

文章编号: 1000-2634(2005)02-0084-04

流体输送管道水击载荷动力学模拟分析^{*}

童 华, 陈小榆, 练章华, 祝效华

(西南石油学院石油工程学院, 四川 成都 610500)

摘要: 在流体输送管道中, 因各种原因会发生水击现象, 从而对管道以及管线上的设备造成危害。为深入了解管线水击现象的产生与发展过程、压力波动及其不稳定载荷对管道结构的影响并预防水击所带来的破坏作用, 用管道应力分析、设计软件 CAESAR II 建立了某输送管线突然停泵造成管线中的压力波动影响的管道动力学模型, 根据水击载荷频谱分析了在水击载荷动力作用下输送管道内各关键点的位移、应力和支反力, 同时进行了输送管道系统的模态分析和固有频率分析。这些结果为合理设计输送管道、管道强度设计和消除水击现象提供了参考依据。

关键词: 管道; 泵; 水击; 动力学分析

中图分类号: TE973.1

文献标识码: A

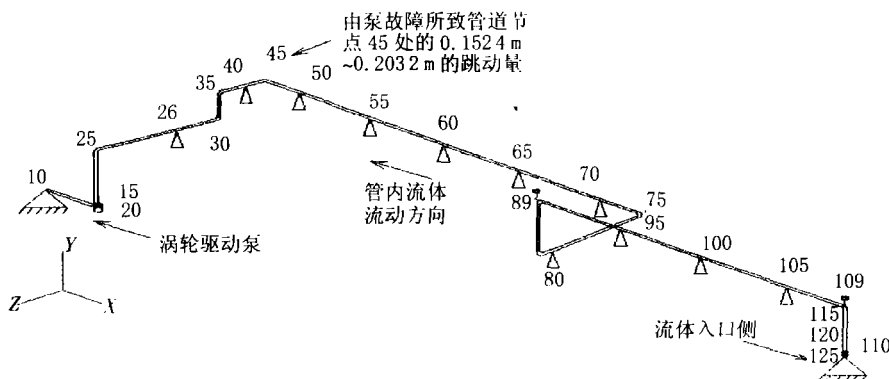
引 言

在流体输送管道系统中, 由于某种原因, 如正常启泵、突然停泵、过快开关阀门、切换流程等操作, 引起流速突然变化, 从而使管道内压力发生骤变, 这一现象称为水击现象。其物理成因是液体具有惯性和粘性^[1], 其特征是流速和压强发生急剧变化, 该增大或降低的压力称为水击压力。水击压力常常会导致管道或设备被水击波冲击破坏, 例如发生泵汽蚀、液

气分离、管道连接部分脱离、泄漏、管线破裂、裂纹扩大、管线中阀门等控制元件以及测量仪表损坏等危害, 因此必须引起足够的重视。

1 输送管道中的水击问题

某流体输送管线简图见图 1 所示。该管线系统由涡轮泵 (图中左下侧) 进行驱动, 当涡轮驱动泵由



于轴承温度问题而下落脱机时, 该管线系统将承受一个压力振荡作用。据现场观测知, 当涡轮发生解扣跳闸时, 45 节点处的弯头沿 x 方向的跳动量为 (0.1524~0.2032 m)。这样大的跳动量正是由于

该输送管线系统突然停泵产生的水击载荷所导致的, 它会严重影响整个管线的正常工作, 很可能会造成管线的损坏或泵的破坏。考虑到管线系统的经济性和安全性, 在不改变工艺条件和管线现有布置的

^{*} 收稿日期: 2004-04-16

作者简介: 童华 (1979-), 女 (汉族), 四川射洪人, 在读硕士, 主要从事油气长输管道研究。

基础上,对管线的水击问题进行模拟,为管线设计更合理的支承方案,并通过讨论提出可行的常规处理措施,以消除或减轻水击波冲击破坏引起的大范围跳动位移。本文案例中描述供给管线的主要参数为:管道平均直径 219.1 mm;管道壁厚 8.2 mm;管道的弹性模量 $2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$;流体密度 999.65 kg/m^3 ;流体压力 1.72 MPa ;温度 60°C ;流体速度 1.83 m/s ;流体体积弹性模量 $2.163 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

