

空气冲击波作用下的安全距离

李 铮

(1983年9月23日收到)

本文阐述了二十年来我们在空气冲击波安全距离的试验、理论研究、数值计算方面的一些重要成果。

前 言

在工业炸药的生产与贮存过程中、在矿山、铁道、水电部门的爆炸作业中，都会遇到炸药爆炸时空气冲击波对建筑物的破坏作用，以及对人的杀伤作用。为了保证安全，通常建筑物须设置在距爆源足够远的地方，即处于安全距离地带。安全距离的大小，对于节省土地、保证生产正常进行、保障国家财产和人民生命安全都有直接关系。以往我国在确定安全距离时，往往参考国外的有关资料，自六十年代初我国开始了这方面的试验研究工作，本文即是把这方面有关的试验研究成果作一比较系统的阐述。

一、炸药爆炸产生的空气冲击波荷载

根据量纲分析，在标准状态下空气冲击波波阵面超压 ΔP 的函数表达式为：

$$\Delta P = f\left(\frac{R}{C^{1/3}}\right) \quad (1)$$

正压作用时间 t_+ 的函数表达式为：

$$\frac{t_+}{C^{1/3}} = f\left(\frac{R}{C^{1/3}}\right) \quad (2)$$

在安全距离计算中，通常取：

$$\Delta P = K_1 \left(\frac{R}{C^{1/3}}\right)^{-n_1} \quad (3)$$

$$t_+ = K_2 \left(\frac{R}{C^{1/3}}\right)^{n_2} C^{1/3} \quad (4)$$

式中： ΔP ——空气冲击波波阵面入射超压(kg/cm^2)； t_+ ——空气冲击波正压作用时间(ms)； R ——装药中心至测点距离。在隧道爆破时，为隧道口部至测点的距离(m)； C ——爆炸能量，即装药量(kg)。

K_1 、 n_1 、 K_2 、 n_2 为经验常数，在不同爆破（爆炸）情况下的数值列于表1。

表 1

序号	爆炸条件 (爆破方式)	方向	4P		I ₁		药量范围 (T)	备 注
			K ₁	n ₁	K ₂	n ₂		
1	地面爆炸 (爆心无土围) ⁽¹⁾	0°—360°	14.49	2.00	1.50	0.50	任意	根据 H. L. Brode 公式改作的
		°	17.20	1.82	1.50	0.50	°	根据 M. A. CagoBckuu 公式改作的
2	地面爆炸 (爆心有土围) ⁽¹⁾	°	16.68	2.56	1.50	0.50	0.3—100	
3	弹药在钢拱复土库内爆炸 (集中堆放) ⁽²⁾	0°	5.48	1.53	1.32	0.52	0.5—45	复土厚 0.60m、0° 系复土库开口方向
		90°	2.22	1.21	1.79	0.33	°	°
		180°	3.48	1.58	1.32	0.81	°	°
4	弹药在钢拱复土库内爆炸 (分散堆放) ⁽³⁾	0°	3.79	1.40	1.50	0.50	0.5—1.0	°
		90°	0.65	1.05	2.30	0.49	°	°
		135°	0.48	1.02	3.52	0.16	°	°
		180°	0.76	1.06	2.53	0.26	°	°
5	炸药在钢拱复土库内爆炸 ⁽³⁾	0°	13.93	1.91	0.72	0.71	<45	°
		90°	2.76	1.25	0.76	0.67	°	°
		180°	2.20	1.33	0.73	0.69	°	°
6	炸药在钢筋混凝土复土库内爆炸 (柱状装药)	0°	5.87	1.67	0.96	0.30	任意	复土厚 0.50m 与柱状装药长度方向相垂直的
		45°	3.49	1.23	0.62	0.74	°	方向为 0°、90° 方向未复土, 为开口方向
		90°	4.55	1.28	0.65	0.60	°	°
7	隧道内爆破 (柱状装药)	0°	2.21	1.68	1.36	0.95	°	0° 为开口方向
		45°	0.96	1.36	0.63	1.07	°	°
		90°	0.69	1.10	0.48	0.50	°	°
8	露天爆破 ⁽³⁾							
	深孔药包微差爆破 (6x B 阿莫尼特)	0°—360°	1.43	1.55			0.80—30	露天大爆破的 $\rho = 1.10(R/C^{1/3})^{0.02}$
	深孔药包瞬发爆破 (6x B 阿莫尼特)		2.03	1.55				
	裸露药包微差爆破 (10A 狄那尼特)		10.70	1.81				
	裸露药包瞬发爆破 (10A 狄那尼特)		1.35	1.18				

注: 除注明者外, 均为 $\rho = 1.50 \text{ g/cm}^3$ 的 TNT 炸药。

从表1可以看到：在隧道爆破、复土炸药库、复土弹药库爆炸时，应避开超压最大的开口方向，尽量利用侧向或背后布置建筑物，以减小安全距离。

不同爆破(爆炸)情况的 $\Delta P - R/C^{1/3}$ 曲线示于图1。

对于地面爆炸爆心有土围的情况，试验时是将球形装药直接放在土围内爆炸的，这时土围内未设置建筑物。如果设置了建筑物，一部分爆炸能量将消耗在建筑物上，当 $C < 1 t$ 时可使 ΔP 降低 $1/4$ 。另外，土围的开口方向 ΔP 增大 $1/3$ 。

