

燃煤电站锅炉运行过程中 NO_x 排放的预测方法

沈跃云¹,高小涛²

(1.江苏经贸职业技术学院,江苏南京 211168;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

摘要:燃煤电站锅炉实际运行过程中,在煤质等变化时需对燃烧进行必要的调整以保持锅炉的运行性能和低的 NO_x 排放浓度。运行人员可以根据机组的性能和运行经验对各因素变化及相应调整的影响进行评估,以确定较佳的调整方式和幅度。电厂运行过程中对锅炉 NO_x 排放的预测控制的常用方法,主要包括基于燃烧调整试验的经验方法、基于优化控制的数学模型方法和 CFD 性能模拟和分析方法。在对锅炉 NO_x 排放的预测和控制的常用方法的国内外研究和应用现状评述的基础上,采用 CFD 技术对先进燃烧系统锅炉的运行进行模拟研究和性能分析,以实现锅炉安全稳定、高效和低 NO_x 排放运行的目标。

关键词:燃煤锅炉;运行;NO_x 排放;预测

中图分类号:TK227

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2011)06-0073-04

燃煤电站锅炉实际运行过程中,锅炉 NO_x 的排放浓度除取决于锅炉设计参数外,更重要的是还依赖于运行参数和煤质特性。这两方面包含的影响因素众多,且许多因素的影响相互耦合,如低 NO_x 燃烧时煤的挥发分和温度因素,而实际过程中还有一些因素(如煤质变化)是不可控的,此外还有些不确定因素(煤粉流量的均匀连续性)。这意味着锅炉的 NO_x 排放特性十分复杂,表现出强烈的多变量、非线性特征。但是,实际运行过程中,在运行工况和煤质变化时需要调整以保持锅炉的运行性能和低的 NO_x 排放浓度。运行人员可以根据机组的性能和运行经验对各因素变化及相应调整的影响进行评估,以确定较佳的调整方式和幅度。但是依据经验并非总是有效,特别是面临复杂的因素变化。因而,如果能为运行提供必要的可靠预测方法和手段,无疑可显著提高运行水平。为此,国内外在锅炉 NO_x 排放的预测和控制方面进行了大量的研究工作。

1 经验模型和燃烧调整试验方法

经验模型实际上是建立在实验研究的基础上,通过大量的实验室和电站锅炉上的系统实验,总结出锅炉 NO_x 排放量与各种参数变化之间的经验关系式,用于运行中锅炉 NO_x 排放量的预测。目前国内外提出的经验模型很多^[1,2]。如 Pohl 等人提出的经验模型^[1]考虑了煤质特性、运行氧量、锅炉燃烧器区域热负荷、燃烧方式(分级或不分级)等对 NO_x 排放量的影响,该模型被包括在美国 EPRI 煤质评价专家系统中用于锅炉 NO_x 排放量的预测。

由于现有经验模型往往采用简单的函数形式,

难以描述各因素之间的相互影响和相互作用,因此,现有经验模型预测的准确性和通用性一般是极有限的。另一方面,许多经验关系式提出的年代较早,而对于采用先进低 NO_x 燃烧系统的锅炉,其适用性则需要实际情况的检验或者重建。

在中国,电站锅炉运行中 NO_x 的排放控制一般依赖于锅炉的燃烧调整试验的结果。在燃烧调整试验时,试验人员一般通过改变单一的主要运行参数,如通过改变过量空气系数(或氧量)、配风方式、磨煤机磨组运行方式等,获得单一参数变化时 NO_x 排放量的变化,并绘制出相应的单一因素和 NO_x 排放量的关系曲线,以提供给电厂运行人员。

燃烧调整试验在单因素影响预测方面具有实用性,但单因素试验都是在基准工况条件下的变量试验,而锅炉运行的条件和因素很多,这些在运行过程中一般是变化的,为了适应其他因素变化的影响,经验关系式的系数一般必须随运行的条件而改变^[3]。尽管如此,燃烧调整试验方法是目前我国大型电厂广泛使用的方法,它也是其他预测模型建立和评价的基础。根据单因素试验的结果,确定各因素对 NO_x 排放影响程度,以此为基础根据主要因素的影响,对锅炉运行时 NO_x 排放进行预测则可提高预测方法的可靠性和实用性。

