

超临界 CO₂ 锅炉气冷壁壁温及炉内烟温分布

苏宏亮¹, 王婷², 黄莺¹, 杜谦³

(1. 高效清洁燃煤电站锅炉国家重点实验室(哈尔滨锅炉厂有限责任公司), 黑龙江 哈尔滨 150046; 2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司 新技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150046; 3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了从超临界 CO₂ 锅炉实验数据中挖掘出更多的参数信息, 应用固体导热计算、工质管路分配计算、炉膛辐射传热仿真等研究方法对气冷壁及其内、外部热边界进行求解, 基于 DO 模型、支持向量机提出了一种气冷壁壁温和炉内烟温预测模型, 并根据实验数据进行了计算。该算法的数据源为运行监测数据, 可以实现炉内烟气温度分布、壁温及热负荷等物理量的在线求解。研究结果表明: 气冷壁导热计算获得的管壁特定点温度与工质温度温差拟合公式准确性高, 相关性在 0.99 以上; 气冷壁壁温与外部热边界求解计算中获得热负荷波动情况一致; 烟温预测模型的有效性在传热数据库测试中得到验证, 其最大相对误差不超过 8.5%。

关键词: 超临界 CO₂; 锅炉; 实验; 壁温; 烟温

中图分类号: TK122 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.011

[引用本文格式] 苏宏亮, 王婷, 黄莺, 等. 超临界 CO₂ 锅炉气冷壁壁温及炉内烟温分布[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 77-83. SU Hong-liang, WANG Ting, HUANG Ying, et al. Distribution of gas-cooled wall temperature and flue gas temperature in the furnace of supercritical CO₂ boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 77-83.

Distribution of Gas-cooled Wall Temperature and Flue Gas Temperature in the Furnace of Supercritical CO₂ Boiler

SU Hong-liang¹, WANG Ting², HUANG Ying¹, DU Qian³

(1. State Key Laboratory of Efficient and Clean Coal-fired Utility Boilers (Harbin Boiler Company Limited), Harbin, China, Post Code: 150046; 2. Institute of New Technology, Harbin Boiler Co., Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046; 3. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to get more parameter information from experiment data of supercritical CO₂ boiler, the research methods of solid heat conduction calculation, pipe flow distribution calculation and furnace radiation heat transfer simulation were applied to solve the gas-cooled wall and its internal and external thermal boundaries separately. Then a prediction model of gas-cooled wall temperature and flue gas temperature in the furnace was proposed based on DO model and support vector machine, and calculated according to the experiment data. The data source in this algorithm came from the operation monitoring data, which could realize the online solution of physical quantities such as the temperature distribution of flue gas in the furnace, wall temperature and thermal load. The research results show that through gas-cooled wall heat conduction calculation, the fitting formula of the temperature difference between the tube wall at specific point and the working fluid is highly accurate with the correlation above 0.99; the gas-cooled wall temperature accords with fluctuation of the thermal load curve obtained by solving the external thermal boundary; the validity of flue gas temperature prediction model is verified in the testing of heat trans-

收稿日期: 2021-07-24; 修订日期: 2021-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0218103)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Program of China(2020YFF0218103)

作者简介: 苏宏亮(1987-), 男, 吉林吉林人, 哈尔滨锅炉厂有限责任公司工程师。

fer database with the maximum relative error of 8.5% at most.

Key words: supercritical CO₂, boiler, experiment, wall temperature, flue gas temperature

引言

超临界 CO₂ 发电循环设备结构紧凑、效率高,正在成为众多研究机构的研究热点^[1]。超临界 CO₂ 发电技术在核能^[2]、太阳能^[3]、化学能^[4] 利用方面均有一定发展潜力。研究以 CO₂ 为工质的锅炉,对超临界 CO₂ 发电技术在该领域应用具有重要意义。

超临界 CO₂ 锅炉的炉膛冷却壁作为锅炉首要设计难点获得大量关注,但这些针对炉膛冷却壁的研究基本停留理论上,不涉及实验。Yu Yang^[5]、徐进良^[6] 对超临界 CO₂ 锅炉降低工质流体阻力和解决炉膛冷却壁金属壁温高提出了一些解决方法。张一帆^[7]、胡涵^[8]、杨丹蕾等人^[9] 对超临界 CO₂ 锅炉的气动力特性及壁温分布进行了更为详尽的理论计算分析,计算表明,炉膛冷却壁的金属壁面温度在 600℃ 以上,与目前水蒸气锅炉明显不同。

