

文章编号:1007-6735(2009)03-0251-04

# 天然气加热炉结构及其传热特性分析

郭 韵<sup>1</sup>, 曹伟武<sup>2</sup>, 严 平<sup>2</sup>, 于彩霞<sup>1</sup>, 钱尚源<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 天然气加热炉作为一种特殊的炉型形式, 是天然气应用系统中不可缺少的设备. 针对天然气加热炉的结构, 其冷源和热源在筒体内均呈偏心布置. 使用双极坐标系对圆筒体内加热元件偏心布置时的自然对流换热进行了研究和分析. 结果表明, 加热元件下偏心布置时, 在筒体内的流动和传热状况最好.

**关键词:** 天然气加热炉; 偏心布置; 自然对流; 双极坐标系

**中图分类号:** TE 963 **文献标志码:** A

## Structure and heat transfer analysis on natural gas heater

GUO Yun<sup>1</sup>, CAO Wei-wu<sup>2</sup>, YAN Ping<sup>2</sup>, YU Cai-xia<sup>1</sup>, QIAN Shang-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** As a special type of heater, natural gas heater is indispensable equipment in natural gas application system. According to the structure of natural gas heater, its heating surface and cooling surface are all eccentrically-oriented. The mathematic analysis of natural convection in eccentric cylinder was conducted, the medium flow and temperature field were numerically simulated in the bipolar coordinate system. The result indicates that the flow and heat transfer would perform the best when the heating surface is in the lower half of the cylinder.

**Key words:** natural gas heater; eccentrically-oriented collocation; natural convection; bipolar coordinate

天然气在开采、输送及应用过程中, 常常需要加热. 因为天然气中含有水合物, 在长途输送过程中, 为防止由于天然气温度过低而导致水合物析出凝结成固体, 从而堵住管道设备引起事故<sup>[1]</sup>, 因此需要加热; 此外在天然气应用过程中, 往往需要对其减压, 而压降较大时会导致天然气温降过大, 也需要加热; 更有由于工艺需要而需天然气保持一定温度, 则更需要加热. 因此在天然气减压系统和供气系统中常设置加热设备, 可见天然气加热炉是天然气输送应

用系统中不可缺少的重要设备. 根据天然气加热炉的结构可知, 筒体内的火筒、烟管、盘管在筒体内均呈偏心布置. 故本文对圆筒体内加热元件偏心布置时介质的流场和传热进行分析.

## 1 结构及工作过程

天然气加热炉的外观结构为卧式金属圆筒体, 内设火筒、烟管及盘管, 通过中间载热介质来传递热

收稿日期: 2008-04-11

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(P1401); 上海市科委重大科技资助项目(043012013)

作者简介: 郭 韵(1977-), 女, 讲师. E-mail: graceguo1976@126.com 工作单位: 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620

量,如图1所示.

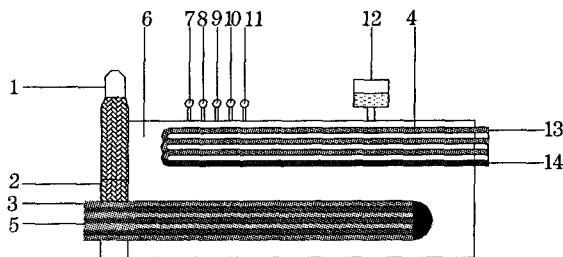


图1 天然气加热炉结构示意图

Fig.1 Scheme of natural gas heater

1. 烟囱 2. 前烟箱 3. 烟气出口 4. 盘管 5. 火筒、烟管 6. 载热介质  
7. 温度计 8. 温度传感器 9. 液位计 10. 液位传感器 11. 压力表  
12. 膨胀箱 13. 天然气进口 14. 天然气出口

天然气加热炉的工作过程为,燃料燃烧产生的热量经过火筒和烟管传递给中间载热介质,中间载热介质再加热盘管内的天然气.在整个传热过程中,中间载热介质与火筒、烟管及盘管的传热形式为自然对流换热,而产生自然对流换热的根本原因是不均匀的温度场造成了不均匀的密度场,由此产生的浮升力成为运动的动力.所以,对中间载热介质在筒体内的温度分布及流动的研究是天然气加热炉筒体内传热理论的重要环节.

