时域极化调控下介质集尘板捕获细颗粒物的理论与实验研究

田俊梅[1]，李一昉[1]， 陈润楠[2]， 李梦飞[1]，张津华[3]
1. 电力与建筑学院，山西大学，太原，山西，中国。
2. 电气工程学院，北京交通大学，北京，中国。
3. 山西瑞光热电有限责任公司（山西国际能源集团子公司），晋中，山西，中国。

摘要
为了降低湿式静电除尘器（WESP）除尘室中央区域的颗粒逃逸风险，需要在电极附近构建更强的空间电场。因此，本文提出一种基于电介质极化弛豫效应调控除尘室电场分布的方法。首先，我们探究了介电材料在极低频双极电源下的弛豫特性协同调控机制，分析了该机制下介电材料吸附灰尘时对空间电场的增强效应。其次，构建传统与改进 WESP 除尘室仿真模型，得到了双极性电源配置对电介质弛豫时间和其产生的空间电场的调制规律。最后，搭建实验平台，验证极性颗粒的介电弛豫动态响应，并获得两种配置下的除尘效率及出口粒径分布。结果表明，在电源最优配置下，除尘室电场强度显著增强（约提升两倍），总除尘效率较传统装置提升 24.7%。以真实粉煤灰为样本，对 45μm 以下细颗粒物总体去除率提升 35.3%。该方法通过电介质弛豫与双极性电源的协同作用强化电场，为提升 WESP 细颗粒捕集性能提供了有效技术方案。
关键词：湿式静电除尘器；电介质极化弛豫；双极性电源；细颗粒物捕集

1 引言

大气污染问题日益突出，细颗粒物主要源于钢铁、冶金、燃煤电厂及化工等重工业生产过程[1-4]，细颗粒物高效脱除是工业污染治理的关键任务。

在众多废气治理技术中，WESP 凭借高除尘效率、低能耗的优势被广泛应用[5]。然而，传统 WESP 的集尘板附近的大量荷电灰尘会在集尘极附近产生与电极相反的电场[6]。这种削弱电场直接影响除尘腔内粒子运动速度，增加了除尘室中央区域颗粒逃逸的风险 [7]。因此改善空间电场是提升细颗粒物脱除效率的关键[8]

为提升静电除尘器腔内电场强度及细颗粒物捕集性能，众多学者从集尘极结构、材料及电源配置等方面展开深入研究。

在集尘板的结构与材料方面，为了提高除尘室中的空间电场， Xu[9-11] 等通过改变电极形状和提高电极电压，提高空气的电离程度。由于极板间距和绝缘水平的影响，电压不宜过高，限制了电场强度的进一步提高。Ning 等[12-14]将集尘板结构改进为凹凸形，或在放电极处采用介质阻挡放电（DBD）[15, 16]，均可产生非常局部的畸变电场[17]，但对除尘腔内电场提升不明显。除此之外，David J.Bayless 等[18-20]将导电集尘板改为电介质材料，使水膜均布提升了放电极与集尘极之间的电场均匀性。但其电场没有突破当集尘板良好接地时原有放电极自身可以产生的最大电场。为进一步提升除尘腔整体的电场强度上限，我们需要探索新的技术思路。

电源配置优化上，不同频率的电源产生不同特征的电场，促进了荷电颗粒的运动。N. Jidenko 等[21-23]发现粒子平均速度随高压频率的增加而增加。还有一些研究表明，低频交流高压激发的基于介质阻挡放电的静电除尘器在收集亚微米颗粒方面具有巨大的潜力[24-27]。然而，由于除尘室空间电场由电源电场和灰尘附加电场共同产生，因此电源极性改变时空间电场可能加强或削弱，影响颗粒的捕集效率。由此可见，如果可以配置电源频率，一方面在一定程度上增加灰尘的荷电量，另一方面可以利用荷电灰尘产生更强的空间电场 [28]提升除尘器对细颗粒物的脱除效率。

综上，为调控除尘室内的空间电场减少细颗粒逃逸，仅仅通过材料或电源频率单方面的调控对电场提高和除尘效率的提升是有限的。因此，本文提出一种基于电介质极化弛豫效应调控除尘室电场分布的方法。通过对比分析不同电压上升时间下的电介质材料的弛豫时间和除尘室电场强度，最终确定了双极性电源配置对电介质弛豫时间和其产生的空间电场的调制规律，得到了更大的空间电场。最终，我们将集尘板上荷电灰尘产生的削弱电场作用转化为电场增强作用，有效提升细颗粒整体脱除效率。

本文其他部分的结构如下：第 2 节中，我们运用数值模型和仿真计算探究了电介质集尘板的时域弛豫特性和空间电场叠加效应。接着运用 COMSOL Multiphysics 搭建了改进 WESP 模型，得到粉尘颗粒在叠加空间电场下的运动轨迹。第 3 节中， 我们搭建了实验平台，验证了极性颗粒的介电弛豫动态响应，测量了相同电

压下传统和改进湿式静电除尘器的工作效率和灰尘粒径。最后一节对全文进行讨论与总结。

2 机制分析与理论建模

为提升除尘室内空间电场强度，本研究首先分析介质集尘板的极化弛豫特性。接着，对比分析传统湿式静电除尘器(CWESP)与改进湿式静电除尘器 WESP(RWESP)的电场分布差异。最终，通过仿真明确了介质材料在电场作用下的弛豫时间及极化强度，得到了适合材料弛豫时间的最佳电源配置。

2.1 介质集尘板时域弛豫特性

集尘板采用电介质材料，借助其在外电场变化下的弛豫效应，促使荷电颗粒与极化电荷协同参与空间电场构建。具体而言，当外电场消失或极性反转时，电介质内部偶极子不会随外电场立即恢复原位或反向排列，而是在弛豫时间内维持原有极性与电荷强度；因此，该时间段内集尘板表面极化电荷产生的电场方向保持稳定，能够持续吸引荷电颗粒。这样，荷电颗粒产生的电场就有可能与反转电极后的电源电场方向一致，产生增强效应。为了获得电介质集尘板在外电源变化时产生的电场特性，我们首先分析介质弛豫的时域特征。

当物质被视为一个连续介质时，电介质材料中的电位移强度 $\boldsymbol{D}$ 定义为电场强度 $\boldsymbol{E}$ 与电极化强度 $\boldsymbol{P}$ 的组合，即：物质内的电场是电极化强度的直接结果[29]。电介质材料的电位移强度为：

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon_0\boldsymbol{E}+\boldsymbol{P} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 为介质极化强度，$\boldsymbol{E}$ 为介质电场强度。对于均匀各向同性介质，矢量 $\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{P}$ 方向相同。ε_0 为真空介电常数。

