低硅碱性球团矿制备技术研究

青格勒[1]，黄文斌[2]，安 钢[2]，王 凯[2]，吴小江[2]，田筠清[1]，张 彦[1]
（1. 首钢集团有限公司 技术研究院，北京 100043；2. 首钢京唐钢铁联合有限公司，河北 唐山 063200）

摘要：为了提高球团矿入炉比例，降低高炉渣量和燃料消耗，本文通过实验室试验和工业试验，研究了有利于生产低硅碱性球团矿的熔剂及生产工艺参数。试验结果表明：消石灰具有良好的黏结性能，有利于降低球团膨润土的使用比例，且分解吸热量少，对球团抗压强度影响小，可以实现优质低硅碱性球团矿的生产，并可满足高炉高配比使用要求。首钢京唐3座5 500 m^3 高炉配加优质低硅碱性球团矿后，总球团配比可由原来的28%提升至55%，吨铁 CO^2 排放降低10%。

关键词：低硅碱性球团矿；消石灰；大型高炉；还原膨胀率；抗压强度
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0119－08
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.016

Research on preparation technology of low-silica alkaline pellets

QING Gele[1], HUANG Wenbin[2], AN Gang[2], WANG Kai[2],
WU Xiaojiang[2], TIAN Junqing[1], ZHANG Yan[1]
(1. *Research Institute of Technology, Shougang Group Corporation, Beijing* 100043, *China*; 2. *Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan* 063200, *Hebei*, *China*)

Abstract: In order to increase the proportion of pellets putting into the furnace and reduce the amount of blast furnace slag and fuel consumption, through laboratory tests and industrial tests, the flux and production process parameters that are beneficial to the production of low-silicon alkaline pellets are studied. The results show that slaked lime has good bonding properties, which is conducive to reducing the proportion of bentonite used in the pellets, and has less decomposition and heat absorption, which has little effect on the compressive strength of the pellets, and can realize the production of high-quality low-silica alkaline pellets, while it can meet the requirements of high ratio of blast furnace. After Shougang Jingtang three 5 500 m^3 blast furnaces are equipped with high-quality and low-silicon alkaline pellets, the total pellet ratio increased from the original 28% to 55%, and the CO_2 emissions per ton of iron is reduced by 10%.

Key words: low-silicon alkaline pellets; slaked lime; large blast furnace; compressive strength

国内钢铁制造流程主要以高炉＋转炉长流程冶炼为主，约占90%，而长流程钢的 CO_2 排放较高，一般吨钢 CO_2 排放在1.8～2.2 t，其中炼铁系统占75%以上，所以高炉炼铁系统的 CO_2 减排至关重要。国内高炉炼铁的炉料结构主要以烧结矿为主，比例在65%以上，而球团矿的平均入炉比例不足15%[1-2]。鉴于球团工艺的 SO_2、NO_x、颗粒物等污染物排放比烧结工艺低45%以上，CO_2 排放比烧结工艺低65%以上，发展球团、提高球团矿在高炉炉料中的应用比例是长流程钢铁企业降低污染物以及碳排放的有效途径之一[3]。国内外学者在球团矿制备及理论方面开展了大量的研究工作。刘文强等[4]通过研究发现 $CaCO_3$ 分解吸热对球团矿抗压强度影响较大；姜涛等[5]进行了熔剂性球团矿的生产及理论技术研究，研究结果显示，采

收稿日期：2021－12－27；**修回日期**：2022－01－05
作者简介：青格勒(1979—)，女，教授级高级工程师，从事球团工艺及低碳技术研究工作。

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

用消石灰可以改善生球强度，另外含镁熔剂性球团矿的性能优于熔剂性球团矿；李杰等[6]研究了碱度对镁质熔剂性球团矿性能的影响，其研究结果显示，镁质球团配加熔剂时爆裂温度降低，但球团软熔性能改善；HANNINE 等[7-8]研究了赤铁矿球团通过适当配加石灰石提高球团抗压强度的方法。国外生产熔剂性球团矿的企业较多，国内主要为宝武湛江钢铁使用链算机—回转窑工艺生产 0.85 左右碱度的熔剂性球团矿[9-10]。国内外熔剂性球团矿主要使用石灰石粉作为熔剂，大部分熔剂性球团矿的 SiO_2 质量分数在 2.5% 以上。而使用 SiO_2 质量分数高、品位低的球团矿，高炉难以降低渣量和燃料消耗。本文研究了低硅碱性球团矿的制备工艺参数及其对综合炉料冶金性能的影响，以期通过生产低硅碱性球团矿，提高球团矿在高炉中的使用比例，降低高炉燃料消耗和 CO_2 排放。

