

天津港“8·12”特大火灾爆炸事故建筑物及非结构构件破坏特征

李嘉良^{1,2}, 马东辉¹, 安韶^{1,2}

(1. 北京工业大学抗震减灾研究所, 北京 100124; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 为了研究分析天津港“8·12”特大火灾爆炸事故对建筑物及非结构构件造成的破坏特征, 为城市防灾规划中安全距离划定提供依据, 在详尽的灾害现场调查及相关数值计算基础上, 建议了一种综合描述近场和远场冲击波超压峰值与比例距离关系的表达式. 通过与实际建筑物及其玻璃的破坏情况的对比验证, 并根据爆炸能量大小和距爆炸源的距离不同, 以及可能造成的人员伤亡情况, 将灾害危害范围划分为不同的破坏等级, 可为城市防灾规划编制提供借鉴.

关键词: 爆炸; 三硝基甲苯(TNT); 冲击波; 峰值超压

中图分类号: TU 982.21

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2016)10-1490-08

doi: 10.11936/bjgxb2016010036

Building and Non-structural Element Failure Characteristics of the Extraordinarily Fire Explosion Accident in Tianjin Port

LI Jialiang^{1,2}, MA Donghui¹, AN Shao^{1,2}

(1. Institute of Earthquake Resistance and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To research the failure characteristics of building and non-structural element on the extraordinarily fire explosion accident (“8·12”) which happened in Tianjin Port, and to provide reference for safe distance of urban disaster prevention planning, through detailed site investigation and related numerical calculation, a new formula of the shock wave overpressure which can be used in near field and far field were proposed. Through the comparison and validation with the actual damage, and according to the explosive power and the distance from explosive source, as well as the casualties, the damaging range was divided into different damage levels, and it could supplement and revise the urban disaster prevention planning.

Key words: explosion; trinitrotoluene (TNT); shock wave; peak pressure

北京时间2015年8月12日23时30分许,位于天津滨海新区的天津东疆保税港区瑞海国际物流有限公司所属危险品仓库集装箱堆场,装有危险品的集装箱起火,在消防队员灭火过程中现场先后发生2次爆炸,造成轻轨东海路站建筑及周边居民楼

严重受损. 经国务院调查组认定,本次爆炸事故是一起特别重大生产安全责任事故,最终致165人遇难^[1]. 据中国地震台网记录本次事故的波形图可以清晰看到,第1次爆炸近震震级ML约2.3级,相当于3t三硝基甲苯(TNT)释放的能量,而30s后的第

收稿日期: 2016-01-15

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAK14B01); 北京市教育委员会科技计划资助项目(KM201610005029)

作者简介: 李嘉良(1987—),男,博士研究生,主要从事防灾减灾工程及防护工程方面的研究, E-mail: ljfcb@126.com

2 次爆炸,近震震级约 2.9 级,相当于 21 t TNT^[2] 释放的能量。

近年来,随着经济的发展,化工、煤炭等工业作为我国国民经济的支柱产业,为国民经济的增长做出了重要贡献。但是,我国化工企业环境复杂多变,管理水平较弱,也发生了数次爆炸事故,造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失^[3]。

1 建筑物破坏分布特征

1.1 爆炸的定义

爆炸是指在足够小的容积内以极短的时间突然释放出能量,以致产生一个爆源向有限空间传播的一定幅度的压力波,即该环境里发生了爆炸^[4]。爆炸发生后,由于爆轰产物对周围空气的强烈压缩,产生压强很高的初始冲击波,并向周围传播和扩散,瞬间便可在附近的建筑墙体和建筑玻璃发生正反射或斜反射。