2 数学模型和优化方法

除燃烧调整试验方法外,考虑到锅炉 NO_x 排放量的影响因素众多和复杂性,目前国外有相当多的电厂采用基于人工神经网络的方法对锅炉 NO_x 排放量进行预测,并应用于控制系统中进行运行的优化控制^[4],我国在这方面也开展了相当多的卓有成效的研究工作^[5]。

用人工神经网络来预测 NO_x 排放的模型是一种较好的非线性黑箱模型^[5],它不需要详细了解 NO_x 排放与各操作参数之间的关系,就可以预测 NO_x 的排放量,已有的研究表明其具有相当的准确性。但是普通的人工神经网络模型难以给出输入各参数与输出的关系,或者说很难给出各运行工况参数对输出参数(即 NO_x 排放量)贡献的大小,因此对于运行的需要而言并不直观。虽然可以在建模方面进行一定的改进,如在模型中考虑 NO_x 生成机理和电厂运行实际条件,但其作用在于提高模型的准确性,上述问题仍然难以解决。

理论上,采用基于人工神经网络方法预测锅炉 NO_x 排放量能应用于机组控制系统,但从锅炉运行人员的角度看,必要时仍然需要根据锅炉运行参数对 NO_x 排放量影响特性用于运行优化调整。虽然目前有采用参数识别和神经网络的结合来得到主要运行参数与 NO_x 排放量之间的关系^[6],但其结果仍有待于试验结果的检验,而模型和上述关系的建立也依赖于大量试验结果数据及其可靠性。此外,人工神经网络方法建模本身还存在许多问题有待于进一步的研究解决^[7],特别是网络建模所必需的样本数量多,而目前的研究中采用实炉测试工况数据数量很有限,且实际测量数据在统计意义上的准确性和可靠性也可能存在不确定性。由于试验条件限制而不可能进行大量工况的试验,又不可能进行经常性的现场试验,这也是基于试验工况所建立的模型难以适应实际工况的重要原因。因此,人工神经网络方法的研究、开发和应用也有待于锅炉燃烧 NO_x 试验方法的研究和改进。应用锅炉现有在线测量数据,则可以对上述缺陷进行改进,目前这方面也有较好的尝试。

除人工神经网络方法之外,支持向量机模型方法也被应用到 NO_x 排放的预测和运行优化,国内近年来在这方面开展了大量的研究^[7]。支持向量机(SVM)算法作为一种新的统计学习方法在建模方面显示了良好的优势,成为了模式识别和回归分析领域的重要工具。该方法可应用于 NO_x 排放预测的建模,以实现在线运行的优化,采用在线运行数据,可获得运行参数和 NO_x 排放之间的关系,这无疑可为运行人员提供良好的参考依据,因而具有良好的应用前景。

3 计算流体力学(CFD)模拟方法

计算 CFD 模拟是预测电站锅炉燃烧过程和 NO_x 排放量常用方法^[8]。因 CFD 模型可详细考虑炉内的流动、传热、燃烧反应和 NO_x 生成过程,在已知

锅炉结构燃烧系统结构和运行输入条件的前提下,理论上可以准确预测不同运行条件下锅炉的 NO_x 排放量及煤质等条件变化的影响。因此,目前该方法在国内外被广泛用于锅炉特别是燃烧器及燃烧系统设计和燃烧改造时预测 NO_x 排放量,以预测设计、改造方案的效果,也更多地应用于锅炉运行性能和 NO_x 排放特性的研究和分析^[8]。虽然 CFD 技术因受各基础模型在理论上的准确性和输入运行数据准确性的限制,其预测结果的准确性因而受影响,但随着燃烧等基础模型研究的进步,其可靠性正日益提高,这也是该技术日益广泛应用的原因。在国外,CFD 技术甚至被开发作为重要的辅助手段结合到锅炉运行控制中^[8],应用其对炉内流动和燃烧过程模拟得到的丰富分布数据为运行人员提供更全面的运行信息,这方面在提高运行水平上无疑具有良好的应用前景。