1 球团矿比例及碱度需求分析

生产中，为了维持炉渣的二元碱度，提高球团矿使用比例时需要提高其碱度，否则高炉需要直接配加石灰石，影响高炉冶炼。图 1 是球团矿使用比例及碱度需求测算结果(按炉渣碱度为 1.18、烧结矿碱度为 2.0 测算)。由图 1 可知，当球团矿比例提高至 40% 时，碱度需要提高至 0.50 左右；当球团矿比例提高至 50% 时，碱度需要提高到 0.83。图 2 是球团矿入炉配比为 50% 时，球团矿 SiO_2 质量分数与高炉渣比和燃料比的关系。从图 2 可知，当球团矿 SiO_2 质量分数从 4.0% 降低至 2.0% 时，吨铁高炉燃料比可降低 25 kg/t 以上。

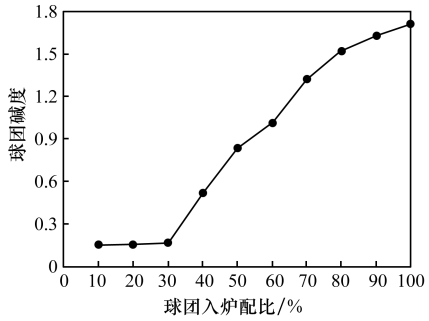
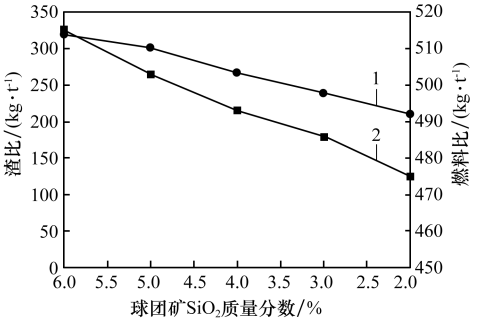


图 1 球团矿入炉配比及碱度需求

Fig. 1 Pellet ratio and basicity requirement



1—渣比；2—燃料比。

图 2 球团矿 SiO_2 质量分数与渣比和燃料比关系

Fig. 2 Relationship between pellet SiO_2 content and blast furnace slag and fuel rate

2 试验原料与方法

2.1 试验原料

试验用铁矿粉为磁铁精矿粉，熔剂为石灰石粉、白灰和消石灰，黏结剂为膨润土。试验用原料的主要化学成分和粒度组成如表 1 所示，膨润土的物理性能指标如表 2 所示。由表 1 可知：磁铁精矿粉的铁品位为 69.65%，$w(SiO_2)$ 为 1.69%，$w(FeO)$ 为 29.35%，矿粉 -0.074 mm 粒级占比为88.6%；白灰、消石灰、石灰

表 1 原料主要化学成分、烧损和粒度(质量分数)

Table 1 Main chemical composition, burning loss and particle size of raw materials %

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	FeO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	烧损	-0.074 mm 粒级占比
磁铁矿粉	69.65	1.69	0.35	29.35	0.33	0.48	0.043	0.087	-2.66	88.6
石灰石粉	—	1.34	51.78	—	0.29	1.29	0.130	0.088	45.35	98.6
消石灰粉	—	1.19	70.26	—	0.34	3.76	0.034	0.008	22.26	99.8
白灰	—	0.86	90.5	—	0.35	1.84	0.036	0.010	5.63	97.6
膨润土	—	63.35	2.49	—	14.20	2.45	1.230	1.720	9.31	97.4

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

表 2　膨润土物理性能

Table 2　Physical properties of bentonite

胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	吸蓝量/[g·(100 g)$^{-1}$]	膨胀指数/[mL·(2 g)$^{-1}$]	2 h 吸水率/%
495	28.7	16	356

石粉的 w(CaO)分别为 90.5%、70.26%、51.78%。由表 2 可知：试验用膨润土的 2 h 吸水率为 356%，膨胀指数为 16 mL/(2 g)。

