

文章编号: 1000-4750(2015)03-0241-08

空气冲击波作用于柔性防爆墙的透射和绕射效应分析

年鑫哲¹, 张 耀¹, 孙传怀², 王浩州¹, 严东晋¹

(1. 解放军理工大学国防工程学院, 南京 210007; 2. 96151 部队, 黄山 245400)

摘 要: 为研究爆炸空气冲击波作用于柔性防爆墙后发生的透射和绕射现象及规律, 采用数值模拟方法计算了防爆墙在 5、10、15 和 20kg 四种药量 TNT 炸药爆炸冲击波作用下墙后压力流场的变化, 分析了墙后发生的透射和绕射现象, 比较了压力波形的变化特点, 得到了墙后压力场变化分布规律。计算结果表明, 柔性墙背后的压力存在两个主要峰值, 分别为透射压力峰值和绕射压力峰值。透射压力峰值由柔性墙体变形运动引起, 并与墙体变形速率有关; 绕射压力峰值由冲击波在墙顶绕射传播引起。透射压力与绕射压力的分布与变化规律不同, 需区别对待分析。

关键词: 爆炸力学; 冲击波; 数值模拟; 透射压力; 绕射压力

中图分类号: O383⁺.1 文献标志码: A 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.09.0897

ANALYSIS OF TRANSMISSION AND DIFFRACTION EFFECTS OF AIR SHOCK WAVES UPON FLEXIBLE EXPLOSION-PROOF WALLS

NIAN Xin-zhe¹, ZHANG Yao¹, SUN Chuan-huai², WANG Hao-zhou¹, YAN Dong-jin¹

(1. College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. PLA 96151 Units, Huangshan 245400, China)

Abstract: To investigate the transmission and diffraction phenomena when air shock waves attack flexible explosion-proof walls, the air blast pressure flow field behind a flexible wall was studied via numerical simulation. The weight of TNT charge in the simulation is 5kg, 10kg, 15kg and 20kg, respectively. The transmission and diffraction phenomena of air shock waves behind the flexible wall are analyzed and the pressure time histories are compared. Finally, the air blast pressure distributions behind the wall are studied. The results show that there are mainly two peak pressures behind the flexible wall, one being the transmitted pressure and the other the diffracted pressure. Transmitted pressure is caused by the motion of the deformed wall and is dependent on the wall's deformation rate. Diffracted pressure is caused by the diffraction of air shock wave propagated over the wall. The distributions of the transmitted pressure and diffracted pressure are different, and hence the analysis of them should be treated differently.

Key words: explosion mechanics; air shock waves; numerical simulation; transmitted pressure; diffracted pressure

收稿日期: 2013-09-29; 修改日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021001)

通讯作者: 年鑫哲(1982-), 男, 甘肃白银人, 博士生, 从事武器毁伤效应研究(E-mail: 15996264008@163.com).

作者简介: 张 耀(1980-), 男, 江苏镇江人, 博士生, 从事武器毁伤效应研究(E-mail: z_yao@163.com);

孙传怀(1962-), 男, 安徽芜湖人, 高工, 硕士, 从事武器毁伤效应研究(E-mail: sun_ch@sohu.com);

王浩州(1986-), 男, 江苏淮安人, 硕士生, 从事武器毁伤效应研究(E-mail: wang_hz@sina.com);

严东晋(1960-), 男, 山西平遥人, 研究员, 博士, 从事爆炸震动及隔震研究(E-mail: yan_dj@sina.com).

防爆墙是防护爆炸空气冲击波的一种重要设施。钢筋混凝土防爆墙具有抗力高、防护效果好等优点，但此类墙体位置固定、建设周期较长。满足抗力要求的钢筋混凝土防爆墙受爆炸冲击波作用时墙体变形微小，对冲击波流场影响小，流场分析时可视为刚性墙。采用高强聚合物纤维织物制作的防爆墙，具有重量轻、柔韧性好、移动快速和部署灵活的优点，能够有效防护小当量爆炸物的冲击波破坏作用。该类柔性织物防爆墙可称为柔性防爆墙，简称为柔性墙。目前国内外对冲击波作用于刚性墙的反射和绕射规律的研究较多^[1-5]，而有关冲击波与柔性墙相互作用以及对墙后流场影响规律的研究未见公开报道。本文主要针对冲击波作用于柔性墙后发生透射和绕射的现象和变化规律进行数值模拟分析。

1 数值分析模型与验证

LS-DYNA 是著名的有限元动力分析程序，可以实现流体与固体耦合作用模拟，适用于冲击波与结构的相互作用分析^[6-7]。本文采用程序中高效的 ALE 技术，用流固耦合算法实现冲击波与防爆墙的相互作用分析^[8-9]。

1.1 有限元模型及参数

柔性防爆墙墙面采用高强聚乙烯纤维布材料，竖梁、水平系梁和斜撑等杆件采用型钢材料并组成多跨钢框架。每一跨宽度为 2m，高度为 2.5m。数值模拟中为减少计算量，有限元模型取 x, z 平面($y=0$)为对称平面，取两跨半($2m+2m+1m$)来进行数值模拟计算，如图 1 所示。杆件采用梁单元建立，纤维布采用壳单元建立^[10-11]。壳单元与梁单元间共节点。梁单元与地面接触节点施加约束。竖梁截面形状为工字型，斜撑截面形状为矩形，水平系梁截面为空心圆柱，梁截面的形状和具体尺寸在关键字中定义。

计算空气域同样取 x, z 平面($y=0$)为对称平面，空气域的尺寸在 $xyxz$ 方向上为 $3.5m \times 5.1m \times 7.0m$ 。空气域的外围采用透射边界，以模拟无限空气域。不同药量的 TNT 炸药均集中于对称面通过的地面上，距离墙体迎爆面 3m。炸药所在的地面设置为刚性，其余面采用对称边界。计算模型如图 2 所示。

