

防爆墙形状与位置变化对目标建筑超压的影响

周清¹, 耿程程¹, 盖燕茹², 齐麟^{3,*}, 刘旭宏⁴

(1. 滨州市规划设计研究院有限公司, 滨州 256600; 2. 山东航空学院 建筑工程学院, 滨州 256600;
3. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 4. 福建理工大学 土木工程学院, 福州 350116)

摘要:为研究定点爆炸下矩形防爆墙形状及位置变化对建筑物超压的影响,利用 LS-DYNA 软件对包含 TNT 炸药、空气、防爆墙、目标墙等组成要素的计算模型开展了数值分析。研究了不同形状、3 种不同形式位置变化的防爆墙对目标墙爆炸超压的影响,并根据研究的结论对防爆墙设计与布置提出了一定的建议。研究发现,“宽矮形”与“等比例形”防爆墙的防护效果相似,这两种形状的防爆墙均能有效地对目标墙底部的整个范围进行有效的防护。墙底的爆炸超压随着防爆墙与目标墙的宽度比 α 、高度比 β 的增加迅速减小,但是当 α 、 β 超过某一数值后防爆效果不明显。防爆墙距离爆炸点越近防爆效果越好,距离目标墙越近防爆效果越差。防爆墙发生偏移时,与偏移方向同侧目标墙底超压明显降低,与偏移方向相反的墙底超压明显增大。

关键词:矩形防爆墙;形状;位置变化;爆炸超压;数值分析

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2025)05-0022-10

Influence of the shape and position change of anti-explosion wall on the overpressure of target building

ZHOU Qing¹, GENG Chengcheng¹, GAI Yanru², QI Lin^{3,*}, LIU Xuhong⁴

(1. Binzhou Planning & Design Research Institute Company Limited, Binzhou 256600, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256600, China;
3. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
4. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to study the influence of the shape and position change of rectangular anti-explosion wall on the overpressure of buildings under fixed-point explosion, the calculation model including TNT explosives, air, anti-explosion wall, target wall and other factors was numerically analyzed by using the LS-DYNA software. The influence of different shapes of and three different position changes of anti-explosion walls on the explosive overpressure of the target wall was studied, and according to the conclusion of the study, some suggestions were put forward for the design and layout of anti-explosion walls. It is found that the “wide and short” anti-explosion walls and the “equal proportion” anti-explosion walls have similar protective effects, and both can effectively protect the whole area at the bottom of the target wall. The explosive overpressure at the bottom of the wall decreases rapidly with the

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600504)

作者简介: 周清(1982—), 男, 山东滨州人。博士, 正高级工程师, 主要从事建筑结构抗爆研究。E-mail: zhouqingtianda@163.com。

* 通信作者: 齐麟(1982—), 男, 山西太原人。博士, 教授, 主要从事建筑结构防灾减灾研究。E-mail: qilint208@163.com。

increase of the width ratio α and height ratio β of the anti-explosion wall, but the anti-explosion effect is not obvious when α and β exceed a certain value. The closer the anti-explosion wall is to the explosion point, the better the anti-explosion effect is, and the closer it is to the target wall, the worse the anti-explosion effect is. When the anti-explosion wall deviates, the overpressure at the bottom of the target wall on the same side with the deviation direction decreases obviously, and the overpressure at the bottom of the wall opposite to the deviation direction increases obviously.

Key words: rectangular anti-explosion wall; shape; position change; explosive overpressure; numerical analysis

近年来因爆炸引发的事故时有发生,降低爆炸波对建筑物作用的有效方法是在爆炸点与目标建筑物之间设置一道防爆墙。因具有施工简单、防爆效果好等优点,现实生活中的防爆墙多设计成矩形,众多学者已经采用试验与数值分析相结合的方法对各种不同形式的矩形防爆墙的抗爆性能进行了深入的研究。赵春风等^[1]采用试验的方法研究了单钢板混凝土防爆墙的抗爆性能并在此基础上利用 LS-DYNA 软件进行了数值分析。CAO 等^[2]研究了不同波高比的波纹钢-混凝土组合防爆墙的水下防爆效果,并与试验结果进行了比较。NIAN 等^[3]对钢筋混凝土防爆墙(RC 防爆墙)进行了原型试验,然后在此基础上对试验过程进行了数值模拟。众多学者的研究成果表明,各种类型的防爆墙均具有良好的抗爆性能,数值分析方法可以准确地模拟爆炸波的传播过程以及与防爆墙的相互作用,是一种重要的研究手段。

以往学者研究的重点集中在防爆墙的抗爆性能上,而本文主要探讨防爆墙的应用。笔者将高性能防爆墙视为刚体布置在爆炸点与目标建筑物之间,通过改变防爆墙的截面形状与位置研究其对目标建筑物超压荷载的影响。将高性能防爆墙与目标建筑物均视为刚体,是因为笔者主要研究的对象是目标建筑物表面的超压数值,而并不关心建筑物在爆炸荷载作用下的损伤与破坏的情况,众多学者在研究爆炸波对建筑物表面产生的超压荷载时均采用该方法。例如,李忠献等^[4]借助 LS-DYNA 软件对城市复杂环境中爆炸波的传播规律与超压荷载进行了数值模拟和分析,将两栋建筑物设置成刚体并采集其上的超压数据进行了对比与分析。曲树盛等^[5]研究了爆炸波在地铁站内的传播规律以及对主要结构构件产生的超压荷载,将所有结构构件均设置为刚体,忽略了爆炸冲击波引起的结构构件变形与破坏。

1 研究模型与研究意义

构建包含爆炸点、防爆墙、目标建筑物三者的模型如图 1 所示,结合图 1 论述本文的研究意义。本文采用定点爆炸形式,爆炸点正对建筑物的中心,爆炸点至目标建筑物的距离设置成 10 m。恐怖袭击时爆炸点的位置具有不确定性,但爆炸点距离目标建筑物越近破坏性越大。例如,在如图 2 所示的典型街道中,当爆炸点位于两建筑物中间位置时,产生的破坏作用最严重。由于爆炸荷载对目标

