# 烧结矿成分体系对软熔滴落性能的影响

于银俊，龙 防，陈 伟，申 勇，周永平
（安阳钢铁股份有限公司，河南 安阳 455000）

**摘要：** 本文通过对不同碱度和 $SiO_2$、$Al_2O_3$、MgO 质量分数的烧结矿进行软熔滴落性能试验，并结合安钢及国内各大型高炉所用烧结矿技术参数和高炉实际运行参数数据进行分析总结，得出当烧结矿的 $SiO_2$ 质量分数为 5% 左右，碱度为 1.95 左右，CaO 质量分数不超过 10%，MgO 质量分数不超过 2% 时，烧结矿的软熔滴落性能较好，滴落温度约为 1 460 ℃，熔化区间约为 160 ℃，软熔区间约为 260 ℃，高炉能够长期保持高产低耗的顺行状态。

**关键词：** 烧结矿；成分体系；熔滴性能
**中图分类号：** TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0055－07
**doi：** 10.13403/j.sjqt.2021.06.085

## Effect of sinter composition system on soft droplet performance

YU Yinjun，LONG Fang，CHEN Wei，SHEN Yong，ZHOU Yongping
(*Anyang Iron & Steel Co.，Ltd.，Anyang* 455000，*Henan*，*China*)

**Abstract:** The soft droplet performance of sinter with different basicity，$SiO_2$，$Al_2O_3$ and Mgo content is studied. By analyzing and summarizing the technical parameters of sinter and actual operating parameter data of blast furnace used by Anyang Steel and various large blast furnaces in China，it can be drawn that when the $SiO_2$ mass fraction of sinter is about 5%，alkalinity is about 1.95，CaO mass fraction is not more than 10% and MgO mass fraction is not more than 2%，the soft droplet performance of sinter is better，the droplet temperature is about 1 460 ℃，the melting interval is about 160 ℃，the soft melt interval is about 260 ℃，and the blast furnace can maintain a long-term high-production and low-consumption forward state.

**Key words:** sinter; composition system; droplet performance

烧结矿作为高炉的主要原料，在炉料结构中占比一般在70%以上，其性能好坏直接决定炉料的整体性能。高炉生产“以风为纲”，改善料柱透气性是提高风量的最直接有效途径，这其中的关键在于减小料层气流阻力。文献和高温性能试验均表明，高炉料柱气流阻力分布[1-2]：块状带约占15%，软熔滴落带约占60%以上，其它区域约占25%。因此，软熔滴落带的气流阻力是气流通过的最大屏障，将直接影响气流的通过及分布。而软熔滴落带气流阻力的决定因素是原料的高温软熔滴落性能。烧结矿作为高炉的基础炉料，改善其高温软熔滴落性能是减小料柱气流阻力的关键，是实现高炉稳定顺行、增产节焦的原料基础和重要保障。

目前，国内外对于高炉原料高温冶金性能的研究主要是对原料软熔滴落性能进行检测，依据开始软化温度、软化结束温度、开始熔化温度、滴落温度、软熔区间等试验数据判断其软熔滴落性能的好坏。熔滴性能的测试方法参照GB/T 34211—2017，但不同企业的试验设备、参数选择等很多是2017年以前设置的，这

**收稿日期：** 2020－10－20；**修回日期：** 2021－01－13
**作者简介：** 于银俊(1965—)，男，高级工程师，从事炼铁工艺技术、生产组织管理及市场分析方面的工作。
**通讯作者：** 龙 防(1980—)，男，高级工程师，从事烧结工艺技术、原料性能、高炉操作优化及配矿技术方面的工作。

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

造成试验数据的差别较大、可比性不强，客观上不利于企业之间的技术交流与进步[3]。对于原料高温冶金性能的好与坏，现有做法是通过熔滴试验进行直观判断，至于高温冶金性能的主要影响因素及采取何种技术措施对其进行改善，目前研究甚少或系统性不强，可参考价值有待进一步提升。

本文结合各炉料在高炉内的实际影响，重点选择基础炉料(烧结矿)作为研究对象，通过分析烧结矿成分体系变化对其熔滴性能影响的趋势，为整体改善炉料高温冶金性能，实现烧结优化配矿及成分体系合理控制提供参考和指导。

## 1 试验原料与方法

烧结矿在高炉内经过还原、高温熔化后变成铁和初渣，初渣性能基本决定了烧结矿的熔滴性能，而初渣性能主要受其成分体系($SiO_2$、CaO、MgO、$Al_2O_3$)的影响。因此，本文围绕烧结矿$SiO_2$、CaO、MgO、$Al_2O_3$质量分数的变化对熔滴性能的影响进行研究。

