

文章编号: 1006-9941(2008)04-0436-05

含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用

辛春亮¹, 徐更光¹, 刘科种¹, 秦 健^{1,2}

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 海军装备研究院, 北京 100073)

摘要: AUTODYN 数值模拟结果揭示 Jing Ping Lu 提供的 PBXW-115 点火生长模型参数低估了后期铝粉的燃烧放热。讨论了人工粘性、网格密度对计算结果的影响: 较大的人工粘性系数和较粗的网格会严重抹平冲击波峰值压力, 但对冲量影响较小。根据 Bocksterner 水下爆炸实验测试峰值压力和冲量反推 Miller 能量释放模型参数, 目标函数中冲量的加权系数取峰值压力加权系数的两倍, 反推出的 Miller 能量释放模型参数更能反映含铝炸药的输出结构。

关键词: 爆炸力学; 数值模拟; 含铝炸药; 能量输出结构; Miller 能量释放模型

中图分类号: TJ012.1; O389

文献标识码: A

1 引言

水中兵器用含铝炸药是非理想炸药, 一般含有大量的铝粉和高氯酸铵(AP), 其爆轰反应过程与理想炸药不同, 首先高能炸药成分爆轰, 随后是 AP 分解反应和缓慢的铝粉燃烧放热过程, 不断为水中冲击波和气泡补充能量。铝粉燃烧发生在 CJ 面之后, 释放的能量不能支持爆轰波阵面的传播, 因此不能用传统的 CJ 理论来描述含铝炸药的输出过程。

PBXN-111 是美国产含铝炸药, 含 43% 的 AP、25% 的铝粉、20% 的 RDX、12% 的 HTPB 粘结剂。澳大利亚的科研人员在 PBXN-111 基础上改进得到 PBXW-115, Bocksterner^[1] 通过水下爆炸实验得到不同距离处 PBXW-115 水下爆炸冲击波压力曲线, 并拟合得到 PBXW-115 水下爆炸相似律公式。实验中 PBXW-115 的药量为 25 kg, 传爆药为 0.5 kg Pentolite。Bocksterner 的水下爆炸测试结果显示: 与 PBXN-111 相比, PBXW-115 冲击波能和气泡能均有大幅度提高^[1]。

Jing Ping Lu^[2] 拟合了 PBXN-111、PBXW-115 爆炸产物的 JWL 状态方程和 Lee-Tarver 点火生长模型参数, 并用 LS-DYNA 软件计算了不同药量 PBXW-115 水中爆炸冲击波衰减演化过程。该文作者采用二维轴对称模型和 Lagrange 算法, 并用了一些技巧避免网格大变形带来的计算困难, 即便如此, 也仅仅计算了比例距离小于 0.68 时的情况, 在此区段内冲击波界面、冲击波峰值压力计算结果与实验结果吻合很好。本文则在 Jing Ping

Lu 提供的状态方程基础上, 根据 Bocksterner 水下爆炸实验结果反推出 PBXW-115 能量释放模型参数。

2 含铝炸药爆炸产物状态方程和 Miller 能量释放模型

为了计算冲击波在更大水域中的传播, 本文采用有限差分程序 AUTODYN^[3] 和 Euler 算法。Euler 算法的特点是网格固定, 物质在网格内流动, 可以避免 Lagrange 算法中因网格扭曲带来的计算困难。数值模拟中采用炸药分别为 25 kg 的球形 PBXN-111、PBXW-115 和 PBX9010, 传爆药为 0.5 kg Pentolite。经计算发现: PBXW-115 与 PBXN-111 的冲击波能差别很小(见图 1), 而且后期的能量释放与理想炸药 PBX9010 相比也并不明显, 这说明 Jing Ping Lu 提供的状态方程参数虽然很好地拟合了炸药中理想成分和少量铝粉的早期快速释能, 却由于拟合时间太短, 点火生长模型参数并没有很好地反映后期铝粉的二次燃烧放热反应。

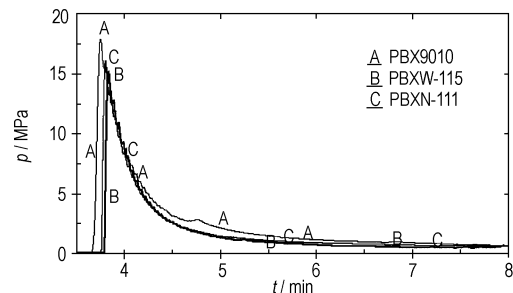


图 1 距爆心 6.25 m 处 PBXN-111、PBXW-115、PBX9010 压力历程对比

Fig. 1 Comparison of pressure histories 6.25 m away from center of explosion for different explosives

