，et al. Effect of MgO content in sinter on the softening melting behavior of mixed burden made from chromium-bearing vanadium-titanium magnetite[J]. International Journal of minerals，metaurgy and materials，2016，23(1)：25－32.

[4] ZHANG Guangming，FENG Keqin，YUE Huifang. Theoretical analyses and experimental investigations of selective carbothermal reactions of vanadium bearing titanomagnetite concentrates for preparation of iron-based wear-resistant material[J]. JOM，2016，68(9)：2525－2532.

[5] 严照照，卢建光，吕庆，等. 碱度对生球质量和球团矿抗压强度的影响[J]. 钢铁钒钛，2018，39(6)：110－115.
YAN Zhaozhao，LU Jianguang，Lü Qing，et al. The impact of basicity on the green ball quality and cruslring strength of pellets[J]. Iron steel vanadium titanium，2018，39(6)：110－115.

[6] 李乃尧，张建良，刘兴乐，等. MgO，TiO_2 对镁质钒钛球团矿综合冶金性能的影响[J]. 钢铁，2017，52(7)：14－21.
LI Nairao，ZHANG Jianliang，LIU Xingle，et al. Effects of MgO and TiO_2 on comprehensive metallurgical properties of magnesia vanadium titanium pellets[J]. Iron and steel，2017，52(7)：14－21.

[7] 杨杰康，王福才，王星富. 提高钒钛球团矿碱度试验[J]. 云南冶金，2013，42(6)：50－56；72.
YANG Jiekang，WANG Fucai，WANG Xingfu. Test for increasing alkalinity of vanadium-titanium iron ore pellet[J]. Yunnan metallurgy，2013，42(6)：50－56；72.

[8] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙：中南大学出版社，2016.
JIANG Tao. Iron ore agglomeration[M]. Changsha：Central South University Press，2016.

[9] 中国钢铁工业协会. 钒钛铁精矿：YB/T 4695—2618[S]. 北京：冶金工业出版社，2019.
China iron & steel association. Vanadium Titanium iron concentrate：YB/T 4695—2618[S]. Beijing：Metallurgical industry press，2019.

[10] CHENG Gongjin，GAO Zixian，HE Yang，et al. Effect of calcium oxide on the crushing strength，reduction and smelting performance of high-chromium vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Metals，2017，7(6)：181.

[11] 汪智德. 高钛型钒钛磁铁精矿生产酸性氧化球团的研究[D]. 沈阳：东北大学，2006.
WANG Zhide. Study on production of acid oxidized pellets from high titanium vanadium titanomagnetite concentrate[D]. Shenyang：Northeastern university，2006.

[12] 周祥，韩秀丽，刘磊，等. 不同类型钒钛球团矿矿相结构和冶金性能分析[J]. 烧结球团，2019，44(4)：31－35.
ZHOU Xiang，HAN Xiuli，LIU Lei，et al. Analysis of mineralogical structure and metallurgical properties of different types of vanadium titanium pellets[J]. Sintering and pelletizing，2019，44(4)：31－35.

[13] 刘长江，高培程，王刚. 首钢股份高钛氧化球团生产实践[J]. 矿业工程，2020，18(2)：47－50.
LIU Changjiang，GAO Peicheng，WANG Gang. Production practice of high titanium oxidized pellets in beijing shougang Co.，Ltd[J]. Mining engineering，2020，18(2)：47－50.

[14] 王纪元，阎丽娟. 球团矿质量分层综合评价方法研究[J]. 烧结球团，2015，40(3)：17－21.
WANG Jiyuan，YAN Lijuan. Study on stratified comprehensive evaluation method of pellet quality[J]. Sintering and pelletizing，2015，40(3)：17－21.

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