

文章编号:1671-6833(2017)04-0007-05

纵向激励下防波板组合形式对罐箱液体晃动的影响

丁 昌, 付延唐, 吴学红, 龚 毅

(郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于 VOF(volume of fluid)模型采用 Fluent 软件,模拟了罐车突然制动时罐箱内液体的晃动过程.对比罐箱内液体晃动对前后封头的压强变化,结果表明,液体主要对前封头有较大的冲击载荷.设置防波板可有效减小罐箱内液体的晃动,降低液体对封头的冲击力,提高罐箱的安全性.研究了 5 块相同的弓形防波板在全下布置、全上布置、上下交错、左右交错 4 种不同的布置形式在不同充液率时对前封头的冲击,结果表明,在较低充液率时防波板左右交错和全下布置均能降低液体对前封头的冲击载荷,而防波板上下交错和全上布置的防波效果较差.随着充液率的升高,防波板左右交错的效果逐渐变差.在不同的充液率下,防波板全下布置均有较好的防波效果.

关键词: 罐箱;VOF 模型;防波板;布置形式;防波效果

中图分类号: U469.61 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.012

0 引言

液体晃动现象广泛存在于运输、地震、核工程、航空航天等领域^[1].罐箱作为工业生产中常用的运输工具,由于其装载量大,当运动状态突然发生改变时,引起内部液体大幅晃动,对罐壁产生冲击载荷,严重影响罐车的安全行驶^[2].此外,由于罐箱内介质大多属于易燃、易爆、有毒物质,液体晃动产生的静电和热量,导致罐箱内压力升高,造成介质泄露甚至产生爆炸,对罐箱的安全构成极大的威胁^[3].在罐箱内设置合理的防波板能够有效减弱液体的晃动,降低罐箱内液体对罐壁的冲击力,对罐车安全稳定的行驶具有重要的意义^[4].

20 世纪 70 年代初,国外学者已经开始进行理论研究,Moiseev^[5]通过 Ritz 法得出了液体在立式圆柱形容器和矩形容器内晃动的固有频率.但是由于影响罐内液体晃动的因素较多,液面的边界条件是十分复杂的非线性方程,使得罐内液体晃动的求解极其困难,其他国内外学者对此也进行了大量的理论分析、实验研究和数值模拟^[6].Lee 等^[7]对造波池中相同尺寸的空贮箱和部分充液的贮箱进行了实验和模拟研究,随着波浪频率

的增大,充液贮箱的晃动逐渐比空贮箱剧烈.Akyildiz 等^[8]针对三维液罐内液体晃动的压强分布进行了实验研究,发现防波板能够大大降低液体的晃动.AKyildiz 等^[9]实验研究了圆柱形贮箱在未带防波板和带有环形防波板两种情况下,液体对贮箱压强的变化,以及在不同安装位置、不同充液高度、不同旋转速度下环形防波板的作用,环形防波板非常有效地降低了液体对贮箱的冲击载荷.Xue 等^[10]针对竖直防波板和带孔防波板在不同激励下进行试验和数值模拟研究,结果表明,竖直防波板在低频激励下降低了液体的晃动,而在高频激励下带孔防波板有较好的防波效果.Panigrahy 等^[11]通过实验对竖直带孔防波板和环形防波板进行了研究,结果表明,环形防波板具有更好的效果.Zhang^[12]提出一种楔形 LNG 储罐,并用数值模拟的方法研究了其防波性能,结果表明其防波效果较好.Yu 等^[13]提出了一个流固互相影响的计算框架,利用自己开发的有限元方法获得了穿刺能量和速度之间的定量相关性.张韬等^[14]采用 VOF 模型对罐车制动过程中内部液体的自由晃动过程进行了模拟,计算得出罐体各个部分的应力分布.文献大多研究了防波板的形状、位置等因素对防波效果的影响,少有人研究防波板的

收稿日期:2016-10-28;修订日期:2016-11-11

基金项目:河南省产学研合作项目(23000253);郑州轻工业学院横向项目(001586);郑州轻工业学院博士项目(000524)

通信作者:丁昌(1981—),男,河南信阳人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要从事低温容器的热性能与结构优化等方面的研究,E-mail:shesdc@126.com.