为了对比柔性防爆墙刚度增大对流场的影响，本文同时对钢筋混凝土构筑的刚性防爆墙情况进行了数值模拟分析。刚性防爆墙长 5m、高 2.5m、

厚 0.4m，墙体及有限元分析模型如图 3 和图 4 所示。

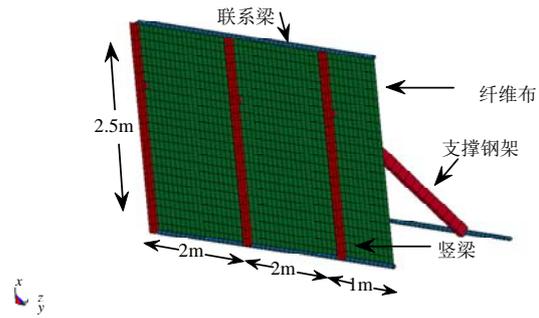


图 1 柔性墙有限元模型

Fig. 1 FE model of a flexible explosion-proof wall

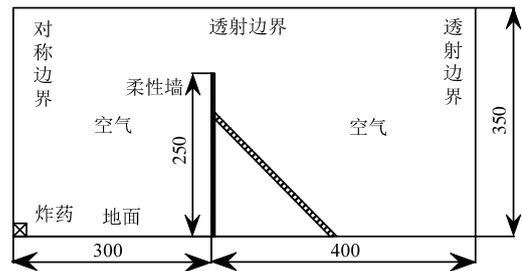


图 2 柔性墙模型侧视图 /cm

Fig. 2 Lateral view of a flexible explosion-proof wall

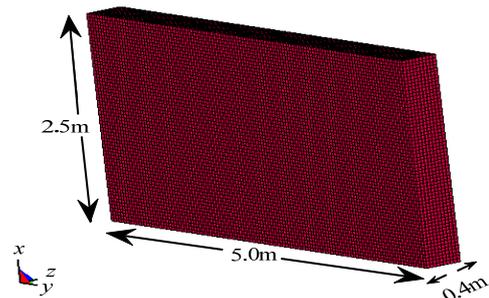


图 3 刚性墙有限元模型

Fig. 3 FE model of a rigid explosion-proof wall

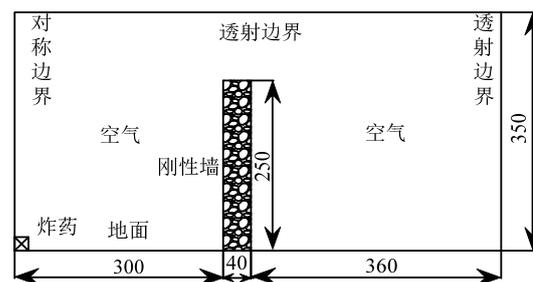


图 4 刚性墙模型侧视图 /cm

Fig. 4 Lateral view of a rigid explosion-proof wall

柔性墙支撑杆件和连接杆件采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型。纤维布采用 MAT_ELASTIC 材料模型。纤维布^[12]面密度为 $220g/m^2$ ，体密度为 $970kg/m^3$ ，12 层纤维布制成的柔性墙面厚 2.7mm。为简化分析，混凝土材料同样采用 MAT_ELASTIC 模型。材料主要参数见表 1。

表 1 材料参数
Table 1 Parameters of material

材料	参数				
钢	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/Pa	pr	δ_s/Pa	β
	7.8×10^3	2.0×10^{11}	0.25	4.68×10^8	0
纤维	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/Pa	pr		
	0.97×10^3	0.95×10^{11}	0.34		
混凝土	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/Pa	pr		
	2.50×10^3	4.0×10^{10}	0.18		

TNT 炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型, 需要定义炸药密度 ρ , CJ 面压力 P_{Cj} 及爆轰波速 D 等参数。采用 JWL 状态方程来描述爆炸产物压力、内能和相对体积的关系。JWL 状态方程形式为:

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

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为材料常数; V 为相对体积; E 为初始内能密度。炸药主要参数取值见表 2 所示。

表 2 炸药材料参数
Table 2 Parameters of TNT

$\rho/(\text{kg/m}^3)$	$E/(\text{J/m}^3)$	P_{Cj}/Pa	$D/(\text{m/s})$	A
1.640×10^3	6.0×10^9	2.10×10^{10}	6930	3.74×10^{11}
B	$R1$	$R2$	ω	
1.39×10^9	4.15	0.9	0.32	

空气采用 MAT_NULL 模型, 选用线性多项式状态方程描述, 压力按下式进行计算:

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

其中, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 、 ρ/ρ_0 是当前密度与初始密度的比值。当空气视为理想气体时, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 。 γ 是气体的比热容, 一般取

1.4。空气密度 $\rho = 1.292 \text{kg/m}^3$, 初始内能密度 $e_0 = 0.25 \text{MJ/m}^3$ 。

1.2 模型精度验证

为了验证数值模拟的有效性, 本文对 5kg、10kg、15kg 和 20kg 四种药量 TNT 炸药地面爆炸情况进行了数值计算分析。较大比例距离处自由场冲击波超压的计算结果如图 5 所示, 冲击波超压计算结果取值点(简称测点)距离地面 0.2m, 图中同时给出了美军 TM5-855-1^[13]的计算结果。从图 5 结果的比较可知, 本文采用的数值模拟方法和参数取值是合理的、有效的。

