



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201901125

中图分类号 X513

文献标识码 A

苏璐璐, 姬亚芹, 张福强, 等. 水性聚合物对铁矿粉的抑尘性能与现场应用[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2181-2188.

SU Lulu, JI Yaqin, ZHANG Fuqiang, et al. Dust suppression performance and field application of waterborne polymer on iron ore powder[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(9): 2181-2188.

## 水性聚合物对铁矿粉的抑尘性能与现场应用

苏璐璐<sup>1</sup>, 姬亚芹<sup>2</sup>, 张福强<sup>1,\*</sup>, 杨升<sup>1</sup>, 杨红健<sup>1</sup>, 肖庆一<sup>3</sup>

1. 河北工业大学化工学院, 天津 300130

2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300110

3. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300130

第一作者: 苏璐璐(1994—), 女, 硕士研究生。研究方向: 大气污染防治。E-mail: sls322@126.com

\*通信作者: 张福强(1965—), 男, 博士, 教授。研究方向: 高分子功能材料。E-mail: fqzhang@hebut.edu.cn

**摘要** 为控制扬尘污染, 采用水性聚合物抑尘剂将澳洲铁矿粉稳定化, 表征了铁矿粉的含水率、Zeta 电位、表面形貌、化学组成与晶体结构, 研究了聚合物的抑尘性能和现场应用效果。结果表明, 抑尘剂可促进铁矿粉聚集、提高内聚力, 可在湿润状态下延缓水分挥发、干燥状态下紧密封闭粉体, 有效降低风力侵蚀性。在 30 ℃、35% 相对湿度下的平均含水率比洒水提高了 1.2 倍, 装卸过程和露天堆场估算的扬尘控制效率分别达到 67.78% 和 93.96%。露天料场 24 h PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的控制效率分别为 75.0% 和 80.95%, 与估算结果接近; 30 d 的观察期间, 堆体的封闭状态稳定, 实现了现场有效抑尘。

**关键词** 悬浮颗粒物; PM<sub>2.5</sub>; 抑尘剂; 无组织排放; 铁矿粉; 露天堆场

在装卸、堆取和露天存放过程中, 铁矿粉在作业机械的剪切、抛洒以及自然风力作用下容易扬尘, 可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub> 浓度高达 182.2 μg·m<sup>-3</sup>。铁矿粉的无组织排放不仅造成铁矿粉自身的损耗, 也危害从业人员健康。钢铁生产企业因此导致的年损耗率高达 0.66%<sup>[1]</sup>, 直接经济损失巨大。外逸的铁矿粉影响周边的环境空气质量, 超标的铁离子及其伴生的镉离子导致水体和土地污染<sup>[2]</sup>, 金属含量超标的水源灌溉, 植物种子的发芽率降低, 影响正常成苗和植物生长。铁是人体的必需微量元素之一, 但摄入过量则会引起金属中毒。我国饮用水源地的铁含量整体超标且呈不断上升趋势, 超标倍数高达 8.80 倍, 超标率高达 86.1%<sup>[3]</sup>。因此, 提高钢铁企业料场和矿区等污染源的控制效率, 提高空气、水体和土地安全性的意义重大。

作为洒水抑尘的添加剂, 抑尘剂通过润湿、保湿、聚集和固结等方式显著降低了煤炭<sup>[4]</sup>、渣土<sup>[5]</sup>和道路扬尘<sup>[6]</sup>的排放风险。但铁矿粉呈正电性<sup>[7]</sup>, 颗粒表面 Fe-OH 的极性大, 这也决定了铁矿粉抑尘剂的特殊性。由于物理化学性质特殊, 国内外对铁矿粉抑尘剂的技术研发进展缓慢, 研究内容仍然停留在传统品种。表面活性剂可以润湿铁矿粉但无法提高内聚力, 对 PM<sub>10</sub> 的控制效果不及水<sup>[8]</sup>。氯化钙和偏硅酸钠对 PM<sub>10</sub> 的控制效率达到 85%, 但这些无机盐腐蚀金属、严重影响植物生

收稿日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 河北省科技计划项目(17273703D); 天津市科技计划项目(16ZXCXSF00010); 天津市重大科技攻关项目(16ZXCXSF00110); 河北省自然科学基金资助项目(E2016202279)

