

零基线高压脉冲荷电对过滤除尘的影响研究

刘海弟^{1,2,3}, 李伟曼¹, 陈运法^{1*}, 呼和涛力⁴, 邹永平⁵, 张 晖⁵, 冯家迪⁵

(1. 中国科学院 过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 绿色过程制造创新研究院, 北京 100190; 4. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510651;
5. 江苏省宜兴非金属化工机械厂有限公司, 江苏 宜兴 214221)

[摘要] 以多孔纤维陶瓷管为除尘介质, 研究了采用零基线高压脉冲进行粉尘预荷电的除尘过程, 分析了不同高压脉冲峰值对除尘的影响效果, 研究发现: 零基线高压脉冲的粉尘荷电方式可以促进微米级超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉尘的过滤去除, 然而对于纳米级的气相法白炭黑则作用并不明显, 本文从高压脉冲荷电机理特征的角度分析了以上现象的原因。根据研究结果, 对于粒度在微米级别的一般工业粉尘, 采用零基线高压脉冲荷电方式对粉尘进行预荷电是一种良好的除尘强化手段。

[关键词] 多孔纤维陶瓷管; 除尘; 脉冲荷电; 预荷电

[中图分类号] X773 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0001-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.001

除尘操作是能源、冶金、粉体制备、环境保护等诸多领域常见的工艺过程, 其中惯性除尘、湿法除尘、电除尘和过滤除尘等均存在大量的成熟工艺和广泛的工业应用^[1-2]。然而对于微细颗粒的去除, 过滤除尘和电/滤复合除尘是最可靠、最常见的方案选择^[3-4]。随着近年来对空气质量日益重视, 在烟气中细颗粒物的去除方面产生了巨大的技术需求^[5], 稳定高效的深度除尘工艺成为除尘技术发展的重要方向。

过滤除尘和电/滤复合除尘都使用过滤介质(如布袋、陶瓷管、金属滤筒)完成气流中细颗粒的最终去除, 虽然可以保证极低的出口粉尘浓度, 但当烟气粉尘微细或尘浓较大时必须频繁反吹再生, 这对于过滤介质的稳定性和使用寿命产生巨大挑战。本研究团队曾经采用直流高压静电对粉尘进行预荷

电, 发现可以极大降低陶瓷管表面粉饼的气流压降, 原因在于粉尘荷载相同电荷后发生静电相斥, 使粉饼层疏松多孔, 从而大大延长陶瓷管的反吹周期^[6]。然而, 使用直流静电的预荷电器在对有色冶金烟气的粉尘进行荷电时遇到明显的技术难题: 当粉尘颗粒非常细小($< 1 \sim 2 \mu\text{m}$)时, 粉尘的荷电机理从电场荷电过渡到扩散荷电, 导致大量粉尘荷载与高压电晕极相反的电荷, 这些粉尘将快速向电晕极移动并造成严重的积污。为了解决这一难题, 本团队尝试采用内部具有清洁气流保护的高压荷电喷枪来完成粉尘荷电, 研究发现该技术方案也显著降低了白炭黑粉饼层的气流压降^[7], 但该技术方案难以在风量巨大的工业除尘装置中使用, 因为设置数量众多的荷电喷嘴是不切实际的。

经广泛调研和深入思考, 本团队提出使用零基线的高压脉冲电源对粉尘进行荷电的新方法, 具有两点优势: (1) 高压脉冲可以达到极高的电压峰值并不会发生直流高压常见的放电击穿问题; (2) 高压脉冲峰值之间电压归零, 避免了荷载相反电荷的粉尘向高压电晕极表面移动, 从而保护电晕极不被微细的粘性粉尘沾污。本研究中使用超细氢氧化铝和气相法白炭黑为目标粉体, 采用多孔纤维陶瓷管为除尘介质, 考察了不同零基线高压脉冲荷电参数对除尘过程压降和流量衰减的影响, 研究发现对于

[收稿日期] 2023-01-26

[作者简介] 刘海弟(1976—), 男, 陕西杨凌人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事环境净化技术研究工作。

[基金项目] 中国科学院绿色过程制造创新研究院自主部署项目(IAGM2022D09); 中国科学院先导专项 A (No. XDA21040401); 国家重点研发计划(No. 2020YFC1908902)资助项目

[引用格式] 刘海弟, 李伟曼, 陈运法, 等. 零基线高压脉冲荷电对过滤除尘的影响研究[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 1-6.