在炉内烟气温度场预测方面,陈有福^[10] 提出了一种基于水冷壁壁温的炉膛火焰中心位置预测方法。该方法基于 CFD 全炉膛数值模拟建立预测模型,工况多,工作量大,计算周期长。

本文以某超临界 CO₂ 发电机组实验锅炉为研究对象,根据锅炉 CO₂ 参数与壁温测点布置情况,以热边界条件对气冷壁温度场影响规律和管路分配计算为基础,通过联立换热方程实现炉膛壁面热负荷及壁温求解。并进一步基于 DO 模型、支持向量机、遗传算法建立的烟气温度预测模型实现炉内烟气温度分布预测。

1 数学模型及计算方法

1.1 求解思路

气冷壁为超临界 CO₂ 锅炉的炉膛膜式冷却壁。以气冷壁为研究对象,气冷壁的管壁外表面与炉膛内火焰和高温烟气进行辐射换热,即外部热边界。同时,换热管内部的超临界态 CO₂ 流体与管内壁进行对流换热并将热量传递给 CO₂,即内部热边界。气冷壁壁温及炉内烟气温度预测模型求解流程如图 1 所示。本文的研究思路是先分析气冷壁稳态情况

下膜式壁温度场与内外部热边界影响规律,再进行气冷壁内部热边界条件求解,根据锅炉实际运行监测的工质参数求解气冷壁内 CO₂ 在管内的流动和传热情况;接着联立炉膛换热方程、内部热边界条件、膜式壁温度场关系式推导出气冷壁壁温和壁面热负荷等外部热边界;最终基于 DO 模型、支持向量机、遗传算法建立预测模型实现炉内烟气温度分布求解。

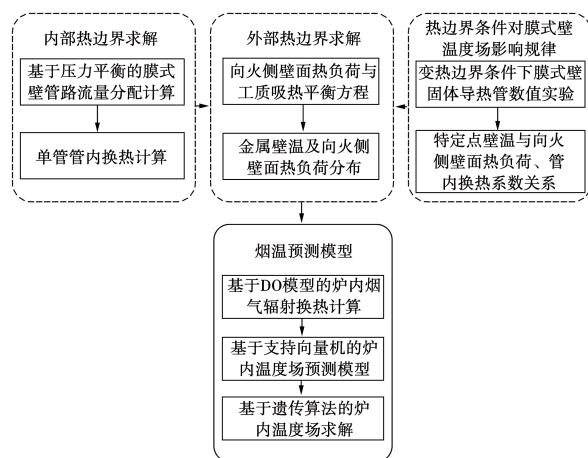


图 1 气冷壁壁温及炉内烟气温度预测模型求解流程图
Fig. 1 Solution diagram of prediction models of gas-cooled wall temperature and flue gas temperature distribution in the furnace

1.2 热边界条件对膜式壁温度场影响规律

现代电站锅炉炉膛广泛采用光管加扁钢焊接成的膜式壁结构,这种结构具有炉膛重量轻、气密性好等优点。

膜式壁几何结构如图 2 所示。 q 为膜式壁接受炉膛火焰辐射的向火面外壁热负荷, δ 为扁钢厚度, S 为管间节距。以示意图右侧管子为例,管子中心轴线通过点 O ,点 A 和 E 代表扁钢向火面,点 B 和 D 代表扁钢背火面,点 C 代表管子背火面外壁,点 F 和 G 分别代表管子向火面外壁和内壁。忽略管壁轴向导热,可以对膜式壁横截面进行二维稳态金属导热计算,向火侧为炉内壁面热负荷,背火侧由于敷设一定厚度保温材料近似为绝热条件,管内为 CO₂ 工质对流冷却,借鉴文献[11-12]研究方法,通过

