

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.003

基于流固耦合的空调分歧管应力分析

吕闻, 张翔, 赵承志, 栾德玉

(青岛科技大学, 山东 青岛 266061)

摘要:基于 ANSYS Workbench 分析平台, 采用流固耦合的计算方法, 对空调分歧管的断裂进行分析, 探讨 410A 氟利昂流场速度分布, 分析空调分歧管的变形和等效应力分布, 对分歧管出现裂纹的位置进行应力分析和强度评定。结果表明: 空调分歧管的最大等效应力为 305.2 MPa, 位置位于出现裂纹的三通管根部, 分歧管出现裂纹处的一次应力高于许用值。

关键词:流固耦合; 空调分歧管; 等效应力; 应力分析

中图分类号: TU831.3; O353.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)06-0017-03

Stress Analysis of Air-conditioning Branch Pipe Based on Fluid-structure Coupling

SI Wen, ZHANG Xiang, ZHAO Chengzhi, LUAN Deyu

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the ANSYS Workbench analysis platform, the fluid-structure coupling calculation method was used to analyze the fracture of the air-conditioning branch pipe, with the discussion of the velocity distribution of the 410A Freon flow field, the deformation and equivalent stress distribution of the air-conditioning branch pipe were analyzed, and stress analysis and strength evaluation were carried out at the crack-occurring location. The results show that the maximum equivalent stress of the branch pipe of the air conditioner, located at the root of the cracked tee pipe, is 305.2 MPa, and the primary stress of the branch pipe where the crack occurs is higher than the allowable value.

Keywords: fluid-structure coupling; air-conditioning branch pipe; equivalent stress; stress analysis

0 引言

多联空调实现了一台室外机配多台室内机对空调房间进行制冷或制热。因其管控方便、控温准确、节能等优点而被广泛应用于高层建筑^[1-2]。在大型高层建筑所采用的多联式空调系统中, 室外机与室内机之间存在高落差、管路结构中存在众多分支, 经常会用到不同类型的分歧管。因为它们影响制冷量不平衡率, 所以必须在通往室内机的分支处安装分歧管管路, 作为系统一部分的可选附件^[3-5]。

某企业在制热工况时个别分歧管在安装运行一段时间后可在三通的根部发生裂纹, 导致制冷系统冷媒泄露, 发生裂纹的分歧管如图 1 所示。



图 1 产生裂纹的分歧管示意图

分歧管工作原理如图 2 所示。

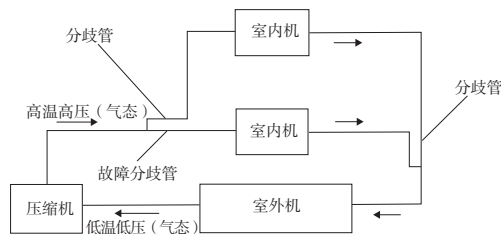


图 2 分歧管工作原理图

分歧管都是在冬季制热工况发生故障的, 影响空调工况的正常运行。但目前对空调制热工况时分歧管与流体相互作用情况下分歧管的应力和变形还未进行相关研究。

流固耦合问题在交通、航空、船舶、化工等领域有着广泛的应用。越来越多的研究者开始通过流固耦合数值计算方法进行研究^[6]。基于上述分歧管出现裂纹的问题, 本文采用流固耦合方法, 计算流体对分歧管应力和变形的影响, 并分析三通管根部产生裂纹的原因, 为分歧管的实际应用提供借鉴, 为结构的改进提供参考。

基金项目:国家自然科学基金项目(52176040 E0602)

第一作者简介:吕闻(1998—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为化工机械设备, 3370771766@qq.com。

