

用于低温余热回收系统热管换热器 传热性能的数值模拟

王芹, 王晓燕, 刘铁铮, 张俊*, 王红
(内蒙古工业大学化工学院, 内蒙古呼和浩特 010051)

摘要:采用CFX软件Fluent模拟了用于低温余热回收的重力热管内的相变情况及充液率、热管长度比、管中心距对热管换热器传热性能的影响。模拟结果显示,水量一定时,加热段与冷凝段长度相同的热管在不同充液率条件下的传热特性,高充液率的传热能力优于低充液率的传热能力,适宜的充液率为60%~70%。当充液率一定时,加热段的长度小于冷凝段的长度有利于热管传热。当充液率及管长一定时,热管换热器的传热系数随管中心距的增大而减小。将热管换热器数值模拟的总传热系数与理论计算的结果进行对比,实现了特定体系热管换热器的结构优化。

关键词:热管;加热段;冷却段;充液率;传热;管中心距

中图分类号:中图分类号:TK172.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)11-0151-04

Numerical simulation of heat transfer performance for low temperature waste heat recovery system of heat pipe heat exchanger

WANG Qin, WANG Xiao-yan, LIU Tie-zheng, ZHANG Jun*, WANG Hong

(Chemical Engineering College of Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The influences of phase change, filling rate, length ratio of heat pipe and tube center distance in the gravity assisted heat pipe on the heat transfer performance of low temperature waste heat recovery system are simulated by using Fluent of CFX software. The results show that when the water volume is constant and the filling rate is 60% - 70%, for the heat pipe with the same heating and condensation section, the high filling rate is beneficial to obtain the superior heat transfer capability. When the filling rate is constant, the shorter heat section than that of condensation one is helpful to heat transfer of heat pipe. When the filling rate and pipe length are constant, the heat transfer coefficient will decrease as the increase in tube center distance. The structure of specific heat pipe exchanger is optimized through the comparison of total heat transfer coefficient and theoretical calculation result of heat pipe exchanger's numerical simulation.

Key words: heat pipe; heating section; condensation section; filling rate; heat transfer; tube center distance

在过程工业中,众多的反应过程、用能设备、热能的转换产生大量的余热余能,但是,我国能源利用率低,余热余能资源的回收率仅占约30%而且仅限于高位热能的回收,而低温余热占工业废热总值约60%。热管是一种高效传热元件,具有结构简单、重量轻、体积小、无运动部件及维护费用低等特点,广泛运用于铁路防冻、空调系统及换热设备等^[1]。因此,研究热管技术在低温余热回收应用中具有重要的意义。

在不同的应用体系中,热管的几何尺寸、充液率、排列方式对热管换热器总传热性能、换热器内部流体温度场及管内蒸汽温度场产生影响,因而通过大量变量的最佳优化组合实现在一定工艺体系中热管换热器的结构优化是目前众多研究者的主要研究内容。

数值模拟研究方法为设计换热器提供了强有力的手段,1956年美国的Cotter针对热管内流动和传热的研究提出热管的一维模型^[2]、二维模型^[3]和三维模型^[4]。近年来,通过建立模型来分析两相流的流动情况及换热特性成为热管应用领域的研究热点^[5-6],主要的研究内容集中在利用CFX软件、Fluent软件建立热管的三维模型模拟热管单相流的流动情况,采用VOF模型模拟管内的相变现象,以及模拟热管的结构尺寸、充液率等因素对热管传热的影响,从而实现热管的优化设计^[7-10]。

前期工作确立了热管换热器回收钢铁厂低温废水的工艺方案,并采用理论分析对热管换热器进行了结构设计,本文中该热管换热器中单根热管为研究对象,建立二维两相流模型,考虑最佳充液率及热管加热段与冷凝段的长度,并考虑管中心距的大

小对热管换热器传热性能的影响。采用 CFX 软件 Fluent 模拟热管内的蒸发、冷凝现象及热管的速度场、温度场及热管的传热系数,并将模拟结构与理论设计进行比较,实现特定体系的热管换热器的实际优化。