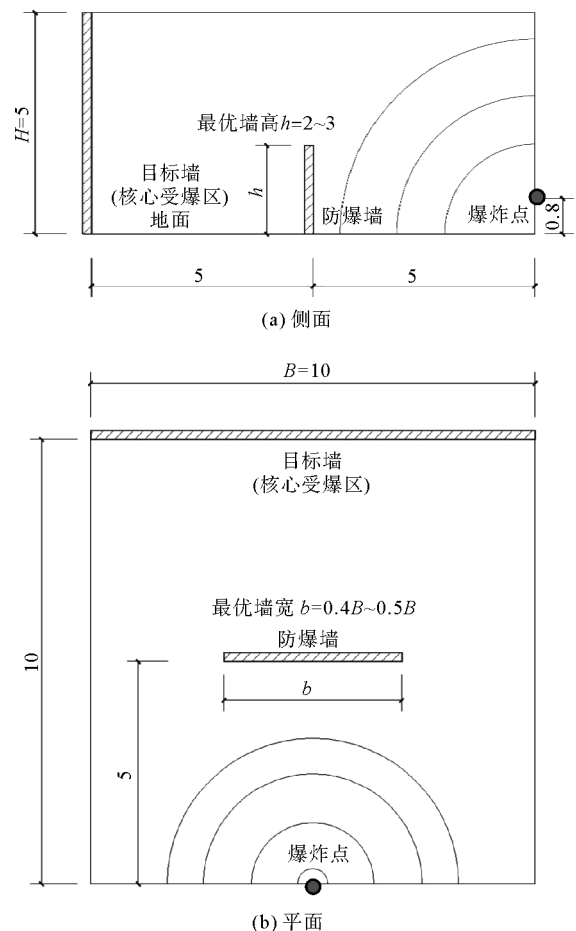


图 1 模型平面示意(单位:m)

建筑物越近破坏性越大。例如,在如图 2 所示的典型街道中,当爆炸点位于两建筑物中间位置时,产生的破坏作用最严重。由于爆炸荷载对目标

建筑物产生的破坏作用是局部的,所以防爆墙尺寸并非越大越好。合理的防爆墙尺寸不仅能够达到降低爆炸超压的目的,还能节省材料、降低成本。

在爆炸点布置药量为 454 kg 的球状实心 TNT 炸药,该药量为普通轿车炸弹的 TNT 当量^[6],借助 TNT 炸药的密度 $\rho=1640 \text{ kg/m}^3$ 可以计算出该球形炸药的半径 $R=0.405 \text{ m}$ 。炸药放置在轿车内,而普通轿车高度介于 1.2~1.6 m,故爆炸点距离地面 0.8 m。爆炸波以爆炸点为中心向四周传播并对目标建筑物产生超压作用,超压作用最严重的区域称为目标建筑物的“核心受爆区”。例如,当爆炸点距离地面较近时,高度为 100 m 的目标建筑往往只是在底层破坏最严重。同样,宽度为 100 m 的目标建筑物也只是在距离爆炸点附近的有限宽度内受到的作用较大,随着爆炸波向两侧扩散对目标建筑物的作用迅速减小。基于上述原因,对目标建筑物进行防护时仅需要关注其“核心受爆区”的超压分布与变化。研究发现,目标建筑物的“核心受爆区”与炸药药量、爆炸点到目标建筑物的距离有关。多次数值模拟发现,在药量为 454 kg 的球状实心 TNT 炸药作用下,距离爆炸点 10 m 的目标建筑物“核心受爆区”尺寸为:宽度 $B=10 \text{ m}$ 、高度 $H=5 \text{ m}$,超过该区域后的爆炸超压迅速衰减。用一道尺寸为 $B \times H=10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的目标墙代替目标建筑物的“核心受爆区”,该区域爆炸超压的变化能够较为准确地反映防爆墙的防爆效果。

以目标墙所在的平面建立坐标系,如图 3 所示,规定沿墙宽度方向为 x 坐标、高度方向为 y 坐标,墙底中点为坐标原点。以 0.5 m 为坐标轴的基本刻度值,取 x 坐标与 y 坐标刻度值的交叉点作为数据采集点。对于尺寸为 $B \times H=10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的目标墙而言,每种工况下共需采集 231 个数据点。防爆墙布置在爆炸点与目标墙之间,尺寸为宽 \times 高= $b \times h$ 。

以目标墙所在的平面建立坐标系,如图 3 所示,规定沿墙宽度方向为 x 坐标、高度方向为 y 坐标,墙底中点为坐标原点。以 0.5 m 为坐标轴的基本刻度值,取 x 坐标与 y 坐标刻度值的交叉点作为数据采集点。对于尺寸为 $B \times H=10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的目标墙而言,每种工况下共需采集 231 个数据点。防爆墙布置在爆炸点与目标墙之间,尺寸为宽 \times 高= $b \times h$ 。



图2 典型街道

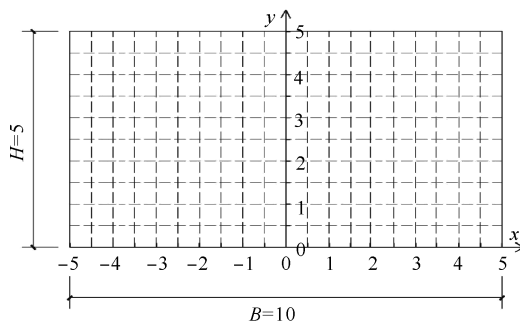


图3 目标墙坐标(单位:m)

2 矩形防爆墙形状对目标建筑物爆炸超压的影响

目标墙上的爆炸超压不仅与防爆墙有关,与目标墙也存在一定关系。定义反映防爆墙与目标墙宽度的参数 $\alpha=b/B$ 、高度的参数 $\beta=h/H$, α 、 β 分别称为防爆墙与目标墙的宽度比、高度比。 α 、 β 取值不同时,防爆墙呈现如图 4 所示的 3 种不同形状:①当宽度比 α 不变,高度比 β 增加时,防爆墙呈现“窄高形”;②当高度比 β 不变,宽度比 α 增加时,防爆墙呈现“宽矮形”;③当宽度比 α 、高度比 β 按照目标墙宽度与高度的比值一起增加时,防爆墙呈现与目标墙形状相似的“等比例形”。

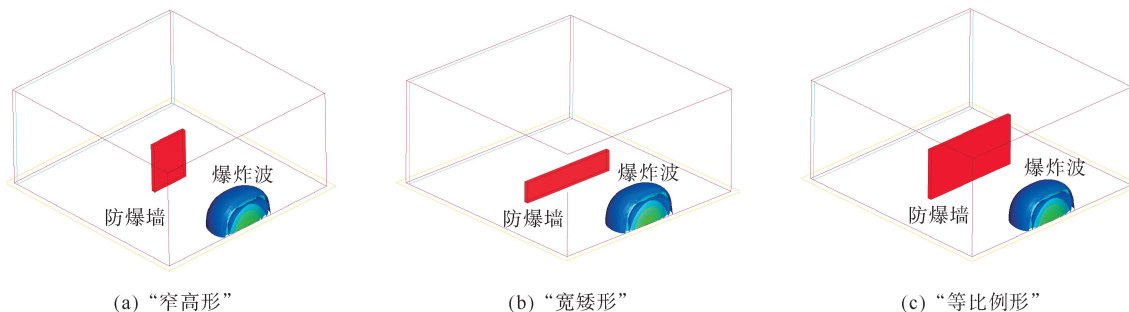


图4 不同形状防爆墙

2.1 数值分析模型

借助 LS-DYNA 软件建立数值分析模型,炸药、空气、防爆墙与目标墙均采用实体 SOLID 单元。数值分析模型网格划分尺寸为 50 mm,根据相关文献可知该尺寸可以满足计算精度要求^[7]。利用关键字 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 定义 TNT 炸药^[8],密度 $\rho=1640 \text{ kg/m}^3$ 、爆轰速度 $D=6930 \text{ m/s}$ 。利用关键字 * EOS_JWL 定义爆轰过程的状态方程,该方程主要反映爆轰压力 P_1 与相对体积 V 的相互关系,具体表达式为