收稿日期: 2007-12-17; 修回日期: 2008-04-28

作者简介: 辛春亮(1973-), 男, 博士生, 从事爆炸力学数值计算工作。

含铝炸药水下爆炸时加速水的时间较长,尤其是深水爆炸时,含铝炸药反应比较充分。因此水下爆炸试验数据拟合出的能量释放模型参数所包含的信息会更加丰富。为了更好地表达铝粉后期的能量释放,本文将在 Jing Ping Lu 提供的状态方程参数基础上,根据 Bocksterner 水下爆炸实验测试结果反推 PBXW-115 能量释放模型参数,补齐后期铝粉的二次燃烧释放的能量。

PBXW-115 爆炸产物状态方程为^[3]:

$$p = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{V} \quad (1)$$

其中, A, B, R_1, R_2, ω 为常数,需要用标准圆筒实验进行标定; E 主要与炸药中理想成分释放的能量有关,另外对于含铝炸药,圆筒实验中圆筒破裂前可能有少量铝粉燃烧释能,这也对 E 有所贡献; Q 是圆筒破裂后部分铝粉燃烧额外释放的比内能; V 为比容; λ 是圆筒破裂后铝粉的反应率,理想炸药能量全部在 CJ 面前释放, $\lambda = 0$ 。公式右端第一项在高压段起主要作用,第二项在中压段起主要作用,第三项代表低压段。在爆炸产物膨胀的后期,方程式前两项的作用可以忽略,为了加快求解速度,将炸药爆炸产物 JWL 状态方程转换为更为简单的理想气体状态方程(绝热指数 $\gamma = \omega + 1$)。

水采用多项式状态方程。材料受压时:

$$p = A_1 u + A_2 u^2 + A_3 u^3 + (B_0 + B_1 u) \rho_0 E \quad (2)$$

材料受拉时状态方程为:

$$p = T_1 u + T_2 u^2 + B_0 \rho_0 E \quad (3)$$

式中, E 为单位质量内能, $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$ 为常数, $u = \rho/\rho_{ref} - 1$ 。

Lee-Tarver 点火生长模型有三项: 点火、快反应和燃烧,需确定的参数较多。Miller^[3-5] 在该模型基础上提出了只采用燃烧项的能量释放简化模型,计算速度大大加快。含铝炸药爆炸产物 Miller 能量释放模型如下:

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1 - \lambda)^m p^n \quad (4)$$

该模型考虑了由反应率 λ 和压力 p 控制的燃烧。式中, a 是能量释放常数; m 是能量释放指数; n 是压力指数。这些参数与铝粉粒度、比表面积有关,可以通过对含铝炸药水下爆炸测试数据和 AUTODYN 计算结果对比迭代反推来确定。

3 人工粘性和网格密度对计算结果的影响

由于数值计算不能反映冲击波强间断,数值计算软

件都用人工粘性在几个网格内光滑强间断,使解随空间的变化变得缓和。AUTODYN 中人工粘性形式^[3]如下:

$$q = \begin{cases} \rho \left[\left[C_Q d \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) \right]^2 - C_L c d \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) \right], & \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) < 0 \\ 0, & \left(\frac{\dot{V}}{V} \right) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

这里, C_L 和 C_Q 分别是一次项、二次项系数(缺省值分别为 0.2 和 1), ρ 是密度, c 是材料声速, d 是单元特征长度, V 是单元体积, \dot{V}/V 是体积的变化率。 C_L 和 C_Q 的数值决定了强间断需要跨过的单元数。

人工粘性抹平了强间断,这使得计算出的水中冲击波峰值压力比真实值要小。图 2 是采用不同人工粘性系数时 AUTODYN 计算峰值超压与 Cole 公式^[6] 计算值的对比。在该计算模型中,炸药为 1 kg TNT,计算水域为 30 m,网格划分数为 4000。可以看出,人工粘性系数越大,峰值压力越低,而且一次项系数 C_L 的影响要比二次项系数 C_Q 大得多。

图 3 是采用不同人工粘性系数时 AUTODYN 计算冲量与 Cole 公式计算值的对比,积分计算冲量时采用的也是 Cole 公式计算时间常数。可以看出人工粘性对数值计算冲量影响非常小,而且数值计算值要比经验公式计算值稍小一些。

