

储罐外爆冲击波数值模拟及超压公式研究

唐兴亮,管友海,贾娟娟,西文喜

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:为研究储罐外爆冲击波的传播规律和对储罐安全性的影响,应用软件 LS-DYNA 建立炸药-储罐的数值模型,并进行空爆数值计算。研究分析储罐外爆冲击波超压的衰减关系和罐体的动力响应,与经验公式的对比验证了模型的可信性,并结合经验公式平均值对数值模拟结果做了进一步修正。结果表明:冲击波运动到迎爆面中心后,外罐主应力在 10 ms 时迅速达到最大值,随后主应力值迅速减小,并不断振荡;迎爆面中心首先产生较大的拉应力,混凝土外罐的破坏属于脆性破坏;比例距离大于 1 时,现有超压计算公式拟合超压的衰减规律误差较小,比例距离小于 1 时,超压计算公式误差较大,修正后的超压计算公式可为储罐抗爆设计提供参考。

关键词:LNG 储罐;外爆冲击波;传播规律;超压公式修正

中图分类号:TQ56

文献标识码:A

Research on propagation rule and overpressure formula of blast shock wave outside storage tank

TANG Xingliang, GUAN Youhai, JIA Juanjuan, XI Wenxi

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao, 266580, China)

Abstract: To study the propagation rule of blast shock wave outside tank and its impact on the safety of storage tank, the software LS-DYNA was used to build numerical model of dynamite-storage tank, and the air blast numerical calculation was performed. The study analyzed the attenuation relation of shock wave overpressure and the dynamic response of the tank. The reliability of the model was verified by contrast with the empirical formula. And the further amendment for numerical simulation results was made. The results are as follows: When shock wave moves to burst surface center, principal stress in 10ms quickly reaches maximum value, and then decreases rapidly and continuously oscillated; The facing blasting center first produces larger tensile stress, the destruction of concrete tank belongs to brittle failure; When the proportion distance is greater than 1, overpressure formula can better fit the attenuation law of overpressure; While the proportion distance is less than 1, the error of the overpressure formula is large. The amended overpressure calculation formula can be used as a reference tank blast-resistant design.

Key words: LNG storage tank; blast shock wave outside tank; propagation rule; amendment of overpressure formula

爆炸冲击波是一种强压缩波,爆炸瞬间释放巨大的能量,对周围物体造成了巨大的破坏。LNG 储罐是国家重要的生命线工程,其生产和安全对于国家经济的发展具有重要的意义^[1]。近几

年,因泄露导致的爆炸事故造成了重大的经济和财产损失,储罐抗暴性能的研究日益引起专家学者们的关注。20 世纪后期,各国学者将冲击波超压作为研究的重要参数之一, Sadovskiy M A 等^[2-7]

收稿日期:2016-04-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51408609);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(15CX02044A);中国石油大学(华东)学术硕士点建设项目(XWS130005)

作者简介:唐兴亮(1990-),男,山东聊城人,硕士,从事管道和 LNG 储罐抗爆研究。

表 1 构件尺寸及材料参数
Tab. 1 Member size and material parameters

材料	参数	数值	材料	参数	数值
外罐混凝土(C50)	密度/kg · m ⁻³	2 500	预应力混凝土外罐	厚度/m	0.8
	弹性模量/N · m ⁻²	3.45 × 10 ¹⁰		高度/m	40.085
	泊松比	0.17		半径/m	41
钢	密度/kg · m ⁻³	7 850	球面穹顶	厚度/m	0.4
	弹性模量/N · m ⁻²	2.04 × 10 ¹¹		外径/m	82.4
	泊松比	0.3		内径/m	82
	屈服强度/N · m ⁻²	4.2 × 10 ⁸	炸药	距外罐距/m	10
	剪切模量/N · m ⁻²	2.15 × 10 ⁹		爆炸高度/m	10

基于实验数据和理论分析,提出相应的计算公式,由于爆炸试验危险性高、耗费大,且实验条件重复性差,实验可操作性受到较大限制。近年来,众多学者通过爆炸试验与数值模拟相结合的方法对冲击波超压进行一系列的研究,并提出相应的计算公式。由于各经验公式适用范围和标准有所差别,有必要对 TNT 炸药爆炸冲击波超压计算公式做进一步修正。本文通过数值模拟对爆炸冲击波的传播规律进行了细致的研究,并将结果与经验公式做对比分析,验证了计算模型及参数取值的可信性,提出爆炸冲击波修正计算方法。

1 储罐空爆模型的建立

本文以山东某大型 LNG 储罐为例,应用有限元软件 LS-DYNA 建立 LNG 储罐空爆模型,如图 1 所示,模型包括空气域、外罐、穹顶和炸药^[8]。具体构件尺寸和材料参数如表 1 所示。