$$P_1=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: P_1 为爆轰压力; V 为相对体积; E 为初始内能密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程参数,根据相关文献^[9]可知上述参数的数值分别为: $A=373.8 \text{ GPa}$ 、 $B=3.747 \text{ GPa}$ 、 $R_1=4.15$ (无量纲)、 $R_2=0.9$ (无量纲)、 $\omega=0.35$ (无量纲)。

利用关键字 * MAT_NULL 定义空气材料,空气密度 $\rho_0=1.29 \text{ kg/m}^3$ 。利用关键字 * EOS_LINEAR_POLUNOMIAL 定义空气的状态方程,具体表达式为

$$P_2=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+(C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E_0 \quad (2)$$

式中: P_2 为空气压力;参数 $C_0\sim C_6$ 为状态方程常数,根据相关文献^[10]可知: $C_0\sim C_3$ 、 $C_6=0$; $C_4\sim C_5=0.4$;参数 $\mu=\rho/\rho_0-1$, ρ 为空气的当前密度, ρ_0 为空气密度; E_0 为初始能量密度, $E_0=2.5\times 10^5 \text{ J/m}^3$ 。

利用关键字 * INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 实现炸药在空气中的填充,该关键字可以方便地建立 $R=0.405 \text{ m}$ 的球形炸药数值分析模型并避免了因网格划分带来的困难。利用关键字 * MAT_RIGID 将防爆墙与目标墙定义为刚性体,利用关键字 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 定义流固耦合以实现爆炸波与墙体之间的作用,利用关键字 * RIGIDWALL_PLANAR 定义刚性地面以考虑地面对爆炸波的反射作用。

2.2 无防护时目标墙超压分布与墙底超压峰值曲线

在 454 kg 球状 TNT 炸药产生的爆炸波作用下,目标墙每个参考点上都有一条超压时程曲线,该时程曲线上的超压最大值称为超压峰值 $P_{\text{峰}}$ 。借助绘图软件 origin 将目标墙上采集得到的 231 个超压峰值绘制成 3D 超压峰值分布图,如图 5 所示。在图 5 所示的三维坐标系中, x 坐标与 y 坐标与图 3 保持一致, z 坐标为超压峰值。分析图 5 可知,墙底部($y=0 \text{ m}$)的超压峰值远大于其他部位,该处超压峰值明显增大是由于地面与墙面对爆炸波的双重反射作用。超压峰值沿墙高先减小再增加,在墙高中部($y=3 \text{ m}$)到达一个小波峰后迅速减小。图 6 为墙底部($y=0 \text{ m}$)与墙中部($y=3 \text{ m}$)的超压峰值曲线,分析图 6 可以清楚

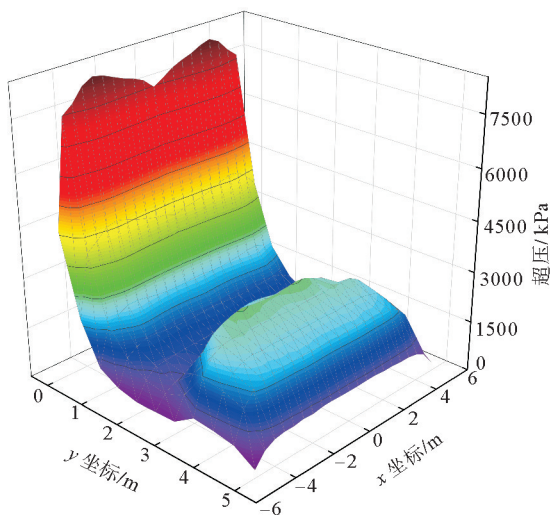


图 5 无防护的目标墙超压分布

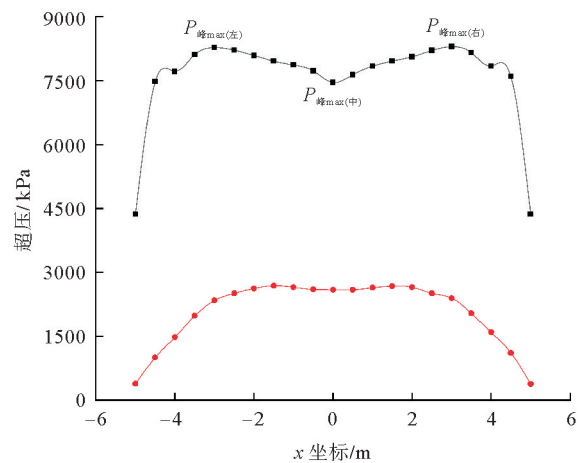


图 6 无防护的目标墙超压峰值曲线

—■— 墙底部($y=0 \text{ m}$); —●— 墙中部($y=3 \text{ m}$)

地看到墙底部各点的超压峰值远大于墙中部。墙底超压峰值曲线一般会在墙两端与中部出现3个波峰,每个波峰对应一个超压峰值的最大值 $P_{\text{峰max}}$, $P_{\text{峰max}}$ 的大小与分布情况反映出防爆墙的防护效果。为研究墙底 $P_{\text{峰max}}$ 的变化,根据波峰出现位置定义3个重要超压参数: $P_{\text{峰max(左)}}$ 表示左侧的最大超压峰值; $P_{\text{峰max(右)}}$ 表示右侧的最大超压峰值; $P_{\text{峰max(中)}}$ 表示中间的最大超压峰值。以图6为例,此时 $P_{\text{峰max(左)}} = P_{\text{峰max(右)}} = 8280 \text{ kPa}$ 、 $P_{\text{峰max(中)}} = 7460 \text{ kPa}$ 。

2.3 不同形状防爆墙对目标墙爆炸超压的影响

2.3.1 “窄高形”防爆墙

保持防爆墙宽度 $b=2 \text{ m}$ 不变,此时宽度比 α 为定值0.2。防爆墙高度分别取 $h=1, 1.5, 2, 2.5 \text{ m}$,对应的高度比分别为 $\beta=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$,形成“窄高形”防爆墙。

