

旋流对冲燃烧锅炉整炉膛数值模拟与工程应用研究 进展与展望

刘鹏宇¹, 李德波², 刘彦丰¹, 冯永新²

(1. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080)

摘要:旋流对冲燃烧锅炉中常采用分级送风来实现低 NO_x 燃烧,会造成炉膛内 O_2 体积分数减小、还原性气体体积分数增大,极易诱发锅炉水冷壁高温腐蚀现象。为此综述了大型旋流对冲锅炉低 NO_x 燃烧技术所导致的高温腐蚀现象及贴壁风改造数值模拟研究现状,发现目前大型旋流对冲燃烧锅炉数值模拟中普遍存在使用未考虑灰层的焦炭燃烧模型及在全炉膛数值模拟中过度简化旋流燃烧器结构的问题,导致与工程实际的误差难以进一步降低,需要进一步开展单个旋流燃烧器和整炉膛数值模拟工作,以探索旋流燃烧器内、外二次风旋流强度、风量等多回流区影响的规律和二次风量在主燃烧器区域和燃尽风区域分配对锅炉燃烧及污染物生成的影响规律。

关键词:旋流对冲锅炉;低 NO_x 燃烧;高温腐蚀;贴壁风;燃烧调整

中图分类号:TK224.1

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.03.001

[引用本文格式]刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.旋流对冲燃烧锅炉整炉膛数值模拟与工程应用研究进展与展望[J].热能动力工程,2022,37(3):1-8. LIU Peng-yu, LI De-bo, LIU Yan-feng, et al. Research progress and prospects of numerical simulation and engineering application of the whole furnace of swirl opposed combustion boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 1-8.

Research Progress and Prospects of Numerical Simulation and Engineering Application of the Whole Furnace of Swirl Opposed Combustion Boiler

LIU Peng-yu¹, LI De-bo², LIU Yan-feng¹, FENG Yong-xin²

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003;

2. China Southern Grid Power Technology Co., Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510080)

Abstract: The staged air supply is often used in swirl opposed combustion boilers to realize low NO_x combustion, resulting in the reduction of O_2 volume fraction and the increase of reducing gas volume fraction in the furnace, which is very easy to induce high-temperature corrosion of boiler water wall. Therefore, the high-temperature corrosion phenomena caused by low NO_x combustion technology of large-scale swirl opposed boiler and the research status of numerical simulation of closing-to-wall air transformation are summarized. It is found that the coke combustion model without considering the ash layer is widely used in the numerical simulation of large swirl opposed combustion boiler, and the structure of swirl burner is excessively simplified in the numerical simulation of the whole furnace, which make it difficult to further reduce the error with the engineering practice. As a result, it is necessary to further carry out the nu-

收稿日期:2021-04-28; 修订日期:2021-06-14

基金项目:国家自然科学基金(51376161)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51376161)

作者简介:刘鹏宇(1997-),男,甘肃兰州人,华北电力大学硕士研究生。

通讯作者:李德波(1983-),男,湖北宜昌人,南方电网电力科技股份有限公司教授级高级工程师。

merical simulation of single swirl burner and whole furnace chamber, so as to explore the influence law of swirl intensity and air volume of secondary air inside and outside the swirl burner on the multi backflow zone and the influence law of secondary air volume distribution in the main burner area and burnout air area on the boiler combustion and pollutant generation.

Key words: swirl opposed boiler, low NO_x combustion, high temperature corrosion, closing-to-wall air, combustion adjustment

引 言

随着我国发电量的逐渐上升,我国发电技术和发电事业正在飞速发展。国内投产了一大批超临界和超超临界燃煤发电机组^[1],而其采用的燃烧器主要为直流燃烧器和旋流燃烧器两种。在四角切向燃烧锅炉内旋转上升气流由炉膛进入对流烟道时存在较强的残余旋转,引起对流烟道两侧的烟速差和烟温差,使得烟道内热负荷分布不均匀^[1-3]。因此,超临界和超超临界锅炉机组逐渐以旋流燃烧器作为其首选。

在超临界或超超临界锅炉机组中常采用分级送风来调节燃烧,从而达到低 NO_x 燃烧的目的。而针对采用旋流燃烧器的锅炉炉内燃烧方式的研究,现场试验测量(或搭建试验台)受限于高温条件和负荷波动频繁等因素,很难选择理想的工况和测点,且测量周期较长、费用高,在各种因素干扰下很难得到准确的数据^[4]。随着商用流体力学软件 CFD(Computational Fluid Dynamics)的发展,现已能准确高效地指导工程实际问题。基于 CFD 的数值模拟能够以相对较低的成本和较短的周期,广泛地设定所需参数,得到不同参数下的炉内速度场、温度场和组分场^[5],从而能够快速开展相关实验。

