

钢铁冶金与材料

生石灰消化行为对钒钛磁铁精粉 烧结制粒的影响

刘东辉^{1,2}, 李俊华¹, 张建良², 王广伟², 彭悦¹, 姜曦³

(1.清华大学环境学院,北京 100084; 2.北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 3.中国钢铁工业协会市场调研部,北京 100711)

摘要:研究了生石灰消化行为对钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响规律。研究表明:不同生石灰消化后粒度分布指数差异较大,影响生石灰消化后粒度分布行为的主要因素是生石灰的化学成分和矿物组成。生石灰消化后的粒度分布指数与钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数、均匀性指数和抗热粉化指数呈正相关,与破损指数呈负相关。相对于中钛型和高钛型钒钛磁铁精粉而言,低钛型钒钛磁铁矿的破损指数受消化后粒度分布指数的影响较小。消化后粒度分布指数大的生石灰,其在混合料中分布均匀,消化放热使得准颗粒小球中消石灰胶体颗粒均匀收缩,准颗粒小球中各组分粘结的更加紧密且烧结抽风过程中准颗粒小球各向热应力均衡,在一定程度上抑制了准颗粒小球的热粉化现象。

关键词: 烧结; 钒钛磁铁精粉; 制粒; 生石灰; 消化行为; 配矿

中图分类号: TF046.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)06-0084-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effects of Quicklime Digestion Behavior on the Granulation of Vanadium Titano-magnetite Concentrate

Liu Donghui^{1,2}, Li Junhua¹, Zhang Jianliang², Wang Guangwei², Peng Yue¹, Jiang Xi³

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Marketing Representative Manager, China Iron and Steel Association, Beijing 100711, China)

Abstract: Effects of quicklime digestion behavior on the granulation of the vanadium titano-magnetite concentrate were investigated by using micro-drum granulation equipment. The results show that there exist great difference in the particle size distribution index (PDI) of different kinds of quicklime after hydration with water. The main reasons for the great difference of PDI are chemical composition and mineral structure. The PDI has positive correlations with the granulation index (GI), uniformity index (UI), and resistance index of the thermal disintegration (KI), but has negative correlations with the damage index (DI) of vanadium titanium magnetite concentrate. The effect of PDI on the DI is comparatively low for low-titanium magnetite concentrate compared with the other two concentrates. The quicklime with high particle size distribution index is good for its uniform distribution in the sinter mixture. The heat from hydration action of the quicklime can make the lime particles in the quasi-particles shrunk, and the particles in the quasi-particles are bonded more tightly and the isotropic thermal stress is more balanced, which is beneficial to the improvement of the hot property of the quasi-particles.

Key words: sinter, vanadium titano-magnetite concentrate, granulation, quicklime, digestion behavior, ore mixing

收稿日期: 2019-09-18

作者简介: 刘东辉(1987—)男,河北承德人,博士后,主要从事炼铁理论与冶金环保研究。E-mail: 17801035953@163.com。

0 引言

近年来,随着我国烧结技术水平的提高,钒钛磁铁精矿在烧结生产中应用的比例不断上升。前人对钒钛矿烧结的研究^[1-3]表明:钒钛磁铁精粉制粒中颗粒间黏附力弱,制粒后的准颗粒小球在受机械冲击和热气流作用时,其表层的黏附层容易脱落,从而使得准颗粒小球结构破坏,严重恶化烧结料层的透气性。此外,不同钢铁企业所用的含铁钒钛原料存在明显差异,造成烧结工作者对钒钛磁铁精粉制粒中存在问题的认识分歧较大。改善烧结料层的原始透气性和烧结过程中料层的透气性是强化钒钛磁铁精粉烧结和提高钒钛磁铁烧结矿产质量的有效方法。烧结混合料中熔剂的种类、添加量和添加方式对烧结料层原始透气性和烧结过程中料层透气性影响显著。研究^[6-10]表明:烧结混合料中不同熔剂的加入,能明显提高烧结混合料制粒效率和准颗粒小

球的热稳定性,进而改善烧结料层的透气性和物料间烧结反应的动力学条件,降低干燥预热带阻力,提高烧结矿的产质量。因此,笔者研究了生石灰的消化行为及其对三种典型钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响规律,为探明烧结混合料制粒中钒钛磁铁精粉与熔剂的合理匹配及改善钒钛磁铁精粉的制粒性能 and 其在工业烧结过程中的合理优化提供理论依据。