2.2　试验方法

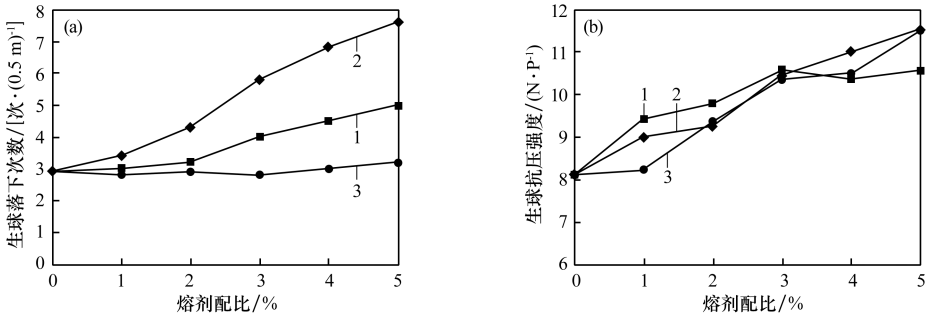
试验首先对磁铁精矿粉分别配加 0%、1%、2%、3%、4%和 5%的石灰石粉、白灰和消石灰进行造球试验，研究 3 种熔剂的造球性能(膨润土配比为 0.6%)，造球试验在直径为∅1 000 mm 的圆盘造球机内进行造球，造球时间为 10 min，随机筛取 10～12.5 mm 的生球进行落下强度、抗压强度、水分和爆裂温度分析试验；然后选择造球性能好的熔剂，进行膨润土配比从 0.6%降低至 0.5%、0.4%、0.3%、0.2%、0.1%和 0%的造球试验，通过试验研究降低膨润土配比，降低球团矿 SiO_2 质量分数的可行性；最后，筛取 10～16 mm 的生球进行焙烧试验，焙烧试验在直径为∅120 mm 的球团焙烧杯内进行，焙烧过程模拟带式焙烧机的热工过程，包括鼓风干燥、抽风干燥、预热、焙烧、均热和冷却过程，两种焙烧过程的最高温度分别为 1 250 ℃和 1 265 ℃，总的焙烧时间为 52 min，焙烧后的球团矿抗压强度按国标 GB/T 14201—2018 进行测定，还原度、还原膨胀率和低温还原粉化率指标分别按国标 GB/T 13241—2017、GB/T 13240—2018、GB/T 31923.2—2015 进行测定，并用扫描电镜研究球团矿的微观结构。

3　结果及分析

3.1　不同熔剂对生球强度的影响

不同配比熔剂下的生球落下强度和抗压强度结果如图 3。由图 3 可知，随着熔剂配比的增加，生球落下强度和抗压强度都有提高的趋势，但在相同配比下，配加消石灰的生球落下强度相对最高，当消石灰配比提高到 3%时，生球平均落下强度达到 5.8 次/(0.5 m)，可以满足生产要求；而配加石灰石粉时，在膨润土配比为 1.0%时，难达到 5 次/(0.5 m)以上要求，这主要与石灰石粉颗粒形貌显棱角和砾石状，不易黏结，而消石灰颗粒形貌呈现絮凝状，有较好的吸水和黏结性有关(图 4)；配加白灰的生球落下强度高于配加石灰石粉的生球，但不如配加消石灰的生球强度，所以从造球性能及生球强度看，选择使用消石灰。

图 5 是消石灰比例为 3%时，进一步降低膨润土配比的生球落下强度和抗压强度结果。由图 5 可知，此条件下，即使在不配加膨润土的情况下，生球落下强度也可达到 5 次/(0.5 m)，生球抗压强度达到 9.5 N/P，基本可以满足生产要求，说明消石灰具有很好的黏结性，可以



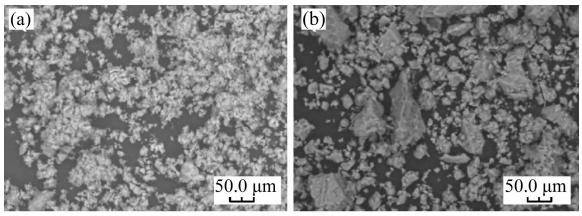
(a) 落下强度；(b) 抗压强度

1—白灰；2—消石灰；3—石灰石。

图 3　不同熔剂配比下生球强度(膨润土配比 1.0%)