设置“窄高形”防爆墙后,目标墙超压分布、墙底超压峰值曲线如图7、图8所示。分析图7、图8可知:

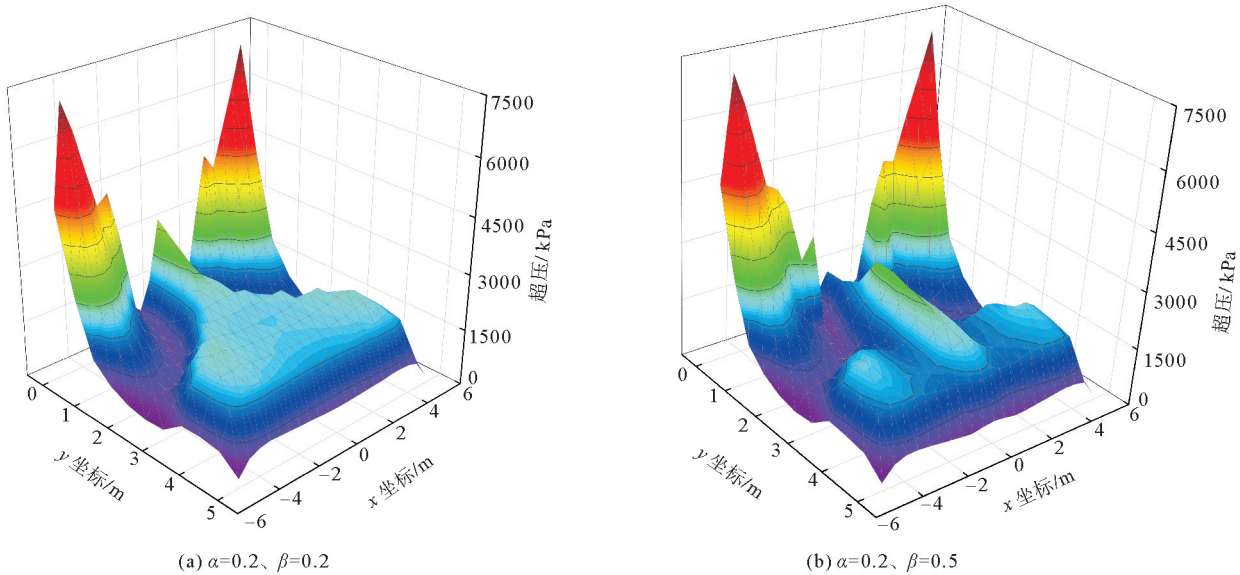


图7 采用“窄高形”防爆墙防护的目标墙超压分布

1) 当高度比 $\beta=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 时, $P_{\text{峰max(左)}} = P_{\text{峰max(右)}}$,分别为7140、7160、7160、7160 kPa,较无防护时的8280 kPa分别降低了13.77%、13.53%、13.53%、13.53%,说明防爆墙宽度较小,对目标墙底部两侧的防护效果较差。当 $x = \pm 4$ 时, $P_{\text{峰}} = 6330 \text{ kPa}$,较该点在没有防护时的7720 kPa降低18%;当 $x = \pm 2$ 时, $P_{\text{峰}} = 3260 \text{ kPa}$,较该点在没有防护时的8090 kPa降低59.7%。随着高度比 β 的增加,原点附近区域以外的各条曲线基本重合,各点的超压峰值降低均不明显。

2) 当高度比 $\beta=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 时, $P_{\text{峰max(中)}}$ 分别为3240、2190、1460、1400 kPa,较无防护时的7460 kPa分别降低了56.57%、70.64%、80.43%、81.23%,当 $\beta \geq 0.4$ 时继续增加墙高防爆效果不明显。

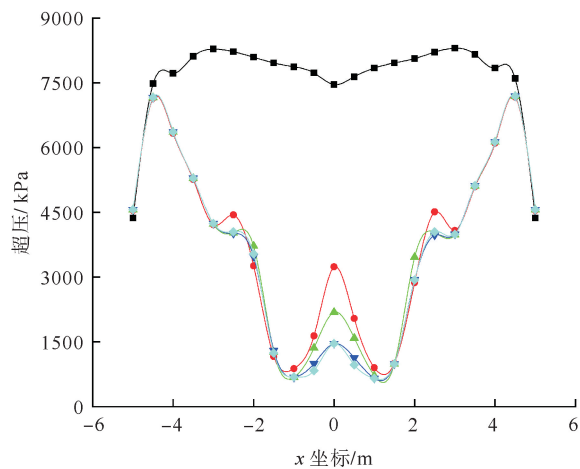


图8 采用“窄高形”防爆墙防护的超压峰值曲线

—■— 无防护; —●— $\alpha=0.2, \beta=0.2$; —▲— $\alpha=0.2, \beta=0.3$;
—▼— $\alpha=0.2, \beta=0.4$; —◆— $\alpha=0.2, \beta=0.5$

2.3.2 “宽矮形”防爆墙

保持防爆墙高度 $h=1\text{ m}$ 不变,此时高度比 β 为定值 0.2。防爆墙宽度分别取 $b=2,3,4,5\text{ m}$,对应的宽度比分别为 $\alpha=0.2,0.3,0.4,0.5$,形成“宽矮形”防爆墙。

设置“宽矮形”防爆墙后,目标墙超压分布与墙底超压峰值曲线如图 9、图 10 所示。分析图 9、图 10 可知:

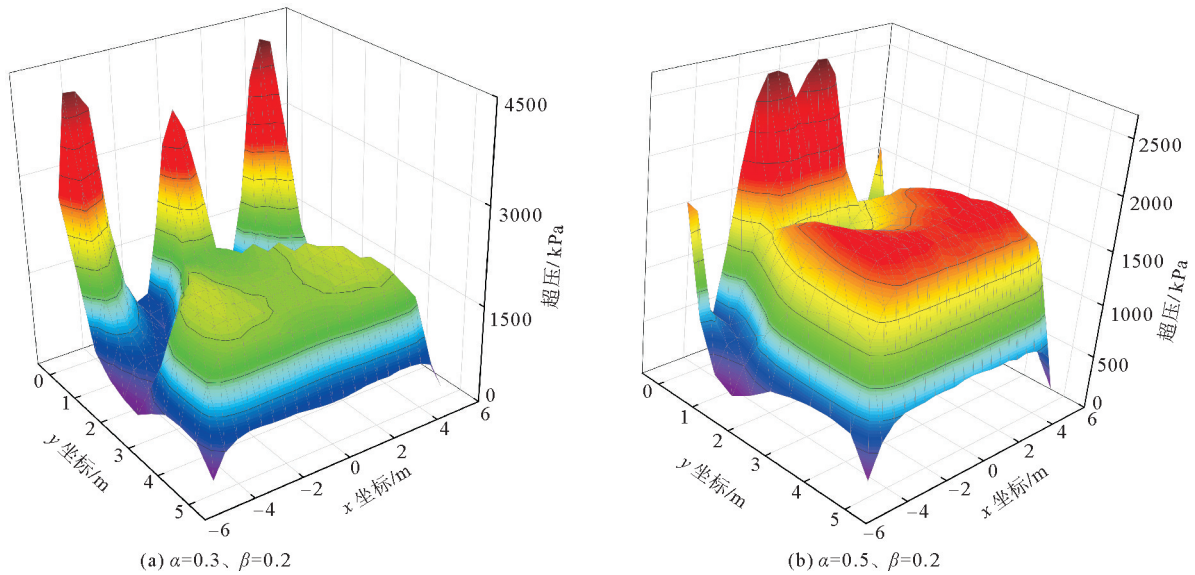


图 9 采用“宽矮形”防爆墙防护的目标墙超压分布

1) 当宽度比 $\alpha=0.2,0.3,0.4,0.5$ 时, $P_{\text{峰max(左)}}=P_{\text{峰max(右)}}$,分别为 7140、4200、3240、1630 kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别降低了 13.77%、49.28%、60.87%、80.31%。随着宽度比 α 的增加,墙两端的 $P_{\text{峰max}}$ 明显降低,墙底超压峰值曲线由“两端大、中间小”的形状逐渐过渡到“两端小、中间大”。

2) 当宽度比 $\alpha=0.2,0.3,0.4,0.5$ 时, $P_{\text{峰max(中)}}$ = 3240、3560、3300、2600 kPa,较无防护时的 7460 kPa 分别降低了 56.57%、52.28%、55.76%、65.15%,随着宽度比 α 的增加 $P_{\text{峰max(中)}}$ 先升后降,且均较无防护时显著降低。

2.3.3 “等比例形”防爆墙

目标墙的宽高比 $B/H=2$,按照该比例设置防爆墙的宽高比 b/h 。当 $b \times h=2\text{ m} \times 1\text{ m},3\text{ m} \times 1.5\text{ m},4\text{ m} \times 2\text{ m},5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 时,对应的 $\alpha=\beta$,分别为 0.2、0.3、0.4、0.5,形成“等比例形”防爆墙。

设置“等比例形”防爆墙后,目标墙超压分布、墙底超压峰值曲线如图 11、图 12 所示。分析图 11、图 12 可知:

1) 当 $\alpha=\beta$,分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 时, $P_{\text{峰max(左)}}=P_{\text{峰max(右)}}$,分别为 7140、4240、3200、1540 kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别降低了 13.77%、48.79%、61.35%、81.40%。

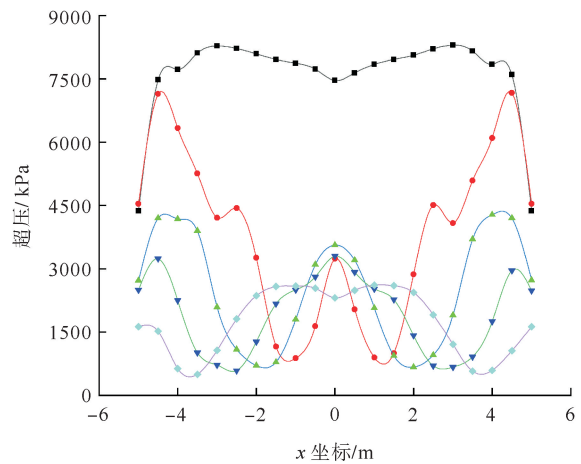


图 10 采用“宽矮形”防爆墙防护的超压峰值曲线

—■— 无防护; —●— $\alpha=0.2, \beta=0.2$; —▲— $\alpha=0.3, \beta=0.2$;
—▼— $\alpha=0.4, \beta=0.2$; —◆— $\alpha=0.5, \beta=0.2$

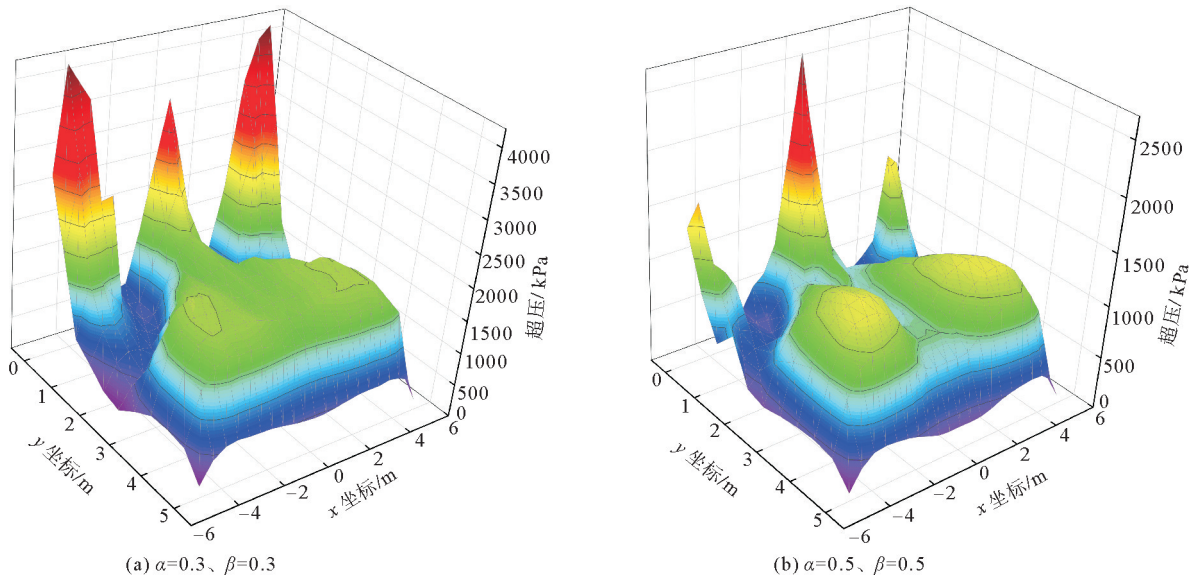


图11 采用“等比例形”防爆墙防护的目标墙超压分布

2) 当 $\alpha=\beta$,分别为0.2、0.3、0.4、0.5时, $P_{\text{峰max(中)}}$ = 3240、3460、3010、2630 kPa,较无防护时的7460 kPa分别降低了56.57%、53.62%、59.65%、64.75%,随着宽度比 α 、高度比 β 的“等比例”增加, $P_{\text{峰max(中)}}$ 显著降低。

