水泥窑炉湍流团聚超低排放技术与应用

张保龙[1]，刘鹤欣[2]，杨富鑫[2]，谭厚章[2]，陈立新[3]，张永谋[3]
（1.金刚(集团)白山水泥有限公司，吉林　白山　134309；2.西安交通大学，陕西　西安　710049；3.北京汉能清源科技有限公司，北京　100070）

摘要：水泥行业开展超低排放改造已成为在“十四五”期间水泥工业绿色发展的必然趋势。采用湍流团聚技术与传统除尘设备相配合实现粉尘超低排放是一种经济可行的有效技术方案。安装团聚器前后，颗粒物排放浓度从5.62 mg/Nm^{3}降低至3.47 mg/Nm^3。同时，窑头篦冷机扬尘收集可提高熟料产量10.4 t/d。该公司使用团聚器—布袋除尘器系统实现颗粒排放浓度低于5 mg/Nm^3，既实现颗粒物超低排放，又提高颗粒资源化利用率，具有良好的环境生态效益和经济效益。

关键词：超低排放；水泥窑炉；湍流团聚；团聚器；布袋除尘器

中图分类号：TQ172.9　**文献标识码：**B　**文章编号：**1002-9877(2021)09-0023-03　**DOI：**10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2021.09.007

0　引言

水泥窑炉作为一种典型高能耗高排放的燃煤工业窑炉，其所排放的颗粒物等大气污染物是国家生态环境保护部门严格规范管控与改造治理的重点对象。进入“十四五”期间，随着电力、钢铁等行业陆续完成超低排放改造，水泥行业的超低排放也亟待开展，以期使有组织排放实现颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放控制在10 mg/Nm^3、35 mg/Nm^{3}和50 mg/Nm^{3}范围之内。随着环保意识增强及国家环保管控强化，水泥窑炉颗粒物的排放限值将进一步降低并优化，水泥行业在“十四五”期间积极开展超低排放改造已成为水泥工业绿色发展的必然趋势[1]。

水泥窑炉颗粒物，是指来源于水泥熟料及水泥烧成加工过程中排放至空气中的液体或固态悬浮物，其中空气动力学直径≤10 μm、≤2.5 μm和≤1 μm的颗粒物也被称之为PM_{10}、$PM_{2.5}$和PM_1。颗粒物中，$PM_{2.5}$和PM_1等微细颗粒物通常富集有痕量金属和有机污染物，可经呼吸系统后进入心、肺、血液等部位，对人体健康造成严重危害[2]。

目前，水泥窑炉颗粒物的脱除与控制主要采用脉冲袋式除尘器，总脱除效率可达99.99%，其中对$PM_{2.5}$和PM_1的微细颗粒物脱除效率可达97%~99%，颗粒排放浓度可降低至10~15 mg/Nm^3。传统布袋除尘器因为对不同粒径颗粒的捕获机理不同，而存在难以脱除0.1~1 μm范围内颗粒的情况，该粒径范围被称为穿透窗口，是造成布袋除尘器对微细颗粒物脱除效率较低的主要原因。

湍流团聚技术是一种能有效解决微细颗粒物难以捕获脱除的烟气预处理增强技术手段，其通过在传统除尘器设备前端加装扰流元件，促使颗粒碰撞并团聚黏附，以实现微细颗粒物的脱除及颗粒排放浓度降低[3]。本文以某水泥厂安装湍流团聚装置为典型案例，为水泥行业实现颗粒物超低排放提供技术参考。

1　颗粒团聚除尘方案及采样测试

1.1　水泥窑炉概况

中国建材集团北方水泥有限公司某水泥公司现有一条4 000 t/d新型干法水泥熟料生产线。2017年错峰生产期间，该公司实施了将原第三代篦冷机升级改造为第四代篦冷机，并重新优化配置篦冷机冷却风机，改造后出篦冷机熟料温度降低，熟料结粒状况得到改善。此外，由于出篦冷机熟料在辊压机与输运皮带之间存在较大落差，为提高颗粒资源化利用率及避免粉尘逸散，在该位置处加装一台低压脉冲布袋除尘装置。同时，为进一步降低颗粒物排放，在该布袋除尘器前端加装湍流团聚装置，并进行颗粒物浓度测试。