Fig. 3　Strength of green balls with different fluxes(bentonite ratio 1.0%)

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



(a) 消石灰；(b) 石灰石粉

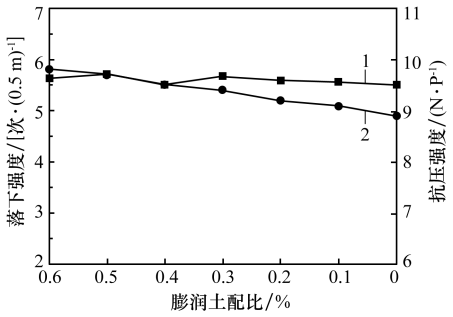
图4 消石灰和石灰石颗粒形貌

Fig. 4 Particle morphology of hydrated lime and lime stone

大幅度降低膨润土配比，有利于生产低硅碱性球团矿。

3.2 不同熔剂对生球爆裂温度的影响

不同熔剂及配比对生球爆裂温度的影响试验结果见表3。由表3可知，随着熔剂比例的增加，生球爆裂温度都降低，在3种熔剂中，石灰石对生球爆裂温度的影响相对较小。当石灰石配比在4.0%以下时，生球爆裂温度能达到650 ℃以上。当消石灰配比为3.0%时，生球爆裂温度在530 ℃左右，当消石灰配比提高到4.0%时，爆裂温度降低至490 ℃。配加白灰的生球爆裂温度较低，当白灰配比为4.0%时，生球爆裂温度只有380 ℃左右，主要是配加白灰的生球在干燥过程中存在白灰吸水体积增大和再分解的问题，导致生球爆裂温度明显降低。



1—抗压强度；2—落下强度。

图5 膨润土配比与生球强度关系

Fig. 5 Strength of green balls at different bentonite ratio

表3 生球水分和爆裂温度

Table 3 Moisture and bursting temperature of green balls

熔剂种类	配比(质量分数)/%					
	2.0		3.0		4.0	
	水分/%	爆裂温度/℃	水分/%	爆裂温度/℃	水分/%	爆裂温度/℃
消石灰	9.2	560	9.2	520	9.2	490
石灰石	9.2	>650	9.2	>650	9.2	650
白灰	9.2	440	9.2	420	9.2	390

当消石灰配比为3%时，不同水分下生球爆裂温度见图6。由图6可知，此条件下，当水分从9.5%降低至8.6%时，生球爆裂温度可从490 ℃左右提高至570 ℃。当生球水分降低至8.4%时，爆裂温度可以提高到600 ℃左右。说明配加消石灰的生球适当控制水分可以缓解生球爆裂的问题。

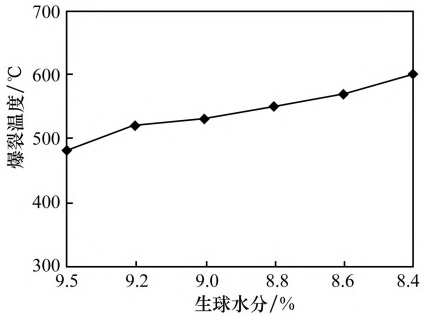


图6 水分对生球爆裂温度的影响

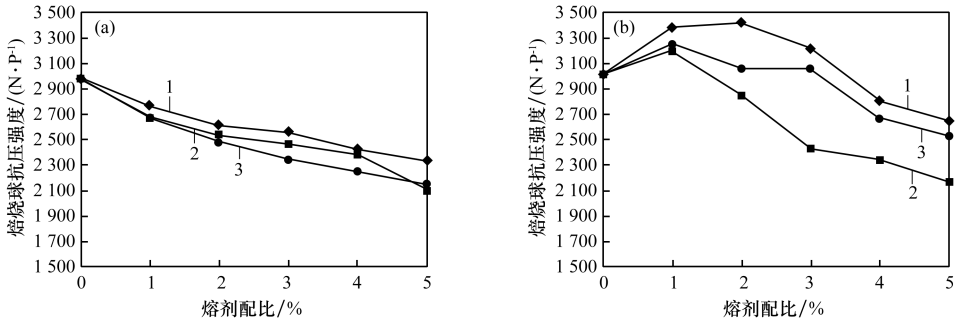
Fig. 6 Influence of moisture on green ball bursting temperature

