

生物质气化套管采暖热环境数值模拟

闫放,许开立,姚锡文,张秀敏
(东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:为保障我国北方的生物质气化站在冬季可以安全运行,提出一种利用轴流风机与套管将生物质气化反应的余热送入净化间进行采暖的方法.采用计算流体力学(CFD)方法对采暖后的生物质气化站净化间热环境进行模拟,并使用 Fluent 进行计算,得出在沈阳市冬季温度最低(243. 15 K)的情况下可将净化间的温度提升至 254 K 以上,若对净化间围护采取保温措施,则可使温度继续提高,使净化间内温度达到 278 K 以上,进而满足防冻要求.从而证明套管采暖方案的可行性,并为我国北方生物质气化站防冻改造提供参考.

关 键 词:生物质气化;防冻;套管;计算流体力学

中图分类号: X 913. 4 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)06 - 0886 - 05

Numerical Simulation of Thermal Environment for Double-tube Heating of Biomass Gasification

YAN Fang , XU Kai-li , YAO Xi-wen , ZHANG Xiu-min
(School of Resources and Civil Engineering , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : XU Kai-li , E-mail : kaili_xu@ aliyun. com)

Abstract : In order to guarantee safety operation of the biomass gasification station in the north of China in winter , a method which makes the waste heat of biomass gasification reaction go into purification room by using axial flow fan and double-tube is proposed. Simulation is performed for heat environment of the heated purification room of the biomass gasification station by computational fluid dynamics(CFD) approach using Fluent. The temperature of purification room can reach to 254 K when the situation temperature in Shenyang is 243. 15 K. The temperature of purification room will continue to enhance to 278 K when the heat measures are taken to envelope. And the requirement of freeze prevention is met and the feasibility of double-tube heating is proved. It provides some references for the transformation of freeze prevention of biomass gasification station in northern China.

Key words : biomass gasification ; freeze prevention ; double-tube ; computational fluid dynamics (CFD)

我国北方农村地区的小型生物质气化站由于冬季严寒并缺乏集中供暖,使得净化间内的湿式净化装置在气温低于 0 ℃ 时会出现冻裂现象,进而导致生物质燃气泄漏,带来火灾、爆炸或中毒等隐患^[1]. 本文提出了一种利用套管将生物质气化反应余热送入净化间进行采暖的方法. 套管换热器作为一种热交换装置在各领域均有应用. Nelson 等分析了套管内为多孔介质情况下空气的热交换^[2]. Han 等研究了内管为波纹管的套管

传热^[3]. 张俊霞等研究了流体为水的套管换热器换热特性. 本文根据计算流体力学(CFD)方法,对套管采暖系统及采暖后净化间内的温度场进行模拟,以及不同围护保温效果下的温度场进行模拟研究,对比了外墙、房顶、门在不同保温效果下的采暖效果. 近年来随着计算机技术与 CFD 技术的发展,CFD 技术广泛地应用在室内采暖模拟领域. Rodrigues 等对地热采暖的室内热环境进行了模拟研究^[5]. 王谦等模拟了采用风机盘管热风系

统采暖后的温室热环境^[6]。但对基于套管采暖系统的生物质气化站热环境分析还未见报道,本文通过对套管系统采暖后的净化间热环境进行模拟,得出了在采取一定保温措施下可达到防冻要求,证明了该方法的可行性,并为生物质气化站的防冻改造提供参考。

1 套管采暖系统

1.1 套管采暖生物质气化站结构

生物质气化站由气化间与净化间构成:气化间包括气化装置、干式除尘器与喷淋式除尘器,而净化间则包括其余的湿式净化装置。两房间由防火墙分隔。位于气化间内的气化装置在生产过程中由于生物质气化反应会产生大量的热,高温气体直到进入喷淋式除尘器后才会冷却,所以处于干式除尘器与喷淋式除尘器之间的管道在生产过程中因为高温气体会使得其管壁处于持续高温状态。经测量其外壁温度可达到 600 K。如图 1 所示,本研究将套管设置在该段管道上,然后通过室外的轴流风机将冷空气经由进气管通入套管内,利用高温管道的外壁进行加热,加热后的空气经由出气管送入净化间内。

