冶金粉尘对铁矿粉高温性能影响研究

李和平[1]，张 琦[1]，王 炜[2]，陈绪亨[2]，杨代伟[2]，王 斌[2]

(1. 上海梅山钢铁股份有限公司 炼铁厂，江苏 南京 210039；2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室，湖北 武汉 430081)

摘要：烧结矿的质量与铁矿粉的高温性能密切相关，烧结生产过程中配加冶金粉尘是钢铁企业处理冶金粉尘的一种重要方式，而冶金粉尘的加入势必影响铁矿粉的高温性能，进而影响烧结矿的质量，因此，研究冶金粉尘添加对铁矿粉高温性能的影响具有重要意义。本文通过对比 3 种冶金粉尘(烧结除尘灰、高炉炉灰与杂料)与铁矿粉理化性能差异，并采用微型烧结试验研究了冶金粉尘对混合铁矿粉同化性及液相流动的影响。结果表明：烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料粒度均小于混合矿，其中烧结除尘灰粒度最细；烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料配比的增加均会降低混合矿最低同化温度和黏结强度，提高混合矿的流动性，对最低同化温度下降程度影响最大的是杂料，对流动性指数增加程度最大的是高炉炉灰；3 种冶金粉尘对混合铁矿粉黏结强度的影响效果比较接近。

关键词：铁矿粉；冶金粉尘；烧结除尘灰；高炉炉灰；烧结杂料；烧结；高温性能

中图分类号：X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)01－0008－07

doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.002

Research on influence of metallurgical dust on high temperature performance of iron ore powder

LI Heping[1], **ZHANG Qi**[1], **WANG Wei**[2], **CHEN Xuheng**[2], **YANG Daiwei**[2], **WANG Bin**[2]

(1. *Iron-making Plant, Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing* 210039, *Jiangsu, China*;
2. *Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*)

Abstract: The quality of sinter is closely related to the high temperature performance of iron ore powder. Adding metallurgical dust in the sintering process is important for iron and steel enterprises to deal with metallurgical dust, which will inevitably affect the high temperature performance of iron ore powder, and then the quality of sinter. Therefore, it is of great significance to study the influence of metallurgical dust on the high temperature performance of iron ore powder. The physical and chemical properties of 3 metallurgical dusts (sintering dust, blast-furnace dust and sintering miscellaneous material) and iron ore powder are compared, and the effects of metallurgical dust on the assimilation and liquid phase flow of mixed iron ore powder are studied by micro-sintering experiment. The results show that the particle sizes of sintering dust, blast-furnace dust and sintering miscellaneous materials are smaller than those of mixed ore, and the particle size of sintering dust is the smallest. Increasing the ratio of sintering dust, blast-furnace dust and sintering miscellaneous material will reduce the minimum assimilation temperature and bonding strength of mixed ore, and improve the fluidity of mixed ore. The miscellaneous materials have the greatest influence on the decrease of minimum assimilation temperature, and the blast-furnace dust has the greatest increase on

收稿日期：2021－10－22；**修回日期**：2021－12－21

基金项目：国家自然科学基金面上项目(51974212)；国家自然科学基金联合项目(U1760101)

作者简介：李和平(1971—)，男，博士，从事烧结生产技术管理方面工作。

通信作者：王 炜(1974—)，男，博士，教授，从事冶金数模及计算机控制、炼铁原料准备技术方面的研究。

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

the fluidity index. The effects of 3 kinds of metallurgical dust on the bond strength of mixed iron ore powder are similar.

