

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.022

气云爆炸超压和温度作用下抗爆墙响应研究*

周梦敬, 黄涛, 范进, 丁建国
(南京理工大学理学院, 南京 210094)

摘要: 以某可燃气体仓库的抗爆隔墙为研究对象, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 研究抗爆墙在可燃气体爆炸产生的超压场和温度场作用下的响应规律。经与已有试验结果的对比, 验证了抗爆墙模型的合理性。研究了抗爆墙在可燃气体爆炸产生的超压场和温度场单独作用下的动力响应, 以及超压场和温度场共同作用下的动力响应。研究表明: 温度场单独作用时抗爆墙的应力峰值远小于超压场单独作用时抗爆墙的应力峰值; 相比超压场单独作用, 超压场与温度场共同作用时, 抗爆墙的应力峰值提升幅度超过 6%, 峰值数值远大于温度场单独作用时抗爆墙内产生的应力值。

关键词: 抗爆墙; 气云爆炸; 超压场; 温度场; 共同作用; 响应

中图分类号: TU375.2; TU352.1; O383.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0129-05

Response Study on Blasting Resistance Wall under Overpressure and Temperature Generated by Gas Explosion

ZHOU Meng-jing, HUANG Tao, FAN Jin, DING Jian-guo

(College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Taking the blasting resistance wall of a flammable gas warehouse as the research object, the finite element analysis software ANSYS was used to simulate the response law of the blast resistance wall under the action of overpressure field and temperature field generated by the flammable gas explosion. After comparing the experimental results with numerical simulation results, the rationality of blasting resistance wall model is verified. The dynamic response of the blasting resistance wall under the separated and the combined effects of the overpressure field as well as the temperature field generated by the flammable gas explosion was studied, respectively. The results show that the peak stress of the blasting resistance wall under the separated effect of the temperature field is much smaller than that under the effect of the overpressure field. The peak stress of the wall under the combined effect of the overpressure field and the temperature field increased by 6%, and is much larger than that under the separated effect of the temperature field.

Key words: blasting resistance wall; gas explosion; overpressure field; temperature field; interaction; response

在工业生产和日常生活中爆炸灾害时有发生, 其中可燃气体爆炸是爆炸灾害的主要形式, 而抗爆

墙是结构防护的主要形式。当前严峻的防灾形势迫切需要研究者能够预测气体爆炸的威力, 并以此为基础, 在设计和实际建造过程中提出合理的抗爆方案, 因此研究气云爆炸作用下抗爆墙的响应规律具有重要价值和现实意义^[1]。国内外学者在此领域进行大量研究, 周晓青针对某地下军火库的钢筋混凝土防爆墙^[2], 采用 AUTODYN 软件模拟抗爆墙在

收稿日期: 2020-04-28

作者简介: 周梦敬(1995-), 男, 四川乐山人, 主要研究方向为防灾减灾与防护工程, (E-mail) 2321832492@qq.com。

通讯作者: 范进(1962-), 男, 江苏海安人, 主要研究方向为防灾减灾与防护工程, (E-mail) fanjinem@njust.edu.cn。

基金项目: 后勤军委基础科研项目

的温度时程曲线视为双线性模型。温度上升段视为垂线, 温度瞬间达到峰值, 随后保持出现水平段, 最后为下降段, 其简化后温度-时间变化曲线如图3所示。

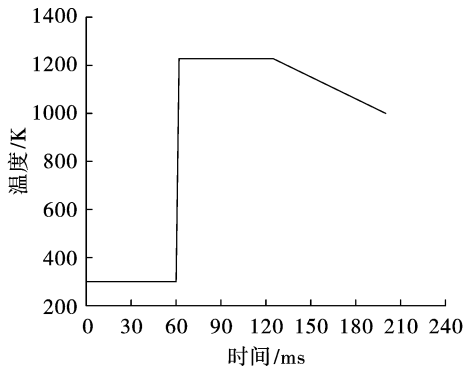


图3 温度-时间变化曲线

Fig. 3 Temperature time curve

1.4 模型验证

文献[10]记录了六根不同的钢筋混凝土梁在爆炸荷载作用下的动力响应规律, 其中G1梁为简支梁, 截面尺寸为19.7 cm × 29.0 cm, 跨度145.0 cm, 混凝土抗压强度约为35 MPa, 主钢筋屈服强度为600 MPa, 配筋率为0.43%。试验在筒形爆炸压力加载器上进行, 导爆索经雷管引爆后产生的高压气体经爆炸管的孔壁外泄, 使置于加载筒底部的试件顶面受到均布压力。试验中G1梁的最大跨中挠度为3.30 mm, 爆炸荷载超压峰值为0.52 MPa, 实验中受拉钢筋即将屈服, 压区混凝土出现塑性变形。数值模拟与实验数据对比结果如表1所示。

