

线管式热电子发射高温静电除尘器的数值研究

余旭平¹, 代维敏², 席剑飞², 顾中铸²

(1. 厦门保全电子有限公司, 福建 厦门 361012)

(2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 热电子发射式高温静电除尘技术是一种新颖的高温烟气净化方法, 与传统的电晕式静电除尘技术不同, 其以稀土钨制成的阴极在高温下发射电子的方式使烟气中的粉尘荷电, 然后依靠电场力的作用将其捕集. 本文建立了线管式热电子发射式高温静电除尘器除尘过程数学物理模型, 模型涵盖了颗粒荷电方程和颗粒浓度场. 利用 MATLAB 编写粉尘荷电量和除尘效率的计算程序, 并进行数值计算, 得到不同条件下粉尘荷电量和除尘效率, 系统地研究了各种影响因素与除尘效率的关系, 发现降低烟气进口流速、提高温度及收尘电压、减小除尘管半径, 都可以提高除尘效率.

[关键词] 热电子发射, 高温静电除尘, 数值计算, 除尘效率

[中图分类号] TU834.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)02-0042-07

Numerical Investigation of Line Tube Thermal Emission Style High-Temperature Electrostatic Precipitator

Yu Xuping¹, Dai Weimin², Xi Jianfei², Gu Zhongzhu²

(1. Xiamen Security Electronic Co., Ltd, Xiamen 361012, China)

(2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The thermal emission style high-temperature electrostatic precipitation is an innovative technique for cleaning up high-pressure hot flue gases. It utilizes the negative electrode made of tungsten doped with rare earth oxides which emits a large number of electrons when heated, instead of the corona discharge in traditional ESP, to charge dust particles. The charged particulate is collected by grounded plates under the action of the electric field. This article has established a dust collection mathematical and physical model of the wire-pipe thermal emission style high-temperature electrostatic precipitation, which has covered the particle charging equation, the electric field equation, the flow field and the dust pellet density field, compiled computational procedure of the dust particle charged quantity and the dust removal efficiency using MATLAB, and carried on the numerical calculus, obtained dust electrically charged quantity and dust removal efficiency under the dissimilar condition. This article has systematically studied each kind of influencing factor and the dust removal efficiency relationship, and quantitative pointed out: to reduce the flue gas flow rate of imports, to enhance the temperature and the particle charged area voltage and the dust removal area voltage, to increase the dust removal area length, to reduce dust removal tube's radius, may obviously raise its particle collection efficiency.

Key words: thermal emission, high-temperature electrostatic precipitation, numerical simulation

热电子发射^[1-2]是指通过加热给予电子足够的能量, 使电子能够克服固体-真空势垒逸出表面的物理过程. 能够提供有效热电子发射的材料称为热电子发射材料. 迄今为止, 只有东南大学和南京师范大学将热电子发射技术应用于静电除尘领域, 在国外未见相关研究报道. 魏启东等^[3-8]进行了板式无电晕高温静电除尘器的发射特性和除尘实验研究数值计算. 实验表明, 在高温(大于 800 ℃)条件下, 由阴极材料热发射所获得的电流密度比采用常规电晕方式所得到的电流密度至少高 2 个数量级. 提高温度可明显改善其荷电性能, 提高除尘效率. 较高的烟气温度(700~830 ℃)下, 除尘效率达 90%~99%. 在实验基础上, 建立

收稿日期: 2016-09-15.

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB470011)、南京师范大学引进人才科研启动项目(184080H202B53).

通讯联系人: 席剑飞, 博士, 讲师, 研究方向: 燃烧理论与污染控制. E-mail: jianfeixi@njnu.edu.cn

了气固两相流的数值模型,并计算不同工况下的除尘效率,其结果与实验值基本吻合.此外,刘孝国^[9]建立板式的层流除尘理论模型,并进行了计算,得出结果与实验值亦能很好吻合.总之,无电晕式高温静电除尘器的研究目前仅涉及板式除尘器,而且均处于实验室研究阶段,有许多问题还未解决.本文基于前期的静态实验研究,对管式稀土钨热电子发射高温静电除尘器除尘性能进行理论分析和数值计算,为后续的除尘试验研究以及进一步开发无电晕式静电除尘器提供理论依据,具有重要意义.

