

天然气气化炉内介质乙二醇非稳态耦合热流场研究

张栩宁, 郭 韵

上海工程技术大学, 机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要:目的 在天然气工业化应用中, 液化天然气的高效气化是关键影响因素, 为了在国家能源改革的大背景下, 尽可能提升现有气化设备的运行效能, 采用 ANSYS Fluent 软件对一种采用乙二醇作为中间载热介质的天然气气化炉内非稳态耦合热流场进行数值模拟。方法 通过深入研究天然气气化炉传热传质机理, 在总结前人研究仅考虑对流换热情况不足的情况下, 将辐射换热加以考虑, 构建出大空间非稳态自然对流及介质参与性辐射耦合传热模型, 通过天然气加热、传热流动试验装置, 对边界条件进行实验校准, 验证数值分析模型的正确性。结果 中间载热介质为乙二醇的气化炉运行时长达到 2.0 h 后, 传热量趋于稳定, 内部热流场不再发生明显扰动, 表明气化炉进入稳定运行阶段, 此时炉内整体加热效率仅为 87.35%, 其中介质参与性辐射占总传热量的 27.01%, 气化炉底部形成了范围较小的低温带, 表明该工况下其内部运行存在难以消除的流动死角。结论 在本文设置的工况下, 大筒体天然气气化炉内部流场分布情况不佳, 气化炉的加热效率和启动时间有待进一步优化, 炉内主要换热形式仍是自然对流, 但不可忽略介质参与性辐射对总传热的贡献。

关键词:加热气化; 非稳态; 耦合传热模型; 加热效率

中图分类号:TK17 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0004.007

Unsteady Coupled Heat Flow Field of Medium Ethylene Glycol in Natural Gas Gasifier

ZHANG Xuning, GUO Yun

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Objective The efficient gasification of liquefied natural gas (LNG) is a key influencing factor in the industrial application of natural gas. In order to improve the operation efficiency of the existing gasification equipment in the context of national energy reform, ANSYS Fluent software was used to numerically simulate the unsteady coupled heat flow field in a natural gas gasifier using ethylene glycol as the intermediate heat-carrying medium. **Methods** The heat and mass transfer mechanism of natural gas gasifiers was studied in depth. It was found that previous studies only considered convective heat transfer. Considering the radiative heat transfer, a coupled heat transfer model of unsteady natural convection and medium participating radiation in a large space was constructed. The boundary conditions were verified and calibrated by natural gas heating and heat transfer flow experimental equipment. The correctness of the numerical analysis model was verified. **Results** When the running time of the gasifier with ethylene glycol as the intermediate heat-carrying medium reached 2.0 h, the heat transfer tended to be stable. As the internal thermal flow field was no longer obviously disturbed, the gasifier entered a stable operation stage. At this time, the overall heating efficiency in the furnace was only 87.35%, in which the medium participating radiation accounted for 27.01% of the total heat transfer. In addition, a small range of low-temperature zones was formed at the bottom of the gasifier, indicating that there was a flow dead angle

收稿日期:2023-04-12 **修回日期:**2023-06-15 **文章编号:**1672-058X(2024)04-0053-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51606116);上海市科学技术委员会科技创新行动计划资助项目(19195810800).

作者简介:张栩宁(1998—),男,吉林延边人,硕士研究生,从事能源装备研究. Email: m18916378990@163.com.

通讯作者:郭韵(1976—),女,教授,硕士生导师,从事新能源利用开发、能源经济等. Email: graceguo1980@126.com.

引用格式:张栩宁,郭韵.天然气气化炉内介质乙二醇非稳态耦合热流场研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(4):53—60.

ZHANG Xuning, GUO Yun. Unsteady coupled heat flow field of medium ethylene glycol in natural gas gasifier[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 53—60.

that was difficult to eliminate in its internal operation under this working condition. **Conclusion** Under the working conditions set in this paper, the internal flow field distribution of the large cylinder natural gas gasifier is not good, and the heating efficiency and start-up time of the gasifier need to be further optimized. The main form of heat transfer in the furnace is still natural convection, but the contribution of medium participating radiation to the total heat transfer cannot be ignored.

Keywords: heating gasification; non-steady state; coupled heat transfer model; heating efficiency

1 引言

天然气是一种方便储运、高效清洁的能源,国际能源机构 IEA 在 2020 年发布的调查报告显示,天然气已经是世界能源利用的主要贡献来源,其结构占比达 23%,预计 2035 年前后将超过煤炭,成为全球第二大能源^[1]。过去 20 多年,我国一直是世界最大的能源消费国,煤炭是我国主要能源。随着能源转型成为实现可持续发展的必然选择,在以太阳能为代表的绿色能源普及前^[2],天然气成为中国最清洁、发展最快的化石燃料。目前,天然气作为未来我国计划培育成为的主体能源,预计 2030 年左右将在我国一次能源消费结构达到 15% 的占比^[3-4]。