3.3 不同熔剂对球团矿抗压强度的影响

图7是焙烧球抗压强度随不同熔剂及配比的变化情况。由图7(a)可知，当最高焙烧温度为1 250 ℃时，随着3种熔剂配比的增加，焙烧球的抗压强度都呈下降趋势，其中配加石灰石粉的球团矿抗压强度下降最明显。其中，配加5%石灰石粉的球团矿抗压强度只有2 100 N/P，而配加5%消石灰的球团矿抗压强度为2 140 N/P，这与消石灰和石灰石在焙烧过程中存在分解吸热有关。由图7(b)可知：当焙烧温度提高至1 265 ℃时，配加熔剂的球团矿抗压

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

强度能提高，3 种熔剂中，配加消石灰的球团矿抗压强度相对最高。其中，配加 2% 和 3% 消石灰的球团矿抗压强度分别达到 3 415 N/P 和 3 210 N/P。配加白灰的球团矿因出现了爆裂，所以抗压强度低于配加石灰石粉的球团矿。可见，3 种熔剂中，消石灰对球团矿抗压强度影响小，且在提高焙烧温度的条件下，可以获得高强度的球团矿，但需要控制生球水分和干燥温度，避免生球出现爆裂问题。



（a）焙烧球抗压强度（最高温度 1 250 ℃）；（b）焙烧球抗压强度（最高温度 1 265 ℃）

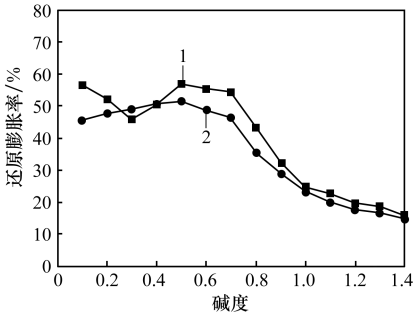
1—消石灰；2—白灰；3—石灰石。

图 7　不同焙烧温度下熔剂配比对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 7　Effect of flux ratio on compressive strength of pellet at different firing temperatures

3.4　碱度对低硅球团矿还原膨胀率的影响

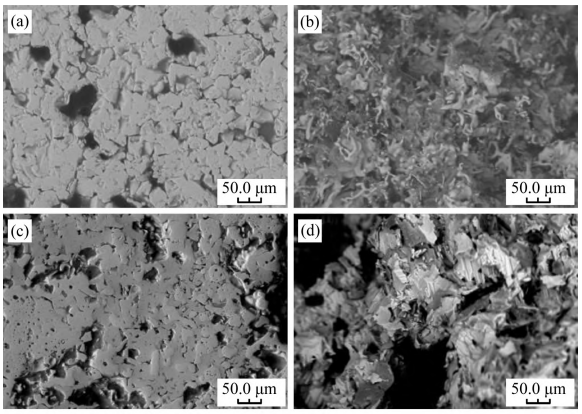
当 SiO_2 质量分数分别为 2.0% 和 2.5% 时，不同碱度下的还原膨胀率如图 8 所示。由图 8 可知：在碱度为 0.8 以下时，两个球团矿的还原膨胀率都在 40% 以上，无法满足高炉使用要求；当碱度提高至 1.0 时，球团矿的还原膨胀率分别降低至 23.5% 和 24.4%，仍不能满足高炉 20% 以下的要求；而当碱度提高至 1.1 以上时，球团矿的还原膨胀率可降低至 20% 以下；当碱度为 1.2 时，SiO_2 质量分数为 2.0% 和 2.5% 球团矿的还原膨胀率分别为 19.3% 和 17.5%。说明SiO_2质量分数为2.0%~2.5%的低硅球团矿，在高碱度（大于 1.1）情况下，还原膨胀率可以满足高炉入炉要求，且当碱度达到 1.4 时，还原膨胀率可降至 14.5%。这主要是因为在低碱度时，球团内部物相为赤铁矿，液相和铁酸钙物相少[9(a)]，所以还原过程容易出现铁晶，如[9(b)]导致球团矿还原膨胀。碱度高时，球团内部出现较多的液相和铁酸钙[9(c)]，所以抑制还原过程铁晶须的出现[9(d)]，从而控制低硅球团矿的还原膨胀率。



w（SiO_2）/%：1—2.0；2—2.5。

图 8　球团矿还原膨胀率随碱度变化

Fig. 8　Pellet reduction swelling index changes with basicity



（a）焙烧球团矿扫描电镜分析（R=0.8）；（b）还原后球团矿扫描电镜分析（R=0.8）；（c）焙烧球团矿扫描电镜分析（R=1.2）；（d）还原后球团矿扫描电镜分析（R=1.2）

