

高温橡胶废气在电滤装备中的流场特性研究

陈兆华^{1,2}, 张琳^{1,2*}, 许伟刚^{1,2}, 柳林^{1,2}, 陈俊³, 吴然¹, 谢钊¹

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州 213164;
3. 江苏中兴化工设备有限公司, 江苏 扬州 225225)

摘要:为研究板式电滤装备对橡胶行业燃烧所产生高温烟气的净化效果,建立了板式电滤装备的物理模型,分析板式电滤装备内部复杂的流场特性以及不同温度橡胶烟气对装备内部电场分布和净化效率的影响,利用FLUENT对烟气温度为323~673 K时板式电滤装备的收尘过程进行了数值模拟。结果表明,在相同放电电压下,烟气的温度越高,电荷密度越低,电场强度越小,烟气中细颗粒物所受静电力越小;温度升高会增强细颗粒物与流体间的相互作用,表现在气体粘度和颗粒曳力增大,从而降低了净化效率,尤其是对粒径在1 μm 以下的细微颗粒物,其净化效率减小得更为明显。

关键词:高温橡胶废气;多场耦合;流场特性;净化效率

中图分类号:O241.82;TQ330.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)00-0000-06

在石化、橡胶行业的生产过程中,会产生大量的高温废气^[1],尤其橡胶的燃烧会产生大量的高温烟气,其中含有大量的细微颗粒物,当其排放到大气中时会对人体产生重大的危害^[2],对这些细微颗粒物的净化处理是当今工业社会发展中急需解决的一项重大问题。板式电滤装备作为一种能够高效处理橡胶烟气的净化设备被广泛地应用在石化、橡胶等行业^[3-6]。

国内外学者对于常温常压下的板式电滤装备内部除尘机理、电流场计算等有了相对深入的研究。G. Xiao等^[7]在350~700 $^{\circ}\text{C}$ 高温下对线管式静电除尘器进行了相关的试验研究,发现温度的升高增大了净化装备的能耗。G. Xiao等^[8]研究了颗粒床技术对高温烟气的高效净化特性,但其会产生较大的床层阻力。A. Villot等^[9]研究了静电除尘器在510~680 $^{\circ}\text{C}$ 下对合成气的净化效果。朱唯卓等^[10]搭建了板式电滤装备试验系统,对高温下的颗粒脱除性能进行了相关试验研究。N. Noda等^[11]研究了温度对煤灰颗粒物电阻率等物理属性的影

响,发现温度的变化改变了飞灰颗粒物的电阻率,从而影响净化效率。N. Neimarlija等^[12]利用有限体积法离散电滤装备内部的空间电场,可以相对精确地计算出常温下电滤装备内部的电场分布。张琳等^[13]对管式电滤装备内部的复杂流场进行了相关的数值模拟研究,研究结果很好地反映了常温下管式电滤装备内介质宏观上的运动规律,但有关温度对电滤装备内部流场特性的影响研究还相对缺乏。何林菊等^[14]对低温省煤器内温度、密度及流速的变化规律及分布情况进行了数值模拟,准确地指导了电除尘器内部进出口烟道内导流、阻流板布置方案设计。

综上所述,国内外学者的试验研究发现温度对流场有影响,但是影响机制不甚清晰;前人对高温下电滤装备的数值研究还相对缺乏。本工作利用数值模拟深入研究装备内部介质的温度、放电电压、颗粒物大小等对净化效率的影响,计算在多场相互耦合作用下板式电滤装备对高温橡胶烟气的净化效率,以期更好地指导工业实践。

1 数学模型

高温烟气通过电滤装备时,其内部存在流场(气相)、电场、颗粒动力场(固相)、温度场相互耦合的复杂的场量,电滤装备中多场之间的相互作用关系如图1所示。电场通过电场力 F_e 影响颗粒

基金项目:江苏省科技厅重点研发计划项目(BE2016211);江苏省“六大人才高峰”创新人才团队项目(GDZB-CXTD-001);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_2085);江苏省大学生创新创业训练计划项目(201710292034Y)

作者简介:陈兆华(1992—),男,江苏兴化人,常州大学在读硕士研究生,主要从事过程强化与节能环保装备技术方面的研究。

*通信联系人(z3281315@yeah.net)

运动场,通过EHD流作用于气流场;气流场通过拖曳力 F_d 作用颗粒运动场,颗粒运动场通过空间电荷 q 的分布影响电场;温度的变化改变气流密度 ρ_g 、空气粘度 ν 和热导率 c 影响气流场,通过改变空间电荷密度 ρ 、离子迁移率 K 和起晕场强 E_j 来影响电场,通过改变空气曳力和电场力来影响颗粒运动场。

