甲醇装置新增复式换热器设计分析

崔同魁

（云南云聚能新材料有限公司，云南 昆明 650000）

［摘 要］管壳式换热器流体诱发振动造成换热器损坏占其损坏总量的30%。针对甲醇装置技改新增CO_2复式换热器设计中软件提示的管束振动问题，分析振动机制及振动区域，基于GB 151—2014标准，通过优化设计确定壳体直径800 mm、折流板间距540 mm等参数，设置防振结构，将壳程横流速度控制在9.17 m/s、压力降控制在0.014 9 MPa，解决了振动问题，确保设备安全运行，为同类设计提供参考。

［关键词］甲醇装置；复式换热器；管束振动；设计分析；解决措施

［中图分类号］TQ051.5 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）06-0124-05

Design analysis of new duplex heat exchanger in methanol plant

CUI Tongkui

（*Yunnan Yunjuneng New Materials Co., Ltd., Kunming* 650000, *China*）

Abstract: Damage of shell-and-tube heat exchangers caused by fluid-induced vibration accounts for 30% of total damage. Regarding the vibration problem of the tube bundle indicated by the software in the design of the CO_2 duplex heat exchanger for the methanol plant technical renovation project, the vibration mechanism and vibration area are analyzed. Based on the GB 151—2014 standard, parameters such as the shell diameter of 800 mm and the spacing of the baffles of 540 mm are optimized and determined. Anti-vibration structures are set up, and the cross-flow velocity in the shell side is controlled at 9.17 m/s and the pressure drop is 0.014 9 MPa. This design solves the vibration problem and ensures the safe operation of the equipment, providing a reference for similar designs.

Key words: methanol plant; duplex heat exchanger; tube bundle vibration; design analysis; solution measures

0 引言

管壳式换热器在石油化工装置中的应用非常广泛，为了提高其换热性能，往往选择更高的流速，而流速越高就越容易诱发换热器振动[1]。换热器因流体诱发振动导致失效的比例几乎占其损坏总量的30%。笔者在云南云天化股份有限公司甲醇装置技改新增CO_2复式换热器设计中（工艺参数详见表1），采用换热器工艺传热计算软件ASPEN HTFS V7.2.1计算，其计算结果警告提示表明换热器管束会发生振动。管束轻微振动不会带来换热器损坏，还有利于强化传热或减少结垢的作用；强烈的振动必须采取措施以减缓振动，避免换热器管束振动损坏带来的风险。流体流动高速区是最容易诱发振动的区域，其振动问题不能忽视。因此，在该换热器设计时，首先，要保证换热器的传热效率满足工艺要求[2]；其次，还要考虑换热器内流体诱发振动的影响进行相应的预防振动设计[3]，确保管束振动在安全范围内，避免换热器因振动造成破坏。

表1 复式换热器的工艺参数

Table 1 Process parameters of the duplex heat exchanger

项目	正常操作温度(进口/出口)/℃	最大操作压力/MPa	物料名称	流量/(kg·h^{-1})	壳程允许压降/MPa	换热管排列方式	换热面积/m^2
壳程	192/130	2.56	热CO_2气体	58 700	<0.05	正三角排列	185
管程	86/135	8.20	CO_2气体	58 700			

收稿日期：2024-10-23； **修回日期**：2025-09-10

作者简介：崔同魁（1985— ），男，云南宣威人，工程师，主要研究方向为化工设备维修、化工设备设计、静设备管理。

本文以甲醇装置CO_2复式换热器设计中遇到的管束振动问题为研究对象，从工艺和结构设计方面提出预防措施[4]。

1　换热器管束振动分析

国内外相关文献资料表明，换热器管束振动主要由壳程流体横向流动引起流体特性不稳定、流体速度波动等导致，此外换热器内部介质的局部湍流、涡流也会引起换热管振动，横向流是流体诱发管束振动的主要诱因[4]。换热器流体诱导管束振动的机制主要有：气体或液体诱发管束产生卡门旋涡、紊流抖动、流体弹性不稳定、声共振[5]。

