爆　炸　与　冲　击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0255

圆柱形弹药空气中爆炸相似性规律*

陈　材[1]，石　全[1]，尤志锋[1]，郭驰名[1]，戈洪宇[2]
（1. 陆军工程大学，河北 石家庄 050003；
2. 中国白城兵器试验中心，吉林 白城 137001）

摘要：针对战场损伤试验中弹药费用高、使用风险系数大的问题，采用量纲分析的方法对圆柱形弹药相似性模型的建立方法进行分析，研究原型同相似性模型之间冲击波峰值压力的关系，利用有限元仿真软件 AUTODYN 对冲击波传播过程进行数值仿真，并结合实弹试验数据对相似模型的有效性进行验证。研究结果表明，AUTODYN 仿真结果同量纲分析结果一致，同时与实弹试验结果也吻合较好，说明在实际试验中可以使用缩比模型替代原型进行试验。该研究为弹药缩比模型在战场损伤试验中的使用提供了理论基础，具有一定的工程价值。

关键词：战场损伤试验；相似理论；量纲分析；冲击波
中图分类号：O381; TP391.9　　**国标学科代码：**13035　　**文献标志码：**A

为打赢高新技术条件下的现代战争，提升部队实战化水平，要求部队的作战训练更贴近实战[1]。因此在战场损伤试验中，使用制式弹药对实际装备进行打击毁伤试验，成为了研究装备损伤规律、提高装备战场环境下生存力的重要途径[2]。然而对于制式弹药而言：一方面其造价高昂，造成试验成本过高；另一方面其毁伤威力大，造成试验风险系数过高，同时对装备的损伤程度不易把控，无法高效获取损伤数据。这两方面因素共同造成了目前装备战场损伤试验费效比过高、无法广泛开展的问题。因此，研究弹药空气中爆炸相似性问题，探寻制式弹药替代物的选择与建立方法，具有十分重要的现实意义。

目前，采用相似理论对炸药空气中爆炸进行研究，目的多为研究冲击波的毁伤机理及优化其理论公式。杨亚东等[3-4] 以相似理论为基础，针对毁伤对象研究了利用相似模型对原模型毁伤规律进行分析的方法，吕祥锋等[5] 通过建立相似模拟试验模型，研究了在不同装药量下巷道破坏规律，张玉磊等[6] 研究了不同量级 TNT 裸装药在空气中爆炸的冲击波参数相似规律。也有学者对炸药在水下爆炸的相似性规律进行了研究：荣吉利等[7] 和刘文韬等[8] 利用数值仿真方法，研究了水下爆炸试验中缩比模型的建立方法及冲击波的毁伤规律。

本文以相似理论为理论基础，采用量纲分析的方法，研究圆柱形弹药战斗部的相似性规律，分析不同缩比模型同原型之间冲击波峰值压力的关系，并利用有限元仿真软件 AUTODYN 进行仿真计算，在此基础上，使用实弹试验所采集数据同缩比模型仿真数据进行对比分析，以此验证相似性模型的正确性。

1　量纲分析

1.1　弹药空气中爆炸强度影响因素分析

弹药在空气中爆炸时，所产生的冲击波强度主要受到装药、空气和弹药壳体性质的影响。因此冲击波的强度特征主要受到以下几个方面的控制因素影响。

（1）装药相关参数：装药质量 Q；单位质量装药所释放化学能 e；装药密度 ρ_e；爆炸产物膨胀指数 γ_e；弹药长径比 k。

---

* **收稿日期：**2018-07-14；**修回日期：**2018-08-25
基金项目：国家自然科学基金 (71401173)
第一作者：陈　材 (1990—　)，男，博士研究生，caichen20091165@126.com。