1 数学建模

模拟对象为一荷电和收尘相分离的双区无电晕式静电除尘器,有关结构及其物理模型详见文献[8].本文使用有限差分法并借助 MATLAB 进行编程,实现电场、流场、浓度场的数值计算.

1.1 网格划分

对管式除尘器,设其长度为 L ,管径为 R ,阴极线半径为 r_0 ,以此管立式除尘器作为研究的物理模型,此模型是轴对称的,选取轴对称的一侧平面区域作为计算区域.本文在轴向和径向均采用均匀网格,即把 L 分为 k 等分, r_0 到 R 划分为 n 等分,于是把整个计算区域划分为 $k \times n$ 个网格.网格划分如图 1.

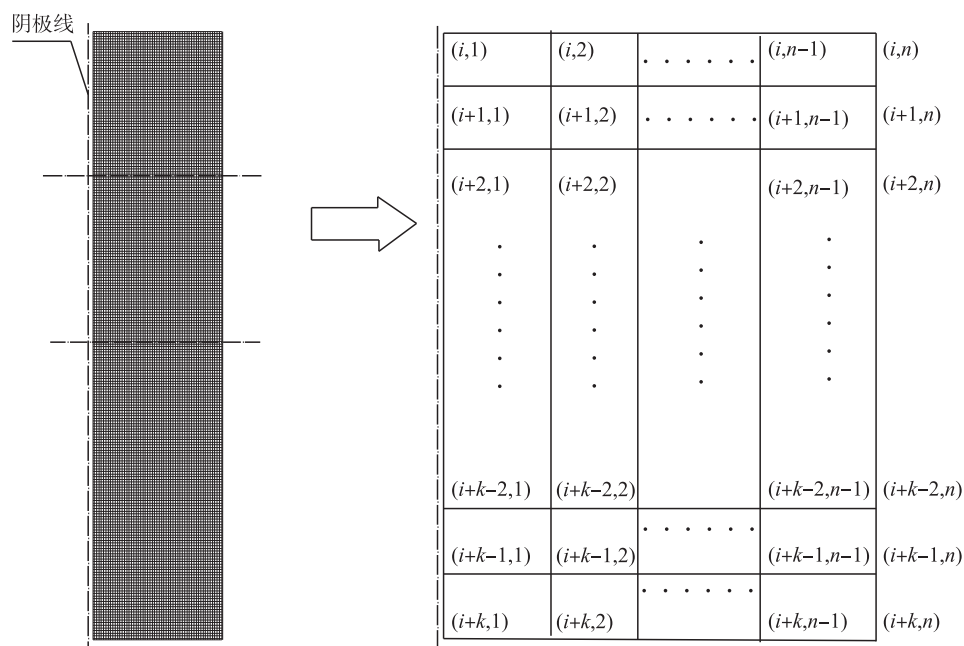


图 1 计算网格划分

Fig. 1 Mesh partition

1.2 荷电区空间离子密度的计算模型

无尘状态时,在设定工况下,测试获得离子电流 j ,从而推算离子密度 N_0 .

$$N_0 = \frac{j}{ekE} \quad (1)$$

式中, j 为测试的阴极发射电流密度 (A/m^2), e 为电子电量 ($1.6 \times 10^{-19} C$), E 为荷电区电场强度 (V/m), N_0 为空间离子密度 (个/ m), k 为离子迁移率 ($m^2/(s \cdot V)$).

