典型钢铁原料场在不同风向下的源强仿真研究

刘梦[1]，贾敏[2,3]，伯鑫[3]，张尚宣[4]，陶迎[5]，钟渝[5]，康明雄[6]，王彤[7]，钟星立[5]，李时蓓[3]
(1. 中国船级社质量认证公司，北京 100006；2. 北京化工大学经济管理学院，北京 100029；3. 生态环境部环境工程评估中心，北京 100012；4. 中冶赛迪重庆环境咨询有限公司，重庆 400013；5. 中冶赛迪技术研究中心有限公司，重庆 401122；6. 福建省环境保护设计院有限公司，福建 福州 350012；7. 陕西省环境调查评估中心，陕西 西安 710000)

摘要：本研究选取上海某铁矿石料场为研究对象，采用 CFD 仿真模型模拟不同工况条件下原料场扬尘排放量（起尘量）。结果表明：相同来流风速，不同来流风向（0°、45° 和 90°）情况下，安装防尘网可以有效降低铁矿石料堆表面平均风速。其中，来流风向为 0° 和 90° 时，添加防尘网可以有效降低料场起尘量，且来流风向为 90° 时起尘量达最小；相反，来流风向为 45° 时，添加防尘网对铁矿石料场起尘量并未出现抑制作用。

关键词：扬尘；钢铁；原料场；CFD；$PM_{2.5}$
中图分类号：X51　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2095-672X(2020)03-0135-04
DOI:10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.03.075

Simulation study on source emissions of typical iron and steel raw material field with different wind directions

Liu Meng[1],Jia Min[2,3],Bo Xin[3],Zhang Shangxuan[4],Tao Ying[5],Zhong Yu[5],Kang Mingxiong[6],Wang Tong[7],Zhong Xingli[5],Li Shibei[3]
(1.China Classification Society Certification Company,Beijing 100006,China;2.School of Economics and Management,Beijing University of Chemical Technology,Beijing 100029,China;3.Appraisal Center for Environment and Engineering,Ministry of Ecology and Environment,Beijing 100012,China;4.CISDI Chongqing Environmental Consulting Co.,Ltd.,Chongqing 400013,China;5.CISDI R&D Co.,Ltd.,Chongqing 401122,China;6.Fujian Environmental Protection Design Institute Co.,Ltd.,Fuzhou Fujian 350012,China;7.Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center,Xi'an Shaanxi 710000,China)

Abstract: Taking an iron ore raw material filed in Shanghai for research object, the dust generated by the raw material field (dust emission) under different working conditions is simulated by CFD simulation model.The results show that the installation of dust-proof net can effectively reduce the mean wind speed on the surface of the iron ore raw material filed under the same wind speed and different wind directions (0°, 45° and 90°).When the incoming wind direction is 0° and 90°, installing dust-proof net can effectively reduce the dust emission of the material field and the dust emission reached the minimum when the incoming wind direction is 90°.On the contrary, installing dust-proof net did not reduce the dust emission in the iron ore material field when the incoming wind direction is 45°.

Key words: Dust;Iron and steel;Raw material filed;CFD;$PM_{2.5}$

中国是钢铁生产大国，自 1996 年粗钢产量稳居世界第一[1]。与发达国家相比（短流程电炉炼钢为主），中国主要以长流程炼钢为主（主要工序包括原料场、烧结、球团、焦化、高炉、转炉、电炉、轧钢等）[2]。由于无组织排放源影响因素复杂，中国钢铁企业无组织排放呈现出高污染[3, 4]、难控制[3]等特点。原料场作为重要的无组织排放源之一，其排放对环境造成较大影响[5]。因此，为准确摸清中国钢铁行业大气污染物排放底数，厘清钢铁企业重点排污环节，开展钢铁企业无组织源强（原料场等）排放研究至关重要。

