# 生石灰吸水特性对钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响

刘东辉[1,2]，张建良[1]，王广伟[1]，王晓哲[1]，姜 曦[3]

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院,北京 100831;2. 清华大学 环境学院,北京 100084;3. 中国钢铁工业协会 市场调研部,北京 100711)

**摘 要:** 为改善钒钛磁铁精粉的烧结制粒效果,采用微型圆筒制粒机研究了生石灰的吸水特性对钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响。研究结果表明: 不同生石灰的吸水特性差异较大,随着生石灰吸水特性指数的增大,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先升高后降低,破损指数先降低后升高; 相对于中钛型和高钛型钒钛磁铁矿,吸水特性指数对低钛型钒钛矿破损指数和抗热粉化指数的影响较小; 增加吸水能力强的生石灰使用配比,有利于制粒性能的改善; 但生石灰吸水能力过高时,其消化反应剧烈,消化后的黏性大,容易出现"自团聚"现象,造成其在混合料发生偏析,且水分在矿粉颗粒间的分布占比下降,矿粉颗粒间形成毛细力的水分不足。因此,对于吸水能力过高的生石灰,制粒中应适当调整配水量和加水方式使其均匀分布,同时保证铁矿粉之间形成毛细水的含水量,进而提高钒钛磁铁精粉的制粒效果。

**关键词:** 生石灰; 吸水特性; 钒钛磁铁精粉; 烧结; 制粒; 优化配矿

**中图分类号:** TF046.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2020)01-0020-05

**doi:** 10.13403/j.sjqt.2020.01.004

# Effects of water absorbing characteristics of quicklime on granulation of the vanadium titano-magnetite concentrate fines

**Liu Donghui[1,2], Zhang Jianliang[1], Wang Guangwei[1], Wang Xiaozhe[1], Jiang Xi[3]**

(1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083; 2. *School of Environment, Tsinghua University, Beijing* 100084; 3. *Department of Market Research, China Iron and Steel Industry Association, Beijing* 100711)

**Abstract** In order to improve the sintering granulating effects of vanadium titano-magnetite concentrate, the effects of water absorbing characteristics of quicklime on the granulation of the vanadium titano-magnetite concentrate are investigated using micro-drum granulation equipment. The results show that there exists great difference for the water absorbing index(WAI) of different kinds of quicklime. With the increase of the WAI, the granulation index(GI), uniformity index(UI), and resistance index of the thermal disintegration(KI) of vanadium titano-magnetite concentrate first increase and then decrease, but the damage index(DI) exhibits the opposite behavior. Compared with medium-titanium and high-titanium vanadium titano-magnetite concentrate, the effects of WAI on the KI and DI are little for low-titanium vanadium titano-magnetite concentrate. Increasing the proportion of quicklime with strong water absorbing capacity is favorable for improving granulating performance, but when the WAI of quicklime is too high, the digestion reaction will be strong and the viscosity increases, which easily leads to "self-reunion" phenomenon and result in flux segregation in mixture. Meanwhile, the proportion of water distributed in the ore particles decreases, the water required for forming the capillary force among the ore particles is insufficient. Therefore, for the quicklime with high WAI, the water content and water adding methods can be adjusted in the granulation process for the flux uniform distribution and appropriate moisture of the ore particles, so as to improve the granulating effect of vanadium titano-magnetite concentrate.

**Key words** quicklime; water absorbing ability; vanadium titano-magnetite concentrate; sintering; granulation; optimization of ore proportioning

**收稿日期:** 2019-09-20

**基金项目:** 国家自然科学基金重点支持联合基金资助项目(U1260202)

**作者简介:** 刘东辉(1987—),男,博士后,从事烧结及炼铁新技术方面的研究。

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

随着我国钢铁工业的迅猛发展，国内铁矿石资源日益紧张，我国内陆钢铁企业的进口铁矿石存在运输成本高、来源不稳、烧结基础数据缺乏等问题，烧结矿质量难以保证[1-3]。因此，合理利用钒钛磁铁矿对缓解我国内陆钒钛钢铁企业的资源危机和降低生产成本具有重要意义。前人对钒钛矿烧结的研究表明[3-5]，钒钛磁铁精粉制粒效率低，冷态强度和热态稳定性较差，烧结生产配比较高时，将严重恶化烧结料层的透气性。而烧结混合料在混匀和制粒中，生石灰吸水消化放热，其吸水能力对烧结混合料中水分的分配影响显著，进而影响烧结制粒效果。