(1) 碱度试验。保持烧结原料结构及配比基本不变，在其它成分处于同一水平条件下调整烧结矿碱度，尽可能减小其它因素的影响。通过调整生石灰配加量将烧结矿碱度依次设定为4个梯度：1.75、1.90、2.05、2.20。

(2) $SiO_2$质量分数试验。通过高纯二氧化硅粉来调整试验中$SiO_2$质量分数，排除结构变化带来的影响。将烧结矿碱度设定为1.90，$w(MgO)/w(Al_2O_3)\approx0.8$，$SiO_2$质量分数依次设定为4.5%、5.0%、5.5%、6.0%。

(3) MgO质量分数试验。将碱度设定为1.90，$w(SiO_2)$、$w(Al_2O_3)$分别控制为5.7%、1.85%左右，通过调整白云石粉配加量将烧结矿MgO质量分数依次设定4个梯度：1.2%、1.7%、2.2%、2.7%。

(4) $Al_2O_3$质量分数试验。通过添加高纯$Al_2O_3$粉来调节烧结矿成分中$Al_2O_3$质量分数，将其设为1.5%、1.9%、2.3%、2.7% 4个梯度。

在实验室通过烧结杯烧制出对应的烧结矿样品，其中碱度试验样品编号为sj1～sj4；$SiO_2$质量分数试验编号为sj5～sj8；MgO质量分数试验编号为sj9～sj12；$Al_2O_3$质量分数试验编号为sj13～sj16，其化学成分如表1所示。然后，对上述试验样品进行熔滴性能检测。

表1 试验烧结矿样品的化学成分和碱度

Table 1 Chemical composition and basicity of test sinter samples

| 试验编号 | 质量分数/% | | | | | | 实际碱度 | 设计碱度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TFe | $SiO_2$ | FeO | CaO | $Al_2O_3$ | MgO | | |
| sj1 | 57.68 | 5.20 | 9.40 | 8.94 | 1.95 | 1.70 | 1.72 | 1.75 |
| sj2 | 56.92 | 5.17 | 9.80 | 9.98 | 1.98 | 1.69 | 1.93 | 1.90 |
| sj3 | 56.24 | 5.22 | 9.30 | 10.65 | 1.92 | 1.73 | 2.04 | 2.05 |
| sj4 | 55.96 | 5.20 | 9.50 | 11.34 | 1.96 | 1.71 | 2.18 | 2.20 |
| sj5 | 56.69 | 4.55 | 7.42 | 8.60 | 1.96 | 1.61 | 1.92 | — |
| sj6 | 55.99 | 5.01 | 7.30 | 9.22 | 1.97 | 1.57 | 1.89 | — |
| sj7 | 55.57 | 5.55 | 7.72 | 10.16 | 2.01 | 1.56 | 1.90 | — |
| sj8 | 54.15 | 6.09 | 7.60 | 11.15 | 1.99 | 1.56 | 1.88 | — |
| sj9 | 55.12 | 5.77 | 7.10 | 10.82 | 1.83 | 1.20 | 1.88 | — |
| sj10 | 55.56 | 5.81 | 6.70 | 10.63 | 1.91 | 1.72 | 1.91 | — |
| sj11 | 55.44 | 5.68 | 7.00 | 10.67 | 1.85 | 2.18 | 1.90 | — |
| sj12 | 55.24 | 5.75 | 6.59 | 10.42 | 1.87 | 2.65 | 1.92 | — |

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

（续表 1）

| 试验编号 | 质量分数/% | | | | | | 实际碱度 | 设计碱度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TFe | $SiO_2$ | FeO | CaO | $Al_2O_3$ | MgO | | |
| sj13 | 55.56 | 5.74 | 7.83 | 10.74 | 1.55 | 1.45 | 1.87 | — |
| sj14 | 55.89 | 5.73 | 8.13 | 10.83 | 1.88 | 1.44 | 1.89 | — |
| sj15 | 55.65 | 5.70 | 7.90 | 10.77 | 2.27 | 1.44 | 1.89 | — |
| sj16 | 55.54 | 5.62 | 7.80 | 10.68 | 2.65 | 1.43 | 1.90 | — |

## 2　试验结果与讨论

### 2.1　碱度对烧结矿熔滴性能的影响

不同碱度烧结矿样品的熔滴试验结果如表 2 所示。从表 2 可以看出：碱度变化对烧结矿熔滴性能的影响十分显著。随着碱度的升高，烧结矿开始软化温度（$T_{10}$）、开始熔化温度（$T_s$）呈现下降趋势，滴落温度（$T_d$）呈现上升趋势，软熔区间（$T_d - T_{10}$）、熔化区间（$T_d - T_s$）均变宽，对改善烧结矿熔滴性能不利[4-5]。

