

# Technology Research and Application of Electric Coagulation Removal of Fine Particulate Matter in Coal-Fired Flue Gas

Kaikai Zhu, Jianxing Ren, Haiwen Wang, Junjie Zhang

College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai Electric Power College, Shanghai  
Email: zk1101512055@163.com

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2016; accepted: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2016; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

At present the problem environment is one of the main problems, which people have to solve. This paper studied and analyzed the current control method of removing particulate matter—Electric coagulation and technology. According to the principle of electric coagulation and dusting we discuss the influencing factors of electric coagulation and dust removal efficiency, which conclude dust particle size, dielectric properties, the frequency of the ac power plant, ion concentration and so on. People have found the method to improve the efficiency of coagulation and dust removal.

## Keywords

Inhalable Particles, Electric Coagulation, Electric Coagulation and Dust Removal Efficiency

---

# 电凝并技术脱除燃煤烟气中细颗粒物的研究与应用

朱锴锴, 任建兴, 王海文, 张俊杰

上海电力学院, 能源与机械工程学院, 上海  
Email: zk1101512055@163.com

收稿日期: 2016年8月5日; 录用日期: 2016年8月22日; 发布日期: 2016年8月30日

## 摘要

环境问题是目前人们面临的主要问题之一。本文研究分析了当前脱除可吸入颗粒物的控制方法：电凝并技术。根据电凝并除尘原理探讨了影响电凝并除尘效率的因素，主要包括：粒径大小、粉尘介电特性、交流电厂的频率、离子浓度等，得出了提高电凝并除尘效率的方法。

## 关键词

可吸入颗粒，电凝并，电凝并除尘效率

## 1. 前沿

我国是煤炭生产和消费大国和全球唯一以煤炭为初级能源的大国[1] [2]。2015 年我国煤炭使用量为 27.52 亿吨[3]，粉煤灰的排放量为 6.2 亿吨。燃煤电厂、冶金、化工等工业都是煤炭使用的大户。燃煤烟气未经任何处理的排放，因此会造成各种的环境和社会问题。其中，总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物在空中的数量是用来判断空气质量的重要依据。不同等级粒径的颗粒物会对人体产生不同的伤害，其中，粒径大于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒物对人体基本没有危害，其能被鼻毛、粘液截留和人体自主保护性条件反射排出体外；粒径在  $0.5\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$  的颗粒物对人体的危害最大，这是因为这种微细颗粒物在空中驻留时间长、比表面积大、易于富集大气中的有毒物质，并且通过呼吸能够直接进入肺泡，在肺泡中沉积，甚至能够进入血液，引发其他的并发症。有研究表明，大气中  $\text{PM}_{10}$  浓度每增加  $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日死亡率上升 1%，呼吸疾病上升 3%~4%，心血管发病率上升 1%~4% [4]。哮喘及其他呼吸疾病发病率也与大气中  $\text{PM}_{10}$  浓度有关[5]。对电厂烟尘的控制都是各国研究的重点。尽管各国也研发了可种各样的除尘设备，这些设备对粒径大于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物出去效果很好，但是对亚微米和微米级颗粒物的除去效果不是很理想。减少排放废气中颗粒物仍是一个需要积极探索的领域[6]-[8]。本文从电凝并除尘的可行性方面进行了研究。

## 2. 电凝并技术脱除细颗粒物的机理

### 2.1. 电凝并的原理

电凝并除尘技术是采用外电场使颗粒物提前荷电的方法，荷电后的粒子在凝并区通过外加的高压交流电场的作用下相互碰撞、扩散、异极间的吸引排斥使细颗粒凝并成较粗的粒子并被除去的技术。

大量的实验证实，采用常规的除尘方法对  $0.01\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$  微细颗粒的除去效率很低[9] [10]。然而电凝并技术能够有效地脱除亚微米粒子。二区式电凝并器(如图 1)工作原理是通过微粒在外电场的作用下发生极化，产生极化电荷。两端带不同电荷的偶极粒子在电场的作用下沿着电场线的风向移动，瞬间大量的粒子凝聚在一起形成较粗的偶极颗粒，偶极颗粒在静电除尘器部分被收集。