1.3 尘粒荷电量计算模型

对于 $d_p > 0.5 \mu m$ 的微粒,以电场荷电为主,在时间 t 内粒子获得的电荷 q_f 为:

$$q_f = 3\pi\epsilon_0 E d_p^2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + 2} \right). \quad (2)$$

式中, ϵ 为粒子相对介电常数,取 $\epsilon = 5.5$, ϵ_0 为真空介电常数,为 $8.85 \times 10^{-12} F/m$, E 为荷电区电场强度 (V/m), d_p 为粒子直径 (m).

对 $d_p < 0.15 \mu m$ 的微粒,则以扩散荷电为主,在时间 t 内粒子获得的电荷 q_k 可由下式计算:

$$q_k = \frac{\pi \varepsilon_0 k_b T d_p}{e} \ln \left(1 + \frac{e^2 N_0 d_p t}{2 \varepsilon_0 \sqrt{2 m \pi k_b T}} \right). \quad (3)$$

式中, k_b 为波尔兹曼常数, 为 1.38×10^{-23} J/K, T 为烟气温度的 (K), t 为荷电时间, 即尘粒穿越荷电区所需的时间 (s), m 为离子的质量, 取 5.3×10^{-26} kg.

对于粒径介于 $0.15 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间的粒子, 则需要同时考虑这两种过程.

$$q = q_f + q_k. \quad (4)$$

式中, q 为综合荷电量 (c).

1.4 浓度场分布计算模型

将粒子运动视为稳定流动, 粒子在切线方向上运动速度 u_θ 与径向驱进速度 w_r 及气流 x 方向上的速度 u 相比小得多, 故在切向上的速度 u_θ 可以忽略不计. 因此, 可以简化为二维平面问题加以研究^[10].

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + w_r \frac{\partial C}{\partial r} = 0. \quad (5)$$

其边界条件:

$$\begin{cases} C = C_0, & x = 0, \\ C = 0, & r = 0. \end{cases}$$

式中, C_0 为除尘器进口浓度 (kg/m^3), w_r 为轴向驱进速度 (m/s), u_θ 为切向速度 (m/s), u 为微元体内浓度为 C 的粒子在 x 方向的速度 (m/s), C 为粉尘浓度 (kg/m^3), u 为 x 方向的气流速度 (m/s).

1.5 除尘效率计算

除尘器的除尘效率是除尘性能好坏的综合性指标, 进口处颗粒粒径相同时, 除尘效率的表达式如下:

$$\eta = 1 - C_1 / C_0. \quad (6)$$

式中, C_0 为进口处粉尘颗粒平均质量浓度 (kg/m^3), C_1 为出口处粉尘颗粒平均质量浓度 (kg/m^3).

进口处颗粒粒径不相同, 可先求出分级除尘效率:

$$\eta_k = 1 - C_1^k / C_0^k. \quad (7)$$

式中, C_0^k 、 C_1^k 为第 k 种粒径的粉尘颗粒的进口、出口平均质量浓度 (kg/m^3).

再求出总的除尘效率:

$$\eta = \sum_{k=1}^m D_k \cdot \eta_k. \quad (8)$$

式中, D_k 为除尘器入口处第 k 种粒子的分布频率.

2 计算结果及分析

2.1 荷电区粉尘颗粒荷电量的计算结果

根据以上数学模型, 用 MATLAB 编程, 在除尘器管径为 0.05 m 、长度为 0.5 m 、烟气流速为 $1 \text{ m}/\text{s}$ 时计算结果和分析如下.

2.1.1 粉尘粒径对粉尘颗粒荷电量的影响

表 1 是荷电电压为 900 V , 荷电温度为 1373 K 时, 不同尘粒粒径的粉尘电场荷电量和扩散荷电量.