表 2　不同碱度烧结矿样品的熔滴性能参数

Table 2　Droplet performance parameters of sinter samples with different basity

| 试验编号 | $T_{10}$/℃ | $T_{40}$/℃ | $(T_{40}-T_{10})$/℃ | $(T_s-T_{40})$/℃ | $(T_d-T_{10})$/℃ | $(T_d-T_s)$/℃ | $T_d$/℃ | $T_s$/℃ | 10 min 滴落量/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sj1 | 1 213.3 | 1 295.5 | 82.0 | 23.0 | 260.0 | 160.0 | 1 473.0 | 1 318.8 | 212.4 |
| sj2 | 1 198.6 | 1 282.7 | 84.0 | 33.0 | 311.0 | 194.0 | 1 510.0 | 1 316.0 | 211.0 |
| sj3 | 1 184.8 | 1 279.3 | 95.0 | 27.0 | 351.0 | 230.0 | 1 536.0 | 1 306.5 | 194.5 |
| sj4 | 1 179.5 | 1 283.3 | 107.0 | 26.0 | 366.0 | 236.0 | 1 545.3 | 1 309.2 | 199.8 |

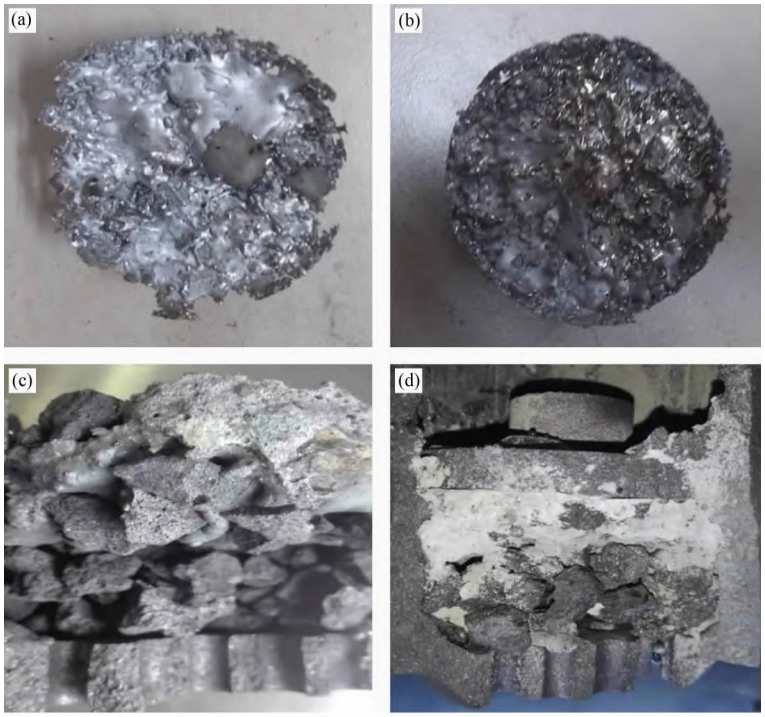
熔滴试验结束后，滴落盘中的滴落物如图 1 所示。从图 1（a）可知：当烧结矿碱度为 1.75，滴落温度为 1 473 ℃时，滴落物由铁和渣铁混合物组成（图片中暗灰色部分），这表明该条件下初渣已熔化并滴落；对比碱度为 2.05 的滴落物外形［图 1（b）］，滴落温度为 1 536 ℃条件下，滴落物只见铁未见渣，表明此时初渣未熔化或滴落。结合烧结矿高温软熔滴落后焦炭层形貌［图 1（c）、1（d）］可清晰看出，当烧结矿碱度为 2.05 时，熔滴试验结束后其焦炭层滞留大量白色粉末（主要是未熔化的初渣），而烧结矿碱度为 1.75 的焦炭层非常干净，未见白色粉末，表明此时初渣已熔化并流出。考虑焦炭层是高炉内透气性最好的区域，如有大量难熔的初渣粉末滞留在该区域，将堵塞焦炭层气孔率，势必增加料柱气流阻力，造成压差升高、影响气流合理分布等。

### 2.2　$SiO_2$ 质量分数对烧结矿熔滴性能的影响

不同 $SiO_2$ 质量分数烧结矿样品的熔滴试验结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，随着 $SiO_2$ 质量分数的升高，烧结矿软化开始温度、软化终了温度变化不明显，软化区间也没有明显变化；相比较而言，烧结矿 $SiO_2$ 质量分数变化对滴落温度、熔化温度、熔化区间等的影响不同，随着烧结矿 $SiO_2$ 质量分数的升高，滴落温度呈现上升趋势，但上升幅度较小，开始软化温度则呈现明显的下降趋势，造成熔化区间明显变宽，对高炉料柱透气性改善带来不利影响。