## 2 自然对流分析

圆筒体中自然对流的研究是传热学中的经典课题之一.圆筒体按内圆在筒体内布置形式的不同可分为同心圆筒体、最大偏心圆筒体及偏心圆筒体3种结构形式,在研究圆筒体内自然对流换热时,因内圆布置位置的不同会采用不同的坐标系来进行研究,如极坐标、正切圆坐标和双极坐标等<sup>[2-4]</sup>.

### 2.1 基本方程的建立

#### 2.1.1 假设条件

为了研究方便,将偏心圆筒体内介质的物性作为定值,按定物性模型处理,并假设:a. 偏心圆筒体内介质的流动是二维流动;b. 介质黏性耗散产生的耗散热可以忽略不计;c. 介质采用 Boussinesq 近似,在动量方程和能量方程中,除了浮力项的密度外,其余各项的密度均作为不可压缩的常物性处理.

#### 2.1.2 坐标系的选择

由于在直角坐标系下偏心圆筒体的几何形状是不规则的,为了使边界条件简化,引入双极坐标系.将不规则的偏心区域化为规则的矩形区域,从而简化流场的几何条件.双极坐标系是一种正交曲线坐

标系, $\xi$ 和 $\eta$ 为双极坐标系下的坐标分量, $\xi$ 从0到 $2\pi$ , $\eta$ 从 $-\infty$ 到 $+\infty$ ;可以覆盖全平面; $e$ 为偏心距,即两圆圆心的距离,如图2所示.

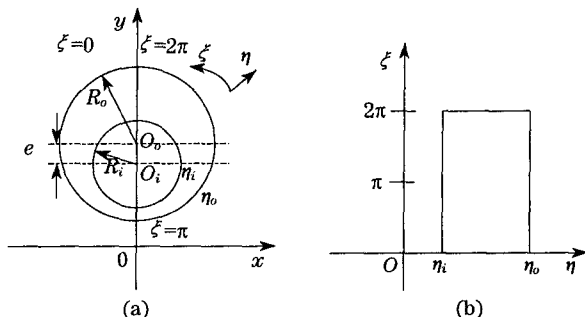


图2 坐标系转换简图

Fig.2 Schematic of coordinates transformation

双极坐标和直角坐标的转换关系<sup>[5]</sup>为

$$x = \frac{c \sin \xi}{\cosh \eta - \cos \xi}, \quad y = \frac{c \sinh \eta}{\cosh \eta - \cos \xi} \quad (1)$$

式中, $c$ 为双极坐标参数.

经过双极坐标变化后,将不规则的偏心圆区域化为了规则的矩形区域,如图2所示.从而大大简化了流场的几何条件,为求解圆筒体内加热元件偏心布置时介质的流动和温度分布提供了有利条件.

#### 2.1.3 控制方程

为求得对流空间的传热特性,控制方程中的压力梯度是不必求知的,故用“流函数-涡量法”<sup>[6]</sup>求解控制方程组,引入流函数 $\psi$ 和涡量 $\omega$ ,并定义为

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v, \quad \omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

在给出偏心圆筒体自然对流的支配方程组之前,先要将方程无量纲化,定义以下无量纲参数.

$$\text{特征长度} \quad L = R_o - R_i \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{e}{L} \quad (4)$$

式中, $R_o$ 、 $R_i$ 分别为圆筒体和加热元件的半径; $\epsilon$ 为偏心圆环的偏心度.

$$\text{温度} \quad \phi = \frac{T - T_o}{T_i - T_o} \quad (5)$$

式中, $T_o$ 、 $T_i$ 为筒体内壁面和加热元件外壁面的温度.准则数为

$$\text{格拉晓夫数} \quad Gr = \frac{g\beta(T_i - T_o)L^3}{\nu^2} \quad (6)$$

$$\text{普朗特数} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (7)$$

$$\text{瑞利数} \quad Ra = grPr \quad (8)$$

式中,  $g$  为重力加速度;  $\beta$  为介质的体积膨胀系数;  $\nu$  为介质的运动黏度;  $\alpha$  为介质的热扩散系数。

二维偏心圆筒体自然对流问题在双极坐标系下的控制方程<sup>[4]</sup>为

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (9)$$

$$\nabla^2 \omega = \frac{1}{Pr} \left[ \frac{1}{h} \left( U \frac{\partial \omega}{\partial \xi} + V \frac{\partial \omega}{\partial \eta} \right) \right] + Ra \left[ - \left( \sin \alpha \frac{\text{sh} \eta \sin \xi}{\alpha} + \cos \alpha \frac{\text{ch} \eta \cos \xi - 1}{\alpha} \right) \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \left( \sin \alpha \frac{\text{ch} \eta \cos \xi - 1}{\alpha} - \cos \alpha \frac{\text{sh} \eta \sin \xi}{\alpha} \right) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] \quad (10)$$

