

文章编号:2095-6134(2017)02-0172-07

温度对静电除尘器内颗粒受力影响的数值模拟*

毕文剑,李艳,罗坤[†],樊建人

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室,杭州310027)
(2016年4月19日收稿;2016年10月14日收修稿)

Bi W J, Li Y, Luo K, et al. Numerical simulation of temperature effect on particle forces in electrostatic precipitators [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(2):172-178.

摘要 应用计算流体力学方法对高温下的线板式静电除尘器进行数值模拟,建立综合考虑温度场、电场、流场和颗粒动力场的多场耦合模型。采用有限体积法对计算域进行离散进而求解电场,采用欧拉-拉格朗日方法求解气固两相流动。研究温度对于静电除尘器内颗粒受力的影响。结果表明:随着温度的升高,颗粒所受的静电力减小而 Saffman 升力、布朗力和曳力均增大;曳力随温度的增加速率比静电力变化快,这可能是导致高温下除尘效率降低的原因。

关键词 温度;静电除尘;电流体动力;颗粒受力

中图分类号:TK123 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2017.02.008

Numerical simulation of temperature effect on particle forces in electrostatic precipitators

BI Wenjian, LI Yan, LUO Kun, FAN Jianren

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract A computational fluid dynamics (CFD) model is proposed to describe the wire-plate electrostatic precipitator (ESP) in high temperature condition. In this model, the complex interactions among the electric field, temperature field, fluid dynamics, and the particulate flow are taken into account. The finite volume method is used to solve the electric field and the Euler-Lagrange model is used to describe particle-laden flows. The influences of high temperature on particle characteristics in ESP are investigated in the current simulation. Numerical results show that Coulomb force decreases while the Saffman lift force, Brownian force, and drag force increase with the temperature. Besides, the increasing rate of drag force is faster than that of Coulomb force, which may cause the reduced efficiencies at high temperature.

Keywords temperature; electrostatic precipitation; electro-hydrodynamic; particle force

高温下除尘过程普遍存在于工业生产中,例如整体煤气化联合循环(IGCC)和增压流化床燃烧联合循环(PFBC)过程。高温静电除尘器是满

足上述气体净化要求的重要设备。对高温静电除尘过程的研究有助于揭示除尘机理,也能为工程实际中除尘设备的设计和 optimization 提供指导。

* 环保部公益项目(201409008-4)和浙江省社会发展重大专项(2014C03025)资助

[†] 通信作者, E-mail: zjulk@zju.edu.cn

国内外对常温下静电除尘器内部的荷电多相流在数值计算方面进行了比较深入的研究。学者们对电场和流场的耦合计算^[1-4]、离子风的作用^[5]、荷电过程^[6-7]、细颗粒在耦合场中的分布^[8],以及颗粒与颗粒、颗粒与壁面直接相互作用对粉尘层行为的影响^[9]等方面进行了研究。Watanabe^[6]和Meroth等^[7]研究荷电颗粒在气流中的运动,但忽略了颗粒电场荷电对电势和离子荷电密度分布的影响。Cristina和Feliziani^[10]考虑电场荷电对计算的影响,并采用饱和荷电量作为颗粒的荷电量,但是由于颗粒是在流经电场时不断荷电的,饱和电量只是颗粒荷电量的粗略估计。Li等^[11]考虑温度对平板静电除尘的影响,研究温度对静电除尘器内流场特性、电场特性以及离子风效应的影响。然而,对于静电除尘器的研究大部分都局限于常温下,在高温下颗粒的行为还不清楚。本文的主要工作是建立静电除尘过程的多场耦合模型,研究平板静电除尘器在293~1273 K温度条件下的颗粒受力情况,分析颗粒行为特性。

1 数学模型

关于本文中所采用的数学模型和算法已经在前期研究^[11]中论述过,为保持论文的完整性,对其进行简单介绍。

1.1 气相控制方程

对于气相运动,采用雷诺平均方法(RANS)。对于稳态的湍流流动状态,其控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho u_i u_k - (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{Di} + (\rho_{ion} + \rho_{pc}) E_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_k} \right) + q_v, \quad (3)$$

其中: f_{Di} 是单位体积的曳力; ρ_{ion} 、 ρ_{pc} 分别是离子电荷密度和颗粒电荷密度; E_i 是电场强度分量; P 和 T 分别为流体的压力和温度; c_p 为流体的比热容; λ_t 是流体导热系数; q_v 表示由颗粒引起的体积热源。

