

基于三维物质点法的清洁煤燃烧时锅炉结渣特性模拟研究

曾国兵

(安徽电气工程职业技术学院 动力工程系,安徽 安肥 230051)

摘 要: 作为煤炭需求大国,为更加有效清洁的利用煤炭资源,提高电厂安全运行效益和发电效率。采用三维物质点法,利用 Mathematica 构建包含锅炉、风、煤粉的三维物质点模型,并针对飞灰与锅炉壁的粘附过程,针对不同内/外二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系进行仿真模拟,注重分析个中机理,为锅炉改造、煤粉使用提供理论依据。

关 键 词: 锅炉结渣;三维物质点法;飞灰粘附;内/外二次风旋流强度

中图分类号: TQ520.62

文献标识码: A

清洁煤燃烧时锅炉结渣特性一直是生产生活中广泛关注的问题^[1]。定量研究清洁煤燃烧时锅炉结渣过程,分析在不同燃烧条件下锅炉中煤粉的烧渣、运动、沉淀过程,为锅炉结构的改进、提高煤粉的利用率提供理论依据^[2]。

国内外学者对于清洁煤燃烧时锅炉结渣特性的研究主要分为两个方面:实验法和数值模拟法^[3-4]。实验法主要是利用大型锅炉针对不同的煤粉进行长期实验,并观测其中的相关数据。D. J. Veganieva^[6]对 W 型火焰的锅炉进行清洁煤燃烧实验,探究清洁煤煤粉的粒径与结渣的量之间的关系,但是无法描述锅炉内部的燃烧情况。Odile Vekemans^[7]通过测量锅炉不同区域的温度,描述锅炉的温度场的变化情况,并探究不同温度下的结渣特性,但是没有考虑速度场的作用。P. V. Roslyakov^[8]通过测量锅炉燃烧时内部的风速,近似描述速率,但无法测量方向,便无法描述速度场。总体而言,实验法对于实验条件要求苛刻,难以设置对照实验,无法对同种对象进行重复实验,并且许多数据是难以观测的^[9];数值法避免了实验法难以观测数据的缺点,并且可以随意重复试验,是当下应用较为广泛的一种研究清洁煤燃烧时锅炉结渣特性问题的方法^[10]。Gerarden^[10]利用 Eulerian 法模拟锅炉燃烧之时内部火焰的湍流效应,但是无法准确定位结渣的位置。Yosuke Komatsu^[11]利用 Lagrangian 法对粒子进行标记,研究煤粉结渣之前的运动迹线,但在锅炉突变的区域,Lagrangian 法网格会出现畸变,致使网格需要重构。整体而言,传统意义上的数值方法(无论是 Lagrangian 法还是 Eulerian 法),都有自身难以克服的缺陷:Eulerian 法不易追踪物质边界;Lagrangian 法会产生网格畸变^[12]。

新兴的物质点法在时间空间尺度上可以与实验结果相比较,并且物质点法是结合 Eulerian 法和 Lagrangian 法的优点,避免了其缺点^[13-15]。本文采用三维物质点法,针对清洁煤燃烧时锅炉结渣特性问题,利用 Mathematica 构建包含锅炉、风、煤粉的三维物质点模型,并针对飞灰与锅炉壁的粘附过程、内二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系、外二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系进行仿真模拟,为锅炉改造、煤粉使用提供理论依据。

收稿日期:2016-11-12

基金项目:安徽省高等职业教育创新发展项目(XM-1)

作者简介:曾国兵(1982-),男,工程师,主要研究方向:火电厂集控运行。

电子邮箱:381095759@qq.com(曾国兵)

1 物质点法的基本思想

物体在开始时刻 $t=0$ 所处的空间为初始构型 Ω_0 , 随着物体的运动, 在时刻 t 所处的空间为现时构型 Ω 。任意选择一个时刻的构型作为参考构型。在参考构形中, 任意一个质点的矢径 X 可以表示为

$$X = X_i e_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

其中: e_i 为参考构型的基矢量; X_i 为在三个坐标轴上的投影, 成为 Lagrangian 坐标。在现时构形中, 任意一个矢径 X 可以表示为

$$X = x_i e_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

其中: e_i 为参考构型的基矢量; x_i 为 X 在三个坐标轴上的投影, 成为 Eulerian 坐标。质点 X 运动方程可以表示为

$$x_i = x_i(X, t). \quad (3)$$

在 Lagrangian 描述和 Eulerian 描述中, 质点 X 的位移分别为

$$u_i = x_i(X, t) - X_i, \quad (4)$$

$$u_i = x_i - X_i(X, t), \quad (5)$$

质点的速度为公式(4) 中的 Lagrangian 导数, 即

$$v_i = \frac{\partial x_i(X, t)}{\partial t} = \frac{\partial u_i(X, t)}{\partial t} = \dot{u}_i, \quad (6)$$