### 2.2. 荷电粒子凝并原理

#### 2.2.1. 布朗凝并

在悬浮的极板间气溶胶粒子足够小时，来自悬浮粒子各个方向的碰撞作用是不平衡的。粒子在某个方向受到撞击的超强作用时，使粒子向各个方向运动，与其它微粒相融合，形成较粗颗粒[11]。粒径小于  $1\ \mu\text{m}$  的粒子聚合体是由离子的布朗运动碰撞形成的。这种碰撞也是受到扩散制约的[12]。布朗运动是一种热运动占主导地位的为运动。有研究发现亚微米粒子的电凝聚速率比中性粒子的热凝聚速率快  $10^2$  和

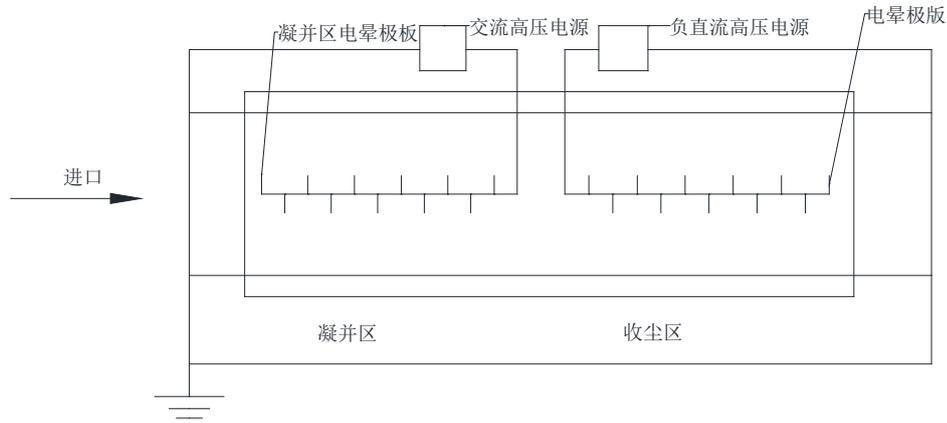


Figure 1. The structure diagram of electric coagulation  
图 1. 电凝并结构示意图

$10^4$  倍[13]。

如果粒子都是规则的球体且碰撞时相互凝聚， $r_2$  粒子布朗运动，向静止在  $r_2$  粒子坐标系原点的  $r_1$  粒子表面扩散。其扩散公式：

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_2 \frac{\partial r^2 * \frac{\partial n}{\partial r}}{r^2 \partial r} \quad (1)$$

边界条件： $n = 0$ ， $r = r_1 + r_2$ ， $t$  为任意值； $n$  为无穷， $r > r_1 + r_2$ ， $t = 0$ 。式中  $n$  表示半径为  $r_2$  的粒子在  $t$  时刻的浓度； $D_2$  表示半径为  $r_1$  粒子的扩散系数。

因为每次碰撞都会导致两个颗粒融合成新的聚合物，所以布朗凝并过程中颗粒数目总浓度必然减小，颗粒粒径不断增大。由扩散系数的斯托克斯-爱因斯坦公式与碰撞公式联立，可以得到两种颗粒由于布朗凝并导致的总浓度随时间的变化速率：

$$-\frac{dn}{dt} = K_c (v_1^{1/3} + v_2^{1/3}) (v_1^{-1/3} + v_2^{-1/3}) n_1 n_2 = \beta_c (v_1, v_2) n_1 n_2 \quad (2)$$

式中  $K_c$  为连续区布朗凝并系数； $v_1$  和  $v_2$  为两种粒子的体积， $\beta_c$  凝并效率。

由(2)式可以得出，如果  $v_1$  远远大于  $v_2$ ，凝并效率将趋近于无穷。因此，当两种颗粒物的体积相差越大，它们的凝并效率就越大。这是因为大颗粒物相当于增大了碰撞的表面积，而小颗粒物相当于增大了碰撞的扩散系数。但是颗粒物的粒径不能无限的缩小。

如果仅考虑气溶胶球形颗粒数目浓度随时间的变化情况，粒子总的布朗运动速率方程可描述为：

$$-\frac{dn}{dt} = \beta_c \left( \frac{n}{2} \right)^2 + 2 \left[ \beta_c \left( \frac{n}{4} \right)^2 + \dots \right] = \frac{1}{2} K n^2, \quad k \text{ 为系数。} \quad (3)$$

