

周钱,钱进,王康,等. 超超临界锅炉水冷壁近壁面颗粒特性及冲刷磨损研究[J]. 智能计算机与应用,2024,14(5):136-143.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.240518

超超临界锅炉水冷壁近壁面颗粒特性及冲刷磨损研究

周钱¹, 钱进¹, 王康², 林志恒³, 邓传记², 殷金桥¹, 刘动力²

(1 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2 国家电投集团贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551700;

3 中国电力工程顾问集团 中南电力设计院有限公司, 武汉 430060)

摘要: CFB 锅炉水冷壁冲刷、磨损、减薄及保管问题造成了机组运行安全性、可靠性降低,为研究超超临界参数锅炉水冷壁近壁面颗粒特性,通过数值模拟的方法对 BMCR 工况下炉膛整体颗粒特性、不同粒径和不同冲击角下水冷壁墙角区域颗粒特性进行分析。研究表明, BMCR 工况下,炉膛颗粒体积分数呈“马鞍形”分布;颗粒在水冷壁墙角区域向下运动时,墙角中心区域和水冷壁管迎风侧的颗粒体积分数更高,在墙角内测,颗粒体积分数对相对磨损量影响更大,在墙角外侧颗粒速度对相对磨损量影响更大;颗粒冲击角度越大,获得的高水平方向速度分量越大,受到来自炉膛中心流体的裹挟作用也越大,墙角内测更容易形成高速度区域,水冷壁迎风侧壁面整体相对磨损量大于背风侧。

关键词: 超超临界参数; 水冷壁; 颗粒特性; 相对磨损量

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)05-0136-08

Numerical simulation of particle characteristics and erosion wear near the wall of water cooled ultra supercritical boiler

ZHOU Qian¹, QIAN Jin¹, WANG Kang², LIN Zhiheng³, DENG Chuanji², YIN Jinqiao¹, LIU Dongli²

(1 College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2 State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Chayuan Power Generation Co., Ltd., Bijie 551700, Guizhou, China; 3 Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430060, China)

Abstract: The problems of erosion, wear, thinning, and storage of the water cooled wall of CFB boilers have led to a decrease in the safety and reliability of unit operation. In order to study the particle characteristics near the wall surface of the water cooled wall of ultra supercritical parameter boilers, numerical simulation is used to analyze the overall particle characteristics of the furnace under BMCR conditions, as well as the particle characteristics in the corner area of the water cooled wall with different particle sizes and impact angles. The research results indicate that under BMCR conditions, the volume fraction of furnace particles exhibits a "saddle shaped" distribution; When particles move downwards in the corner area of the water-cooled wall, the particle volume fraction in the center area of the wall corner and on the windward side of the water-cooled wall tube is higher. When measured inside the wall corner, the particle volume fraction has a greater impact on relative wear, while the particle velocity outside the wall corner has a greater impact on relative wear; The larger the angle of particle impact, the greater the velocity component in the high horizontal direction obtained, and the greater the entrainment effect of the fluid from the center of the furnace. The inner side of the wall corner is more likely to form a high velocity area, and the overall relative wear on the windward side of the water-cooled wall is greater than that on the leeward side.

Key words: supercritical parameter; water cooled wall; particle characteristics; relative amount of wear

0 引言

宽燃料、宽负荷及低污染物排放等优势使循环流化床锅炉(Circulating Fluidized Bed, CFB)发电机

组在未来新能源为主的新型电力系统中仍具有很强的生命力。机组大型化和参数超临界、超超临界化,使机组热效率得以提高的同时,也使锅炉出现了受热面磨损等问题。CFB 锅炉水冷壁的磨损、减薄及

基金项目: 国家电投贵州金元茶园发电公司科技项目(CPCEC-ZCB-13-2022-16-11); 贵州省科技支撑计划项目([2020]2Y040)。

作者简介: 周钱(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:热能利用与节能工程。

通讯作者: 钱进(1965-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:热动力过程多尺度数值模拟与仿真技术。Email:jqian@gzu.edu.cn

收稿日期: 2023-04-25

爆管问题导致了机组运行安全性、可靠性下降,当锅炉燃用更硬的煤种时,这一问题更加突出。在近几年中,超临界 CFB 锅炉发电技术在国内得到了充分发展并取得了重大的突破,也进一步引领了该领域在全球范围内的发展^[1-4]。

针对 CFB 锅炉炉膛内颗粒流动特性,国内外学者进行了大量研究。周星龙等学者^[5]对一台 330 MW 循环流化床锅炉的壁面颗粒浓度分布进行了分析,结果发现在距离壁面 1 m 范围内,颗粒浓度随着壁面距离的增加而减小;在高度方向上,测孔高度越高,颗粒浓度越小。李振杰^[6]利用仿真软件模拟了多组分颗粒工况下 CFB 锅炉流动特性,研究结果表明颗粒沿轴向时的时均浓度分布均为“上密下稀”的分布特征。连晓芳^[7]研究发现,缩小二次风平面面积以及适当缩小二次风喷口与布风板的距离,有助于提高稀相区颗粒物的浓度,同时减少密相区颗粒物的浓度。李静等学者^[8]基于计算颗粒流体学(CPFD)方法,对某超临界 350 MW CFB 锅炉的颗粒特性进行数

