不同配矿结构下碱度对生球性能及干燥特性的影响

吴 建[1]，周冰致[1]，周 峰[1]，张汉泉[2]，路漫漫[2]
（1. 武钢资源集团鄂州球团有限公司 湖北 鄂州 436000；2. 武汉工程大学
资源与安全工程学院，湖北 武汉 430205）

摘要：鄂州球团造球原料粒度和 SiO_2 含量随外购矿种类变化和配矿方案调整波动较大，在生产碱性球团时，需要考虑配矿结构对球团性能的影响。针对上述问题，本研究以 5 种鄂州球团生产用料为研究对象，通过改变造球原料配比与熔剂添加量，调整原料结构与碱度，查明不同配矿结构下碱度对生球性能和干燥特性的影响。结果表明，当 MUSA 精矿占比为 50% 时，生球性能较优，在碱度为 0.8 条件下分别使用石灰石、活性灰和石小粒作为熔剂时，3 种碱度的生球落下强度分别为 6.9、6.4 和 5.9 次/(0.5 m)，抗压强度分别为 23.5、26.0 和 23.2 N/P，爆裂温度大于 450 ℃。当干燥时间为 10 min，各方案碱性生球均干燥完成，干燥速率略慢于自然碱度生球(8 min 左右)。

关键词：碱性球团；配矿结构；生球性能；干燥特性
中图分类号：TF046.6；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)04－0063－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.059

Effect of alkalinity on the properties and drying characteristics of green pellets under different ore blending structures

WU Jian[1], ZHOU Bingzhi[1], ZHOU Feng[1], ZHANG Hanquan[2], LU Manman[2]
(1 Ezhou Pellet Co., Ltd. of Wuhan Iron and Steel Resource Group, Ezhou 436000, Hubei, China;
2 College of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: The particle size and SiO_2 content of the raw materials for Ezhou pellet production fluctuate greatly with changes in the type of purchased ore and adjustments to the blending scheme. When producing alkaline pellets, it is necessary to consider the impact of blending structure on pellet performance. In response to the above issues, this study focuses on five types of materials used in the production of Ezhou pellets. By changing the ratio of pelletizing raw materials and the amount of flux ore added, adjusting the structure and alkalinity of raw materials, the influence of alkalinity on the performance and drying characteristics of green pellets under different ore blending structures is investigated. The results showed that when the proportion of MUSA concentrate was 50%, the performance of the green balls was better. When limestone, active ash, and small stone particles were used as fluxes under the condition of alkalinity of 0.8, the falling strength of the green balls for the three alkalinity was 6.9, 6.4, and 5.9 times/(0.5 m), the compressive strength was 23.5, 26.0, and 23.2 N/P, when the drying time was 10 min, the alkaline pellet of each scheme was dried and the drying rate was sightly slower them that of the nature alkaline pellet(about 8 minutes).

Key words: alkaline pellet; ore blending structure; green pellet performance; drying characteristics

收稿日期：2023－07－16；**修回日期**：2023－08－21
基金项目：湖北省重点研发计划资助项目(2022BCA062)
作者简介：吴 建(1983—)，男，工程师，从事烧结球团相关技术研究。
通信作者：路漫漫(1989—)，男，讲师，从事复杂铁矿综合利用、铁矿造块等研究。

近年来，随着钢铁行业“双碳”政策和高炉精料方针的实行，高品位优质球团矿在高炉炉料中的占比越来越大[1-3]。传统的酸性球团矿使用高品位铁精矿为原料生产，在高温下固相固结，因此不需要额外提供碱性熔剂[4-5]。但高炉对于炉料碱度有一定要求，仅提高酸性球团矿的炉料占比，无法满足高炉冶炼对钙、镁等成分的要求，不利于高炉顺行[6]。因此，若能生产合适的碱性球团矿替代高碱度烧结矿，对实现全球团入炉有利[7]。碱性球团矿生产一般使用石灰石、生石灰或消化石灰作为熔剂，球团二元碱度在0.6以上。经过高温焙烧后，球团内会产生少量铁酸钙、硅酸钙液相，有利于球团固结[8-10]。

武钢资源集团鄂州球团有限公司(简称鄂州球团)拥有一条亚洲最大的500万t/a链算机—回转窑—环冷机氧化球团生产线，该厂以外购铁精粉矿为主要造球原料，其主要特点是粒度和SiO_2含量随外购矿种类变化和配矿方案调整波动较大。若要利用鄂州球团现有原料条件生产碱性球团主要问题在于外购精矿没有经过选矿脱硅处理，其SiO_2含量偏高，同时钙、镁含量低，需外配熔剂矿粉以生产碱性球团。此外，利用鄂州球团原料生产碱性球团时，还需考虑配矿结构对成球行为和球团性能的影响。

