# 烧结矿强度 - 碱度低凹区及影响因素研究

韩闯闯[1],李 杰[1],杨爱民[2],刘卫星[3],张玉柱[1]
(1. 华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063009;2. 华北理工大学 理学院,河北 唐山 063009;
3. 华北理工大学 继续教育学院,河北 唐山 063009)

**摘 要:** 采用烧结杯实验方法,研究了碱度(0.6~2.4)对烧结矿转鼓强度的影响,并从矿物组成及显微结构的角度分析了强度 - 碱度低凹区形成的内在机理。研究结果表明:碱度在 0.6~2.4 内,随碱度升高,烧结矿强度基本呈先降低后升高的趋势,并在 1.6 附近出现强度 - 碱度低凹区。其主要原因是碱度在 1.6 附近,有效粘结相(铁酸钙)含量少,矿物组成复杂,且矿相结构为交织熔蚀结构 - 部分斑状结构 - 局部粒状结构共存,结构极不均匀。当烧结矿冷却时,引起的内应力导致大量裂纹的生成,强度低,形成强度 - 碱度低凹区。

**关键词:** 烧结矿;强度 - 碱度低凹区;显微结构;矿物组成
**中图分类号:** TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 8764(2018)02 - 0005 - 05
**doi:** 10.13403/j.sjqt.2018.02.017

## Study on sinter strength-basicity low-concave areas and their influencing factors

**Han Chuangchuang[1], Li Jie[1], Yang Aimin[2], Liu Weixing[3], Zhang Yuzhu[1]**
(1. *College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063009, *Hebei*;
2. *College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063009, *Hebei*;
3. *College of Continuing Education, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063009, *Hebei*)

**Abstract** The sinter pot experiment method is used to study the influence of basicity (0.6~2.4) on sinter drum strength, and the internal mechanism of formation of strength-basicity low-concave area are analyzed from the perspective of mineral composition and microstructure. The research results show that, when the basicity is 0.6~2.4, with the basicity increasing, the sinter strength substantially first reduces and then rises, and the strength-basicity low-concave area appears in the vicinity of 1.6. The main reason is that, when the basicity is in the vicinity of 1.6, the content of the effective binder phase(calcium ferrite) is low, the mineral composition is complex and mineralogical structure shows coexistence of mixed corrosion structure-part porphyritic texture-local granular structure and the structure is extremely inhomogeneous. When the sinter is cooled, the internal stress will lead to formation of large number of cracks and the strength is low, thus the strength-basicity low concave area appears.

**Key words** sinter; strength-basicity low-concave area; microstructure; mineral composition

## 1 前 言

烧结矿作为高炉生产的重要原料,烧结工艺参数不同,其矿物组成和粘结相组成不同,从而导致烧结矿性能各异。前人对此做了许多研究,张玉柱等人研究了冀东磁铁矿烧结成矿规律,确定在 $SiO_2$ 含量较高时,烧结矿在碱度为 1.4 左右时强度最差,形成强度低凹区[1]。吕庆等人研究了碱度对钒钛烧结矿强度和烧结过程的影响,综合考虑烧结矿碱度对承钢烧结过程、高炉炉料结构和高炉冶炼过程的影响,烧结矿碱度控制在 1.9 左右比较适宜[2]。IO. M. Tloreoh、B. H.

**收稿日期:** 2017 - 04 - 12
**基金项目:** 国家自然科学基金(51674121);河北省科技计划项目(15214104D);河北省青年拔尖人才项目(BJ2017021)
**作者简介:** 韩闯闯(1991 - ),男,在读硕士,主要从事烧结球团及冶金节能与资源综合利用方面的研究。
**通讯作者:** 李 杰(1982 - ),男,博士,副教授,主要从事烧结球团及冶金节能与资源综合利用方面的研究。