Key words: iron ore powder; metallurgical dust; sintering dust; blast-furnace dust; sintering miscellaneous material; sintering; high temperature performance

在钢铁企业的生产过程中，不可避免地会产生一定数量的冶金粉尘。目前，在烧结过程中配加冶金粉尘是钢铁企业处理冶金粉尘的重要方式，但是冶金粉尘粒度较细且含有较高的碱金属、锌等元素，在烧结工序中大量使用势必会对烧结矿成矿过程造成影响，进而导致烧结矿质量劣化[1]。

国内外对冶金粉尘在烧结过程中回收利用进行了一些研究。SHIRYAEVA 等[2]发现添加冶金粉尘—赤泥有助于改善制粒效果，可增加混合料平均粒径，且在赤泥添加量不超过 5% 时，烧结矿强度随着赤泥添加量的增加而提高。江剑[3]通过烧结杯实验研究发现添加 2% 烧结除尘灰时，烧结矿的成品率和转鼓强度最佳。El-HUSSINY 等[4]研究将冶金粉尘黏结造球后应用于烧结过程，发现可提高烧结矿性能，但会导致烧结速度和生产效率下降。国内许多研究者[5-7]发现在烧结过程中使用含一定质量分数的碳的冶金粉尘后，可适当降低烧结燃料消耗。LANZERSTORFER 等[8]研究发现，高炉粉尘在烧结过程中的回收利用可以替代固体燃料，且高炉粉尘中的碳替代了焦粉作为燃料时的替代因子非常接近于 1。为分析冶金粉尘中较多碱金属对铁矿粉尘烧结成矿的影响，王艺慈等[9]采用差热分析(DTA) 与 X 射线衍射(XRD) 相结合的方法，研究 F、K、Na 在高碱度烧结中对烧结固相反应的影响，发现烧结原料中 K、Na 有利于促进烧结固相反应过程中低熔点化合物硅酸钠、铁酸钠、枪晶石的形成。罗果萍等[10]研究发现，以钾板岩和钠辉石形式存在的碱金属有助于铁矿粉烧结时液相量和硅酸盐玻璃相增加，且当碱金属质量分数较高时，SFCA 的针状和柱状细颗粒团聚为粗颗粒，与铁氧化物的黏结作用减弱，冶金性能恶化。

烧结矿的质量与铁矿粉的高温烧结特性密切相关已经得到广大炼铁工作者的认可。为了更好地在烧结过程中回收利用冶金粉尘，本文在对比分析冶金粉尘与铁矿粉理化性能和高温性能差异的基础上，对冶金粉尘添加后对混合铁矿粉最低同化温度、液相流动性等高温特性的影响进行了研究。

1　试验原料与方法

1.1　试样原料

1.1.1　化学成分

试验所用的 3 种冶金粉尘(烧结除尘灰、高炉炉灰与杂料) 与铁矿粉均来自于国内某钢铁企业，其中杂料是企业各工序中产生的部分含铁固体废弃物的混合物，各含铁原料主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，3 种冶金粉尘的铁品位较低，均低于 52%；在烧结除尘灰中 K 元素相对较多，质量分数为 0.32%，而高炉炉灰和杂料中 K、Na 和 Zn 元素均相对较多，碱金属质量分数分别达到 0.36% 和 0.53%，锌质量分数分别达到 0.4% 和 0.28%。

表 1　含铁原料主要化学成分与烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and burning loss of different iron-containing raw materials　　%

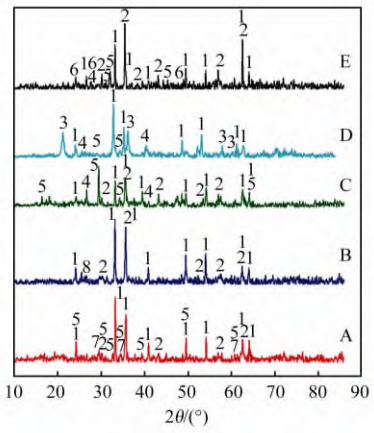
含铁原料	TFe	FeO	MgO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Zn	K	Na	C	烧损
烧结除尘灰	51.80	2.89	1.57	5.60	12.10	2.33	0.020	0.320	0.060	3.1	3.46
高炉炉灰	42.66	14.70	0.66	5.28	3.80	2.40	0.280	0.330	0.200	20.2	30.90
杂料	43.24	23.70	1.78	5.75	11.30	2.27	0.400	0.210	0.150	—	11.80
混匀矿	64.96	0.53	0.45	3.96	0.27	1.43	0.006	0.004	0.006	—	3.58
铁精粉	53.98	20.70	1.20	5.58	3.65	0.98	0.035	0.100	0.048	—	5.38