快速增长的天然气消费对天然气工业相关技术设备的设计研发提出了更高的要求,天然气气化炉作为其中必不可少的关键设备^[5],其流动传热特性的研究是十分必要的^[6]。天然气气化炉大量应用于天然气系统中,首先,液化天然气在输送过程中,要防止天然气水合物晶体析出阻塞管道,进而导致设备性能下降甚至引发故障,需要对天然气进行加热;一些特殊的工艺场景需要稳定的进气温度以达到指定的燃烧效率,也需要对天然气进行加热;另外,在液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)运输配送系统中,为了使 LNG 在指定环节气化,也要对其进行加热。综上所述,推进天然气工业发展的重点在于设计和制造高效节能的天然气气化炉^[7-8]。目前,常用于工业生产中的天然气气化炉有多种形式,空温式翅片气化炉利用高温空气冲击管外翅片,管内的液化天然气通过强烈对流的方式吸收管外高温空气的热量从而气化,该过程受环境湿度和温度变化的影响较大,故不适合作为调峰设备使用,只能用于气化需求量较小的工业场景中^[9]。浸没燃烧式气化炉通过加压燃料燃烧产生的烟气后泵入水中产生高温湿烟气,进而加热浸没在水中受热管内的 LNG,使其气化。该炉气化产率较好,但泵送烟气需要额外消耗很多电力,因此运行成本较高^[10]。蓄热式气化炉同样采用燃烧方式为 LNG 供能,但其利用排烟废热预先加热燃料气以提升气化炉整体的能量利用率,具有出色的能效比,但由于增加了蓄热系统,气化炉的运行可能会包含某些安全隐患^[11]。目前,大部

分对上述 LNG 气化设备的传热研究仅考虑了对流,而没有考虑热辐射的影响。本文研究了一种新型的内含中间载热介质的筒体负荷型天然气气化炉,其工作原理与蓄热式天然气气化炉相近,但前者较后者具有更高的安全系数。

在考虑热辐射影响的前提下,本文建立了筒体负荷型天然气气化炉自然对流耦合辐射传热的三维计算模型,基于定制的 130 kW 实验平台对模型进行验证,进一步研究和分析乙二醇作为中间载热介质的 LNG 气化炉内非稳态流场及传热特性,为该类型气化炉今后的改进优化指出可行的方向。

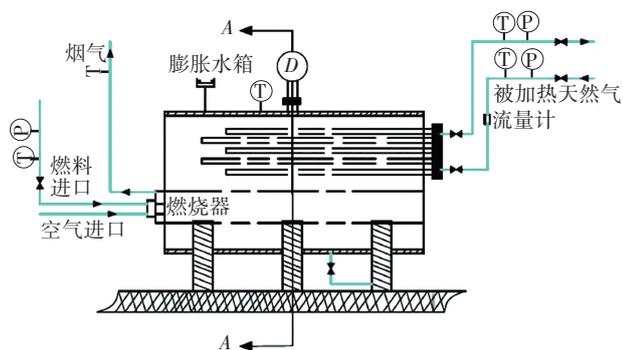
2 实验平台和物理建模

负荷型大筒体 LNG 气化炉采取整体组装结构,沿几何轴线在卧式筒体内对称安装火管、烟管束以及 LNG 管束。烟管束与火管为热源面,安装在水平轴下方,与垂直轴两侧对称。LNG 管束为热汇面,设计为往返共四个流程,安装在水平轴上方,其中垂直轴左右两侧各有两个回程。作为传热媒介的液态中间载热介质充满大筒体内部,并通过吸收火管和烟管束内高温烟气的热量,将大部分的热量以热对流和热辐射的形式传递给 LNG 管束内待加热的液化天然气,实现全部传热过程。

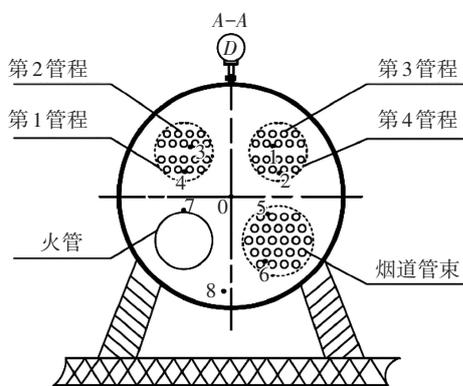
可以看到,气化炉内温度场和流场的分布情况主要受烟管束、火管、对流管束的安装位置,以及燃料的燃烧模式、中间载热介质的热力学性质的影响。炉内热流场具有脉动性、随机性、复杂性等特点^[12-13],可以归为非稳态空间下自然对流换热耦合介质参与性辐射的复杂流动传热传质问题。

130 kW 气化炉实验平台^[14]如图 1(a)所示。表 1 为大筒体气化炉的规格和尺寸,筒体外包裹厚度为 8 mm 的绝热材料。为获得燃料燃烧产生烟气以及待加热天然气的温度与压力,在燃料进口、烟气出口以及对流受热管束进出口等位置布置了压力与温度传感器;为获得炉内不同位置乙二醇的温度,将 9 个热电偶布置在炉体中心截面上,其中 0 号热电偶布置在炉体中心,以测量整体温度;1-4 号热电偶分别布置在对流受热管束第 1-4 管程区域,以监测 LNG 管束换与乙二醇之间的换热情况;5-6 号热电偶分别布置在烟管束的上