（2）距弹药几何中心距离 R；测试点同弹药几何中心连线同弹药赤道面夹角 α；测试点同弹药几何中心连线同弹药轴向夹角 ϕ。

（3）空气相关参数：初始状态压力 p_0；空气密度 ρ_a；空气绝热指数 γ_a。忽略空气温度、传热性和空气黏性等次要因素。

（4）弹药壳体相关参数：密度 ρ_s；弹性模量 E_s；泊松比 μ_s；屈服极限 Y_s；厚度 h_s。

1.2 弹药空气中爆炸量纲分析

以时间 T，质量 M，长度 L 为基本量纲，各个物理量量纲见表 1。

表 1 弹药空气中爆炸相关参数及其量纲

Table 1 Explosion-related parameters and their dimensions

物理量	符号	量纲	物理量	符号	量纲
峰值压力	p_m	$ML^{-1}T^{-2}$	空气初始状态压力	p_0	$ML^{-1}T^{-2}$
装药质量	Q	M	空气密度	ρ_a	ML^{-3}
装药密度	ρ_e	ML^{-3}	空气绝热指数	γ_a	1
质量化学能	e	L^2T^{-2}	弹壳密度	ρ_s	ML^{-3}
膨胀指数	γ_e	1	弹壳弹性模量	E_s	$ML^{-1}T^{-2}$
长径比	k	1	弹壳泊松比	μ_s	1
爆距	R	L	弹壳屈服极限	Y_s	$ML^{-1}T^{-2}$
赤道面夹角	α	1	弹壳厚度	h_s	L

因此，由相似第二定理（Π 定理）可知，弹药在空气中爆炸的峰值压力 p_m 与以上控制参数的关系为：

$$p_m = f(Q,\rho_e,e,\gamma_e,k,R,\alpha,\phi,p_0,\rho_a,\gamma_a,Y_s,\mu_s,h_s,\rho_s,E_s) \tag{1}$$

取 Q、ρ_e 和 e 作为基本量，则式 (1) 可转化为以下的无量纲形式：

$$\frac{p_m}{\rho_e e} = f\left(\gamma_e,k,\frac{R}{(Q\cdot\rho_e^{-1})^{1/3}},\alpha,\phi,\frac{p_0}{\rho_e e},\frac{\rho_a}{\rho_e},\gamma_a,\frac{Y_s}{\rho_e e},\mu_s,\frac{h_s}{(Q\cdot\rho_e^{-1})^{1/3}},\frac{\rho_s}{\rho_e},\frac{E_s}{\rho_e e}\right) \tag{2}$$

使用相同炸药在相同环境下做相似模型试验，则弹药峰值压力影响参数中的 10 个有关参数同原型保持一致，即：

$$(\rho_e,e,\gamma_e,p_0,\rho_a,\gamma_a,\rho_s,E_s,\mu_s,Y_s) = \text{const} \tag{3}$$

因此式 (2) 可简化为：

$$\frac{p_m}{\rho_e e} = f\left(k,\frac{R}{(Q\cdot\rho_e^{-1})^{1/3}},\alpha,\phi,\frac{h_s}{(Q\cdot\rho_e^{-1})^{1/3}}\right) \tag{4}$$

由相似定律可知，若要使模型同原型峰值压力相似，则需要满足以下条件：

$$\begin{cases} k_m = k_p \\ \alpha_m = \alpha_p \\ \phi_m = \phi_p \\ R_m/(Q_m\cdot\rho_{e,m}^{-1})^{1/3} = R_p/(Q_p\cdot\rho_{e,p}^{-1})^{1/3} \\ h_m/(Q_m\cdot\rho_{e,m}^{-1})^{1/3} = h_p/(Q_p\cdot\rho_{e,p}^{-1})^{1/3} \end{cases} \tag{5}$$

即：

$$\begin{cases} k_m = k_p \\ \alpha_m = \alpha_p \\ \phi_m = \phi_p \\ R_m/R_p = (Q_m/Q_p)^{1/3} \\ h_m/h_p = (Q_m/Q_p)^{1/3} \end{cases} \tag{6}$$

式中：下标 m 代表相似模型参数，下标 p 代表原型参数。

设相似模型同原型的装药质量缩比比例 $Q_m/Q_p=\theta^3$，对于相似模型而言，只需要满足缩比后的弹药长径比 k 不变，弹药壳体厚度 $h_m=\theta h_p$，则当爆距 $R_m=\theta R_p$，赤道面夹角 $\alpha_m=\alpha_p$，轴向夹角 $\phi_m=\phi_p$ 时，其爆炸产生的冲击波峰值压力 p_m 同原型中爆距为 R_p、赤道面夹角为 α_p、轴向夹角为 ϕ_p 时所产生的冲击波峰值压力相同。

通过以上分析可知，在缩比模型满足相似率的条件下，若其装药质量为原型质量的 θ^3 倍，则其在 θ 倍爆距处所产生的冲击波峰值压力与原模型相同。以 27 kg 炸药为例，其在爆距为 3 m 处同 1 kg 炸药在爆距为 1 m 处所产生的冲击波峰值压力相同。