2 管线水击动力学分析

2.1 水击过程简析

对于上述的水击问题,泵或阀入口侧的压力波动大小可由式 $\phi = \rho c \Delta v^{[2]}$ 进行计算。泵或阀出口侧上的最大压力波动值为流体汽蚀压力与线压力(排放压力)之间的差值。入口侧上,一个正的压力波动以流体中音速从泵向外传递,该压力波动的大小等于入口侧的压力总数加上“ ϕ ”。出口侧上,一个负的压力波动以流体中音速从泵向外传递。该负的压力波动的最大值为泵的出口压力与流体汽蚀压力之间的差值。一旦泵停转,出口侧上的压力开始降低,下游管道的流体动力吸出口侧压力降低,当流体达到其蒸汽压,则邻近泵的流体便开始反射。当负压波动离开泵,这些汽蚀泡沫立刻破灭。该局部蒸汽“内爆”能引起极大的压力脉冲。此外,可能会由于快速的压力下降而产生流体逆流。问题中,拍击在空转泵上的逆流被其所产生的蒸汽泡沫的破裂所强化,从而产生一个极大的下游水击载荷,将对设备仪器产生极大的破坏作用。从某种程度上讲,该水击载荷是循环作用的。一旦水击载荷达到满额强度,压力波动将横穿整个管路系统。此外,波动反射还可能导致二次压力瞬变^[2]。一般情况下,假设一个或两个显著的压力波动通过管线对问题的分析就已足够了^[2]。

2.2 压力波动及不稳定载荷的计算

如上所述,泵入口侧压力波动的大小可用下式进行估算^[2]

$$\phi = \rho c \Delta v \quad (1)$$

式中

ϕ —泵骤停而致的压力上升;

ρ —流体密度;

c —流体中的音速;

Δv —流体中的速度变化量 (19.686 m/s)。

管道产生水击后,受水击压力的作用,管内液体受压收缩,管道受压膨胀,管道产生的水击压力波沿管道传播,流体中的音速,也即水击波传播速度的估算为^[3,4]

$$c = \left[\frac{E_f}{\rho + \rho(E_f/E)(R/t)} \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中

E_f —流体的体积模数, Pa

E —管道的弹性模量, Pa

R —管道平均直径, m;

t —管道壁厚, m;

ρ —流体密度, kg/m^3 。

计算得到 $c = 1.40 \times 10^4 \text{ m/s}$

将 c 代入式 (1), 得到水击压力波动

$$\phi = 2.38 \text{ MPa} \quad (3)$$

由于泵的骤停,管线中的流动流体将产生两个明显的压力脉冲。一个压力脉冲发生在泵的入口侧,另一个脉冲发生在泵的出口侧。本文仅对泵入口侧的水击效应进行处理,出口侧上的水击载荷亦可照此方法进行处理。

现场实测的管线中出口侧和入口侧水击脉冲的时间历史变化曲线见图 2 和图 3 所示。

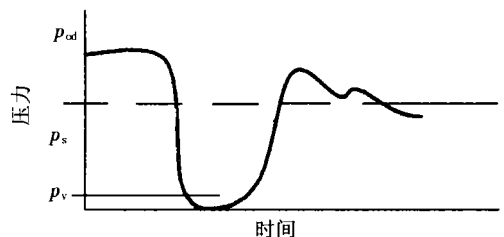


图 2 出口侧压力波动曲线

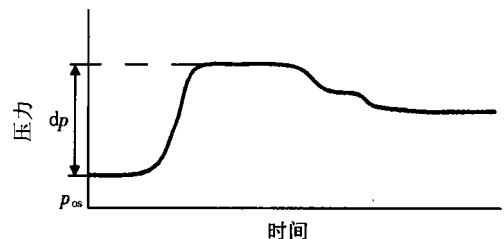


图 3 泵入口侧压力波动曲线

图 2 和图 3 中: p_{od} —出口侧压力; p_s —水源(储水池或静的)压力; p_{os} —吸入压力(当运行时); ϕ —由于通过泵的流动的瞬时阻断而产生的压力波动; p_v —运行温度下的液体汽蚀压力。

管道系统发生水击作用时,入口侧管线要吸收压力波动以使流体通过连续弯头对,这一过程需经历一定的时间,从而在管线中产生一个不稳定载荷。该不稳定载荷的大小由下式计算得到^[2]

$$F(\text{不稳定力}) = \phi p \times A_{\text{rea}} \quad (4)$$

这种不稳定的总时间较短,要么达到新的稳态,要么发生事故。不稳定载荷的持续时间为: $t = L/c$, 其中 L 表示相邻弯头对之间管道的长度。对于文中案例,最有可能引起45节点处的大变形的弯头对是45~70节点间管段和90~110节点间管段,因为这两段弯头一弯头对长度 L 最大,因而 t 最大,所以该动载持续时间长,从而可能引起大的冲击振动变形。

