

螺纹管管内流动与传热的数值模拟

史以奇, 李 凌

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用数值模拟的方法对螺纹管管内的流动与换热情况进行了研究. 针对不同槽深螺纹管在不同雷诺数下内部的速度矢量场进行了对比分析, 详细研究了螺纹对管内两种流动方式及其对流动和换热的影响. 研究表明, 随着槽深 e 的增加, 旋流不断加强, 减薄边界层, 涡流引起的扰动也逐渐增强, 并加强了管内流体径向混合, 因而强化了螺纹管的换热能力. 但是当槽深 e 继续增加到一定程度时, 旋流的增强主要集中于对换热影响较小的中心区域, 而对换热影响较大的壁面附近的变化很小, 这时旋流对换热的强化影响很小; 此时涡流核心区又会逐渐形成死流, 从而弱化换热, 并且随着槽深 e 的增大, 死流区逐渐扩大.

关键词: 螺纹管; 螺旋流动; 传热; 数值模拟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Spirally Fluted Tubes

SHI Yiqi, LI Ling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The flow and heat transfer in spirally fluted tubes were investigated numerically. The velocity vector fields in spirally fluted tubes with different groove depths under different Reynolds numbers were compared. The influences of the thread groove on the two types of flows and heat transfers were investigated. It is found that the spiral flow is enforced with the increasing groove depth " e ", the disturbance caused by eddy is gradually enhanced and the heat transfer in the pipe also increases. However, when e rises up to a certain value, the enhancement of spiral flow concentrates mainly in the center region of pipes which has little effect on heat transfer. In the area near the wall where the flow type has a great influence on heat transfer, the change of spiral flow is small and therefore it has little effect on heat transfer enhancement. The center of the eddy becomes a 'still zone' which weakens the heat transfer. In addition, when e is kept increasing, the still zone enlarges.

Keywords: spirally fluted tube; spiral flow; heat transfer; numerical simulation

收稿日期: 2014-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476102)

第一作者: 史以奇(1989-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 数值传热. E-mail: yuqi1202@163.com

通信作者: 李 凌(1976-), 女, 副教授. 研究方向: 数值传热、强化传热. E-mail: lililing@usst.edu.cn

螺纹管因为制造简单、传热性能及机械性能好等优点,被广泛应用于冶金、动力、核能、制冷、石油化工、航空航天等各个领域,有大量文献对其强化换热机理进行了研究^[1-11].一般认为螺纹管的强化换热主要在于螺纹对流动产生的扰动,有研究发现螺纹对流动的扰动主要有两种表现:一方面螺纹对近壁处流体流动的限制作用使管内流体产生附加的螺旋流动;另一方面流体经过螺纹时会产生分离流动.邓颂九等^[12]根据前人和自己所做的湍流实验数据,推论出这两种流动方式对螺纹管内的传热强化起决定性作用.李向明等^[13]用氢气泡示踪法也证实了上述两种流动同时存在的推论.但以上两种流动方式的存在是在实验室观察得到的,对其机理的研究还极少,尤其是螺纹管的结构参数对流动方式及其对换热的影响还有待于进一步探讨.本文采用数值模拟方式,对不同雷诺数和不同槽深螺纹管内的流动和换热情况进行了分析,详细讨论了螺纹对流动方式和换热的影响.

1 物理及数学模型

以往研究^[1,12]认为,无量纲截距 p^* ($p^* = p/d$) 为 0.4~0.75 和无量纲槽深 e^* ($e^* = e/d$) 为 0.003~0.054 是螺纹管换热的最佳结构参数范围.本文据此选用截距 p 为 8 mm,槽深 e 分别为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 mm 的规格为 20×2 mm 钢管压制而成的螺纹管作为研究对象.图 1 为其结构示意图,其中 p 为截距, D 为外径, d 为内径, e 为槽深, t 为管壁厚度.

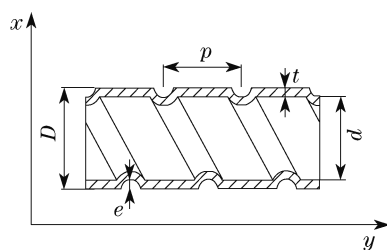


图 1 螺纹管结构示意图

Fig.1 Schematic of spirally fluted tubes

本文应用 fluent 软件进行模型研究,采用前处理软件 ANSYS ICEM 划分混合网格.为保证前几层网格中每层网格节点距离壁面高度基本一致,壁面附近采用棱柱网格,内部网格采用六面体为主的混合网格,如图 2 所示.