1.2 电场控制方程

在线板式静电除尘器中,电场和离子荷电密度由泊松方程和电流连续性方程描述。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k^2} = - \frac{\rho_{ion} + \rho_{pc}}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \left[\rho_{ion} (k_{ion} E_k + u_k) - D_e \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_k} \right] = 0, \quad (5)$$

其中: φ 为电势; ε_0 为真空介电常数; k_{ion} 为离子迁移率; E_k 为场强在 x_k 方向上的分量; D_e 为离子的有效扩散系数; δ 为与标况下相比的相对密度 $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $P_0 = 101325 \text{ Pa}$ 。

1.3 颗粒荷电控制方程

在静电除尘器内某一点发生电场荷电需要满足一定的条件,电场荷电只发生在当前荷电量 q_p 小于饱和荷电量 q_s 时,饱和荷电量计算:

$$q_s = 3 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 E, \quad (6)$$

其中: ε_0 为真空介电常数; $\varepsilon_r = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}/(\text{v} \cdot \text{m})$; ε_r 为电介质(烟气)的相对介电常数; d_p 为颗粒直径。

颗粒电场荷电量随时间变化的关系式为

$$q_t = q_s \frac{1}{1 + \frac{\tau}{t}}, \quad (7)$$

其中: t 为时间, τ 为粒子荷电的时间常数(达到饱和荷电量一半时所用的时间)。

扩散荷电随时间的变化关系式用下式近似计算:

$$q = \frac{2\pi \varepsilon_0 d_p k_B T}{e} \ln \left(\frac{d_p \rho_{ion} e \bar{V}}{8 \varepsilon_0 k_B T} t + 1 \right), \quad (8)$$

其中: k_B 为 Boltzmann 常数, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; e 为基本电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; \bar{V} 为离子的均方根速度。

1.4 固相控制方程

本文采用拉格朗日法追踪颗粒。在气固两相流中,颗粒与流体进行着强烈的动量交换。在流体中运动颗粒受到的作用力通常包括:曳力、重力、浮力、Saffman升力、热泳力、压力梯度力和虚拟质量力等,如表1所示。静电除尘器内的颗粒还受到电场力的作用。详细的颗粒控制方程请参考文献[11]。

2 模型验证

2.1 计算模型

根据上述数学模型,本文基于计算流体力学 FLUENT 软件开发了适用于高温静电除尘器多物理耦合过程的三维数值模拟平台。本文研究的静电除尘器三维几何区域结构如图1所示。电除尘设备在长宽高方向上的尺寸分别为 $0.5 \text{ m} \times$

0.12 m × 0.24 m, 具有 3 个直径为 5 mm 的电晕极, 线间距为 0.1 m, 线板距(异极距)为 0.06 m。由于设备装置结构的对称性, 本文只研究静电除尘器结构的一半以减少计算量。

表 1 颗粒受力计算公式列表

Table 1 Calculation formula of the force acting on the particle

受力	计算公式
曳力	$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} (u - u_p)$
	$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda})$
电场力	$F_E = \frac{q_p E}{m_p}$
重力	$F_g = g$
浮力	$F_{Bu} = -\frac{\rho}{\rho_p} g$
Saffman 升力	$F_S = \frac{2Kv^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{ml})^{1/4}} (u - u_p)$
热泳力	$F_T = -D_{r,p} \frac{1}{m_p T} \nabla T$
压力梯度力	$F_p = \frac{\rho}{\rho_p} \frac{du}{dt}$
虚拟质量力	$F_V = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right)$

