第 37 卷第 1 期　　东北电力大学学报　　Vol. 37, No. 1
2017 年 2 月　　Journal Of Northeast Electric Power University　　Feb., 2017

文章编号:1005-2992(2017)01-0075-05

液体管不同宽度微小缝隙泄漏数值模拟研究

石志标,孙　宇
(东北电力大学 机械工程学院,吉林 吉林 132012)

摘　　要:为了给声波检测的基础应用提供理论指导,以便提高声波法检测液体管道泄漏的准确性,应用 Ansys 软件进行了不同缝隙宽度的液体管道泄漏数值模拟,得到在入口压力一定的情况下,缝隙宽度发生变化时泄漏位置的流场和压力场变化,研究其对泄漏发声的影响。结果表明:随着泄漏缝隙宽度的增加,泄漏缝隙处空泡发声强度增大;射流冲击泄漏缝隙的壁面以及空泡腐蚀现象将加速泄漏缝隙的扩展。

关　键　词:液体管道;微小缝隙;数值模拟
中图分类号:TK730　　　**文献标识码**:A

管道在工业生产中的应用给人们带来方便的同时也带来了极大的安全隐患,管道发生泄漏时,由于其内部介质的特殊性质极易造成火灾和爆炸等重大安全事故,造成极大的经济损失并对人身安全和环境带来极大的危害[1-2]。随着现代科技的不断发展,新的管道泄露检测方法也不断出现,如何能够更好的进行泄漏检测,将危害降到最低成了一个急需解决的问题。目前,声波检测已经被广泛的应用于液体管道泄漏检测,但泄漏检测误报和漏报时有发生,如何提高检测识别率显得尤为重要[3]。应用 Ansys 软件对管道发生泄漏时泄漏缝隙处的流场进行数值模拟,并对不同缝隙宽度的泄漏流场进行比较,对进一步进行泄漏检测研究提供了理论指导。

1　物理模型

实验过程中,通过格兰富公司生产的 CM10 型水泵对管道系统进行供水;为了降低泵出口位置的水流对泄漏位置的扰动,在泵与泄漏管之间用长 2 m 的 Φ32 钢管连接;泄漏管的出口端采用软管连接,以便出口端排出的水回流至水箱;通过更换泄漏管来实现缝隙宽度的改变,调节调压伐来改变管道系统内部压力。

为了使数值模拟的结果能够满足试验条件的要求,建立物理模型时只截取一段泄漏管道进行研究,并采用 1∶1 的模型比例,管道的具体参数为:长度 500 mm,管内径 32 mm,管外径 38 mm,壁厚 3 mm,泄漏缝隙长度 10 mm,泄漏缝隙距离管道两端 245 mm,泄漏缝隙宽度分别为 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm。

实体建模示例,如图 1 所示。在划分网格时,为

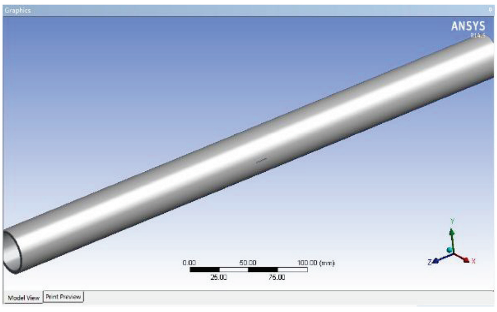

图 1　物理模型实体建模图示

收稿日期:2016-04-12
基金项目:吉林省科技发展计划项目(20100506)
作者简介:石志标(1960-),男,博士,教授,主要研究方向:机械故障诊断.
电子邮箱:1726155644@qq.com(石志标);908059024@qq.com(孙宇)