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

1.1.2 物相组成及形貌

通过 XRD 确定冶金粉尘与铁矿粉物相组成差异，其结果如图 1 所示。由图 1 可知：烧结除尘灰主要含铁矿物为赤铁矿、磁铁矿和复合铁酸钙(SFCA) ，这主要是由于烧结除尘灰一般在烧结抽风和烧结矿运输过程中形成，其矿物组成与烧结矿较为相似；高炉炉灰中主要含铁矿物为赤铁矿和磁铁矿，并存在一定数量碳；而杂料由多种含铁废弃物混合而成，主要矿物除赤铁矿、磁铁矿和褐铁矿外，还含有一定数量的低熔点橄榄石相；作为烧结铁矿粉的混匀矿和铁精粉中主要含铁矿物为赤铁矿与磁铁矿。

采用扫描电子显微镜对 3 种冶金粉尘形貌进行分析，其结果如图 2 所示。由图 2 可知，烧结除尘灰颗粒表面较为粗糙，且表面颗粒存在大量黏结状态的小颗粒粉尘；高炉炉灰和杂料颗粒相对烧结除尘灰更大，且呈现疏松多孔结构。

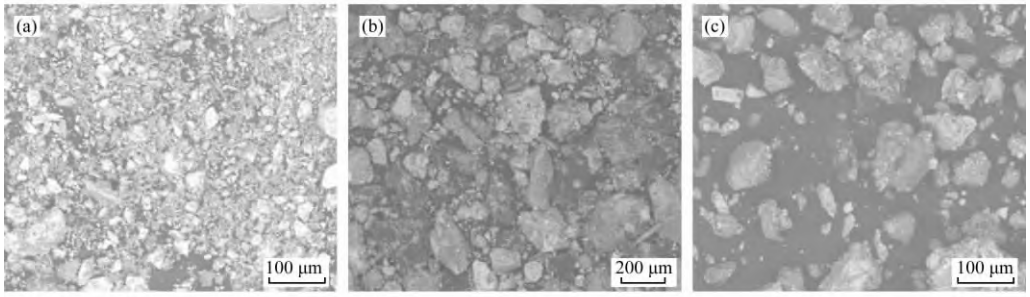


A—烧结除尘灰；B—高炉炉灰；C—杂料；D—混匀矿；E—铁精粉

1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$；4—SiO_2；5—$(Ca,Fe)_2SiO_3$；6—$CaAl_2Si_2O_8$；7—SFCA；8—C。

图 1 含铁原料 XRD 物相分析

Fig. 1 XRD phase analysis of iron-containing raw materials



(a) 烧结除尘灰；(b) 高炉炉灰；(c) 杂料

图 2 冶金粉尘表面形貌结构

Fig. 2 Surface morphology and structure of metallurgical dust

1.1.3 粒度分布

含铁原料的粒度分布如表 2 所示。由表 2 可知，相对粒度较大的混匀矿与杂料，烧结除尘灰和高炉炉灰粒度分布更接近铁精粉，其中烧结除尘灰粒度小于 0.2 mm 的质量分数超过 97%，较铁精粉粒度更细，而高炉炉灰粒度与铁精粉接近，粒度小于 0.2 mm 的质量分数为 61.18%。

1.2 试验方法

1.2.1 方案设计

试样为了比较3种冶金粉尘与铁矿粉的高

表 2 含铁原料粒度分布(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of iron-containing raw materials %

