

内爆炸作用下抗爆单元防护隔墙厚度计算*

夏志成, 王 静, 施翠英, 徐 甜

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

摘 要: 封闭空间发生内爆炸时, 由于受到周围墙体的限制, 作用荷载得以加强。文中分析了结构内爆炸荷载的组成, 提出了内爆炸荷载作用下抗爆墙设计的解析计算方法。通过分析表明: 准静态气体荷载与冲击波荷载相比较小, 但两者之比及在墙体上产生的弯矩之比随加载密度的增加呈上升趋势; 爆炸当量相同的条件下, 室内地面长宽比对墙体上弯矩影响较大, 长宽比越小, 墙体上弯矩越小, 长宽比为 1 时, 墙体上弯矩达到最小。

关键词: 内爆炸; 抗爆单元; 防护隔墙; 准静态气体

中图分类号: O383 **文献标志码:** A

Calculation of Thickness of Blast Wall of Antiknock Cell Under Internal Explosion

XIA Zhicheng, WANG Jing, SHI Cuiying, XU Tian

(Engineering College of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Because of the restriction of the wall, the shock wave is reinforced when bombs explode in enclosed space. This paper analyzed the component of blast wave, posed the approximate analytical calculation method of blast-wall inside structures. It is indicated that, the quasi-static gas load is rather low compared with the shock wave pressure, but the ratios between the two and the bending moment inflict on the wall are upward along with the increase of loading density. The same explosion equivalents explode in enclosed space, the length-width ratio affect the load inflict on the wall a lot. The ratio smaller, the load smaller, and when the ratio reaches 1, the load is the least.

Keywords: internal explosion; antiknock cell; blast wall; quasi-static load

0 引言

工程通过合理的单元划分和防护隔墙设计, 将爆炸限制在局部区域, 使相邻的防护单元得以生存, 能大大提高整个工程的生存能力^[1]。抗爆单元防护隔墙研究中需要研究和解决的问题是: 1) 作用在防护隔墙上爆炸荷载的确定; 2) 内爆炸作用下防护隔墙的结构动力响应和变形破坏状态的预测, 包括隔墙在给定爆炸荷载下的应力状态、变形状态、破坏模式、破坏准则、破坏等级以及给定防护单元的安全控制爆炸当量; 3) 为抵抗给定爆炸荷载设计出安全、实用、经济的防护单元所需遵循的合理的设计原理、方法和程序。

文中主要介绍抗爆单元内爆炸荷载的解析

计算公式以及内爆炸荷载作用下防护隔墙厚度计算方法。

1 防护隔墙上的内爆炸荷载

1.1 冲击波荷载

发生结构内爆炸时, 从不同方向、不同角度和不同距离处反射的冲击波加上入射波会在结构内形成复杂的运动规律, 包括汇聚、发射和多次反射, 在此过程中波的能量发生耗散, 压力不断衰减, 这是室内爆炸效应不同于自由大气中爆炸的显著特点。由于室内爆炸发展过程的复杂性, 要建立比较准确的理论模型描述爆炸发展过程非常困难, 可采用 ConWep 模型进行地面爆炸冲击波参量的计算:

* 收稿日期: 2007-12-22

作者简介: 夏志成(1961-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 研究方向: 结构抗爆与隔震。