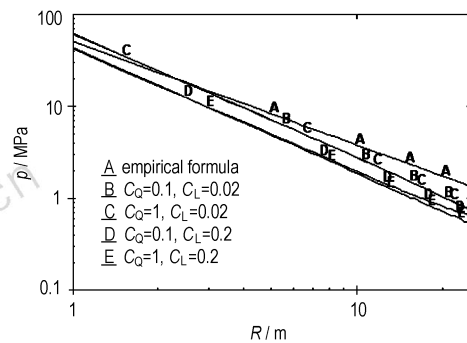


图 2 人工粘性对峰值压力的影响

Fig. 2 Effects of artificial viscosity coefficients on peak pressure

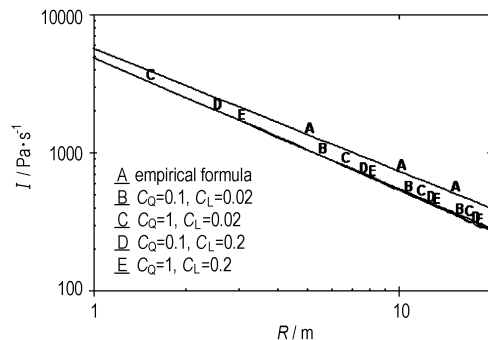


图 3 人工粘性对冲量的影响

Fig. 3 Effects of artificial viscosity coefficients on impulse

人工粘性在几个网格内抹平强间断,因此网格密度的影响是和人工粘性紧密联系在一起的,计算模型需要在网格细化程度和计算费用之间折中。图4、图5是网格划分数分别为1000、2000、4000、8000时计算峰值超压、计算冲量与Cole公式计算值的对比,积分计算冲量时采用的也是Cole公式计算时间常数。在该计算模型中,炸药为1 kg TNT,计算水域为30 m,采用缺省人工粘性系数。从图4和图5中可以看出网格越粗峰值压力越低,而冲量受网格密度的影响要小一些。

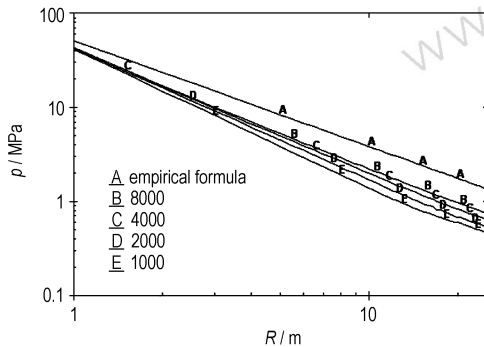


图4 网格密度对峰值压力的影响

Fig. 4 Effects of mesh densities on peak pressure

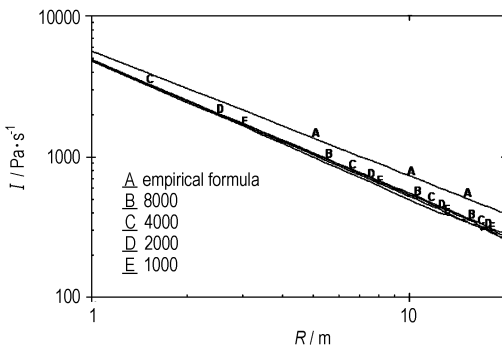


图5 网格密度对冲量的影响

Fig. 5 Effects of mesh densities on impulse

4 Miller 能量释放模型参数的反推

4.1 确定反推对比量和目标函数

采用计算压力曲线与测试曲线进行逐点对比就可以反推能量释放模型参数。人工粘性和网格密度对峰值压力、伪震荡影响很大,对比前需要对压力曲线后半段进行低通滤波去掉高频伪震荡。遗憾的是,Bocksterner文献[3]中并没有提供压力测试曲线。

人工粘性、网格密度对时间常数影响很大,而且峰值过后的伪震荡使计算时间常数呈现非单调性。时间常数又会对计算能流密度有影响,能流密度是压力平方的积分,对压力的误差有放大作用,因此,时间常数、能

流密度来作为对比量反推能量释放模型参数并不合适。

如果只采用冲击波峰值压力作为对比量,不考虑曲线下对应的面积就不能正确表达含铝炸药的能量输出结构。冲量是做功能力的体现,对结构响应起主要作用。因此同时比较峰值压力和冲量也可以反推能量释放模型参数。