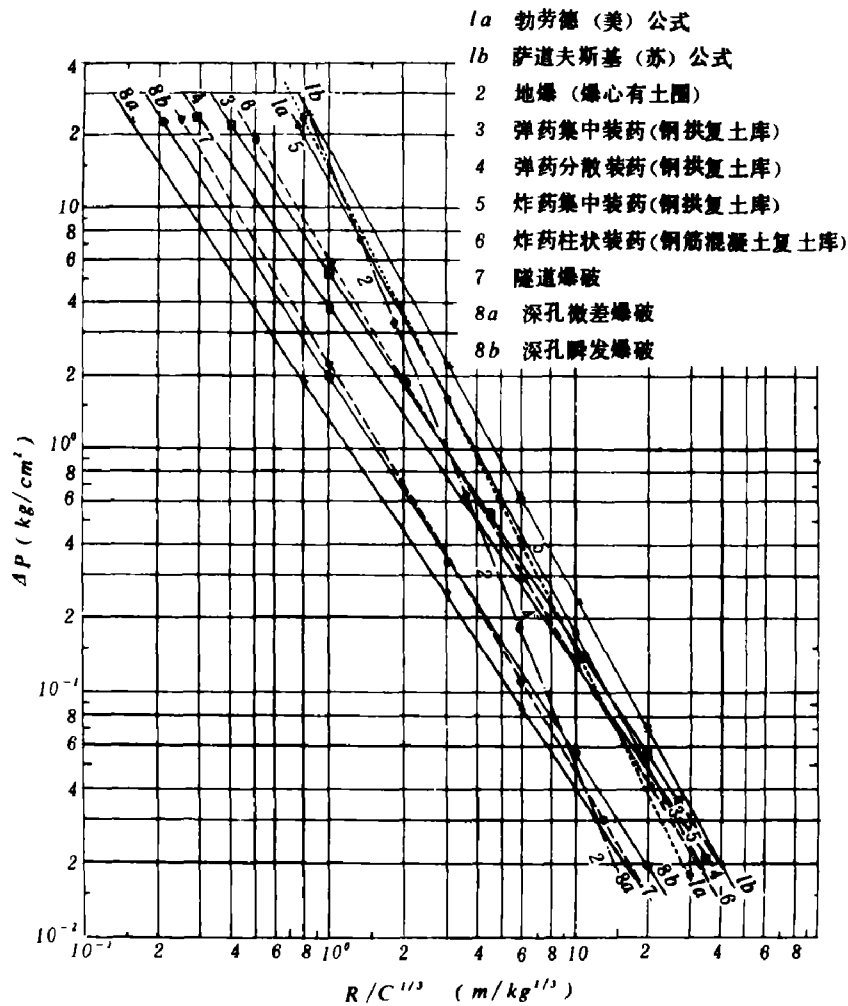


图1 各种爆炸(爆破) $\Delta P - R/C^{1/3}$ 曲线

二、考虑正压作用时间与建筑物动力特性的安全距离计算公式

由(3)式得:

$$R = KC^{1/3}$$

(5)

式中:

$$K = \left(\frac{K_1}{\Delta P} \right)^{1/n_1} \quad (6)$$

目前,美、英、日、西德等国均采用(5)式计算安全距离,并仍根据试验资料用数理统计方法确定 K 值。从1976年起苏联也规定当药量大于100t时也采用(5)式计算区域安全距离。表2列出了各种情况下的 K 值。

根据我国大量化爆的试验结果,当炸药量为0.3~100t时,砖混结构和砖木结构的破坏情况及与超压的关系列于表3。

从公式(6)可以看到:若取 K_1 、 n_1 为常数,则安全距离系数 K 值只与 ΔP 有关。这样来计算安全距离是不全面的,因为(5)式中有下述两个重要因素没有考虑:

1) 正压作用时间的影响:对于同一建筑物,根据爆炸相似律,当比例距离 $\bar{R} = R/C^{1/3}$ 为常数时,超压 ΔP 都相等,但正压作用时间 t_+ 并不相等, t_+ 随着药量的增加而增大。从试验结果来看, t_+ 越大建筑物破坏越重, t_+ 越小破坏越轻。反映在安全距离上的是:若取同一超压 ΔP 值,小药量合适的安全距离则对大药量就偏小;反之,对于大药量合适的安全距离对于小药量又偏大。显然这是由于正压作用时间不相等造成的。

2) 建筑物动力特性的影响:即使在具有相同的正压作用时间 t_+ 、相同峰值 ΔP 作用下,对于不同尺寸、不同材料、不同结构型式的建筑物,其破坏程度也是不同的。

为了在(5)式中考虑上述两个因素,用自振频率来表示结构的动力特性,并且将结构的动力系数反映到(5)式中去。为了求得解析解,将建筑物近似简化成单自由度体系。此外,将超压随时间作指数衰减的曲线,再根据超压峰值不变冲量相等的原则简化成直线,即 $P(t) = \Delta P [1 - (t/\theta)]$,而 θ 即有效作用时间。由达朗培尔原理,质量为 m 、刚度为 K 的单自由度无阻尼体系的振动方程为:

$$m\ddot{y} + K y(t) = P(t) \quad (7)$$

(7)式的解即杜哈美积分:

$$y(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t P(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau + \frac{1}{\omega} \dot{y}(0) \sin \omega t + y(0) \cos \omega t \quad (8)$$

式中: $\dot{y}(0)$ 及 $y(0)$ 分别为初始速度和位移。

对于直线衰减的动载 $P(t) = \Delta P [1 - (t/\theta)]$,如果以上面所得到的弹性阶段终点的位移 y_r 和速度 V_r 作为塑性阶段的初始条件,同时考虑到化爆情况下,一般是在冲击波荷载消失后结构才达到最大变位,所以 $t_r > \theta$,这时求得塑性阶段动力系数 K_p 与延性比 μ 的关系式如下

$$\mu = 1 + \frac{1}{2K_p} \left\{ \frac{1}{\omega\theta} \cos \omega t_r (1 - \cos \omega\theta) + \sin \omega t_r \left(1 - \frac{1}{\omega\theta} \sin \omega\theta \right) \right\}^2 \quad (9)$$