$$\Delta P_r = \begin{cases} \frac{1.8629}{\bar{R}} + \frac{11.19933}{\bar{R}^2} - \frac{0.9315}{\bar{R}^3} + \frac{0.02665}{\bar{R}^4} & 0.066 \leq \bar{R} \leq 0.3967 \\ -\frac{1.24033}{\bar{R}} + \frac{3.92737}{\bar{R}^2} + \frac{7.29823}{\bar{R}^3} - \frac{1.94425}{\bar{R}^4} & 0.3967 \leq \bar{R} \leq 3.967 \\ \frac{0.15797}{\bar{R}} + \frac{1.96958}{\bar{R}^2} - \frac{6.27228}{\bar{R}^3} + \frac{24.89097}{\bar{R}^4} & 3.967 \leq \bar{R} \leq 39.67 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{i_r}{\sqrt[3]{W}} = \begin{cases} -249.71385 + \frac{785.28548}{\bar{R}} + \frac{240.284}{\bar{R}^2} + \frac{6.89227}{\bar{R}^3} & 0.066 \leq \bar{R} \leq 0.3967 \\ -5.78656 + \frac{590.05849}{\bar{R}} + \frac{301.96046}{\bar{R}^2} - \frac{1.25455}{\bar{R}^3} & 0.3967 \leq \bar{R} \leq 3.967 \\ -0.56831 + \frac{570.75981}{\bar{R}} + \frac{271.88872}{\bar{R}^2} + \frac{134.33233}{\bar{R}^3} & 3.967 \leq \bar{R} \leq 39.67 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ΔP_r 为冲击波反射超压,MPa; W 为炸药 TNT 当量,kg; \bar{R} 为比例距离,即目标到爆心距离与 TNT 当量立方根之比,m/kg^{1/3}; i_r 为冲击波反射冲量,Pa·s。

1.2 准静态荷载

室内爆炸时,气体生成物聚集起来形成气体压力,其数量一般较空气冲击波小,但结构物会妨碍泄压,由于墙壁的响应时间远比泄压时间短,爆炸产生的高温、高压产物无法及时向外扩散,形成准静态气体压力。

对于准静态气体荷载的确定,文献[5-6]均以图表给出。查图表均存在主观误差,给计算带来不便。陈剑杰利用 Conwep 软件,通过数值计算并进行数学拟合,得到内爆炸准静态气体参数计算公式:

$$\begin{aligned} P_{qs} &= 0.9611(W/V)^{1.1052} \\ \lg \bar{I}_g &= -0.0559(\lg(P_{qs}/P_0))^2 + \\ &\quad 0.8596 \lg(P_{qs}/P_0) + 0.8449 \\ \bar{I}_g &= I_g/V^{1/3} \\ t_g &= 2I_g/P_{qs} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P_{qs} 为峰值准静态气体压力,MPa; V 为结构内空体积,m³; \bar{I}_g 为准静态气体压力的比例冲量,MPa·ms/m; I_g 为准静态气压冲量,MPa·ms; P_0 为结构初始大气压力,0.1MPa; t_g 为准静态气体压力有效作用时间,ms。

通过计算,给出结构内爆炸时,不同加载密度 W/V 下的冲击波反射超压及准静态气体压力数据,见表 1。

表 1 可以看出:发生内爆炸时,准静态气体压力和冲击波气体压力之比 P_{qs}/P_r 随加载密度 W/V 的增加呈不断增大的趋势,因而进行结构内爆炸荷载计算应考虑冲击波荷载和准静态荷载双重作用。

表 1 不同加载密度条件下冲击波反射压力与准静态气体压力对比

	W/V						
	0.125	0.25	0.5	1	2	3	4
P_{qs}/MPa	0.097	0.208	0.447	0.961	2.068	3.237	4.448
$\Delta P_r/\text{MPa}$	4.367	8.041	14.369	24.775	40.507	51.910	60.196
$\epsilon/\%$	2.210	2.583	3.109	3.879	5.104	6.235	7.389

2 内爆炸作用下防护隔墙厚度计算

计算假定^[2-3]:1)沿墙高方向,各点的荷载基本相同;2)防护隔墙按受均布荷载的单向板进行设计;3)荷载只考虑最大初始脉冲,不考虑后续波峰的影响。

2.1 由冲击波气体压力在隔墙引起的弯矩计算

冲击波的加载持续时间非常短,取文献[4]中无衰减单自由度弹-塑性体系对三角形荷载的最大响应图中 $T_L/T_N = 0.1$,选择:

$$\frac{R_m}{F} \leq 0.1 \quad (4)$$

式中: R_m 为均质梁或单向板的最大静抗力,N; F 为施加的外力,N; R_m/F 为抗力荷载之比; T_L/T_N 为荷载持续时间同该体系基本周期之比。

冲击波反射压力在隔墙上的冲击力 F 为:

$$F = P_r b H \quad (5)$$

式中: P_r 为冲击波反射压力,MPa; b 为墙体内纵向受力钢筋间距,m; H 为墙高,m。

则给出冲击波荷载在墙体上引起的弯矩 M_{pl} 计算公式:

$$M_{pl} = \frac{R_m H}{12} = \frac{0.1 F H}{12} = \frac{0.1 P_r b H^2}{12} \quad (6)$$

2.2 由准静态气体压力在隔墙引起的弯矩计算

由文献[4]中无衰减单自由度弹-塑性体系对具有上升时间的阶梯脉冲的最大响应图,取 $T_r/T_N = 0.1$,选择:

$$\frac{R_m}{F} = 1.05 \quad (7)$$

同样可以得到由准静态气体压力在隔墙上产生的弯矩计算公式:

$$M_{p2} = \frac{R_m H}{12} = \frac{1.05 FH}{12} = \frac{1.05 P_{qs} b H^2}{12} \quad (8)$$

2.3 防护隔墙厚度计算

墙体所应抵抗的弯矩 M 需满足:

$$[M_{p1}, M_{p2}]_{\max} \leq M \leq [M_{p1} + M_{p2}] \quad (9)$$

在上式给定范围中取定 M 值后,防护隔墙等效厚度 d_c 由下式给出:

$$A_s = M / \sigma_s d_c = \rho_v b (d_c + a) \quad (10)$$

式中: A_s 为防护隔墙横断面内所含钢筋面积, mm^2 ; σ_s 为钢筋动态强度, MPa ; ρ_v 为钢筋配筋率; a 为钢筋保护层厚度, mm ; $(d_c + a)$ 即为防护隔墙横断面有效高度。最后防护隔墙厚度即为 $(d_c + 2a)$ 。

3 讨论

3.1 装药量 W 对弯矩的影响

取室内体积 500m^3 , 尺寸: $10\text{m} \times 10\text{m} \times 5\text{m}$, 装药量 W 分别取 62.5kg 、 125kg 、 250kg 、 500kg 。爆心位于空间的中心处。对冲击波压力与准静态气体压力加载在防护隔墙上的弯矩进行计算, 分别记为 M_{p1} 、 M_{p2} , 并将 M_{p2}/M_{p1} 值记为 ϵ , 如表 2。

表 2 冲击波与准静态气体产生弯矩对比表

爆炸当量 / kg	$M_{p1} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_{p2} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$\epsilon / \%$
62.5 TNT	136.47	31.68	23.21
125 TNT	251.28	68.14	27.21
250 TNT	449.03	146.59	32.63
500 TNT	774.22	315.36	40.73

由表 1、表 2 可知, 在不同加载密度条件下, 虽然准静态气体压力与冲击波气体反射压力相比较小, 但前者在隔墙上加载的弯矩值与后者产生弯矩之比均超过 20%, 且两者之比随装药量的增加呈增大的趋势, 在加载密度 W/V 为 1 时, 准静态气体在墙体产生弯矩与冲击波气体压力产生弯矩之比达到 40%, 可见准静态气体压力对爆炸荷载作用在墙上的弯矩影响较大。

3.2 封闭空间尺寸对弯矩的影响

取装药量 $W = 250\text{kg}$, 室内地面面积 $S_1 = 600\text{m}^2$, $S_2 = 900\text{m}^2$, L 、 D 分别为地面长和宽, 且使 $D < L$, 改变长宽比 L/D 的值, 计算 $M = M_{p1} + M_{p2}$, 见图 2、图 3。在图 2、图 3 中, $L/D = 1$, $H = 3\text{m}$ 时, 图 2 中 $M = 20\text{kN} \cdot \text{m}$, 图 3 中 $M =$

