

各种炸药的殉爆安全距离

李 铮

(机电部工程设计研究院 北京 100053)

项续章 郭梓熙

(机电部二〇四研究所 西安 710061)

摘要 为了保证炸药生产与贮存中的安全,我们对各种单质散装炸药进行了一系列殉爆试验,主发装药的药量为 $1\sim 10^5\text{kg}$ 、被发装药为 $1\sim 50\text{kg}$ 。通过试验求出了殉爆的最小超压和不殉爆的最大超压、平均殉爆时间,以及温度、冲击、装药密度、建筑物、土围对殉爆的影响,从而确定出各种炸药的殉爆安全距离。

关键词 殉爆 殉爆安全距离 空气冲击波 冲击能 温度

1 引言

在炸药生产与贮存中保证炸药不殉爆是最基本的要求。所谓殉爆就是炸药爆炸后能够激发一定距离处另一炸药的爆炸。先爆炸的炸药称为主发装药、被激发的装药称为被发装药,被发装药殉爆概率为100%时,主发装药与被发装药之间的距离称为殉爆距离 R_{100} ,被发装药殉爆的概率为0%时,主发装药与被发装药之间的距离称为殉爆安全距离 R_0 。

影响殉爆的主要因素有主发装药产生的冲击波超压、作用时间和温度、火球半径、爆轰产物高速粒子的冲击能量,被发装药的感度、几何尺寸,被发装药对不同能量激发形式的响应等。

至于殉爆机理,从我们试验情况来看,对于不敏感的炸药如梯恩梯(TNT),主要是由于爆轰产物的冲击使被发炸药产生热点,从而导致爆炸或爆轰。爆轰产物是一种混合物既有固体颗粒如炭微粒又有各种气体如 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 O_2 、 N_2 等。对于较敏感的炸药如黑索金(RDX),主要是空气冲击波超压和正压持续时间的作用使被发炸药产生热点,从而导致爆炸或爆轰。

我们从工程的实际需要出发,对梯恩梯、黑索金、泰安、特屈儿、黑火药等单质散状炸药进行了一系列试验,用压电晶体传感器系统测定空气冲击波超压,用强震仪测定爆炸近区地面振动加速度与速度,用7.62mm 步枪子弹和57mm 炮弹测定撞击动能、用探测靶测定殉爆时间,从而解决了殉爆安全距离问题。

2 空气介质中的殉爆相似律

主发装药的爆轰过程及产物运动过程可用药量 W 、装药密度 ρ_0 、爆速 D_{CJ} 、爆压 p_{CJ} 、质点速度 u_{CJ} 、爆容 $V_{CJ}(\rho_{CJ})$ 、爆温 T 、爆轰产物运动时的压力 p_B 、密度 ρ_B 、质点速度 u_B 和多方

1992年4月24日收到原稿,8月11日收到修改稿。

次指数 γ ; 在这些物理量中并不都是独立的物理量, 因为爆轰波阵面要遵守质量守恒、动量守恒、能量守恒关系, 再加上 C-J 稳定爆轰条件, 这样只要知道 ρ_0 和爆速 D_{CJ} , 其它的爆轰过程的量就可导出。同样在计算产物运动时可以把 p_{CJ} 、 ρ_{CJ} 、 u_{CJ} 作为初始条件, 再加上状态方程就可以导出 p_B 、 ρ_B 、 u_B , 所以对主发装药来说独立的物理量只有 ρ_0 、 D 、 γ 、 W 。

主发装药在空气中爆轰, 首先是爆轰波入射到空气介质中产生空气冲击波, 其后面是高压产物流的膨胀运动, 冲击波阵面也遵守质量守恒、动量守恒、能量守恒关系。所以只要知道空气的初始密度 ρ_{0r} 、初始压力 p_{0r} 、绝热指数 K 就可以求得距离 R 处的各种参数如压力 p 、质点速度 u 、冲击波速度 s 等。所以对空气介质来说, 独立的物理量是 ρ_{0r} 、 p_{0r} 、 K 、 R 。