吴胜利等[6]研究了烧结过程中基于生石灰吸水特性的适宜制粒含水量，研究表明：烧结制粒中生石灰的吸水行为不仅消耗其生成消石灰的化合水，还包括其消化后自身吸收的物理水；当制粒所需水分仅满足化合水消耗时，$Ca(OH)_2$的吸水会影响铁矿粉中的水分分布；当制粒所需水分满足生石灰湿容量时，铁矿粉中的水分和生石灰化合所需水分均充足，有利于烧结制粒效果的改善。左藤武夫等[7]研究了生石灰改善混合料制粒的机理以及生石灰的有效使用方法，结果表明：制粒小球的结构为核颗粒的粗粒部分、粘附细粉的中层和受热应力作用易碎裂的外层；添加生石灰后，制粒小球的热稳定性增强，且升高混合料温度可以增强生石灰的水合反应性，有利于制粒性能指标的改善。因此，本文研究通过生石灰的吸水特性及其对钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响规律，以期为烧结混合料制粒中钒钛磁铁精粉与熔剂的合理搭配提供理论依据。

## 1　试验原料与方法

### 1.1　试验原料

试验原料为石灰石(LS)、焦粉(JF)、4 种生石灰(L1、L2、L3 和 L4)和 5 种含铁料。其中含铁料分别为 3 种钒钛磁铁精粉(Ore-A、Ore-B 和 Ore-C)、烧结返矿(Ore-D)和杨迪矿(Ore-E)。试验原料的主要化学成分如表 1 所示。

表 1　试验原料主要化学成分(质量分数)　%

| 试验原料 | TFe | $SiO_2$ | CaO | MgO | $Al_2O_3$ | $V_2O_5$ | $TiO_2$ | 烧损 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ore-A | 63.88 | 3.40 | 1.19 | 0.88 | 1.13 | 0.45 | 2.61 | 1.14 |
| Ore-B | 61.43 | 1.26 | 0.13 | 1.19 | 3.24 | 0.94 | 6.80 | 2.98 |
| Ore-C | 53.67 | 3.34 | 1.16 | 2.76 | 3.60 | 0.57 | 12.46 | 1.72 |
| Ore-D | 50.30 | 5.38 | 12.73 | 2.42 | 1.93 | 0.33 | 1.25 | 2.71 |
| Ore-E | 57.30 | 6.02 | 0.02 | 0.06 | 1.48 | — | — | 10.37 |
| L1 | — | 4.64 | 78.80 | 0.69 | 2.01 | — | — | 12.80 |
| L2 | — | 3.78 | 80.00 | 0.64 | 4.21 | — | — | 8.58 |
| L3 | — | 3.00 | 79.00 | 1.00 | 4.80 | — | — | 9.00 |
| L4 | — | 2.20 | 86.40 | 1.60 | 1.10 | — | — | 7.60 |
| LS | — | 8.00 | 48.00 | 0.91 | 0.13 | — | — | 42.10 |
| JF | — | 7.52 | 0.67 | 0.70 | 3.34 | — | — | 80.23 |

由表 1 可知：3 种钒钛矿中 Ore-C 的含铁品位最低，但 $w(TiO_2)$ 最高(12.46%)，属于高钛型钒钛磁铁矿；矿粉 Ore-A 和 Ore-B 的 $w(TiO_2)$ 分别为 2.61%和 6.80%，分别为低钛型和中钛型钒钛磁铁矿；烧结返矿 Ore-D 和杨迪矿 Ore-E 粒度较大，含铁品位较低，主要作为核矿石；4 种生石灰的 $w(CaO)$ 较高，均高于 78.80%，其中生石灰 L4 的 $w(CaO)$ 最高，但烧损最低，其 $w(CaO)$ 和烧损分别为 86.40%和 7.60%；其它 3 种生石灰的 $w(CaO)$ 在 78.80%~80.00%范围内，$w(CaO)$ 基本属于同一水平；石灰石和焦粉的烧损较大，分别为 42.10%和 80.23%。