为了与Bocksterner^[1]实验尽可能一致,数值模拟中采用的炸药为25 kg的球形PBXW-115,传爆药为0.5 kg Pentolite。计算水域为50m,采用缺省的人工粘性系数,计算模型网格划分总数为4000,炸药及其附近水域加密网格。

在水域中取30个测点,离爆心距离分别为:6、6.25、7、8.1、9、9.8、11、12.2、13、14、15、15.3、16、17、18、19、19.4、20、21、22、22.5、23、24、24.5、26、27、27.4、29、30、31.1 m,斜体部分测点与实验测点位置一致,计算每个数据输出点的峰值压力、冲量,与Bocksterner水下爆炸实验拟合相似律公式计算值比较。

$$Para = k \left[\frac{W^{1/3}}{R} \right]^a \quad (6)$$

式中,Para代表峰值压力 p_m 、比冲量 $I/W^{1/3}$ 、比时间常数 $\theta/W^{1/3}$ 、比能流密度 $E/W^{1/3}$,相似律参数 k 、 a 见表1。

表1 PBXW-115的相似律参数

Table 1 Similitude parameters of PBXW-115

Para	p_m		$I/W^{1/3}$		$\theta/W^{1/3}$		$E/W^{1/3}$	
	k	a	k	a	k	a	k	a
value	70.5	1.18	10	1.01	0.110	-0.21	195	2.20

各数据输出点之间的误差定义为:

$$e_{Iri} = [(V_{Ici} - V_{Iei})/V_{Iei}] \times 100\%, \quad i = 1 \sim 10 \quad (7)$$

$$e_{Pri} = [(V_{Pci} - V_{Pei})/V_{Pei}] \times 100\%, \quad i = 1 \sim 10 \quad (8)$$

式中, V_{Ici} 、 V_{Pci} 是第*i*个测点的冲量、峰值压力计算值, V_{Iei} 、 V_{Pei} 是第*i*个测点的冲量、峰值压力实验值。

总误差为:

$$E_r = \sum_{i=1}^{10} (W_{Ii} |e_{Iri}| + W_{Pi} |e_{Pri}|) \quad (9)$$

这里, W_{Ii} 、 W_{Pi} 是冲量、峰值压力的权重系数。冲量受人工粘性和网格密度的影响小,权重应该大些,取 $W_{Ii} = 2W_{Pi} = 2/90$ 。误差是目标函数,通过调整能量释放模型参数 a 、 m 、 n 以及CJ面后释放的比内能 Q 使其达到最小。将状态方程参数 Q 也设置为变量是因为不能确定参与反应的铝粉数量。

对于上述测点来说, Q 越大,峰值压力越大,冲量越大; a 越大,峰值压力越大,冲量越小; m 、 n 越大,峰

值压力越小,冲量越大。

4.2 数值反推结果

经过多次迭代优选,得到 $a = 0.028$; $m = 0.68$; $n = 0.185$; $Q = 6.0 \times 10^9$, PBXW-115 炸药状态方程和 Miller 能量释放模型参数见表 2。

图 6、图 7、图 8 是 Bocksterner 相似律公式与 Miller 能量释放模型计算出的时间常数、能流密度、冲击波能的对比。图 6 中计算时间常数呈现非单调性,距离越大,非单调性越明显,这是由随距离增大而加剧的伪震荡引起的。虽然没有选定能流密度作为反推对比量,但图 7 中相似律公式与 Miller 能量释放模型计算出的能流密度曲线基本重合,这充分说明了选择冲量作为对比量的合理性。图 8 中冲击波能与距离之间的斜率为负,这是由于冲击波在水中传播时少量的能量损失用于水的加热。Bocksterner 的测试结果本身就带有一定程度的离

散性,这使得拟合结果与测试结果之间存在一定的差异。

图 9 是距离爆心 6.25 m 处 Bocksterner 相似律公式计算压力曲线,以及与分别采用 Miller 能量释放模型参数、Jing Ping Lu 的 Lee-Tarver 点火生长模型参数 AUTODYN 计算曲线的对比。从图 9 可以看出,Miller 能量释放模型计算出的压力曲线与 Bocksterner 水下爆炸实验拟合得到相似律公式计算出的压力曲线吻合得较好,只是在后段相似律公式计算值衰减过快,远远小于 Miller 能量释放模型计算值。这是因为压力曲线后段应该采用倒数衰减规律来拟合,而相似律公式采用的是指数衰减规律。采用 Jing Ping Lu 提供的 Lee-Tarver 点火生长模型参数的计算值则小得多,其模型参数不能反映后期铝粉的燃烧放热,而本文拟合的 Miller 能量释放模型参数则很好地解读了含铝炸药 PBXW-115 水下爆炸的能量输出结构。