部和下部区域,用来监测烟气与乙二醇之间的换热情况;7号热电偶布置在火管的上部,用来监测燃料的燃烧情况;8号热电偶布置在气化炉的底部,用以监测炉内是否有换热死区。各个热电偶的具体位置如图1(b)所示。影响温度监测值准确度的因素主要有热电偶的测量准确度以及安装位置的定位准确度,在与数值计算的出值做比较时,本文将温度监测值的误差带宽度定为±2 K。在启动试验平台时,将燃料流量设置到10 m³/h, LNG 盘管内的表压为 5.5 Mpa, 初始温度为 280 K, 流速为 1.67 m/s。



(a) 实验系统图



(b) 测点布置图

图 1 天然气气化炉实验系统

Fig. 1 Experimental system of natural gas gasifier

表 1 实验平台各部件规格参数

Table 1 Specification parameters of each part of the experimental platform

部 件	直径、壁厚、长度/mm	材 料	数 目	间距/mm
空气进口	70, 3, 100	316L	—	—
燃料进口	12, 3, 60	316L	—	—
火管	325, 8, 2430	316L	—	—
烟管	42, 3, 2228	316L	24	68
外部圆筒	1316, 8, 2200	Q235 碳钢	—	—
LNG 管束	38, 3, 7500	316L	9	65

本文使用 Solidworks 软件,根据实验平台的实际尺寸和构造建立了对应的几何模型,将气化炉的几何

中心定为原点,沿筒体轴线方向定义为 x 轴,指向 LNG 管束的方向定义为 y 轴,指向火管的方向定义为 z 轴,各参考截面的选取如图 2 所示。其中, $B-B$ 截面过坐标原点且垂直于 x 轴, $A-A$ 截面和 $C-C$ 截面与 $B-B$ 截面的间距均为 0.5 m, $D-D$ 与 $E-E$ 截面均垂直于 y 轴, $D-D$ 截面与原点距离为 0.21 m, $E-E$ 截面与原点距离为 0.255 m。

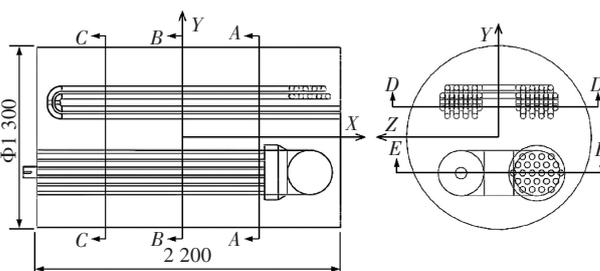


图 2 模型坐标轴及截面位置图

Fig. 2 Model coordinate axis and section location

3 数学模型

3.1 控制方程

气化炉内的流动与传热传质遵循以下的控制方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

其中, ρ 表示密度, \mathbf{v} 表示流体速度的矢量, t 表示流动时间。

化学组分守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_s) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_s \frac{\partial}{\partial x_j} m_s) + R_s$$

其中, m_s 表示组分 s 的质量分数, Γ_s 表示组分 s 的交换系数, R_s 表示由化学反应造成的组分 s 的含量变化率。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \mathbf{F} + \text{div} \mathbf{P}$$

其中, \mathbf{P} 表示二阶应力张量, \mathbf{F} 表示作用在流体微团上的质量力。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + Q_s + S_{nr}$$

其中, T 表示温度, k 表示流体的导热系数, Q_s 表示辐射源项, 可用式(1)进行计算, S_{nr} 表示其他能量源项。

$$Q_s = k_a \left[4\sigma T^4 - \int_0^{4\pi} I d\Omega \right] \quad (1)$$

式(1)中, k_a 表示吸收系数, σ 为斯忒藩-波耳兹曼常数, Ω 表示辐射立体角, I 表示辐射强度, 可由式(2)求出。

$$\mu^m \frac{\partial I^m}{\partial x} + \eta^m \frac{\partial I^m}{\partial y} = -k_a I^m + n^2 k_a I_b \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

式(2)中, I^m 表示沿 m 向量的辐射强度, I_b 表示相同条件下黑体的辐射强度, μ^m, η^m 表示 m 向量的方向余

弦, M 为离散方向的个数。

对于漫射或不透明边界, 辐射边界条件由式(3)给出:

$$I_{\omega}^m = n^2 \varepsilon_{\omega} I_{b\omega} + \frac{1 - \varepsilon_{\omega}}{\pi} \sum_{n_{\omega} \cdot s^{m'} < 0} I_{\omega}^{m'} |n_{\omega} \cdot s^{m'}| \omega^{m'} \quad (3)$$

式(3)中, ε_{ω} 表示边界发射率, n_{ω} 表示外边界法向量, $s^{m'}$ 表示沿 m' 方向的单位向量, $\omega^{m'}$ 表示 m' 方向上辐射立体角投影值。

由于炉内气体处于高流速湍动状态, 本文选择 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型; 燃烧选择非预混燃烧模型^[15]; 辐射选取具有良好适应性的 DO 模型; 选取灰气体加权平均 WSGGM 模型^[16] 计算燃料和烟气的吸收系数。