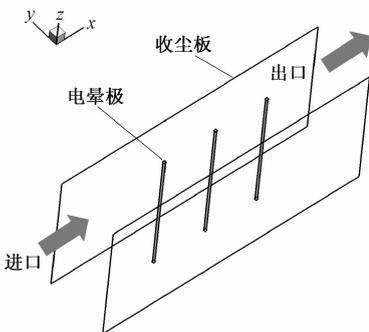


图 1 3-D 静电除尘器计算几何区域示意图
Fig. 1 Schematic of precipitator geometry model

入口气体质量流率为 0.034 7 kg/s (相当于 293 K 时 1.0 m/s, $Re = 8\ 840$), 喷入的粉尘粒子假设为球形, 粒径为 2.5 μm , 密度为 2 500 kg/m^3 , 相对介电常数为 4.0。颗粒以与气体相同的速度从入口进入, 颗粒质量浓度为 2 g/m^3 。运行电压取 79 192 V, 温度是 293 K (20 $^\circ\text{C}$)。把上述工况作为基础工况, 考虑 4 种有限体积网格数: 412 320, 654 610, 824 640, 1 236 960, 不同网格数的模型均对 0.1 μm 颗粒(其他条件同基本工况)在静电除尘器中的运动进行模拟计算, 得到相应的除尘效率分别为 77.4%, 82.5%, 82.7% 和

82.4%。由此可见, 当网格数由 654 610 增加到 1 236 960 时, 除尘效率的变化微小, 即认为此时网格对模拟结果的影响很小, 因此确定用于空间离散的网格节点数为 654 610 个。

2.2 边界条件

本文对三维静电除尘器内的颗粒的行为进行研究。主要从颗粒的荷电和受力来分析颗粒运动轨迹以及静电除尘器的除尘效率。工况参数列示见表 2。

表 2 温度对颗粒行为影响的模拟工况参数设置

Table 2 Simulation parameters for temperature effect on particle behavior

几何区域	
长度/m	0.5
宽度/m	0.12
高度/m	0.24
电晕极个数	3
电晕极直径/mm	5
异极距(线板距)/m	0.06
线间距/m	0.1
温度参数	
气相、固相温度/K	293, 373, 473, 573, 673, 773, 873, 973, 1 073, 1 173, 1 273
气相物性及模拟参数	
压力/atm	1
入口质量流率/(kg/s)	0.034 72 (293 K 时 1.0 m/s)
固相物性及模拟参数	
粒径/ μm	0.1, 1, 5, 10
密度/(kg/m^3)	2 500
相对介电常数	4.0
入口颗粒质量浓度/(g/m^3)	2
入口速度/(m/s)	与气体相同
电场参数	
运行电压/V	$U = U_j - (U_j - U_s) \times 0.1$

2.3 模型验证

为了验证本文数值模型的准确性, 将模拟结果与 Penny 和 Matick^[12] 的经典实验数据进行对比。实验装置采用的是 0.3 mm 的电晕线, 线板距 0.114 3 m, 线间距 0.152 4 m, 运行电压 43.5 kV。图 2 给出计算得到的沿 X 方向对应不同 Y 值时的电势分布。显然模拟的结果与实验数据吻合地很好。本文的模型能对电场进行很好的预测。

捕集效率的验证与 Kihm 等^[13] 的实验数据进行对比。实验设备是八线-线板式静电除尘器, 电晕线直径为 0.1 mm, 喷入的油酸液滴的粒径为 4 μm 。由图 3 可以看出, 模拟的结果与实验吻合得很好。

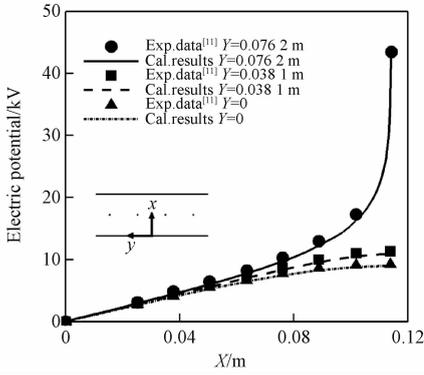


图 2 静电除尘器内电势特性曲线的模拟结果与 Penny 和 Matick 的实验数据的对比图

Fig.2 Comparison of electric potential characteristic curves between computational results and experimental data in the ESP

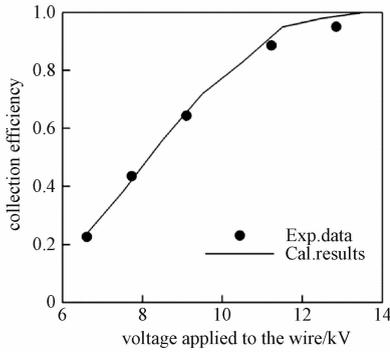


图 3 除尘效率的模拟结果与 Kihm 的实验数据对比图

Fig.3 Comparison of collection efficiencies between computational results and experimental data of Kihm