超临界和超超临界锅炉机组采用分级送风的方式实现低 NO_x 燃烧,但是由于近壁面处风力不足,容易产生还原性气氛,造成锅炉出现高温腐蚀现象,使水冷壁管变薄,而引起爆管^[6]。

1 旋流燃烧器低氮燃烧数值模拟研究现状

燃煤电厂排放的烟气中污染物种类众多,其中 NO_x 的排放量可以通过调整燃烧特性来削减。燃煤锅炉中生成的 NO_x 主要有 3 种:热力型 NO_x 、快速型 NO_x 以及燃料型 NO_x 。对于燃煤锅炉来说,通常

燃料型 NO_x 占 70% ~ 85%,热力型 NO_x 占 15% ~ 25%,而快速型 NO_x 量很少,一般可以忽略不计^[6]。热力型 NO_x 的形成是由于 N_2 在燃烧室被空气中的 O_2 氧化的结果,其反应机理如下:



燃烧温度、氧气体积分数、氮气体积分数及气体在燃烧区域的停留时间对热力型 NO_x 生成影响较大。燃料型 NO_x 是由燃料中氮的有机化合物在燃烧中氧化形成的,也与燃烧条件有关,因此可以从较广泛的角度对上述两种类型 NO_x 的生成进行抑制。而快速型 NO_x 是烃类燃料在碳氢化合物过浓时燃烧产生的,因此较难控制,加之在燃煤锅炉中生成量少,可以忽略其影响^[6-8]。

文献[9]指出,与常规燃烧相比多级分级燃烧比单级燃烧可更有效地降低 NO_x 排放,因此我国已经投运的超临界和超超临界低氮燃烧锅炉机组绝大部分均采用空气分级燃烧即分级送风技术。而热力型 NO_x 与燃料型 NO_x 的生成量与炉内的高温环境、 O_2 体积分数成正比,与 CO 体积分数成反比,且热力型 NO_x 在温度低于 1 500 °C 时的生成量可以忽略不计^[8-9]。因此,为与低 NO_x 锅炉机组相适配,要求燃烧器可以将着火区燃烧温度和 O_2 体积分数控制在较低水平以抑制 NO_x 生成。而旋流燃烧器在旋流风内部会形成两个明显的回流区域,回流区域的出现让煤粉与气流更加充分地混合,防止燃烧器附近出现高温,同时稳定煤粉的燃烧^[10]。

对旋流燃烧器低氮燃烧进行数值模拟的过程中,李道林等人^[8]认为在燃煤锅炉低氮燃烧的数值模拟中,由于燃烧产物中有众多的气体生成且 NO_x 只占其中的一小部分,因此其生成对数值模拟的温度场和速度场没有较大的影响,可以待热态收敛后再模拟 NO_x 的生成。徐启等人^[11]和刘鹏宇等

人^[12-15]基于 Fluent 软件模拟了 DBC-OPCC 型旋流燃烧器,得到了燃烧器出口附近处有轴向中央回流区和两边切向回流区,具有实现燃料粒子快速引燃和平稳燃烧的良好空气动力场,并得出燃烧过程中应避免二次风速低于一次风速的现象。基于此模拟,徐启等人^[9]对同一个燃烧器进行了低氮燃烧特性的模拟,认为 NO_x 分布整体沿燃烧室轴向先增大后减小,沿径向中间高两边低, NO_x 受喷口强还原氛围影响体积分数较低;在燃烧器喷口处形成了高煤粉质量分数、高 CO 质量分数、较高湍流速度以及较低氧量供应的“三高一低”区域,该区域可以通过有效增强 NO_x 的还原来降低其排放;而只增加 O_2 体积分数对降低 NO_x 有促进作用。茅建波等人^[16]同样基于 Fluent 软件对 OPCC 型旋流燃烧器进行了数值模拟,发现通过增加送入炉膛的风量来提升 O_2 体积分数,有利于煤粉完全燃烧,但对平均温度影响较小,因此热力型 NO_x 生成量变化不大,但燃料型 NO_x 生成量却与之成正比,整体 NO_x 体积分数增加;此外,增大 O_2 体积分数造成 NO_x 生成量升高的同时 CO 体积分数大幅降低,从而得出 CO 体积分数与 NO_x 生成有密切关系。李德波等人^[7]和王松浩等人^[10]在对应用旋流燃烧器的超临界压力锅炉进行低氮燃烧数值模拟时得出,第二层旋流燃烧器上部的 NO_x 体积分数较高,是由于较高质量分数的煤粉释放出较多的氮氧化物和 CO,产生了还原性气氛,对 NO_x 的生成有抑制作用。同时,通过数值模拟分析可知,空气与主火焰在燃烧起始阶段尽早以及强烈地混合极大地制约了 NO_x 的生成,是未来降低 NO_x 排放的一个研究方向^[9]。