3.2 乙二醇的吸收系数

Hale 等研究了常见液体在 200 nm ~ 200 μm 波长范围内的光学常数的测量方法^[17], 得到通过波长计算吸收系数的公式为

$$k_a = 4\pi k_{\lambda} / \lambda \quad (4)$$

式(4)中, λ 表示辐射波长, k_{λ} 表示介质的消光系数, 可由如图 3 所示装置测量得到。

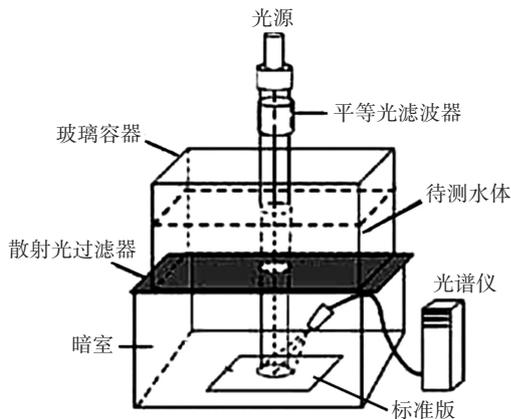


图 3 消光系数测量仪

Fig. 3 Extinction coefficient measuring instrument

测量时, 光源发出的光线经过平行光滤波器后穿过厚度 h 的待测介质, 经由散射光过滤器被反射率为 1 的标准板反射进入光谱仪探头, 经仪器处理后得到对应的辐射量度 L , 代入式(5)即可求出对应的 k_{λ} , 其中 h_1 与 h_2 分别为两次测量所对应的待测液体厚度, L_1 与 L_2 分别为 h_1 与 h_2 对应的辐射量度。

$$k_{\lambda} = \frac{1}{h_2 - h_1} \ln \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \quad (5)$$

将 k_{λ} 代入式(4), 可得待测液体在不同波长以及温度下的吸收系数。

图 4 是温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时不同波长下对应的乙二醇吸收系数以及不同温度下对应的乙二醇吸收系数, 可知在 0.76 ~ 20 μm 波长范围内, 介质乙二醇的平均吸收系数为 41 933.7 m^{-1} 。

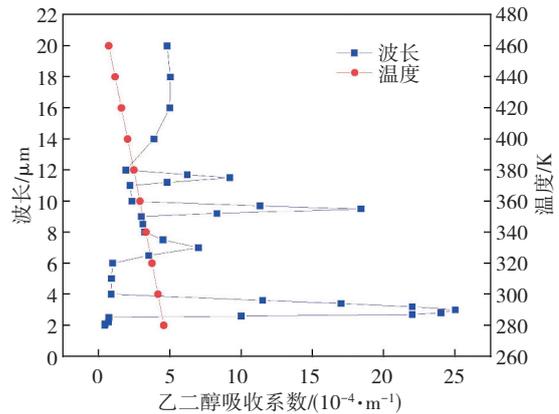


图 4 乙二醇在不同波长下 (25 $^{\circ}\text{C}$) 及不同温度下的吸收系数

Fig. 4 Absorption coefficients of ethylene glycol at different wavelengths (25 $^{\circ}\text{C}$) and temperatures

3.3 初始及边界条件

气化炉外壁为绝热边界条件, 化学反应只考虑燃料燃烧, 所有管束的进出口均没有回流现象。LNG 管束入口设为速度入口, 出口设为压力出口; 待气化 LNG 的初始压力为 5.5 MPa, 温度为 280 K, 管内 LNG 流速为 1.67 m/s; 所有介质的物性参数均取为温度的函数; 燃烧器采用非预混燃烧方式, 燃料和空气均设为速度入口, 入口温度均为 300 K; 燃料流速取 39.2 m/s, 质量流率为 0.186 kg/h, 压强为 120 kPa; 空气流速取 10.9 m/s, 质量流率为 3.24 kg/h, 压强为 8 kPa; 烟管出口设为压力出口, 压强为 -20 Pa。

LNG 管束、火管以及烟管束壁面两侧分别浸泡在两种不同的工质中, 因此三者均设定为 Coupled 耦合壁面, 并将壁面黑度设为 0.8。

3.4 网格划分

采用直角坐标系进行非结构网格划分, 其优势在于绘制出的网格系统简单直观, 且避免了控制方程与节点坐标在计算域及物理域的转换^[18]。考虑热边界层的影响, 将烟管束、火管、燃烧器及 LNG 管束贴壁侧的网格进行了局部细化, 如图 5 所示。

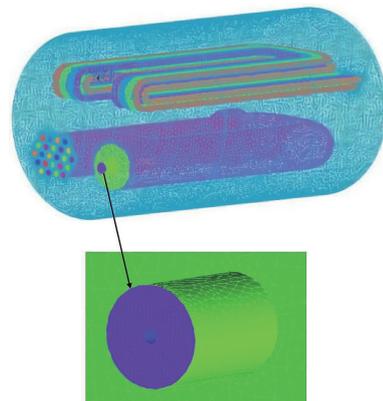


图 5 网格划分图

Fig. 5 Diagram of grid division

为进行网格无关性检测,本文针对模型建立了 5 个不同的网格数级别:分别为 481 万、853 万、1 510 万、2 694 万和 3 588 万。图 6 对比了烟管束烟气出口平均温度与对流受热管束内的总传热量。可以看到,总传热量和出口烟温随网格的细化趋于稳定。对于趋于稳定的总传热量和出口烟温,2 694 万网格数得到的值相较于 1 510 万网格数得到的值相差均在 0.4% 以下。因此,本文选取 1 510 万网格数进行模拟。