图 9　不同碱度下球团矿的微观结构

Fig. 9　Microstructure of pellets with different basicity

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

3.5 低硅碱性球团矿冶金性能研究

低硅碱性球团矿的还原性，低温还原粉化指数结果如表5所示。由表5可知，与酸性球团矿相比，低硅碱性球团矿的还原度明显改善，SiO_2质量分数为2.0%，碱度为1.2的球团矿还原度达到86.1%，比酸性球团矿提高了17.2%。还原度高，有利于高炉间接还原的进行和降低燃料消耗。此外，随着碱度的提高，低硅碱性球团矿的低温还原粉化指数降低，但碱度为1.2的低硅碱性球团矿$RDI_{+3.15\ mm}$达到了90.4%。

表5 低硅碱性球团矿冶金性能

Table 5 Metallurgical properties of low silicon fluxed pellet

球团矿	还原度/%	低温还原粉化指数/%		
		$RDI_{+6.3\ mm}$	$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$
酸性球(SiO_2=3.5%，R_2=0.1)	68.9	95.3	96.5	1.2
球团矿(SiO_2=2.0%，R_2=1.1)	84.5	84.5	90.2	2.1
球团矿(SiO_2=2.0%，R_2=1.2)	86.1	85.3	90.4	2.5
球团矿(SiO_2=2.0%，R_2=1.3)	87.4	84.6	87.5	2.6

为了研究低硅碱性球团矿对综合炉料熔滴性能的影响，进行了表6所示3个方案的综合炉料熔滴性能分析试验，表7为试验结果。由表7可知，使用低硅碱性球团矿，并提高球团矿配比后，综合炉料熔滴过程的软化温度区间从128 ℃缩小至119 ℃，最大压差从6 373 Pa降低至5 830 Pa，熔滴过程的S值也相应降低。低硅碱性球团矿配比进一步提高至60%时，综合炉料熔滴过程的最大压差和S值进一步降低，说明使用低硅碱性球团矿后，综合炉料熔滴性能改善。

表6 熔滴试验方案(质量分数)

Table 6 Softening and melting test scheme %

编号	烧结矿	酸性球团矿	低硅碱性球团矿	块矿
方案1	67	28	0	5.0
方案2	45	15	35	5.0
方案3	35	0	60	5.0

表7 熔滴性能试验结果

Table 7 Result of softening and melting test

编号	软化开始温度/℃	软化终了温度/℃	软化温度区间/℃	软熔开始温度/℃	最大压差/Pa	滴落温度区间/℃	滴落温度/℃	熔滴特性值(S)/(kPa·℃)
方案1	1 204	1 332	128	1 365	6 373	81	1 446	476
方案2	1 206	1 325	119	1 369	5 830	74	1 443	395
方案3	1 219	1 344	125	1 367	5 788	70	1 437	371

4 低硅碱性球团矿的生产及大型高炉应用

为了生产碱性球团矿，京唐公司建立了2条2.5×10^5 t的消石灰生产线。2019年5月份开始，首钢京唐公司在504 m^2带式焙烧机使用消石灰生产低硅碱性球团矿，表8是基准期酸性球团矿和低硅碱性球团矿指标情况。由表8可知，低硅碱性球团矿的SiO_2质量分数为2.1%，比基准期酸性球团矿降低1.2%，碱度

表8 球团矿主要指标

Table 8 Main indexes of pellet

试样	化学成分(质量分数)/%			抗压强度/(N·P^{-1})	还原膨胀率/%	还原度/%
	TFe	SiO_2	R_2			
基准期球团矿	65.9	3.3	0.10	3 263	17.9	69.5
低硅碱性球团矿	66.0	2.1	1.15	3 280	16.5	86.3