值模拟,结果表明在炉膛高度方向上,颗粒轴向运动速度呈现出中间高、近壁面处低的特点。

论文以一台燃用无烟煤的 660 MW 超超临界 CFB 锅炉为研究对象,对炉膛整体和水冷壁墙角区域近壁面气固流动特性及颗粒对受热面的冲刷磨损进行数值模拟研究。

1 研究对象

该型 660 MW 超超临界循环流化床锅炉为双布风板单炉膛结构,整体“H”型左右对称布置,炉膛平衡通风,配备 6 个外置床调节床温、再热蒸汽温度及 6 台高温冷却式分离器进行气固分离。

锅炉水冷壁为垂直上升的膜式管屏,四周水冷壁为光管,中隔墙水冷壁为内螺旋管。该循环流化床锅炉炉膛左右侧管共 2×697 根,炉膛前后墙管共 2×349 根,数值模拟中使用的水冷壁管单元管外径为 31.8 mm,管壁厚度和鳍片厚度为 7 mm,管节距为 45 mm,管材质为 15CrMoG,水冷壁管参数见表 1。

表 1 水冷壁管材料参数

Table 1 Main parameters of the boiler

温度/℃	弹性模量/ GPa	线膨胀系数/ (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	泊松比	屈服强度/ MPa	许用应力/ MPa	温度/℃	弹性模量/ GPa
100	199	11.90	40.6	574	0.295	295	147	100	199
150	194	12.20	40.4	582	0.298	283	145	150	194
200	190	12.60	40.1	590	0.300	269	145	200	190
250	187	12.90	39.5	598	0.300	256	145	250	187
300	181	13.20	38.7	607	0.301	242	143	300	181
350	176	13.45	37.8	632	0.303	242	135	350	176
400	172	13.70	36.8	657	0.304	216	128	400	172

2 模型及边界条件

2.1 几何模型及网格划分

对几何模型进行合理的简化有利于减少计算时间,炉膛整体简化后如图 1 所示,网格划分及部分细节如图 2 所示。本部分采用 Barracuda 进行模拟,炉膛整体网格划分后最终网格数确定在 180 万个左右。

循环流化床在边壁附近颗粒浓度较大,通常向下流动。墙角区域是炉膛颗粒主要汇集处,颗粒在该区域会出现回流现象,选取密相区水冷壁墙角处的模型进行研究,炉膛墙角区域几何模型如图 3 所示。由图 3 可知,单侧水冷壁保留 10 根管道单元,模型上端为代表贴壁下降的颗粒流入口 1,模型沿着 y 轴负方向和 x 轴负方向的表面分别代表靠近炉

膛中心处汇集来的颗粒流入口 2 和入口 3,模型底部为压力出口。本部分采用 Fluent 软件进行模拟,划分网格时,对管道壁面进行局部加密处理,网格模型如图 4 所示,经网格无关性检验后确定的网格数量约 150 万个。



图 1 简化后的物理模型图

Fig. 1 Simplified physical model diagram

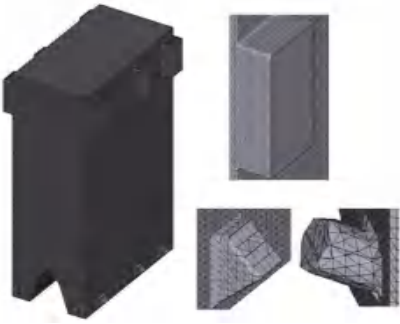


图2 网格划分及部分细节展示

Fig. 2 Grid division and partial detail display

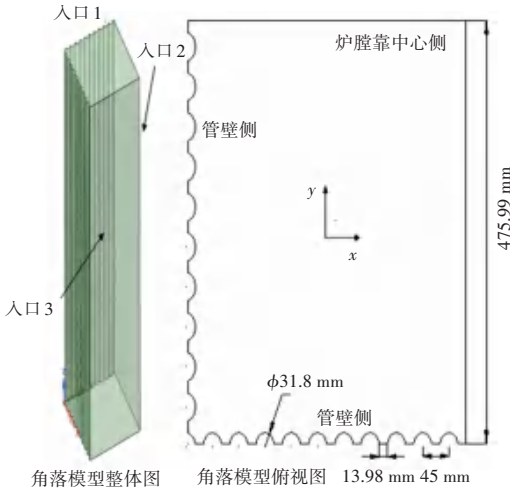


图3 炉膛墙角区域几何模型

Fig. 3 Geometric model of furnace wall corner area

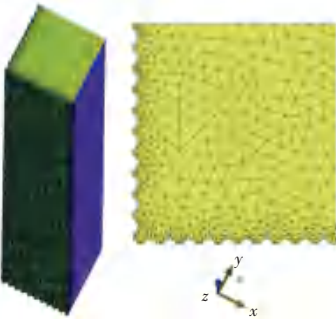


图4 炉膛墙角区域网格模型

Fig. 4 Grid model of furnace wall corner area

2.2 数学模型

2.2.1 流体相方程

气固两相流动中流体相质量方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \tilde{\mathbf{N}} \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) = \rho_{pg}^c \quad (1)$$