近年来，中国逐步加强对钢铁行业无组织排放源（原料场等）控制水平。钢铁行业现行排放标准[6-9]中明确规定钢铁企业无组织排放浓度限值，推动钢铁企业无组织排放源头治理。2018 年 6 月，国务院进一步发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》[10]，明确提出强化钢铁等重点行业无组织排放管控力度，深度治理企业重点无组织排放节点（物料存储等）。2019 年 4 月，中国颁布《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[11]，要求全面加强企业无组织排放控制水平，全方位减少烟粉尘等外溢排放。作为钢铁生产大省（2018 年占全国粗钢产量 25.56%），河北在率先实施超低改造的情况下，在《河北省钢铁、焦化、燃煤电厂深度减排攻坚方案（验收标准）》（冀气领办〔2018〕156 号）[12]中详细规范了钢铁企业无组织排放源超低改造治理标准，严格控制钢铁行业无组织排放总量。然而，在钢铁行业无组织排放核算方面，仍存在研究方法参差不齐、排放核算不确定性大等问题。目前钢铁行业无组织排放核算主要有采取系数法和类比法。2017 年 4 月《排污许可证申请与核发技术规范－钢铁工业》[13]中提出对钢铁行业无组织排放采用产污系数法，并给出钢铁原料系统排污系数；次年 3 月，中国颁布《污染源源强核算技术指南 钢铁》[14]，推荐采用类比法核算无组织排放。上述方法均未考虑不同企业原料场由于空间尺度、流动风速和风向等因素不同带来扬尘排放差异。在 2014 年底发布的《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南（试行）》[15]中，虽然规定了根据不同风速、含水量核算排污系数的方法，但并未考虑不同风向对无组织排放的影响。另外，国内外研究学者针对钢铁行业无组织排放核算开展了部分研究，已有研究中多采用系数法核算企业无组织排放，例如 Wu[16]、朱明奕[5]、郭健[17]和孙威[18]等，伯鑫等[19]采用 SCREEN3 估算模式分析钢铁企业原料场扬尘在不同风速下的扩散规律。上述研究均未考虑不同风向对钢铁原料场起尘量的影响，结果存在一定不确定性，无法准确核算钢铁企业原料场无组织排放总量。

为解决上述问题，本研究以典型钢铁企业原料系统为例，创新性地采用 CFD 仿真模拟等技术，研究钢铁企业原料场在不同风向下的无组织排放特征，核算不同风向下钢铁企业原料场总起尘量，为钢铁行业源强核算、源解析和污染预报预警等工作提供技术支持。

1　研究方法

1.1　技术方案

本研究选取上海某铁矿石料场（2019 年投产）为研究对象，具体研究技术方案如图 1 所示：

（1）首先，本研究综合考虑某铁矿石料厂典型矿堆截面结构、典型风向风速、有无防尘网等因素，建立露天矿堆 CFD 仿真模型并进行计算，后根据计算结果求解铁矿石料堆表面风速（u）（不同位置风速及

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

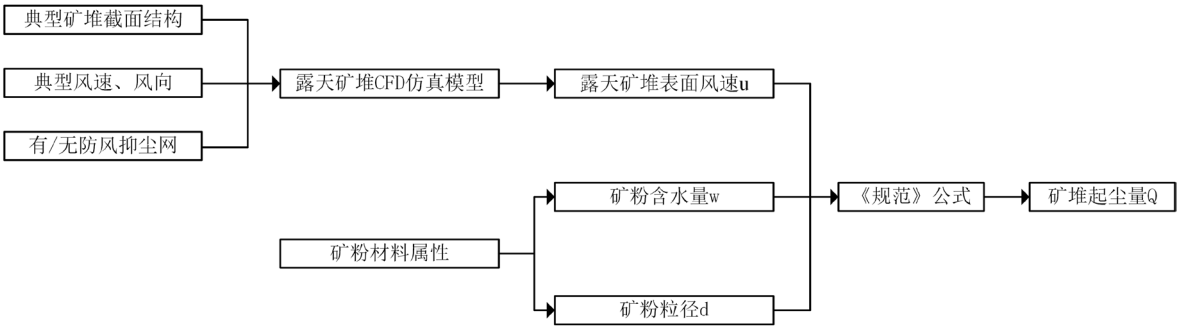


图 1　某铁矿石料场无组织排放研究仿真方案

整个表面平均风速）；

（2）其次，结合铁矿石料堆表面风速（u）、矿粉材料物理参数（矿粉含水量（w）和矿粉粒径（d）），根据《港口建设项目环境影响评价规范》（JTS 105-1—2011）（以下简称《规范》）[20] 推荐的起尘量计算公式核算露天铁矿石料场的起尘量（Q）。

1.2　仿真模型

本研究采用 CFD（Computational Fluid Dynamics）仿真模型模拟铁矿石料场内空气流动。铁矿石料场内的大气流动是一个复杂的三维湍流流动过程，其流动控制微分方程见公式（1）和（2）。

（1）连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (1)$$

（2）动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right]-\frac{\partial p}{\partial x_i} \qquad (2)$$

