

文章编号:1000-582X(2012)04-059-06

均流装置对垃圾焚烧烟气喷雾干燥净化影响

臧仁德,张 力,蒲 舸

(重庆大学 a. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室;b. 动力工程学院,重庆 400044)

摘 要:采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和颗粒轨道模型,研究了均流装置对垃圾焚烧后烟气喷雾干燥塔净化过程的影响,考察了均流装置对烟气流线、浆滴颗粒空间分布、塔内阻力特性、粘壁率以及净化效率的影响规律。结果表明,加装均流装置后,烟气在塔内分布更加均匀;塔内阻力随着均流装置开孔区域直径增加而逐渐减小;当均流装置的开孔区域直径从 0.2 m 增加到 0.7 m 时,浆滴的粘壁率先增加再减小,且在直径为 0.4 m 时达到最大值 38.2%;加均流装置后,SO₂ 及 HCl 脱除效率提高,脱硫效率由加装前的 60.2% 增加到 68.5%;HCl 的脱除效率由加装前的 93.7% 增加到 97.6%。研究结果可为喷雾干燥塔结构优化及参数选择提供理论依据。

关键词:均流装置;喷雾干燥;粘壁;净化效率

中图分类号:TK09

文献标志码:A

Influence of flow-equilibrating device on purification of flue gas from MSW incineration

ZANG Ren-de, ZHANG Li, PU Ge

(a. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education of PRC; b. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The influences of flow-equilibrating device on flue gas purification by spray drying are studied numerically with RNG $k-\epsilon$ turbulent model and stochastic droplet track model. The effects of flow-equilibrating device on flue gas streamline, droplets distribution, internal resistance, adhering ratio and purification efficiency are investigated. The flow field is more uniform and symmetrical after the flow equalization plate is added. The internal resistance decreases gradually with increasing diameter of the opening area of flow equalization plate. The percentage of droplet adhering on the wall is first increased, and then decreased when opening area diameter increases from 0.2 to 0.7 m. The maximum value reaches 38.2% when the diameter equals to 0.4 m. The purification efficiency for SO₂ and HCl has increased after the plate is added. The desulphurization efficiency increases from 60.25% to 68.56%. HCl removal efficiency increases from 93.73% to 97.62%. The results can provide theoretical basis for flue gas purifying system optimization and parameters selection.

Key words: flow-equilibrating device; spray drying; droplet adhering on the wall; purification efficiency

收稿日期:2011-12-18

基金项目:重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2009BA6067)

作者简介:臧仁德(1979-),男,重庆大学博士研究生,主要从事能源与环保,低品位能源利用技术研究;

张力(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65103114;(E-mail)lizhang@cqu.edu.cn。

喷雾干燥烟气净化技术因能源消耗少,废渣易处理等优点得到迅速推广,已成为继湿法之后应用最为广泛的烟气净化工艺^[1-2]。利用喷雾生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆滴,吸收垃圾焚烧烟气中酸性气体 (SO_2 、 HCl 等)^[3-4],反应在干燥塔内进行,塔内气液两相流动直接影响能耗、气液传质及净化效率,因此塔内流场特性是实现烟气有效净化的重要因素之一。理想状态是在不同塔高横截面上气流分布尽可能均匀,以便充分发挥干燥塔内空间的作用,实际上烟气从干燥塔内一侧进入,因贴壁会产生逃逸现象,无法均匀布满整个干燥塔空间。对于传统的喷雾干燥塔^[5-6]由于石灰浆滴的粘壁会造成塔壁结垢、腐蚀,对设备造成了损害,也减少了浆滴的利用率。因此,均流装置的加装对于改善喷雾干燥塔内的结构、减小浆滴的粘壁率、增加酸性气体脱除效率和减少设备腐蚀等方面具有重要意义。目前,垃圾焚烧喷雾干燥烟气净化技术中,烟气净化及塔内流场的模拟比较多,但对塔内流场改良研究的较少,林军^[7]等在研究中采用了烟气分布器改良烟气分布,过小玲^[8]等在研究中采用了托盘整流塔内流场。尽管在这些研究中,对塔内流场、阻力及温度场进行了分析,但对浆滴的空间分布情况分析较少,对浆滴在塔内运动过程中的粘壁特性的研究几乎没有。文中利用数值模拟的方法,采用湍流 RNG $k-\epsilon$ 模型和颗粒随机轨道模型^[9-12],针对均流装置的加装对垃圾焚烧烟气喷雾干燥净化过程的影响进行研究,除了探讨均流装置对喷雾净化过程中塔内流场、塔内阻力、净化效率的影响外,还研究了均流装置对浆滴空间分布、浆滴粘壁率等重要参数的影响规律。