分析原因认为，烧结矿 $SiO_2$ 质量分数的合理控制，不仅是满足烧结过程液相生成水平及高温固结、改善烧结矿常规指标的需要，亦是保障其具有良好高温软熔滴落性能的重要技术措施[6-7]。结合碱度变化对熔滴性能的影响，从改善烧结矿熔滴性能和常规性能指标考虑，当烧结矿 $SiO_2$ 质量分数偏高时，可适当减低碱度；反之，当烧结矿 $SiO_2$ 质量分数过低时，可适当提高碱度，这即可保证烧结过程液相的生成能力，又能稳定其高温熔滴性能。

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




(a) 碱度为1.75的高温滴落物($T_d$=1 473 ℃)；(b) 碱度为2.05的高温滴落物($T_d$=1 536℃)；
(c) 碱度为1.75烧结矿高温软熔后焦炭层形貌；(d) 碱度为2.05烧结矿高温软熔后焦炭层形貌

**图1 不同碱度烧结矿高温软熔后焦炭层形貌**

**Fig. 1 Morphology of coke layer after high temperature softening of sinter with different basicity**

**表3 不同 $SiO_2$ 质量分数烧结矿样品熔滴性能参数**

**Table 3 Melting drop performance parameters of sinter samples with different $SiO_2$ content**

| 试验编号 | $T_{10}$/℃ | $T_{40}$/℃ | ($T_{40}-T_{10}$)/℃ | ($T_s-T_{40}$)/℃ | ($T_d-T_{10}$)/℃ | ($T_d-T_s$)/℃ | $T_d$/℃ | $T_s$/℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sj5 | 1 194.2 | 1 285.4 | 91.0 | 38.0 | 315.0 | 186.0 | 1 509.4 | 1 323.4 |
| sj6 | 1 180.6 | 1 276.2 | 96.0 | 42.0 | 332.0 | 194.0 | 1 513.0 | 1 318.7 |
| sj7 | 1 205.7 | 1 290.8 | 85.0 | 22.0 | 309.0 | 202.0 | 1 514.6 | 1 312.9 |
| sj8 | 1 197.8 | 1 281.4 | 84.0 | 24.0 | 320.0 | 213.0 | 1 517.4 | 1 304.9 |

### 2.3 MgO质量分数对烧结矿熔滴性能的影响

不同MgO质量分数烧结矿样品的熔滴试验结果如表4所示。从表4可以看出，烧结矿MgO质量分数的升高对烧结矿熔滴性能有正反两方面影响：有利的方面是，开始软化温度、开始熔化温度均呈现上升趋势，尤其开始软化温度提高比较明显；不利的方面是，滴落温度亦呈现上升趋势，由于开始熔化温度和滴落温度上升几乎同步，熔化区间的变化并不明显，基本处于同一水平。随着烧结矿MgO质量分数的升高，烧结矿10 min滴落量呈现逐步减少，这表明矿物的熔化性能或初渣流动性能有变差趋势。

试验研究及生产实践均表明：一般情况下，向烧结工序添加镁质熔剂对烧结常规指标均有负面影响，主要表现在利用系数、转鼓指数、成品率、粒度组成等有降低趋势，返矿率则升高[8-9]；随着烧结矿MgO质量分数的升高，伴随着难还原、难熔化的镁橄榄石或钙镁橄榄石生成，低温还原粉化性能有改善趋势，还原性能及高温熔化性能有变差趋势。

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

表 4　不同 MgO 质量分数烧结矿样品熔滴性能参数

Table 4　Melting drop performance parameters of sinter samples with different MgO content

| 试验编号 | $T_{10}$/℃ | $T_{40}$/℃ | $(T_{40}-T_{10})$/℃ | $(T_s-T_{40})$/℃ | $(T_d-T_{10})$/℃ | $(T_d-T_s)$/℃ | $T_d$/℃ | $T_s$/℃ | 10 min 滴落量/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sj9 | 1 159.1 | 1 255.7 | 97.0 | 48.0 | 355.0 | 211.0 | 1 514.0 | 1 303.5 | 202.2 |
| sj10 | 1 178.5 | 1 276.1 | 98.0 | 29.0 | 340.0 | 214.0 | 1 518.6 | 1 305.0 | 200.5 |
| sj11 | 1 175.5 | 1 280.4 | 105.0 | 36.0 | 351.0 | 210.0 | 1 526.4 | 1 316.7 | 140.5 |
| sj12 | 1 199.7 | 1 292.6 | 93.0 | 21.0 | 337.0 | 223.0 | 1 536.6 | 1 313.8 | 138.4 |

