

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212204

基于机器学习的螺旋管圈水冷壁壁温预测模型研究

袁茂博¹, 邓磊¹, 刘雪敏², 杨凯璇^{1,3}, 梁永¹, 刘虎¹,
笪耀东², 车得福¹

(1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2.中国特种设备检测研究院, 北京 100029;

3.上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

[摘要] 针对某 600 MW 机组四角切圆锅炉建立了数值计算模型, 综合考虑了一次风率、主燃区过量空气系数、燃烧器摆角以及 SOFA 喷嘴垂直摆角等运行参数的影响, 设计 $L_{16}(4^5)$ 正交工况获得了 100%BMCR、75%THA、50%THA 以及 35%BMCR 负荷下锅炉水冷壁壁面的热流量, 各工况下螺旋管圈水冷壁的壁温分布通过耦合壁面吸热量、水动力特性与壁温计算得到。由于正交工况参数设置的不连续性, 建立了机器学习模型, 实现了正交工况覆盖参数范围内的螺旋管圈水冷壁壁温分布预测。研究结果表明: 在亚临界工况下, 螺旋管圈水冷壁在燃烧器高度区域内出现 730 K 的温度峰值; 锅炉在变负荷过程中, 当炉膛火焰中心高度与管内工质相变起始高度重合时, 易发生传热恶化导致壁温激升; 机器学习算法中集成学习算法在壁温数据的训练集和测试集上拟合优度 R^2 均达到了 0.99, 能够适用于宽负荷下锅炉水冷壁壁温预测。同时, 机器学习算法建立了壁温分布与锅炉运行参数之间的映射关系, 后续研究可通过优化算法合理调整优化运行参数, 保障水冷壁的壁温安全。

[关键词] 螺旋管圈水冷壁; 热流密度分布; 壁温分布; 正交工况; 机器学习

[引用本文格式] 袁茂博, 邓磊, 刘雪敏, 等. 基于机器学习的螺旋管圈水冷壁壁温预测模型研究[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 32-39. YUAN Maobo, DENG Lei, LIU Xuemin, et al. Research on prediction model for spiral water-cooled wall temperature based on machine learning[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 32-39.

Research on prediction model for spiral water-cooled wall temperature based on machine learning

YUAN Maobo¹, DENG Lei¹, LIU Xuemin², YANG Kaixuan^{1,3}, LIANG Yong¹, LIU Hu¹,
DA Yaodong², CHE Defu¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

3. Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: In the study, a computational fluid dynamics (CFD) model based on a 600 MW tangentially coal-fired boiler was established. According to orthogonal conditions ($L_{16}(4^5)$), the heat flux distributions of the water-cooled wall under 100% BMCR, 75% THA, 50% THA and 35% BMCR loads were obtained. In addition, the factors also included: primary to secondary air rate, degree of air-staging, swing angles of burners and SOFA nozzles. Then, the spiral water-cooled wall temperature distributions under various conditions were calculated through coupling the heat absorption, temperature calculation and hydrodynamic characteristics of the water-cooled wall. Due to the discontinuity of orthogonal condition, the machine learning was used for predicting the spiral water-cooled wall

修回日期: 2022-12-26 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0602102)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0602102)

第一作者简介: 袁茂博 (1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为碳基燃料洁净利用及 CFD 数值仿真计算, isyuanmb@163.com.

通信作者简介: 笪耀东 (1979), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为特种设备安全节能环保检测与评价、绿色低碳发展等, 1350710510@qq.com.

temperature distribution within the range of parameters covered by orthogonal conditions. The results showed that a wall temperature peak up to 730 K would appear in the area among burner system. The heat transfer deterioration was easy to occur when the flame center height in furnace coincided with the phase change height of the working fluid during the boiler load adjusting process. The goodness of fit R^2 of the ensemble learning on the training set and the test set of the wall temperature data had reached 0.99, which could be used to predict the wall temperature of the boiler under wide load. At the same time, the machine learning established the mapping relationship between the wall temperature distribution and the operating parameters of the boiler. In the future study, the wall temperature safety of the water wall can be guaranteed by reasonably adjusting and optimizing the operating parameters through the optimization algorithm.

