烧结用铁矿粉制粒性能影响因素的试验研究

史先菊[1,2]，李光强[1]，刘 畅[1]，李 军[2]，赵毓伟[3]，王 强[1]
（1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室，湖北 武汉 430081；2. 宝钢股份中央研究院 武钢有限技术中心，湖北 武汉 430080；3. 鞍钢股份有限公司 鲅鱼圈钢铁分公司，辽宁 营口 115007）

摘要：研究铁矿粉制粒性能影响因素的层级结构规律对制粒和烧结生产配矿具有重要意义。本文通过检测11种铁矿粉的性能，并分粒级进行制粒试验，分析颗粒间作用力的种类；提出采用黏附指数表征矿粉制粒效果，判断颗粒间作用力相对大小，并分析各因素对颗粒间作用力表达的影响程度。结果表明：铁矿粉制粒过程所受的颗粒间作用力有铁矿粉自身产生的黏性力、分子水和毛细水产生的吸附力、矿石表面棱角产生的阻力3种，其中，黏性力大于水吸附力和棱角阻力。有黏性的铁矿粉制粒受以上3种作用力同时影响，以黏性力作用为主；无黏性的铁矿粉制粒时受铁矿粉水吸附力和表面粗糙度产生的阻力共同作用，黏附指数与成球性指数（采用K表征水吸附力）和大孔孔隙率（采用D_{big}表征表面粗糙度产生的力）比值正相关。水分、颗粒黏性、粒级、亲水性和粗糙度是影响颗粒间作用力表达的主因素，主因素对铁矿粉制粒性能的影响强弱具有明显的层级结构。

关键词：铁矿粉制粒；黏附指数；黏性力；水吸附力；表面粗糙度
中图分类号：TF046.4；TF3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0030－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.051

Experimental research on factors influencing granulation performance of iron ore powder for sintering

SHI Xianju[1,2], LI Guangqiang[1], LIU Chang[1], LI Jun[2], ZHAO Yuwei[3], WANG Qiang[1]
(1. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy Jointly Built by Provinces and Ministries, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Technical Center of Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Academia Sinica, Baosteel, Wuhan 430080, Hubei, China; 3. Bayuquan Iron and Steel Branch Company of Angang Steel Company Limited, Yingkou 115007, Liaoning, China)

Abstract: It is of great significance to research the hierarchical rules of the factors influencing the granulation performance of iron ore powder for granulation and sintering production. In this paper, through detecting the performances of 11 kinds of iron ore powder, conducting the granulation test at different granulation levels, the types of inter-particle forces are analyzed. In addition, the adhesion index is used to characterize the granulation effect of ore powder, judge the relative size of the intergranular force, and analyze the influence of various factors on the expression of intergranular force. The results show that the intergranular forces affected by the granulation process of iron ore powder include such 3 kinds as the viscous force generated by iron ore powder itself, the adsorption force generated by molecular water and capillary water, and the resistance generated by the angular angle of the ore surface, among which the viscous force is greater than the water adsorption force and angular resistance. The granulation of viscous iron ore powder is affected by the above 3 forces at the same time, mainly by viscous force. During the granulation of non-viscous iron ore powder, the adhesion index is positively correlated with the spherical index (K is used to represent the water adsorption force) and the macroporosity (the force

收稿日期：2022－02－21；**修回日期**：2022－03－10
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51674042)
作者简介：史先菊(1984—)，女，博士研究生，高级工程师，从事烧结、球团工艺及相关数学模型研究。
通信作者：王 强(1989—)，男，副教授，从事钢铁冶金工艺流程及相关数学模型研究。

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

generated by D_{big} is used to represent the surface roughness). Moisture, particle viscosity, particle grade, hydrophilicity and roughness are the main factors affecting the expression of inter-particle forces, and the influence of the main factors on the granulation performance of iron ore powder has an obvious hierarchical structure.

Key words: iron ore powder granulation; adhesion index; viscous force; water adsorption; surface roughness

铁矿粉制粒用于改善烧结原料粒度组成以获得良好透气性，其效果好坏对烧结过程有较大影响[1]。目前，广泛应用的铁矿粉制粒性能评价模型是成球性指数(K)，其中，铁矿粉最大毛细水和最大分子水质量分数用于表征成球能力，K 指数越大成球性越好[2-3]。K 指数用于评价造球铁精矿制粒性能的好坏，但用于评价烧结用铁粉矿制粒性能的一致性较差。铁精矿粒度相对较细，比表面积大，其亲水性在制粒中的影响较大。而铁粉矿粒度较粗，比表面积小，影响铁粉矿制粒性能的因素较多，且诸多因素之间存在复杂耦合关系。有研究指出，铁矿粉粒度对制粒性能和制粒行为的影响较大[4-5]。针对粒度对制粒行为的影响，有学者将铁矿粉颗粒分为黏附粒子和核粒子，粒度 <0.50 mm 的颗粒为黏附粒子，>1.00 mm 颗粒为核粒子，其余为中间粒子[6-9]。亦有研究提出，影响铁矿粉制粒性能的因素有物料的黏性、润湿性、粗糙度、圆形度等[10-12]。铁矿粉制粒性能的影响因素较多，且影响机理暂不明晰，这给预测的准确度和正确评价铁矿粉制粒性能带来了困难。有人在忽略机理的基础上，通过数学工具分析多因素对铁矿粉制粒性能的影响，比如借助模型工具、回归方法等建立铁矿粉制粒性与其圆形度、气孔率、润湿性以及粒度分布等各种因素之间的线性关系，判断铁矿粉制粒性能与各因素之间的相关性，并对制粒性能好坏进行评价[13-17]。此类方法均仅考虑与部分影响因素的回归关系，因此这类回归分析并不具有普适性。

