

辐射废锅内辐射屏水冷管热变形数值模拟研究

张国钰, 许建良, 龚 岩, 郭庆华, 于广锁

(华东理工大学 洁净煤技术研究所, 上海 200237)

摘要:煤气化技术是煤炭清洁高效利用的有效途径, 其中带辐射废锅的气流床气化工艺能够有效回收高温合成气显热, 提高能源利用率。辐射废锅内部增设辐射屏水冷管, 可在保持辐射废锅水冷壁整体结构紧凑的同时提高传热面积。为研究气化炉操作条件下辐射废锅内辐射屏水冷管的热变形, 利用流体-结构耦合原理建立三维辐射屏模型进行模拟分析。模拟结果表明: 在正常操作工况下, 水冷管整体在距顶部 5.30 m 处温度达到最大值。在周向方向上, 最靠近炉膛中心的 1 号水冷管表面温度成抛物线形分布, 向火侧中间位置温度最高, 向火侧和背侧最大温差达到 60 K; 在相邻水冷管的冷却作用下, 2~5 号水冷管表面温度成双峰状分布。水冷管的空间布置直接影响水冷管表面的温度分布。未加固定的辐射屏水冷管中最靠近炉膛中心的 1 号水冷管局部变形量最大为 5.20 cm, π 方向的最大偏移量为 4.58 cm, 超过相邻水冷管的间距, 水冷管之间易发生碰撞。水冷管间增加固定后, 水冷管发生整体变形, 最大热变形量为 3.28 cm, 较未加固定的减小 36.9%, π 方向的相对偏移基本消失, 水冷管之间的局部变形远小于管间距。增加固定可有效避免水冷管之间的碰撞。进口合成气温度和表面沉积的变化不同程度影响水冷管表面温度梯度和变形量, 偏移方向均为水冷管的 $\pi/2$ 侧。

关键词:辐射废锅; 水冷管; 热变形; 数值模拟

中图分类号: TQ546 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)06-2896-09

Numerical simulation on thermal deformation of water-cooling pipe for radiation screen in radiant syngas cooler

ZHANG Guoyu, XU Jianliang, GONG Yan, GUO Qinghua, YU Guangsuo

(Institute of Clean Coal Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Coal gasification technology is an effective way to the clean and efficient utilization of coal, the entrained-flow gasification process with radiant syngas cooler (RSC) can effectively recover the sensible heat from high temperature syngas and improve energy utilization rate. The radiation screen adopted inside the RSC is not only keeping the overall structure compact, but improving the heat transfer area greatly. In order to study the thermal deformation of the radiation screen in the RSC under gasification operating conditions, a three-dimensional radiation screen model is established by using the fluid-structure coupling principle to simulation analysis. The simulation results show that under normal operating conditions, the temperature of the whole water-cooling pipe reaches the maximum value at 5.30 m from the top. In the circumferential direction, the surface temperature of the pipe 1 closest to the center of the RSC is parabola distribution. Temperat-

收稿日期: 2023-02-02 修回日期: 2023-04-04 责任编辑: 王 凡 DOI: [10.13225/j.cnki.jccs.2023.0112](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0112)

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大资助项目(2019BCH01001)

作者简介: 张国钰(2000—), 男, 河南安阳人, 博士研究生。E-mail: gyzhang@mail.ecust.edu.cn

通讯作者: 郭庆华(1981—), 男, 河北邢台人, 教授, 博士生导师。E-mail: gqh@ecust.edu.cn

引用格式: 张国钰, 许建良, 龚岩, 等. 辐射废锅内辐射屏水冷管热变形数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6):

2896-2904.

ZHANG Guoyu, XU Jianliang, GONG Yan, et al. Numerical simulation on thermal deformation of water-cooling pipe for radiation screen in radiant syngas cooler[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2896-2904.



移动阅读

ure in the middle of the fire-facing side is the highest, and the maximum temperature difference between the fire-facing side and its back side reaches 60 K. Due to the cooling action of adjacent water-cooling pipe, the surface temperature of pipe 2–5 becomes bimodal distribution. The spatial arrangement has direct effect on the surface temperature distribution of water-cooling pipe. The local deformation of pipe 1 closest to the center of the RSC in water-cooling pipe without fixed is the largest, which is 5.20 cm. Maximum offset in π direction is 4.58 cm, far exceeding the pitch of water-cooling pipes, and the collision between water-cooling pipes is prone to occur. The overall deformation arises after water-cooling pipe is fixed. Maximum thermal deformation of water-cooling pipe with fixed is 3.28 cm, which is 36.9% lower than that of water-cooling pipe without fixed. The relative shift in the π direction basically disappears. Local deformation between the water-cooling pipe is smaller than the distance between the pipes. The occurrence of collision between water-cooling pipes is disappeared for the fixed action of the fixture. The changes of inlet syngas temperature and surface deposition affect the surface temperature gradient and deformation of water-cooling pipe with varying degrees, the offset direction is $\pi/2$ side of the water-cooling pipe.