Key words: spiral water-cooled wall; heat flux distribution; temperature distribution of water-cooled wall; orthogonal condition; machine learning

2021 年风能、水能、太阳能等可再生能源发电量占总发电量的 29.7%，可以预见，该比例在“双碳”目标的驱动下仍会增长^[1-2]。同时由于风、光、水资源的时空分布不平衡，传统电站在调配能源中的地位将显著增强。然而，大容量锅炉在深度调峰过程中，往往会出现不同程度的水冷壁壁温偏差，即设计温度低于壁面测点的监测温度^[3]。这种水冷壁壁温偏差主要出现在工质发生相变的下炉膛区域。

对于大容量锅炉，下炉膛往往采用螺旋管圈水冷壁，工质在水冷壁中盘旋上升，以适应主燃区四面墙吸热的不均性^[4]。但在负荷深度调节过程中，水冷壁中工质的压力也会在亚临界和超临界之间转换。亚临界压力下，蒸干和膜态沸腾是引起传热恶化的主要因素。而在超临界压力下，工质物性会在大比热区内剧烈变化，管内工质从中心到管壁的径向物性差异会引起浮力效应，容易导致传热恶化^[5-6]。同时，低负荷下炉膛火焰充满度低，下炉膛水冷壁吸热量的不均匀性变强，水冷壁水动力稳定性变差。由于向火侧的传热特性和水侧的流动特性在锅炉负荷深度调节过程中变化剧烈，下炉膛的壁温安全问题必须引起重视。

传统的壁温校核方法通常采用零维模型，但炉膛沿高度和宽度方向的热流密度分布源于半经验公式，无法充分考虑炉内空气分级程度、一次风比例、燃烧器摆角等运行参数的影响，且螺旋管圈水冷壁在水动力计算时通常做简化处理，按四面墙单独进行，未考虑工质流动的连续性^[7-8]。因此本文建立锅炉数值模拟模型计算 100%BMCR、75%THA、50%THA 以及 35%BMCR 4 种负荷下锅炉的热流密度分布，并采用坐标变换的热量再分配方法，将螺旋管圈水冷壁吸热量进行一体化处理，耦合数值模拟、水动力计算和壁温计算得到螺旋管圈水冷壁在各负荷下的壁温分布。由于锅炉负荷变化连续，空气分级程度、一次风比例、燃烧器摆角以及分离燃

尽风 (SOFA) 摆角灵活可调，因此本文设计 $L_{16}(4^5)$ 正交实验，以最少的工况综合考虑上述各因素对壁温的影响^[9]。将正交工况数据作为样本数据，采用机器学习算法对样本中的锅炉负荷、空气分级度、一次风比例等特征与壁温之间的关系进行学习，最终得到宽负荷下螺旋管圈水冷壁的壁温分布的预测模型。

1 数值计算模型

1.1 锅炉参数

本文研究对象为某电厂的超临界 600 MW 机组直流四角切圆燃煤锅炉，其几何形状和燃烧系统如图 1 所示。

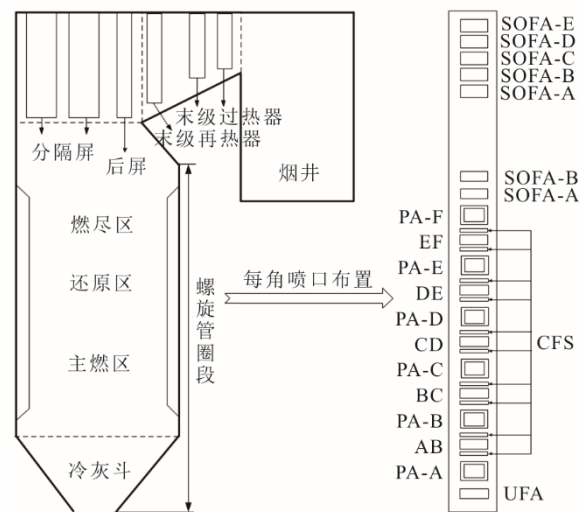


图 1 某 600 MW 机组四角切圆燃煤锅炉布置
Fig.1 Diagram of a 600 MW tangentially coal-fired boiler

该锅炉总高为 63.750 m，炉膛截面为矩形，深度为 17.696 m，宽度为 18.816 m。下炉膛水冷壁为倾角 13.95° 的螺旋管圈^[10]。该锅炉结构中，燃烧系统的主要组件包括紧凑燃尽风 (CCOFA)、预置水平偏角的辅助风喷嘴 (CFS)、可水平摆动的 SOFA 以及强化着火 (EI) 煤粉喷嘴，整个燃烧

区域从下到上被分为主燃区、还原区和燃尽区 3 个部分。燃烧器中心线和炉壁的夹角为 51° 和 48° ，预置水平偏角的辅助风喷嘴（CFS）和炉壁夹角为 22° 和 19° 。

1.2 数值模型与网格划分

采用六面体结构化网格对锅炉进行网格划分。分隔屏、后屏、各级过热器等对流受热面均简化为平面。流体计算域在冷灰斗底部至锅炉后烟井之间，对主燃区网格进行加密处理，锅炉网格系统如图 2 所示。网格无关性测试已在前期研究中给出，最终选取的网格总数为 207 万^[11]。