质点的加速度为公式(6) 中的 Lagrangian 导数, 即

$$a_i = \frac{\partial v_i(X, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_i(X, t)}{\partial t^2} = \ddot{u}_i. \quad (7)$$

在 Eulerian 描述中, 物理量 $F = F(x, t) = F(x(X, t), t)$, F 的 Lagrangian 导数为

$$\frac{DF(x, t)}{Dt} = \frac{\partial F(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial F(x, t)}{\partial x_i} v_i, \quad (8)$$

式中: $\partial F(x, t)/\partial t$ 为 Eulerian 导数; $v_i \partial F(x, t)/\partial x_i$ 为迁移导数。

Eulerian 坐标 x_i 对 Lagrangian 坐标 X_i 的偏导数称之为变形梯度。在初始构型中, 任意两个质点 X 和 $X + dX$ 的变形为

$$dx_i = x_i(X + dX, t) - x_i(X, t) = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} dX_j, \quad (9)$$

换算成矩阵形式

$$I = \left| \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

现时构型中的体积为

$$dV = J dV_0, \quad (11)$$

所以, 得出

$$I = \frac{dV}{dV_0}. \quad (12)$$

假设质点 p, p' 的坐标分别为 $x_j, x_j + dx_j$, 则 p' 相对于 p 的速度为

$$dv_i = v_i(x_j + dx_j, t) - v_i(x_j, t) = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} dx_j, \quad (13)$$

$(\partial v_i)/(\partial x_j)$ 为速度梯度张量, 为了便于分析, 换算成以下格式

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (14)$$

令

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (15)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (16)$$

并称 Ω_{ij} 为旋转张量, 称 D_{ij} 为变形率张量, 联立公式 (13)、公式 (14)、公式 (15)、公式 (16), 得到

$$dv_i = \Omega_{ij} dx_j + D_{ij} dx_j. \quad (17)$$

令 $t^{(n)}$ 表示应力矢量, ΔT 表示作用在面元上力, 面元的面积和法向量分别为 $\Delta A, n, \sigma_{ki} = t_i^{(k)}$ (应力分量), 当 ΔA 趋向于零的时候, 有

$$t_i^{(n)} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T_i}{\Delta A} = \frac{dT_i}{dA} = \sigma_{ki} n_k, \quad (18)$$

σ_{ij} 为 Cauchy 应力张量, 且是对称的

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}. \quad (19)$$

控制方程为:

$$\text{质量守恒:} \quad \frac{d}{dt} \rho(x, t) + \rho \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0, \quad (20)$$

$$\text{动量方程:} \quad \rho \ddot{u} - \rho b_i - \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = 0, \quad (21)$$

$$\text{能量方程:} \quad \rho \dot{e} = \dot{\varepsilon}_{ij} \sigma_{ji} = s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} = p \dot{\varepsilon}_{kk}, \quad (22)$$

$$\text{本构关系:} \quad \sigma^\nabla = \sigma^\nabla(\dot{\varepsilon}_{ij}, \sigma_{ji}, \dots), \quad (23)$$

$$\text{边界条件:} \quad \begin{cases} (n_j \sigma_{ji})|_{\Gamma_t} = \bar{t}_i, \\ v_i|_{\Gamma_u} = \bar{v}_i, \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{几何方程:} \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (25)$$

$$\text{初始条件:} \quad \begin{cases} v_i(X, 0) = v_{oi}(X), \\ u_i(X, 0) = u_{oi}(X), \end{cases} \quad (26)$$

其中: Γ_t, Γ_u 分别为面力边界和位移边界; σ_{ji} 为 Cauchy 应力。

对于弹性模型

$$\sigma_{ij}^\nabla = c_{ijkl}^{\sigma J} \dot{\varepsilon}_{kl} = (2GI_{ijkl}^{dev} + k\delta_{ij}\delta_{kl}) \dot{\varepsilon}_{kl}, \quad (27)$$

其中: G 为剪切模量; K 为体积模量。

$$I_{ijkl}^{dev} = \frac{1}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) - \frac{1}{3} \delta_{ij}\delta_{kl}, \quad (28)$$

