

王书鹏. 格栅式防爆网在建筑防爆中的应用及防爆性能[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 48-53. [Wang Shupeng. The Utilization of Blast Proof Square Mesh in Buildings and Its Anti-explosion Performance [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 48-53.]

格栅式防爆网在建筑防爆中的应用及防爆性能*

王书鹏

(石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041)

摘 要: 分析现有建筑防爆方法的不足, 提出一种新的防爆概念, 即在建筑周围设置一道防爆网, 可以同时解决场地限制和防爆问题。应用 LS-DYNA 有限元程序建立方孔格栅式防爆网的爆炸模型, 对防爆网防护范围内的冲击波压力进行了数值模拟, 得到了压力场分布, 并与无防护网情况进行比较。结果表明: 防爆网可以有效减小爆炸对建筑的冲击, 但防爆效果与其和建筑之间的距离有关; 防爆网与建筑之间的距离增大时, 冲击波超压减小率减小, 但减小率分布的均匀性会显著改善, 适当增加防爆网和建筑之间的距离, 可获得良好防爆效果; 防爆网紧邻建筑时, 冲击波超压减小率等值线分布与防爆网的网格一致, 孔边的冲击波超压减小率要大于孔中心的数值, 防爆网可有效减轻爆炸对窗户玻璃边角的冲击, 减小爆炸对玻璃的伤害。

关键词: 防爆网; 爆炸; 冲击波; 超压减小率; 防爆效果

中图分类号: O383⁺.2; TU393.3; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0048-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.011

近年来世界恐怖爆炸层出不穷, 针对民用设施及无辜民众并造成严重人身伤害及财产损失的恐怖袭击事件无疑也属于灾害的范畴。从众多的恐怖爆炸事件分析得知, 自杀式汽车炸弹和人体炸弹是恐怖分子选择爆炸袭击的主要方式, 他们选择的袭击目标多为大使馆、地铁站、汽车站和运动场馆等人口聚集或具有特殊重要性的建筑。资料显示, 汽车炸弹在街道爆炸时, “沟谷效应”会使冲击波压力和冲量增大数倍, 对街区附近的人群或建筑造成极大伤害^[1-3]。提高建筑的防护能力已成为国际社会的普遍共识。

目前, 增强建筑防护能力, 减轻汽车炸弹对其伤害的方法有三种: 设置汽车检查站或路障, 增大建筑的安全防护距离^[4]; 设置防爆墙, 阻挡冲击波, 减轻冲击波对建筑的伤害^[5]; 对建筑进行加固, 提高建筑的抗爆能力^[6-7]。研究表明, 冲击波压力和冲量与炸药 TNT 当量及防护距离相关^[8], 增加防护距离可以显著减小爆炸对建筑的伤害, 但是该方法受到建筑场地的局限, 多数情况下难以实施; 在建筑前设置防爆墙可以在一定程度上缩小防护距离, 减轻爆炸对建筑的伤害, 但是防爆效果与墙体的高度相关^[9], 增加墙体高度可以减轻爆炸对建筑的伤害, 但高墙体又会影

响建筑的使用功能及立面装饰效果。可见以上两种方法均受场地环境的制约, 在多数情况下难以对建筑形成有效防护。因此, 本文提出一种新的防爆概念, 即在建筑周围设置一层兼具装饰及防爆效果的防爆网, 既可以不受狭小的街道及场地局限, 又可以解决建筑的防恐怖爆炸问题。

图 1 所示为网格型防护措施在某大使馆的实际应用, 该防护网既可以防爆, 也可以阻挡外界对建筑内窥视, 同时还兼具装饰建筑立面的效果。可见防爆网在建筑中已有使用, 但对于其防爆性能的研究尚少。为此本文基于有限元程序 LS-DYNA, 对一种典型的方孔格栅式防爆网进行爆炸模拟实验, 在确定合适的模型及参数后对其防爆性能进行研究。



图 1 某大使馆的网格型防护措施

* 收稿日期: 2013-09-29 修改日期: 2013-11-01

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN20131160); 河北省科技计划项目(13275414)