1 物理模型

1.1 模拟对象

模拟对象是图 1 所示喷雾干燥塔:塔高 3.9 m,塔径 0.8 m,在塔内离顶部 1.2 m 处加均流装置,均流装置上加装 8 mm 的小孔,开孔率为 25%,小孔均匀分布。浆液和烟气方向逆向,烟气由烟道入口进入塔内,向下流经均流装置,与同向喷射的浆液相遇,烟气得到净化,由出口烟道排出。

1.2 计算网格

采用结构和非结构的混合网格,为提高计算精度,在均流装置区域进行网格加密,干燥塔网格总数约为 27 万个。

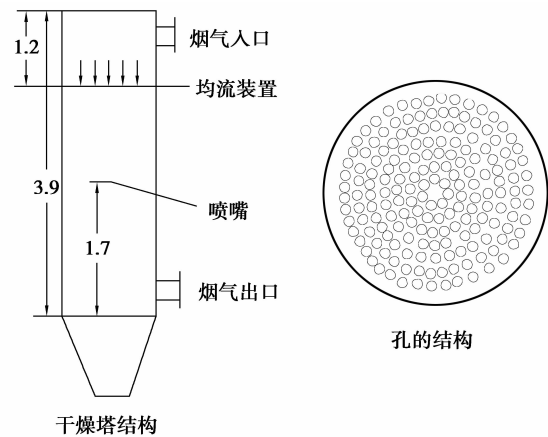


图 1 喷雾干燥塔物理模型

2 数学模型

2.1 连续相(气相)控制方程

脱酸塔内湍流流动时均特性的连续方程、动量方程、能量方程和组分方程^[11-13]可以用 RNG $k-\epsilon$ 模型来描述,气相三维湍流方程可用通用形式表示

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi + S_{p\varphi}, \quad (1)$$

式中: S_φ 包括气相作用源项; $S_{p\varphi}$ 为气相与颗粒间作用源项,脱除对象为: HCl 和 SO_2 ,相应气体组分方程需要包括这两者的方程。

2.2 离散相(液相)控制方程

将喷雾生成浆滴视为离散相,用随机轨道模型模拟浆滴的运动过程^[14]。假设浆滴为球形颗粒:忽略作用在颗粒上的浮力、Basset 力、Magnus 力和 Saffman 力,只考虑烟气对浆滴的曳力和浆滴自身的重力,则浆滴的运动方程表示为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p}, \quad (2)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为颗粒受烟气的单位质量曳力; ρ_p 为浆滴的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; u 和 u_p 分别为烟气和液滴速度, m/s ; F_D 为曳力系数,其表达式为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (3)$$

其中, C_D 是与 Re 有关曳力系数,表示为

$$C_D = 0.44, \quad Re \geq 1000;$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right), \quad 1 < Re < 1000;$$

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad Re \leq 1.$$

2.3 浆滴的蒸发模型

浆滴和热烟气的热量传递由下式给出

$$m_p \cdot c_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_g - T_p) + \frac{dm_p}{dt}\lambda_w, \quad (4)$$

对流换热系数由下式算出

$$\frac{hd_p}{\lambda} = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33}, \quad (5)$$

对于浆滴下降速度和气流速度相同的“准静态蒸发”时,有如下关系式

$$\frac{hd_p}{\lambda} = 2.0. \quad (6)$$

1)当浆滴温度小于颗粒表面蒸发温度(湿球温度)时,颗粒处于升温阶段,没有质量变化。

$$m_p \cdot c_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = hA_p(T_g - T_p). \quad (7)$$

