[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.008

真实流场中管束排列方式对流体 诱导振动影响的研究

殷天明,苏文献,施卿海

(上海理工大学化工过程机械研究所,上海 200093)

摘 要:针对工程应用中流体诱导换热器管束振动破坏的情况,搭建实验平台通过加速度传感器测得真实流场下管束的 振动加速度响应,并在Workbench15.0 中采用双向流固耦合方法进行数值模拟。对比实验测得结果和数值模拟结果,分 析不同排列方式和换热管数量的管束振动特性,发现正三角形排列比正方形排列管束更加稳定,更难发生流弹不稳定; 外层横排管对其后第1排管束振动有促进作用,对其后第2排管束振动有抑制作用;沿着横流方向,后排管束振动受前 排管抑制作用越来越大。对换热器的防振设计有一定的指导意义。

关键 词:固定管板式换热器;流体诱导振动;管束排列;流固耦合;真实流场
中图分类号:TH123;TK172
文献标志码:A
文章编号:1005-2895(2018)06-0036-07

Study on Influence of Tube Bundle Arrangement on Fluid-Induced Vibration in Real Flow Field

YIN Tianming, SU Wenxian, SHI Qinghai

(Institute of Chemical Machinery & Process Equipment, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the vibration damage of the fluid-induced heat exchanger tube bundles in engineering applications, the experimental platform was built to measure the vibration acceleration response of the tube bundles under the real flow field by the acceleration sensors, and the two-way fluid-solid coupling method was used for numerical simulation in Workbench15. 0. Comparing the experimental results and the numerical simulation results, analyzing the vibration characteristics of the tube bundles with different arrangement modes and the numbers of heat transfer tubes, it is found that the equilateral triangle arrangement is more stable than the square arrangement tube bundle, and it is more difficult to cause the flow elastic instability; the outer horizontal pipe has the function of promoting the vibration of the first row bundle behind it, restraining the vibration of the second row bundle behind it; along the cross-flow direction, the vibration of the rear tube bundles is more and more inhibited by the front tubes. It has certain guiding significance for the anti-vibration design of heat exchangers.

Keywords: fixed tube-plate heat exchanger; fluid-induced vibration; tube bundle arrangement; fluid-solid coupling; real flow field

随着工业技术的发展,换热器以其结构简单、传热 高效、造价低廉、操作简捷和适用面广且满足高温高压 的使用条件等优点,已成为石油、化工、医疗和核能等 领域的主要设备。随着对换热效率要求的日益提高, 换热器因管束振动而失效的情况愈发增多,而流体诱 导振动是换热器管束振动的主要因素。流体诱导振动 指换热器正常运行时,其壳程内流体流动而引起换热 器部件的振动。换热器壳程内流体流动由有无折流板 的存在,分为横向流和轴向流^[1]。由于横向流对换热 器管束的危害较大,轴向流对管束危害较小,所以课题

收稿日期:2018-07-04;修回日期:2018-09-05

第一作者简介:殷天明(1992),男,湖北嘉鱼人,硕士研究生,主要从事承压容器结构与强度研究。E-mail:15221769036@163. com

组主要探讨横向流对管束的影响。虽然使用 TEMA 和 GB/T 151—2014 能够对已经设计好的换热器进行 振动校核,判断管束是否发生振动,但是工程应用换热 器内的真实流场与国内外研究通用的理论流体模型存 在较大差别,而研究人员对于真实流场中换热器管束 的振动问题的研究较少^[24]。

课题组主要研究真实流场中换热管中心管振动发 生流弹不稳定的临界恒流速度以及管束排列方式和管 束数量对换热器管束振动的影响,采用数值模拟与实 验相结合的方法对临界速度和振动因素进行研究。

1 实验与信号处理

1.1 实验装置

实验平台如图 1(a) 所示,主要包括流体循环系统,换热器和数据采集设备。实验通过调节阀门来调节进口流速,根据涡街流量计来读取进口流量,通过动态数据采集设备采集换热管振动加速度。实验流体由水箱提供,离心泵对水进行升压,让水通过涡街流量计和阀门,由阀门控制流量后进入换热器,通过导流装置,分别冲刷管束图 1(c) 所示的 3 个位置,再通过管道流出,最后流入水箱。