作者简介: 王书鹏(1982-), 男, 山西阳泉人, 工学硕士, 讲师, 主要从事结构抗爆研究。E-mail: shupeng2hao@163.com

表 1 炸药的材料参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$D/(\text{m}/\text{s})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J}/\text{m}^3)$
1 630	6 713	18.5	540.9	9.4	4.5	1.1	0.35	8×10^9

注： D 为 C - J (Chapman-Jouget) 爆速； P_{CJ} 为 C - J 压力。

1 防爆网爆炸试验的计算模型

1.1 数值模型的建立

以一个典型爆炸场景为原型，方孔格栅式防爆网为研究对象，采用 LS-DYNA 有限元程序建立计算模型，如图 2 所示。防爆网厚度为 0.05 m，格栅肋宽 0.1 m，网孔宽 0.2 m，防爆网与炸药之间的距离为 1.0 m。为简化计算，防爆网视为刚体。空气、炸药和防爆网均采用 Solid 164 单元，ALE 空间尺寸为 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ，共划分为 125000 个单元，其中炸药为一个单元，尺寸为 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 。防爆网单元尺寸也为 $0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 。利用模型的对称性取 1/8 模型计算。除对称面外，边界面定义为透射边界。

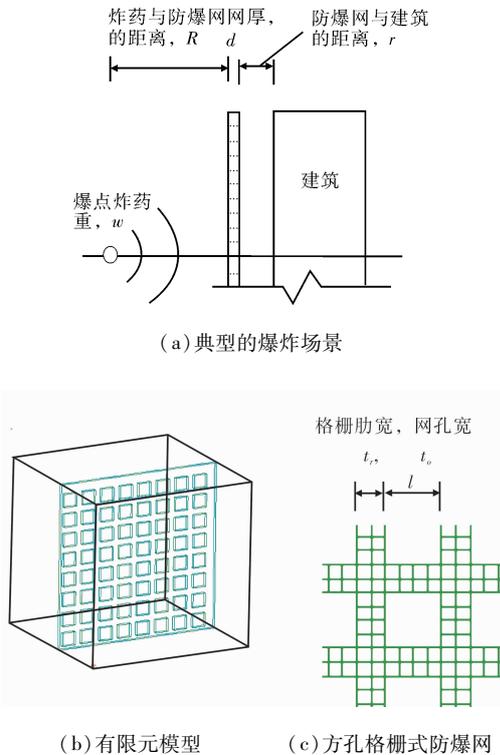


图 2 爆炸场景及计算模型

炸药采用 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 材料模型和 JWL (Jones-Wilkens-Lee) 方程。状态方程为^[10]：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中： A 、 R_1 、 B 、 R_2 、 ω 为材料常数； P 为冲击波压力； V 为相对体积； E_0 为单位体积炸药的初始内能。各参数如表 1 所示。

空气采用 MAT-NULL 材料模型和线性多项式状态方程 EOS-LINEAR-POLYNOMIAL。方程为：

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e, \quad (2)$$

$$\mu = (\rho/\rho_0) - 1.0. \quad (3)$$

式中： e 为单位体积内能； ρ 为质量密度； ρ_0 初始质量密度。空气材料参数如表 2 所示。

表 2 空气的材料参数

$\rho_0/(\text{kg}/\text{m}^3)$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	e_0/MPa
1.290	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

1.2 模型的验证

为验证模型和材料参数取值的正确性和可靠性，进行无限空中爆炸的数值模拟，尺寸及参数同上。数值模拟结果与经验公式^[11-13]计算结果的比较如图 3 所示，本文模型得到的冲击波超压及正压持续时间与经验公式结果接近。