含铁原料	<0.1 mm	[0.1,0.2) mm	[0.2,0.6) mm	[0.6,1.0) mm	[1.0,3.0) mm	[3.0,5.0) mm	≥5 mm
烧结除尘灰	25.46	72.09	2.41	0.04	0	0	0
高炉炉灰	21.29	39.89	29.09	2.40	1.30	1.09	4.94
杂料	1.33	10.02	23.86	8.36	20.23	10.40	25.79
混匀矿	7.26	8.18	16.59	8.62	24.14	12.81	22.42
铁精粉	24.38	45.04	21.00	2.15	1.19	1.29	4.95

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

温烧结特性的差异，分别对烧结除尘灰、高炉炉灰、混匀矿、铁精粉和杂料的高温同化性与流动性进行测试。此外，为了明确各冶金粉尘添加量对铁矿粉高温烧结特性的影响，对配加不同质量分数冶金粉尘的混合铁矿粉进行高温基础性能测试，以混合铁矿粉的最低同化温度、流动性指数和黏结强度作为响应指标。采用单因素实验的设计方案，固定铁精粉质量分数，配加不同比例的杂料、烧结除尘灰和高炉炉灰，减少对应质量的混匀矿，其具体配比如表 3 所示。

表 3　混合铁矿粉配比(质量分数)

Table 3　Proportion of mixed iron ore powder　%

编号	混匀矿	铁精粉	烧结除尘灰	高炉炉灰	杂料
1	69.65	27.34	0	0	3.01
2	68.30	27.34	1.35	0	3.01
3	66.96	27.34	2.69	0	3.01
4	65.61	27.34	4.04	0	3.01
5	64.27	27.34	5.38	0	3.01
6	66.96	27.34	2.69	0	3.01
7	65.98	27.34	2.69	0.98	3.01
8	65.00	27.34	2.69	1.96	3.01
9	64.02	27.34	2.69	2.94	3.01
10	63.04	27.34	2.69	3.92	3.01
11	69.97	27.34	2.69	0	0
12	68.47	27.34	2.69	0	1.5
13	66.96	27.34	2.69	0	3.01
14	65.46	27.34	2.69	0	4.51
15	63.95	27.34	2.69	0	6.02

试验利用红外镜面反射炉对 3 种冶金粉尘及铁矿粉同化性进行测试，并以其同化特性的评价指标为最低同化温度(*LAT*)，*LAT* 为铁矿石与 CaO 之间的最低同化反应温度[11]。图 3 为同化反应试验温度系统和气氛。试样将直径为 20 mm，质量为 2.0 g 的 CaO 和粒度小于 0.074 mm，质量为 0.8 g 的混合铁矿粉分别在 15 MPa 的压力下压制为柱状，并将铁矿石放在 CaO 片上，在红外镀金镜面反射炉微烧结设备中烧结。并在试验过程中，通过摄像头观察不同温度下铁矿石片与 CaO 的同化状态，其图片数据采集时间间隔为 1 s。

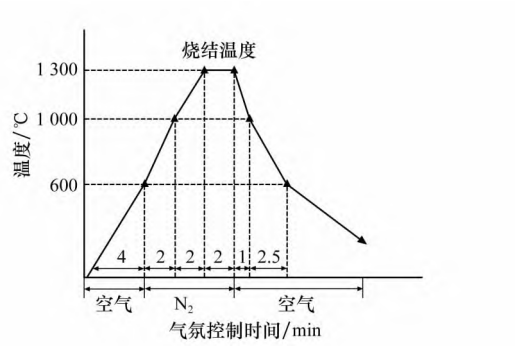


图 3　同化反应试验温度与气氛控制

Fig. 3　Experimental temperature and atmosphere of assimilation reaction

试验采用液相流动性试验方法[12]测试分析 3 种冶金粉尘及铁矿石液相流动性差异。分别在各含铁原料中添加一定质量分析纯 CaO 试剂，使各含铁原料中 CaO 质量分数均为 15%。在 15 MPa 的压力下，将 0.8 g 左右的各混合料压成圆柱状。流动特性试验的设备、温度和气氛与同化反应试验相同，其中流动特性、试验的试验温度为1 300 ℃。通过对烧结矿试验前后液相面积的比较，得出液相流动性指数(ρ_{IFL})，如式(1)所示。