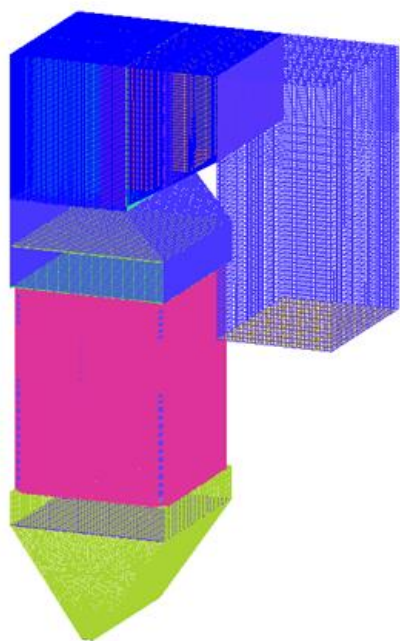


图 2 锅炉网格系统
Fig.2 Grid system of the boiler

本文采用三维稳态方法，选取 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型构建湍流方程组^[12]；采用基于欧拉-拉格朗日方法的随机轨道模型来描述煤粉颗粒的运动和燃烧反应的历程；选择离散相来模拟煤粉颗粒在炉膛内的分布和轨迹，其中煤粉颗粒的粒径分布采用 Rosin-Rammler 分布进行描述，最小粒径为 $1\ \mu\text{m}$ ，最大粒径为 $100\ \mu\text{m}$ ，平均粒径为 $61\ \mu\text{m}$ ；炉膛内的辐射换热过程采用离散坐标辐射模型进行求解，气相的辐射吸收系数采用灰色气体加权求和模型计算；压力与速度耦合选用 SIMPLE 算法，压力项离散采用 Standard 格式，其他控制方程（动量方程、 k 方程和 ε 方程、能量方程以及各组分控制方程）均采用一阶迎风格式进行离散^[13-15]。燃用煤种为烟煤，其元素分析和工业分析见表 1。

表 1 煤质分析

Tab.1 Quality analysis of the coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
$w_{\text{ar}}(\text{FC})$	$w_{\text{dar}}(\text{V})$	$w_{\text{ar}}(\text{A})$	$w_{\text{ar}}(\text{M})$	$w_{\text{ar}}(\text{C})$	$w_{\text{ar}}(\text{H})$	$w_{\text{ar}}(\text{O})$	$w_{\text{ar}}(\text{N})$	$w_{\text{ar}}(\text{S})$	$(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
50.38	35.00	8.00	14.50	62.83	3.62	9.94	0.70	0.41	22.76

2 正交工况设计

影响炉内燃烧的因素众多，其中锅炉负荷直接决定锅炉给煤量、燃烧器投运层数以及过量空气系数，是炉膛数值模拟的决定性因素。此外，一次风率影响煤粉着火位置与燃烧器的距离，主燃区空气过量系数影响下炉膛的燃烧强度，燃烧器及 SOFA 风摆角影响火焰中心的高度，这 4 项操作参数与锅炉负荷关联不紧密但都直接影响着水冷壁的热分布情况。因此本文选取了锅炉负荷、一次风率、主燃区过量空气系数、燃烧器摆角以及 SOFA 喷嘴竖直摆角为因素，分别记为 A、B、C、D、E。

对每个因素设计 4 个水平，采用正交试验设计了 16 种试验工况，具体工况见表 2。当锅炉负荷变化时，给煤量、燃烧器投运层数和过量空气系数等运行参数随之变化。在不同的运行负荷下，边界条件如表 3 所示进行设置。

表 2 $L_{16}(4^5)$ 正交工况

Tab.2 $L_{16}(4^5)$ orthogonal condition table

编号	A	B	C	D	E
1	100%BMCR	0.18	0.75	-10°	-10°
2	100%BMCR	0.20	0.80	0°	0°
3	100%BMCR	0.22	0.85	15°	15°
4	100%BMCR	0.24	0.90	20°	25°
5	75%THA	0.18	0.80	15°	25°
6	75%THA	0.20	0.75	20°	15°
7	75%THA	0.22	0.90	-10°	0°
8	75%THA	0.24	0.85	0°	-10°
9	50%THA	0.18	0.85	20°	0°
10	50%THA	0.20	0.90	15°	-10°
11	50%THA	0.22	0.75	0°	25°
12	50%THA	0.24	0.80	-10°	15°
13	35%BMCR	0.18	0.90	0°	15°
14	35%BMCR	0.20	0.85	-10°	25°
15	35%BMCR	0.22	0.80	20°	-10°
16	35%BMCR	0.24	0.75	15°	0°

表 3 不同负荷下锅炉运行参数

Tab.3 Operating parameters under different loads

锅炉负荷	给煤量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	燃烧器投运层数	过量空气系数
100%BMCR	240.00	a—e	1.20
75%THA	164.40	b—e	1.33
50%THA	113.00	a—c	1.37
35%BMCR	95.70	b—c	1.47