由于铁矿石料场存在防尘网，需要对其进行简化处理。对于简单、均匀的多孔介质，其源项方程见公式（3）。

$$S_i=-\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i+C_2\frac{1}{2}\rho|v|v_i\right) \qquad (3)$$

式中，S_i 代表源项；α 代表多孔介质的渗透性；μ 代表流体的动力粘度；C_2 代表惯性阻力系数。$\frac{\mu}{\alpha}v_i$ 则代表黏性损失项；$C_2\frac{1}{2}\rho|v|v_i$ 代表惯性损失项。

1.3　起尘量计算

根据《规范》要求，铁矿石料场起尘量计算公式见公式（4）和（5）。

$$Q=0.5\alpha(U-U_0)^3S \qquad (4)$$

$$U_0=0.03e^{0.5w}+3.2 \qquad (5)$$

式中，Q 代表散货堆场风蚀起尘量，kg/a；α 代表货物类型起尘调节系数；U 代表堆场表面风速，m/s；U_0 代表混合粒径颗粒的起动风速，m/s；S 代表堆垛的表面积，m^2；w 代表含水率，%。

根据《规范》要求，此次研究中矿粉起尘调节系数 α 取值为 1.6。根据现场调研，该铁矿石料场含水率 W 为 9%，S 为 5.018km^2。根据公式（5）即可求得铁矿石料场混合粒径颗粒的起动风速 U_0 为 5.9m/s。其次，通过铁矿石料场 CFD 仿真模拟，求解铁矿石料堆表面不同位置处的风速 U。最后，根据公式（4），计算料堆表面不同位置处的起尘量，将所有位置的起尘量累加即为整个铁矿石料场混合粒径颗粒的总起尘量。

1.4　几何模型

针对某铁矿石料场，为考虑不同风向对起尘量的影响，选取三个典型风向进行仿真，即来流风向为 0°、45° 和 90°，如图 2。

1.5　仿真工况

本研究仿真模型来流风向设置值分别为 0°、45° 和 90°，来流风速设置值为 10m/s（10m 标准高度处）；综合无防尘网、有防尘网等条件，共计研究 6 个模拟工况，所有工况说明如表 1 所示。

表 1　某矿石料场仿真工况及说明

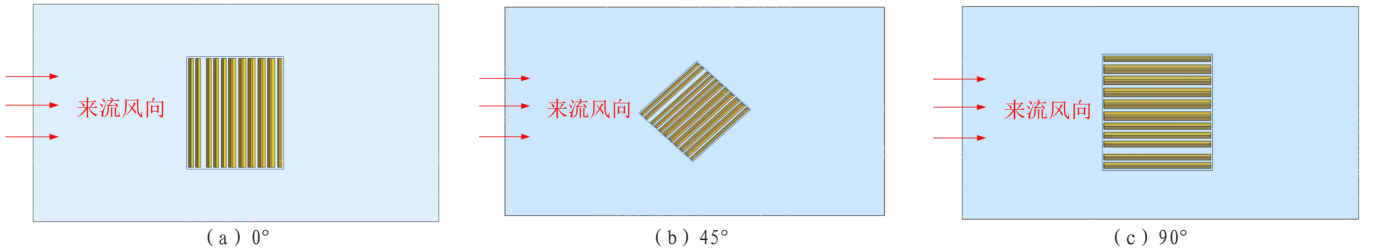
工况			说明
来流风向	防尘网	综合情景	
0°	无网	0°_NoNet_V10	来流风向为 0°，无防尘网，来流速度为 10m/s
	有网	0°_Net_V10	来流风向为 0°，有防尘网，来流速度为 10m/s
45°	无网	45°_NoNet_V10	来流风向为 45°，无防尘网，来流速度为 10m/s
	有网	45°_Net_V10	来流风向为 45°，有防尘网，来流速度为 10m/s
90°	无网	90°_NoNet_V10	来流风向为 90°，无防尘网，来流速度为 10m/s
	有网	90°_Net_V10	来流风向为 90°，有防尘网，来流速度为 10m/s