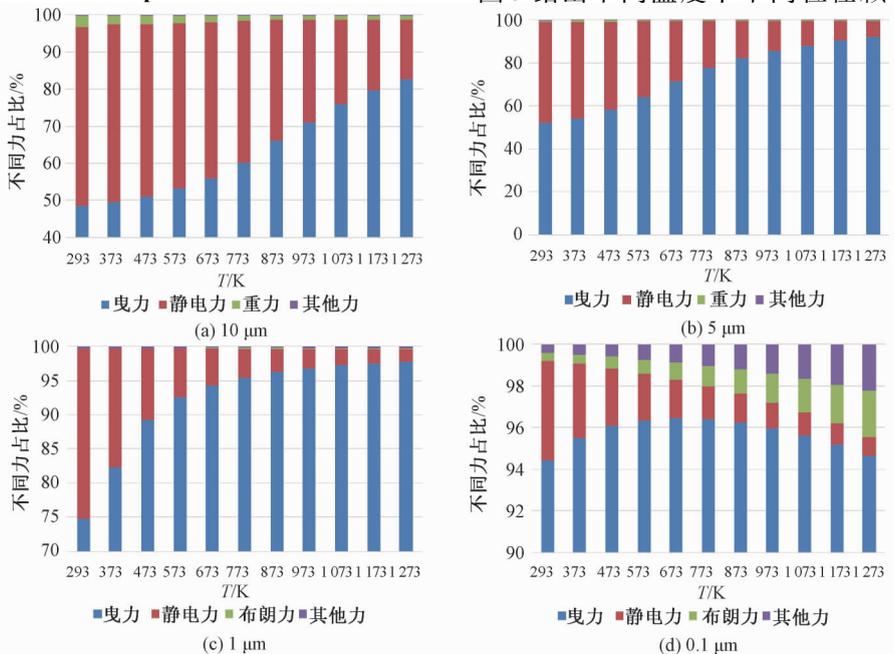


图 4 不同粒径颗粒在不同温度下的受力相对大小

Fig.4 Relative sizes of particle force at different temperatures at different particle diameters

3 结果与讨论

3.1 温度影响颗粒所受各力的相对大小

图 4 给出 4 种粒径颗粒在不同温度下的受力相对大小,及颗粒主要的 3 种受力的相对占比,从下到上依次表示:曳力、电场力、第 3 种主要受力(重力或布朗力)以及其他力之和。从图 4 可以看出曳力、静电力是颗粒的主要受力。其次,随着温度的升高,曳力占颗粒总受力的比例增加。即温度越高,流体对颗粒的运动的曳力作用越显著。对 10 μm 的颗粒,曳力和电场力比其他力大得多,主导颗粒的运动。随着温度的升高,重力所占占比减小,从 293 K 的 2.4% 到 1 273 K 的 0.5%。浮力、布朗力、Saffman 升力、热泳力、压力梯度力和虚拟质量力比重力小得多,在符合精度要求的条件下这些力可以忽略。其中,Saffman 升力随着温度的升高,比例增大,对运动的影响增加,在 1 073 K 时与重力达到同一数量级。Saffman 升力和布朗力在 293 ~ 1 273 K 的研究区间内随着温度的升高,增加一个数量级。而电场力随着颗粒荷电量和场强二者的减小而减小,同时,曳力因为气体黏度的增大而增大。

3.2 温度影响颗粒所受的电场力平均值

由于电场力和曳力对颗粒的运动过程起着重要作用,下面将分别研究二者随温度的变化规律。图 5 给出不同温度下不同粒径颗粒平均的电场

力。从图中可以看出,细颗粒的静电力明显小于粗颗粒,且粒径不同,其变化趋势也不一样。对于粗颗粒($10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$),静电力随着温度的升高先升高后降低;对于细颗粒($1\ \mu\text{m}$ 和 $0.1\ \mu\text{m}$),静电力随着温度的升高单调递减(除开头微增)。静电力主要受颗粒荷电量和场强的影响,其中颗粒荷电量与离子电荷密度、荷电时间有关。