超细氢氧化铝而言,采用零基础高压脉冲进行粉尘荷电可以降低除尘压降并延缓流量衰减,而对于气相法白炭黑而言,零基础高压脉冲并不能有效提高除尘效能,本团队从高压脉冲荷电机理的角度分析了上述现象的原因。

1 实验材料与装置

1.1 实验材料和实验装置

分别使用超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和气相法白炭黑为除尘实验目标粉体,超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 购自济南金盈泰化工有限公司,规格 8 000 目,气相法白炭黑购自 Evonic(赢创)公司,其牌号为 A200,两种粉体的电镜分析结果见后文。实验中使用的纤维陶瓷管由江苏省宜兴非金属化工机械厂有限公司制作,参数如下:长度 1.8 m,直径 8 cm,壁厚 1 cm,抗折强度 10 MPa,孔隙率 70%,主相材质为莫来石纤维。实验使用的除尘装置由苏州科林环保装备股份有限公司设计并加工制作,其结构图如图 1 所示,气流经喷粉枪喷入粉尘后自上而下进入垂直圆筒状预荷电器,其内部中心吊杆上设置 80 片芒刺片,芒刺尖端距离筒壁 100 mm,悬挂芒刺片的吊杆固定在圆筒上下的四个绝缘柱上,零基础的高压脉冲由 DMP-1 型烟尘调质等离子电源来实现(购自浙江大维高新技术股份有限公司),经粉尘荷电后的气流进入除尘器底部,经气流分布器后在除尘器内部的纤维陶瓷管表面进行粉尘过滤,除尘器中安置 80 根陶瓷管,过滤面积 36 m^2 。洁净气流经过引风机排空,采用微锥式流量计检测系统风量,同时使用压差计检测陶瓷管前后的过滤压降,以上数据经 PLC 采集存储并同时显示于现场操作面板。

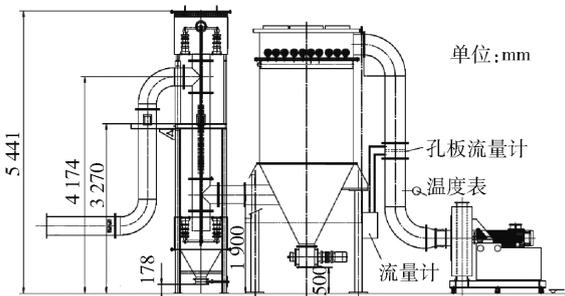


图 1 除尘实验装置简图

1.2 实验方法

实验中开启装置后端风机抽取环境空气,打开

预荷电器电源,选择相应的脉冲频率和导通角(导通角数值与脉冲峰值相关),脉宽 $10 \mu\text{s}$,称取 20 kg 超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$,使用自制喷粉枪雾化分散后喷入气流中模拟含尘烟气,实验时间 90 min 左右,实验中固定风机的变频器频率,初始气体流量 $3\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,初始气布比为 $1.4 \text{ m}/\text{min}$,初始尘浓约 $4\,444 \text{ mg}/\text{m}^3$,随着粉尘不断在陶瓷管表面积累,陶瓷管过滤压降不断上升,装置的气体流量也不断下降,实验过程中每 30 s 采集一次陶瓷管前后气体压降和气体流量,最终通过除尘过程中的流量衰减和陶瓷管前后过滤压降上升来表征预荷电参数对除尘过程的影响。当使用白炭黑为目标粉体时,进粉量为 4 kg,进粉时间 47 min 左右,同样通过除尘过程中的流量衰减和陶瓷管前后压降上升来表征预荷电参数对除尘过程的影响。