为探明铁矿粉制粒性能影响因素之间影响程度的相对强弱关系，本文以铁矿粉制粒过程中颗粒间黏性物质的黏性力、分子水和毛细水产生的水吸附力、铁矿石表面棱角产生的咬合力或阻力等为出发点，研究颗粒间作用力的种类，采用黏附指数来计算制粒效果，用于表征铁矿粉制粒性能的好坏，并判断颗粒间作用力的相对大小，分析不同作用力的影响因素及其影响程度，建立影响因素对铁矿粉制粒性能影响强弱的层次关系。

1　原料性能及研究方法

1.1　试验原料

试验采用国内某烧结厂使用的 11 种铁矿，且为排除不同粒度对检测结果的干扰，对该铁矿粉 0.50 ~ 1.00 mm 粒级的亲水性和 3.15 ~ 5.00 mm 粒级的孔隙率进行检测，结果如表 1 所示。

表 1　铁矿粉的亲水性和孔隙率相关参数检测结果

Table 1　Test results of hydrophilicity and porosity-related parameters of iron ore powder

矿粉编号	0.50 ~ 1.00 mm 粒级亲水性			3.15 ~ 5.00 mm 粒级孔隙率(质量分数)/%	
	最大分子水(质量分数)/%	最大毛细水(质量分数)/%	K	大孔孔隙率	总孔孔隙率
1#	5.96	10.27	1.38	3.19	8.20
2#	8.19	16.41	1.00	3.86	7.94
3#	7.10	14.42	0.97	3.22	7.95
4#	5.51	11.29	0.95	4.91	8.74
5#	5.81	12.20	0.91	2.98	7.74
6#	7.05	15.32	0.85	2.90	8.77
7#	6.23	13.82	0.82	2.34	7.14
8#	4.45	10.89	0.69	2.34	6.88
9#	3.87	12.37	0.46	2.58	8.34
10#	2.11	7.73	0.38	0.44	1.26
11#	1.38	7.81	0.21	3.70	7.19

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

1.2 研究方法及评价指标

1.2.1 最大分子水和最大毛细水的测量及成球性指数计算

本文采用离心法测定铁矿粉的分子水质量分数[18]，所用设备为湘仪 H1850 离心机，其转速为 10 000 r/min，离心时间为 30 min。在离心后，将样品烘干并测定残留的水为铁矿粉最大分子水质量分数。

采用容量法，并采用图 1 所示装置测定毛细水量。测量步骤：先将有孔筛板装入∅30 mm × 150 mm 的试管中，然后在筛板上铺设两张圆形滤纸，防止矿粉漏失；将干燥后的矿粉样品自然填充到试管中，至高度达到 100 mm；通过橡皮塞将装料试管与水容器相连；然后用滴定管将蒸馏水逐渐添加到水容器中。当矿粉开始从底部吸水时，通过精密控制滴定管的加水量，保证在较小的压差下吸水。当液体高度达到 100 mm 的矿粉料面时，停止试验。设定样品中吸收的水量为毛细水量。

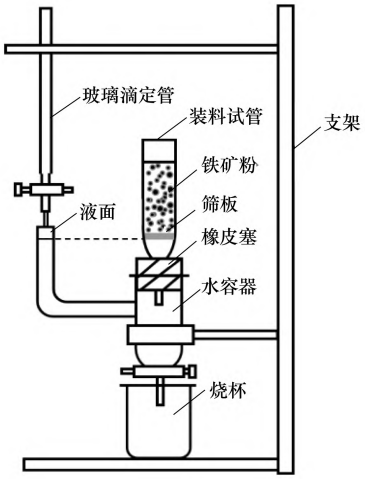


图 1 铁矿粉最大毛细水检测装置

Fig. 1 Maximum capillary water detection device for iron ore powder

成球性指数（K）用于表征水的吸附力[2]，计算方法如式(1)所示。

$$K=\frac{F}{M-F} \tag{1}$$

式中：F 为最大分子水质量分数,%；M 为最大毛细水质量分数,%。

1.2.2 铁矿粉孔隙率的检测

依据《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.2—2009)、《铁矿石表观密度、真密度和孔隙率的测定》(GB/T 24586—2009)，采用比重瓶浸泡法测定铁矿粉的孔隙率。孔隙越小，浸泡时水分进入孔隙所用时间越长，因此，采用浸泡 1 h 测得的孔隙率表征相对大孔孔隙率，浸泡至铁矿粉不再吸水时测得的孔隙率表征铁矿石总孔孔隙率。测量步骤：将比重瓶中装入三分之一左右的铁矿粉试样，并装满水；浸泡一定时间后，再次将比重瓶加满水；直至比重瓶不再需要加水。采用重量差计算矿石孔隙中浸入的水体积，得出矿石孔隙率。矿石大孔孔隙率用于判断矿石相对粗糙度，其计算方法如下。