3) 通过对比目标墙的超压分布与墙底超压峰值曲线可知,“宽矮形”与“等比例形”防爆墙的防护效果相似。

综上所述,“窄高形”防爆墙宽度较小,不能对目标墙底端部进行有效地防护,随着高度比 β 的增加,墙底端部的超压峰值并没有明显的降低。“窄高形”防爆墙可以有效地降低目标墙底的 $P_{\text{峰max(中)}}$,但是当 $\beta \geq 0.4$ 时继续增加墙高效果不明显。“宽矮形”与“等比例形”防爆墙的防护效果相似,随着宽度比 α 与高度比 β 的增加,经两种防爆墙防护后的整个目标墙底区域的超压峰值均明显降低。当宽度比 α 到达某一数值后继续增加防护效果将不明显,建议宽度比 α 取值0.4~0.5。

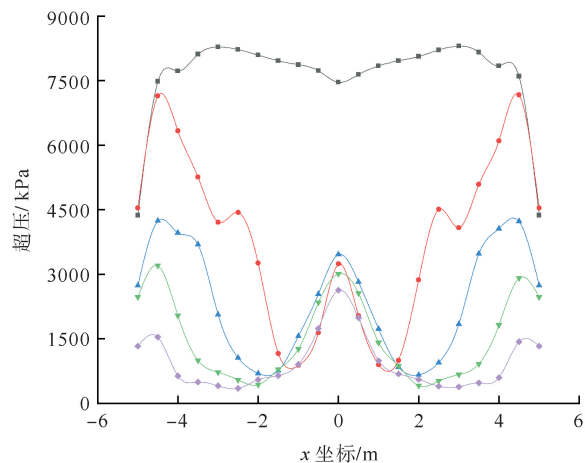


图12 采用“等比例形”防爆墙防护的超压峰值曲线

—■— 无防护; —●— $\alpha=0.2, \beta=0.2$; —▲— $\alpha=0.3, \beta=0.3$;
—▼— $\alpha=0.4, \beta=0.4$; —◆— $\alpha=0.5, \beta=0.5$

3 防爆墙位置变化对目标墙爆炸超压的影响

在研究防爆墙位置变化对目标墙爆炸超压的影响时,将防爆墙设置成尺寸为 $b \times h = 4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的“等比例形”,此时 $\alpha=\beta=0.4$ 。防爆墙的位置变化包括平动和转动,其中平动又分为纵向平动(前后平动)与横向平动(左右平动)两种情况。

3.1 防爆墙平动对目标墙爆炸超压的影响

3.1.1 防爆墙纵向平动对目标墙爆炸超压的影响

防爆墙纵向平动时,爆炸点至防爆墙的距离为 d_1 、防爆墙至目标墙的距离为 d_2 。定义防爆墙纵向平动距离比 $\eta = d_1/d_2$,借助距离比 η 反映防爆墙纵向平动对目标墙爆炸超压的影响。分别将防爆墙布置在如图13所示的3个不同的位置上:位置1的 $d_1=2.5 \text{ m}, d_2=7.5 \text{ m}$,距离比 $\eta=0.33$;位置2的 $d_1=5 \text{ m}, d_2=5 \text{ m}$,距离比 $\eta=1$;位置3的 $d_1=7.5 \text{ m}, d_2=2.5 \text{ m}$,距离比 $\eta=3$ 。防爆墙纵向平动后,墙底超压峰

值曲线如图 14 所示。分析图 14 可知:当距离比 $\eta=0.33$ 时,整条曲线只在中间出现 1 个波峰。此时的 $P_{\text{峰max(中)}}=1170 \text{ kPa}$,较无防护时的 7460 kPa 降低了 84.32% ,防护效果非常明显。当距离比 $\eta=1$ 时,曲线在两端与中间共出现 3 个波峰,此时 $P_{\text{峰max(左)}}=P_{\text{峰max(右)}}=3200 \text{ kPa}$ 、 $P_{\text{峰max(中)}}=3010 \text{ kPa}$,中间与两端的最大超压峰值接近。当距离比 $\eta=3$ 时,曲线在两端与中间共出现 3 个波峰,此时 $P_{\text{峰max(左)}}=P_{\text{峰max(右)}}=8590 \text{ kPa}$ 、 $P_{\text{峰max(中)}}=1050 \text{ kPa}$,两端的最大超压峰值远超中间,并且两端的超压峰值较无防护时甚至增加了 3.74% 。

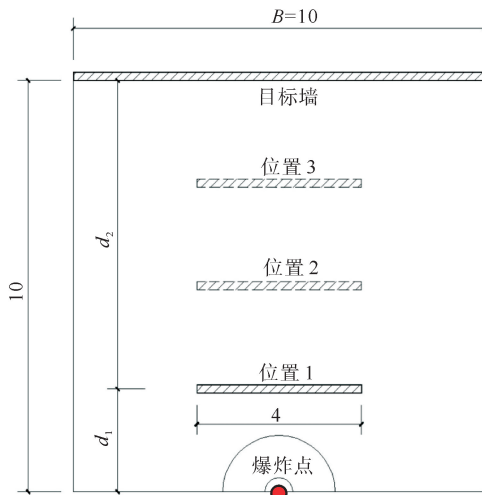


图 13 防爆墙纵向平动(单位: m)

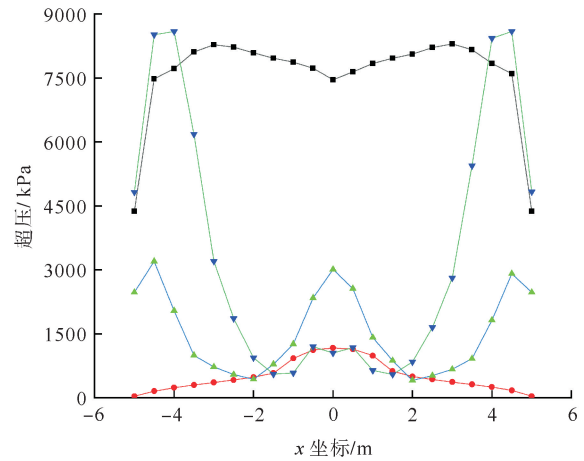


图 14 防爆墙纵向平动后的超压峰值曲线

—■— 无防护; —●— $\eta=0.33$; —▲— $\eta=1$; —▼— $\eta=3$

3.1.2 防爆墙横向平动对目标墙爆炸超压的影响

防爆墙横向平动时,定义爆炸点与防爆墙中点、爆炸点与目标墙中点连线的夹角 Φ 为防爆墙的横向平动偏移角,如图 15 所示。当防爆墙向左偏移时, Φ 分别取值 10° 、 20° 、 30° 共 3 种工况。防爆墙横平移后,墙底超压峰值曲线如图 16 所示。分析图 16 可知:

1) 当偏移角 $\Phi=0^\circ$ 时,墙底超压峰值曲线对称分布。超压峰值曲线在两端与中间共出现 3 个波峰,其中 $P_{\text{峰max(左)}}=P_{\text{峰max(右)}}=3200 \text{ kPa}$ 、 $P_{\text{峰max(中)}}=3010 \text{ kPa}$,两端的最大超压峰值与中间基本相等。

2) 当偏移角 $\Phi=10^\circ$ 时,峰值曲线仅在两端出现 2 个波峰,其中 $P_{\text{峰max(左)}}=2900 \text{ kPa}$ 、 $P_{\text{峰max(右)}}=5930 \text{ kPa}$,右侧最大超压峰值是左侧的 2.04 倍。

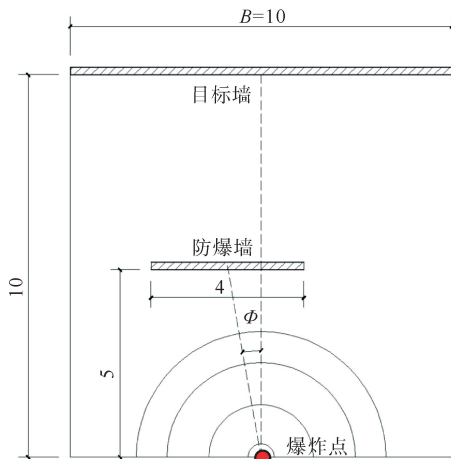


图 15 防爆墙横向平动(单位: m)

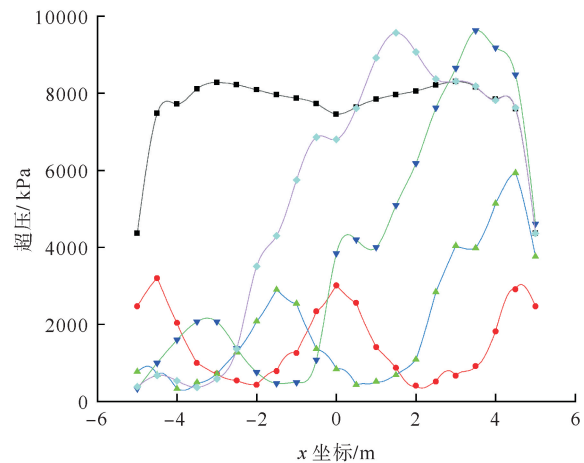


图 16 防爆墙横向平动后的超压峰值曲线

—■— 无防护; —●— $\Phi=0^\circ$; —▲— $\Phi=10^\circ$; —▼— $\Phi=20^\circ$; —◆— $\Phi=30^\circ$

3) 当偏移角 $\Phi=20、30^\circ$ 时,超压峰值曲线仅出现一个大的波峰,该波峰随着偏移角的增大向左偏移。当偏移角 $\Phi=20、30^\circ$ 时, $P_{\text{峰max}}=9180、9570$ kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别增加了 10.87%、15.58%。

以上说明,当防爆墙发生纵向平动时,防爆墙距离爆炸点越近防爆效果越好,距离目标墙越近防爆效果越差。当防爆墙横向平动时,与防爆墙偏移方向相同一侧的目标墙底超压峰值明显降低,而另一侧的超压峰值则明显增加。

3.2 防爆墙转动对目标墙爆炸超压的影响

将尺寸为 $b \times h=4 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的“等比例形”防爆墙布置在爆炸点与目标墙中间,取防爆墙与水平线的转角 θ 作为参数,从 0° 开始以 15° 为单位逆时针转动至 90° ,如图 17 所示。防爆墙逆时针转动后,墙底超压峰值曲线如图 18 所示。分析图 18 可知:

1) 当转角 $\theta=15、30、45、60、75^\circ$ 时,目标墙左侧的超压峰值 $P_{\text{峰max(左)}}=1490、1480、1470、2350、5330$ kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别降低了 82%、82.13%、82.25%、71.62%、35.63%。当转角 $\theta=90^\circ$ 时,防护后目标墙左侧的超压峰值 $P_{\text{峰max(左)}}=8550$ kPa,较无防护时反而增加了 3.26%。当转角 $\theta \leq 45^\circ$ 时,目标墙左侧的超压峰值 $P_{\text{峰max(左)}}$ 随着转角的增加变化很小。但是当 $\theta \geq 60^\circ$ 时,超压峰值 $P_{\text{峰max(左)}}$ 迅速增加。

2) 当转角 $\theta=15、30^\circ$ 时,目标墙右侧的超压峰值 $P_{\text{峰max(右)}}=3680、6260$ kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别降低了 55.56%、24.40%。当转角 $\theta=45、60、75、90^\circ$ 时,目标墙右侧的超压峰值 $P_{\text{峰max(右)}}=9890、11500、10900、8550$ kPa,较无防护时的 8280 kPa 分别增加了 19.44%、38.89%、31.64%、3.26%。当转角 $\theta \geq 45^\circ$ 时,防护后目标墙右侧的超压峰值比无防护时更大,在 $\theta=60^\circ$ 时到达顶峰后逐渐减小。当 $\theta=90^\circ$ 时,左右两侧的最大超压峰值相等。

3) 当转角 $\theta=15、30、45、60、75、90^\circ$ 时,目标墙中间的超压峰值 $P_{\text{峰max(中)}}=2950、2830、2200、1350、1370、2180$ kPa,较无防护时的 7460 kPa 分别降低了 60.46%、62.06%、70.51%、81.90%、81.64%、70.78%。

以上说明,当爆炸点偏离目标建筑物时,应将防爆墙布置在目标建筑物一侧并顺着目标建筑方向转动一定角度。其目的是将大部分爆炸波分散到其他区域,并进一步降低其对目标建筑的作用。通过分析可知,转角 θ 合理的范围为 $30 \sim 45^\circ$ 。

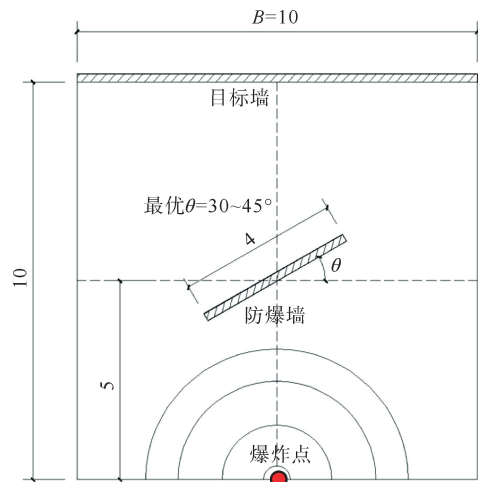


图 17 防爆墙转动(单位:m)