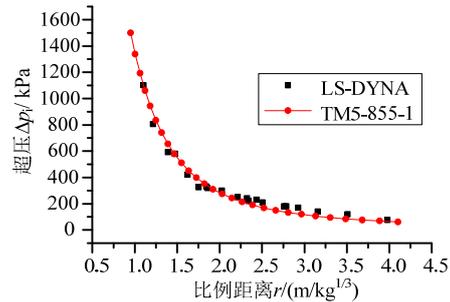


图 5 自由场模拟与理论计算结果对比
Fig.5 Comparison of overpressure in free air

2 冲击波绕射与透射现象

2.1 绕射与透射现象

为了分析柔性墙体厚度变化对墙体背后冲击波流场的影响, 计算了 7 种厚度柔性墙体受冲击波作用墙后流场的压力分布, 并与刚性墙后的进行了对比分析。

图 6 和图 7 分别为 20kg 炸药地面爆炸情况下冲击波遇刚性墙(厚度 40cm)和柔性墙(厚度 2.5cm)发生相互作用的压力云图。

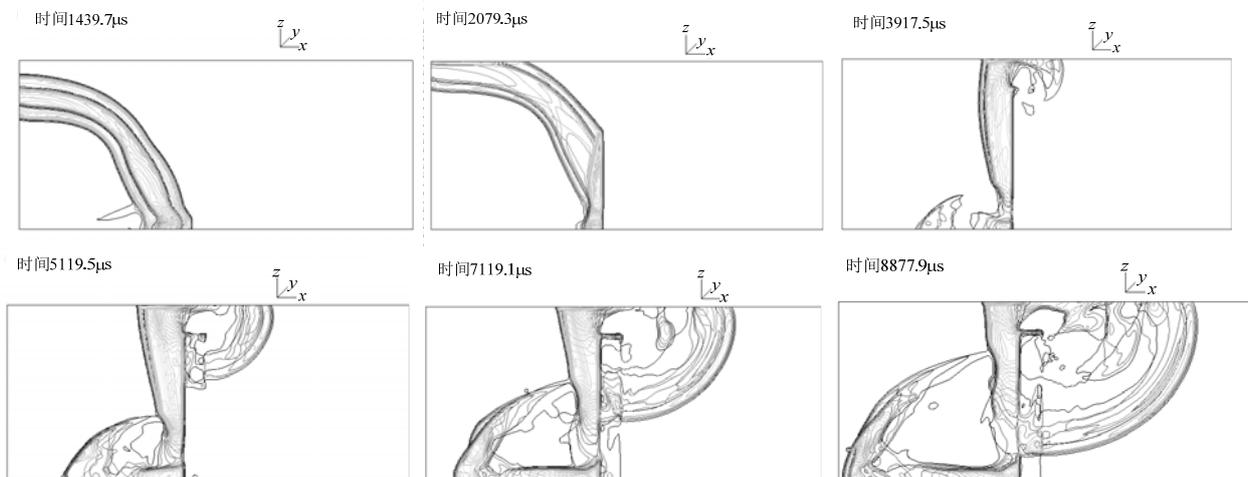


图 6 冲击波遇刚性墙发生绕射的压力云图
Fig.6 Air flow fields after the air shock wave impact on a rigid wall

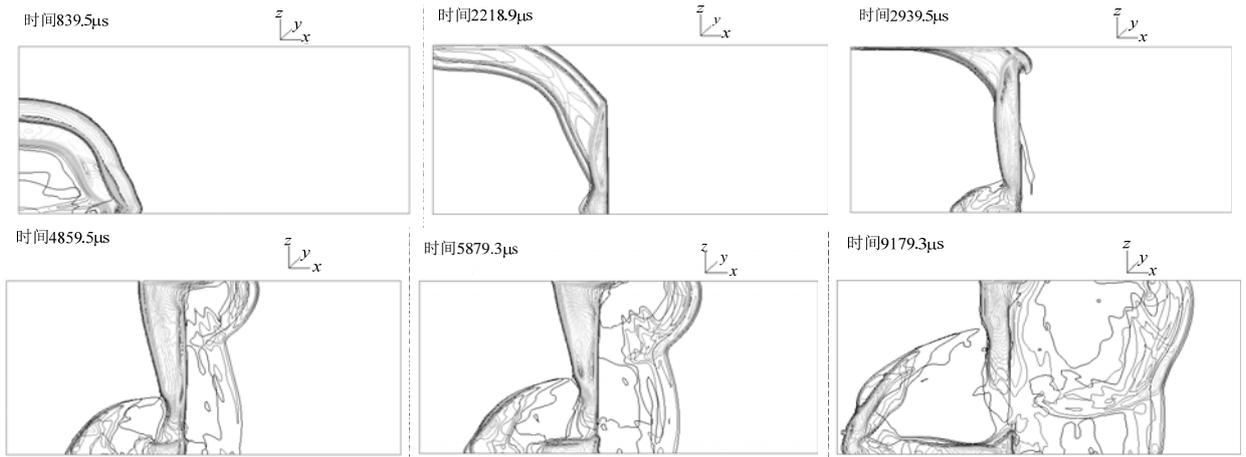


图7 冲击波遇柔性墙发生透射和绕射的压力云图

Fig. 7 Air flow fields after the air shock wave impact on a flexible wall

从图6可以看出,冲击波遇刚性墙后发生绕流,此时刚性墙基本不发生变形运动,邻近墙后的空气没有发生扰动,入射冲击波只通过墙顶绕射到达墙体背后,在墙体后的压力波形上只出现一个波次,所对应的压力称之为绕射压力。从图7可以发现,当冲击波拍击柔性墙时,将迫使墙体发生变形运动,墙体的快速变形运动将导致墙体后空气受到强烈扰动,继而形成一道新的波系,可称为感生冲击波。