表 2 PBXW-115 炸药 JWL 状态方程和 Miller 能量释放模型参数
Table 2 JWL EOS and Miller energy release model parameters of PBXW-115

A/Pa	B/Pa	R_1	R_2	ω	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$E^0/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	a	m	n	$Q/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$
3.729E11	5.412E9	4.453	1.102	0.344	1792	6.0E9	0.028	0.68	0.185	6.0E9

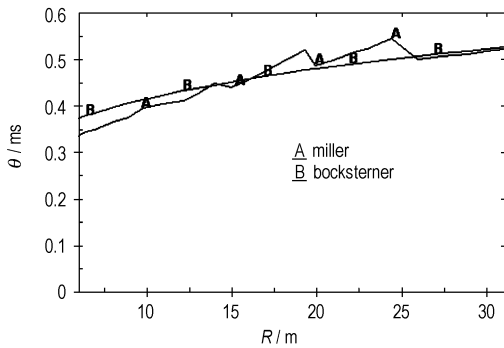


图 6 Bocksterner 相似律公式、Miller 模型计算时间常数对比

Fig. 6 Comparison of time constants for different models

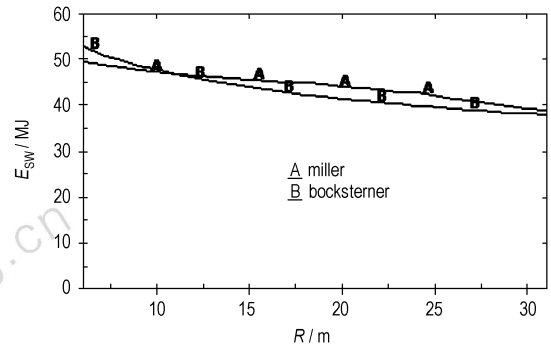


图 8 Bocksterner 相似律公式、Miller 模型计算冲击波能对比

Fig. 8 Comparison of shock wave energy for different models

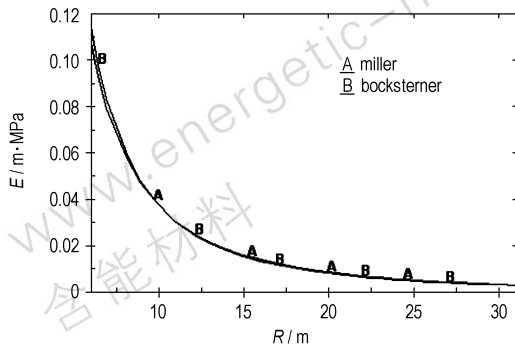


图 7 Bocksterner 相似律公式、Miller 模型计算能流密度对比

Fig. 7 Comparison of energy flux density for different models

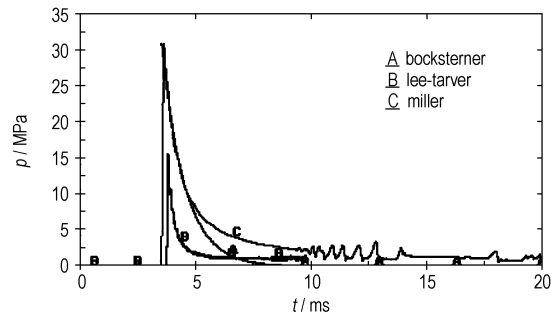


图 9 Bocksterner 相似律公式、Lee Tarver 模型、Miller 模型距爆心 6.25 m 压力历程对比

Fig. 9 Comparison of pressure histories 6.25 m away from center of explosion for different models

图10则是PBX1(仿制PBXW-115,惰性粘结剂HTTP所占份额由12%降为8%,能量有所提高)水下爆炸距离爆心2m处测试压力曲线,以及与分别采用Miller能量释放模型参数、Jing Ping Lu的Lee-Tarver点火生长模型参数AUTODYN计算曲线的对比。PBX1实验药量为0.9789 kg,传爆药Pentolite药量为0.1611 kg。计算曲线的峰值稍小于测试曲线峰值,曲线下的面积差别要大些,与Jing Ping Lu的Lee-Tarver点火生长模型参数计算曲线相比,采用Miller能量释放模型参数的计算曲线与实验测试曲线更为接近。