假设被发装药是规则形状的裸体炸药, 引起被发装药爆炸首先与传给被发装药的能量有关, 象入射冲击波的压力、正压作用时间、产物流的质点速度、温度等。另外, 还与被发装药的物理化学性质有关, 象装药密度 ρ_a 、药包尺寸 l 、炸药的导热率 τ 、比热 C 、活化能 E 、指前因子 Z 以及临界温度 T_c 等。在这些参量中入射能量与主发装药和介质性质有关, 因此可用主发装药的独立物理量来表示。所以对于被发装药来说, 独立的物理量是 ρ_a 、 l 、 C 、 τ 、 E 。

综上所述, 对整个殉爆系统来说, 独立的物理量有 ρ_0 、 D_{CJ} 、 γ 、 W 、 ρ_{0r} 、 p_{0r} 、 R 、 ρ_a 、 l 、 C 、 τ 、 E 、 Z 。其中 R 为因变量, 是主发装药表面到被发装药表面的距离。因为我们是研究空气介质中的殉爆, 所以空气介质密度 ρ_{0r} 、初始压力 p_{0r} 、绝热指数 K 都不变, 这样就只有 10 个因变量了, 可以写成:

$$R = f(\rho_0, D, \gamma, W, \rho_a, l, C, \tau, E, Z) \quad (1)$$

这些物理量的量纲如下:

$$[R] = L, [\rho_0] = ML^{-3}, [D] = LT^{-1}, [W] = M, [\rho_a] = ML^{-3},$$

$$[l] = L, [C] = L^2K^{-1}T^{-2}, [\tau] = LMK^{-1}T^{-3}, [E] = L^2MT^{-2}m_0l^{-1}, [Z] = T^{-1} \quad (2)$$

量纲分析的基本单位是长度 L 、质量 M 、时间 T 、热力学温度 K 和物质的量 m_0 , 因此选 ρ_0 、 D 、 l 、 c 、 E 为基本量, 根据 π 定理 $n=5$, 可以组成 5 个无量纲量。

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (3)$$

现分别求无量纲量 $\pi_1 \sim \pi_5$, 例如: $\pi_1 = W/(\rho_0 D^3 l^3 C^4 E^e)$, 其中: a, b, c, d, e 是待定的指数; 因 π_1 是无量纲量, 所以分子、分母的量纲应相等。 $M = [ML^{-3}]^a [LT^{-1}]^b [L]^c [L^2K^{-1}T^{-2}]^d [L^2MT^{-2}m_0l^{-1}]^e$, 则求得 $a=1, b=0, c=3, d=0, e=0$, 所以:

$$\pi_1 = \frac{W}{\rho_0 l^3} \quad (4)$$

同理求得: $\pi_2 = \rho_a/\rho_0, \pi_3 = \tau/\rho_0 D^3 l^3 C^{-1}, \pi_4 = Z/Dl^{-1}, \pi_5 = \gamma, \pi = R/l$ 。令:

$$\pi'_3 = \pi_3 \times \pi_4^3 = \frac{\tau C Z^3}{\rho_0 D^6}, \pi'_4 = \pi_4 \times \pi_3^{1/3} = \frac{Z}{D^2} \sqrt{\frac{\tau C}{\rho_0}}, \text{ 则}$$

$$\frac{R}{l} = f\left[\gamma, \frac{W}{\rho_0 l^3}, \frac{\rho_a}{\rho_0}, \frac{\tau C Z^3}{\rho_0 D^6}, \frac{Z}{D^2} \sqrt{\frac{\tau C}{\rho_0}}\right] \quad (5)$$