在外加电场突然变化的情况下，极化不再与场强成正比，而是取决于考虑介质极化 $\boldsymbol{P}$ 在时刻 t 之前所有时刻的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 值[30]。在之前的研究中[31]，考虑空间电荷影响的介质极化随时间的变化规律如式(2)所示：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}(t)=&k(\varepsilon_0(\varepsilon_\infty-1)\boldsymbol{E}(t)+\varepsilon_0\int_0^t A_D(m,n,\omega_p)(\omega_p(t-\tau))^{-n}\\&\times\exp(-\omega_p(t-\tau))\,{}_1F_1(1-m;2-n;\omega_p(t-\tau))\boldsymbol{E}(\tau)\mathrm{d}\tau)\end{aligned} \tag{2}$$

其中，k 如式(3)所示，根据电源频率选取 0~1 之间的值，反映了空间电荷对弛豫的削弱效应。ε_∞ 为光频介电常数，ε_s 为静态介电常数。

$$k=\begin{cases}1 & \text{Unipolar DC power}\\ \dfrac{\varepsilon_\infty+\varepsilon_s}{2\varepsilon_s} & \text{Bipolar DC power}\end{cases} \tag{3}$$

$A_D(m,n,\omega_p)$ 为待确定函数，如式(4)所示。

$$A_D(m,n,\omega_p)=\omega_p\frac{\Gamma(1+m-n)}{\Gamma(m)\Gamma(1-n)\Gamma(2-n)} \tag{4}$$

其中，m 表示偶极子簇间运动相关系数，n 表示偶极子簇内运动的相关系数。ω_p 为损耗峰频率，${}_1F_1$ 为合流超几何函数。对于不同介质材料，并纳入空间电荷的影响，m，n 在 0~1 之间内取值。

在单极性外电源作用下，极化电场本身是削弱外电场的[32]。并且，根据公式(2)可知，介质的极化将滞后于外电场的变化。在这期间，原有极化电场方向仍维持，集尘板可继续吸附带电颗粒。同时，集尘板表面的荷电灰尘产生的附加电场与反转后的外电场同向，叠加后增强空间总电场。因此，为了能够利用弛豫效应对除尘室内空间电场的增强，关键在于选择合适的电极反转时间和集尘板材料。基于二者良好的配合，可以利用电介质的弛豫特性增强对荷电颗粒的吸附几率，改善除尘室内的空间电场分布。

2.2 配置介质集尘板前后除尘室空间电场

为了比较集尘板上的荷电颗粒在构建空间电场中的作用，我们分析了除尘室横截面为正六边形的传统和改进湿式除尘器的空间电场。

传统的湿式静电除尘一般采用单一负极性电源和平板导电集尘板。荷电颗粒在吸附到集尘板水膜上后随着水流进入灰斗，不再显电性。因此，上述传统湿式静电除尘中空间电场可近似认为由电极和在不同位置的荷电颗粒产生的电场叠加而成。

将集尘板改进为凹凸结构的电介质材料后，凹槽处导流循环水。施加外电压时，凸起部分介质极化产生的电场可促进除尘室内荷电颗粒黏附并团聚于集尘板上。与此同时，凸起结构的改变了集尘板附近的局部流体特性导致近壁区域流速降低、局部压差增大。这种流体动力学的变化进一步增强了颗粒在凸起区域的沉积稳定性，有利于在集尘板表面形成稳定的荷电粉尘层，从而为后续电源反转时的电场增强提供了有利条件。

首先，我们研究了放电极外加电压在空间中产生的电场 $\boldsymbol{E}_1$。当不考虑荷电颗粒对空间电场影响时，将除尘室简化为圆柱形。并且，集尘板采用凹凸结构与平板结构相比，势必增加了局部电场畸变。但由于集尘板采用介质材料，局部电场畸变有限。因此，简化分析 $\boldsymbol{E}_1$ 与 U 关系为：

$$\boldsymbol{E}_1=\frac{U}{r\ln\frac{r_b}{r_a}}\boldsymbol{e}_r \tag{5}$$

其中，r_a 是放电极半径。r 是除尘室内任一点与放电极之间的距离。r_b 是集尘板距放电极中心的距离。$\boldsymbol{e}_r$ 为电场强度单位矢量。

其次，我们分析了非常接近集尘板某一截面上的荷电颗粒在空间中产生的电场 $\boldsymbol{E}_2$。由于我们

选取的位置紧挨集尘板(但还没有接触集尘板)，因此仅讨论颗粒和放电极之间的电场。颗粒被吸附靠近集尘板时，在距离其 R 处产生的电场为[33]:

$$\boldsymbol{E}_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\iint_S \frac{\sigma}{R^2}\boldsymbol{e}_r dS \tag{6}$$

其中，σ是某一时刻荷电颗粒截面的面电荷密度。

接着，我们考虑了在除尘室中心的荷电颗粒在距离颗粒自身 r 处产生的电场 $\boldsymbol{E}_3$ [34]:

$$\boldsymbol{E}_3 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\boldsymbol{e}_r \tag{7}$$

其中，除尘器的运行中，颗粒的荷电量 Q 是决定除尘效率的关键因素之一。颗粒荷电方式分为电场荷电和扩散荷电。由于发电和供热行业废气中的颗粒物主要集中在 2 微米以上，在我们的模拟计算模型及实验中，所选用的颗粒粒径均大于 2μm。在这个粒径范围内只考虑电场荷电[35-37]，其直流电源下荷电的饱和电荷量为[38]：

$$Q_{\mathrm{DC}} = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r+2}\pi\varepsilon_0 d^2\left|\boldsymbol{E}_\Sigma\right| \tag{8}$$

式中：ε_r 和 d 分别为颗粒的相对介电常数和直径；$\boldsymbol{E}_\Sigma$ 表示颗粒在电场中所受电场强度的总和。

当放电极采用交流电源时，A. Zouaghi[36]等使用经验公式证明颗粒交流荷电量是频率的对数函数，即：

$$Q_{\mathrm{AC}}(f) = g(f)\cdot Q_{\mathrm{DC}} \tag{9}$$

其中，f是交流电源频率，$g(f)$ 为考虑频率影响的经验公式

$$g(f) = A\cdot\ln(1+\frac{f}{B}) \tag{10}$$

其中，A 和 B 为与 ESP 的几何形状和流动特性等有关的参数。$g(f)$ 只适合在交流条件下 $(f\neq 0)$ 使用，所以颗粒所带电荷量为：

$$Q = \begin{cases} \dfrac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r+2}\pi\varepsilon_0 d^2\left|\boldsymbol{E}_\Sigma\right| & f=0 \\ A\cdot\ln(1+\dfrac{f}{B})\cdot\dfrac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r+2}\pi\varepsilon_0 d^2\left|\boldsymbol{E}_\Sigma\right| & f\neq 0 \end{cases} \tag{11}$$