不稳定动载的上升时间应从供应商处获取或经由试验测定(如图2和图3所示)。本问题中,从供应商供给的设备数据可知动载上升时间为5ms。

上述两段管段中各几何参数的计算为:

$$L_{45 \sim 75} = 295.29 \text{ m}, \quad L_{90 \sim 110} = 246.08 \text{ m};$$

$$A_{\text{rea}} = p/4d^2 = 3.23 \times 10^{-2} \text{ m}^2.$$

所以 $F(\text{不稳定力})$ 为

$$F = \phi p \times A_{\text{rea}} = 7.69 \times 10^4 \text{ N} \quad (5)$$

动载持续时间 t 为

$$t = L/c = 21 \text{ ms} (45 \sim 75 \text{ 管段上}) \quad (6)$$

$$t = L/c = 17.5 \text{ ms} (90 \sim 110 \text{ 管段上}) \quad (7)$$

由于案例中的管道为易延展性的低碳钢,所以将大位移作为主要设计变量;即通过重新设计约束系统可以限制由水击载荷产生的大位移时,从而解决该案例中的水击问题,但需注意该新约束系统不应引起任何由于过约束而产生的后来的热力学问题。

2.3 水击载荷频谱分析

应用专业管道分析、设计软件 CAESAR II 进行该管线水击载荷动力学分析输入。其主要操作为^[2]:

(1) 在该软件的水击动力学频谱模块中创建两管段上的动载频谱文件(DLF),得到这两段危险管段上的频率-动载因子变化关系曲线,且将横、纵坐标设置成线性插值模式;

(2) 设置管线上的不稳定动载;

(3) 设置动载分析的工况参数,为分析的方便,将设置两段管线的独立动载工况1、2(分别为管线45~75和管线90~110上的动载工况)及其组合叠加工况3共三类动载分析工况;

(4) 通过设置将静力学分析与动力学分析相结

合建立静动组合分析工况;

(5) 设定几项相关高级控制参数,如非线性约束,截止频率,模态组合方式等。

2.4 模拟分析中的几点讨论

若关注的是临界状态的管道系统,或者要计算缓冲器和约束上的最大载荷,则应对每个弯头对进行单独的压力波动效应分析。要为压力波动通过时有最高压力的弯头对设置单独的力频谱载荷,施力方向背离弯头对。每个独立的力设置应运行一个单独的动载工况分析,常不运行不同力设置的组合分析。当将该方法应用于固定约束很少及振动低模态很多的大型热蒸汽管道系统时,其结果令人满意^[2]。

初始水击激励使钢管壁中产生轴向音波,该音波会导致局部的、短暂的高峰值持续力和应力。但是在设计易延展性管道系统时通常不考虑这些短暂的局部载荷。若考察的是由水击载荷而产生的焊缝及材料中的裂纹扩展问题,则分析中需遵从下列准则:

(1) 分析中常需用到大量自然频率。这些频率是受激励弯头对之间管道的轴向自然模态。在很多情况下要用到300Hz的高阶自然频率^[2],若有必要,还可计算更高阶模态以寻求不再引起力/应力响应明显变化的最高截止频率。最高截止频率可由式 $\text{SQRT}(E/\rho)/L$ 进行估算,其中 L 为主要运行段中的单一管道单元的长度。对45~75弯头对计算6.1m管道长度最高截止频率: $f_{\text{cutoff}} = \text{SQRT}(E/\rho)/L = 134.2 \text{ Hz}$ 。另一可选的替代方法就是将高级控制参数设置域中的短缺质量成分包含与否项目设置为“YES”,它所产生的效果将近似于被忽略模态的贡献值。

(2) 主要轴向运行段中任何单元的长度不应大于 $ct/4$, 其中 t 为水击动载持续时间。该准则对管线中支承、约束的布置有重要的指导作用。如45~75弯头一弯头段管线最大单元长度计算由下式给出: $L_{\text{max}} = ct/4 = 6.86 \text{ m}$ 。由此可知,为精确评估由压力波动横穿管道而产生的应力,各管道单元的长度(也即支承间距)都应小于6.1m(比最大支承间距略小)。对于载荷持续时间更短的管线则需要设置更短的管道单元以便监控压力波动在管道系统中的传播情况。

(3) 包含更高阶态的响应将不再影响位移结果(仅影响力和应力结果)。在包含了模态参与因子大于0.01的低频模态之后,通常就能精确计算出位移

结果, 譬如本文中的 $0.1524 \sim 0.2032 \text{ m}$ 位移结果。

2.5 模拟结果分析

主要从下面几个方面来进行问题的模拟结果分析。

(1) 质量参与因子结果分析: 质量参与因子阐明管道系统各模态对水击动力学载荷的敏感程度。高参与因子值表明该模态易于被施加的动力所激励, 因此那些模态必须被抑制或消除。