取两个对称偏张量 s_{ij} 和 ε_{ij} , 有

$$s_{ij}^\nabla = 2G\dot{\varepsilon}_{ij}', \quad (29)$$

$$\dot{\sigma}_m = K\dot{\varepsilon}_{kk}, \quad (30)$$

其中: s_{ij}^∇ 为偏应力的 Jaumann; $\dot{\sigma}_m$ 为球应力变化率; $\dot{\varepsilon}_{ij}'$ 为偏应力张量; $\dot{\varepsilon}_{kk}$ 为体积应变率。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}' = \dot{u}_i \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij}, \quad (31)$$

故而, 弹性模型的更新格式为

$$s_{ij}^{n+1} = s_{ij}^{Rn} + 2G\dot{\varepsilon}_{ij}^{tn+0.5} \Delta t^{n+0.5}, \quad (32)$$

$$\sigma_m^{n+1} = \sigma_m^n + K \dot{\varepsilon}_{ki}^{n+0.5} \Delta t^{n+0.5}, \quad (33)$$

Johnson - Cook 模型可以展现材料的高应变率。屈服应力为

$$\sigma_y = f(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p, T), \quad (34)$$

其中: ε^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^p$ 为塑性应变率; T 为温度。

Johnson 和 Cook 二人将屈服应力表示为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^{pn}) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (35)$$

其中: $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_o$, $\dot{\varepsilon}_o$ 为参考应变率; A, B, n, C, m 为材料参数。

弹塑性模型的屈服条件

$$f(\sigma_{ij}, q_a) = 0, \quad (36)$$

其中: q_a 为硬化参量, 亦称之为内变量。硬化参量的演化方程为

$$\dot{q}_a = \dot{\lambda} h_a(\sigma_{ij}, q_a), \quad (37)$$

其中: $\dot{\lambda}$ 为流动因子且大于等于零, 由一致性条件确定

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial f}{\partial q_a} \dot{q}_a, \quad (38)$$

由塑性流动性法则确定塑性应变率 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} r_{ij}, \quad (39)$$

其中: 塑性流动方向张量 r_{ij} 和塑性流行流动势 ψ 的关系为

$$r_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (40)$$

用 s^{*n+1} 表示有效应力试探值; 用 σ_y^n 表示屈服应力; 用 s^{*n+1} 表示偏应力张量的试探值; 用 m 表示屈服强度的计算比例系数。弹塑性模型的更新格式为

$$\Delta \varepsilon^p = \frac{s^{*n+1} - \sigma_y^n}{3G + E^p}, \quad (41)$$

$$\varepsilon^{pn+1} = \varepsilon^{pn} + \Delta \varepsilon^p, \quad (42)$$

$$\sigma_y^{n+1} = \sigma_y^n + E^p \Delta \varepsilon^p, \quad (43)$$

$$m = \frac{\gamma}{s^{*n+1}}, \quad (44)$$

$$s^{n+1} = m^* s^{n+1}, \quad (45)$$

多方过程满足

$$p = (n - 1) \rho e = \frac{\rho}{\rho_o} E (n - 1), \quad (46)$$

其中: n 为多方气体指数; ρ_o 为参考密度。

不可压缩流体状态方程为

$$p = p \left[\left(\frac{\rho}{\rho_o} \right) - 1 \right], \quad (47)$$

式中: p_o 为参考压强。

线性多项式状态方程为

$$p = c_o + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E, \quad (48)$$

其中: c_o 至 c_6 为材料常数。

Mie - Gruneisen 状态方程为

$$p = p_H + \frac{\gamma}{v} (e - e_H), \quad (49)$$

其中: p_H 和 e_H 分别为 Hugoniot 曲线上的压力和比内能。

$p - a$ 状态方程为

$$p = \frac{1}{a}f(\frac{v}{a},e) \ ,$$

(50)

其中: a 为孔隙率; v 为比体积; e 为比内能。

2 模型构建

清洁煤燃烧过程中由于受到炉膛内高温多灰的恶劣环境的限制,无法对炉内的温度和气氛情况进行全面长时间的在线测量,所以对实施添加风后的炉内燃烧和污染物生成情况缺乏全面的了解。利用 Mathematica 对锅炉物质点模型的构建,有助于弥补现场试验数据的不足。模型包括锅炉、风、煤粉,如图 1 所示。通过对炉内流动、燃烧和污染物生成过程的综合数值模拟,可以比较全面地掌握炉内的温度和主要气体组分的分布情况。