3 螺旋管圈水冷壁壁温计算模型

将数值模拟计算得到的热流密度与水动力特性相耦合求解锅炉受热面壁温分布是近年来常见的方法^[16-18]。其核心在于将壁面离散,再借助单元的热流密度和传热热阻计算水冷壁管的壁温。然而,针对螺旋管圈水冷壁的壁温计算模型鲜有报道。本节提出的热量再分配方法与水动力计算、壁温计算相耦合,能够更准确地计算螺旋管圈水冷壁的壁温分布。

3.1 螺旋管圈水冷壁热量再分配方法

本文选取灰斗上沿至螺旋管圈顶端的一段螺旋管圈水冷壁作为研究对象。应用基于坐标变换的热量再分配方法对数值模拟计算得到的壁面热流密度进行处理。图3为坐标变换的示意,先将水冷壁展开形成由前壁、右壁、后壁、左壁依次排列的平面,此时三维螺旋管圈中某管路(ABCDEF)在展开平面上被分为ABCDE和EF,之后再再将分隔的2段拼合成完整管路。该方法的核心在于各个热流密度点的坐标位置变换。当所有热流密度点完成变换后,再对四边形平面进行网格划分并求取各个网格内的热流密度平均值以计算壁面吸热量。

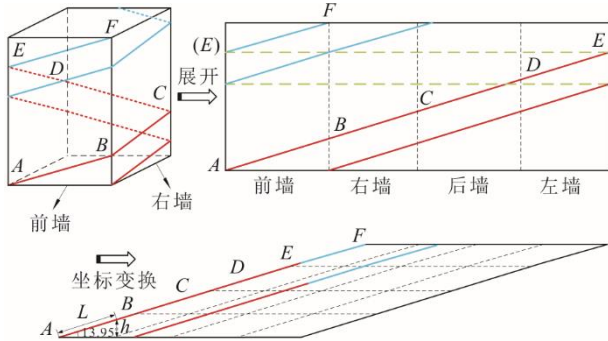


图3 螺旋管圈展开方法示意

Fig.3 Diagram of the planarization method of spiral water-cooled wall

3.2 热工-水力模型

忽略水冷壁管中的加速压降,考虑单回路管圈的摩擦压降和重位压降,第*i*回路压降由该回路各段的摩擦压降(Δp_f)和重位压降(Δp_h)累加组成:

$$\Delta p(i, M_i) = \sum_j \Delta p_f(i, j, M_i) + \sum_j \Delta p_h(i, j, M_i) \quad (1)$$

光管单相摩擦压降计算公式为^[19]:

$$\Delta p_f = f(L/D_{in})(G^2/2)v \quad (2)$$

式中: L 为第*i*回路*j*段长度, m ; D_{in} 为管内径, m ; G 为单位面积质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$; v 为第*i*回路*j*段的比容, m^3/kg 。

处于旺盛湍流区的光管单相摩擦系数*f*为:

$$f = \frac{1}{4[\lg(3700D_{in}/k)]^2} \quad (3)$$

式中: k 为粗糙度,对于SA213T12, $k=0.008$ 。

汽水混合物的摩擦压降计算公式为^[18]:

$$\Delta p_f = \psi f(L/D_{in})(G^2/2)v_1[1+x(v_s/v_1-1)] \quad (4)$$

式中: ψ 为摩擦阻力修正系数,取0.95; x 为第*i*回路*j*段含汽率(干度); v_1 为饱和水比容, m^3/kg ; v_s 为饱和蒸汽比容, m^3/kg 。

单相重位压降计算公式为:

$$\Delta p_h = \rho gh \quad (5)$$

式中: h 为第*i*回路*j*段垂直上升距离, m ; ρ 为第*i*回路*j*段的工质密度, kg/m^3 。

汽水混合物重位压降计算公式为:

$$\Delta p_h = [x\rho_s + (1-x)\rho_l]gh \quad (6)$$

式中: ρ_l 为第*i*回路*j*段的饱和水密度, kg/m^3 ; ρ_s 为第*i*回路*j*段的饱和蒸汽密度, kg/m^3 。

根据并联管组压降相等原则,可列出如下压降平衡方程:

$$0 = \Delta p - \Delta p(i, M_i) \quad (7)$$

再根据管路的质量流量,可列出质量守恒方程:

$$0 = M - \sum_i M_i \quad (8)$$

对于并联管组的流量计算,因为压降计算与工质物性和流量都有关,而物性计算中同样需要用到流量,因此准确求取流量分配需要借助迭代方法。首先假定一个流量分配,由此计算出各段物性参数,再依据压降平衡和质量守恒计算各管流量分配,当两次流量分配之差满足收敛条件时,结束迭代。需要指出的是,压降平衡和质量守恒方程组求解使用离散牛顿法,用差商代替导数,组成类雅可比矩阵。

3.3 壁温计算模型

亚临界状态下,圆管的单相换热系数用Dittusee-Boelter公式表示:

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{D_{in}} Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