1 试验原料

研究选取的含铁料为三种钒钛磁铁精粉和两种核矿石(烧结返矿和杨迪矿),含铁料的主要化学成分见表 1。其中矿粉 Ore-C 为河北承德地区的低钛型钒钛磁铁精粉,Ore-J 为俄罗斯进口的中钛、高铬型钒钛磁铁精粉、Ore-P 为攀西地区的高钛型钒钛磁铁精粉,Ore-R 和 Ore-Y 分别为烧结返矿和杨迪矿。研究选取的烧结熔剂为四种生石灰,生石灰的化学成分见表 2。

表 1 含铁料的化学成分
Table 1 Chemical compositions of iron-bearing materials

矿粉编号	w(TFe)	w(CaO)	w(Al ₂ O ₃)	w(SiO ₂)	w(MgO)	w(V ₂ O ₅)	w(TiO ₂)	烧损
Ore-C	63.88	1.19	1.13	3.40	0.88	0.45	2.61	1.14
Ore-J	61.43	0.13	3.24	1.26	1.19	0.94	6.80	2.98
Ore-P	53.67	1.16	3.60	3.34	2.76	0.57	12.46	1.72
Ore-R	50.30	12.73	1.93	5.38	2.42	0.33	1.25	2.71
Ore-Y	57.30	0.02	1.48	6.02	0.06			10.37

表 2 生石灰的化学成分
Table 2 Chemical compositions of quicklime

熔剂编号	w(CaO)	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(MgO)	烧损
L1	78.80	4.64	2.01	0.69	12.80
L2	80.00	3.78	4.21	0.64	8.58
L3	79.00	3.00	4.80	1.00	9.00
L4	86.40	2.20	1.10	1.60	7.60

由表 1 可知,三种钒钛磁铁精粉中矿粉 Ore-P 的含铁品位相对较低,但 TiO₂ 含量和 Al₂O₃ 含量最高,分别为 12.46% 和 3.60%,属于典型的高钛型钒钛磁铁矿;矿粉 Ore-C 和 Ore-J 中 TiO₂ 含量分别为 2.61% 和 6.80%,分别为低钛型和中钛型钒钛磁铁矿。由表 2 可知,四种生石灰的 CaO 含量均高于 78.80%,其中生石灰 L4 的 CaO 含量最高,但烧损最低,其 CaO 含量和烧损分别为 86.40% 和 7.60%;其它三种生石灰的 CaO 含量在 78.80% ~ 80.00% 范围内波动,CaO 含量基本属于同一水平。四种生石灰中 L1 的 CaO 含量最低,但烧损最高,分别为 78.80%

和 12.80%;生石灰的主要成分除了 CaO 和未煅烧完全的 CaCO₃ 外,还含有少量脉石成分和吸水后形成的 Ca(OH)₂,其 CaO 总量与烧损呈一定的负相关关系。

四种生石灰的矿物组成如图 1~4 所示。

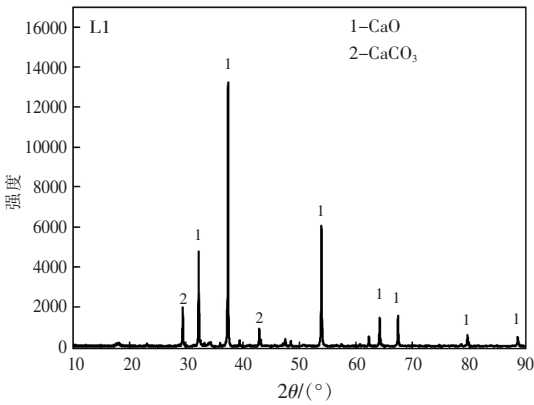


图 1 生石灰 L1 的矿物组成
Fig.1 Mineral compositions of the quicklime (L1)

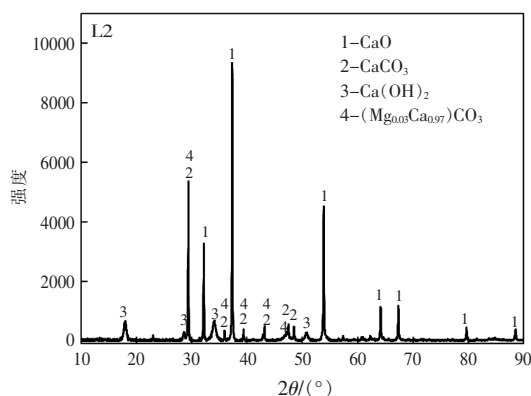


图2 生石灰 L2 的矿物组成

Fig.2 Mineral compositions of the quicklime (L2)