Key words: radiant syngas cooler; water-cooling pipe; thermal deformation; numerical simulation

气流床煤气化技术以其煤种适应性广、气化效率和碳转化率高等优点成为当前广泛应用的煤气化技术^[1-2]。原料煤在气流床气化炉内经过一系列的化学反应生成以 CO 和 H₂ 为主的高温合成气,合成气温度在 1 500 K 以上^[3],显热量高,对这部分热量进行回收可以有效提高煤气化装置的整体效率。根据合成气冷却方式的不同可以将气流床气化流程分为激冷流程、废锅流程和废锅-激冷流程^[4],激冷流程设备简单,合成气降温速度快、水气比高,多用于合成气全变换的煤制氢、合成氨等化工生产过程^[5];废锅流程包括辐射废锅和对流废锅,能源转化效率高,可以生产高压蒸汽,多用于 IGCC 等项目^[6-8];废锅-激冷流程综合了对合成气冷却和下游部分变换水气比的要求,适用于煤制甲醇等化工过程。

辐射废锅作为气流床气化流程中重要的热回收设备,国内外学者对辐射废锅内的传热、流动和结构特征进行研究。UEBLE 等^[9]从热力学性能和工业技术方面对不同配置的合成气冷却流程设计进行比较,认为气化炉-辐射废锅-激冷室的耦合一体化设计具有更高的能源转化率。王蕾等^[10]考察不同长度的鳍片和布置方式对辐射废锅内温度分布和流场分布的影响,发现交错布置的鳍片能够提高辐射废锅的整体换热量。QIU 等^[11]建立辐射废锅顶部上锥膜壁模型,解释造成膜壁中鳍片温度分布不均的原因,分析膜壁的热变形现象。LI 等^[12]探讨不同膜壁布置的辐射废锅内的温度场、速度场和颗粒分布特性。WANG 等^[13]模拟研究辐射废锅内均相反应对辐射废锅内合成气组成和分布的影响。

辐射屏的设置能够大大增加辐射废锅内的传热面积,但为了简化计算在文献中常常忽略辐射屏的实际结构^[14-17],关于辐射屏水冷管的温度分布和变形量

的研究内容极少。笔者基于工业实际建立辐射废锅内辐射屏的三维模型,采用流固耦合的方法探究辐射屏水冷管表面的温度分布和热变形现象,并对加连接的水冷管温度和热变形进行分析,为气流床辐射废锅的工业设计优化提供依据。

1 模型

1.1 物理模型

图 1 为带辐射屏的辐射废锅的三维结构模型。辐射废锅与气化炉的连接入口处直径 800 mm,出口直径 1 200 mm,辐射废锅主体直径 3 160 mm,辐射屏长度 20 400 mm。每组辐射屏由 5 根水冷管组成,在水冷管顶部与锻板连接,水冷管节距 70 mm。辐射废锅内均匀布置 16 组对称的辐射屏,辐射屏内冷却水与合成气流动方向成逆流布置,冷却水入口处辐射废锅内的径向和周向温度分布均匀且十分接近,此外,水冷管入口段的弯曲长度远小于直段长度。基于辐射废锅结构的对称性建立了 1/16 的辐射废锅模型,并将水冷管入口处的直角结构简化为直段。

1.2 数学模型

1.2.1 流动模型

气化炉内的合成气携带熔融的飞灰颗粒以高速进入辐射废锅内,最大速度在 9 m/s 以上,合成气以湍流受限射流的形式在辐射废锅内流动^[18]。NI 等^[17]通过对多种湍流模型的研究表明 Realizable k - ε 模型在辐射废锅内的流场预测效果与实验能够较好的吻合,因此,笔者采用 Realizable k - ε 模型计算辐射废锅内流动,该模型的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

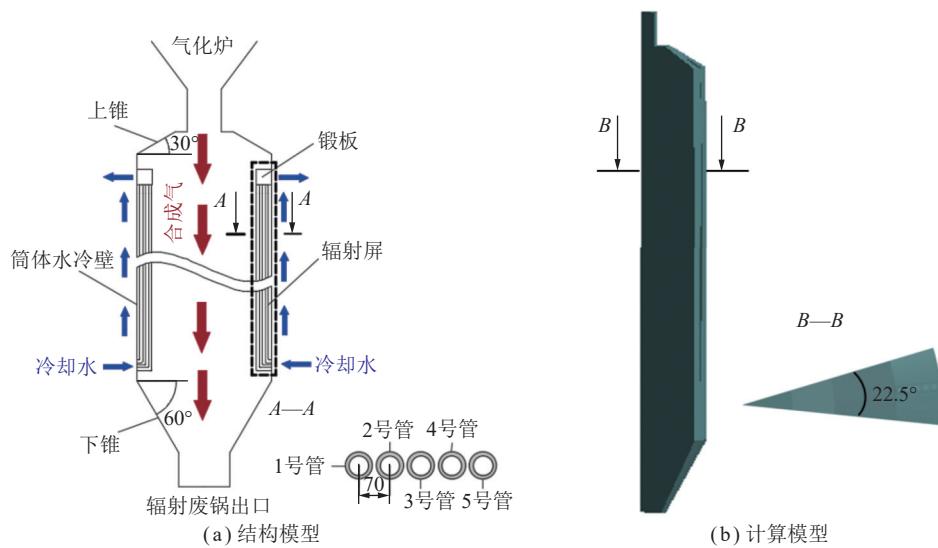


图1 辐射废锅的三维结构模型和计算模型

Fig.1 Three dimensional structure model and computational model of the radiant syngas cooler

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中, ρ 为气相密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; k 为湍流动能, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; μ 为黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_τ 为湍流涡黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; x_i 和 x_j 为坐标分量; u_i 和 u_j 为平均相对速度分量, m/s ; ν 为运动黏度, m^2/s ; G_b 为平均速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^2 ; G_b 为由于浮力产生的湍流动能, m^2/s^2 ; Y_M 为可压缩湍流中的脉动膨胀对总耗散率的影响, m^2/s^2 ; $C_{3\varepsilon}$ 为浮力的影响; S_ε 和 S_ε 为自定义源项; σ_k 、 σ_ε 为湍流动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数; C_1 为湍流模型的系数; 湍流模型的标准常数为 $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_2=1.90$, $\sigma_k=1.00$, $\sigma_\varepsilon=1.20$ 。

气相流动的连续性方程和动量方程通过时间平均的形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中, \bar{u} 为脉动速度, m/s ; \bar{p} 为平均压力, Pa ; σ_{ij} 为分子黏度引起的应力张量, Pa ; τ_{ij} 为亚网格尺度应力, Pa 。