对于自由分子区气溶胶的布朗凝并效率可以表示为：

$$\eta = K_f \sqrt{\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}} \left( \frac{1}{v_1^3} + \frac{1}{v_2^3} \right)^2 \quad (4)$$

$$K_f = (3/4\pi)^{1/6} * \sqrt{6KT/\rho} \quad (5)$$

是自由分子区布朗凝并系数， $\rho$  是气溶胶颗粒的密度。

由(4)式可知, 当  $v_1$  不变,  $v_2$  为无穷大时,  $\eta$  的取值也为无穷大。所以可推得随着颗粒粒径的增大, 颗粒物的凝并效率也随之增大。

### 2.2.2. 库伦凝并

试验证明, 库仑力在颗粒物电凝并中也有着重要的作用。凝并系数是衡量凝并速率的关键, 在库仑力作用下的扩散方程表示[14]:

$$K = \frac{q_1 q_2}{kT \varepsilon_0} (D_1 + D_2) \left[ \exp \frac{q_1 q_2}{4\pi T \varepsilon_0 (\alpha_1 + \alpha_2)} - 1 \right] \quad (6)$$

式中  $q_1$ ,  $q_2$  分别是半径  $a_1$ ,  $a_2$  的尘粒的带电量;  $D_1$ ,  $D_2$  分别为半径  $a_1$ ,  $a_2$  的尘粒扩散系数。

根据质量守恒定律, 可以求出凝并后粒子的中位径的随时间变化的表达式:

$$d(t) = \left( 1 + \frac{1}{2} Knt \right)^{1/3} d_0 \quad (7)$$

其中  $d_0$  为凝聚前的烟尘中位径,  $n$  为初始尘粒计算浓度。

由(6), (7)的关系式可知, 当采用高电压电晕电离放电方法时, 能够很大程度地提高烟道中离子浓度, 从而提高尘粒的荷电量, 增大尘粒的凝并速度, 促使尘粒粒径不断增大; 可是变粗的颗粒又促进自身荷电量地增加。

## 3. 影响电凝并技术脱除细颗粒物的因素

### 3.1. 颗粒粒径对凝并的影响

粒子的荷电量为[15]:

$$q = q_d + q_k = 3\varepsilon\varepsilon_0\pi d^2 E_0 / (\varepsilon + 2) * \frac{1}{1 + \frac{4\varepsilon_0}{Nekt}} + \frac{2\pi\varepsilon_0 dkT}{e} \ln \left( 1 + \frac{dNe^2 t \bar{u}}{8\varepsilon_0 kt} \right) \quad (8)$$

从粒子的荷电量公式可知, 在其他变量不变的情况下, 粒子的荷电电量与粒子的粒径成正比。

电场粒子凝并驱进速度公式:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 EE_p}{(\varepsilon + 2)\mu} C_u d_p \quad (9)$$

$\varepsilon_0$  ——真空介电常数;  $\varepsilon$  ——粉尘相对介电常数;

$E$  ——荷电场强, V/m;  $E_p$  ——收尘场强, V/m。

从(9)式可以得出, 粒子在凝并区受到的电场作用越强, 驱进速度就越快, 凝并速率就越大, 凝并效率就越高, 细小颗粒物的脱除效率就越大。从图2可以得出凝并效率随着颗粒物粒径的变化不是单调的, 而是先减小, 随后增大; 尘粒平均直径越大, 凝并效率越高[16]。

### 3.2. 烟尘介电特性对凝并的影响

介电性能是指在电场的作用下, 表现出对静电能的储存和损耗的性能。介电常数是衡量电介质在电场下的极化行为或储存电荷能力的参数[17]。介电常数越大, 材料的极化能力也就越强。

烟气粉尘也是一种电介质。在外加电场的作用下, 烟尘粒子内部的正、负电荷与外加电场相互排斥、吸引发生相对位移, 在分子两端表面积累等量的异种电荷, 烟尘粒子极化成了偶极子[12] [18] [19]。