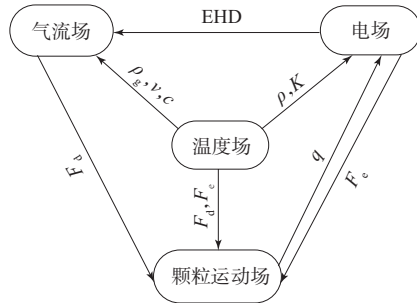


图1 电除尘装备中多场耦合关系

1.1 气体流场

含尘气流通过电除尘装备时,颗粒悬浮在气流中并随之运动。考虑到气体是连续相,气体流场可以采用湍流流动的Navier-Stokes方程进行描述。

在电除尘装备二维模型中,气体连续性方程可写为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_g v_g) = 0 \quad (1)$$

气体运动方程可写为

$$\rho_g u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + \rho_g v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 u_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_g}{\partial y^2} \right) + \frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (u_g - u_x) + \rho E \quad (2)$$

$$\rho_g u_g \frac{\partial v_g}{\partial x} + \rho_g v_g \frac{\partial v_g}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 v_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_g}{\partial y^2} \right) + \frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (v_g - v_x) + \rho E \quad (3)$$

式中, u_g 和 v_g 分别为气体 x 和 y 方向的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_x 和 v_x 分别为颗粒 x 和 y 方向的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P 为气体压强,Pa; μ 为气体动力粘性系数, $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; μ_t 为湍流动力粘性系数, $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; C_c 为Cunningham修正因数; ρ 为空间电荷密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$; E 为电场强度, $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$; d_p 为颗粒直径, m 。 $\frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (u_g - u_x)$, $\frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (v_g - v_x)$ 和 ρE 为源项。湍动能 k 方程和湍流耗散率 ε 方程选

用RNG k - ε 模型。

1.2 电场

1.2.1 电场方程

电除尘装备中由泊松方程和电流连续方程来描述电晕放电电场的分布特性:

$$\nabla U^2 = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

$$\nabla U \cdot \nabla \rho = \frac{\rho^2}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$E = -\nabla U \quad (6)$$

式中, U 为空间电势,kV; ε_0 为真空介电常数。

1.2.2 颗粒荷电方程

放电电极放电使周围气体电离成离子和电子,与烟气中的颗粒物碰撞使其附上电荷(电场荷电),或者通过自由扩散而附着在颗粒物上,使其带电(扩散荷电)。本工作研究的颗粒粒径大于 $1 \mu\text{m}$,电场荷电起主导作用,其荷电情形为

$$q(t) = 3\pi d_p^2 \varepsilon_0 E \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s + 2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\tau}{t}} \quad (7)$$

式中, ε_s 为相对介电常数, τ 为电场荷电时间。

1.3 颗粒动力场

颗粒运动方程可以很好地研究颗粒物的运动轨迹。颗粒主要受空气曳力、电场力和重力作用,颗粒作用力平衡方程如下:

$$m_p \frac{du_x}{dt} = q(t) E_x + \frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (u_g - u_x) \quad (8)$$

$$m_p \frac{dv_y}{dt} = \frac{m_p g_y (\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + \frac{3}{C_c} \pi \mu d_p (v_g - v_y) \quad (9)$$

式中, m_p 为颗粒质量,kg; E_x 为 x 轴方向电场强度; q 为颗粒物所带电荷,C; ρ_p 为颗粒物的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_g 为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 数值计算

2.1 物理模型与网格划分

如图2(a)所示,采用板式电除尘装备的一个基本工作单元作为研究对象,烟气从左端进入,从右端流出,上下为收尘极板,极板长(L)为1 000 mm,两极板距离(h)为300 mm,其中布置5根电极线,电极线间距离(S)为200 mm,电极线直径(D)为6 mm。考虑到模型的对称性,选取电极线上部分为计算区域,经网格无关性验证,将其划分为71 750