表 1 不同尘粒粒径的粉尘电场荷电量和扩散荷电量

Table 1 Electric field charge and diffusion charge of dust with different particle sizes

尘粒直径 (μm)	0.1	0.2	0.5	1	5	10	50
电场荷电 (C)	1.62×10^{-20}	6.48×10^{-20}	4.05×10^{-19}	1.62×10^{-18}	4.05×10^{-17}	1.62×10^{-16}	4.05×10^{-15}
扩散荷电 (C)	6.36×10^{-18}	1.40×10^{-17}	3.90×10^{-17}	8.41×10^{-17}	4.92×10^{-16}	1.05×10^{-15}	5.94×10^{-15}

由表 1 可以看出粉尘颗粒粒径越大, 其电场荷电量和扩散荷电量均增大. 对于粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 的尘粒, 扩散荷电起主要作用, 此时扩散荷电量比电场荷电量大 2 个数量级; 而对粒径不小于 $1 \mu\text{m}$ 的尘粒, 电场荷电量和扩散荷电量相差不多, 所以必须同时考虑电场荷电和扩散荷电作用. 这与传统电晕式静电除尘器中粉尘荷电不太一样, 主要由两方面的原因引起. 一是传统的电晕式静电除尘器中含尘气体的温度

较低,为 $100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,而表1中所对应的热电子发射高温静电除尘器的工作温度很高,为 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. 根据扩散荷电量的计算公式(式(3))可知,温度越高,扩散荷电量越大. 二是传统电晕式静电除尘器荷电区的电压高达 $50\sim 100\text{ kV}$,而本文中热电子发射式静电除尘器的荷电区电压较低,仅为 900 V ,所以其电场荷电量较小. 综合上述两方面的因素,使得表1中不同粒径下的扩散荷电量始终占据较大的比例.

2.1.2 管径对粉尘颗粒荷电量的影响

图2和图3给出了不同荷电区温度、荷电电压时,即不同荷电区荷电密度下, $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 粉尘颗粒荷电量. 由图可知荷电密度越大,粉尘荷电量越大;且大颗粒荷电量较大,细小颗粒荷电量较小;随管径的增大,细小颗粒荷电量增大,而大颗粒荷电量先减小后增大. 这是因为:(1)大颗粒荷电是电场荷电和扩散荷电相互作用的结果. 发射极附近,电场强度很大,此时电场荷电起主要作用,在一定范围内,随着管径的增大,电场强度逐渐减小,电场荷电量减小,尘粒总荷电量减小. 而当管径达到一定程度时,场强变小,扩散荷电起主要作用,扩散荷电与空间电荷密度成正比,而空间电荷密度与电场强度成反比,所以进一步增大管径,尘粒荷电量随之增加;(2)细小颗粒荷电主要为扩散荷电,扩散荷电与空间电荷密度成正比,而空间电荷密度与电场强度成反比,故随管径的增大,扩散荷电量增大,总荷电量增大.

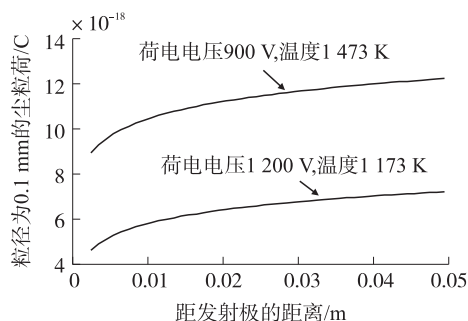


图2 细颗粒粉尘的荷电量随管径的变化情况

Fig. 2 Variation of charge quantity of fine dust with pipe diameter

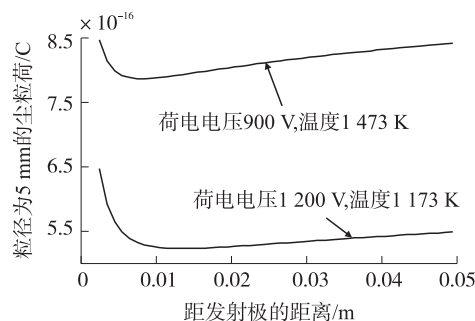


图3 大颗粒粉尘的荷电量随管径的变化情况

Fig. 3 Variation of charge quantity of thick dust with pipe diameter

2.1.3 荷电区长度对粉尘颗粒荷电量的影响

图4和图5给出了不同荷电区温度、电压时,即不同荷电区荷电密度下, $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 粉尘颗粒荷电量随荷电区长度的变化. 由图4可知:(1)在不同电流密度下,细小粉尘荷电量均随荷电区长度的增加而增加,这是因为细粉尘荷电主要为扩散荷电,其荷电量随时间的增大而增加,但增速逐渐减小,最终趋于饱和.(2)不同电流密度下,细粉尘的最终荷电量相差较大,电流密度越大,粉尘荷电量越大,这是因为空间电荷密度与电流密度成正比.