2 数值仿真模型及材料参数

2.1 有限元模型的建立

采用显式有限元分析软件 AUTODYN 对带壳装药爆炸冲击波场的形成和传播过程进行数值模拟。炸药采用 TNT 装药，形状为圆柱形，由文献 [9] 可知，当圆柱形炸药的长径比为 1.5 时，其爆炸产生的峰值压力较大，故将装药长径比定为 1.5，起爆方式采用中心单点起爆。因此建立 60 kg 的带壳装药，其半径为 160 mm，长度为 480 mm，外壳厚度为 6 mm，网格单元尺寸为 1 mm×1 mm，将其置于边长为 20 m×10 m 的长方形空气域当中，为了得到冲击波传播过程中峰值压力的变化规律，以装药中心为圆心，在半径为 10 m 的范围内，在轴向及径向每隔 1 m 设置一个观测点，以此测量冲击波参数。由于冲击波问题具有对称性特点，为提高运算效率，模型采用 2D 轴对称的方式进行构建，单位制定为 mm-mg-ms。空气域选用 Euler 算法进行计算，网格单元尺寸为 1 mm×1 mm，采用填充的方式在空气域中建立 TNT 装药模型。为实现无限空气域的仿真效果，在空气域模型边界节点处设置无反射边界，从而避免冲击波在边界处产生折射和反射的现象。建立好的数值仿真模型如图 1 所示。在此基础上，分别建立缩比比例为 1/2、1/3、1/4 和 1/5 的缩比模型，模型数据如表 2 所示。

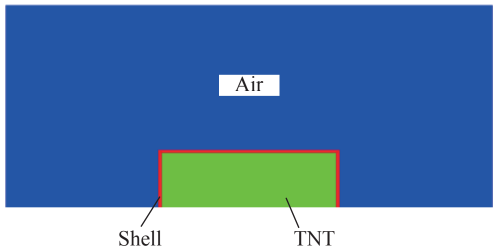

图 1 数值仿真模型

Fig. 1 Numerical simulation model

表 2 弹药原型及缩比模型结构参数值

Table 2 Ammunition prototype and scale model structural parameter values

弹药模型	TNT质量/kg	长度/mm	半径/mm	外壳厚度/mm
原型	64.000	480	160	6.00
1/2缩比模型	8.000	240	80	3.00
1/3缩比模型	2.370	162	54	2.00
1/4缩比模型	1.000	120	40	1.25
1/5缩比模型	0.512	96	32	1.20

2.2 材料模型及参数设置

2.2.1 弹药外壳材料参数设置[10]

弹药外壳材料选用 V250 钢，采用 Shock 状态方程和 Steinberg-Guinan 强度方程对其进行描述。

Shock 状态方程表达式为 $u_s = c + s_1 u_p + s_2 u_p^2$，在强冲击条件下，对于大多数材料而言，其表达式可以满足 $u_s=c+su_p$。其中需要设置的部分参数：密度，8.129×10³ kg/m³；Grüneisen 系数，1.6；c，3.98 km/s；s_1，1.58；参考温度，291.15 K；比热，408 J/(kg·K)。

Steinberg-Guinan 强度方程其表达式为：

$$G = G_0\left[1+\left(\frac{G'_p}{G_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}}+\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)(T-300)\right] \tag{7}$$

$$Y = Y_0\left[1+\left(\frac{Y'_p}{Y_0}\right)\frac{p}{\eta^{1/3}}+\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)(T-300)\right](1+\beta\varepsilon)^n \tag{8}$$

$$Y_0(1+\beta\varepsilon)^n \leqslant Y_{\max} \tag{9}$$

式中：G 为剪切模量，G_0 为初始状态的剪切模量，$G'_p = \mathrm{d}G/\mathrm{d}p$，$p$ 为压力，η 为压缩比，$G'_T = \mathrm{d}G/\mathrm{d}T$，$T$ 为温度，Y 为屈服应力，Y_0 为初始状态的屈服应力，$Y'_p = \mathrm{d}Y/\mathrm{d}p$，$\beta$ 为硬度常数，ε 为等效塑性应变，n 为硬度幂数，$Y_{\max}$ 为最大屈服应力，T 为温度 (K)。具体参数值：G_0，71.8 GPa；Y_0，1.56 GPa；$Y_{\max}$，GPa；β，2；n，0.5；dG/dp，1.479；dG/dT，−22.62 MPa/K，dY/dp，0.032 14；熔化温度，2 310 K。材料失效模型选择主应变失效。失效主应变取值为 0.2，最大切应变取值 0.9。