由于试验中主发装药和被发装药的品种不变, 装药密度相同, 这样 $\rho_a = \rho_0$ 。反映炸药性质的其它物理量 D 、 C 、 τ 、 E 、 Z 都不变, 则 ρ_a/ρ_0 、 γ 、 $\tau C Z^3/\rho_0 D^6$ 、 $(Z/D^2)(\tau C/\rho_0)^{3/2}$ 在每次试验中就相等了, 则有:

$$\frac{R}{l} = f\left(\frac{W}{\rho_0 l^3}\right) \quad (6)$$

相似参数 $W/\rho_0 l^3$ 的物理意义是主发药量与被发药量之比。由于被发装药的尺寸、密度总是已知的,所以

$$R = f(W) \quad (7)$$

这就是说函数 f 的具体形式通过试验确定,当以空气冲击波超压作为判别殉爆的主要参数时殉爆距离与主发药量为立方根关系。

3 试验结果

试验是在野外平整后的场地上进行的,主发装药放置在中心,在其上下、左右互相垂直的四个方向布置被发装药,各被发装药测线之间的夹角为 90° ,以保证其一测线上被发装药殉爆后不引起相邻的被发装药爆炸。殉爆试验平面示意图见图 1。

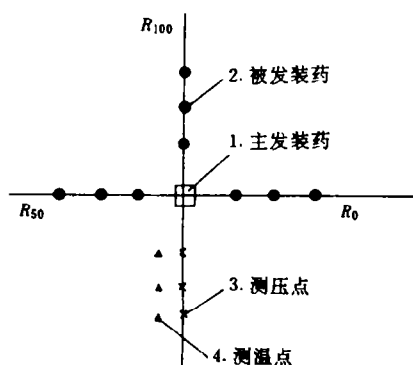


图 1 殉爆试验平面示意图

Fig. 1 Sketch of unsympathetic detonation test

1. Acceptor charge, 2. Donor charge, 3. Overpressure point, 4. Temperature piont

试验采用的主发装药与被发装药都是散装单质炸药,装药密度 $\rho = 0.85 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。试验方法是将被发装药装在一层牛皮纸做成的圆柱筒内,圆柱的高度与直径的比值为 $1:1$,被发装药量为 $1 \sim 47 \text{ kg}$,在被发装药下面垫放铝板,起爆后观察被发装药下面的铝板,以判别是否殉爆。当铝板无变形又未熏黑时认为被发装药燃烧,当铝板未熏黑而出现变形时认为被发装药殉爆。与此同时,也对被发装药下面是否出现爆坑进行了检查,如出现爆坑,也就肯定殉爆了。试验结果列于表 1。

试验中测定了被发装药殉爆时间,地面爆炸情况下被发装药殉爆时间列于表 2。

试验时实测了 TNT 和 RDX 殉爆时的最小超压和不殉爆时的最大超压,见表 3。

试验中实测了散装 TNT 被发药包中的冲击波速度和散装 TNT 的临界起爆压力,见表 4。

散装梯恩梯被发药包单位面积上所能承受的动能的撞击试验结果见表 5。

表 1 各种单质炸药殉爆试验数据表
Table 1 Various simple explosives testing data of sympathetic detonation

