

空气冲击波扩散室内 平均压力时程曲线的预测

陈志林

本文按拟定常流动理论提出一种近似解析方法，用来预测冲击波扫过小孔进入防护结构时室内平均压力时程曲线，为防空地下室人员生存能力评价和多级预孔高抗力防护门设计提供依据。

一、引言

应防护工程的实际需要，对空气冲击波通过孔口进入扩散室时室内平均压力时程曲线的估算问题，国内外科技工作者已做了大量的研究工作。美国对此问题一直比较重视，早期，进行过核爆炸空气冲击波通过孔口进入扩散室的现场试验，但很少批露这方面的实验数据。最近报导^[1,2]，美国工兵水道研究站对化爆冲击波通过小孔进入扩散室问题，开展了室内试验研究，并运用拟定常流理论和改进的射线理论来预估扩散室内平均压力波形。其不足之处是假定离散化后每个阶梯波形的流场参数均满足激波关系式，且没有给出直接可供应用的计算公式。文献〔4〕也有类似缺陷，所给出的估算公式要数值积分，迭代求解，不便于应用。

本文在〔4〕的基础上，将室外冲击波波形离散化，并使离散后第一个阶梯波形的流场参数满足激波关系式，其他各个阶梯波形的流场参数近似满足等熵绝热流动关系式，导出一种简便的近似解析方法来预测室内平均压力时程曲线。在开孔率 $\eta = S/A < 0.03$ （ S 进气孔面积， A 扩散室最大横截面）和扩散室体积 V 足够大（ $V/A \gg 1$ ）条件下，计算结果与实验结果吻合很好。这些成果对城市高层和多层建筑物设置的防空地下室人员生存能力评价和多级预孔高抗力防护门的设计具有重要意义。

二、充气阶段室内平均压力时程曲线估算

如图1所示，当冲击波自左向右扫过扩散室孔口时，室外流场参数：压力 p_1 ，密度 ρ_1 ，声速 a_1 ， y 向质点速度 v_1 ， x 向质点速度 $u_1 = 0$ ；室内任意时刻平均流场参数：压力 p ，密度 ρ ，声速 a ， x 向速度 $u = 0$ ； y 向速度 $v = 0$ ；初始时刻，室内为静止大气（压力 p_0 ，密度 ρ_0 ，声速 a_0 ）。由于孔口两侧的压力差引起室外气体向内流动，一般说来，这种流动为三维不定常运动，只能求助于数值计算和实验手段来解决。但在下述简化条件下可借助于近似理论来解决。这些简化条件是：（1）流

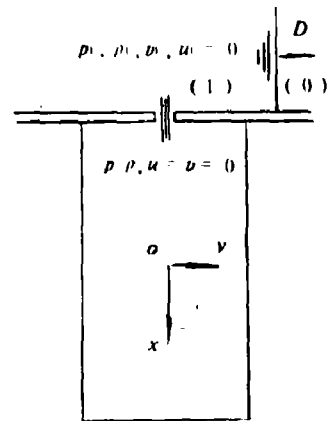


图1 物理问题示意图

入室内的气体瞬息将动能转化为内能,处于静止状态;(2)开孔率 $\eta = S/A < 0.03, V/A > 1$.使得流入室内的能量迅速几何扩散,不致形成冲击波;(3)入口处的流入截面收缩系数由实验给出;(4)仅考虑中等强度的冲击波;(5)理想气体,绝热过程。

设孔口内侧的平均流动速度为 \bar{u} ,它必须满足 x 方向动量守恒定律

$$(\rho \bar{u}^2 - \rho_1 u_1^2) S dt = (p_1 - p) S dt \quad (1)$$

绝热方程

$$p/p_1 = (\rho/\rho_1)^\gamma \quad (2)$$

通过孔口流入室内质量

$$dM = K_m S \rho \bar{u} dt \quad (3)$$

式中, γ 为气体绝热指数, K_m 为入口截面收缩系数,由实验给出,与壁面粗糙度和激波强度有关。

联立(1)~(3)式得到

$$dM = K_m S \sqrt{p_1 \rho_1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/\gamma} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{(\gamma+1)/2\gamma} \right]^{1/2} dt \quad (4)$$

在 dt 时段内流入室内总能量为 $dE = \left[\frac{p_1}{(\gamma-1)\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} \right] dM$,假定这些能量全部转化气体内能增加,由能量守恒定律得到

$$\frac{dp}{\gamma-1} V = \left[\frac{p_1}{(\gamma-1)\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} \right] dM \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式得到

$$\frac{dp}{(\gamma-1)} V = \left[\frac{p_1}{(\gamma-1)\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} \right] K_m S \sqrt{p_1 \rho_1} \left[\left(\frac{p}{p_1} \right)^{1/\gamma} - \left(\frac{p}{p_1} \right)^{(\gamma+1)/2\gamma} \right]^{1/2} dt \quad (6)$$