建筑物尤其是建筑玻璃在受到强大的冲击波的作用后,在极短的时间内发生变形。单元板面或整体板面在力的作用下开始向冲击波的初始方向退后,并把冲击波压力传递到玻璃框的横梁与立柱上。当冲击波作用在玻璃面板上,由于玻璃为脆性材料,更易发生破坏,当冲击波压力到达玻璃的承受极限时,玻璃即可能发生破碎,甚至发生玻璃碎片飞溅现象;当横梁和立柱受到的作用力超过其承受荷载时,玻璃的整体结构即发生破坏。

1.2 玻璃破坏总体分布

2015 年 8 月 15 日,即爆炸事故发生后的第 3 d,本文调查小组对爆炸发生源周围 5 km 以内进行了实地调查,收集了相关资料并选取部分建筑及其玻璃进行研究。通过分析,对本次爆炸事故中建筑物玻璃的破坏特征有了较为明确的认识,也发现了几个与以往不同的陌生破坏现象,并做了一些验证性工作和分析,初步掌握了此次天津爆炸事故建筑物玻璃破坏的基本特征。

由于警方戒严和对于安全的考虑,调查组对距离爆炸源 2~5 km 的若干处建筑物及其玻璃破坏特征进行了实地考察,大致分为 5 个区域共 21 处建筑物,如图 1 所示,红色圆点为采集点。

1.3 实际破坏与理论破坏的对比情况

据中国地震台网方面公布的数据,此次爆炸事故从波形记录结果看,先后共有 2 次爆炸,第 1 次爆炸相当于 3 t TNT 释放的强度,而第 2 次爆炸相当于 21 t TNT,如图 2、3 所示。



图 1 采集点整体分布情况

Fig. 1 Overall distribution of collection points

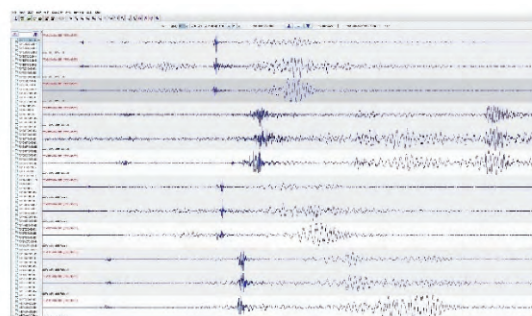


图 2 第 1 次爆炸震级波形

Fig. 2 The first explosion magnitude waveform

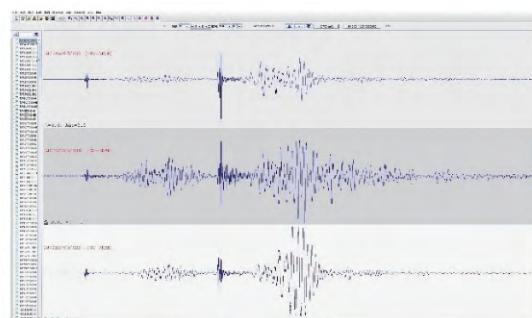


图 3 第 2 次爆炸震级波形

Fig. 3 The second explosion magnitude waveform

冲击波在传播过程中的波阵面上压力是衰减的。首先,波阵面随着冲击波的传播不断扩大,使其单位面积上的能量降低;其次,随着冲击波的传播,机械能逐渐转化为热能所消耗,不同介质间的摩擦也消耗了一部分能量,从而导致维持着冲击波运动的能量降低。

目前,研究者大多用冲击波压力、冲量、超压峰值和持续时间等参数来描述 TNT 爆炸所产生的入

射冲击波传播规律,冲击波的大部分参数通常用比例距离来表示^[5].比例距离可以定义为

$$r = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

式中: r 为比例距离, $m/kg^{1/3}$; R 为观测点与爆炸中心的距离, m ; W 为爆炸有效质量, kg .