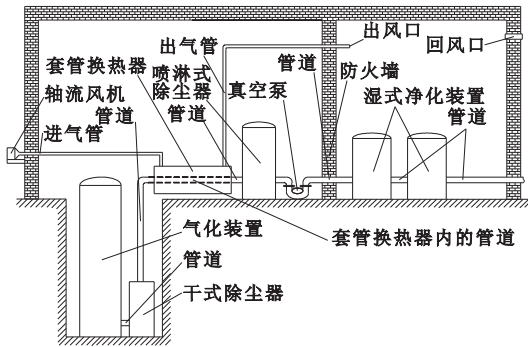


图 1 带有套管采暖系统的生物质气化站
Fig. 1 Biomass gasification station with double-tube heating system

1.2 简化后的模拟区域

由于气化间与净化间之间的防火墙隔热性能非常好,以及出气管采用了岩棉保温材料,因此这两部分均可简化为完全隔热的部分;气化间内一般为室温,对进气管内的来自于室外的冷空气可视为没有影响。所以模拟区域可略去气化间其余部分,只保留进气管、套管、出气管及净化间。本文以沈阳市闫家村生物质气化站为例进行研究,该站净化间布局、尺寸及套管采暖系统尺寸如图 2 所示。

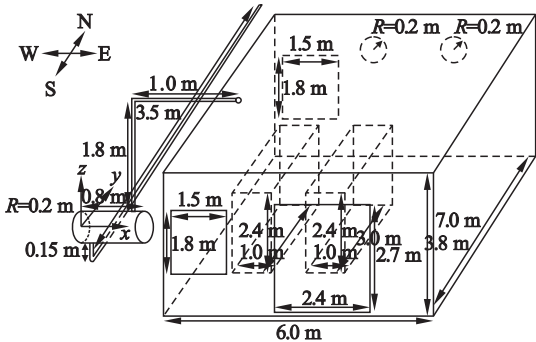


图 2 模拟区域及各部分尺寸
Fig. 2 Simulation area and size of each part

其中,湿式净化装置简化为立方体,进气管与出气管的管径均为 0.1 m;出气管有 0.1 m 长的部分位于净化间内;净化间的南北墙有两扇对称的窗户;门位于南墙,两个回风口位于北墙。

2 套管采暖系统 CFD 模拟模型

2.1 基本控制方程

该采暖系统通过轴流风机将室外的空气通入套管内加热后再通入净化间采暖,在净化间内是通过强迫对流的方式来进行热量的传递,因此在模拟区域内不可避免会引起湍流。所以选择在涉及湍流相关计算时具有较好收敛性与较高精确度的 $k-\varepsilon$ 模型。在模拟区域内的空气流动与传热满足以下方程^[7]:

连续性方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = \\ \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = \\ \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \\ \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \beta (T - T_{\text{ref}}). \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{q}{C_p} + \frac{\lambda_{\text{eff}}}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

湍流能量耗散方程

$$\frac{\partial(\rho u K)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v K)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w K)}{\partial z} = \Gamma_K \left(\frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial z^2} \right) + S_K.$$

(4)

湍流能量耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \Gamma_\varepsilon \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) + S_\varepsilon.$$

(5)

2.2 求解设置与网格划分

本文采用 Fluent6.3 软件进行生物质气化站套管采暖的模拟仿真,并使用 Gambit2.4.6 作为前处理软件进行网格划分.采用二阶迎风格式离散偏微分方程组,压力速度耦合使用 SIMPLE 算法.采用四面体网格进行建模,将模拟区域分为 2 个部分,进气管、套管与出气管为第一部分,净化间为第二部分.第一部分区域内空气流速大、流动复杂,故对该部分网格进行加密,采用 0.009 m 的网格,第二部分采用 0.075 m 的网格.最终第一部分共生成 928 528 个体网格,第二部分共生成 1 766 058 个体网格,全部模拟区域共计 2 694 586 个体网格.