2.2.2 TNT 及空气材料参数设置

采用理想气体状态方程对空气进行描述：

$$p_1 = (\gamma-1)\rho_1 e_a + p_{\text{shift}} \tag{10}$$

式中：p_1 为压力；ρ_1 为初始密度；e_a 为比热力学能；γ 为理想气体常数，p_{shift} 为压力偏移量。在空气模型中，取 γ 为 1.4，ρ_1 为 1.225 kg/m^3，e_a 则取为 206.8 J/g。

TNT 采用 JWL 状态方程进行描述：

$$p_2 = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V}+\frac{\omega E}{V} \tag{11}$$

式中：p_2 为爆轰压力，V 为相对体积，E 为初始比内能，ω、A、B、R_1、R_2 均为表征炸药特性的常数。TNT 参数：ρ_{TNT}, 1.63 g/cm^3; A, 374 GPa; B, 3.75 GPa; R_1, 4.15; R_2, 0.09; ω, 0.35。

3　弹药空气中爆炸相似规律数值模拟

3.1　爆炸过程分析

通过对弹药爆炸及冲击波传播过程进行数值计算，可知弹药原型及各个缩比模型冲击波传播规律基本相同，以 1/2 缩比模型为例，可得到其不同时刻冲击波场空间状态信息如图 2 所示。由图 2 可知，在爆炸初始时刻，弹药内部装药急剧反应产生高压，并迅速向四周扩散。由于弹药是圆柱形结构，因此冲击波场在传播过程中将出现局部超高压区，在爆炸初期，当冲击波场撕裂弹药外壳后，首先在轴线方向出现超高压区，随着冲击波的不断传播，其在径向方向产生叠加，从而产生局部超高压区。由此分析可知，弹药爆炸后冲击波峰值压力将出现在径向及轴线方向，因此重点对径向及轴线方向上的峰值压力进行测量及分析。

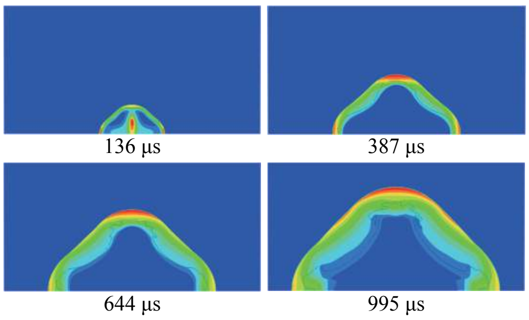

图 2　不同时刻弹药爆炸冲击波场

Fig. 2　Shock wave field of ammunition explosion at different moments

3.2　冲击波峰值压力仿真分析

测量弹药轴向及径向方向不同距离处的冲击波峰值压力。对于弹药原型，分别测量爆距为 1.000、2.000、3.000、4.000、5.000、6.000 和 7.000 m 处的冲击波峰值压力。由量纲分析结果可知，对于不同缩比比例 η 的缩比模型，其与原型具有相同冲击波峰值压力的爆距如表 3 所示，由此分别测量轴向及径向对应各点的冲击波峰值压力，结果分别如表 4、5 所示。

由表 4、5 分别可得不同缩比比例下轴向及径向方向上冲击波峰值压力变化趋势图，如图 3、4 所示。

表 3　缩比模型中同原型具有相同冲击波峰值压力的爆距

Table 3　Detonation distance with same peak pressure of original model in the similar model

弹药类型	爆距/m						
原型	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000
1/2缩比模型	0.500	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500
1/3缩比模型	0.333	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000	2.333
1/4缩比模型	0.250	0.500	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750
1/5缩比模型	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400

表 4　轴向方向上冲击波峰值压力

Table 4　Peak pressure of shock wave in the axial direction

弹药类型	峰值压力/kPa						
原型	12 744.1	4 763.6	1 894.9	911.9	552.1	376.7	277.7
1/2缩比模型	12 719.5	4 761.2	1 892.5	907.7	540.0	366.3	273.6
1/3缩比模型	12 764.2	4 819.8	1 922.4	929.8	560.6	382.6	280.3
1/4缩比模型	12 739.8	4 752.3	1 897.0	910.3	551.0	374.6	275.7
1/5缩比模型	12 709.5	4 714.0	1 891.2	910.6	543.1	380.5	279.4