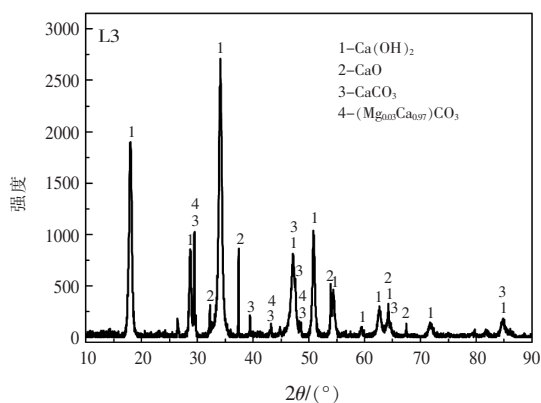


图3 生石灰 L3 的矿物组成

Fig.3 Mineral compositions of the quicklime (L3)

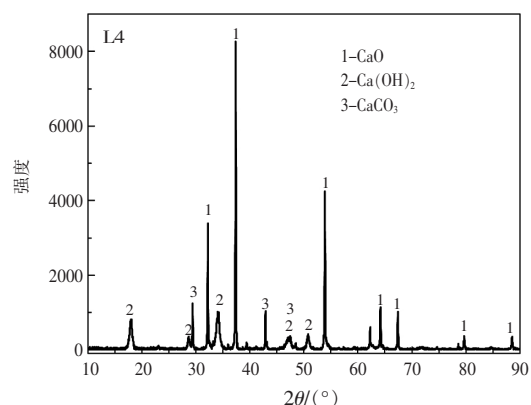


图4 生石灰 L4 的矿物组成

Fig.4 Mineral compositions of the quicklime (L4)

结合生石灰的化学成分和 XRD 图谱可知,生石灰 XRD 图谱中同时存在的衍射峰有 CaO 、 CaCO_3 和 Ca(OH)_2 ,但是衍射峰的强弱差别较大。生石灰 L1

和 L4 中主要的衍射峰为 CaO ,而 CaCO_3 和 Ca(OH)_2 的衍射峰较弱;相比生石灰 L1 和 L4 而言,L2 中 CaCO_3 和 Ca(OH)_2 的衍射峰较强;L3 的主要衍射峰为 Ca(OH)_2 ,此外还含有一些强度较弱的 CaO 、 CaCO_3 和 $(\text{Mg}_{0.03}\text{Ca}_{0.97})\text{CO}_3$ 衍射峰。说明生石灰 L1 和 L4 的煅烧程度较高,成分主要以 CaO 为主,熔剂中含有的杂质较少;L2 中主要成分虽然依旧为 CaO ,但其煅烧程度明显低于 L1 和 L4;L3 中 Ca(OH)_2 含量较高,说明生石灰保存过程中吸收了水分,部分生石灰发生了变质。

2 试验方法和方案

2.1 试验方法

生石灰消化后粒度分布指数试验:将生石灰消化后粒度小于 0.1 mm 粒级所占比例定义为消化后粒度分布指数。生石灰消化粒度分布指数试验方法:采用四分法称取生石灰 10 g 置于陶瓷坩埚,加入足量蒸馏水使其充分消化,然后将坩埚放入烘箱 110 °C 条件下烘干 10 h,直至其完全干燥,然后称量消化后不同坩埚内小于 0.1 mm 粒级的百分比。

烧结混合料制粒试验采用微型圆筒制粒机,混合料制粒方法和制粒过程参数一定^[1],主要考察其制粒效率、制粒后小球的均匀程度、冷强度以及抗热破坏能力,分别以颗粒长大指数 $\text{GI}^{[1]}$ 、均匀性指数 $\text{UI}^{[1]}$ 、破损指数 $\text{DI}^{[1]}$ 和抗热粉化指数 $\text{KI}^{[1]}$ 进行评价。

2.2 试验方案

本研究按照“51.00% 钒钛磁铁精粉+20% 烧结返矿+20% 杨迪矿+2.55% 生石灰+2.75% 石灰石+3.70% 焦粉”模式进行配矿(质量分数),试验方案见表 3。