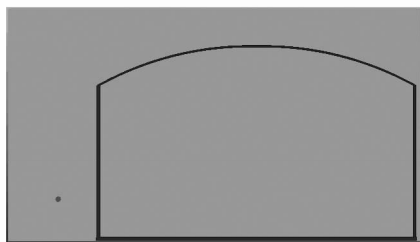


图 1 LNG 储罐 - 炸药有限元模型

Fig.1 FEM of LNG storage tank and explosive

由于对称性,建立 1/2 模型。其中,空气域尺寸为 110 m × 90 m × 62 m。储罐的底部视为固定端,在外罐和空气的对称面处施加对称约束,在空气的其他面施加无反射边界条件,模拟空气的无

线边界条件。空气和混凝土外罐以及炸药均选用 SOLID164 单元,空气和炸药采用 ALE 算法^[9-10]。

2 冲击波的传播规律

爆炸是物质状态的突然物理或化学变化,在这个过程中伴随着能量的释放。爆炸发生后周围介质状态会突然变化,包括密度压力等参数。爆炸产生的高温高压气体以冲击波的形式向周围传播,在传播过程中冲击波能量不断的消耗^[11-12]。

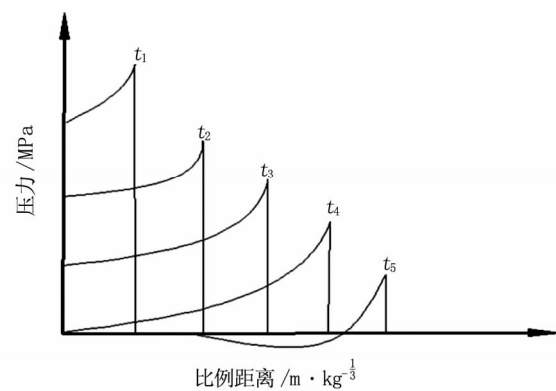


图 2 冲击波传播规律

Fig.2 Propagation law of shock wave

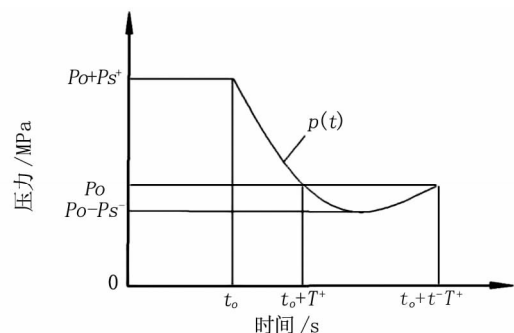


图 3 压力时程曲线

Fig.3 Pressure-time history curve of shock wave

图2显示了空中爆炸时冲击波的传播规律,由图可知,随着比例距离的增加,冲击波波阵面传播速度和压力都下降,正压区作用时间延长。

图3为某个比例距离处冲击波压力时程曲线,当冲击波传播到这个点时,此处的压力迅速上升到最大值,压力值随着冲击波的传播逐渐减小,直到压力小于大气压,然后又逐渐恢复到大气压。

3 罐体响应分析

图4和图5为混凝土外罐迎爆面中心最小主应力时程曲线和云图,从主应力时程曲线可以看出,冲击波运动到迎爆面中心并作用于结构以后,主应力值首先达到最大,随后主应力值迅速减小,并不断振荡。从应力云图可以看出,在迎爆面中心最小主应力最大。这是因为外罐在受到冲击波作用时,产生沿冲击波方向的变形,从而使得迎爆面中心产生较大的拉应力。

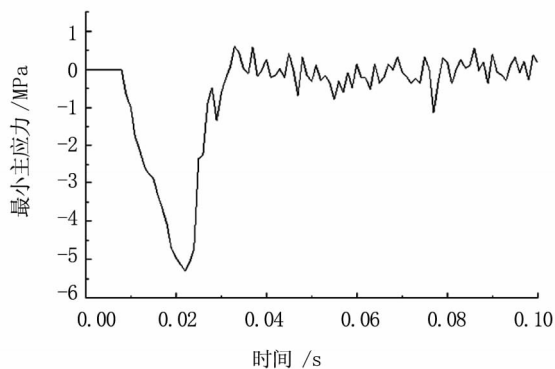


图4 最小主应力曲线

Fig.4 Curve of minimum principal stress

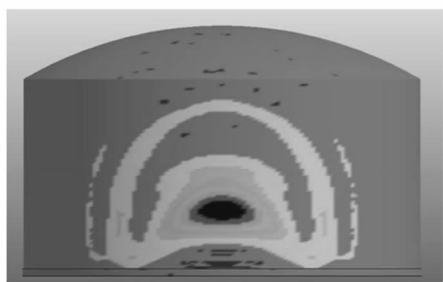


图5 最小主应力云图

Fig.5 Nephogram of minimum principal stress

4 外爆冲击波超压公式及修正

为了验证储罐-炸药有限元模型的正确性,本文先选取8种工况进行数值模拟。其中,距离参数 $r = 10$ m,通过改变炸药半径 γ_0 来改变炸药的质量 w ,数值模拟的结果与经验公式^[2-7]的比较情况如图6所示。