表1 钢筋混凝土梁跨中峰值压力和最大挠度^[10]

Table 1 Peak pressure and maximum deflection of reinforced concrete beam in midspan

试件	实验值/MPa	模拟值/MPa	误差/%
峰值压力	0.52	0.49	5.7
最大挠度	3.30	3.11	5.8

数值模拟结果显示, 抗爆墙承受的超压峰值出现在6 ms时刻, 其值为0.49 MPa; 实验中超压峰值约0.52 MPa, 数值模拟结果与实验结果的误差5.70%; 而挠度在9 ms达到峰值, 其值为3.11 mm, 与实验值的误差仅为5.80%; 两者的实验误差均未超6.00%, 说明模拟结果与试验结果吻合较好。因此, 建立的模型是合理的。

2 抗爆墙响应分析

2.1 抗爆墙在超压场作用下的响应

将监测到的超压冲击波以荷载形式施加于抗爆墙的相应区域。结果显示, 冲击波于2.4 ms抵达抗爆墙迎爆面, 随后迎爆面与框架柱相交处的等效应力值达到材料的抗拉强度, 抗爆墙出现裂纹, 如图4(a)红色部分所示。由于迎爆面混凝土开裂, 背爆面对应位置的混凝土等效应力突然增加, 到达4.18 MPa。混凝土的破坏过程为非连续的渐进过程^[11]。在4.8 ms时刻, 迎爆面框架柱和抗爆墙相交处的裂缝继续发展并最终贯穿整个抗爆墙, 主裂纹沿抗爆墙对角线方向发展, 抗爆墙中央出现矩形破坏区, 呈现典型的双向板受弯破坏^[12], 抗爆墙的裂缝分布如图4(b)红色部分所示。

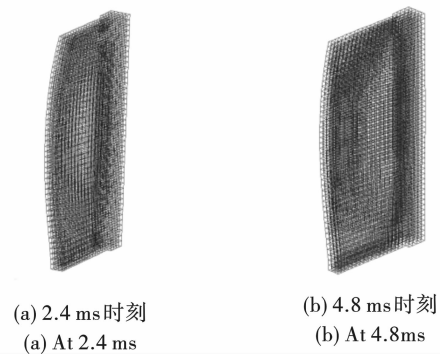


图4 抗爆墙裂缝分布图

Fig. 4 Crack distribution map of blast resistant wall

抗爆墙迎爆面中心点(即50号监测点)超压时程曲线及X方向上的位移时程曲线如图5所示。由图可知, 超压冲击波抵达迎爆面后, 墙体所受超压迅速上升, 在3.28 ms时刻达到1.72 MPa, 而该点的位移增长速率小于超压的增加速率。于22.4 ms时刻该点位移达到最大值52.7 mm, 最终残余位移为35.7 mm, 该点处位移峰值相较于超压峰值会滞后约19 ms。

抗爆墙背爆面中心点处混凝土的等效应力时程曲线如图6所示。冲击波抵达墙体后, 短时间内材料处于弹性阶段, 应力线性增加; 随后材料进入塑性阶段, 应力增长速率下降, 直至达到材料抗拉强度设计值3.24 MPa, 随后混凝土开裂。

2.2 抗爆墙在温度场作用下的响应

气体燃烧火焰阵面对抗爆墙产生作用时, 三种传热方式均有涉及^[13,14]。根据规范取表面综合辐射系数为0.5, 气体强制对流状态下, 物体表面的对流换热系数为20~100, 现取为90。

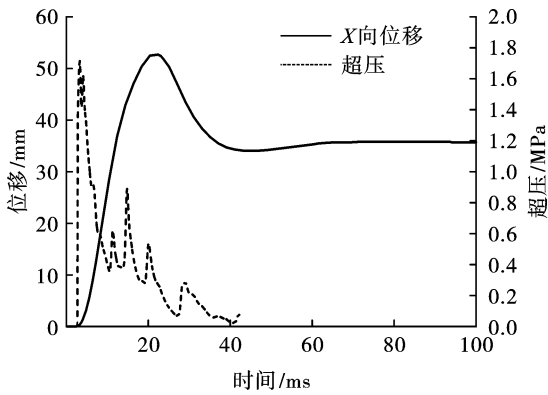


图5 50号监测点超压时程曲线和位移时程曲线
Fig. 5 The history curve of overpressure and displacement at point 50