追求更节能、更环保的燃烧方式及实现更低的 NO_x 排放固然符合我国能源政策,但过低的 NO_x 排放燃烧方式会引入诸如水冷壁高温腐蚀、飞灰含碳量高、燃烧器烧损等其他燃烧问题,制约燃煤电厂绿色、平稳及高效运行,需要综合考虑所有的影响因素。

目前,研究者在对旋流燃烧器或采用旋流燃烧前后墙对冲布置的燃煤机组进行数值模拟时,在焦炭燃烧模型中普遍采用 FLUENT 软件自带的动力/扩散焦炭燃烧模型^[8],在该模型中选择忽略包裹在焦炭外表面灰层对焦炭燃烧的影响,则空气不必再

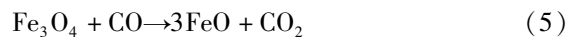
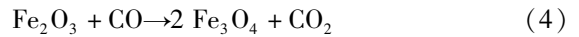
穿过灰层与焦炭进行燃烧反应。因此,基于该模型对焦炭燃烧的 Fluent 模拟往往比工程实际中要更快,导致数值模拟与工程实际中炉膛出口烟温的误差始终在 10% 左右,不能够进一步缩小。

2 炉膛高温腐蚀数值模拟研究现状

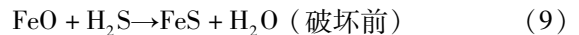
2.1 发生机理

旋流对冲燃煤机组中,旋流燃烧器普遍采用前、后墙对冲布置,会出现对冲气流冲刷侧墙的问题。另外,由于采用分级送风燃烧方式导致炉内煤粉不能完全燃烧,炉膛内氧气的体积分数较低,炉内烟气中存在较高体积分数的还原性气体^[17-18],常常在侧墙处近壁面会孕育出还原性气氛。

炉膛内高温腐蚀的原理为在一定炉内传热条件的辅助下,炉内烟气中存在的还原性气体成分如 CO、 H_2 等会发生一系列的化学反应,将致密的氧化铁保护膜还原成为疏松的氧化亚铁^[17]:



除了还原性气氛会导致炉膛水冷壁产生高温腐蚀外,在燃煤锅炉中,煤粉中的硫分与炉内氧气会以两种不同的形式相结合:在氧气充足区域生成 SO_2 ,在氧气匮乏区域生成 H_2S 。炉内两种气体均存在,根据燃煤电厂实际生产经验判断,高温腐蚀多属于硫化物型腐蚀, H_2S 与 CO、 H_2 一样是发生高温腐蚀的重要因素,会破坏氧化物的保护膜^[17,19],其机理为:



2.2 防治方法

目前,针对燃煤电厂锅炉炉内近壁面处还原性气氛浓烈而导致的高温腐蚀现象,主要的应对措施包括 4 种:涂层喷涂、管材优化、燃烧调整和贴壁风技术^[20]。上述几种方法均能够在一定程度上缓解高温腐蚀现象,但是涂层会增加一层热阻,从而降低水冷壁的传热特性且寿命较短;管材优化势必会带来燃烧经济性的影响且不同管材焊缝也会给超临界

及超超临界锅炉的安全运行带来隐患;燃烧调整只能起到幅度不大的调节作用,无法根除高温腐蚀现象^[21]。因此,目前较为常用的做法为增设贴壁风并基于该方法协同多种调节手段共同抑制 NO_x 的排放。