序号	主发装药		距离 R/m	超压 $\Delta p/kPa$	温度 $T/^{\circ}C$	爆否	被发装药		$\frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}/(\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}})$
	名称	药量 W/kg					名称	药量/kg	
1	TNT	1.0	0.29	11200 ^{b)}		爆	TNT	1.0	0.2900
	TNT	1.0	0.40	8000 ^{b)}		未	TNT	1.0	0.4000
2	TNT	1.60	0.40	9400 ^{b)}		爆	TNT	1.0	0.3420
	TNT	1.60	0.52	7250 ^{b)}		未	TNT	1.0	0.4445
3	TNT	3.20	0.46	10400 ^{b)}		爆	TNT	1.0	0.3122
	TNT	3.20	0.65	7250 ^{b)}		未	TNT	1.0	0.4411
4	TNT	6.40	0.65	9200 ^{b)}		爆	TNT	3.5	0.3500
	TNT	6.40	0.90	6600 ^{b)}	1550	未	TNT	3.5	0.4847
5	TNT	25.60	0.84	11400 ^{b)}		爆	TNT	3.5	0.2850
	TNT	25.60	1.37	6900 ^{b)}		未	TNT	3.5	0.4548
6	TNT	51.20	1.01	12000 ^{b)}		爆	TNT	3.5	0.2720
	TNT	51.20	2.00	6300 ^{b)}	2080	未	TNT	3.5	0.5386
7	TNT	102.4	1.34	7450 ^{b)}		爆	TNT	3.5	0.2864
	TNT	102.4	2.80	5200 ^{b)}		未	TNT	3.5	0.5948
8	TNT	141.0	2.10	8000 ^{b)}		爆	TNT	47	0.4035
	TNT	141.0	3.10	5250 ^{b)}		未	TNT	47	0.5950
9	TNT	188	2.30	7400		爆	TNT	47	0.4015
	TNT	188	3.80	4700		未	TNT	47	0.6633
10	TNT	376	2.90	8000 ^{b)}		爆	TNT	47	0.4018
	TNT	376	4.50	5000 ^{b)}		未	TNT	47	0.6235
11	TNT	495	2.70	9400 ^{b)}	1520	爆	TNT	47	0.3413
	TNT	495	4.60	5850		未	TNT	47	0.5815
12	TNT	1485	4.70	7800 ^{b)}	1580	爆	TNT	47	0.4120
	TNT	1485	6.70	3740	1250	未	TNT	47	0.5872
13	TNT	3995	7.00	7200	1430	爆	TNT	47	0.4411
	TNT	3995	11.00	4700 ^{b)}	1250	未	TNT	47	0.6932
14	TNT	10000 ^{a)}	19.00	3230 ^{b)}		未	TNT	20	0.8819
15	TNT	40000 ^{a)}	20.00	5350 ^{b)}		未	TNT	20	0.5848
16	TNT	100000 ^{a)}	40.00	3200 ^{b)}		未	TNT	90	0.8617

续表 1 Table 1 (Continued)								
17	RDX	10	3.00	1250	爆	RDX	5	1.3925
	RDX	10	4.80	520 ^{b)}	未	RDX	5	2.2279
18	RDX	25	4.00	1560	爆	RDX	5	1.3680
	RDX	25	6.50	570	未	RDX	5	2.2230
19	RDX	90	6.50	1930	爆	RDX	20	1.4504
	RDX	90	10.00	520	未	RDX	20	2.2314
20	RDX	135	7.50	1570	爆	RDX	20	1.4620
	RDX	135	12.00	760	未	RDX	20	2.3392
21	TNT	100000 ^{a)}	100	500 ^{b)}	未	RDX	55	2.2894
22	TNT	100000 ^{a)}	100	500 ^{b)}	未	PETN	50	2.3392
23	TNT	100000 ^{a)}	60	1560 ^{c)}	爆	特屈儿	40	1.3138
	TNT	100000 ^{a)}	80	730 ^{b)}	未	特屈儿	40	1.7518
24	TNT	100000 ^{a)}	60	1560 ^{b)}	爆	黑火药	75	0.9280
	TNT	100000	80	730 ^{b)}	未	黑火药	75	1.2373

注:a)爆心有土围,b)按殉爆试验的超压拟合公式的计算值,c)符号:TNT——梯恩梯,RDX——黑索金,PETN——泰安。

表 2 TNT 地面爆炸殉爆时间试验数据表

Table 2 Test data of sympathetic detonation time of TNT ground explosion

序 号	主发药量 W/kg	被发药量 /kg	至爆心距离 R/m	数据个数	平均殉爆时间 /μs
1	0.30	0.30	0.088	2	31.70
2	0.30	0.30	0.138	9	57.80
3	0.50	0.50	0.095	5	25.20
4	0.50	0.50	0.145	10	28.50
5	0.50	0.50	0.195	8	44.40
6	141	47	2.100	3	29.20
7	188	47	2.300	3	20.30
8	376	47	3.500	1	36.70
9	495	47	3.800	1	67.00
10	495	47	5.00	1	127.00
11	495	47	5.00	1	165.00
12	3995	47	8.50	2	211.00
13	3995	47	9.40	2	457.00

表 3 TNT、RDX 殉爆最小超压与不殉爆最大超压

Table 3 The minimum overpressure of sympathetic detonation and maximum overpressure of unsympathetic detonation for explosives TNT and RDX