1.2.2 传热模型

图2为水冷管的传热模型(T 为对应位置计算得到的温度)。在辐射废锅内, 高温合成气与冷却水之间

的传热形式以辐射为主, 但合成气与壁面间的热对流和内部的热传导过程不可忽略。高温合成气中的热量经过热辐射、热对流和热传导的形式进入冷却管内, 合成气温度下降, 同时冷却水吸收热量后产生高品质的蒸汽。整体的传热关系式可以表示为

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} \quad (5)$$

其中, Q_{total} 为总传热量, W ; Q_{cond} 为热传导传递的热量, W ; Q_{conv} 为热对流传递的热量, W ; Q_{rad} 为热辐射传递的热量, W 。颗粒对壁面换热的影响较小, 因此在模拟过程中将辐射废锅内的多相流动简化为单相流动。辐射废锅内复杂的辐射过程采用P-1模型计算^[19], 辐射特性参数通过灰气体加权和模型(Weighed-Sum-of-Gray-Gases Model, WSGGM)模型求解^[20]。

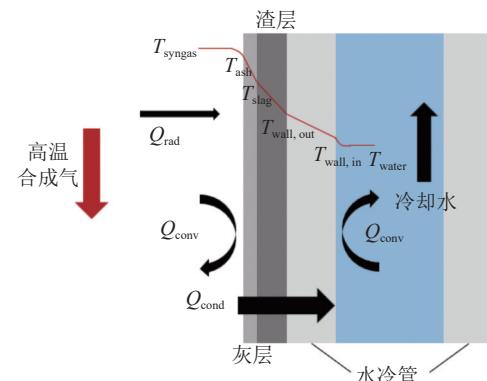


图2 水冷管传热模型

Fig.2 Heat transfer model of water-cooling pipe

1.2.3 等效应力模型

基于三向应力状态分析和形状改变能密度理论,

材料的等效应力 (von-Mises 应力) σ_e 可表示为

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为三对相互垂直平面对应的主应力, Pa。

等效应变 ε_e 可由式 (7) 进行计算

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1 + \nu} \left[\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

式中, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为 3 个主应力相应的线应变; ν 为有效泊松比, 即材料参考温度下计算的弹性应变和热应变之比。

2 边界条件与网格独立性检验

2.1 边界条件

工业辐射废锅的运行参数见表 1。假设辐射废锅处于稳定运行状态, 进口合成气温度和流量及操作压力不随时间变化。固态灰和渣的物性参数随温度变化较小, 且笔者主要研究水冷管在操作条件下的变形, 对灰渣颗粒的性质不作深入讨论。为了简化计算, 将灰和渣的物理性质的参数设置为常数^[2], 见表 2。辐射废锅内水冷管材质选用高、中压锅炉常用管道材

表 1 工业辐射废锅运行参数

Table 1 Operation parameters of industrial radiant syngas cooler

参数	数值
进口合成气温度/K	1 573
操作压力/MPa	6.5
进口流量/(kg · h ⁻¹)	171 916
冷却水温度/K	588
冷却水流量/(kg · h ⁻¹)	558 145
CO ₂ 占合成气的摩尔分数/%	13.84
H ₂ O占合成气的摩尔分数/%	20.38
H ₂ 占合成气的摩尔分数/%	28.50
CO占合成气的摩尔分数/%	37.28

表 2 灰和渣的物性参数

Table 2 Physical parameters of ash and slag

样品	密度 / (kg · m ⁻³)	比热 / (kJ · (kg · K) ⁻¹)	热传导系数 / (W · (m · K) ⁻¹)
灰	1 060	0.92	0.25
渣	2 500	1.45	1.87

质 15CrMo, 其物性参数可参考文献[11]的相关数据。

利用 Fluent 软件对辐射废锅内的流动和传热过程进行模拟计算, 将模拟得到的水冷管表面温度作为 ANSYS workbench 中 static structure 模块的初始热载荷条件进行热变形计算, 实现流动、传热和结构的耦合分析。辐射废锅模型入口和出口分别设置为质量流量入口和压力出口; 忽略辐射废锅筒体的水冷管结构, 将壁面设置为无滑移边界; 利用 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合求解; 压力、动量、湍动能、涡耗散率的离散均采用二阶迎风格式。

2.2 网格无关性检验

为了考察不同网格数对模拟结果的影响, 建立四种不同网格数的辐射废锅模型, 在其他条件相同的情况下对模型的网格独立性进行检验。图 3 给出不同网格数下辐射废锅内中心轴线上的温度分布, 当网格数大于 455 672 时, 模拟结果与网格数量的增加无关, 因此为了保持模型精度, 同时考虑计算量, 选取网格数为 455 672 的辐射废锅模型进行模拟计算。辐射废锅的局部网格划分如图 4 所示。

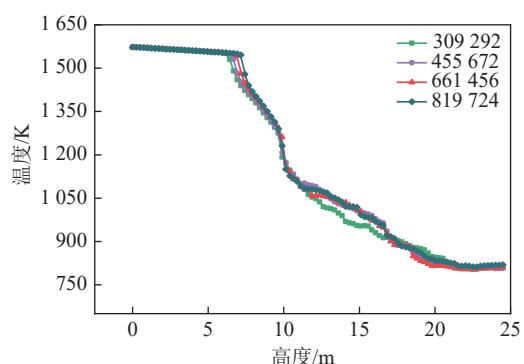


图 3 辐射废锅中心轴线上的合成气温度分布

Fig.3 Syngas temperature distribution on the central axis of radiant syngas cooler