个控制体积。相应的模型与网格划分如图2(b)所示,其电极线周围由于受电场影响较大,应进行加密。

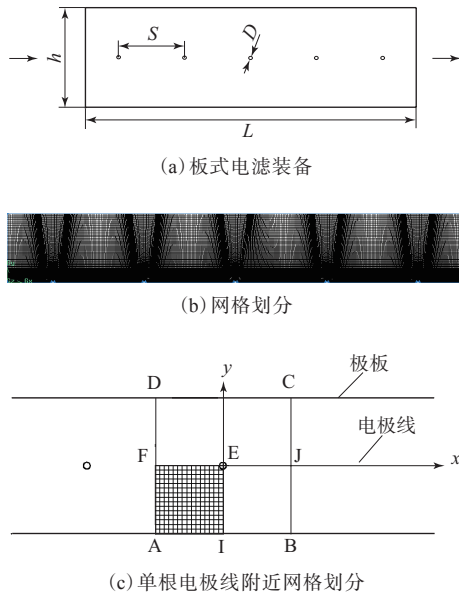


图2 物理模型及网格划分

2.2 边界条件

模型的边界条件设置如表1所示。

表1 边界条件

部 位	x方向速度	y方向速度	工作电势	颗粒相
入口	$u_g = C_1$	$v_g = 0$	0	Escape
出口	$P = 0$	$P = 0$	0	Escape
电极	无滑移	无滑移	0	Reflect
极板	无滑移	无滑移	C_2	Trap

2.3 计算方法

为了准确描述电滤装备内部气流流动特性和颗粒运动轨迹,利用FLUENT软件进行数值模拟,采用DPM模型模拟电滤装备内部固体相的运动情况。运行时,空气和固体颗粒分别作为连续相和离散相,采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型来计算电滤装备内部复杂的湍流流动,采用SIMPLE算法对控制容积进行数值求解,采用Lagrange颗粒轨迹法对颗粒运动进行追踪。利用用户自定义UDF编写程序,链接到FLUENT当中,通过数学方法简化电场,将其加载到整个模拟过程中。整个计算采用基于压力的算法进行求解,连续相和离散相的计算结果耦合迭代计算直到收敛。

3 试验验证

取本研究前3根电极线模拟数值,进行归一化处理。图3示出了正规化坐标系下不同 X' 值时,距离电极板5 mm处颗粒横向运动速度大小,模拟数值与N. Parasram^[15]试验值在两端具有较好的吻合性,而在电极线附近有相对的偏差,可能是由于颗粒湍流速度脉动的影响,随机轨道的模型导致了这些脉动,由此产生了一定的偏差。但其整体趋势及平均数值量大小与试验数值仍然比较吻合。

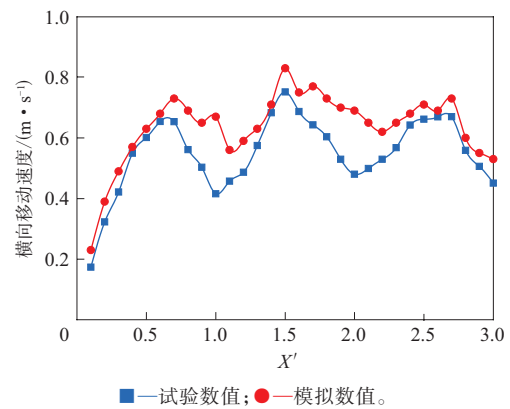


图3 颗粒横向运动速度与N. Parasram^[15]试验数值对比

将本研究模拟净化效率与K. D. Kihmet等^[16]试验数值进行比较,如图4所示。由于本研究收尘板较长,颗粒在装备中的运动时间较长,荷电时间也相对偏长,其除尘效率也相对偏高,但本研究模拟净化效率趋势与试验值趋势相对吻合,证明本研究模拟方法具有较高的可信度。

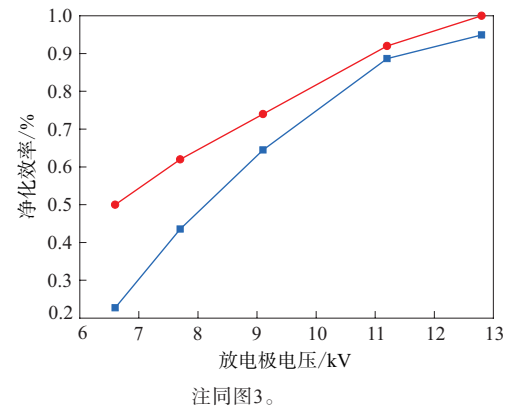


图4 净化效率模拟数值与K. D. Kihmet^[16]试验数值对比

4 数值模拟结果对比分析

4.1 电场的数值解

图5(a)和(b)分别为电滤装备放电电压在45 kV时通过耦合迭代泊松方程和电流连续性方程求解出的电滤装备内部电极线附近的电场强度和空间电荷密度分布, x 和 y 坐标分别表示图2(c)中距电极线的横向和纵向距离。由图5可知,电极线附近电场强度和空间电荷密度均为最大值,随着距离电极线距离的延长,电场强度迅速降低,电极线附近的电场强度梯度很大,空间电荷密度降低的趋势较为平缓,在极板位置趋近于零。