1.1　管束振动机制

1.1.1　卡门旋涡分离共振

当流体横向掠过换热管时，流体周期性从管子表面脱离形成非对称排列的旋涡尾流，旋涡周期性交替产生脱离，使管子产生垂直于流体方向周期性变化的激振力而导致换热管振动[6]。此周期性振动频率即为卡门旋涡频率，按式（1）计算：

$$f_v=S_t\frac{u}{d_o}。\tag{1}$$

式中：f_v为卡门旋涡频率；u为横流速度；S_t为斯特罗哈数，与换热管排列及节径比有关；d_o为换热管外径。

由此可见，卡门漩涡频率与横流速度、斯特罗哈数及换热管外径有关，因此为避免产生旋涡分离共振，在换热器工艺设计计算中，在换热管外径确定时，应通过计算选择合适横流速度，避免因卡门漩涡频率与换热管最小固有频率耦合产生共振。

1.1.2　紊流抖振

紊流中脉动变化的压力和速度场持续向换热管输入能量，对换热管施加随机的激振力，当受脉动激发主频率与换热管固有频率相近时，换热管吸收能量而产生振动。当管间距较小时，由于没有足够的空间产生旋涡频率，紊流的影响是主要的，当紊流抖振的频率与换热管的最小固有频率之比大于0.5时，将可能产生管束强烈振动[7]。紊流抖振主频率按式（2）计算：

$$f_t=\frac{ud_o}{ll_1}\left|3.05\left(1-\frac{d_o}{l_1}\right)+0.28\right|。\tag{2}$$

式中：f_t为紊流抖振主频率，l和l_1为纵横向换热管中心距，d_o为换热管外径。

1.1.3　流体弹性不稳定

当流体横向流过换热管时，由于流体的弹性不稳定性，可使换热管产生弹性位移，这样将改变周围的流场状态，从而打破相邻换热管上的力平衡，导致管子产生位移而处于振动状态。当流体速度达到临界横流速度时，流体弹性力对换热管束所做的功大于换热管阻尼作用所消耗的功，换热管的响应振动振幅将迅速增大，导致产生激烈振动。流速较高区域，诱发振动的机制主要是流体弹性激振。发生流体弹性激振时，横流速度的临界值按式（3）计算：

$$u_c=K_cf_nd_o\delta_sb。\tag{3}$$

式中：u_c为临界横流速度，K_c为比例系数，δ_s为质量阻尼系数，f_n为换热管固有频率，b为指数。

1.1.4　声共振

当气体介质进入换热器壳程后，流过换热管时，将在与流体流动方向和换热管轴线均垂直的方向上形成声学驻波，并在壳程内筒壁之间穿过管束来回反射[8]。当声学驻波频率与卡门旋涡频率或紊流抖振主导频率相一致时，会使气体介质所具有的动能转化为声压波，便发生声共振。

相关研究表明，声共振只发生在壳程流体为气体的工况，对于壳程流体为液体的情况，由于声波在液体中的传播速度很大，而换热器直径相对较小，难以满足驻波的形成条件；而本甲醇装置新增复式换热器的壳程介质为气体，为换热器管束产生振动提供了必要条件[9]。

1.2　换热器的管束振动区域

尽管管束在换热器中的任何地方都可能发生振动，但最容易引起流体诱发振动的区域是流动高速区[7]，诸如：管束内两块折流支承板间最大的无支撑中间跨；管束周边区位于弓形折流板缺口区的换热管；U形管束的U形弯头区；位于壳程进口接管流体下方的换热管；位于管束旁流区和管程分隔板流道区域的换热管；在换热管与换热器结构部件有相对运动的区段界面，如换热管与折流板的管孔区域。

1.3　管束发生振动的判断准则

根据换热器标准GB 151—2014规定[1]，当壳程介质为气体或液体时，只要符合下列条件的任何一条，就有可能发生振动：（1）卡门漩涡频率f_v与换热管最小固有频率f_n之比大于0.5；（2）紊流抖振主频率f_t与换热管最小固有频率f_n之比大于0.5；（3）横流速度u大于临界横流速度u_c。