$150\text{kN} \cdot \text{m}$, 可见装药量一定的情况下, 室内面积大小对墙体上弯矩值影响较大, M 随室内面积 S 的增大而减小; 图 2 中 S 一定, 长宽比 L/D 越大, 墙体所受弯矩 M 越大, L/D 等于 1 时 M 值达到最小; 且在同一长宽比条件下, 爆炸在墙体上施加的弯矩是随墙体增高而增加的。

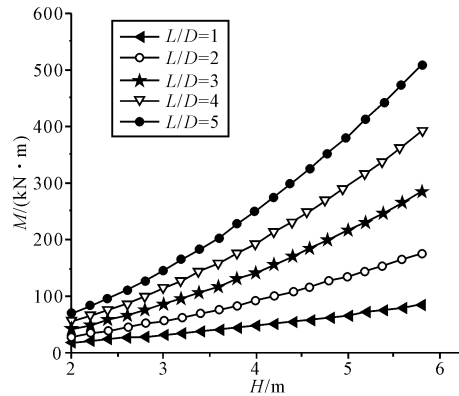


图 1 $S = 600\text{m}^2$ 时, M 随 L/D 的变化

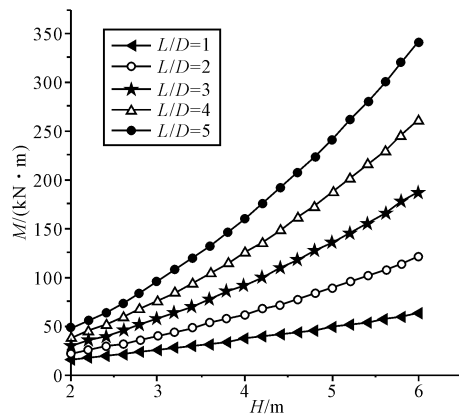


图 2 $S = 900\text{m}^2$ 时, M 随 L/D 的变化

3.3 不同工况条件下抗爆墙厚度计算

取 $W = 250\text{kg}$, 三种工况为 $V_1 = 10\text{m} \times 10\text{m} \times 3.5\text{m}$; $V_2 = 20\text{m} \times 20\text{m} \times 3.8\text{m}$; $V_3 = 25\text{m} \times 25\text{m} \times 5\text{m}$, 分析爆炸荷载在墙体上的弯矩, 并计算该荷载下墙体等效厚度 d_c 的值。各参数如下: $a = 50\text{mm}$; $b = 150\text{mm}$; $\rho_v = 2.4\%$, $\sigma_s = 252\text{MPa}$ 。

表 3 不同条件下墙体弯矩及等效厚度

工况	M 应处范围 / $(\text{kN} \cdot \text{m})$	选取的 M 值 / $(\text{kN} \cdot \text{m})$	等效厚度 d_c / mm
1	$220 \leq M \leq 368$	300	550
2	$41 \leq M \leq 76$	70	254
3	$72 \leq M \leq 99$	90	291

4 结语

室内爆炸荷载, 包括爆轰波及爆炸产物飞散与结构壁面的碰撞压力和空气冲击波在结构壁

面的首次反射和多次反射压力、还有强动态作用之后的准静态气体压力。作为一种近似,把防护隔墙上弯矩分为两部分:冲击波施加的弯矩及准静态气体压力引起的弯矩,两者相加后计算防护隔墙等效厚度值,并得到如下结论:

1) 准静态气体压力与冲击波相比较小,但两者之比 P_{qs}/P_r 及在墙体上产生弯矩之比 M_{p2}/M_{p1} 随加载密度 W/V 的增加呈不断增大的趋势,加载密度为 0.125 ~ 1 时,准静态气体压力引起的弯矩占冲击波引起的弯矩的 20% ~ 40%,在计算防护隔墙上所受荷载时需考虑准静态气体压力的影响。