布置形式对防波效果的影响.

笔者针对某种型号的罐车,基于 VOF 法,采用 Fluent 软件,对安装 5 块相同的弓形防波板进行数值模拟.由于罐箱运行过程中以纵向激励载荷(载荷沿着罐体的轴向)为主,因此重点关注纵向激励条件下的液体晃动特性.首先研究了罐车制动时罐内液体的涌动规律及防波板的作用;其次对不同防波板布置形式的防波效果进行了比较,并研究了充液率对结果的影响.

1 理论模型

1.1 流体动力学控制方程^[15]

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho u_i)u_i]}{\partial x_i} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - \rho f_i = 0. \tag{2}$$

式中: u 为速度, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 .

1.2 VOF 体积函数方程^[16]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla(uF) = 0, \tag{3}$$

式中: F 为流体体积分数; u 为速度, m/s .

2 初始计算条件

采用基于压力的非稳态算法, κ - ε 方程, 动网格技术. 初始速度 $v = 10 \text{ m/s}$, 制动加速度 $a = 5 \text{ m/s}^{-2}$. 速度和压力耦合采用 SIMPLE 算法, 压力修正方程的离散格式采用 PRESTO 格式, 对流项离散格式采用一阶迎风格式.

3 罐内液体的晃动过程

3.1 几何模型

图 1 为建立的罐箱模型, 罐体长 $L = 9\,080 \text{ mm}$,

前后封头为标准椭圆封头, 直径 $D = 2\,600 \text{ mm}$. 充液率为 50%, 罐内液体为水, 其余为空气, 物性参数如表 1 所示.

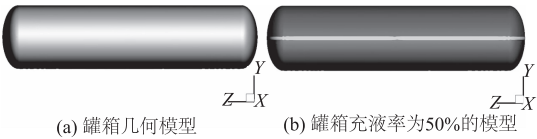


图 1 罐箱的模型
Fig. 1 Container model

表 1 介质的物性参数
Tab. 1 Properties of medium parameters

介质	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
水	998.2	1.0×10^{-3}
空气	1.2	1.8×10^{-5}

3.2 晃动过程分析

假设罐箱以初速度 $v = 10 \text{ m/s}$ 沿 Z 轴正向运动, 突然以 $a = 5 \text{ m/s}^2$ 的加速度作减速运动, 2 s 后静止, 计算时间共 10 s. 图 2 表示了制动过程中罐箱内液体的变化.

由图 2 可以看出, 罐箱在制动时, 罐箱内液体因惯性作用向 Z 轴正向即前封头涌动, 在 2 s 罐车静止时, 罐箱内上部液体已经开始向后封头涌动, 随着时间的推移, 冲向后封头的液体越来越多. 8 s 时罐箱内液体又向前封头涌动, 10 s 时趋于平缓状态. 整个过程中前后封头所受压强的变化如图 3 所示(充液率为 50%), 前封头的压强逐渐增大, 后封头的压强逐渐减小, 在 1.2 s 时前封头的压强达到最大值 $4.3 \times 10^5 \text{ Pa}$, 之后液体开始向后封头涌动, 前封头压强随之降低, 2.2 s 时前封头压强降到最小值, 此时后封头压强达到局部最大值. 如此反复的涌动, 由于罐箱的作用力和液体的黏性力, 罐箱内液体的晃动逐渐趋于平缓. 当罐箱内安置防波板时, 液体对前封头的压强变化

