

脉动流条件下弹性管束换热器振动特性仿真

王成刚¹,刘 慧¹,刘 俊¹,肖 健¹,高 兴¹,盖超会²

(1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205;

2. 武汉软件工程职业学院电子工程学院,湖北 武汉 430205)

摘 要:为了得到弹性管束换热器传热元件的振动参数以及流体诱导振动强化传热规律,对平面弹性管束的固有振动特性及脉动流作用下的弹性管束振动规律进行了研究. 首先,利用 ANSYS 软件建立平面弹性管束有限元模型,并对管束进行模态分析;然后利用 FLUENT 软件对弹性管束内通入脉动流后的流场进行数值分析. 结果表明:弹性管束复杂的三维运动状态提高了其换热和抑垢性能;三棱柱绕流体产生的脉动流速度变化范围为 0.4~1.3 m/s,波形明显,因此三棱柱绕流体更适合用于脉动流发生装置;数值计算得到的弹性管束振动频率与实际工况脉动流流体流经弹性管束时产生的频率相一致,为弹性管束换热器在实践使用中提供一定的参考意义.

关键词:弹性管束;有限元;脉动流;振动

中图分类号:TK124

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.04.012

0 引 言

弹性管束换热器是利用流体诱导振动来达到强化传热的效果,并且还有利于降低污垢热阻,实现复合强化传热^[1]. 通过诱发和控制传热元件自由振动达到流体诱导振动强化传热来防止振动破坏,因此控制换热器内部传热元件的振动至关重要^[2-3]. 为了实现换热器的强化传热和流体诱导强化传热技术,研究如何合理地诱发传热元件振动以及实现对传热元件的有效控制有着重要的意义^[4]. 由于脉动流的脉动参数具有周期性变化的特点,可以将其作为对传热元件进行简谐激励的外部激励源,以实现对传热元件振动的控制^[5-6]. 为了控制传热元件振动的效果,采用脉动流发生装置来诱导弹性管束产生一定频率的周期性振动^[7-8]. 然后利用得到的周期性振动的脉动流流体流经弹性管束,进而研究弹性管束换热器的振动频率.

1 弹性管束结构及有限元模型

弹性管束由四根弯管和两块不锈钢连接体组成,其三维实体模型如图 1 所示. 连接体 5、6 两处为固定端,A、B 两端可以自由运动. 管束从外到内的编号分别为 4、3、2、1,换热器工作时管程流体可以从 A、B 两端的任意一端进入,依次经过四根弹

性管束,连接体将相邻管束连通. 利用 ANSYS 软件建立了弹性管束有限元模型,连接体选用六面体实体单元 Solid45 建模,管束选用板壳单元 Shell93 建模,网格划分后得到的有限元模型如图 2 所示.

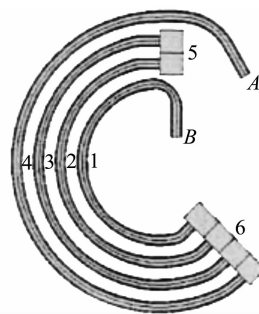


图 1 弹性管束结构图

Fig. 1 Schematic drawing of elastic tube bundle structure



图 2 弹性管束的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of elastic tube bundle

收稿日期:2014-02-24

基金项目:国家自然科学基金(50976080);武汉工程大学科学研究基金

作者简介:王成刚(1974-),男,湖南祁东人,副教授,博士.研究方向:应力分析、计算机测控技术、PLC 控制;新型化工设备的研究与开发.

2 模态分析及计算结果

利用 ANSYS 软件中结构力学的模态分析模块对管束进行分析,得到平面弹性管束结构的各阶固有频率和相应振型.管束各部件的几何尺寸和材料属性列于表 1 和表 2 中.表 3 给出了平面弹性管束结构前 10 阶固有频率和振型,从计算结果可以看出,平面弹性管束的振型存在两种:在管束平面内的面内振型和垂直于管束平面的面外振型.实际工况中,在内外流体的共同作用下,弹性管束呈现出的是一种复合而成的复杂三维运动,并不是简单的处于一种面内振动状态或者面外振动状态.周围流体由于管束这种复杂的三维振动状态会产生扰动,这有利于边界层厚度减薄,进而导致热阻减小,对流传热系数增加,换热性能提高.而且管束振动变形使管束表面污垢不易附着和促进污垢的脱落,导致污垢热阻减小,最终实现复合强化传热.