注：表中所述来流速度均是指标准高度为 10m 处的来流速度（后文若无特别说明，来流风速均按此标准定义）

2　结果与讨论

2.1　来流风向 0° 源强分析

来流风向为 0°，来流风速为 10m/s 情景计算结果见表 2。结果表明，无防尘网工况下铁矿石料堆表面平均风速为 1.86m/s，端部平均风速为 6.73m/s；有防尘网工况下铁矿石料堆上表面平均风速为 1.57m/s，端部平均风速为 3.80m/s。相对于无网工况，有网工况料堆上表面平均风速降低 15.5%，端部表面平均风速降低 43.5%，总起尘量下降了 89.18%。说明来流风向为 0° 时，安装防尘网可有效降低铁矿石料堆表面平均风速，大幅减少料场起尘量，从源头减少扬尘排放。两个工况下典型截面上流场分布如图 3。



（a）0°　（b）45°　（c）90°

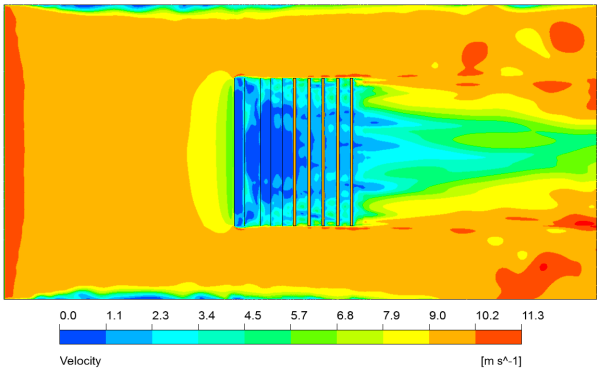
图 2　某铁矿石料场来流风向为 0°、45° 和 90° 仿真模型俯视图

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

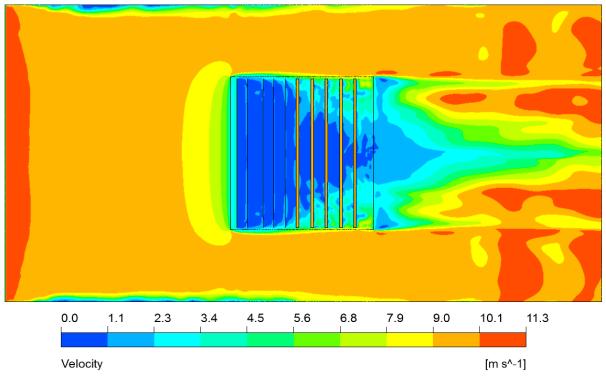
表 2　来流风向为 0° 情景下铁矿石料堆表面平均风速、料场起尘量

工况（0°） 防尘网	来流风速（m/s）	上表面平均风速（m/s）	端部平均风速（m/s）	上表面起尘量（kg/a）	端部起尘量（kg/a）	总起尘量（t/a）	单位面积起尘量（kg/(m²*a)）
无网	10	1.86	6.73	20370.1	17526.1	37.9	0.11
有网	10	1.57	3.8	4048.7	4.7	4.1	0.01

注：上述总起尘量为混合粒径颗粒起尘量，对特定粒径如 TSP、PM_{10} 等，需将上述总起尘量乘以相应粒径颗粒所占百分比（本文铁矿石料堆为矿粉，粒径小于 100μm）