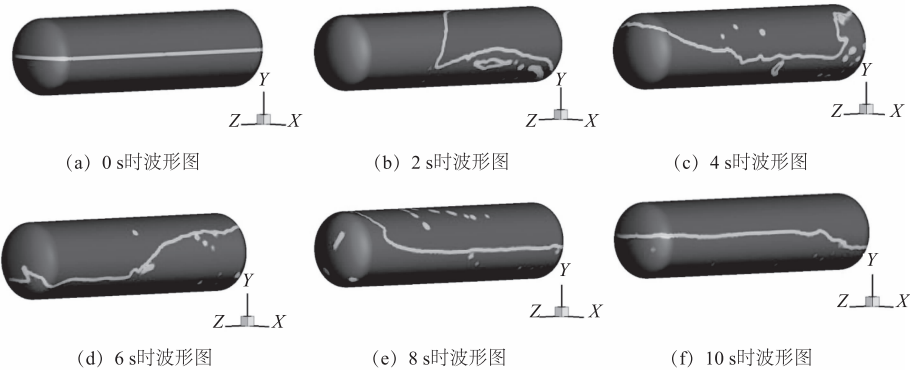


图 2 罐箱内液体的晃动过程
Fig. 2 The process of liquid sloshing in the container

如图 4 所示(充液率为 50%),从图中 4 可以看出,罐箱内加防波板以后,前封头的最大压强为 2.1×10^5 Pa,没有明显的上升阶段,而是不断下降直至趋于稳定,这是由于防波板改变了罐箱内的空间布局,进而改变了液体的流场分布,能够明显抑制液体的晃动,降低液体对前封头的冲击载荷。

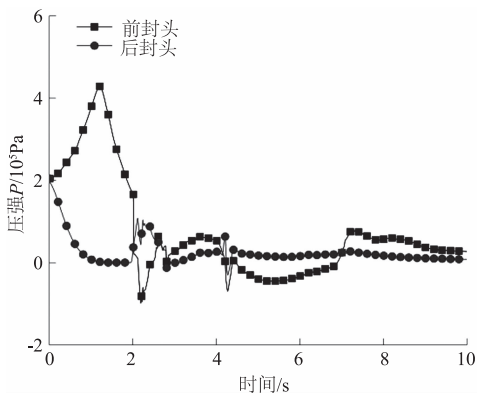


图 3 前后封头的压强曲线
Fig.3 The change of pressure former and after in the head

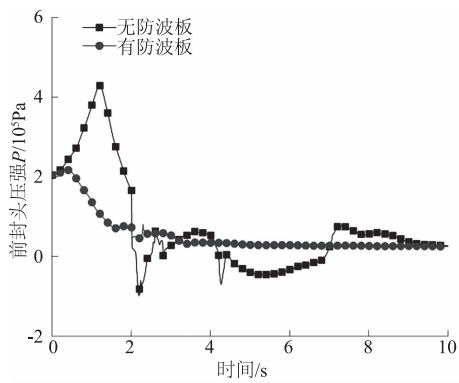


图 4 前封头的压强曲线
Fig.4 Pressure variations former head

4 防波板不同布置形式的结果分析

由图 3 可以看出,罐箱内液体主要对前封头有较大的冲击载荷,因此以液体对前封头的压强的大小评价防波板不同布置形式的优劣,并考虑充液率对其结果的影响。从图 4 可以看出,有无防波板的比较主要体现在罐箱制动的前 2 s 以内,2 s 以后基本无变化。基于对罐箱内液体晃动规律的研究,防波板安装方向均垂直于液体的涌动方向。