设定电介质材料表面黏附的荷电颗粒的面电荷密度为：

$$\sigma = \frac{NQ}{S} \tag{12}$$

其中，N为黏附在电介质材料表面的荷电颗粒，S为黏附颗粒的电介质材料表面积。

最后，我们研究了粘附在集尘板上的荷电颗粒和集尘板极化形成的合成电场 $\boldsymbol{E}_4$。$\boldsymbol{E}_4$ 也可以由公式（5）计算得出。

特别地，粘附颗粒的作用尤为重要，因为在电源反转时，集尘板表面粘附的荷电颗粒会显著强化电场，提高整体的空间电场强度。因此，$\boldsymbol{E}_4$ 对电场增强起到关键作用。

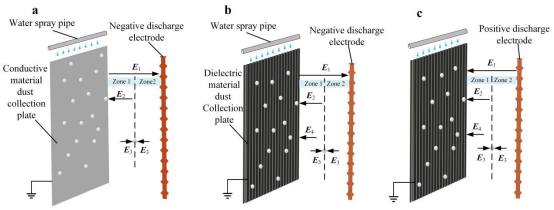


图 1 CWESP 与 RWESP 的电场分布对比。a)CWESP 的空间电场分布 b)电源反转前 RWESP 的空间电场分布。c)电源反转后 RWESP 的空间电场分布。

为了进一步分析荷电颗粒运动对空间电场的影响，本研究选取刚进入除尘室的荷电颗粒为对象，研究两种集尘板和电源配置下的电场分布特性。首先分析传统集尘板在单一直流电源下的电场分布（如图 1(a)所示），随后分析凹凸型介电集尘板搭配双极性电源时的电场分布。随着电源极性切换，除尘室内电场分布呈现两个阶段。负极电源电场分布如图 1(b)所示，正极电源电场分布如图 1(c)所示。两种配置方案在 zone1 与 zone2 区域的空间电场变化特征如表 1 所示。

表 1 不同集尘板与电源配置下除尘室 Zone 1 与 Zone 2 的空间电场分布

集尘板-电源配置方案	zone1	zone2
传统集尘板和单一电源	$\boldsymbol{E}_{\Sigma 1} = \boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2 + \boldsymbol{E}_3$	$\boldsymbol{E}_{\Sigma 2} = \boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2 - \boldsymbol{E}_3$
改进集尘板+负极	$\boldsymbol{E}_{\Sigma 1} = \boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2 + \boldsymbol{E}_3 -$	$\boldsymbol{E}_{\Sigma 2} = \boldsymbol{E}_1 - \boldsymbol{E}_2 - \boldsymbol{E}_3 -$

电源（反转前）改进集尘板+正极电源（反转后）	$\boldsymbol{E}_{\Sigma 1}=\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2-\boldsymbol{E}_3+\quad \boldsymbol{E}_{\Sigma 2}=\boldsymbol{E}_1+\boldsymbol{E}_2+\boldsymbol{E}_3+$

由表 1 可知不论在 zone1 还是 zone2，靠近集尘板的颗粒产生的电场 $\boldsymbol{E}_2$ 始终与外电源产生的电场 $\boldsymbol{E}_1$ 方向相反，影响空间电场。与单一直流电源作用下相比，反转电极后合成电场将更大。更重要的是，被介电集尘板在弛豫时间内吸附的荷电颗粒数量相当可观，因此 $\boldsymbol{E}_4$ 的存在将在反转极性时使除尘室内的综合电场显著增强。

2.3 仿真计算

理论上，我们已经分析了集尘板结构和电源配置对除尘室内部空间电场及粉尘颗粒的荷电情况等现象的影响。在此基础上，采用 COMSOL Multiphysics 搭建仿真模型。首先，仿真得到了不同电介质弛豫特性。接下来，重点分析了 PVC 集尘板弛豫时间下的极化强度和空间电场，据此确定最优电源配置。最后，在此电源配置下对比了荷电颗粒运动前后除尘室内部电场的变化。

2.3.1 除尘室结构改进前后的电场分布

为对比改进前后除尘室的电场分布，我们建立了（CWESP）与(RWESP)的电场模型。传统集尘板采用导电玻璃钢材质，改进型集尘板为凹凸结构 PVC 材质。除尘室各项参数如表 2 所示。传统与改进结构的三维电场强度分布计算结果分别如图 2(a)、(b)所示。

比较图 2(a)和图 2(b)可知，当不考虑荷电颗粒对空间电场的影响时，两种除尘室结构单一直流电场作用下的空间电场均为从放电极向集尘板逐渐衰减。其中，最大场强均出现在放电极的芒刺处 Max 点。具体而言，图 2(a)中传统结构除尘室的最大电场强度为 9.58×10^6V/m，而图 2(b)中改进结构除尘室的最大电场强度为 1.06×10^7V/m。对比结果表明，改进结构的除尘室空间电场强度最大值略高于传统湿式除尘室，仅考虑集尘板材料和结构的改变，对除尘室空间电场影响有限。

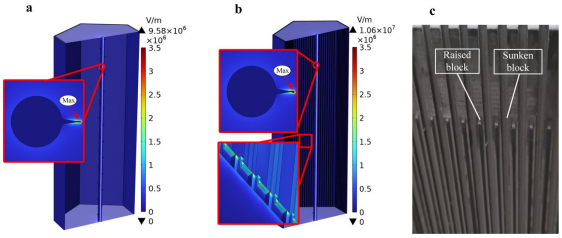


图 2 CWESP 与 RWESP 的电场仿真对比及介电集尘板。a)CWESP 的仿真电场强度。b)RWESP 的仿真电场强度。c) 介电集尘板结构。

2.3.2 双极性电源不同电压配置对集尘板弛豫效应的影响

公式(2)可知，当集尘板外加电源电压极性随时间发生变化时，由于电介质材料的弛豫现象，其极化强度 $\boldsymbol{P}$ 会滞后于电压变化。为验证电介质极化弛豫时间下荷电灰尘对电场增强的作用，考虑到改性 PVC 的耐腐蚀性能，我们首先选取 PVC 材料作为图 2(b)中集尘板。

令双极性电源在不同时间内从-10kV 线性反转至 10kV，PVC 板的弛豫时间曲线如图 3(a)所示。可以看出，弛豫时间随电压降低而增大，在电压为 1kV 附近变化率最大且达到最大值。