2 实验结果与讨论

2.1 超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和白炭黑的透射电镜分析

实现中选择的超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的粒径小于 $1.3 \mu\text{m}$ (8000 目所对应的粒径),颗粒形貌为近似六方的片层状,这和文献报道的常见 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的形貌一致,一般而言,片层状颗粒堆叠形成的粉饼容易产生较大的气流阻力,其透射电镜照片如图 2 所示,其粒度明显小于常见的工业粉尘。实验中选择的气相法白炭黑的比表面 $200 \text{ m}^2/\text{g}$,一次粒子 12 nm 左右,堆积密度 $50 \text{ g}/\text{L}$,其透射电镜照片如图 3 所示(图中标尺 100 nm),可知其粒子非常微细均匀,是由 12~20 nm 左右的一次粒子团聚和搭接而成的超细团簇体,一般而言,过滤此类纳米粉体所形成的粉饼具有更大的气流阻力。

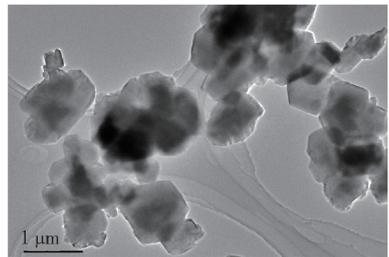


图 2 实验用超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的透射电镜照片

2.2 不同荷电条件下零基础高压脉冲荷电对超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的除尘效果

高压脉冲荷电过程中峰值电压为最关键的操作

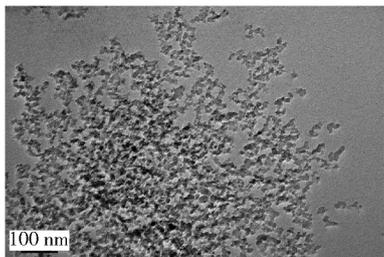
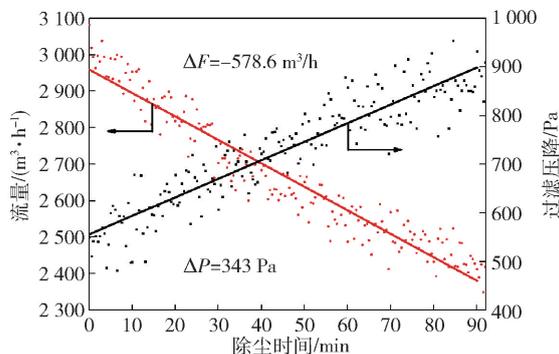
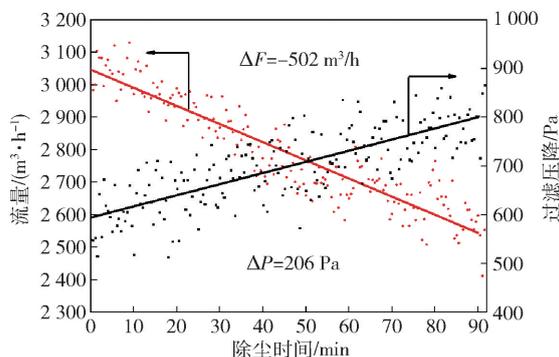


图3 实验用白炭黑粉体透射电镜照片

参数, DMP-1 型烟尘调质等离子电源通过设置导通角来调节高压脉冲的峰值, 同时所能达到的峰值电压也和工作电场的电容相关, 在本装置的容值条件下, 导通角设置为 200、400 和 600 时的脉冲峰值电压分别为 20 ~ 25 kV、40 ~ 44 kV、60 ~ 64 kV, 为了避免峰值电压过高而发生击穿事故, 实验中选择了导通角 200、400 和 600 三个参数进行研究(脉冲频率均选择 6 000 Hz)。图 4、图 5、图 6 和图 7 分别给出了不使用高压脉冲荷电、导通角 200、导通角 400 和导通角 600 四种情况下除尘过程的气体流量和过滤压降的变化情况, 一般而言, 除尘过程采集的气体流量和过滤压降数据波动巨大, 因此对所得到的数据点采用线性最小二乘拟合, 利用拟合式来估算除尘过程的流量衰减和压降上升数值, 图 4 ~ 图 7 中分别给出了相应条件下气体流量变化(ΔF)和过滤压降变化(ΔP)。