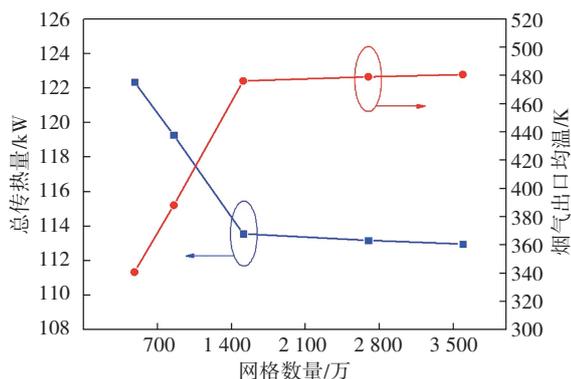


图 6 网格无关性验证

Fig. 6 Grid-independence test

4 结果与讨论

将图 1(b) 中 9 个标记点的温度计算值与热电偶的输出值进行对比,结果如图 7 所示。可以看到模拟结果与实验结果一致性较好,但计算值普遍比实测值高 1~2 K,这是由于炉体外包裹的绝热材料不能完全阻断热传导而导致的。

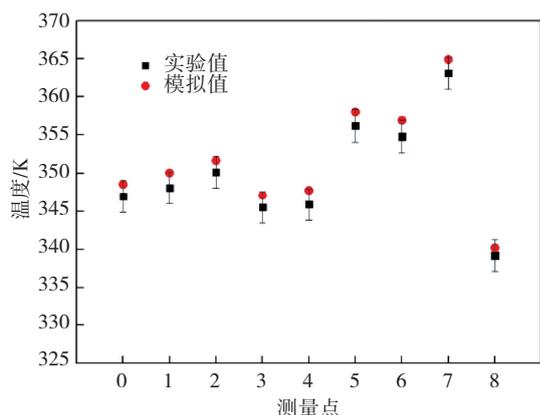


图 7 9 个测量点模拟值与实验测量值比较

Fig. 7 Comparison of the temperatures simulated and measured at nine locations

图 8 反映了气化炉运行时长与 LNG 管束出口温度、加热效率之间的关系(加热效率定义为 LNG 管束面吸热量与燃料燃烧功率的比值)。可以看到,随着运行时长的增加,天然气出口温度与加热效率都增加,在运行时间达到 2.0 h 后 LNG 管束出口温度不再发生明显变化,

2.0 h 时其温度为 319.4 K, 2.6 h 时为 319.45 K, 3.2 h 时为 319.58 K, 当 LNG 管束出口温度波动幅度在 0.5 K 以内时,认为炉内热流场已发展完全。因此,中间载热介质为乙二醇的天然气气化炉所需启动时长约为 2.0 h, 稳态时气化炉效率为 87.35%。

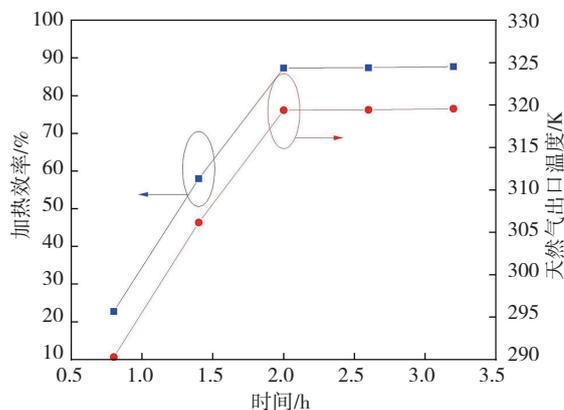


图 8 不同时刻天然气出口温度及加热效率

Fig. 8 Natural gas outlet temperature and heating efficiency at different time points

图 9 反映了气化炉运行时长与 LNG 管束总传热量、辐射传热量之间的关系。可以看到,辐射传热量和总传热量随气化炉的运行时长增加而增加,当炉内热流场发展完全时,辐射传热量为 29 729 W,对 LNG 管束总传热量为 113 555 W,辐射传热量占总传热量的 25.70%~27.01%,故不可忽略介质参与性辐射。

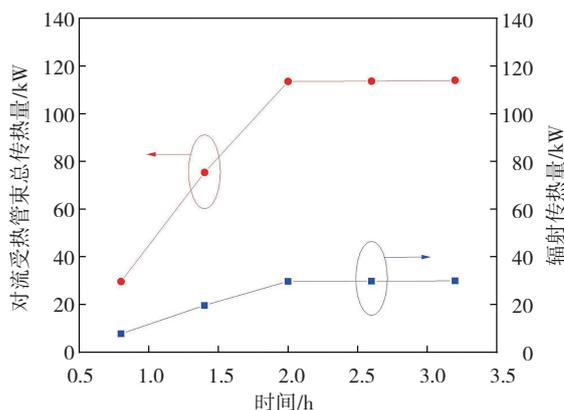
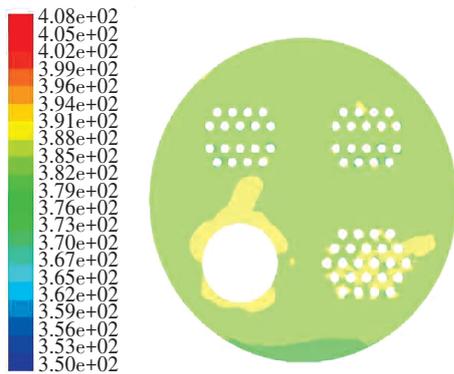


