

DOI: 10.7652/xjtuxb201303010

增压富氧燃煤锅炉省煤器管束磨损研究

阎维平, 马凯, 高正阳, 董静兰

(华北电力大学能源与动力工程学院, 071003, 河北保定)

摘要: 针对常压空气燃烧和增压富氧燃烧两种工况, 利用 CFD 软件、应用 $k-\epsilon$ 双方程模型模拟锅炉省煤器管束间烟气的流动, 用拉格朗日方法研究管束间颗粒的运动, 并利用颗粒与管壁的碰撞和反弹模型考虑颗粒与壁面碰撞后的运动。通过对比 3 种磨损模型, 得出 Oka 模型考虑的因素相对更全面, 与实验数据也比较吻合。利用该模型可得壁面磨损量随流速呈指数规律变化, 随着入射角度的增大磨损量先增加后减小, 壁面材料硬度越大, 磨损量越小, 并且随着颗粒粒径增大磨损量略有增加。增压富氧燃烧下, 最大磨损速率比常压下小很多, 且最大磨损位置也发生了变化, 各管排的颗粒撞击和平均磨损速率分布较均匀, 除了第 1 排管外, 单管最大磨损区域位于管壁迎风阶两侧 60° 附近。这对省煤器实际运行及增压富氧燃烧下省煤器的设计有重要意义。

关键词: 增压富氧; 数值模拟; 颗粒运动; 磨损模型; 磨损速率

中图分类号: TK223.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0053-07

Erosion of Economizer Tube Bundles in Pressurized Oxy-Fuel Coal-Fired Boiler

YAN Weiping, MA Kai, GAO Zhengyang, DONG Jinglan

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: A simulation on the flue gas flow between the economizer tube bundles was performed using the $k-\epsilon$ two-equation model in the CFD software. The particle motion between the bundles was examined by the Lagrangian method and the particle motion after collision with the wall was investigated using the collision and bounce model for the situations of atmospheric air combustion and pressurized oxy-fuel combustion. By comparing three wear models, it is found that model Oka is relatively more comprehensive and more consistent with the experimental data. According to the model, the amount of wall erosion changes exponentially with an increase in the flow rate, and it increases first and then decreases with the increase in the incidence angle. The erosion decreases with an increase in the hardness of the wall, and it increases slightly with the particle size. Under pressurized oxy-fuel combustion, the maximum erosion rate is much lower than that under atmospheric condition, the position of the maximum erosion changes and the particle impact and erosion rate distributes more uniform on each tube row. The single-tube maximum erosion area is located near 60 degrees of the wall on both sides of the windward-order except the first row. These results are of significance for the economizer design and operation under pressurized oxy-fuel combustion.

Keywords: pressurized oxy-fuel; numerical simulation; particle motion; erosion model; erosion rate

收稿日期: 2012-08-26。 作者简介: 阎维平(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA05Z310); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12QX25)。

网络出版时间: 2012-11-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121116.1039.004.html>

富氧燃烧技术目前被认为是一项采用矿物燃料进行能量生产时可以实现污染物零排放的新型洁净发电技术^[1]。已有的常压富氧燃烧技术,虽然锅炉效率较常规空气燃烧有所提高,但空气分离制氧与CO₂压缩需要消耗大量的能量,使得其成本高、经济性差。基于常压富氧燃烧技术提出的燃煤增压富氧燃烧技术克服了以上缺点,该技术从制氧到锅炉内的燃烧换热,再到烟气中CO₂压缩捕集的全过程均在高压(6~8 MPa)下完成,避免了纯氧降压、烟气再升压两个压变过程,而且在高压下,烟气中的CO₂在20℃即可液化,可大大减少压缩能耗与压降损失;同时,高压下烟气中水蒸气的凝结温度也大幅提高,烟气中的凝结潜热可更方便地回收利用,从而可以降低排烟损失,减少汽轮机抽汽,并可输出更多的电能,与常压富氧燃烧相比具有更高的发电效率,是一项极具前景的新技术^[2]。