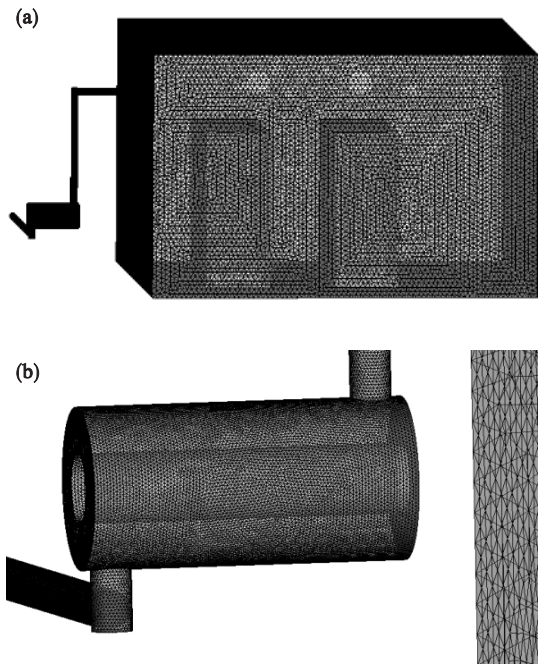


图 3 全部模拟区域及加密部分的网格划分
Fig. 3 Mesh of the whole simulation area and the refined area
(a)—全部模拟区域的网格划分;
(b)—加密部分的网格划分.

2.3 边界条件与初始条件

将进气管的进气口面设为 velocity inlet,两个回风口设置为 outflow,出气管末端的出风口与净

化间相交的面设置为 interface,其余面均设置为 wall.如 1.2 节所述,套管内管管壁视为恒温发热壁面,进气管、套管、出气管的壁面、防火墙与地板可视为绝热,东墙、南墙、北墙、房顶、门、窗在模拟时考虑热量由这些围护向室外传递,并同时考虑该壁面外表面也就是室外的对流及辐射对热耗散的影响.为保障模拟结果的实际应用,参数设置参照沈阳市闫家村生物质气化站的实际情况,该站墙体采用一般建筑用砖,无保温层,房顶为单层铁板,无保温层,门为普通卷闸门,窗为单层玻璃窗.气象条件取沈阳冬季平均风速及历年冬季最低气温.主要参数如表 1 所示^[8-10].

表 1 主要参数设置
Table 1 Basic parameters settings

参数	数值			
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	墙	房顶	门	窗
	1 600	7 854	7 900	2 700
发射率	墙	房顶	门	窗
	0.95	0.8	0.2	0.9
厚度/m	墙	房顶	门	窗
	0.38	0.03	0.005	0.01
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	墙	房顶	门	窗
	840	434	477	840
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	墙	房顶	门	窗
	0.69	60.5	14.9	0.78
室外温度/K	243.15			
套管内管壁温度/K	600			
室外对流换热系数 $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	17.48			

由于整个模拟区域内温度变化较大,而空气的大部分参数也会随着温度的变化而变化.因为模拟区域的温度变化区间在 243.15 ~ 600 K 之间,查表可知在该范围内空气的比热容 c 基本保持不变,可设置为常数;密度 ρ ,导热系数 λ ,动力黏度 μ 则可根据查表数据^[8]拟合成用温度 T 的多项式来表示,如表 2 所示.

表 2 空气参数设置
Table 2 Parameters settings of air

参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$3.72 - 1.42 \times 10^{-2}T + 2.32 \times 10^{-5}T^2 - 1.38 \times 10^{-8}T^3$
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 013
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$1.17 \times 10^{-3} + 9.11 \times 10^{-5}T - 2.26 \times 10^{-8}T^2 - 1.88 \times 10^{-6} + 9.17 \times 10^{-8}T - 9.44 \times 10^{-11}T^2 + 5.28 \times 10^{-14}T^3$
$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	

初始条件为进气管进气口处空气流速 10 m/s,方向平行于进气管;室外空气温度 243.15 K,净化间初始温度为 243.15 K.

3 数值模拟结果与分析

文献 [46] 的模拟与实验结果证明了本文所用模拟方法对于净化间热环境模拟结果的可靠性. 本文所解决问题为生物质气化站冬季防冻问题, 因此在模拟结果中只考虑温度场的分布.

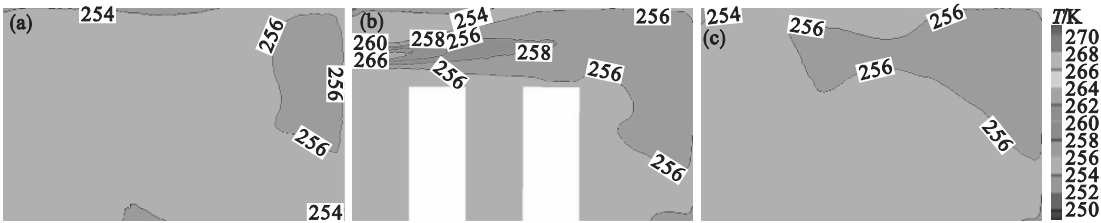


图 4 未采取保温措施的温度场分布
Fig. 4 Distribution of temperature field without adopting heat preservation measures
(a)— $y = 1.5\text{ m}$; (b)— $y = 0$; (c)— $y = -1.5\text{ m}$.