通过大量的实验和分析结果,可以得到很多计算空气冲击波超压峰值(Δp)的经验公式,研究人员常用的有如下几种形式:

Brode(1955)认为TNT爆炸冲击波超压峰值 Δp 计算公式^[6-7]为

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{0.67}{r} + 0.1 & \Delta p > 1 \\ \frac{0.0975}{r} + \frac{0.1455}{r^2} + \frac{0.585}{r^3} - 0.0019 & 0.01 \leq \Delta p \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

Henrych(1979)给出的空气中冲击波超压峰值 Δp 计算公式^[5]为

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{1.40717}{r} + \frac{0.55397}{r^2} - \frac{0.03572}{r^3} + \frac{0.000625}{r^4} & 0.05 \leq \Delta p \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{r} - \frac{0.03262}{r^2} + \frac{0.21324}{r^3} & 0.3 \leq \Delta p \leq 1 \\ \frac{0.0662}{r} + \frac{0.405}{r^2} + \frac{0.3288}{r^3} & 1 \leq \Delta p \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

文献[8]建议TNT球型装药在无限空间中爆炸时的冲击波超压峰值 Δp 计算公式为

$$\Delta p = \frac{0.084}{r} + \frac{0.27}{r^2} + \frac{0.7}{r^3} \quad (4)$$

M. A. Sadovskiy根据模型相似律理论建立公式,由试验确定系数,得到高爆炸药冲击波超压峰值 Δp 计算公式^[7]为

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{1.07}{r^2} - 0.1 & r < 1 \\ \frac{0.076}{r} + \frac{0.255}{r^2} + \frac{0.65}{r^3} - 0.0019 & 1 \leq r \leq 15 \end{cases} \quad (5)$$

本文通过综合比较,在计算冲击波超压峰值 Δp 时,在比例距离处于 $15 m/kg^{1/3}$ 范围内采用我国《爆破安全规程》GB6722—2014^[9]建议的公式,而在考

虑远场冲击波超压峰值预测中,选择文献[10]建议的公式,这样既满足了不同比例距离的计算精度要求,又可在无限空间爆炸范围内满足广度的要求.

当 $1 < r < 15$ 时

$$\Delta p = \frac{1.1}{r} + \frac{4.3}{r^2} + \frac{14}{r^3} \quad (6)$$

当 $15 < r < 70.9$ 时

$$\Delta p = \frac{0.67}{r} + \frac{3.01}{r^2} + \frac{4.31}{r^3} \quad (7)$$

另外,超压准则是以冲击波超压峰值作为判断破坏的唯一标准,不计时间对超压的影响.当冲击波的超压大于或等于某一临界值时,会对目标(建筑物、设备设施等)造成一定程度的毁伤.通过对以往大量爆炸现场的调查,以及对资料的总结得出如表1所示的冲击波对建筑物的破坏情况.

表1 冲击波对建筑物的破坏情况^[11]

Table 1 Destruction of buildings induced by shock wave

$\Delta p/kPa$	破坏形式
0.5~2	玻璃部分破碎
2~12	玻璃全部破碎
12~30	门窗坏 砖墙小裂纹(0.5 mm)
30~50	砖墙裂纹(0.5~5 mm) 钢混屋面严重开裂
50~76	墙裂纹(50 mm) 钢混屋面严重开裂
76~100	砖墙开裂 钢混屋面塌下
100~200	防震钢混结构破坏
200~300	钢架桥破坏

根据上述公式,作者采集了16栋建筑物的相关数据和破坏特征,代入爆炸有效质量时考虑了2次爆炸的叠加效应,即 W 取24 t TNT,相关分析如表2所示.

2 案例具体分析

爆炸都是以冲击波的传播方式向四周扩散,若在空中场地中爆炸作用效力存在明显的衰减规律,进而对建筑物的破坏程度也有明显规律,但是,实际情况往往要比空旷场地复杂得多,例如,建筑楼群的布局特征(建筑物间距、排列方式等)、单个建筑物高宽等几何特征都会对冲击波的传播产生影响,进而影响到作用在目标上的爆炸荷载.