2) 装药量一定的条件下,同一空间高度墙体弯矩随室内地面面积 S 的增加而减小;在同一面积时,室内地面长宽比对墙体所受荷载影响较大,长宽比越小,墙体所受荷载越小,长宽比到达 1 时,墙体所受弯矩达到最小;且同一长宽比时,墙体高度与墙体弯矩成正比。因此在设计抗内爆结构时应尽量选择扁平空间且长宽比接近于 1

的形状。

参考文献:

[1] 杨科之. 基于毁伤率的抗爆单元合理划分及隔墙厚度[J]. 防护工程, 2005, 27(3): 1-5.
 [2] 杨科之, 杨秀敏, 陶洪明, 等. 大空间人防地下室防护隔墙上的内爆炸荷载[J]. 防护工程, 2003, 25(3): 1-5.
 [3] 刘飞, 任辉启, 王肖均, 等. 抗爆墙在地面重要建筑物反爆炸恐怖袭击中的作用[J]. 防护工程, 2004, 26(6): 20-25.
 [4] W E 贝克. 爆炸危险性及其评估[M]. 北京: 群众出版社, 1988: 184-220.
 [5] Tri-Services Design Manual. Structures to resist the effects of accidental explosions[Z]. Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, TM5-1300, NAVFAC P-397, AFM 88-22, Washington, D. C., December 1979.
 [6] Waterway Experimental Station, Corps of Engineers. Fundamentals of protective design for conventional weapons[M]. Department of The Army, TM5-855-1, November 1986.

(上接第 139 页)

表 1 介质材料参数

介质名称	$A/(kg/ms^2)$	$B/(s^2/m^2)$
硬土	0.70×10^7	60×10^{-6}
松土	0.461×10^7	60×10^{-6}
湿土	0.266×10^7	80×10^{-6}
砂土	0.435×10^7	20×10^{-6}
砖	3.16×10^7	15×10^{-6}
岩石	$(4.40 \sim 5.52) \times 10^7$	15×10^{-6}

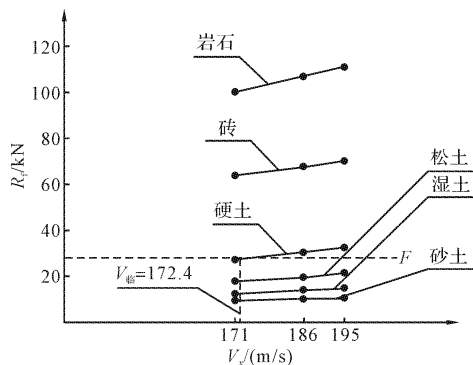


图 3 不同介质的侵彻阻力 R_i 与落速的关系

由图 2 可知,当弹丸落入岩石或砖墙区域以及落速大于 172.4m/s 侵彻硬土时, $R_i > F$,配重杆螺纹将剪切,造成弹丸落地不坚定。

3 验证

为验证分析及计算是否正确,采取配用摘火

引信和配用假引信(加配重杆两体式)两种状态的实弹进行弹体装药射击安定性对比试验,弹丸理论计算落速为 192m/s。试验结果:配用摘火引信的弹丸落地均没有出现半爆现象,而配用假引信的弹丸在第 3 发即出现落地半爆。检查半爆弹着弹点,发现为多石区域,属于硬土。通过对比试验,故障事件得以复现,说明故障原因分析和计算结果与故障现象吻合良好。

4 结论

1) 在弹丸的运动条件和几何形状相同的情况下,地面介质的密度和强度越大,侵彻介质阻力越大。

2) 试验结果表明,两体式假引信在侵彻地面介质过程中,当介质阻力大于配重杆螺纹所能承受的剪力时,螺纹发生剪切,造成配重杆脱落,直接冲击弹丸装药,因而发生半爆现象。

参考文献:

[1] 尹放林, 王明详. 弹体垂直侵彻深度工程计算模型[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 333-339.
 [2] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 南京: 南京理工大学出版社, 1990.
 [3] 魏惠之, 朱鹤松, 汪东晖, 等. 弹丸设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.