新型流化除雾器除雾性能实验研究

张成刚[1,2]，陈旺生[1,2]，朱能天[1,2]，涂阳哲[1,2]，韩 军[1,2]
(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 湖北省工业安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430081)

摘 要： 针对目前除雾器存在的除雾效率不高、易堵塞、成本高等问题，提出一种新型的流化除雾器，其具有高效、低阻、防堵塞等优点。探讨了流化除雾器的除雾原理，并研究了流化除雾器的除雾性能及其影响因素。结果表明：流化除雾器除雾机理主要为惯性碰撞、拦截；除雾器阻力随着流化风速、除雾介质堆积厚度和表观密度的增大而增大，当除雾介质粒径为 30 mm，堆积厚度为 16 cm，进口雾滴质量浓度为 90 g/m^3，流化风速由 5.7 m/s 增大至 7.5 m/s 时，排放质量浓度由 4.17 mg/m^3 增大至 41.94 mg/m^3，除雾效率均高达 99.95% 以上，阻力均在 210 Pa 左右，表明流化除雾器具有良好的除雾性能，且由于除雾介质处于流化状态，因此可有效防止除雾器堵塞。

关键词： 除雾器；除雾机理；除雾效率；排放质量浓度；阻力
中图分类号： X703.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2020)01－0067－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.01.013

Experimental study on performances of the mist eliminator with fluidized pellets

Zhang Chenggang[1,2], Chen Wangsheng[1,2], Zhu Nengtian[1,2], Tu Yangzhe[1,2], Han Jun[1,2]
(1. *College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei*; 2. *Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan* 430081, *Hubei*)

Abstract Aiming at such problems as low efficiency, easy blockage and high cost, a new type of mist eliminator with fluidized pellets is proposed, which has such advantages as high efficiency, low resistance and anti-blockage. The mechanism of the mist eliminator with fluidized pellets is analyzed, its performance and influencing factors are experimentally studied. The results show that the main mechanism of the mist eliminator with fluidized pellets is inertial collision and interception. The resistance of mist eliminator increases with the rise of fluidization velocity, stacking thickness and apparent density of the mist eliminating medium. When the diameter of the medium is 30 mm, and thickness is 16 cm, the mass concentration of imported droplet is 90 g/m^3. When the fluidization velocity increases from 5.7 m/s to 7.5 m/s, the emission mass concentration increases from 4.17 mg/m^3 to 41.94 mg/m^3, the eliminating efficiency reaches 99.95% and resistance is about 210 Pa. The results show that the mist eliminator has good performance and can effectively prevent the mist eliminator from blocking because the pellets are in the fluidized state.

Key words mist eliminator; mist eliminating mechanism; mist eliminating efficiency; emission mass concentration; resistance

气液分离是许多化工工艺过程中的一个重要环节。正因为如此，除雾器成为很多工业生产中不可或缺的设备之一，其性能直接影响到整个工艺运行的可靠性。以烧结烟气脱硫为例，由于烧结工艺和原料的特点，导致烧结烟气中含有大量的 CO、SO_2、和 NO_x 等[1-2]。经脱硫处理后虽然很大程度上解决了上述问题，但脱硫的同时又会导致气流中夹带大量雾滴，如不

收稿日期： 2019－07－17
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51476118)
作者简介： 张成刚(1994—)，男，硕士研究生，从事工业除雾器方面的研究。
通讯作者： 陈旺生(1968—)，男，教授，从事工业通风除尘以及有毒有害气体净化方面的研究。

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

加处理直接排放，不仅会造成下游设备的损坏，更会造成严重的环境问题。

现有的除雾技术虽然取得了很大的进步，技术的应用也越来越广泛，但是依然存在诸多问题：如折流板除雾器对小粒径雾滴除雾效果较差，同时受入口烟尘质量浓度高、冲洗水系统设置或冲洗水量等原因容易导致除雾器结垢堵塞[3-5]；旋风式除雾器除雾效果受处理烟气量影响大，同时其运行阻力大，能耗高[6]；静电除雾器成本高，在含腐蚀性气溶胶的环境中设备老化较快，且受其除雾原理和设备结构复杂等方面的影响，导致静电除雾器维修较困难，维护费用高[7]；丝网除雾器虽然除雾效率得到很大的提升，但长时间运行后容易堵塞导致除雾性能大幅下降，存在使用寿命短、不易清洗等问题[8-10]。