4.1 防波板的 4 种布置形式

采用 5 块相同的弓形防波板,弓形防波板的面积为罐箱横截面的一半,防波板所在的平面把罐箱内部均分为 6 部分。图 5 所示为 4 种防波板

的布置形式:全上布置、全下布置、上下交错布置、左右交错布置。

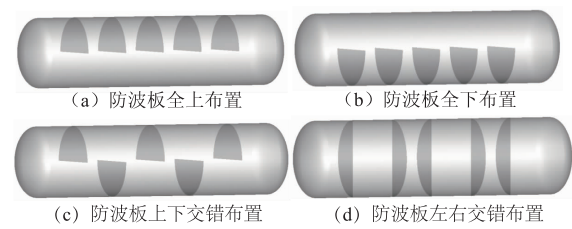


图 5 防波板的布置形式
Fig.5 Arrangement of baffles

4.2 充液率为 50% 和 60% 时的结果分析

图 6 为充液率为 50% 和 60% 时防波板不同组合形式条件下罐箱前封头压强变化曲线图。由图中可以看出,防波板左右交错和全下布置的布置形式均能降低液体对前封头的冲击载荷,其中防波板全下布置时前封头所受压强的峰值最小,防波效果最好。防波板全上布置和上下交错布置时罐内液体晃动加剧,不仅没有降低液体对前封头的冲击载荷,反而加大了液体对前封头的冲击。

充液率为 50% 时,防波板全上和上下交错的布置形式在 0.1 s 出现局部的压强波峰,此时壁面剪切力的矢量图如图 7 所示,距离前封头最近的防波板处均出现漩涡,阻挡了表面液体向后封头的涌动,迫使前封头的压强增大。部分液体在压力下向第一块防波板(距离前封头最近)和第二块防波板之间涌动,前封头压强随之降低,但仍高于无防波板时的压强。液体在前封头聚集到一定程度从液体表面向后封头涌动,防波板全上布置和上下交错布置时,距前封头最近防波板均在顶部形成半封闭的结构,迫使压力波峰提前出现且波峰值增大。

充液率为 50% 时,无防波板的罐箱前封头在 1.2 s 时达到压强波峰。图 8 为无防波板和防波板全下布置在 1.2 s 时的液相图,从图 8 中可以看出,罐箱制动时液体向前封头涌动,主流区域在罐箱内底部,全下布置的形式有效地阻挡液体的晃动。

充液率为 60% 时,左右交错的布置在 1.2 s 时出现压强波峰,液相图和壁面剪切力矢量图如图 9(c)、(d) 所示。(a)、(b) 为充液率为 50% 时的液相图和壁面剪切力矢量图。随着充液率的升高,防波板左右交错布置时罐箱内液体对前封头的压强并不是简单的线性增大,液体的晃动过程发生了改变,防波板对液体的阻挡作用降低,液体聚集到一定程度后更迅速地涌向前封头,前封头处的静压大幅度增大,造成总压强剧增。

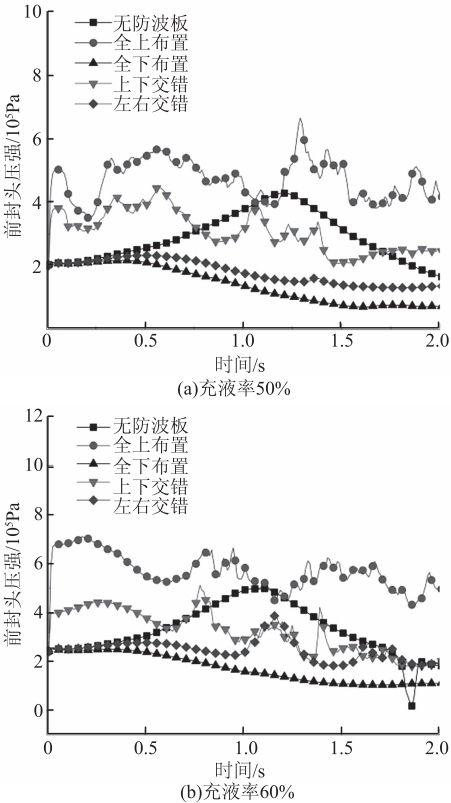


图 6 充液率为 50% 和 60% 时前封头压强变化曲线
Fig. 6 The pressure curve on former head filling rate of 50% and 60%