在空旷场地中,爆炸波的入射角度、马赫半径、

表 2 各建筑物实际破坏与理论破坏对比
Table 2 Comparison between the actual and theory damage of buildings

序号	建筑物名称	与爆炸源 距离/km	结构 形式	使用 用途	破坏现状 描述	$\Delta p/\text{kPa}$	理论破坏 情况	是否 相符
1	滨海博达集装箱 物流公司	0.32			集装箱及汽车全 部摧毁	144.76	防震钢混结构破 坏	是
2	万科清水港湾	0.68	框剪结构	住宅	窗框全部损坏, 墙体出现裂缝	34.17	砖墙裂纹,钢混 屋面严重开裂	是
3	天滨公寓	1.20	混合机构	住宅	门窗全部损毁	17.9	门窗坏,砖墙小 裂纹	是
4	万科金域蓝湾	1.30	框剪结构	住宅	门窗损坏,部分 阳台坍塌	16.4	门窗坏,砖墙小 裂纹	是
5	滨海财富广场写 字楼	1.50	框剪结构	行政办公	玻璃连接外墙大 面积严重撕裂	13.50	玻璃全部破碎	是
6	滨海国际会展中心	1.80	大型框架斜 拉结构	展览交流	玻璃全损坏,有 部分崩出	11.53	玻璃全部破碎	是
7	泰达足球场	2.10	大型框架结 构	体育场	玻璃大部分破 碎,门损坏	9.78	玻璃全部破碎	是
8	天津技术开发区 第二中学	2.30	框架结构	教学	少量玻璃破损			
9	伴景湾家园	2.40	框剪	住宅	玻璃破碎			
10	汤浅有限公司未 完工楼	3.20	框架结构	办公	大量玻璃破碎			
11	天津环渤海国际 物流中心	3.50	框架结构	物资堆放	玻璃部分破损			
12	美克国际	3.50	框架结构	办公	玻璃部分损坏			
13	仁达公司厂房	3.80	砖混结构	设备加工	玻璃部分损坏			
14	泰达公司办公楼	4.20	框架结构	行政服务 中心	玻璃破碎,玻璃 幕墙内陷			
15	富士康天津精密 工业有限公司	4.50	框架结构	加工生产	玻璃破损			
16	某生活区	4.80	框架结构	办公	玻璃全部破损			

注:超过 2.1 km 处,其比例距离不满足约束条件,故只描述事故现场情况。

马赫高度以及临界爆炸距离都将随着爆炸点高度、距离的改变发生变化。在城市复杂环境中,由于周围建筑物的阻挡,爆炸冲击波将发生反射、衍射或产生“引导效应”等,使得爆炸波的传播更趋复杂,明显区别于简单空旷场地中的传播机理。建筑物的外部造型特征和建筑物之间的布局等,对爆炸波的传播也有着显著影响。因此,在城市复杂

环境中,作用在周围建筑物上的爆炸荷载也更为复杂,其所造成的破坏后果也更趋难以预测。为了避免这类灾害,应分析城市中的一些环境特征对爆炸波的传播及爆炸荷载的影响,提出一些行之有效的防爆措施,确保各类结构物一旦在发生爆炸的情况下能够最大限度地承受爆炸的冲击,有效降低爆炸的灾害程度。

2.1 具体案例分析与对比

玻璃通常是建筑物中最薄弱的部分. 与楼板、墙、柱等其他构件相比, 较低的压力就可以使玻璃破坏. 过去的爆炸事件表明, 大规模外部爆炸事故发生后, 几 km 外的玻璃都受到了破坏. 在市区范围内的爆炸事件中, 震落的玻璃成为道路行人受伤的主要原因, 并且街道上大量的玻璃碎片给救援和清理带来很大的不便.

下面就根据本次爆炸具体的实地调查结果进行分析, 总结了下述一些规律.

1) 同一座建筑玻璃破坏程度大体上正立面比背立面严重, 正立面玻璃破坏程度上层大于下层, 背立面则正好相反.