表 1 弹性管束的几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of elastic tube bundle mm

尺寸名称	数值
钢管截面半径	10
钢管厚度	1.5
钢管 1 半径	75
钢管 2 半径	95
钢管 3 半径	115
钢管 4 半径	135
连接体 5 各边长	40×20×20
连接体 6 各边长	80×20×20

表 2 弹性管束的材料属性

Table 2 material properties of elastic tube bundle

材料属性名称	数值
钢管的弹性模量/GPa	129
钢管的泊松比	0.33
钢管的密度/kg·m ⁻³	8 900
连接体的弹性模量/GPa	210
连接体的泊松比	0.3
连接体的密度/kg·m ⁻³	7 800

表 3 弹性管束结构模态

Table 3 The structure mode of elastic tube bundle

阶次	频率/Hz	主要变形方式
1	22.444	面内
2	22.900	面外
3	30.179	面外
4	34.408	面内
5	44.383	面外
6	60.107	面内
7	89.196	面外
8	99.329	面内
9	155.800	面内
10	167.570	面外

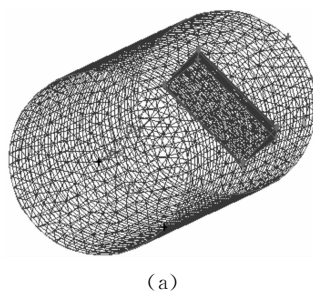
3 脉动流发生装置三维仿真计算

考虑到是研究无源强化传热形式以及实际生产中安装的可行性,因此产生所需脉动流采用的是在分支出口处安放绕流体的方式.流体流经一定形状的绕流体后内部存在旋涡,会产生旋涡分离,在不同位置流体的速度值和压力值是不同的,导致尾流中流体的流速、压力、密度产生周期性变化,从而出口处流体的速度、压力会随时间而变化,形成脉动流.然而对于不同绕流体的截面形状所产生的脉动流强度和稳定性也不同.斯特罗哈尔数 St 是绕流体最主要的特性参数,可根据涡脱落频率计算得到:

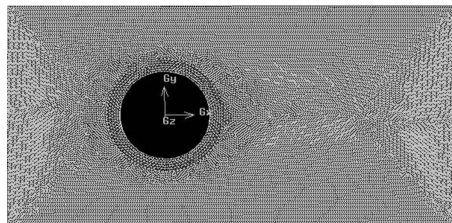
$$St = \frac{f_s d}{u_1} = \frac{f_s m d}{u}$$

其中: f_s 为漩涡脱落频率,Hz; d 为绕流体迎流面特征宽度,m; u_1 为绕流体两侧的平均速度,m/s; m 为绕流体两侧流通面积与管道流通面积之比; u 为管道内平均流速,m/s.

选用三棱柱绕流体和圆柱绕流体, $m=0.72$.各个结构尺寸:直管部分内径为 30 mm、长度为 590 mm,分支部分直管管束内径为 12 mm、长度为 24 mm、三棱柱绕流体横向特征宽度为 2.8 mm,三棱柱迎流面距离分支入口为 12 mm;圆柱绕流体的直径为 4 mm,圆柱迎流面距离分支入口为 12 mm.分支部分的有限元模型如图 3 所示:图 3(a)为三棱柱绕流体分支部分有限元模型、图 3(b)为圆柱绕流体分支部分有限元模型.



(a)



(b)

图 3 分支部分的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of branch part

按照上述的结构尺寸利用 FLUENT 计算软件,对脉动流发生装置进行仿真计算,在脉动流发生装置入口处流速设为 0.4 m/s,在分支出口处检

测速度变化情况,得到如图4所示的曲线:图4(a)为三棱柱绕流体监测点的速度变化曲线、图4(b)为圆柱绕流体监测点的速度变化曲线。可以看出两种绕流体监测点的速度变化曲线波形明显并且具有一定的稳定性。三棱柱绕流体的速度变化范围在0.4~1.3 m/s之间,圆柱绕流体的速度变化范围在0.07~0.15 m/s之间,相比较而言三棱柱绕流体产生的波形速度变化范围更大并且速度变化曲线的波形也比较稳定,因此三棱柱绕流体更适合用于脉动流发生装置。