$$D_{\text{big}}=\frac{m_{1\text{h}}-m_0}{m_{\text{ore}}} \tag{2}$$

$$D_{\text{total}}=\frac{m_{\text{total}}-m_0}{m_{\text{ore}}} \tag{3}$$

式中：D_{big}为大孔孔隙率，即浸泡 1 h 矿石中水浸入的孔隙容积占铁矿粉总体积百分比,%；D_{total}为总孔孔隙率，即浸泡至矿石不再吸水矿石中水浸入的总孔隙容积占铁矿粉总体积百分比,%；m_{ore}为比重瓶中装入的铁矿粉重量，g；m_0 为未开始浸泡时，装入试样的比重瓶加满水时总重量；$m_{1\text{h}}$为试样浸泡 1 h 后，比重瓶加满水的总重量，g；m_{total}为试样浸泡至不再吸水后，比重瓶加满水的总重量，g。

1.2.3 制粒效果及颗粒间作用力评价指标

圆盘制粒中，制粒水分、圆盘转速、制粒时间、填充率等参数对制粒的影响较大。为消除制粒参数的影响，试验采用统一的参数：圆盘直径为400 mm、转速为20 r/min、制粒时间为10 min、试样填充量为 1 kg，进行多水平水分制粒试验，取最优水分条件进行分析。

若原始颗粒粒级不同时，颗粒间正作用力越大能制粒成球的原始颗粒粒级越大；若原始颗粒粒级相同时，颗粒间正作用力越大颗粒制粒效果越好，制粒后粒级越大[6]。有研究指出：制粒效果的评价指标包括长大指数、混合料的平均粒度、透气性指数和制粒效率。而平均粒度和透气性指数均表征制粒后的状态，不能表征制粒前后的变化，长大指数和制粒效率可表征制粒前后的变化。其中，长大指数(G_{I})的计算方法如下。

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

$$G_I = \frac{M_{S1} - M_{S0}}{M_{S0}} \tag{4}$$

式中：M_{S0}、M_{S1}分别为混合料制粒前、后的平均粒度，mm[19]。

制粒效率(η,%)的计算方法如下。

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \tag{5}$$

式中：E_1 为制粒前混合料中 <3.00 mm 颗粒的质量分数,%；E_2 为制粒后混合料中 <3.00 mm 颗粒的质量分数,%。η 越大制粒效果越好[20]。

以上公式均可判断颗粒制粒效果的好坏，但由于制粒后粒级分级不够细，用于判断颗粒间力的作用力相对大小效果不佳。颗粒在所受外力相同的条件下，外力力矩与颗粒半径成正比。颗粒越大，制粒克服外力聚集成球所需的颗粒间作用力越大。因此，本文以制粒后颗粒的粒度分布为基础，根据颗粒间作用力与制粒后颗粒半径的相关性，提出采用黏附指数来表征制粒效果的好坏，并用于判断颗粒间作用力的相对大小。计算方法如下。

$$\rho_{ADI} = \sum_{i=0}^{6} P_{c_i}/2^i \tag{6}$$

式中：ρ_{ADI}为黏附指数,%；i 为 0 ~ 6；c_i 为 >10.00、(6.30, 10.00]、(5.00, 6.30]、(3.15, 5.00]、(2.00, 3.15]、(1.00, 2.00]、(0.05, 1.00] mm；P_{c_i}为 c_i 粒级的质量分数,%。

能制粒成球的原始颗粒越大，所需颗粒间正作用力越大；相同原始颗粒粒级下，制粒后ρ_{ADI}越大，颗粒间作用力越大。

2　结果与讨论

铁矿粉颗粒制粒成球过程所受的颗粒间作用力有分子水和毛细水的吸附力、铁矿粉所含黏性物质所产生的黏性力、铁矿粉表面棱角产生的咬合力或阻力等。其中吸附力和黏性力为正作用力，对制粒起积极作用，铁矿粉表面棱角产生的力不能确定是咬合力占主导还是阻力占主导，即不能确定其表现为正作用力或负作用力[21]。为此，本文在分析以上 3 种类型颗粒间作用力强弱的基础上，研究作用力的影响因素及其影响强弱排序。

2.1　3 种自身作用力相对大小综合分析

已有研究对铁矿粉分子水和毛细水产生的吸附力较多，在水吸附力作用下进行铁矿粉制粒，只有 <0.50 mm 粒级的颗粒能作为黏附粒子制粒成球。按此理论，铁矿粉 >0.50 mm 的任意粒级，在只有水吸附力作用下不能单独制粒成球[22]。为此，本文选取 2.00 ~ 3.15 mm 粒级铁矿粉进行制粒，得到最佳水分条件下制粒后的粒度分布及黏附指数如表 2 所示。

表 2　最佳水分条件下 2.00 ~ 3.15 mm 粒级铁矿粉制粒试验结果(质量分数)