对汤浅有限公司未完工楼的正立面(见图4(a))和背立面(见图4(b))玻璃破坏情况分析, 面向爆炸源的建筑物正立面玻璃基本全部损坏, 大部分窗框也基本脱落, 而建筑物的另一侧, 即背对爆炸源的背立面上的玻璃基本没有损坏.

另外, 按楼层高度的区别, 正立面的玻璃破坏程度大体趋于一致, 最高层的玻璃和窗框全部脱落, 而首层的窗框无脱落现象, 但玻璃基本破碎. 对于背立面的玻璃破坏程度, 只有首层出现了玻璃或窗框



(a) 楼体正立面



(b) 楼体背立面

图4 汤浅有限公司未完工楼的正立面和背立面破坏对比

Fig. 4 Contrast of the facade and back elevation of YUASA Co., Ltd. uncompleted building

损坏现象.

2) 高层建筑正立面的破坏程度小于背立面.

在距离爆炸源约 1 300 m 的万科金域蓝湾高层居民楼, 出现了正立面(见图5(a))玻璃破坏程度比背立面(见图5(b))破坏程度小的现象, 建筑物正立面只有少数部玻璃出现了破碎现象, 而背立面出现了大部分玻璃破碎和窗框脱落的现象, 据笔者推测除了建筑物高度较高的原因之外还和其建筑形式有关系, 即此建筑物长宽比过大, 形成了条形形式的平面, 室内在冲击波传播方向的狭小空间产生了巨大的正负压强差异.



(a) 正立面



(b) 背立面

图5 万科金域蓝湾高层建筑正立面和背立面破坏对比

Fig. 5 Contrast of the facade and back elevation of the Vanke high-rise building

3) 具有夹道效应^[12], 即 2 座距离很近的建筑物对立面墙的玻璃破坏异常严重.

在建筑物之间的“夹道效应”起初是指 2 栋距离较近的建筑物所引起的其表面局部风压分布大幅度增加的现象, 此次现场调查发现, 该结论同样适用于爆炸冲击波的研究, 即冲击波在 2 个建筑之间发生爆炸时, 爆炸波的传播和产生的超压荷载要比空旷场地中或仅有单个建筑物时要复杂. 爆炸波除了发生绕流等特征外, 相邻 2 栋建筑物之间还存在着相互干扰. 如图 6 所示, 在相邻 2 栋建筑物中, 在不相邻的墙面上(见图 6(a))的玻璃基本完好, 只有个别玻璃发生了破坏. 而在相邻的 2 个墙面(见图 6

(b)) 上,由于 2 栋建筑物之间距离太小,产生了俗称的“夹道效应”,相互对立的玻璃发生了更为严重的破坏. 故建筑物之间距离的不同对爆炸造成的破坏后果也不同.



(a) 建筑物不相邻墙面



(b) 建筑物相邻墙面

图 6 两栋相邻建筑的破坏情况

Fig. 6 Destruction of two adjacent buildings

4) 无支撑面积越大,长宽比越小的玻璃破坏越严重.

Kadi 等^[13]分析了建筑设计对玻璃窗爆炸响应的影 响,通过分析证明,减少玻璃窗的无支撑面积和使用较大的长宽比可以提高玻璃窗抗击荷载,包括爆炸荷载的能力. 通过图 7、8 可以看到,在本次爆炸事故中也体现了这种结论,长宽比越小的近似正方形的玻璃越容易发生破碎,而相反,长宽比越大的近似长方形的玻璃越不容易发生破碎.



图 7 仁达公司厂房

Fig. 7 Factory of Renda company

另外,若是冲击波发生在强度和刚度较大的玻



图 8 某单层砌体结构

Fig. 8 Singlelayer masonry structure

璃上,玻璃轻易不会发生破坏,而冲击荷载便传递到窗框上,而发生玻璃窗框整体变形或脱出的情况,从而造成砸击等伤亡事故,如图 9 万科高层住宅楼和图 10 某单层厂房所示.