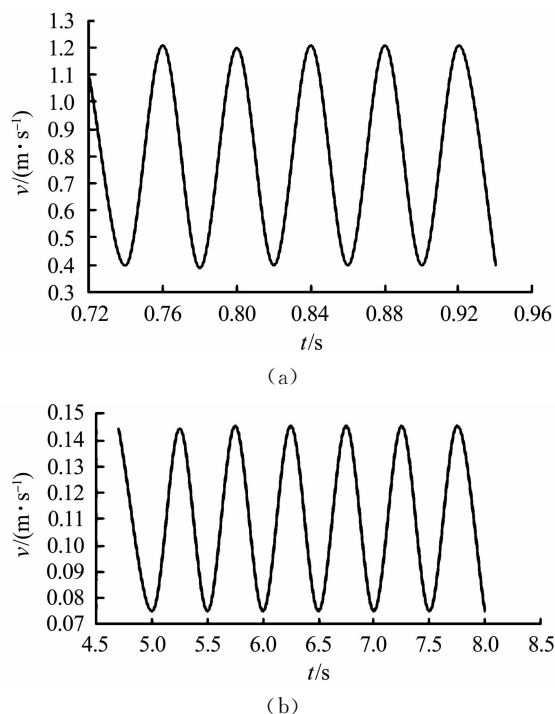


图4 监测点的速度变化曲线

Fig. 4 The speed curve of monitoring stations

三棱柱绕流体的速度变化频率由图4(a)可计算得到基本为41.67 Hz,此时的 St 值为0.21,与相关研究中 St 所给的范围比较一致。

4 装置整体的实际频率

利用脉动流发生装置产生的脉动流流体流经弹性管束换热器,对弹性管束的振动频率进行分析计算。通过变频器调节泵的流量来实现脉动流发生装置入口流速的变化,利用FFT(快速傅里叶变换)得到管束的振动频谱图。选用脉动流发生装置入口速度为0.4 m/s时产生的脉动流流体流经弹性管束换热器,模拟了第一排平面管束及换热器的振动频谱图,如图5(a)、5(b)所示。从图5(a)可以看出管束的振动频谱主要包括30 Hz、42 Hz、52 Hz三个频率,从图5(b)可以看出:管束振动频谱中的30 Hz和52 Hz是由外界干扰所产生,由脉动流引起的振动频率为42 Hz,这一数值与之前

的结果基本一致。

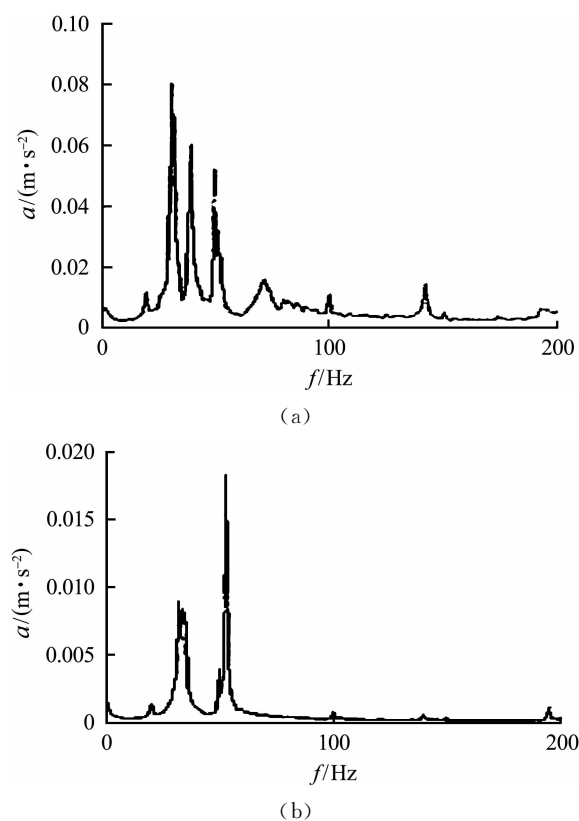


图5 振动频率

Fig. 5 Vibration frequency

5 结 语

a. 利用ANSYS软件对弹性管束进行模态分析,得到弹性管束的振动是一种复杂的三维运动。这无疑对提高弹性管束的换热性能和抗结垢能力产生重要影响。

b. 在平面弹性管束分支出口安放绕流体可以产生脉动流,采用安放三棱柱绕流体能够产生波形较好的脉动流。因此三棱柱绕流体更适合用于该脉动流发生装置。

c. 利用FLUENT软件对脉动流发生装置进行仿真计算得到的频率与实际情况下脉动流流体流经弹性管束换热器引起的振动频率相一致。

致 谢

感谢国家自然科学基金委员会和武汉工程大学研究生创新基金的资助!