表 5　径向方向上冲击波峰值压力

Table 5　Peak pressure of shock wave in the radial direction

弹药类型	峰值压力/kPa						
原型	9 927.2	4 357.5	2 160.9	1 145.5	692.0	466.4	349.6
1/2缩比模型	9 925.5	4 354.0	2 161.2	1 144.3	691.9	464.4	345.4
1/3缩比模型	10 099.0	4 465.6	2 198.9	1 171.7	701.6	474.8	353.6
1/4缩比模型	9 921.2	4 356.2	2 158.8	1 138.9	690.0	463.3	347.3
1/5缩比模型	9 916.9	4 355.2	2 157.2	1 134.9	685.9	465.3	343.5

由图 3、4 可知, 弹药爆炸后冲击波峰值压力随着传播距离的增大而降低, 且初期降低速率较快, 后期逐渐趋于平缓; 缩比模型爆炸冲击波峰值压力在表 3 所示的相应爆距处, 能够与原型峰值压力基本保持一致。但是, 随着缩比比例的逐渐加大, 冲击波在单位距离上的变化率迅速加大, 由于传感器测量精度的限制, 造成实际试验中测量成本加大、测量精度降低, 因此在实际试验中应根据试验具体情况合理选择缩比比例。

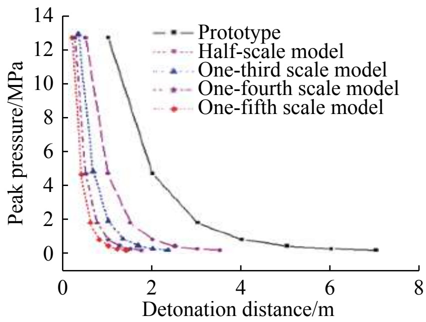

图 3　轴向冲击波峰值压力

Fig. 3　Peak pressure of shock wave in the axial direction

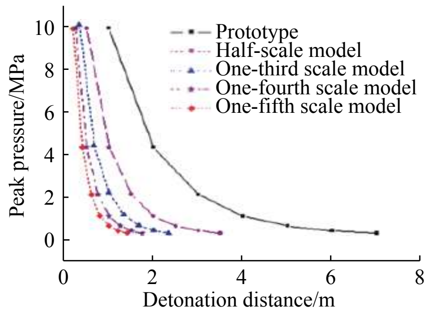

图 4　径向冲击波峰值压力

Fig. 4　Peak pressure of shock wave in the radial direction

以原型为参考, 计算轴向上缩比模型冲击波峰值压力同原型对应点峰值压力的绝对值偏差, 计算结果如表 6 所示, 计算径向上缩比模型冲击波峰值压力同原型对应点峰值压力的绝对值偏差, 结果如表 7 所示。

表 6　缩比模型轴向方向峰值压力绝对值偏差

Table 6　Absolute deviation of peak pressure of scale model in the axial direction

弹药类型	缩比模型轴向峰值压力同原型偏差/%						
1/2缩比模型	0.20	0.05	0.13	0.46	2.19	2.76	1.46
1/3缩比模型	0.16	1.18	1.45	1.96	1.55	1.58	2.77
1/4缩比模型	0.04	0.24	0.11	0.18	0.19	0.55	0.72
1/5缩比模型	0.27	1.04	0.21	0.14	1.63	1.02	0.63

表 7　缩比模型径向方向峰值压力绝对值偏差

Table 7　Absolute deviation of peak pressure of scale model in the radial direction

弹药类型	缩比模型径向峰值压力偏差/%						
1/2缩比模型	0.02	0.08	0.01	0.10	0.02	0.43	1.19
1/3缩比模型	1.73	2.48	1.76	2.29	1.39	1.80	1.16
1/4缩比模型	0.06	0.03	0.10	0.58	0.29	0.67	0.66
1/5缩比模型	0.10	0.05	0.17	0.93	0.89	0.24	1.73

由表 6、7 可知, 对于不同缩比模型, 轴向方向上峰值压力绝对值偏差最大为 2.77%, 径向方向上峰值压力绝对值偏差最大为 2.48%, 属于数值模型建立及网格划分所造成的误差范围之内[7], 因此可以说明通过量纲分析所建立的相似性模型是正确的。