序号	主发装药		被发装药		殉爆的最小超压	不殉爆的最大超压
	名称	药量/kg	名称	药量/kg	$\Delta p/\text{kPa}$	$\Delta p/\text{kPa}$
1	TNT	141	TNT	47	8000	5500
2	TNT	188	TNT	47	7400	4700
3	TNT	376	TNT	47	8000	4340
4	TNT	495	TNT	45	9400	5850
5	TNT	1485	TNT	45	7800	3740
6	TNT	3995	TNT	47	7200	4700
7	TNT	4230	TNT	45	5300	4000
8	RDX	10	RDX	5	1250	520
9	RDX	25	RDX	5	1560	570
10	RDX	90	RDX	20	1930	520
11	RDX	135	RDX	20	1570	760

表 4 散装 TNT 中的冲击波速度和临界起爆压力

Table 4 Velocity of shock wave and critical pressure in bulk TNT

序号	主发装药 W/kg	至爆心距离 R/m	靶针间距 $/\text{mm}$	时间 $/\mu\text{s}$	冲击波平均速度 $/(m/s)$	冲击波临界起爆压力 ^{a)} $/\text{kPa}$	爆否
1	0.50	0.145	50	56.5	885	2.7	爆
			50	32.0	1560		
			175	185	946		
2	495	5	175	244	717	2.3	爆
			175	40	4380		
			175	406	431		
3	3995	11	175	344	509	0.5	未
			175	472	371		

a) 系按 $p=\rho_e w_e v/(1+\frac{\rho_e w_e}{\rho_i w_i})$, v ——撞击体速度, w_e ——炸药中冲击波速度, ρ_e ——炸药密度, ρ_i ——撞击体密度, w_i ——撞击体内冲击波速度, p ——临界起爆压力。

表 5 散装梯恩梯撞击试验数据表
Table 5 Data of impacting tests of bulk TNT

序 号	撞击速度 /(m/s)	单位面积动能 /(kJ·m/cm ²)	试验结果
1	861	36.32	爆炸
2	674	22.25	爆炸
3	645	20.38	爆炸
4	467	10.68	爆炸
5	382	7.15	燃烧
6	319	4.98	未爆
7	320	5.01	爆炸
8	293	4.26	未爆

4 殉爆距离及其影响因素

4.1 殉爆距离计算公式

散装 TNT 殉爆试验数据列于表 6。
散装 RDX 殉爆试验数据列于表 7。
根据表 6 中数据采用幂函数形式求得散状 TNT 殉爆距离的计算公式：

表 6 散装 TNT 的 R_{100} 、 R_{50} 数据表^{a)}
Table 6 Test data of R_{100} 、 R_{50} for bulk TNT

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
W/kg	1	1.6	3.2	6.4	25.6	51.2	102.4	141	188	376	495	1485	3795
R_{100}/m	0.29	0.40	0.46	0.65	1.12	1.50	2.00	2.20	2.40	3.00	3.38	5.50	8.20
R_{50}/m	0.35	0.44	0.55	0.75	1.37	1.65	2.40	2.50	2.80	3.70	4.10	6.20	9.20

a) 主发装药和被发炸药均为散装 TNT,装药密度 $\rho=0.85g/cm^3$ 。

表 7 散装 RDX 的 R_{100} 、 R_{50} 数据表^{a)}
Table 7 Test data of R_{100} 、 R_{50} for bulk RDX

序 号	1	2	3	4	5
W/kg	10	25	45	90	135
R_{100}/m	3	4	5	6.5	7.5
R_{50}/m	3.7	5	6	7.5	9.4

a) 主发装药和被发装药均为散装 RDX,装药密度 $\rho=1.00g/cm^3$ 。

$$\left. \begin{aligned} R_{100} &= 0.3080W^{0.3937} \\ R_{50} &= 0.3581W^{0.3960} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} (r &= 0.9991) \\ (r &= 0.9989) \end{aligned} \quad (8)$$