这种感生冲击波就像入射冲击波部分穿透柔性墙而继续传播一样,因此本文也将其称为透射冲击波,或简称透射波。入射冲击波拍击柔性墙时除发生透射现象外,沿墙顶仍然发生绕射现象。透射波先于绕射波到达墙体后部,继续向后传播时与绕射波发生相互作用,柔性墙后的压力波形上将出现2个波次的压力峰值,如图8和图9所示。图8和图9分别为不同厚度墙体在20kg炸药地面爆炸情况下墙后距离墙迎爆面1.5m和2m处同一空气单元的压力变化,测点高度离地20cm。

从图8和图9看出,柔性墙后空气单元压力时程上出现2道压力峰值:第1道压力峰值由透射波产生,出现时间较早,压力峰值随着墙体厚度增大而减小;第2波压力峰值由绕射波引起,出现时间较晚,并与刚性墙后绕射压力峰值出现时间基本一致,压力峰值随着墙体厚度增加而增大。随着冲击波向后传播距离的增大,透射波和绕射波的波阵面将逐渐融合。当柔性墙体厚度超过10cm时,墙后的透射压力已很小,而绕射压力已接近刚性墙。

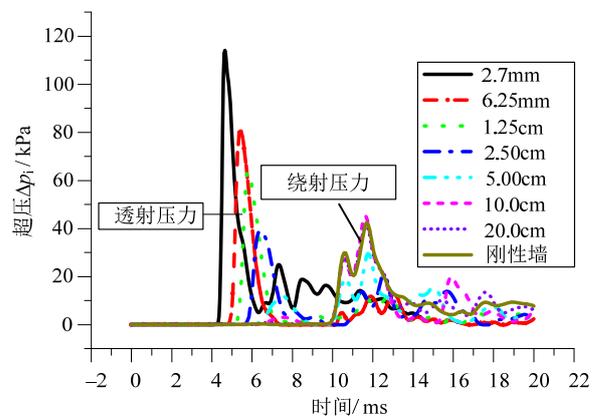


图8 墙后 1.5m 测点处压力

Fig. 8 pressures of the gauge 1.5m behind wall

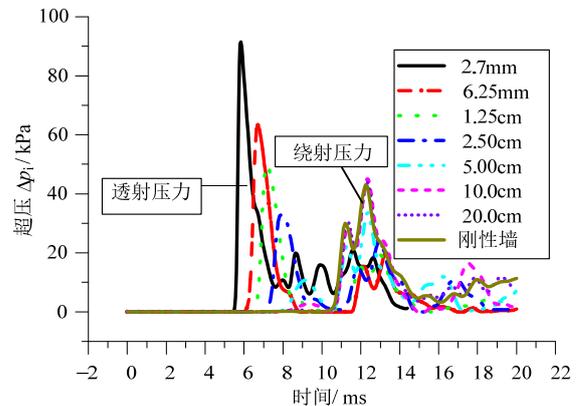


图9 墙后 2.0m 测点处压力

Fig. 9 Pressures of the gauge 2.0m behind the wall

图10为20kgTNT炸药地面爆炸条件下2.7mm厚度柔性墙后2.0m处试验测得地面压力波形(经过低通滤波)与数值模拟计算得到压力波形的对比,可以看出,数值模拟计算结果与测试结果有较好的一致性。

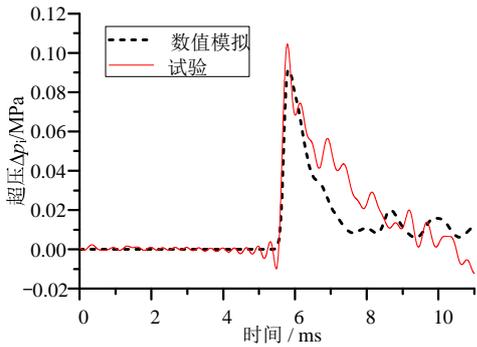


图 10 柔性墙后部 2.0m 处地面压力波形对比

Fig. 10 Comparison of pressures 2.0m behind the wall

2.2 墙体变形速率的影响

从图 8 和图 9 可以看出, 柔性墙后一定距离上透射压力出现的时间随墙体厚度增大而延迟, 透射压力随墙体厚度增大而减小, 而绕射压力随墙体厚度增大而增大, 所以柔性墙体厚度变化对墙后冲击波流场有重要影响。

图 12 是 20kg 炸药地面爆炸情况下 6 种厚度柔性墙体中部的侧向速度, 测点取在墙体对称面中部, 离地高度为 1.25m, 如图 11 所示。从图 12 可以看出, 墙面测点处速度随墙体厚度增加而逐渐减小。墙面较薄时, 墙体变形速度幅值大且变化较剧烈; 墙体变厚, 则墙体测点处速度幅值变小且变化变缓。从上述结果结合图 8 和图 9 的结果来看, 受到爆炸荷载时, 墙体发生绕曲变形的速率对墙后透射压力及绕射压力具有直接影响。