由图5可知,对大颗粒粉尘来说,粉尘荷电量亦随荷电区长度的增加而增加,但相比细小粉尘来说,荷电量达到饱和状态要稍快些,这是因为大颗粒粉尘荷电是电场荷电和扩散荷电综合作用的结果.

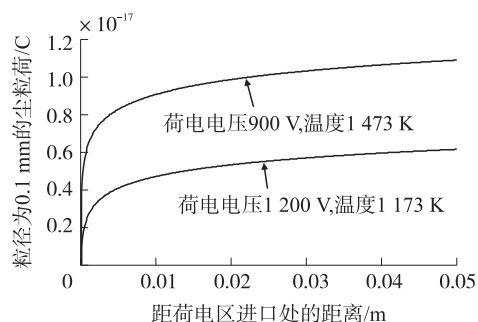


图4 细颗粒粉尘的荷电量随荷电区长度的变化情况

Fig. 4 Variation of charge quantity of fine dust with charge zone length

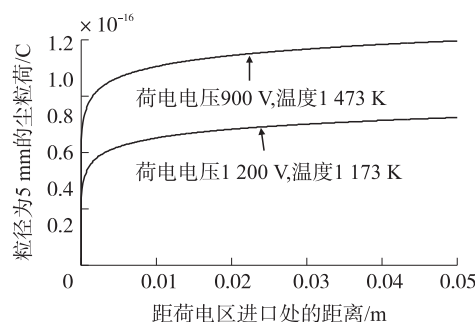


图5 大颗粒粉尘的荷电量随荷电区长度的变化情况

Fig. 5 Variation of charge quantity of thick dust with charge zone length

2.1.4 温度对粉尘颗粒荷电量的影响

在荷电电压为 700 V 和 $1\ 200\text{ V}$ 时, $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 粉尘颗粒荷电量随荷电区温度的变化规律如图6和

图 7 所示. 由图可以看出两种粒径的粉尘颗粒荷电量随温度的变化均基本呈正线性关系. 由于细小粉尘荷电属于扩散荷电, 温度升高, 电流密度增加, 故空间电荷密度增加, 其扩散荷电量亦增大. 而大颗粒粉尘荷电量虽然由电场荷电和扩散荷电综合作用, 但是电场荷电与温度无关, 而扩散荷电与温度基本呈正线性关系, 所以随温度的升高, 其总荷电量增加.