综上，本文利用鄂州球团外购铁精矿为原料制备碱性球团，通过调节熔剂配比，控制球团CaO含量[考虑二元碱度$w(CaO)/w(SiO_2)$]，在不同配矿结构下，研究了碱度对成球行为和球团性能的影响规律，以期结果能为现场生产碱性球团提供技术指导和理论支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

本文使用的5种铁精矿取自鄂州球团料场，分别为凹山精矿、巴西精矿、MUSA精矿、大冶铁精矿、金山店精矿。5种铁精矿主要化学组成见表1。

由表1可以看出，5种铁精矿中，金山店精矿和大冶铁精矿的$w(TFe)$品位较高，分别为67.36%和67.18%，其余3种铁精矿的$w(TFe)$均在65%左右。但是这几种铁精矿中$w(SiO_2)$都较高，特别是MUSA精矿，其$w(SiO_2)$高达12.91%，需要外配大量熔剂以提高成品球碱度，从而降低了成品球铁品位，不利于生产碱性球团。对于武钢资源自产金山店和大冶铁矿精矿，其中含有一定CaO、MgO，自然碱度(二元)分别达到0.27和0.25。

表1 各铁精矿主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions analysis results of each iron concentrate %

矿种	TFe	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5
凹山精矿	65.94	0.57	0.81	6.39	2.90	0.40
巴西精矿	65.06	0.05	0.35	5.59	1.57	0.33
MUSA	64.25	0.15	0.30	12.91	2.45	0.24
金山店	67.36	1.74	3.17	6.42	2.13	0.08
大冶铁矿	67.18	1.23	2.82	5.00	2.01	0.04

试验共使用3种钙质熔剂，均来自宝武资源集团乌龙泉矿，分别为石灰石、活性灰和石小粒(一种钙含量较低的石灰石)，它们的化学成分及<0.074 mm粒级占比见表2。

表2 熔剂主要化学成分及<0.074 mm粒级占比(质量分数)

Table 2 Main chemical compositions of flux and proportion of <0.074 mm particle size %

熔剂	CaO	MgO	SiO_2	Na_2O	Al_2O_3	-0.074 mm占比
石灰石	58.29	0.44	0.31	0.16	0.07	81
活性灰	74.09	1.14	0.87	0.21	0.18	86
石小粒	55.91	0.35	0.11	0.08	0.04	84

由表2可知：石灰石、活性灰和石小粒中$w(CaO)$均较高，分别为58.29%、74.09%和55.91%；3种熔剂中的$w(SiO_2)$均低于1%，适合作为碱性球团熔剂使用；3种熔剂经过干磨后，粒级较细，<0.074 mm质量分数均在80%以上，满足造球要求。

1.2 试验方法

试验中使用凹山、巴西、MUSA、大冶、金山店5种铁精矿为造球原料，根据原料性质和现场生产实际情况制定了4种配矿方案，具体见表3。

表 3　造球原料配矿方案(质量分数)

Table 3　Blending scheme of pelletizing raw materials　%

方案	大冶精矿	金山店精矿	凹山精矿	MUSA 矿	巴西精矿
①	20	20	—	30	30
②	20	20	10	30	20
③	20	20	10	50	—
④	20	20	10	10	40