（a）无防尘网

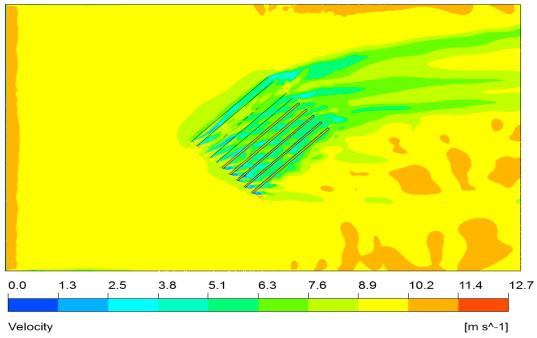


（b）有防尘网

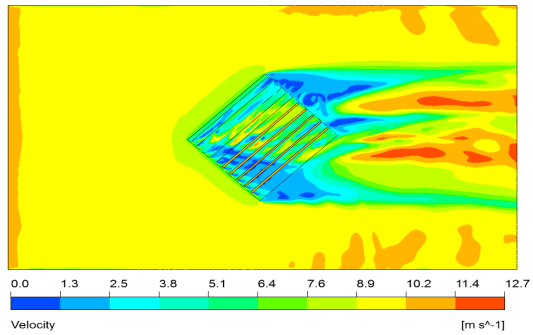
图 3　有 / 无防尘网，平面 3 速度云图（0° 风向，风速 10m/s）

2.2　来流风向 45° 源强分析

来流风向为 45°，来流风速为 10m/s 情景计算结果见表 3。结果表明，无防尘网工况下铁矿石料堆表面平均风速为 5.28m/s，端部平均风速为 4.35m/s；有防尘网工况下铁矿石料堆上表面平均风速为 4.23m/s，端部平均风速为 3.19m/s。相对于无网工况，有网工况料堆上表面平均风速降低 19.8%，端部表面平均风速降低 26.5%，但是总起尘量反而上升 132.31%。说明来流风向为 45° 时，安装防尘网铁矿石料堆表面平均风速减小，可以有效降低料堆表面平均风速；但是安装防尘网工况料场起尘量存在一定程度的增大，说明此情景下防尘网并未对铁矿石料场起到抑尘效果。两个工况下典型截面上流场分布如图 4。



（a）无防尘网



（b）有防尘网

图 4　有 / 无防尘网，平面 3 速度云图（45° 风向，风速 10m/s）

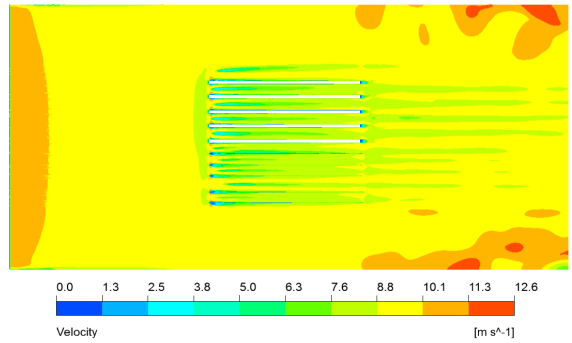
表 3　来流风向为 45° 时铁矿石料堆表面平均风速、料场起尘量

工况（45°） 防尘网	来流风速（m/s）	上表面平均风速（m/s）	端部平均风速（m/s）	上表面起尘量（kg/a）	端部起尘量（kg/a）	总起尘量（t/a）	单位面积起尘量（kg/(m²*a)）
无网	10	5.28	4.35	302887.9	16190.9	319.1	0.93
有网	10	4.23	3.19	741267.4	36.6	741.3	2.15

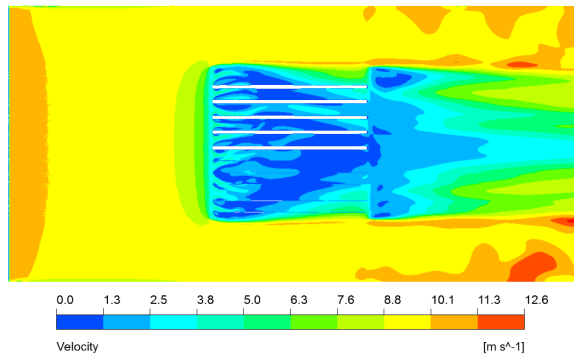
注：上述总起尘量为混合粒径颗粒的起尘量，对特定粒径如 TSP、PM_{10} 等，需将上述总起尘量乘以相应粒径颗粒所占百分比（本文铁矿石料堆为矿粉，粒径普遍小于 100μm）

2.3　来流风向 90° 源强分析

来流风向为 90°，来流风速为 10m/s 情景计算结果见表 4。结果表明，无防尘网工况下铁矿石料堆表面平均风速达 4.49m/s，端部平均风速为 2.54m/s；有防尘网工况下铁矿石料堆上表面平均风速为 1.52m/s，端部平均风速为 2.09m/s。相对于无网工况，有网工况料堆上表面平均风速降低 66.1%，端部表面平均风速降低 17.8%，总起尘量下降 100%。说明来流风向为 90° 时，安装防尘网可明显降低铁矿石料堆表面平均风速，抑制料场起尘量，全面减少扬尘排放。两个工况下典型截面上流场分布如图 5。