从图 4 可知, 在没有荷电参与的情况下, 随着除尘过程的进行和粉饼的增厚, 气体流量不断衰减、陶瓷管的过滤压降不断上升, 除尘过程结束时流量衰减了 $578.6 \text{ m}^3/\text{h}$, 而压降则上升了 343 Pa 。当采用频率 6 000 Hz、导通角 200(峰值电压 20 kV 左右)的脉冲条件进行粉尘预荷电时, 除尘过程的流量衰减略有降低($502 \text{ m}^3/\text{h}$), 过滤压降上升也降低至 206 Pa , 随着进一步提高导通角至 400(峰值电压 40 kV 左右), 除尘过程的流量衰减值降低至 $421 \text{ m}^3/\text{h}$ (为不荷电情况的 73%), 过滤压降上升量也降低至 196 Pa (为不荷电情况的 57%), 继续提高导通角至 600(峰值电压 60 kV 左右), 除尘过程的流量衰减继续降低至 $420.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 而过滤压降的上升量也降低至 155 Pa (为不荷电情况的 45%), 从以上结果可知, 脉冲峰值电压的提高可以明显降低除尘过程的流量衰减并降低过滤压降, 其原因很可能在于更高的峰值电压使粉尘荷电更加充分, 导致粉尘颗粒之间静电斥力增加, 使陶瓷管表面的粉饼层更加疏松, 从而

降低了过滤压降, 在风机频率不变的情况下较少了除尘过程的气体流量衰减, 这和直流高压对粉尘预荷电促进除尘过程的原理相似^[6-7]。从高压脉冲电源操作的角度看, 导通角 400 ~ 600(峰值电压 40 ~ 60 kV)是比较合理的操作范围, 更高的导通角条件下峰值电压达到 70 ~ 80 kV, 高压引线的安全风险有所提高。


 图4 不荷电条件下超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的除尘过程流量压降变化结果

 图5 高压脉冲导通角为 200 时超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的除尘过程流量压降变化结果 (峰值电压 $\approx 20 \text{ kV}$; 脉冲频率 6 000 Hz)

2.3 零基础高压脉冲对超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的荷电机理分析

以上研究摸索了较好的导通角范围, 在除尘器流量同时衰减的情况下, 零基础高压脉冲对粉尘荷电后除尘过滤压降大约下降到原来的 50% 左右, 而以往的研究结果^[6]指出, 在除尘器流量不变的情况下, 20 kV 的直流高压荷电可以使堇青石粉饼($D_{90} = 14.4 \mu\text{m}$)的压降上降低至原来的 30% 左右, 为何仅 20 kV 的直流电压荷电获得的除尘效果明显好于本实验中 40 ~ 60 kV 的零基础脉冲荷电所获得的除尘效果? 这需从零基础高压脉冲荷电的

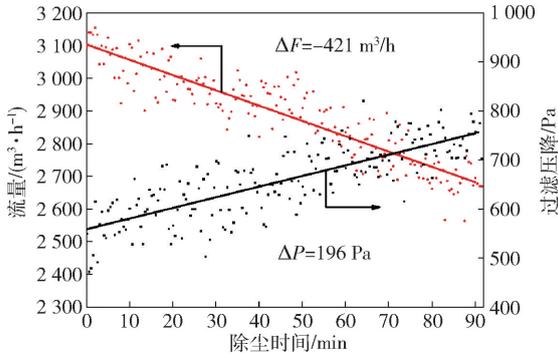


图 6 高压脉冲导通角为 400 时超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的除尘过程流量压降变化结果 (峰值电压 $\approx 40 \text{ kV}$; 脉冲频率 6 000 Hz)

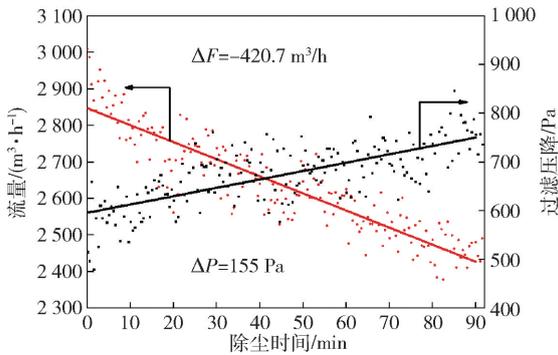


图 7 高压脉冲导通角为 600 时超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体的除尘过程流量压降变化结果 (峰值电压 $\approx 60 \text{ kV}$; 脉冲频率 6 000 Hz)