$$\rho_{IFL}=(S_{FA}-S_{OA})/S_{OA} \tag{1}$$

式中：S_{OA}和S_{FA}分别表示流动性测试前后试样垂直投影面积，mm^2。

在表 3 各混合铁矿粉中添加一定质量分析纯 CaO 试剂，使其混合料碱度为 1.9。在 15 MPa 的压力下，将 0.8 g 左右的混合料压成圆柱状，然后通过微型烧结制备抗压强度测试样品，其中微型烧结试验设备、温度和气氛与流动性测试试验相同，最后对添加不同冶金粉尘烧结后试样进行抗压强度测试，并测试 4 次取其平均值。

2　结果与讨论

2.1　冶金粉尘及铁矿粉高温性能分析

含铁原料同化性及流动性测试结果见表 4。由表 4 可知：烧结除尘灰最低同化温度仅低于混匀矿和铁精粉矿粉，主要原因是其铁酸钙质量分数相对较高，抑制其与 CaO 发生同化反应，

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

但明显高于铁品位较低的杂料；高炉炉灰中由于碳质量分数过多，在进行高温性能测试时，在 1 000 ℃以下时有明显燃烧与同化现象，因此其最低同化温度明显低于其他含铁原料；杂料含有较多的低熔点铁橄榄石相，因此具有较低的同化开始温度。

表 4 含铁原料同化性及流动性测试结果

Table 4 Test results of assimilation and fluidity of iron-containing raw materials

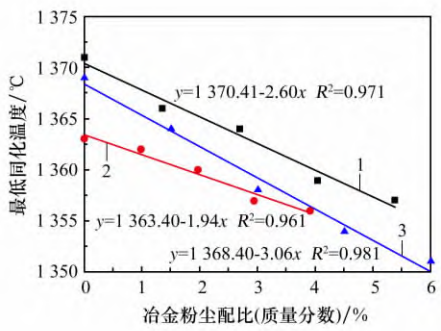
含铁原料	最低同化温度/℃	流动性指数	黏结强度/kN
烧结除尘灰	1 314	>5.00	1.51
高炉炉灰	<1 000	>5.00	—
杂料	1 143	3.97	1.24
混匀矿	1 345	2.16	2.95
铁精粉	1 363	1.89	3.02

此外，由表 4 中的流动性指数结果可知，烧结除尘灰和高炉炉灰的液相流动性指数最好，杂料次之，混匀矿和铁精粉较差。这主要是因为：烧结除尘灰中含有熔点较低的铁酸钙相，在高温下可直接形成部分液相，同时其粒度较细、比表面积大更容易与熔剂发生反应；高炉炉灰中由于含碳较多可提供额外热量，促进烧结液相形成，且烧结除尘灰和高炉炉灰中碱金属含量相对较多有利于降低液相黏度[10]；杂料中低熔点橄榄石相对较多，且杂料含一定数量碱金属有利于液相黏度下降，因此其流动性指数相对铁精粉和混匀矿的流动性指数略高，但由于其铁品位较低，其流动性小于炉灰和烧结除尘灰。由表 4 中黏结强度结果可知，流动性指数过高的烧结除尘灰和杂料黏结强度明显低于混匀矿和铁精粉，且高炉炉灰由于流动性过高，样品在烧结后完全呈液相，难以进行黏结强度测试。