电站锅炉产生的烟气中含有大量飞灰,不可避免地会撞击和磨损受热面。据不完全统计,因锅炉受热面磨损爆管而停炉的事故占锅炉总事故的45%~50%,而省煤器磨损爆管事故占受热面磨损爆管总数的40%以上^[3],增压富氧燃烧下锅炉省煤器也存在同样的问题。陈丽华等利用磨损方程对常压下锅炉受热面的磨损进行了理论研究^[4-5],在Hong等对1 MPa下的增压富氧燃煤锅炉进行的计算中,并未考虑受热面磨损^[6]。

增压富氧燃烧下锅炉产生的烟气密度大,飞灰颗粒浓度高,锅炉受热面的磨损不同于常压空气燃烧。增压富氧燃烧下管束间烟气流动及颗粒的运动特性,以及不同参数和燃烧工况下壁面的磨损特性直接决定了受热面的使用寿命,因此是锅炉设计者和使用者非常关心的问题,而有关增压富氧燃烧下锅炉受热面的磨损研究尚未见有关报道。

本文针对某300 MW等级锅炉的省煤器,在常压空气燃烧和增压(6 MPa)富氧燃烧两种工况下,利用FLUENT软件模拟省煤器管束间烟气和飞灰颗粒的流动,通过颗粒碰撞反弹恢复比来考虑颗粒与壁面的碰撞反弹,再通过对比分析3个磨损方程,得出最佳磨损模型,并应用该模型研究了颗粒流速、入射角度、壁面材料硬度及颗粒尺寸等对管壁磨损的影响,对比了两种工况下省煤器管壁的磨损特性,得出平均磨损速率和最大磨损速率沿管排的分布特性,对省煤器实际运行及增压富氧燃烧下省煤器的设计有重要意义。

1 研究对象

省煤器为顺列管束,管外径 $D=0.051\text{ m}$,管壁厚 $\delta=0.006\text{ m}$,并采用钢材SA-210C作为磨损壁面,其布氏硬度 $H_B=179$ 。烟气中飞灰颗粒密度为 $2\,000\text{ kg/m}^3$,假定颗粒直径服从Rosin-Rammler分布,最小为 $20\text{ }\mu\text{m}$,最大为 $120\text{ }\mu\text{m}$,平均为 $70\text{ }\mu\text{m}$,分布指数为3.3。模拟时取省煤器中横向6排、纵向10排的顺列管束。各工况下的模拟参数见表1,增压富氧燃烧下烟气的物性参数由文献[7]得到。

表 1 各工况下的模拟参数

参数	常压空气燃烧	增压富氧燃烧
烟气密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.51	40.67
烟气黏度/ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	32.01	30.07
进口烟气流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5.010	0.072
颗粒质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.029	0.031
Stokes 数 St	2.460	0.033

2 物理模型

含灰气流的磨损是一个复杂的过程,它包括许多复杂的现象,比如气体-颗粒、颗粒-颗粒和气体-颗粒-壁面的相互作用。为了给工程应用提供一个合理的参考,本文对所计算模型做了如下简化假设:

- (1)含飞灰的烟气流动为稀疏载粒流,也就意味着飞灰颗粒不影响气流的流动并且可以忽略颗粒与颗粒之间的相互作用;
- (2)作用在固体颗粒上的主要的力为流体拖曳力,没有考虑附加质量力等;
- (3)忽略省煤器的支撑和固定结构、联箱以及蛇形管的弯头部分,认为省煤器由数排平行的长直管组成;
- (4)烟气在省煤器中为定常流动。

由于本文所求颗粒相与气相的质量比约为 10^{-3} ,颗粒相的体积分数更是达到了 10^{-7} 数量级,而对于稀疏载粒流的判断标准是颗粒在气体中的体积分数低于 10^{-3} ^[8],可见,把当前的研究处理为稀疏载粒流的假定是非常合理的。经上述处理后,保留了影响研究结果的主要因素,忽略了次要因素,使所研究的问题得到了简化,同时模拟的结果更具有一般性。

2.1 气相流场数学模型

流体相的控制方程为二维不可压缩 Navier-

Stokes 方程,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 双方程模型,气相湍流流场的通用控制方程为

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi)\right] - \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)\right] = S_\phi + S_{p,\phi} \quad (1)$$