1.2　湍流团聚原理

湍流团聚原理如图1所示。团聚器中按一定的形状、尺寸、间距、数量、排列方式等布置有一系列扰流元件。携带颗粒的气流经过扰流元件后，在尾流区域将产生不同尺度的漩涡。由于不同粒径颗粒所具有的颗粒惯性不同，气流携带时将使颗粒之间产生速度差以及横向速度，同时微细颗粒受布朗运动

基金项目：国家重点研发计划课题《工业炉窑气固排放物质的高效分离与洁净利用技术研发与工业示范》(2016YFB0601504)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

影响较大，进而颗粒发生碰撞而使微细颗粒聚集或黏附于大粒径颗粒表面。团聚后的颗粒再经过传统布袋除尘器进行脱除，进而实现微细颗粒脱除以及颗粒排放浓度降低的效果。

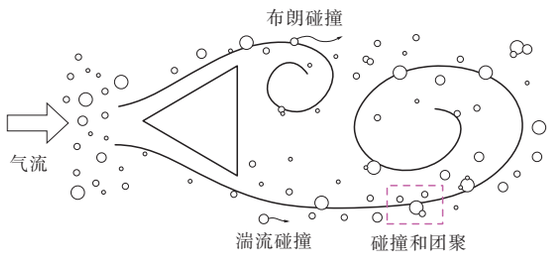

图1　湍流团聚原理示意

水泥窑炉中在窑头篦冷机破碎机处实际安装的湍流团聚器与布袋除尘器如图2所示。进口管道自熟料斜拉链处沿竖直方向从下至上，依次经过团聚器、布袋除尘器和离心风机，最后排放至大气。团聚器内扰流元件按一定规则排布，布袋除尘器灰斗熟料颗粒经收集后汇集到熟料库中。团聚器进口处测量得到烟气量为11 400 m^3/h，烟气温度为118 ℃，烟气流速为7.8 m/s。

图2　湍流团聚器与布袋除尘器系统现场照片

1.3　采样测试系统

实验选取团聚器前、团聚器后、布袋除尘器后三个采样点进行颗粒物浓度采样测试。实验采用《火电厂烟气中细颗粒物($PM_{2.5}$)测试技术规范重量法》(DL/T 1520—2016)以及《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397—2007)进行指导。颗粒采样测试系统如图3所示。采样测试系统主要由PM_{10}切割器、低压撞击器(DLPI)、数字压力表、干燥器及真空泵组成。该采样系统核心部件为低压撞击器(DLPI)，为芬兰Dekati公司生产，可以测量28 nm~10 μm范围内13级颗粒的质量浓度。每级颗粒物通过铝箔进行采集，铝箔上涂有溶于四氯化碳的Apiezon–H硅脂用于捕集颗粒物。取样后的颗粒物通过精度为0.001 mg的精密电子天平(型号M2P，德国赛多利斯公司)进行测量。为保证数据的有效性，每组数据在相同工况下测试三次取平均值。