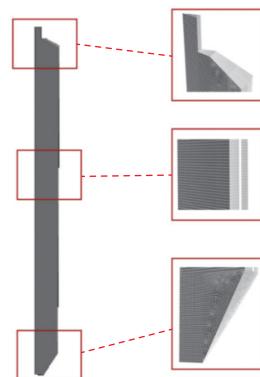


图 4 辐射废锅网格划分

Fig.4 Grid configuration of the radiant syngas cooler

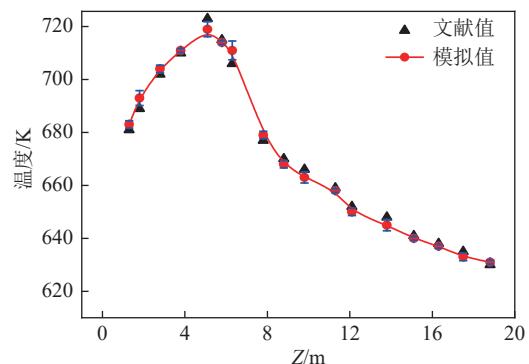
3 结果与讨论

3.1 模型验证

由于辐射废锅内运行条件复杂,其内部的温度分布等相关数据难以直接在工业运行中测量得到,且不同辐射废锅运行参数和尺寸结构不同,相关物理量相差很大。因此,主要通过将模拟结果与文献结果进行对比。QIU 等^[22]给出了光滑水冷管沿轴向方向上的表面温度分布,图 5 为模拟的温度结果与文献值的比较,可以看出模拟结果与文献值吻合良好。

3.2 辐射屏水冷管的温度和热变形分析

图 6 为未加固定的水冷管表面温度分布。在轴向方向上,各个水冷管表面温度均呈现先增大后减小的趋势,最大温度出现在 $Z=5.3$ m 左右的位置。在径向方向上,1~5 号水冷管表面温度逐渐降低,在 5.3 m 处最大温度差值在 80 K 左右,这是由于 1 号管最接



注: 文献工况为进口温度 1613 K, 进口流量 178 870 kg/h。

图 5 水冷管表面温度模拟结果与文献值^[22]比较

Fig.5 Comparison between simulated value and literature value^[22] of water-cooling pipe surface temperature

近炉膛中心处,承受的温度最高,接收的热辐射量最大。

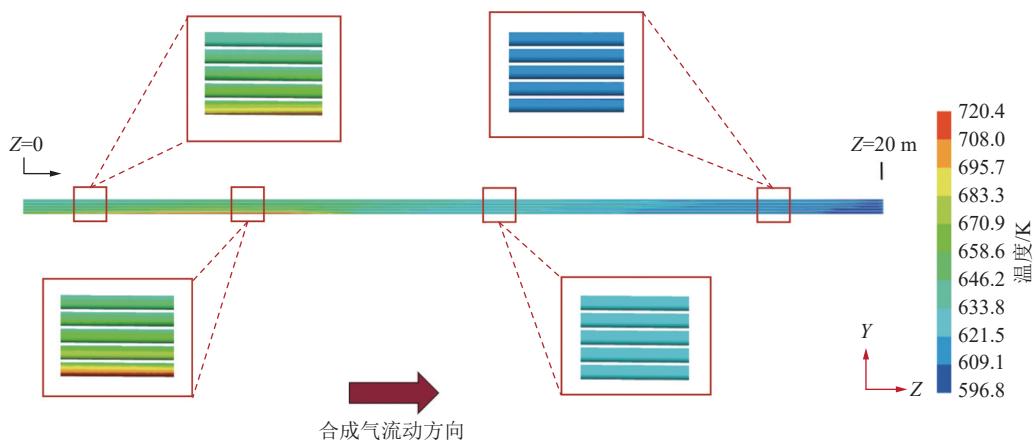


图 6 水冷管表面温度分布

Fig.6 Temperature distribution on the surface of water-cooling pipe

图 7 为不同位置处水冷管表面周向的温度分布。

1 号管表面的温度分布呈抛物线形分布,在 0° 即向火侧中间的位置温度最高。1 号管在 5.3 m 处的最高温度与最低温度相差 60 K, 主要原因是 1 号管的 0° 位置最靠近炉膛处, 温度最高; 此外, 在 1 号管的 $-\pi/2 \sim 0 \sim \pi/2$ 间, 越靠近 π 处的位置, 受到 2 号管冷却作用的影响越大。2~5 号管表面温度分布相似, 整体呈双峰分布, 最高温度位于 $-\pi/2$ 和 $\pi/2$ 的位置。由于水冷管空间位置的影响, 2 号管受到相邻水冷管的冷却作用, 在 0° 和 π 处温度都相对较低。

8.5 m 和 11.5 m 处的温度分布较 2.5 m 和 5.3 m 温度分布有所不同, 主要体现在 2~5 号管的温度分布上。2~5 号管的最高温度与 1 号管的最高温度基本相同, 在无其他冷却条件下水冷管表面温度基本一致, 辐射废锅内径向的温度梯度很小, 温度分布比较

均匀, 这也与文献报道相吻合^[22]。

基于流固耦合原理, 将模拟得到的水冷管表面温度分布作为初始条件分析水冷管热变形, 同时根据工业实际将水冷管两端作为固定端, 可以得到如图 8 所示的水冷管热变形结果。水冷管在热应力和外加约束的作用下, 发生最大形变的位置出现在整个水冷管的中部, 其中以 1 号管形变量最大, 最大总形变为 5.20 cm。5 根水冷管在高温作用下主要向辐射废锅周向一侧 (水冷管的 $\pi/2$ 处) 进行偏移, 但 1 号管除了有周向一侧的偏移外, 还有向辐射废锅外侧 (π 处) 偏移的趋势, 最大偏移量为 4.58 cm, 远大于各个水冷管之间的间距 (1.30 cm)。若水冷管发生较大变形, 一方面会导致辐射屏附近的温度场发生变化, 水冷管局部温度可能升高; 另一方面还可能会引起水冷管之间的碰撞, 影响长周期使用。