同理根据表 7 中数据采用幂函数形式求得散状 RDX 殉爆距离的计算公式

$$\left. \begin{aligned} R_{100} &= 1.30W^{0.3560} \\ R_{50} &= 1.64W^{0.3446} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: R_{100} 、 R_{50} ——殉爆概率为 100% 和 50% 时的殉爆距离(m), W ——主发装药的炸药量(kg)。

散装 TNT 在超压 $\Delta p = 72 \sim 120 \text{ kg/cm}^2$ 情况下就殉爆, 如果采用超压作为主要判据, 则

$$\left. \begin{aligned} R_{100} &= K_{100}W^{\frac{1}{3}} \\ R_{50} &= K_{50}W^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: R_{100} 、 R_{50} 、 W ——同公式(9), K_{100} 、 K_{50} ——见表 8。

表 8 散装单质炸药殉爆系数 K_{100} 、 K_{50}

Table 8 Factors of sympathetic detonation of simple bulk explosives K_{100} 、 K_{50}

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
主发装药	TNT	TNT	TNT	TNT	TNT	RDX	PETN	特屈儿	黑火药 ^{a)}	胶质炸药 ^{b)}
被发装药	TNT	RDX	PETN	特屈儿	黑火药	RDX	PETN	特屈儿	黑火药	胶质炸药
K_{100}	0.52	1.37	—	1.28	1.28	1.46	—	1.31	0.93	1.59
K_{50}	0.58	—	—	—	—	1.83	—	—	—	1.65

a) 黑火药成份为硝酸钾: 硫黄: 木炭(75: 10: 5); b) 胶质炸药成份: 含硝酸脂 40%。

4.2 温度对殉爆的影响

温度对炸药的作用即热感度, 通常用爆发点试验来表示。所谓爆发点就是指在一定的试验条件下, 将炸药加热到爆炸时加热介质的最低温度, 一般用 5s 或 300s 延滞期爆发点来表示炸药的热感度。象 TNT 炸药 5s 延滞期爆发点为 475℃, 300s 延滞期爆发点为 290℃。而 RDX 炸药 5s 延滞期爆发点为 260℃、300s 延滞期爆发点为 230℃。在这里不准备用热爆炸理论对炸药在高温作用下的引爆时间的计算结果与炸药爆发点进行分析比较。我们只从试验结果来说明温度对殉爆的影响。TNT 被发药包附近实测的温度范围是 700~1000℃, 这时 47kg 的球形药包的实测引爆时间为 29.2~457μs, 而纯高温作用引起 TNT 爆炸的引爆时间为 20~30s, 两者相差几个数量级。高速摄影资料表明: 放置在温度高达 1000~1200℃的 TNT 药包因无火焰作用而未燃烧或爆炸, 故在纯高温作用下(无火焰、无爆炸生成物)不能引起 TNT 殉爆。

另外, 散装 RDX、PETN、特屈儿、黑火药等炸药殉爆处的温度都在 700℃以下, 其实测引爆时间又远小于爆炸所需要的引爆时间, 因此温度作用不是引起黑索金、泰安、特屈儿、黑火药殉爆的原因。

4.3 撞击对殉爆的影响

由表 5 可以看到: 当作用于散装梯恩梯上的动能 $E \geq 5.01 \text{ kN} \cdot \text{m/cm}^2$ 时将发生爆炸,

当 $E < 4.26 \text{ kN} \cdot \text{m/cm}^2$ 时将不发生爆炸。而当一般的房屋倒塌时,如屋面板质量 2000 kg 、屋面板面积为 $0.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} = 2.25 \text{ m}^2$ 、自高度 5 m 处落下,则屋面板倒塌时产生的比动能 $E = 0.0044 \text{ kN} \cdot \text{m/cm}^2$,所以屋面板或墙倒塌不会导致梯恩梯殉爆。我们在进行试验时也出现过钢筋混凝土屋面板倒塌砸在泰安炸药上而未引起爆炸的实例。

另外,我们对重量 50 kg 的散装梯恩梯 ($\rho = 0.85 \text{ g/cm}^3$) 进行撞击试验时,当撞击速度为 $320 \sim 293 \text{ m/s}$ 时可发生爆炸,当被发药包中冲击波速度为 $830 \sim 890 \text{ m/s}$ 时可发生爆轰或爆燃。理论计算出的临界起爆压力为 0.23 GPa 与试验结果该处炸药爆炸相符。