当壳程介质为气体或蒸汽时，f_a处于$0.8f_v$～$1.2f_v$或$0.8f_t$～$1.2f_t$时，就有可能发生振动。

等跨度换热管束的固有频率计算式为：

$$f_{nu}=35.3\lambda_u\sqrt{\frac{E(d_o^4-d_i^4)}{ml^4}}。\quad(4)$$

式中：λ_u为频率常数，E为材料弹性模量，m为单位换热管长质量，l为跨距，d_i及d_o为换热管内外径。

2　换热器管束振动计算

通过上述分析可知，管子的振动与管子系统的横流速度、固有频率、系统的阻尼和流体流动特性等因素有关。根据换热器管束振动的判断准则，若想有效防振，就需要分别计算出卡门漩涡频率f_v，紊流抖振频率f_t、管子的固有频率f_n及横流速度等，确定换热器哪些区域发生振动，以便采取相应的措施避免振动的发生。

根据甲醇新增复式换热器的工艺参数（见表1），由于换热器管壳程流体温差较大，为避免产生较大的热应力，便于清洗检查管束，从经济性角度考虑采用U形管式换热器。换热管规格为ϕ19 mm × 2 mm，换热面积为185 m^2，换热管束排列采用正三角形排列，折流板采用单弓形折流板，板间距为540 mm，折流板块数为7块，结构简图见图1。

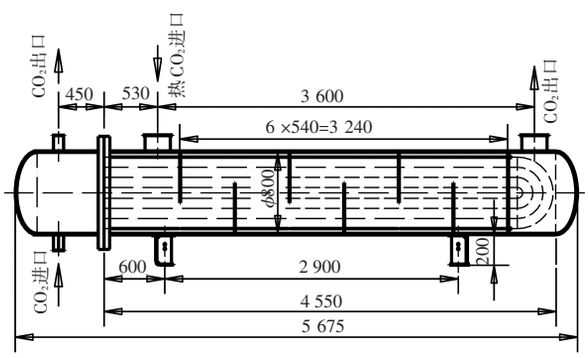

图1　U形管式换热器结构简图

Fig. 1　Structural diagram of U-shaped tube heat exchanger

用ASPEN HTFS换热器计算软件进行管束的振动分析计算，警告提示换热器管束存在振动，振动区域为U形弯管处、折流板间无支撑跨处及壳程进口管束位置，其振动分析计算结果见表2、表3，流体弹性不稳定分析见表4。

由表2、表3可知，由于f_v/f_n、f_t/f_n均>0.5，折流板缺口区f_v/f_a>0.8，故在管束U形弯管折流板缺口区及在管束中部的无支撑跨部位，可能因卡门旋涡及紊流抖振使管束振动，说明管束折流板缺口大小、折流板间距等参数存在选择不合理的问题，需调整折流板弓形缺口高度（弓形缺口高度太小容易引起管束振动）、管束中部的无支撑跨间距等设计参数，必要时，需在管束U形弯管区增加支持板或加固、壳程进口处设置防冲挡板等措施，避免换热管束在使用中产生振动。

表2　U形弯管区振动计算值

Table 2　Calculated value of vibration in U-shaped bend area

项目	f_v/f_n	f_v/f_a	f_t/f_n	f_t/f_a
折流板缺口出口处	5.06	0.86	3.5	0.59
折流板缺口进口处	1.38	0.86	0.96	0.59

表3　管束中部折流板间无支撑跨振动计算值

Table 3　Calculated value of unsupported cross-vibration between the folding plate in the middle of the tube bundle

项 目	f_v/f_n	f_v/f_a	f_t/f_n	f_t/f_a
管束无支撑跨流体进口处	1.16	0.08	0.8	0.05
管束无支撑跨底部	1.16	0.08	0.8	0.05