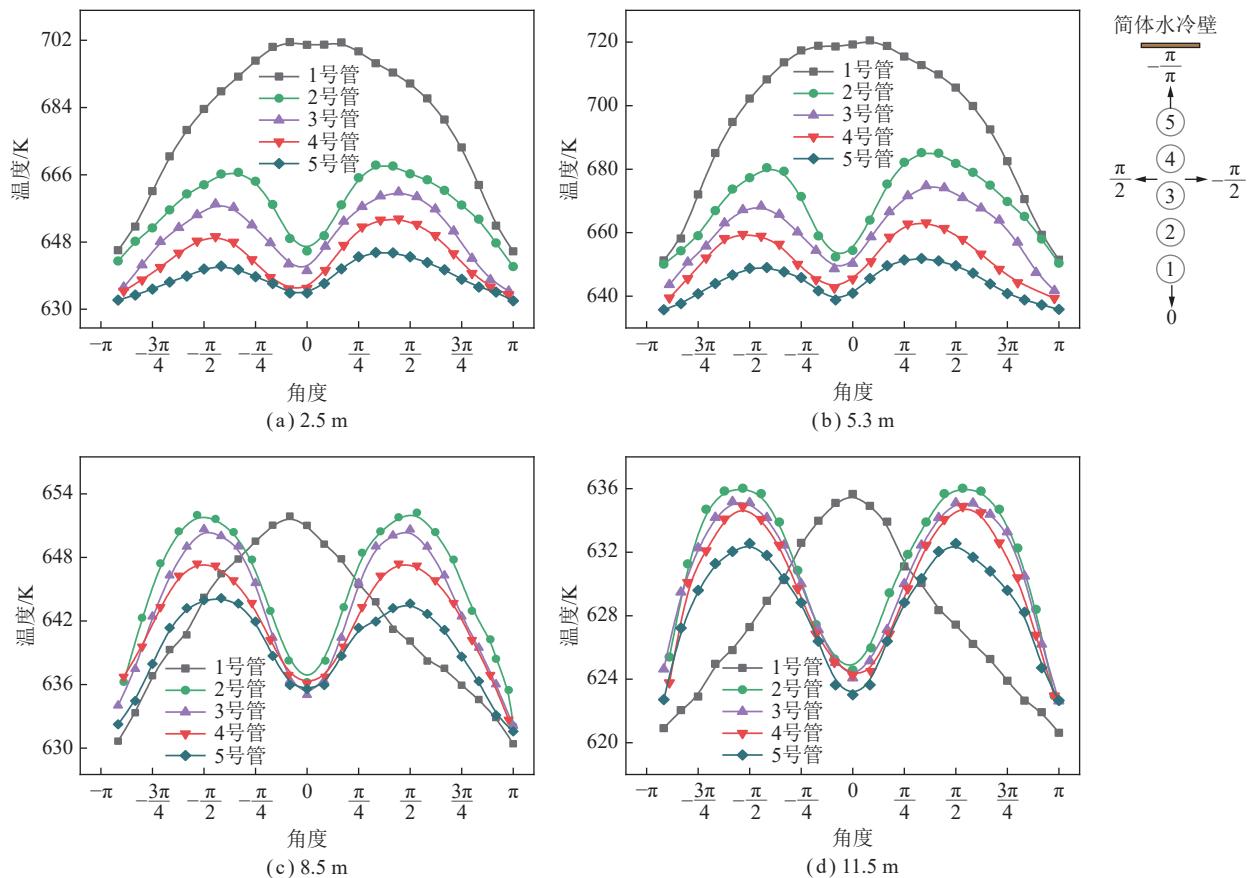


图7 不同位置处水冷管表面周向温度分布

Fig.7 Circumferential temperature distribution of water-cooling pipe at different positions

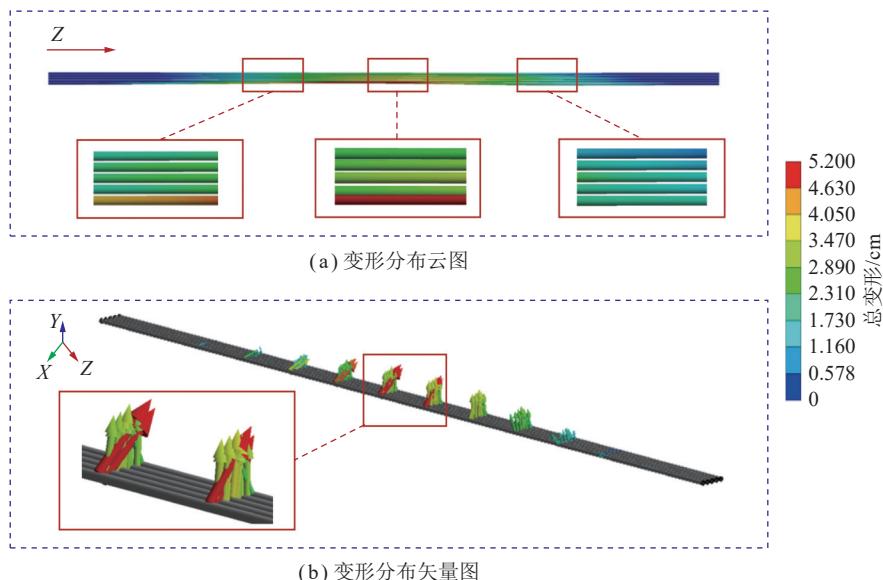


图8 水冷管热变形分析

Fig.8 Thermal deformation analysis of water-cooling pipe

3.3 带固定的水冷管模型的热变形分析

在水冷管之间增加固定以防止水冷管变形过大。结合工业实际,在距离辐射屏水冷管顶部4、8、12和16 m位置处加入固定物,图9为带固定的水冷管模型,

固定物长度10 cm,最大宽度2 cm,所用材质与水冷管材质相同。图10为增加固定后水冷管的热变形模拟结果,最大形变位置仍然出现在中部,整体最大形变量为3.28 cm,较不加固定的水冷管最大形变量减