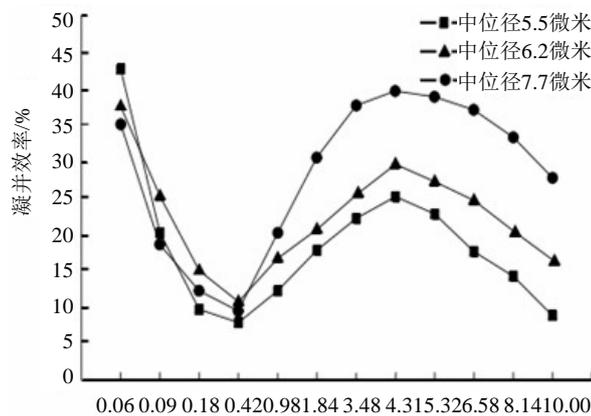


Figure 2. Curve: Particle size distribution

图 2. 粒径分布/ $\mu\text{m}$ 

由式  $dF = \varepsilon_0(\varepsilon - 1) \text{grad} \left( \frac{E^2}{2} \right) dv$  可得, 被极化了的并形成偶极子的微粒, 在电场的受力与相对电介常数成正比, 相对电介常数越大, 微粒在电场中受到的作用力就越大。并在偶极矩的作用下, 粒子沿着电场线的方向移动, 并很快凝结在一起, 形成灰串珠型的粒子聚集物[11] [13], 提高脱除效率。

### 3.3. 交流电场频率对凝并的影响

烟尘在外电场的作用下将会发生极化形成偶极荷电。在交流电场下偶极荷电粒子, 由于惯性的作用, 在高频率电场的作用下, 将会使所有的尘粒发生不停地振动[20]。交流电场频率与凝并系数的关系可表示为[21]:

$$K_w = \frac{1}{2} (x_2 + x_1)^2 \left( \frac{\tau_1 q_1 E_0}{m_1 \sqrt{1 + \tau_1^2 w^2}} \cos \theta_1^2 + \frac{\tau_2 q_2 E_0}{m_2 \sqrt{1 + \tau_2^2 w^2}} \cos \theta_2^2 \right) \quad (10)$$

由式(9)可知, 当角频率  $w$  很大时, 一方面离子振动比较剧烈, 振幅减小, 但离子的自由程比较大, 粒子之间不能发生有效的碰撞凝聚, 降低凝并系数, 减小尘粒的凝并效果和脱除效率; 另一方面由于烟尘粒子剧烈震动不能够很好地荷电, 从而降低了尘粒的凝并效果和脱除效率。

当角频率  $w$  很小时, 同样也不利于尘粒对称偶极荷电, 尘粒在双区电凝并器的凝并效果和除尘效率提高不是很显著。如图 3 所示, 因此只有选择恰当的角频率, 才能提高凝并效果和除尘效率。

### 3.4. 粒子荷电量对凝并的影响

在荷电区, 随着离子浓度的增大, 离子与颗粒物的接触机会也越大, 在高频率的交变电场中带电的粒子的振幅非常的剧烈, 容易与周围的粒子融合凝聚成较大粗颗粒, 有利于颗粒物的脱除[22]。离子浓度与进入电凝并区粒子的动量、电晕级数、烟尘的进口速度等有关。

在不同的电场和粒子流速的条件下, 粒子流体速度越快, 单位时间内进入荷电区的粒子量越多, 越容易得到高浓度的离子, 在荷电区颗粒物越容易荷电。这是因为荷电区粒子流速增大能够带离更多的离子, 从而降低正负离子之间的复合几率[23]。离子浓度越大, 在交变的高压场中离子的振动频率越高, 越有利于烟尘粒子的荷电和凝并。随着场强的增大, 凝并除尘效率也逐渐的增大。

在预荷电区, 相同的电压条件下, 随着电晕级数的增多, 产生的离子数就越多, 烟尘的荷电量就越大。并在外电场作用下与周围的荷电粒子快速结合形成新的聚合物, 提高凝并效果和脱除效率。

如图 4 所示在电压 2 KV~8 KV 时，粒子颗粒数的降低速度很明显；大于 8 KV 时粒子颗粒数目变化趋于平缓。由上图可知，随着交变电压的增大，粒子的凝并效果在逐渐减小。这是因为高电压下小颗粒物充分荷电，粒子数量的继续减少是因为增加了凝并区域的长度，使更多粒径较小的粒子在交流电压下振荡聚合成粒径较大的粒子。