数值模拟的对象是某厂超超临界 1 000 MW 机组锅炉的炉膛。该炉膛横截面为长方形,由膜式水冷壁构成。炉膛宽度为 32 084 mm、深度 15 670 mm、高度 65 900 mm。炉膛上方布置高度为 14 500 mm 的分隔屏和屏式过热器。

3.1 计算区域和网格

计算区域包括整个炉膛及屏区,从冷灰斗到屏式过热器后的炉膛出口烟窗。计算根据锅炉和燃烧器的实际结构尺寸在以上区域划分计算网格。在网格划分时,各角燃烧器各喷口和 AA 风喷口采用了实际的尺寸和结构布置。为适应燃烧器喷口的尺寸和实际的结构布置,并考虑燃烧器喷口附近区域流动、反应过程参数的显著变化,在燃烧器区域炉膛和 AA 风区域炉膛特别是燃烧器喷口附近采用了局部加细的网格。而对燃烧器区域与 AA 风区域之间、燃烧器区域以下和 AA 风以上区域炉膛,网格尺寸逐渐放大,以实现网格尺寸的平稳过渡。对于屏区空间特别是炉膛宽度方向也采用了加细的网格,以合理模拟屏区的流动和传热过程。计算区域的网格及其分布如图 1 所示。



图 1 计算区域的网格及其分布

3.2 CFD 模型选择

数值模拟计算时采用的模型简述如下:

(1) 炉内气体流动模型。炉内气体流动为三维湍流流动,其平均流可视为稳态流,模拟时采用常规的守恒方程(连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程等)进行描述。其中气相湍流的描述采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。

(2) 煤粉颗粒的运动采用拉格郎日方法描述,即采用随机轨道模型来模拟炉内颗粒的运动过程。

(3) 煤粉颗粒燃烧模型的主体为颗粒的能量平衡方程,其中考虑颗粒加热、热解和挥发分释放、煤焦燃烧过程以体现颗粒燃烧过程的热质变化,这些热质变化作为源项作用到连续相(气相)的守恒方程之中去。对于煤粉的燃烧过程,热解采用传统的双方程模型来描述,而焦颗粒的燃烧则采用动力学/扩散模型。

(4) 气相湍流燃烧的过程采用非预混燃烧模型模拟,采用混合分数-概率密度函数模型来描述气相燃烧。

(5) 炉内辐射过程的描述则采用 P1 模型,该模型对于锅炉这种大尺寸结构内辐射传热计算既可节省计算时间又不失计算的精度。

(6) 热力 NO_x 生成模型采用经典的扩展 Zeldovich 机理。对于燃料 NO_x 的生成,模型考虑煤的挥发分和焦中燃料 N 的转化,因模拟涉及的煤种均为典型的烟煤,所以假定挥发分和焦炭 N 转化为中间产物 HCN,HCN 再氧化成 NO 或转化成 N₂。除燃料 N 转化外,模型还包括了 NO 在焦表面的还原过程及其对 NO_x 生成的影响。

3.3 数值模拟的边界条件

数值模拟的入口边界条件主要是燃烧器各喷口的入口条件,包括气相的速度、温度、湍流特性以及煤粉颗粒流量、温度、粒径分布等。出口边界即炉膛出口烟窗,采用普通的出口条件描述。固体壁面上采用无速度滑移和无质量渗透条件,还考虑温度和辐射率等特性。