2)当颗粒含有未蒸发的水并且温度未达到沸点时,颗粒中水的蒸发速率为

$$N = k_c(C_s - C_\infty), \quad (8)$$

传质系数由下式计算

$$\frac{K_c d_p}{D_v} = 2 + 0.6Re^{0.5}Sc^{0.33}, \quad (9)$$

对于浆滴速度和烟气速度相同的“准静态蒸发”,有

$$\frac{dm_p}{dt} = N \cdot A_p \cdot M. \quad (10)$$

3)当颗粒温度大于沸点且颗粒内有未蒸发的水,即 $T_p \geq T_b$ 且 $m_p > (1-f)m_{p,0}$ 时,有

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{2\pi d_p \lambda}{c_p} (1 + 0.23 \sqrt{Re}) \times \left[1 + \frac{c_p(T_g - T_p)}{\lambda_w} \right]. \quad (11)$$

2.4 脱酸模型

通过研究 SO_2 、 HCl 的吸收过程包括气相传质、液相传质、固相溶解及液相反应等多个过程,假定其中传质为稳态传质,吸收过程用双膜理论进行分析^[13-15],其干燥阶段分为恒速阶段和降速阶段。

2.4.1 恒速干燥阶段 SO_2 、 HCl 的吸收

本阶段,酸性气体和 $Ca(OH)_2$ 分别由气相及液相向反应区域扩散并反应^[16-17],根据双膜理论,单个浆滴的酸性气体传质速率可表示为

1) SO_2 恒速阶段传质速率 N_s

$$N_s = \frac{\pi d_d^2 \left(\frac{PC_{SO_2}}{H_s} + \beta C_{CaS} - 0.5 \frac{\beta N_{Cl} d_d^2}{K_{Ca} N_p d_p^2} \right)}{\frac{1}{k_{sg} H_s} + \frac{1}{k_{sl}} + \frac{\beta d_d^2}{k_{Ca} N_p d_p^2}}. \quad (12)$$

2) HCl 恒速阶段的传质速率为 N_{cl}

$$N_{cl} = \frac{\pi d_d^2 \left(\frac{PC_{HCl}}{H_{cl}} + \beta C_{CaS} - 0.5 \frac{\beta N_{Cl} d_d^2}{K_{Ca} N_p d_p^2} \right)}{\frac{1}{k_{clg} H_s} + \frac{1}{k_{cll}} + \frac{\beta d_d^2}{k_{Ca} N_p d_p^2}}. \quad (14)$$

2.4.2 降速阶段 SO_2 、 HCl 的吸收

降速干燥阶段,石灰浆滴的粒径不再变化,酸性气体扩散的难度增加,参加反应的离子态石灰迅速减少,当石灰浆滴的水分达到平衡时,干燥停止,此时的酸性气体吸收可表示如下

1) SO_2 降速阶段吸收率 N_s

$$N_s = \frac{\pi d_c^2 \left(\frac{PC_{SO_2}}{H_s} + \beta C_{CaS} - 0.5 \frac{\beta N_{Cl} d_c^2}{K_{Ca} N_p d_p^2} \right) \left(\frac{X - X_e}{X_c - X_e} \right)}{\frac{1}{k_{sg} H_s} + \frac{1}{k_{sl}} + \frac{\beta d_d^2}{k_{Ca} N_p d_p^2}}. \quad (15)$$

式中: N_s 为 SO_2 传质通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{Ca} 是石灰溶解通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; K_{sg} 为 SO_2 气膜传质系数, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; K_{sl} 为 SO_2 液气膜传质系数, m/s ; K_{Ca} 为吸收剂溶解传质系数, m/s ; d_d 为石灰浆滴直径, m ; d_p 吸收剂浆滴粒径, m ; N_p 为单个浆滴中吸收剂颗粒数目; P 是烟气总压力, Pa ; H_s 为 SO_2 的 Henry 定律常数; D_{cal} 是 $Ca(OH)_2$ 在液膜中的扩散系数, m^2/s ; D_{sl} 为 SO_2 在液膜中的扩散系数, m^2/s 。

2) HCl 降速阶段吸收率 N_{cl}

$$N_{cl} = \frac{2\pi d_c^2 \left(\frac{PC_{HCl}}{H_{cl}} + \beta C_{CaS} - \frac{\beta N_{Cl} d_c^2}{K_{Ca} N_p d_p^2} \right) \left(\frac{X - X_e}{X_c - X_e} \right)}{\frac{1}{k_{clg} H_{cl}} + \frac{1}{k_{cll}} + \frac{\beta d_d^2}{k_{Ca} N_p d_p^2}}. \quad (16)$$