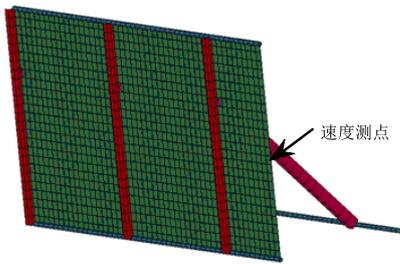


图 11 速度测点位置

Fig. 11 Position of velocity gauge on a flexible wall

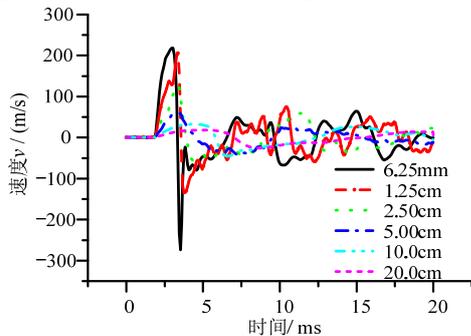


图 12 柔性墙体上测点的侧向速度

Fig. 12 Lateral velocity of a flexible wall

表 3 列出了 20kg 炸药爆炸情况下不同厚度柔性墙体对应的墙体最大变形速率、透射压力峰值和绕射压力峰值。从表 3 的结果结合图 8 和图 9 分析, 不同厚度柔性墙体后部的压力场分布变化有一定规律。墙体厚度越小, 则墙体变形速率越大, 墙体背后越容易出现透射波, 透射波峰值强度较大并与墙体后的绕射波存在相互作用, 此时透射波峰值比绕射波峰值大。随着墙体厚度的增加, 墙体变形速率变小, 墙后透射波的幅值减小, 绕射波幅值增大并逐渐成最大峰值。随着墙体厚度的继续增加, 墙体变形速率变得很小, 墙后透射波的幅值也变得非常小, 透射波基本消失, 墙后的绕射波不再受到透射波的影响, 柔性墙的绕射就基本变成了刚性墙的绕射。需注意的是, 当墙体厚度在一定范围内变化时(2.5cm~5.0cm 厚度), 柔性墙体后同时存在峰值较大的透射波和绕射波, 但 2 个波的峰值均可能低于刚性墙后的绕射波峰值。

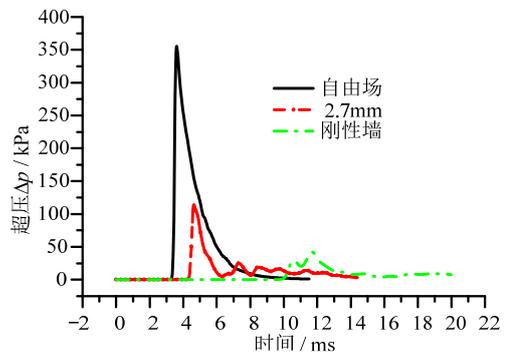
表 3 20kgTNT 炸药地面爆炸情况下柔性墙后 2.0m 处流场压力峰值

Table 3 Peak pressures at 2.0 meters behind a flexible wall under 20kg TNT surface burst

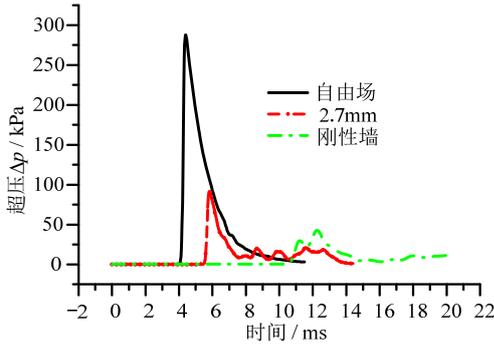
墙体厚度/cm	墙体最大变形速率/(m/s)	透射压力达到时间/ms	透射压力峰值/kPa	绕射压力峰值/kPa
0.625	223.5	6.72	63.40	19.87
1.250	210.1	7.25	50.14	19.25
2.500	129.9	8.00	32.94	23.81
5.000	58.7	9.19	10.69	33.43
10.00	31.9	9.39	2.64	45.21
20.00	18.6	9.42	0.66	43.02
刚性墙	—	—	—	43.03

2.3 压力波形的差异

对 20kgTNT 炸药地面爆炸情况, 提取自由场、刚性墙和柔性墙(厚度为 2.7mm)三种工况下墙后距墙迎爆面 1.5m 和 2.0m(离地面 0.2m 高)位置空气单元的压力波形, 如图 13 所示。



(a) 墙后 1.5m 处压力波形



(b) 墙后 2.0m 处压力波形

图 13 刚性墙和柔性墙后部压力波形对比

Fig. 13 Pressure time histories behind rigid and flexible walls

从图中可见，在相同测点上，柔性墙背后的压力到达时间早于刚性墙背后的压力。柔性墙和刚性墙背后压力的到达时间均晚于自由场冲击波的到达时间，二者的峰值也都低于相同距离上的自由场冲击波峰值。

3 透射与绕射的压力分布规律

图 14 和图 15 为 20kgTNT 炸药距墙 3m 地面爆炸情况下不同厚度柔性墙后的压力变化计算结果。图 14 中 Δp_t 表示透射压力，图 15 中 Δp_r 表示绕射压力， r 为墙后测点距墙迎爆面的水平距离。

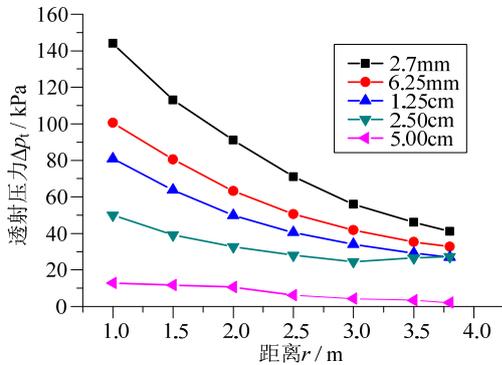


图 14 墙后透射压力变化

Fig. 14 Transmitted pressure behind flexible walls

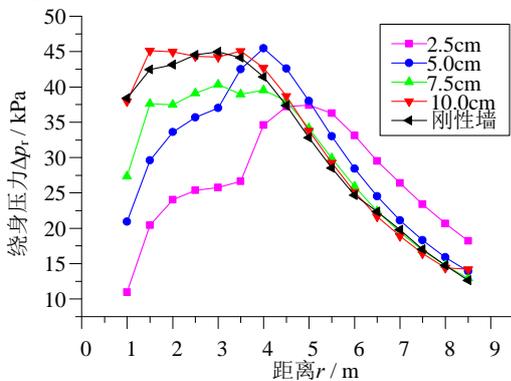


图 15 墙后绕射压力变化

Fig. 15 Diffracted pressure behind flexible walls

对比图 14 和图 15 可知，透射压力与绕射压力随爆距变化的规律不同。透射压力随距离增大而减小，在同样的距离上随墙体厚度增加而减小。绕射压力在墙后一定范围内随距离增大而缓慢增大，在距墙面后约 4m 位置(约 1.6 倍墙高距离)以外开始减小。在距离墙面大致 4m 范围内，绕射压力随墙体厚度增加而增加，在距离墙面约 4m~8m 范围内，绕射压力随墙体厚度增加而减小。当墙体厚度为 10cm 时，绕射压力已接近刚性墙后的绕射压力。