了能够更好的模拟和分析泄漏位置处的流场变化情况，对泄漏缝隙处进行了局部网格加密处理。

2 数学模型

2.1 数学模型假设

(1)管内部介质为水，管外部介质为空气。

(2)内部介质水具有不可压缩性，其他性质不变。

(3)内部介质从泄漏缝隙流出时，外部空间为无限大。

2.2 控制方程选择

进行数值模拟时，为了能够更好的模拟内部流场选择湍流模型为运动模型，湍流模型选择 k-ε 模型，其控制方程[4]为：

紊动能方程

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\overline{u_k}\frac{\partial k}{\partial x_k}=-\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{\left[u'_k\left(\frac{p'}{\rho}+\frac{1}{2}u'_iu'_i\right)\right]}-\overline{u'_iu'_k}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}+v\frac{\partial 2k}{\partial x_k\partial x_k}-v\overline{\frac{\partial u'_i\partial u'_i}{\partial x_k\partial x_k}}, \tag{1}$$

式中：$k=\frac{1}{2}\overline{u'_iu'_k}$。左端为单位时间内单位质量流体紊动能变化；右端第一项为紊流扩散项，右端第二项为雷诺应力在平均运动引起变形时所作的功率，右端第三项为粘性扩散项，右端第四项为耗散项。

紊流耗散方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\bar{u}_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=&-2v\,u'_j\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}\,\overline{\frac{\partial 2u'_i}{\partial x_j\partial x_k}}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[v\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}-v\,u'_k\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}\,\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}-\frac{2v}{\rho}\overline{\frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}\,\overline{\frac{\partial p'}{\partial x_k}}\right]\\&-2v\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k}}\,\overline{\frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}\,\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}-2v\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}\left(\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}\,\overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}+\overline{\frac{\partial u'_k}{\partial x_j}}\,\overline{\frac{\partial u'_k}{\partial x_i}}\right),\end{aligned} \tag{2}$$

式中：左端为 ε 的变化率，右端第一项为产生项，第二项为紊流扩散项，第三项和第四项为耗散项。

应用 k-ε 方程能够很好的解决湍流计算中方程不封闭的问题，应用的 k-ε 模型通过湍流黏性系数的函数来表示雷诺应力，而湍动能和能量耗散率又可以表示出黏性系数，从而很好的封闭方程。大量的工程实际应用表明，标准 k-ε 模型具有很好的预测能力，并且数据稳定[5]。

2.3 边界条件设置

(1)管道入口处的边界条件为压力入口。

(2)管道出口处的边界条件为开放性压力出口，以确保流体能够顺利的流出。当流体流出管体时，直接进入空气中，所以压力出口的压力设置为环境大气压。

(3)管道泄漏处的边界条件为开放性压力出口，压力大小为环境大气压。

(4)管体的边界条件为绝热无滑移，应用可以促进模拟的收敛性和准确性的 Scalable 函数[6]作为近壁位置的壁面函数。

2.4 求解方法

应用 CFX 软件进行求解的过程，就是残差的比较过程。当残差值小于一定值时，认定求解的结果可以描述所要求解的模型，本文采用差分格式中的迎风模式进行求解运算，该模式在进行湍流模型运算时具有很好的收敛性，同时设定最大残差值为 1×10^{-5}，该精度为超精确收敛，对于一般的几何敏感问题都能够得到很好的解决[7]。

3 模拟结果及分析

选定入口压力为0.6 MP 分别对缝隙宽度为0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm 的模型进行数值模拟，以比较

当入口压力一定时,缝隙宽度变化时内部流场的变化情况。

3.1　泄漏缝隙处的速度分布

图 2、图 3、图 4 分别为入口压力一定时 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm 宽度的缝隙泄漏位置的速度矢量图。从图中可以看出,当入口压力一定泄漏缝隙的宽度发生变化时,管道内部的速度矢量情况基本不变,主流体受泄漏影响较小,主要是泄漏位置处近壁面流体在管道内外压差的作用下向外流出,但由于流速较高致使泄漏液体不能迅速的流出泄漏缝隙从而冲击泄漏缝隙壁面,泄漏流体在经过泄漏缝隙向外流出的过程中一部分流体直接冲击泄漏缝隙壁面从而产生速度瞬间停滞,其余流体则分别沿着泄漏缝隙壁面向上和向下流动。当管道内主流体流速很高的时候,管道内部介质在发生泄漏时只沿着靠近出口端的泄漏缝隙壁面流出,而不是在整个泄漏缝隙均有液体流出。