式中: N_{cl} 为 HCl 传质通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; K_{clg} 是 HCl 的气膜传质系数, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; K_{cll} 是 HCl 的液膜系数, m/s ; H_{cl} 为 HCl 的 Henry 定律常数。

2.4.3 酸性气体的脱除效率

1)喷雾干燥塔内脱硫效率为

$$\eta_s = 1 - \frac{C_{so_2,1}}{C_{so_2,0}}, \quad (17)$$

2)喷雾干燥塔内 HCl 的脱除效率为

$$\eta_{cl} = 1 - \frac{C_{cl,1}}{C_{cl,0}}. \quad (18)$$

3 计算参数与边界条件

3.1 计算参数的选择

以实验结果为模拟参数条件,实验系统主要由烟气发生系统、喷雾干燥塔、石灰浆液制备系统等部分组成,模拟中选取的喷雾干燥塔,塔高3.9 m,塔径0.8 m,离塔顶1.2 m处均匀安装开孔率为25%,开孔直径为8 mm的均流装置。烟气为经旋风分离器分离固体颗粒以后,再由冷却装置冷却到220℃后进入喷雾干燥塔,其中烟气流量为600 Nm^3/h ,进口烟气速度为5 m/s,一个喷嘴,顺烟气流向,喷淋浆

液流量 10 kg/h, 浆液平均粒径分布为 $80 \mu\text{m}$, 浆滴温度 293 K, 液滴运动时雷诺数在 0~300 之间, 颗粒 Stokes 数在 0.76~0.95 之间。

3.2 边界条件

塔及烟道外壁为绝热边界, 固体壁面按不滑移条件处理, 假设浆滴为等粒径的球形颗粒, 当浆滴颗粒与壁面碰撞后, 停止计算, 计为该颗粒粘壁。

4 模型验证及结果讨论

图 2 为实验结果和模拟结果的比较, 此时均流装置开孔率为 25%, 开孔区域直径为 0.6 m, 入口烟气温度和饱和温差不变的前提下, SO_2 、 HCl 的吸收效率随化学计量比 $\text{SR}(\text{Ca}/\text{S} + 0.5\text{Cl})$ 的增加而增加, 由图中还可以看出, 模拟结果与实验结果吻合较好, 证明文中的模拟方法可以用于喷雾干燥塔内传热传质和化学反应过程的研究。

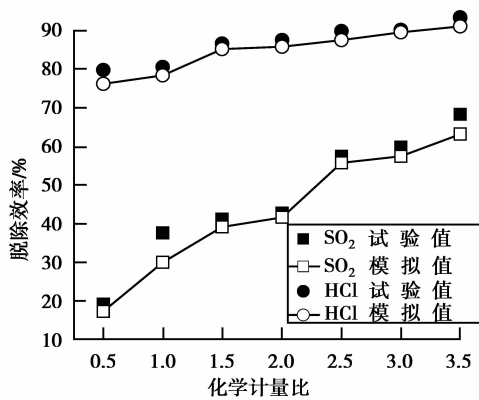


图 2 化学计量比对脱酸效率的影响

4.1 均流装置对烟气流线的影响

加装均流装置有效地防止了烟气从塔壁逃逸而不经浆滴喷淋, 根据实验参数及得到的烟气参数条件, 经过模拟计算得到烟气流线图(见图 3), 左图给出了无均流装置时的烟气流线模拟结果, 右图给出了开孔率为 25%, 开孔区域直径为 0.7 m 时的模拟结果。

从图 3 可以看出, 烟气进入干燥塔, 冲击对面的塔壁后, 形成了 2 个旋涡, 而后向塔下流动。对于无均流装置的干燥塔, 烟气沿塔壁流动, 这样就不能很好地和喷淋浆滴接触, 烟气还没来得及净化就离开了干燥塔。而对于加装均流装置的干燥塔来说, 烟气在均流装置安装处经过小孔流向塔的中心区域, 接受吸收浆液的喷淋, 强化了气液两相的混合, 并且从图中可以看出, 经过均流装置的烟气充满度要优于无均流装置的干燥塔, 这就说明均流装置优化了塔内流场, 对烟气的净化有利。