在调整旋流燃烧器以解决炉内高温腐蚀现象的数值模拟研究中,王松浩等人^[10]发现,旋流燃烧器采用旋流风后,由于其旋流特性,可以根据流场特性将旋流内外部进行分割,旋流风裹挟着携带煤粉的直流风前进,避免了像直流燃烧器那样直接冲刷水冷壁,可以在一定程度上保护水冷壁;加之当相邻旋流燃烧器的旋流方向反向布置时,可以让流场中气流最大限度地混合,使得炉内温度场分布趋向均匀,从而避免了出现高温区域及高温腐蚀现象。在采用旋流燃烧器对冲布置的超临界和超超临界燃煤锅炉的数值模拟中,杨振等人^[20]发现,炉膛沿深度方向的温度场由于水冷壁吸热导致出现中间高、两边低的状态,在锅炉工程实际燃烧中,沿燃烧器出口的轴向、切向上由于配比的均匀性不同会导致炉膛内局部 CO 体积分数进一步提升,从而加剧炉内高温腐蚀的发生。基于此现象对燃烧器内二次风占比进行模拟,结果表明,配比调整较小时,内外二次风配比调整与贴壁风协同作用所取得的工程实际收益较小。李永生等人^[19]对采用 DBC-OPCC 型旋流燃烧器的超临界锅炉机组进行高温腐蚀的贴壁风改善方法进行数值模拟发现,提高烟气中的氧气体积分数虽然可以降低还原性气体的体积分数,但主燃区和还原区过量空气系数仍小于 1,会增加 NO_x 的体积分数;通过对炉膛燃烧进行数值模拟发现,负荷越高炉膛侧墙近壁处的还原性氛围越重,因此可以推断高温腐蚀主要发生高负荷条件下。而针对高温负荷与高温腐蚀之间的关系,徐国群等人^[18]同样基于 DBC-OPCC 的超临界锅炉机组进行了不同负荷状态下侧墙近壁区的还原性气体体积分数的数值模拟工作发现,在低负荷时,由于燃尽风风率不高且近壁处气体氧气体积分数较高,CO、 H_2 、 H_2S 等还原性气体不能起主导作用,因此水冷壁区域出现高温腐蚀面积的概率较小;但当负荷进一步提升,侧墙近壁处的还原性气体体积分数飞速增长,此时水冷壁多区域

发生高温腐蚀现象,说明高温腐蚀确实主要发生高负荷运行的条件下,如图 1 所示。

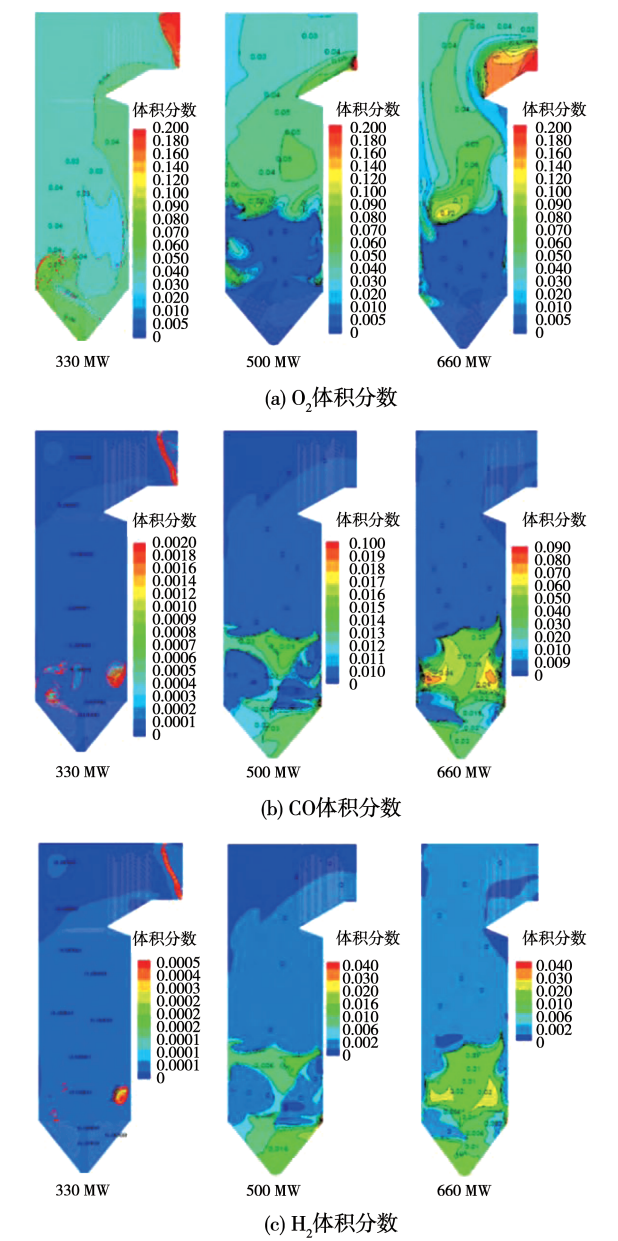


图 1 不同负荷下侧墙近壁区烟气气氛分布^[18]

Fig.1 Smoke atmosphere distributions near walls of side-walls at different loads^[18]

通过大量的数值模拟发现,在炉膛最底层燃烧器层至燃尽风层之间的左右两侧墙是高温腐蚀的多发地带。朱宣而等人^[22]通过对超临界燃煤锅炉防止高温腐蚀的贴壁风解决方案进行数值模拟发现,来自燃尽风的贴壁风反而能在一定程度上削弱对燃尽风分级配风,在大幅度提升选择性催化还原技术 SCR 系统(Selective Catalytic Reduction,SCR)入口处