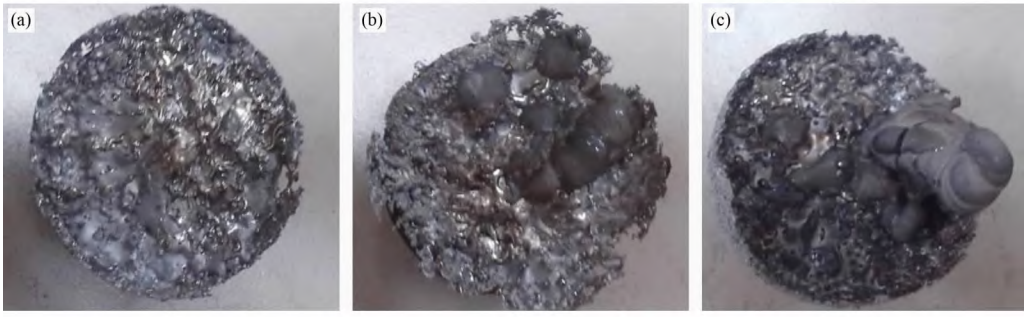
### 2.4　$Al_2O_3$ 质量分数对烧结矿熔滴性能的影响

不同 $Al_2O_3$ 质量分数烧结矿样品的熔滴试验结果如表 5 所示。从表 5 可以看出，随着烧结矿 $Al_2O_3$ 质量分数的升高，烧结矿开始软化温度、滴落温度、开始熔化温度均呈现降低趋势，而滴落温度和熔化开始温度几乎同步降低，这导致熔化区间无明显变化，基本处于同一水平。不同 $Al_2O_3$ 质量分数烧结矿熔滴试验结束后的滴落物如图 2 所示。由图 2 可看出：随着烧结矿 $Al_2O_3$ 质量分数的升高，在较低温度下已有大量的初渣熔化并流出；结合表 5 中 10 min 滴落量可知，随着烧结矿 $Al_2O_3$ 质量分数的升高，其初渣熔点有明显的降低趋势，熔化性能改善可为其流动创造条件。

表 5　不同 $Al_2O_3$ 质量分数烧结矿样品熔滴性能参数

Table 5　Melting drop performance parameters of sinter samples with different $Al_2O_3$ content

| 试验编号 | $T_{10}$/℃ | $T_{40}$/℃ | $(T_{40}-T_{10})$/℃ | $(T_{40}-T_4)$/℃ | $(T_s-T_{40})$/℃ | $(T_d-T_{10})$/℃ | $(T_d-T_s)$/℃ | $T_d$/℃ | $T_s$/℃ | 10 min 滴落量/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| sj13 | 1 207.4 | 1 289.2 | 82.0 | 105.0 | 19.0 | 300.1 | 199.0 | 1 507.5 | 1 308.2 | 215.2 |
| sj14 | 1 206.6 | 1 286.5 | 80.0 | 103.0 | 24.0 | 296.2 | 192.0 | 1 502.8 | 1 310.4 | 212.0 |
| sj15 | 1 190.2 | 1 274.5 | 84.0 | 107.0 | 30.0 | 310.6 | 196.0 | 1 500.8 | 1 304.3 | 223.7 |




$w(Al_2O_3)$/%：(a) 1.9；(b) 2.4；(c) 2.7

图 2　不同 $Al_2O_3$ 质量分数烧结矿的高温滴落物

Fig. 2　Dropping objects from sinter under high temperature with different $Al_2O_3$ content

## 3　国内大型钢企烧结矿熔滴试验数据分析

考虑目前熔滴性能尚没有统一的国家或行业标准，而不同企业试验检测的数据或相关资料提供的数据不具可比性。为此，分别对国内部分大型高炉近几年来使用的烧结矿进行实地取样，在同一台设备进行熔滴性能检测。烧结矿样品的化学成分、熔滴试验检测数据分别如表 6、7 所示。

从表 6、7 可以看出，济钢、宝钢、邯钢烧结矿的熔滴性能处于较好水平，主要表现在滴落温度适宜、开始熔化温度高、熔化区间较窄、初渣的熔点低且流动性好；相比较而言，迁安、

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

表6 国内大型钢企烧结矿的化学成分和碱度

Tabel 6 Chemical composition and basicity of sinters from large mills in China

| 企业名称 | 年份/年 | $w$(TFe)/% | $w$(CaO)/% | $w$($SiO_2$)/% | $w$(MgO)/% | $w$($Al_2O_3$)/% | $w$(FeO)/% | $R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 京唐 | 2014 | 56.37 | 10.63 | 4.53 | 1.26 | 1.94 | 8.20 | 2.35 |
| 迁钢 | 2014 | 55.94 | 10.87 | 5.01 | 1.50 | 1.65 | 10.40 | 2.17 |
| 济钢 | 2014 | 55.69 | 10.15 | 5.55 | 2.31 | 3.17 | 9.20 | 1.83 |
| 武钢 | 2015 | 55.52 | 10.82 | 6.09 | 1.71 | 1.67 | 8.42 | 1.78 |
| 宝钢 | 2015 | 57.20 | 9.22 | 5.31 | 1.65 | 1.72 | 10.74 | 1.74 |
| 邯钢 | 2015 | 56.61 | 10.11 | 5.45 | 1.79 | 1.79 | 9.50 | 1.85 |
| 莱钢 | 2015 | 55.98 | 11.19 | 5.53 | 1.02 | 1.51 | 8.00 | 2.03 |
| 济钢 | 2016 | 56.11 | 10.42 | 5.78 | 1.84 | 2.28 | 8.18 | 1.80 |