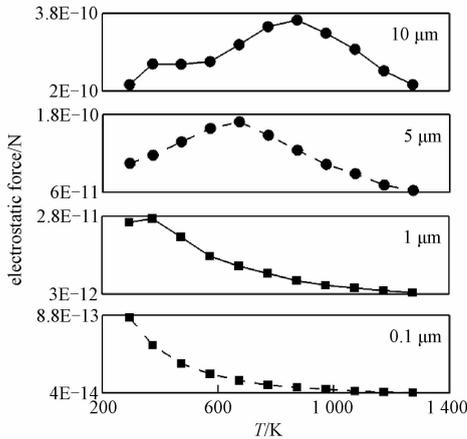


图 5 颗粒不同温度下平均电场力大小

Fig. 5 Variation in Coulomb force acting on the particle with temperature

场强和离子电荷密度都是随温度的增加而减小,因此,图 5 现象的主要原因是荷电时间随温度的变化的不同。粗颗粒在很短的时间内到达收尘

板,荷电时间较短。高温使颗粒在整个静电除尘器内的运动时间缩短,荷电时间不确定。对于很早就被捕获的颗粒来说,高速致使其被捕集推后,这样荷电时间延长;对于从出口逃逸走的颗粒来说,高温(高速)意味着荷电时间缩短。这就导致高温对不同粒径颗粒静电力变化趋势的影响也不同。

对于粗颗粒($10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$)而言,由于高温延长荷电时间,同时场强和离子电荷密度都随温度的增加而减小,静电力表现为先增大后减小。对于细颗粒($1\ \mu\text{m}$ 和 $0.1\ \mu\text{m}$)而言,高温(高速)缩短其荷电时间,同时场强和离子电荷密度都随着温度的增加而减小,静电力随着温度的升高而减小。以上不同粒径颗粒静电力的不同变化规律是由于高温的这两种影响机制共同决定的。

3.3 温度影响颗粒所受的曳力平均值

曳力是由于气固两相的速度差造成的作用项,速度高的一方会对速度低的一方产生拖曳作用,反过来,速度低的一方会阻碍速度高的一方。温度的变化对曳力影响很显著,图 6 给出 4 种不同粒径颗粒的曳力随温度的变化趋势。

不同粒径颗粒的曳力随温度变化规律不同,对于粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒,随着温度的升高,曳力增加;对于粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒,随着温度的升高,曳力先增加后减小;对于粒径为 $0.1\ \mu\text{m}$

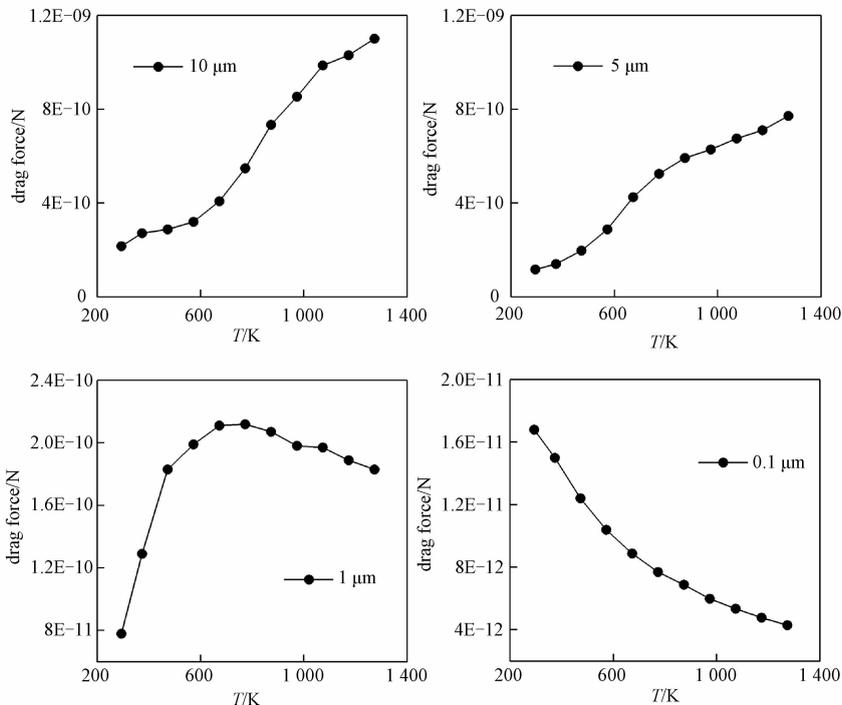


图 6 不同粒径颗粒的曳力随温度变化图

Fig. 6 Variation in drag force acting on the particles of different diameters with temperature