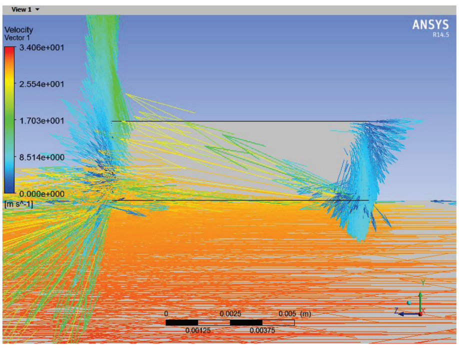

图 2　缝隙宽度 0.2 mm 速度矢量图

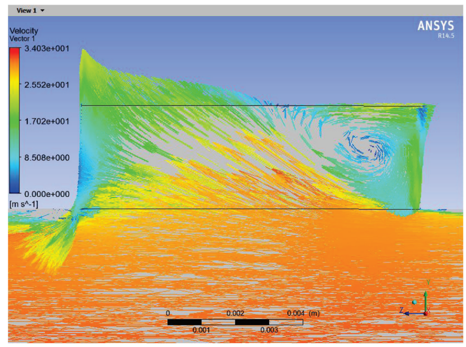

图 3　缝隙宽度 0.4 mm 速度矢量图

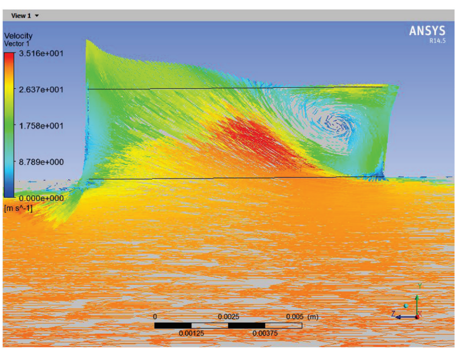

图 4　缝隙宽度 0.6 mm 速度矢量图

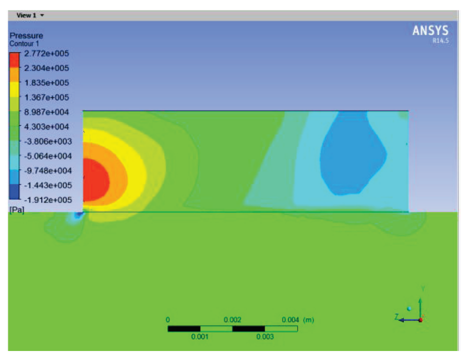

图 5　缝隙宽度 0.2 mm 压力分布

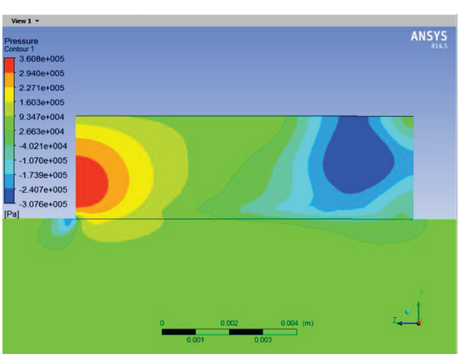

图 6　缝隙宽度 0.4 mm 压力分布图

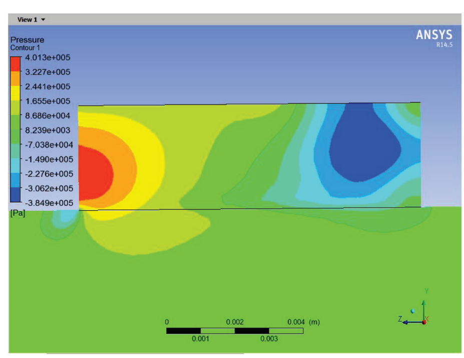

图 7　缝隙宽度 0.6 mm 压力分布图

3.2　缝隙泄漏处的压力分布

图 5、图 6、图 7 分别为入口压力一定时 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm 宽度的缝隙泄漏位置的压力分布图。对比三种缝隙宽度下的压力分布图可以看出,当缝隙宽度发生变化时,管内部整体压力场变化较小,在泄漏位置处由于主体流速较高惯性较大,在内外压差的作用下向管外部流出时不能及时改变流动

方向从而冲击泄漏缝隙壁面,冲击到缝隙壁面时产生瞬间的速度停滞,动能转化为压力势能,造成了高压核心区的形成;而当泄漏位置处形成稳定射流后,射流周围在卷吸作用下产生漩涡,漩涡中心处的压力相对较低,越靠近射流主体卷吸作用越强,压力越低,从而形成低压核心区。

入口压力一定时,随着泄漏缝隙宽度的逐渐增大,泄漏位置处的高压区范围随之增大,同时高压区内部压力值也随之增大,泄漏缝隙壁面上的最高压力可达到入口压力的三倍,长时间的高压冲击使泄漏缝隙的扩展速度大大增加。同时,泄漏位置处的低压区范围随着缝隙宽度的增大而增大,低压区的压力随之降低,当局部区域内的压力降到相应温度下液体介质的饱和蒸汽压时会产生空化核,当空化核的半径大于临界半径时将失稳发生空化效应[8-9]。