过程机理进行分析: 在本实验中所使用的超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的平均粒径小于 $1.3 \mu\text{m}$, 明显小于文献^[6]中使用的堇青石粉体粒径, 其荷电机理从常见的电场荷电过渡到了扩散荷电与电场荷电并存。

如图 8 所示: 放电脉冲在 A、B 两个时间点中间, 脉冲间隔的无电场区间在 B 点和 C 点之间, 脉冲高压可使电子获得 $5 \sim 20 \text{ eV}$ 的高能量, 从而使气体分子发生电离而产生高能自由电子和带正电的气体离子。但由于高能自由电子在电场中的迁移速率比离子的迁移率高 $2 \sim 3$ 个数量级, 因此脉冲放电持续期内电子的荷电能力远远大于离子, 荷电过程主要体现为高能自由电子与颗粒物进行碰撞荷电, 可高效完成粉尘颗粒的荷电, 而离子基本保持不动^[8]。然而, 在脉冲放电结束后, 大量电子在阳极逸失, 此时空间内主要是正负离子, 而正离子的浓度比负离子高一个数量级^[9], 并且绝大部分残余负离子会在极短时间内被正离子复合, 因此空间内净电

荷体现为正电荷^[10-12]。因此在脉冲放电期外的无电压期间电场中主要发生以正离子通过扩散运动对颗粒物进行的扩散荷电, 而该过程会向粉尘颗粒荷载正电。当粉尘颗粒较大 ($> 2 \mu\text{m}$) 时, 脉冲区间外的正电荷很难通过扩散荷电向粉尘荷电。因此, 粉尘在脉冲区间内荷载的负电可以保留, 零基线高压脉冲对于粉尘荷电是有效的, 但本实验选择的超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的粒径为 $1.3 \mu\text{m}$, 其扩散荷电效益较为明显, 很可能在脉冲区间外发生了粉尘与正离子之间的扩散荷电, 导致一部分粉尘荷载的负电荷被中和损失, 因此该荷电过程对除尘的促进作用不如文献^[6]报道的结果突出。

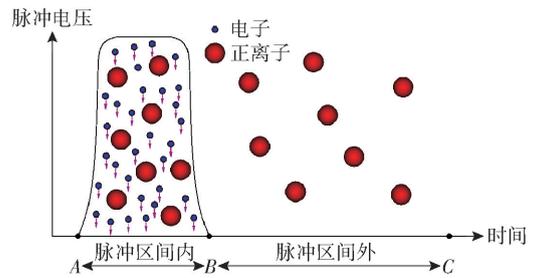


图 8 零基线高压脉冲荷电过程机理

基于以上分析, 笔者认为: 如果进一步减小粉尘粒径至纳米级, 其扩散荷电效应更加强烈, 那么很可能使用零基线高压脉冲不再能对粉尘进行荷电, 因为粉尘在脉冲区间内荷载的负电荷会在脉冲区间外被电场中剩余的正离子通过扩散荷电的方式消耗殆尽, 为了证明上述猜测, 本研究使用气相法白炭黑进行了除尘实验, 其结果如下。

2.4 零基线高压脉冲荷电对气相法白炭黑的除尘效果

以气相法白炭黑为目标粉尘的除尘实验结果如图 9 ~ 图 10 所示, 图 9 为不荷电条件下白炭黑的除尘过程的流量和压降变化曲线, 由于除尘过程压降上升和流量衰减都较大, 其线型表现出了二次曲线的样式, 因此曲线的采用最小二乘法按照二次曲线模式进行回归拟合, 使用所得的拟合曲线计算整个除尘过程的流量衰减和压降上升值。可知仅 4 kg 白炭黑可以使除尘器压降上升 671 Pa , 而流量衰减则高达 $985.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 说明纳米级的白炭黑粉饼过滤压降很大。同时可以看到: 此时流量下降曲线为下凹曲线 (二次导数为正); 压降上升曲线为上凸曲线 (二次导数为负), 和很可能是固定了风机频率同时