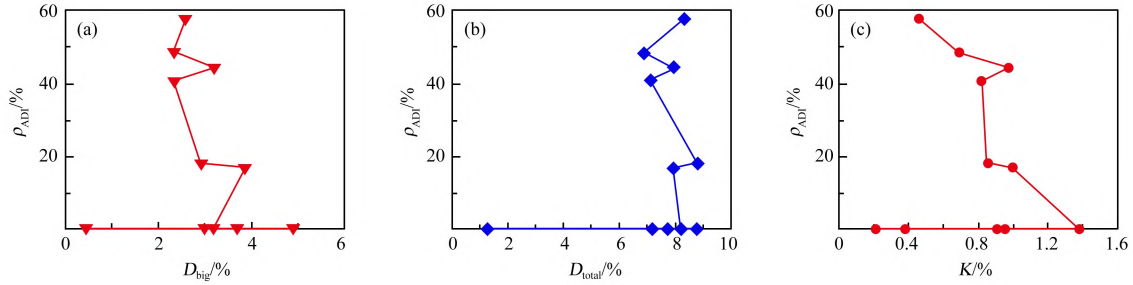
Table 2　Pelletizing test results of iron ore powder with 2.00 ~ 3.15 mm particle size under optimal moisture conditions　%

矿粉编号	粒度组成					黏附指数
	>10.00 mm	(6.30,10.00] mm	(5.00,6.30] mm	(3.15,5.00] mm	(2.00,3.15] mm	
9#	44.53	25.32	0.41	3.07	26.67	57.68
8#	22.48	50.98	0.98	1.18	24.38	48.36
3#	0	87.86	0.67	1.03	10.44	44.23
7#	0	78.92	3.46	2.15	15.47	40.59
6#	0	19.37	25.31	16.57	38.75	18.08
2#	0	7.11	40.67	24.58	27.64	16.80
10#	0	0	0	0	100.00	0
1#	0	0	0	0	100.00	0
4#	0	0	0	0	100.00	0
5#	0	0	0	0	100.00	0
11#	0	0	0	0	100.00	0

注：$\rho_{ADI} = P_{>10.00\ mm} + P_{6.30\sim10.00\ mm}/2 + P_{5.00\sim6.30\ mm}/2^2 + P_{3.15\sim5.00\ mm}/2^3$；其中，(2.00,3.15] mm 粒级没有成功制粒，不计入黏附指数。

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

由表 2 可以看出，2.00 ~ 3.15 mm 粒级颗粒中，2#、3#、6# ~ 9#铁矿粉能成球，1#、4#、5#、10#、11#铁矿粉不能成球。这说明 2#、3#、6# ~ 9#铁矿粉的颗粒间存在较水吸附力大的正作用力。为弄清其所受力为何种力，对各矿种黏附指数（ρ_{ADI}）与成球性指数（K）和孔隙率（D_{big}、D_{total}）之间的关系进行分析，如图 2 所示。



（a）大孔孔隙率 D_{big}；（b）总孔孔隙率 D_{total}；（c）成球性指数 K

图 2 2.00 ~ 3.15 mm 粒级铁矿粉的 ρ_{ADI} 与孔隙率和 K 之间的关系

Fig. 2 The relationship between ρ_{ADI} and porosity and K of iron ore powder with 2.00 ~ 3.15 mm particle size

由图 2 可以看出，不同铁矿粉 2.00 ~ 3.15 mm 粒级颗粒 ρ_{ADI} 与 K 之间无明显规律性，与 D_{big}、D_{total} 表现出一定的负相关性。这说明 2.00 ~ 3.15 mm 粒级颗粒制粒成球的主要正作用力不是分子水、毛细水吸附力和棱角产生的作用力，而是铁矿粉中含有的黏性物质表现出的黏性力，且黏性力大于水吸附力和棱角力。有研究指出，当铁矿粉中含有黏性高岭土时，铁矿粉制粒性能更好，铁矿粉制粒性能与高岭土质量分数和高岭土的细度有较强的相关性。黏性高岭土质量分数越多制粒性能越好，高岭土分布细度越细制粒性能越好[6]。但由于铁矿粉中黏性物质较少，不易提取，难以进行黏性检测，故本文采用铁矿粉 2.00 ~ 3.15 mm 粒级矿粉制粒后的 ρ_{ADI} 值表征铁矿粉的黏度。根据 ρ_{ADI} 大小对铁矿粉的黏度进行排序：9# > 8# > 3# > 7# > 6# > 2#，10#、1#、4#、5#、11#无黏性。

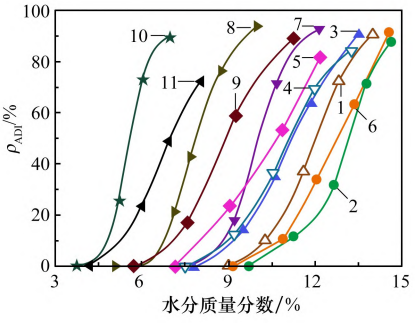
综合而言，制粒时颗粒间表现出的 3 种类型作用力之间的关系：正作用黏性力大于水吸附力，棱角产生的力表现为负作用力。