式中: K_p ——塑性阶段的动力系数(当 $\mu = 1$ 的 K_p 值即为弹性阶段的动力系数 K_e); $\mu = y_p/y_r$ ——延性比; y_p ——塑性阶段某种破坏程度的变位; y_r ——弹性阶段的最大变位; ω ——无阻尼体系的自振圆频率; θ ——有效正压作用时间; t_r ——弹性阶段终点的时刻亦即塑性铰形成的时刻。

(9)式已绘曲线可参见文献[4]中的图4.2,对于研究安全距离所需要的 $\mu - \theta/T$ (T —自

表 2

序号	国名	爆炸条件	$K(m/kg^{1/3})$
1	美国 ⁽⁶⁾	1. 有土圈的炸药库爆炸时: 至住宅 至客运铁路 至公路 至其他炸药库 2. 炸药生产线内的安全距离	14~16 6.5 4~6 1.4 3.55
2	西德 ⁽⁶⁾	1. 有土圈的炸药库爆炸时: 至生产工房 至无爆炸危险的建筑物 至住宅 至无破坏区域 2. 炸药生产线内的安全距离	2.5~8 8~22 22 >22 4
3	日本 ⁽⁶⁾	1. 至市街区的住宅、学校 2. 至村庄的住宅、公园 3. 至铁路、贮气罐、工厂 4. 至国家、省、县级公路、高压电线	16 14 3 5
4	苏联 ⁽⁷⁾	1. 玻璃完全破坏、部分门窗框破坏、抹灰与轻质隔墙破坏 2. 玻璃偶然破坏 3. 完全无破坏	30~50 100 400

表 3

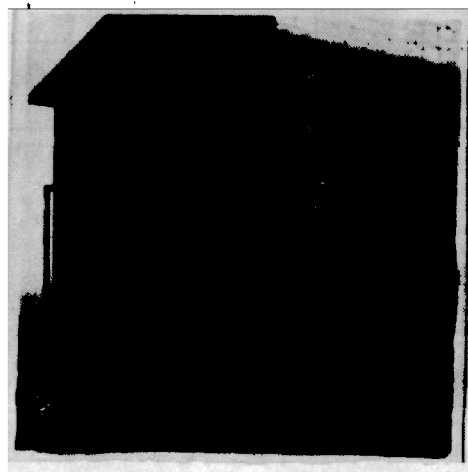
破坏等级	破坏程度	破坏情况	$R/C^{1/3}$ ($m/kg^{1/3}$)	ΔP (kg/cm^2)
一	无破坏	完全无损坏	>23	0.02
二	玻璃破坏	门窗玻璃部分或全部破坏	10~23	0.09~0.02
三	轻度破坏	玻璃破碎、门窗框部分破坏、砖墙出现 5mm以下细微裂缝或稍有倾斜,平挂瓦屋面掀起。	6~10	0.25~0.09
四	中等破坏	门窗大部分破坏,砖墙有较大裂缝(宽5~ 50mm)和倾斜(偏移 $\delta=10-100mm$)、钢筋混凝土 土面板裂缝、木屋盖大部分破坏。	4~6	0.45~0.25
五	严重破坏	门窗摧毁、砖墙严重开裂(宽150mm以上) 并有较大倾斜,甚至部分倒塌。钢筋混凝土屋盖 严重开裂、木屋盖塌下。	3.5~4	0.70~0.45
六	倒塌	砖墙倒塌、钢贴屋盖塌落	<3.5	>0.70

注: 1. 二~五每一破坏等级又分为三小级, 如中等破坏四级又分为四⁺、四、四⁻, 余类推

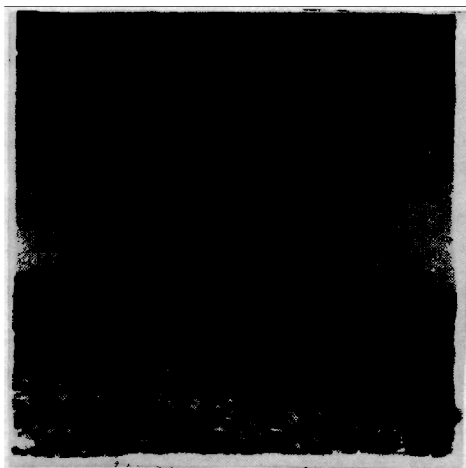
2. 各破坏等级的典型情况见照片11~15



照片11 二级玻璃破坏



照片12 三阶轻度破坏



照片13 四级中等破坏



照片14 五级严重破坏



图片15 六级倒塌

振周期) 见图 2。

作用于结构上的等效静载为:

$$P_e = K_r K_r \Delta P \quad (10)$$

等效静载作用下结构的挠度为:

$$y = \frac{1}{EJ} \varphi P_e l^4 = \frac{1}{EJ} \varphi l^4 K_r K_r \Delta P \quad (11)$$

式中: φ ——结构弹性阶段的挠度系数, 与边界条件有关, 例如对于两端简支梁 $\varphi = 5/384$; l ——结构跨度; EJ ——结构刚度。

将表 1 中 $\Delta P = K_r (R/C^{1/3})^{n_1}$ 代入(11)式得:

$$R = \left(\frac{K_r \varphi l^4}{y EJ} \right)^{1/n_1} \cdot K_r^{1/n_1} \cdot K_r^{1/n_1} \cdot C^{1/3} = \alpha \beta \eta C^{1/3} \quad (12)$$