粉饼比较疏松的结果。

同样采用 6 000 Hz、600 导通角(脉冲峰值 ≈ 60 kV)的高压脉冲荷电条件对白炭黑进行荷电,其除尘结果如图 10 所示,可知荷电操作并没有明显提高除尘效能,除尘器流量衰减为 $801.7 \text{ m}^3/\text{h}$,相比于未荷电情况仅减少了 20% 左右,而压降上升值为 641 Pa,相比于未荷电情况仅降低 4.5%,虽然流量衰减和压降上升都略微小于不荷电的情况,但是其流量和压降的变化曲线形状发生了翻转,其流量下降曲线为上凸曲线(二次导数为负);压降上升曲线为下凹曲线(二次导数为正),可以预见,如果随着除尘时间继续延长白炭黑粉饼厚度不断增加,对粉尘荷电后反而会导致相比不荷电情况更大的流量衰减和压降上升,换言之,从长时间除尘角度来看,用零基础高压脉冲对白炭黑进行预荷电反而导致除尘效果恶化。

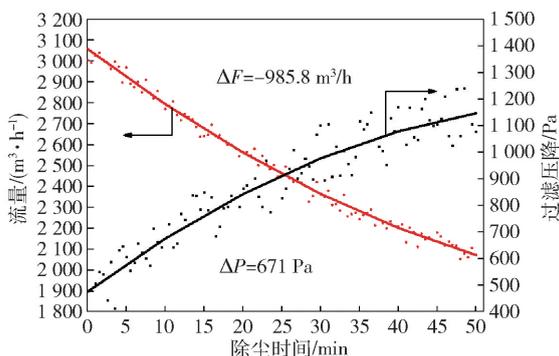


图 9 不荷电条件下白炭黑粉体的除尘过程流量压降变化结果

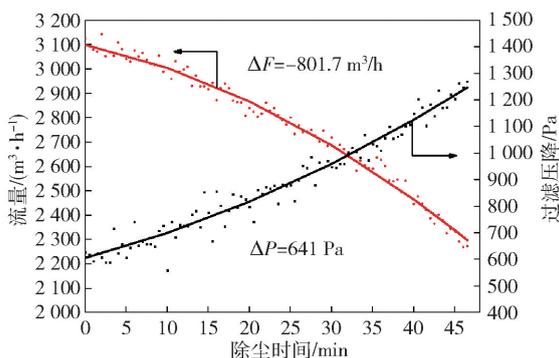


图 10 高压脉冲导通角为 600 时白炭黑粉体的除尘过程流量压降变化结果
(峰值电压 ≈ 60 kV;脉冲频率 6 000 Hz)

从上面荷电前后流量、压降曲线凹凸性改变的结果推断,很可能荷电操作反而导致白炭黑粉饼更

加致密,从而使粉饼层的压降表现出二次曲线形式的快速上升,那么为什么高压脉冲反而导致白炭黑粉饼层更加致密呢?这很可能也可以从 2.3 的高压脉冲的荷电机理找到原因:前文提到在脉冲区间内,管中心芒刺片上的高压正电导致电子剧烈的链式激发并快速向芒刺片移动,而正离子几乎不动,这期间大量白炭黑颗粒因为电子的移动而被荷载负电,但也有一些颗粒因为扩散而被荷载了正电,而在脉冲区间外,空间内仅剩余正离子,而这部分正离子通过扩散荷电向白炭黑颗粒荷载正电,这些正电性白炭黑颗粒会与在脉冲区间内被荷载负电的颗粒发生静电凝并,从而提高了颗粒间的团聚力和紧密度,虽然团聚后的颗粒更容易被惯性收尘装置收集,但对于通过过滤作用收尘的纤维陶瓷管而言,这明显提高了粉饼的密实程度,因此在短时间内其除尘效果没有明显促进,长时间内其除尘效果反而恶化,以上实验现象间接的证明了 2.3 机理分析的正确性。