2　结果与讨论

2.1　熔剂用量及种类对生球性能的影响

2.1.1　石灰石用量影响

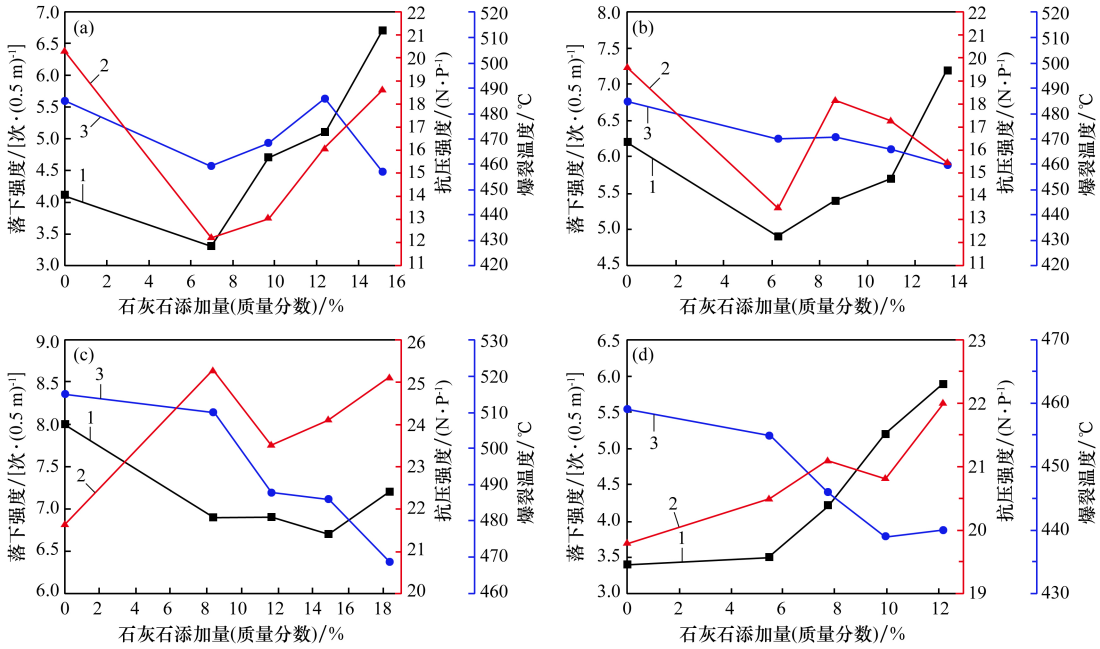
在膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件下，研究了石灰石用量对各配矿方案生球性能的影响，造球原料碱度分别控制为自然碱度、0.6、0.8、1.0 和 1.2，结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出：方案①、②、④在 0.6 碱度下的生球强度会略低于自然碱度生球，随着石灰石添加量的增加，生球强度呈上升的趋势，其主要原因可能是细粒级的石灰石加入后，铁精矿颗粒之间的空隙改善，丰富颗粒之间的毛细水化层，提高颗粒间的相互吸引力，从而提高生球强度；方案③生球强度会随着石灰石用量的增加而降低，但整体降幅不大。主要原因是其铁精矿粒度较细，成球性能优良，加入石灰石熔剂后，铁精矿颗粒间的毛细水化层被破坏，生球强度恶化；随着生球碱度的增加，爆裂温度略微下降，各方案生球爆裂温度均大于 450 ℃。

2.1.2　活性灰用量影响

在膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件下，研究了活性灰用量对各配矿方案生球性能的影响，造球原料碱度分别控制为自然碱度、0.6、0.8、1.0 和 1.2，结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出，对于配矿方案①、②、③生球而言，添加活性灰熔剂时，其生球强度低于自然碱度下的生球强度。但随着活性灰熔剂添加量的增加，生球强度随之增加，整体上与自然碱度生球强度差别不大。方案④中，碱度对于生球落下强度影响不大，抗压强度随着活性灰添加量的增加而增加。方案①、③、④下的生球爆裂温度均会随着活性灰添加量的增加而下降，方案②各碱度生球爆裂温度变化不大。在碱度为0.8时，