长,而且SiO<sub>2</sub>影响高炉冶炼<sup>[9]</sup>。制备安全、高效的抑尘剂,改善颗粒之间的相互作用,提高铁矿粉的稳定性和控制效率尤为必要。

铁矿粉是一种特殊的污染源,既影响空气质量、又影响水体和土地安全;铁矿粉扬尘既危害环境,又导致直接经济损失<sup>[1]</sup>;其表面性质不同于常见的颗粒物<sup>[7]</sup>,且矿粉品质容易受抑尘剂影响<sup>[9]</sup>,因此抑尘剂技术研发进展缓慢。本研究从含水率、Zeta电位、表面形貌、化学组成与晶体结构等基本性质出发,探讨铁矿粉与水性聚合物的之间的相互作用,估算装卸过程和露天堆场的湿控制效率、现场测定露天堆场的规模化效果,提高铁矿粉扬尘的控制效率。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

丙烯酸、甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸丁酯和苯乙烯通过幂级加料方式合成水性聚合物抑尘剂<sup>[10]</sup>,水溶胶状态,105℃固含量为39.7%,pH为6.7。

选择澳洲产铁矿粉,红褐色,某钢铁公司提供,自然干燥。过80目筛的粒度用于实验,其中,过200目筛的粒度占47.3%。由于扬尘主要来自75μm以下的颗粒,参照AP-42方法<sup>[11]</sup>,采用Mastersizer 2000激光粒度仪测定200目筛下粒度的粒度分布,如图1所示。可以看出,铁矿粉的中值粒径为18.81μm,30μm以下粒度的质量分数为66.93%。以ARL QUANT型X射线荧光光谱仪(XRF)测得其化学组成,结果见表1,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为82.56%。

### 1.2 实验方法

1) 含水率。铁矿粉的真密度为5.2 kg·m<sup>-3</sup>,但堆密度只有1.5 kg·m<sup>-3</sup>左右<sup>[12]</sup>。洒水的主要作用是增加堆密度和内聚力,在一定时间内降

低风力侵蚀性。春夏之交是高扬尘季节,以此作为测试条件。将初始质量 $W_0$ 为20.0 g的铁矿粉置于φ100 mm培养皿中,喷洒5.0 g浓度为2.0%的抑尘剂水溶液至充分湿润,纯粹聚合物的质量为铁矿粉的0.5%;作为对比,蒸馏水代替抑尘剂水溶液,重复以上操作。测定30℃、35%相对湿度下 $t$ 时刻的样品质量 $W_t$ ,其含水率如式(1)所示。

$$P = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P$ 为含水率; $W_t$ 为 $t$ 时刻的样品质量,g; $W_0$ 为初始样品质量,g。

2) Zeta电位。根据式(2),在重力加速度 $g$ 、空气密度 $\rho_0$ 、空气黏度 $\gamma$ 和悬浮颗粒物密度 $\rho$ 已确定时,其沉降速度 $u_g$ 取决于直径 $D$ <sup>[13]</sup>。直径增大,则降尘加快、空中滞留时间短、漂移范围小;粉体稳定性提高,风力扬尘量降低。

$$u_g = \frac{g(\rho - \rho_0)D^2}{18\gamma} \quad (2)$$

式中: $g$ 为重力加速度; $\rho_0$ 为空气密度; $\gamma$ 为空气黏度; $\rho$ 为悬浮颗粒物密度; $u_g$ 为沉降速度;

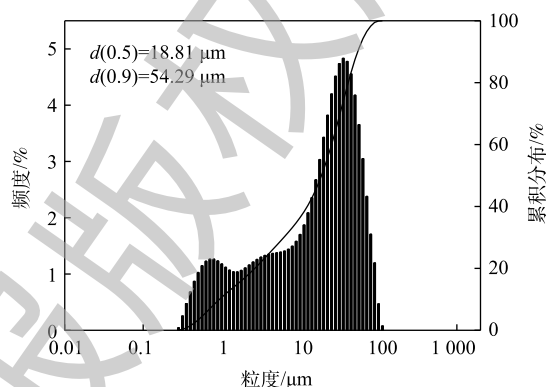


图1 过200目粒级的粒度分布

Fig. 1 Iron ore size distribution less than 200 screen mesh

表1 过200目粒级的化学组成(质量分数)