的颗粒,随着温度的升高,曳力减小。上述曳力大小随温度不同的演变规律是与曳力相关的参数随温度变化的综合作用的结果。

曳力 = 颗粒质量 × 曳力系数 × 相对速度,

$$F_D = m_p F_D(u - u_p), F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (9)$$

对于特定粒径的颗粒,曳力与曳力系数和相对速度大小有关。曳力系数采用的是考虑小颗粒

Cunningham 修正的曳力系数,其与气体的黏度和颗粒的粒径、密度以及 Cunningham 修正系数有关。随着温度的升高,气体黏度和 Cunningham 修正系数均增大,如图 7 所示。曳力系数的变化取决于二者的相对增加幅度。其中,Cunningham 修正系数本身是为修正小颗粒的曳力而引入的系数。从图中也可以看出,小颗粒(小于 1 μm)的 Cunningham 修正系数随温度的变化不能忽略。

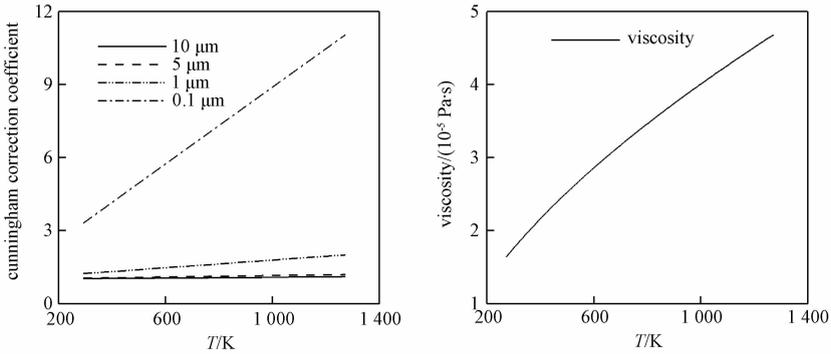


图 7 不同粒径颗粒的 Cunningham 修正系数随温度变化图

Fig. 7 Variation in Cunningham correction coefficient at different particle diameters with temperature

从物理意义上讲,之所以对小颗粒进行曳力修正是因为当颗粒很小,以至于同空气分子的尺寸可以相比较时,气体的连续性假设(斯托克斯定律假设气体为连续性介质)就不成立了。所以对曳力加一个修正系数,也称滑脱修正系数。由图 5 也可以看出,对于 5 μm 以上的颗粒 C_c 大约

为 1,而对于 1 μm 以下的颗粒,其修正是必要的。Cunningham 修正系数对不同粒径的敏感度不同,或者说粒径由大变小的过程中曳力变化从量变到质变从而导致不同粒径的不同曳力变化规律。不同粒径颗粒的曳力系数随温度的变化具体如图 8 所示。

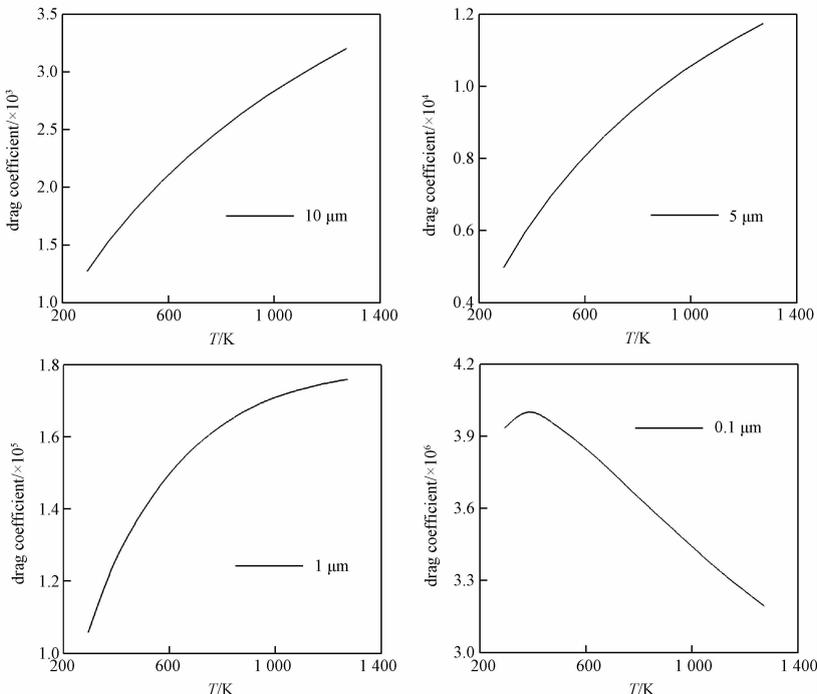


图 8 不同粒径颗粒的曳力系数随温度变化图

Fig. 8 Variation in drag coefficient at different particle diameters with temperature