表7 国内大型钢企烧结矿熔滴性能参数

Tabel 7 Droplet performance parameters of sinter in domestic large-scale steel enterprise

| 企业名称 | $T_{10}$/℃ | $T_{40}$/℃ | $(T_{40}-T_{10})$/℃ | $(T_s-T_{40})$/℃ | $(T_d-T_{10})$/℃ | $(T_d-T_s)$/℃ | $T_d$/℃ | $T_s$/℃ | 10 min滴落量/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 京唐 | 1 191.0 | 1 283.0 | 92.0 | 17.0 | 307.6 | 199.0 | 1 498.6 | 1 300.0 | 189.0 |
| 迁钢 | 1 229.0 | 1 304.0 | 75.0 | 15.0 | 282.0 | 193.0 | 1 511.0 | 1 319.0 | 187.0 |
| 济钢 | 1 231.8 | 1 313.3 | 81.0 | 15.0 | 208.1 | 112.0 | 1 439.9 | 1 328.0 | 216.5 |
| 武钢 | 1 195.7 | 1 288.0 | 92.0 | 17.0 | 298.7 | 189.0 | 1 494.4 | 1 305.1 | 190.0 |
| 宝钢 | 1 192.0 | 1 278.7 | 87.0 | 37.0 | 267.2 | 144.0 | 1 459.2 | 1 315.7 | 253.0 |
| 邯钢 | 1 201.0 | 1 282.0 | 81.0 | 28.0 | 277.0 | 168.0 | 1 478.0 | 1 310.3 | 192.0 |
| 莱钢 | 1 215.0 | 1 297.0 | 81.0 | 17.0 | 298.8 | 200.0 | 1 513.8 | 1 314.2 | 185.0 |
| 济钢 | 1 189.7 | 1 273.3 | 84.0 | 21.0 | 254.8 | 150.0 | 1 444.5 | 1 294.7 | 201.0 |

武钢、京唐、莱钢烧结矿熔滴性能处于一般水平，主要表现在滴落温度较高、熔化区间较宽，不利于软熔带气流阻力的改善。

从检测结果看，烧结矿熔滴性能与其成分体系呈现较强的对应关系，宝钢烧结矿品位高、碱度控制低、成分体系中难熔的碱性氧化物质量分数低；济钢烧结矿碱度较低、MgO 质量分数高、$Al_2O_3$ 质量分数较高改善了初渣的熔化性能；武钢烧结矿碱度控制较好，但 $SiO_2$ 质量分数较高；京唐烧结矿碱度过高，但其 $SiO_2$ 质量分数控制非常低，客观上弥补了碱度过高对熔滴性能的影响。根据不同时期的对标情况可知，当期高炉压差水平及炉况状态与其烧结矿熔滴性能呈现较强的相关性[10-11]。

## 4 生产应用效果

依据对烧结矿熔滴性能的试验研究成果，结合铁矿石资源市场及结构降本工作目标，在烧结配料及生产工艺控制过程中对烧结矿成分体系持续进行优化，通过改善烧结矿熔滴性能促进高炉实现稳产、高产、低耗。2016 年安钢 3# 高炉整体运行状态较好，尤其是 3—9 月，高炉日产均在 1 万吨以上，焦比为 290 kg/t 左右，燃料用量为 500 kg/t 左右，煤气利用率为 50% 以上。2016 年 3# 高炉烧结矿熔滴性能检测数据、样品对应的化学成分如表 8、9 所示。

从表 8、9 可以看出：在高炉运行状态较好期间，烧结矿的熔滴性能参数均处在合理范围，滴落温度在 1 460 ℃左右，熔化区间为 160 ℃左右，软熔区间为 260 ℃左右；烧结矿的成分体系也较合理，铁品位为 56.5% 以上、$SiO_2$ 质量分数为 5% 左右、碱度控制为 1.90 左右，尤其高熔点碱性氧化物 CaO 质量分数基本在 10% 以内，这样的成分体系有利于降低初渣的熔点，改善其流动性，促进料柱透气性的改善。