求解过程采用分离变量法的隐式求解,湍流模

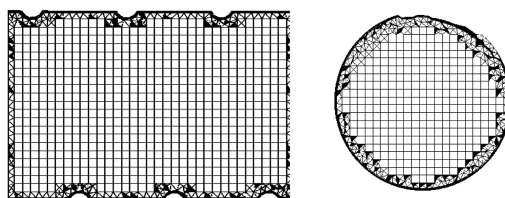


图 2 螺纹管网格示意图

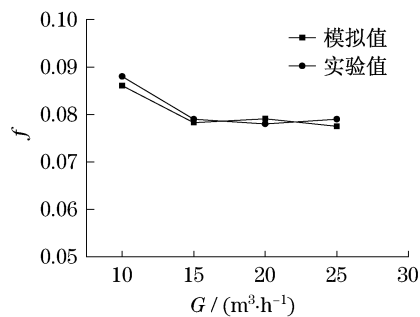
Fig.2 Grids in spirally fluted tubes

型采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,壁面处采取增强壁面函数处理.对动量方程和能量方程采用二阶迎风离散求解,压力和速度耦合采用经典的 SIMPLE 算法.空气进出口采用周期性边界条件,质量流量给定,壁面温度设为 $T_w = 393$ K 的恒壁温边界条件,空气在壁面处采用无滑移边界条件.空气温度设为室温,取值 295 K,物性假设为常物性.

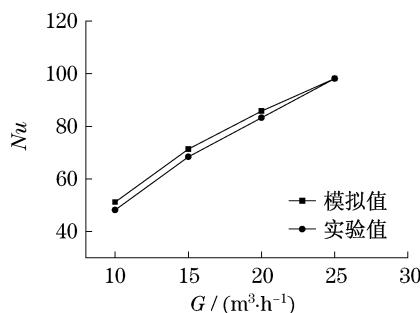
2 结果与讨论

2.1 方法的验证

本文首先进行网格无关性验证,并进一步将计算结果同实验数据^[14]进行对比,图 3 表示阻力系数 f 和努塞尔数 Nu 随流量 G 的变化情况.由图 3 可见, f 及 Nu 数都和实验值吻合较好,说明本文算法可靠.



(a) f 的对比



(b) Nu 数的对比

图 3 实验值与计算值对比

Fig.3 Comparison between the experimental data and the simulation results

2.2 不同雷诺数 Re 下两种流动方式的比较

对 Re 数分别为 10 000, 20 000 和 30 000 时的螺旋管内流动情况进行模拟计算,图 4 和图 5 分别为槽深 e 为 0.6 mm 时,螺旋管的截面速度矢量分布图和管内流线在剖面上的局部投影.从图 4 可以观察到明显的螺旋流动,并且远离中心的流体螺旋速度很大,而靠近螺旋管中心部分区域流体旋转程度逐渐变小.进一步比较不同 Re 数下的速度矢量图可以看出,随着 Re 数的增加,旋流不断增强.这是因为 Re 数增加,管内流体速度变大,流体惯性力影响也越来越大,粘滞力影响越来越小,导致旋转流动增强.

同时从图 5 可以看到,由于螺纹产生的形体阻力使流体产生逆向压力梯度,迫使边界层分离,沿流体流动 y 方向凹槽后部产生了涡流;并且随着雷诺数的增加,凹槽背后的涡流区域逐渐减小.

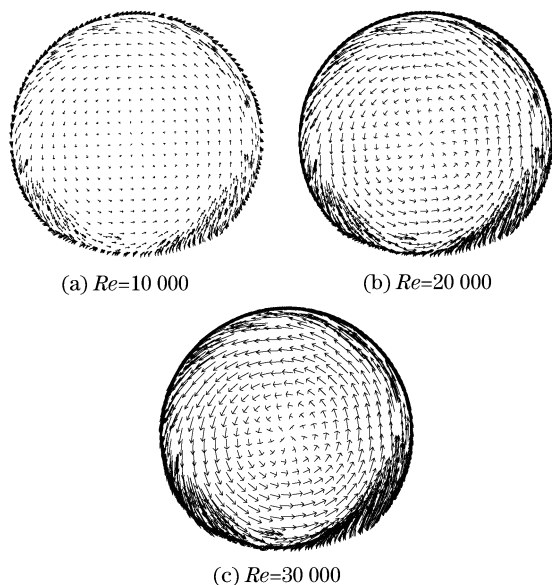


图 4 螺旋管截面速度矢量分布图

Fig.4 Velocity vectors distribution on the cross section of spirally fluted tubes