1 模型几何结构与网格划分

分歧管由三通管、前直管、后直管、弯管组成。分歧管的尺寸和结构如图3所示。

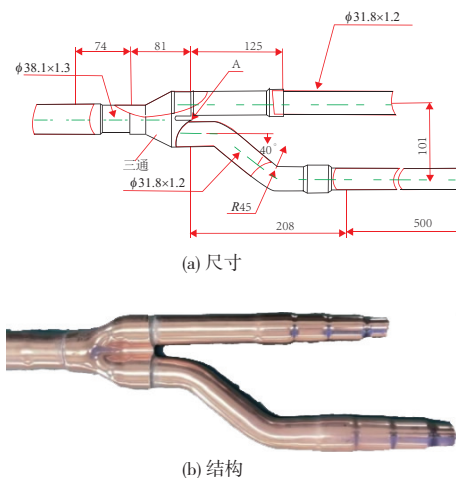


图3 分歧管的尺寸和结构示意图

分歧管为紫铜管,密度 $8\,900\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $1.10 \times 10^{11}\text{ Pa}$,泊松比 0.34,抗拉屈服强度 $2.80 \times 10^8\text{ Pa}$,抗压屈服强度 $2.20 \times 10^8\text{ Pa}$ 。使用 Workbench 中的 Mesh 模块对分歧管进行网格划分,在流体计算中,使用非结构化四面体网格单元对流体域进行离散化。初始网格单元数共计 722 584 个,得到分歧管流场压力为 3 187 618.5 Pa。按照网格无关性验证的要求,将单元数增加到 1 397 048 个,得到流场压力为 3 199 783.5 Pa,计算后得到的流场压力变化量超过 3%。由此将网格数再增加到 2 312 018 个,得到流场压力为 3 204 032 Pa,此时压力的改变量不超过 3%。因此,本文采用 2 312 018 个网格单元数对流体域进行离散。固体域采用 253 436 个网格单元,网格划分如图4所示,分歧管固体域与流体域连接面网格划分如图5所示。

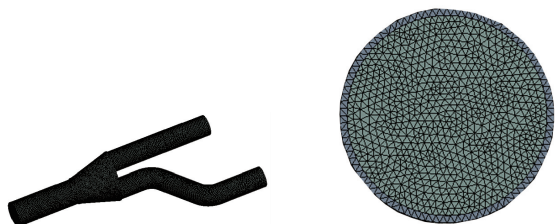


图4 分歧管计算域网格划分 图5 分歧管固体域与流体域连接面网格划分

2 计算方法

本文基于流固耦合的计算方法,使用 ANSYS Workbench 分析平台提供的 Flow (Fluent) 和

Transient Structural 模型,分别对分歧管进行流场分析和瞬态结构应力分析。二者通过组件系统中 System Coupling 实现数据传输,完成计算的双向耦合;在 Workbench 软件的 Transient Structural 模块中模拟了固体域。在 Model 模块中,边界条件设置为 3 个管道的固定约束,忽略分歧管的摆动,分歧管与流体接触的内表面设置为 fluid flow interface,在 Fluid Flow 模块中模拟流体域,流体为 410A 氟利昂,入口速度设为 6 m/s ,入口温度为 383.15 K ,出口压力为 3.2 MPa ,出口温度为 383.15 K 。根据雷诺数公式: $Re = \rho u d / \mu$, 410A 氟利昂的流速 $u = 6\text{ m/s}$,密度 $\rho = 88.74\text{ kg/m}^3$,黏度 $\mu = 1.80 \times 10^{-5}\text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。将分歧管的管径与 410A 氟利昂的各参数值代入上式,计算出雷诺数 $Re = 1\,131\,435$ 。此时处于完全湍流状态。因此计算时应选用 $k-\epsilon$ 湍流模型方程,坐标原点设置在分歧管三通管部位,压力-速度耦合项采用 SIMPLE 算法,收敛残差设置为 1×10^{-4} 。在流固耦合模拟计算时,须采用动网格的模拟方法,以便计算流体域和固体域的相互作用。选择 Smoothing 与 Remeshing 两种动网格方法,设置动网格区域,分歧管与流体接触的区域设置为耦合面,即 System Coupling。流体域和固体域的时间步长均设置为 0.001 s 。最后把两个区域的模型导入 System Coupling 中,将流体区域中的 System Coupling 面和固体区域中的 fluid flow interface 面设置为耦合表面,以确保在耦合计算过程中完成数据传输。计算耦合运动时间为 10 s 。此时,流场处于稳定状态。

3 结果与讨论

3.1 分歧管的宏观流场结构

图6为分歧管整体速度矢量分布。可以看出,由于结构的突变,导致流体从分歧管三通管开始流动至后面两管时,在靠近中部的位置具有较大的速度梯度,速度激增至 8.67 m/s ,产生了较大的冲击,必然导致在此处会出现流场旋涡,引起分歧管管壁此处应力的增加,此处与分歧管产生裂纹的位置对应。

3.2 分歧管的变形与等效应力

图7为分歧管整体变形云图。分歧管的变形量在三通管根部与后弯管前端连接的附近区域较大,最大可达到 0.33 mm ,从分歧管中部到分歧管两侧趋于减小,减小至 0.04 mm ,说明分歧管的中部也就是三通管根部附近区域是分歧管的薄弱区