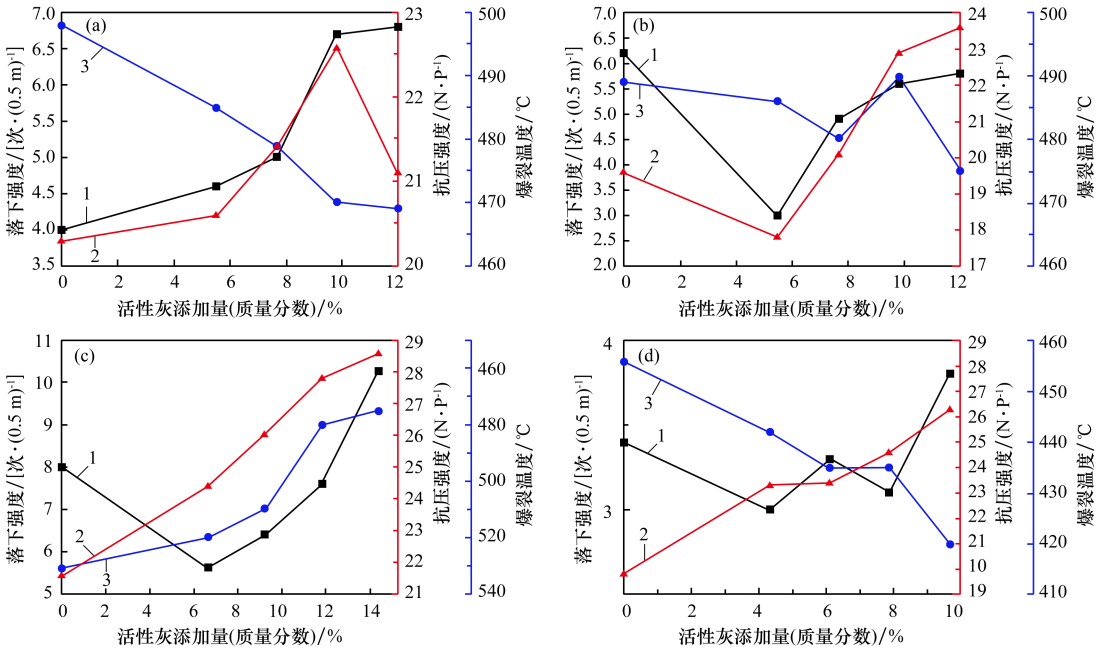


1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

（a）方案①；（b）方案②；（c）方案③；（d）方案④

图 1　石灰石添加量对生球性能的影响

Fig. 1　Influence of limestone addition amount on performance of green pellet



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

（a）方案①；（b）方案②；（c）方案③；（d）方案④

图 2 活性灰添加量对生球性能的影响

Fig. 2 Effect of active ash addition on the performance of green pellets

各方案生球抗压强度分别为 5.0、4.9、6.4、3.3 次/(0.5 m)。考虑到碱度过高，在预热和焙烧过程中会产生液相，恶化窑内气氛，产生“葡萄球”和“结圈”现象，因此该条件下，0.8 碱度为宜。

2.1.3 石小粒用量影响

在膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件下，研究了石小粒用量对各配矿方案生球性能的影响，造球原料碱度分别控制为自然碱度、0.6、0.8、1.0 和 1.2，结果如图 3 所示。

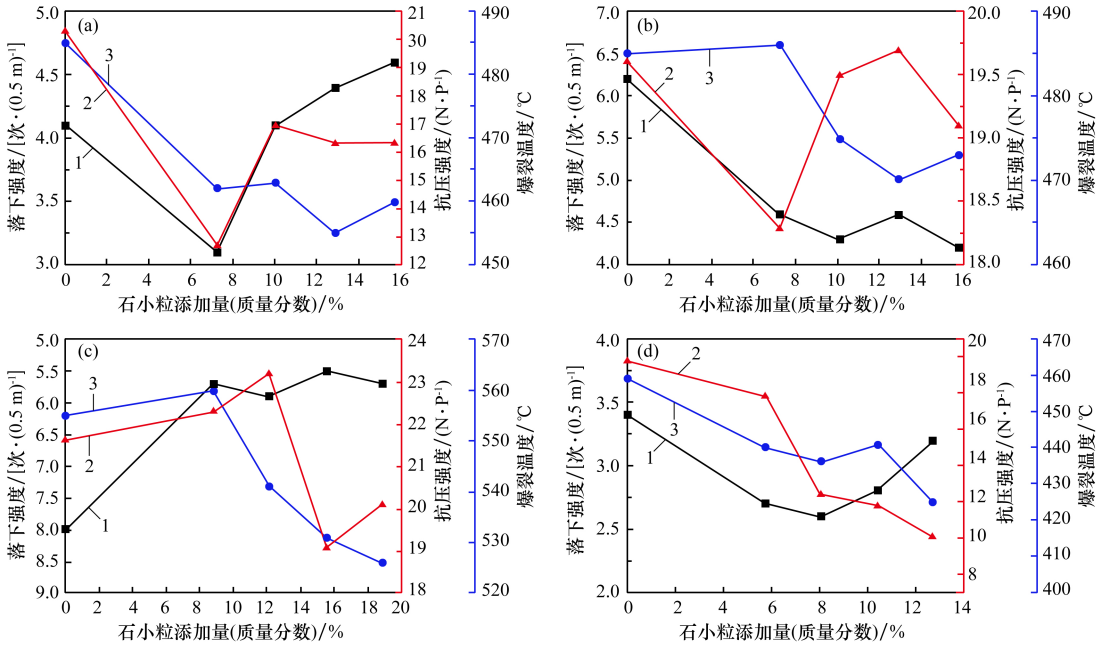
由图 3 可以看出，对于配矿方案①、④而言，在碱度为 0.6 时，生球落下强度低于自然碱度生球，随着石小粒添加量的增加，生球落下强度逐渐提升，在碱度为 1.2 时，方案①、④生球落下强度分别为 4.6 次/(0.5 m)和 3.2 次/(0.5 m)。对于方案②、③来说，加入石小粒熔剂后，生球落下强度呈下降的趋势，在 0.6 ~ 1.2 碱度范围内，生球落下强度保持在 4.3 次/(0.5 m)和 5.7 次/(0.5 m)左右，变化不大。在生球碱度达到 0.8 后，方案①、②、③生球抗压强度均与自然碱度生球相当，在 15 N/P 以上，而方案④中生球抗压强度随碱度的提高而下降，由自然碱度下的 19.8 N/P 下降至 1.2 碱度下的 10.1 N/P。由于配矿方案②、③中铁精矿粒度较细，在加入石小粒后，铁精矿颗粒间的水化膜被破坏，生球强度恶化。整体而言，石小粒的加入对于生球性能呈负面影响。

