

# 低温甲醇洗工艺管线振动分析及阻尼减振研究

冯浩然 何立东\* 胡航领

(北京化工大学 机电工程学院 化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029)

**摘要:** 针对某煤化工企业甲醇车间低温甲醇洗工艺管线的振动问题, 首先利用 ANSYS 有限元分析软件对管道进行模态分析, 通过比较分析结果和现场振动数据确定管道振动的主要原因; 然后利用 SAP2000 软件对设置阻尼器前后管道的振动位移进行计算, 探讨阻尼器对管道的减振效果; 最后根据模态分析和振动位移分析并结合现场情况拟定最终减振方案, 在不停机的情况下安装粘滞性管道阻尼器, 有效降低了该管线的振幅, 保证了相关设备的安全运行。

**关键词:** 管道振动; 模态分析; 减振分析; 管道阻尼器

**中图分类号:** TB535 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.05.012

## 引言

管道作为输送介质及传递热量的设备广泛应用于石化、航天、电力等行业。如果管道长期处于振动状态, 在交变应力的作用下很容易出现疲劳损伤, 造成接管、测量计及法兰部位的焊缝开裂, 甚至会引发起火爆炸等恶性安全事故<sup>[1]</sup>, 因此控制管道振动一直是业内重点研究的课题。

引发管道振动的原因主要有旋转机械振动、流体脉动、水锤冲击、气蚀、气液两相流及风载或地震载荷等<sup>[2]</sup>; 工程上采用多种方法控制管道振动, 应用比较广泛的有增设管架、孔板、缓冲器、滤波器等组件, 以及改造管道结构等方法<sup>[3]</sup>。但以上这些管道减振方法均存在不足之处, 改变管道结构可能会使管道产生附加应力, 而增设管道减振组件大多需要在停车的情况下施工, 影响设备的正常生产<sup>[4]</sup>。而管道粘滞性阻尼器可以在不停机、不破坏管道原有支撑的情况下有效耗散管道的振动能量, 达到理想的减振效果。

本文针对包头某煤化工企业低温甲醇洗工艺管线的振动情况, 首先利用 ANSYS 软件进行模态分析, 结合现场测量的振动数据确定管道振动的主要

原因, 然后利用 SAP2000 软件对管道进行阻尼减振分析, 最终确定减振方案。施工完成后管道的振动得到有效控制, 取得很好的减振效果。

## 1 管道参数及振动情况

该管线总长约 55 m, 公称直径 350 mm, 存在 4 个连续弯头, 高速流体遇到弯头后, 对管道产生猛烈冲击, 容易造成管道振动。另外管道设有减压阀, 流体流经减压阀后压力骤降, 产生了闪蒸现象, 部分液态溶液变为气态, 伴随这种相变产生的剧烈压力脉动会加剧管道的振动。

现场可肉眼观测到管道的振动, 用德国 Schenck 公司的现场振动测试仪 (SmartBalancer) 测量的结果显示管道振动频率主要为 4 Hz, 速度为 90.8 mm/s, 最大振幅达到 40 mm。此振幅远远超出美国普渡标准规定的危险界限, 极易导致管线疲劳破坏使甲醇泄漏, 造成严重事故。

## 2 管线有限元分析

### 2.1 ANSYS 模态分析

现场测量管线的结构尺寸, 确定管线支撑与约束的位置, 并结合甲醇车间提供的管线空视图, 利用 ANSYS 有限元分析软件对管道进行实体建模, 结果如图 1 所示。采用四面体单元对管道进行网格划分, 通过分析其前 5 阶模态来确定管道的固有频率, 计算结果如表 1 所示。

由表 1 数据可知, 该管线一阶模态的固有频率为 4.08 Hz, 由此计算出的一阶共振区频率范围为

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 国家“973”计划 (2012CB026000)

第一作者: 男, 1990 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: 1963he@163.com