下面从流场的角度分析图 15 的结果。从图 7 看出，冲击波到达墙顶部开始发生扰流，绕射波一部分会继续向墙后的空中传播，一部分则会向墙后地面传播并最终到达地面，地面即受到绕射波作用。墙后不同位置处绕射波强度是不一样的，靠近墙体的位置其绕射波强度相对较小，而远离墙体的位置其绕射波强度相对大一些，绕射压力从墙后约 4m 处位置开始又逐渐减小。墙后不同距离上绕射波峰值压力的大小和绕射波传播有关系，同时与墙体高度及厚度也有关系。在墙后大致 4m 范围内，绕射压力随墙体厚度增加而增加，这种情况主要是由于透射压力和绕射压力在传播过程中相互作用而引起的。在距离墙面后大致 4m 范围内，绕射压力受透射波影响较大，较薄的墙体变形速率较大，导致其后部的透射波强度更大一些，从而使得绕射波强度相比较厚墙体后绕射波强度更小一些。

由于透射压力和绕射压力二者产生的机制不同，分析柔性墙后压力衰减变化的规律宜分别按照透射压力和绕射压力进行。根据数值模拟结果，墙后最大压力为透射压力时墙体厚度大致为 2.5cm 以下，墙后最大压力为绕射压力时墙体厚度大致为 5cm 以上，可根据上述区间进行柔性墙后压力分布规律分析。

图 16 为 4 种药量下柔性墙后透射压力的变化规律，其中 Δp_t 和 Δp 分别为墙后透射超压峰值和自由场入射超压峰值， \bar{r} 为墙后测点距墙迎爆面的水平比例距离。从图 16 看出，柔性墙后部透射压力与入射压力比值是随着墙体厚度变化的，墙体厚度越厚， $\Delta p_t / \Delta p$ 值越小，同一厚度墙体后部 $\Delta p_t / \Delta p$ 值随比例距离变化幅度不大。

图 17 为 4 种药量下柔性墙后绕射压力的变化规律，其中 Δp_r 和 Δp 分别为墙后绕射超压峰值和自由场入射超压峰值。从图 17 看出，柔性墙后绕射压力与入射压力比值同样随墙体厚度变化，当在一

定比例距离内, 墙后 $\Delta p_r / \Delta p$ 值随墙体厚度增加而增加, 超过一定比例距离, 则墙后 $\Delta p_r / \Delta p$ 值随墙体厚度增加而递减, 最后与刚性墙后部 $\Delta p_r / \Delta p$ 值趋于一致。

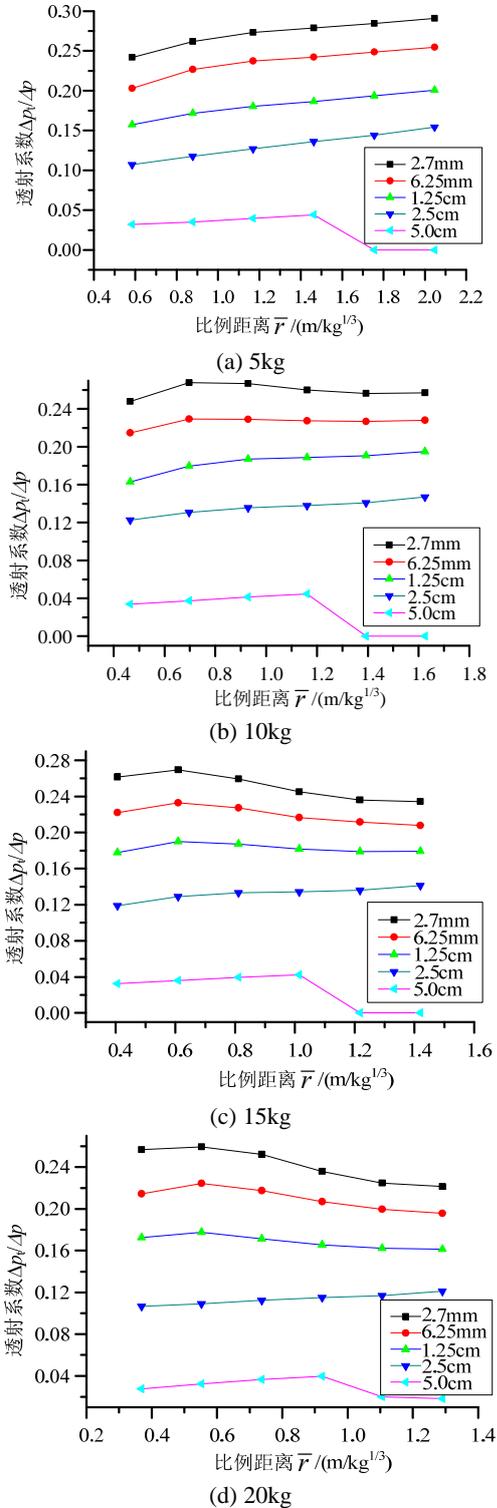


图 16 $\Delta p_r / \Delta p$ 值随墙体厚度和比例距离变化
Fig. 16 Variations of $\Delta p_r / \Delta p$ with wall thicknesses and scaled distances