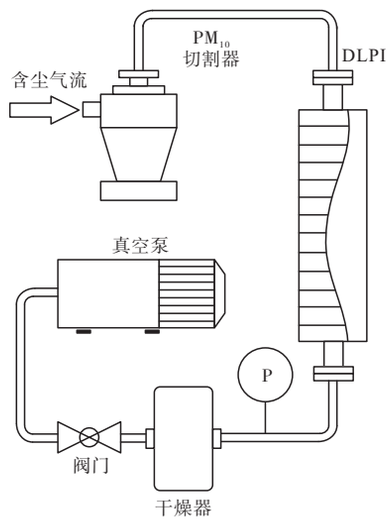

图3　颗粒物低压撞击器(DLPI)取样测试系统

2　结果与讨论

2.1　颗粒排放特征与质量浓度

采集总尘来确定管道进口颗粒浓度以及颗粒物排放浓度，结果如表1所示。可以看出，团聚器可以强化布袋除尘器脱除颗粒物，有效降低了颗粒物的排放浓度。

表1　团聚器安装前后颗粒物排放值

管道进口颗粒浓度/(g/Nm³)	团聚器进出口压差/Pa	安装团聚器前排放浓度/(mg/Nm³)	安装团聚器后排放浓度/(mg/Nm³)
37.9	130	5.62	3.47

测试实验中，对团聚器安装后PM_{10}、$PM_{2.5}$和PM_1颗粒浓度进行采样分析，得到结果如表2所示。可以看出，PM_{10}颗粒物在排放颗粒物中占据主要成分，同时微细颗粒物PM_1在团聚器进口处比例较低，但在排放颗粒中也占据较大份额。

表2　团聚器安装后PM_{10}、$PM_{2.5}$和PM_1浓度变化

mg/Nm³

位置	PM_{10}颗粒浓度	$PM_{2.5}$颗粒浓度	PM_1颗粒浓度
团聚器进口	699.03	275.23	35.48
团聚器出口	567.94	222.99	28.65
布袋除尘器出口	3.25	2.92	2.54

2.2　颗粒分级粒径分布及脱除效率

采用DLPI对团聚器前后PM_{10}颗粒物分级粒径分布进行采样测试，结果如图4所示。可以看出，PM_{10}中粒径1~6 μm颗粒占据主要成分，微细颗粒PM_1比

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

例较低。同时，经过团聚器后，PM_{10}颗粒粒径分布发生变化，粒径10 μm附近颗粒具有略微增长，表明团聚器使小粒径颗粒浓度降低而使大粒径颗粒浓度略微增加。

本文采用标准化质量浓度格式描述分级粒径颗粒的浓度分布，计算公式为：

$$\mathrm{d}m/\mathrm{d}\log D_{\mathrm{p}} = \frac{c_i}{\log\left(D_{\mathrm{p},\,i+1}/D_{\mathrm{p},\,i}\right)} \tag{1}$$

式中：

c_i——第i级撞击器所采集颗粒质量浓度，mg/Nm^3；

$D_{\mathrm{p},\,i}$——第i级撞击器对应颗粒粒径，m；

$D_{\mathrm{p},\,i+1}$——第i+1级撞击器对应颗粒粒径，m；第14级撞击器粒径为50 μm。

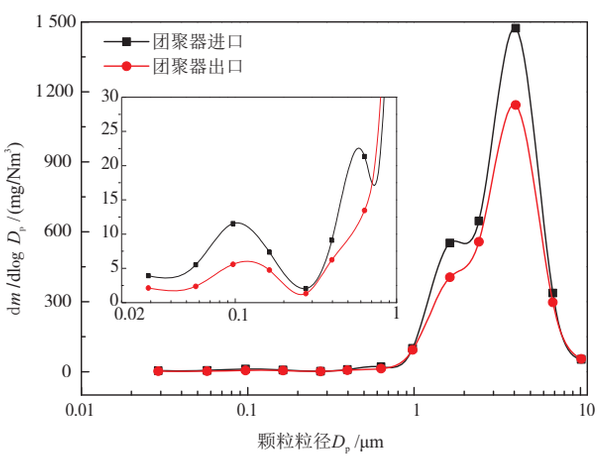

图4　团聚器前后PM_{10}颗粒粒径分布

图5为布袋除尘器出口排放PM_{10}粒径分布，图6为团聚器–布袋除尘器系统的整体脱除效率。可以看出，0.1~1 μm范围具有较低脱除效率，即布袋除尘器穿透窗口的存在造成该粒径范围颗粒逃逸较多。该水泥厂采用团聚器安装于布袋除尘器之前，一定程度上有效缓解了布袋除尘器穿透窗口的作用，可以使微细颗粒物的脱除效率具有一定程度的提升。