当空泡进入高压区时会发生空泡溃灭发声,我国学者黄景泉给出了单个空泡溃灭表达式[10]:

$$p(R,r)=\frac{\sigma}{r}\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)2-3\right]+\frac{P_\infty-P_V}{r}\left\{\frac{4R}{3}\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)2-1\right]-\frac{R2_0}{R2}\right\}$$
$$-\frac{p_1}{(1-r)r}\left\{\frac{4R}{3}\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)3-\left(\frac{R_0}{R}\right)3\gamma\right]-\frac{R3_0}{R2}+\frac{\gamma R3\gamma_0}{R(3\gamma-1)}\right\}\ , \qquad (3)$$

式中:R 为空泡溃灭阶段半径;P_∞ 为未受扰动处的液体压力;P_V 为泡内蒸汽压力;p_1 为溃灭起始时的泡内空气压力;γ 为绝热系数;R_0 为溃灭起始时刻的空泡半径;T 为表面张力为液体温度。

由上式可知,R_0 当和 T 一定时,空泡溃灭的发声强度随着未受到扰动处的液体压力的增大而增大;同时,随着低压区范围的增大,低压区内的空泡数目增多,进而同时溃灭时空泡噪声幅值叠加造成声强增大。空化效应同时伴随着空化气蚀,在空化气蚀的作用下会加速压力管道的破坏。

3.3 缝隙泄漏处的耦合分析

以泄漏缝隙宽度为 0.6 mm 的耦合分析结果为例,从图 8 中可以清晰的看出,当发生微小泄漏的时候,管内液体对管整体的应力作用比较小,但是在泄漏缝隙两侧存在着明显的应力集中,泄漏缝隙处的应力变化范围为 0.996 09 MP 到 4.640 2 MP,普遍高于管内液体压力,应力最大处的应力值可达到管内压力的 7 倍,其中应力最大的位置为管内流体瞬时冲击泄漏缝隙壁面位置。