参考文献:

- [1] 程林. 弹性管束换热器原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
CHENG Lin. The principle and application of elastic tube bundle heat exchanger [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

- [2] 郑继周,程林,杜文静. 弹性管束动态特性子结构模态综合法[J]. 机械工程学报,2007,43(7):202-208.
ZHENG Ji-zhou, CHENG Lin, DU Wen-jing. Dynamic characteristic of elastic tube bundles with component mode synthesis method[J]. Chinese Journal Of Mechanical Engineering, 2007, 43 (7): 202-208. (in Chinese)
- [3] L. Cheng, T. Luan, W. Du, M. Xu. Heat transfer enhancement by flow-induced vibration in heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(3): 1053-1057.
- [4] 吴峰,王秋旺. 脉动流条件下带突起内翅片管强华传热数值研究[J]. 中国机电工程学报,2007,35(12): 108-112.
WU Feng, WANG Qiu-wang. Numerical simulation on heat transfer enhancement inside internally longitudinal protuberant finned tube under pulsating flow [J]. Proceeding Of the CSEE, 2007, 35 (12): 108-112. (in Chinese)
- [5] 田茂诚,姜波,冷学礼,等. 流体诱导新型弹性管束振动强化传热实验[J]. 山东大学学报:工学版,2011, 41(5):21-25.
TIAN Mao-cheng, JIANG Bo, LENG Xue-li, et al. Experimental research on heat transfer enhancement characteristics of a new type by flow-induced vibration elastic tube bundle[J]. Journal Of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41 (5): 21-25. (in Chinese)
- [6] 姜波,田茂诚,冷学礼,等. 振动管外流动与传热实验研究及场协同分析[J]. 振动与冲击,2009,28(5): 102-106.
JIANG Bo, TIAN Mao-cheng, LENG Xue-li, et al. Experimental research and field synergy analysis of flow and heat transfer outside a vibratory tube[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28 (5): 102-106. (in Chinese)
- [7] 孙雷,赵刚. 基于流固耦合的换热器管束振动分析[J]. 压力容器,2011,28(8):39-43.
SUN Lei, ZHAO Gang. Vibration analysis of heat exchange tube bundle based on fluid-structure coupling [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28 (8): 39-43. (in Chinese)
- [8] 田茂诚,程林,林颐清,等. 管外水流诱导管束振动强化传热实验研究[J]. 工程热物理学报,2002,23(1): 63-66.
TIAN Mao-cheng, CHENG Lin, LIN Yi-qing, et al. Experimental investigation of heat transfer enhancement by crossflow induced vibration [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23 (1): 63-66. (in Chinese)
- [9] 郑贤中,余潜军,周宁波,等. 脉动流技术在管壳式换热器振动分析中的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2013,35(8):68-73.
ZHENG Xian-zhong, YU Qian-jun, ZHOU Ning-bo, et al. Application of pulsating flow technology in vibration analysis of shell-and-tube heat exchanger[J]. Journal Wuhan Institute of Technology, 2013, 35 (8): 68-73. (in Chinese)
- [10] 喻九阳,聂思皓,郑小涛,等. 波纹管内层流脉动流传热和阻力特性的数值研究[J]. 武汉工程大学学报, 2013,35(2):60-64.
YU Jiu-yang, NIE Si-hao, ZHENG Xiao-tao, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristic and pressure drop of pulsating flow in corrugated tube[J]. Journal Wuhan Institute of Technology, 2013, 35 (2): 60-64. (in Chinese)

Vibration characteristics of elastic tube bundles heat exchanger for pulsating flow conditions

WANG Cheng-gang¹, LIU Hui¹, LIU Jun¹, XIAO Jian¹, GAO Xing¹, GAI Chao-hui²

(1. School of Mechanical and Electrical, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Department of Mechanical Manufacture Engineering, Wuhan Vocational College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China)

Abstract: To obtain vibration parameters of the heat transfer components of the elastic tube bundles heat exchanger and influence of the fluid induced vibration on heat transfer enhancement, the natural vibration characteristics of plane elastic tube bundles and the effects of flow pulsating parameters on the vibration were studied. Firstly, finite element model was established and then modal analysis of the elastic tube bundles was done by ANSYS; secondly, the flow field in elastic tube bundles under pulsating flow was numerically analyzed by FLUENT. The results show that the performance of heat transfer and anti-fouling was enhanced under the three-dimensional complex motion of elastic tube bundles; the velocity of pulsating flow produced by the fluid across a triangular prism ranges from 0.4 to 1.3 m/s with obvious waveform, therefore a triangular prism is more suitable for using as a pulsating flow generator; the calculated frequency is consistent with the actual frequency when the pulsating flow crosses the elastic tube bundles, which provides a technical method for elastic tube bundle heat exchanger in the actual working conditions.

Key words: the elastic tube bundles; ansys; pulsating flow; frequency

本文编辑:陈小平