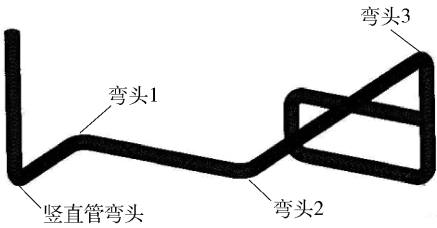


图 1 低温甲醇洗工艺管线模型

Fig. 1 The model of the rectisol process pipeline

表 1 管道模态计算结果

Table 1 Calculation results for the pipeline mode

模态阶次	固有频率/Hz	模态阶次	固有频率/Hz
一阶	4.08	四阶	7.56
二阶	5.42	五阶	9.64
三阶	6.71		

3.26~4.90 Hz。现场测得管线振动频率为 4 Hz,正好处于管道的一阶共振区,由此可知引起该管道振动的主要原因可能是共振。进一步利用 ANSYS 软件模拟计算管道的一阶振型及振动位移,结果如图 2、3 所示。由图 2 可以看出管道振动位移最大处位于弯头 1、2 之间,由图 3 中静止管道与振动管道的对比可以很清晰地看出管道振动的形态主要是横向摆动。模拟计算的管道振动情况与现场实际相符。

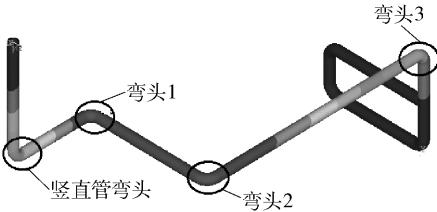


图 2 低温甲醇洗工艺管线一阶模态位移云图  
Fig. 2 The first order modal displacement of the rectisol process pipeline

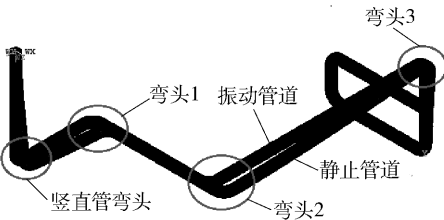


图 3 低温甲醇洗工艺管线一阶模态振型图  
Fig. 3 The first order mode shape diagram of the rectisol process pipeline

根据现场甲醇洗管线的振动情况并结合 ANSYS 模态分析结果,可以确定管道振动的主要原因

是一阶共振,可作为后期减振方案的依据。

2.2 SAP2000 阻尼减振模拟分析

2.2.1 阻尼器选型

依据粘滞性减振原理<sup>[5]</sup>,阻尼器产生的阻尼力  $F = CV^\alpha$ ,其中  $C$  为阻尼系数,受阻尼液黏度影响; $V$  为阻尼器活塞运动的相对速度,与系统的振动强度相关; $\alpha$  为阻尼指数,取值范围 0.3~1。对于同一管道,在相同位置安装的黏滞性阻尼器产生的阻尼力大小受阻尼液黏度影响,即阻尼液黏度越大阻尼器产生的阻尼力越大,对振动管道的减振效果越好。为确定此次管线改造使用的阻尼器型号,利用 SAP2000 软件对现有的 3 种阻尼器进行管线阻尼减振模拟分析,3 种阻尼器 A、B、C 的阻尼系数分别为 76、105 和 137 kN·s/m,阻尼指数均为 0.3。模拟时在竖直管的弯头和水平管的弯头 1、2 共 3 处安装阻尼器。图 4 为施加载荷后的管道振型图,结果显示振动形态与实际情况相符;图 5 为安装阻尼器后管道的振型图,可以看出管道的振动大幅减小。

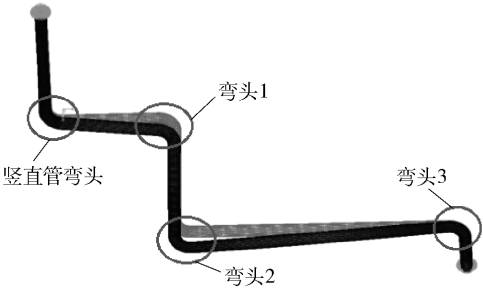


图 4 管道振型图  
Fig. 4 The pipeline vibration map

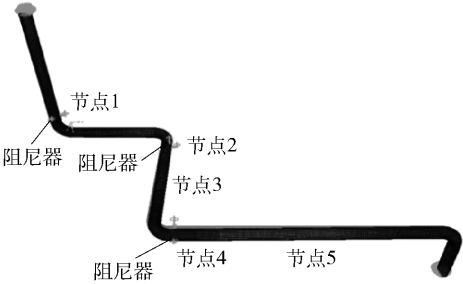


图 5 安装阻尼器后管道振型图  
Fig. 5 Pipe vibration pattern after installing the damper

为分析 3 种阻尼器减振效果的差异,在模型中选取 5 个节点(节点选取位置见图 5)来比较 3 种情况下各节点振动情况。表 2 为选取节点在管道模型上的位置分布,表 3 为安装 3 种阻尼器前后各节点的振动位移。