从图6中可以看出,无论是数值模拟还是经验公式,计算得到的超压峰值都是随着比例距离的增大而减小。随着比例距离的增大,各个公式的偏差逐渐减小,其中,Mills公式的值较其他公式的结果偏高,而Henrych公式的值偏低^[13-14]。当比例距离大于1时,各个公式预测结果比较接近,当比例距离小于1时,各个公式预测结果误差较大;本文冲击波超压的曲线走势与经验公式一致,吻合度较高,模拟结果和Henrych得到的经验公式比较接近,当比例距离 $\bar{R} \geq 1$ 时,平均误差分别为26.1%,当比例距离 $0.15 \leq \bar{R} \leq 0.55$ 时,平均误差为24.8%,误差较大。主要原因是比例距离越小,相当于距离爆心的位置越近,因为超压峰值本身的离散型和在近爆区作用持时短的特性,近爆区超压峰值压力很难得到一个精确的结果,无论是实验还是数值模拟都不能很精确的确定峰值超压的值,同时实验装置所处的环境以及一些人为因素会对精度造成一定的影响,并且数值模拟所采用的网格大小等因素也会造成很大的影响。可见比例距离较小时各经验公式之间以及由有限元计算得到的超压峰值结果相差较大。

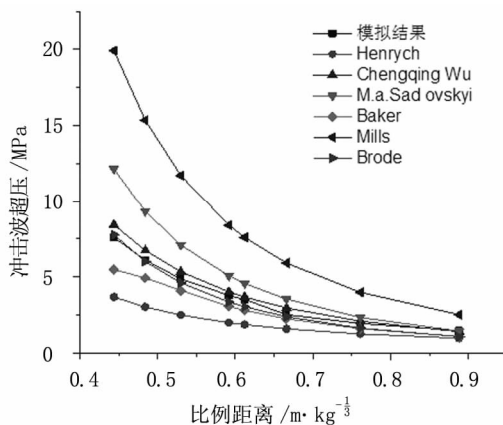


图6 数值模拟和经验公式结果比对

Fig.6 Comparison of numerical simulation and empirical formulas

从图6中可以看出,比例距离 $0.45 \leq \bar{R} \leq 1$ 时,模拟结果和Chengqing Wu、Brode经验公式比较接近,平均误差分别为8.2%、10.6%,误差在合理的范围内,得到的数值模拟结果是可信的,模型以及各参数的设置是可取的。在该区间内,计算公式可取Chengqing Wu的结果。