有限元数值计算可以拟合出以管内流体平均温度 t_0 为基准的温差列表表达式(1)~(3),相关性达到0.99以上。

$$\Delta t_{CO} = t_C - t_0 = 4224q \alpha^{-1.232} \quad (1)$$

$$\Delta t_{FO} = t_F - t_0 = 82.92q \alpha^{-0.5642} \quad (2)$$

$$\Delta t_{GO} = t_G - t_0 = 496.3q \alpha^{-0.852} \quad (3)$$

式中: Δt_{CO} —管子背火面外壁与管内 CO₂ 温差, °C; Δt_{FO} —管子向火面外壁与管内 CO₂ 温差, °C; Δt_{GO} —管子向火面内壁与管内 CO₂ 温差, °C; t_0 —管内 CO₂ 温度, °C; t_C —管子背火面外壁温度, °C; t_F —管子向火面外壁温度, °C; t_G —管子向火面内壁温度, °C; q —向火面外壁热负荷, kW/m²; α —管子内 CO₂ 对流传热系数, W/(m²·K)。

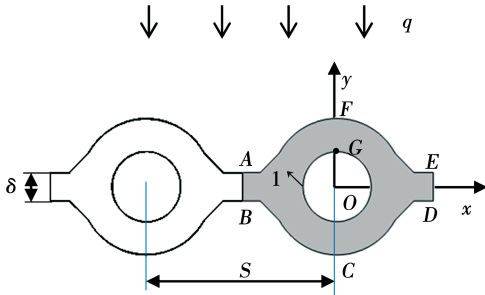


图2 膜式壁几何结构
Fig.2 Geometry of membrane wall

1.3 内部热边界条件求解

管内传热系数 α 可以通过下述方法求解:以炉膛气冷壁进出口集箱管接头上壁温测量值(认为等于工质温度^[13])的平均值作为管路内工质定性温度,结合炉膛气冷壁进出口工质参数信息可以实现流量分配的在线求解。

锅炉气冷壁并联管束,可以划分为并联在锅炉炉膛进出口的 m 个回路,每个回路中由 n 个管段串联而成,根据流量与压降关系及质量连续方程可得:

$$\begin{cases} \min | \sum_{i=1}^m G_i - G | \\ f(i) = |1 - \Delta p_i / \Delta p| < 0.02 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta p_i = \sum_{k=1}^n (\zeta_k + \lambda_k l_k / d_k) G_i^2 / (2 A_k^2 \rho_k) \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n; G$ —锅炉进入或流出总流量, kg/s; G_i —计算回路中流量, kg/s; Δp_i —回路流量与压降的函数关系, Pa; Δp —气冷

壁进出口压差, Pa; ζ_k, λ_k —管段局部阻力系数和沿程阻力系数; l_k, d_k —相应管段的长度和管径, m; ρ_k —管段内 CO₂ 密度, kg/m³。

由式(4)、(5)求解非线性规划可以得到流量分布,继而由下式得到单个回路的传热系数^[14]:

$$\alpha = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda}{d} \quad (6)$$

式中: λ —管内 CO₂ 导热系数, W/(m·K); d —管子内径, m; Re, Pr —工质流体相应的雷诺数和普朗特数。

1.4 外部热边界条件求解

图3为气冷壁管子管段划分示意图。膜式冷却壁向火侧受到炉膛火焰辐射,背火侧每隔一段距离焊接有壁温测点,测点测得的温度为 $t_{c,j}$,相应点的管内工质温度为 $t_{0,j}$ 。

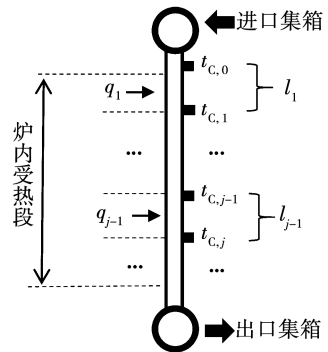


图3 气冷壁管段划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of the gas-cooled wall pipe section division

按照测点距离将受热管划分为多个管段,每个管段内热负荷 q_j 为常数。对于由集箱进入膜式壁回路第1段,忽略管子轴向导热及背火侧散热,根据工质换热平衡关系易得:

$$G_i c_p (t_{0,1} - t_{0,0}) = q_1 s l_1 \quad (7)$$

$$t_{0,1} = t_{c,1} - 4224 q_1 \alpha^{-1.232} \quad (8)$$

$t_{0,0}$ 为集箱出口处于未受热段,可认为等于 $t_{c,0}$,由(7)、(8)式联立:

$$q_1 = G_i c_p (t_{c,1} - t_{c,0}) / (s l_1 + 4224 G_i C_p \alpha^{-1.232}) \quad (9)$$