图 9 不同时刻对流受热管束总传热量及辐射传热量

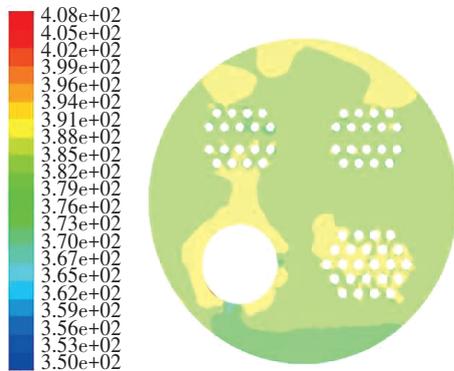
Fig. 9 Total heat transfer and radiant heat transfer of convective heating tube bundles at different time points

图 10—图 13 为气化炉达到稳态时,各个标定截面的流场与温度云图。从图 10 中可以看出,气化炉模拟时间达到 2.0 h 时,LNG 管束上部已基本被高温区域覆盖,此时温度 370 K 即为炉内乙二醇的工作温度,处于该温度下的乙二醇可以为 LNG 管束内的待加热液态天然气提供稳定的热能。通过对各截面温度和速度云图(图 10、图 11)分析可知,截面位置的火管与对流受

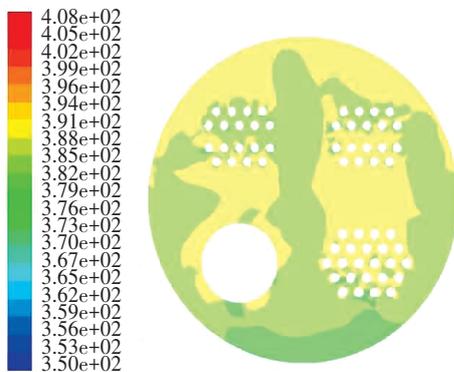
热管束之间的流场对冲较明显, 烟管束与 LNG 管束之间也存在同样的现象, 这导致炉内流场紊乱; 另外由于乙二醇黏度较大, 导致流速较低, 从而气化炉底部出现了比较大的低温区域。可以看到, 火管和烟管束上方的温度较高, 此处介质乙二醇流速也较快, 但在气化炉底部介质乙二醇的流动则非常缓慢。炉内热流场在达到稳态时炉底仍存在较小的低温带, 这表明使用乙二醇作为该气化炉的中间载热介质难以避免炉内流动死角的存在。



(a) $x = -0.5 \text{ m}$



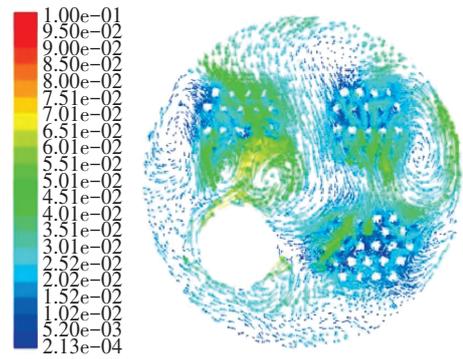
(b) $x = 0.0 \text{ m}$



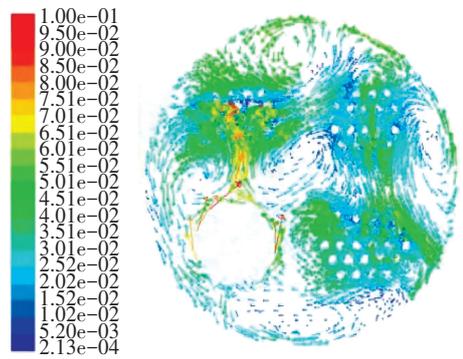
(c) $x = 0.5 \text{ m}$

图 10 $t = 2.0 \text{ h}$ 时的温度云图(K)

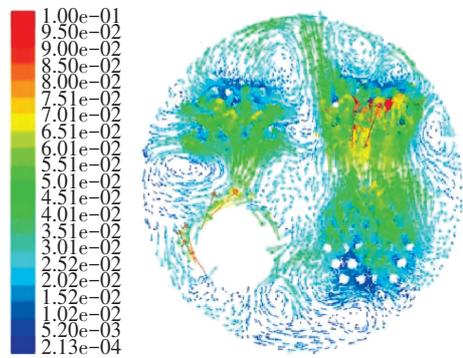
Fig. 10 Temperature nephogram at $t = 2.0 \text{ h}$ (K)



(a) $x = -0.5 \text{ m}$



(b) $x = 0.0 \text{ m}$



(c) $x = 0.5 \text{ m}$

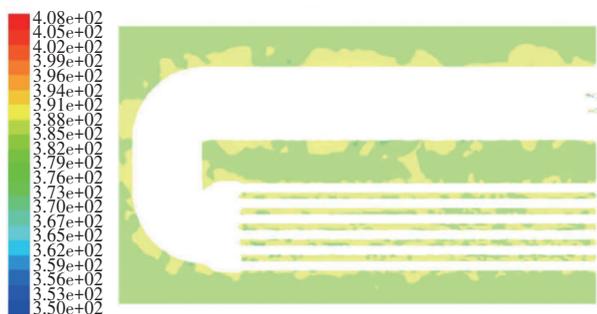
图 11 $t = 2.0 \text{ h}$ 时的流场矢量图(m/s)