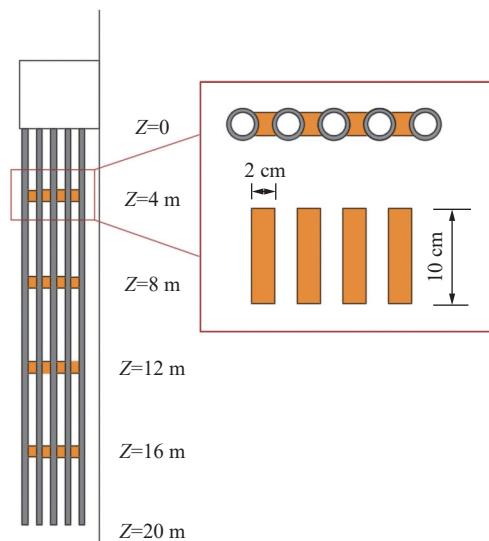


图 9 带固定的水冷管模型

Fig.9 Model of water-cooling pipe with fixed

少了 36.9%。从图 10(b) 局部放大图可以看出, 虽然最大变形量仍大于水冷管间距, 但由于固定物的固定作用, 最大形变并非仅出现在 1 号管上, 而是呈现整体小幅变形, 整体变形主要在水冷管的 $\pi/2$ 方向上, 1 号管向 π 方向的变形现象基本消失。固定物的设置约束了水冷管之间发生相对位移。

3.4 入口温度的影响

图 11 为不同入口温度对带固定的水冷管表面最大温度和热变形量的影响。随着入口温度的提高, 水冷管表面沿程的温度梯度更大, 在最高温度出现的位置基本不变的情况下, 最高温度从 660 K 增加到 750 K 以上。从图 11(b) 可以看出, 加固定的水冷管最大变

形量在较高入口温度 (1 673、1 773 K) 下呈现下降的趋势。这主要归因于在较高的入口温度下, 高温度梯度导致发生最大变形的位置离水冷管顶端的距离减小, 水冷管整体的自由变形受到顶端固定作用的影响增大, 使得变形量减小。需要注意的是, 在较高的入口温度下, 最大变形量减小, 但是变形位置出现在辐射废锅的高温射流核心区附近。

3.5 表面颗粒沉积的影响

辐射废锅入口高温合成气会携带大量灰渣颗粒进入辐射废锅, 高温熔渣和灰颗粒易沉积在水冷壁表面, 形成渣层和灰层。因此, 需要对不同沉积厚度下水冷管的温度和变形进行分析。根据文献给出的数据^[23], 灰层厚度一般为 0.5 mm, 渣层厚度在不同运行条件下有所不同, 为了简化计算, 假设灰渣层厚度在水冷壁表面分布均匀, 均处于动态平衡中, 水冷管表面沉积厚度见表 3。

从图 12 可以看出, 水冷管表面覆盖灰渣后, 表面沿程温度梯度和最高温度急剧减小, 在 0~10 m 的范围内, 工况 1 的温度变化幅度超过 90 K, 而工况 2~4 的温度变化幅度在 30 K 以内, 灰渣的存在大大降低水冷管表面沿程的温度梯度, 最大热变形量从 3 cm 降低到 1 cm 以下。随着渣层厚度的增加, 水冷管表面最高温度不断降低, 但下降幅度较小。水冷管出现变形量最大的位置均在距顶部 10 m 附近, 最大热变形量随渣层厚度的增加略有降低。表面沉积有利于降低水冷管的形变量, 但会减少水冷管的传热速率, 影响设备的高效运行^[24-25]。