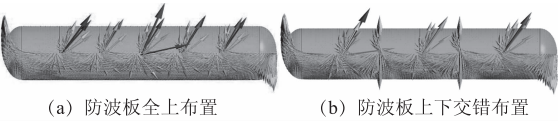


图 7 壁面剪切力矢量图
Fig. 7 Wall shear force vector



图 8 波形图
Fig. 8 Waveforms

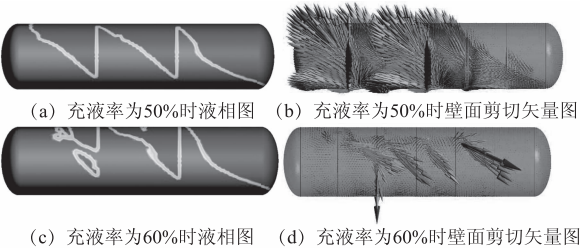


图 9 防波板左右交错布置在 1.2 s 时的波形图
和壁面剪切力矢量图
Fig. 9 Baffles disposed in staggered around 1.2 s of
waveforms and wall shear stress vector

4.3 充液率为 70% 和 80% 的结果分析

图 10 为充液率为 70% 和 80% 条件下, 罐箱前封头的压强变化曲线. 由图可见, 随着充液率从 50% 升高到 70%, 4 种不同的防波板布置形式和无防波板的罐箱内液体对前封头的压强波峰均随着充液率的升高而增大. 当充液率为 80% 时, 罐箱内液体晃动的幅度减小, 不同防波板布置形式之间的差别减小, 防波板全上布置的前封头压强波峰值反而出现了下降. 图 11 所示为充液率 70% 和 80% 防波板全上布置在压强波峰时刻的液相图和壁面剪切力图, 从图中可以看出, 随着充液量的升高, 上部防波板起到一定阻挡作用, 前封头所受最大压强降低.

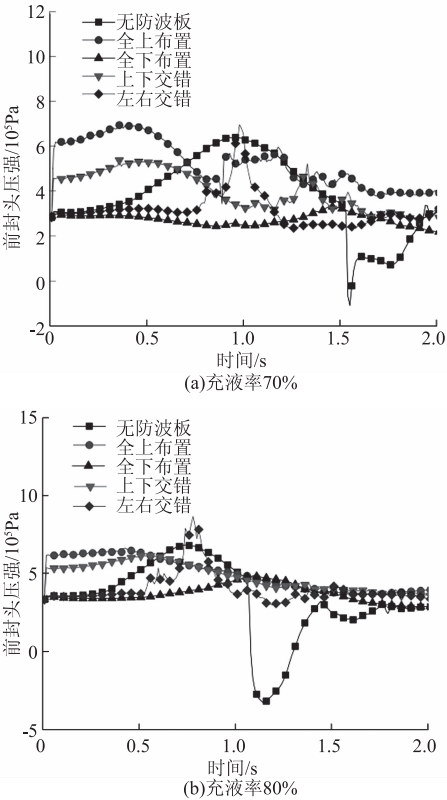


图 10 充液率为 70% 和 80% 时前封头的压强变化曲线
Fig. 10 The pressure curve on former head filling rate of 70% and 80%

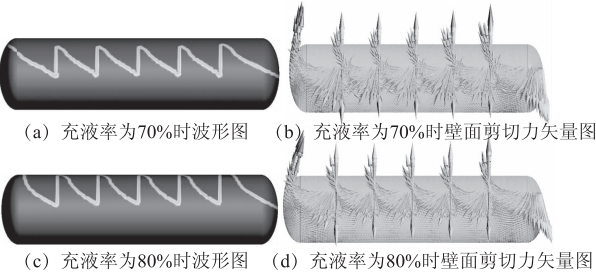


图 11 波形图和壁面剪切力矢量图
Fig. 11 Waveforms and wall shear stress vector

4.4 充液率为90%的结果分析

防波板左右交错的布置形式在罐内形成一个水平方向的蛇形流道,随着充液率的升高,大量液体在前封头聚集时,蛇形流道阻碍作用开始明显出现,阻挡了液体向后封头涌动,造成前封头压强短时间内急剧增大,如图12所示.同样由于防波板上下交错的布置形式在竖直方向形成一个蛇形通道,防波板上下交错布置时前封头的压强超过全上布置时前封头的压强.