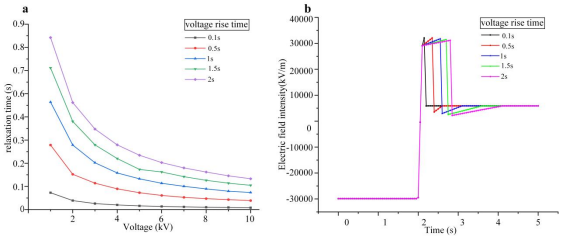


图 3 集尘板弛豫时间及电场仿真结果 a)不同电压上升时间下弛豫时间变化曲线 b)不同反转时间下空间电场变化曲线

2.3.3 不同电压变化时间下弛豫效应对空间电场的影响

为了使集尘板有更大的弛豫时间来增强空间电场，我们选取 1kV 为反转最高电压。分析电压按照不同的上升时间线性变化时，除尘室内电场的分布。考虑到弛豫时间结束后，集尘板上荷电灰尘与集尘板结合力减弱而无法继续有序排列。因此，设定弛豫时间结束时灰尘电场消失。不考虑运动粒子时除尘室内电场分布如图 3(b)所示。

由图 3(b)可知，电压上升时间为 0.1、0.5s 时除尘室中的电场最大。也就是说，电源反转后处于集尘板弛豫时间内，空间电场将大于反转前数值。但是考虑到电源反转对高压器件提出的苛刻开断要求，最终，选取 1s 作为电压上升时间（图 4a）。

因此，在上述设定电压下，选取 PVC 板与空气交界面处 P 点，如图 4(c)。分析其极化强度随时间变化规律，如图 4(b)所示。当 2.1 s 外加电压恢复至 0 时，由于介质的弛豫作用，介质内的偶极子方向来不及随外电场发生反转。此时，PVC 内表面 P 点极化强度仍为负值-1.74×10 -9C/m^2。直到 3.011s 时，PVC 极化强度才变为 0。总的极化滞后时间约为 0.911s。为此时间内使得荷电灰尘稳定吸附并增强空间电场提供条件。

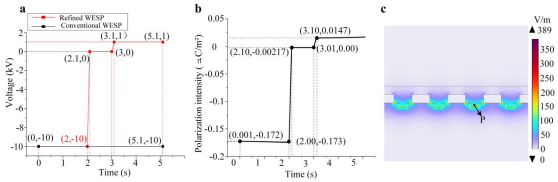


图 4 集尘板弛豫效应的仿真结果 a)传统与改进 WESP 电极电压。b) 点 P 的极化强度随时间变化曲线。c)外电压为 0 时 P 点的电场强度

2.3.4 不同材料对弛豫效应的影响

需说明的是，不同材料的极化特性存在差异，所以其弛豫时间也不同。我们分析了聚丙烯（PP）与 PVC 材料在不同电压下的弛豫时间（图 5），由图可见，PP 的弛豫效果优于 PVC，因此，考虑到对荷电灰尘的吸附效果，可以选择弛豫时间更长的材料。

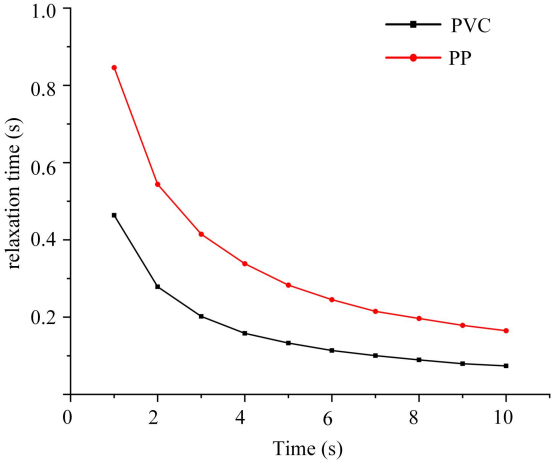


图 5 不同电压下 PP 与 PVC 弛豫时间曲线

表 2 改进 WESP 中集尘板的参数

content	parameter	content	parameter
Collection plate material	PVC	Electrode spacing d	200 mm
Area of a single collection plate S_1	600 mm×230.95 mm	Diameter of the inlet and outlet pipeline ϕ_2	1.25mm
Diameter of the discharge electrode ϕ_1	7 mm	Height of the collection plate protrusion h_1（RWESP）	2.5 mm
Length of the discharge electrode L	600 mm	Depth of the collection plate indentation h_2（RWESP）	60 mm

2.3.5 粉尘颗粒的运动特征及其对空间电场的影响

由上文中的分析可知，在我们的 RWESP 中，可以使放电极周围的电场在部分时间内大于外电源产生电场强度。这样的结果不仅除尘室内电场强度有所提高，而且由公式(11)可知，粉尘颗粒的荷电量也会相较单一极性的直流电源时有所提高。另外，随着粉尘颗粒的荷电量和空间电场的增加，颗粒所受电场力也会增加，会加快粉尘颗粒向集尘板的运动速度，降低了该区域内颗粒物逃逸的可能性。

为了进一步研究集尘板表面荷电颗粒物对空间电场构建的影响，在图 2(a,b)的模型中我们投入了荷电灰尘，取集尘板凸起处截面建立了粒子运动模型。其中，依据 Wan Yi 研究的湿式静电除尘中投入粒子浓度[39]，计算设定二维模型投入粒子数量为 5.6×104 个/s。设定除尘腔内入口风速为 1m/s。考虑到流场作用对仿真模型的收敛性的影响，简化图 2(a,b)模型中的齿状电极为棒电极。进而，为了使除尘腔中产生与图 2(a,b)相近的空间电场，设定放电极电压为-10kV。CWESP 与 RWESP 腔内粒子轨迹分别如图 6(a)和图 6(b)所示。

图 6(a)和图 6(b)可知，电源反转到正极时，进入除尘腔的灰尘有很大一部分被高效地吸附到放电极上。放电极上的灰尘在一定程度上充当了阻挡介质，降低了放电极的起晕电压，从而进一步加速了除尘腔内的空气电离。与此同时，电源反转后，电极附近区域正荷电灰尘与除尘室内负荷电灰尘在电场力的作用下发生碰撞，凝并成大粒径粉尘团，在重力作用下落入灰斗。双极性电源的采用实现了放电极附近灰尘的凝并，减少了中心区域粉尘的逃逸。

为了研究荷电颗粒对空间电场的影响，如图 6(a)和图 6(b)所示，分别在 CWESP 和 RWESP 中取靠近放电极的一点 A(20mm,100mm)。在静电除尘过程中，CWESP 和 RWESP 内 A 点的电场强度随时间变化曲线如图 6(c)所示。