Table 1 Iron ore composition less than 200 screen mesh (mass fraction) %				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
82.56	9.22	7.54	0.19	0.17
CaO	MnO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O
0.13	0.08	0.05	0.03	0.03

$D$  为直径。

铁矿粉呈正电性<sup>[7]</sup>，聚集能力差，聚集体粒径低。借助 Zeta 电位，分析聚合物与铁矿粉颗粒之间的相互作用，藉以促进颗粒聚集。配制浓度为 0.1% 的铁矿粉悬浮液，以 Nano-ZS90 型电位分析仪测定 Zeta 电位。

3) 表面形貌。聚集体进一步聚集，即可相互胶结成膜<sup>[14]</sup>，以篷布覆盖的方式封闭粉体表面，从根本上避免了扬尘，摆脱了对含水率的依赖。喷洒之后的铁矿粉在室温下干燥，喷金制样，以 Nova Nano SEM450 型电镜观察表面状态特征。

4) X 射线衍射分析。采用 Bruker-D8 Focus 型 X-射线衍射仪 (XRD) 测定晶体结构，考察抑尘剂对铁矿粉结构和组成的影响<sup>[9]</sup>。扫描角度  $5^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，扫描速度  $12 (^{\circ})\cdot\text{min}^{-1}$ 。

5) 现场应用。在实验室评价的基础上，实施露天堆场的规模化抑尘。如图 2 所示，料场占地约  $60\text{ hm}^2$ ，南侧的料条以尼龙网苫盖，北侧料条正在堆取、装卸作业。中间料条为棱台状，地面长度  $740\text{ m}$  宽度  $40\text{ m}$  垂直高度  $7.5\text{ m}$ ，东西两段相隔  $6\text{ m}$ 。选择西段料条和料场地面为抑尘区域，东段料条作为对比区域。

距地面  $1.5\text{ m}$  处安置 Trak 8530 型气溶胶监测仪，跟踪监测  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度。根据《环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)》(HJ 664-2013) 布设监测点位，A1、A2、A3 和 A4 的浓度平均值作为抑尘区域的浓度，B1 和 B2 的平均值作为对比区域的浓度。

2018 年 9 月 16 日，架设扬尘在线物联网 (IOT) 系统，实时监测  $2.5\text{ m}$  高处的气象参数和颗粒物浓度 (图 3)。在上午 10 点 30 分，气温  $18^{\circ}\text{C}$  相对湿度  $25\%$ ，晴，西北风，风速  $7.8\text{ m s}^{-1}$ ， $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度分别为  $46\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $85\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

根据气象参数、颗粒物浓度和现场条件，采用多功能抑尘车喷洒地面，如图 4 所示。抑尘剂浓度为  $1.0\%$ ，喷洒量为  $1.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，调整喷嘴的间隙和角度，后向喷洒、逆风行驶，车速不高于  $8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ；使用车载式高压喷枪喷洒西段料条，喷洒量约  $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ，自上而下蛇形操作。对比区域不做喷洒。

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚合物的湿抑尘作用

1) 平均含水率。如图 5 所示，喷洒抑尘剂后，铁矿粉在  $30^{\circ}\text{C}$ 、 $35\%$  相对湿度下失水缓慢。聚合物质量用量为  $0.25\%$ 、 $0.5\%$  和  $0.75\%$  时，含水率依次增大，但至完全干燥，

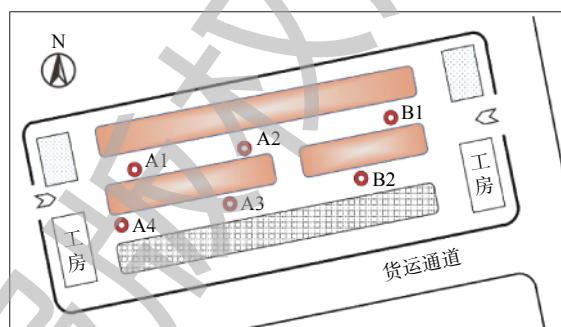


图 2 喷洒区域及监测点布设示意图

Fig. 2 Sketch of sprayed zone and monitoring sites



图 3 现场监测的物联网系统

Fig. 3 IOT system monitoring on suppression field



图 4 现场喷洒料场地面

Fig. 4 Spraying on storage yard ground

即失水达到平衡时三者差别不大。因此,集中讨论 0.5% 用量的铁矿粉。其平衡时间 ( $t_e$ ) 为 8 h, 平衡含水率为 2.35%。洒水样品的含水率为 0.95%, 平衡时间为 4 h。