2.2 冶金粉尘对混合铁矿粉高温性能影响

2.2.1 冶金粉尘对混合铁矿粉同化性影响

添加不同质量分数烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料对混合铁矿粉同化性影响及其拟合结果见图 4。由图 4 可知，在烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料质量分数增加时，混合矿最低同化温度呈现线性下降的趋势，且混合铁矿粉最低同化温度与其质量分数之间拟合度 R^2 均超过 0.95，拟合效果较好。基于上述影响结果及其模型拟合回归方程结果可知，杂料对混合矿最低同化性能影响程度最大，而高炉炉灰影响最小。由于含一定碳质量分数的高炉炉灰中，TFe 质量分数过低，导致混合铁矿粉与 CaO 反应形成低熔点铁酸钙速度增加程度相对较少，从而导致其降低混合铁矿粉最低同化温度的下降趋势较小。相对于高炉炉灰，尽管烧结除尘灰最低同化温度较高，但是由于其细粒度且矿物组成与烧结矿接近，除尘灰中的铁酸钙能直接形成液相，使铁矿粉与 CaO 接触更加充分，促进混合铁矿粉与 CaO 反应，因此添加烧结除尘灰后混合铁矿粉最低同化温度下降程度相对高炉炉灰更大，是高炉炉灰的 1.4 倍。杂料最低同化温度相对烧结除尘灰较低，且杂料中低熔点橄榄石相对较多，导致其质量分数增加时，混合铁矿粉同化温度下降程度相对烧结除尘灰更大。



1—除尘灰；2—炉灰；3—杂料。

图 4 冶金粉尘对混合铁矿粉同化性影响

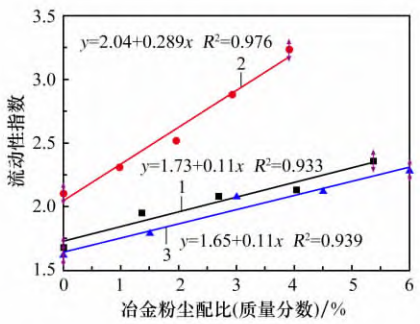
Fig. 4 The influence of metallurgical dust on the assimilation of mixed iron ore powder

2.2.2 冶金粉尘对混合铁矿粉流动性影响

添加不同质量分数烧结除尘灰、高炉炉灰、杂料对混合铁矿粉液相流动性指数影响及其拟合结果见图 5。由图 5 可知，在烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料质量分数增加时，混合矿液相流动呈现线性增加的趋势，且混合铁矿粉液相流动指数与其质量分数之间拟合度 R^2 均超过 0.95，具有较好的拟合结果。基于上述影响结果及其模型拟合回归方程可知，高炉炉灰对混

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

合矿液相流动性影响程度最大，而烧结除尘灰和杂料影响程度较为相似。由于杂料中钙铁橄榄石和烧结除尘灰中铁酸钙相均易形成低熔点矿物，且烧结除尘灰中能降低液相黏度的碱金属质量分数相对杂料差异较小，因此烧结除尘灰与杂料对液相流动性能的影响较为接近。高炉炉灰中由于含碳较多可提供额外热量，促进烧结液相形成，且高炉炉灰碱金属质量分数相对烧结除尘灰更多，对降低液相黏度的效果更明显，因此添加高炉炉灰对混合铁矿粉液相流动性影响高于烧结除尘灰。



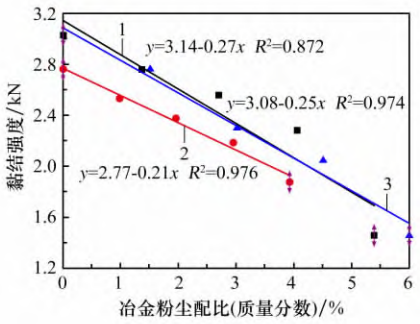
1—除尘灰；2—炉灰；3—杂料。

图 5　冶金粉尘对混合铁矿粉流动性影响

Fig. 5　The influence of metallurgical dust on the fluidity of mixed iron ore powder