NO_x 体积分数的基础上有效改善炉内高温腐蚀现象。

高温腐蚀现象使水冷壁管不断被腐蚀减薄,减薄速度平均值达到每年 1.8 ~ 2.6 mm,燃用较高硫分煤时,速度平均值可高达每年 5 mm。当水冷壁管壁减薄至一定程度时,最终会发生水冷壁高温爆管的严重电厂事故,使锅炉被迫停炉检修。目前,该现象已经成为超临界和超超临界锅炉机组的顽疾。

采取贴壁风等技术可降低近壁处还原性气氛的方法来消除炉内高温腐蚀现象,这是防止锅炉发生高温腐蚀的重要研究方向,目前已得到应用。需要指出的是,在进行贴壁风改造设计时,需要对贴壁风喷口位置、喷口速度、喷口形状等因素影响规律的 CFD 数值模拟进行研究,并同时重点进行贴壁风率对燃烧、飞灰含碳量等影响规律的研究。工程应用表明,不当的贴壁风率会造成锅炉效率降低,二次风箱压力偏低等问题。工程方面,关注贴壁风加入之后,水冷壁 O_2 覆盖的范围,尤其是侧墙水冷壁中间区域 O_2 覆盖的程度,直接影响水冷壁高温的腐蚀程度。

3 炉膛贴壁风应用的数值模拟研究现状

贴壁风技术目前大致可分为前后墙贴壁风、侧墙贴壁风以及组合式贴壁风^[21],上述 3 种贴壁风布置形式均能在一定程度上缓解炉内高温腐蚀现象。

炉内发生高温腐蚀处的还原性气体 H_2 、 CO 、 H_2S 的体积分数高,当送入贴壁风后,近壁处 O_2 的体积分数快速上升。然而在介于高 O_2 与高 CO 体积分数之间还存在 1 个 O_2 及 CO 体积分数均较低的区域,这部分区域发生高温腐蚀的概率同样较小^[23]。因此,在进行贴壁风数值模拟时不能只监测近壁处 O_2 体积分数,应将 O_2 与 CO 一同作为判断贴壁风技术的指标。当水冷壁附近区域氧气体积分数低于 3% 时,属于弱还原性气氛,发生高温腐蚀的可能较小。因此,目前较多采用高温腐蚀面积比 ε 来定量评价贴壁风喷口减缓高温腐蚀的效果^[22,24]:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_{P_0}}$$

(11)

式中:下标 P_0 —高度范围为下层燃烧器标高以下

3 m 至燃尽风标高以上 3 m,且距离侧墙 30 mm 的截面;下标 c—该平面面积范围内 CO 体积分数高于 3% 的区间; S —面积。

作为贴壁风到达炉膛近壁区的载体,不同的喷口形状会带来不一样的空气流场。朱宣而等人^[22]对比研究了圆形槽状喷口、方形竖槽喷口以及方形横槽喷口 3 种最为常见的喷口形式,进行了 O_2 组分场的数值模拟。对比发现,贴壁风通过上述 3 种不同喷口在炉内近壁区降低高温腐蚀面积的能力以方形横槽和竖槽布置性能较为突出,如图 2 所示。但结合工程实际中要达到较为完美的 O_2 膜对水冷壁的覆盖效果,需要保证在水平方向上有足够的长度,这对水冷壁的布置提出了较高的要求。并且 3 种喷口性能差异较为接近,因此工程实际中常选用圆形槽状喷口。

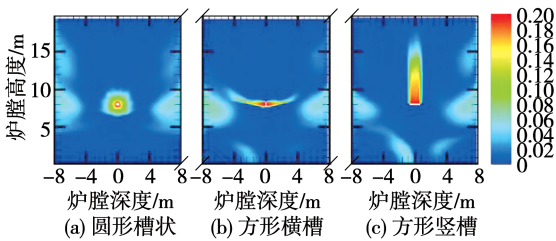


图 2 各喷口型式下 P_0 截面上 O_2 组分云图^[22]

Fig. 2 O_2 component cloud diagram of P_0 cross section with each nozzle type^[22]

在基于对冲旋流燃烧锅炉机组采用贴壁风缓解高温腐蚀现象的数值模拟研究中,孟凡冉等人^[23]对前后墙布置贴壁风的 600 MW 超临界锅炉机组进行了数值模拟,认为前后墙异距布置贴壁风喷口能够从最大程度上使近壁区均有 O_2 膜覆盖,缓解了传统贴壁风覆盖面狭窄的问题,在有效组织各层喷口射流形成较完整的 O_2 膜以防止高温腐蚀的同时,尽可能降低风率的损耗,从而同时降低 NO_x 的排放。同样,在对前后墙布置的研究中,W Yang 等人^[25]基于 300 MW 前后墙对冲锅炉机组进行了数值模拟,发现贴壁风在降低 CO 和 H_2S 峰值体积分数的同时,还能降低近壁面处还原性气氛区域的占比面积。而对于侧墙布置,Hu Liu 等人^[26]基于 1 000 MW 旋流