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

Tlopobeen 对不同碱度烧结矿的性能进行了研究，得出碱度 1.25 ~ 1.75 的烧结矿冷态和热态时的强度都最低[3]。Biswas，A. K. 根据矿相结构分析了碱度对烧结矿强度的影响，得到碱度在 1.6 ~ 1.7 范围内出现强度低凹区[4]。但目前对烧结矿强度 - 碱度低凹区的研究都是针对单一的本地粉或外矿粉进行研究，而针对本地粉及外矿粉混合搭配的强度 - 碱度低凹区的相关研究鲜见报道。本文以本地粉及外矿粉混合搭配的铁矿粉为主要原料，从矿物组成及显微结构的角度分析了烧结矿强度随碱度的变化规律，并分析了强度 - 碱度低凹区形成的内在机理。

## 2 原料性能与研究方法

### 2.1 原料性能

实验所用原料化学成分见表 1、表 2。

表 1 烧结用原料化学成分(%)

| 原料名称 | TFe | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | $TiO_2$ | Ig |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 巴西粉 | 62.92 | 5.65 | 1.54 | 0.45 | 0.11 | 0.08 | 0.48 |
| 本地碱精粉 | 63.96 | 3.25 | 0.79 | 2.69 | 1.83 | 0.09 | -0.001 5 |
| 低硅酸精粉 | 65.33 | 7.02 | 0.70 | 0.60 | 0.28 | 0.24 | -0.019 |
| 涞源精粉 | 61.75 | 3.80 | 0.79 | - | 4.94 | 0.10 | -0.012 |
| 澳矿 | 57.49 | 5.04 | 2.6 | 0.45 | 0.11 | 0.17 | 9.57 |
| 返矿 | 54.54 | 5.53 | 1.98 | 11.22 | 2.15 | 0.18 | -0.009 7 |
| 烧结除尘灰 | 42.50 | 5.94 | 2.32 | 18.02 | 4.24 | 0.20 | 5.04 |
| 烧结整粒灰 | 49.56 | 6.27 | 2.06 | 12.80 | 3.12 | 0.18 | 1.62 |
| 重力除尘灰 | 42.53 | 7.19 | 2.79 | 4.79 | 1.29 | 0.20 | 20.26 |
| 槽下灰 | 40.92 | 8.96 | 2.48 | 6.96 | 2.20 | 0.27 | 15.70 |
| 竖炉除尘灰 | 61.31 | 8.26 | 0.17 | 0.15 | 2.88 | 0.21 | 5.20 |
| 杂灰 | - | 4.22 | 0.77 | 73.30 | 2.90 | 0.040 | 18.31 |
| 白云石 | - | 2.68 | 0.82 | 38.45 | 20.21 | 0.040 | 35.39 |
| 白灰 | - | 4.22 | 0.77 | 73.30 | 2.90 | 0.040 | 18.31 |
| 燃料 | - | 6.36 | 4.34 | 0.9 | 0.11 | 0.20 | 84.80 |

表 2 烧结用燃料工业分析(%)

| 原料名称 | A | V | C | S |
|---|---|---|---|---|
| 燃料 | 14.17 | 1.67 | 82.16 | 0.69 |

### 2.2 研究方法

依据某烧结厂的原料条件与配比(见表 1)，改变碱度来进行烧结矿强度 - 碱度低凹区的烧结杯实验。用白云石粉调整烧结矿 MgO 含量，MgO 含量为 2.3%；用燃料调整烧结配碳量，配碳量为 3.25%、3.50%、3.75% 三个梯度水平；用生石灰调整烧结矿碱度，碱度为 0.6 ~ 2.4，13 个梯度水平。

烧结杯实验装置由点火器、烧结杯、抽风室、除尘器和抽风机组成。烧结杯型号为 ∅200 mm × 600 mm；烧结点火负压为 6.0 kPa；点火温度 1 150 ± 50 ℃，烧结负压为 10.0 kPa。

烧结矿被倒出后，在 2 m 高的落下装置中进行三次落下实验，测定成品率及粒度组成；将 10 ~ 40 mm 的烧结矿按粒度组成的比例取样，采用 ISO 标准转鼓，进行强度指标检验。

将不同碱度的烧结矿样品分别制成光薄片，在德国蔡司 Axioskop 40 偏/反两用研究型显微镜下观察测定。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 烧结矿强度

通过烧结杯实验测得在配碳量为 3.25% ~ 3.75%(配碳量范围根据烧结厂的实际生产条件

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

选取)、碱度从 0.6～2.4 时的转鼓指数。随着配碳量的增加,转鼓强度基本呈提高的趋势,本文取配碳量为 3.75% 时的转鼓指数进行研究,得到转鼓指数随碱度变化的趋势如图 1 所示。