3 试验结果及分析

3.1 生石灰消化后粒度分布指数

生石灰遇水消化后生成细小的 Ca(OH)_2 颗粒,而生成的 Ca(OH)_2 颗粒的比表面积较大,消石灰呈胶体粒子状态存在,胶体黏结性能较好,且粒度较细,当其均匀地分布在烧结混合料中,能够促进烧结混合料在圆筒转动过程中成球长大,进而改善烧结料层的透气性和烧结矿的性能指标。因此,对四种生石灰消化后的粒度组成进行了研究,四种生石灰消化后粒度分布指数见表 4。

表 3 铁矿粉配矿试验方案(质量分数)
Table 3 Schemes of ore mixing experiments

方案	Ore-C	Ore-F	Ore-J	Ore-R	Ore-Y	L1	L2	L3	L4	石灰石	焦粉
CL1	51.00	0.00	0.00	20.00	20.00	2.55	0.00	0.00	0.00	2.75	3.70
CL2	51.00	0.00	0.00	20.00	20.00	0.00	2.55	0.00	0.00	2.75	3.70
CL3	51.00	0.00	0.00	20.00	20.00	0.00	0.00	2.55	0.00	2.75	3.70
CL4	51.00	0.00	0.00	20.00	20.00	0.00	0.00	0.00	2.55	2.75	3.70
PL1	0.00	51.00	0.00	20.00	20.00	2.55	0.00	0.00	0.00	2.75	3.70
PL2	0.00	51.00	0.00	20.00	20.00	0.00	2.55	0.00	0.00	2.75	3.70
PL3	0.00	51.00	0.00	20.00	20.00	0.00	0.00	2.55	0.00	2.75	3.70
PL4	0.00	51.00	0.00	20.00	20.00	0.00	0.00	0.00	2.55	2.75	3.70
JL1	0.00	0.00	51.00	20.00	20.00	2.55	0.00	0.00	0.00	2.75	3.70
JL2	0.00	0.00	51.00	20.00	20.00	0.00	2.55	0.00	0.00	2.75	3.70
JL3	0.00	0.00	51.00	20.00	20.00	0.00	0.00	2.55	0.00	2.75	3.70
JL4	0.00	0.00	51.00	20.00	20.00	0.00	0.00	0.00	2.55	2.75	3.70

表 4 生石灰消化后粒度分布指数
Table 4 Particle size distribution index (PDI)
of quicklime

L1	L2	L3	L4
19.32	10.37	15.67	6.52

由表 4 可知,不同生石灰消化后粒度分布指数差异较大,总体而言,四种生石灰消化后的粒度分布指数波动在 6.52%~19.32%,最大为 19.32%(L1),其次为 L3 和 L2,最小为 6.52%(L4)。造成生石灰消化后粒度分布差异较大的主要原因是生石灰的化学成分和矿物组成。当生石灰生产过程中其煅烧程度较低时,生石灰中未煅烧完全的碳酸钙含量较高,而碳酸钙遇水不能消化,影响消化后的粒度分布行为。此外,生石灰在运输过程中容易吸水发生变质,而变质后的生石灰容易发生黏结现象,影响钙质熔剂消化后粒度的组成及其在烧结混合料中的均匀分布。

3.2 生石灰消化后粒度分布指数对钒钛磁铁精粉制粒的影响

不同生石灰条件下,三种钒钛磁铁精粉制粒性能指标结果如表 5 所示。

3.2.1 颗粒长大指数和均匀性指数

生石灰消化后粒度分布指数对钒钛磁铁精粉颗粒长大指数和均匀性指数影响的试验结果如图 5 所示。

由表 5 可知,对于同一种生石灰而言,三种不同钛含量的钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数分别在 1.539 4~1.609 8、1.480 5~1.579 1 和 1.386 3~1.480 3 范围内波动,颗粒长大指数差异较大。三种钒钛磁铁精粉准颗粒小球的均匀性指数分别在 0.493 1~0.532 3、0.481 3~0.521 7、0.476 2~0.514 7 范围内波动,准颗

粒小球的均匀性差异较小。对于不同生石灰同种钒钛磁铁矿粉而言,三种钒钛磁铁精粉颗粒长大指数的差值分别为 0.070 4、0.098 6 和 0.094; 均匀性指数的差值分别为 0.039 2、0.031 4 和 0.041 2,两项指标波动均较小,即生石灰对同种钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数和均匀性指数影响较小。总体而言,钒钛磁铁精粉的制粒效率和均匀性指标较好,说明生石灰种类不是钒钛磁铁精粉制粒效率和准颗粒小球均匀程度的限制性环节。