其中, ε_g 表示流体相体积分数; \mathbf{u}_g 表示流体相速度, 单位为 m/s ; ρ_g 表示流体相密度, 单位为 kg/m^3 ; ρ_{pg}^c 表示流体相单位控制体积内的质量生成率。流体相动量方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \tilde{\mathbf{N}} \cdot (\varepsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\tilde{\mathbf{N}} p + \tilde{\mathbf{N}} \cdot (\varepsilon_g \boldsymbol{\tau}_g) + \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} - F \quad (2)$$

其中, p 表示压力, 单位为 Pa ; \mathbf{g} 表示重力加速度, 单位为 m/s^2 ; $\boldsymbol{\tau}_g$ 表示气体应力张量, 单位为 Pa ; F 表示颗粒与气体间的动量交换率。进一步推得:

$$F = \iint f m_p [D_p(u_g - u_p) - \frac{1}{\rho_p} \tilde{\mathbf{N}} p] dm_p du_p \quad (3)$$

其中, u_p 表示颗粒速度, 单位为 m/s ; D_p 表示曳力系数; m_p 表示颗粒质量, 单位为 kg ; ρ_p 表示颗粒密度, 单位为 kg/m^3 。

2.2.2 颗粒相方程

颗粒相动量方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = D_p(u_g - u_p) - \frac{1}{\rho_p} \tilde{\mathbf{N}} p - \frac{1}{\varepsilon_p \rho_p} \tilde{\mathbf{N}} \boldsymbol{\tau}_p + \mathbf{g} \quad (4)$$

颗粒间相互碰撞作用力利用颗粒正向作用力来描述:

$$\boldsymbol{\tau}_p = \frac{p_s \varepsilon_p^\beta}{\max[(\varepsilon_{cp} - \varepsilon_p), \varepsilon(1 - \varepsilon_p)]} \quad (5)$$

其中, p_s 表示压力常数, 单位为 Pa ; ε 为 10^{-7} , 一个数量级很小的数; ε_{cp} 表示紧密堆积时颗粒体积分数; β 的推荐值为 $2 \sim 5$ 。

颗粒相的能量方程为:

$$C_V \frac{dT_p}{dt} = \frac{A_p}{m_p} \gamma_p (T_g - T_p) + \frac{1}{m_p} Q_{c,fp} \quad (6)$$

其中, T_g 表示流体相的温度, 单位为 K ; T_p 表示颗粒相的温度, 单位为 K ; γ_p 表示相间传热系数; $Q_{c,fp}$ 表示相间化学反应传递的热量, 单位为 kJ ; A_p 表示颗粒表面积, 单位为 m^2 ; C_V 表示比热容, 单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ 。

3 模拟结果及分析

3.1 BMCR 工况下炉膛颗粒特征分析

根据制造厂设计, 本文中设置过量空气系数为 1.2, 一、二次风配比为 $5:5:4.5$ 。锅炉最大连续运行工况 (Boiler Maximum Continue Rate, BMCR) 下, 炉膛内颗粒的速度分布呈现马鞍形分布, 如图 5 所示。中心区域速度朝上, 近壁面区域部分颗粒朝下运动 (云图中表现为负速度)。在炉膛中上部, 颗粒只在靠近壁面处和转角处向下运动。这与大多数文献中“H”型布置 CFB 锅炉的炉内颗粒速度分布相吻合, 整体呈现出马鞍形分布。炉膛中上部颗粒粒径较小, 容易出现团聚现象, 这也是颗粒只在靠近壁面处和转角处呈现向下运动趋势的原因。