2.3 两种流动方式对螺旋管换热的影响

为了进一步分析两种流动方式对流动换热的影响,计算不同槽深的螺旋管在不同 Re 数下的 Nu 数和阻力系数,如图 6 所示.图 6(a)显示 f 随着槽深 e 的增大而增大,而随着 Re 数的增大而减弱.这主要是由于随着槽深 e 的增大,旋流和分离流引起的涡流逐渐加强,螺纹的形体阻力也越大.由图 6(b)可以看出当槽深 e 一定时,随着 Re 数的增大, Nu 数也逐渐增大,然而当 Re 数一定时 Nu 数随着槽深 e 的增加先增加而后又逐渐减小,并且 Re 数越大,这种现象越明显.

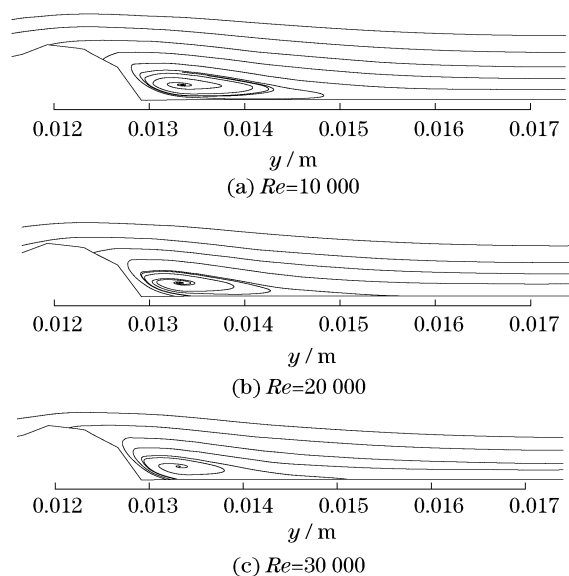
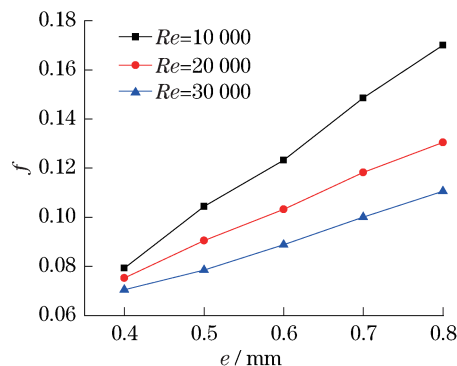
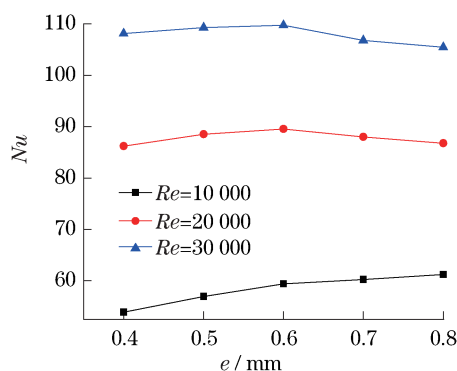


图 5 螺旋管管内流线在剖面上投影

Fig.5 Streamlines at the projection towards the profile face in the spirally fluted tubes



(a) f 随槽深 e 的变化



(b) Nu 随槽深 e 的变化

图 6 Nu 与阻力系数 f 随槽深 e 的变化图

Fig.6 Nu number and resistance coefficient f changing with the groove depth e

为对此现象进行深入讨论,计算 $Re = 20\,000$ 时,槽深 e 分别为 0.4, 0.6, 0.8 mm 时螺旋管内的流动情况.图 7 和图 8(见下页)分别为 e 为 0.4 mm

和0.8 mm时截面上速度矢量图和管内流线在剖面上的局部投影.由图可见,槽深 e 越大,管内旋转流动越强,换热也越强.但是当 e 增加到一定时候,旋流的增强主要在于对换热影响较小的中心区域,而对换热影响较大的壁面附近其变化很小.这时旋流对换热的强化影响很小,然而,在螺纹后面形成的回流区却很大.回流区对换热的影响与几何参数有关,一般,流体的分离扰动会强化换热,但是在某些参数下回流区会形成死流区,从而弱化换热,因此总的效果就可能表现为换热弱化.