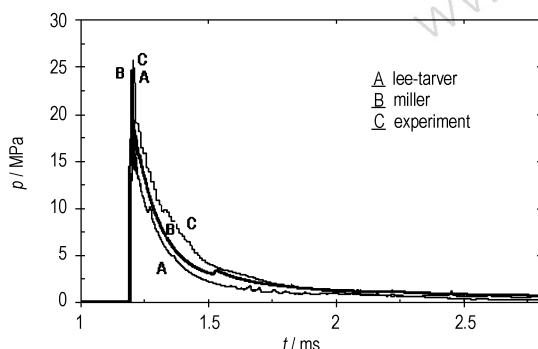


图10 PBX1距爆心2m处实验测试曲线与Lee-Tarver模型、Miller模型计算压力曲线对比

Fig. 10 Comparison of pressure histories 2 m away from center of PBX1 explosion for different models

将图9(大药量计算波形)和图10(小药量计算波形)进行比较,可以发现Lee-Tarver模型参数在小药量条件下的计算结果与实测曲线的差距要小一些,而Miller模型参数的不同药量计算曲线与实验测试曲线都比较接近,这说明Miller模型参数能够较好地表达含铝炸药水下爆炸时的尺度效应,而Lee-Tarver模型参数并不适用于大药量含铝炸药水下爆炸。

Application of Miller Energy Release Model for Aluminized Explosive

XIN Chun-liang¹, XU Geng-guang¹, LIU Ke-zhong¹, QIN Jian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China)

Abstract: Numerical simulation results with AUTODYN software revealed Jing Ping Lu's parameters of PBXW-115 ignition and growth model underestimate energy release of Al powders combustion. The effects of artificial viscosity coefficient and mesh density on simulation results were discussed. The larger artificial viscosity coefficients and coarser meshes can smear off peak pressure of shock wave severely, but affect impulse little. Based on Bocksterner's underwater explosion experimental results, parameters of Miller energy release model were solved inversely. Weighted coefficient of impulse was twice as much as that of peak pressure in objective function. New model parameters obtained from underwater explosion test can express the size effect of aluminized explosive and can be applied to numerical simulation of near field and far field, while Lee-Trave model parameters can only be applied to the numerical simulation of near field and small yield underwater explosion.

Key words: explosion mechanics; numerical simulation; aluminized explosive; structure of energy output; Miller energy release model

5 结论

含铝炸药的爆轰与药量、约束条件(外壳、水深)密切相关,由于大药量圆筒实验很难实现,到现在为止,尚没有大当量含铝炸药爆炸产物的状态方程及其能量释放模型参数问世。而标准圆筒实验产物作用时间短,大约20 μs,只能反映早期理想成分和少量铝粉能量的快速释放,此时大部分铝粉还没有反应,由此得出的能量释放模型参数会严重低估含铝炸药能量输出结构。含铝炸药水下爆炸时加速水的时间较长,尤其是深水爆炸时,铝粉反应比较充分。因此用水下爆炸试验数据拟合出的Miller能量释放模型参数所包含的信息会更加丰富,使得计算结果与实验结果有较好的一致性,能够较好地表达含铝炸药水下爆炸时的尺度效应,适用于近场、远场水下爆炸数值分析,而Jing Ping Lu提供的Lee-Tarver模型参数仅仅适用于小当量近场水下爆炸数值分析。

参考文献:

- [1] Bocksterner G. Evaluation of Underwater Explosive Performance of PBXW-115 (AUST). 1996, DSTO-TR-0297.
- [2] Jing Ping Lu, David L Kennedy. Modeling of PBXW-115 Using Kinetic CHEETAH and DYNA Codes. 1996, DSTO-TR-1496.
- [3] AUTODYN User's Manual, Version 11.0, 2007, ANSYS.
- [4] Miller P J, Guirguis R H. Experimental study and model calculations of metal combustion in Al/AP underwater explosives[J]. *Mat Res Soc Symp Proc*, 1993, 296: 299-304.
- [5] Guirguis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives [C] // Proc. of 10th Symp. (Int.) on Detonation, Boston, Massachusetts. 1993: 675-682.
- [6] Cole R H. Underwater Explosion [M]. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1948.