2.2 颗粒间作用力影响因素分析

为弄清制粒因素影响铁矿粉自身作用力的机制，进行如下因素分析试验。

2.2.1 水分对铁矿粉制粒行为的影响

由于正作用力水吸附力和黏性力均需以水分为表达媒介[15]。为弄清楚水分的影响程度，对铁矿粉 <0.50 mm 粒级颗粒进行制粒试验，分析不同水分条件下的制粒效果。为确保水分分布的均匀性，试验均在制粒前加水，混合均匀放置 5 min 后加入圆盘进行制粒，圆盘制粒过程中不另外加水，试验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，无论铁矿粉制粒过程颗粒间受何种力作用，均需在水分达到一定值时才开始黏附成球，并随着水分质量分数的增加黏附指数增加。因此，在铁矿粉制粒过程中，水分是第一层影响因素，足够的水分是成球的必备条件。



1 ~ 11—1# ~ 11#矿。

图 3 11 种 <0.50 mm 粒级铁矿粉 ρ_{ADI} 与水分质量分数的关系

Fig. 3 The relationship between ρ_{ADI} and moisture mass fraction of 11 kinds of iron ore powder with <0.50 mm particle size

2.2.2 铁矿粉粒级对铁矿粉制粒行为的影响

在水分充足，颗粒间作用力充分表达的条件下，为弄清粒级如何影响铁矿粉的制粒效果，对 0.50 ~ 1.00 mm 粒级和 <0.50 mm 粒级铁矿粉进行制粒试验，得到最佳水分条件制粒后的粒级分布及 ρ_{ADI} 如表 3、4 所示。

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

表 3　最佳水分条件下 0.50 ~ 1.00 mm 粒级铁矿粉制粒试验结果(质量分数)

Table 3　Pelletizing test results of iron ore powder with 0.50 ~ 1.00 mm particle size under optimal moisture conditions　%

项目	矿粉编号	粒度组成							黏附指数
		>10.00 mm	(6.30,10.00] mm	(5.00,6.30] mm	(3.15,5.00] mm	(2.00,3.15] mm	(1.00,2.00] mm	(0.50,1.00] mm	
有黏性矿	9#	57.26	27.34	1.81	1.89	1.54	2.27	7.89	71.79
	8#	36.17	52.94	1.03	1.16	1.04	1.67	5.99	63.16
	3#	35.74	54.09	1.12	1.24	1.06	1.52	5.23	63.33
	7#	0	92.17	1.05	1.36	0.74	1.43	3.25	46.61
	6#	0	78.36	2.56	3.39	1.34	4.42	9.93	40.47
	2#	0	56.35	6.16	8.99	4.26	8.99	15.25	31.39
无黏性矿	10#	0	0	0	0	0	0	100.00	0
	1#	0	0	0	0	0	0	100.00	0
	4#	0	0	0	0	0	0	100.00	0
	5#	0	0	0	0	0	0	100.00	0
	11#	0	0	0	0	0	0	100.00	0

注：$\rho_{ADI} = P_{>10.00\ mm} + P_{6.30\sim10.00\ mm}/2 + P_{5.00\sim6.30\ mm}/2^2 P_{3.15\sim5.00\ mm}/2^3 + P_{2.00\sim3.15\ mm}/2^4 + P_{1.00\sim2.00\ mm}/2^5$；其中，(0.50,1.00] mm 粒级没有成功制粒，不计入黏附指数。

表 4　最佳水分条件下 <0.50 mm 粒级铁矿粉制粒试验结果(质量分数)

Table 4　Pelletizing test results of iron ore powder with <0.50 mm particle size under optimal moisture conditions　%

项目	矿粉编号	粒度组成							黏附指数
		>10.00 mm	(6.30,10.00] mm	(5.00,6.30] mm	(3.15,5.00] mm	(2.00,3.15] mm	(1.00,2.00] mm	(0.50,1.00] mm	
有黏性矿	9#	68.42	19.87	4.38	3.27	1.11	1.61	1.34	6.04
	8#	52.12	38.48	5.52	1.95	0.64	0.7	0.59	2.67
	3#	51.32	39.69	4.84	1.99	1.38	0.42	0.36	2.16
	7#	50.91	40.66	4.85	2.47	0.30	0.43	0.38	2.51
	6#	47.21	37.27	8.35	2.41	1.87	1.75	1.14	1.12
	2#	46.79	37.55	8.82	2.99	1.24	1.33	1.28	1.28
无黏性矿	10#	55.39	34.28	7.95	1.19	0.26	0.37	0.56	2.57
	1#	38.38	47.05	8.07	3.62	0.82	0.97	1.09	3.33
	4#	37.82	46.38	9.61	3.46	0.80	1.05	0.88	3.31
	5#	19.68	61.15	11.17	5.01	1.09	1.17	0.73	8.24
	11#	0	77.23	13.46	6.22	1.26	1.23	0.60	10.65

注：$\rho_{ADI} = P_{>10.00\ mm} + P_{6.30\sim10.00\ mm}/2 + P_{5.00\sim6.30\ mm}/2^2 + P_{3.15\sim5.00\ mm}/2^3 + P_{2.00\sim3.15\ mm}/2^4 + P_{1.00\sim2.00\ mm}/2^5 + P_{0.50\sim1.00\ mm}/2^6$。