对冲锅炉对比了前后墙布置与侧墙布置方式对降低高温腐蚀效率的差异,结果表明,降低相同体积分数的 H_2S 还原性气体,侧墙布置所需风量仅为前后墙布置时的一半,但两种布置方式在贴壁风比率较低时对还原性气氛的缓解十分有限。因此,耦合及优化上述两种贴壁风布置方式及喷嘴比是未来研究的重要方向。朱宣而等人^[22]对侧墙贴壁风结构进行数值模拟得出,在诸如安装位置、喷口样式、喷口风量、贴壁风来源等变量一致的情况下,喷口高度越小其防腐效果越好的结论。但在工程实际中,太小的喷口高度会导致射流阻力明显升高,且较高的气流速度可能会导致气流冲刷墙壁,从而快速磨损水冷壁面,反而造成危害,因此结合生产实际选取较小的喷口高度。在贴壁风的前后墙和侧墙布置的对比中,对于组合式贴壁风布置方式,穆延非等人^[27]在炉膛四周均加装贴壁风喷口,在保持原配风风量不变的情况下,能够使水冷壁附近还原性气体体积分数大幅下降。杨希刚等人^[28]也基于组合式贴壁风布置方式对锅炉机组进行数值模拟发现,过度增大贴壁风风量虽然能够进一步有效减小高温腐蚀的区域面积,但同时 NO_x 的排放也有较显著的提升,不利于机组的经济、环保运行;还发现若保持风率不变,只改变侧墙和前后墙的风量配比,则不能对近壁区气氛产生较明显的影响。

综上所述,贴壁风的布置方式及风量大小会对未燃尽碳的质量分数^[27]、 NO_x 排放体积分数^[21-22,27]等造成影响。因此,贴壁风的布置应结合锅炉的具体形式并基于数值模拟的流场、速度场和组分场等分析进行合理地布置。

4 结论与展望

目前研究者开展了旋流对冲锅炉低氮燃烧、高温腐蚀和贴壁风改造数值模拟研究,为现场开展工程设计、改造以及改造后优化运行提供了一定指导,但是还是存在以下问题,需要进一步研究:

(1) 国内外基于单个旋流燃烧器的冷态特性数值模拟并不多,尤其国内研究者对其冷态特性分析缺乏深度,对旋流燃烧器的旋流特性研究较缺乏透彻的研究分析。

(2) 在对采用旋流燃烧器前后墙对冲布置的超临界和超超临界燃煤锅炉的数值模拟中,普遍采用 Fluent 自带的动力/扩散燃烧焦炭模型,而选择忽略了包裹在焦炭外层的灰层的影响。目前,在对前后对冲旋流锅炉的数值模拟中过多地简化旋流燃烧器,导致旋流燃烧器中诸如结构、浓淡煤粉等特性无法在全炉膛的数值模拟中加以体现,对全炉膛数值模拟中的准确性产生影响。

(3) 在进一步对旋流燃烧器及旋流对冲锅炉在低氮、高温腐蚀、贴壁风及燃烧调整等方面的数值模拟研究中,应积极探求新方法以避免对旋流燃烧器过度简化及采用有灰层影响的焦炭模型,从而使得数值模拟的精确性进一步提升,更好地指导工程实际。

(4) 前后对冲锅炉数值模拟中,需要进一步开展单个旋流燃烧器、整炉膛数值模拟工作;需要进一步探究旋流燃烧器内外二次风旋流强度、风量等对回流区影响的规律;需要进一步探究二次风量在主燃区和燃尽区的分配比例对锅炉燃烧及污染物生成的影响规律。

参考文献:

- [1] 李德波,狄万丰,李鑫,等. 1 045 MW 超超临界贫煤锅炉燃用高挥发分烟煤的燃烧调整研究及工程实践[J]. 热能动力工程,2016,31(1):117-123,139-140.
LI De-bo, DI Wan-feng, LI Xin, et al. Combustion adjustment research and engineering practice of 1 045 MW ultra-supercritical lean coal boiler burning high volatile bituminous coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(1):117-123, 139-140.
- [2] 陈朝松. 电站锅炉过热器和再热器超温爆管理论分析 计算方法的研究[D]. 上海:上海发电设备成套设计研究所,2003.
CHEN Chao-song. Theory analysis and research on calculative method about overheating tube rupture of superheater and reheater in utility boiler[D]. Shanghai: Shanghai Power Equipment Design Institute, 2003.
- [3] 衡丽君. 大型锅炉热偏差数值计算方法与应对措施的研究[D]. 南京:东南大学,2004.
HENG Li-jun. Research of numerical calculation method and tackling measures of thermal deviation of large-capacity boiler[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.