### 1.2　试验方法

生石灰中游离 $w(CaO)$ 的测定方法：取生

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

石灰试样 1 g 置于小口径陶瓷干锅中，向坩锅中加入足量刚煮沸过的冷蒸馏水并加盖使其充分消化，静置 1 h 后将坩埚放在烘箱中烘干，温度设置为 50 ℃，称量烘干后试样的质量。生石灰中游离的 $w(\mathrm{CaO})$ 可由式(1)计算得出。

$$w(\mathrm{CaO}) = \frac{56 \times (M_1 - M_0)}{18 \times M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：$M_0$ 为生石灰的初始质量，g；$M_1$ 为生石灰完全消化并烘干后的质量，g。

烧结混合料制粒试验采用微型圆筒制粒机，制粒方法和制粒过程参数一定[8]，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[9]、均匀性指数[9]、破损指数[9]和抗热粉化指数[9]进行评价。烧结混合料配料试验方案如表 2 所示。

表 2 烧结混合料配料试验方案(质量分数) %

| 方案 | Ore-A | Ore-C | Ore-B | Ore-D | Ore-E | L1 | L2 | L3 | L4 | LS | JF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AL1 | 51.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| AL2 | 51.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| AL3 | 51.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| AL4 | 51.00 | 0.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 2.75 | 3.70 |
| CL1 | 0.00 | 51.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| CL2 | 0.00 | 51.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| CL3 | 0.00 | 51.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| CL4 | 0.00 | 51.00 | 0.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 2.75 | 3.70 |
| BL1 | 0.00 | 0.00 | 51.00 | 20.00 | 20.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| BL2 | 0.00 | 0.00 | 51.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| BL3 | 0.00 | 0.00 | 51.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 0.00 | 2.75 | 3.70 |
| BL4 | 0.00 | 0.00 | 51.00 | 20.00 | 20.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.55 | 2.75 | 3.70 |

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 生石灰的吸水特性

烧结混合料从一次混匀到二次混匀制粒的过程基本在 12 min 内完成，因此将生石灰在 12 min 内的吸水量定义为吸水特性指数。吸水特性指数表征了生石灰在烧结制粒消化过程中消耗混合料的含水量。4 种生石灰的吸水特性指数和游离 $w(\mathrm{CaO})$ 如图 1 所示。

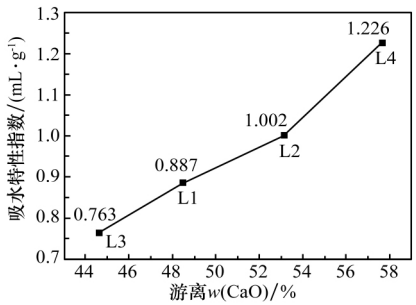



图 1 生石灰的吸水特性指数和游离 $w(\mathrm{CaO})$ 试验结果

由图 1 可知：不同生石灰的吸水特性差异较大，4 种生石灰中 L4 的吸水特性指数和游离 $w(\mathrm{CaO})$ 相对较高，分别为 1.226 mL/g 和 57.64%；其次是生石灰 L2 和 L1；生石灰 L3 的吸水特性指数和游离 $w(\mathrm{CaO})$ 最低，分别为 0.763 mL/g 和 44.62%。此外，生石灰的吸水特性指数随着游离 $w(\mathrm{CaO})$ 的升高而升高，两者基本呈现出正相关关系。主要原因是生石灰中游离 $w(\mathrm{CaO})$ 与其活性度呈正相关关系，随着生石灰中游离 $w(\mathrm{CaO})$ 的升高，生石灰的活性增强，当生石灰遇水消化时，高活性的生石灰与水剧烈反应，剧烈消化反应放出的热量又使烧结混合料蒸发掉一部分水。因此，生石灰的吸水特性指数随着游离 $w(\mathrm{CaO})$ 的升高而升高。