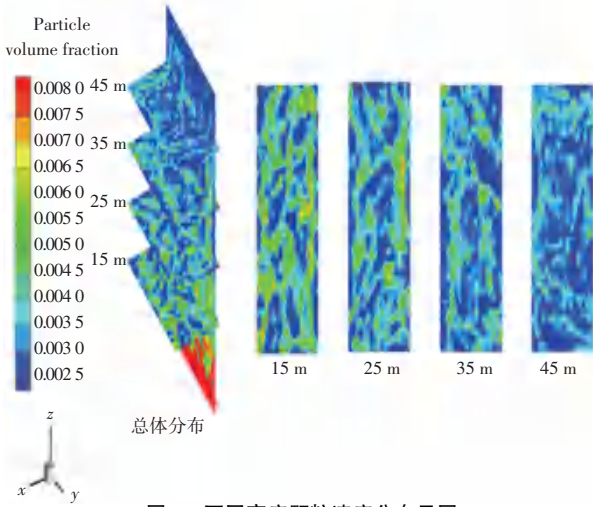


图5 不同高度颗粒速度分布云图

Fig. 5 Cloud chart of particle velocity distribution at different heights

不同高度颗粒体积分数分布云图如图6所示。不同高度颗粒平均体积分数见表2。由图6和表2可知,炉膛内颗粒在高度方向上分布呈现出上稀下密的分布规律,在水平方向上,炉膛转角处和贴近壁面处的颗粒体积分数较高。前墙和后墙几何尺寸相对较小,具有相对较强的壁面效应,小粒径颗粒在这里更容易聚集,导致炉膛前壁和后壁颗粒体积分数相对较高。

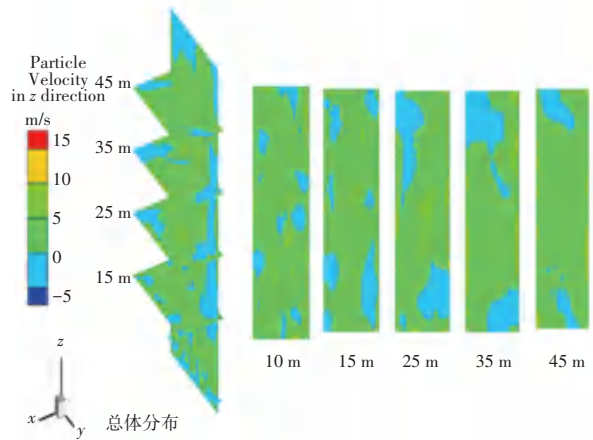


图6 不同高度颗粒体积分数分布云图

Fig. 6 Cloud chart of particle volume fraction distribution at different heights

表2 不同高度颗粒平均体积分数

Table 2 Average volume fraction of particles at different heights

高度/m	颗粒平均体积分数
15	0.004 40
20	0.004 37
25	0.003 98
30	0.003 95
35	0.004 07
40	0.003 72

3.2 不同颗粒粒径下墙角区域流动数值模拟和壁面磨损分析

炉膛内颗粒粒径的大小是炉膛气固流动结构最主要的影响因素之一,小粒径颗粒更容易被流体携带,颗粒因粒径不同而具有不同的流动轨迹,也因此构成了炉膛内气固流动的内、外循环结构。颗粒粒径占百分比见表3。由表3可知,只有5%的颗粒粒径小于0.015 mm,而粒径小于0.5 mm的颗粒占95%,所以粒径在这两者之间的颗粒占绝大部分,具有研究价值,所以下文重点研究颗粒粒径为0.05 mm、0.15 mm、0.50 mm时颗粒对水冷壁的影响。

表3 颗粒粒径占百分比

Table 3 Percentage of particle size

颗粒粒径/mm	百分比/%
小于0.015	5
小于0.050	35
小于0.150	75
小于0.500	95
小于1.500	100

图7为不同粒径颗粒在不同高度下的速度分布云图。由图7可知,随着高度的降低,颗粒在流体的裹挟作用下,向水冷壁墙角区域加速靠近的现象越明显。整个速度场呈现出中心速度最大且逐级向外降低的波纹状分布,速度最大的颗粒处出现在靠近墙角的边壁处。靠近墙角处水冷壁管迎风侧和背风侧颗粒速度基本一致,而在远离墙角的区域呈现出管壁迎风侧速度小于背风侧速度。分析不同粒径颗粒在同一位置的速度可知较小粒径的颗粒更易受到流体影响,在水平方向上更容易被气流裹挟运动到墙角区域。

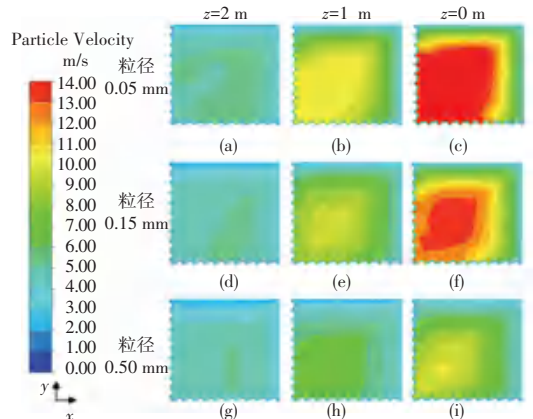


图7 不同粒径在不同高度下的速度分布云图

Fig. 7 Cloud chart of velocity distribution for different particle sizes at different heights