Figure 1 Experimental device

实验装置的规格参数如表1所示。

表1 实验装置规格参数

Table 1 Parameters of experimental device

名称	规格参数
水箱	不锈钢
管材	20 号钢
离心泵	立式多级离心泵 CDLF120-20-1,最大流量 120 m ³ /h,
	轴功率18.5 kW
流量计	涡街流量计,量程25~200 m ³ /h
换热器管束	管中心距 0.04 m, 管外径 0.032 m, 管厚 0.003 m
数据采集设备	HPDJ-8425 动态数据采集系统, SA-AV-3100 加速度
	传感器

1.2 实验方案

实验设计了4种不同的换热管束,分别是1,7,9 和25根换热管,其中1,9,25根换热管呈正方形排列, 7根换热管呈三角形排列。换热管尺寸见表1,节径比 为1.25。管束为3跨,各跨间距均为1m,两端固支, 在各跨中点设置导流装置,导流装置尺寸如表2所示。 在相应导流装置中的管束中部放入加速度传感器,测量相应换热管在不同冲击流速下的振动加速度,测量 位置如图2所示。

表2 各管束导流装置参数

Table 2 Paran	neters of flow guide device
换热管数量/根	导流装置规格参数/(mm×mm)
1	80 × 263
7	134 × 239
9	134 × 239
25	

1.3 信号处理

实验中换热器是通过地脚螺钉固定在实验平台上,实验时壳程流体流速较大,会对换热器进行持续的冲刷,且对换热器内壁产生交替的作用,从而使换热器 壳体发生振动,对测量结果产生干扰。为了消除换热 器壳体自身振动对测量信号的影响,在换热器外壁轴 向上均匀布置4个加速度传感器进行干扰信号检测。 以 C 模型在间隙流速^[5]22.96 m/s 时的加速度信号为





例,图 3 所示为干扰检测的加速度振幅-频率曲线。图 4 所示为在间隙流速为 22.96 m/s 时滤波前后 C 模型 中心管的加速度振幅-频率曲线。

根据 GB/T 151—2014 标准,计算实验正方形排列 3 跨直管的一阶和二阶固有频率^[6]分别为 83.89 和 122.50 Hz。图4中可以观察到在对应频率位置管束 加速度振幅较大,说明对管束振动的主要影响因素为 管束的固有频率。





图 3 C 模型干扰检测加速度振幅-频率曲线 Figure 3 Acceleration-amplitude curves of C model interference signal

由图 3 发现 4 个干扰频率范围为 390~400 Hz,与 图 4(a)的第 2 个峰值频率范围一致,故该段频率为换 热器壳体振动频率,通过 Chebyshev 滤波器对该段频 率进行滤波^[7]。滤波后的加速度振幅-频率曲线如图 4(b)所示。通过包络法^[8]来修正积分后的速度和位 移信号,得到该间隙流速下的中心管均方根振幅为 0.011 01 mm,修正后振动-时间曲线如图 5 所示。















2 数值模拟

2.1 几何模型与网格

课题组主要分析排列方式和管排疏密对流体诱导 换热管振动的影响,故模型为错排7根管,顺排3×3和 5×5的管束模型。在流体和固体间的耦合面处使用动 网格技术,主要采用弹性光顺(spring smoothing)的方 法。对于耦合面周围的流场网格采用边界层网格划分 方法,边界层分为5层,固体网格划分与流体相同,具体 如图6所示。



图6 流场域和管束网格划分情况

Figure 6 Grid division of flow field and tube bundle

2.2 换热管基础刚度

由于数值模拟时所采用的换热器管束模型不是完

整换热管模型,而是导流装置内受到流体横向冲击的管 束模型,为了保证简化模型与完整模型等效和数值模拟 的准确性,引入换热管基础刚度的概念^[9]。基础刚度为 使结构产生单位法相偏移所需要的压力,课题组通过数 值模拟的方法得到基础刚度值为0.040 49 N/mm³。

2.3 求解设置

湍流方程采用 RNG $k - \varepsilon$ 方程,计算方法选择 PISO 算法,梯度选择为基于格林高斯节点梯度,动量、 湍动能和湍流扩散率运用二阶迎风,瞬态方程选择二阶 隐式。动网格设置为 Smoothing,选择 Spring/Laplace/ Boudarylayer 弹性光顺方法^[10-11],并将导流装置的两面 设置为变形面,与固体相接的面设置为耦合面。固体 分析中,由于只分析 Y 方向的振动位移,故对管束在 导流装置的两面施加位移约束,X,Z Component 值为 0。管束外表面分别设置为耦合面,并且对管束施加弹 性约束,基础刚度为0.040 49 N/mm³。在 System Coupling 中,将对应的耦合面进行 Date Transfer 实现 双向流固耦合,并先进行 FLUENT 分析,后进行瞬态固 体分析。模拟计算时间1s,计算步数为200。

