

隧道内液化天然气管道泄漏爆炸过程的数值模拟

马世海¹, 黄平², 代鹏飞³, 李想⁴

1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012
2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081
3. 中国石油西部管道分公司科技信息处, 乌鲁木齐 830000
4. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310007

摘要 为了解隧道内液化天然气(LNG)管道泄漏爆炸事故的发展规律,以某实际工程为例,运用计算流体力学方法建立隧道内LNG管道泄漏爆炸模型,分别以3种不同的边界条件对LNG泄漏爆炸过程进行了数值模拟计算。针对隧道两端为固壁和设泄压结构2种情况下的爆炸过程,通过数值模拟得到了3种不同泄漏强度条件下隧道内LNG泄漏爆炸峰值超压情况,并以此为依据判定其破坏性。结果表明,隧道两端为固壁或设泄压结构时,在泄漏强度最小及最大2种情况下爆炸形式均为爆燃,会对隧道内设施产生较严重破坏;泄漏强度居中的情况下,则会发生爆燃转爆轰过程,破坏力极强,应避免此种情况的发生。

关键词 液化天然气;管道泄漏;蒸气云爆炸;超压;数值模拟

中图分类号 X937

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.007

Numerical Simulation of Explosion Process due to LNG Leakage from Pipelines in Tunnel

MA Shihai¹, HUANG Ping², DAI Pengfei³, LI Xiang⁴

1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China
2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
3. Department of Sci & Tech Information, PetroChina West Pipeline Company, Urumqi 830000, China
4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China

Abstract In order to simulate the explosion process due to Liquefied Natural Gas (LNG) pipeline leakage in tunnel, a mathematical model of fire and explosion due to LNG pipeline leakage is proposed based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method and for an active LNG transportation pipeline in a tunnel. The LNG leakage explosion under three different LNG leakage conditions are numerically simulated, and their overpressures at the measuring points are obtained for tunnel with solid ends and pressure release ends. The explosion overpressures caused by LNG pipeline leakage under three different boundary conditions are obtained and the destruction effect is evaluated. The simulation results show that the explosion is in the form of deflagration when the LNG leakage intensity is the maximum or the minimum in the tunnel with solid ends or pressure release ends, which would damage badly the equipments in tunnel. When the LNG leakage intensity is a medium one, the deflagration would transform into the detonation with very strong damage power, and this should be avoided to be happening.

Keywords liquefied natural gas; pipeline leakage; vapor cloud explosion; overpressure; numerical simulation

收稿日期: 2011-06-24;修回日期: 2011-07-14

作者简介: 马世海,高级工程师,研究方向为系统安全分析和安全评价,电子信箱: smarmt@163.com;黄平(通信作者),副教授,研究方向为含能材料和安全工程,电子信箱: ph6111@bit.edu.cn

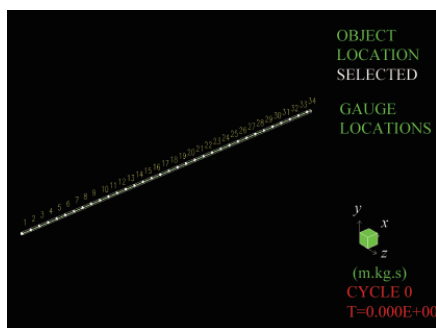


图3 测点分布示意图

Fig. 3 Sketch map of measuring point distribution

2 泄漏爆炸过程数值模拟结果分析

用荷兰 TNO 公司的 AutoReaGas 专用气体爆炸软件进行模拟。按照隧道两端为固壁和泄压结构(泄压压力为 100kPa) 2 种情况分别对 CASE1、CASE2、CASE3 进行模拟, 各个测点的峰值超压如图 4 所示。

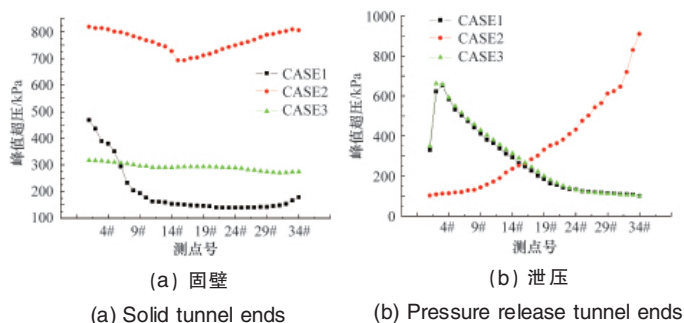


图4 隧道两端为固壁和泄压时各测点峰值超压

Fig. 4 Maximum explosion overpressure in the case of solid tunnel and pressure release tunnel ends