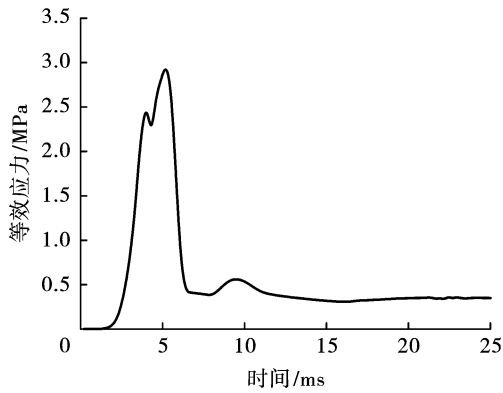


图6 监测点50处混凝土等效应力时程曲线
Fig. 6 Equivalent stress-time history curve of concrete at point 50

迎爆面墙体表面混凝土受热后发生膨胀,导致前后墙的变形不一致,框架柱和楼面板对抗爆墙起到一定的约束作用使得墙体发生翘曲。抗爆墙体上X方向的最大位移出现在32号监测点,位移量约0.014 mm,该点在0.1 s内的位移-时间曲线如图7所示。

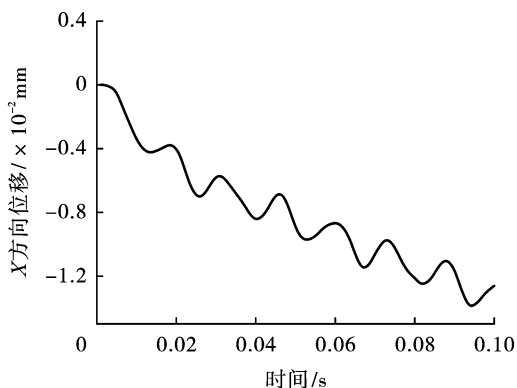


图7 32号监测点X方向位移时程曲线
Fig. 7 Displacement-time history curve of point 32 in X direction

在0.1 s末抗爆墙的等效应力最大值出现在墙体与地面相交的角落位置(A区域),其值约0.93 MPa。为做比较,绘出32号监测点(B区域)的等效应力时程曲线如图8所示。

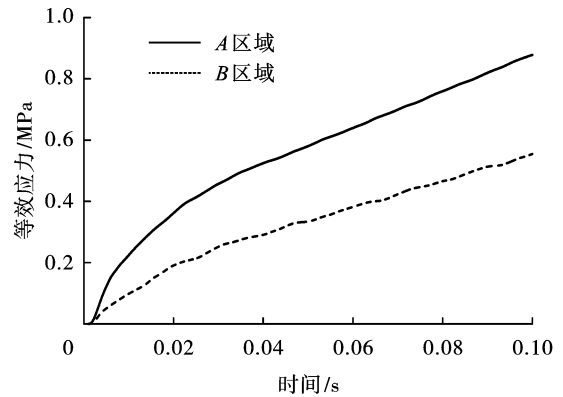


图8 A、B区域应力时程曲线
Fig. 8 Stress-time history curves at point A and point B

2.3 抗爆墙在超压场及温度场共同作用下的响应

将计算所得超压和温度作为荷载施加于抗爆墙的相应节点。抗爆墙竖向对称轴上的10个监测点在两种工况作用下的等效应力最大值如图9所示。相较于超压场单独作用,由于超压反射波在墙角区域的反射叠加作用使得抗爆墙与楼板相交区域的等效应力值会有少量的增加^[15]。超压场与温度场共同作用下,对称轴附近区域内的等效应力峰值有所提高,最大提高幅度为6.17%;抗爆墙到达应力峰值的时间提前约3.00 ms,两种工况下应力峰值相差最大为2.24 MPa,超压场与温度场对抗爆墙的作用具有相关性。

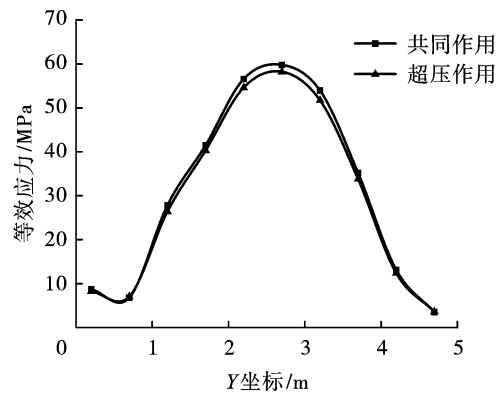


图9 竖向监测点在两种工况下超压峰值
Fig. 9 Overpressure peak values at vertical monitoring points under two working conditions