式中: λ 为管的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

倾斜管沸腾对流换热系数公式为:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = 0.0885 \times \left[\left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_s} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_l} \right)^{0.1} \right]^{0.1516} \times \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{-5.2231} \times \left(\frac{G}{2000} \right)^{-0.1664} \quad (10)$$

式中： α_i 为饱和水的对流换热系数，用单相对流换热系数计算， $W/(m^2 \cdot K)$ ； μ_i 为第*i*回路*j*段的饱和水动力黏度， $N/(m \cdot s)$ ； μ_s 为第*i*回路*j*段的饱和蒸汽动力黏度， $N/(m \cdot s)$ ； p 为工质压力，Pa； p_{cr} 为临界压力，22.115 MPa； G 为质量流量， $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

超临界压力下，光管的对流换热系数为^[20]：

$$\alpha = 0.0068 \frac{\lambda_b}{d} Re_b^{0.9} Pr_b^{0.63} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.17} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_b} \right)^{0.29} \quad (11)$$

式中： λ_b 为由流体温度确定的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； λ_w 为由壁面温度确定的导热系数， $W/(m \cdot K)$ 。

各回路各区段内壁温度计算公式为^[21]：

$$t_n = t_f + q \cdot \beta / \alpha \quad (12)$$

式中： t_f 为计算区段的流体温度，K； β 为管子外径与内径的比值， D_{out}/D_{in} ； q 为外壁辐射热流密度。

管子外壁温度计算公式为^[22]：

$$t_w = t_n + q(\delta / \lambda_{tube}) [2\beta / (\beta + 1)] \quad (13)$$

式中： δ 为管壁厚度，m； λ_{tube} 为管壁导热系数， $W/(m \cdot K)$ 。

以上热量再分配、热工-水力模型及壁温计算皆在 Matlab 平台上实现，流体物性参数调用 IAPWS-IF97 数据库获取^[23]，最终计算得到螺旋管圈水冷壁中各回路的流量分布和壁温分布。模型验证已在前期研究中给出^[11]。

4 机器学习模型训练

相比于传统的零维计算模型，将数值模拟计算、水动力计算以及壁温计算相耦合能够获得水冷壁壁温分布情况。将所有正交工况下的壁温数据进行汇总，即可获得一个相对大的样本数据集。机器学习即是借助“统计”的思想，建立特征值和标签值间的联系，实现由给定数据预测未知数据的目标^[24-25]。本文采用机器学习算法的目的是将有限的正交工况进行延伸，从而实现正交工况覆盖参数范围内的螺旋管圈水冷壁壁温分布预测。表4简要介绍了机器学习中的主流算法。

表4 机器学习算法介绍
Tab.4 Introduction of machine learning algorithm

方法	算法核心	算法特点
CART 回归树	利用基尼增益来作为特征的选取标准，并用“二分法”对样本空间进行划分，本质是对数据进行加和统计	模型易于理解，对样本量不敏感
集成学习	通过若干个弱回归树共同预测，将结果汇总后取均值输出	具备天然的抗“噪声”能力，泛化能力强
支持向量机	应用最速下降法，计算最大间隔，获得超平面；对于非线性问题可通过核函数让数据升维	对非线性高维问题处理很快，预测精度高，但对样本量依赖度较高
神经网络	可通过提高神经网络层数和各层神经元个数实现对复杂问题的求解，神经网络的关键在于求解各个神经元的对特征值的偏置和权重	非线性映射能力很强，但内部机理不清晰，对样本量依赖度很高

训练机器学习模型的基础是获得样本数据集。首先要从 16 个正交数值模拟工况中提取螺旋管圈水冷壁各个网格中心坐标上的热流密度分布数据；随后将热流密度数据进行坐标变换处理，并沿长度划分为 m 列，沿高度划分为 n 行，共计 $m \times n$ 个网格，进而计算各工况下壁温分布。本文选取长度和高度方向的网格密度分别为 70 和 30，共计 2 100 个网格；最后将锅炉负荷、一次风率、主燃区过量空气系数（主过）、燃烧器摆角（摆角 B）、SOFA 喷嘴竖直摆角（摆角 S）、X 坐标以及 Y 坐标共计 7 项影响因素设为特征值，对应的壁温数据设为标签值，形成标准样本数据以供机器学习算法训练。具体流程如图 4 所示。

5 计算结果讨论

5.1 变负荷壁温分布

选取正交工况 2、工况 6、工况 9 及工况 16 分别代表 100%BMCR、75%THA、50%THA 及 35%BMCR 这 4 种锅炉负荷。依照第 3 节的计算方法，获得了变负荷下的螺旋管圈水冷壁壁温分布。图 5 对比了 4 种锅炉负荷下，炉膛前墙的温度分布。由图 5 可见：100%BMCR 和 75%THA 负荷下壁面温度分布较为均匀，100%BMCR 负荷下高温区平均温度约为 724 K，比螺旋管圈水冷壁预警温度低 49 K；而 50%THA 和 35%BMCR 负荷下，在燃烧器区域范围内出现了温度的峰值，最高温度达到 730 K。