本模型中水冷壁厚度为 7 mm,定义距离水冷壁外壁一倍壁厚的区域为水冷壁近壁面区域,对粒径为 0.15 mm 时的颗粒速度云图进行取点定量分析,绘制如图 8、图 9 所示的在不同高度下 $x = 22.9$ mm 和与 X/Y 轴夹角 45° 对角线的速度分布折线图。根据图 8 的结果可以看出,当截面高度在 0 m 时,颗粒的速度分布非常不稳定,出现了局部速度急剧下降的现象。然而,随着高度的增加,颗粒的速度分布逐渐稳定。由图 9 可以看到,在对角线方向上,颗粒的速度呈现出两侧速度较低、中间速度较高的分布情况。出口截面的最大速度约为 13.7 m/s。

墙角区域和水冷壁近壁面颗粒体积分数越大,且随着颗粒粒径的增大,壁面对局部颗粒体积分数的影响越大,墙角区域颗粒体积分数分层现象更加明显,以(i)图最为典型。

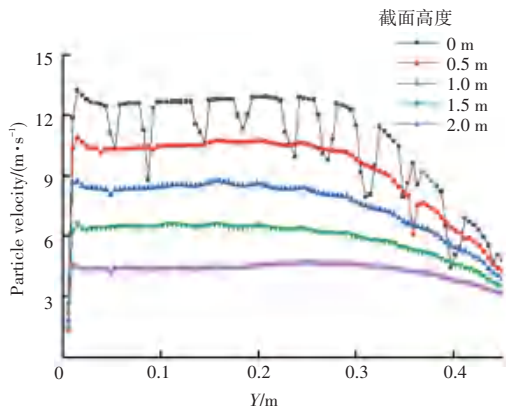


图 8 不同高度下 $x = 22.9$ mm 颗粒速度分布折线图

Fig. 8 Broken line diagram of particle velocity distribution for $x = 22.9$ mm at different heights

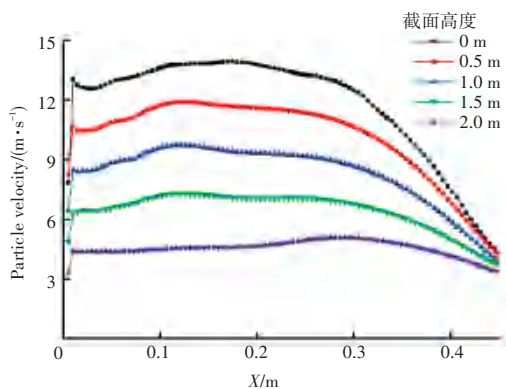


图 9 不同高度下与 X/Y 轴夹角 45° 对角线上颗粒速度分布折线图
Fig. 9 Broken line diagram of particle velocity distribution on a diagonal line with an angle of 45° from the X/Y axis at different heights

图 10 为不同高度下单一粒径颗粒体积分数分布云图。从图 10 中可以看出,不同截面高度均呈现出颗粒越靠近墙角区域和水冷壁壁面,颗粒体积分数越高。同时,水冷壁迎风侧颗粒体积分数高于背风侧体积分数,该现象在靠近流体入口处越发明显。比较同一高度位置云图可以发现,颗粒粒径越大,在

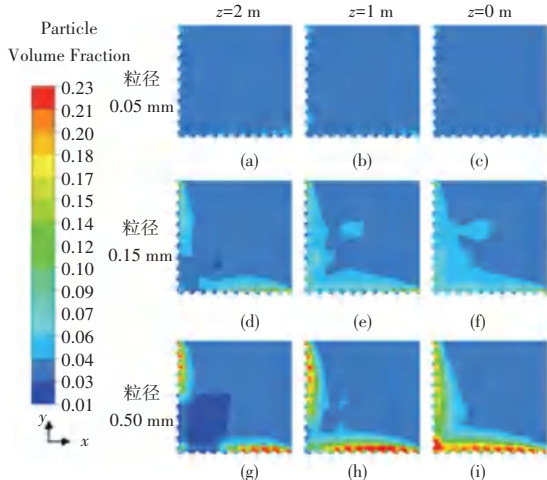


图 10 不同高度下单一粒径颗粒体积分数分布云图

Fig. 10 Cloud chart of volume fraction distribution of single particle size at different heights

对粒径为 0.15 mm 时的颗粒体积分数分布云图进行取点定量分析,分别绘制不同高度下 $x = 22.9$ mm 和与 X/Y 轴夹角 45° 对角线的体积分数分布折线图,如图 11、图 12 所示。从图 11 可以得出在距离 Y 轴距离小于 0.25 m 范围内,颗粒体积分数随着截面高度的降低而增大。在距离 Y 轴距离大于 0.25 m 范围内,随着高度的减小,体积分数随之减小。由图 12 可以看出,在对角线方向上,颗粒体积分数基本上呈先增大后减小态势,最终体积分数基本都在 0.04 左右,墙角区域颗粒体积分数远大于外侧,最大时达到 0.085。