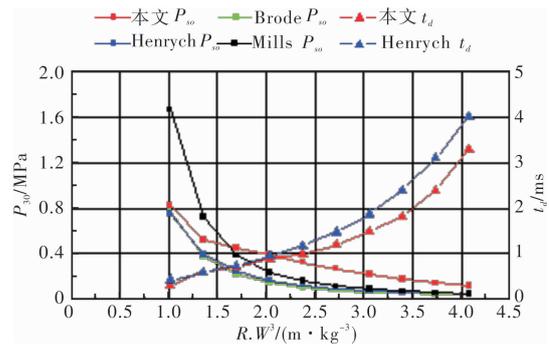
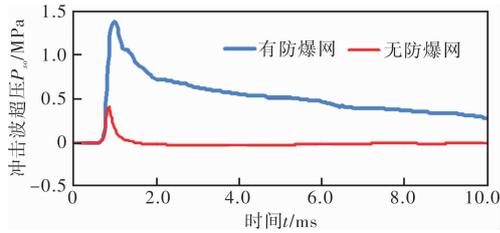
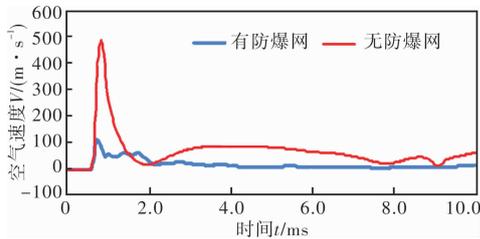


图 3 数值计算结果与经验公式比较

另外，图 4 中给出有防爆网和无防爆网两种情况下防爆网前的空气超压及速度比较。炸药爆炸后，冲击波迅速传播，当到达防爆网时，由于受到阻挡，空气在防爆网前堆积，空气速度显著降低，如图 4b 所示。在无防爆网情况下，空气流通顺畅，该处的空气速度为 $490.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；在有防爆网情况下，空气受到阻挡，该处空气速度为 $109.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，两者相差 4.5 倍。由于防爆网的阻挡，空气在防爆网的格栅肋处形成反射，如图 4a 所示，该处反射冲击波的超压为 1.37 MPa，入射冲击波超压为 0.41 MPa，两者相差 3.3 倍，符合冲击波在刚性界面反射系数取值范围为： $2 \leq K \leq 8$ ^[14]。



(a) 压力 - 时间图



(b) 速度 - 时间图

图4 防爆网前空气超压及速度

从以上分析可知,数值模拟结果与理论分析相符,测点超压及正压持续时间与经验公式的计算结果也符合较好,表明模型及参数选取可靠,数值模拟计算结果可信。

2 防爆网的防爆性能分析

2.1 防爆网防爆性能的量化计算

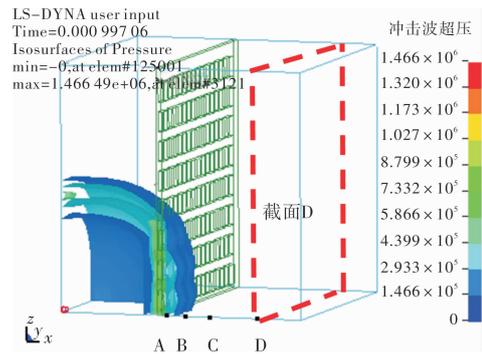
炸药爆炸后,冲击波传播到防爆网时会受到阻挡,一部分冲击波会被防爆网反射,另一部分冲击波会绕过防爆网,形成绕射,如图5a所示。绕射的冲击波压力云图呈波浪型,波浪的起伏与防爆网格一致。图5b为无防爆网情况下的冲击波压力云图,压力云图呈球形,与理论相符。为方便比较,在图上标出A、B、C、D四处,坐标分别为(1.05 m, 0 m, 0 m)、(1.25 m, 0 m, 0 m)、(1.5 m, 0 m, 0 m)、(2.0 m, 0 m, 0 m),与防爆网的垂直距离分别为0.05 m、0.25 m、0.5 m、1.0 m。同时为了量化分析防爆网的防爆性能,引入冲击波超压减小率,如式(4)所示:

$$EP_{so} = \frac{P_{so} - P'_{so}}{P_{so}} \quad (4)$$

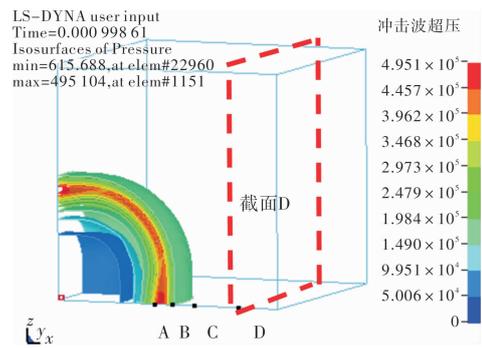
式中: EP_{so} 为冲击波超压减小率; P'_{so} 为有防爆网情况下冲击波超压峰值; P_{so} 为无防爆网情况下的冲击波超压峰值。