3 模拟结果与实验结果分析

3.1 中心管振动特性分析

图 7 所示为 4 个模型中心管实验和模拟所得均方 根振幅-间隙流速曲线。







由图7可知,A 模型的均方根振幅随间隙流速的 增大进行不规律的变化,并没有像其他3个模型一样 表现出均方根振幅在某一间隙流速下出现明显转折的 情况。由此可以看出单根换热管没有出现流弹不稳定 的现象。随着间隙流速增大,B,C和D模型中心管均 方根振幅随之增大:在低流速情况下,中心管均方根振 幅增大缓慢;当B模型间隙流速达到15.30 m/s,C和 D模型间隙流速达到16.84 m/s时,均方根振幅急剧 增大。由此可得 B模型的临界横流速度为 $v_{cC} = v_{cD} =$ 15.30 m/s,C和D模型的临界横流速度为 $v_{cC} = v_{cD} =$ 16.84 m/s。

3.2 排列方式对管束振动的影响

图 8 所示为正方形排列管束 C 模型和正三角形 排列 B 模型中心管实验和模拟的均方根振幅-间隙流 速的曲线。由图 8 可知,这 2 种排列方式中心管均方 根振幅的差距不大,随着间隙流速的增大,均方根振幅 均增大。结合图 7(b)和(c)还可以发现,在发生流体 弹性不稳定性时,正方形排列管束与正三角形排列管 束临界横流流速相近,但从图 8 看,正方形排列管束振 幅略大于正三角形排列管束,差值大约在15%,说明 三角形比正方形排列方式更加稳定。





Figure 8 Experiment and simulation RMS amplitude contrast curves of B and C model

3.3 外层管束对管束振动的影响

图 9 所示为 C 和 D 模型的管束基本模型、编号和 模拟振幅结果,考虑到外层横排管对管束振动的影响, 分别将 C 模型的 1,4,5 管和 D 模型的 2,3,4 管进行 比较;考虑到外层竖排管对管束振动的影响,分别将 C 模型 1,2,6 号管子和 D 模型 1,2,6 号管子进行均方根 振幅的对比,以此研究外层管排对管束振动的影响。







从图 9 中可以发现, C 模型 3,4 和 5 号管振幅小于 D 模型 3,4 和 5 号管子振幅, 而 C 模型 2,1 和 6 号 管子振幅大于 D 模型 2,1 和 6 号管振幅。

图 10 所示为 C 和 D 模型对应的换热管实验所得 均方根振幅的对比图。由图 10(a),(b)和(c)发现 D 模型3,4 号管的均方根振幅略大于 C 模型4,5 号管的 均方根振幅,说明 D 模型在外层横排管子的影响下, 其后第1 排管振幅增大,振动变强烈;D 模型2 号管子 均方根振幅略小于 C 模型1 号管均方根振幅,说明 D 模型在外层横排管子的影响下,其后第2 排管子振幅 变小。可以得到结论,外层横排管对其后第1 排管束 振动有促进作用,对其后第2 排管束振动有抑制作用。 这样的结果与模拟结果一致。



图 10 C 和 D 模型对应换热管实验均方根振幅-间隙流速曲线 Figure 10 RMS amplitude-gap velocity curves of corresponding numbered tubes in C and D models

从图 10(d),(e)和(f)中可以发现 C 模型 1,2,6 号管子的均方根振幅均大于 D 模型 1,2,6 号管子均 方根振幅,且随着横流方向,均方根振幅差距逐渐缩 小,这表明外层竖排管对管束的振动有抑制作用,且距 离外层竖排管越近,抑制作用越明显。同时还发现,前 排管子对后排管子的振动存在抑制作用,而后排管子 对前排管子的振动并没有影响。由图 11 可以发现,沿 着横流方向,换热管的振动逐渐变小,说明沿横流方 向,前排管束对后排管束的振动抑制作用越发明显。

3 结论

课题组以管壳式换热器为研究对象,从实验和数 值模拟两方面对流体诱导管束振动进行分析,并将两 种方法得到的结果进行比较,结论如下:

 1)课题组使用整体换热器模型,还原了真实流场 下的管束振动特性,通过测量管束加速度振动响应,为 数值模拟提供实验数据支撑。

 2)相同条件下,三角形排列束比正方形排列管束 (下转第52页)