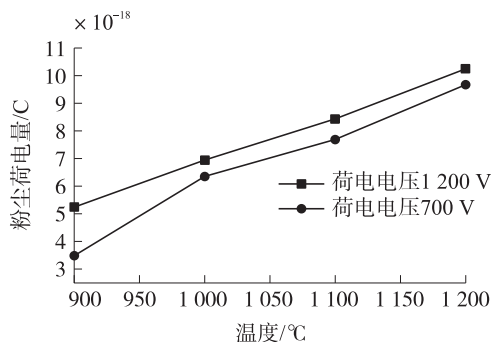


图 6 粒径为 0.1 μm 粉尘荷电量随温度的变化情况

Fig. 6 Variation of charge quantity of 0.1 μm dust with temperature

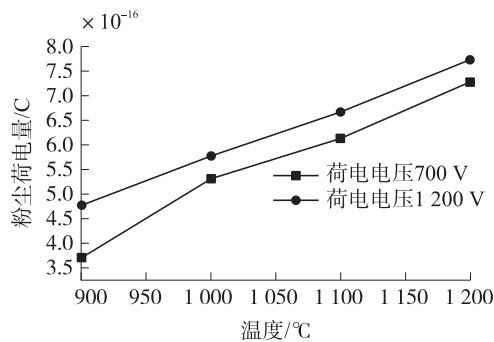


图 7 粒径为 5 μm 粉尘荷电量随温度的变化情况

Fig. 7 Variation of charge quantity of 5 μm dust with temperature

2.1.5 荷电电压对粉尘颗粒荷电量的影响

不同荷电温度下, 0.1 μm 、5 μm 粉尘颗粒荷电量随荷电区电压的变化规律如图 8 和图 9 所示. 从图可以看出, 粉尘荷电量随电压的增大而增加, 且细小粉尘颗粒荷电量随荷电区电压的增大基本呈指数形式增加. 这是因为荷电电压升高, 电流密度增加, 空间电荷密度亦升高, 从而扩散电荷量大大增加.

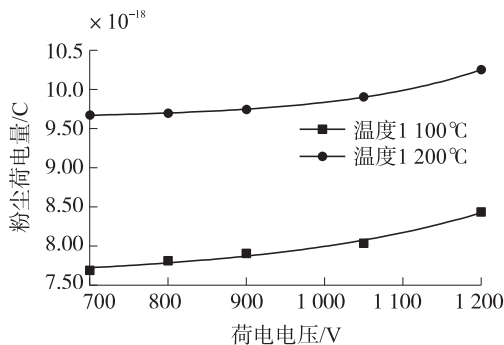


图 8 粒径为 0.1 μm 粉尘荷电量与电压的关系

Fig. 8 Variation of charge quantity of 0.1 μm dust with voltage

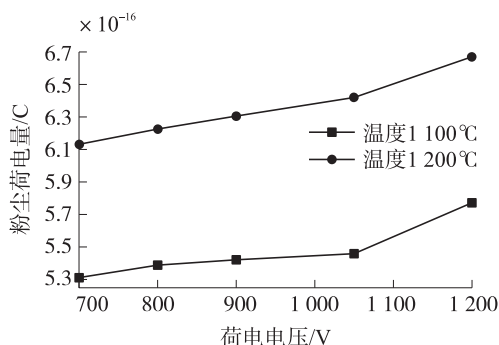


图 9 粒径为 5 μm 粉尘荷电量与电压的关系

Fig. 9 Variation of charge quantity of 5 μm dust with voltage

2.2 除尘效率计算结果及分析

粉尘的除尘效率与烟气流速、荷电区温度、除尘区电压、除尘器区管径等因素有关.

2.2.1 烟气流速的影响

在荷电区温度为 900 $^{\circ}\text{C}$, 荷电区电压为 1 200 V, 除尘区电压为 6 000 V, 烟气入口粉尘浓度 0.03 kg/m^3 , 除尘区长度为 1 m, 管径为 0.03 m 条件下, 图 10 给出了烟气流速与除尘效率的关系. 由图 10 可知, 随着流速的增大, 除尘效率降低. 这一结论和传统电除尘器的是一致的. 这是因为, 提高流速, 粉尘颗粒在荷电区的停留时间变短, 粉尘颗粒尤其是细小的粉尘颗粒荷电量减少, 使其在除尘区的驱进速度减小, 粉尘更难出去; 另外, 流速变大使得粉尘颗粒总速度与径向的夹角变大, 从而粉尘颗粒到达阳极壁的时间延长, 除尘效率降低.

2.2.2 荷电区温度的影响

在烟气流速为 1 m/s, 荷电区电压为 1 200 V, 除尘区电压为 6 000 V, 烟气入口粉尘浓度 0.03 kg/m^3 , 除尘区长度为 1 m, 管径为 0.03 m 工况下, 图 11 给出荷电区温度对除尘效率的影响关系图. 随着温度的增大, 粉尘尤其是细小粉尘的荷电量增大, 从而除尘效率随之变大. 另外, 温度升高, 烟气的粘度变大, 这将阻碍粉尘颗粒的运动, 对除尘效果不利. 总之, 除尘效率随温度的升高而增大.