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

表 8　2016 年 3#高炉用烧结矿部分熔滴性能参数

Tabel 8　Partial melting drop performance parameters of sinter for No. 3 BF in 2016　　℃

| 日期 | $T_{10}$ | $T_{40}$ | $T_{40}-T_{10}$ | $T_s-T_{40}$ | $T_d-T_{10}$ | $T_d-T_s$ | $T_d$ | $T_s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2016－01－04 | 1 198.1 | 1 284.8 | 87.0 | 20.0 | 271.2 | 165.0 | 1 469.3 | 1 304.4 |
| 2016－05－20 | 1 187.8 | 1 271.7 | 84.0 | 29.0 | 269.3 | 156.0 | 1 457.1 | 1 301.1 |
| 2016－08－23 | 1 181.7 | 1 273.9 | 92.0 | 27.0 | 300.9 | 181.0 | 1 482.6 | 1 301.3 |
| 2016－09－05 | 1 169.7 | 1 265.1 | 95.0 | 28.0 | 294.8 | 172.0 | 1 464.5 | 1 292.7 |
| 2016－09－20 | 1 180.9 | 1 272.1 | 91.0 | 27.0 | 301.1 | 183.0 | 1 482.0 | 1 299.1 |
| 2016－09－27 | 1 166.0 | 1 257.8 | 92.0 | 30.0 | 305.7 | 184.0 | 1 471.7 | 1 287.7 |

表 9　2016 年 3#高炉用烧结矿的部分化学成分和碱度

Tabel 9　Partial chemical composition and basicity of sinter for No. 3 BF in 2016

| 日期 | $w$(TFe)/% | $w$($SiO_2$)/% | $w$(MgO)/% | $w$(CaO)/% | $w$(FeO)/% | $w$($Al_2O_3$)/% | $R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2016－01－04 | 55.80 | 5.40 | 1.91 | 10.64 | 8.64 | 1.76 | 1.97 |
| 2016－05－20 | 56.87 | 5.09 | 1.62 | 9.82 | 9.80 | 2.09 | 1.93 |
| 2016－08－23 | 55.75 | 5.21 | 1.69 | 10.47 | 9.30 | 1.76 | 2.01 |
| 2016－09－05 | 56.59 | 4.83 | 1.69 | 10.05 | 9.30 | 1.90 | 2.08 |
| 2016－09－20 | 56.82 | 4.67 | 1.79 | 10.13 | 7.90 | 1.60 | 2.17 |
| 2016－09－27 | 56.50 | 5.16 | 1.83 | 10.84 | 8.00 | 1.87 | 2.10 |

## 5　结　论

**(1) 烧结矿作为高炉原料的基础炉料，其冶金性能(尤其是熔滴性能)是实现高炉强化冶炼的基础性能保障，而烧结矿的熔滴性能主要取决于其成分体系构成，改善烧结矿熔滴性能需结合自身的原料条件去控制合理烧结矿成分体系。**

**(2) 通过烧结矿成分体系对熔滴性能影响的试验研究，为高炉炉料结构实现性能优化提供指导。尤其是低烧结矿配比炉料条件下，在高炉配加适当碱性球团对改善炉料整体性能是一项合理选择，可取得较好的生产使用效果。**

## 参考文献:


[1] 张文哲，聂礼，赵勇，等. 铁矿粉高温性能特征数之间的关联性研究[J]. 烧结球团，2020，45(1)：7－12.
ZHANG Wenzhe，NIE Li，ZHAO Yong，et al. Study on the correlation between characteristic numbers of high temperature properties of iron ore fines [J]. Sintering And Pelletizing，2020，45(1)：7－12.

[2] 安进博. 莱钢含铁炉料熔滴性能试验研究[J]. 山东冶金，2018，40(4)：24－26.
AN Jinbo. Experimental study on droplet performance of iron-bearing burden at Laigang [J]. Shandong metallurgy，2018，40(4)：4－26.

[3] 陈培敦，孙守建，方爱新，等. 熔带对高炉操作的影响[J]. 山东冶金，2004，26(3)：14－16.
CHEN Peidun，SUN Shoujian，FANG Aixin，et al. Effect of melting zone on blast furnace operation [J]. Shandong metallurgy，2004，26(3)：14－16.

[4] 陈伟，李俊平，申勇. 烧结矿碱度变化对软熔滴落性能影响的试验研究[J]. 河南冶金，2018，24(8)：9－12.
CHEN Wei，LI Junping，SHEN Yong. Experimental study on the effect of basicity of sinter on drop property of soft melt [J]. Henan Metallurgy，2018，24(8)：9－12.

[5] 王玉庆. 高炉合理煤气流探讨[J]. 南京科技与管理，2004，20(3)：19－21.
WANG Yuqing. Discussion on reasonable gas flow in blast furnace [J]. Nanjing Science，technology and management，2004，20(3)：19－21.