2.2.3　冶金粉尘对混合铁矿粉黏结强度影响

添加不同质量分数烧结除尘灰、高炉炉灰、杂料对混合铁矿粉黏结强度的影响及其拟合结果见图 6。由图 6 可知，在烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料质量分数增加时，烧结样黏结强度呈现线性下降的趋势，造成其主要原因是冶金粉尘中的铁品位较低，导致生成黏结强度高的铁酸钙数量减少。同时，冶金粉尘中的 SiO_2 质量分数高于混合铁矿粉，而在高温下 SiO_2 和 CaO 的亲和力要大于 Fe_2O_3 和 CaO[13]，会导致强度较差的硅酸盐数量增加，最终导致混合铁矿粉的黏结强度下降，但烧结除尘灰、高炉灰和杂料添加量对混合铁矿粉黏结强度影响程度差异较小。



1—除尘灰；2—炉灰；3—杂料。

图 6　冶金粉尘对混合铁矿粉黏结强度影响

Fig. 6　The influence of metallurgical dust on the bond strength of mixed iron ore powder

3　结　论

(1)　烧结除尘灰中的主要物相为赤铁矿、磁铁矿和复合铁酸钙；高炉炉灰中的主要物相为赤铁矿和磁铁矿，并存在一定数量碳；杂料中的主要物相为赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿和橄榄石；烧结除尘灰和高炉炉灰粒度较细，且烧结除尘灰粒度比高炉炉灰更细，而杂料粒度相对另外两种冶金粉尘更粗，3 种冶金粉尘大颗粒表面均黏附有大量小颗粒粉尘。

(2)　当混合矿中烧结除尘灰、高炉炉灰和杂料配比增加时，混合矿最低同化温度呈线性下降的趋势，下降程度影响最大的是杂料，而混合铁矿粉流动性指数呈线性增加的趋势，增加程度最大的是高炉炉灰。随冶金粉尘质量分数的增加，混合矿的黏结强度降低，3 种冶金粉尘对混合矿粉黏结强度影响程度差异较小。

参考文献:

[1]　JIAO K X, ZHANG J L, LIU Z J, et al. Circulation and accumulation of harmful elements in blast furnace and their impact on the fuel consumption [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 44(5): 344 – 350.

[2]　SHIRYAEVA E V, PODGORODETSKII G S, MALYSHEVA T Y, et al. Effects of adding low-alkali red mud to the sintering batch at OAO Ural' skaya Stal' [J]. Steel in Translation, 2014, 44(1): 6 – 10.

[3]　江剑. 除尘灰使用对烧结过程及节能降耗的影响研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
JIANG Jian. The Research on dust using effect on sintering process and saving energy and reducing consumption [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.

[4]　El-HUSSINY N A, SHALABI M E H. Effect of recycling blast furnace flue dust as pellets on the sintering performance [J].

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

Science of Sintering,2010,42(3):269 – 281.

[5] 张树华,冯红云,史先菊. 除尘灰配矿烧结性能研究[J]. 武钢技术,2015,53(1):4 – 6.
ZHNAG Shuhua,FENG Hongyun,SI Xianju. Study of the performance with sintering dust[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology,2015,53(1):4 – 6.

[6] 王建明,陈建平,李海云,等. 烧结配加高炉除尘灰的工业试验[J]. 山西冶金,2013,36(6):13 – 14.
WANG Jianming, CHEN Jianping, LI Haiyun, et al. Industry experiment of sinter bearing blast furnace gasdust[J]. Shanxi Metallurgy,2013,36(6):13 – 14.

[7] 闫天明,彭犇. 水洗除尘灰配入烧结对成矿性能的影响[J]. 中国资源综合利用,2020,38(7):29 – 32;43.
YAN Tianming,PENG Ben. Research on the influence of water washing dedusting ash combined with sintering process on metallogenic performance[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2020,38(7):29 – 32;43.

[8] LANZERSTORFER C,BAMBERGER S,BIRGIT P K. Recycling of blast furnace dust in the iron ore sintering process: investigation of coke breeze substitution and the influence on off-gas emissions[J]. ISIJ International,2015,55(4):758 – 764.