4.2 均流装置对浆滴颗粒空间分布的影响

基于实验参数及得到的烟气参数条件, 图 4 给

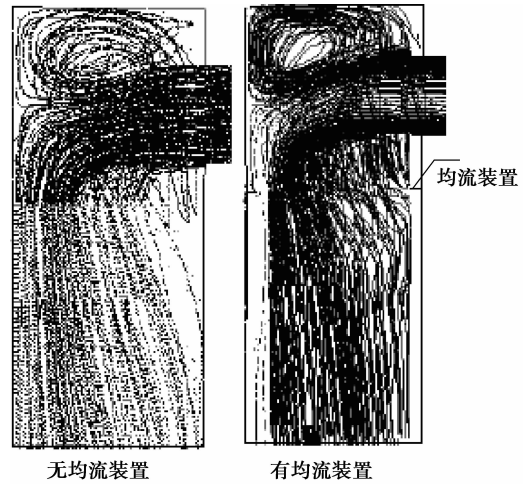


图 3 烟气流线图

出了浆滴在塔内的空间分布情况, 左图是无均流装置时的模拟结果, 右图给出了开孔率为 25%, 开孔区域直径为 0.7 m 时的模拟结果。

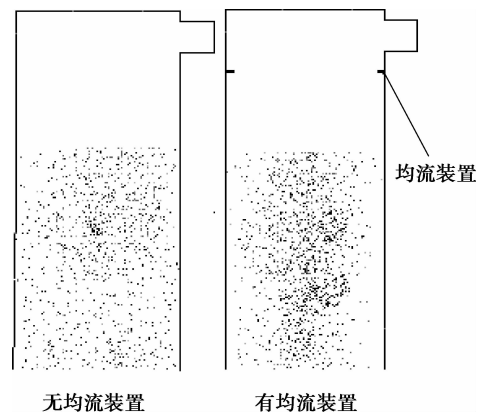


图 4 浆滴空间分布

从图 4 中右图可以看出浆滴颗粒主要集中在塔中心轴线附近, 贴近壁面的浆滴颗粒数量不多, 说明安装均流装置后, 在烟气的作用下, 浆滴颗粒向轴线集中的程度加大, 浆滴与壁面的碰撞减少。

4.3 塔内阻力特性分析

基于实验参数及得到的烟气参数条件, 均流装置开孔率为 25%, 开孔直径 8 mm 情况下, 改变均流装置的开孔区域直径, 选取 0.3、0.5、0.7 m 进行模拟计算。图 5 为开孔区域直径与塔内阻力之间的关系曲线, 这里的阻力为通过模拟计算得出进出口压降。由图中所示曲线可知, 0.7、0.5、0.3 m 均流装置的开孔区域直径塔内阻力分别约为 450、580、790 Pa, 阻力随均流装置开孔区域直径的变大而减小, 其趋势几乎成线性。这主要由以下 2 个方面的原因造成的, 第一是因为均流装置将烟气向塔的中心区域均流, 开孔区域直径小的时候, 沿程阻力加

大,从而增大了塔内的压降。第二,烟气经过均流装置小孔时速度增加,其压强减小,开孔区域小,速度增加较大,则压强整体减小程度大于开孔区域大的情况,因此阻力也就大于开孔区域大的情况。

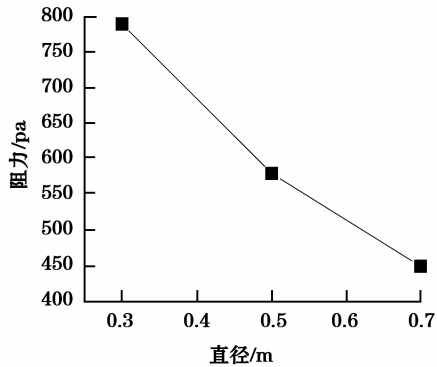


图5 塔内阻力随开孔区域直径变化

4.4 粘壁率

为了定量表征液滴在反应器内壁的粘附情况,用粘壁率来描述浆滴在塔内的粘附程度,粘壁率也就是模拟停止计算的浆滴数量占总喷入浆滴的比例分数。根据模拟条件,在模拟计算中,粘壁的浆滴会在计算结果中停止计算,计算中将明确给出停止计算的浆滴数目。塔内流场的合理组织可以增加雾化浆滴的利用率,浆滴的利用率与净化效率有着密切的关系,改变均流装置的开孔形式,基于实验参数及得到的烟气参数条件,在均流装置开孔率为25%,开孔直径8 mm 情况下,把均流装置的开孔区域从0.2 m 开到0.7 m 的区域,如图6所示,浆滴的粘壁率先增大再减小。