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

为 1.15，低硅碱性球团矿抗压强度保持在 3 200 N/P 以上，还原膨胀率从 17.9% 降低为 16.5%，还原度从 69.5% 提高到了 86.3%。

京唐公司二期工程建成后，3 座 5 500 m^3 高炉的球团矿配比从 28% 提高至 55%（20% 酸性球团矿 +35% 低硅碱性球团矿），烧结矿使用占比从 67% 降低至 40% 左右。表 9 是球团矿配比提升前后高炉炉料结构及主要指标。由表 9 可知：高比例使用低硅碱性球团矿后，吨铁高炉渣量从 280 kg/t 降低至 215 kg/t，吨铁燃料比从 500 kg/t 降低至 480 kg/t，取得了良好的技术经济指标。球团工序的 CO_2 排放约为烧结工序的 35%，所以将球团矿配比提高至 55%，可降低高炉燃料消耗，吨铁 CO_2 排放也随之降低约 10%。

表 9　高炉炉料结构指标情况

Table 9　Blast furnace burden structure

项目	炉料结构(质量分数)/%			吨铁高炉指标		
	烧结矿	酸性球团	低硅碱性球	块矿	渣量/(kg·t^{-1})	燃料比/(kg·t^{-1})
基准期	67	28	0	5	280	500
使用期	40	20	35	5	215	480

5　结　论

（1）消石灰具有良好的黏结性，有利于生产低硅碱性球团矿，同时对球团矿抗压强度影响相对较小；当将 SiO_2 质量分数为 2.0% 的低硅球团矿的碱度提高至 1.1 以上时，球团矿还原膨胀率可控制到 20% 以下；低硅碱性球团矿还原性好，有利于改善综合炉料熔滴性能。

（2）首钢京唐公司使用消石灰生产低硅碱性球团矿，当 SiO_2 质量分数为 2.1%，碱度为 1.15 时，还原膨胀率为 16.5%，还原度为 86.3%。3 座 5 500 m^3 高炉配加低硅碱性球团矿(将球团总配比从 28% 提高至 55%)后，高炉渣量和燃料消耗明显降低，吨铁 CO_2 排放降低约 10%，取得了良好的技术经济指标和降碳效果。

（3）低硅矿粉资源有利于生产低硅碱性球团矿，并适合高炉高比例使用。目前在双碳目标背景下，国内外选矿应进一步提升提铁降硅技术，提升选矿铁品位，降低脉石含量，然后制备低硅球团矿用于高炉炼铁或直接还原铁，从而进一步促进钢铁行业的节能减排。

参考文献：

[1] 王维兴．提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[C]//中国金属学会．全国高炉炼铁学术年会论文集．北京：冶金工业出版社，2018：16－20.
WANG Weixing. Increasing the proportion of pellets in blast furnace burden and promoting energy conservation and emission reduction[C]//The Chinese Society for Metals. Symposium of the National Annual Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press 2018:16－20.

[2] 吴钢生，边美柱，沈峰满．碱性含镁球团矿的应用及合理炉料结构研究[J]．钢铁，2006，41(12)：19－22.
WU Gangsheng, BIAN Meizhu, SHEN Fengman. Use of magnesium-bearing basic pellet and reasonable burden design[J]. Iron and Steel. 2006, 41(12): 19－22.

[3] 青格勒，吴锵，刘洪松，等．焙烧温度对低硅含镁球团矿还原膨胀率的影响及机理[J]．中国有色金属学报，2015，25(10)：2905－2912.
QING Gele, WU Keng, LIU Hongsong, et al. Study of mechanism and effect of firing temperature on reduction swelling of low silicon magnesium pellets[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2015, 25(10): 2905－2912.

[4] 刘文强，韩闯闯，李杰．$CaCO_3$ 分解对熔剂性球团强度的影响[J]．钢铁，2020，55(12)：18－23.
LIU Wenqiang, HAN Chuangchuang, LI Jie. Effect of $CaCO_3$ decomposition on the strength of flux pellets[J]. Iron and Steel. 2020, 55(12): 18－23.

[5] 姜涛，范晓慧，李光辉．熔剂性球团矿的生产与理论技术[C]//中国金属学会．全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集．北京：冶金工业出版社，2014：92－100.
JIANG Tao, FAN Xiaohui, LI Guanghui. Production theory and technology of flux pellet[C]//The Chinese Society for Metals. National ironmaking production technology conference and annual ironmaking Academic Conference. Beijing: Metallurgi-

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

cal Industry Press,2014:92 – 100.