燃烧器喷口的入口条件根据锅炉的设计和运行条件确定,其中气相即空气采用各次风速、风温等来确定,而对煤粉颗粒,除考虑速度和温度外,还包括颗粒特性。颗粒尺寸采用 Rosin-Rammler 分布,煤粉细度 $R_{90}=18\% \sim 20\%$ (设计值)。因模拟锅炉额定 (BRL) 负荷下的炉内燃烧过程,实际过程采用 5 台磨运行,所以模拟时采用 5 层浓淡煤粉燃烧器运行方式。模拟采用随机轨道模型跟踪煤粉的运动和燃烧过程,计算中共跟踪 7 200 颗粒。而对于壁面,主要采用辐射率和表面温度来模拟其辐射特性,而表

面温度根据热力计算结果估算。

3.4 模拟计算结果

采用 CFD 数值计算得到的 1 000 MW 超超临界锅炉炉膛内 NO_x 浓度场分布的结果模拟计算得到 CO 的浓度场、O₂ 的浓度场和 NO_x 的浓度场分布结果^[8],如图 2—4 所示。

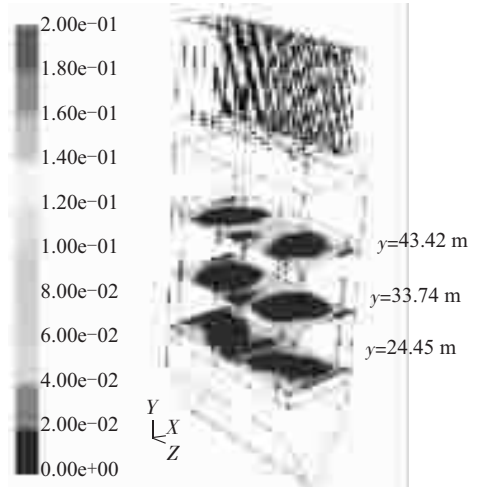


图 2 炉内水平面上 O₂ 浓度(体积份额)的分布

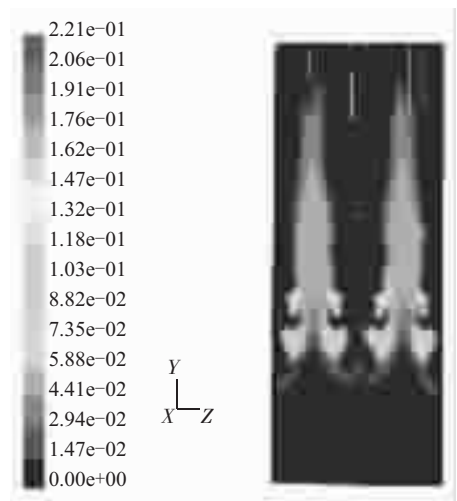


图 3 炉膛中心截面($x=0$ m)上的烟气中 CO 浓度(体积份额)的分布

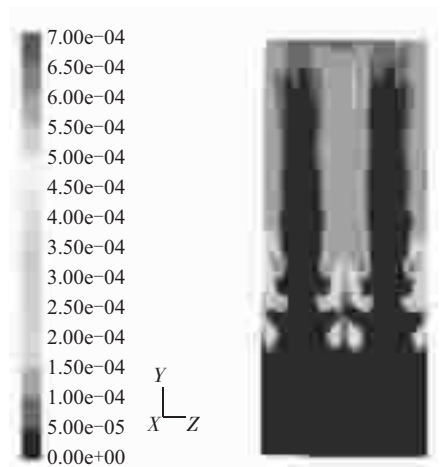


图 4 炉膛中心截面($x=0$ m)上的 NO_x 浓度(体积份额)分布

模拟计算结果表明,该锅炉采用PM燃烧器和MACT燃烧系统,燃烧区域形成了巨大的还原性区域,体现出炉内深度空气分级燃烧的作用,因而显著地抑制了主燃烧区域NO_x的生成和有利于以生成的NO_x的还原,其结果是炉膛双切圆的中部大部分区域NO_x浓度极低,因此炉内整体NO_x浓度水平也不高。

