

缩放管结构优化数值研究

靳遵龙,董其伍,刘敏珊,张富强

(郑州大学 热能工程研究中心,河南 郑州 450002)

摘要:采用数值模拟方法研究了不同扩张段跨度、不同扩张段弧高,共28组结构参数的缩放管,考察其管内流体的传热及阻力降性能。结果表明,缩放管结构的周期性扩张与收缩引起流线弯曲,并造成近壁面流体对壁面的冲刷,产生流体分离,促进核心流体与边界层流体的混合,减薄层流底层,强化了对流传热;由于管内流体流线的周期性变化,流体的阻力降显著增加。对比结果表明,在扩张段弧高为5 mm时缩放管综合性能最优,且随着扩张段跨度的增大综合性能增大。

关键词:缩放管;结构优化;数值研究

中图分类号: TP391

文献标识码: A

0 引言

高效强化换热管的研究一直是传热领域最活跃和最具有生命力的重要研究课题^[1-2]。缩放管强化传热方法采用被动强化措施,不需要借助外功。管内流体经过周期性的收缩与扩张,增强了流体流动的湍动程度、减薄边界层,对于管内结垢亦有一定的抑制作用。其与光管相比,在泵功率消耗相同的情况下,可显著增强管内流体的传热效果。

缩放管已被越来越广泛地应用在石油、化工、电力及制冷等行业的换热设备上。关于缩放管的传热及流体流动性能,已有众多学者进行了相关研究。邓先和等^[3]提出了一种急扩加速流缩放管,进行了数值研究,并与实验结果相对照,结果表明,获得了较好的强化传热效果。王建国等^[4]考察了缩放管管内结垢情况,并与光管进行了对比研究,结果显示,缩放管与光管相比阻垢性能更加优越。

作者在文献[5]当中,提出一种正弦波形流线缩放强化传热管,并研究了管内流体的压降及传热性能。结果显示,该新型缩放管的周期性变化结构促进了核心流体与边界层流体的混合,强化了对流换热。流体流经收缩段时换热效果显著增强,而在扩张段换热系数呈下降趋势。因此,适当增加收缩段的长度比例可增强换热能力。并且,随

着扩张段弧高的变化,管内压降及传热性能均有所变化。如何有效地匹配各种结构参数,减少阻力消耗、提高强化传热效果,便涉及到结构优化问题。

基于此,笔者采用数值模拟手段,对4组扩张段弧高、7组扩张段跨度,共28组结构参数进行了对比研究,以期得到管内流体流动与传热性能随着结构参数的变化规律,为缩放管结构优化提供依据。

1 数值研究模型

1.1 几何模型

该新型缩放管几何模型结构详见文献[5]。缩放管过渡段跨度的长度基准取40 mm,进出口段长度以及过渡段长度依据扩张段长度的变化略有变化。管型采用 $\phi 25 \times 2.5$ mm碳钢管。

研究缩放管扩张段跨度分别为60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 mm,扩张段弧高分别为5, 6, 7, 8 mm,共28组结构。考察管内流体流动及传热状况,各个模型的长度均取1 500 mm。

采用CFD前处理软件建立模型及划分网络,图1为缩放管实体模型及网络划分。

1.2 边界条件

管内工作介质为水。将一些边界条件进行了简化,对管内工质状况做了如下简化:①工质的物性参数随温度和时间不发生变化;②工质视为

收稿日期:2010-04-08;修订日期:2010-05-17

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20100471001)

作者简介:靳遵龙(1973-),男,河南周口人,郑州大学讲师,博士,主要从事过程装备强化传热研究,E-mail: zljn@zzu.edu.cn.

不可压缩流体,并且流动状态为稳态;③管外壁温度恒定,忽略重力影响。



图1 缩放管实体模型及网络划分
Fig.1 Model of convergent - divergent tube

在数值计算中,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,用 SIMPLE^[6] 算法处理压力、速度二者的耦合关系. 控制体积界面的物理量利用二阶迎风差分格式获取. 管内工质的进口流速设定为 1 m/s、进口温度设定为 310 K,外壁设定恒定温度 450 K.

2 模拟结果及讨论

2.1 速度场

管内流体随着收缩与扩张结构的周期性变化而发生周期性改变. 与光管相比,扩张段打破原有管内速度分布规律,图2为结果显示. 随着过渡段横截面的面积缩小,管内工质湍动程度增加,在过渡段与扩张段过渡位置,近壁面处的工质流速与其前后部位处的流速相比有较明显的提高,减薄了管壁处的边界层厚度. 由于管内工质流速分布的不均匀性,产生旋涡和涡束,进一步增强了管内工质的径向混合,促进了工质与管壁面的对流换热.