式中: $\alpha = \left(\frac{K_r \varphi l^4}{y EJ} \right)^{1/n_1}$ ——结构影响系数; $\beta = K_r^{1/n_1}$ ——反射影响系数; $K_r = 2 + \frac{6 \Delta P}{7 + \Delta P}$;

$\eta = K_r^{1/n_1}$ ——正压作用时间影响系数。

(12)式就是计算安全距离的通式, 如果结构本身的各参数、荷载、延性比(即破坏标准)都能定量, 那末就可以求得安全距离。

我们用下标“1”与“2”来表示两种不同情况下的安全距离, 由(12)式可写出:

$$R_1 = \alpha_1 \beta_1 \eta_1 C_1^{1/3} \quad (13)$$

$$R_2 = \alpha_2 \beta_2 \eta_2 C_2^{1/3} \quad (14)$$

(14)/(13)可得:

$$R_2 = \frac{R_1}{C_1^{1/3}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{\beta_2}{\beta_1} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot C_2^{1/3} \quad (15)$$

现在分下述两种情况对(15)式进行分析:

1 模型试验的情况: 在满足爆炸相似律 $R_1/C_1^{1/3} = R_2/C_2^{1/3}$ 的条件下, $\Delta P_1 = \Delta P_2$ 。此外, 对于结构动力学相似尚须满足相似准则 $\pi_1 = \omega \theta = const$ 。如模型的材料与原型相同, 模型尺寸为原型的 $1/n$, 则模型的变位和正压作用时间为原型的 $1/n$ 、自振频率为原型的 n 倍。所以 $\pi_1 = \omega \theta = const$ 、原型与模型的材料应力 σ 相等。这时 $\alpha_2/\alpha_1 = 1$ 、 $\beta_2/\beta_1 = 1$ 、 $\eta_2/\eta_1 = 1$ 。即在模型与原型几何相似的情况下可直接运用爆炸相似律来计算安全距离。

2 原型不变、药量改变的情况: 实际工程的情况往往是: 工业与民用建筑物是不变的, 而爆炸药量是可变的。超压 ΔP 也不一定相等。因此, $\pi_1 = \omega \theta \neq const$ 。对于某种破坏程度下的安全距离而言, 结构的破坏程度是相同的, 所以 $\alpha_2/\alpha_1 = 1$ 。当 ΔP 值的变化范围不大时 $\beta_2/\beta_1 = 1$, 由于 $\pi_1 = \omega \theta \neq const$, 所以 $\eta_2/\eta_1 \neq 1$ 。这时不能直接运用爆炸相似律来计算安

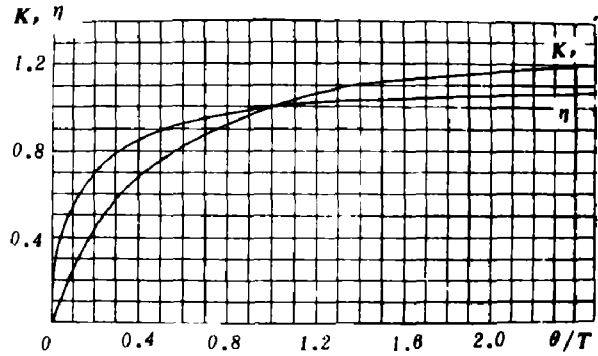


图 2 K_r — θ/T (延性比 $\mu = 2$), η — θ/T 曲线图

全距离。

我们以爆心有土围的地面爆炸为例来说明原型不变药量改变情况下安全距离公式的推导(其他爆炸情况可类推)。并通过对原型的小药量试验来确定大药量情况下原型的安全距离。试验结构为砖混建筑物,总体尺寸为 $4 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$ (长 \times 宽 \times 高)、砖墙厚 24 cm 、钢筋混凝土屋盖。当 1 t 梯恩梯爆炸时经试验测定安全距离为 40 m ,即 $R_1 = 40 \text{ m}$ 、 $C_1 = 1000 \text{ kg}$ 。由于所试验的建筑物相同、允许破坏程度也相同,所以 $\alpha_1 = \alpha_2$ 。当炸药量自 1 t 至 100 t 变化时,对我们所采用的破坏程度四⁺、五⁻级而言,超压从 0.535 kg/cm^2 减小到 0.211 kg/cm^2 ,对于地爆有土围的情况取 $n_1 = 2.56$,两者的 β 值相差小于 3.5% ,所以 $\beta_1 \doteq \beta_2$ 。因此(15)式化简为

$$R_2 = \frac{R_1}{C_1^{1/3}} \frac{\eta_2}{\eta_1} C_2^{1/3} = \frac{R_1}{C_1^{1/3}} \bar{\eta} C_2^{1/3} = 4 \bar{\eta} C_2^{1/3} \quad (16)$$

式中: $\bar{\eta} = \eta_2/\eta_1$ 、 R 、 C 见公式(4)

由于具有爆炸危险的生产工房一般为地面建筑物且没有土围,所以(16)式是计算生产线内建筑物安全距离的通式。又由于 $\bar{\eta}$ 随炸药量的变化而变化,(16)式又称为变系数公式。

$\bar{\eta}$ 可通过数值计算求得。

三、生产线内安全距离的数值计算

安全距离试验时上述砖混建筑物的自振周期以承重砖墙控制, $T = 100 \text{ ms}$ 。当 1000 kg 梯恩梯爆炸时 40 m 处的超压 $\Delta P = 0.535 \text{ kg/cm}^2$ 、正压作用时间 $t_+ = 30 \text{ ms}$ 。建筑物最大弹性变位的计算值为 3.05 cm 、试验时实测位移为 5.3 cm 、砖墙出现较大裂缝,结构已进入塑性阶段,所以按延性比 $\mu = 2$ 来求结构的动力系数。