含水率  $P$  随时间  $t$  的变化规律<sup>[6]</sup> 如式 (3) 所示。

$$P = Ae^{-Bt} \quad (3)$$

式中:  $P$  为含水率;  $A$ 、 $B$  为常数。

方程 (3) 取自然对数, 回归结果见图 6。根据式 (4), 抑尘铁矿粉从开始干燥的时刻  $t_0$  到平衡时刻  $t_e$ , 即干燥过程中抑尘铁矿粉的平均含水率为 10.77%, 洒水铁矿粉为 4.8%。

$$P_{av} = \frac{\int_{t_0}^{t_e} P dt}{t_e - t_0} = \frac{\int_{t_0}^{t_e} Ae^{-Bt} dt}{t_e - t_0} = \frac{A \int_{t_0}^{t_e} e^{-Bt} dt}{t_e - t_0} \quad (4)$$

式中:  $P_{av}$  为平均含水率;  $t_0$  为开始干燥时间, h;  $t_e$  为平衡时间, h。

2) 装卸过程扬尘的控制效率。根据式 (5), 可估算抑尘铁矿粉和洒水铁矿粉的排放系数  $E_s$  和  $E_0$ <sup>[15]</sup>, 结果见表 2。根据式 (6), 可计算抑尘剂对装卸过程扬尘的控制效率  $\eta$ , 结果为 67.78%。

$$E = 1.6k_i \left(\frac{u}{2.2}\right)^{1.3} \cdot \left(\frac{2}{P_{av}}\right)^{1.4} \quad (5)$$

式中:  $E$  为堆场装卸扬尘的排放系数,  $g \cdot t^{-1}$ ;  $k_i$  为物料的粒度乘数, TSP、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  分别为 0.74、0.35 和 0.053;  $u$  为地面平均风速, 以  $9.5 m \cdot s^{-1}$  计, 属 5 级风力。

$$\eta = \left(1 - \frac{E_s}{E_0}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\eta$  为控制效率;  $E_s$  为抑尘铁矿粉的排放系数,  $g \cdot t^{-1}$ ;  $E_0$  为洒水铁矿粉的排放系数,  $g \cdot t^{-1}$ 。

3) 露天堆场扬尘的控制效率。式 (7) 是刘琴<sup>[16]</sup> 建立的澳洲铁矿粉扬尘排放模型, 据此计算  $9.5 m \cdot s^{-1}$  风速下洒水铁矿粉的扬尘量  $Q_0$ , 结果为  $33.68 g \cdot (kg \cdot h)^{-1}$ , 抑尘之后的扬尘量  $Q_s$  为  $2.03 g \cdot (kg \cdot h)^{-1}$ 。参照式 (6), 抑尘剂对露天堆场铁矿粉扬尘的控制效率为 93.96%。

$$Q = 2.892 \times 10^{-3} u^{5.16} e^{-0.47P_w} \quad (7)$$

式中:  $Q$  为扬尘量,  $g \cdot (kg \cdot h)^{-1}$ ;  $u$  为风速,  $m \cdot s^{-1}$ 。

## 2.2 聚合物的湿抑尘作用

1) Zeta 电位变化。铁矿粉在中性介质中以颗粒形式存在, 表面呈正电性, Zeta 电位仅为  $-14.6 mV$ 。随聚合物用量的增加, 图 7 的 Zeta 电位增强, 说明铁矿粉与聚合物发生了化学吸附, 吸附量增加, 颗粒分散性提高; 用量为 0.5% 时, 极值电位达到  $-41.9 mV$ 。用量持续增加, 颗粒表面的负电荷则阻碍进一步吸附。