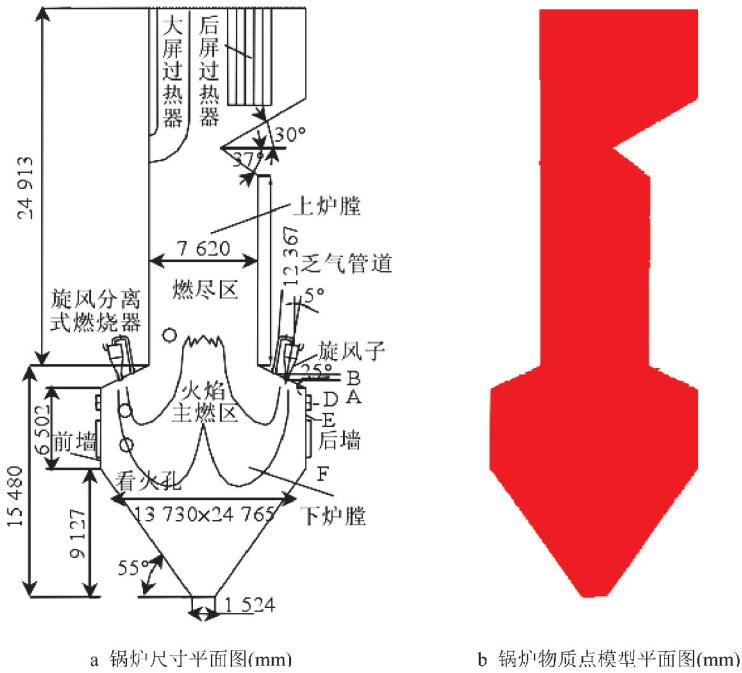


图 1 锅炉尺寸及物质点模型

在图 1 中,物质点的间距为 10 mm,共 687 737 692 772 647 个物质点。其中,清洁煤采用 Johnson-Cook 模型进行描述,锅炉采用弹塑性模型描述,水采用弹性材料描述。

表 1 清洁煤的材料参数

$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	E / GPa	ν	A / MPa	B / MPa	n	c	m
1 135	22.4	0.42	12	125	1	2 092	0

在表 1 中, ρ 为材料密度; E 为杨氏模量; ν 为泊松比; A, B, n, C, m 为材料常数。

表 2 水的材料参数

$\rho / (\text{kg} / \text{m}^2)$	$E / (\text{GPa})$	ν
1	6.6	0.22

在表 2 中, ρ 为材料密度; E 为杨氏模量; ν 为泊松比。物质点的半径为 1 m,网格间距为 1.4 m。锅炉采用弹塑性材料模型描述,压力 p 满足 Mie - Grüneisen 状态方程

$$p = (c\mu + D\mu^2 + S\mu^3) \left(1 - \frac{\mu\gamma}{2}\right) + \gamma\rho e, \quad (51)$$

公式(51)中, e 为内能密度; $\mu = \rho/\rho_o - 1 = V_o/V - 1$, $r = r_o\rho_o/\rho$, $C = c_0^2\rho_o$, $D = c(2\lambda - 1)$, $S = C(\lambda - 1)(3\lambda - 1)$;密度为 $\rho_o = 2\,700\text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 69\text{ GPa}$;泊松比 $\nu = 0.33$;初始屈服应力为 $\sigma_o = 120\text{ MPa}$;切向模量 $E_{tam} = 384\text{ MPa}$;声速 $c_o = 5.35\text{ km/s}$;比热容 $Cv = 880\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$;热传导系数 $k = 237\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $\lambda = 1.34$ 。

3 结果分析

3.1 飞灰与锅炉壁的粘附过程

飞灰是锅炉结渣的主要成分,为了揭示锅炉结渣的过程,选取锅炉上膛炉转折处(图1)作为展示区域,展示单个飞灰颗粒撞击并部分粘附在锅炉壁上的过程(图2)。在图2中,长度单位为 $110\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,时间单位为 ms ,整个粘附时长为 2.8 ms ,飞灰颗粒的半径为 $25 \times 10^{-2}\text{ m}$ 。