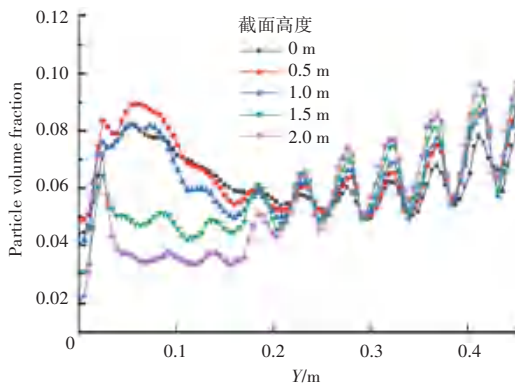


图 11 不同高度下 $x = 22.9$ mm 颗粒速度分布折线图

Fig. 11 Broken line diagram of particle velocity distribution for $x = 22.9$ mm at different heights

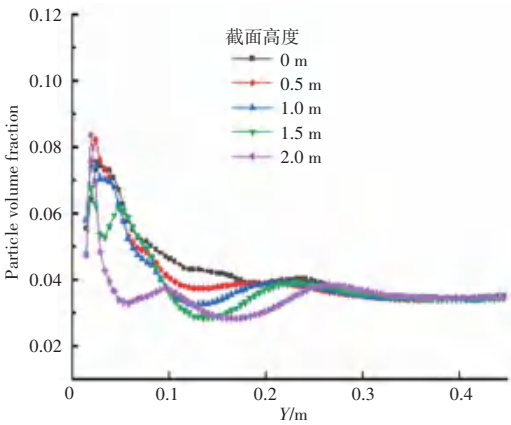


图 12 不同高度下与 X/Y 轴夹角 45° 对角线上颗粒体积分数分布折线图

Fig. 12 Broken line diagram of particle volume fraction distribution on a diagonal line with an angle of 45° from the X/Y axis at different heights

综上所述,距离墙角中心距离和水冷壁管周围位置会影响颗粒速度和体积分数分布,因此,在计算水冷壁近壁面相对磨损量时本文设置了磨损计算点如图 13 所示。磨损模型使用 Tabakoff 磨损模型,数学模型公式见式(7):

$$E_d = k_4 f(\alpha) v_3^2 (\cos \alpha)^2 (1 - R_T) + f(v_3) \quad (7)$$

其中, E_d 表示单位质量颗粒造成材料的磨损质量,无量纲; $f(\alpha)$ 表示攻角函数; v_3 表示颗粒运动速度相对值,无量纲; $f(v_3) = k_5 (v_3 \sin \alpha)$; $R_T = 1 - 0.0016 v_3 \sin \alpha$; k_4, k_5 为经验系数,本文中分别为 1.505×10^{-6} 和 5.0×10^{-12} 。

为了衡量壁面磨损,研究简化了计算中的冲击

角为颗粒 Z 轴方向速度分量与颗粒速度矢量的夹角,考虑到单颗粒和颗粒团对壁面磨损造成的速率不同,根据靶材磨损速率与颗粒浓度成正比的原则,使用颗粒体积分数来乘以计算结果,得到相对磨损量。

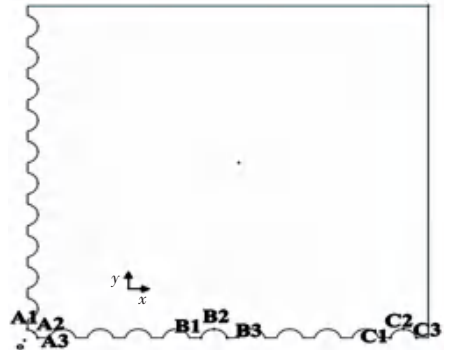


图 13 磨损计算点位置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of wear calculation point location

粒径不同时壁面各点相对磨损量如图 14 所示。从图 14 可以看出,靠近墙角区域 Z 轴方向上 0 m 到 0.5 m 区域整体的磨损量较大,各测点相对磨损量随着颗粒粒径的增加而增加,因为粒径的增大,颗粒动能也随之增大,进而增大了颗粒对水冷壁的磨损作用,靠近水冷壁角处的增幅最大。从水冷壁管壁上磨损点的相对磨损量来看, A2 点相对磨损量整体高于 A1 和 A3 点,迎风侧 B2、B3 点相对磨损量整体高于背风侧 B1 点,但迎风侧 C3 点相对磨损量不一定高于背风侧 C1 点,因为相对磨损量同时受颗粒速度和颗粒体积分数的影响。