图 9 某万科高层破坏情况

Fig. 9 Destruction of Wanke high-rise building



图 10 某单层厂房

Fig. 10 Single storey factory

5) 玻璃幕墙的抗冲击波能力明显好于建筑玻璃,其危害圈大致仅约 2 km.

调查组还分析了此次天津爆炸事故中,建筑物玻璃幕墙的破坏情况,位于距离爆炸源 3 200 m 的汤浅公司未完工办公楼正立面(见图 11),可以明显地看到建筑玻璃几乎全部破碎以及窗框大部分脱出,而处于同一立面的玻璃幕墙则完好无损. 位于 1 800 m 的滨海国际会展中心为斜拉框架结构

(见图12)作为围护结构的玻璃幕墙遭到了损坏.故可以总结以下结论,玻璃幕墙的抗冲击波能力明显好于普通玻璃,且相比后者的5 km破坏圈,玻璃幕墙的破坏范围基本在爆炸源周围2 km左右.



图11 汤浅公司未完工楼
Fig. 11 YUASA Co. Ltd. uncompleted building

2.2 爆炸作用下建筑物的破坏等级

经过上述分析对本次爆炸事故造成的建筑物破坏情况进行了总结和比较,在2 km危害圈内建筑物结构产生了少量的破坏,而玻璃大部分都遭到了



图12 天津国际会展中心
Fig. 12 Tianjin international convention and exhibition center

严重的破坏.在5 km危害圈内造成的破坏基本都是玻璃的损坏.为了估计爆炸对周围建筑物及非结构构件的破坏程度,降低人员伤亡和经济损失,根据爆炸能量大小和距爆炸源的距离不同,本文将危害范围划分为不同的破坏等级(见表3).从而根据具体的建筑物重要程度和使用功能等因素进行相应的防爆措施,也可以在城市抗震防灾规划的修订方面进行补充.

表3 爆炸冲击波对建筑物玻璃和窗框的破坏等级

Table 3 Damage grade of glass and window frames induced by shock wave

破坏等级	对门窗的破坏现象	预计对人员的伤害情况
极高	门窗掉落,成为致命危险	多数人员遇难
高	玻璃破碎向室内喷射,导致严重的碎片损伤,或玻璃和窗框整体脱出	多数人员严重受伤,约10%~25%人员遇难
中等	玻璃破碎,破片喷射越为一米左右,窗框可能部分脱出,玻璃也可能回弹到室内,造成较小伤害	多数人员受重伤,少于10%人员遇难
低	玻璃破碎但停留在窗框内,不可再使用	小部分人员受伤,基本无死亡
极低	玻璃不破碎,可以再次使用	仅可能出现轻伤

3 结论

通过较详尽的现场调查以及相关资料分析和现场勘察,本文对“8·12”天津爆炸事故造成的建筑物玻璃破坏特征取得了初步认识,并通过与以往的研究结论进行了对比分析,结果总结如下:

1) 通过对TNT爆炸冲击波超压峰值的已有研究成果进行比较,提出一种综合描述近场和远场冲击波超压峰值与比例距离关系的表达式,通过计算结果与现场勘查情况的对比分析,验证了此计算模型的可信性.