4　试验验证

为进一步验证通过量纲分析所建立的弹药相似性模型, 在进行数值模拟的基础上, 开展某型弹药战斗部冲击波测试试验。战斗部实体如图 5 所示, 其装药 TNT 当量为 112.5 kg。分别建立缩比模型 A_1、A_2 和 A_3, 其对应的 TNT 质量 m_1=64 kg, m_2=16 kg, m_3=4 kg, 则由量纲分析可知缩比比例分别为 θ_1=0.829, θ_2=0.522, θ_3=0.329, 由此可根据实体战斗部参数建立相应缩比模型。

图 5　弹药战斗部实体

Fig. 5　Entity of ammunition warhead

根据试验方案, 在距离爆心 14、19、24 m 的 3 个点处分别放置 3 组 (每组 2 个) 超压测试传感器,

传感器距离地面 1.8 m，与爆心同高。在赤道面夹角 α 和轴向夹角 ϕ 同实际试验保持一致的前提下，利用缩比比例 θ 进行计算，可得缩比模型中同实际测量点处具有相同冲击波峰值压力的测量距离如表 8 所示。

试验布置示意图及现场图如图 6 所示。试验共使用 2 发弹药战斗部，分别记录每发爆炸后各个传感器冲击波超压值，并将其换算为冲击波峰值压力值，计算各次测量平均值作为不同距离处的冲击波峰值压力值。试验结果与仿真结果如表 9 所示，由此可得仿真试验冲击波峰值压力同实际试验冲击波峰值压力误差值如表 10 所示。

由试验结果可知，通过缩比模型仿真试验所获得的冲击波峰值压力与实际试验所得峰值压力误差最小为 3.5%，最大为 5.9%，随着测量距离的增大，两者间误差有所增加。考虑误差产生原因，仿真试验是在完全理想化的条件下进行，而实际试验则受到天气、地形以及人为因素等诸多因素的影响，故产生的误差属于试验误差的合理范围之内。因此通过缩比模型仿真试验与原型实际试验的对比分析，证明了弹药相似性模型的正确性。

表 8 冲击波峰值压力测量距离

Table 8 Measure distance of peak pressure

弹药类型	测量距离/m		
原型	14.00	19.00	24.00
缩比模型A_1	11.61	15.75	19.90
缩比模型A_2	7.31	9.92	12.53
缩比模型A_3	4.61	6.25	7.90

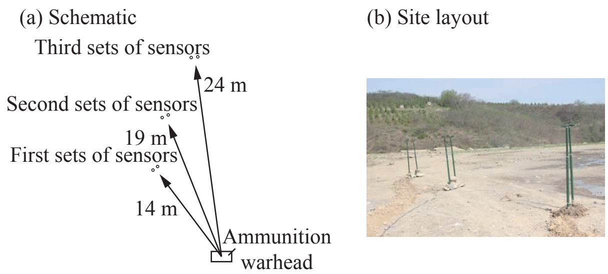

图 6 冲击波测量试验布置图

Fig. 6 Test layout of shock wave measurement

表 9 现场试验与仿真试验冲击波峰值压力

Table 9 Peak pressure in field and simulation tests

试验类型	冲击波峰值压力/kPa		
原型实际试验	257.3	185.5	145.3
缩比模型A_1仿真试验	248.2	176.5	137.2
缩比模型A_2仿真试验	246.0	176.0	137.2
缩比模型A_3仿真试验	247.5	177.0	136.7

表 10 冲击波峰值压力误差

Table 10 Error of peak pressure

试验类型	误差/%		
缩比模型A_1仿真试验	3.5	4.9	5.6
缩比模型A_2仿真试验	4.4	5.1	5.6
缩比模型A_3仿真试验	3.8	4.6	5.9

5 结 论

(1) 当缩比模型装药量为原型的 θ^3 倍时，其在 θ 倍爆距处所产生的冲击波峰值压力与弹药原型所产生的冲击波峰值压力相同。因此在满足相似律的条件下，冲击波峰值压力的测试可以用弹药缩比模型替代原型。