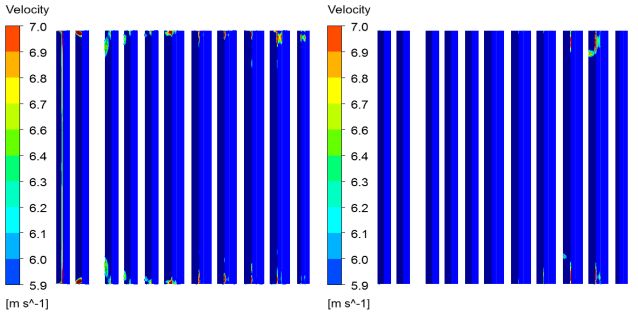
（a）无防尘网



（b）有防尘网

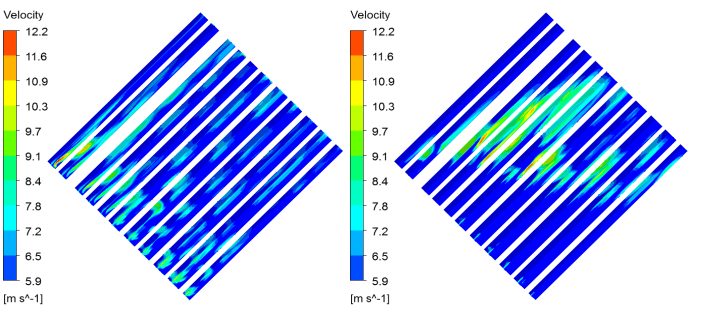
图 5　有 / 无防尘网，平面 3 速度云图（90° 风向，风速 10m/s）

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



（a）10m/s，无网　　（b）10m/s，有网

图 6　来流风向为 0° 时铁矿石料堆表面风速云图



（a）10m/s，无网　　（b）10m/s，有网

图 7　来流风向为 45° 时铁矿石料堆表面风速云图

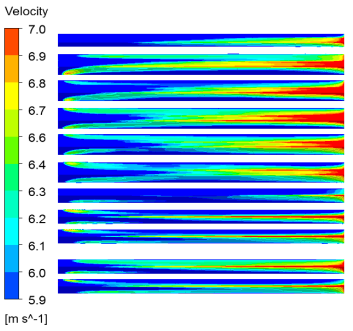
表 4　来流风向为 90° 时铁矿石料堆表面平均风速、料场起尘量

工况（90°）		上表面平均风速(m/s)	端部平均风速(m/s)	上表面起尘量(kg/a)	端部起尘量(kg/a)	总起尘量(t/a)	单位面积起尘量(kg/(m²*a))
防尘网	来流风速(m/s)						
无网	10	4.49	2.54	6892.3	1860.9	8.8	0.03
有网	10	1.52	2.09	0	0	0	0

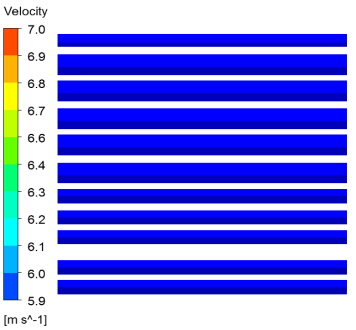
注：上述总起尘量为混合粒径颗粒的起尘量，对特定粒径如 TSP、PM_{10} 等，需将上述总起尘量乘以相应粒径颗粒所占百分比（本文铁矿石料堆为矿粉，粒径小于 100μm）。

2.4　结果讨论

根据上述模拟结果，在相同来流风速，不同来流风向（0°、45° 和 90°）情况下，安装防尘网均可有效降低铁矿石料堆表面平均风速。另外，当来流风向为 0° 和 90°，安装防尘网对起尘量有显著抑制效果，但来流风向为 45° 时，有防尘网工况料场起尘量反而增大，表明此时防尘网对起尘量并无抑制效果。



（a）10m/s，无网



（b）10m/s，有网

图 8　来流风向为 90° 时铁矿石料堆表面风速云图

为了分析造成这种现象的原因，本研究对来流风向为 0°、90° 和 45° 时不同工况下铁矿石料堆表面速度云图进行分析，如图 6- 图 8 所示。从图可得，相同来流风速，来流风向分别为 0° 和 90° 时，无防尘网工况下铁矿石料堆表面局部高速区明显更多；而来流风向为 45° 时，有防尘网工况料堆表面局部高速区更多。根据《规范》推荐的起尘量计算公式，起尘量与速度的三次方成正比，即速度越大，其起尘量增长越快。因此来流风向为 45° 时，其起尘量变化规律相反主要由于其料堆表面风速局部高速区分布不同产生。

3　结论

（1）本研究表明，相同来流风速，不同来流风向（0°、45° 和 90°）情况下，安装防尘网可以有效降低铁矿石料堆表面平均风速。

（2）相同来流风速下，来流风向为 0° 和 90° 时，添加防尘网可以有效降低料场起尘量，且来流风向为 90° 时起尘量减排幅度最大；相反，来流风向为 45° 时，添加防尘网铁矿石料场起尘量并未出现抑制作用，主要由于有防尘网时料堆表面局部高速区更多。

（3）结合铁矿石料场常年风向、风速以及相关工况条件，对料场无组织排放进行 CFD 仿真模拟，可准确掌握企业不同工况条件下无组织排放水平，为企业未来无组织排放源控制减排提供依据。本研究结论也可借鉴到其他行业原料场防风抑尘设计（例如码头料场等）、钢铁排放清单无组织源强研究 [21-22] 等。

参考文献

[1]World Steel Association (WSA). Steel Statistical Yearbook 1990-2019 [M].