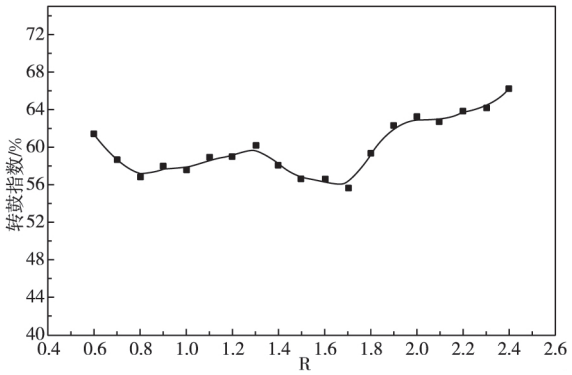



图 1　碱度与烧结矿转鼓指数的关系

由图 1 可知,碱度在 0.6～2.4 内,随碱度升高,烧结矿强度先降低,在 0.8 附近,呈现小的低凹区,然后继续升高,到 1.3 时,达到较大值;碱度继续升高,强度再次呈降低趋势,并在 1.6 附近形成整个碱度范围的低凹区;在 1.8～2.0 内,强度急剧升高,2.0 之后升高不明显,与李炳焕等人研究结果相一致[5,6]。

### 3.2　烧结矿矿物组成

选择烧结杯实验中所得到的各碱度水平的烧结矿试样,将试样制备成光薄片,在德国蔡司 Axioskop 40 偏/反两用研究型显微镜下观察测定,得到不同碱度条件下烧结矿的矿物组成及体积百分含量列于表 3。

表 3　矿物组成及体积百分含量(%)

| 实验编号 | 金属相 | | 粘结相 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 磁铁矿 | 赤铁矿 | 铁酸钙 | 硅酸二钙 | 玻璃质 | 黄长石 | CMS | 游离 CaO |
| $R_{0.6}$ | 80～85 | 3～5 | – | 5～7 | 7～10 | – | – | – |
| $R_{0.8}$ | 80～85 | 5～10 | – | 2～3 | 5～7 | – | – | 少量 |
| $R_{0.9}$ | 80～85 | 5～7 | – | 1～2 | 10～12 | – | – | – |
| $R_{1.0}$ | 75～80 | 8～10 | – | 1～2 | 10～12 | 1～2 | – | – |
| $R_{1.2}$ | 75～80 | 2～3 | 5～10 | 3～5 | 8～10 | 少量 | – | – |
| $R_{1.3}$ | 55～60 | 15～20 | 10～15 | 7～10 | 2～3 | 1～2 | – | – |
| $R_{1.4}$ | 50～55 | 2～5 | 30～35 | 5～8 | 3～5 | – | – | – |
| $R_{1.5}$ | 50～55 | 2～3 | 30～35 | 7～10 | 2～3 | – | – | – |
| $R_{1.6}$ | 55～60 | 12～15 | 15～20 | 5～7 | 3～5 | – | – | – |
| $R_{1.8}$ | 40～45 | 10～15 | 30～35 | 7～10 | 1～2 | – | – | – |
| $R_{2.0}$ | 45～50 | 少量 | 40～45 | 10～12 | 少量 | – | – | – |
| $R_{2.2}$ | 45～50 | 2～4 | 30～35 | 15～20 | 1～2 | – | – | – |
| $R_{2.4}$ | 50～55 | 5～10 | 30～35 | 10～12 | 少量 | – | 少量 | – |