Fig. 11 Flow field vector diagram at $t = 2.0 \text{ h}$ (m/s)

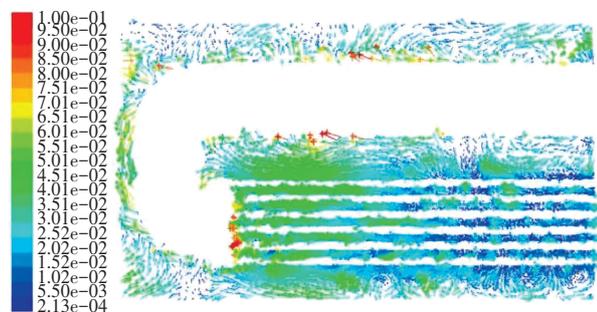
图 12 为气化炉运行 2.0 h 时 $y = -0.255 \text{ m}$ 截面处的流场矢量图与温度云图, 可以看到炉内温度沿轴向波动很小, 这是由于燃烧器采用非预混点燃方式, 火管前半部分燃料燃烧不完全, 放热量不足。而高温烟气经过火管 U 形弯折所需时间较管内其他地方更长, 因此火管 U 形弯折附近乙二醇流速较快, 温度也较高。图 13 为气化炉运行 2.0 h 时 $y = 0.21 \text{ m}$ 截面处流场矢量图与温度云图, 结合筒体轴向各截面的流场矢量图和温度云图不难发现, 介质乙二醇受热后密度发生波

动,在密度差作用力的驱使下,温度较高的乙二醇上浮,而温度较低的乙二醇下沉。由于 $x=0.5\text{ m}$ 截面处于火管燃烧充分区域,此处各个管束之间的热对流换热比较强烈。另外 $y=0.21\text{ m}$ 截面处的流场矢量图表明,LNG 管束第一管程进口处与第四管程出口处由于同处于火管燃烧充分区域,其附近乙二醇流速较快,出现了高流速区域。

在截面 $y=0.21\text{ m}$ 处的温度云图中,LNG 管束各管程的弯管附近温度较低,乙二醇流速也较慢,这是因为 LNG 在经过 U 形管时内部会出现二次流和分离涡,使得湍流强度增加,且 U 形管相较于直管比表面积更大,有利于管内 LNG 与管外乙二醇之间的换热,使 LNG 管束 U 型弯管附近的乙二醇散失大量热量。综合烟管束、火管及 LNG 管束之间的换热情况,火管壁的整体温度高于烟管壁,因此 LNG 管束第一、二管程与火管之间的热交换较强烈,而第三、四管程与烟管束之间的换热整体沿管轴线方向呈现前弱后强的趋势。



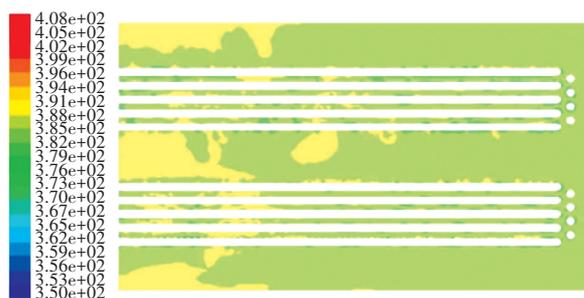
(a) 截面温度云图



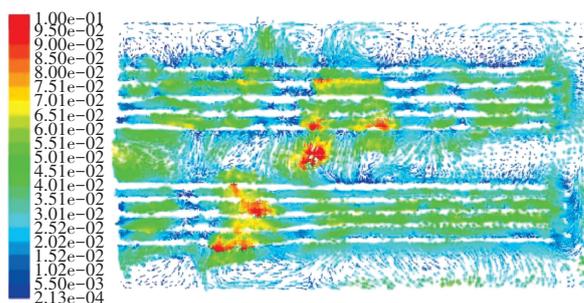
(b) 截面速度矢量图

图 12 $t=2.0\text{ h}$ 时 $y=-0.255\text{ m}$ 截面温度云图 (K) 和流场矢量图 (m/s)

Fig. 12 Temperature nephogram (K) and flow field vector diagram (m/s) of $y=-0.255\text{ m}$ section at $t=2.0\text{ h}$



(a) 截面温度云图



(b) 截面速度矢量图

图 13 $t=2.0\text{ h}$ 时 $y=0.21\text{ m}$ 截面温度云图 (K) 和流场矢量图 (m/s)

Fig. 13 Temperature nephogram (K) and flow field vector diagram (m/s) of $y=0.21\text{ m}$ section at $t=2.0\text{ h}$

5 结论

(1) 在本文设置的工作条件下,以乙二醇为中间载热介质的天然气气化炉启动时间在 2.0 h 左右,而后炉内流场趋于稳定。整体而言乙二醇介质条件下的炉内流场分布不佳,炉内热流场发展完全时气化炉的热效率为 87.35% ,还可以进一步提升。

(2) 炉内热流场在稳定后,底部仍存在较小区域的低温带,表明使用乙二醇作为该气化炉的中间载热介质很难消除流动死角。由于乙二醇具有高的吸收系数,炉内热流场发展完全时辐射传热占总传热的 25% 左右。可以看到,自然对流仍是天然气气化炉内最主要的传热方式,但也不可忽略介质参与性辐射。