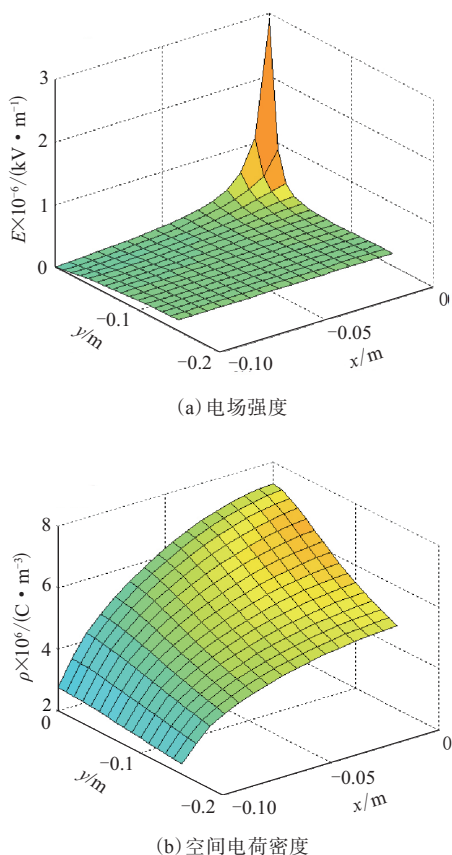


图5 电场强度和空间电荷密度分布

4.2 温度对电场的影响

图6为不同温度下电极线附近的电荷密度分布。由图6可知,在电极线周围,随着温度的升高,离子电荷密度越来越小,这是由于温度的升高减小了电滤装备内部空气的相对密度,且伴随着离子迁移率增大导致电荷密度的减小。此外,随着到电极线距离的延长,温度对离子电荷密度的影响逐渐变小。

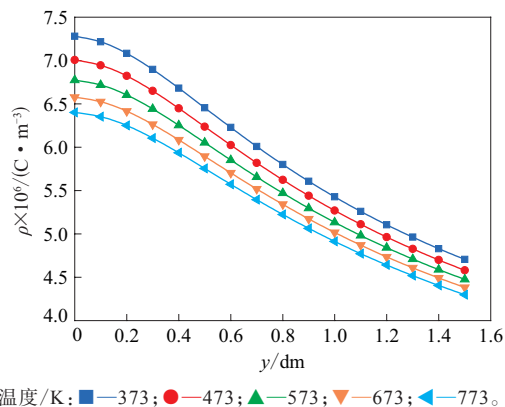


图6 温度对空间电荷密度的影响

图7示出了不同温度下电极线附近的电流密度(J)分布。由图7可知,在相同的放电电压下电流随着温度的升高而增大,这是由于温度的升高使装备内部空气分子的自由程增大,离子之间相互撞击的动能增大,使得分子更易被撞击电离出离子和电子,从而随着温度的升高,装备内部的电流密度也随之变大。

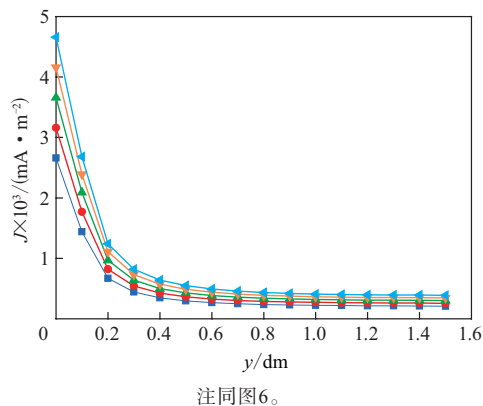


图7 温度对电流密度的影响

4.3 温度对除尘效率的影响

图8示出了不同温度下颗粒的运动轨迹。由图8可知,当低速含尘气流通过电滤装备时,随着温度的升高,气流中颗粒物所受电场力减小,空气曳力增大,颗粒运动轨迹发生变化,颗粒向收尘极板运动的时间延长,收尘效率降低。