2.2 生球干燥特性研究

2.2.1 配矿方案影响

不同配矿方案下，铁精矿粒级不同，其干燥速率也各不相同。固定干燥温度为 200 ℃，干燥风速为 1 m/s，在膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件下，考查不同配矿方案对生球干燥速率的影响，结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出，不同配矿方案下，生球的干燥速率也各不相同。其中，方案③生球干燥速率最快，在 5 min 时，就已基本完成干燥。方案①次之，需要 8 min 时间，方案②和④的生球干燥速率相当，在 10 min 后，完成干燥。从各方案铁精矿配比来看，方案①、③中，MUSA 和巴西精矿用量较多，这两种矿物粒度较粗，在球团内部可形成细小孔道供水蒸气排出，加快了生球干燥速率。



1—落下强度；2—抗压强度；3—爆裂温度。

（a）方案①；（b）方案②；（c）方案③；（d）方案④

图 3　石小粒添加量对生球性能的影响

Fig. 3　Effect of the addition amount of small stone particles on the performance of green pellets

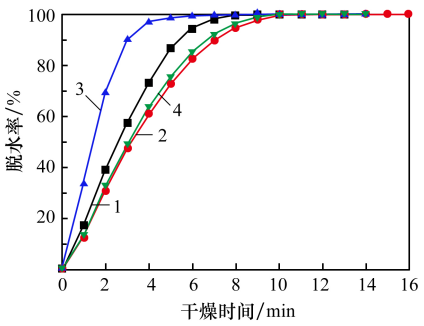


图 4　配矿方案对生球干燥速率的影响

Fig. 4　Influence of ore blending scheme on the drying rate of green pellets

2.2.2　干燥温度影响

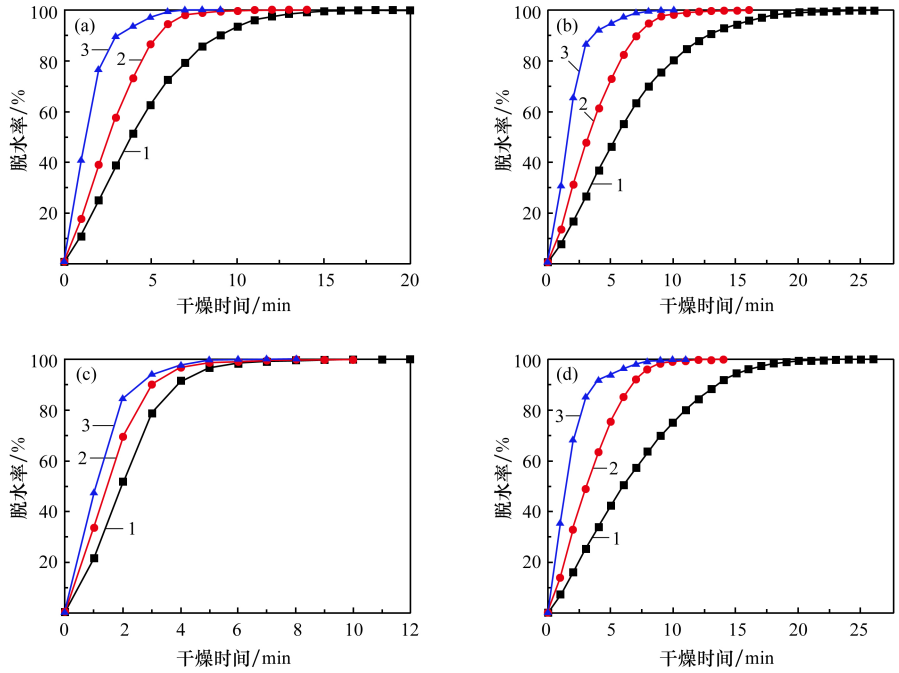
生球干燥过程中最主要的因素是干燥介质的温度和流速。干燥介质的温度对干燥过程影响最大。试验在 4 种不同配矿方案下，采用膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件，保持干燥风速 1 m/s，考查不同干燥温度对生球干燥速率的影响，结果如图 5 所示。