针对目前除雾器存在的问题，提出一种新型的流化除雾器，对其除雾机理及除雾性能进行分析与研究，其具有除雾性能好、结构简单、成本低、防堵塞等优点。

1 流化除雾器结构及除雾机理分析

1.1 流化除雾器结构

流化除雾器主要由除雾器壳体、除雾单元、清洗喷嘴、孔板和气体喷嘴构成。除雾器单元放置于孔板中、均匀布置在流化除雾器内，在除雾器单元上方和下方分别设置有用于清洗除雾器的洗清喷嘴和用于预流化除雾介质的气体喷嘴；除雾单元上方设置有防止除雾介质逃逸的延伸筒，除雾介质置于除雾单元内(图1)。

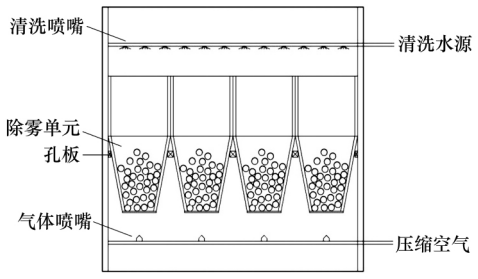


图1 流化除雾器工业应用示意图

1.2 流化除雾器工作原理及除雾机理分析

流化除雾器工作时主要靠惯性碰撞和拦截效应实现气液分离，其除雾机理如图2所示。由图2可知：当携带雾滴甚至固体颗粒物的烟气进入流化除雾器后，在气流的作用下，除雾器内堆积的除雾介质向上方运动，到达一定高度后，由于除雾器壳体采用上端开口大下端开口小的特殊设计，上方断面面积不断增加，气流速度也随之变小，使得气流速度小于除雾介质的流化速度，除雾介质继而向边缘及下方运动，而边壁的倾斜角使得边缘的除雾介质在重力的作用下沿边壁向下运动填补被气流吹起的除雾介质，继而循环往复，形成稳定的流化形态。并且由于除雾介质处于流化状态，进一步促进了烟气流场的均匀分布，解决了气流的偏流问题，有利于夹带雾滴的气流均匀地通过，避免了局部区域烟气流速过高或过低。相比于折流板除雾器的静止状态，流化除雾器具有自清洗功能，不易发生因除雾介质表面不洁净而导致粘结导致除雾器堵塞的情况，即使有物质附于除雾介质表面，也会因为除雾介质的运动碰撞、相互摩擦而剥落。同时由于除雾介质的运动，增加了气流的扰动，增大了雾滴与雾滴之间和雾滴与除雾介质的碰撞机率，能够强化惯性捕集和扩散捕集，提高脱硫效率。

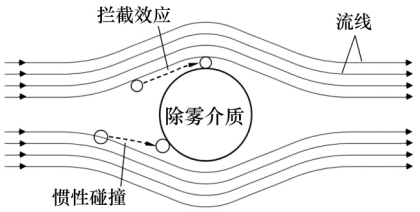


图2 流化除雾器除雾机理

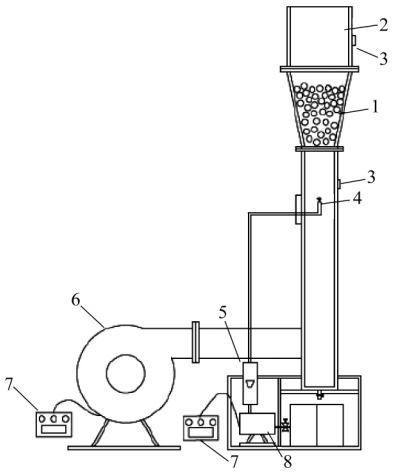
2 流化除雾器除雾性能研究

为研究不同粒径、厚度和表观密度的除雾介质及不同流化风速下流化除雾器的除雾性能，确定除雾器的除雾效率、排放质量浓度和阻力，对单个除雾单元进行实验验证。

2.1 实验装置及仪器

实验装置主要由流化除雾器、通风系统、喷雾系统和测试系统组成，如图3所示，为方便观察流化除雾器流化和除雾效果，实验段均采用有机玻璃材质。

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



1—流化除雾器；2—延伸筒；3—测量孔；4—喷雾喷嘴；5—流量计；6—风机；7—变频器；8—水泵。

图 3　除雾性能实验装置示意

由图 3 可知：流化除雾器采用上端开口大、下端开口小的锥形结构，在流化除雾器进、出口分别设有测量孔；实验用除雾介质粒径分别为 15、20、25 、30 mm 的空心小球，可根据实验研究选择不同厚度及表观密度的除雾介质；通风系统主要由离心风机和变频器组成，可通过变频器调节实验段风量；喷雾系统主要由喷嘴、水泵及流量计组成，雾滴粒径采用 Winner318 工业喷雾激光粒度分析仪测量；测试系统主要包括雾滴质量浓度采样装置和除雾器阻力测试装置，雾滴质量浓度采样装置为 CCD304 动压平衡型烟气采样器，除雾器阻力采用 S2600 手持式电子压力计进行测量。