4.4 被发装药密度变化对殉爆的影响

被发装药(TNT)密度变化的殉爆试验结果见表9。

由表9中的数据进行拟合求得:

$$R_{100} = 178.9 - 203.5\rho + 59.8\rho^2 \quad (11)$$

式中: R_{100} ——殉爆概率为 100% 的殉爆距离(cm); ρ ——被发装药密度(g/cm^3)。

由表9中的数字可以看到殉爆距离随着被发装药密度的增加而减小。

表9 不同密度被发装药(TNT)的殉爆距离试验值^{a)}

Table 9 The distance of sympathetic detonation to various densities TNT

序 号	1	2	3
主发装药重量/g	100	100	100
主发装药密度/(g/cm^3)	1.57	1.57	1.57
被发装药重量/g	100	100	100
被发装药密度/(g/cm^3)	1.57	1.40	1.00
殉爆距离/cm	6.8	11.2	35.2

a) 本表中数据系赵博森硕士研究成果。

4.5 振动对殉爆的影响

从试验的各种炸药的情况来看,在地面振动加速度 $a \leq 500 \text{ g}$,地面振动垂直速度 $v_{\perp} \leq 250 \text{ cm/s}$ 的情况下,均未因振动而发生爆炸。

4.6 殉爆概率与殉爆距离的关系

根据沈承珏副教授对代那买特炸药试验数据的分析,殉爆距离 R 与殉爆概率呈线性关系见图2。

5 殉爆安全距离

从工程使用要求出发,我们最关心的是炸药之间不殉爆的距离,即通常所说的殉爆安全距离。

5.1 散状 TNT 的殉爆安全距离

将表1中序号1~13中的数据用最小二乘法拟合求得:

$$R_0 = 0.4210W^{0.3942} \quad (\text{相关系数 } r = 0.9978) \quad (12)$$

由于散状 TNT 在超压 $\Delta p \leq 3.74 \sim 5.85 \text{ MPa}$ ($37.4 \sim 58.5 \text{ kgf/cm}^2$) 情况下就不殉爆。如

以超压作为判别殉爆的主要参数,可采用 R_0
 $=KW^{\frac{1}{3}}$ 形式,从表 1 可以看到 $K=0.40\sim$
 0.6932 ,如取 K 的最大值,则:

$$R_0 = 0.6932W^{\frac{1}{3}} \approx 0.70W^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式中: R_0 ——殉爆安全距离(m); W ——主发装药(散装 TNT)的炸药量(kg)。

5.2 散装 RDX 的殉爆安全距离

同理根据表 1 中数据求得:

$$R_0 = 2.2263W^{0.3363} \quad (\text{相关系数 } r = 0.9999) \quad (14)$$

或

$$R_0 = 2.34W^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

式中: R_0 ——同公式(13); W ——主发装药(散装 RDX)的炸药量(kg)。

5.3 散装泰安、特屈儿、黑火药的殉爆安全距离

从试验结果来看,散装泰安、特屈儿、黑火药是在爆炸产物生成区以外殉爆的,超压对殉爆起主要作用,可采用立方根形式,即:

$$R_0 = KW^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

式中: R_0 ——同公式(13); K ——不殉爆系数($\text{m}/\text{kg}^{\frac{1}{3}}$),见表 10。

5.4 各种散装单质炸药的殉爆安全距离

综上所述,不敏感的炸药如散装 TNT,由于爆炸产物的作用而殉爆,而较敏感的炸药如散装 RDX、泰安(PETN)、特屈儿、黑火药,是由于超压的作用而殉爆。因此,我们可将公式(13)~(16)统一用立方根形式来表达,即:

$$R_0 = KW^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

式中: R_0 ——殉爆安全距离(m); W ——主发装药的炸药量(kg); K ——不殉爆系数见表 10 ($\text{m}/\text{kg}^{\frac{1}{3}}$)。