式中: ϕ 代表各因变量 $U、V、k、\epsilon$; Γ_ϕ 为 ϕ 的湍流扩散系数; $S_\phi、S_{p,\phi}$ 表示气相场和颗粒相的源项。

采用 SIMPLE 方法求解式(1),式中各项的具体含义见表 2,其中 $G_k = 2\mu_{\text{eff}} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] + \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2$, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$, $C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

表 2 式(1)中各项的具体含义

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
U	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V}{\partial x} \right)$
V	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V}{\partial y} \right)$
k	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_k$	$G_k - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu_{\text{eff}} / \sigma_\epsilon$	$C_1 G_k \epsilon / k - C_2 \rho \epsilon^2 / k$

2.2 颗粒运动模型

通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒的轨道,颗粒作用力平衡方程为

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

$F_D(u - u_p)$ 为颗粒单位质量曳力, F_D 由下式计算

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

式中: u 为烟气速度; u_p 为颗粒速度; μ 为烟气动力黏度; ρ 为烟气密度; ρ_p 和 d_p 分别为颗粒密度和颗粒直径; g 为重力加速度; C_D 为拖曳力系数, Re 为颗粒相雷诺数,分别由下式定义

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}); Re = \frac{\rho_f |u - u_p| d_p}{\mu}$$

颗粒运动轨迹由下式得到

$$dx_p/dt = u_p \quad (4)$$

引入 Stokes 数

$$St = \rho_p \overline{d_p}^2 u_p / (\mu D) \quad (5)$$

式中: $\overline{d_p}$ 为颗粒平均直径, m; D 为管径, m。 St 可以反映颗粒的跟随性, $St < 1$ 时,颗粒受载流体的影响较大,有较好的跟随性; $St > 1$ 时,颗粒受载流体影

响较小,相对于流场运动更加独立^[9]。

2.3 颗粒与管壁的碰撞和反弹数学模型

为了求解颗粒碰撞管壁后的运动轨迹,必须知道颗粒碰撞后的反弹速度和方向。Tabakoff 等基于大量的煤灰粒子碰撞实验得到了如下反弹恢复比经验公式^[10-11]

$$e_n = \frac{u_{pn2}}{u_{pn1}} = 1.0 - 0.415\,9\theta - 0.499\,4\theta^2 + 0.292\theta^3 \quad (6)$$

$$e_t = \frac{u_{pt2}}{u_{pt1}} = 1.0 - 2.12\theta + 3.077\,5\theta^2 - 1.1\theta^3 \quad (7)$$

式中: e 为反弹恢复系数; θ 为撞击速度与撞击点切平面的夹角;下标 n 和 t 分别代表法相和切向, 1、2 分别代表碰撞前、后的物理量。

3 磨损模型

Finnie 基于微切削机理提出了最早的磨损模型。1963 年 Bitter 等提出材料的磨损包括剪切磨损和塑性变形,总磨损量是二者之和。随后,Neilson 等又通过实验数据对模型做了进一步改进^[12-13]。

美国 TULSA 大学磨损/磨蚀(E/CRC)研究所的研究人员致力于磨损机理的深入研究,Ahlert 等对于目标材料为碳钢和铝时给出了推荐的磨损方程^[14]。随后,Chen 又对该模型进行了改进^[15],方程如下

$$E_R = m(H_B)^{-0.59} F_s u_p^n f(\alpha) \quad (8)$$

式中:磨损量 E_R 为由颗粒撞击引起的壁面质量损失量与撞击颗粒的质量之比, kg/kg; F_s 为颗粒形状因子; α 为入射角; $m、n$ 为经验系数; $f(\alpha)$ 为入射角函数。