相对于燃烧调整试验,CFD技术可获得丰富的炉内流动、燃烧和NO_x生成特性等方面的信息,利用该技术对先进燃烧系统锅炉的运行进行模拟研究和性能分析,更适应于深入了解低NO_x燃烧系统的燃烧和NO_x生成排放特性,以作为锅炉低NO_x燃烧运行的参考依据,这无疑对充分发挥先进系统的作用,实现锅炉安全、稳定、经济运行和低NO_x排放具有重要的意义。

4 结束语

燃煤电厂运行过程中对锅炉NO_x排放量的预测和控制的常用方法,主要包括基于燃烧调整试验的经验方法、基于优化控制的数学模型方法和CFD性能模拟和分析方法。在国内外研究和应用现状评述的基础上,采用CFD技术对先进燃烧系统锅炉的运行进行模拟研究和性能分析,以实现锅炉安全稳定、高效和低NO_x排放运行的目标。锅炉运行人员可以通过对NO_x排放量的可靠预测,来提高锅炉优化运行的水平。

参考文献:

- [1] POHL J H, CHEN S L, HEAP M P, et al. Correlation of NO_x Emissions with Basic Physical and Chemical Characteristics of Coals [R], In Proceedings of the 1982 Joint Symposium on Stationary NO_x Control, EPRI Report No. CS-3182, 1983.
- [2] DAVISON R M. How Coal Properties Influence Emissions [M]. IEA Report CCC/28, London: IEA Coal Research, 2000.
- [3] 刘志超. 燃煤锅炉NO_x排放浓度影响因素的试验和分析[J]. 电站系统工程, 2005, 21(5):30-34.
- [4] SMOUSE S.M., WILDMAN D J, MACLLVRIED T S, et al. Estimation of NO_x Emissions from Pulverized Coal-fired Utility Boilers [C]. In Joint EPA/EPRI Symposium on Stationary Combustion NO_x control, 1994.
- [5] 周 昊, 朱洪波, 曾庭华, 等. 大型四角切圆燃烧锅炉NO_x排放特性的神经网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1):33-37.
- [6] 梁 森, 李 凌. 电站锅炉低NO_x排放的参数辨识[J]. 动力工程, 2006, 26(5):671-675.
- [7] 王春林, 周 昊, 李国能, 等. 大型电厂锅炉NO_x排放特性的支持向量机模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(10): 1787-1791.
- [8] 高小涛. 大型燃煤电站锅炉低NO_x燃烧及其排放特性的研究[D]. 东南大学博士学位论文. 南京: 东南大学, 2009.

作者简介:

沈跃云(1966-), 女, 江苏靖江人, 副教授, 从事现代教育技术、工程应用数学等方面研究工作;

高小涛(1967-), 男, 江苏靖江人, 高级工程师, 从事电站锅炉燃烧、NO_x燃烧技术、运行监控技术等研究工作。

Prediction Model for NO_x Emissions During the Operation of Pulverized-coal Fired Utility Boiler

SHEN Yue-yun¹, GAO Xiao-tao²

(1. Jiangsu Institute of Economic & Trade Technology, Nanjing 211168, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: During the operation of pulverized-coal fired boiler, essential combustion adjustments are required for the boiler to maintain good operation performance and low concentration of NO_x emission when coal quality and other factors change. Operation personnel can evaluate the impacts of the variations of the factors and the corresponding adjustment measures based on the unit performance and their operational experience so as to determine the better mode and extent of the adjustment needed. The commonly used methods for the prediction and control of boiler NO_x emissions during power plant operation mainly include the empirical method based on combustion tuning tests, the mathematical model method based on optimization control and the method based on CFD simulation and performance analysis. Based on the review on the current status of the investigation and application of boiler NO_x emission prediction and control, CFD technology was applied for the numerical investigation and performance analysis of the boiler with advanced combustion system to realize the goal of safe, stable, highly efficient and low-NO_x operation of the boiler.

Key words: coal-fired boiler; operation; NO_x emission; prediction

欢迎投稿 欢迎订阅