冲击动载工况 1、2 下的第 2、9 阶模态的参与因子分别为 -0.3335 和 -0.327 , 说明这两阶模态对水击装敏感度高, 因此管线在实际运行过程中要尽量避免发生这两个频率的冲击振动。

(2) 位移结果分析: 位移结果显示管线中节点 45 处 X 向的最大跳动量为 0.2017 m , 模拟结果处于实测范围内且逼近最大实测值, 说明所用的模拟分析方法可行。

(3) 约束 / 力、力矩 / 应力结果分析: 若分析中包含高阶模态, 则在这些模拟分析结果中给出由总变形和管道中声音应力波传播而产生的系统中力和应力的最大值。反之则该模拟分析结果将仅给出由于总变形而产生的系统中力和应力的最大值。从中得知组合工况 3 的应力报告未通过验证, 有几处代码应力超过许可值。后两个分析结果都涉及了工况的组合。水击问题的频谱分析方法不考虑模态和方向性最大值之间的时间关系。通过获取模态和指向性响应特性的绝对总和来确保保守的完整结果。对每个主要的管道流都运行一个独立载荷工况分析, 而包括所有独立载荷工况的最终组合工况分析能够提供给分析者一个“感性认识”, 以判断何处最易发生故障。本案例中, 节点 45 ~ 75 之间的管道流动为系统动力响应的主要部分。

3 改进措施建议

在流体输送管线的现代化管理中, 认识水击的机理、危害及预防很有必要。综上所述, 笔者对本管线水击问题的解决提出以下几点建议:

(1) 从设计的角度来讲, 需要设计更合理的支承方案。

从两危险管线上支承布置的修正设计角度入手进行大量模拟分析试算, 给出如下支承方案: 在节点 45 处和 105 处分别设置一个导轨及一个轴向极

限止块。管道系统中这两处产生热应力的微小增量 (该热应力在初始状态下为低值), 可削弱管线上由水击载荷所导致的大轴向位移。采用该修正支承方案后不仅减小了晃动量, 也降低了局部瞬时载荷的幅值。

具体施加约束时, 可尽量选择高柔韧性的支承材料, 以充分消除低频冲击所产生的总体变形; 同时可通过构造管线中的局部不连续面积来吸收水击压力冲击, 如支承到管道间的焊接应有额外的焊缝或支承盘面积。

(2) 从生产实践的处理措施角度来讲, 减小管内流速是直接减小水击载荷的有效途径。

若是对阀或泵操作, 则需缓慢关闭阀或泵以减小动量变化的程度^[5], 此“缓慢”限度可用式 $T = 2L/c$ 度量。本案例中, 对于节点 15 ~ 125 之间的波动, $T = 126 \text{ ms}$; 对于引起管线最强烈扰动的节点 45 ~ 75 之间的波动, $T = 42 \text{ ms}$, 因此, 若关闭时间能延缓至大于 126 ms 或 42 ms , 则整个管线或节点 45 ~ 75 之间的水击趋势将减缓。

从能量的角度控制水击的影响, 其具体实施方法主要有: 在管线中对关键阀门进行自动化联网控制, 或安装阀门限位装置控制阀门动作速度; 在恰当位置如泵附近设置高压泄流阀, 实现自动泄压减轻水击波动危害; 设置蓄能罐进行水击防护^[6], 利用气体的可压缩性吸收或释放能量, 如钻井中所应用的空气包的原理。

参考文献:

- [1] 雷西娟. 常见输液管道中的水击控制 [J]. 石油机械, 2002 30(9): 57.
- [2] COADE/Engineering Physics Software, Inc. CAESAR II Application Guide[M]. Version 4.40. Houston: 2002. 162-173.
- [3] Crooke & King. PIPING HANDBOOK. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [4] 赵东瑞译. 管道水击压力的计算 [J]. 油气储运, 1996, 15(10): 59-60.
- [5] 慕希茂. 输油管道水击过程分析 [J]. 西安石油学院学报 (自然科学版), 2001, 16(5): 24.
- [6] 王绍周. 长距离浆体管道输送系统的水击防护 [J]. 水力采煤与管道运输, 1994, (1): 32-33.