域,而分歧管出现裂纹的位置就位于此区域内。

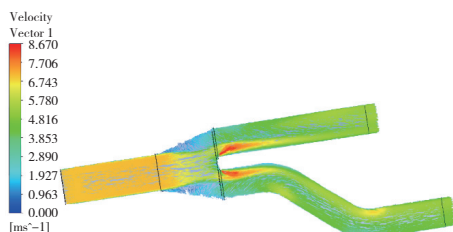


图6 分歧管纵截面速度示意图

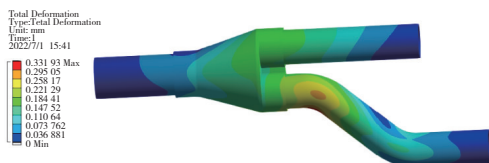


图7 分歧管总变形示意图

图8为分歧管等效应力分布云图,反映了分歧管以及流体之间的力耦合效应。可以发现:分歧管三通管根部的应力最大,是分歧管强度最容易失效的部位。根据计算结果,分歧管根部应力为305.2 MPa,最大等效应力位置与分歧管产生裂纹位置一致。

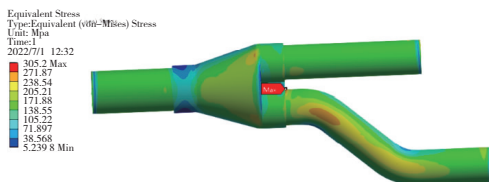


图8 分歧管等效应力示意图

3.3 应力评定

为了分析空调分歧管制热工况时断裂的原因,采用线处理方法对应力进行均匀化和当量线性化处理。线处理法是作沿截面法向方向的积分路径线,并将各应力分量沿此积分路径线进行处理与分析,是分析应力常用的基本方法,对应力处理有着适用性和准确性^[7]。然后对应力进行分类与评定。本文选择贯穿分歧管厚度且通过最大等效应力点(即分歧管制热工况下出现裂纹的位置)的最短路径为应力处理线。

根据相关钢制压力容器分析设计标准应力分类原则,沿厚度线性分布的应力为一次弯曲应力 p_b ,结构不连续区域内压力产生的薄膜应力为一次局部薄膜应力 p_L ,整体结构不连续处的弯曲应力为二次应力 Q 。通过对上述路径进行

线性化处理,可以得到薄膜应力、弯曲应力和峰值应力。根据相关钢制压力容器分析设计标准,得到各应力强度计算方式,以下是判断各类应力强度的依据。

$$S_{II} = p_L < 1.5KS_m \quad (1)$$

$$S_{III} = p_L + p_b < 1.5KS_m \quad (2)$$

$$S_{IV} = p_L + p_b + Q < 3S_m \quad (3)$$

式中: S_{II} 为一次局部薄膜应力强度,MPa; S_{III} 为一次薄膜加一次弯曲应力强度,MPa; S_{IV} 为一次加二次应力强度,MPa; p_L 为一次局部薄膜应力,MPa; K 为载荷组合系数; S_m 为设计温度下材料的应力强度,MPa; p_b 为一次弯曲应力,MPa; Q 为二次应力,MPa。

在本模拟过程中, $K=1$,分歧管受内压产生的薄膜应力为一次局部薄膜应力,弯曲应力主要为一次应力。因此,应力评价标准为:

$$S_{II} = p_L < 1.5K[\sigma] = 1.5 \times 1 \times 82.69 = 124.04 \quad (4)$$

$$S_{III} = p_L + p_b < 1.5K[\sigma] = 124.04 \quad (5)$$

由于不考虑疲劳破坏,因此忽略了峰值应力强度对分歧管整体强度的影响。通过数值计算之后在Ansys Workbench软件中显示了应力处理后的分布曲线,如图9所示。

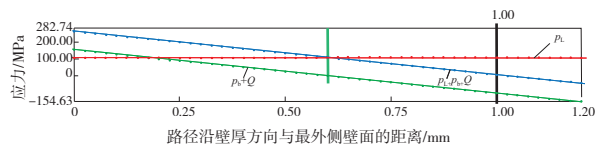


图9 分歧管模型应力线性化分布

表1分别列出了分歧管模型应力处理的结果。由表1可以看出, $S_{III} < 124.04$ MPa不成立,分歧管出现裂纹处应力评价结果为不合格。

表1 应力评定结果 单位:MPa

项目	分歧管出现裂纹的位置对应的值
最大等效应力	305.20
S_{II}	109.96
S_{III}	264.60

4 结语

本文采用流固耦合计算方法,对空调分歧管制热工况时流场的速度分布、变形、等效应力进行了分析,并对分歧管进行强度评定来讨论分歧管制热工况下出现裂纹的原因,得出以下结论。