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{h} \left( U \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + V \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) \quad (11)$$

其中  $U = \frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}, V = -\frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial \xi}$

式中,  $\alpha$  为  $x$  轴方向与重力加速度方向的夹角;  $h$  为拉梅系数, 即

$$h = h_\eta = h_\xi = \frac{c}{\text{ch} \eta - \cos \xi}$$

边界条件

当  $\eta = \eta_i$  时,  $\psi = U = V = 0, \phi = 1$

当  $\eta = \eta_o$  时,  $\psi = U = V = 0, \phi = 0$

## 2.2 计算方法

用上述数学模型研究如图3所示. 天然气加热炉筒体内加热元件下偏心布置时介质水的流动与传热. 当  $Ra = 5.6 \times 10^5$  时, 小于  $10^6$ , 介质流动处于层流状态, 故选用层流模型. 通用控制方程的离散采用有限体积法, 控制区域内网格的划分采用四边形结构网格. 控制容积界面的物理量采用二阶迎风差分格式求得, 离散后的控制方程采用耦合式解法, 即同时求解连续方程、动量方程及能量方程的耦合方程组, 联立求解出各个变量.

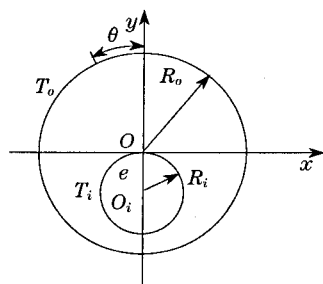


图3 物理模型图

Fig.3 Physical model

由于介质水的温度变化不太大, 为了得到更好地收敛速度, 采用 Boussinesq 近似, 即除了动量方

程的浮力项之外, 在动量方程和能量方程中将密度看成常数. 计算温度条件依据加热炉在实际运行时的某一温度工况, 筒体的  $T_o = 323$  K, 加热元件的  $T_i = 368$  K. 在温差小于 50 K 时, 采用 Boussinesq 近似所带来的相对误差小于 4%. 为了提高计算效率, 可以采用 Boussinesq 近似.

## 2.3 计算结果与分析

图4为介质水的等温线和流动矢量图. 从图4(a)中可以看出, 介质水在圆筒体内的温度分布是不均匀的. 介质水会沿着加热元件外壁面上升, 附着在加热元件外壁面的导热层逐渐增厚(在加热元件顶部导热层最厚), 在浮升力作用下, 热水流在加热元件顶部分离并继续上升, 形成热羽毛状温度分布, 当热水流上升碰到筒体内壁时被冷却, 同时沿着筒体内壁下行, 并附着在壁面上形成导热层, 导热层随水流下行而增厚, 在接近筒体底部时, 由于空间变窄, 使筒体内壁导热层与加热元件外壁导热层重叠, 形成纯导热区. 由此可知, 传热温差较小时, 在大筒体内尽管会出现微弱的自然对流, 但在局部区域仍会出现导热, 有流动死角区域, 这对筒体内的传热效果将产生较大影响. 流体介质温度较高的部分主要分布在加热元件外壁面附近及加热元件顶部.

介质水在筒体内垂直方向上出现了明显的温度分层现象, 在径向方向上没有明显的温度逆转, 仅在靠近筒体内壁面处才出现了温度逆转, 所以从流动矢量分布图来看, 流动部分主要分布在靠近加热元件外壁面和筒体内壁面区域及加热元件顶部中心线上.

本文还通过筒体内加热元件不同布置位置时, 在不同角度上介质水的局部换热系数来比较换热特性.