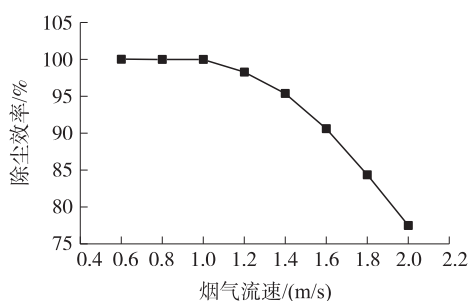


图 10 烟气流速对除尘效率的影响

Fig. 10 Effect of flue gas velocity on dust removal efficiency

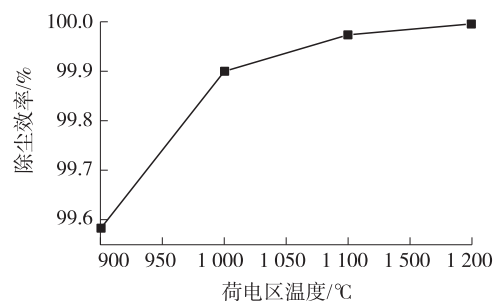


图 11 荷电区温度对除尘效率的影响

Fig. 11 Effect of dust area temperature on dust removal efficiency

2.2.3 除尘区电压的影响

在烟气流速为 1 m/s, 荷电区温度为 900 ℃, 荷电区电压为 1 200 V, 烟气入口粉尘浓度 0.03 kg/m³, 除尘区长度为 1 m, 管径为 0.03 m 条件下, 除尘区电压与除尘效率的关系如图 12. 根据数值计算的结果, 当除尘区电压为 5 000 V 时, 除尘效率为 98.49%, 当电压为 7 000 V 时, 除尘效率已达 99.90%, 当电压进一步提高到 10 000 V 时, 除尘效率几乎达到 100%. 可见, 随着除尘区电压的升高, 除尘效率不断增大, 这是由于提高电压, 粉尘颗粒的驱进速度增大, 缩短了粉尘颗粒在收尘区中的时间. 这一结论与传统的电除尘器相同.

2.2.4 除尘区管径的影响

在烟气流速为 1 m/s, 荷电区温度为 900 ℃, 荷电区电压 1 200 V, 除尘区电压为 6 000 V, 烟气入口粉尘浓度 0.03 kg/m³, 除尘区长度为 1 m, 管径为 0.03 m 条件下画出除尘效率随除尘区管半径长度的变化情况如图 13. 当管径小于 0.03 m 时, 除尘效率几乎均为 100%, 当管径大于 0.03 m 时, 除尘效率迅速下降, 管径为 0.04 m 时, 除尘效率低至 83%.

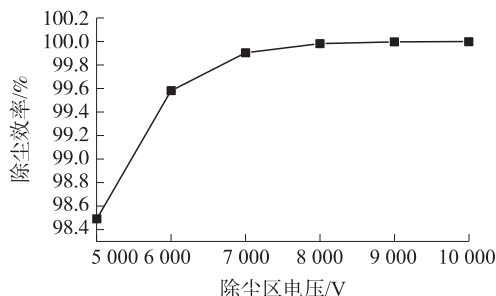


图 12 除尘区电压对除尘效率的影响

Fig. 12 Effect of dust area voltage on dust removal efficiency

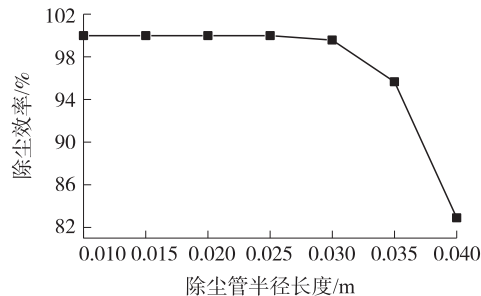


图 13 除尘管半径对除尘效率的影响

Fig. 13 Effect of dust pipe radius on dust removal efficiency

3 结语

(1) 与电晕式电除尘器荷电有所不同, 对于粒径小于 1 μm 的尘粒, 扩散荷电起主要作用, 而大于 1 μm 的尘粒荷电量由电场荷电和扩散荷电共同作用. 大颗粒粉尘荷电量随管径的增加先减小后增加, 而细小颗粒粉尘荷电量随管径的增大而增大. 粉尘荷电量随颗粒粒径、荷电区长度、荷电电压以及温度的增大而增加.