计算 η 时须先求出 K ,而求 K ,又需要先求出 θ/T 。由于 R 和 θ 相互影响,两者又都是未知数,所以必须采用迭代法。计算步骤是先任意假定一个 η_0 ,然后按 $\eta_0 \rightarrow R \rightarrow t_+ \rightarrow \theta \rightarrow \theta/T \rightarrow \eta_n \rightarrow \bar{\eta}$ 的顺序计算下去。当 $(\eta_0 - \bar{\eta}_n)/\bar{\eta}_n < 4\%$ 时便认为求得的 R 值是合理的。否则就以所算得的 η 值作为下一次计算的 η_0 值,如此反复计算。

建筑物自振周期 $T = 100 \text{ ms}$ 、 $\mu = 2.0$ 时安全距离的计算过程和最终结果见表4。由表4可以看到:安全距离的计算值与实测值的误差仅 4% 。

建筑物自振周期 $T = 100 \sim 400 \text{ ms}$ 时,安全距离的计算结果见表5。

四、生产线内安全距离公式的其他形式

(1) 安全距离的变方次公式

如果将表5的计算结果绘于双对数坐标上,则 $\bar{\eta}-C$ 接近于一直线,就可求得:

$$\left. \begin{array}{l} T = 100 \text{ ms 时} \quad \bar{\eta} = 0.53C^{0.09205} \\ T = 200 \text{ ms 时} \quad \bar{\eta} = 0.43C^{0.1226} \\ T = 300 \text{ ms 时} \quad \bar{\eta} = 0.406C^{0.1312} \\ T = 400 \text{ ms 时} \quad \bar{\eta} = 0.353C^{0.1530} \end{array} \right\} \quad (17)$$

将(17)代入(16)得:

序号	C (kg)	C ^{1/3}	η ₀	4η ₀	R=4η ₀ C ^{1/3} (m)	*t ₊ (ms)	C ^{1/2} /R	r	θ=rt ₊ (ms)	θ/T	η _a	$\bar{\eta}_a = \frac{\eta_a}{\eta_1}$	$\frac{\eta_0 - \bar{\eta}_a}{\eta_a}$	R _{实际} (m)	$\frac{R - R_{实际}}{R_{实际}}$
1	300	6.69	0.895	3.59	24.20	19.10	0.277	0.705	13.45	0.1345	0.62	0.862	+3.5%	25	-3%
2	1,000	10.00	1.000	4.00	40.00	30.00	0.260	0.750	22.50	0.2350	0.72	1.000	0%	40	0%
3	5,000	17.10	1.165	4.66	79.60	55.20	0.215	0.800	44.20	0.4420	0.86	1.195	-2.5%	80	-0.5%
4	10,000	21.54	1.231	4.92	105.50	73.50	0.203	0.802	58.70	0.5870	0.925	1.285	-4%	101	+4%
5	15,000	24.66	1.271	5.08	125.30	83.40	0.197	0.805	67.20	0.6720	0.950	1.320	-3.9%	123	+1.9%
6	40,000	34.20	1.342	5.37	185.00	119.20	0.186	0.830	99.00	0.990	1.010	1.389	-3.5%	180	+2.2%
7	100,000	46.41	1.480	5.92	274.00	169.00	0.169	0.850	144.00	1.440	1.100	1.528	-3.0%	277.5	-1.3%

* t₊ = 1.5 ($\frac{R}{C^{1/3}}$)^{1/2}

表 4

R T (ms)	C (kg)		300	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	8,000	10,000	20,000	30,000	40,000	60,000	80,000	100,000
	η	η	0.82	0.72	0.79	0.82	0.84	0.86	0.90	0.925	0.97	0.99	1.00	1.05	1.08	1.10
100	η	η	0.82	1.00	1.10	1.14	1.17	1.19	1.25	1.285	1.35	1.38	1.39	1.46	1.50	1.53
	R	R	24.20	40.00	54.00	64.80	72.30	79.60	96.40	105.50	141	165	185	221	250	274
	η	η	0.50	0.56	0.63	0.67	0.69	0.713	0.765	0.795	0.85	0.895	0.92	0.955	0.98	0.985
200	η	η	0.89	1.00	1.125	1.20	1.232	1.213	1.366	1.420	1.52	1.600	1.64	1.71	1.74	1.76
	R	R	23	40.00	56.00	67.00	75.50	84.50	106	120.00	157	191	217	265	292	323
	η	η	0.42	0.50	0.54	0.60	0.62	0.64	0.68	0.715	0.79	0.815	0.845	0.870	0.90	0.915
300	η	η	0.84	1.00	1.08	1.20	1.24	1.28	1.36	1.430	1.58	1.630	1.69	1.740	1.80	1.83
	R	R	22.00	40.00	57	69.00	82.00	89	113	126.00	170	200	227	271	309	339
	η	η	0.375	0.43	0.50	0.53	0.56	0.583	0.635	0.66	0.73	0.767	0.800	0.83	0.85	0.87
400	η	η	0.872	1.00	1.163	1.23	1.30	1.356	1.477	1.53	1.698	1.783	1.860	1.93	1.98	2.02
	R	R	21.00	40.00	58.40	72.20	83.50	94.00	119.20	132.00	184	221	254	301	341	372

表 5

$$\left. \begin{aligned}
 T = 100 \text{ ms 时} & \quad R = 2.12C^{1/2.35} \\
 T = 200 \text{ ms 时} & \quad R = 1.72C^{1/2.19} \\
 T = 300 \text{ ms 时} & \quad R = 1.625C^{1/2.15} \\
 T = 400 \text{ ms 时} & \quad R = 1.413C^{1/2.06}
 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(18)式中药量 C 的方次不再为一常数 $1/3$,而是随着建筑物自振周期的变化而变化,称为安全距离的变方次公式。