日本广岛大学 Oka 等基于大量磨损实验提出了一个新的方程^[11,16-17],该方程包括了颗粒撞击速度和角度、目标材料的硬度、颗粒尺寸以及颗粒的特性等,入射角度为 α 时颗粒撞击材料表面造成的磨损量为

$$E(\alpha) = f(\alpha) E_{90} \quad (9)$$

$$E_R = 1.0 \times 10^{-9} \rho_w E(\alpha)$$

式中: $f(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + H_V (1 - \sin \alpha))^{n_2}$, $n_1, n_2 = s(H_V)^q$, s 和 q 为与颗粒特性有关的量, H_V 是壁面材料的维氏硬度, GPa; $E_{90} = K(H_V)^{k_1} \left(\frac{u_p}{u_p'} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d_p'} \right)^{k_3}$ 为入射角为 90° 时颗粒撞击材料表面造成的磨损量,

mm^3/kg , u'_p 、 d'_p 分别为实验中采用的颗粒撞击速度和颗粒直径; ρ_w 为壁面材料的密度, kg/m^3 。

另外, FLUENT 软件推荐采用如下磨损模型^[18]

$$R_e = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(u_p)}}{A} \quad (10)$$

式中: R_e 为管壁材料的磨损速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; p 为颗粒数; m_p 为颗粒质量流量, kg/s ; A 为受磨损的管壁面积, m^2 ; C 和 b 分别为颗粒直径和速度的函数。

为选择合理的磨损模型, 本文将采用 FLUENT 模型、E/CRC 模型和 Oka 模型得到的磨损量计算值与文献[19]的实验值进行了对比, 不同颗粒流速下 3 个模型得到的计算结果与实验结果的比值 ω 如图 1 所示。

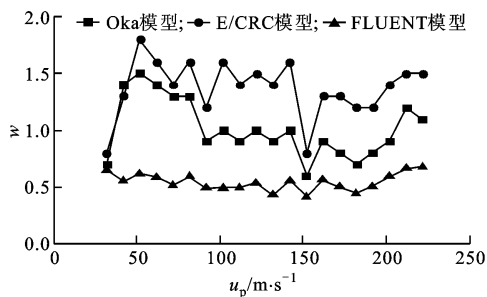


图 1 3 种模型计算结果与实验结果^[19]的对比

如图 1 所示, FLUENT 模型计算值较实验值偏小, E/CRC 模型偏大, Oka 模型计算值与实验值较符合, 且 Oka 模型、E/CRC 模型和 FLUENT 模型计算值与实验值的平均误差分别为 24.1%、42.9% 和 48.9%。Oka 模型所得结果与实验结果的误差最小, 并且考虑的因素相对更全面, 本文在模拟中选用 Oka 模型来计算磨损量。

3.1 入射角函数和磨损量与壁面材料和入射角的关系

利用 Oka 模型进行计算, 可得在颗粒粒径和流速保持不变的情况下, 不同壁面材料硬度时入射角函数和单位颗粒质量磨损量随入射角变化的曲线如图 2、3 所示。

由图 2、3 可见, 当颗粒粒径和流速一定时, 入射角函数和单位颗粒质量磨损量随 α 的变化曲线相似, 当 α 小于某一值时, 随着 α 的增大, 入射角函数和磨损量逐渐增大, 当 α 大于该值时, 二者又逐渐减小。壁面材料硬度越小, 入射角函数和磨损量越大, 并且随着壁面材料硬度的增加, 入射角函数和磨损量最大时所对应的 α 趋于增大, 如壁面材料维氏硬度为 1 GPa、 α 为 30° 左右时, 入射角函数和磨损量最