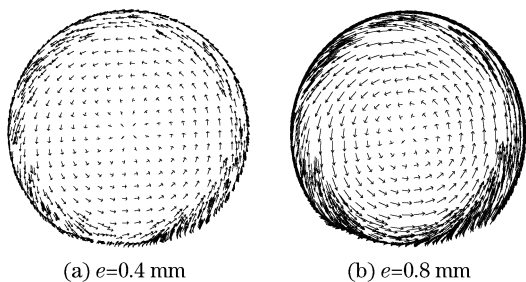


图7 不同槽深 e 的螺纹管截面上的速度矢量分布图 ($Re = 20\ 000$)

Fig.7 Velocity vectors distribution on the cross section at different depths e

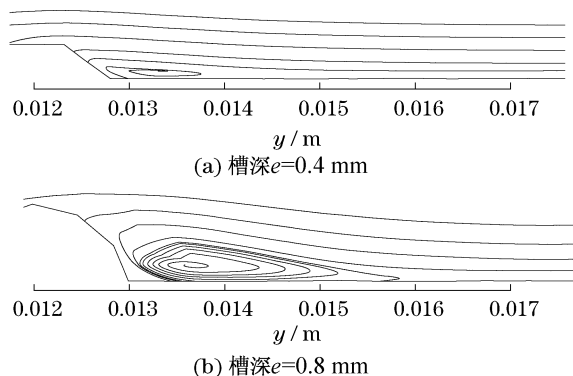


图8 不同槽深 e 的螺纹管流线在剖面上的投影 ($Re = 20\ 000$)

Fig.8 Streamlines at the projection towards the profile face at different depths e

为了进一步讨论回流对流动换热的影响,计算螺纹后面局部处的 Nu 数.图9示出了槽深 e 为0.6 mm时,螺纹管螺纹后面局部 Nu 数的变化情况.由图9可见,局部 Nu 数成波状分布,部分区域低于光管局部 Nu 数,这是因为此时螺纹后面涡流逐渐蜕变为死流,从而弱化换热,这也同时解释了图6(b)中出现的 Nu 数随着槽深 e 的增加而有所下降的现象.

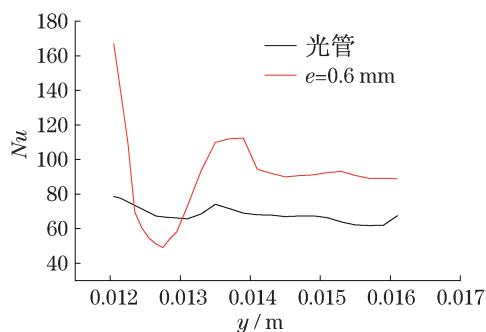


图9 螺纹管壁面上局部 Nu 数分布图 ($Re = 20\ 000$)

Fig.9 Local Nu numbers at the wall of spirally fluted tubes

3 结 论

应用 fluent 软件对螺纹管的流动换热进行了数值模拟,研究管内不同流动方式的存在及其对流动换热的影响.在本文研究的参数范围内,获得以下结论:

a. 螺纹管管内存在两种对换热起决定性作用的流动:一种为螺旋流动;另一种为分离流动引起的涡流.随着 Re 数的增加,旋流不断加强,而涡流区域逐渐变小.

b. 随着槽深 e 的增加,旋流不断加强,管内的流动换热增强,分离流引起的涡流加强了流体的径向混合,有利于管内换热.而当槽深 e 增加到一定的时候,由于螺纹后面形成死流,局部换热能力降低.而此时旋流的增强主要集中于对换热影响较小的中心区域,而对换热影响较大的壁面附近的变化很小,这时旋流对换热的强化影响很小,致使管内的整体换热能力又有所下降.