2.2　实验方法

主要针对流化除雾器的除雾效率、阻力、排放质量浓度 3 项性能指标进行实验研究，主要实验方法如下。

(1) 除雾效率及排放质量浓度计算：进口雾滴质量浓度 c_i 根据喷嘴喷出的液体量与处理气体量获得，喷雾采用质量分数 20% 的氯化钠溶液，防止空气湿度及蒸发作用对采样结果的影响；通过等速采样法对含雾滴气流采样，称量实验前后干燥滤纸得到氯化钠净重，进而计算出采样雾滴质量 m，从而获得排放质量浓度 c_0 和除雾效率 η，其计算公式如式(1)、(2)所示：

$$c_0 = \frac{m}{V} \tag{1}$$

式中：c_0 为雾滴排放质量浓度，mg/m^3；m 为采样雾滴质量，mg；V 为采样气体体积，m^3。

$$\eta = \frac{c_i - c_0}{c_i} \times 100\% \tag{2}$$

式中：η 为除雾效率，%；c_i 为除雾器进口雾滴质量浓度，mg/m^3；c_0 为雾滴排放质量浓度，mg/m^3。

(2) 阻力测试：利用手持式电子压力计测量流化除雾器进口与出口的全压差值，从而获得流化除雾器的阻力。

实验雾滴粒径为 55 μm，其中直径小于 20 μm 雾滴体积分数约为 8%，如图 4 所示。

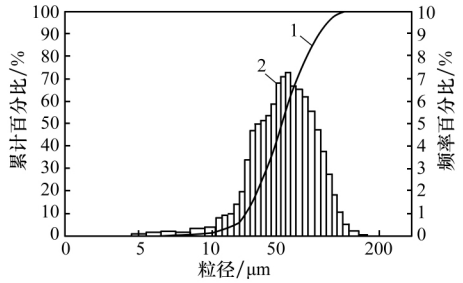


图 4　喷雾粒径分布

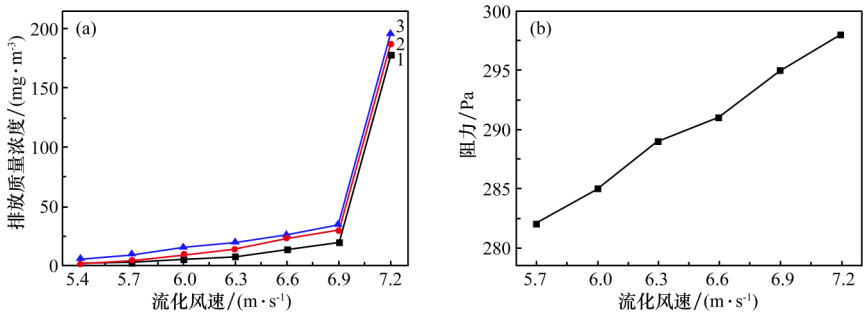
3　实验结果分析

3.1　进口雾滴质量浓度对流化除雾器性能的影响

当除雾介质粒径为 25 mm，堆积厚度为 16 cm、表观密度为 0.335 g/cm^3 时，研究进口雾滴质量浓度为 50、70、90 mg/m^3 时对除雾器性能的影响，结果如图 5 所示。

由图 5 可知：雾滴排放质量浓度随着流化除雾器进口雾滴质量浓度的增大而增大；当流化速度为 5.4 m/s 时，流化除雾器排放质量浓度分别为 1.97、1.97、5.42 mg/m^3，阻力均为 282 Pa；当流化速度为 6.9 m/s 时，排放质量浓度分别为 18.87、29.26、33.88 mg/m^3，阻力均为 298 Pa；当流化速度达到 7.2 m/s 时，分别为 177.15、186.75、195.73 mg/m^3，阻力均为 301 Pa；除雾器出口排放质量浓度随进口雾滴质量浓度和流化风速的升高而升高，阻力亦随