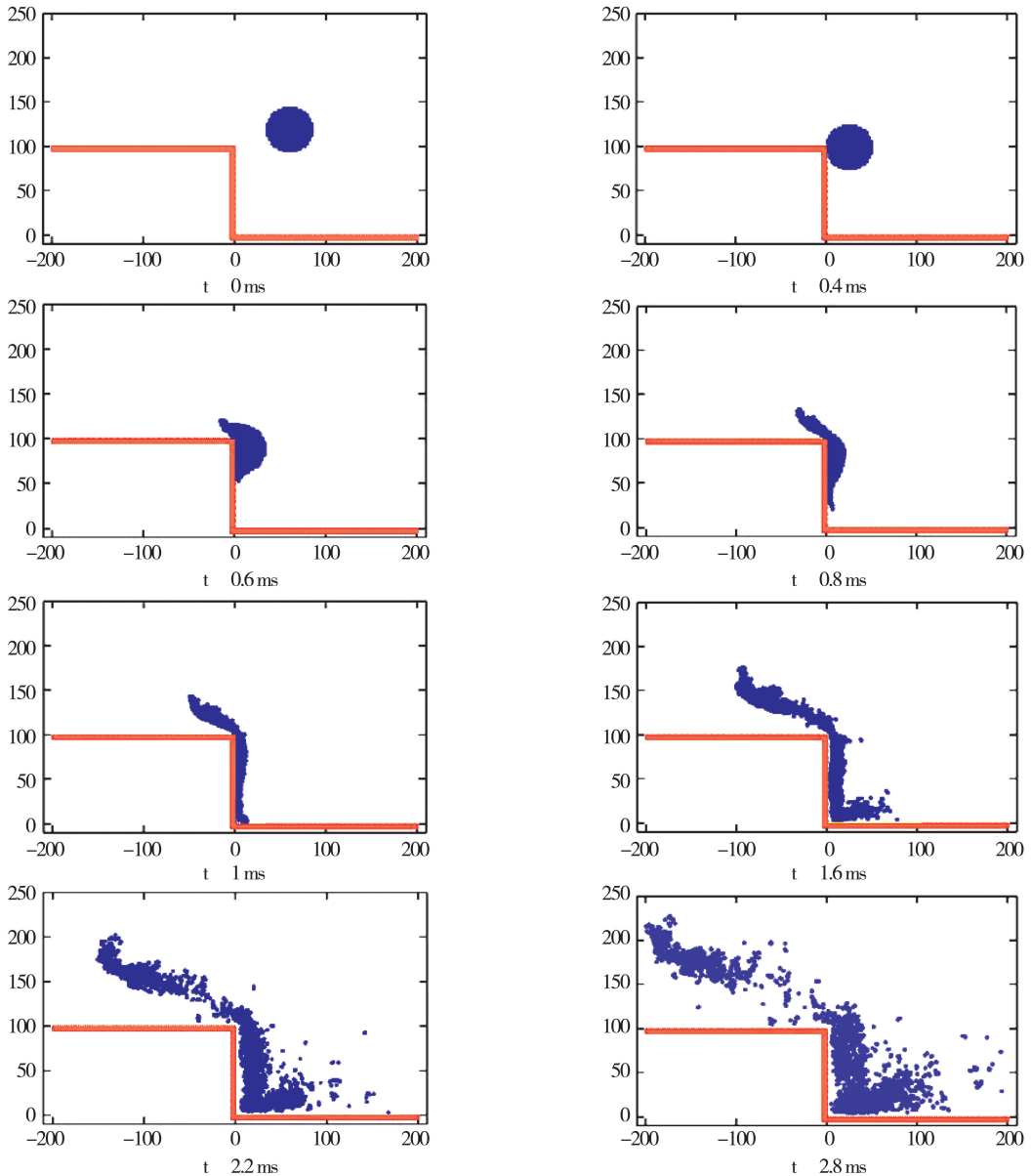


图2 飞灰与锅炉壁的粘附过程

图 2 展示了飞灰与锅炉壁粘附的全过程,在顺风向的方向(左右方向),飞灰粘附的较少,而在垂直于风向的方向,飞灰粘附的较多。最终, $0.001\ 309\ \text{mm}^2$ 的飞灰粘附在了锅炉壁上,约占飞灰颗粒体积($\pi/48$)的 2%。

3.2 内二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系

煤粉颗粒粘附数目随内二次风旋流强度变化的情况,如图 3 所示。根据图 3 可知,随着内二次风旋流强度的增大,导致煤粉颗粒粘附数目增加,然后达到一个峰值(0.9 处);随着内二次风旋流强度的增大,煤粉颗粒粘附数目开始降低并维持在一个较为稳定的水平。究其原因,在内二次风旋流强度大于 0.9 的时候,内二次风旋流强度的增大加强了燃烧器出口的煤粉的燃烧速率,使得煤粉得到了充分的燃烧,进而降低了煤粉颗粒的浓度,导致了煤粉颗粒粘附数目开始降低并维持在一个较为稳定的水平。