(2) 用传递函数计算安全距离的问题

如果以某一药量时的安全距离作为标准距离,那末任意药量的全安距离即为标准距离乘一函数,该函数称为传递函数。当以 $c = 1000 \text{ kg}$ 时的安全距离 R_1 作为标准距离,那末由(16)求得:

$$\frac{R_2}{C_2^{1/3}} = \frac{R_1}{C_1^{1/3}} \bar{\eta} \quad (19)$$

将(17)代入(19)得:

$$\left. \begin{aligned}
 T = 100 \text{ ms 时} & \quad R_2 = R_1 \left[(1/18.88) C^{0.4253} \right] \\
 T = 200 \text{ ms 时} & \quad R_2 = R_1 \left[(1/23.28) C^{0.4560} \right] \\
 T = 300 \text{ ms 时} & \quad R_2 = R_1 \left[(1/24.64) C^{0.4645} \right] \\
 T = 400 \text{ ms 时} & \quad R_2 = R_1 \left[(1/28.28) C^{0.4865} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由(20)求得传递函数

$$K_T = \left(\frac{1}{18.88} \sim \frac{1}{28.28} \right) C^{0.4253 \sim 0.4865} \quad (21)$$

式中: R_2 —任意药量时的安全距离(m); R_1 —药量为 1000 kg 时的安全距离(m),根据试验可取:对于砖木结构 $R_1 = 50 \text{ m}$;对于砖混结构 $R_1 = 40 \text{ m}$;对于钢筋混凝土结构 $R_1 = 30 \text{ m}$ 。

五、不同结构类型对安全距离的影响

上述生产线内安全距离的计算公式(16)是以砖混结构为标准的,对于砖木结构,根据试验在空气冲击波作用下与砖混结构相比较,木屋盖的破坏程度要比钢筋混凝土屋盖严重得多,而承重砖墙的破坏程度又轻得多。所以砖木结构的破坏以木屋盖控制,在同一破坏等级(四⁺、五⁻)的情况下,砖木结构的安全距离约为砖混结构的1.25倍,即:

$$R_2 = 5\bar{\eta} C_2^{1/3} \quad (22)$$

根据试验以及一些爆炸事故的实测资料,钢筋混凝土结构的安全距离比砖混结构为小,近似为砖混结构的0.75倍,即:

$$R_2 = 3\bar{\eta} C_2^{1/3} \quad (23)$$

六、土围对安全距离的影响

我们主要研究被保护建筑物有土围的情况。为了减小空气冲击波作用下建筑物的安全距

离, 并减轻飞散物对建筑物的作用, 工程上常在受保护建筑物的四周设置土围。目前我国通常采用 45° 的土围, 即土围的迎坡面与背坡面都是 45° 、顶部宽 1 m 、与屋檐等高或高出 1 m 。根据试验, 在距爆心同一距离的情况下, 将空气冲击波自由场的入射超压与土围内的入射超压相比较, 求得:

$$\Delta P_b = K_b \Delta P \quad (24)$$

$$K_b = 0.7755 - \frac{0.0748}{\Delta P} \quad (25)$$

式中: ΔP_b ——土围内的超压, kg/cm^2 ; ΔP ——与土围测点同一距离时相应的自由场超压, kg/cm^2 ; K_b ——土围的减压系数。

当 $\Delta P = 0.535 \sim 0.211 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 时, $K_b = 0.64 \sim 0.42$, 即被保护建筑物设置土围后可使超压降低(36~58)%, 对于地爆(爆心有土围)的情况, 如按(6)式计算安全距离可乘以(0.71~0.84)的折减系数; 同时, 设置土围后正压作用时间约为自由场的 $1/3$, 由于作用时间的缩短安全距离的折减系数为 $0.66 \sim 0.91$; 所以安全距离总的折减系数为 $0.71 \times 0.66 \sim 0.84 \times 0.91 = 0.55 \sim 0.65$, 也就是说 1 t 梯恩梯爆炸时安全距离减少45%, 而 100 t 时只减少25%, 即土围的作用随着炸药量的增大而减小。

目前世界各国如美、苏、日、英、法、西德等, 都在安全距离的规范中规定: 被保护建筑物设置土围时安全距离可减少 $1/2$ 。根据我国的试验, 这一结论只有当炸药量小于 300 kg 时才是正确的。

七、国内外生产线内安全距离的比较

我们以地面爆炸爆心有土围的情况为标准, 将中国、美、苏、英、西德及本文的 $R-C$ 曲线绘于图3, 从图3可以看到:

1. 美英两国采用了不同的破坏标准, 所以英国的安全距离比美国大。但是大致从 $C = 7.0\text{ t}$ 开始, 美英两国的 $R-C$ 曲线平行, 都符合常系数立方根的规律。在 $C \leq 7.0$ 吨时都采用了变系数立方根的计算方法。西德采用常系数立方根公式, 其安全距离介于美英之间。

2. 苏联: 1945年М. А. Садовский通过 $1-46\text{ kg}$ 梯恩梯爆炸试验, 以冲击量作为安全距离的计算依据, 求得 $R = 1.2C^{1/2}$, 当 $\theta/T < 3/8$ 时是合理的, 当 $\theta/T > 3/8$ 时该式求得的安全距离过大。

3. 中国: 国内某些部门制定安全距离规范时以 1 t 梯恩梯爆炸时的安全距离为 38 m 、 80 t 为 277 m 作为控制值, 近似表示为 $R = 1.66C^{1/2.20}$ 。我国的安全距离比苏、英为小。