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



(a) 排放质量浓度；(b) 阻力

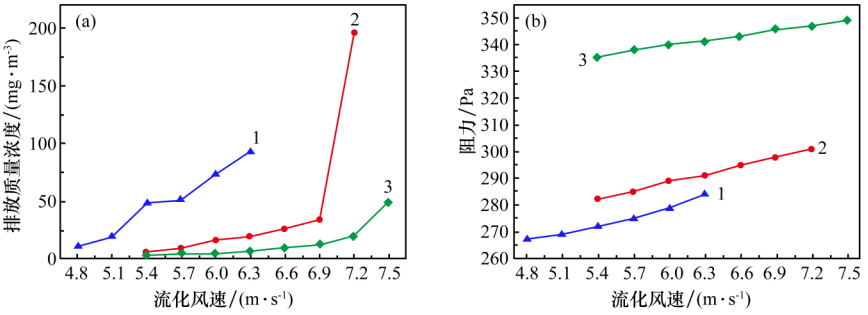
进口质量浓度/(g·m^{-3})：1—50；2—70；3—90。

图 5 进口雾滴质量浓度对除雾性能的影响

流化风速的增大而增大，但进口雾滴质量浓度对排放质量浓度和流化风速对阻力的影响并不十分显著。实验结果表明，流化除雾器对进口雾滴质量浓度的变化具有较好的适应性。

3.2 除雾介质厚度对流化除雾器性能的影响

当除雾介质粒径为 25 mm，表观密度为 0.335 g/cm^3，流化除雾器进口雾滴质量浓度为 90 g/m^3 的条件下，研究除雾介质堆积厚度对流化除雾器性能的影响，结果如图 6 所示。



(a) 排放质量浓度；(b) 阻力

堆积厚度/cm：1—14；2—16；3—18。

图 6 除雾介质厚度对除雾性能的影响

由图 6 可知：在堆积厚度为 16 cm 和 18 cm 时，当流化风速为 5.4 m/s，流化除雾器排放质量浓度分别为 5.42、2.47 mg/m^3，阻力分别为 282、335 Pa；当流化速度达到 6.9 m/s 时，排放质量浓度分别为 33.88、11.95 mg/m^3，阻力分别为 298、346 Pa；当风速大于 6.9 m/s 时，堆积厚度为 16 cm 的除雾介质已经难以满足除雾要求，而堆积厚度为 18 cm 的除雾器依然能较好的工作，但风速达到 7.5 m/s 时，其排放质量浓度为 48.98 mg/m^3，阻力也随之上升为 349 Pa。通过阻力数据可以发现，除雾介质厚度为 14 cm 和 16 cm 时，其阻力虽然随厚度的增加而增大，但变化并不大，当厚度增加到 18 cm时，对应的阻力大幅升高，较 16 cm 时普遍提高了 50 Pa，其主要原因是当厚度到达 18 cm甚至更高时，除雾器内除雾介质运动可大致分为 2 种：①下层除雾介质运动剧烈，能够反复有效捕集雾滴；②上层除雾介质形成“除雾介质层”，运动较下层更稳定，能够对未被下层除雾介质捕集的雾滴进行二次捕集，但阻力也相应增加。因此可通过改变除雾介质堆积厚度满足不同工况的除雾要求。

3.3 除雾介质粒径及表观密度对流化除雾器性能的影响

通过对粒径 15 mm 和 20 mm 的除雾介质进行除雾性能研究发现，在不同的流化速度下，流化介质很难维持良好的流化状态，除雾效果并不理想，其中当除雾介质粒径为 15 mm，表观密度为 0.365 g/m^3 时，流化风速由 5.1 m/s 增至 5.4 m/s 时，其排放质量浓度由 41 mg/m^3 增加至

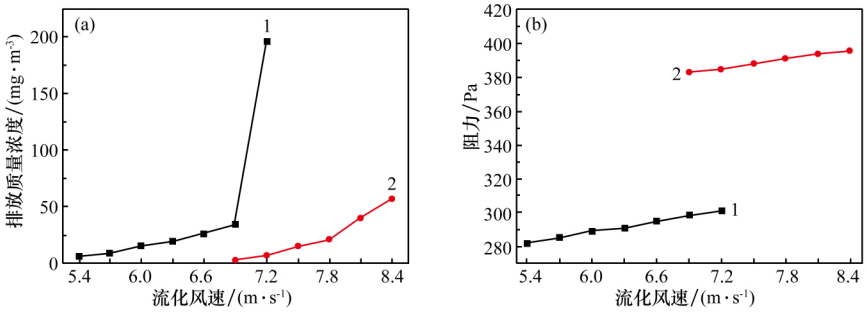
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