[6] 梁栋，周小辉，石红燕，等. 莱钢高炉用含铁炉料熔滴性能试验及分析[J]. 山东冶金，2013，26(2)：25－28.
LIANG Dong，ZHOU Xiaohui，SHI Hongyan，et al. Drop test and analysis of iron-bearing burden for blast furnace at Laiwu Iron and Steel Co. [J]. Shandong metallurgy，2013，26(2)：25－28.


(下转第 68 页)

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

[4] 张超. 当代混合机的结构原理及发展趋势[J]. 矿山机械,2010,38(16):12-15.
ZHANG Chao. Structure principle and development trend of current drum mixers [J]. Mining Machinery,2010,38(16):12-15.

[5] 唐建波. 柳钢120万t/a球团生产卧式强力混合机设备作业率攻关[J]. 烧结球团,2012,37(6):57-59.
TANG Jianbo. TANG Jianbo. Brainstorming equipment availability of horizontal intensive mixer for liusteel 1.2 million t/a pellet production line [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(6):57-59.

[6] 夏建芳,邓佳欣. 立式强力混合机料仓旋转参数优化研究[J]. 设计与研究,2017(1):77-80.
XIA Jianfang,DENG Jiaxin. Study on optimization of silo rotation parameters of vertical intensive mixer [J]. Design and research,2017(1):77-80.

[7] ZUO Zhijian,GONG Shuguang,XIE Guilan. Analysis of blade erosion of intensive mixer based on DEM during wet particles mixing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(5):81-90.

[8] BEHJANI M A,MOTLAGH Y G,BAYLY A E,et al. Assessment of blending performance of pharmaceutical powder mixtures in a continuous mixer using Discrete Element Method (DEM) [J]. Powder Technology,2020,366:73-81.

[9] CUNDALL PA. A computer model for simulating progressive,large-scale movements in blocky rock systems [J]. Procintsympon Rock Fracture,1971,1(II-b):11-18.

[10] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. Reine Angew Math,1882(92):156-171.

[11] MINDLIN R D,DERESIEWICZ H. Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces [J]. J. APPL. MECH. ASME,1953,20(3):327-344.

(上接第54页)

[7] 赵斌,张玉柱,王子兵,等. 烧结环冷机热工测试及余热源参数确定[J]. 钢铁,2010,45(8):90-93.
ZHAO Bin,ZHANG Yuzhu,WANG Zibing,et al. Thermal test of sintering ring cooler and determination of residual heat source parameters [J]. Iron and steel,2010,45(8):90-93.

[8] 沈永兵,刘建虎,高杨. 基于热力学模型的烧结环冷机漏风率测算方法研究[J]. 热能动力工程,2016,31(1):87-91.
SHEN Yongbing,LIU Jianhu,GAO Yang. Study on calculation method of air leakage rate of sintering annular cooler based on thermodynamic model [J]. Thermal power engineering,2016,31(1):87-91.

[9] 汪用澎,张信. 大型烧结设备[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
WANG Yongpeng,ZHANG Xin. Large sintering equipment [M]. Beijing:Machinery Industry Press,1997.

(上接第61页)

[7] 武轶,李小静,余正伟. 低硅烧结矿的冶金性能及其优化配用研究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报,2018,28(1):19-22.
WU Yi,LI Xiaojing,YU Zhengwei. Study on metallurgical properties of low silicon sinter and its optimum combination [J]. Journal of Anhui Metallurgical Science and Technology Vocational College,2018,28(1):19-22.

[8] 郭贺,沈峰满,柳明旭,等. MgO以及装料方式不同对烧结矿熔滴性能的影响[J]. 材料与冶金学报,2017,16(1):13-16.
GUO He,SHEN Fengman,LIU Mingxu,et al. Effects of MgO and charging methods on the properties of sinter droplet [J]. Journal of Materials and metallurgy,2017,16(1):13-16.

[9] 许满兴. 烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]. 烧结球团,2014,39(3):1-11.
XU Manxing. Effect of metallurgical properties of sinter on its quality and main operation index of blast furnace [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(3):1-11.

[10] 丁智敏,姜鑫,魏国,等. 软熔带类型对高炉内未燃煤粉分布影响的数值模拟[J]. 东北大学学报,2018,39(9):1242-1245.
DING Zhimin,JIANG Xin,WEI Guo,et al. Numerical simulation of the influence of soft melt zone type on unburned pulverized coal distribution in blast furnace [J]. Journal of Northeastern University,2018,39(9):1242-1245.

[11] 王海涛,李光辉,范晓慧. 几种高炉炉料冶金性能的对比研究[J]. 钢铁,2006,41(1):23-27.
WANG Haitao,LI Guanghui,FAN Xiaohui. Comparative study on metallurgical properties of several BF burden [J]. Iron and Steel,2006,41(1):23-27.

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