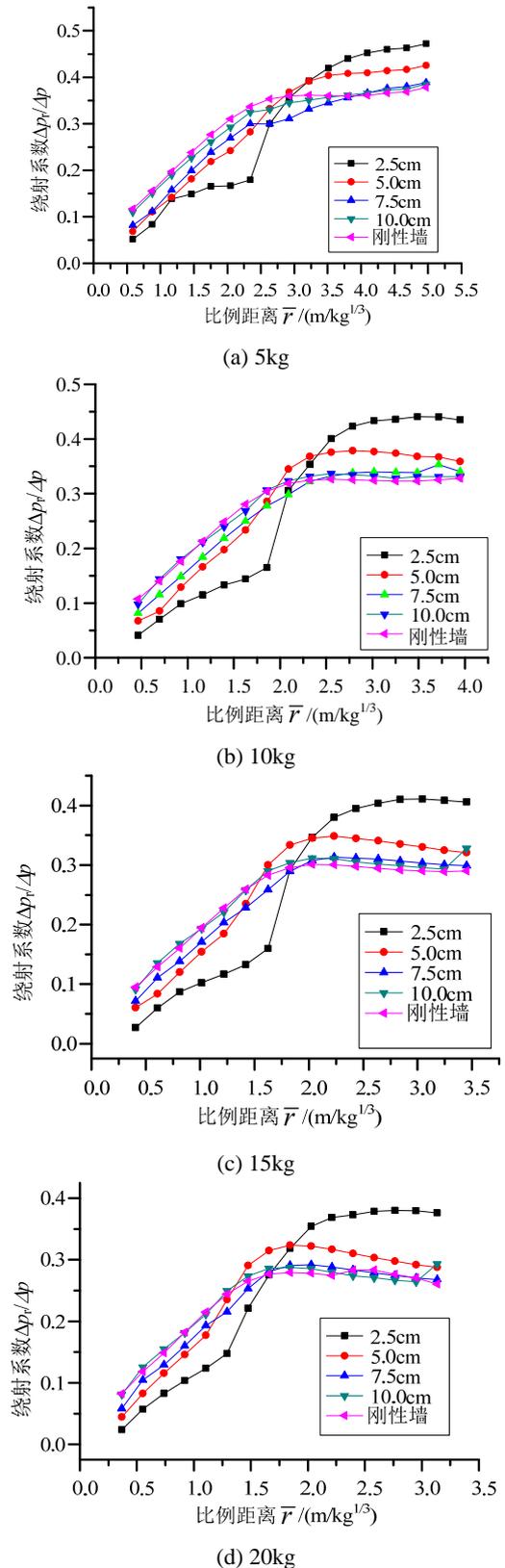


图 17 $\Delta p_r / \Delta p$ 值随墙体厚度和比例距离变化
Fig. 17 Variations of $\Delta p_r / \Delta p$ with wall thicknesses and scaled distances

图 17 有 2 个含义。第一, $\Delta p_r / \Delta p$ 值表示防爆墙体对绕射波压力峰值的削减程度。定义墙体对绕

射波的削减率为 η ($\eta = (\Delta p - \Delta p_r) / \Delta p$, Δp 为自由场入射超压峰值, Δp_r 为墙后绕射压力峰值), $\Delta p_r / \Delta p$ 值越小, 则 η 值越大, 表示冲击波被削减程度越高。第二, 不同厚度墙体后 $\Delta p_r / \Delta p$ 值不同, 体现出不同厚度墙体对冲击波绕射压力的削减作用不同。由第 2 节的论述, 柔性墙后一定范围内绕射压力随墙体厚度递增是由于透射波和绕射波在传播过程中相互影响作用所导致。而墙体越厚、墙体抗弯刚度越大, 对冲击波的削减作用应该越强, 刚性墙对绕射冲击波的削减作用应优于柔性防爆墙, 体现在图 17 中就是在一定水平距离之外, $\Delta p_r / \Delta p$ 值随墙体厚度递减。此外, 这种现象应与冲击波绕过柔性墙上部时柔性壁面顶部的变形有关系, 柔性壁面顶部的变形一定程度上会降低柔性墙体对冲击波的阻碍削减作用。

药量对柔性墙后透射波和绕射波是有影响的。防爆墙体对绕射波的削减作用与炸药与墙体间的比例距离及相对位置有关系。炸药与墙面之间水平比例距离越小, 墙后 $\Delta p_r / \Delta p$ 值会变小, 削波率提高, 图 17 体现出了这种规律。但图 16 中 $\Delta p_r / \Delta p$ 值随药量的变化不是很大, 说明透射波与绕射波的传播及分布是不一样的。

4 结论

通过对爆炸空气冲击波作用下柔性墙体透射和绕射效应的数值模拟分析, 可以得到以下结论:

(1) 柔性墙受爆炸冲击波作用后在墙后将出现透射和绕射两类波形, 其产生机制不同。柔性墙小于一定厚度时, 墙后一定范围内透射压力将大于绕射压力; 当柔性墙超过一定厚度后, 绕射压力将大于透射压力。

(2) 柔性墙后的透射压力与绕射压力的变化规律不同。柔性墙后的透射压力是随着墙体厚度增大而减小, 而柔性墙后的绕射压力是随着墙体厚度增大而增大, 最后与刚性墙后绕射压力趋于一致。

(3) 在同样比例距离上, 柔性墙和刚性墙背后的压力峰值均低于自由场入射压力峰值, 柔性墙后压力峰值可能高于或低于刚性墙后的压力峰值(取决于柔性墙的厚度), 其压力到达时间早于刚性墙后压力到达时间, 迟于自由场压力到达时间。