无防波板的罐箱内液体对前封头的压强出现两次较大波峰,而防波板全下布置的方式则出现一次波峰且波峰值小于无防波板时的波峰值,因此充液率为90%时防波板全下布置仍具有较好的防波效果.

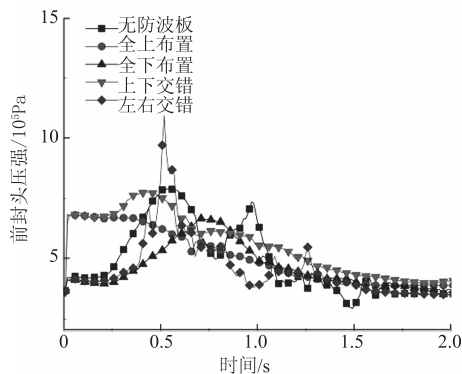


图12 充液率为90%时前封头的压强变化曲线

Fig.12 The pressure curve on former head filling rate of 90 %

5 结论

通过对设置5块防波板的罐箱在纵向激励载荷作用下液体晃动特性的计算分析,可得出如下结论:

(1)以一定速度沿纵向运行的罐箱在制动时,罐箱的前封头压力在短时间内迅速增加,随后急剧下降,然后逐渐趋于平稳.后封头的压力则从制动开始时不断下降,随后维持在与前封头压力几乎相同的数值水平上.

(2)当充液率变化时,不同的防波板设置形式在对罐箱内液体晃动的防波动效果上有显著的差异.在较低充液率时,防波板全下布置和左右交错的布置形式均有较好的防波效果,防波板上下交错和全上布置防波效果较差.随着充液率的升高,防波板左右交错的效果逐渐变差,在高充液率时防波板左右交错的布置形式最差.

(3)防波板全下布置的形式由于位于主流区

域,在不同的充液率下均具有最好的防波效果.充液率为80%时,罐箱内液体的晃动幅度最小,是较适宜的充液系数.

参考文献:

- [1] IBRAHIM R A. Liquid sloshing dynamics: theory and application [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] 孙丽娜,周国发. 罐式集装箱液体晃动过程数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(22): 147-150.
- [3] 陈志伟. 移动式压力容器介质晃动数值模拟及防波装置研究[D]. 浙江大学材料与化学工程学院, 2006.
- [4] 刘奎,康宁. 罐车制动时液体晃动的仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 799-803.
- [5] MOISEEV N N. On the theory of nonlinear vibrations of a liquid of finite volume[J]. Applied mathematics and mechanics, 1958, 22(5): 612-621.
- [6] 靳玉林. 具有新型防晃结构贮箱的液体晃动动力学分析[D]. 哈尔滨工业大学航天学院力学系, 2013.
- [7] LEE D Y, CHOI H S, FALTIBSEN O M. A study on the sloshing effect on the motion of 2d boxes in regular waves[J]. Journal of hydrodynamics, 2010, 22(5): 446-451.
- [8] AKYILDIZ H, ÜNAL E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing[J]. Ocean engineering, 2005, 32(12): 1503-1516.
- [9] AKYILDIZ H, ERDEM ÜNAL N, AKSOY H. An experimental investigation of the effects of the ring baffle on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank[J]. Ocean engineering, 2013, 59(1): 190-197.
- [10] XUE M A, LIN P Z, ZHENG J H, et al. Effects of perforated baffle on reducing sloshing in rectangular tank: experimental and numerical study[J]. China ocean engineering, 2013, 27(5): 615-628.
- [11] PANIGRAHY P K, SAHA U K, MAITY D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks[J]. Ocean engineering, 2009, 36(4): 213-222.
- [12] ZHANG C W. Analysis of liquid sloshing in LNG carrier with wedge-shaped tanks[J]. Ocean engineering, 2015, 105(7): 304-317.
- [13] YU H, JEONG D Y. Impact dynamics and puncture failure of pressurized tank cars with fluid-structure interaction: a multiphase modeling approach[J]. International journal of impact engineering, 2016, 90(12): 12-25.

(下转第34页)