2.1 隧道两端为固壁的模拟结果

(1) CASE1 中由于爆炸性气云量较少, 气云充填区域各测点的爆炸峰值超压较小, 约 0.1MPa, 但在隧道两端由于爆炸冲击在端面产生反射和叠加, 超压明显升高。在隧道入口端(靠近码头侧), 爆炸的峰值超压可达约 0.45MPa, 爆炸形式为爆燃, 会对隧道内设施产生较严重破坏。

(2) CASE2 中隧道内充满爆炸性气体, 且体积分数为 8.7%, 接近其爆炸的浓度, 爆炸威力大, 各个观测点的爆炸峰值超压大, 靠近两端的固壁超压接近 1MPa。由爆炸超压随时间的变化可知, 此时在隧道内已发生了爆燃转爆轰过程, 破坏力极强, 可摧毁爆炸场内所有设备。

(3) CASE3 中隧道内充满爆炸性气体, 体积分数为 13%, 接近甲烷的爆炸上限, 爆炸威力不太大。模拟得到的各测点爆炸超压变化不大, 均约 0.3MPa, 爆炸形式为爆燃, 会对隧道内设施产生较严重破坏。

2.2 隧道两端设泄压结构的模拟结果

(1) CASE1 中因爆炸性气体充填于隧道末端, 在达到泄放压力时后部观测点压力迅速降低, 但由于爆炸的冲击波在

末端面产生了反射, 与到达隧道前端面的反射冲击波叠加, 造成前部测点(测点 1 除外)峰值超压较高, 可达 0.65MPa, 爆炸形式为爆燃, 会对隧道内设施产生较严重破坏。

(2) CASE2 中隧道前部测点由于泄压的作用, 峰值超压较低, 但后部测点压力随爆炸火焰的加速而迅速升高, 到达末端时瞬时泄压, 反射波与爆炸冲击波叠加使峰值超压较高, 最大值可达 0.9MPa。此时隧道内的爆炸形式变为准爆轰, 对设备与设施的破坏严重。

(3) CASE3 中由于甲烷浓度很高, 爆炸威力较小, 爆炸时由于前泄压装置的作用压力传播能力差, 只是在入口(靠近码头侧)约 100m 的区域内产生了较高的峰值超压(约 0.65MPa), 隧道末端压力较小。此爆炸过程为爆燃, 会对隧道内的设施产生较严重破坏, 特别是在 100—300m 的区域, 破坏力相对较强。

3 结论

本文建立了隧道内 LNG 管道泄漏爆炸模型, 按照隧道两端为固壁和泄压结构 2 种情况对爆炸过程进行了模拟计算, 分别得到了隧道内各测点处的峰值超压值。经模拟计算可知, 在预设的 3 种情况(CASE1、CASE2、CASE3)下, 不论爆炸发生时隧道两端为固壁还是泄压结构, CASE2 的爆炸威力均最强, 破坏性最大, 且爆炸过程为准爆轰, 应着力避免这种情况的发生。

参考文献 (References)

- [1] Anay L H, Ronald P K. On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(3): 504-517.
- [2] Pereira J C F, Chen X Q. Numerical calculations of unsteady heavy gas dispersion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 46(5): 253-272.
- [3] 潘旭海, 华敏. 环境条件对 LNG 泄漏扩散影响的模拟研究 [J]. *天然气工业*, 2009, 29(1): 117-119.
Pan Xuhai, Hua Min. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(1): 117-119.
- [4] 李义绿, 姚安林. 天然气管道泄漏扩散模型研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(8): 102-104.
Li Youlu, Yao Anlin. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(8): 102-104.
- [5] Ronald P K, Donald L E. Review lessons learned from LNG safety research[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 140(3): 412-428.
- [6] Robin P, John B. LNG decision making approaches compared [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 130(2): 148-154.
- [7] 王大庆, 高惠临. 天然气管线泄漏扩散及危害区域分析 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(7): 120-122.
Wang Daqing, Gao Huilin. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(7): 120-122.
- [8] 王曰燕, 罗金恒. 天然气输送管道火灾事故危险分析 [J]. *天然气与石油*, 2005, 23(3): 34-36.
Wang Yueyan, Luo Jinheng. *Natural Gas & Oil*, 2005, 23(3): 34-36.
- [9] Spyros S, Fotis R. Simulation of Coyote series trials-Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(5): 1434-1443.
- [10] 陈宝智. 危险源辨识控制及评价[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1996.
Chen Baozhi. *Identification and assessment of hazard source* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1996.

(责任编辑 孙秀云)