如图2所示,若将连续变化的室外压力波形离散成有限个阶梯波形之和的形式,对于第一个阶梯波形的流场参数必须满足激波关系式,其他各个阶梯波形的流场参数近似满足等熵绝热流动关系式。无论哪种情形,在微时段 Δt_i 之内,室外流场参数(p_i, ρ_i, v_i, a_i 等)视为常数。将方程(6)改写成

$$\frac{d(p/p_{i1})}{\left[\left(p/p_{i1} \right)^{1/\gamma} - \left(p/p_{i1} \right)^{(\gamma+1)/2\gamma} \right]^{1/2}} = \frac{K_m S}{\sqrt{\gamma} V} \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{v_i^2}{p_{i1}/\rho_{i1}} \right] a_{i1} dt \quad (7)$$

取 $\gamma = 1.4$,在区间 $[p_{i-1}, p_i]$ 积分上式得到

$$\frac{(p_i/p_{i1})^{5/7} - (p_{i-1}/p_{i1})^{5/7}}{\left[\left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2p_{i1}} \right)^{1/7} - \left(\frac{p_i + p_{i-1}}{2p_{i1}} \right)^{8/7} \right]^{1/2}} = \frac{0.845 K_m S}{V} \left[1 + 0.2 \frac{v_i^2}{p_{i1}/\rho_{i1}} \right] a_{i1} \Delta t_i \quad (8)$$

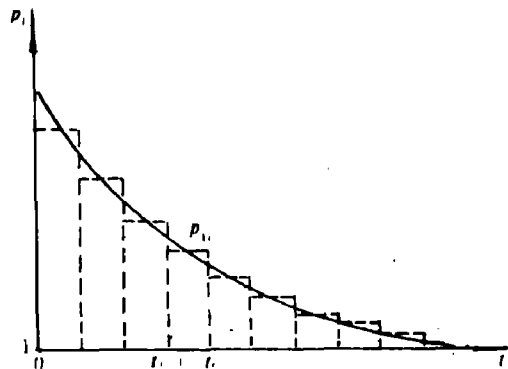


图2 室外压力波形离散化

式中, p_{i-1} , p_i 分别为 Δt_i 时段内初时刻和终时刻的室内压力。

三、泄气阶段室内平均压力时程曲线估算

当充气过程进行到某时刻 t , 室内外压力达到瞬时平衡状态, 充气过程告终, 随着室外压力减小, 变成室内压力高于室外压力。室内气体开始外泄, 使得室内气体慢慢减少, 直到与周围大气压力相同为止。假定孔口外侧处向外泄气的平均速度 u' , 它必须满足动量守恒定律

$$(\rho_1 u'^2 - \rho u^2) S \Delta t = (p - p_1) S \Delta t \quad (9)$$

通过孔口流出的质量

$$dM = K'_m S \rho_1 u' dt \quad (10)$$

联立(9)–(10)式得到

$$dM = K'_m S \sqrt{\rho_1 \rho_1} \sqrt{p/p_1 - 1} dt \quad (11)$$

K'_m —出流截面收缩系数, 它与出流速度和孔壁粗糙度有关, 由实验给出。

在 Δt 时段内, 通过孔口流出的内能为 $p dM / (\gamma - 1) \rho$, 它将引起室内压力减小 $-dp$, 使室内总的内能减小为 $-dpV / (\gamma - 1)$, 根据能量守恒定律得知, 两者必须相等:

$$\frac{p dM}{(\gamma - 1) \rho} = -\frac{V}{\gamma - 1} dp \quad (12)$$

由(11)、(12)式得到

$$dp = -\frac{K'_m S p_1}{V \rho_1} \sqrt{p_1 \rho_1} \left(\frac{p}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \sqrt{\frac{p}{p_1} - 1} dt \quad (13)$$

对离散化后每个阶梯波形来说, 上式化为

$$\frac{d(p/p_{1i})}{(p/p_{1i})^{(\gamma-1)/\gamma} (p/p_{1i} - 1)^{1/2}} = -\frac{K'_m S}{V \sqrt{\gamma}} a_{1i} dt \quad (14)$$

取 $\gamma = 1.4$, 利用积分中值定理在区间 $[p_{i-1}, p_i]$ 积分上式得到

$$\frac{(p_i/p_{1i} - 1)^{1/2} - (p_{i-1}/p_{1i} - 1)^{1/2}}{[(p_i + p_{i-1})/2p_{1i}]^{2.7}} = -\frac{0.423 K'_m S}{V} a_{1i} \Delta t_i \quad (15)$$