显著提高, 但均不能达到 273.15 K 以上的防冻要求. 由图 4b 可知, 房间顶部区域比房间底部区域的温度要高, 这是因为顶部区域正对着出风口, 而净化装置又位于房间底部区域, 因此净化装置所在的区域反而是房间内温度相对较低的部分. 但根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB50019—2003) 第 4.6.6 条规定, 出风口高度不宜低于 3.5 m , 因此不能通过调整出风口的位置来提高净化装置附近的温度. 而导致温度低的另一个原因是该房间并未采取任何保温措施, 由图 4a、图 4c 可知, 房间左下侧的温度偏低, 这是因为净化间的门设置在房间的中部 (如图 2 所示). 而门采用的是普通卷闸门, 隔热效果很差, 导致净化间整体温度较低, 并且净化装置附近温度更低. 另外, 图 4a 相较于图 4c 的低温区域范围更加靠近房间的东侧是由于在房间北侧的墙上设置了回风口. 因此, 需要改善净化间的保温效果来提高采暖后的温度以达到采暖要求.

3.2 采取保温措施的净化间采暖效果分析

对于该生物质气化站净化间的外部围护采取

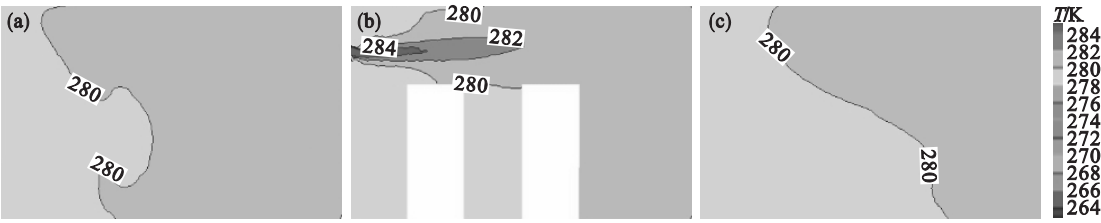


图 5 采取保温措施后的温度场分布
Fig. 5 Distribution of temperature field with adopting heat preservation measures
(a)— $y = 1.5\text{ m}$; (b)— $y = 0$; (c)— $y = -1.5\text{ m}$.

由图 5 可知采取保温措施后, 净化间内温度显著提高, 最低温度达到 278 K 以上, 由于采用了

3.1 未采取保温措施的净化间采暖效果分析

生物质气化站净化间防冻涉及到的是装置的防冻问题, 所以在温度场分布的区域选取上主要考虑净化装置附近区域, 这里选取 xoz 面, 并将 $y = -1.5\text{ m}$ 、 $y = 0$ 、 $y = 1.5\text{ m}$ 三处的面作为参考, 该三个面的温度场如图 4 所示.

由图 4 可知, 采暖后净化间内的温度得到了

如下保温措施: 外墙与房顶外装设厚度为 0.1 m 的保温层, 门改为双开式保温门. 采取保温措施后的围护参数如表 3 所示^[8-10].

表 3 采取保温措施后的参数设置 Table 3 Settings of parameters after adopting heat preservation measures			
参数	数值		
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	墙	房顶	门
	1 277	1 851	1 373
发射率	墙	房顶	门
	0.9	0.9	0.3
厚度/ m	墙	房顶	门
	0.48	0.13	0.074
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	墙	房顶	门
	936	1 100	1 256
$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	墙	房顶	门
	0.13	0.04	0.15

将相关参数按照表 3 进行修改后, 得出计算结果, 同样将 xoz 面 $y = -1.5\text{ m}$ 、 $y = 0$ 、 $y = 1.5\text{ m}$ 三处的平面作为参考. 其温度分布如图 5 所示.

保温门, 使得房间内的温度分布较未采取保温措施
(下转第 894 页)