4. 本文: 在考虑正压作用时间与结构动力特性的基础上推导出 $R = 4\eta C^{1/3}$, 与实测相比误差在4%左右。同时考虑了不同结构类型的影响, 使安全距离的计算更加合理, 达到节省土地的目的。

八、住宅区域安全距离

在确定爆炸危险品生产工厂或炸药(弹药)库四周的其他生产区、住宅区、村庄、大小城镇的安全距离时, 通常以门窗玻璃达到某种程度的破坏或不破坏作为控制标准。

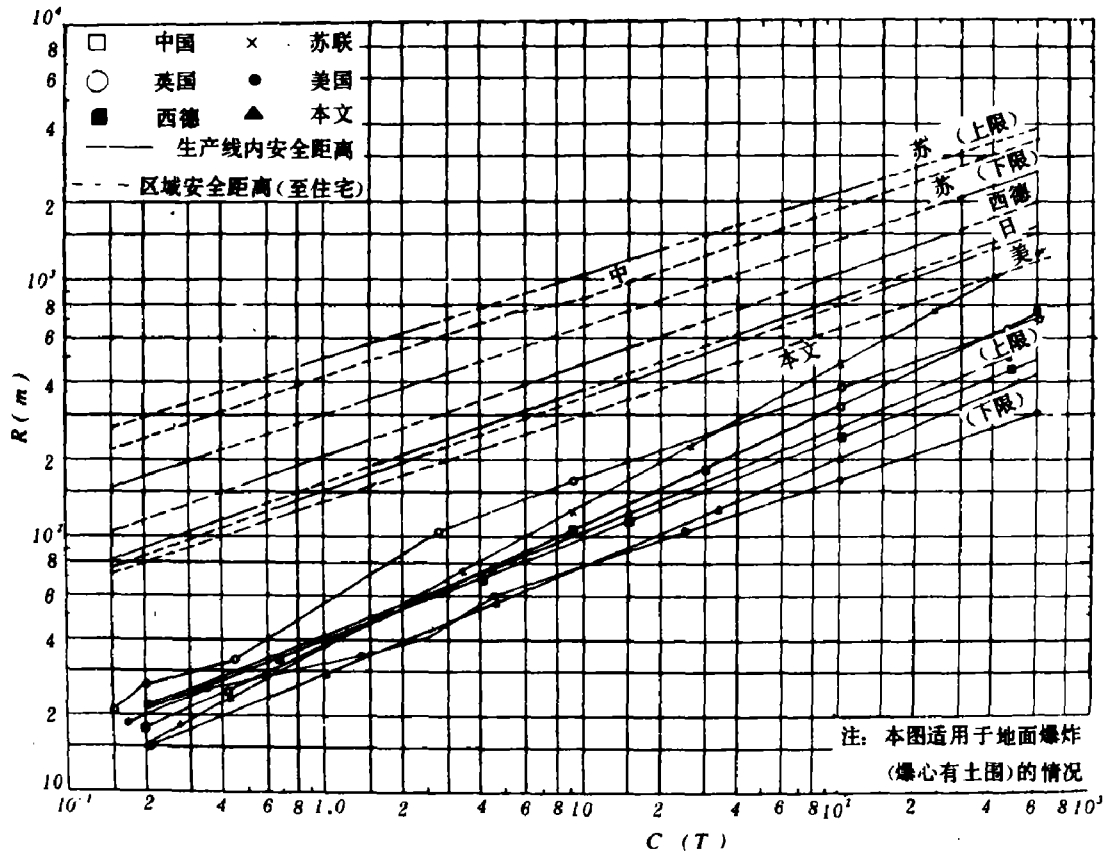


图3 国内外R-C曲线

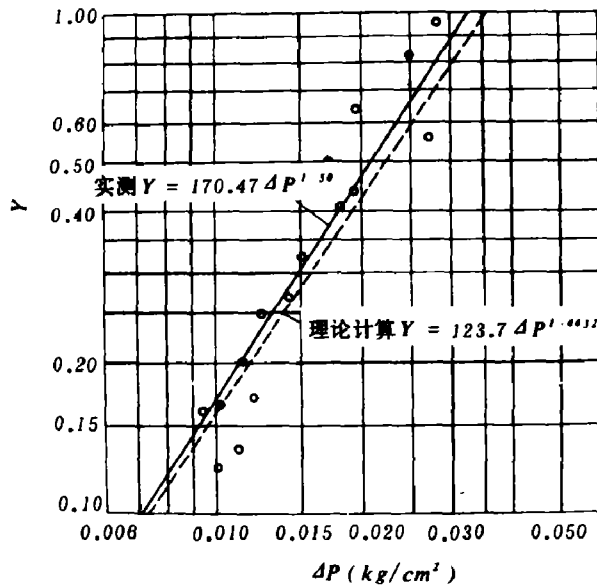


图4 $\Delta P - Y$ 关系曲线

根据实验，门窗玻璃可按四边固定的弹性薄板进行理论计算。通过理论推导可求得门窗玻璃不出现开裂时的临界反射压：

$$P_c = \delta^2 \sigma_r / 6K_b K_e b^2 \quad (26)$$

式中： P_c ——玻璃不出现开裂时的临界反射压， kg/cm^2 ； δ, b ——玻璃的厚度和宽度， (cm) ； σ_r ——玻璃的抗拉强度， (kg/cm^2) ； K_b ——四边固定弹性薄板的支座弯矩系数； K_e ——单自由度体系的弹性动力系数按文献〔4〕中图 4.2 计算，这时延性比 $\mu = 1.0$ 。所以，门窗玻璃所能承受的入射超压为：