四、波后流场参数确定

在室内平均压力计算公式(8)和(15)中, 都包括波后流场参数 a_{1i} , v_{1i} , ρ_{1i} 的计算问题。对于离散化后室外压力波形而言(见图2), 其第一个阶梯波形的流场参数必须满足激波关系式

$$a_{1i} = a_0 \left[\left(6 + \frac{p_{1i}}{p_0} \right) \frac{p_{1i}}{p_0} / \left(6 \frac{p_{1i}}{p_0} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$\rho_{1i} = \rho_0 \left(6 \frac{p_{1i}}{p_0} + 1 \right) / \left(6 + \frac{p_{1i}}{p_0} \right) \quad (17)$$

$$v_{1i} = a_0 \left(\frac{p_{1i}}{p_0} - 1 \right) / \left(\gamma \sqrt{\frac{\gamma+1}{2\gamma} \frac{p_{1i}}{p_0} + \frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right) \quad (18)$$

对于其他各个阶梯波形的流场参数, 假定近似满足绝热连续流动方程(对任意两个相邻的阶

梯波形)。

绝热条件

$$\frac{p_{1i}}{p_{1(i-1)}} = \left(\frac{\rho_{1i}}{\rho_{1(i-1)}} \right)^\gamma$$

动量守恒方程

$$\rho_{1(i-1)} v_{1(i-1)} - \rho_{1i} v_{1i} = p_{1(i-1)} - p_{1i}$$

记两个相邻阶梯波形之间压力差值 $d p_{1i} = p_{1(i-1)} - p_{1i}$ ，若时间步长 Δt_i 充分小，则压力差值 $d p_{1i}$ 也是个量，作为近似估算，可忽略二阶以上小量 ($d p_{1i}^2$)，导出波后流场参数的估算公式

$$a_{1i} = a_{1(i-1)} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{d p_{1i}}{p_{1i}} \right) \tag{19}$$

$$\rho_{1i} = \rho_{1(i-1)} \left(1 - \frac{d p_{1i}}{\gamma p_{1i}} \right) \tag{20}$$

$$v_{1i} = v_{1(i-1)} + \left(\frac{v_{1(i-1)}}{\gamma p_{1i}} - \frac{1}{\rho_{1(i-1)}} \right) d p_{1i} \tag{21}$$

式中， $a_{1(i-1)}$ ， $\rho_{1(i-1)}$ ， $v_{1(i-1)}$ 为前一阶梯波形的流场参数， $d p_{1i}$ 为两个相邻阶梯波形压差，均为已知值。

五、算 例

(1) 如图 3，爆炸波从穿廊两端相向运动，在孔口附近形成静止高压高密度区 (此区内， $u_1 = 0$ ， $v_1 = 0$)，设扩散室体积 $V = 2 \times 2 \times 6.6 = 26.4 \text{m}^3$ ，孔口面积 $S = 0.07069$ ， 0.14138m^2 ，开孔率分别为：0.018, 0.030。根据激波管实验数据统计得到入流截面收缩系数 $K_m = 0.75$ ，出流截面收缩系数 $K'_m = 0.90$ 。在该例中，由于 $v_{1i} \equiv 0$ ，故室内平均压力计算公式大为简化，公式 (8) 化为

$$\frac{(p_i/p_{1i})^{5/7} - (p_{i-1}/p_{1i})^{5/7}}{\{[(p_i + p_{i-1})/2 p_{1i}]^{1/7} - [(p_i + p_{i-1})/2 p_{1i}]^{8/7}\}^{1/2}} = \frac{0.845 K_m S}{V} a_{1i} \Delta t_i \tag{8'}$$