水冷壁是整个锅炉中结渣效应最为强烈的区域,为了研究内二次风旋流强度与结渣区域分布情况的关系,可以取水冷壁为研究对象,利用物质点法进行仿真模拟,如图 4 所示。

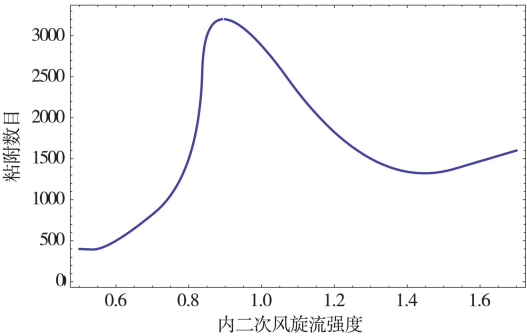


图 3 内二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系

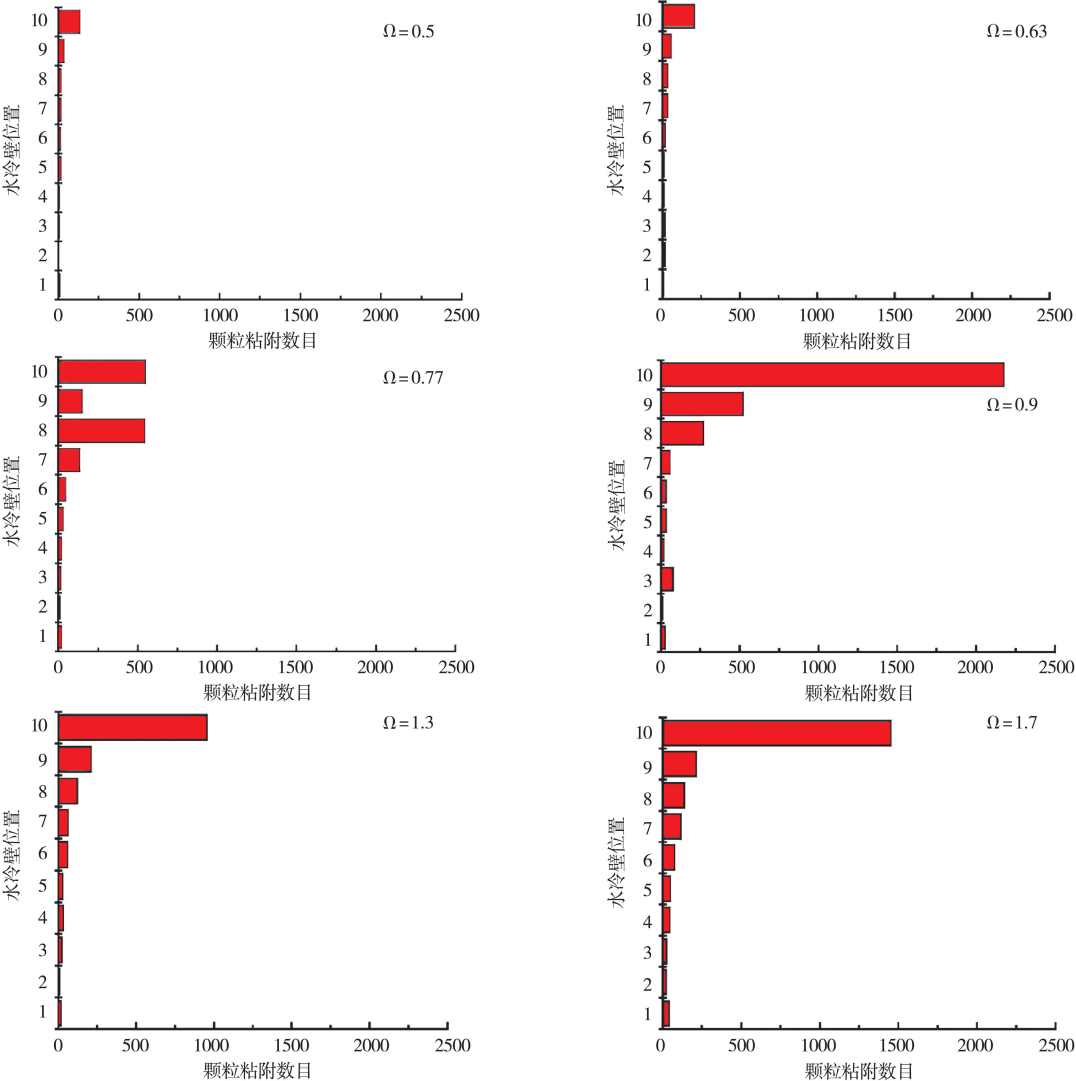


图 4 不同内二次风旋流强度下煤粉颗粒粘附数目的分布情况

在图 4 中, Ω 代表的是内二次风旋流强度;长度单位为 cm。根据图 4 可知,无论内二次风旋流强度 Ω 为多少,煤粉颗粒粘附最大位置皆发生在水冷壁的最上端,而在靠近燃烧器出口的水冷壁面煤粉颗粒粘附的数量很少。水冷壁的最上端粘附的煤粉颗粒数目约为靠近燃烧器出口的水冷壁面粘附的煤粉颗粒数的百余倍。究其原因,水冷壁的最上端的颗粒的速度为负,致使水冷壁可以吸附更多的颗粒;其次,水冷壁的最上端的颗粒的浓度要远远大于中下端。

3.3 外二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系

煤粉颗粒粘附数目随外二次风旋流强度变化的情况,如图 5 所示。根据图 5 可知,随着外二次风旋流强度的增大,导致煤粉颗粒粘附数目增加,最大值达到 24 500。究其原因,外二次风旋流强度的增大,导致了气流向外扩展的强度更加剧烈,煤粉颗粒更容易随着气流而出。与图 3 参考可知,外二次风旋流强度对于煤粉颗粒粘附数目的影响要远远大于内二次风旋流强度对于煤粉颗粒粘附数目的影响。