由干燥机理可知，干燥介质与生球二者的温差越大，则所需要的干燥时间就越短，为了加速干燥，总是希望干燥介质的温度尽量高。从图 5 可知，随着温度的升高，各方案生球干燥所需时间缩短，干燥速率明显加快。对于方案③生球而言，其内部空隙较多，在低温下干燥速率就很快，提高干燥温度对其生球干燥速率的提升作用没有其他 3 种生球明显。越是内部紧密的生球，提高干燥温度后，生球干燥速率提升就越明显。但是，当生球内部过于致密后，过高的干燥温度会导致生球爆裂，增加料层粉化率，恶化焙烧气氛[11-13]。

2.2.3　干燥风速影响

在干燥温度一定时，热风速率增加，单位时间内供应的热量增加，速率的增大可以保证球表面的蒸气压与热风中蒸气压，缩短干燥时间。试验在 4 种不同配矿方案下，采用膨润土用量为 1.5%，造球时间为 10 min 的优化条件，保持干燥温度为 200 ℃，考查不同干燥风速对生球干燥速率的影响，结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出，对于方案②、④而言，当干燥风速增大到 1.2 m/s 时，干燥时间由 10 min 缩短至 6 min。干燥风速对于方案①生球干燥速率影响不明显，3 种风速条件下，干燥时间相当。方案③生球在风速为 0.8 m/s 时，干燥时间为 10 min，明显长于 1.2 m/s 时的 6 min，1.0 m/s 和 1.2 m/s 风速条件下时，干燥时间相当。