[9] 王艺慈,罗果萍,柏京波,等. F、K、Na 对烧结固相反应影响的研究[J]. 钢铁,2008,43(7):12 – 15.
WANG Yici,LUO Guoping,BAI Jingbo,et al. Study on the influence of F,K,Na on the solid phase reaction of sintering[J]. Steel,2008,43(7):12 – 15.

[10] 罗果萍,吴胜利,贾晓斌,等. K、Na 对白云鄂博铁精矿烧结液相流动特性的影响[J]. 钢铁研究学报,2013,10(25):10 – 13.
LUO Guoping,WU Shengli,JIA Xiaobi,et al. Effect of K and Na on sinter liquid phase fluidity of Baiyunebo iron ore concentrates[J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,10(25):10 – 13.

[11] WU S, ZHANG G, CHEN S, et al. Influencing factors and effects of assimilation characteristic of iron ores in sintering process[J]. ISIJ International,2014,54(3):582 – 588.

[12] WU S,LI H,ZHANG W,et al. Effect of thermodynamic melt formation characteristics on liquid phase fluidity of iron ore in the sintering process[J]. Metals,2019,9(4):404.

[13] ZHANG G L,WU S L,CHEN S G,et al. Influence of gangue existing states in iron ores on the formation and flow of liquid phase during sintering[J]. International Journal of Minerals Metallurgy Materials,2014,21(10):962 – 968.

(上接第7页)

[15] SUN D,XU J,CHEN Q. Modeling of the evaporation and condensation phase-change problems with fluent[J]. Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals,2014,66(4):326 – 342.

[16] 胡忠新. 工业管内高温高压流体多相流动特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
HU Zhongxin. Study on multiphase flow characteristics of high temperature and high pressure fluid in the industrial pipeline[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2021.

[17] QU Xiaohua,SUI Hui,TIAN Maocheng,et al. CFD simulation of steam-air jet condensation[J]. Nuclear Engineering & Design,2016,297:44 – 53.

[18] NARASIMHA M, BRENNAN M S, HOLTHAM P N, et al. Numerical simulation of magnetite segregation in a dense medium cyclone[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10):1034 – 1047.

[19] 吴亮. 含固体颗粒的两相流界面变化的数值研究-DEM-VOF 方法的实现[D]. 天津:天津大学,2018.
WU Liang. Development of a DEM-VOF model for the turbulent free-surface flows with particle[D]. Tianjin: Tianjin University,2018.

[20] LI Shuqian,WANG Ping,LU Tao,et al. CFD based approach for modeling steam-water direct contact condensation in sub-cooled water flow in a tee junction[J]. Progress in nuclear energy,2015,85:729 – 746.

[21] VYSKOCIL Ladislav,SCHMID Josef,MACEK Jiri,et al. CFD simulation of air-steam flow with condensation[J]. Nuclear Engineering and Design,2014,279:147 – 157.

[22] 陈卓,郑睿琦,堵伟桐,等. 含锌粉尘协同处置含铬尘泥的碳热还原试验[J]. 钢铁,2021,56(11):148 – 159.
CHEN Zhuo,ZHENG Ruiqi,DU Weitong,et al. Experiment on co-processing of chromium-containing sludge with zinc-bearing dust by carbothermic reduction method[J]. Iron & Steel,2021,56(11):148 – 159.

[23] 王浩翔,王炜,李宏玉,等. PbO 对高炉原燃料冶金性能影响的分析[J]. 中国冶金,2021,31(7):6 – 12.
WANG Haoxiang,WANG Wei,LI Hongyu,et al. Analysis of PbO on metallurgical properties of blast furnace raw fuel[J]. China Metallurgy,2021,31(7):6 – 12.

[24] 陈威,张立峰. 结晶器内多相流动和卷渣定量化统计的大涡模拟研究[R]. 重庆:冶金工业出版社,2022:38 – 39.
CHEN Wei,ZHANG Lifeng. Development and application of hign temperature continuously quenching technology at the end of thick slab continuous caster[R]. Chongqing: Metallurgical Industry Press. 2022:38 – 39.

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