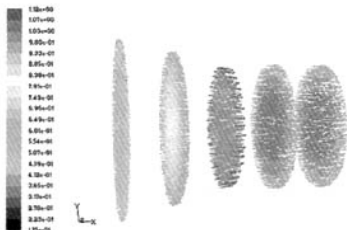


图2 $x = 260, 270, 280, 290, 300$ mm 时横截面的速度矢量图
Fig.2 Vectorgraph of cross section at $x = 260, 270, 280, 290, 300$ mm

2.2 传热及压降特性

研究缩放管不同扩张段跨度、不同扩张段弧高,共 28 组结构. 考察各参数结构管内流体流动及传热状况. 传热性能及管内压降随扩张段弧高及跨度变化情况分别示于图3、图4(其中 x_1 、 x_2 坐标分别代表扩张段弧高及跨度,单位 mm). 对于相同的扩张段弧高,扩张段跨度越小,传热系数越大,压降也越大. 这是由于流体在管内呈周期性流动,在扩张处流速减慢,在收缩处速度加大,流体处于周期性扰动状态;跨度减小,增加了流动周

期次数,反复改变流体速度及压力梯度,增强了流体的湍动程度,从而提高传热效率. 同时,周期性的压力梯度变化,加大了流体在管内的流动阻力.

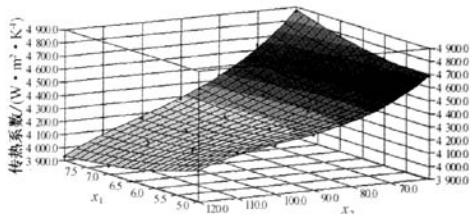


图3 缩放管传热性能随扩张段弧高及跨度变化
Fig.3 Heat transfer performance with divergent arc height and space

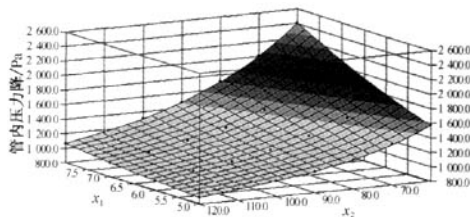


图4 缩放管压降随扩张段弧高及跨度变化
Fig.4 Pressure drop with divergent arc height and space

2.3 综合性能

在缩放管内流体呈周期性流动,强化传热的同时,流体流动阻力降大为增加. 对于相同的扩张段弧高,随着扩张段跨度间距减小,传热系数变大,压降同时变大. 传热效果的改善是以消耗更多的工质输送泵功率为代价的. 采用单位阻力降时的传热系数进行对比分析,也即缩放管的综合性能是以单位阻力降下的传热系数 $\alpha/\Delta p$ 来表征. 如图5所示. 在所研究的结构参数范围内,缩放管综合性能随着扩张段跨度的增大而提高,且在扩张段弧高为 5 mm 时综合性能最优.

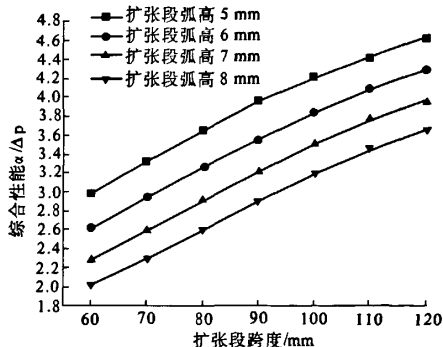


图5 缩放管综合性能对比分析
Fig.5 Comprehensive performance of convergent - divergent tube

3 结论

对不同扩张段弧高、不同扩张段跨度的28组结构参数的缩放管传热性能及流体流动阻力性能进行了数值研究,结果表明:

(1)该类型的缩放管结构使管内传热性能得到强化,同时,管内流动阻力增加。

(2)在所研究的范围内,对于相同的扩张段弧高,随着扩张段跨度的增大,传热系数增大,流体流动阻力增加。

(3)缩放管综合性能在弧高取5mm时最优,且随着扩张段跨度的增大而提高。

参考文献:

- [1] 李军,王晨,桑芝富,等. 强化传热管管内传热及阻力性能的数值研究[J]. 石油机械,2009,37(2): 37-40.
- [2] BRUCE T, ROBERT S, UMESH R. Designing and rating process heat exchangers [J]. Chemical Processing, 1998, 61(4): 65-76.
- [3] 陈颖,邓先和,丁小江. 缩放管内湍流对流换热-场协同控制机理[J]. 化工学报,2004,55(11): 1759-1763.
- [4] 王建国,徐志明,周立群,等. 缩放管污垢性能的实验研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(4): 686-688.
- [5] 靳遵龙,董其伍,刘敏珊,等. 缩放管流体流动与传热性能数值研究[J]. 冶金能源,2009,28(3): 12-14.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001.

Numerical Research on Optimization of the Convergent-divergent Tube Structure

JIN Zun-long, DONG Qi-wu, LIU Min-shan, ZHANG Fu-qiang

(Thermal Energy Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Numerical methods were used to study the heat transfer enhancement and fluid flow resistance, with 28 kinds of structure parameter. The results indicate that, convergent-divergent tube urges on mixture between the core fluid and the boundary layer fluid, decrease the thickness of boundary layer, and enhance heat transfer. At the same time, because of the periodical structure influence, fluid flow resistance increases remarkably. Within the research of this paper, the optimum performance of the tube with 5 mm divergent arc height is gained. Furthermore, the general comprehensive performance becomes higher as divergent space increases.

Key words: convergent-divergent tube; structure optimization; numerical research