大, 当壁面材料维氏硬度为 4 GPa 时, 最大入射角函数和最大磨损量所对应的 α 约为 50° 。

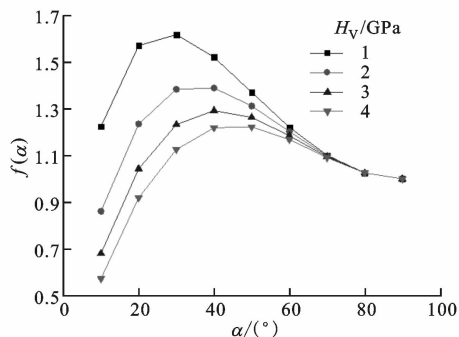


图 2 不同硬度下入射角函数随入射角的变化

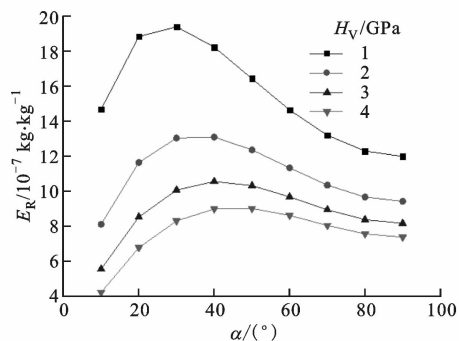


图 3 不同硬度下磨损量随入射角的变化

3.2 磨损量与颗粒流速及颗粒直径的关系

当 $\alpha = 30^\circ$ 、壁面材料布氏硬度为 179 时, 不同粒径下单位颗粒质量磨损量随颗粒流速变化的曲线如图 4 所示。

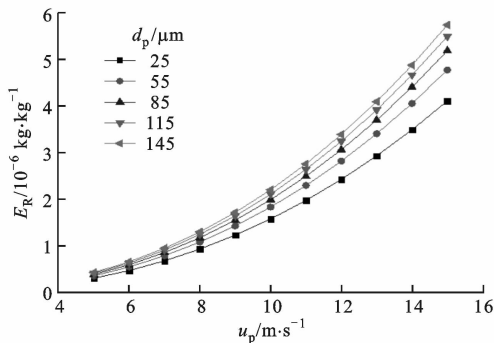


图 4 不同粒径下磨损量随颗粒流速的变化

由图 4 可见, 随着颗粒流速的增大, 单位颗粒质量磨损量呈指数规律增大, 且随着颗粒粒径的增大, 磨损量稍微有所增大。由 Stokes 数的定义可知, 随着粒径的增大, 颗粒的 Stokes 数也增加, 弛豫时间增大, 跟随能力减弱, 使得大颗粒较易穿过尾涡及边

界层与管壁相撞,从而增加了磨损量。

4 数值模拟结果分析

4.1 连续相流场

两种工况下省煤器管束间烟气的流速分布如图 5 所示。

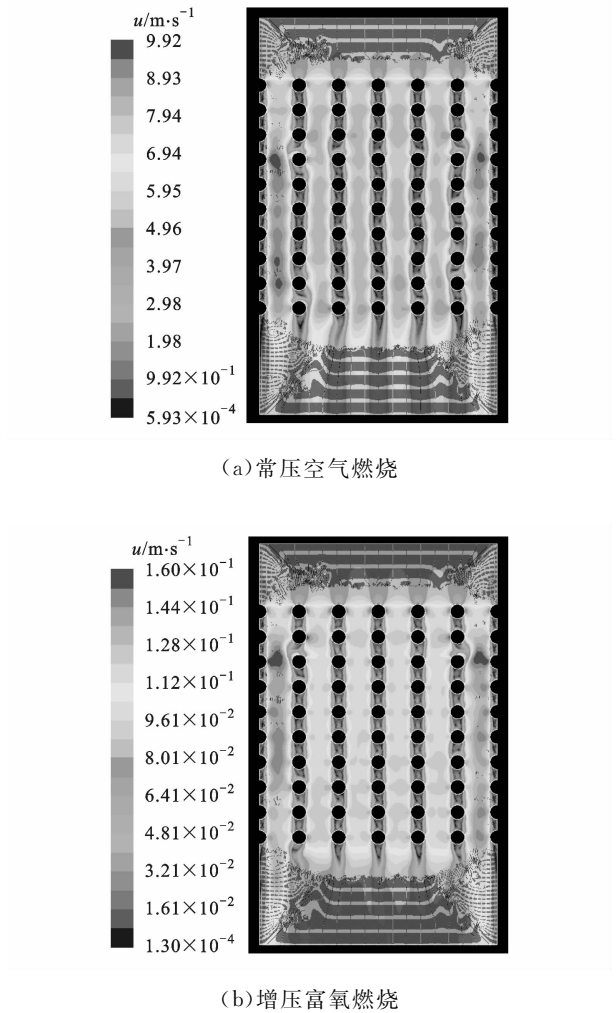


图 5 常压空气燃烧和增压富氧燃烧下的烟气流速分布

通过以上不同燃烧工况下的速度矢量图对比可见:常压空气燃烧下管间最大烟气流速达到了 9.92 m/s,上下两排管之间的烟气流速较小;增压富氧燃烧下,管间最大烟气流速仅为 0.16 m/s,且各处烟气流速相对均匀些。图中纵向管排间颜色较深区域烟气的流速较大,由于烟气的流动状态决定着颗粒相的流态,因此该区域颗粒的流速也较大,容易发生磨损。