表4　流体弹性不稳定分析

Table 4　Fluid elastic instability analysis

项　目	u/u_c	振动判别
壳程流体进口处	2.46	$u/u_c>1$,可能振动
折流板缺口流体出口处	1.21	$u/u_c>1$,可能振动
折流板缺口流体进口处	0.28	$u/u_c<1$,不会振动
管束尾部	2.46	$u/u_c>1$,可能振动

由表4可知，由于壳程流体进口处、折流板缺口流体出口及管束尾部的$u/u_c>1$，在壳程流体进口处、折流板缺口出口及管束尾部，将因流体不稳定使管束振动，因而应在壳程流体进口处采取措施及对折流板缺口大小等参数进行适当调整，避免管束振动。

3　解决措施

根据上述分析，在换热器工艺计算和结构设计时应从以下几方面采取措施，避免因激振频率与换热管固有频率相耦合产生振动，导致设备使用中损坏。

3.1　降低壳程流体速度

根据卡门漩涡频率和紊流抖振主频率的计算式，换热器的激振频率与横向流速成正比关系，因而降低壳程流体流速，可有效降低流体诱导振动的频率，是防止管束振动的最直接方法[10]，但同时会使换热器传热效率降低。若壳程流体的单位时间内流量不能改变，可采用增加管间距的办法降低流速，特别是在压力降有限制条件时应考虑此方法，

但该方法最终将导致壳体直径加大，换热器传热效率有所下降。通过试算调整，壳程流体横流速度为9.17 m/s，壳程流体计算压力降为0.014 9 MPa，确定壳体直径为ϕ800 mm，换热管长度为4 m，满足工艺设计要求。

3.2　改变换热管排列方式

管束排列方式对管束振动的影响，由于流体诱导激振频率与斯特罗哈数S_t有关，根据斯特罗哈数S_t与换热管的节径比及管束排列的关系图（见图2）[1]，改变管束换热管排列方式，可降低流速和流体诱导激振频率，避免流体诱导振动发生。通常管束采用的排列方式有正三角排列、正方形排列、转角三角排列及转角正方形排列4种，在实际设计中，可采用计算软件逐一试算的方法确定。通过试算本换热器管束排列方式最终确定为正三角排列。

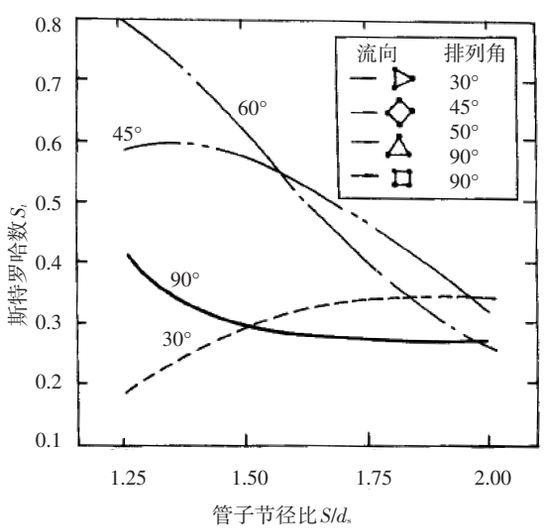

图2　管子节径比及管束排列与斯特罗哈数的关系

Fig. 2　Relationship between pipe joint diameter ratio, tube bundle arrangement and strouhal number

3.3　减小折流板间距

工艺传热计算时，应在保证传热效率和壳程流体压力降的情况下，适当减小换热管的折流板间距，可增加管束的固有频率，使流体诱导频率远离换热管的固有频率，经传热计算确定折流板间距为540 mm。

3.4　调整折流板弓形缺口高度

根据文献［1］规定，折流板弓形缺口高度一般为圆筒内直径的20%～45%，若调整为低值对传热影响不大，但可能会使u/u_c超界导致软件发出振动警告。折流板弓形缺口高度需根据工艺传热计算确定，经传热计算本设备折流板缺口切割率为26.5%。