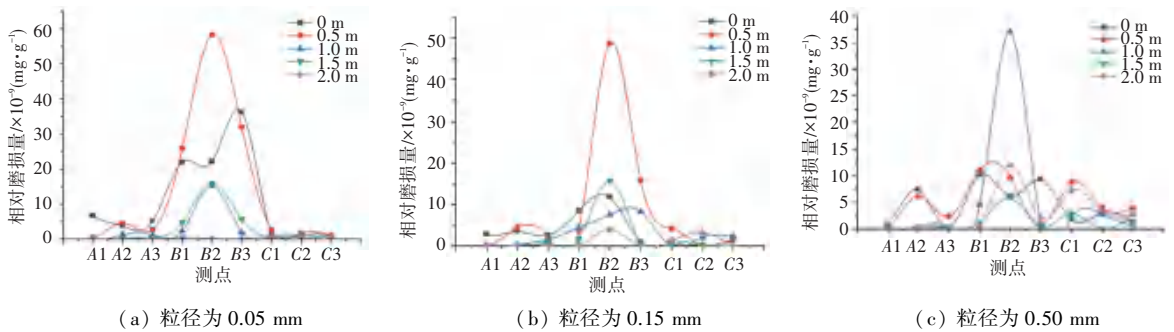


图 14 粒径不同时壁面各点相对磨损量

Fig. 14 Relative wear of each point of the wall when the particle size is different

3.3 不同冲击角下墙角区域流动数值模拟和壁面磨损分析

颗粒冲击角度是影响壁面磨损程度的重要因素之一,冲击角度会随着炉膛内部燃烧和流体流动的变化而变化。本节通过改变颗粒入射与 Z 轴负方

向夹角,模拟 25°、50°、75° 三种不同冲击角下颗粒在墙角区域的流动状态并分析其对壁面造成的磨损情况,颗粒速度分布云图和颗粒体积分数分布云图如图 15、图 16 所示。从图 15 中可以看出,颗粒冲击角度越大,在靠近墙角区域越容易形成高速区。

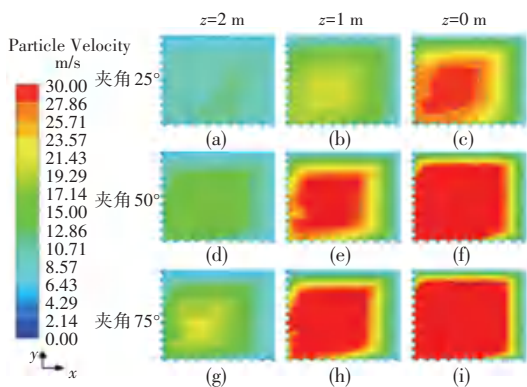


图 15 不同冲击角下颗粒速度分布云图

Fig. 15 Cloud chart of particle velocity distribution at different incidence angles

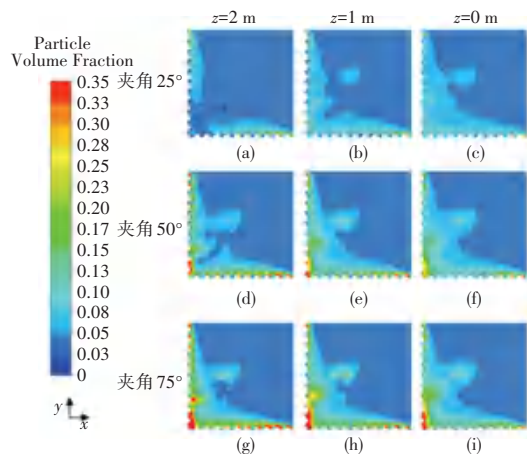


图 16 不同冲击角下颗粒体积分数分布云图

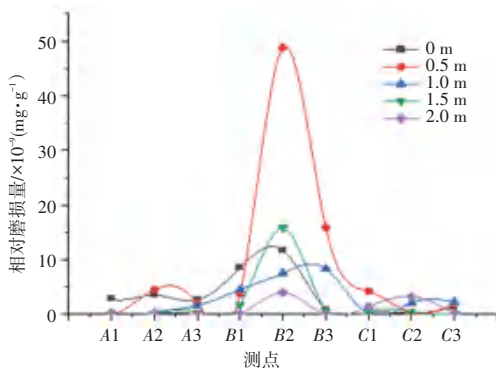
Fig. 16 Cloud chart of particle volume fraction distribution at different incidence angles

图 16 表明,随着高度的降低,颗粒会呈现出墙角区域聚集的趋势,形成的等体积分数带愈发明显。当冲击角为 25°时,水冷壁墙角区域颗粒体积分数随着高度的降低而增大,冲击角为 75°时这一规律恰好相反。同一高度时,伴随着夹角的增大,水平方向上的速度也随之增大,与图 16 中水冷壁墙角区域颗粒体积分数增大现象相符合。此外,颗粒在 X 轴和 Y 轴方向上入口段水冷壁管迎风侧颗粒体积分数均大于背风侧。流体充分发展后,水冷壁管两侧颗粒体积分数趋于一致,在转角处,由于气流的汇聚,所以会出现体积分数突增的现象。