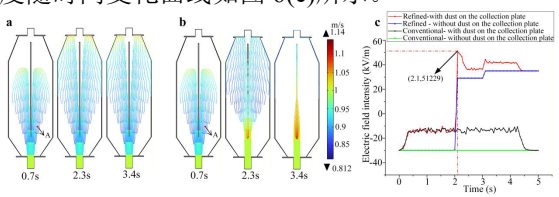


图 6 电场及颗粒运动的仿真结果。a) CWESP 颗粒运动轨迹。b) RWESP 中颗粒运动轨迹。c)CWESP 与 RWESP 中点 A 的电场强度

由图 6(c)可知，0-2sCWESP 与 RWESP 的电源均为负极性直流，灰尘削弱了两者的电场，减少

值约为 1.58×10⁴V/m。这是由于负极性放电极和带负电的灰尘颗粒之间相互排斥，削弱了空间电场。2-4s，传统除尘室仍保持空间电场的削弱状态；改进除尘室则由于电极电源由负变正，与负极性颗粒之间产生了增强电场，增大值约为 7793V/m。此外，我们注意到电源极性反转瞬间出现了电场强度的最大值 5.12×10⁴V/m。这是由于当外加电源突然变为正极性时，空间中带负电荷的灰尘迅速改变运动状态，向电极靠近，形成了瞬态的局部增强电场。

需要说明的是，上述分析我们选取的 A 点靠近放电极，但根据图 1(c)的分析，进入除尘腔的颗粒在运动过程中形成的 zone2 中的电场都处于增强状态。其产生的增强电场与颗粒的运动位置有关。由于在图 6 中我们投入了大量粒子，粒子之间会产生相互作用。越靠近放电极，粒子产生的增强电场越明显。

3 实验

3.1 介质颗粒弛豫过程

为验证反转电极时非金属介质集尘板的弛豫对吸附灰尘的作用，我们希望搭建实验台观测灰尘颗粒的吸附特征。但考虑到实验台搭建的便捷，我们采用金属板电极生成电场，研究弛豫效应对介质粉尘颗粒吸附成链过程的影响。以此推广到 PVC 集尘板对灰尘的吸附作用。

实验选取非金属电介质材料（二氧化硅颗粒）与金属材料（小钢球颗粒）作为研究对象，将两类颗粒置于完全相同电场环境中，采用 Phantom T2540 高速摄像机以 3000 fps 的帧率记录颗粒物的微观运动的瞬时特征。

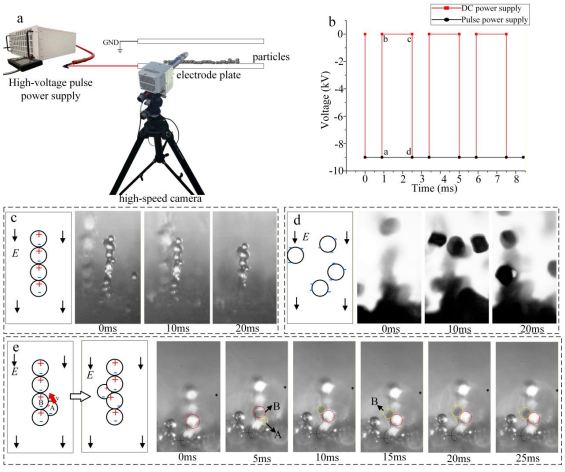


图 7 实验观测颗粒介电弛豫现象。a)实验示意图 b)电极电压波形 c)直流电场中二氧化硅颗粒的运动 d)直流电场中钢颗粒的运动 e) 脉冲电场中二氧化硅颗粒的运动

实验采用金属平行板电极构建匀强电场。两极板间距 1cm 确保电极中心电场的均匀性。实验时将直径都为 100μm 的两类颗粒分别平铺于下极板表面。实验电源设置为两类对比条件，其一为-9kV 直流电压；其二为 0kV 至-9kV 的 400Hz 方波脉冲电压。捕捉颗粒微观运动的瞬时特征。图 7 为不同材料颗粒弛豫效应观测的实验图。视频 1-3 展示了这些颗粒的运动轨迹（支持信息）。

通过分析高速摄影机采集图像中颗粒的动态运动可知，非金属介质二氧化硅颗粒在直流电场中呈现显著的极化成链特征。如图 7(c)所示，二氧化硅颗粒作为电介质在电场作用下发生界面极化，沿电场方向的两端形成异号束缚电荷。稳定状态下，相邻颗粒通过异号束缚电荷间的库仑吸引力相互作用[40]，最终排列成连续的链状结构。成链排列中的每个颗粒形态都非常稳定，不会因为链条以外颗粒的上升下降而发生偏转或脱落。

当下极板电源切换为 400Hz 脉冲电源后，二氧化硅颗粒的链状结构看似仍能保持稳定，如图 7(e)所示。但是，特别地，当紧邻链条的颗粒 B 在电场的作用下向上运动时，其运动带动了颗粒 A 也随之发生了转动。这是由于根据公式(2)可知，虽然图 7(b)中一个周期的 bc 段电压为 0，但在 d 点二氧化硅颗粒的极化强度仍可以保持原极化强度的 2/3。因此，当电极从-9kV 变化为 0V 时，二氧化硅颗粒的偶极子来不及发生明显偏转。当 B 向上运动时，A 和 B 之间极化后的分子相互吸引，使得 A 跟随 B 发生转动。这就使得 A 在原有链条中与其他颗粒的接触非常松散。不论是气流还是其他颗粒的轻微撞击，都有可能破坏原有链条，抑制灰尘颗粒结块，产生二次扬尘。

进一步地，当颗粒为弛豫时间非常短的金属颗粒时，钢球在电场中呈杂乱分散状态，未形成有效链状结构，如图 7(d)所示。这是由于小钢球为良导体，与下极板负电极接触时，自由电子快速迁移使颗粒表面均带负电，同种电荷间的库仑斥力导致颗粒相互排斥，无法实现聚集。

综上所述，为了使得非金属介电颗粒稳定成链并最终结块，电源反转极性的最大时间应与材料的弛豫时间大致相同。弛豫时间内，非金属介电材料将保持原有极化特性，为反转极性后的电场提供增强分量。因此，本文中除尘器采用极低频电源。只有当电极电源配置与材料弛豫时间良好配合，才可能在保证颗粒成链的同时增加除尘器空间电场。