1 传热模型的建立

1.1 单根热管的传热模型

本文中采用的物理模型为铜管-水重力热管,该热管的形状为圆形,并将单根热管简化为二维模拟。如图 1(a)所示,沿整个热管从下往上依次为加热段、绝热段和冷凝段,长度分别为 2、1、2 m。热管的外径 D_0 为 32 mm,内径为 27 mm,管内充液率为 50%。在 Gambit 中进行网格划分,整个计算区域选用的四边形网格如图 1(b)所示。壁面层进行网格加密,以确保计算精度,如图 1(c)所示。蒸发段和冷凝段壁面边界条件设置为恒温,其他各面的边界条件设置为绝热。

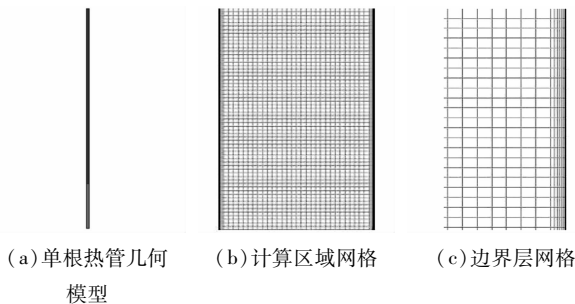


图 1 热管计算模拟网格示意图

本文中计算选用流体体积函数模型 (VOF) 来捕捉气液相间界面,每个控制单元所占的体积分数之和为 1,采用 N-S 控制方程,用户自定义 UDF 来实现热管内的蒸发和冷凝现象的模拟。热管冷热侧流体分别采用 SIMPLE 算法计算压力-速度耦合项;能量方程与动量方程采用 QUICK 算法,整个过程为瞬态计算。

1.2 热管换热器的传热模型

参考相关文献,建立热管换热器的二维模型,热管排列方式采用倒三角,换热器腔体采用三角形网格划分,热管腔体采用四边形网格划分,以确保计算精度。边界条件的设置:入口边界条件采用速度入口边界条件 (velocity - inlet),进口速度设置为 0.5 m/s,水的温度设置为 373 K;出口边界条件采用出流边界条件 (outflow);其余边界条件设置为恒温壁面 (WALL),管的壁厚都设置为 0.002 5 mm,热管的材料设置为 steel,其他参数保持默认。该模型

选择 Eulerian Model,通过编写定义函数 (UDFs) 来实现相中不同组分的交换源项。计算过程中选用 unsteady 流动,计算用到的方程是二维、非稳定、常物性的连续方程、动量方程、能量方程,热管内部处理为内热源耦合。热管换热器的几何模型如图 2 所示。

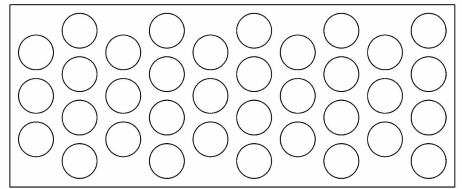


图 2 热管换热器的几何模型

2 结果与讨论

2.1 充液率对热管传热性能的影响

充液率对热管传热性能有重要的影响。热管中工作介质过多、过少都会使热管工作性能变差,适量的工作介质才能充分发挥热管传热性能。总结已有的研究可知,合适的充液率在 40% ~ 75%。因此,本次模拟选用 50% ~ 70% 的充液率对热管的传热性能进行研究。对热管加热段、绝热段、冷凝段长度分别为 2、1、2 m,充液率分别为 50%、60%、70% 进行模拟。

由图 3 可知,热管工质的速度随着充液率的增加而减小。图 3(a)、(b)、(c) 的最大速度依次为 0.70、0.63、0.60 m/s。热管加热段中工质的速度都呈上升趋势,绝热段中工质速度保持稳定,冷凝段中工质的速度呈下降趋势。加热段中工质的速度出现不稳定,由于发生相变过程,出现漩涡,导致速度不够稳定。