[2]Wang, X. et al. A unit-based emission inventory of SO_2, NOx and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015[J]. Science of The Total Environment, 2019, 676: 18-30.

[3] 赵羚杰．中国钢铁行业大气污染物排放清单及减排成本研究 [D]．杭州：浙江大学，2016.

[4] 汪旭颖，燕丽，雷宇，等．我国钢铁工业一次颗粒物排放量估算 [J]．环境科学学报，2016,36(8):3033-3039.

[5] 朱明奕，张余．钢铁企业原料场粉尘无组织排放控制 [J]．资源节约与环保，2017(5):74-75.

[6]GB 28662-2012 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准 [S].

[7]GB 28664-2012 炼钢工业大气污染物排放标准 [S].

[8]GB 28663-2012 炼铁工业大气污染物排放标准 [S].

[9]GB 28665-2012 轧钢工业大气污染物排放标准 [S].

[10] 国务院．打赢蓝天保卫战三年行动计划．2018-07-03.http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.

（下转第 140 页）

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

搭建生化池，AO-MBBR-AO 工艺在应用过程中主要是对缺氧池、好氧池、二级缺氧池等发挥作用。运行期间采用多点进水模式，前段 AO-MBBR 反应池要将原污水内部碳源的优势充分发挥出来，形成反硝化反应，随后待处理的高氨氮废水进入到二级缺氧池中，这时在其中投入碳源，确保出水 TN 与规范标准相符。生化段出水后会流入到污泥泵房、配水井中，一些污泥通过回流返回至一级缺氧池，另一部分则经过配水井进行分流处理，再出水进入到二沉池中，利用絮凝沉淀池、二氧化氯，使高氨氮废水得到接触氧化处理。创建生化池需要用低速推进器、膜管式曝气器、回流泵、悬浮性填料等设备，缺氧 I 区的低速推进器数量为 2 台，单台功率为 7.5kW，缺氧 II 区使用的低速推进器数量宜设置 4 台，单台功率 5.5kW。搭建二沉池过程中，要设置中心传动单管吸泥机，将线速度控制在 3m/min；搭建污泥泵房要与配水井合建，期间要控制剩余污泥产量在 560~700m^3/d，污泥回流比则以 50%~120% 为最佳[3]。其中运用到的设备则包括回流污泥泵、剩余污泥泵。

3.3 创建稳定出水处理系统

搭建絮凝沉淀，絮凝时间为 13.50min，采用中心传动刮泥机，池径为 13.9m，功率为 0.75kW；合建出水泵房与接触池，期间要运用 1 台大泵与 2 台小泵，大泵口容积是 1242 m^3/h，高度为 12m，单台功率是 45kW，小泵口的容积是 620m^3/h，高度为 12m，单台功率是 37 kW。

3.4 创建辅助生产单元

搭建鼓风机房，将其划分为好氧 I 区、好氧 II 区。其中好氧 I 区与流化床曝气池的最大供气量分别为 105m^3/min、70m^3/min，而好氧 II 区的最大供气量则以 20m^3/min 为最佳；搭建加氯加矾间与碳源投加系统，其中主要包括化学除磷加药与加氯两种系统，在系统内部投加液体浓度为 10% 的氧化铝，加氯操作时要采用二氧化氯发生器。另外，碳源投加系统包括投加泵房、甲醇储罐这两个部分，储罐采用埋地式设置。