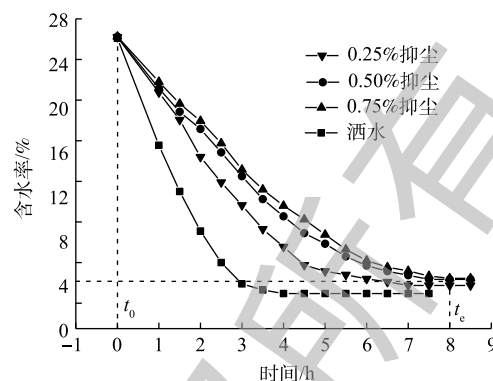


图 5 铁矿粉含水率随时间的变化

Fig. 5 Change of moisture content of iron ore powder with time

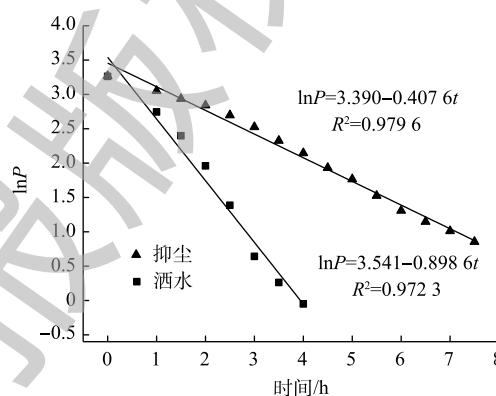


图 6  $P=Ae^{-Bt}$  的自然对数回归方程曲线

Fig. 6 Regression curve with natural logarithm  $P=Ae^{-Bt}$  equation

表 2 装卸过程扬尘的排放系数

Table 2 Dust emission factors during handling process

样品	$P_{av}/\%$	TSP/( $g \cdot t^{-1}$ )	$PM_{10}/(g \cdot t^{-1})$	$PM_{2.5}/(g \cdot t^{-1})$
抑尘铁矿粉	10.77	0.75	0.36	0.05
洒水铁矿粉	4.80	2.33	1.10	0.17

在干燥过程中，铁矿粉的含水率不断降低，由于聚合物羧基与 $\text{Fe}^{3+}$ 交联、 $\text{Fe}-\text{OH}$ 氢键作用<sup>[14]</sup>，铁矿粉的内聚力逐渐提高。如图8所示，颗粒密实堆砌，聚集体粒径增加，细颗粒相应减少，粉体稳定性提高，风力侵蚀性则降低<sup>[17]</sup>。

2) 聚集体的表面形貌。水性聚合物的分散和交联作用可促进颗粒团聚，空隙降低，如图9(a)所示，有效阻塞水分传输，平均含水率因此提高了1.2倍。干燥之后，铁矿粉颗粒相互胶结成膜，形成致密的表面封闭层，风力侵蚀性显著下降。尽管澳洲铁矿粉的吸水性强、粒径小，但水的内聚能力低且有可逆性，洒水铁矿粉干燥之后的聚集状态较差，在图9(b)中表现为松散堆积，空隙可见。

此外，聚合物羧基与铁矿粉表面 $\text{Si}-\text{OH}$ 、 $\text{Al}-\text{OH}$ 的氢键作用可进一步增加内聚力<sup>[14]</sup>。而且，聚合物与颗粒之间的长程作用力具有加和性，其强度不亚于化学键。因此，铁矿粉的封闭层在干燥状态下有足够的强度抵御风力侵蚀，如果没有人为破坏和外来降尘，可以长期抑尘。

### 2.3 聚合物对铁矿粉品质的影响

1) 铁矿粉的晶体结构。图10为铁矿粉样品在喷洒抑尘剂前后的XRD图谱， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 特征衍射峰的衍射角 $\theta$ 、晶面间距 $d$ 和半峰宽度见表3。

聚合物抑尘剂不含VOC等低分子化合物，只与颗粒表面的官能团结合，不可能进入晶格。由表3看出，铁矿粉的结构和组成没有变化。

2) 铁矿粉的化学组成。对比洒水铁矿粉和抑尘铁矿粉的化学组成(表4)，有害元素S和P以及 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等杂质互有消长，但均在测试误差范围之内<sup>[18]</sup>，故可以认为二者没有区别。结合XRD结果，足以说明抑尘剂没有影响铁矿粉的原料品质。