161 mg/m^3；当除雾介质粒径为 20 mm，表观密度为 0.265 g/cm^3 时，流化风速由 4.8 m/s 增至 5.1 m/s 时，其排放质量浓度由 56 mg/m^3 增加至 276 mg/m^3。分析其原因，主要是由于除雾介质粒径越小，除雾介质在堆积状态下空隙率越小，而当流化风速一定时即风量一定，空隙率越小，其空隙内的风速越大，导致除雾介质运动更加剧烈甚至不稳定，并且由于除雾器壳体采用特殊的变径设计，粒径较小时，其侧壁的除雾介质运动效果较差，进一步导致中心区域风量变大，因此除雾介质粒径越小，除雾效果较差甚至完全无法满足除雾需要。另外的，由于空隙间风速过大导致除雾介质捕集的雾滴无法及时排出而出现液泛现象，在空隙之间积液，导致部分雾滴被气流“二次夹带”，造成除雾效率下降。因此除雾介质宜选用粒径大于 20 mm 的空心小球。

为了进一步了解除雾介质表观密度对除雾性能的影响，分别对 25 mm 和 30 mm 粒径除雾介质不同表观密度下的除雾性能进行了研究。除雾介质堆积厚度均为 16 cm，进口雾滴质量浓度为 90 g/m^3。

当除雾介质粒径为 25 mm，流化除雾器实验结果如图 7 所示。由图 7 可知：当除雾介质表观密度为 0.335 g/cm^3，流化风速为 5.4 m/s 时，其排放质量浓度为 5.42 mg/m^3，阻力为 282 Pa；当流化风速为 6.9 m/s 时，排放质量浓度为 33.88 mg/m^3，阻力为 298 Pa；当除雾介质表观密度为 0.435 g/cm^3，流化风速为 6.9 m/s 时，排放质量浓度为 2.31 mg/m^3，阻力为 383 Pa；当流化风速增加至 8.4 m/s 时，排放质量浓度为 56.85 mg/m^3，阻力为 396 Pa。

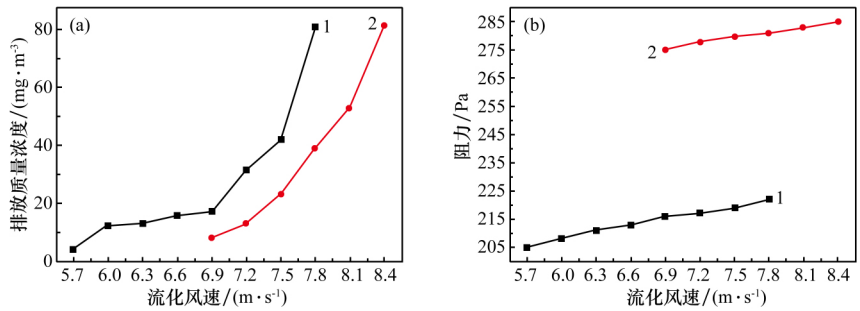
当除雾介质粒径为 30 mm，流化除雾器除雾性能实验结果如图 8 所示。



(a) 排放质量浓度；(b) 阻力

表观密度/(g·cm^{-3})：1—0.335；2—0.435。

图 7　粒径 25 mm 除雾介质在不同表观密度下除雾性能



(a) 排放质量浓度；(b) 阻力

表观密度/(g·cm^{-3})：1—0.224；0.324。

图 8　粒径 30 mm 除雾介质在不同表观密度下除雾性能

由图 8 可知：当表观密度为 0.224 g/cm^3，流化风速由 5.7 m/s 增大至 7.5 m/s 时，排放质量浓度从 4.17 mg/m^3 增大至 41.94 mg/m^3，阻力从 205 Pa 增大至 217 Pa；当表观密度为 0.324 g/cm^3 时，流化风速由 6.9 m/s 增大至 8.1 m/s 时，排放质量浓度从 7.96 mg/m^3 增大