对于回路第2段($j \geq 2$) 及以后各管段仍有列关系:

$$G_i c_p (t_{0,j} - t_{0,j-1}) = q_j s l_j \quad (10)$$

$$t_{0,j} = t_{c,j} - 4224 q_j \alpha^{-1.232} \quad (11)$$

同理,可得:

$$q_j = G_i c_p (t_{c,j} - t_{c,j-1} + 4224 q_{j-1} \alpha^{-1.232}) \cdot (s l_j + 4224 G_i c_p \alpha^{-1.232})^{-1} \quad (12)$$

式中: c_p —超临界 CO_2 比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q_j —管段处热负荷, kW/m^2 ; s —鳍片管节距, m ; l_j —管段长度, m 。

1.5 基于 DO 模型和支持向量机求解炉内烟温

假设炉膛壁面为灰体壁面,壁面发射率 0.8,采用 DO 模型求解炉膛火焰与冷却壁面的传热过程:

$$G = \sum_{i=1}^N \omega_i I_i \quad (13)$$

$$S_i \cdot \nabla I_i = \kappa I_b(T) - \beta I_i +$$

$$\frac{\sigma_s}{4\pi} \sum_{j=1}^N \omega_j I_j \phi(S_j, S_i) \quad (14)$$

式中: G —投入辐射, W/m^2 ; κ —吸收系数, $1/\text{m}$; σ_s —散射系数, $1/\text{m}$, 取 0; S_i —第 i 个为离散坐标; $\phi(S_j, S_i)$ —散射角方程, 假设各向同性; I_i —第 i 个组分的辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; T —烟气的温度, K ; I_b —黑体辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$; ω_i —第 i 个积分权重。

沿炉膛高度选取多个需要求解烟气温度的位置,每个位置按照需要设置 1 组典型烟气温度值,根据选取位置与烟气温度典型值数量组合进行正交数值实验,可以获得温度场分布与炉膛壁面热负荷关系的换热数据库,并用于加法混合核函数^[15]支持向量机训练。图 4 为炉膛温度场求解流程图。使用遗传算法不断调整炉内烟气温度分布,使支持向量机预测模型输出的热负荷值与实测热负荷值接近时,可认为当前假设温度分布为实际温度场。

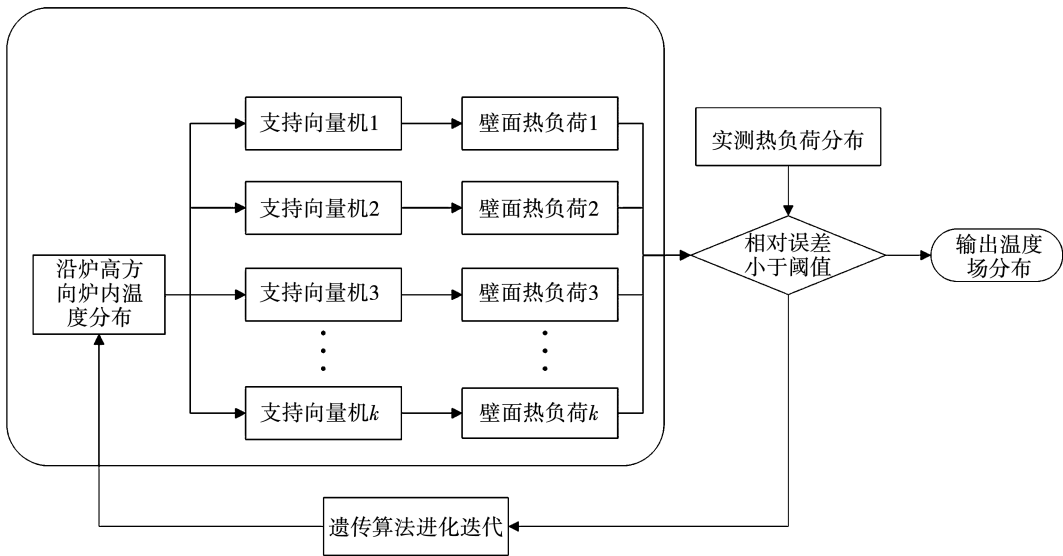


图 4 炉内烟气温度分布求解流程图

Fig. 4 Solution diagram of flue gas temperature distribution in the furnace

2 计算结果与实验分析验证

某超临界 CO_2 锅炉炉膛气冷壁详细结构如文献 [16] 所述,炉顶布置下冲燃烧器,工质从炉顶上集箱流入,由炉底下集箱流出。在每面墙背火侧中部自炉膛顶棚标高处向下每隔 0.5 ~ 1 m 布置一处壁温测点,用于监测气冷壁沿高度方向换热情况。同时为监测管内换热前后工质温度偏差,在进口集箱管接头每隔 10 根管布置 1 只测点,出口集箱管接头