(2) 降低流速、提高温度与收尘电压、减小除尘管的半径, 都可以使其除尘效率显著提高. 当流速为 1 m/s, 烟气含尘浓度为 0.03 kg/m³, 除尘区长度为 1 m, 除尘管径为 0.03 m 时, 除尘效率可达 98% 以上. 这为管式热电子发射式高温电除尘器的设计提供了理论依据.

[参考文献] (References)

[1] 刘学慧. 阴极电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 8-10.

LIU X Q. Cathode electronics[M]. Beijing: Science Press, 1980: 8-10. (in Chinese)

- [2] 承欢,江剑平. 阴极电子学[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986:18-20.
CHENG H,JIANG J P. Cathode electronics [M]. Xi'an:Northwest Institute of Telecommunication Engineering Press,1986:18-20.(in Chinese)
- [3] 顾中铸,蔡崧,魏启东. 一种新颖的高温高压静电除尘技术[J]. 热能动力工程,2003,18(1):197-199.
GU Z Z,CAI S,WEI Q D. An innovative technology of high-temperature and high-pressure electrostatic precipitation[J]. Journal of engineering for thermal energy and power,2003,18(2):197-199.(in Chinese)
- [4] 顾中铸,魏启东,蔡崧. 温度对无电晕式静电除尘器除尘性能的影响[J]. 锅炉技术,2004,35(4):8-11.
GU Z Z,WEI Q D,CAI S. The influence of temperature on the non-corona electrostatic precipitation[J]. Boiler technology,2004,35(4):8-11.(in Chinese)
- [5] 顾中铸,魏启东,蔡崧. 无电晕式高温高压静电除尘器数值模拟[J]. 动力工程,2004,24(3):446-450.
GU Z Z,WEI Q D,CAI S. Numerical simulation for the non-corona high-temperature and high-pressure electrostatic precipitator[J]. Power engineering,2004,24(3):446-450.(in Chinese)
- [6] 顾中铸,魏启东,蔡崧. 无电晕式高温高压静电除尘器阴极电发射特性试验研究[J]. 热能动力工程,2000,15(2):144-147.
GU Z Z,WEI Q D,CAI S. Experimental study of the cathode-electron emission-characteristics of an electron-emission type high-temperature and high-pressure electrostatic precipitator[J]. Journal of engineering for thermal energy and power,2000,15(2):144-147.(in Chinese)
- [7] 杨亚平,黄蕙芬,魏启东,等. 无电晕式高温高压静电除尘器阴极电发射特性的试验研究[J]. 动力工程,2000,20(3):714-716.
YANG Y P,HUANG H F,WEI Q D,et al. Experimental research on the emittance characteristics of cathode in the cathode precipitator at high temperature and high pressure[J]. Power engineering,2000,20(3):714-716.(in Chinese)
- [8] 顾中铸. 无电晕式高温高压静电除尘器应用基础研究[D]. 南京:东南大学,2001.
GU Z Z. Fundamental researches on the non-corona high-temperature and high-pressure electrostatic precipitation [D]. Nanjing:Southeast University,2001.(in Chinese)
- [9] 刘孝国. 无电晕式高温高压静电除尘器的试验研究与模型计算[D]. 南京:东南大学,2000.
LIU X G. Experimental study and model calculation of high temperature and high voltage non-corona electrostatic precipitator[D]. Nanjing:Southeast University,2000.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]