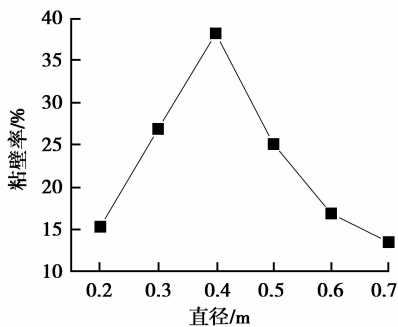


图6 浆滴的粘壁率随开孔区域直径的变化

这是因为当开孔区域比较小的时候,烟气经过一个狭窄区域,速度升高,高速的热烟气与浆滴相遇,给浆滴的冲击较大,因阻力作用,浆滴的速度衰减迅速,从而改变浆滴群的运动方向,冲向壁面的浆滴数量减小,浆滴的粘壁率减小,但此时浆滴与烟气

的接触面积减小。随着开孔区域的变大,烟气的流速减小,烟气与浆滴的相对速度减小,烟气对浆滴群的运动方向影响较小,此时均流装置的开孔区域增加并不大,浆滴与热烟气相遇的空间与时间均较小,初次相遇的热烟气与浆滴进行热质交换,浆滴进入恒速干燥阶段,浆滴的干燥速率很快建立起来,浆滴尺寸小幅收缩,因接触时间较短,故而在浆滴还未完成恒速干燥之前,就飞出了热烟气区域,造成了粘壁率增加;随着开孔区域的再增加,虽然烟气与浆滴的相对速度也不大,浆滴有充分的时间完成恒速干燥,之后,继续在热烟气中飞行,进入降速干燥阶段,浆滴内的水分向表面的扩散过程变得比较困难,浆滴表面就无法保持湿润,这就在很大程度上减小了浆滴黏附到壁面的可能,降低了粘壁率。

4.5 均流装置开孔区域直径对净化效率影响

SO₂、HCl 的吸收过程包括气相传质、液相传质、固相溶解及液相反应等多个过程,假定其中传质为稳态传质,吸收过程用双膜理论进行分析。图7所示为在化学计量比SR为2.5,在入口烟气温度、饱和温差不变的前提下,均流板的开孔区域从0.2 m 开到0.7 m 的区域时,酸性气体脱除效率的模拟值。由图可见SO₂、HCl 的净化效率随开孔区域直径的增加开始的时候增加缓慢,随后随开孔区域直径的增加逐渐增加,趋势明显。

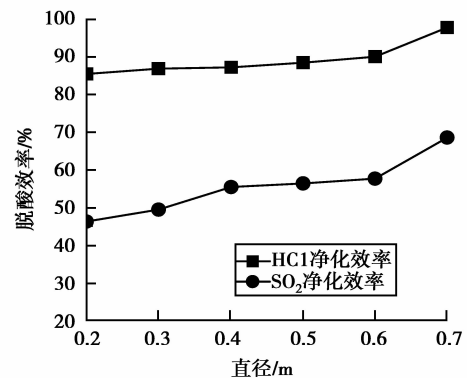


图7 均流装置开孔区域直径对脱酸的影响

并且在开孔区域直径为0.7 m 时,酸性气体脱除效率达到最高,此时加装均流装置后的脱酸效率可以达到68.5%, HCl 的脱除效率为97.6%,经过模拟计算得到加装前的脱酸效率和HCl 的脱除效率分别为60.2%和93.7%,可以看出加装均流装置后脱酸效率比加装前有明显提高。加装均流装置后,干燥塔内烟气分布更均匀,浆滴在均匀的烟气中完成了恒速,降速等干燥过程,浆滴粘壁率减小,烟气接触的浆滴数量、浆滴的利用率增加,脱酸效率提高。

5 结 论

采用数值模拟的方法研究了均流装置对垃圾焚烧后烟气与石灰浆滴在塔内的流动、粘壁及脱酸效率等因素的影响规律,获得以下结论:

1) 喷雾干燥塔中加装均流装置后,烟气在塔内的流动更均匀,烟气沿壁面逃逸减少,气流分布更有利于烟气与浆滴的接触,有利于酸性气体的吸收。

2) 当均流装置开孔率不变,开孔区域直径从 0.2 m 增加到 0.7 m 时,塔内的阻力逐渐减小,由 790 Pa 减小到 450 Pa。

3) 当均流装置开孔率不变,均流装置的开孔区域直径由 0.2 m 增加到 0.7 m 时,吸收浆滴的粘壁率先增加再减小,并在 0.4 m 时达到最大,此时的浆滴粘壁率为 38.2%。

4) 随着开孔区域直径的增加 SO_2 、HCl 净化效率增加的趋势越来越明显,其中在开孔区域直径为 0.7 m 时,效率最大,HCl 脱除效率由加装前的 93.7% 增加到 97.6%, SO_2 脱除效率由加装前的 60.2% 增加到 68.5%,均有所提高。

参考文献:

- [1] CONSONNI S, GIUGLIANO M, GROSSO M. Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste; part B: emission and cost estimates [J]. *Waste Management*, 2005, 25(2): 137-148.
- [2] YAMAZAKI H, AOYAMA Y, KAWAGUCHI H. A system for co-incineration of municipal and industrial waste for kashima resource regeneration center [J]. *Hitachi Zosen Technical Review*, 2005, 66(1): 2-5.
- [3] 李香排, 蒋旭光, 张东平, 等. 典型垃圾组分焚烧中 HCl 排放的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2004, 29(1): 83-87.
LI XIANG-PAI, JIANG XU-GUANG, ZHANG DONG-PING, et al. Experimental study of emission of HCl on incinerating of typical municipal solid waste components [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(1): 83-87.
- [4] WERTHER J. Gaseous emissions from waste combustion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144(3): 604-613.
- [5] 蒲舸, 张力, 辛明道. 垃圾焚烧烟气喷雾干燥净化分析 [J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(11): 84-87.
PU GE, ZHANG LI, XING MING-DAO. Analysis of spray dry scrubbing of MSW incineration flue gas [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2004, 27(11): 84-87.
- [6] 李香排, 蒋旭光, 李琦, 等. 钙基脱氯剂固定床脱氯动力学模型 [J]. *化工学报*, 2004, 55(8): 1280-1284.
LI XIANG-PAI, JIANG XU-GUANG, LI QI, et al. Kinetic model of dechlorination of CA-based sorbents in fixed bed [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(8): 1280-1284.
- [7] 林军, 王凡, 张凡, 等. 烟气分布器对半干法脱硫塔流场的影响 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 129-132.
LIN JUN, WANG FAN, ZHANG FAN, et al. Influence of flue gas distributor on flow field of semi-dry desulphurization reactor [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 129-132.
- [8] 过小玲, 金保升, 沈丹. 装有多孔板的脱硫喷淋塔流场数值模拟研究 [J]. *锅炉技术*, 2007, 38(6): 5-9.
GUO XIAO-LING, JIN BAO-SHENG, SHEN DAN. Flow simulation for FGD spray scrubber with porous plate [J]. *Boiler Technology*, 2007, 38(6): 5-9.
- [9] 王雷, 章明川, 谢广录, 等. 喷雾干燥烟气脱硫技术的数值模拟 [J]. *动力工程*, 2005, 25(3): 416-421.
WANG LEI, ZHANG MING-CHUAN, XIE GUANG-LU, et al. Numerical simulation study of flue gas desulphurization by spray drying [J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2005, 25(3): 416-421.
- [10] JANNELLI E, MINUTILLO M. Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant [J]. *Waste Management*, 2007, 27(5): 684-690.
- [11] 蔡杰, 凡凤仙, 袁竹林. 循环流化床气固两相流颗粒分布的数值模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(20): 71-75.
CAI JIE, FAN FENG-XIAN, YUAN ZHU-LIN. Numerical simulation on solids fraction distribution in straw burned circulating fluidized beds [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2007, 27(20): 71-75.
- [12] 熊源泉, 袁竹林, 章名耀. 加压条件下气固喷射器输送特性的三维数值模拟 [J]. *化工学报*, 2004, 55(10): 1638-1643.
XIONG YUAN-QUAN, YUAN ZHU-LIN, ZHANG MING-YAO. Three-dimensional numerical simulation on conveying properties of gas-solid in injector under pressurization [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2004, 55(10): 1638-1643.
- [13] SCALA F, D-ASCENZO M, LANCIA A. Modeling flue gas desulfurization by spray-dry absorption [J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, 34(1-3): 143-153.
- [14] WANG L, SONG Y B, ZHANG M C, et al. Modeling study on the impaction and humidification process in desulfurization activation reactor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(4): 951-962.
- [15] 滕斌. 半干法烟气脱硫的实验及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学机械与能源工程学院, 2004: 35-73.