3.2 改进湿式静电除尘实验

为了能够更好的验证改进的集尘板和电源配置对除尘效率的影响，我们根据图 8(a)设计了实验装置，对集尘板不同结构、放电极不同电源类型和电压等级下除尘器的工作效率进行实验探究。如图 8(b)所示。除尘室采用六块 PVC 集尘板装配成横截面为正六边形的管道状。集尘板表面具有凹凸结构。电极电压通过高压继电器 K1、K2 对工作电源进行切换。

实验针对三种工况的湿式静电除尘器展开研究：传统集尘板-传统电源、改进集尘板-传统电源、改进集尘板-改进电源，以探究不同结构与电源配置组合的除尘效率差异。

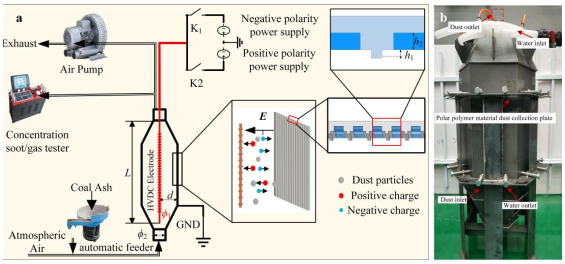


图 8 改进 WESP 实验系统的概述。a) 改进 WESP 工作系统示意图。b) 改进 WESP

实验中，通过给料机和引风机维持恒定，以此确保入口浓度稳定。除尘室流速稳定在在 1m/s，给料机速率设定为 70g/min。除尘效率的计算以入口烟尘浓度为基准，对比不同集尘板结构与电源配置下的出口灰尘浓度。其计算公式为：

$$\eta = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \tag{18}$$

式中，ρ_1 为除尘器入口浓度，ρ_2 为不同集尘板结构与电源配置下的出口烟尘浓度，g/L。

其中，烟尘浓度计算公式为：

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{v \cdot S \cdot t} \tag{19}$$

式中，m_1、m_2 分别为抽滤设备在实验前后滤筒质量，g。v 为抽滤设备测得的流速，m/s。S 为给料管道截面积，cm^2。

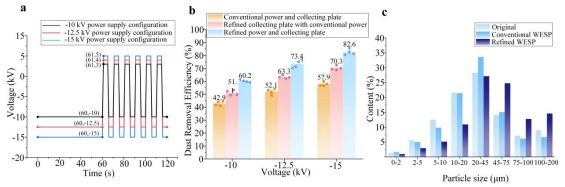


图 9 除尘实验电压及结果 a) 电源配置方案(b)传统/改进结构和电源下除尘效率(b)除尘前后粉尘粒度分布特征图

本实验充分考虑了不同电压下的电离程度差异以及集尘板上荷电量的不同。为使反转时空间电场强度处于接近峰值的范围，实验中针对不同电压等级设置了差异化反转点电压，如图 9(a)所示。

电源反转时间与电压幅值是影响介电材料弛豫行为的关键参数。我们将仿真中的上升时间、电压幅值设定与实验一致，确保电场变化过程的一致性。具体说来，在考虑介电集尘板弛豫效应的仿真中，施加电压波形如图 4a 所示。电压反转时长为 1.1s。电压幅值由–10kV 变化至 +1kV。实验中电压波形如图 9a 所示，电压上升时间与仿真一致，均约为 1s。且电压幅值变化范围相同。

如图 9(a)所示的实验中反转电压后正负极稳定电压持续时间略高于集尘板材料的弛豫时间。这是鉴于我们高压开关器件的开断能力。并基于 2.2.节和图 4(b)的分析，略加长反转电压的作用时间产生了相反的极化强度，确实减弱了粉尘之间的粘附力。如果反转电压持续过长，集尘板上已经结块的粉尘层颗粒将会变得松散，造成二次扬尘。因此，我们鉴于高压开关特性略增长了电压稳定时间，但又控制了其时长，使得粉尘颗粒紧密粘附。粘附的粉尘必然可以增强除尘腔内的空间电场，促进粉尘的进一步附着。

实验过程按以下步骤进行：先启动给料机与引风机，持续运行 1min 以确保除尘室内流场稳定；待流场稳定后，同步启动抽滤装置并施加负极性高压电源，维持该状态 1min；随后进入持续 1min 的电源切换阶段，电极电压采用周期性工作模式：以 12s 为一个周期（对应图 9(a)中的电源波形），每个周期负极和正极各持续 5s，中间 1s 为切换时间，循环运行。

多组重复实验的平均效率结果如图 9(b)所示。由图 9(b)可知，在传统电源作用下，传统结构与改进结构的除尘效率均随电极电压升高而上升，且改进结构的效率显著优于传统结构。具体而言，电压从-10kV 升至-15kV 时，传统结构效率提升 15%，改进结构效率提升 22.4.%。这是因为改进的凸起结构提供了灰尘粘附的介质表面，进而提供了灰尘附加电场，为电源反转极性增强粉尘所受电场力提供条件。

值得注意的是，改进结构和电源配置在-10kV 时的除尘效率略高于传统结构和电源配置在-15kV 时的效率；且在-10kV 至-15kV 范围内，改进结构和电源配置的效率随电压升高稳步提升（理论上，电压持续增加时效率将持续上升直至峰值稳定）。这表明，新结构与电源的协同作用可在较低电压下实现更高的电场强度，从而在保证一定除尘效率的情况下降低除尘设备的工作电压。

相较于传统结构和电源配置，改进结构和电源配置在各电压等级下的除尘效率最高提升 24.7%；与改进结构和传统电源配置相比，其平均效率提升约 10%。这一结果源于改进电源与电介质集尘板的协同效应，两者产生的电场有效叠加，提升了除尘室内的空间电场强度，促使电离程度增强，让颗粒物获得更大荷电量。此时，粒径较小的和更轻的颗粒在强电场作用下将更容易被捕集。

为此，我们使用 Bettersize2600 激光粒度分析仪，对除尘前粉尘粒径及传统和改进结构与电源的湿式静电除尘器处理后粉尘颗粒的粒径分布进行对比分析，对应的粒径分布如图 9(c)所示。

如图 9(c)所示，原始粉尘的粒径分布呈正态分布，核心集中于 20~45μm 区间。经传统湿式静电除尘器处理后，各粒径区间的颗粒占比未发

生显著变化；而采用改进结构与电源静电除尘器处理后，45μm 以下细颗粒（PM45）的累计占比大幅下降：相较于原始粉尘下降 31.85%，较传统方案降低 35.3%。

结果表明，改进结构与电源的湿式静电除尘器，可有效促进颗粒在集尘板附近的沉积与放电极区域的凝并。在介电弛豫效应作用下，集尘板凸起部位能够形成稳定的荷电粉尘层；该粉尘层在双极性电源调控下，可进一步提升除尘空间电场强度。上述多效应协同作用，显著提升了除尘器整体除尘效率，同时实现了细颗粒物的高效捕集。