图 4 数据集生成方法
Fig.4 Generation method of data set

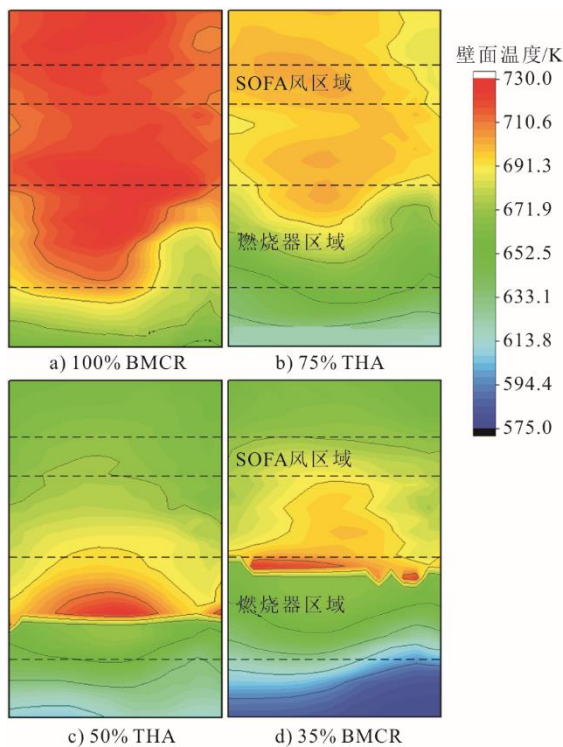


图 5 变负荷下螺旋管圈水冷壁前墙壁温分布
Fig.5 Temperature distributions of front walls of spiral water-cooled wall under variable loads

一般而言，壁面温度会随负荷降低而降低，这主要是由于给煤量降低导致炉内火焰温度降低。在 50%THA 和 35%BMCR 负荷下，管内工质的运行压力在临界点以下，温度云图显示在某一高度位置壁

温会快速上升，该位置往往就对应沸腾的起始高度。当该位置与火焰中心高度位置重合时，极易导致工质发生膜态沸腾，从而出现传热恶化与壁温激增，威胁锅炉的安全运行。在预警壁温 773 K 的范围内，高负荷下的壁温分布相对均匀，对水冷壁的安全性影响有限；低负荷下壁面出现的局部高温容易加剧水冷壁的热应力疲劳，长期来看会缩短水冷壁的使用寿命。

另一方面，螺旋管圈水冷壁对吸热不均匀性不是很敏感，很大程度上避免了管路吸热量越高、管内工质流量越小的情况，因此螺旋管圈水冷壁壁面沿横向的温度分布不均主要是由壁面热流密度的分布不均导致的。由此可见，锅炉在变负荷过程中，须调整运行参数，使得炉内火焰中心高度与管内工质相变高度错开，以避免发生严重的传热恶化，保障螺旋管圈水冷壁安全运行。

5.2 机器学习模型训练

根据样本数据集的获取方式，本文所计算的 16 个正交数值模拟工况的总样本量为 33 600，包含特征有：锅炉负荷、一次风率、主燃区过量空气系数、燃烧器摆角、SOFA 喷嘴竖直摆角、X 坐标以及 Y 坐标。随机抽取样本集的 15% 作为验证样本，其余为测试样本，各算法表现和参数选择如图 6 和表 5 所示。测试结果表明，回归树、集成学习、支持向

量机和神经网络这4种算法在训练集上的预测值与样本值较为接近,拟合优度 R^2 都在 0.94 以上,其中集成学习算法达到了 0.99。因此,在测试集的壁温预测中这4种算法皆能达到较好的效果。