(2) 随着缩比比例的增大，冲击波在单位尺度上的变化率迅速增大，这将给实际测量工作带来困难，降低试验测量精度。同时，缩比比例越大，缩比模型的外壳越薄，这不仅会对模型的加工制造带来困难，也会对材料的强度属性造成一定的影响。因此在实际应用中需要合理选择缩比比例。

(3) 通过对弹药原型试验同缩比模型仿真试验结果进行对比分析，得到缩比模型仿真试验同弹药原型试验冲击波峰值压力误差在试验允许范围之内，能够较好地反映原型试验的试验效果，证明了弹药相似性模型的正确性。

参考文献:

[1] 吴晓颖, 李帆, 张万君, 等. 装备毁伤模拟试验方案的设计与优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2014, 35(10): 5–7. DOI: 10.11809/scbgxb2014.10.002.

WU Xiaoying, LI Fan, ZHANG Wanjun, et al. Design and optimization of equipment damage simulation test [J]. Journal of

Ordnance Equipment Engineering, 2014, 35(10): 5–7. DOI: 10.11809/scbgxb2014.10.002.

[2] 石全. 装备战伤理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 243−244.

[3] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 密闭空间内爆炸缩比相似模型研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 128–133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.02.025.
YANG Yadong, LI Xiangdong, WANG Xiaoming, et al. Scale similarity model of internal explosion in closed field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 128–133. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2014.02.025.

[4] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 钢筋混凝土结构内爆炸相似模型试验研究 [J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(2): 135–141.
YANG Yadong, LI Xiangdong, WANG Xiaoming, et al. Experimental study on similarity model of reinforce concrete structure under internal explosion [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(2): 135–141.

[5] 吕祥锋, 潘一山, 李忠华, 等. 冲击波作用下巷道破坏规律相似模拟研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(10): 212–215. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.10.041.
LV Xiangfeng, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Similarity simulation tests for failure law of a rock burst roadway under shock wave [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(10): 212–215. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.10.041.

[6] 张玉磊, 王胜强, 袁建飞, 等. 不同量级 TNT 爆炸冲击波参数相似律实验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(6): 53–56.
ZHANG Yulei, WANG Shengqiang, YUAN Jianfei, et al. Experimental research on similarity law of explosive shock wave parameters with different orders of magnitude TNT [J]. Journal of Projectiles, Rocks, Missiles and Guidance, 2016, 36(6): 53–56.

[7] 荣吉利, 何轩, 项大林, 等. 定向战斗部水下爆炸相似性研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1329–1334. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.09.001.
RONG Jili, HE Xuan, XIANG Dalin, et al. The similarity research on underwater explosion of directional warhead [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9): 1329–1334. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.09.001.

[8] 刘文韬, 姚熊亮, 李帅, 等. 离心机水下爆炸缩比实验原理及数值研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6): 789–796. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0789-08.
LIU Wentao, YAO Xiongliang, LI Shuai, et al. Experimental principle and numerical study of scaled-down underwater explosion model on a centrifuge apparatus [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(6): 789–796. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0789-08.

[9] LI Jian, RONG Jili. Experimental and numerical investigation of the dynamic response of structures subjected to underwater explosion [J]. European Journal of Mechanics, 2012, 32(1): 59–69. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2011.09.009.

[10] 朱如意. 杀爆榴弹动静态爆炸仿真及毁伤威力差异性分析 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2016: 31−34.

Similarity law of cylindrical ammunition explosions in air

CHEN Cai[1], SHI Quan[1], YOU Zhifeng[1], GUO Chiming[1], GE Hongyu[2]

(1. *Army Engineering University*, *Shijiazhuang* 050003, *Hebei*, *China*;

2. *Baicheng Ordnance Test Center of China*, *Baicheng* 137001, *Jilin*, *China*)

Abstract: In order to solve the issues of high cost and large risk factor of ammunition explosion in the battlefield damage test, the method of dimensional analysis is used to analyze the establishment method of cylindrical ammunition similar models. The explosive power field relationship between different similar models and an original model is studied. The AUTODYN finite element simulation software is used to simulate the explosive power field, and the effectiveness of the similar models is verified by real-experiment data. The results show that the simulated results are consistent with the results of both the dimensional analysis and the actual tests. Therefore, in the actual test, the similar model can be used instead of the original model. This study provides a theoretical basis for the use of the ammunition similar model in battlefield damage test and has certain engineering value.

Keywords: battlefield damage test; similarity theory; dimensional analysis; shock wave

(责任编辑　张凌云)