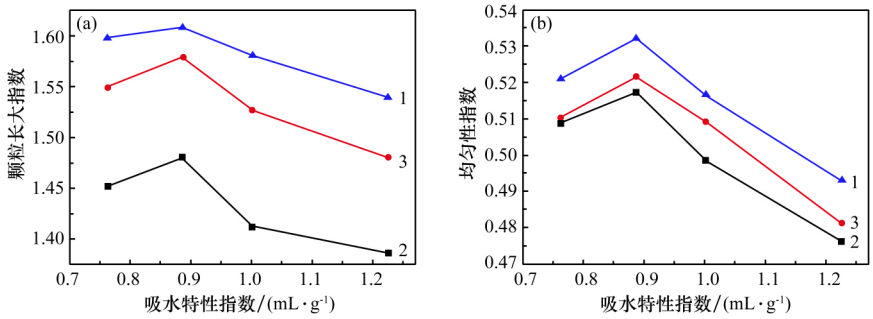
### 2.2 生石灰吸水特性对钒钛磁铁精粉制粒的影响

#### 2.2.1 颗粒长大指数和均匀性指数

生石灰吸水特性指数对颗粒长大指数和均匀性指数的影响如图 2 所示。由图 2 可知：随着生石灰吸水特性指数的升高，3 种钒钛磁铁

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

精粉的颗粒长大指数和均匀性指数均先升高后降低，当吸水特性指数在 0.887 mL/g 左右时，颗粒长大指数和均匀性指数达到最大值。这是因为：钒钛磁铁精粉亲水性差且结构致密，铁矿颗粒之间的毛细力较小，当生石灰的吸水特性指数较低时，铁矿粉颗粒间物理水的占比增加，此时生石灰消化后胶体的粘结作用较弱，粘附细粉与核矿石的粘附力较小，不利于制粒效率提高；随着生石灰吸水能力的增大，生石灰消化后的 $Ca(OH)_2$ 胶体的粘结作用增强，粘附细粉能够快速、均匀地粘附到核矿石表面，进而提高烧结制粒效率和准颗粒小球的均匀性；但生石灰的吸水能力过大时，生石灰容易快速吸水发生团聚，造成熔剂在烧结混合料中偏析，不利于熔剂在混合料中均匀分布，影响粘附细粉与核矿石的均匀粘接；同时水分在铁矿粉颗粒间的分布占比大幅下降，矿粉颗粒间形成毛细力的水分不足，亦不利于制粒效率的提高。



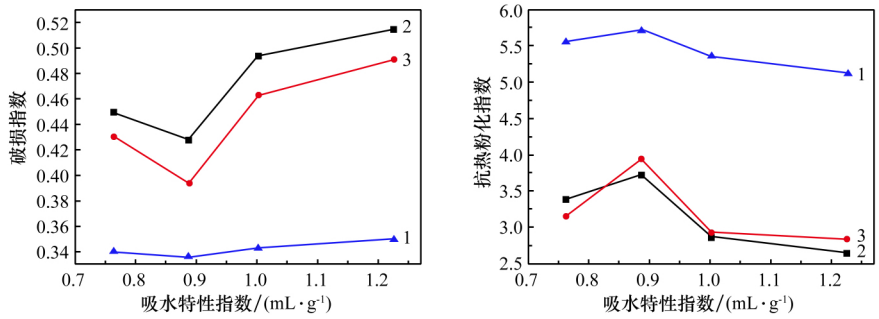

(a) 颗粒长大指数；(b) 均匀性指数

1—低钛型钒钛磁铁精粉；2—中钛型钒钛磁铁精粉；3—高钛型钒钛磁铁精粉。

图 2　生石灰吸水特性指数对颗粒长大指数和均匀性指数的影响

### 2.2.2　破损指数和抗粉化指数

生石灰吸水特性指数对破损指数和抗粉化指数的影响如图 3 所示。由图 3 可知：生石灰的吸水特性指数对低钛型钒钛磁铁矿的破损指数和抗热粉化指数影响相对较小；而随着吸水特性指数的升高，中钛型和高钛型钒钛磁铁精粉制粒后准颗粒小球的冷强度和热态稳定性先升高后降低；当生石灰的吸水特性指数较低时，水分主要存在于表面光滑的钒钛磁铁精粉间，生石灰消化后的粘结能力降低，准颗粒小球在运转过程和热气流冲击的作用下，粘附粉颗粒容易从核矿石表面脱落，造成其冷强度和热强度较差；当生石灰吸水特性指数在 0.887 mL/g 左右时，制粒小球的冷强度和热稳定性最好；随着生石灰的吸水特性指数继续增大，其消化反应剧烈且消化后的黏性较大，易出现“自团聚”现象，不利于其在烧结混合料中均匀分布。同时，水分在矿粉颗粒间的分布占比大幅下降，矿粉颗粒间形成毛细力的水分不足，毛细作用力降低。因此，对于吸水能力过高的生石灰，