表 10 单质散装炸药不殉爆系数 K

Table 10 Factors of sympathetic detonation of simple bulk non-explosives K

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
主发装药	TNT	TNT	TNT	TNT	TNT	RDX	PETN	特屈儿	黑火药	代那买特
被发装药	TNT	RDX	PETN	特屈儿	黑火药	RDX	PETN	特屈儿	黑火药	代那买特
$K/(\text{m}/\text{kg}^{\frac{1}{3}})$	0.70	2.14	2.14	1.72	1.72	2.34	2.34	1.75	1.24	1.78

5.5 土围对殉爆安全距离的影响

我们主要研究被保护建筑物有土围的情况,目前广泛采用的土围其迎坡面与背坡面都是 45° ,土围顶部宽 1m,与屋檐同高或高出 1m。根据试验在距爆心同一距离的情况下,空气冲击波自由场入射超压与土围内的入射超压的关系是:

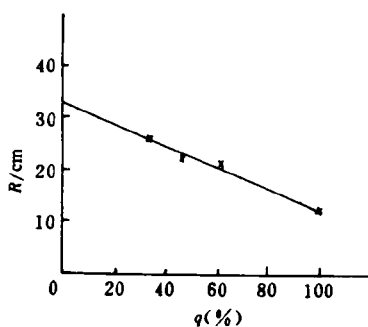


图 2 $R \sim q$ 曲线

Fig. 2 R Versus q

$$\Delta p_b = K_b \Delta p \quad (18)$$

$$K_b = 0.7755 - \frac{0.0748}{\Delta p} \quad (19)$$

式中: Δp_b ——土围内的超压(kgf/cm²); Δp ——与土围内测点同一距离时相应的自由场超压(kgf/cm²); K_b ——土围的减压系数。计算后,超压值换算成法定计量单位值。

一般情况下设置土围可使超压降低30%~50%,另外,土围对减弱爆炸火球及爆炸产物的作用也具有明显效果。从表1可以看到散装梯恩梯无土围地面爆炸时其不殉爆系数 $K=0.6932$,而有土围时 $K=0.5848$,殉爆安全距离可减少16%。

6 几点结论

1. 影响殉爆的主要因素:从我们试验情况来看,温度、振动和低冲击能(房屋倒塌)都不是造成殉爆的主要原因。在爆炸火球范围以内被发炸药全部殉爆,对于不敏感的炸药如TNT,爆炸生成物的作用是造成散装TNT殉爆的主要原因;而较敏感的炸药如RDX,空气冲击波超压和正压持续时间作用是造成殉爆的主要原因。

2. 殉爆距离和殉爆安全距离公式的形式以立方根形式 $R=KW^{\frac{1}{3}}$ 为优,因为该式把各种炸药的殉爆距离和殉爆安全距离与超压联系起来。

3. 本文的研究成果是以工程试验为依据的,试验炸药量变化范围从1kg到100t,可供实际工程使用。

向给作者以帮助的陈树澜、曹承昭高级工程师深切致谢!

VARIOUS EXPLOSIVES OF SAFETY DISTANCE OF UNSYMPATHETIC DETONATION

Li Zheng

(*Engineering Design and Research Institute Ministry of Machinery
and Electronic Industry, Beijing, 100053, China*)

Xiang Xuzhang, Guo Zixi

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Ministry of Machinery
and Electronic Industry, Xi'an, 710061, China*)

ABSTRACT To assure the safety in manufacturing and storing of explosives, we have carried out a series sympathetic detonation test of various simple explosives in bulk-load state. The donor charges weighing from 1 to 10⁵ kg, while the acceptor weighing from 1 to 50 kg. Through experiments we obtained the minimum overpressure to induce sympathetic detonation, the maximum overpressure not to induce sympathetic detonation, and the following factors which influences on the sympathetic detonation: temperature, shock wave, variety of charge density, buildings, earth bank, etc., so that we can determine the safety distances of various simple explosives, respectively, to protect against sympathetic detonation.

KEY WORDS sympathetic detonation, safety distance of unsympathetic detonation, air shock wave, energy of shock, temperature