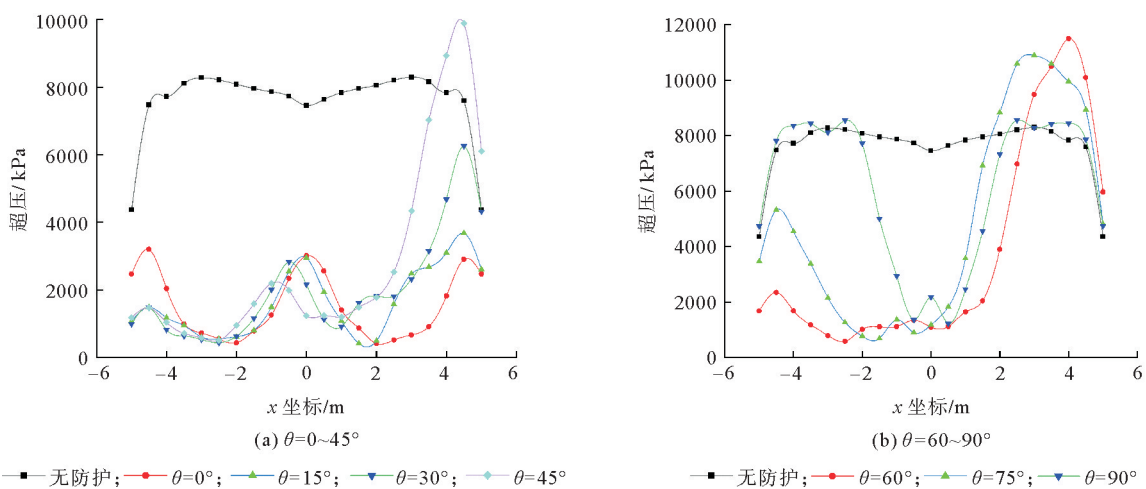


图 18 防爆墙转动后的超压峰值曲线

4 结论

借助 LS-DYNA 软件、采用数值分析方法研究了矩形防爆墙截面形状与位置变化对目标建筑物爆炸超压的影响,得到以下结论:

1) “窄高形”防爆墙不能对目标墙底部的整个范围进行防护,墙底两侧超压峰值没有明显降低。墙底中部的超压峰值随着防爆墙高度的增加首先迅速降低,然后到达某一高度后继续增加墙高的防护效果不明显。“宽矮形”与“等比例形”防爆墙的防护效果相似,随着宽度比 α 与高度比 β 的增加,目标墙底部的整个范围内的超压均明显降低。当宽度比 α 与高度比 β 到达某一数值后继续增加,防护效果不明显。综上所述,当防爆墙设置在目标墙与爆炸点中间时,应以控制防爆墙宽度为主,其与目标墙的宽度比 α 可取0.4~0.5。

2) 当防爆墙纵向平动时,防爆墙距离爆炸点越近防护效果越好。当防爆墙横向平移时,与防爆墙偏移方向相同一侧的目标墙底超压峰值明显降低,而另一侧的超压峰值则明显增加。当防爆墙转角 $30^\circ \leq \theta < 45^\circ$ 时,由于防爆墙的分流作用,与转动方向相同一侧的目标墙底超压峰值降为无防护时的80%以上,而另一侧的超压峰值则明显升高甚至超过无防护时的超压峰值。当防爆墙转角 $\theta \geq 60^\circ$ 时,目标墙底两侧的超压分布趋于相近,当 $\theta = 90^\circ$ 时两侧超压分布完全对称。综上所述,当爆炸点偏离目标建筑物时,应将防爆墙设置在目标建筑物一侧,同时将防爆墙顺着目标建筑物方向转动 $30 \sim 45^\circ$ 以便将爆炸波分流到其他方向,从而进一步降低爆炸波对目标建筑物的破坏作用。

参考文献(References):

- [1] 赵春风,卢欣,何凯城,等. 单钢板混凝土剪力墙抗爆性能研究[J]. 爆炸与冲击,2020,40(12):24-36.
ZHAO Chunfeng, LU Xin, HE Kaicheng, et al. Blast resistance property of concrete shear wall with single-side steel plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12): 24-36.
- [2] CAO K L, FU Q F, ZHANG J W, et al. Study on the protection mechanism and damage grade prediction of different corrugated steel-concrete composite structures under underwater contact explosion[J]. Ocean Engineering, 2023, 292(4): 116520.
- [3] NIAN X Z, XIE Q M, KONG X L, et al. Experimental and numerical study on protective effect of RC blast wall against air shock wave[J]. Defence Technology, 2024, 31: 567-579.
- [4] 李忠献,师燕超,周浩璋,等. 城市复杂环境中爆炸波的传播规律与超压荷载[J]. 工程力学,2009,26(6):178-183.
LI Zhongxian, SHI Yanchao, ZHOU Haozhang, et al. Propagation law and overpressure load of blast wave in urban complex environment[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 178-183.
- [5] 曲树盛,李忠献. 地铁车站内爆炸波的传播规律与超压荷载[J]. 工程力学,2010,27(9):240-247.
QU Shusheng, LI Zhongxian. Propagation law and overpressure load of blast wave inside subway station[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 240-247.
- [6] 吕晋贤,吴昊,方秦. 爆炸作用下高层框架结构倒塌分析与设计建议[J]. 建筑结构学报,2023,44(11):114-128.
LU Jinxian, WU Hao, FANG Qin. Collapse analysis and design recommendations of high-rise frame structures under blast loadings[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(11): 114-128.
- [7] 胡志乐,马亮亮,吴昊,等. 远距离近地面爆炸空气冲击波计算的网格尺寸优化与验证[J]. 爆炸与冲击,2022,42(11):118-132.
HU Zhile, MA Liangliang, WU Hao, et al. Optimization and verification of mesh size for air shock wave from large distance and near ground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 118-132.
- [8] 秦业志,王莹,王志凯,等. 小当量柱型装药水下近场爆炸固支单层方形钢板毁伤特性研究[J]. 振动与冲击,2021,40(7):29-36.
QIN Yezhi, WANG Ying, WANG Zhikai, et al. Damage characteristics of fixed single-layer square steel plate under near-field underwater explosion of small equivalent column charge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(7): 29-36.
- [9] 史明方,刘振宇,田志昌,等. 火灾下爆炸冲击波在钢结构中的传播规律及破坏机理[J]. 防灾减灾工程学报,2022,42(2):283-293.
SHI Mingfang, LIU Zhenyu, TIAN Zhichang, et al. Propagation law of explosion shock wave in steel structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 283-293.
- [10] 吴昊,林城. 两层单跨缩尺 RC 框架结构外爆炸试验数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(3):111-126.
WU Hao, LIN Cheng. Numerical simulation on external explosion experiments of two-story single-span scaled RC frame structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 111-126.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)