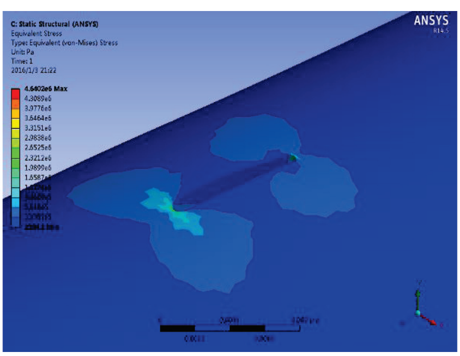

图 8 缝隙宽度 0.6 mm 应力分布图

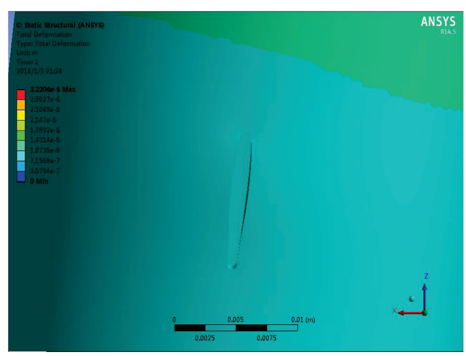

图 9 缝隙宽度 0.6 mm 形变图

图 9 为流体模拟结果加载于管体模型上的形变结果,从图中可以明显看出,泄漏缝隙在流体压力作用下,靠近管体出口端的缝隙发生了明显的沿管体径向的扩张,使得原本规则的直线边界变为椭圆形边界。

4 结 论

(1)当入口压力一定时,随着泄漏缝隙宽度的增加,管道内部介质的流动速度随之增大,泄漏缝隙处的高压区和低压区的范围增大。

(2)随着低压区内部压力的降低,泄漏缝隙处空泡发声的声强增大;随着低压区范围的增大,泄漏缝隙处产生的空泡个数随之增多从而使空泡发声的声强随之增大。

(3)泄漏缝隙处的射流持续冲击泄漏缝隙的壁面以及负压区内空泡腐蚀现象将加速泄漏缝隙的扩展。

(4)在泄漏缝隙的两端存在应力集中,应力值普遍高于管内压力值;并且泄漏缝隙在应力作用下发生沿管径方向的形变。

参　考　文　献

[1] 宋源.国内外油气管道泄漏检测技术研究进展[J].当代化工,2013,42(3):297-299.

[2] 陈雷,葛烜铸,王彦升,等.国内化工园区输料管道泄漏检测技术的研究进展[J].科技信息,2014(1):121-122.

[3] 苏天一,石志标.液体管道泄漏的流场模拟与泡声分析[J].东北电力大学学报,2013,33(3):35-37.

[4] 周云龙,郭婷婷.高等流体力学[M].北京:中国电力出版社,2008:150-151.

[5] 丁源,吴继华.ANSYS CFX14.0 从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2013:81-86.

[6] 黄志新,刘成柱.ANSYS Workbench14.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2013:450-459.

[7] 谢龙汉,赵新宇,张炯明.ANSYS CFX 流体分析及仿真[M].北京:电子工业出版社,2012:156-163.

[8] 王含.气泡行为的数值研究[D].上海:复旦大学,2010.

[9] 朱坤,沃恒洲,徐玉福,等.流体物性对空化气泡溃灭过程影响研究[J].合肥工业大学学报,2011,34(9):1295-1297,1312.

[10] 黄景泉.空泡起始和溃灭阶段的噪声[J].应用数学和力学,1990,11(8):725-730.

Numerical Simulation of Liquid Pipeline Gap Leakage Under Different Width

Shi Zhibiao, Sun Yu

(School of Mechanical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012)

Abstract: In order to provide a theoretical guidance for the basic application research of acoustic detection and improve the accuracy of liquid pipeline leakage detection with acoustic wave detector, liquid pipeline leakage under different gap width has been simulated by ANSYS, obtained the changes of flow field and pressure field in the case of inlet pressure constant and the leak gap width changes, study its effect on the sound of the leak. The result show that the strength of vacuoles sound will grow with the changes of leak gap width, the spread of leak gap will accelerate because of jet attack the wall of leak gap and cavitation corrosion.

Key words: Liquid pipeline; Small gap; Numerical simulation