水冷壁是整个锅炉中结渣效应最为强烈的区域,为了研究外二次风旋流强度与结渣区域分布情况的关系,可以取水冷壁为研究对象,利用物质点法进行仿真模拟,如图 6 所示。

图 6 中, Ω 代表的是外二次风旋流强度;长度单位为 cm。根据图 6 可知,无论外二次风旋流强度 Ω 为多少,煤粉颗粒粘附最大位置皆发生在水冷壁的最上端,而在靠近燃烧器出口的水冷壁面煤粉颗粒粘附的数量很少。水冷壁的最上端粘附的煤粉颗粒数目约为靠近燃烧器出口的水冷壁面粘附的煤粉颗粒数的百余倍。究其原因,水冷壁的最上端的颗粒的速度为负,致使水冷壁可以吸附更多的颗粒;其次,水冷壁的最上端的颗粒的浓度要远远大于中下端。

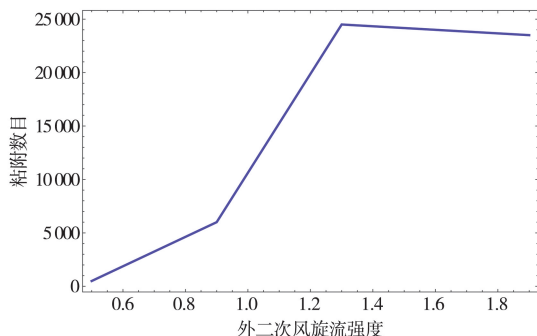


图 5 外二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系

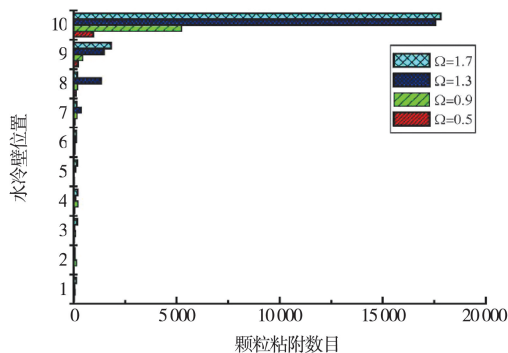


图 6 不同外二次风旋流强度下煤粉颗粒粘附数目的分布情况

4 结 论

基于三维物质点法,利用 Mathematica 构建包含锅炉、风、煤粉的三维物质点模型,并针对飞灰与锅炉壁的粘附过程、内二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系、外二次风旋流强度与煤粉颗粒粘附数目的关系进行仿真模拟,得出以下结论。