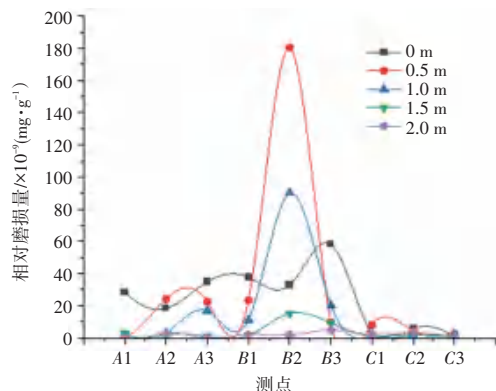
选取和上文相同的点计算不同冲击角壁面点相对磨损量,计算结果如图 17 所示。

结果表明,随着冲击角度的增大,各点整体相对磨损量都有所增大,靠近墙角区域的增幅较为明显,因为更大的水平速度会携带更多的颗粒在墙角处聚集,进而发生磨损,而颗粒在 C1、C2、C3 点处体积分

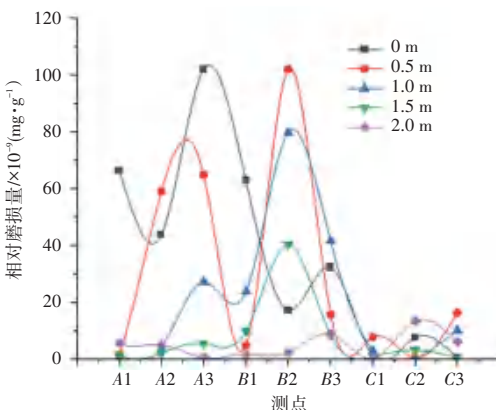
数也随之降低,但由于冲击角增大带来颗粒速度的增大,所以该点处相对磨损量也会有所增加。水冷壁迎风侧壁面整体相对磨损量大于背风侧,且在 B2 点处的相对磨损量为局部最大值,冲击角为 50°时,最大值达到 $180.54 \times 10^{-9} (\text{mg/g})$,远远大于其他测点,该工况下容易发生爆管等现象。



(a) 冲击角为 25°



(b) 冲击角为 50°



(c) 冲击角为 75°

图 17 粒径 0.15 mm 时不同冲击角下壁面各点相对磨损量

Fig. 17 Relative wear of each point of the wall under different impact angle at particle size of 0.15 mm/s

4 结束语

(1) BMCR 工况下,颗粒体积分数呈“马鞍形”分布,且在壁面墙角处和贴近壁面处的体积分数相

对较大。

(2)颗粒粒径增大会导致在水冷壁墙角处和近壁面处的颗粒体积分数增大,进而导致相对磨损量的增大。靠近水冷壁墙角处颗粒体积分数对相对磨损量的影响较大,而随着与墙角距离的增加,相对磨损量的主要影响因素变为颗粒速度,相对会在某一位置达到最大值,比如文中的B2处,应加强对该区域的检测,以防止爆管现象发生。

(3)颗粒冲击角度越大,获得的高水平方向速度分量越大,受到来自炉膛中心流体的裹挟作用也越大,墙角内侧更容易形成高速度区域,会造成水冷壁迎风侧壁面相对磨损量增大。

(4)机组运行中可通过颗粒粒径、颗粒形状等的调整控制有效减少冲刷和磨损;也可在易发生冲刷磨损的部位采取主动防磨措施,如采用防磨护瓦、防磨梁和金属格栅等。

参考文献

[1] 凌文,吕俊复,周托,等. 660MW超超临界循环流化床锅炉研

究开发进展[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(9): 2515-2524.

[2] GAO Mingming, YUE Guangxi, LEI Xiujian, et al. Research on control system of 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(35):6319-6328.

[3] 蔡润夏,吕俊复,凌文,等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. 中国电力, 2016, 49(12):1-7.

[4] TANG Guoli, ZHANG Man, GU Junping, et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis on evaporator system of a 660 MWe ultra-supercritical CFB boiler [J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2019, 151: 385-393.

[5] 周星龙,谢建文,范永胜,等. 330MW循环流化床锅炉炉膛壁面颗粒浓度分布测量[J]. 热力发电, 2015,44(1): 39-43.

[6] 李振杰. CFB内多组分颗粒和富氧燃烧下流动和燃烧特性的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.

[7] 连晓芳. 炉膛结构参数对CFB锅炉颗粒相浓度分布的影响研究[J]. 现代机械, 2018(4):59-62.

[8] 李静,申欣,赵强,等. 某350 MW机组循环流化床锅炉颗粒流动特性数值模拟研究[J]. 热力发电, 2022,51(4): 62-69.

[9] ZENG Shengting, CHEN Xi, MA Jinchun, et al. CPFD simulation on gas-solid hydrodynamics of a 300 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2018, 6(3): 208-216.

[10] 胡军军. 循环流化床提升管颗粒团聚特性的实验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.