再选取16种工况进行数值模拟,其中,炸药的质量 w 不变,只改变距离参数 r ,数值模拟的结果与经验公式的比较如图7和图8所示。

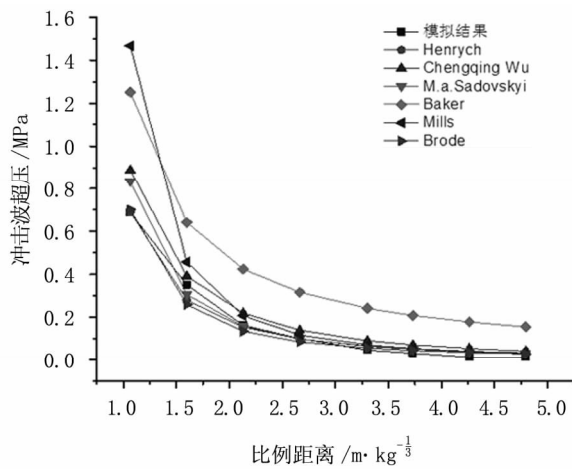


图 7 $\bar{R} \geq 1$ 时, 冲击波超压变化图

Fig. 7 $\bar{R} \geq 1$, overpressure change of block wave

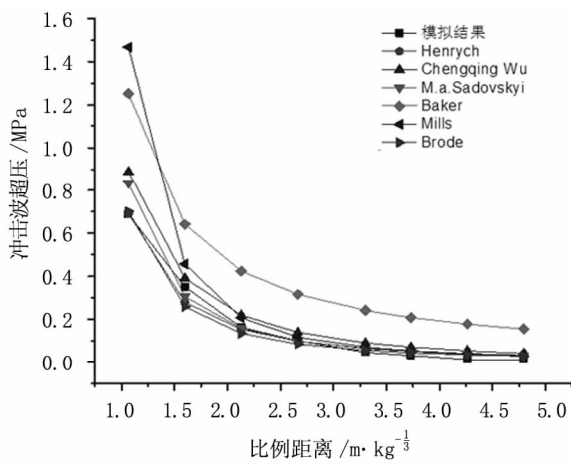


图 8 $0.15 \leq \bar{R} \leq 0.55$ 时, 冲击波超压变化图

Fig. 8 $0.15 \leq \bar{R} \leq 0.55$, overpressure change of block wave

为减小计算结果误差,求模拟结果和另外与其误差最小的两组数据,取其平均值,运用最小二乘法拟合公式,拟合得到的曲线如图 9 所示。

利用最小二乘法将上述各数据点进行拟合,采用三段式表达形式,得到统一爆炸冲击波超压计算公式如下:

$$\Delta P = \begin{cases} \frac{0.5478}{R} + \frac{0.58178}{R^2} - \frac{0.47358}{R^3} + 0.5353 & 0.15 \leq \bar{R} \leq 0.5 \\ \frac{-1.355}{R} + \frac{9.1739}{R^2} - \frac{12.7}{R^3} + 6.016 & 0.5 \leq \bar{R} \leq 1 \\ \frac{0.3323}{R} + \frac{0.7047}{R^2} - \frac{0.0278}{R^3} + 0.00935 & \bar{R} \geq 1 \end{cases}$$

公式中: ΔP 为冲击波超压,MPa; \bar{R} 为比例距离($\bar{R} = r/\sqrt[3]{W}$); r 为测试点到爆心的距离,m; W 为

药量,kg。

本文拟合的公式方差与各经验公式以及数值模拟结果最小,修正后的公式可以综合描述冲击波超压峰值和比例距离的关系。储罐抗爆设计时将爆炸荷载等效成静力荷载时,可以采用本文的修正公式以更加接近实际情况。所以经过拟合得到的新公式可以为设计中采用的等效静力荷载提供一定的参考和依据。

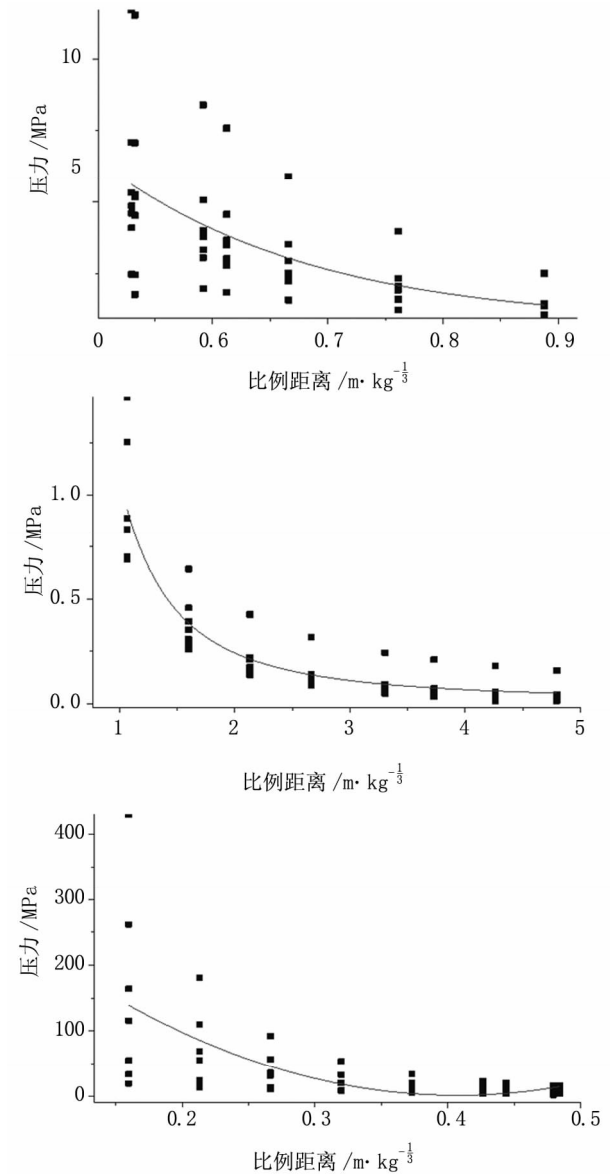


图 9 拟合曲线图

Fig. 9 Fitting curve

5 结论

1) 冲击波运动到迎爆面中心并作用于结构以后,外罐主应力在 10 ms 时迅速达到最大值,随后主应力值迅速减小,并不断振荡。

2) 迎爆面中心首先产生较大的拉应力,混凝

土外罐的破坏属于脆性破坏。

3) 比例距离大于 1 时, 现有超压计算公式能比较好的拟合超压的衰减规律; 比例距离小于 1 时, 现有超压计算公式预测结果存在较大差别, 需要进一步细化研究。