$$\Delta P = \frac{P_c}{K_r} \quad (27)$$

式中： K_r ——空气冲击波正反射系数见 (12)。

我国生产的平板玻璃的弹性模量 $E = 525 - 1500 kg/cm^2$ 、抗拉强度 $\sigma_r = 400 \sim 600 kg/cm^2$ ，门窗玻璃的宽度按常用尺寸 30、40、50cm 计算，玻璃的长宽比为 1:1、1:1.5、1:2，对于长宽比大于 2 的情况可按等于 2 考虑。按公式 (26)、(27) 计算出的门窗玻璃不开裂的最大临界入射超压 $\Delta P = 0.0355 kg/cm^2$ 、最小临界入射超压 $\Delta P = 0.0072 kg/cm^2$ ，与试验结果相近，见表 6。

当民用建筑门窗玻璃尺寸变化范围不大时根据试验，求得 3mm 厚门窗玻璃破坏率与入射超压的关系见图 4，入射超压 ΔP 与玻璃破坏特征的关系见表 7

表 6

玻璃尺寸、宽×长 抗拉强度 σ_r t, ms 正压作用时间 kg/cm^2	30cm (宽)			40cm (宽)			50cm (宽)			
	30×30	30×45	30×60	40×40	40×60	40×80	50×50	50×75	50×100	
$t < 230 (C < 10t)$	400	0.0355	0.0265	0.0235	0.0225	0.0164	0.0152	0.0161	0.0121	0.0115
$t = 230 - 500 (10 - 100t)$	400	0.0320	0.0235	0.0211	0.0198	0.0141	0.0125	0.0135	0.0095	0.0131
$t > 500 (> 100t)$ 及核爆	400	0.0312	0.0225	0.0200	0.0182	0.0125	0.0111	0.0118	0.0081	0.0072

- 注：1. 表中的入射超压值 $\Delta P (kg/cm^2)$ 系根据 3mm 厚的平板玻璃计算的，如果玻璃厚度为 2mm，则将表中数字乘以 0.44 如果玻璃厚度为 4mm，则将表中数字乘以 1.77
2. 表中药量 C 系指地面爆炸的情况 (包括爆心有土围与无土围两种情况)，其他形式的爆炸均以 t_c 控制。

按照使用要求确定玻璃破坏的入射超压后代入 (5)、(6) 两式，就可求出住宅区域安全距离。考虑到工业炸药生产与贮存中爆炸事故是偶然发生的，同时又考虑到我国人多地少的实际情况本文建议以 $\Delta P = 0.02 kg/cm^2$ 作为标准，这时玻璃破坏率为 48%、将开裂成大块状、少数开裂成条状，但窗户附近人员不会受到伤害。求得地面爆炸 (爆心有土围) 时的安全距离系数 $K = (R/C^{1/3}) = 13.84$ ，该值与美国的住宅安全距离相近但略小。

美、苏、日、西德、中国及本文所求得的住宅区域安全距离的 $R-C$ 关系线见图 3。

表 7

$\Delta P kg/cm^2$	破坏特征
< 0.01	基本上无破坏
$0.01 \sim 0.02$	玻璃开裂成大块状
$0.02 \sim 0.05$	玻璃开裂成条状
> 0.05	玻璃呈小碎片至粉碎

九、结 论

1. 求出了各种化爆情况下空气冲击波超压与正压作用时间的计算公式, 解决了计算安全距离所需要的荷载问题。

2. 推导出化爆情况下考虑正压作用时间与结构动力特性的生产线内安全距离计算公式。并进行了数值计算, 由此推导出化爆生产线内安全距离的相似关系式及传递函数。

3. 根据试验求出了土围的减压系数, 从而使生产线内安全距离的计算中可以定量地考虑土围的作用。

4. 根据试验求出了不同结构类型对生产线内安全距离的影响。

5. 根据试验与理论分析求出了门窗玻璃临界超压值的计算公式和门窗玻璃破坏率与入射超压的关系, 为计算住宅区域安全距离提供了实验数据与理论根据。

本文所求得的各种爆炸(爆破)情况下空气冲击波荷载的经验公式、推导出的安全距离计算公式都与试验结果相近。而且按本文方法求出的生产线内安全距离与住宅区域安全距离比国内外现有资料都低, 这样就可保证安全的条件下节省土地。

本文在成文过程中承兵器部五院何诚志付院长、北京大学黄敦教授指导、在定稿过程中中国科学院工程力学研究所熊建国研究员多次审定 本文, 并提出许多宝贵意见, 定稿后又蒙七七工程王川总工程师和中国科学院岩土所朱瑞庚主任审阅, 特此致谢!

参 考 文 献

- [1] Ф. А. 鲍姆, 爆炸物理学, 科学出版社 (1963), 480.
- [2] Sound, A. R., AD 619241, (1965).
- [3] Charles, N. Kingery et al., AD 4081414 (1976).
- [4] Allgood, J. R., Swihart, G. R., (吴铭译), 受弯构件在静力和爆炸荷载作用下的设计, 科学出版社 (1977), 30.
- [5] Кузнецов, Г. В., Ульбщ, В. П., Горный журнал, 5 (1973), 46.
- [6] 水岛容二郎, 工业火药, 第31卷 (通卷135号) 第6册, 昭和45年, 361.
- [7] Бабокин И. А. И ДР, Недра, Москва, (1976), 187.

SAFE DISTANCE UNDER AIRBLAST LOADING

Li Zheng

Abstract

In the paper, some results of experimental and theoretical studies and numerical calculation carried out in the last twenty years to determine the safe distance under airblast loading are presented.