由表 3、4 可以看出，有黏性铁矿粉在两个粒级条件下均能成球；无黏性矿 0.50 ~ 1.00 mm 粒级不能制粒成球，<0.50 mm 粒级可以成球。由于颗粒越大制粒过程中颗粒碰撞产生的力矩越大，颗粒越容易剥落[23]。有黏性的矿，大粒级亦能成球，说明黏性力足够克服大颗粒碰撞产生的力矩。

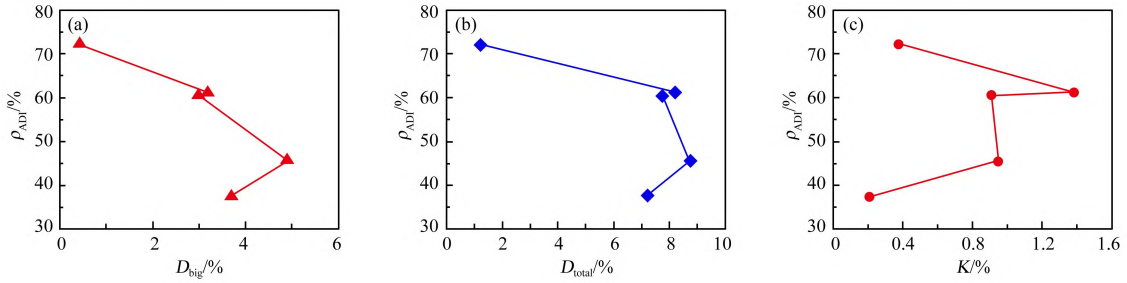
综合而言，黏性力的影响大于粒级的影响，铁矿粉黏性为第二层影响因素；粒级的影响大于水吸附力的影响，粒级为第三层影响因素。

2.2.3　铁矿粉亲水性和粗糙度对铁矿粉制粒性能的影响

有黏性矿制粒时颗粒间黏性力相对较大，水吸附力和颗粒表面棱角阻力相对较小，因此，黏性力是影响有黏性矿制粒的主要因素。而无黏性

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

矿制粒时仅受水吸附力和颗粒表面棱角阻力作用。为了弄清此两种力对无黏性矿制粒的影响程度，对无黏性矿 <0.50 mm 粒级颗粒进行制粒试验，得到最佳制粒水分条件下试验结果如图 4 所示。



（a）大孔孔隙率 D_{big}；（b）总孔孔隙率 D_{total}；（c）成球性指数 K

图 4 <0.50 mm 粒级无黏性铁矿粉 ρ_{ADI} 与孔隙率和 K 之间的关系

Fig. 4 The relationship between ρ_{ADI} and porosity and K of non-viscous iron ore powder with <0.50 mm particle size

由图 4 可以看出，无黏性矿种 ρ_{ADI} 与 K 之间有一定的正相关性，与 D_{big} 表现出一定的负相关性，与 D_{total} 表现出的影响规律变弱，但不是全部无黏性矿种均吻合此规律。这说明无黏性矿制粒时，会受到水吸附力和大孔棱角产生的阻力共同作用，因此将无黏性铁矿粉制粒后 ρ_{ADI} 对 K 与 D_{big} 比值绘制线性关系图，如图 5 所示。

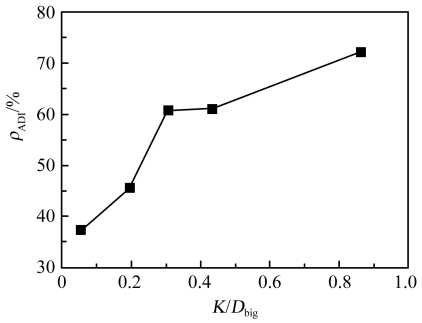


图 5 <0.50 mm 粒级无黏性铁矿粉 ρ_{ADI} 与 K/D_{big} 的关系

Fig. 5 The relationship between ρ_{ADI} and K/D_{big} of non-viscous iron ore powder with <0.50 mm particle size

由图 5 可以看出，<0.50 mm 粒级铁矿粉制粒效果与 K/D_{big} 呈现出较强的规律性，这是由于颗粒表面越粗糙棱角越大，颗粒表面水分的接触越不充分，颗粒间水吸附力越小，因此无黏性矿颗粒需在水吸附力作用下克服棱角阻力进行制粒。因此亲水性和表面粗糙度为铁矿粉制粒性能的第四层影响因素。

3 结 论

（1）本文提出黏附指数用于判断颗粒间力作用的相对大小。在相同原始颗粒条件下，黏附指数越大，颗粒间作用力越大。同时，制粒原始颗粒越大，制粒所需作用力越大。

（2）铁矿粉制粒过程所受的颗粒间作用力：铁矿粉自身黏性产生的黏性力，分子水和毛细水产生的吸附力，铁矿石表面棱角产生的阻力。>0.50 mm 粒级原始颗粒制粒后，黏附指数大于 0，这表明颗粒间存在黏性力，反之仅存在水吸附力和棱角产生的阻力。其中黏性力大于水吸附力和棱角阻力，水吸附力和棱角阻力大小差异不大。