(下转第41页)

误差补偿效果越明显,精度提高的倍数也越多。

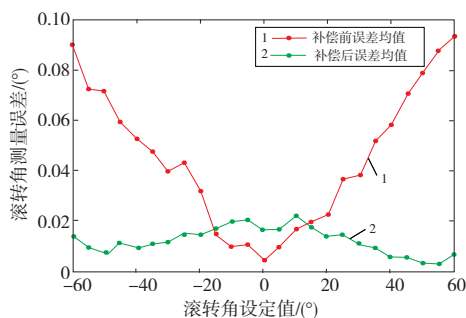


图 13 滚转角补偿前后误差对比图

5 结语

本文建立了角度控制的数学模型,实现了双转轴模型支撑装置的运动学解析。利用高精度水平仪测量得到尾轴和滚转角的误差精度,通过 Matlab 离散数据拟合的方法分别得到尾轴测量值与误差值的误差函数和滚转角测量值与误差值的误差函数。尾轴误差函数用于修正光栅编码器的反馈值,滚转角误差函数用于修正滚转角的运动

学解析公式。误差补偿后的数据表明:尾轴单轴精度可以由初始的 $2'45''$ 提高到 $35''$,精度提高了 3 倍以上;滚转角精度可以由初始的 $6'$ 提高到 $2'35''$,精度提高了 1 倍以上,满足了风洞试验中的精度要求。

参考文献:

- [1] 王帆,施洪昌,盖文,等. 风洞测控技术[M]. 北京:国防工业出版社,2019.
- [2] 李连福. 双转轴模型支撑装置控制系统设计与实现[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [3] 李强,李周复,高小荣. FL-9 低速增压风洞支撑机构设计研究[J]. 机械传动,2008,32(1):15-17,19.
- [4] 刘念,王帆,褚卫华,等. 风洞模型支撑装置驱动油缸位置和速度的精确控制研究[J]. 机床与液压,2014,42(1):86-90,119.
- [5] 恽起麟. 风洞实验数据的误差与修正[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [6] 蒋甲利,张孝棣,贾元胜,等. 模型角度测量误差对阻力系数误差的影响[C]// 探索创新交流——中国航空学会青年科技论坛文集. 银川:[s.n.],2004:546-550.

收稿日期:2023-03-17

(上接第 19 页)

1)通过对分歧管的速度分布、变形、等效应力的分析,确定了分歧管结构的薄弱位置,其与分歧管产生裂纹位置一致,在最大等效应力点进行应力处理。结果可知,分歧管三通根部的一次应力高于许用值,这说明分歧管三通管根部的强度不足,这种分歧管的结构不适合在本空调系统中运用,应对根部进行改进。

2)用流固耦合的方法对空调分歧管进行分析,结果表明分歧管的三通管根部不满足强度要求,而在实际工况下分歧管运行时在三通管根部产生了裂纹,计算结果与实际情况相吻合。这表明本文建立的基于流固耦合的计算模拟方法是可行的,结果是可靠的。

参考文献:

- [1] 李正帅,郭占军,王兆强. 配管长度及分歧管间距对多联式空调性能的影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2012,27(4):33-35.

- [2] 李立民,滕天凤. 涡旋式压缩机在低环境温度多联式空调(热泵)机组中的应用研究[J]. 制冷与空调,2022,22(12):69-73,79.
- [3] 燕子腾,曹昊敏,庄大伟,等. 高落差多分支管路结构对多联式空调系统能力影响的快速仿真[J]. 制冷学报,2023,44(1):59-70.
- [4] 郭占军,沈玉富. 不同作用域的多联式空调系统性能的实验[J]. 低温与超导,2014,42(2):78-80,15.
- [5] 邵文杨,阳光武,肖守讷,等. 基于流固耦合的机车燃油箱冲击计算及试验验证[J]. 振动与冲击,2023,42(7):267-272.
- [6] KELLY W, GIGAS B. Using CFD to predict the behavior of power law fluids near axial-flow impellers operating in the transitional flow regime[J]. Chemical Engineering Science,2003,58(10):2141-2152.
- [7] 栾德玉,王越,魏星,等. 压力容器非径向开孔结构的应力分析和强度评定[J]. 石油化工设备技术,2018,39(1):13-17.

收稿日期:2023-04-11