表2 节点位置分布  
Table 2 Node position distribution

节点序号	节点编号	节点位置
1	1980	竖直管弯头
2	4555	弯头 1
3	5420	弯头 1 与弯头 2 中间
4	6740	弯头 2
5	7795	弯头 2 与弯头 3 中间

表3 3 种型号阻尼器减振效果的比较  
Table 3 Comparison of the damping effects of three types of dampers

节点	振动位移/mm			
	原始振动	阻尼器 A	阻尼器 B	阻尼器 C
1	6.41	1.84	1.23	1.04
2	15.21	3.62	2.98	2.03
3	12.84	3.25	2.76	1.96
4	11.56	2.72	2.24	1.64
5	6.12	1.96	1.35	1.08

由表 3 看出,安装阻尼器 C 后每个节点的振动位移均小于另外两种阻尼器,由此选择阻尼器系数为 137 kN·s/m 的阻尼器。

2.2.2 阻尼器的数量

在已安装 3 个阻尼器的管道模型上继续增加阻尼器个数,探讨阻尼器数量为 4、5 和 6 个时节点位置的振动情况。新增阻尼器安装情况如图 6 所示,安装不同数量阻尼器时选取节点(与 2.2.1 中节点相同)的振动情况如表 4 所示。

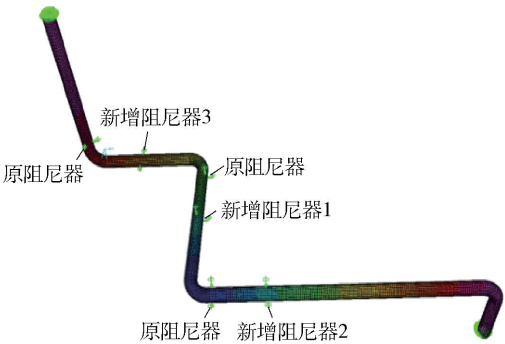


图6 新增阻尼器位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the new damper

由表 4 发现随着阻尼器安装数量的增加,每个节点位置的最大振动位移逐渐减小。靠近新增阻尼器的节点的振动减幅相对其他节点更加明显,而其余节点的减振幅度则随着阻尼器个数的增加逐渐降

低。也就是说阻尼器数量的增加虽然可以改善减振效果,但是改善作用越来越不明显。经综合考虑,确定采用 5 个粘滞性阻尼器较为适宜。

表4 安装不同数量阻尼器时的减振效果  
Table 4 The damping effect when installing different numbers of dampers

阻尼器数量	振动位移/mm				
	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
原始振动	6.41	15.21	12.84	11.56	6.12
3	1.04	2.03	1.96	1.64	1.08
4	0.92	1.52	1.32	1.18	0.93
5	0.82	1.30	1.19	0.98	0.78
6	0.68	1.11	1.10	0.92	0.72

2.2.3 阻尼器安装位置

阻尼器的安装位置同样会影响减振效果,结合厂方提出的减振要求以及现场安装空间的限制,制定了 3 种不同的改造方案。图 7(a)、(b)、(c)分别为 3 种方案阻尼器安装位置示意图。

根据减振目标,需要重点控制竖直管弯头、弯头 1、弯头 2 及管道末端靠近阀门部位的振动。由图 7 看出,3 种方案均在需要控制振动的 3 个弯头部位各设置了一个阻尼器,另外两个阻尼器在弯头 1、2 之间和弯头 2、3 之间两处变换位置。

通过阻尼减振分析,考察选取节点部位的振动情况,结果如表 5 所示。

分析表 5 可以看出,3 种方案中节点 1 的振动位移几乎无变化,节点 2 和节点 3 在方案 1 中振动位移最小,方案 3 中最大,但 3 种方案下两个节点的振动差别不大,与原始振动相比减幅均在 90% 以上,说明管道的前两个弯头及水平管段的振动得到有效控制。节点 4 和节点 5 在采用方案 3 时振动最小,而且相对其他两种方案优势较为明显,说明在方案 3 中水平管的第二个弯头及管道末端的振动得到最有效控制。经综合考虑最终选择方案 3 作为甲醇洗管线振动改造的实施方案。