每隔 1 根管布置测点。布置示意如图 5 所示(集箱管接头测点未示出)。

测试过程中燃气量 $953 \text{ m}^3/\text{h}$ (43% 设计燃气量),气冷壁工质流量 258 t/h ,进口压力 13.56 MPa ,进口温度 $350 \text{ }^\circ\text{C}$,出口温度 $396 \text{ }^\circ\text{C}$,出口压力 13.23 MPa 。炉膛出口烟温均值 $760 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 6 为气冷壁热负荷计算结果。从图中可以看出,4 条热负荷曲线走向趋势一致,但仍存在差异。右墙最高热负荷为 $165 \text{ kW}/\text{m}^2$,右墙高热负荷区几

乎达到了左墙热负荷的 1.5 倍。前后墙热负荷偏差仅体现在标高 10~12 m 处,前墙热负荷存在突升现象,最高值为 167 kW/m²。这些热负荷值能够反映燃烧侧客观存在的偏差。

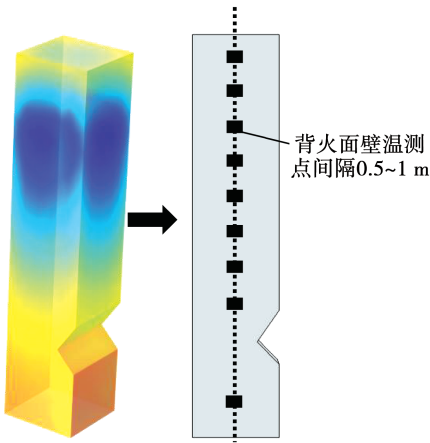


图5 壁温测点布置

Fig.5 Arrangement of the wall temperature sensor

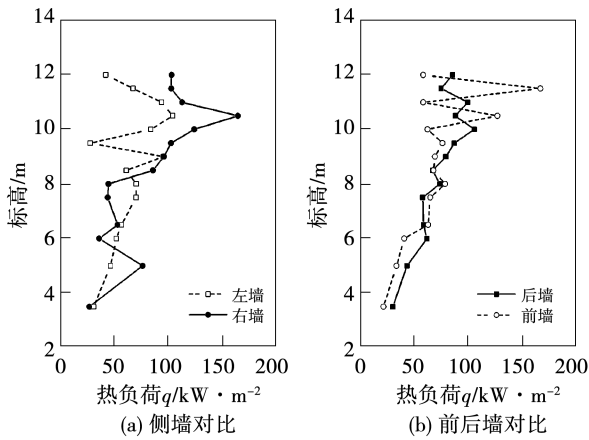


图6 气冷壁热负荷分布

Fig.6 Thermal load distribution of the gas-cooled walls

图7为右墙和前墙气冷壁壁温。由于前墙和右墙热负荷偏大,其壁温计算值能够代表气冷壁整体安全性情况。背火面温度为 t_c 测点实测值,工质温度 t_0 、向火侧外壁温 t_F 和向火侧内壁温 t_G 为计算值。由于气冷壁内工质自炉顶向下流动,表示 t_0 呈现出沿着工质流动方向逐渐升高。与图6对照可以看出, t_F, t_G 能够显著反映热负荷影响,在热负荷突升处均呈现较大温升, t_c 与 t_F 差值最高达到约 100 °C。按照锅炉水动力相关标准,膜式壁管子强度校核温度应为 t_F 和 t_G 平均值,该值能够真实反映膜式壁强度裕量情况,当前 43% 额定负荷下向火面