3 结语

采用多孔纤维陶瓷管为过滤介质,研究了零基础高压脉冲荷电方式对超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和气相法白炭黑两种不同粒径颗粒的过滤除尘性能影响,研究发现对于粒径小于 $1.3 \mu\text{m}$ 的超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体,零基础高压脉冲荷电可以明显提高粉尘的过滤除尘效果,荷电后相同进粉量条件下除尘器流量衰减值和压降上升值均降低。然而零基础高压脉冲荷电对于纳米级($\approx 12 \text{ nm}$)白炭黑粉体的过滤去除并没有表现出明显的促进作用,甚至随着粉饼不断增厚过滤效果反而可能更差。本文从分析零基础高压脉冲荷电机理的角度解释了该实验现象,其原因可能在于:纳米级白炭黑颗粒的扩散荷电效益非常明显,虽然在脉冲区间内可以荷载一些负电荷,而在脉冲区间外则因为残余正离子的扩散荷电而使颗粒荷载正电荷,荷载正负电荷的白炭黑颗粒会发生静电凝并形成更加紧密的团粒,从而提高了陶瓷管表面粉饼的致密度,因此白炭黑的过滤除尘效果反而随着粉饼层增厚而劣化。而超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体粒径相对较大,扩散荷电的效果相对较弱,因此在脉冲区间外不容易被残余正离子荷载正电,其脉冲荷电区间内荷载的负电荷可以更多的保留,导致所形成的粉饼增因为静电斥力而更加疏松,因此其过滤除尘效果因为有所提高。根据本研究的结果可知:对于粒径

在微米级的常见工业粉尘,零基线高压脉冲荷电可以有效提高其过滤收尘效果。

[参考文献]

- [1] 金国森. 除尘设备设计[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1985.
- [2] 向晓东. 现代除尘理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [3] 胡鉴仲,隋鹏程. 袋式收尘器手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1984.
- [4] 安钢,张仲新,范文忠,等. 高炉煤气采用净煤气脉冲布袋除尘技术的应用[J]. 冶金能源, 2006, 25 (1): 48 - 51.
- [5] 陈运法,朱廷钰,程杰,等. 关于大气污染控制技术的几点思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28 (3): 364 - 370.
- [6] 刘海弟,李伟曼,陈运法,等. 粉尘预荷电与荷高压导

电多孔陶瓷管耦合的除尘新技术研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(10): 6 - 11.

- [7] 刘海弟,李伟曼,陈运法,等. 陶瓷管耦合粉尘荷电技术去除白炭黑的研究[J]. 环境影响评价, 2021, 43 (4):63 - 66.
- [8] 江建平, 细颗粒物脉冲荷电机理及凝并脱除方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [9] 阎克平,赵君科,夏连胜. 静电基础及其应用技术[M]. 大连:大连理工大学出版社,1996.
- [10] 赵志斌,刘建民,吴彦,等. 脉冲放电粒子荷电机理的研究[J]. 环境科学学报,1999,19(2):113 - 119.
- [11] 姜雨泽. 脉冲放电烟气脱硫、除尘及产物收集相结合的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2000.
- [12] 骆仲泮,江建平,赵磊,等. 不同电场中细颗粒物的荷电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(23): 3959 - 3969.

Research on the Influences of Dust Pre-charging with Zero-baselined High Voltage Pulse Upon the Dust Filtration

LIU Hai-di, LI Wei-man, CHEN Yun-fa, HU HE Tao-li,
ZOU Yong-ping, ZHANG Hui, FENG Jia-di

Abstract: With the porous fibrous ceramic tube used as filtration medium, the dust-removal process using zero-baselined high voltage pulse as dust pre-charging means was investigated. The influence of maxima of high voltage pulse upon the dust-removal results was analyzed. It is revealed by the results: zero-baselined high voltage pulse could benefit the filtration of $Al(OH)_3$ dust with size in micrometer scale, however, it exhibits weak influences upon nano-scaled fumed silica. In this paper, we analyzed the cause of the phenomenon mentioned above in the perspective of charging mechanism of high voltage pulse. It could be concluded from the results that: as for the normal industrial micro-meter scaled powder, pre-charging dusts with zero-baselined high voltage pulse is a very effective promoting tactic for dust removal.

Key words: Porous fibrous ceramic tube; Dust-removal; Pulse charging; Pre-charging