从图 4 ~ 图 6 中可以看出电场力和曳力的大小在常温下相差不大,但是随着温度的升高,电场力明显小于曳力,其随温度变化的幅值也小于曳力变化幅值,即曳力随温度的增加速率比静电力变化快,这可能是导致高温下除尘效率降低的原因。

4 结论

本文对线板式静电除尘器内温度对颗粒荷电、受力的影响进行研究,最后分析除尘效率降低的影响。基于本文的研究结果,得到以下结论:

1)随着温度的升高,静电力减小而 Saffman 升力、布朗力以及曳力均增大。对于 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒,颗粒受到的力主要是静电力和曳力。对于微米及微米级以上的颗粒,重力不能忽略。对于亚微米颗粒,布朗扩散效应对颗粒的运动有着重要的影响,不能忽略。小颗粒和大颗粒在静电场中的受力不同,运动规律不同,一些适用于大颗粒的规律并不适用于小颗粒。曳力随温度的增加速率比静电力变化快。

2)随着温度的升高,电场力明显小于曳力,其随温度变化的幅值也小于曳力变化幅值,即曳力随温度的增加速率比静电力变化快,这可能是导致高温下除尘效率降低的原因。

参考文献

- [1] Lami E, Mattachini F, Gallimberti R, et al. A numerical procedure for computing the voltage-current characteristics in electrostatic precipitator configurations [J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 34(4): 385-399.
- [2] Neimarlija N, Demirdzic I, Muzaferija S. Finite volume method for calculation of electrostatic fields in electrostatic precipitators [J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(1): 37-47.
- [3] Schmid H J, Vogel L. On the modelling of the particle dynamics in electro-hydrodynamic flow-fields; I. Comparison of Eulerian and Lagrangian modelling approach [J]. *Powder Technology*, 2003, 135: 118-135.
- [4] Schmid H J. On the modelling of the particle dynamics in electro-hydrodynamic flow fields; II. Influences of inhomogeneities on electrostatic precipitation [J]. *Powder Technology*, 2003, 135: 136-149.
- [5] Kallio G A, Stock D E. Interaction of electrostatic and fluid dynamic fields in wire plate electrostatic precipitators [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 240: 133-166.
- [6] Watanabe T. Calculation of flyash particle motion and its migration velocity in an electrostatic precipitator [C]// *Industry Applications Society Annual Meeting. Conference Record of 1989 IEEE*, 1989: 2 126-2 136.
- [7] Meroth A M, Rastogi A K, Schwab A J. Numerical computation of the turbulent particulated flow in an electrostatic precipitator [C]// *International Symposium on Filtration and Separation of Fine Dust*. 1996.
- [8] Adamiak K, Atten P. Numerical simulation of the 2-D gas flow modified by the action of charged fine particles in a single-wire ESP [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics And Electrical Insulation*, 2009, 16(3): 608-614.
- [9] Guo B, Yang S Y, Xing M, et al. Toward the Development of an Integrated Multiscale Model for Electrostatic Precipitation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(33): 11 282-11 293.
- [10] Cristina S, Feliziani M. Calculation of ionized fields in DC electrostatic precipitators in the presence of dust and electric wind [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(5): 1 446-1 451.
- [11] Li Y, Zheng C, Luo K, et al. CFD simulation of high-temperature effect on EHD characteristics in a wire-plate electrostatic precipitator [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, 23: 633-640.
- [12] Penney G W, Matick R E. Potentials in D-C corona fields [J]. *Transactions of American Institute of Electrical Engineers*, 1960, 79: 91-99.
- [13] Kihm K D, Mitchner M, Self S A. Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in turbulent flow [J]. *Journal of Electrostatics*, 1987, 19(1): 21-32.