### 2.4 现场应用

表5为现场监测的结果，0 h即抑尘剂喷洒施工之前，抑尘区的悬浮颗粒物浓度 $C_s$ 和对比区浓度 $C_0$ 相当。喷洒之后 $C_s$ 下降，根据

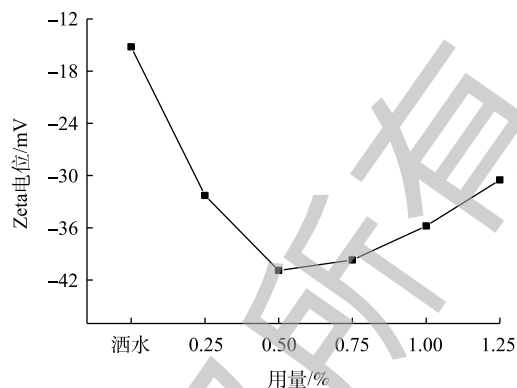


图7 聚合物用量对铁矿粉 Zeta 电位的影响  
Fig. 7 Polymer dosage effect on Zeta potential of iron ore particles

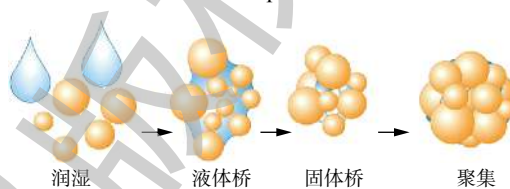
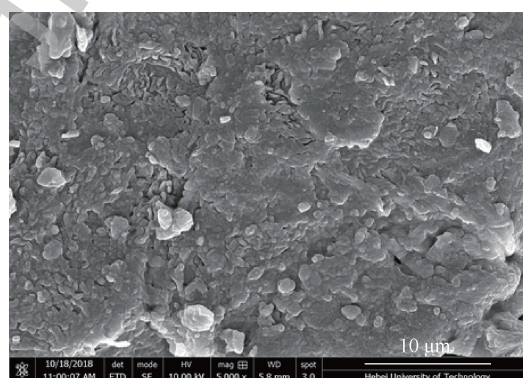
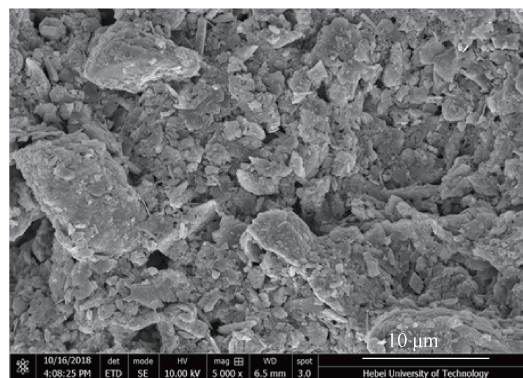


图8 干燥过程中的颗粒聚集

Fig. 8 Particles agglomeration during the course of drying



(a) 抑尘铁矿粉



(b) 洒水铁矿粉

图9 铁矿粉的SEM表面形貌

Fig. 9 SEM images of iron ore aggregation surface

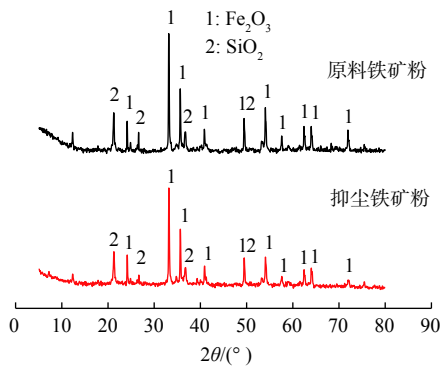


图 10 抑尘剂对铁矿粉 XRD 晶体结构的影响

Fig. 10 Suppressant effect on iron ore structure characterized by XRD patterns

表 4 洒水铁矿粉和抑尘铁矿粉的化学组成 (质量分数)  
Table 4 Compositions of suppressed and watering iron ore (mass fraction) %

样品	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
洒水铁矿粉	81.85	9.53	7.95	0.18	0.16
抑尘铁矿粉	81.94	9.42	8.0	0.17	0.16
样品	CaO	MnO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O
洒水铁矿粉	0.13	0.09	0.05	0.03	0.03
抑尘铁矿粉	0.12	0.07	0.06	0.03	0.03