图9示出了不同温度下电滤装备的净化效率。由图9可知,随着颗粒粒径的增大,除尘效率越来越高,对大颗粒而言,温度对除尘效率的影响较弱。当颗粒粒径大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,电滤装备对颗粒的除尘效果非常好,且不易受到温度的影响,在高温下除尘效率基本可达100%;当颗粒粒径变小至1

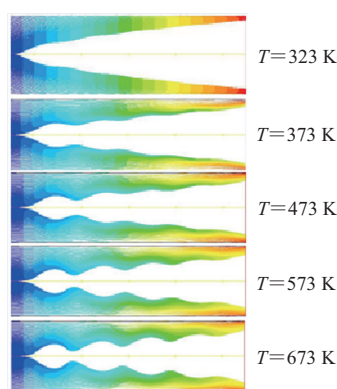


图8 温度对颗粒运动轨迹的影响

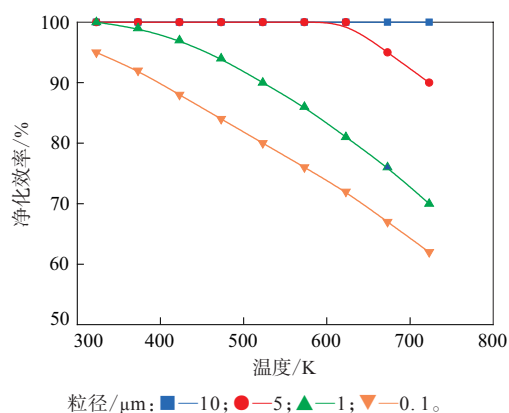


图9 温度对净化效率的影响

μm 以下时,随着温度的升高,电滤装备对细颗粒物的除尘效果越来越低,当温度到达723 K时,对粒径为0.1 μm 的细颗粒物的除尘效率降低到62.3%左右。

4.4 入口气流流速对除尘效率的影响

图10示出了不同入口气流流速下颗粒的运动轨迹,入口气流流速为 u_g 。由图10可知,随着气流流速的增大,颗粒向收尘极板偏移量明显减小。这是因为流速的增大缩短了细颗粒物所受电场作用的时间,从而降低了净化效率。

图11示出了不同入口气流流速下电滤装备的净化效率。由图11可知,相同入口气流流速下,放电极电压越小,电滤装备净化效率越低。在入口气流流速均为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,放电极电压由50 kV增大到60 kV时,可以将净化效率由58%提高到100%。在放电极电压为50 kV时,净化效率随着入口气流流速的增大而减小,净化效率由100%减小到28%,整体净化效率小于放电极电压较大(60和70 kV)时的情况。当放电极电压升至60 kV时,净

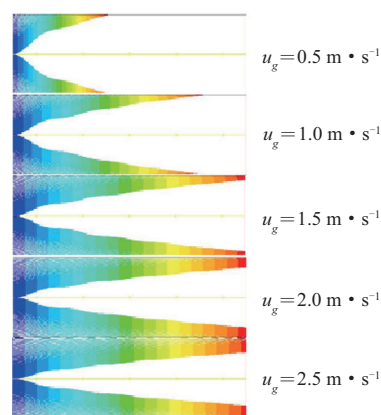


图10 入口空气流速对颗粒运动轨迹的影响

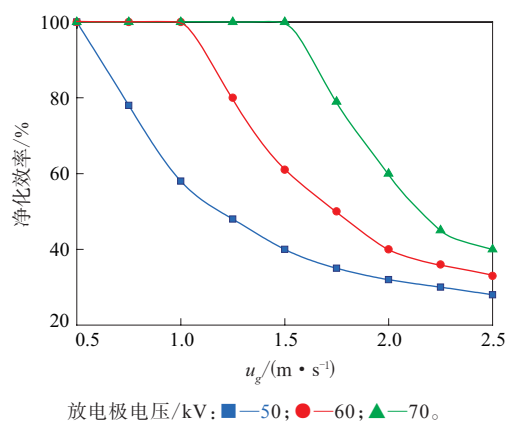


图11 入口空气流速对净化效率的影响

化效率随入口气流流速的增大而减小,效率由100%减小到33%,且当入口气流流速不大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净化效率最高,可以达到100%。

5 结论

(1) 温度场通过影响电场特性参数来影响电场分布,靠近电极处电场特性参数受温度影响较为明显,随着到电极距离的延长,其影响越来越小。温度的升高减小了颗粒所受库仑力,增大了颗粒所受牵引力,尤其是对 $1 \mu\text{m}$ 以下的细微颗粒物,温度对其所受各项力的影响更加明显。温度的升高还增大了湍流强度,从而增强了颗粒物与流体之间的相互作用,导致了颗粒物运动的波纹趋势的增大,从而降低了除尘效率。