注:CMS 为钙镁橄榄石

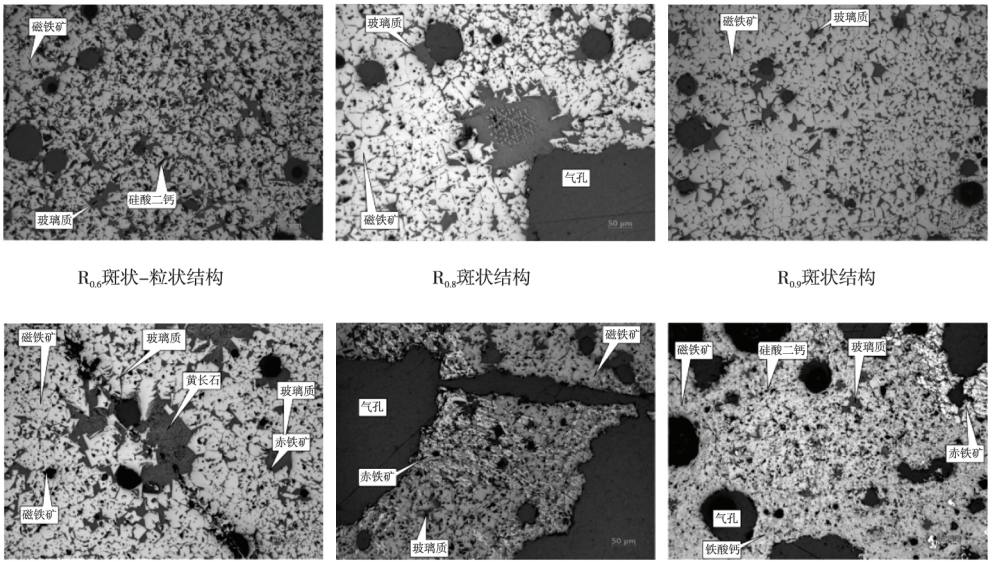
由表 3 可知,碱度在 0.6～1.3 范围内,随碱度提高,烧结矿中的金属相磁铁矿含量减少,赤铁矿增加;粘结相含量减少,碱度为 0.9、1.0 时,粘结相含量出现最低值;继续提高碱度,粘结相含量增加,碱度为 1.2 时,出现铁酸钙粘结相,且随碱度提高,铁酸钙含量增加。碱度在 1.4～1.6 范围内,随碱度提高,烧结矿中的金属相赤铁矿增加;粘结相含量减少,特别是碱度为 1.6 时,有效粘结相－铁酸钙含量减少较明显,矿物组成复杂,这是低凹区出现在 1.6 附近的主要原因。碱度在 1.8～2.4 范围内,随碱度提高,粘结相中的铁酸钙含量增加,当碱度为 2.0 时,铁酸钙含量达到最高值,继续提高碱度,铁酸钙含量降低。这是碱度为 2.0 的烧结矿各项性能指标优良的