表 5 钒钛磁铁精粉制粒性能指标
Table 5 Granulation indexes of the vanadium
titano-magnetite concentrate

方案	GI	UI	DI	KI
CL1	1.608 9	0.532 3	0.336 1	5.73
CL2	1.580 6	0.516 7	0.343 2	5.36
CL3	1.598 1	0.521 0	0.340 1	5.57
CL4	1.539 4	0.493 1	0.350 2	5.13
PL1	1.579 1	0.521 7	0.393 9	3.95
PL2	1.526 9	0.509 3	0.462 9	2.94
PL3	1.549 3	0.510 3	0.430 5	3.16
PL4	1.480 5	0.481 3	0.491 0	2.85
JL1	1.480 3	0.517 4	0.428 2	3.74
JL2	1.412 7	0.498 5	0.494 0	2.88
JL3	1.452 4	0.508 6	0.449 3	3.40
JL4	1.386 3	0.476 2	0.514 7	2.66

由图 5 可知,三种钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数和均匀性指数均随着生石灰消化后粒度分布指数的增大而升高。当生石灰消化后粒度分布指数小于 10.37 时,低钛型和高钛型钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数和均匀性指数的增长速度明显高于中钛型钒钛磁铁精粉; 当生石灰消化后粒度分布指数大于 10.37 时,低钛型和高钛型钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数和均匀性指数的增长速度缓慢减

弱,而中钛型钒钛磁铁精粉的制粒效率和均匀性指数的增长整体相对均匀。对于同一种生石灰而言,颗粒长大指数和均匀性指数由小到大的顺序为:中钛型、高钛型和低钛型钒钛磁铁精粉,造成颗粒长大指数差异较大的主要原因是钒钛磁铁精粉的表面形貌和亲水性不同^[13]。钒钛磁铁精粉的制粒效率和均匀性指数随着生石灰消化后粒度分

布指数的增大而升高,主要原因是高粒度分布指数的钙质熔剂在与其它烧结原料混匀、消化和制粒中,其在混合料中的分布更加均匀,呈胶体粒子状态存在的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与其它物料的接触面积大,有利于其黏附其它细小颗粒均匀地向核矿石表面黏接,从而提高烧结混合料的制粒效率和准颗粒小球的均匀程度。