4 多级 AO-MBBR 工艺在高氨氮废水处理中的应用效果

某印刷厂在高氨氮废水处理中应用多级 AO-MBBR 工艺，污水处理连续监测月平均值数据如下所示：2018 年 1 月份平均流量进水为 282.67m^3/h，出水为 195.10m^3/h，中水为 155.730m^3/h，COD 进水 2719.71mg/L，出水 48.95mg/L，氨氮进水 31.67mg/L，出水 3.08mg/L，pH8.48，溶解氧 3.45mg/L，污泥累计流量 518.51m^3，产生量 518.51t；到 6 月份平均流量进水为 372.81m^3/h，出水为 228.99m^3/h，中水为 135.930m^3/h，COD 进水 2012.63mg/L，出水 44.70mg/L，氨氮进水 17.84mg/L，出水 2.73mg/L，pH8.46，溶解氧 2.63mg/L，污泥累计流量 7857.29m^3，产生量 7857.29t；到 12 月份平均流量进水为 353.47m^3/h，出水为 201.11m^3/h，中水为 96.060m^3/h，COD 进水 1987.44mg/L，出水 33.78mg/L，氨氮进水 15.78mg/L，出水 4.00mg/L，pH8.01，溶解氧 1.42mg/L，污泥累计流量 321754.60m^3，产生量 321754.60t。分析可知多级 AO-MBBR 工艺在应用过程中获得了显著的效果，污泥累计流量与产生量增加明显，切实达到了出水达标这一目的。

5 结束语

综上所述，高氨氮废水处理时采用多级 AO-MBBR 工艺，可以将工业污水、生活污水等形成混合废水，水解酸化预处理技术、接触氧化工艺作为辅助，加强高氨氮废水处理的出水水质，发挥多级 AO-MBBR 工艺优势为今后高氨氮废水处理工作提供技术参考。

参考文献

[1] 钱允致，马华继，苑宏英，池勇志，丁艳梅，田素凤．厌氧氨氧化工艺在高氨氮废水处理的研究应用进展 [J/OL]．水处理技术，2019(12)：7-12.

[2] 樊佳炜，武海霞，陈卫刚．氨氮废水的高级氧化处理技术研究进展 [J/OL]．南京工业大学学报（自然科学版）：1-10.

[3] 刘艳丽，赵志龙，刘峰彪，王志国，王永文．某粉体材料厂高盐氨氮废水处理工程实例 [J]．中国资源综合利用，2019,37(10)：43-46.

收稿日期：2020-01-07

作者简介：程红霞（1983-），女，汉族，硕士研究生，中级，研究方向为环境工程专业水污染控制工程。

（上接第 138 页）

[11] 生态环境部．关于推进实施钢铁行业超低排放的意见 [EB/OL].http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201904/t20190429_701463.html?keywords= 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见．

[12] 河北省生态环境厅．河北省钢铁、焦化、燃煤电厂深度减排攻坚方案（验收标准）[EB/OL].http://www.hb.cangzhou.gov.cn/HBSC/Services/pdf/web/show.jsp?id=540094.

[13]HJ846-2017 排污许可证申请与核发技术规范 钢铁工业 [S].

[14] 生态环境部．污染源源强核算技术指南 钢铁工业 [EB/OL].http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wrfzjszc/201803/W020180329582067501945.pdf.

[15] 生态环境部 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南（试行）[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W02015-0107594588131490.pdf.

[16]Wu X, Zhao L, Zhang Y, et al. Primary air pollutant emissions and future prediction of iron and steel industry in China[J]. Aerosol Air Qual. Res, 2015, 15(4): 1422-1432.

[17] 郭健，刘善军，黄宪江．某钢铁企业颗粒物无组织排放核算与监测对比分析 [J]．环境保护科学，2017,43(3)：14-18.

[18] 孙威，黄学敏，李培．钢铁企业原料场扬尘污染估算 [J]．环境科学与管理，2009,34(9)：178-179.

[19] 伯鑫，韩松，刘梦．钢铁企业原料场扬尘在不同风速下扩散规律研究 [A].2011 中国环境科学学会学术年会论文集（第三卷）[C],2011.

[20]JTS 105-1—2011 港口建设项目环境影响评价规范 [S].

[21] 伯鑫，李时蓓，吴忠祥，等．基于反演模型的焦炉无组织苯并 [a] 芘排放因子研究 [J]．中国环境科学，2016,36(05)：1340-1344.

[22] 伯鑫，赵春丽，吴铁，等．京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究 [J]．中国环境科学，2015,35(08)：2554-2560.

收稿日期：2020-02-24

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFC0208101）；大气重污染成因与治理攻关项目（DQGG0209-07、DQGG0304-07）；生态环境部环境工程评估中心创新科研项目（2019-10）

作者简介：刘梦（1983-），女，硕士研究生，工程师，研究方向为环境管理和环境影响评价。

责任作者：钟星立，高级工程师；李时蓓，研究员。

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