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

主要原因，与乔瑞庆等人研究结果相一致[7~9]。

### 3.3 烧结矿显微结构

将烧结矿试样制备成光薄片，在德国蔡司Axioskop 40偏/反两用研究型显微镜下观察，得到不同碱度条件下烧结矿的显微结构如图2~4所示。

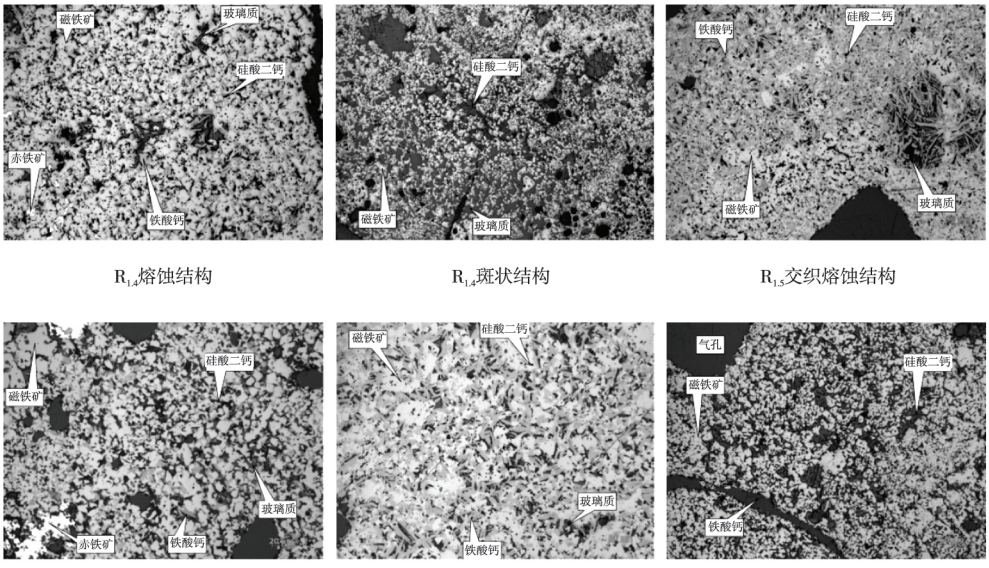



$R_{0.6}$斑状-粒状结构　$R_{0.8}$斑状结构　$R_{0.9}$斑状结构

$R_{1.0}$斑状结构　$R_{1.2}$熔蚀结构　$R_{1.3}$交织熔蚀结构

**图2 $R_{0.6}$~$R_{1.3}$矿相结构图**

由图2可知，碱度在0.6~0.8范围内，随碱度提高，矿相结构逐渐由斑状-粒状结构向矿相结构斑状结构过渡，使强度降低。碱度为0.8时，矿相结构主要为斑状结构，强度较低，呈现小的低凹区。继续提高碱度，矿相结构开始出现部分熔蚀结构[10,11]。当碱度达到1.3时，矿相结构开始出现交织熔蚀结构，烧结矿强度随之提高。主要原因是在低碱度烧结矿中，碱度的变化实际上不影响为数较多的斑状结构，而仅仅引起磁铁矿与粘结它的硅酸盐矿物数量比的改变，以及这些矿物成分的波动。在这样的烧结矿中，能够增加区域块的尺寸。同时，还增加硅酸盐的结晶性，从而使烧结矿强度改善。



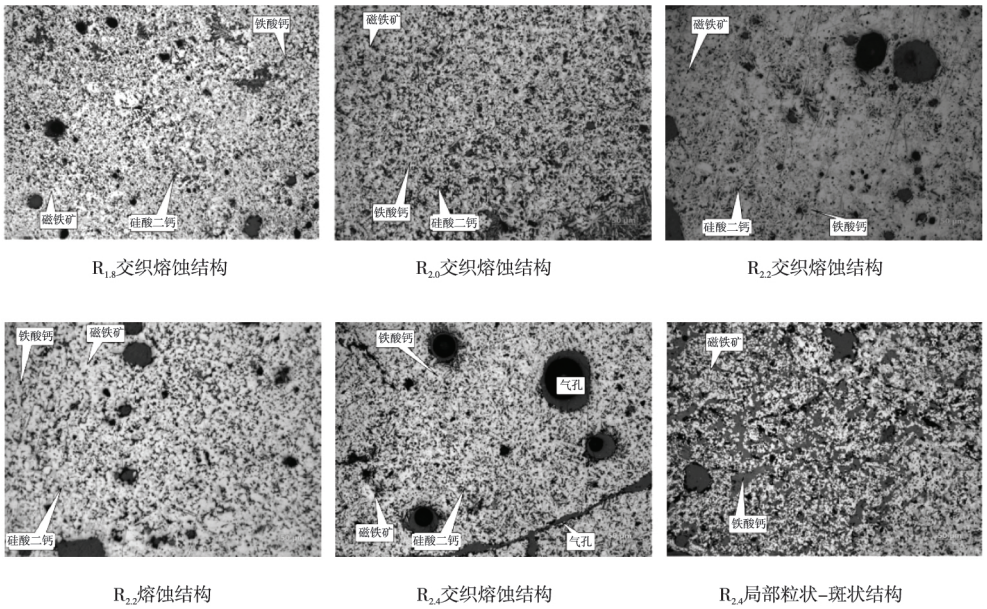

$R_{1.4}$熔蚀结构　$R_{1.4}$斑状结构　$R_{1.5}$交织熔蚀结构

$R_{1.5}$熔蚀结构　$R_{1.6}$交织熔蚀结构　$R_{1.6}$局部粒状结构

**图3 $R_{1.4}$~$R_{1.6}$矿相结构图**

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

由图 3 可知，碱度在 1.4 ~ 1.6 范围内，随碱度提高，矿相结构由主要的熔蚀结构，局部斑状结构逐渐向主要的交织熔蚀结构，部分熔蚀结构过渡，矿相结构不均匀且较为复杂，烧结矿强度降低。当碱度在 1.6 附近，矿相结构主要为交织熔蚀结构，部分斑状结构，局部粒状结构，矿相的不均匀性达最大极限，当烧结矿冷却时，引起的内应力导致大量裂纹的生成，急剧降低烧结矿的强度，这是强度 - 碱度低凹区出现在碱度 1.6 附近的主要原因。