(编辑 朱和平)

chuan 610500 China), WANG Rui ZOU Chang-jun et al *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM INSTITUTE*, VOL 27, NO. 2 73–75 2005 (ISSN 1000–2634 IN CHINESE)

VPO catalyst precursors were prepared by reducing V^{5+} in organic phase and added the promoter selected from compounds of Fe Co Cu elements which have the similar radius with V^{4+} . Techniques of X-ray diffraction X-ray photoelectron spectroscopy and X-ray fluorescence analysis were used to investigate the effect of the promoters on the active of VPO catalysts which were tested for the selective oxidation of n-butane to maleic anhydride. Results have revealed that the active phase of the catalyst for oxidation of n-butane to maleic anhydride is the phase $(VO)_2P_2O_7$ and a few $VOPO_4$. The mass yield of maleic anhydride is increased by adding the promoter. The property of the catalyst of adding promoter is better than the single one.

Key words VPO catalyst promoter compounded component

STUDY ON MECHANISM OF CASING FAILURE AND PREVENTION IN HUZHUANG OIL FIELD

HU Ming-wei (Exploration Bureau of Zhong Yuan Oil field), JIA Jian-min, WU Tian-zhong et al *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM INSTITUTE*, VOL 27, NO. 2 76–79 85 2005 (ISSN 1000–2634 IN CHINESE)

At the later stage of oil field development, the worse well condition seriously restricted oil field development level. Based on analyzing deeply the reason of casing failure well of main area piece which the fifth pieces of Huzhuang oil field. The counterplan of prevention and prepared the failure casing were presented in the paper. This technology was a good method to solve the complex fault block oil field to manage the state of the well and extension the life span to oil water well.

Key words casing damage measure of prevention analyzing

APPLICATION OF AHP ON THE CHOICE OF PIPELINE RIVER – ACROSSING PROJECT

JIANG Hong-ye (Southwest Petroleum Institute, Chengdu Sichuan 610500, China), LIANG Guang-chuan, YU Lei et al *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM INSTITUTE*, VOL 27, NO. 2 80–83 2005 (ISSN 1000–2634 IN CHINESE)

In many schemes of big-diameter Pipeline River – acrossing, the layer-analysis method was first used. The essential of layer-analysis method. How to carry into execution the layer-analysis method in the scheme choice of big-diameter pipeline river – acrossing, the layer-structure model with the factors in-

cluding construction periods was established. riverbed adaptability, technique complicity, the effect on the relative assignment and the investment evaluate. At the same time, the author analyzed the gas pipeline river – acrossing of Tang River making use of the layer analysis method, after the calculating the weighted relative value of other schemes to the best river – traversing scheme was obtained. In conclusion the HDD (Horizontal Directional Drilling) is the best scheme among the all schemes of the Tang river – acrossing.

Key words acrossing schemes river AHP pipeline

DYNAMIC SIMULATION ANALYSIS OF WATER HAMMER IN THE FLUID-CARRYING PIPING

TONG Hua (Southwest Petroleum Institute, Chengdu Sichuan 610500, China), CHENG Xiao-yu, LIAN Zhang-hua et al *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM INSTITUTE*, VOL 27, NO. 2 84–87 2005 (ISSN 1000–2634 IN CHINESE)

In the fluid-carrying piping, the phenomenon of water hammer may be caused by various reasons, and so does harm to pipes and equipments. In order to understand the generation and development courses of water hammer, pressure wave and its effect on the piping, and also for the prevention of the damages on pipes and device which was caused by water hammer, the dynamic analysis model of piping effected by the pressure wave which was caused by the sudden closing of the pump in the piping was established by using CAESAR II software, the professional software of piping analysis and design. According to the spectrum of water hammer, the displacement, stress and reaction force/moment of all key points of piping was analyzed under the condition of the dynamic load of water hammer, and meanwhile the modal analysis and nature frequency analysis was carried on. These results are references for reasonable design of piping strength of pipe and the relieving of water hammer.

Key words pipe pump water hammer dynamic analysis

ANALYSIS OF JINI TECHNOLOGY AND ITS PROXY

DUAN Yu (Southwest Petroleum Institute, Chengdu Sichuan 610500, China), ZHAO Zheng-wen, ZHANG Gang *JOURNAL OF SOUTHWEST PETROLEUM INSTITUTE*, VOL 27, NO. 2 88–91 2005 (ISSN 1000–2634 IN CHINESE)

Jini is a new dynamic distributed technology based on java. It can provide a solution to network service, and user can join the adaptive networks whenever he needs. Jini can also simplify the design and running process by using the proxy mechanism. Besides the basic Jini introduction, several proxy techniques were emphatically described.

Key words Jini distributed system; proxy