在超压场与温度场共同作用下,抗爆墙应力峰值提升约6.06%,到达峰值的时间提前约1.20 ms,这与竖向对称轴上监测点应力峰值表现出相同的规律。

选取迎爆面对角线上的监测点作为研究对象,将监测点在两种工况下的等效应力最大值及到达最大值的时间列于表2。超压场和温度场共同作用下,抗爆墙的应力峰值最大提升约为4.81%,抗爆墙到达应力峰值的时间提前约1.20 ms。在抗爆墙墙体四周及角落区域,共同作用下墙体的应力峰值变化不大。在温度场单独作用下,在20.00 ms时刻抗爆墙内温度应力峰值为0.36 MPa;而共同作用下抗爆墙等效应力峰值与超压场作用下应力峰值相比,最大差值为2.34 MPa,远大于由温度场引起的结构热应力。因此,温度场与超压场对抗爆墙的作用存在相关性。

表2 对角线上监测点在两种工况下的等效应力

Table 2 Equivalent stresses at diagonal monitoring points under two working conditions

点号	共同作用下 峰值应力/MPa	超压作用下 峰值应力/MPa	涨幅/%
50	56.58	54.60	3.63
33	50.92	48.58	4.82
16	46.82	45.27	3.42
8	41.20	40.52	1.69

总体来看,超压场与温度场共同作用下抗爆墙的等效应力峰值有所提高,最大提高幅度在约6.17%,对于结构损伤的影响不显著。对于一般抗爆结构不需要验算超压场与温度场共同作用下结构的破坏情况。对于封闭或半封闭的空间,已燃气体与外界空气不能通过对流进行能量交换,结构表面可能长期处于高温状态,结构热应力将会持续增加,或将成为超压场作用后期结构破坏的主要原因。

3 结论

(1) 抗爆墙上50号监测点达到最大位移的时间比达到超压峰值的时间滞后约19.00 ms。

(2) 超压场与温度场对抗爆结构的作用具有相关性。相比超压场单独作用,超压场与温度场共同作用时,抗爆墙所到达的峰值应力提升约6.17%,但是应力分布区域不具备明显的分布规律。

(3) 气云爆炸产生的温度场对抗爆墙的损伤影响不明显,对于一般抗爆结构不需要进行超压场和温度场共同作用下结构的破坏分析。

参考文献 (References)

[1] 党福辉,黄呈杰,孙旭红,等. 开敞空间可燃气云爆炸数值模拟研究[J]. 天津理工大学学报,2017,33(6):

50-54.

- [1] DANG Fu-hi, HUANG Cheng-jie, SUN Xu-hong, et al. Numerical simulation study on unconfined flammable vapor cloud explosion[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2017, 33(6): 50-54. (in Chinese)
- [2] 周晓青,洪家柱. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土墙的动态模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 153-158.
- [2] ZHOU Xiao-qing, HONG Jia-zhu. Numerical simulation of dynamic response of RC walls under blast loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 153-158. (in Chinese)
- [3] LOW H K, HAO H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading[J]. Structural Safety, 2001, 23(2): 157-178.
- [4] 阎石,张亮,王丹,等. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(3): 177-180.
- [4] YAN Shi, ZHANG Liang, WANG Dan, et al. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2005, 21(3): 177-180. (in Chinese)
- [5] 龚顺风,朱升波,张爱晖,等. 爆炸荷载的数值模拟及近爆作用钢筋混凝土板的动力响应[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(2): 199-205.
- [5] GONG Shun-feng, ZHU Sheng-bo, ZHANG Ai-hui, et al. Numerical simulation of blast loads and dynamic response of reinforced concrete slab subjected to close-in explosion[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(2): 199-205. (in Chinese)
- [6] 张丽,张礼敬. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土防爆墙动力响应研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9): 99-105.
- [6] ZHANG Li, ZHANG Li-jing. Dynamic response of reinforced concrete explosion-proof wall under explosion loading[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(9): 99-105. (in Chinese)
- [7] 朱秀云,潘蓉,林皋,等. 基于ANSYS/LS-DYNA的钢板混凝土墙冲击实验的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 222-228.
- [7] ZHU Xiu-yun, PAN Rong, LIN Gao, et al. FEM analysis of impact experiments with steel plated concrete walls based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 222-228. (in Chinese)
- [8] 曲志民,王育德,周心权. 瓦斯爆炸冲击波的动力规律及数值模拟[J]. 煤矿安全, 2013, 4(56): 1-5.
- [8] QU Zhi-ming, WANG Yu-de, ZHOU Xin-quan, et al. Dynamic laws and numerical simulation study of gas explosion shock wave[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 4(56): 1-5. (in Chinese)