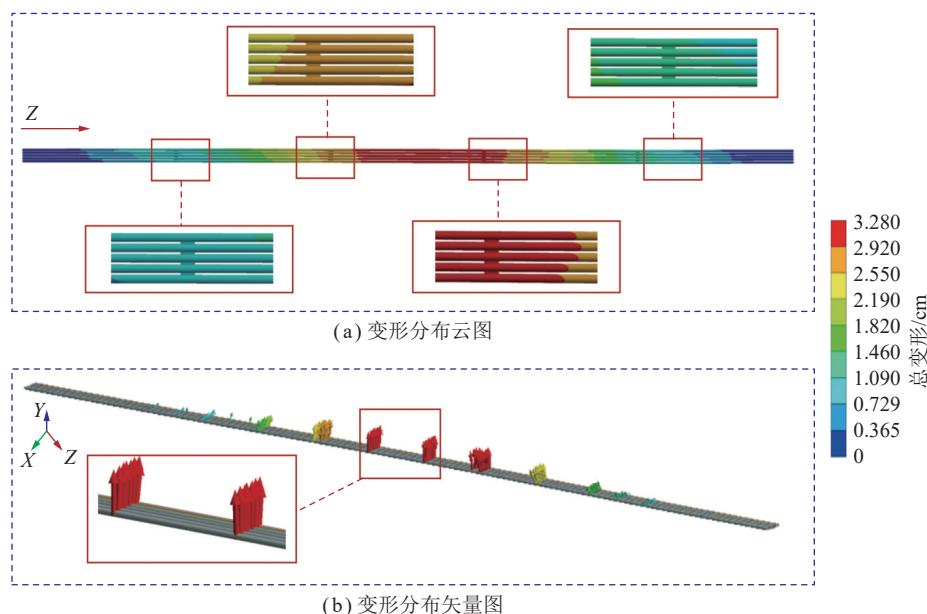


图 10 带固定的水冷管热变形分析

Fig.10 Thermal deformation analysis of water-cooling pipe with fixed

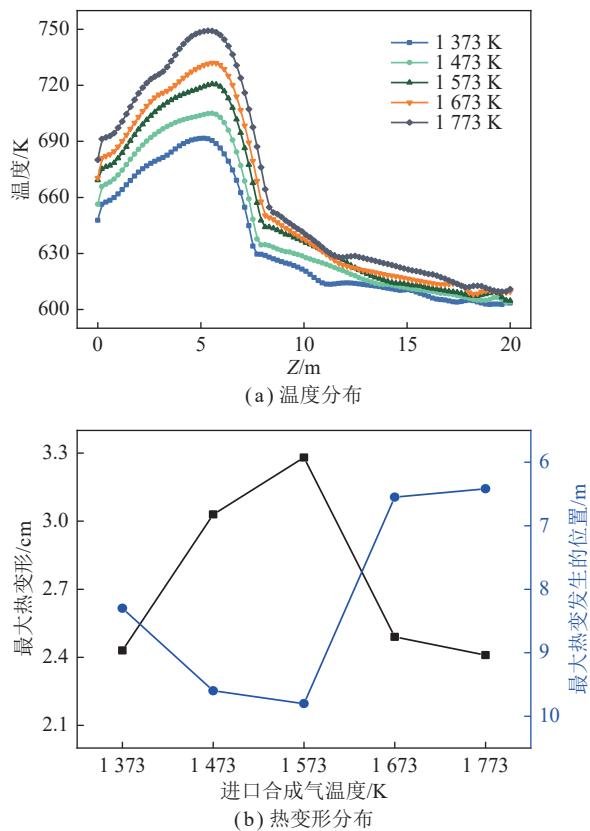


图 11 不同入口温度对加固定的水冷管温度和热变形的影响
Fig.11 Influence of different inlet temperatures on temperature and thermal deformation of water-cooling pipe with fixed

表 3 不同工况下表面沉积厚度
Table 3 Surface deposition thickness under different working conditions

工况	灰层厚度/mm	渣层厚度/mm
1	0	0
2	0.5	1
3	0.5	2
4	0.5	3

4 结 论

(1) 水冷管表面温度沿轴向方向上先升高后降低,在 5 m 左右的位置处温度最高,沿辐射废锅径向方向上,越远离炉膛温度越低。1 号管表面温度成抛物线形分布,在 0° 处温度最高;2~5 号管表面温度成双峰状分布,存在 2 个温度高点,出现在 $\pi/2$ 和 $-\pi/2$ 处。

(2) 在高温度梯度和结构约束的条件下,引起水冷管发生变形,其中 1 号管局部最大热变形量为 5.20 cm,在 π 方向上的最大偏移量 4.58 cm,超过水冷管间距,水冷管之间容易发生碰撞。

(3) 建立带固定的水冷管模型,在相同约束条件下带固定的水冷管的整体位移偏向 $\pi/2$ 方向,最大热变

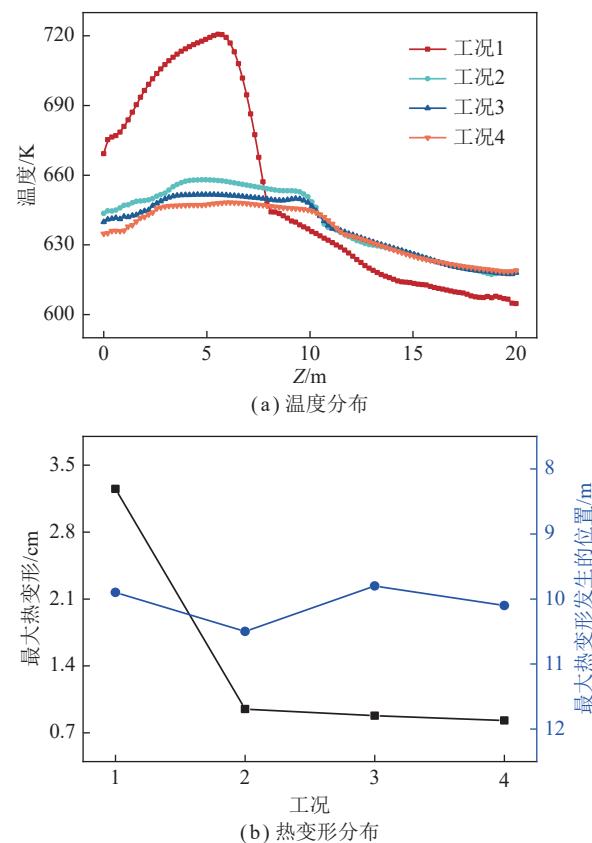


图 12 不同沉积厚度对加固定的水冷管温度和热变形的影响
Fig.12 Influence of different deposition thicknesses on temperature and thermal deformation of water-cooling pipe with fixed

形量 3.28 cm,较未加固定的减小 36.9%,1 号管在 π 方向上的偏移基本消失。固定物的存在大幅降低水冷管之间发生碰撞的风险。

(4) 带固定的水冷管表面沿程的温度梯度随进口温度增加而增加,最大形变的位置出现在水冷管上段,偏向水冷管的 $\pi/2$ 侧,但在结构的约束作用下最大变形量减小。表面颗粒沉积的存在降低水冷管表面沿程的温度梯度和最大变形量,但变形位置和方向基本不变。

参考文献(References):