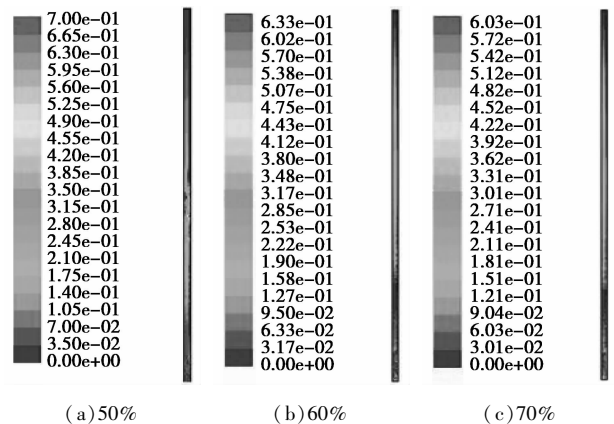


图 3 热管不同充液率的速度云图

由图 4 可知,热管工质的温度随着充液率的增

加而减小,与图 3 的速度云图保持一致。

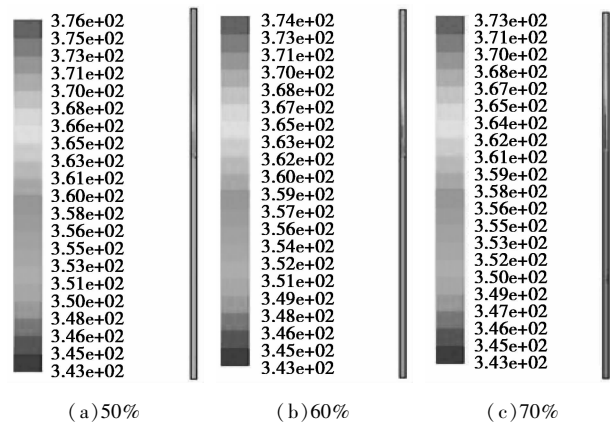


图 4 热管不同充液率的温度云图

从图 5 可以看出,当充液率为 50% ~ 60% 时,冷凝段的传热系数呈上升趋势;当充液率为 60% ~ 70% 时,冷凝段的传热系数变化不大。因此,最佳充液率为 60% ~ 70%。由于流速降低,导致管壁面液膜阻力减小,有利于冷凝液沿管壁下流,这时冷凝段中管壁面的液膜厚度减小,热阻降低,从而使冷凝段的传热系数上升。

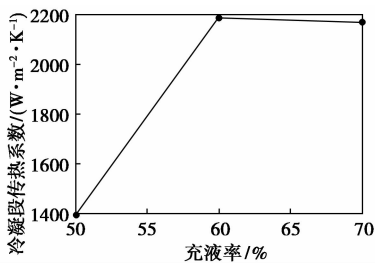


图 5 冷凝段的传热系数

2.2 加热段、冷却段长度分配对重力热管性能的影响

热管的传热性能受加热段与冷凝段长度分配的影响。因此,在设计热管时,合理选择热管加热段与

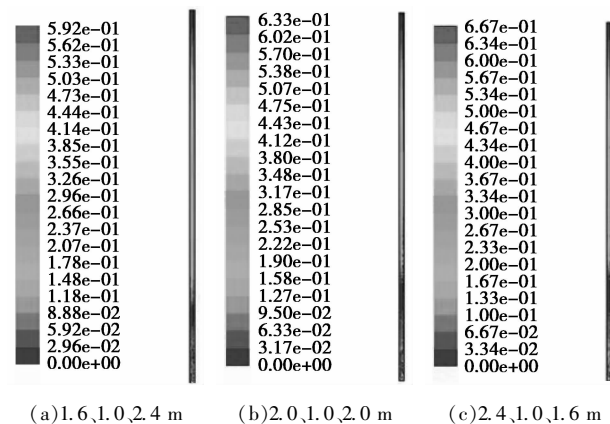


图 6 热管工质的速度云图

冷凝段的长度非常重要。对热管充液率为 60%,其加热段、绝热段、冷凝段长度分别为图 6(a) (1.6、1.0、2.4 m)、图 6(b) (2.0、1.0、2.0 m)、图 6(c) (2.4、1.0、1.6 m) 进行模拟。