A、B、C、D四处冲击波超压时程曲线如图6所示,与无防爆网情况相比,A、B、C、D四处冲击波超压减小率分别为55.4%、49.3%、47.6%、34.9%,超压减小率与防爆网的垂直间距相关,距离增大,超压减小率变小。表明防爆网可以有效阻挡冲击波的传播,减轻防护范围内冲击波对建

筑或人的伤害,但防爆效果和防爆网与被防护物之间的距离有关。



(a) 有防爆网



(b) 无防爆网

图5 冲击波压力云图

2.2 整个防护空间的防爆效果

为全面了解整个防护空间的防爆效果,做平行于防爆网的横截面,经过A、B、C、D点的截面记为截面A、截面B、截面C、截面D。计算冲击波在整个截面的超压减小率,做 EP_{so} 等值线分布图,如图7所示。截面A的 EP_{so} 等值线分布最密且线条间距最小,截面D的 EP_{so} 等值线分布最稀疏且线条间距最大。表明冲击波超压在截面A处不均匀减小,而在截面D处均匀减小,截面D的防爆均匀性要好于截面A。

为方便量化分析,计算截面冲击波超压减小率的均值和方差,结果如图8所示。防爆网后0.1 m的截面(以下简称“截面0.1”) EP_{so} 均值最大,为65.5%,之后 EP_{so} 均值随防爆网与被防护物之间的距离增大而减小。截面1.3的 EP_{so} 均值为55.0%,较截面0.1的 EP_{so} 均值减小0.16倍,截面1.3 m处的防爆效果仍然良好。图8显示 EP_{so} 方差随防爆网与被防护物之间的距离增大而减小,且在截面0.15之前曲线斜率较大,在截面0.15之后曲线斜率变小,截面0.15的 EP_{so} 方差为3.3,该截面处的防爆已较均匀,在此之后截面的防爆均匀性越来越好。