$R_{1.8}$交织熔蚀结构　　$R_{2.0}$交织熔蚀结构　　$R_{2.2}$交织熔蚀结构

$R_{2.2}$熔蚀结构　　$R_{2.4}$交织熔蚀结构　　$R_{2.4}$局部粒状-斑状结构

**图 4　$R_{1.8}$ ~ $R_{2.4}$矿相结构图**

由图 4 可知，在高碱度烧结矿中，随碱度提高，烧结矿粘结相中铁酸钙含量增加，矿相斑状结构几乎全部消失，显微孔隙率和铁酸钙含量增加，结构的不均匀性降低，使得烧结矿强度急剧提高。当碱度为 2.0 时，铁酸钙含量达到最高值，矿相为交织熔蚀结构且结构均匀，这是碱度为 2.0 的烧结矿各项性能指标优良的主要原因。继续提高碱度，铁酸钙含量降低，开始出现斑状、熔蚀结构，斑状 - 粒状、粒状结构，矿相结构变得复杂，烧结矿强度提高不明显。

## 4　结　论

(1) 碱度在 0.6 ~ 2.4 内，随碱度升高，烧结矿强度先降低，在 0.8 附近，呈现小的低凹区，然后继续升高，到 1.3 时，达到较大值；碱度继续升高，强度再次呈降低趋势，并在 1.6 附近形成整个碱度范围的低凹区；在 1.8 ~ 2.0 内，强度急剧升高，2.0 之后升高不明显。

(2) 碱度为 1.6 时，有效粘结相 - 铁酸钙含量低，矿相结构主要为交织熔蚀结构，部分斑状结构，局部粒状结构，矿相极不均匀，出现强度 - 碱度低凹区；当碱度为 2.0 时，铁酸钙含量最高，矿相为交织熔蚀结构且结构均匀，此时的烧结矿各项性能指标优良。

(3) 在烧结实践生产中，碱度的选择应避开强度 - 碱度低凹区，提高烧结矿质量。如无法避开此区域，则在碱度为 1.6 附近，提高混合料的均匀性和含铁量，以改善烧结矿强度。

## 参考文献

[1] 张玉柱，田建军，胡长庆，等. 冀东磁铁矿烧结成矿规律及在生产上的应用 [J]. 钢铁，2003，38(4)：1 - 5.

[2] 王文山，吕庆，李福民，等. 碱度对钒钛烧结矿强度和烧结过程的影响 [J]. 烧结球团，2006，31(5)：11 - 15.

[3] 李思导译. 造块译文集 [M]. 长沙：中南工业大学出版社，1988：229 - 236.

[4] 齐宝铭译. 高炉炼铁原理—理论与实践 [M]. 北京：冶金工业出版社，1989：206.

[5] 李炳焕，郎建峰. 烧结矿出现强度—碱度低凹区的机理研究 [J]. 矿产综合利用，2002，(6)：28 - 31.

[6] Umadevi T，Sah Rameshwar，Mahapatra P. C. Influence of sinter basicity ($CaO/SiO_2$) on low and high alumina iron ore sinter quality [J]. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy，Section C：Mineral Processing and Extractive Metallurgy，2014，123(2)：75 - 85. (下转第 19 页)

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

铁的含量较低时，复合铁酸钙为片状、块状或板块状结构。

(3) 复合铁酸钙显微硬度在 $MgO/Al_2O_3$ 为 0.46 ~ 0.83 范围内，随 $MgO/Al_2O_3$ 比值的增大呈现先增大后减小趋势，在 0.6 附近取得最大值。并且在达到最大值之后，显微硬度随 $MgO/Al_2O_3$ 比值的增大而急剧下降。

## 参考文献


[1] Mumme W G, Clout J M F, Gable R W. The crystal structure of SFCA-I, $Ca_{3.18}Fe^{3+}_{14.66}Al_{1.34}Fe^{2+}_{0.82}O_{28}$, a homologue of theaenigmatite structure type, and new crystal structure refinements of-CFF, Ca 2.99 $Fe^{3+}_{14.30}Fe^{2+}_{0.55}O_{25}$ and Mg-free SFCA, $Ca_{2.45}Fe^{3+}_{9.04}Al_{1.74}Fe^{2+}_{0.16}Si_{0.6}O_{20}$ [J]. Neues Jahrbuch fur Mineralogie-Abhandlungen, 1998.