3.5　端部加支持板

在U形管束尾端，由于最后一块弓形折流板只能固定部分管束，还有部分换热管因处于悬臂状态而稳定性较差，且管束尾端处于出料管口处，在气流的冲击下，会引起管束尾部悬臂较大的振动。为避免因长期振动引起管束疲劳损坏变形，在结构设计时，应考虑在管束U形弯管悬臂段加端部支持板（见图3），同时端部支持板上应开通气窗，其面积不小于折流板缺口面积。

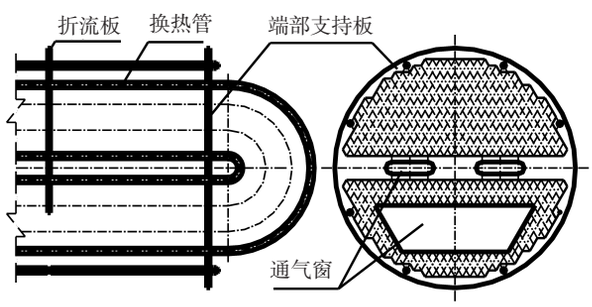

图3　端部支持板示意

Fig. 3　End support board

3.6　设置防冲挡板

根据文献［1］规定，当换热器壳程进口管流体为非腐蚀性、非磨损性的单相介质时，若$\rho u^2>2\ 230\ kg/(m\cdot s^2)$，应在壳程进口管处设置防冲挡板以保护换热管，避免壳程流体直接冲击管束，同时可减少流体的脉冲。本设备壳程进口管处流体$\rho u^2=4\ 074\ kg/(m\cdot s^2)$，大于标准规定值要求，也说明壳程流体进口管处可能发生管束振动。因此在换热器壳程流体进口处应设置防冲挡板，避免壳程进口处换热管受到介质冲刷而振动。

3.7　减少管孔间隙

在满足制作加工的条件下，结构设计上应尽量减小折流板与换热管之间的管孔间隙，增加阻尼，减轻换热管与折流板之间的摩擦切割作用，使换热器在发生振动时减少损失，延长换热器使用寿命。考虑到本复式换热器存在振动问题，换热器管束设计按I级换热管束折流板管孔直径允许偏差确定管孔间隙；此外应对折流板上所有管孔提出去除锐边和毛刺的要求，避免在脉动冲击作用下，管孔锐边对换热管造成损伤。

3.8　调整安装位置

在弓形折流板的安装位置确定时，第一块或最后一块折流板的安装位置应设置在紧贴进出管口边缘，距离管口边缘50 mm左右，调整缺口位置与进出管口方向相反，解决弓形折流板无支撑的缺点，

提高换热管刚性以消除管束振动。

4 结语

管束振动的分析处理是换热器设计工作中不可忽视的重要工作，应引起设计人员的重视。在进行换热器设计时，不仅要充分考虑换热器传热效率的问题，还要考虑换热器管束因流体诱发振动的影响，并采取相应的预防措施，以确保将管束振动的影响限制在安全范围内，避免换热器因管束振动造成损坏，保证设备使用的安全可靠性。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.热交换器:GB/T 151—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.

[2] 钱颂文.换热器设计手册[M].北京:化学工业出版社,2002.

[3] 吴翔.管壳式换热器管束振动机理及改进措施[J].石油和化工设备,2012,15(10):62-64.

[4] 王学生,惠虎.化工设备设计[M].2版.上海:华东理工大学出版社,2017.

[5] 熊哲文,杨军,龚迎莉,等.流致振动主导机理及减振措施的定量分析[J].电力学报,2021,36(5):411-420.
XIONG Z W, YANG J, GONG Y L, et al. Quantitative Analysis of Fluid-induced Vibration Mechanism and Measures of Vibration Damping[J]. Journal of Electric Power,2021,36(5):411-420.

[6] 郎红方,叶泉流,陈福龙.核2、3级管壳式换热器管束流致振动分析方法探讨[J].核动力工程,2011,32(S1):155-158.
LANG H F, YE Q L, CHEN F L. Discussion on Flow Induced Vibration Alalysis Method for Shell-and-Tube Heat Exchanger with Nuclear[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(S1): 155-158.