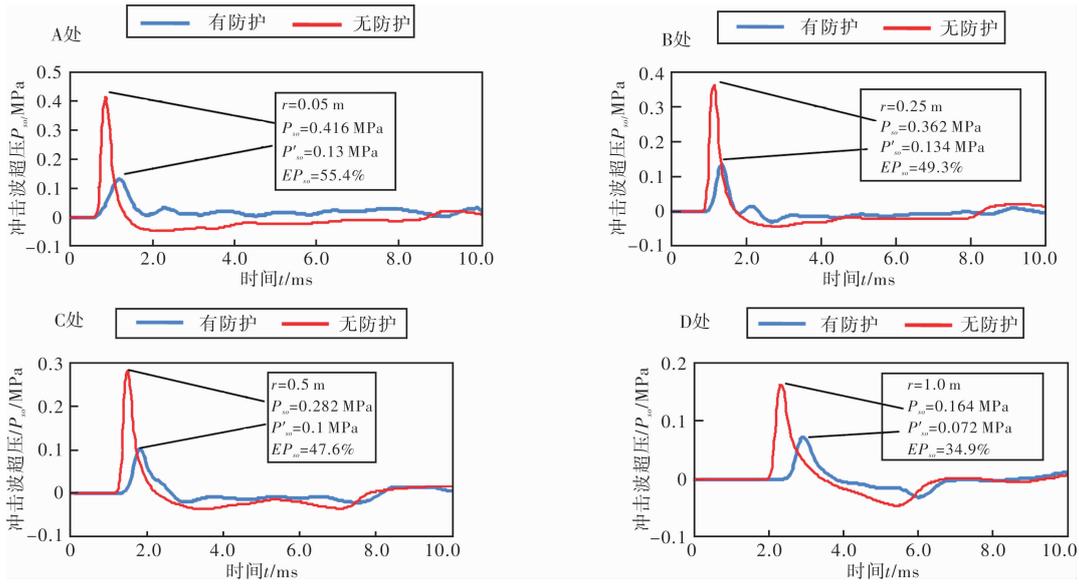


图 6 冲击波超压时程曲线

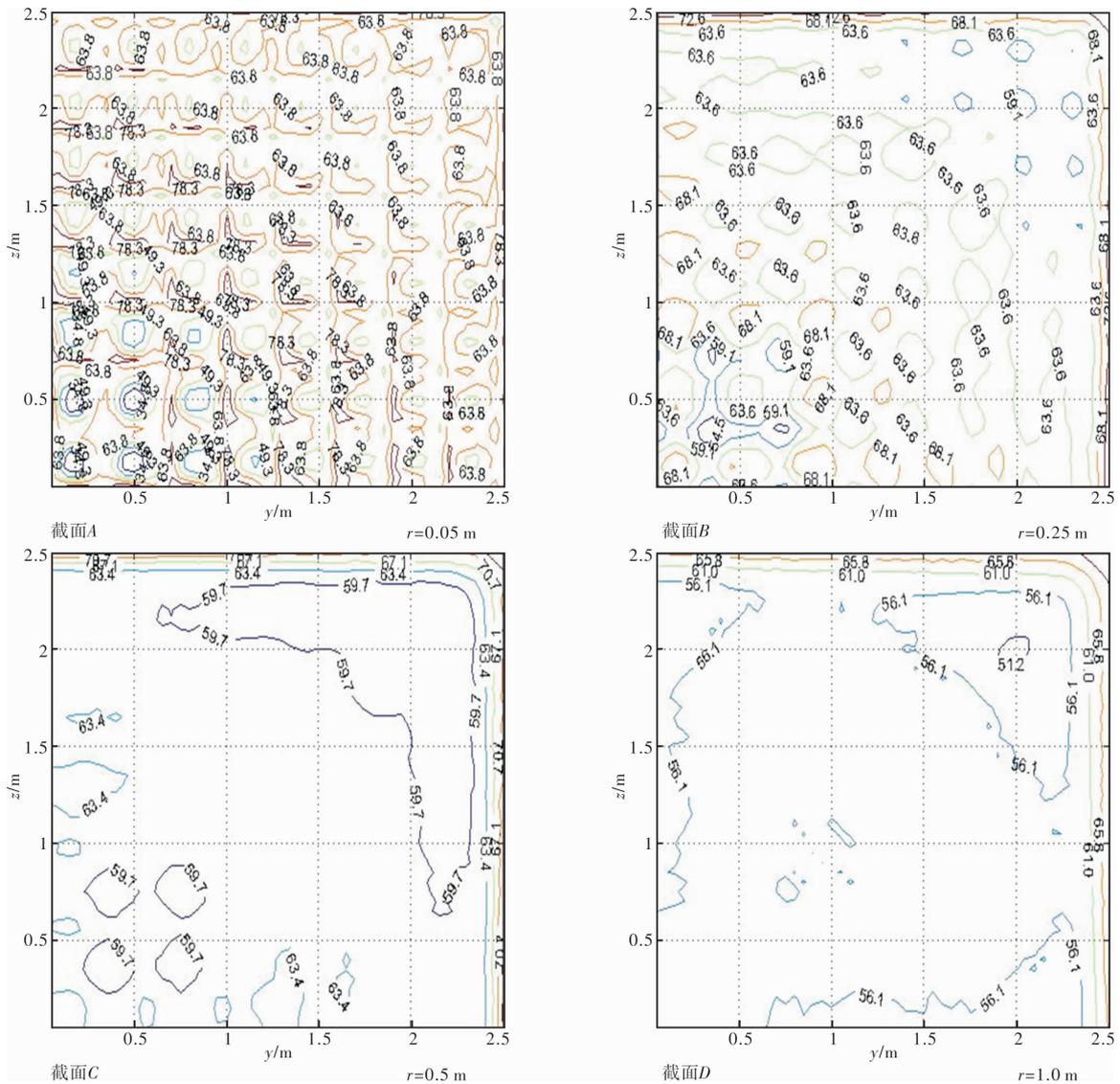


图 7 冲击波超压减小率等值线

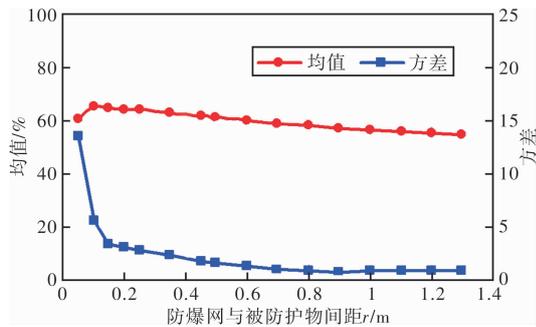


图8 冲击波超压减小率均值和方差

综合分析得出：防爆网的防爆效果与其和建筑之间的距离相关，距离增大， EP_{so} 均值和方差都减小。因此文章建议，实际工程应用时在不显著影响冲击波超压减小率基础上，适当增加防爆网与建筑之间的距离可明显改善防爆的均匀性，能获得良好防爆效果。

另外，图7截面A的 EP_{so} 等值线分布与防爆网的网格一致，等值线数值从网孔边到中心依次减小，孔边的冲击波超压减小率大于孔中心的数值，说明网孔边的防爆效果要好于网孔中心处。原因为冲击波受到格栅肋干扰发生环流，在网孔边受到影响较大，而在网孔中心处受到的影响较小。由于在爆炸作用下玻璃的边角最易受损^[15]，所以紧邻建筑的防爆网可有效减轻爆炸对窗户玻璃边角的冲击，一定程度上减轻爆炸对玻璃的伤害。图9所示为某大使馆的玻璃防护措施，小而深的窗户洞口，起到了防爆网的作用，保护玻璃的同时也可以防止外界对建筑内窥视。



图9 某大使馆玻璃防护措施

3 结论

建筑的防爆研究已开展多年，但常见的防爆方法如增大建筑的安全距离和设置防爆墙等受到场地条件的制约，难以对建筑形成有效防护。本文提出在建筑周围设置一层兼具装饰及防爆效果的防爆网，既可以解决场地局限也可以防止恐怖爆炸。文章应用有限元程序LS-DYNA建立了方孔

格栅式防爆网的爆炸模型，对防爆网防护范围内的冲击波压力场进行了数值模拟。通过与无防护网情况的压力场比较，得出以下结论：

(1)建立的防爆网爆炸模型参数正确，可用于防护范围内的冲击波压力场分布分析。

(2)防爆网可以有效减小爆炸对建筑的冲击，但防爆效果与其和建筑之间的距离有关。距离较近时，冲击波超压不均匀减小，防爆效果不好；距离增大时，冲击波超压减小率分布均匀，防爆效果变好。在不显著影响冲击波超压减小率基础上，适当增加防爆网与建筑之间的距离，可取得良好防爆效果。

(3)防爆网紧邻建筑时， EP_{so} 等值线分布与防爆网的网格一致，孔边的冲击波超压减小率要大于孔中心的数值，网孔边的防爆效果要好于网孔中心处。临近建筑时，防爆网可有效减轻爆炸对窗户玻璃边角的冲击，减小爆炸对玻璃的伤害。

参考文献：

- [1] Smith P D, Whalen G P, Rose T A. Blast propagation in an urban environment[C]//Proceedings of the 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures. Berlin, Germany, 1999.
- [2] Rose T A, Smith P D. The Influence of street junctions on blast wave impulses produced by vehicle bombs [C]//Proceedings of the 11th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Mannheim Germany, 2003.
- [3] Smith P D, Rose T A, Greens J A. The effect of arrays of suburban building in providing shielding from blast[C]//Proceedings of the 11th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Mannheim, Germany, 2003.
- [4] 孔新立, 金丰年, 赵跃堂. 建筑物防爆抗爆技术研究进展[J]. 工程爆破, 2006, 12(4): 77-81.
- [5] Mayor R P, Flanders R. Technical manual, simplified computer model of air blast effects on building walls [S]. Cambridge: US Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Transportation Systems Center, 1990.
- [6] Buchan P A, Chen J F. Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures: A state-of-the-art review [J]. Composites engineering (Part B), 2007, 38: 509-522.
- [7] James L O' Daniel, Robert J D, Phillip T T, et al. Numerical and experimental evaluation of blast retrofit of windows [C]//16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington. Seattle, USA, 2003.
- [8] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [9] Remennikov A M, Rose T A. Predicting the effectiveness of blast wall barriers using neural networks [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1907-1923.
- [10] LS-DYNA keyword user's manual [Z]. Version 971, LSTC, March, 2005.