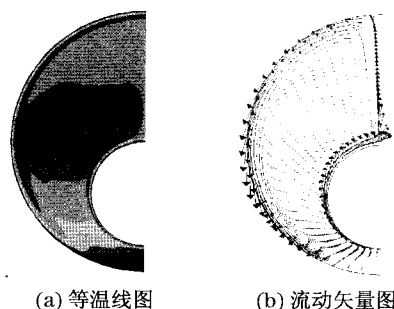
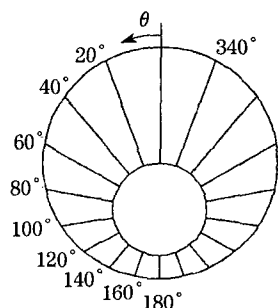


图4 等温线图和流动矢量图

Fig.4 Isotherms profile and flow vectogram profile

局部换热系数  $h_\theta$  定义为: 在加热元件外壁面的不同角度上, 热流密度与壁面温度和介质水温度之差的比值. 如图5所示(见下页),  $\theta$  为加热元件中心辐射的半径与  $y$  轴正向间的夹角.

图5 定义的 $\theta$ 角度Fig.5 Definition of  $\theta$ 

经计算得到加热元件外壁面在不同角度上的局部换热系数,如图6所示,从图中可以看出,4种布置情形的最大局部换热系数均出现在加热元件顶部,因为加热元件顶部热流密度最大,且壁面温度与介质水温度之差较小;随着 $\theta$ 角度的增大(在 $1 \sim 180^\circ$ 范围内),局部换热系数逐渐变小,因为从加热元件顶部至底部,介质水温是逐渐降低的,导致加热元件壁面温度与介质水温度之差变大;而在这4种布置情形中,下偏心布置时,不论哪个角度的局部换热系数都高于另外3种布置时的相同角度上的局部换热系数,因此认为加热元件下偏心布置时筒体内的传热效果最好,亦即其自然对流状况最好。总而言之,由于加热元件附近的水温较高,因此水流均沿加热元件外壁向上流动,然后脱离顶部继续向筒体内壁顶部流动。当下偏心布置时,加热元件顶部与筒体顶部之间有较大空间,介质水的流动与换热得以充分发展,而当加热元件上偏心、右偏心或同心布置时,由于加热元件顶部与筒体顶部间的空间相对狭

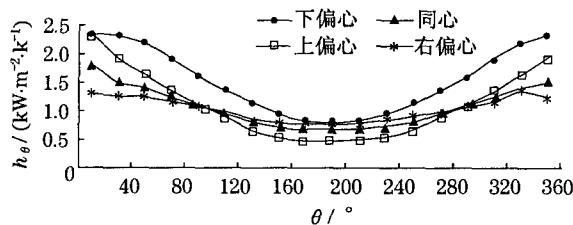


图6 加热元件外壁面在不同角度上的局部换热系数

Fig.6 Local heat transfer coefficient of outer space of heat source under different  $\theta$ 

小,介质水的流动与换热没有充分发展,介质水在筒体内形成自然对流的趋势不如下偏心布置。所以下偏心布置时介质的平均温度要高于其他情形,更利于介质的换热。

### 3 结 论

天然气加热炉传热流动的理论研究,采用了双极坐标下圆筒体内加热元件偏心布置时自然对流的数学描述,将不规则的偏心区域化为了规则的矩形区域,简化了流场的几何条件。通过对筒体内加热元件偏心布置时自然对流的计算分析,得出以下结论:

a. 介质水沿着筒体垂直方向上出现明显的温度分层现象,温度较高的区域主要分布在加热元件的顶部,流动仅在靠近加热元件及筒体的壁面附近较为活跃。

b. 由于加热元件下偏心布置为自然对流提供了发展空间,介质水的流动与换热得以充分发展,自然对流换热效果要好于其他3种情形。所以,对于天然气加热炉的加热元件——火管和烟管来说,下偏心布置时筒体内的流动和传热状况最好。

#### 参考文献:

- [1] 朱利凯. 天然气处理与加工[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [2] CHO C H, CHANG K S. Numerical simulation of natural convection in concentric and eccentric horizontal cylindrical annuli [J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104 (6): 624 - 630.
- [3] 王健敏, 何杰. 最大偏心圆环空间自然对流传热的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2003, 20(5): 616 - 620.
- [4] WASSIM C, SEUNG J S, MICHEL D. Numerical study of the boussinesq model of natural convection in an annular space; having a horizontal axis bounded by circular and elliptical isothermal cylinder[J]. Journal of Applied Thermal Engineering, 2002, 22(4): 1 013 - 1 025.
- [5] 秦裕琨. 炉内传热[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [6] 董韶峰, 李荫堂, 刘艳华. 涡量-流函数法模拟不同高宽比和角度的腔内自然对流[J]. 低温与特气, 2003, 21 (6): 16 - 21.