（3）有黏性铁矿粉受以上 3 种作用力同时作用，以黏性力作用为主；无黏性铁矿粉，铁矿粉制粒时受铁矿粉水吸附力和表面粗糙度共同作用，黏附指数与 K/D_{big} 呈正相关关系。

（4）铁矿粉制粒性能影响因素的层级关系：第一层影响因素是水分，在水分不充足时不能制粒，水分充足时由第二层因素主导；第二层影响因素是铁矿粉黏性，在水分充足时有黏性铁矿粉均能制粒成球，无黏性时由第三层因素主导；第三层影响因素是铁矿粉粒度，没有黏性的铁矿粉在粒度 >0.50 mm 时均不能制粒成球，粒度 <0.50 mm 时由第四层主导；第四层影响因素为亲水性和铁矿粉表面粗糙度，铁矿粉粒度 <0.50 mm 时，K/D_{big} 越大，铁矿粉的制粒效果越好。

参考文献：

[1] UMADEVI T, BANDOPADHYAY U K, MAHAPATRA P C, et al. Influence of limestone particle size on iron ore sinter properties and productivity[J]. Steel Research International, 2010, 81(6): 419 – 425.

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

[2] CORES A, MUNIZ M, FERREIRA S, et al. Relationship between sinter properties and iron ore granulation index [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2012, 39(2): 85 – 94.

[3] LOO C E, DEBRINCAT D, HUTCHENS M F. Effect of iron ore particle assimilation on sinter structure[J]. ISIJ International, 2004, 44(8): 1308 – 1317.

[4] 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.
WU Lihua, CHEN Xuefeng. Research and optimization on factors influencing the mix granulating in Pangang sintering plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(1): 19 – 22.

[5] QIU Guanzhou, JIANG Tao, FAN Xiaohui, et al. Effects of binders on balling behaviors of iron ore concentrates [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2004, 33: 39 – 46.

[6] 蔡皓宇，青格勒，张卫东，等. 细磨对矿粉特性和造球性能的影响[J]. 钢铁，2015，50(8)：16 – 23.
CAI Haoyu, QING Gele, ZHANG Weidong, et al. Influence of milling on property and ballability of iron concentrate[J]. Iron and Steel, 2015, 50(8): 16 – 23.

[7] 白亚楠，张建良，苏步新，等. 铁矿粉吸水性能研究[J]. 烧结球团，2013，38(1)：1 – 5.
BAI Yanan, ZHANG Jianliang, SU Buxin, et al. Study on water absorption performance of iron ore fines[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(1): 1 – 5.

[8] 代书华，沈峰满. 造粒粒度分布及其预测模型[J]. 钢铁，2010，45(6)：20 – 25.
DAI Shuhua, SHEN Fengman. Pelletizing size distribution and its prediction model [J]. Iron and Steel, 2010, 45(6): 20 – 25.

[9] KHOSA J, MANUEL J. Predicting granulating behaviour of iron ores based on size distribution and composition [J]. ISIJ International, 2007, 47(7): 965 – 972.

[10] 张建良，刘东辉，刘浩，等. 核矿石对低钛型钒钛磁铁精粉烧结制粒的影响[J]. 钢铁，2017，52(9)：16 – 21.
ZHANG Jianliang, LIU Donghui, LIU Hao, et al. Effects of nuclei ores on granulation behavior of low-titanium magnetite concentrate[J]. Iron and Steel, 2017, 52(9): 16 – 21.

[11] 熊林，毛晓明，李建. 烧结混合料制粒过程研究[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集. 上海：中国金属学会，2015：1 – 8.
XIONG Lin, MAO Xiaoming, LI Jian. The study of the sinter mixture granulation process [C]//Proceeding of the 10th CSM steel congress & the 6th Baosteel biennial academic conference. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2015: 1 – 8.

[12] 朱德庆，李晓波，潘建，等. 镜铁矿粉在铁矿烧结混合料中的制粒行为[J]. 钢铁，2015，50(7)：8 – 14.
ZHU Deqing, LI Xiaobo, PAN Jian, et al. Investigation of granulation behaviors of specularite fines in ferrous sinter mixture[J]. Iron and Steel, 2015, 50(7): 8 – 14.

[13] MAEDA T, FUKUMOTO C, MAT-SUMURA T. Effect of adding moisture and wettability on granulation of iron ore [J]. ISIJ International, 2005, 45(4): 477 – 484.

[14] 李博. 影响烧结混匀制粒因素的探讨[J]. 江苏冶金，2001(2)：50 – 53.
LI Bo. Discussion on factors affecting sintering mixing and granulation[J]. Jiangsu Metallurgy, 2001(2): 50 – 53.

[15] 黄小波，吕学伟，雷磊，等. 湿容量在烧结混合料制粒中的应用[J]. 烧结球团，2010，35(6)：26 – 29.
HUANG Xiaobo, LÜ Xuewei, LEI Lei, et al. Application of the moisture capacity in the granulation process of sintering mixture [J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(6): 26 – 29.