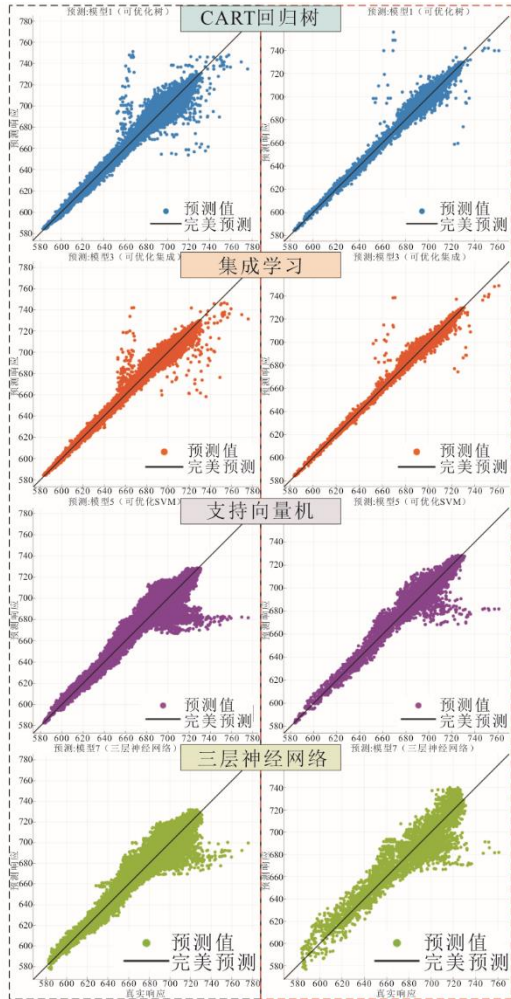


图 6 机器学习算法预测效果

Fig.6 Prediction results of machine learning algorithms

表 5 机器学习算法参数与预测效果

Tab.5 Parameters and deviations of machine learning algorithm

算法	模型参数	训练样本	测试样本
CART 回归树	交叉验证折数: 5	RMSE=4.92	RMSE=5.20
	最小叶大小: 3		
集成学习	优化: 贝叶斯优化	RMSE=3.83	RMSE=4.05
	迭代数: 30		
支持向量机	交叉验证折数: 5	RMSE=7.86	RMSE=8.36
	最小叶大小: 2		
三层神经网络	优化: 贝叶斯优化	RMSE=8.27	RMSE=12.32
	学习器数量: 363		
支持向量机	交叉验证折数: 5	RMSE=7.86	RMSE=8.36
	核函数: 高斯核		
三层神经网络	优化: 贝叶斯优化	RMSE=8.27	RMSE=12.32
	Epsilon: 0.269		
三层神经网络	交叉验证折数: 5	RMSE=8.27	RMSE=12.32
	神经元层数: 3		
三层神经网络	交叉验证折数: 5	RMSE=8.27	RMSE=12.32
	神经元个数: 20		
三层神经网络	交叉验证折数: 5	RMSE=8.27	RMSE=12.32
	激活函数: ReLU		

然而在使用机器学习建立预测模型时,既要避免欠拟合(训练误差太大),也要避免过拟合(测试误差太大)。理论上,在训练集上可以很容易地达到极小的训练误差,但这可能会导致过拟合现象。这就需要验证集上的判别效果来估计模型在实际使用时的泛化能力和预测效果。从验证集的表现来看,三层神经网络算法的方均根误差(RMSE)和 R^2 都明显下降,而集成学习算法仍保持较高的壁温预测准确度, R^2 仍为 0.99。验证结果表明,对于本文所构建的样本数据集,集成学习算法预测壁温效果最佳,并具有很强的泛化能力。

样本数据集将坐标信息纳入特征量,有利于后期将水冷壁上壁温测点数据导入样本数据集进行再学习,这使得该模型具有拓展性。同时,机器学习模型可用于预测变负荷运行下锅炉水冷壁壁温,为合理调整优化运行参数提供参考,保障水冷壁的安全稳定运行。

6 结 论

本文对某 600 MW 机组四角切圆燃煤锅炉建立了数值计算模型,设计 $L_{16}(4^5)$ 正交工况获得了 100%BMCR、75%THA、50%THA 以及 35%BMCR 负荷下锅炉水冷壁壁面的热流密度分布。通过耦合壁面吸热量、水动力特性与壁温计算,得到了各工况下螺旋管圈水冷壁的壁温分布。由于正交工况设置的参数是不连续的,本文建立了机器学习模型,实现了正交工况覆盖参数范围内的螺旋管圈水冷壁壁温分布预测。研究的主要结论如下。

1) 整体而言,水冷壁壁面温度随锅炉负荷降低而降低,但在亚临界工况下,水冷壁在燃烧器高度区域会出现 730 K 的峰值温度。因此,锅炉在变负荷过程中,需调整运行参数,使得炉膛火焰中心高度与管内工质相变起始高度错开,避免发生严重的传热恶化,保障螺旋管圈水冷壁安全运行。

2) 机器学习样本数据集选取特征包括: 锅炉负荷、一次风率、主燃区过量空气系数、燃烧器与 SOFA 喷嘴垂直摆角、X 坐标以及 Y 坐标,标签值为壁温。在选取的算法中,集成学习算法在训练集和测试集上拟合优度 R^2 均达到了 0.99,对本文的样本数据集学习效果最佳,且具有很强的泛化能力。

3) 机器学习算法建立了壁温分布与锅炉运行参数间的映射关系。后续研究可通过优化算法设置水冷壁壁温的均值、最大值等优化目标,指导锅炉运行参数进行优化,避免由于运行参数搭配不当导

致壁温分布严重不均或壁温超温,保障水冷壁的壁温安全。

[参考文献]