参考文献:

- [1] 程俊国,冯骏,靳明聪,等.螺纹管的传热和流阻性能[J].重庆大学学报,1980(3):81-94.
- [2] 邓松圣.单头螺纹管入口段流阻及传热性能实验研究[J].钢铁,1993,28(11):64-68.
- [3] Acharya S, Dutta S, Myrum T A, et al. Periodically developed flow and heat transfer in a ribbed duct[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993,36(8):2069-2082.
- [4] Bruce T, Robert S, Umesh R. Designing and rating process heat exchangers[J]. Chemical Processing, 1998,61(4):65-76.
- [5] 王自宽.凝汽器多头螺旋槽管换热特性的研究及工程应用[D].北京:华北电力大学,2001.

(下转第141页)

粒的流化难度。因此,若煤料含水率过高(大于14%),应采用合理的手段降低煤料的含水率,再进行流化。

综上所述,本文对煤流动特性的研究为操作内置热流化床煤调湿装置提供理论参考。

参考文献:

- [1] 崔荣国,郭娟.保护我国炼焦用煤刻不容缓[J].国土资源情报,2012(8):9-12.
- [2] 谭绍栋,施沛润.煤调湿技术在柳钢应用的思考[J].柳钢科技,2009(2):11-14.
- [3] 中国能源网.我国炼焦煤资源相对较少,主要依靠进口[EB/OL].[2011-03-02].<http://news.qq.com/a/20110301/001468.htm>.
- [4] 武荣成,许光文.焦化过程煤调湿技术发展与应用[J].化工进展,2012,31(S):149-153.
- [5] 孙业新,葛腾飞,张士齐.炼焦煤调湿技术及综合评价[J].莱钢科技,2010(5):5-8.
- [6] 胡新亮.煤调湿技术及存在的问题[J].节能与环保,2006(9):31-32.
- [7] 钟英飞.对各种炼焦工艺及无回收焦炉的评述[J].燃料与化工,2001,32(2):57-61.
- [8] 李向波.炼焦工艺及用煤技术发展研究[J].技术与市场,2014(6):347-348.
- [9] 罗国民,周子民,刘克辉.炼焦煤调湿流化床料层流化特性实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(8):2864-2870.
- [10] 阎维平,李皓宇,吴威,等.宽筛分颗粒高压热态最小流化速度的实验研究[J].华北电力大学学报,2012,39(5):65-71.
- [11] 张廷龙.大颗粒二维流态化床流体动力学特性的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [12] 国井大藏,列文斯比尔.流态化工程[M].华东石油学院,译.北京:石油化学工业出版社,1977.
- [13] 袁一,王世广,贺高红,等.化工原理[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [14] Hartman M, Trnka O, Pohořelý M. Minimum and terminal velocities in fluidization of particulate ceramsite at ambient and elevated temperature[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(22):7260-7266.
- [15] 金涌,祝京旭,汪展文,等.流态化工程原理[M].北京:清华大学出版社,2001.

(编辑:石 璞)

(上接第136页)

- [6] 梁平,龙新峰,楼波,等.电站立式给水加热器传热强化及无铜化运行研究[J].上海理工大学学报,2001,23(3):274-278.
- [7] 鲍伟,马虎根,张希忠.流体在螺旋管内对流换热和降压性能的数值模拟[J].上海理工大学学报,2011,33(1):84-88.
- [8] 吉富英明,大场一马,有马芳雄.螺纹管的传热与压力损失[J].火力原子力发电,1976,27(2):171-182.
- [9] 王泽宁,周强泰,张华.螺旋槽管管内换热与阻力试验研究[J].中国电机工程学报,1996,16(1):59-62.
- [10] 黄渭堂,刘天才,孙中宁,等.螺纹槽管传热与阻力特性的实验研究[J].哈尔滨工程大学学报,1998,19(1):29-34.
- [11] 张华,周强泰.螺旋槽管强化管内换热试验研究[J].发电设备,2003,17(4):24-27.
- [12] 邓颂九,谭盈科,庄礼贤,等.轧槽管传热与流体阻力的研究[J].化学工程,1980(6):1-8.
- [13] 李向明,叶国兴,邓颂九.高效换热元件——螺旋槽管的研究及应用[J].化工学报,1982,33(4):359-367.
- [14] Cao K, Dong Q W, Liu M S, et al. Experimental investigation on heat transfer and flow resistance characteristics of spirally fluted tubes[C]// The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:4956-4959.

(编辑:丁红艺)