- [4] 郝 剑,裴建军,由长福.劣质煤种对1 000 MW 旋流对冲锅炉燃烧性能的影响[J]. 洁净煤技术,2019,25(5):93-100.
HAO Jian, PEI Jian-jun, YOU Chang-fu. Influence of low quality coal on the combustion performance in a 1 000 MW swirl opposed firing boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 93-100.
- [5] 崔星源.超临界煤粉锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟[D]. 北京:华北电力大学(北京),2006.
CUI Xing-yuan. The numerical simulation of supercritical pulverized coal boiler's low NO_x combustion[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2006.
- [6] 韩才元,徐明厚,周怀春,等.煤粉燃烧[M]. 北京:科学出版社,2001.
HAN Cai-yuan, XU Ming-hou, ZHOU Huai-chun, et al. Pulverized coal combustion[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [7] 李德波,沈跃良,余岳溪,等旋流燃烧煤粉锅炉主要烟气组分及分布规律试验[J]. 广东电力,2016,29(3):1-7.
LI De-bo, SHEN Yue-liang, YU Yue-xi, et al. Experiments on main flue gas components and distribution regularities for pulverized coal-fired boiler with swirling combustion[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 1-7.
- [8] 李道林,王文欢,潘卫国.600 MW 墙式对冲燃煤锅炉燃烧数值模拟[J]. 动力工程学报,2020,40(2):110-116.
LI Dao-lin, WANG Wen-huan, PAN Wei-guo. Numerical simulation on the combustion in a 600 MW opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Power Engineering, 2020, 40(2): 110-116.
- [9] 徐 启,邢嘉芯,张梦竹,等.低 NO_x 旋流燃烧器燃烧特性数值模拟[J]. 科学技术与工程,2020,20(20):8168-8174.
XU Qi, XING Jia-xin, ZHANG Meng-zhu, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of the low NO_x swirl burner[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8168-8174.
- [10] 王松浩.旋流对冲锅炉烟煤低氮燃烧特性数值模拟[J]. 发电设备,2018,32(2):108-113.
WANG Song-hao. Numerical simulation on low NO_x combustion of bituminous coal in a swirl-opposed firing boiler[J]. Power Equipment, 2018, 32(2): 108-113.
- [11] 徐 启,邢嘉芯,张梦竹,等.低 NO_x 旋流煤粉燃烧器气固两相流模拟[J]. 科学技术与工程,2019,19(20):215-220.
XU Qi, XING Jia-xin, ZHANG Meng-zhu, et al. Numerical simulation of gas-particle two-phase flow field for the low NO_x swirl burner[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 215-220.
- [12] 刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.整层低 NO_x 旋流燃烧器燃烧特性数值模拟研究与应用[J/OL]. 广东电力:1-13(2021-11-15)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1420.TM.20211112.0001.002.html>.
- [13] 刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.低 NO_x 旋流燃烧器燃烧特性数值模拟研究与应用[J/OL]. 洁净煤技术:1-16(2021-12-03)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20211201.1748.002.html>.
LIU Peng-yu, LI De-bo, LIU Yan-feng, et al. Numerical simulation of combustion characteristics on low NO_x swirl burner and its application[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-16(2021-12-03)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20211201.1748.002.html>.
- [14] 刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.低 NO_x 旋流燃烧器冷态动力场数值模拟研究[J/OL]. 广东电力:1-12(2021-10-22)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1420.TM.20211022.1223.002.html>.
LIU Peng-yu, LI De-bo, LIU Yan-feng, et al. Numerical simulation of cold dynamic field on NO_x swirl burner[J/OL]. Guangdong Electric Power: 1-12(2021-10-22)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1420.TM.20211022.1223.002.html>.
- [15] 刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.单个低 NO_x 旋流燃烧器燃烧特性数值模拟研究与工程应用[J/OL]. 洁净煤技术:1-15(2021-10-15)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211015.0010.002.html>.
LIU Peng-yu, LI De-bo, LIU Yan-feng, et al. Numerical simulation of combustion characteristics on a single low NO_x swirl burner and its engineering application[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-15(2021-10-15)[2022-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211015.0010.002.html>.
- [16] 茅建波,张 明,熊建国,等.1 000 MW 旋流对冲燃烧锅炉 NO_x 排放特性试验研究[J]. 动力工程学报,2019,39(3):169-174,190.
MAO Jian-bo, ZHANG Ming, XIONG Jian-guo, et al. Experimental study on NO_x emission characteristics of a 1 000 MW opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Power Engineering, 2019, 39(3): 169-174, 190.
- [17] 李德波,徐齐胜,李方勇,等.对冲旋流燃烧煤粉锅炉高温腐蚀现场试验与改造的数值模拟研究[J]. 广东电力,2015,28(11):6-12.
LI De-bo, XU Qi-sheng, LI Fang-yong, et al. Experimental research and numerical simulation of reconstruction on high temperature corrosion for pulverized coal fired supercritical boiler with