- [1] 古雨. 中国可再生能源发展趋势预测及应用前景分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021: 1-3.
GU Yu. Development trend forecast and application prospect analysis of renewable energy in China[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021: 1-3.
- [2] 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究[J]. 中国工业和信息化, 2021(8): 54-61.
DING Zhongli. Research on carbon neutralization framework roadmap in China[J]. China Industry & Information Technology, 2021(8): 54-61.
- [3] 杜景轩, 崔健, 韩转慧. 深度调峰时锅炉水冷壁超温分析及解决措施[J]. 现代工业经济和信化, 2021, 11(10): 250-251.
DU Jingxuan, CUI Jian, HAN Chuanhui. Analysis of boiler water-cooled wall over-temperature during deep peaking and response strategies[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(10): 250-251.
- [4] CHE D. Boilers-theory, design and operation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008: 268-271.
- [5] WANG J, LI H, YU S, et al. Comparison of the heat transfer characteristics of supercritical pressure water to that of subcritical pressure water in vertically-upward tubes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(7): 769-776.
- [6] CHEN Y, LU X F, ZHANG W Q, et al. Experimental study on the heat-transfer characteristics of a 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(1): 1-9.
- [7] LIU H, WANG Y, ZHANG W, et al. Coupled modeling of combustion and hydrodynamics for a 1 000 MW double-reheat tower-type boiler[J]. Fuel, 2019, 255: 115722.
- [8] WANG S, YANG D, ZHAO Y, et al. Heat transfer characteristics of spiral water wall tube in a 1 000 MW ultra-supercritical boiler with wide operating load mode[J]. Applied Thermal Engineering, 2017: S1359431117334300.
- [9] 邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 150-154.
QIU Yibing. Experiment design and data processing[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008: 150-154.
- [10] LI D, LIU X, FENG Y, et al. Effects of oxidant distribution mode and burner configuration on oxy-fuel combustion characteristics in a 600 MWe utility boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 781-794.
- [11] YUAN M, LIU H, WU Y, et al. Coordinate transformation method for heat reallocation in the spiral water-cooled wall temperature calculation[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 177: 107557.
- [12] 李宁, 葛家楠, 汪健生. 300 MW 机组四角切圆煤粉炉空气与富氧燃烧对比模拟研究[J]. 热力发电, 2022, 51(6): 122-131.
LI Ning, GE Jianan, WANG Jiansheng. Comparative simulation of air and oxygen-enriched combustion in a 300 MW tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6): 122-131.
- [13] AL-ABBAS A H, NASER J, DODDS D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang A brown coal power station[J]. Fuel, 2012, 102: 646-665.
- [14] LIU H, ZHANG L, LI Q, et al. Effect of FGR position on the characteristics of combustion, emission and flue gas temperature deviation in a 1 000 MW tower-type double-reheat boiler with deep-air-staging[J]. Fuel, 2019, 246: 285-294.
- [15] 王小龙, 张飞龙, 王里, 等. 330 MW 机组燃用贫煤锅炉配煤掺烧数值模拟研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 112-116.
WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation on coal blending in a 330 MW unit boiler firing lean coal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 112-116.
- [16] 闫靖文, 刘欣, 黄书益, 等. 超临界锅炉水冷壁壁温预测耦合模型[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 100-108.
YAN Jingwen, LIU Xin, HUANG Shuyi, et al. Coupled model for prediction of water wall tube temperature of supercritical boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 100-108.
- [17] YU C, XIONG W, MA H, et al. Numerical investigation of combustion optimization in a tangential firing boiler considering steam tube overheating[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 154: 87-101.
- [18] EDGE P J, HEGGS P J, POURKASHANIAN M, et al. An integrated computational fluid dynamics-process model of natural circulation steam generation in a coal-fired power plant[J]. Computers & Chemical Engineering, 2011, 35(12): 2618-2631.
- [19] 王为术. 超(超)临界锅炉内螺旋水冷壁管流动传热与水动力特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 137-139.
WANG Weishu. Supercritical (ultra supercritical) boiler internal thread water-cooled wall tube flow heat transfer and hydrodynamic characteristics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 137-139.
- [20] HUANG D, WU Z, SUNDEN B, et al. A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress[J]. Applied Energy, 2016, 162: 494-505.
- [21] WANG J Z, ZHANG Y P, LI Y, et al. A non-equal fragment model of a water-wall in a supercritical boiler[J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(2): 143-150.
- [22] ZHANG W, WANG H, YAN K, et al. Mathematical modeling and thermal-hydrodynamic analysis of vertical water wall in a SCFB boiler with annular furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 742-748.
- [23] QI J, ZHOU K, HUANG J, et al. Numerical simulation of the heat transfer of superheater tubes in power plants considering oxide scale[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 929-938.
- [24] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 137-139.
ZHOU Zhihua. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 137-139.
- [25] XU L G, HUANG Y J, YUE J F, et al. Improvement of slagging monitoring and soot-blowing of waterwall in a 650 MWe coal-fired utility boiler[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 96: 106-120.

(责任编辑 邓玲惠)