4) 采用经验公式平均值的方法, 对模拟结果进行修正, 修正后的公式能够较准确地描述冲击波超压峰值与比例距离的关系。

5) 基于有限元软件 LS - DYNA 实现 TNT 炸药爆炸的数值模拟计算是可行的, 所得模拟结果偏小, 说明该方法仍存有一定的缺陷, 可结合实验数据和理论分析的结果对数值模拟结果进行修正。

参考文献:

- [1] 李晓勇, 崔村燕, 陈景鹏, 等. LS - DYNA 软件开展爆炸冲击波计算时需考虑的问题[J]. 装备学院学报, 2014, 25(4): 79 - 84.
- [2] GB6722 - 2011, 爆破安全规程[S].
- [3] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Phys Fluids, 1959, 2(2): 217.
- [4] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] SADOVSKIY M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow:

Izd Akad Nauk SSSR, 1952.

- [6] BAKER W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1974.
- [7] WU Chengqing, HAO Hong. Modeling of simultaneous ground shock and from surface Explosions [J]. Int. J. Impact Eng., 2005, 31(6): 699 - 717.
- [8] 管友海, 贾娟娟, 林楠, 等. 大型 LNG 储罐液固耦合模态分析[J]. 当代化工, 2015, 44(1): 148 - 151.
- [9] 吴彦捷, 高轩能. 爆炸冲击波数值模拟及超压计算公式修正[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2014, 35(3): 321 - 326.
- [10] 吴媛媛, 宋振森. 挡墙后爆炸冲击波绕流现象研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(2): 9 - 14.
- [11] 申祖武, 张耀辉, 谢伟平, 等. 爆炸冲击波的环流效应数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 42 - 44.
- [12] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2008, 33(2): 32 - 35.
- [13] 杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008, 25(1): 15 - 19.
- [14] 董桂旭, 杜茂华, 黄雪峰. 某型炸药的冲击波超压峰值计算公式参数的修正[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(5): 542 - 544.

(责任编辑 王利君)

(上接第 84 页)

- [9] 李旭华, 段宁, 王心义, 等. 矿区煤矸石对周围农田玉米作物污染研究[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(11): 1748 - 1759.
- [10] 田采霞, 郭保华. 煤矸石堆对周围土壤中微量元素元素的影响分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(3): 23 - 25.
- [11] 冯吉艳, 刘志斌. 煤矸石中金属元素对人体健康影响的研究[J]. 露天采矿技术, 2006(3): 41 - 44.
- [12] 骈炜, 张敬凯, 王金喜, 等. 煤矸石中有机物对环境的污染分析[C]//2015 年中国环境科学学会学术年会论文集. 中国学术期刊电子杂志社有限公司出版, 2015: 4995 - 5000.
- [13] WANG J, WANG Q, SHI J, et al. Distribution and enrichment mode of Li in the No. 11 coal seam from Pingshuo mining district, Shanxi province [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(2): 203 - 215.
- [14] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 崔淑敏, 李尉卿, 王春峰. 河南煤矸石成分测定与综合

利用[J]. 化学研究, 2004, 15(2): 45 - 48.

- [16] 张明亮, 王海霞. 煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 189 - 192.
- [17] 章建义. 贵州盘县矿区两煤矸石主要有害元素的比较分析及对资源化利用的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [18] 吴敦敖, 鲁文毓. 土壤对铬的吸附作用研究[J]. 上海环境科学, 1991, 10(2): 19 - 23.
- [19] 曹云全, 张双圣, 刘汉湖, 等. 煤矸石中重金属动态淋滤和静态浸泡溶出特征研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(1): 76 - 80.
- [20] GB/T 14848 - 93, 地下水环境质量标准[S].
- [21] 陈志良, 张越男, 李忠斌, 等. 大宝山矿区地下水重金属污染季节特征与环境风险[J]. 中国农学通报, 2014, 30(23): 190 - 196.
- [22] 郝汉舟, 靳孟贵, 汪丙国. 河南省浅层地下水质量评价[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(4): 654 - 659.

(责任编辑 王利君)