(4) 冲击波迫使其阻挡物运动时, 只要阻挡物的变形速率或运动速度到达一定数值时就可以感生透射波, 即出现所谓“透射”现象。

(5) 柔性墙后不同垂直高度上绕射和透射的变化规律存在差异。此外, 冲击波的绕射应与墙高与炸药到墙体的距离之比这一无量纲量有关。对这些问题的研究将会在下一阶段进行。

(6) 虽然“绕射压力”峰值是由绕射波引起的, 但其中还包含绕射波与透射波的相互作用, 与后者的强度及其与前者的相位关系有关。

参考文献:

- [1] 王仲琦, 宁建国, 赵衡阳, 恽寿榕. 挡墙对远场爆炸效应影响的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 88—91.
Wang Zhongqi, Ning Jianguo, Zhao Hengyang, Yun Shourong. Numerical simulation on 2D explosion field with the protective wall [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(1): 88—91. (in Chinese)
- [2] 徐曼妮. 汽车炸弹爆炸冲击波超压预测及其应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 10—15.
Xu Manni. Prediction of shock wave overpressure under the explosion of vehicle bomb and its application [D]. Changsha: Hunan University, 2010: 10—15. (in Chinese)
- [3] 洪武, 范华林, 徐迎, 金丰年, 夏志成. 防爆墙迎爆面反射压力系数计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 109—117.
Hong Wu, Fan Hualin, Xu Ying, Jin Fengnian, Xia Zhicheng. Calculation method for reflected pressure coefficient of a blast wall [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(19): 109—117. (in Chinese)
- [4] Luccioni B, Ambrodi D, Danesi R. Blast load assessment using hydrocodes [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1736—1744.
- [5] 洪武, 范华林, 金丰年, 徐迎. 刚性防爆墙迎爆面荷载计算方法研究[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 109—117.
Hong Wu, Fan Hualin, Jin Fengnian, Xu Ying. Blast response of inclined rigid walls [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 109—117. (in Chinese)
- [6] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 102—103.
Bai Jinze. Theoretical foundation and and example analysis of LS-DYNA3D [M]. Beijing: Science Press, 2005: 102—103.
- [7] 朱正洋. 近地空中爆炸冲击波与柱形拱壳结构相互作用研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊 1): 1486—1489.
Zhu Zhengyang. Research in the interaction of blast wave with semicircular arched structure near the ground explosion [J]. Building Structure, 2011, 41(Suppl. 1): 1486—1489. (in Chinese)
- [8] Shi Yanchao, Hao Hong, Li ZhongXian. Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns [J]. Shock Waves, 2007, 7: 113—133.

(参考文献[9]—[13]转第 256 页)

- Zhao Yunpeng, Li Yucheng, Dong Guohai. Tension distribution of gravity cage net in steady current [J]. *Fishery Modernization*, 2008, 35(6): 5—8. (in Chinese)
- [6] DeCew J, Tsukrov I, Risso A, et al. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents [J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(2): 38—45.
- [7] Lee C W, Kim Y B, Lee G H, et al. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and wave [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(14/15): 1521—1532.
- [8] 黄小华, 郭根喜, 胡昱. 波流作用下深水网箱受力及运动变形的数值模拟[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(2): 443—450.
- Huang Xiaohua, Guo Genxi, Hu Yu. Numerical simulation of forces and motion deformation of deep-water net cage in waves and currents [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(2): 443—450. (in Chinese)
- [9] 黄小华, 郭根喜, 胡昱. 圆形网衣在水流作用下的运动变形特性[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(2): 312—319.
- Huang Xiaohua, Guo Genxi, Hu Yu. Movement and deformation characteristics of cylinder nets in current [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(2): 312—319. (in Chinese)
- [10] 崔勇, 关长涛, 万荣. 基于有限元方法对波流场中养殖网箱的系统动力分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 250—256.
- Cui Yong, Guan Changtao, Wan Rong. Dynamic analysis for fish cage in current and wave based on finite element methods [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 250—256. (in Chinese)
- [11] ANSYS Incorporated. ANSYS User's Manual [M]. Canonsburg, USA: ANSYS, Incorporated, 2009: 45—46.
- [12] 桂福坤, 李玉成, 张怀慧. 深水养殖网箱试验中的网衣相似准则的应用[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(2): 179—187.
- Gui Fukun, Li Yucheng, Zhang Huaihui. Simulation criteria of fishing nets in aquaculture sea cage experiments [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(2): 179—187. (in Chinese)
- [13] Gui F K, Li Y C, Dong G H, et al. Application of CCD image scanning to sea-cage motion response analysis [J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 35(2): 179—190.

(上接第 248 页)

- [9] Wu Chengqing, Hao Hong. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31: 699—717.
- [10] 高轩能, 刘颖, 王书鹏. 基于 LS-DYNA 的大空间柱壳结构爆炸波压力场分析[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(9): 70—75.
- Gao Xuanneng, Liu Ying, Wang Shupeng. Analysis of explosive shock wave pressure distribution on large-space cylindrical reticulated shell based on LS-DYNA [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(9): 70—75. (in Chinese)
- [11] 高轩能, 王书鹏. 大空间柱面网壳结构在爆炸荷载下的动力响应[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 68—73.
- Gao Xuanneng, Wang Shupeng. Dynamic response of a large-space cylindrical reticulated shell under blast loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10): 68—73. (in Chinese)
- [12] 李月平. 强力纤维-高强高模聚乙烯纤维[J]. *山东纺织经济*, 2007, 3: 72—73.
- Li Yueping. High strength and high modulus polyethylene fiber [J]. *Shandong Textile Economy*, 2007, 3: 72—73. (in Chinese)
- [13] TM 5-855-1, Fundamentals of protective design for conventional weapons [S]. Washington, DC, USA: Department of the Army, 1986: 15—16.