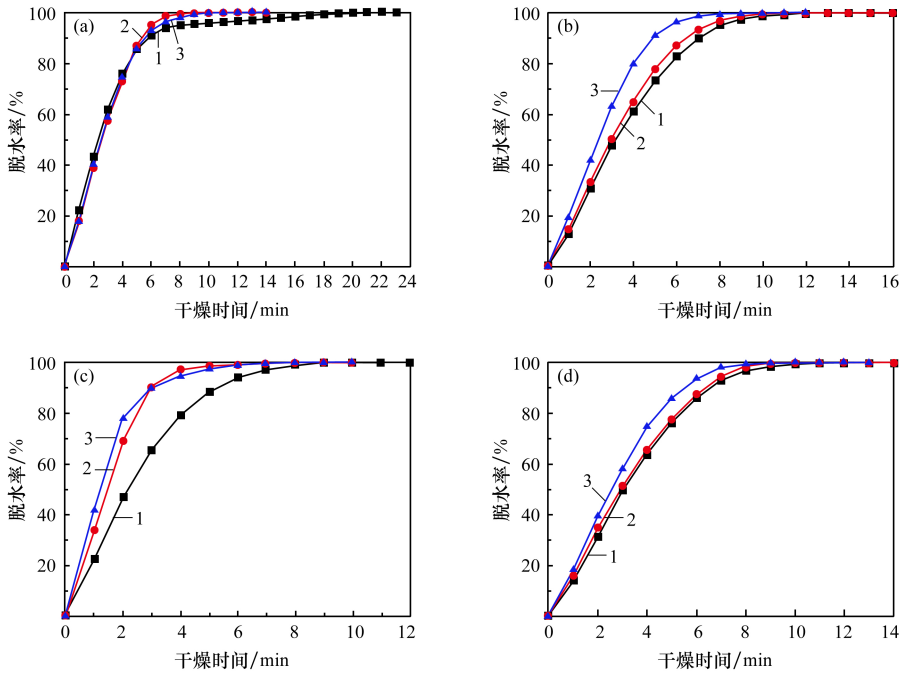


干燥温度/℃：1—100；2—200；3—400。

（a）方案①；（b）方案②；（c）方案③；（d）方案④

图 5 干燥温度对生球干燥速率的影响

Fig. 5 Effect of drying temperature on the drying rate of green pellets



干燥风速/($m \cdot s^{-1}$)：1—0.8；2—1.0；3—1.2。

（a）方案①；（b）方案②；（c）方案③；（d）方案④

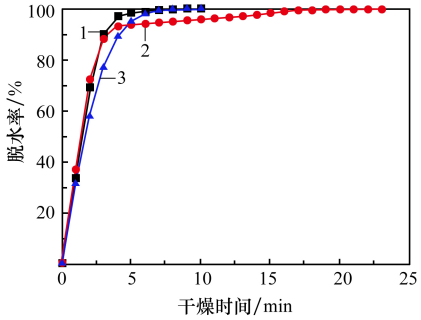
图 6 干燥风速对生球干燥速率的影响

Fig. 6 Effect of drying wind speed on the drying rate of green pellets

2.2.4 熔剂类型影响

为了考查不同熔剂种类对生球干燥速率的影响，试验以方案③为配矿方案，采用优化的造球工艺，分别对自然碱度、石灰石熔剂 1.0 碱度和

活性灰熔剂 1.0 碱度生球进型干燥速率试验，固定干燥温度为 200 ℃，干燥风速为 1.0 m/s，结果如图 7 所示。



1—自然碱度；2—石灰石 1.0 碱度；3—活性灰 1.0 碱度。

图 7　熔剂种类对生球干燥速率的影响

Fig. 7　Effect of flux type on the drying rate of green pellets

方案③以进口 MUSA 粉为主，该矿粉粒级较粗，生产的球团内部空隙较多，水分扩散较快，干燥性能好[14]。由图 7 可以看出，添加细粒度的石灰石熔剂后，生球初始干燥速率与自然碱度生球相当，为 6 min 左右。当生球内部蒸气压与外界蒸气压趋于一致时，由于加入石灰石后生球内部较为致密，水分扩散速度降低，达到干燥终点的时间明显高于自然碱度球团。在相同碱度下，活性灰的添加量较低，因此对生球干燥速率的影响不大，干燥时间略高于自然碱度球团。综上，添加不同熔剂之后，球团矿的脱水速率略微降低，但是整体影响不大。

3　结　论

（1）在石灰石作为熔剂时，方案①、②、④随着熔剂添加量的增加，生球强度呈上升趋势，方案③生球强度会随着石灰石用量的增加而降低，但整体降幅不大；活性灰作为熔剂时，各方案生球强度随熔剂添加量增加变化不大，在碱度为 0.8 时，各方案生球抗压强度分别为 5.0、4.9、6.4、3.3 次/(0.5 m)；使用石小粒作为熔剂时，方案①、④生球强度随熔剂用量增加而升高，在碱度为 1.2 时，方案①、④生球落下强度分别为 4.6 次/(0.5 m)和 3.2 次/(0.5 m)，但是对于方案②、③生球强度，石小粒的添加产生负面影响，在 0.8 时，生球落下强度保持在4.3 次/(0.5 m)和 5.7 次/(0.5 m)左右，与自然碱度生球相当。

（2）在相同配矿结构下，3 种熔剂对生球强度的影响也不尽相同，使用石灰石为熔剂时，其生球质量较好。在碱度为 0.8 的条件下，各方案生球落下强度分别为 4.7、5.4、6.9 和 4.2 次/(0.5 m)，高于活性灰和石小粒生球落下强度。

（3）在风温为 200 ℃，风速为 1 m/s 的干燥条件下，方案③生球干燥速率最快，仅需 5 min。方案①次之，需 8 min，方案②和④的生球干燥速率最慢，需 10 min。当提高干燥风温时，可以显著缩短干燥时间。添加石灰石后，生球干燥速率延长至 8 min，略慢于自然碱度和活性灰球团。

参考文献：

[1] 韦振宁,甘牧原,墙蔷,等. 有机复合膨润土对铁矿球团生产影响的研究[J]. 烧结球团,2022,47(5):33－39.
WEI Zhenning, GAN Muyuan, QIANG Qiang, et al. Research on effect of organic composite bentonite on iron ore pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):33－39.

[2] 陈泽宇. 熔剂性球团液相生成规律和微观结构控制研究[D]. 唐山:华北理工大学,2022.
CHEN Zeyu. Study on liquid phase formation law and microstructure control of flux pellets[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2022.

[3] CHEN S, CHEN D, LYU Y N, et al. Reduction and subsequent carburization of pre-oxidation magnetite pellets[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(6):1856－1868.

[4] 韩凤光,杨涛,赵贺喜,等. 复合粘结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报,2023,45(9):1450－1458.
HAN Fengguang, YANG Tao, ZHAO Hexi, et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023,45(9):1450－1458.