3 减振方案实施及减振效果

根据阻尼减振模拟计算结果并结合现场安装空间情况,本次改造依照模拟得出的最佳方案,在模型施加阻尼位置对应的管道实际位置安装阻尼器,并对阻尼器的安装结构进行设计。图 8 为此次管道减振改造的三维示意图。在不停车状态下

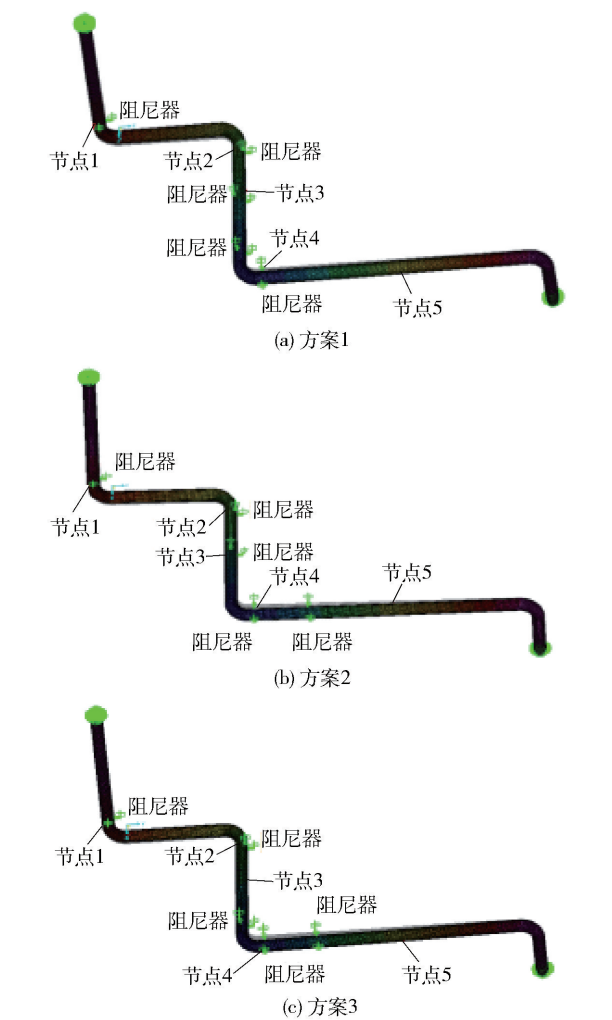


图 7 3 种方案阻尼器安装位置示意图

Fig. 7 Three schematic diagram of the installation positions of the dampers

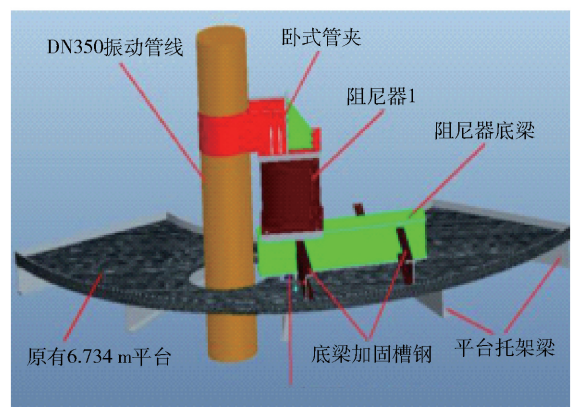
表 5 3 种方案下不同节点振动情况

Table 5 Node vibration of the three schemes

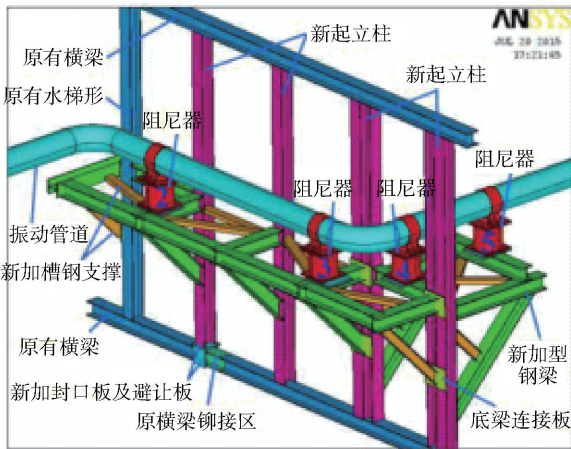
方案	振动位移/mm				
	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
原始振动	6. 41	15. 21	12. 84	11. 56	6. 12
方案 1	0. 81	1. 26	1. 14	0. 95	0. 83
方案 2	0. 82	1. 30	1. 19	0. 98	0. 78
方案 3	0. 82	1. 32	1. 20	0. 91	0. 72