#### 4. 提高脱除尘粒效率的措施与方法

提高交变电场的频率。从关系式(10)可以得出，随着电场频率的增大，颗粒物的振动幅度也增大，有利于颗粒物的接触，凝并系数随之提高，凝并速率就越大，小颗粒物就越容易凝并成较大的颗粒物，能够有效地提高细小颗粒物的脱除效率。如图 3 所示，实验结果表明在电场频率为 40 Hz 时，粒子浓度减少的最多，凝并效率最大。

提高粒子的荷电量和离子浓度。可以增大预荷电区电压，这样在荷电通道内电晕放电强度就愈大，产生大量的离子，并利用通道中粒子的高动量，与颗粒物相结合形成高荷电量的离子，在凝并区受到外电场的作用，与其他离子快速结合形成新的凝聚物，提高脱除效率。如图 4 所示在电压 2 KV~8 KV 时，粒子颗粒数的降低速度很明显；大于 8 KV 时粒子颗粒数目变化趋于平缓。

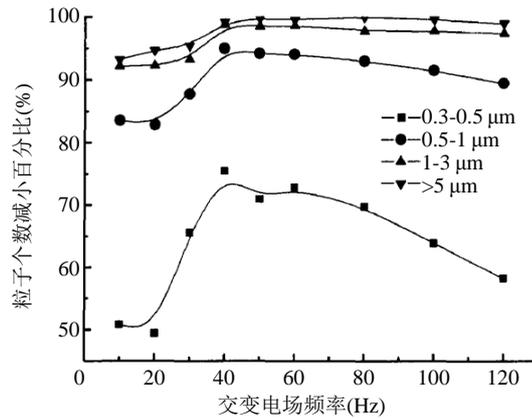


Figure 3. Curve: The influence of frequency of alternating electric field on the particle number  
图 3. 交变电场频率对粒子个数的影响

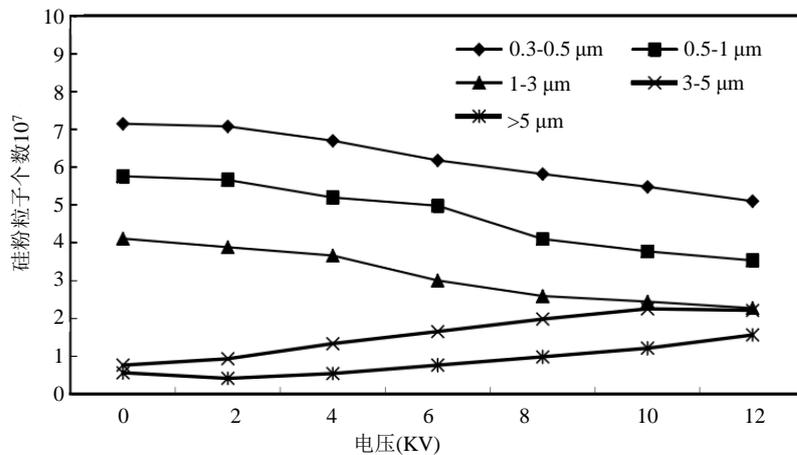


Figure 4. Curve: Silicon powder particle number variation of electric coagulation  
图 4. 凝并区硅粉粒子数目变化曲线

## 5. 结论

电凝并技术是能够高效率脱出 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 等可吸入颗粒物的控制方法之一。电凝并比其他凝并技术更能有效的使尘粒荷电凝并。电凝并技术可以现有的其他除尘技术联合使用能够提高除尘效率。本文主要研究了如何提高电凝并的脱除的因素分析。

由尘粒的荷电量公式可以得出粒径与尘粒荷电量成正相关。随着粒径增大, 荷电量也随之增大, 粒子在交变电场受到的力就越大, 振幅就越剧烈, 粒子之间就越容易碰撞凝并。

不同物质的尘粒有着不同的物理性质。在荷电电源和凝并电压下会有不同的阻碍形式。烟尘的相对电介常数越大, 粒子越容易发生极化, 在交变电场的作用下, 极易与周围极化粒子结合, 形成灰串珠, 被脱除。