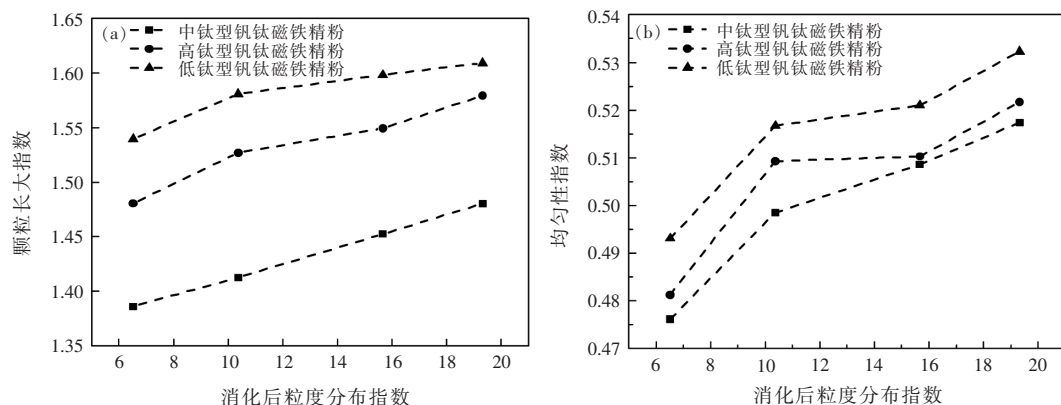


图5 生石灰消化后粒度分布指数对颗粒长大指数和均匀性指数的影响

Fig.5 Effects of particle size distribution index of quicklime on the GI and UI

3.2.2 破损指数和抗粉化指数

生石灰消化后粒度分布指数对钒钛磁铁精粉制

粒后小球的抗热粉化指数和破损指数的影响结果如图6所示。

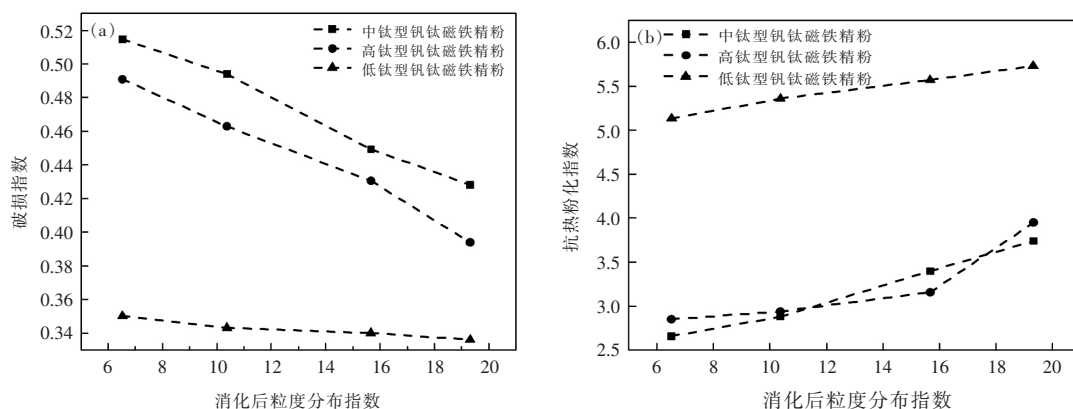


图6 生石灰消化后粒度分布指数对破损指数和抗热粉化指数的影响

Fig.6 Effects of particle size distribution index of quicklime on the DI and KI

由图6可知,对于不同种生石灰而言,三种不同钛含量的钒钛磁铁精粉的破损指数分别在0.336 1~0.350 2、0.393 9~0.491 0和0.428 2~0.514 7范围内波动;抗热粉化指数分别在5.13~5.73、2.85~3.95和2.66~3.74范围内波动,抗热粉化指数差异较大,其最大值与最小值的差值为2.47。对于不同生石灰同种钒钛磁铁矿粉而言,三种钒钛磁铁精粉颗粒长

大指数的差值分别为0.014 1、0.097 1和0.086 5;相对于其它两种钒钛磁铁精粉,低钛型钒钛磁铁精粉的破损指数较小,抗热粉化指数较高,说明低钛型钒钛磁铁精粉的准颗粒小球的强度和热稳定性高于其它两种钒钛矿。

由图6可知,中钛型和高钛型钒钛磁铁精粉的破损指数随着生石灰消化后粒度分布指数的增大而

减小,低钛型钒钛磁铁精粉的破损指数受生石灰消化后粒度分布指数的影响较小。随着生石灰消化后粒度分布指数的升高,钒钛磁铁精粉的抗热粉化指数均呈现出升高趋势。主要原因是生石灰的粒度分布指数越高,其在烧结混合料中偏析现象越弱,生石灰在烧结混合料中的均匀分布使得胶体粒子状态的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与其它物料的黏结效果更好。此外,在烧结抽风过程中,水蒸气对粒度分布指数较高的生石灰与含铁料的准颗粒小球的各向应力均衡,且生石灰吸水消化后放热,消石灰胶体颗粒均匀收缩,准颗粒小球中各组分黏结得更加紧密,减轻了准颗粒小球在抽风负压和热传递过程中的破碎,一定程度上抑制了准颗粒小球的热粉化现象。

4 结论

1) 生石灰消化后粒度分布的影响因素主要为

生石灰的化学成分和矿物组成。当石灰石煅烧程度较低时,生石灰中存在大量未煅烧完全的碳酸钙,其遇水不能消化,影响生石灰消化后的粒度分布行为。此外,变质后的生石灰黏性较大,容易发生黏结现象,亦不利于制粒中生石灰消化后的均匀分布。

2) 生石灰消化后的粒度分布指数与钒钛磁铁精粉的颗粒长大指数、均匀性指数和抗热粉化指数呈正相关,与破损指数呈负相关。相对于中钛型和高钛型钒钛磁铁精粉而言,低钛型钒钛磁铁矿的破损指数受消化后粒度分布指数的影响较小。

3) 生石灰消化后粒度分布指数大,其在混合料中的分布均匀,有利于细小颗粒均匀地向核矿石表面黏接,烧结抽风过程中准颗粒小球的各向热应力均衡;同时,准颗粒小球中消石灰胶体颗粒受热均匀收缩,准颗粒小球中各组分黏结得紧密,一定程度上抑制了准颗粒小球的热粉化现象。