- swirling combustion combustor[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(11): 6-12.
- [18] 徐国群,陈国庆. 对冲旋流燃烧锅炉炉膛壁面氛围数值模拟分析[J]. 电力科技与环保, 2017, 33(6): 44-48.
- XU Guo-qun, CHEN Guo-qing. Numerical simulation analysis of wall atmosphere in front and rear wall opposed coal-fire boiler[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2017, 33(6): 44-48.
- [19] 李永生,刘建民,陈国庆,等. 对冲旋流燃烧锅炉侧墙水冷壁近壁区还原性气氛分布特性[J]. 动力工程学报, 2017, 37(7): 513-519, 539.
- LI Yong-sheng, LIU Jian-min, CHEN Guo-qing, et al. Distribution characteristics of reductive atmosphere close to the water wall of an opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Power Engineering, 2017, 37(7): 513-519, 539.
- [20] 杨 振,王新宇,朱宣而,等. 调整内外二次风与加装贴壁风方法对缓解炉内高温腐蚀的数值模拟研究[J]. 华电技术, 2020, 42(12): 28-36.
- YANG Zhen, WANG Xin-yu, ZHU Xuan-er, et al. Numerical simulation study on reducing high temperature corrosion in furnace by adjusting internal and external secondary air and taking closing-to-wall air[J]. Huadian Technology, 2020, 42(12): 28-36.
- [21] 张春辉. 旋流燃烧方式锅炉组合式贴壁风技术应用[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 169-175.
- ZHANG Chun-hui. Application of convective swirl combustion combined attached wall technology[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 169-175.
- [22] 朱宣而,黄亚继,岳峻峰,等. 旋流对冲锅炉侧墙贴壁风结构优化及布置数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 174-181.
- ZHU Xuan-er, HUANG Ya-ji, YUE Jun-feng, et al. Numerical study of structure and layout optimization of near-wall air nozzle on an opposed wall-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 174-181.
- [23] 孟凡冉,高 畅,金保昇,等. 异距贴壁风喷口布置方案的数值模拟[J]. 化工进展, 2017, 36(9): 3237-3242.
- MENG Fan-ran, GAO Chang, JIN Bao-sheng, et al. Numerical simulation of near-wall air scheme combined with different jet position[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(9): 3237-3242.
- [24] 杨 振,朱宣而,黄亚继,等. 贴壁风与碗式配风协同解决高温腐蚀问题的模拟研究[J/OL]. 洁净煤技术: 1-14(2020-08-18)[2021-04-23].
- YANG Zhen, ZHU Xuan-er, HUANG Ya-ji, et al. Simulation study on high temperature corrosion problem solved by near-wall air and bowl-type air distribution[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-14(2020-08-18)[2021-04-23].
- [25] YANG W, YOU R, WANG Z, et al. Effects of near-wall air application in a pulverized-coal 300 MW utility boiler on combustion and corrosive gases[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(9): 10075-10081.
- [26] LIU H, HU S, ZHANG L, et al. Influence of near-wall air position on the high-temperature corrosion and combustion in a 1 000 MW th opposed wall-fired boiler[J]. Fuel, 2019, 257: 115983. 1-115983. 11.
- [27] 穆延非,闫 姝,马玉华,等. 锅炉水冷壁腐蚀、结焦问题的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(6): 116-121.
- MU Yan-fei, YAN Shu, MA Yu-hua, et al. Numerical simulation of corrosion and coking of boiler water wall[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(6): 116-121.
- [28] 杨希刚,金保昇. 对冲旋流燃烧锅炉组合式贴壁风运行参数优化的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2019, 39(7): 517-523.
- YANG Xi-gang, JIN Bao-sheng. Numerical simulation and optimization on the operation parameters of a combined closing-to-wall air system in a supercritical opposed firing boiler[J]. Journal of Chinese Power Engineering, 2019, 39(7): 517-523.

(刘 颖 编辑)