(3) 提高大筒体中间载热介质气化炉运行效率,设法强化炉内介质参与性辐射与自然对流耦合换热是重要技术途径,后续可考虑在气化炉内部安装不同形状和结构的导流板来改变炉内流场结构,从而进一步提高气化炉的运行效率。

参考文献(References):

[1] HUANG Q. Insights for global energy interconnection from China's renewable energy development [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1—11.
 [2] 李作鑫,张福萍. 廊坊市某公寓集中热水供应系统设计探

- 讨[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2014, 31(8): 92—96.
- LI Zuo-xin, ZHANG Fu-ping. Discussion on centralized hot water supply system design in an apartment of Langfang city[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2014, 31(8): 92—96.
- [3] ZHANG J, MEERMAN H, BENDERS R, et al. Potential role of natural gas infrastructure in China to supply low-carbon gases during 2020-2050 [J]. Applied Energy, 2022, 306: 117989.
- [4] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 等. 中国天然气发展报告(2021) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2021: 2—6.
- National Energy Administration Oil and Gas Department, Resource and Environmental Policy Research Institute of the Development Research Center of the State Council, et al. China Natural Gas Development Report(2021)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021: 2—6.
- [5] 杨帆, 李康. 两相流传热模型在 LNG 加热气化装置中的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(9): 86—89.
- YANG Fan, LI Kang. Research on two-phase circulating heat model in LNG heating gasification device[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(9): 86—89.
- [6] 陈昊. 调峰型 LNG 气化炉内复杂热耦合流场研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021: 3—5.
- CHEN Hao. Study on complex thermally coupled flow field in peak shaving LNG gasifier[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021: 3—5.
- [7] 刘文山, 陈治新. 香港终端天然气加热炉节能分析[J]. 石油化工设备, 2015, 44(1): 60—63.
- LIU Wen-shan, CHEN Zhi-xin. Energy-saving analysis of natural gas heater in gas receiving station[J]. Petro-Chemical Equipment, 2015, 44(1): 60—63.
- [8] 王浩, 史永征, 刘蓉, 等. 天然气管道加热用浸没燃烧换热器设计及应用分析[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(4): 50—56.
- WANG Hao, SHI Yong-zheng, LIU Rong, et al. Design and application analysis of submerged combustion heat exchanger for natural gas pipeline heating[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(4): 50—56.
- [9] 杨睿杰. 空温式气化器传热特性数值分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2019: 3—6.
- YANG Rui-jie. Numerical analysis of heat transfer characteristics of ambient air vaporizers[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019: 3—6.
- [10] 王新. LNG 接收站浸没燃烧式气化器运行优化[J]. 建材与装饰, 2020(5): 210—211.
- WANG Xin. Operation optimization of submerged combustion gasifier in LNG receiving station[J]. Construction Materials & Decoration, 2020(5): 210—211.
- [11] 杜卫达. 蓄热式加热炉燃烧系统控制策略研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019: 5—10.
- DU Wei-da. Research on control strategy of regenerative reheating furnace combustion system[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019: 5—10.
- [12] 郭韵, 曹伟武, 严平, 等. 天然气加热炉的发展现状与改进探索[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 97—100, 150.
- GUO Yun, CAO Wei-wu, YAN Ping, et al. Exploration and development of natural gas heaters with high fuel efficiency[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 97—100, 150.
- [13] 李岁, 王元华. 油田水套加热炉高温空气燃烧瞬态模拟及最小换向时间[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 823—830.
- LI Sui, WANG Yuan-hua. Transient simulation and the minimum reversal time of high temperature air combustion in oil-field jacket heater[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 45(5): 823—830.
- [14] GUO Y, GUO Z. Flow and heat transfer inside a new diversion-type gas heating device[J]. Numerical Heat Transfer Part A - Applications, 2016, 70(1): 1—13.
- [15] 孟庆洋, 赵宁波, 郑洪涛, 等. 非预混条件下的旋转爆轰燃烧室双波头演化过程数值模拟[J]. 航空动力学报, 2019, 34(1): 51—62.
- MENG Qing-yang, ZHAO Ning-bo, ZHENG Hong-tao, et al. Numerical study on the two-wave transition process in rotating detonation combustor under separate injection condition [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 51—62.
- [16] 杨毅成. 航空发动机部件防火试验的火焰特征分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2017: 14—15.
- YANG Yi-cheng. Analysis of flame characteristics of aero engine components fire test[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017: 14—15.
- [17] 周仲伟. 天然气气化炉非稳态耦合热流场研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020: 18—19.
- ZHOU Zhong-wei. Study on Unsteady Coupled Heat Flow Field of Natural Gas Heating Furnace[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020: 18—19.
- [18] 张航, 付俊峰, 王海军, 等. 基于 ICEM CFD 对交叉管道流场网格划分方法的选择[J]. 中国水运, 2019, 19(10): 230—231.
- ZHANG Hang, FU Jun-feng, WANG Hai-jun, et al. Selection of grid division method for cross-pipe flow field based on ICEM CFD[J]. China Water Transport, 2019, 19(10): 230—231.

责任编辑:陈芳