表 3 抑尘剂对铁矿粉 XRD 参数的影响

Table 3 Effect of suppressant on XRD parameters of iron ore

抑尘铁矿粉			原料铁矿粉		
2θ/(°)	d/nm	半峰宽/(°)	2θ/(°)	d/nm	半峰宽/(°)
24.14	0.368	0.096	24.13	0.369	0.092
33.16	0.270	0.148	33.14	0.270	0.150
35.64	0.252	0.125	35.62	0.252	0.128
40.89	0.221	0.144	40.85	0.221	0.143
49.47	0.184	0.139	49.45	0.184	0.154
54.08	0.169	0.190	54.04	0.170	0.176
62.44	0.148	0.116	62.42	0.149	0.131
64.01	1.450	0.191	63.98	1.450	0.148

表 5 抑尘现场的悬浮颗粒物浓度

Table 5 Particulate matter concentrations on suppression field

时间/h	PM <sub>2.5</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )		PM <sub>10</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )	
	抑尘区	对比区	抑尘区	对比区
0	44.0	41.5	84.5	81.5
5	10.0	42.0	13.5	83.0
24	12.0	48.0	16.0	84.0
48	24.0	49.5	24.5	86.0
72	25.5	48.0	37.0	89.5
96	35.0	48.5	58.0	87.5
120	37.0	42.5	68.5	82.0
144	43.5	45.5	77.5	80.0

式 (8) 计算控制效率, 结果见图 11。

$$\eta = \left(1 - \frac{C_s}{C_0}\right) \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为控制效率;  $C_s$  为抑尘区的悬浮颗粒物浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $C_0$  为抑尘区的悬浮颗粒物浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

在图 11 中, 喷洒后 5 h 的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 控制效率分别为 76.19% 和 83.73%, 24 h 后分别为 75.0% 和 80.95%, 与估算结果非常接近, 证实了以上评价方法的可行性。

因设备条件所限, 北侧料条无法控制更新界面的扬尘, 受风力和装卸作业的持续影响, 48 h 的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 控制效率分别降至 51.52% 和 71.51%, 72 h 后分别为 46.88% 和 58.66%。尽管如此, 在 30 d 的观察期间, 抑尘的堆体和料场地面保持完好, 封闭状态未受风力影响 (图 12)。

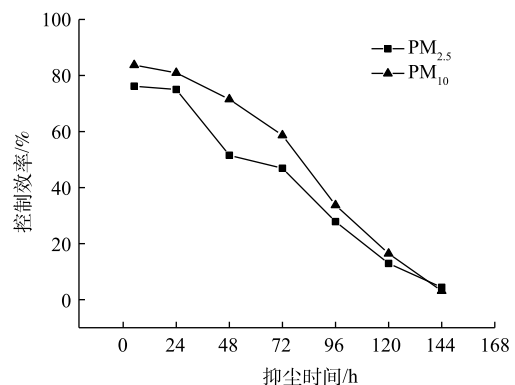


图 11 抑尘现场的控制效率

Fig. 11 Dust control efficiency on suppression field

### 3 结论

1) 聚合物对铁矿粉的原料品质无不良影响, 不会影响后期冶炼。该聚合物可通过离子交联和氢键作用, 促进铁矿粉颗粒团聚、提高内聚力, 使其平均含水率明显提高。装卸过程和露天堆场扬尘估算的控制效率分别为 67.78% 和 93.96%。干燥状态下可形成封闭层, 从而有效降低风力侵蚀, 可实现半年以上的长期抑尘。

2) 铁矿粉露天堆场  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的 24 h 控制效率分别达到 75.0% 和 80.95%, 30 d 内粉体的封闭状态稳定。现场与实验室结果接近, 证实了实际应用和评价方法的可行性。今后应开展不同类型铁矿粉的应用研究, 完善堆取作业面的扬尘控制设施。