- [2] KAWAGUCHI M, ABE M, HATATO T, et al. Structural tests on the "suspen-dome" system [C]// Proceedings of IASS Symposium. May 30-June 3, 1994, Istanbul, Turkey. [S. l.] [s. n.]: 1994: 384-392.
- [3] TATEMACHI I, HATATO T, ANMA Y, et al. Vibration tests on a full-size suspen-dome structure [J]. International Journal of Space Structure, 1997, 12(3-4): 217-224.
- [4] KAWAGUCHI M, ABE M, TATEMACHI I. Design, tests and realization of "suspen-dome" system [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1999, 40(3): 179-192.
- [5] 陈志华. 弦支穹顶结构[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 葛家琪, 张国军, 王树, 等. 2008 奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构整体稳定性能分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 22-30.
GE JIA-QI, ZHANG GUO-JUN, WANG SHU, et al. The overall stability analysis of the suspend-dome structure system of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 22-30.
- [7] 王树, 张国军, 张爱林, 等. 2008 奥运会羽毛球馆索撑节点预应力损失分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 39-44.
WANG SHU, ZHANG GUO-JUN, ZHANG AI-LIN, et al. The prestress loss analysis of cable-strut joint of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 39-40.
- [8] 魏建东. 滑动索系结构分析中的摩擦滑移单元[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 66-70.
WEI JIAN-DONG. Friction gliding cable element in analysis of gliding cable structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 66-70.
- [9] 郭彦林, 崔晓强. 滑动索系结构的统一分析方法——冷冻-升温法[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 156-160.
GUO YAN-LIN, CUI XIAO-QIANG. A unified analytical method for gliding cable structures-frozen-heated method [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 156-160.
- [10] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 滑动环索连接节点在弦支穹顶结构中的应用[J]. 同济大学学报, 2004, 32(10): 1300-1303.
CUI XIAO-QIANG, GUO YAN-LIN, YE KE-MING. Application of gliding hoop cable joint in suspen-dome structures [J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2004, 32(10): 1300-1303.
- [11] 刘红波, 陈志华, 周婷. 弦支穹顶结构预应力张拉的摩擦损失[J]. 天津大学学报, 2009, 42(12): 1055-1060.
LIU HONG-BO, CHEN ZHI-HUA, ZHOU TING. Prestress loss induced by friction in suspendome construction [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(12): 1055-1060.
- [12] 陈志华, 毋英俊. 弦支穹顶滚动式索节点研究及其结构体系分析[J]. 建筑结构学报, 2010(增刊 1): 234-240.
CHEN ZHI-HUA, WU YING-JUN. Design of roll cable-strut joint in suspendome and analysis of its application in the whole structure system [J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 234-240.
- [13] 巨力索具股份有限公司. 索夹滑移试验报告[R]. 保定: 巨力索具股份有限公司, 2005.
- [14] 巨力索具股份有限公司. 拉索使用说明书[R]. 保定: 巨力索具股份有限公司, 2009.
- [15] 王勋成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] GARRIDO J A, FOCES A, PARIS F. An incremental procedure for three-dimensional contact problems with friction [J]. Computer and Structures, 1994, 50(2): 201-215.
- [17] 中国工程建设标准化协会. CECS 212-2006 预应力钢结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(编辑 陈移峰)

(上接第 64 页)

- [16] 赵毅, 汪黎东, 王小明, 等. 烟气脱硫产物—亚硫酸钙非催化氧化的宏观反应动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 116-120.
ZHAO YI, WANG LI-DONG, WANG XIAO-MING, et al. Study on the macroscopical uncatalyzed oxidation kinetics of desulfurization residual product-calcium sulfite [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(8): 116-120.
- [17] 蒋旭光, 李琦, 李香排, 等. 燃煤过程中钙基及镁基吸收剂对 HCl 吸收作用的试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 626-630.
JIANG XU-GUANG, LI QI, LI XIANG-PAI, et al. Chloride of emission control by calcium-based and magnesium-based sorbents during coal combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 626-630.

(编辑 陈移峰)