(2) 电滤装备除尘效率随着内部气流流速的增大而减小,随着工作电压的增大而增大,电滤装备在工程实际使用时,可以控制进入除尘器的烟气流量,在允许的范围内提高放电极电压,以提高

对细微颗粒物的脱除效果。

参考文献:

- [1] 王新,方向晨,刘忠生. 橡胶废气催化燃烧处理技术[J]. 当代化工, 2009,38(2):191-193.
- [2] 施晓亮,吴高强,郑磊. 橡胶制品生产过程中废气污染物的排放系数[J]. 橡胶工业,2016,63(2):123-127.
- [3] 易红宏,郝吉明,段雷,等. 电厂除尘设施对PM10排放特征影响研究[J]. 环境科学,2006,27(10):1921-1927.
- [4] 赵磊,王新,刘忠生. 合成橡胶生产中废气的催化氧化处理技术[J]. 橡胶工业,2016,63(5):316-319.
- [5] 蒋存刚,李纪锦,李勇. 影响脉冲袋式除尘器清灰效果的因素探讨[J]. 橡胶工业,2007,54(1):49-51.
- [6] 李勇,张文青,刘伟冬,等. 不同入口导流板炭黑除尘器内部流场的模拟分析[J]. 橡胶工业,2017,64(12):749-753.
- [7] Xiao G, Wang X, Yang G, et al. An Experimental Investigation of Electrostatic Precipitation in a Wire-cylinder Configuration at High Temperatures[J]. Powder Technology, 2015, 269: 166-177.
- [8] Xiao G, Wang X H. Granular Bed Filter: A Promising Technology for Hot Gas Clean-up[J]. Powder Technology, 2013, 244: 93-99.
- [9] Villot A, Gonthier Y, Gonze E, et al. Separation of Particles from Syngas at High-temperatures with an Electrostatic Precipitator[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 92: 181-190.
- [10] 朱唯卓,沈之旸,严佩. 高温烟气中颗粒静电脱除特性的实验研究[J]. 中国环境科学,2016,36(4):1009-1016.
- [11] Noda N, Makino H. Influence of Operating Temperature on Performance of Electrostatic Precipitator for Pulverized Coal Combustion Boiler[J]. Advanced Powder Technology, 2010, 21(4): 495-499.
- [12] Neimarlija N, Demirdzic I, Muzaferija S. Finite Volume Method for Calculation of Electrostatic Fields in Electrostatic Precipitator[J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67(1): 37-47.
- [13] 张琳,陈兆华. 管式电滤装备内多场耦合数值研究[J]. 节能技术, 2016, 34(5): 431-435.
- [14] 何林菊,骆建友,赵胜清. 低温电除尘器数值模拟研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 391-394.
- [15] Parasram N. Partial Motion in Electrostatic Precipitators[D]. London: Imperial College of Science, 2001.
- [16] Kihmet K D, Mitchner M, Self S A. Comparison of Wire-plate and Plate-plate Electrostatic Precipitations in Turbulent Flow[J]. Journal of Electrostatics, 1987, 19(1): 21-32.

收稿日期: 2018-04-17

Flow Field Characteristics of High Temperature Rubber Flue Gas in Electrostatic Precipitator

CHEN Zhaohua¹, ZHANG Lin¹, XU Weigang¹, LIU Lin¹, CHEN Jun², WU Ran¹, XIE Xing¹

(1. Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Zhongxing Chemical Equipment Co., Ltd, Yangzhou 225115, China)

Abstract: In order to study the dust removal efficiency of high-temperature flue gas from rubber industry combustion in the plate electrostatic precipitator, the physical model of plate electrostatic precipitator was established, its internal complex flow field characteristics was studied, the influence of rubber flue gas in the electric field distribution and dust removal efficiency of the equipment at different temperatures were analyzed. Numerical simulation of the dust collection process for flue gas at 323~673 K was established by using Fluent software. The results showed that at the same discharge voltage, the higher the temperature, the lower the current density, the smaller the electric field strength, and electrostatic force of fine particles in flue gas. Elevated flue gas temperatures also enhanced the interaction between particles and fluids, manifested in the increase in gas viscosity and particles drag force, thereby reduced the purification efficiency, particularly the decrease of purification efficiency was more obvious when fine particles size was below 1 μm .

Key words: high temperature rubber flue gas; multi-field coupling; flow field characteristics; dust removal efficiency