4 结论

本文提出了一种基于电介质极化弛豫效应调控除尘室空间电场分布的方法，提升了湿式静电除尘器（WESP）对细颗粒物的捕集性能。该方法应用改进的时域 Dissado-Hill 弛豫模型，研究了电介质材料在极低频电源作用下的弛豫行为。同时，分析了除尘过程中集尘板凸起结构表面黏附的荷电灰尘在弛豫时间范围内对空间电场的叠加效应。最终，通过实验验证了颗粒的弛豫特性并实现了 WESP 对细颗粒物的高效脱除。本文主要结论如下：

1.结合 Dissado-Hill 弛豫改进时域模型分析了具有凹凸改进结构集尘板的弛豫特性。计算了不同电压下的电介质的弛豫时间，确定了极低频双极性电源的最优的参数配置，实现除尘室空间电场最大化。当电源极性反转时，附着在板上凸起处的粉尘颗粒会形成额外增强的电场。结果表明，在新的电源配置下，除尘腔中心的合成电场增加了约 2 倍。

2. 实验数据表明，负极性电源为-10 kV 的 RWESP 对颗粒物的除尘效率从 42.9%提高到了 60.2%。并且随着电压的不断提高，RWESP 的除尘效率也在稳步增长。以真实粉煤灰为样本，45 μm 以下的颗粒物总体除尘效率提高了 31.85%。并且，当负极性电源电压从-10 kV 上升至-15 kV 时，除尘效率呈线性增长。

3. 实验数据表明，RWESP 在 -10 kV 时的除尘效率与 CWESP 在-15 kV 时的效率接近。由于介电集尘板与电源的协同作用可在较低电压下实现更高的电场强度，从而在保证一定除尘效率的情况下降低除尘设备的工作电压。

4. 相较于 CWESP 与 RWESP 通过优化除尘板结构和电源配置，不仅显著提升了除尘效率，还能有效捕捉微小颗粒物，这得益于其对非金属材料弛豫特性的精准把握。此外，本研究还为调控超低频双极电源提供了理论依据，从而在非金属材料周围形成更强的电场。

参考文献

[1] M. B. Rice, G. D. Thurston, J. R. Balmes, and K. E. Pinkerton, "Climate change. A global threat to cardiopulmonary health," (in eng), Am J Respir Crit Care Med, vol. 189, no. 5, pp. 512-9, Mar 1 2014, doi: http://doi.org/10.1164/rccm.201310-1924PP.

[2] O. L. I. Brown, A. Hammill, and R. McLeman, "Climate change as the 'new' security threat: implications for Africa," International Affairs, vol. 83, no. 6, pp. 1141-1154, 2007/11/01 2007, doi: https://doi.org/10.1111/j.1468-2346.2007.00678.x.

[3] J. Reser and J. Swim, "Adapting to and Coping With the Threat and Impacts of Climate Change," American Psychologist, vol. 66, pp. 277-289, 05/01 2011, doi: https://doi.org/10.1037/a0023412.

[4] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, and G. Chen, "Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact," Additive Manufacturing, vol. 21, pp. 694-704, 2018/05/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022.

[5] X. Wang, J. Chang, C. Xu, J. Zhang, P. Wang, and C. Ma, "Collection and charging characteristics of particles in an electrostatic precipitator with a wet membrane collecting electrode," Journal of Electrostatics, vol. 83, pp. 28-34, 2016/10/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.07.007.

[6] Y. Liu et al., "A new electrostatic dust removal method using carbon nanotubes transparent conductive film for sustainable operation of solar photovoltaic panels," Energy Conversion and Management, vol. 300, p. 117923, 2024/01/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117923.

[7] A. Zukeran et al., "Two-stage-type electrostatic precipitator re-entrainment phenomena under diesel flue gases," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 2, pp. 346-351, 1999, doi: https://doi.org/10.1109/28.753627.

[8] J. G. Gwon, H. Y. Choi, Y. M. Seo, S. Kim, H. K. Choi, and Y. G. Park, "Numerical study on the collection performance according to tilt angle of the collection plate in ESPs," Powder Technology, vol. 457, p. 120873, 2025/05/15/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120873.

[9] X. Xu et al., "Effect of electrode configuration on particle collection in a high-temperature electrostatic precipitator," Separation and Purification Technology, vol. 166, pp. 157-163, 2016/06/22/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.04.039.

[10] X. Pan, Z. Zhang, L. Cui, and C. Ma, "The distribution and movement characteristics of fine particles in an electrostatic precipitator with multi-field synergy," Powder Technology, vol. 410, p. 117893, 2022/09/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117893.

[11] J. Zhang, J. Wang, H. Ren, J. Fu, J. Li, and Z. Zhang, "Enhancement of PM2.5 removal efficiency in high-temperature ESP under multi-field coupling: A numerical simulation study on temperature and magnetic field effects," Powder