[16] 吴胜利，王跃飞，朱娟. 铁矿粉颗粒特性对其烧结制粒性的影响[J]. 钢铁，2015，50(5)：19 – 25.
WU Shengli, WANG Yuefei, ZHU Juan. Influence of particle characteristics on the granulation of iron ores in sintering process[J]. Iron and Steel, 2015, 50(5): 19 – 25.

[17] 周传强，白晨光，吕学伟，等. 铁矿粉制粒特性模糊聚类分析[J]. 烧结球团，2009，34(3)：16 – 20.
ZHOU Chuanqiang, BAI Chenguang, LÜ Xuewei, et al. Fuzzy cluster analysis of granulation characteristics of iron ore[J]. Sintering and Pelletizing, 2009, 34(3): 16 – 20.

[18] 吕学伟，郭家宝，游洋，等. 铁矿粉烧结制粒过程颗粒行为研究综述[J]. 钢铁研究学报，2021，33(10)：1084 – 1094.
LÜ Xuewei, GUO Jiabao, YOU Yang, et al. Particle behavior of iron ore fine during granulation process: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1084 – 1094.

（下转第 80 页）

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

sewage sludge incineration and its air pollution control [J]. Journal of Cleaner Production,2021,295:126456.

[8] FOLGUERAS M B,ALONSO M,DíAZ R M. Influence of sewage sludge treatment on pyrolysis and combustion of dry sludge[J]. Energy,2013,55:426 – 435.

[9] 张建良,李净,胡正文,等. 生物质与无烟煤混合燃烧行为的热重分析[J]. 太阳能学报,2013,34(10):1847 – 5182.
ZHANG Jianliang,LI Jing,HU Zhengwen,et al. Thermogravimetric analysis of co-combustion behaviors of biomass and anthracite[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2013,34(10):1847 – 5182.

[10] 方平,岑超平,唐子君,等. 污泥焚烧大气污染物排放及其控制研究进展[J]. 环境科学与技术,2012,35(10):70 – 80.
FANG Ping, CEN Chaoping, TANG Zijun, et al. Air-pollutants emission and their control from sludge incineration:A review[J]. Environmental Science & Technology,2012,35(10):70 – 80.

[11] CHOI J Y,KIM D J,LEE H G. Reaction kinetics of desulfurization of molten pig iron using $CaO-SiO_2-Al_2O_3-Na_2O$ slag systems[J]. ISIJ international,2001,41(3):216 – 224.

[12] 郝素菊,乐天勤,蒋武锋,等. 烧结固硫的热力学研究[J]. 烧结球团,2009,34(2):1 – 4.
HAO Suju, LE Tianqin, JIAN Wufeng, et al. Thermonynamics research on sintering sulfation[J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(2):1 – 4.

[13] 王小东,王子文,陈明飞,等. 污泥脱水滤液有机磷污染特征及强化去除[J]. 环境工程学报,2019,13(8):1884 – 1892.
WANG Xiaodong, WANG Ziwen, CHEN Mingfei, et al. Pollution characteristics and enhanced removal of organic phosphorus in sludge dewatering filtrate[J]. Chinese Journal Environment Engineering,2019,13(8):1884 – 1892.

[14] 宁平,王磊,王重华,等. 添加剂对 $Ca(OH)_2$ 固磷固硫作用的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(10):4342 – 4349.
NING Ping,WANG Lei,WANG Zhonghua,et al. Effects of additives on $Ca(OH)_2$ sorbent for sulfur and phosphorus-fixing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2013,44(10):4342 – 4349.

[15] 张伟,刘卫星,田铁磊,等. 脱磷剂对高磷钢渣气化脱磷率影响的研究[J]. 烧结球团,2014,39(1):47 – 50.
ZHANG Wei,LIU Weixing,TIAN Tielei,et al. Study on influence of dephosphorization agent on gasification dephosphorization rate of high phosphorus steel slag[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(1):47 – 50.

(上接第37页)

[19] 程峥明,潘文,安钢,等. 铁矿粉制粒黏结特性的研究与生产应用[J]. 烧结球团,2019,44(6):12 – 17.
CHENG Zhengming,PAN Wen,AN Gang,et al. Research and production application of bonding characteristics for iron ore fines granulation[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):12 – 17.

[20] FAN Xiaohui,YANG Guiming,CHEN Xuling. Evaluation model on the ballability of iron ore concentrates[J]. Powder Technology,2015,280:219 – 226.

[21] 石玥,潘建,朱德庆,等. 圆筒混合机制粒性能优化研究[J]. 烧结球团,2019,44(4):1 – 6.
SHI Yue,PAN Jian,ZHU Deqing,et al. Research on improvement of granulating effect of drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):1 – 6.

[22] 黄小波. 铁矿粉制粒过程颗粒粒级演变规律与工艺优化[D]. 重庆:重庆大学,2015.
HUANG Xiaobo. Evolution of particle size grading and process optimization in granulation of iron ore fines[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.

[23] 王素平,杨福,毕学工. 烧结混合料制粒过程的数值模拟[J]. 烧结球团,2015,40(2):7 – 11.
WANG Suping, Yang Fu, BI Xugong. Numerical simulation of sintering mixture granulating process[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(2):7 – 11.

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