外壁温度 t_G 均小于 500 °C,材料强度裕量很大。

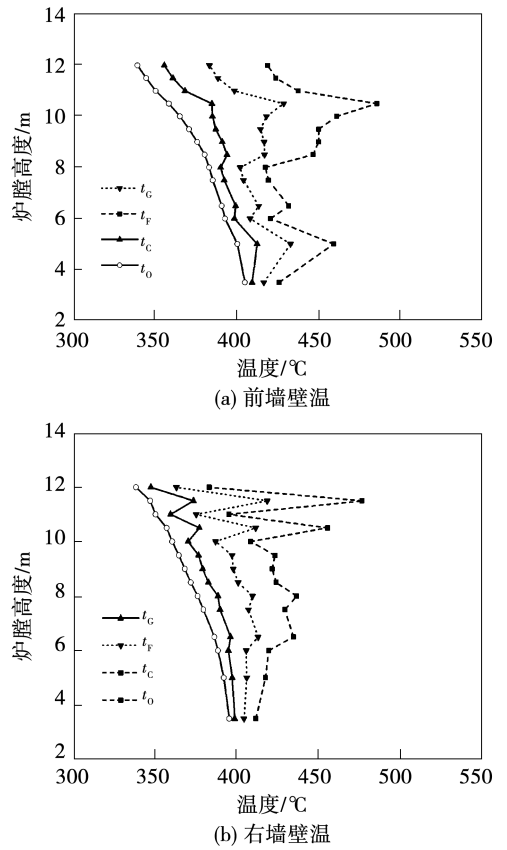


图7 前墙和右墙气冷壁壁温

Fig.7 Wall temperatures of the front and right gas-cooled walls

根据气冷壁结构特点,选取了气冷壁标高为 5, 7.5, 9.5, 10.5 和 11.5 m 这 5 个位置的烟气温度(分别为 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)为待求解烟气温度。 $t_1 \sim t_5$ 均选取 5 个烟气温度典型值进行训练。根据每个位置的烟气温度典型值数量和烟气温度位置选取数量运用正交试验表形成 16 个工况的实验表,并据此运用 DO 模型计算相应的热负荷(分别为 q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)。实验结果组成了(部分)换热数据库(表 1)。

将数据库的 70% 数据用于支持向量机预测训练,另外 30% 用于支持向量机预测的校验,建立 5 个不同的支持向量机分别对 5 个位置热负荷进行预测,模型采用加法混合核函数^[15],模型的预测精度如图 8 所示。横坐标为求解点标高位置,纵坐标为预测的热负荷 q_{cal} 与换热数据库原始热负荷 q_{origin} 比值,所有求解最大相对误差为 8.8%。

表1 换热数据库

Tab. 1 Database of heat transfer

工况	烟气温度/°C					热负荷/W·m ⁻²				
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
1	900	1000	1000	1000	800	41818	56445	61008	58792	30121
2	900	1200	1200	1200	1000	46021	89851	105375	104416	62561
3	900	1400	1400	1400	1200	53625	133682	163939	165399	109783
4	1100	1000	1200	1400	1400	81064	79560	113163	162052	171222
5	1100	1200	1000	1600	1200	78077	96654	96371	195663	110402
6	1100	1400	1600	1000	1000	85363	152166	187939	87769	63313
7	1300	1000	1400	1600	1000	135604	105874	165589	208533	68515
8	1300	1200	1600	1400	800	134295	140525	204707	163660	36317

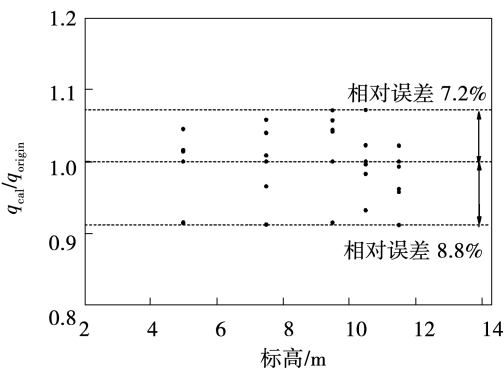


图8 预测数据与数据库中热负荷数据对比

Fig. 8 Comparison between the predicted thermal load and data from the database

使用烟温预测模型对数据库所有 16 组数据共计 80 个烟温数值进行了求解,基本遗传算法群体规模为 100,代数 100,交叉概率 0.8,变异概率 0.05。模型的求解精度如图 9 所示,横坐标为求解点空间位置,纵坐标为求解的烟气温度 t_{cal} 与换热数据库原始烟气温度 t_{ori} 比值,所有求解最大相对误差为 8.5%,求解烟气温度的精度与支持向量机预测的精度相当,证明了求解方法的可行性。