[5] 朱德庆,王名,杨聪聪,等. 铝的赋存状态及质量分数对球团焙烧性能的影响[J]. 烧结球团,2022,47(2):1－7.
ZHU Deqing, WANG Ming, YANG Congcong, et al. Influence of aluminum occurrence state and mass fraction on roasting performance of pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):1－7.

（下转第 76 页）

铁,2022,41(1):49 – 53.
ZHOU Xiang. Carbon emission reduction route of China's steel industry for the goal of "double carbon"[J]. Ironmaking,2022,41(1):49 – 53.

[6] 高冰,张文强,单庆林,等. 焙烧温度对熔剂性球团性能及微观结构的影响[J]. 烧结球团,2022,47(5):53 – 58.
GAO Bing, ZHANG Wenqiang, SHAN Qinglin, et al. Effect of firing temperature on properties and microstructure of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):53 – 58.

[7] YANG Z C,LIU Z G,CHU M S,et al. Effect of basicity on metallurgical properties of fluxed pellets with high MgO content[J]. ISIJ International,2021,61(5):1431 – 1438.

[8] 唐先觉. 日本高炉炉料结构的新进展[J]. 中国冶金,2005,15(3):7 – 10.
TANG Xianjue. New evolution on blast furnace burden structure in Japan[J]. China Metallurgy,2005,15(3):7 – 10.

[9] 刘征建,黄建强,张建良,等. 高炉高比例球团冶炼技术发展和实践[J]. 辽宁科技大学学报,2021,44(2):85 – 91.
LIU Zhengjian, HUANG Jianqiang, ZHANG Jianliang, et al. Development and practice of high-pellet-proportion smelting technology of blast furnace[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2021, 44(2):85 – 91.

[10] 刘西财,石恩泽,赵子川,等. 氢基竖炉条件下制备不同金属化率球团研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):58 – 64.
LIU Xicai,SHI Enze,ZHAO Zichuan,et al. Research on preparation of pellets with different metallization rates under hydrogen-based shaft furnace condition[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):58 – 64.

(上接第69页)

[6] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):119 – 126.
QING Gele, HUANG Wenbin, AN Gang, et al. Research on preparation technology of low-silica alkaline pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):119 – 126.

[7] 闫魁红,冀岗,李宝峰,等. 太钢6号高炉配用碱性球团矿及高比例球团矿冶炼试验[J]. 炼铁,2021,40(6):16 – 20.
YAN Kuihong,JI Gang,LI Baofeng,et al. Test smelting of Taiyuan steel No. 6 BF with basic pellets and high rate of pellets[J]. Ironmaking,2021,40(6):16 – 20.

[8] WANG P, WANG C Q, WANG H T, et al. Effects of SiO2, CaO and basicity on reduction behaviors and swelling properties of fluxed pellet at different stages[J]. Powder Technology,2022,396:477 – 489.

[9] 白凯凯. 熔剂性球团氧化焙烧及冶金行为研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
BAI Kaikai. Study on oxidation roasting and metallurgical behavior of flux pellets [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2022.

[10] 高冰,张文强,单庆林,等. 焙烧温度对熔剂性球团性能及微观结构的影响[J]. 烧结球团,2022,47(5):53 – 58.
GAO Bing, ZHANG Wenqiang, SHAN Qinglin, et al. Effect of firing temperature on properties and microstructure of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):53 – 58.

[11] 兰臣臣,卢建光,吕庆,等. 碱度对镁质低硅球团矿冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2022,47(4):49 – 57.
LAN Chenchen, LU Jianguang, LÜ Qing, et al. Effect of alkalinity on metallurgical properties of magnesian low-silica pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(4):49 – 57.

[12] 易陆杰,李议华,李建,等. 钙镁熔剂对高赤铁矿配比球团的影响[J]. 烧结球团,2021,46(2):57 – 62.
YI Lujie, LI Yihua, LI Jian, et al. Influence of calcium magnesium flux on high hematite ratio pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):57 – 62.

[13] 张金良. 熔剂性赤铁矿球团焙烧特性及高炉还原行为研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
ZHANG Jinliang. Study on roasting characteristics of flux hematite pellets and reduction behavior of blast furnace [D]. Changsha:Central South University,2012.

[14] 乔红梅,张建良,王耀祖,等. 国内外钙质碱性球团生产实践及发展趋势[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1031 – 1039.
QIAO Hongmei,ZHANG Jianliang,WANG Yaozu,et al. Production practice and development trend of calcareous alkaline pellets around the world[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(10):1031 – 1039.