[7] 钱颂文,曾文明,洪绍基,等.换热器紊流抖振的机理[J].石油化工设备,1987(5):8-11.

[8] 霍凌宇.合成工段甲醇水冷器的改造研究[D].大庆:东北石油大学,2017.
HUO L Y. Research on Modification of Methanol Water Cooler in Synthetic Process[J]. Daqing: Northeast Petroleum University,2017.

[9] 葛培琪,段德荣.流体诱导振动强化换热[M].北京:机械工业出版社,2021.

[10] 王永东,胡启辉,尚剑,等.管壳式换热器结构对振动的影响[J].化学工程,2021,49(6):26-29.
WANG Y D, HU Q H, SHANG J, et al. Effect of shell-and-tube heat exchanger geometry on vibration[J]. Chemical Engineering (China),2021,49(6):26-29.

（上接第105页）

[9] LENTZ R D, SOJKA R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration [J].Soil Science, 1994, 158(4):274.

[10] WU L, OK Y S, XU X L, et al. Effects of anionic polyacrylamide on maize growth: a short term 14C labeling study [J]. Plant and Soil,2012,350(1):311-322.

[11] 王峻.聚丙烯酰胺(PAM)对河道底泥性质及白菜生长和品质的影响[D].杭州:浙江大学,2020.

[12] 杨永秦,潘英华,张振华,等.聚丙烯酰胺对土壤保蓄水性能及盐分淋溶的影响[J].鲁东大学学报(自然科学版),2022,38(1):18-26.
YANG Y Q, PAN Y H, ZHANG Z H, et al.Effects of Polyacrylamide on Soil Water Retention and Salt Leaching[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2022, 38(1):18-26.

[13] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加PAM土壤水盐运移特性研究*[J],土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
WANG Q J, ZHANG J H, TAN S. Effects of PAM on characteristics of water and salt movement in soil under brackish water infiltration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(4):1056-1064.

[14] 刘纪根,雷廷武,蔡强国.施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响[J].水利学报,2004(1):57-61.
LIU J G, LEI T W, CAI Q G. Experimental study on impacts of slope length treated with polyacrymide on sediment yield[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004(1):57-61.

[15] 云菲,毕浩东,刘天,等.不同保水材料对济源烟区烤烟生长及土壤保墒能力的影响[J].山西农业科学,2021,49(8):970-975.
YUN F, BI H D, LIU T, et al.Effects of Different Water Retaining Materials on Growth of Flue Cured Tobacco and the Capacity of Humidity Guarantee in Jiyuan Tobacco Growing Areas[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(8):970-975.

[16] 王旭东,杨雪芹.聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附-解析与迁移的影响[J].环境科学学报,2006,26(2):300-305.
WANG X D, YANG X Q. Effect of polyacrylamide on phosphorus adsorption, desorption and translocation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2006,26(2):300-305.

[17] 员学锋,汪有科,吴普特,等.聚丙烯酰胺减少土壤养分的淋溶损失研究[J].农业环境科学学报,2005,24(5):929-934.
YUAN X F, WANG Y K, WU P T, et al.Effects of polyacrylamide application on the decrease of soil fertilizer and its mechanism[J]. Journal of Agro-Environment Science,2005, 24(5):929-934.

[18] 罗在波.PAM对紫色土坡地氮素迁移淋失的控制效应[D].重庆:西南大学,2008.

[19] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(14):135-144.
LI S L, WANG X, WANG S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(14):135-144.

[20] 刘玉学,吕豪豪,石岩,等.生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. 应用生态学报,2015,26(1):304-310.
LIU Y X, LV H H, SHI Y, et al.Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(1):304-310.

[21] 员学锋,汪有科,吴普特,等.PAM对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J].水土保持学报,2005,19(2):37-40.
YUAN X F, WANG Y K, WU P T, et al. Effects and mechanism of PAM on soil physical characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(2):37-40.

[22] 滕玲玲.PAM对紫色土坡地土壤磷素流失的控制效应与机理分析[D].重庆:西南大学,2008.