[6] 李杰,信自成,杨爱民. 碱度对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):35 – 41.
LI Jie,XIN Zihceng,YANG Aimin. Effect of basicity on quality of magnesium fluxed pellets. Iron and steel[J]. 2017,52(7):35 – 41.

[7] HANNINEN M J,SEPPANEN T E,SUNDBERY C R. Internal carbon additon during hematite fluxed pellet production at Tilen. Minerals& Metallurgical processing[J]. 2003,20(4):197 – 198.

[8] PRUSTI Pallishree,BARIK Kashinath,DASH Nilima. Effect of limestone and dolomite flux on the quality of pellets using high LOI iron ore[J]. Powder Technology,2020,16(3):14 – 17.

[9] 梁利生,周琦,易陆杰. 宝钢湛江钢铁熔剂性球团稳定生产实践[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2018:1 – 6.
LIANG lisheng,ZHOU Qi,YI Lujie. Production performance of grate-kiln fluxed pellet in Baosteel Zhanjiang iron and steel plant//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference. Beijing:Metallurgical Industry Press,2018:1 – 6.

[10] 李晓波,李孟土,易陆杰. 湛江球团配矿结构分析[J]. 烧结球团,2018,43(4):49 – 53.
LI Xiaobo,LI Mengshi,YI Lujie,Analysis of proportioning structure of zhanjiang pelletizing plant[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):49 – 53.

(上接第64页)

[12] DWARAPUDI S,GHOSH T K,SHANKAR A,et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2011,99(4):43 – 53.

[13] 章苇玲,牛长胜,王亚锋. 湛钢高炉配加金属化球团冶炼实践[J]. 炼铁,2019,38(4):27 – 29.
ZHANG Weiling,NIU Changsheng,WANG Yafeng. Smelting practice of Zhanjiang Steel blast furnace with metallized pellets[J]. Ironmaking,2019,38(4):27 – 29.

[14] 张旭孝,韩宏亮,姜曦. 高炉添加金属化球团炉料的冶金性能试验[J]. 中国冶金,2015,25(5):15 – 18.
ZHANG Xuxiao,HAN Hongliang,JIANG Xi. Metallurgical properties of blast furnace added with metallized pellet charge[J]. China Metallurgy,2015,25(5):15 – 18.

[15] 陈宏. HYL – Ⅲ海绵铁生产技术[J]. 钢铁,1999,34(11):64 – 67.
CHEN Hong. HYL – Ⅲ Sponge iron production technology[J]. Iron & Steel,1999,34(11):64 – 67.

[16] 汪琦. 铁矿含碳球团技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
WANG Qi. Carbon pellet technology of iron ore[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2005.

(上接第69页)

[6] GAN Min,FAN Xiaohui,JI Zhiyun,et al. Effect of distribution of biomass fuel in granules on iron ore sintering and NO_x emission[J]. Ironmaking & Steelmaking,2014,41(6):430 – 434.

[7] JI ZhiYun,FAN Xiaohui,GAN Min,et al. Assessment on the application of commercial medium-grade charcoal as a substitute for coke breeze in iron ore sintering[J]. Energy & Fuels,2016,30(12):10448 – 10457.

[8] CASTRO J A D,SILVA L M D,MEDEIROS G A D,et al. Analysis of a compact iron ore sintering process based on agglomerated biochar and gaseous fuels using a 3D multiphase multicomponent mathematical model[J]. Journal of Materials Research and Technology,2020,9(3):6001 – 6013.

[9] GAN Min,FAN Xiaohui,CHEN Xuling,et al. Reduction of pollutant emission in iron ore sintering process by applying biomass fuels[J]. ISIJ International,2012,52(9):1574 – 1578.

[10] FAN Xiaohui,JI Zhiyun,GAN Min,et al. Influence of preformation process on combustibility of biochar and its application in iron ore sintering[J]. ISIJ International,2015,55(11):2342 – 2349.

[11] 甘敏. 生物质能铁矿烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
GAN Min. Fundamental research on iron ore sintering with biomass energy[D]. Changsha:Central South University. 2012.

[12] CHENG Zhilong,YANG Jian,ZHOU Lang,et al. Experimental study of commercial charcoal as alternative fuel for coke breeze in iron ore sintering process[J]. Energy Conversion and Management,2016,125:254 – 263.

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