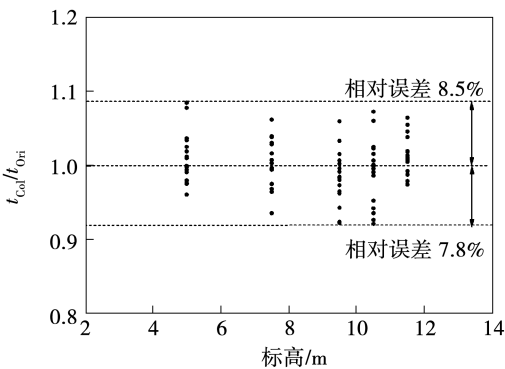


图9 求解数据与数据库中烟气温度数据对比

Fig. 9 Comparison between the calculated flue gas temperature and data from the database

从图 7 中选取 5 个规定位置的壁面热负荷值并按照标高算术平均后,使用烟气温度预测模型求解炉膛内部烟温,求解结果如图 10 所示。求解烟气温度分布大体与常规炉膛内烟温曲线相似,呈驼峰形状,炉内最高温度 1 210 °C,预测曲线的延长线基本可以与炉膛出口烟温 760 °C 吻合,为本文方法的有效性提供了进一步支持。

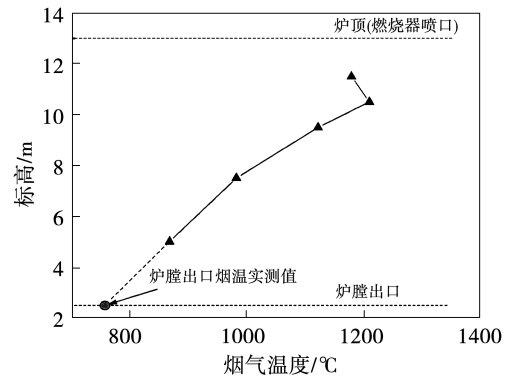


图10 炉内烟气温度预测值

Fig. 10 Predicted flue gas temperature in the furnace

3 结论

基于烟气侧、工质侧及气冷壁结构构建相互关联的流动换热模型,运用超临界 CO₂ 锅炉运行监测数据对炉膛气冷壁内烟气温度、气冷壁壁面热负荷及壁温情况进行了研究,结果表明:

(1) 管壁特定点温度与工质温度温差,与工质温度无关,与热负荷成线性相关、与管内对流换热系数成指数关系,拟合公式能够准确反映管壁特定点之间温差关系,相关性在 0.99 以上。

(2) 利用气冷壁传热计算耦合壁面内外热边界关系实现对超临界 CO₂ 锅炉气冷壁外壁传热边界求解。得到的炉膛最高热负荷为 167 kW/m²,热负荷

曲线能够反映出实际燃烧影响,气冷壁壁温跟随热负荷变化波动。

(3) 支持向量机对传热数据库中全部热负荷数据预测最大相对误差 8.8%,烟温预测模型对换热数据库温度求解验证最大相对误差 8.5%。根据炉内热负荷值求解的炉膛温度曲线符合常规炉膛内烟温曲线形状预期,炉内最高温度 1 210 ℃。

(4) 该算法基于锅炉运行实时监测的 CO₂ 温度、压力及受热面壁温数据,可以实现炉内烟气温度分布、气冷壁热负荷、壁温等物理量的在线求解。

参考文献:

- [1] 徐进良,刘超,孙恩惠,等.超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J].热力发电,2020,49(10):1-10.
XU Jin-liang, LIU Chao, SUN En-hui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10.
- [2] 黄彦平,王俊峰.超临界二氧化碳在核反应堆系统中的应用[J].核动力工程,2012,33(3):21-27.
HUANG Yan-ping, WANG Jun-feng. Applications of supercritical carbon dioxide in nuclear reactor system[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(3): 21-27.
- [3] CHEANG V T, HEDDERWICK R A, MCGREGOR C. Benchmarking supercritical carbon dioxide cycles against steam Rankine cycles for concentrated solar power[J]. Solar Energy, 2015, 113: 199-211.
- [4] 张一帆,王生鹏,刘文娟,等.超临界二氧化碳压缩再热火力发电系统关键参数的研究[J].动力工程学报,2016,36(10):827-833.
ZHANG Yi-fan, WANG Sheng-peng, LIU Wen-juan, et al. Study on key parameters of a supercritical fossil-fired power system with CO₂ recompression and reheat cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [5] YANG Yu, BAI Wen-gang, WANG Yue-ming, et al. Coupled simulation of the combustion and fluid heating of a 300 MW supercritical CO₂ boiler [J]. Applied Thermal Energy, 2017, 113: 259-267.
- [6] XU Jin-liang, SUN En-hui, LI Ming-jia, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant[J]. Energy, 2018, 157: 227-246.
- [7] 胡涵,孙恩慧,刘超,等.超临界二氧化碳分流模式锅炉冷却壁的概念设计[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6656-6665.
HU Han, SUN En-hui, LIU Chao, et al. Conceptual design of supercritical CO₂ coal fired boiler cooling wall in split-flow mode [J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(22): 6656-6665.
- [8] 张一帆,王安,白文刚,等.300 MW 超临界二氧化碳锅炉气动力特性及壁温分布[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1700-1706.
ZHANG Yi-fan, WANG An, BAI Wen-gang, et al. Thermal fluid dynamic characteristics and wall temperature distribution of a 300 MW supercritical CO₂ boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1700-1706.
- [9] 杨丹蕾,唐桂华,范元鸿,等.引入烟气再循环的超临界二氧化碳燃煤锅炉炉冷却壁布置及壁温特性分析[J].热力发电,2020,49(10):144-150.
YANG Dan-lei, TANG Gui-hua, FAN Yuan-hong, et al. Cooling wall arrangement and wall temperature characteristic analysis for supercritical carbon dioxide coal-fired boiler with flue gas recirculation [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 144-150.
- [10] 陈有福,徐颂梅,管诗骅,等.炉膛火焰中心位置与下水冷壁出口壁温关系研究[J].热力发电,2018,47(6):71-77.
CHEN You-fu, XU Song-mei, GUAN Shi-pian, et al. Study on the relationship between the central position of furnace flame and the temperature of water wall outlet [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 71-77.
- [11] 张志正,孙保民,郭永红,等.超(超)临界压力锅炉膜式水冷壁危险点壁温在线监测方法研究[J].中国电机工程学报,2005,25(3):130-134.
ZHANG Zhi-zheng, SUN Bao-min, GUO Yong-hong, et al. Research on on-line temperature monitoring of severe point on membrane water wall of ultra-supercritical boiler [J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(3): 130-134.
- [12] 张志正,孙保民,徐鸿,等.膜式水冷壁特定点温度相关性的研究[J].动力工程学报,2005,25(6):53-56,60.
ZHANG Zhi-zheng, SUN Bao-min, XU Hong, et al. Temperature correlation of key points of membrane water walls [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2005, 25(6): 53-56, 60.
- [13] 王孟浩,王衡,郑民牛.超(超)临界锅炉炉外壁温测点的测量误差[J].中国电力,2009(2):49-52.
WANG Meng-hao, WANG Heng, ZHENG Min-niu. Measuring errors of external wall temperature for supercritical and ultra-supercritical boilers [J]. Electric Power, 2009(2): 49-52.
- [14] 朱兵国,张海松,孙恩慧,等.超高参数 CO₂ 在垂直管中的传热分析[J].化工进展,2019,38(11):4880-4889.
ZHU Bing-guo, ZHANG Hai-song, SUN En-hui, et al. Heat transfer analysis of ultra high parameter CO₂ in vertical pipe [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(11): 4880-4889.
- [15] 苏宏亮,阎维平,高正阳,等.350 MW 机组 W 火焰锅炉燃烧优化试验与性能预测[J].热力发电,2014,43(3):30-36.
SU Hong-liang, YAN Wei-ping, GAO Zheng-yang, et al. Combustion optimization test and performance prediction for a 350 MW unit W-flame boiler [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(3): 30-36.
- [16] 黄莺,苏宏亮,郑麒麟,等.5 MW 超临界二氧化碳试验锅炉气动力特性研究[J].热力发电,2020,49(12):36-40.
HUANG Ying, SU Hong-liang, ZHENG Qi-lin, et al. Aerodynamic characteristics research on a 5 MW supercritical carbon dioxide test boiler [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 36-40.