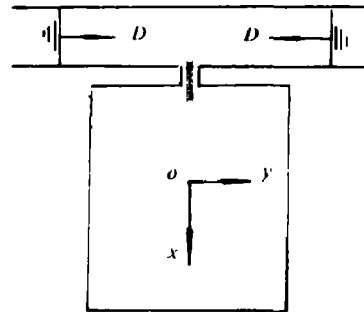


图 3

按公式 (8')，(15)，(16)，(19) 计算室内平均压力结果见图 4。

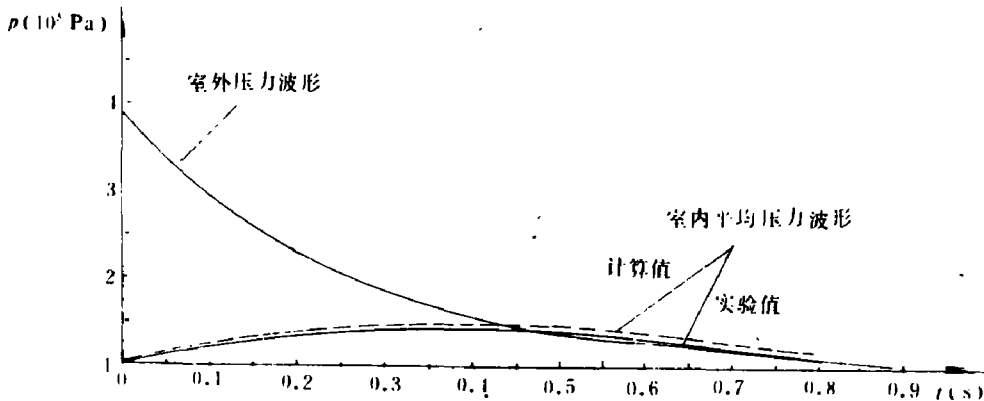


图 4 计算值与实验值比较

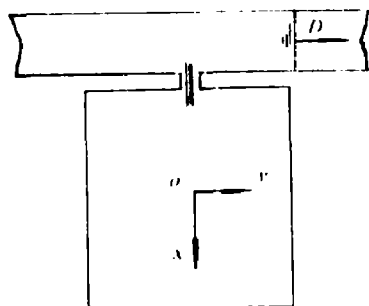


图 5

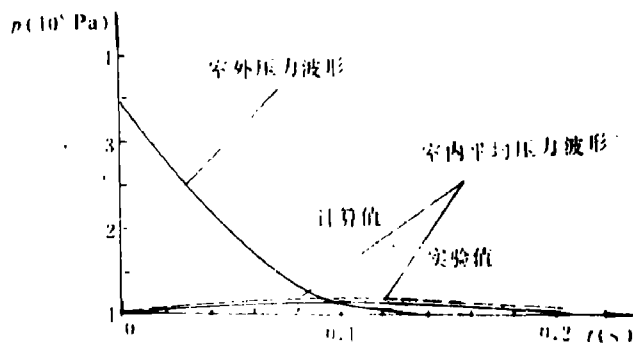


图 6 计算值与实验值比较

(2) 如图5, 爆炸波从穿廊左端入口, 自左向右扫过孔口, 从穿廊右端出口, 此时孔口外侧处在变化的流场参数之中, 必须借助于公式(8)、(15)~(21)才能计算室内平均压力变化过程。设扩散室体积 $V = 3.0086, 6.0172\text{m}^3$, 孔口面积 $S = 0.02011\text{m}^2$, 开孔率 $\eta = 0.02$ 。计算结果见图6 ($K_m = 0.75, K'_m = 0.90$)。

五、结果简析

1. 在室外压力波形和体积保持相同的条件下, 入口面积 S 对室内平均压力时程曲线有明显影响, S 越大, 室内峰值压力越高, 上升越快, 下降也快。

2. 在室外压力波形和入口面积 S 保持相同的条件下, 体积 V 对室内平均压力时程曲线有显著影响, 体积越大, 则室内平均压力越小。

3. 实验表明, 开孔率 $\eta < 0.03, V/A \geq 1$ 时, 扩散室内平均压力时程曲线可按本文给出公式估算; 数值计算还表明, 当开孔率 $\eta > 0.03$ 时, 扩散室内出现冲击波绕流运动, 就不能按本文给出的公式来估算室内平均压力变化过程。

4. 计算结果与实验结果吻合较好, 最大误差在+14%以内。说明本文给出的近似理论公式是可信的, 可直接提供设计人员使用。

参 考 文 献

- (1) Drake, J. L., Britt, J. R., Airblast Penetration into Semihardened Structures, ESL TR 80 60, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall AFB, FL, Oct. (1980).
- (2) Britt, J. R., Little, C. D., Airblast Attenuation in Entranceways and Other Typical Components of Structures, Small Scale Tests Data Report 1, Draft, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. (1983).
- (3) Britt, J. R., and Drake, J. L., Penetration of Short Duration Airblast into Protective Structures, Applied Research Associates, Southern Division Vicksburg, Mississippi. (1986).
- (4) 成竹刚等, 空气冲击波作用下防空洞或缓冲通道内的压力计算, 内部资料, No.3. (1982).
- (5) 陈志林, 爆炸波绕流设备夹层数值计算(一), 内部资料, No.4. 1986.

**PREDICTION OF AVERAGE PRESSURE TIME HISTORY
IN THE ROOM OF PROTECTIVE STRUCTURE WHEN
A SHOCK WAVE SWEEPS OVER A SMALL OPENING
ON THE WALL OF THE STRUCTURE**

Chen Zhilin

Abstract

This paper presents an approximate theoretical method in accordance with the quasi-steady flow theory. It is used to predict the average pressure time history in a room when a shock wave sweeps over a small opening on the wall of the room. It also offers an important basis for the assessment of survivability of people in the basement of residential buildings under nuclear attack and for the design of multiple high strength protective doors with opening.