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

至41.94 mg/m^3，阻力由275 Pa增大为283 Pa。通过实验结果可以发现，粒径为30 mm、表观密度为0.224 g/cm^{3}的空心小球作为除雾介质，在流化风速为5.7～7.5 m/s时，具有良好的除雾性能。分析其原因，主要是由于除雾介质粒径越小，除雾介质在堆积状态下空隙率越小，而当流化风速一定时即风量一定，空隙率越小，其空隙内的风速越大，导致除雾介质运动更加剧烈甚至不稳定，并且由于除雾器壳体采用特殊的变径设计，粒径较小时，其侧壁的除雾介质运动效果较差，进一步导致中心区域风量变大，因此除雾介质粒径越小，除雾效果较差甚至完全无法满足除雾需要。另外，由于空隙间风速过大导致除雾介质捕集的雾滴无法及时排出而出现液泛现象，在空隙之间积液，导致部分雾滴被气流“二次夹带”，造成除雾效率下降。

4 结 论

(1) 流化除雾器除雾机理主要是惯性碰撞和拦截效应。

(2) 对不同粒径、堆积厚度及表观密度的除雾介质在不同进口雾滴质量浓度和不同流化风速情况下的除雾性能综合分析表明：流化除雾器排放质量浓度随着流化风速和进口雾滴质量浓度的增大而增大，随着除雾介质粒径和表观密度的增大而降低。此外，除雾介质宜选用粒径大于20 mm的空心小球，且选用粒径为25 mm除雾介质时其表观密度应大于0.235 g/cm^3。

(3) 当除雾介质粒径为30 mm，堆积厚度为16 cm，进口雾滴质量浓度为90 g/m^3，流化风速由5.7 m/s增大至7.5 m/s时，排放质量浓度由4.17 mg/m^{3}增大至41.94 mg/m^3，除雾效率均高达99.95%以上，阻力均在210 Pa左右，表明流化除雾器具有高效、低阻的优点，同时由于除雾介质处于流化状态，相互摩擦碰撞有利于去除表面污染物，从而具备自清洗功能，不易发生因除雾介质表面不洁净而发生粘结导致除雾器堵塞现象。且流化除雾器结构简单，运行可靠，成本低，因此具有广阔的工业应用前景。

参考文献

[1] 张兴胜，张军红，何志军，等. 熔剂添加对烧结过程中有害气体排放规律影响的研究[J]. 烧结球团，2012，37(6)：66－69.

[2] 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.

[3] 朱凯，袁竹林. 一种涡流除雾器的实验与数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2018，49(1)：22－30.

[4] 张长伟. 湿法FGD装置除雾器塌陷原因分析与处理[J]. 电力科学与技术学报，2008，23(4)：93－96.

[5] 李壮，胡妲，朱跃. 双塔双循环脱硫除雾器故障分析及对策研究[J]. 中国电力，2019，52(2)：177－182.

[6] 陆文峰. 纤维栅除雾效果实验研究[D]. 沈阳：东北大学，2014.

[7] 蒯继玺. 脱硫塔高效除雾技术的研究[D]. 北京：华北电力大学，2014.

[8] Banitabaei S A，Rahimzadeh H，Rafee R. Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave－plate mist eliminator[J]. Asia－Pacific Journal of Chemical Engineering，2012，7(4)：590－597.

[9] 兰茂森. 如何选好用好纤维除雾器[J]. 硫酸工业，2004(1)：45－47.

[10] 孔庆森. 折流板除雾器力学性能研究[D]. 天津：天津大学，2013.

(上接第54页)

[2] 康兴东，王东. 现代综合原料场新技术应用实践[J]. 烧结球团，2017，42(4)：57－61.

[3] 仇晓磊. 宝钢原料场降低降尘量的生产实践[J]. 内蒙古煤炭经济，2018(7)：44－46.

[4] 陶伟平. 宝钢环保封闭料场选型及特点分析[J]. 环境与发展，2018，30(4)：258－259.

[5] 康兴东，邱实，朱佳星. 山钢综合原料场功能设计及特点[J]. 烧结球团，2019，44(4)：50－55.

[6] 崔永新，康兴东，朱佳星. 综合原料场环保节能技术应用探讨[J]. 工程建设，2017，49(6)：92－94.

[7] 陈铁军，周仙霖，罗艳红，等. 现代烧结造块理论与工艺[M]. 北京：冶金工业出版社，2018：149－153.

[8] 康兴东，邱实，郭鹏. 智能环保原料场设计[J]. 工程建设，2019，51(6)：4－6.

[9] 林逸，汪杰，但伟. 应用BIM技术实现大跨度原料大棚的设计施工一体化[J]. 钢结构，2017，32(224)：113－117.

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