完成管线的减振改造施工,阻尼器安装完成后,对管道各测点振动情况进行测量。每个测点减振改造前后主振动方向的振动数据及管线改造的减振效果见表 6。

由表 6 看出,实际安装阻尼器后各个重点部位的振动减幅均达到 91.3% 以上,管线的振动得到有



(a) 阻尼器 1



(b) 阻尼器 2~5

图 8 低温甲醇洗工艺管道阻尼减振安装示意图

Fig. 8 The damping installation schematic diagram of the rectisol process pipeline

效控制,阻尼器的减振效果明显。

表 6 改造前后管道振动情况

Table 6 Comparison of actual measuring point and model node vibrations

测点位置	振动位移/mm		降幅/%
	改造前	改造后	
阻尼器 1	5. 38	0. 47	91. 3
阻尼器 2	11. 77	0. 52	95. 6
弯头 1、2 中间	10. 87	0. 51	95. 3
阻尼器 4	6. 92	0. 19	97. 3
阻尼器 5	4. 69	0. 23	95. 1

## 4 结论

(1) 利用有限元软件对振动管道进行模态分析可以为确定管道振动原因提供一定参考。



(2)对管道系统进行阻尼减振分析,可以帮助确定阻尼器的型号、数量及安装位置,并为制定阻尼减振方案提供理论依据和优化实施方案。

(3)粘滞性阻尼器安装简单,无需停车,能实际应用于管道减振现场改造,并对管道系统的振动有良好的抑制效果,减振幅度均达到91.3%以上。

#### 参考文献:

- [1] 崔巍升,宫建国,金涛. 化工厂管道振动原因分析及控制[J]. 流体机械, 2011, 39(10): 34-38.  
Cui W S, Gong J G, Jin T. Analysis and control of piping vibration in chemical plant [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(10):34-38. (in Chinese)
- [2] 胡士光,沈小要. 核电厂管道振动原因分析及对策[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3): 208-210.  
Hu S G, Shen X Y. Cause analysis and countermeasures of pipeline vibration in nuclear power plant [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3): 208-210. (in Chinese)

- [3] 周云,刘季. 管道振动及其减振技术[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994(5):108-114.  
Zhou Y, Liu J. Pipeline vibration and vibration reduction technology [J]. Journal of Harbin Architecture & Civil Engineering Institute, 1994(5):108-114. (in Chinese)
- [4] 裴正武,何立东,韩万富,等. 离心泵入口 DN50 mm 管道振动分析及减振方法的研究[J]. 石油化工设备技术, 2012, 33(6):47-50.  
Pei Z W, He L D, Han W F, et al. Study on vibration analysis and vibration reduction method of centrifugal pump inlet DN50 mm pipeline [J]. Petro-chemical Equipment Technology, 2012, 33(6):47-50. (in Chinese)
- [5] 叶正强,李爱群,徐幼麟. 工程结构粘滞流体阻尼器减振新技术及其应用[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32(3):466-473.  
Ye Z Q, Li A Q, Xu Y L. A new technique and its application in engineering structural viscous fluid damper[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2002, 32(3):466-473. (in Chinese)

## Vibration analysis and damping vibration reduction for a rectisol process pipeline

FENG HaoRan HE LiDong\* HU HangLing

(Engineering Research Center of Chemical Safety, Ministry of Education, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to reduce the vibration of the rectisol process pipeline in the methanol workshop of a coal chemical enterprise in Baotou, this paper uses the finite element analysis software ANSYS to analyze the pipeline mode, and determines the main causes of pipeline vibration by comparing the analysis results with the field vibration data. Then the damping effect of the damper on the pipeline is studied by applying SAP2000 software to calculate the vibration displacement of the pipe before and after the damper is set up. Finally, according to the modal analysis and vibration displacement analysis, combined with the situation in the field, this paper proposes a vibration mitigation plan. Without the equipment being shut down, the vibration of the pipeline can be significantly reduced by installing various pipeline dampers, thus ensuring the safe operation of the equipment.

**Key words:** pipe vibration; modal analysis; vibration reduction analysis; pipeline damper

(责任编辑:汪 琴)