(1)在顺风向的方向(左右方向),飞灰粘附的较少,而在垂直于风向的方向,飞灰粘附的较多。最终,占飞灰颗粒体积约 2% 的部分粘附在了锅炉壁上。

(2)随着内二次风旋流强度的增大,导致煤粉颗粒粘附数目增加,然后达到一个峰值(0.9 处);随着内二次风旋流强度的增大,煤粉颗粒粘附数目开始降低并维持在一个较为稳定的水平。无论内二次风旋流强度 Ω 为多少,煤粉颗粒粘附最大位置皆发生在水冷壁的最上端,而在靠近燃烧器出口的水冷壁面煤粉颗粒粘附的数量很少。

(3)随着外二次风旋流强度的增大,导致煤粉颗粒粘附数目增加,最大值达到 24 500。无论外二次风旋流强度 Ω 为多少,煤粉颗粒粘附最大位置皆发生在水冷壁的最上端,而在靠近燃烧器出口的水冷壁面煤粉颗粒粘附的数量很少。

参 考 文 献

[1] 张拓,常乐,李伟. 电站锅炉受热面的结渣浅析[J]. 锅炉制造,2015(1):32-33+36.

- [2] X. Z. Mou, J. B. Zhou, X. Han. Cause Analysis and Preliminary Adjustment Measures of Slagging on Newly-built 350MW Supercritical Boiler [J]. Power System Engineering, 2015, 31(1): 26-28.
- [3] 朱俏俏, 杨光, 程纪华, 等. 准东煤在 350MW 电厂锅炉内燃烧结渣特性研究[J]. 能源工程, 2015(5): 6-8+27.
- [4] M. Perronnet, A. Campen, D. Osby, et al. Increase fuel choices while maintaining a slagging and fouling-free boiler[J]. Coal Age, 2015, 120(9): 56-57.
- [5] D. J. Vaganieva, L. O. Torres, J. L. M. Tabares, et al. Measuring and Predicting the Slagging of Woody and Herbaceous Mediterranean Biomass Fuels on a Domestic Pellet Boiler[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(2): 1085-1095.
- [6] 王擎, 刘丛丛, 肖剑波, 等. 35t/h 内循环流化床锅炉流动数值模拟[J]. 化工机械, 2014, 41(5): 638-641.
- [7] 王超, 程乐鸣, 周星龙, 等. 600MW 超临界循环流化床锅炉炉膛气固流场的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 1-7.
- [8] P. V. Roslyakov, M. N. Zaichenko, D. A. Melnikov, et al. Use of coals for cocombustion with Estonian shale oil[J]. Thermal Engineering, 2016, 63(3): 188-196.
- [9] Zhang Xiangyu, Zheng Shu, Zhou Huaichun, et al. Simultaneously reconstruction of inhomogeneous temperature and radiative properties by radiation image processing[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 107(9): 121-130.
- [10] 张鹤. 65t/h 低倍率油页岩循环流化床锅炉流动特性模拟[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(4): 67-72.
- [11] 谢方静, 陈丽霞. 配风方式对某电厂锅炉燃烧及结渣特性的影响[J]. 节能技术, 2014, 32(4): 368-372.
- [12] 赵富全, 李哲, 赵行, 等. 工业锅炉颗粒配煤特性试验研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(3): 6-10.
- [13] N. T. V. Phuong, A. F. V. Tol, A. S. K. Elkadi, et al. Numerical investigation of pile installation effects in sand using material point method [J]. Computers & Geotechnics, 2016, 73(3): 58-71.
- [14] 吕太, 王新东. 600MW 墙式切圆锅炉变配风方式数值实验研究[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(4): 55-60.
- [15] B. Wang, P. J. Vardon, M. A. Hicks, et al. Development of an implicit material point method for geotechnical applications[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 71(1): 159-167.

Simulation Study on the Slagging Characteristics of Boiler During Combustion of Clean Coal Based on Three Dimensional Material Point Method

Zeng Guobing

(School of Power Engineering, Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, Hefei Anhui 230051)

Abstract: As a big country of coal demand, in order to use coal resources more efficiently and effectively, improve the safety operation efficiency and power generation efficiency of power plant. This study uses the newly-developed method-three dimensional material point method, builds three dimensional material point model that include boiler, air and coal powder by MATHEMATICA, carries on emulation simulation of the adhesion process of fly ash and boiler wall, the relationship between the different inner/outer secondary air swirling intensity and the number of adhesion of coal powder particles, pays attention to the analysis of the mechanism, as to provide a theoretical basis for the transformation of the boiler and the use of coal powder.

Key words: Slagging of boiler; Three dimensional material point method; Fly ash adhesion; Inner/Outer secondary air swirling intensity