4.2 颗粒相运动状态

两种工况下省煤器管束间的颗粒流速分布如图 6 所示。

由以上颗粒流速分布可见,在靠近进口的几排

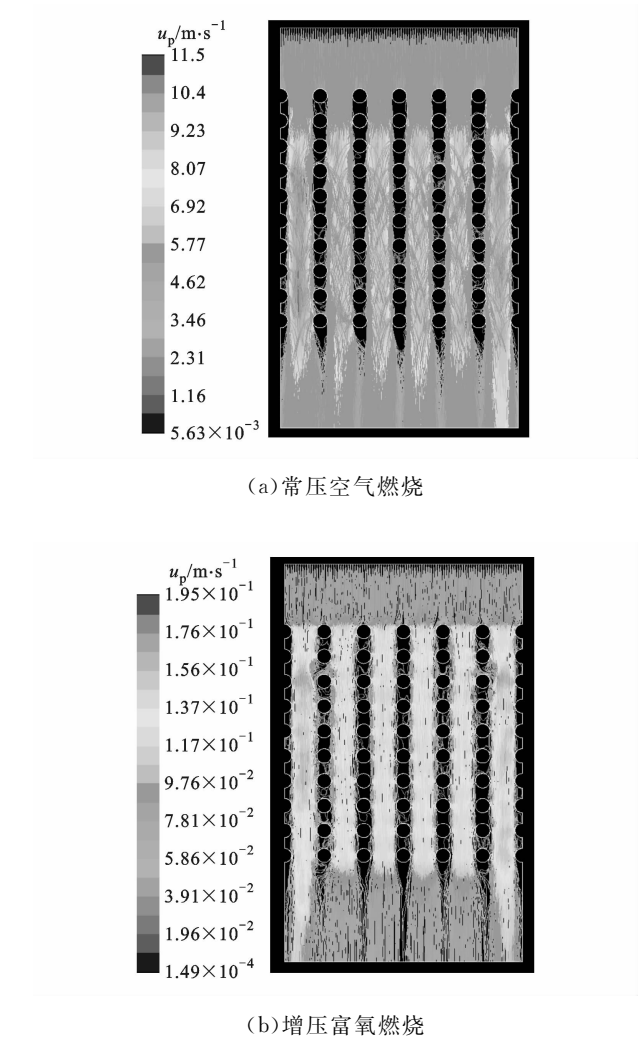


图 6 常压空气燃烧和增压富氧燃烧下的颗粒流速分布

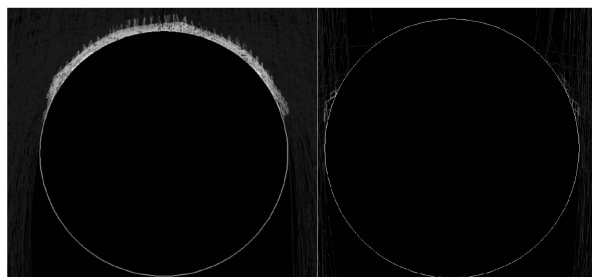
管附近,颗粒的流速分布比较均匀,沿着烟气流动方向,颗粒的流速分布变得不均匀。这是由于在后面的管排上,颗粒的碰撞次数增多,运动也更复杂。

常压空气燃烧下,由于烟气流速大,颗粒的 Stokes 数也较大,烟气携带能力差,颗粒撞击壁面后受到的约束小;增压富氧燃烧下,颗粒流速和 Stokes 数小,而且烟气密度大,颗粒跟随能力强。通过与连续相速度分布进行对比也可以发现,与常压空气燃烧工况相比,增压富氧燃烧下颗粒相与连续相的速度分布更接近,这也说明了增压下颗粒的跟随性好。通过颗粒运动的动画也可以证明这一点。