图 12 封闭状态稳定的堆体表面

Fig. 12 Stable pile surface under sealing conditions

### 参考文献

- [1] 张毅, 李刚. 钢铁企业环保型料场贮存方式的特点及比较[J]. *宝钢技术*, 2015(6): 45-49.
- [2] SARKAR A, SHEKHAR S. Iron contamination in the waters of Upper Yamuna basin[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018, 7: 421-429.
- [3] 何静林, 温东辉, 高波. 杭州萧山区饮用水源地铁污染评价及控制对策研究[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(1): 97-105.
- [4] HASSAN H A, TSIOURI V K, KONSTANTINOS K E. Developing emission factors of fugitive particulate matter emissions for construction sites in the middle east area[J]. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2015, 9(2): 51-54.
- [5] NOBLE T L, PARBHAKAR-FOX A, BERRY R F, et al. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites[M]//LOTTERMOSER B. *Environmental Indicators in Metal Mining*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 281-306.
- [6] IYANG H I, BAE S, PANDO M A. Contaminant dust suppression materials: A cost-effectiveness estimation methodology[J]. *Measurement*, 2016, 93: 563-571.
- [7] QUAST K. The use of Zeta potential to investigate the interaction of oleate on hematite[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 85: 130-137.
- [8] COPELAND C R, KAWATRA S K. Design of a dust tower for suppression of airborne particulates for iron making[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(13): 1459-1466.
- [9] SRIVASTAVA U, KAWATRA S K, EISELE T C. Study of organic and inorganic binders on strength of iron oxide pellet[J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2013, 44(4): 1000-1009.
- [10] 佟云华, 刘永刚, 苏璐璐, 等. VAc共聚乳液对道路浮尘的粘接作用[J]. *中国胶粘剂*, 2018(11): 21-23.
- [11] US EPA. Emission factor documentation for AP-42: Section 13.2.2 unpaved roads[R]. Research Triangle Park, NC: Measurement Policy Group Office of Air Quality Planning and Standards, 2011.
- [12] CAO Y, LIU T, HE J. Fugitive emission rates assessment of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  from open storage piles in China[J]. *Earth and*

Environmental Science, 2018, 128(1): 012136.

- [13] KATRA I, ELPERIN T, FOMINYKH A, et al. Modeling of particulate matter transport in atmospheric boundary layer following dust emission from source areas[J]. *Aeolian Research*, 2016, 20: 147-156.
- [14] QUAICOE I, NOSRATI A, ADDAI M J. Influence of binder composition on hematite-rich mixed minerals agglomeration behavior and product properties[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 97: 45-56.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. [2019-01-10]. [www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588131490.pdf), 2014.
- [16] 刘琴. 铁矿粉尘污染的试验研究[J]. 武汉水运工程学院学报, 1986, 10(4): 69-75.
- [17] NOWAK R. Wet granulation[Z/OL]. [2019-01-10]. [www.ipc-dresden.de/agglomeration-59.html](http://www.ipc-dresden.de/agglomeration-59.html).
- [18] 刘春, 郑洪涛, 梁述廷, 等. X荧光光谱分析技术在测定安徽月山矿床铁铜矿石中Fe、Cu的应用研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(1): 1-7.

(本文编辑: 金曙光, 王萌萌, 郑晓梅)

## Dust suppression performance and field application of waterborne polymer on iron ore powder

SU Lulu<sup>1</sup>, JI Yaqin<sup>2</sup>, ZHANG Fuqiang<sup>1\*</sup>, YANG Sheng<sup>1</sup>, YANG Hongjian<sup>1</sup>, XIAO Qingyi<sup>3</sup>

1. School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300110, China

3. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

\*Corresponding author, E-mail: fqzhang@hebut.edu.cn

**Abstract** In order to control the dust pollution, the Australian iron ore powder was stabilized by waterborne polymeric dust suppressant. The moisture content (MC), Zeta potential, surface morphology, chemical composition and crystal structure of the iron ore powder were characterized. The dust suppression performance and field application effects of the polymer were investigated. The results show that the dust suppressant could promote the powder aggregation and improve the cohesive force, then delay the evaporation of water in the wet state, tightly seal the powder in the dry state, and thus effectively reduce the wind erodibility. The average MC of iron ore powder at 30 °C and 35% relative humidity was 1.2 times higher than that of watering. The dust control efficiencies (CE) estimated by handling process and open storage yard were 67.78% and 93.96%, respectively. The CEs of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> after 24 hours were 75.0% and 80.95%, respectively, which was close to the estimated results. During the 30 d observation period, the sealed state of the open storage yard was stable, and the effective dust suppression on site was achieved.

**Keywords** suspended particulate matter; PM<sub>2.5</sub>; dust suppressant; unorganized emissions; iron ore powder; open storage yard