- [11] Brode H L. Numerical solution of spherical blast waves[M]. Journal of Applied Physics. New York: American Institute of Physics, 1955.
- [12] Henrych J. The dynamics of explosion and its use[M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [13] Mills C A. The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects[C]//Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections. Edinburgh, UK, 1987: 61-73.
- [14] 杨秀敏. 爆炸冲击想象数值模拟[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [15] Wei J, Shetty MS, Dharani LR. Stress characteristics of a laminated architectural glazing subjected to blast loading[J]. Comput Struct, 2006, 84: 699-707.

The Utilization of Blast Proof Square Mesh in Buildings and Its Anti-explosion Performance

Wang Shupeng

(Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract: A new retrofit concept installing blast barrier on building is introduced to protect it from terrorist explosion. Based on LS-DYNA, an appropriate model for calculating the shock wave pressure of air behind the blast barrier is established. The numerical results shows that blast barrier can mitigate the blast effect on building which is related to the distance between them. With the increase of the distance away from blast barrier, the mean of EP_{so} will become less, whereas the uniformity of anti-explosion effect will become better. By increasing the distance as appropriate good anti-explosion performance of blast barrier can be achieved. When the blast barrier is installed near the buildings, the line contours distribution of EP_{so} is consistent with the shape of blast proof square mesh, the value of the EP_{so} is reduced from the edge to the center of a hole. The blast barrier can mitigate the effect of detonation and protect the glass of windows from terrorist explosion.

Key words: blast proof square mesh; blast; shock wave; decrease ratio of over-pressure; anti-explosion effect

(上接第3页)

- [13] 熊兆洪, 李振林. 埋地管道小泄漏模型及数值求解[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 493-498.
- [14] Gräf M K, Hillenbrand H G, Heckmann C J, et al. High-strength Large-diameter Pipe for Long-distance High Pressure Gas Pipelines [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003: 2347-2354.
- [15] Khang, Nguyen Thuc, Van Bich Ha. A new approach for regime optimization of oil and gas mixture pipeline transportation [C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. APOGCE, 2004: 1187-1193.
- [16] Marchenko V N, Zin'ko B F. Current trends in the development and production of steels and pipes for gas and oil pipelines: An international scientific-technical conference[J]. Metallurgist, 2008, 52(3/4): 167-174.
- [17] 郑津洋, 马夏康. 长输管道安全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [18] 张董莉, 刘茂. 火球热辐射后果计算动态模型的应用[J]. 安全与环境学报, 2007(4): 132-136.
- [19] 朱建华, 褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 25-28
- [20] 霍春勇, 董玉华, 等. 长输管线气体泄漏率的计算方法研究[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 101-105.
- [21] 开方明, 马夏康. 油罐区泄漏及火灾危险评价[J]. 环境学报, 2004, 4(3): 3-6.
- [22] 骆正山, 王小完. 基于天然气泄漏的危害性分析及应用[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 97-100.

The Hazard Analysis of the Pool Fire Based on the Long-distance Onshore Oil Pipeline Leakage

Luo Zhengshan, Gu Jianrong and He Hongbi

(Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the research at home and abroad and experimental statistical analysis, the quantitative analytic model of pool fire hazard based on the long-distance onshore oil pipeline leakage is established and improved, the basic properties of pool fire hazard caused by oil pipeline leakage, such as radius, strength and mechanism of hazard, are studied to provide decision support for the risk assessment, risk management and maintenance of long-distance onshore oil pipeline and harmful consequences following the disaster.

Key words: onshore; long-distance pipeline; oil leakage; pool fire hazards; calculation model