4.3 两种工况下的磨损位置对比

借助 FLUENT 中的用户自定义函数,将 Oka 模型嵌入软件,可得到两种工况下省煤器管束的磨损情况对比,如图 7 所示。

由图 7 可见:常压空气燃烧下,颗粒对第 1 排管



(a)常压空气燃烧



(b)增压富氧燃烧

图7 常压空气燃烧和增压富氧燃烧下第1排及其后管排的磨损位置

的撞击最多,该排管束的磨损也最严重,对于第1排以后的管排,撞击和磨损较小,且主要发生在管壁上迎风阶两侧 $40^\circ \sim 80^\circ$;增压富氧燃烧下,第1排及后面的管排上颗粒的撞击和磨损分布较均匀,且除了第1排管外,单根管的最大磨损区域位于管壁迎风阶两侧 60° 附近。

常压空气燃烧下,颗粒跟随性差,颗粒更容易穿过边界层撞击第1排管,撞击后的颗粒动能减小,对后排管的撞击磨损能力减弱;增压富氧燃烧下,进口处颗粒流速小,颗粒跟随性好,颗粒不能穿过第1排管的边界层,在第1排管后,颗粒运动速度增大,Stokes数增大,跟随性变差,也更容易穿过边界层撞击管壁,造成管壁磨损。

4.4 两种工况下的磨损速率对比

各管排平均磨损速率是指各管排在管壁面上磨损速率的平均值,最大磨损速率为最大磨损位置处的磨损速率。两种工况下沿烟气流向各管排的平均磨损速率和最大磨损速率如图8、9所示。

由图8、9可见:常压空气燃烧下,第1排管的平均磨损速率远大于其余管排,达到其余管排平均磨损速率的十几倍,其余管排除了第2排管磨损速率较低外,自第3排管后趋于平稳;增压富氧燃烧下的平均磨损速率和最大磨损速率比常压空气燃烧小了

近4个数量级,且各排管的平均磨损速率波动较小,最大磨损速率发生在第3排管上,其余各管排相差不大。这是由流体及颗粒运动特性决定的。以上结论与由颗粒运动分布图中得到的结论相吻合。

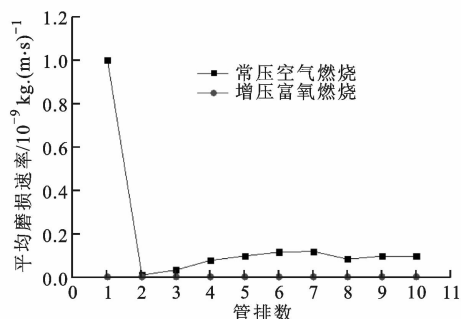


图8 不同工况下沿烟气流向各管排的平均磨损速率

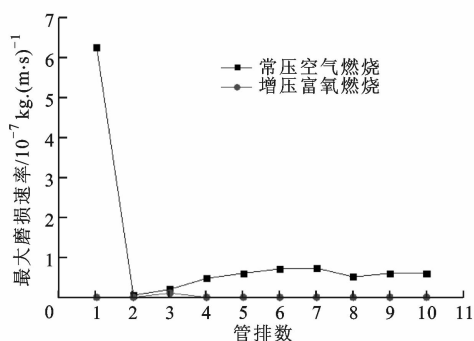


图9 不同工况下沿烟气流向各管排的最大磨损速率

由于增压富氧燃烧下最大磨损速率小于常压空气燃烧,也就是说,在增压富氧燃烧下,省煤器的使用寿命比常压空气燃烧下长,而且最易发生磨损的管排位置发生了变化,并且各排管的磨损速率分布更加均衡,与常压空气燃烧下相比更加合理。

5 结论

利用CFD软件对常压空气燃烧和增压富氧燃烧下的烟气流动和烟气中飞灰颗粒的运动进行了模拟,对比选择出合适的磨损模型,并利用该模型分析研究了两种工况下的磨损特性,所得结论如下。