由图 6、图 7 可知,充液率一定时,随着热管加热段长度的增加,则热水量也随着增加,从而导致热管中工质的速度、温度呈上升趋势。

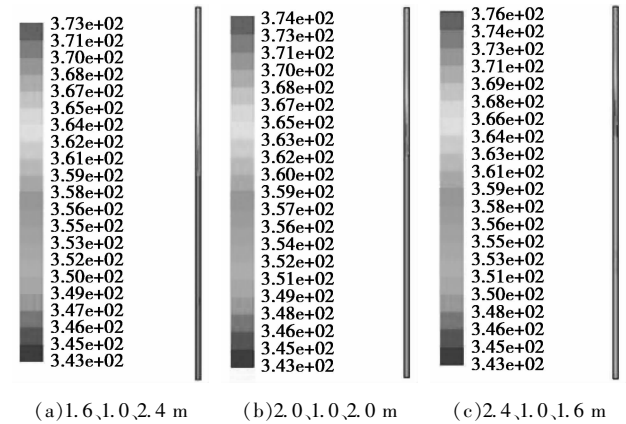


图 7 热管工质的温度云图

由图 8 可知,充液率一定时,随着冷凝段管长的增加,冷凝段的传热系数逐渐上升。由于蒸发段长度的减少,其生成的蒸汽量比较少,从而单位时间内上升到冷凝段的蒸汽量少且流速低,这样就导致冷凝段液膜的阻力及厚度减少,有利于冷凝段的传热。热管加热段、绝热段、冷凝段长度分别为 1.6、1.0、2.4 m 时,有利于热管传热。

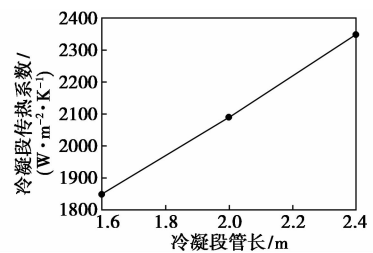


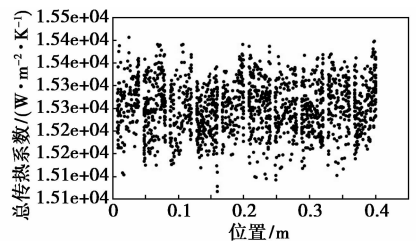
图 8 冷凝段的传热系数

2.3 管间距对热管换热器性能的影响

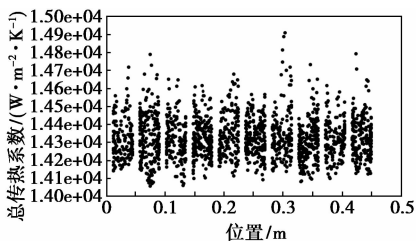
针对前面热管数值的模拟,得出最佳的热管参数:管外径为 32 mm,管内径为 27 mm,热管管长分别为 1.6、1.0、2.4 m。根据这些参数讨论管中心距对热管换热器性能的影响,图 9(a)、(b)、(c) 分别是管中心距为 40、45、50 mm 的热管加热段壁面传热系数。