- [1] LU Y, LI Z, ZHANG M, et al. The application of thermal-calculation methods in the design and syngas prediction of entrained-flow coal gasifiers[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 245: 114627.
- [2] CHAI H, GENG F, WU X, et al. Numerical investigation of gas-liquid two-phase flow in a quench chamber of an entrained flow gasifier[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(9): 5873–5885.
- [3] 张燕, 乐恺, 张欣茹, 等. 煤气化 RSC 中灰渣沉积层结构、组成及传热分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 4045–4053.
ZHANG Yan, LE Kai, ZHANG Xinru, et al. Analysis of structure,

- composition and heat transfer of ash sediment layer in coal gasification RSC[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 4045–4053.
- [4] WANG L, XU J, WEI J, et al. Numerical simulation of radiant syngas cooler with different connection to entrained-flow gasifier[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117804.
- [5] 刘建斌, 乌晓江. IGCC 废热锅炉工程结构特性研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(4): 6–10.
- LIU Jianbin, WU Xiaojiang. Study on structural characteristics of IG-CC waste heat Boiler Engineering[J]. *Boiler Technology*, 2017, 48(4): 6–10.
- [6] 郑亚兰, 林益安, 李春红, 等. 湿法气流床气化单废锅流程与双废锅流程比较[J]. 清净煤技术, 2016, 22(3): 108–111.
- ZHENG Yalan, LIN Yian, LI Chunhong, et al. Comparison of single waste pot and double waste pot processes for wet air flow bed gasification[J]. *Clean Coal Technology*, 2016, 22(3): 108–111.
- [7] 黄习兵. IGCC 多联产项目煤气化技术选择[J]. 现代化工, 2021, 41(11): 197–200.
- HUANG Xibing. Selection of coal gasification technology for IGCC polygene ration Project[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(11): 197–200.
- [8] ZHANG P, XU C, KUANG J, et al. Investigation on the ash deposition of a radiant syngas cooler using critical velocity model[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 112–126.
- [9] UEBEL K, GUENTHER U, HANNEMANN F, et al. Development and engineering of a synthetic gas cooler concept integrated in a siemens gasifier design[J]. *Fuel*, 2014, 116: 879–888.
- [10] 王蕾, 郭庆华, 许建良, 等. 辐射激冷流程气化辐射废锅鳍片结构模拟研究[J]. 煤炭转化, 2018, 41(5): 65–72.
- WANG Lei, GUO Qinghua, XU Jianliang, et al. Study on fin structure simulation of radiant waste pot gasification in radiant cooling process[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(5): 65–72.
- [11] QIU J, GUO Q, XU J, et al. Numerical study on heat transfer and thermal stress of the upper cone membrane wall in radiant syngas cooler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 169: 114845.
- [12] LI X, GONG Y, ZHOU Z, et al. Simulation of radiant syngas coolers and comparison with various arrangements of the entrained-flow gasifier[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2016, 39(8): 1457–1467.
- [13] WANG B, QIU J, GUO Q, et al. Numerical study on the effects of homogeneous reactions on the composition distributions of syngas in radiant syngas cooler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 210: 118307.
- [14] WANG L, QIU J, HE Q, et al. Performance evolution of industrial radiant syngas cooler with radiation screens using numerical simulation[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2023, 101(1): 492–503.
- [15] 谭建宇, 张彦军, 吴少华, 等. 双层水冷壁辐射废热锅炉受热面颗粒磨损状况的数值预测[J]. *节能技术*, 2015, 33(2): 172–178.
- TAN Jianyu, ZHANG Yanjun, WU Shaohua, et al. Numerical prediction of particle wear on heating surface of double-layer water-cooled radiant waste heat boiler[J]. *Energy Conservation Technology*, 2015, 33(2): 172–178.
- [16] 于广锁, 倪建军, 郭庆华, 等. 辐射废锅内气固两相流场的冷态测试与数值模拟[J]. *高校化学工程学报*, 2012, 26(1): 61–68.
- YU Guangshuo, NI Jianjun, GUO Qinghua, et al. Cold state measurement and numerical simulation of gas-solid two-phase flow field in radioactive waste pot[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2012, 26(1): 61–68.
- [17] NI J, YU G, GUO Q, et al. Experimental and numerical study of the flow field and temperature field for a large-scale radiant syngas cooler[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(9): 4452–4461.
- [18] LI X, GUO Q, QIU S, et al. Numerical study on the performance of an adapted radiant syngas cooler with water spray for entrained-flow gasifier[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2016, 11(2): 246–257.
- [19] SAZHIN S S, SAZHINA E M, FALTSI-SARAVELOU O, et al. The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations[J]. *Fuel*, 1996, 75(3): 289–294.
- [20] HOGREN H, SUNDEN B. Evaluation of planck mean coefficients for particle radiative properties in combustion environments[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2015, 51(4): 507–519.
- [21] ANA Z F F, JENSEN P A, et al. Heat transfer in ash deposits: A modelling tool-box[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, 31(5–6): 371–421.
- [22] QIU J, GUO Q, WEI J, et al. Numerical simulation of heat transfer and a forging plate structure in a radiant syngas cooler with radiation screens[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(37): 16483–16491.
- [23] 邱剑勇, 郭庆华, 许建良, 等. 气流床气化辐射废锅单面受热水冷壁数值模拟[J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(1): 48–54.
- QIU Jianyong, GUO Qinghua, XU Jianliang, et al. Numerical simulation of single-side heated water cooling wall of radiant waste boiler for gas bed gasification[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33(1): 48–54.
- [24] TANG S, DING L, ZHAO Z, et al. Dynamic modeling and improvement on ash deposition and thermal-hydraulic characteristics in a waste heat boiler of cement kiln[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118826.
- [25] BALAKRISHNAN S, NAGARAJAN R, KARTHIK K. Mechanistic modeling, numerical simulation and validation of slag-layer growth in a coal-fired boiler[J]. *Energy*, 2015, 81: 462–470.