(a) 破损指数；(b) 抗热粉化指数

1—低钛型钒钛磁铁精粉；2—中钛型钒钛磁铁精粉；3—高钛型钒钛磁铁精粉。

图 3　生石灰吸水特性指数对破损指数和抗粉化指数的影响

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

制粒中应适当调整配水量和加水方式使熔剂均匀分布，同时保证铁矿粉之间形成毛细水的水含量，从而提高制粒小球的冷态强度和热态稳定性。

## 3 结 论

(1) 不同生石灰的吸水特性差异较大，生石灰的吸水特性指数与其游离 $w(CaO)$ 呈正相关；游离 $w(CaO)$ 高的生石灰其活性强，其与水消化反应剧烈放热使混合料的水分进一步蒸发；增加强吸水能力的生石灰使用占比，粘附细粉能够快速粘附到核矿石表面，有利于制粒效率和准颗粒小球冷态强度、热态稳定性的提高。

(2) 随着生石灰吸水特性指数的增大，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均先升高后降低，破损指数先降低后升高；相比于中钛型和高钛型钒钛磁铁精粉，生石灰的吸水特性指数对低钛型钒钛磁铁矿破损指数和抗热粉化指数的影响较小。

(3) 烧结混合料水分一定，当生石灰吸水能力过高时，其消化反应剧烈，消化后的黏性大，容易出现“自团聚”现象，造成其在混合料发生偏析；且水分在矿粉颗粒间的分布占比下降，矿粉颗粒间形成毛细力的水分不足。此时，制粒中应适当调整配水量和加水方式使熔剂均匀分布，同时保证铁矿粉之间形成毛细水的含水量。

### 参考文献


[1] Liu Donghui, Zhang Jianliang, Liu Zhengjian, et al. Effects of iron sand ratios on the basic characteristics of vanadium titanium mixed ores [J]. JOM, 2016, 68(9): 2 418 – 2 424.

[2] 范晓慧，甘敏，李文琦，等. 烧结混合料适宜制粒水分的预测 [J]. 北京科技大学学报，2012，34(4)：373 – 377.

[3] 何木光，蒋大军，陈许玲. 提高钒钛磁铁精矿配比对烧结的影响 [J]. 钢铁钒钛，2014，42(2)：1 – 4.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 佐膝武夫，言素. 改进生石灰添加方法改善混合料制粒特性 [J]. 烧结球团，1987，10(1)：68 – 75.

[8] 张建良，刘东辉，刘征建，等. 比表面积对钒钛磁铁烧结矿烧结制粒的影响 [J]. 钢铁钒钛，2017，38(6)：7 – 12


(上接第6页)

密封装置和正压吸附式密封装置，对影响其密封效果的压差、密封板弹性模量和厚度3个因素进行了仿真分析。结果表明：弹性密封板的厚度对密封性能的影响最大，差压的影响次之，而材料弹性模量的影响最小，即填充间隙密封板的厚度越薄、压差越大、弹性模量越小，则其密封性能越好。

(3) 与正压吸附式密封装置相比，负压吸附式密封装置的密封效果更佳，它的密封性能是正压吸附式密封装置的6.6倍左右。

基于上述结论，作者现已将负压吸附式密封装置应用于工程实际中，并通过现场实际测试，其漏风量比传统密封技术下降了近50%。因此，本文所提出的密封技术可为具有类似结构的设备设计和开发提供指导。

### 参考文献


[1] 金永龙，徐南平，邬士英，等. 烧结机分区段漏风测试技术研究及应用 [J]. 钢铁，2003，38(3)：1 – 3.

[2] 张良. 炼铁烧结机新型首尾密封装置的研究 [D]. 唐山：华北理工大学，2016.

[3] 蒋大年. 烧结机漏风治理技术分析 [J]. 中国设备工程，2017(8)：77 – 78.

[4] 郭云奇，关珍旺，陈宝顺. 烧结机柔性差压侧密封技术研究 [J]. 烧结球团，2014，39(2)：9 – 11.

[5] 董书岐，贾友剑，吕明秀，等. 降低烧结机漏风率的技术改造 [J]. 设备管理与维修，2016(6)：63 – 65.

[6] 何云华，白明华，梁宏志. 降低烧结机漏风率技术与应用研究 [J]. 物理测试，2008，26(1)：6 – 10.

[7] 杨庆桂，强发文. 烧结机密封技术改造与实践 [J]. 工程技术研究，2013(2)：28 – 30.


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