(1)通过对3种磨损模型进行对比发现,Oka模型考虑的因素相对最全面,并且与实验数据最吻合,平均误差为24.1%。

(2)颗粒入射速度和颗粒粒径越大,壁面材料硬度越小,则颗粒对受热面管壁磨损量越大,且随着颗粒入射角的增大,受热面管壁磨损量先增大后减小。

(3)常压空气燃烧下省煤器管束间流体的速度

比增压富氧燃烧下大了2个数量级。

(4)与常压空气燃烧相比,增压富氧燃烧下颗粒的撞击在各排管上的分布更均匀,这与流体运动特性及颗粒的 Stokes 数等有关,且除了第1排管外,单管最大磨损区域位于管壁迎风阶两侧60°附近。

(5)常压空气燃烧下,顺列管束第1排管磨损速率最大,是其余管排平均磨损速率的十几倍,增压富氧燃烧下最大磨损速率发生在第3排管上,且最大磨损速率远小于常压空气燃烧,各排管磨损速率分布均衡,更加合理。

参考文献:

- [1] 阎维平. 洁净发电技术 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2008: 183-190.
- [2] 米翠丽. 富氧燃煤锅炉设计研究及其技术经济性分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [3] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理和计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [4] 陈丽华, 金军, 樊建人, 等. 电站锅炉受热面管束防磨技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 67-71.
CHEN Lihua, JIN Jun, FAN Jianren, et al. Study on the erosion protection technique for the boiler tube bundles of power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 67-71.
- [5] GANDHI M B, VUTHALURU R, VUTHALURU H, et al. CFD based prediction of erosion rate in large scale wall-fired boiler [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 42(1): 90-100.
- [6] HONG J, CHAUDHRY G, BRISSON J G, et al. Analysis of oxy-fuel combustion power cycle utilizing a pressurized coal combustion [J]. Energy, 2009, 34(9): 1332-1340.
- [7] 马凯, 阎维平, 高正阳. 增压富氧燃烧烟气物性及对流传热系数的研究 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(11): 55-62.
MA Kai, YAN Weiping, GAO Zhengyang. Flue gas properties and convective heat transfer coefficient under pressurized oxy-fuel combustion [J]. Journal of Power Engineering, 2011, 31(11): 55-62.
- [8] MORSI Y S, TU J Y, YEOH G H, et al. Principal characteristics of turbulent gas-particulate flow in the vicinity of single tube and tube bundle structure [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(15): 3141-3157.
- [9] 刘洪涛. 气固两相流中微细颗粒沉积与扩散特性的数值研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

- [10] WANG Jianrong, SHIRAZI S A. A CFD based correlation for erosion factor for long-radius elbows and bends [J]. ASME Journal of Energy Resources Technology, 2003, 125(1): 26-34.
- [11] 吕萍, 王鹏. 不同粒径飞灰对顺列管束磨损的非线性特性研究 [J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(4): 420-423.
LU Ping, WANG Peng. Non-linear characteristics study on wear of in-line bundle by fly-ash with different diameters [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(4): 420-423.
- [12] ROBERT W L, JACQUES X B. State-of-the-art review of erosion modeling in fluid/solids systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28(6): 543-602.
- [13] MBABAZI J G, SHEER T J, SHANDU R. A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles [J]. Wear, 2004, 257(5/6): 612-624.
- [14] CHEN X H, MCLAURY B S, SHIRAZI S A. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics(CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees [J]. Computers & Fluids, 2004, 33(10): 1251-1272.
- [15] ZHANG Yongli. Application and improvement of computational fluid dynamics(CFD) in solid particle erosion modeling [D]. Tulsa, OK, USA: The University of Tulsa, 2006.
- [16] OKA Y I, OKAMURA K, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1 Effects of impact parameters on a predictive equation [J]. Wear, 2005, 259(1/6): 95-101.
- [17] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2 Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage [J]. Wear, 2005, 259(1/6): 102-109.
- [18] BENEDETTO B, MARCO E R, MARCO B, et al. Evaluation of erosion-corrosion in multiphase flow via CFD and experimental analysis [J]. Wear, 2003, 255(1/6): 237-245.
- [19] BOURGOYNE A. Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production [C] // Proceedings of SPE/IADC Drilling Conference. New Orleans, LA, USA: Society of Petroleum Engineers, 1989: 807-816.

(编辑 荆树蓉)