通过图 9 可以看到,整个热管换热器中热管加热段表面传热系数的大小不随位移发生变化,说明热管在整个换热器中的传热效果比较稳定。热管加

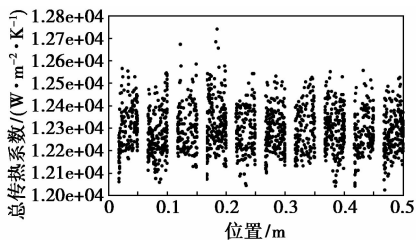
热段表面传热系数随着热管中心距的增大而逐渐减小,图 9(c)的传热效果最差。



(a) 40 mm



(b) 45 mm

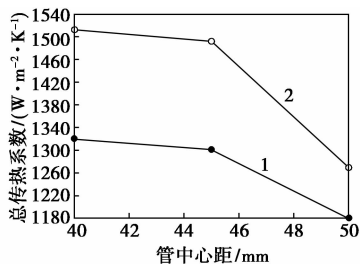


(c) 50 mm

图 9 热管加热段壁面传热系数

2.4 热管换热器理论计算与数值模拟的比较

通过前面确定参数为:管外径 32 mm,管内径 27 mm,热管管长分别为 1.6、1.0、2.4 m。同时对不同管间距的热管换热器传热性能进行数值模拟,并与理论计算对比分析,如图 10 所示。



1—理论计算;2—数值模拟

图 10 不同管中心距对热管换热器传热性能的影响

从图 10 中可知,理论计算得出热管换热器的传热系数与数值模拟得出的传热系数变化趋势一致,都是随着热管中心距的增加,传热系数逐渐降低。

理论计算的传热系数小于数值模拟出的传热系数的主要原因是,在模拟时,将热管换热器二维模型中的壁面设计为等温壁面,这样换热器中的热量就不会通过壳程壁面传入外界。热管中心距为 40 ~ 45 mm,热管换热器的传热系数下降得很慢,考虑到热管换热器总压降及维护清洗问题,选择管中心距为 45 mm。

3 结论

以钢铁厂废水处理工艺为研究对象,利用热管换热器回收低温废水余热,采用 FLUENT 软件对单根热管和热管换热器进行数值模拟计算,并与理论计算结果进行对比分析,实现了特定体系热管换热器的结构优化,优化后的结构参数为:管外径为 32 mm,管内径为 27 mm,热管加热段、绝热段、冷凝段长度分别为 1.6、1.0、2.4 m,热管中心距为 45 mm,管内充液率为 60%。

参考文献

- [1] 许玮玮,唐晓东. 低温余热回收升级利用技术综述[J]. 广州化工,2011,39(23):34-36.
- [2] Ho Chii-dong, Tu Jr-wei, Chuang Yu-jui, et al. Recycle effect on heat-transfer efficiency improvement in a double-pass parallel-plate heat exchanger under uniform wall fluxes[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2008,12(35):1344-1349.
- [3] Ma H B, Peterson G P. Temperature variation and heat transfer in triangular grooves with an evaporating film[J]. Thermophys Heat Transfer,1997,11(1):89-90.
- [4] Valérie Sartre, Mohamed Chaker Zaghoudi, Monique Lallemand. Effect of interfacial phenomena on evaporative heat transfer in micro heat pipes[J]. Int J Therm Sci,2009,39:498-504.
- [5] 袁达忠,马学虎. 两相闭式热虹吸管的流动与传热特性研究[J]. 高校化学工程学报,2008,22(4):557-562.
- [6] 焦波,邱利民. 重力热管蒸发段气液分布形式与换热能力分析[J]. 低温工程,2010,176(4):24-27.
- [7] Tiselj I, Mavko B, Hetsroni G, et al. Effect of axial conduction on the heat transfer in micro-channels[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2008,47(12/13):2551-2565.
- [8] Sandra C K De Schepper, Geraldine J Heynderickx, Guy B Marin. Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker[J]. Computers and Chemical Engineering,2009,33:122-132.
- [9] 汪双凤,西尾茂文. 加热段冷却段长度分配对脉动热管性能的影响[J]. 华南理工大学学报,2007,35(11):59-62.
- [10] 史启辉. 两相闭式热虹吸管强化传热实验研究[D]. 郑州:郑州大学,2007. ■