参考文献

- [1] Zhang Jinliang, Liu Donghui, Liu Zhengjian, *et al.* Effects of specific surface area on granulation behavior of vanadium titanomagnetite concentrate [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2017, 38 (6): 91-97.
(张建良, 刘东辉, 刘征建, 等. 比表面积对钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38 (6): 91-97.)
- [2] Liu Shuqing. Production status and development trend of vanadium product in world in recent years [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35 (3): 55-62.
(刘淑清. 近年全球钒制品生产现状及发展趋势 [J]. *钢铁钒钛*, 2014, 35 (3): 55-62.)
- [3] Zhang Yong, Zhou Mi, Chu Mansheng, *et al.* Basic sintering characteristics of imported vanadium and titanium magnetite with high chrome content [J]. *Iron and Steel*, 2012, 47 (12): 18-23.
(张勇, 周密, 储满生, 等. 进口高铬型钒钛磁铁矿的烧结基础特性 [J]. *钢铁*, 2012, 47 (12): 18-23.)
- [4] Tan Qiyong, Chen Bo, Zhang Yushu, *et al.* Characteristics and current situation of comprehensive utilization of vanadium and titanomagnetite resources in Panxi region [J]. *Multipurpose and Utilization of Mineral Resources*, 2011, 6 (1): 6-10.
(谭其尤, 陈波, 张裕书, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与综合回收利用现状 [J]. *矿产综合利用*, 2011, 6 (1): 6-10.)
- [5] Wu Lihua, Chen Xuefeng. Research and optimization of factors influencing the mix granulating in Pangang sintering plant [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2006, 31 (1): 19-22.
(吴力华, 陈雪峰. 攀钢烧结混合料制粒因素的研究与优化 [J]. *烧结球团*, 2006, 31 (1): 19-22.)
- [6] Liu Donghui, Lü Qing, Zou Leilei, *et al.* Influence of ratios of limonite on basic characteristics of vanadium titanium magnetite [J]. *Iron and Steel*, 2014, 49 (4): 13-17.
(刘东辉, 吕庆, 邹雷雷, 等. 褐铁矿配比对钒钛磁铁矿烧结基础特性的影响 [J]. *钢铁*, 2014, 49 (4): 13-17.)
- [7] Zhou Mi, Yang Songtao, Jiang Tao, *et al.* Effect of enhanced granulation on Cr-bearing vanadium and titanium magnetite sintering [J]. *Iron and Steel*, 2015, 50 (3): 39-43.
(周密, 杨松陶, 姜涛, 等. 强化制粒对含铬型钒钛混合料烧结的影响 [J]. *钢铁*, 2015, 50 (3): 39-43.)
- [8] He Muguang, Lin Qiang, Zhang Yixian. Influence of size distribution of vanadium-titanium magnetite concentrate on sintering performance [J]. *Iron and Steel*, 2010, 45 (3): 27-31.
(何木光, 林千谷, 张义贤. 钒钛磁铁精矿粒度对烧结性能的影响 [J]. *钢铁*, 2010, 45 (3): 27-31.)
- [9] He Shuzhen. Ore blending research of high proportion limonite with ultra-fine magnetite concentrate [J]. *Iron and Steel*, 2010, 45 (9): 22-27.
(贺淑珍. 高比例褐铁矿与细磁铁矿粉配矿技术研究 [J]. *钢铁*, 2010, 45 (9): 22-27.)
- [10] Przemysław F, Mroz J. Ability for self-pelletization of iron ores and magnetite concentrates [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, International, 2011, 18 (6): 1.
- [11] Wu Shengli, Pan Jiaxin, Zhu Juan, *et al.* Proper water addition for sintering granulation based on the water absorbing characteristics of quicklime [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27 (1): 27-34.
(吴胜利, 攀佳欣, 朱娟, 等. 基于生石灰吸水性的适宜烧结制粒水分 [J]. *钢铁研究学报*, 2015, 27 (1): 27-34.)
- [12] Fu Shoucheng, Cai Ruzhuo, Tu Wei. On granulating effectiveness of sinter mix [J]. *Sintering and Pelletizing*, 1992, 4 (1): 7-12.
(傅守澄, 蔡汝卓, 涂卫. 烧结混合料的制粒效果及分析 [J]. *烧结球团*, 1992, 4 (1): 7-12.)