2.3　团聚除尘系统资源化利用

水泥生产过程中，为避免熟料从辊压机落入输运皮带时产生大量扬尘，采用团聚器–布袋除尘器收集颗粒物，使无组织排放变为合理可控的有组织排放，同时收集的熟料颗粒可增加熟料产量，提高资源化利用率。

基于上述运行参数，选取进口颗粒浓度及烟气量计算，可以得到颗粒物收集量。计算表明，在该4 000 t/d水泥窑炉中，团聚器–布袋除尘器系统可收集熟料颗粒10.4 t/d，可有效提高熟料产量。

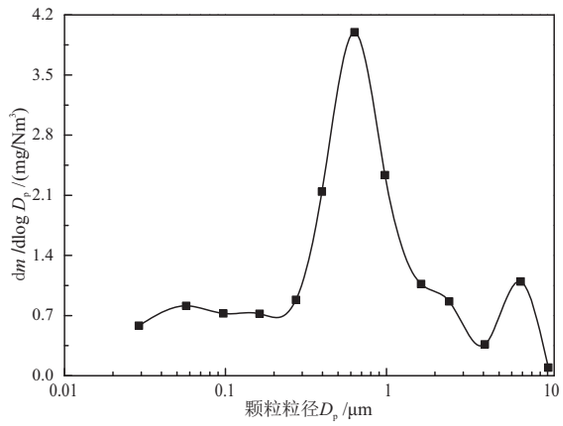

图5　布袋除尘器出口PM_{10}颗粒粒径分布

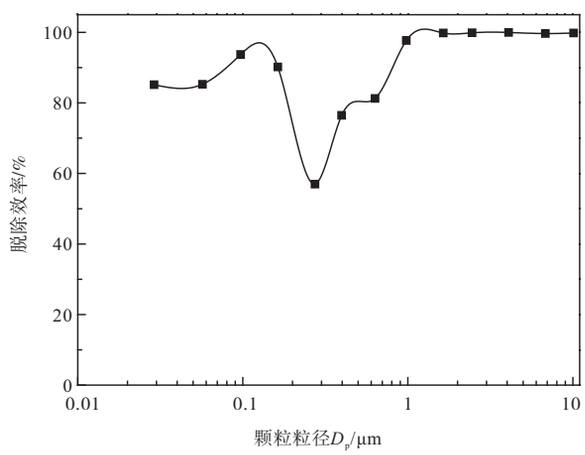

图6　团聚器进口与布袋除尘器出口的颗粒脱除效率

3　结论

采用颗粒团聚技术配合传统除尘设备的改造方案是现实可行的技术方案，可以有效降低颗粒物的排放浓度，尤其降低微细颗粒物的排放浓度。本文案例中，水泥窑炉安装团聚器后，颗粒物排放浓度从5.62 mg/Nm^{3}降低至3.47 mg/Nm^3，进而实现颗粒排放浓度低于5 mg/Nm^{3}的排放目标。同时，窑头篦冷机扬尘收集可提高熟料产量10.4 t/d。颗粒物的减排与利用，不仅是重要的环境保护问题，也与水泥生产过程相关。通过较低成本的改造方法实现超低排放，既有利于实现环境效益，也提高了熟料产量，进而创造经济效益。

参考文献：

[1]　李小明，林　勇. 水泥行业超低排放及烟气治理技术[J]. 水泥工程，2019(6)：70–72.

[2]　李颖芳. 浅谈水泥企业粉尘的危害[J]. 中国水泥，2020(12)：96–99.

[3]　章鹏飞，米建春，潘祖明. 装置元件排列间距和颗粒浓度对细颗粒湍流聚并的影响[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1625–1632.

（编辑　王新频）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net