## 参考文献 (References)

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013: 309-323.
- [2] 熊桂龙, 辛成运, 杨林军, 等. 蒸汽相变协同湿法烟气脱硫系统中烟气温湿度变化特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 18-24.
- [3] 中国煤炭新闻网. 2015 年全国原煤产量回顾及展望[EB/OL]. <http://www.cwestc.com/newshtml/2016-2-6/400707.shtml>, 2016-02-06.
- [4] 潘寂, 主编. 教育心理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1996: 26-35.
- [5] 中华人民共和国教育部制订. 全日制义务教育 普通高级中学体育与健康课程标准(实验稿) [S]. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 95-101.
- [6] Alvarez, R., Weilenmann, M. and Favez, J.Y. (2008) Evidence of Increased Mass Fraction of NO<sub>2</sub> within Real-World NO<sub>x</sub> Emissions of Modern Light Vehicles Derived from a Reliable Online Measuring Method. *Atmospheric Environment*, **42**, 4699-4707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.046>
- [7] Westerdahl, D., Wang, X., Pan, X. and Zhang, K.M. (2009) Characterization of On-Road Vehicle Emission Factors and Micro Environmental Air Quality in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, **43**, 697-705. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.042>
- [8] Zhu, R., Guo, M. and Ouyang, F. (2008) Simultaneous Removal of Soot and NO<sub>x</sub> over Ir-Based Catalysts in the Presence of Oxygen. *Catalysis Today*, **139**, 146-151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.017>
- [9] Mizuno, A. (2000) Electrostatic Precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **7**, 615-624. <http://dx.doi.org/10.1109/94.879357>
- [10] Ohyama, R., Urashima, K. and Chang, J.S. (2000) Numerical Modelling of Wire-Plate Electrostatic Precipitator. *Journal of Aerosol Science*, **31**, S162-S163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(00\)90169-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(00)90169-1)
- [11] Watanabe, T., et al. (1993) Pore. of 5ht Intemational Coneferneon ESP, Cl.
- [12] 唐敏康. 电除尘器中亚微粒子凝冰激励的研究[J]. 工业安全与防尘, 1995(6): 1-5.
- [13] Knazawa, S., Ohokubo, T., Nomoto, K. and Adachi, T. (1993) Submicron Particle Agglomeration and Precipitation by Using a Bipolar Charging Method. *Journal of Electrostatics*, **29**, 193-209.
- [14] 向晓东, 陈宝智, 张国权. 荷电粉尘在交变电场中的凝冰与收集[J]. 东北大学学报, 1999, 20(6): 615-618.
- [15] 王连泽, 贺美陆, 孟亚力. 双极荷电粉尘颗粒的初步研究[J]. 环境工程, 2002, 20(5): 31-33.
- [16] 尚伟. 在交变电场中粉尘粒子荷电凝并的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2009.
- [17] 介电性能[EB/OL]. [http://baike.baidu.com/link?url=Df8DGE5WqGtHaMIxK0jRA5DnZvtVBTsbPN\\_Jrl5u0u99Lod2brvRJD15yB0Gy3kQOvI7c73tM-wV0k5PPInvoa](http://baike.baidu.com/link?url=Df8DGE5WqGtHaMIxK0jRA5DnZvtVBTsbPN_Jrl5u0u99Lod2brvRJD15yB0Gy3kQOvI7c73tM-wV0k5PPInvoa)
- [18] 刘金祥, 国君杰. 用电介质极化理论分析粒子的场荷电问题[J]. 热能动力工程, 1999, 14(3): 179-181.
- [19] 唐敏康, 龚建宝, 刘祖文, 等. 呼吸性粉尘电极化产生凝并行为的机理[J]. 南方冶金学院学报, 1997(2): 92-96.
- [20] 刘栋, 白敏冬, 王永伟, 白希尧. 交变电场频率对荷电微细粉尘凝并影响的实验研究[J]. 科技导报, 2009, 27(5): 61-64.
- [21] 陈旺生, 向晓东, 幸福堂. 交变电场频率对电凝并影响的理论及实验研究[J]. 武汉冶金科技大学学报(自然科学

版), 1999, 12(4): 342-344.

[22] 王少雷. 电除尘器烟道微细粉尘的荷电凝并研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2010.

[23] 白敏葑, 邱秀梅, 杨波, 毛程奇. 模拟烟道中粉尘粒子的荷电凝并实验研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 610-614.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>