Technology, vol. 434, p. 119376, 2024/02/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119376.
[12] L. Ning, N. Wang, J. Fu, Y. Ma, S. Gu, and M. Cheng, "Effect of High-Voltage Electrostatic Precipitator Dust Collection Plate Structure on Collection Efficiency," ACS Omega, vol. 9, no. 35, pp. 37396-37407, 2024/09/03 2024, doi: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06500.
[13] J. Li et al., "Research of the effect of different corrugated dust collection plates on particle removal in electrostatic precipitators," Chemical Engineering Research and Design, vol. 197, pp. 323-333, 2023/09/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.006.
[14] T.-Y. Wen and Q.-Z. Xue, "Capturing heavy loading microparticles using electrostatic precipitator with square-wave collecting electrode," Powder Technology, vol. 361, pp. 520-528, 2020/02/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.083.
[15] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Enhancement of submicron particle electrostatic precipitation using dielectric barrier discharge in wire-to-square tube configuration," Journal of Electrostatics, vol. 71, no. 3, pp. 240-245, 2013/06/01/ 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.11.037.
[16] N. Jidenko and J. P. Borra, "Kinematics of charged nanometric particles in silent discharges," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, no. 4, p. 617, 2005/02/03 2005, doi: https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/014.
[17] W. Zhou, R. Jiang, Y. Sun, B. Chen, and B. Liu, "Study on multi-physical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes," Powder Technology, vol. 381, pp. 412-420, 2021/03/01/ 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.028.
[18] D. J. Bayless, M. K. Alam, R. Radcliff, and J. Caine, "Membrane-based wet electrostatic precipitation," Fuel Processing Technology, vol. 85, no. 6, pp. 781-798, 2004/06/15/ 2004, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.025.
[19] J. Chang, Y. Dong, Z. Wang, P. Wang, P. Chen, and C. Ma, "Removal of sulfuric acid aerosol in a wet electrostatic precipitator with single terylene or polypropylene collection electrodes," Journal of Aerosol Science, vol. 42, no. 8, pp. 544-554, 2011/08/01/ 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.05.006.
[20] C. Huang, X. Ma, M. Wang, Y. Sun, C. Zhang, and H. Tong, "Property of the PVC Dust Collecting Plate Used in Wet Membrane Electrostatic Precipitator," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 42, no. 11, pp. 3520-3528, 2014, doi: https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2359973.
[21] N. Zouzou, A. C. A. Ndong, P. Braud, and E. Moreau, "Time-resolved measurements of electrohydrodynamic phenomena in an AC dielectric barrier discharge electrostatic precipitator," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 2, pp. 651-657, 2016, doi: https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005330.
[22] M. Tański, A. Berendt, and J. Mizeraczyk, "Closed SDBD-driven two-stage electrostatic precipitator," Journal of Cleaner Production, vol. 226, pp. 74-84, 2019/07/20/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.280.
[23] M. Tański, A. Reza, D. Przytuła, K. Garasz, and A. Tomaszewski, "Electrostatic precipitator with Surface Dielectric Barrier Discharge ionizer," Journal of Cleaner Production, vol. 404, p. 136990, 2023/06/10/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136990.
[24] J. H. Byeon et al., "Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge," Journal of Aerosol Science, vol. 37, no. 11, pp. 1618-1628, 2006/11/01/ 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.05.003.
[25] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, and G. Touchard, "Electrostatic precipitation in wire-to-cylinder configuration: Effect of the high-voltage power supply waveform," Journal of Electrostatics, vol. 67, no. 2, pp. 117-122, 2009/05/01/ 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.01.022.
[26] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, and G. Touchard, "Electrostatic precipitation of submicron particles using a DBD in axisymmetric and planar configurations," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, no. 2, pp. 343-351, 2009, doi: https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4815162.
[27] N. Jidenko and J.-P. Borra, "Kinematics of charged nanometric particles in silent discharges," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, p. 617, 02/03 2005, doi: https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/014.
[28] H. Li et al., "Directly printing high-resolution, high-performance 3D curved electronics based on locally polarized electric-field-driven vertical jetting," Additive Manufacturing, vol. 96, p. 104579, 2024/09/25/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104579.
[29] C. J. F. BÖTtcher, "CHAPTER I - ELECTRIC DIPOLES AND MULTIPOLES," in Theory of Electric Polarization (Second Edition), C. J. F. BÖTtcher Ed. Amsterdam: Elsevier, 1973, pp. 9-58.
[30] C. J. F. BÖTtcher, "CHAPTER II - SOME CONCEPTS AND PROBLEMS OF ELECTROSTATICS," in Theory of Electric Polarization (Second Edition), C. J. F. BÖTtcher Ed. Amsterdam: Elsevier, 1973, pp. 59-89.
[31] J. Tian, R. Chen, and X. Zhao, "Time-Domain polarization characteristics in dielectrics based on the refined Dissado–Hill relaxation model," Measurement, vol. 246, p. 116694, 2025/03/31/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116694.

[32] D. J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics," in Electric Fieldsin Matter, D. J. Griffiths Ed., 5 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2023, pp. 181-204.
[33] Y. Jiang et al., "Computation of Electric Field of Overhead Lines with a Nearby Building Based on Surface Charge Method with Planer Triangle Element," in 2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering, 24-26 April 2015 2015, pp. 674-678, doi: https://doi.org/10.1109/ICISCE.2015.155.
[34] J. D. Jackson, "Introduction to Electrostatics," in Classical Electrodynamics, 3rd Edition, J. D. Jackson Ed. New York: John Wiley & Sons, 1998, pp. 24-27.
[35] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, no. 5, pp. 615-624, 2000, doi: https://doi.org/10.1109/94.879357.
[36] A. Zouaghi, N. Zouzou, A. Mekhaldi, and R. Gouri, "Submicron particles trajectory and collection efficiency in a miniature planar DBD-ESP: Theoretical model and experimental validation," Journal of Electrostatics, vol. 82, pp. 38-47, 2016/08/01/ 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.05.004.
[37] N. Zouzou, B. Dramane, E. Moreau, and G. Touchard, "EHD Flow and Collection Efficiency of a DBD ESP in Wire-to-Plane and Plane-to-Plane Configurations," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 1, pp. 336-343, 2011, doi: https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2091473.
[38] Q. Liu, S.-s. Zhang, and J.-p. Chen, "Numerical analysis of charged particle collection in wire-plate ESP," Journal of Electrostatics, vol. 74, pp. 56-65, 2015/04/01/ 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.11.007.
[39] N. Zouzou and E. Moreau, "Effect of a filamentary discharge on the particle trajectory in a plane-to-plane DBD precipitator," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 44, no. 28, p. 285204, 2011/06/24 2011, doi: https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/28/285204.
[40] H. Li, Y. Liu, L. Li, X. Yin, and X. Wu, "New anhydrous de-dusting method for photovoltaic panels using electrostatic adsorption: From the mechanism to experiments," Energy Conversion and Management, vol. 308, p. 118399, 2024/05/15/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118399.

附录 符号说明

ESP	Electrostatic Precipitator	D	Electric displacement vector
WESP	Wet Electrostatic Precipitator	ε_0	Permittivity of vacuum
CWESP	Conventional WESP	m	Correlation coefficient of motion within a dipole cluster
RWESP	Refined WESP	n	Correlation coefficient of motion within a dipole cluster
P	Dielectric polarization intensity	U	Applied voltage on discharge electrode (in V)
E	Electric field intensity (in Vm^{-1})	r_a	Radius of discharge electrode (in m)
ε_r	Relative permittivity	r_b	Distance from collecting plate to center of discharge electrode (in m)
$A_D\left(m,n,\omega_p\right.$	A function to be determined	$\boldsymbol{e}_r$	Unit vector in electric field direction
ω_p	Loss peak frequency (in Hz)	σ	Surface charge density of charged particle cross-section (in $C\ m^{-2}$)
A	Parameters related to geometry and flow characteristics of ESP	$g(f)$	Empirical formula accounting for frequency effect
B	Parameters related to geometry and flow characteristics of ESP	${}_1F_1$	Confluent hypergeometric function
ε_∞	Optical frequency dielectric constant	ε_s	Static dielectric constant