[2] Nicola V. Y. Scarlett, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen. Reaction sequences in the formation of silico-ferrites of calcium and aluminum in iron ore sinter [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(10): 929 - 936.

[3] Nathan A. S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen. In situ X-ray diffraction investigation of the formation mechanisms of Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum-I-type (SFCA-I-type) complex calcium ferrites [J]. ISIJ International, 2013, 53(8): 1334 - 1340.

[4] Nathan A. S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, et al. Effect of oxygen partial pressure on the formation mechanisms of complex Ca-rich ferrites [J]. ISIJ International, 2013, 53(5): 774 - 781.

[5] Nathan A. S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, et al. Fundamentals of Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: effects of CaO: $SiO_2$ ratio [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45B(12): 2097 - 2105.

[6] Nathan A. S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, et al. Silico-Ferrite of Calcium and Aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phase: new insights into their formation during heating and cooling [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43B(12): 1344 - 1357.

[7] 李光森，金明芳，储满生，等. 含氟烧结矿硅酸盐粘结相自身的强度 [J]. 钢铁研究学报，2008，20(1)：10 - 13.

[8] 李光森，窦力威，尚策，等. 铁酸钙粘结相自身强度的研究 [J]. 东北大学学报自然科学版，2009，30(2)：225 - 228.

[9] 李光森. 粘结相对烧结矿强度的影响机理及其合理组分的探讨 [D]. 辽宁：东北大学，2008.

[10] 金明芳，李光森，窦力威，等. 铁酸盐粘结相熔化速率及对烧结强度的影响 [J]. 钢铁，2009，44(1)：7 - 11.

[11] Sahin O, Uzun O, Kolemen U, et al. Vickers microindentation hardness studies of β-Sn single crystals [J]. Materials Characterization, 2007, 58(2): 197 - 204.

[12] Gong J, Miao H, Zhao Z, et al. Load-dependence of the measured hardness of Ti(C,N)-based cermets [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 303(1): 179 - 186.

[13] Bamzai K K, Kotru P N, Wanklyn B M. Investigations on indentation induced hardness and fracture mechanism in flux grown $DyAlO_3$ crystals [J]. Applied Surface Science, 1998, 133(3): 195 - 204.

[14] Pownceby M. I, Patrick T. R. C. Stability of SFC (Silico-Ferrite Of Calcium): Solid Solution Limits, Thermal Stability and Selected Phase Relationships within the $Fe_2O_3$-CaO-$SiO_2$ (FCS) System [J]. European Journal of Mineralogy, 2000, 12(2): 455 - 468.


(上接第 9 页)


[7] 乔瑞庆，杜鹤桂. 低氟烧结矿微气孔的形成机理及对烧结矿强度的影响 [J]. 钢铁研究学报，1999，11(6)：1 - 4.

[8] Zhou Mi, Yang Songtao, Jiang Tao, et al. Influence of basicity on high-chromium vanadium-titanium magnetite sinter properties, productivity, and mineralogy [J]. JOM, 2015, 67(5): 1203 - 1213.

[9] Zhang F, Luo G P, Wang Y C, et al. Research on binding phase strength of low silicon sinter of Baotou Iron and Steel Co [C]//Proceedings of the 5th International Congress on the Scienceand Technology of Ironmaking, 2009: 261 - 265.

[10] 白永强，程树森，赵宏博，等. 钒钛烧结矿还原粉化过程的矿相分析 [J]. 烧结球团，2011，36(2)：1 - 6.

[11] 刘杰，周明顺，翟立委，等. 鞍钢烧结矿的矿物组成和矿相结构研究 [J]. 烧结球团，2012，37(3)：1 - 4.


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