2) 本次爆炸事故破坏范围广,基本延伸到了爆

炸源周围5 km的范围圈内.通过调查发现在低层或多层建筑物中,同一座建筑玻璃破坏程度正立面比背立面严重,而立面玻璃破坏程度上层大于下层,背立面正好相反.在高层建筑方面,正立面的破坏程度小于背立面,造成这种差异的原因可能是这2种建筑高度及平面形式以及室内的狭小空间内冲击波产生的正负压强.在2座或多座距离很近的建筑物中,夹道效应使2座距离很近的建筑物对立面墙的玻璃破坏异常严重,距离越近,破坏越严重.对于绝大多数遭到损坏的玻璃而言,无支撑面积越大,长宽比越小的玻璃破坏越严重,而若是冲击波发生在强度和刚度较大的玻璃上,玻璃轻易不会发生破坏,冲

击荷载便传递到窗框上,而发生玻璃窗框整体变形或脱出的情况.对于具有玻璃幕墙的建筑物进行考察得出,玻璃幕墙的抗冲击波能力明显好于建筑玻璃,其危害圈大致为 2 km 左右.

3) 根据爆炸能量大小和距爆炸源的距离不同,本文将危害范围划分为不同的建筑物破坏等级,从而可以根据具体的建筑物重要程度和使用功能等因素进行相应的防爆措施,也可以在城市抗震防灾规划的修订方面进行补充

由于此次爆炸事故具体信息还未查明及公布,详细的事故分析还需要考虑爆炸源具体参数,明确冲击波传播机制,结合相关计算机模拟软件和城市规划进行深入的研究.

参考文献:

- [1] 王硕. 天津港“8·12”特别重大火灾爆炸事故调查报告公布[EB/OL]. [2016-02-05]. <http://www.chinanews.com/sh/2016/02-05/7750533.shtml>.
- [2] 王微. 天津港爆炸污染物处理引关注[J]. 科技导报, 2015, 33(16): 9.
WANG W. The focus for treatments of pollutants in Tianjin port explosion [J]. Science and Technology Review, 2015, 33(16): 9. (in Chinese)
- [3] 李毅. 反思天津大爆炸[J]. 环境教育, 2015(9): 4-15.
LI Y. The introspection of Tianjin port explosion [J]. Environmental Education, 2015(9): 4-15. (in Chinese)
- [4] 龙文志. 玻璃幕墙的抗爆炸设计[J]. 中华民居, 2009, (6): 94-101.
LONG W Z. The anti-explosion design of glass curtain wall [J]. China Homes, 2009, (6): 94-101. (in Chinese)
- [5] 严国建,周明安,余轮. 空气中爆炸冲击波峰值的预测[J]. 采矿技术, 2011, 11(5): 89-91.
YAN G J, ZHOU M A, YU L. Prediction of overpressure of explosive blast in the air [J]. Mining Technology, 2011, 11(5): 89-91. (in Chinese)
- [6] WU C, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and a inb last pressure on nearby structures from surface explosions [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31(6): 669-717.
- [7] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge [J]. Phys Fluids, 1959, (2): 217.
- [8] 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型[J]. 爆破, 2008, 25(1): 15-19.
YANG X, SHI S Q, CHENG P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the Air [J]. Blasting, 2008, 25(1): 15-19. (in Chinese)
- [9] 中国工程爆破协会. 爆破安全规程: GB6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [10] 北京工业学院. 爆炸及其作用(下册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [11] 董守华. 事故爆炸冲击波破坏准则综述[J]. 石油化工安全技术, 1996, 12(4): 40-41.
DONG S H. Review on failure criteria of the explosion shock wave [J]. Petrochemical Safety Technology, 1996, 12(4): 40-41. (in Chinese)
- [12] 蔡峰,陈学锐,陈青松,等. 复杂结构建筑物风荷载相互干扰研究[J]. 建筑科学, 2006, 22(5): 39-42.
CAI F, CHEN X R, CHEN Q S, et al. Research on interference of wind load on complicated-structured buildings [J]. Building Science, 2006, 22(5): 39-42. (in Chinese)
- [13] KADI A, IREMONGER M J, KENNEDY L J. The influence of architectural design and features on the response of glassing to explosive blast [C]//Proceeding of the 8th International symposium on interaction of the munitions with structures, Mclean, Virginia, 1997. Virginia: ISIEMS, 1997: 195-208.

(责任编辑 郑筱梅)