

文章编号: 1006-9941(2008)02-0160-04

考虑后燃烧效应的 TNT 空气中爆炸的数值模拟

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: 采用 AUTODYN 软件对 TNT 在空气中爆炸进行了数值计算, 在计算模型中考虑了负氧平衡炸药的后燃烧效应, 并将峰值超压、比冲量、正压作用时间计算结果与相似律公式计算值以及 Baker 测试数据进行了对比, 指出 Brode 公式计算出的炸药附近空气冲击波峰值超压明显偏大, 可能是将爆轰产物造成的峰值超压误认为空气冲击波峰值超压所致。

关键词: 爆炸力学; AUTODYN 软件; 后燃烧效应; Henrych 公式; Brode 公式; TNT 爆炸

中图分类号: TJ012.1; O389

文献标识码: A

1 引言

TNT 作为一种严重负氧平衡的炸药, 其在空气中爆炸时生成大量 H₂ 和 CO (以摩尔数计, 约占爆轰产物的 70%), H₂ 和 CO 夺取周围的氧气与之发生放热反应, 波后超压、正压作用时间和冲量升高, 使 TNT 的能量输出结构呈现“非理想性”。Muzychuk 等^[1]对 TNT 炸药的后燃烧效应进行了数值模拟和实验测试, 并指出: 如果数值计算模型中忽略后燃烧效应, 将给近场爆炸仿真结果带来一定的影响。本研究采用显式有限差分程序 AUTODYN 对 TNT 空气中爆炸能量输出结构进行了模拟, 在计算模型中考虑了后燃烧效应, 最后将数值计算结果与经验公式计算结果以及 Baker 测试数据进行了对比分析。

2 计算模型

数值模型中采用 10 kg TNT 球形装药, 半径为 0.113 m。采用一维轴对称楔形网格计算模型, X 轴为对称轴, 模型尺寸为 25 m, 炸药、空气采用多物质 Euler 算法, 流体外围施加压力流出边界条件来模拟无限空气域。AUTODYN 采用理想流体动力学方程来描述物质运动, 把流动看作垂直于波阵面方向的层流, 忽略热传导和粘性的影响。

爆轰产物压力用 JWL 状态方程来描述^[2]:

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

式中, E 为单位质量内能; V 为比容; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数。其中, 方程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。在爆轰产物膨胀的后期, 方程式前两项的作用可以忽略, 为了加快求解速度, 将炸药从 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 $\gamma = \omega + 1$)。TNT 炸药 JWL 状态方程参数见表 1。

表 1 TNT 炸药 JWL 状态方程参数

Table 1 JWL EOS parameters for TNT explosive

A/Pa	B/Pa	R_1	R_2	ω
3.7377E11	3.7471E9	4.15	0.9	0.35
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$D/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E/\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$	p_{CJ}/Pa	
1630	6930	6.0E9	2.1E10	

对于负氧平衡炸药, JWL 状态方程参数具有一定的局限性。因为这些参数是通过标准圆筒实验拟合得到的, 标定时炸药与圆筒紧密接触, 只有端部有机会与空气接触, 并且圆筒破裂前产物作用时间大约 20 μs , 此时后燃烧效应还未来得及发挥作用, 由此标定的方程参数可适用于零氧或者正氧平衡炸药空气中爆炸的计算, 但对于像 TNT 一类的负氧平衡炸药需要对其进行修正。为了在 TNT 的 JWL 状态方程中考虑后燃烧效应, 可在炸药爆轰后 $(0.12 \sim 0.55) \times 10^{-3}$ s 时间段内均匀加入 $2.15 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的能量释放^[2]。

3 计算结果分析

图 1 是本文模型计算得到的距离炸药中心 8 m 处单元压力和质点速度时间历程曲线。可以看到, AUTODYN 输出的曲线在峰值过后基本没有出现数值计算中常见的伪振荡。

TNT 爆炸后形成高温高压的爆轰产物, 强烈压缩周围空气在空气中形成初始冲击波 (见图 1 第一个峰值),

收稿日期: 2007-08-13; 修回日期: 2007-10-29

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

e-mail: chunliang.xin@ansys.com.cn

随后冲击波波后流动近似地以指数规律衰减,逐渐降低到大气压力,而此时空气质点的速度还不为零,由于惯性效应继续向外膨胀,引起负压。惯性效应消失后,周围空气反过来压缩爆轰产物,使压力升高到大气压附近。但在计算结果中并没有发现空气的二次脉动现象。

由于空气密度和压强远小于爆轰产物的密度和压强,在冲击波形成的同时由界面向炸药中心反射回一个稀疏波,使爆轰产物发生膨胀,降低内部压力,此稀疏波在炸药中心汇聚后又朝四周传播一压缩波,由于前导冲击波已经将空气预热,此压缩波的传播速度将大于前导冲击波,并逐渐赶上(见图1第二个峰值),如果测点离炸药不远,此二次压力波峰值足够高,就有可能将负压区强行打断,并再次衰减到负压。如果测点离炸药很远,二次压力波有可能在前导冲击波压力降低到大气压之前到达,拉长正压区。

无限空气介质中的爆炸存在爆炸相似律现象,下面针对空气冲击波三个基本参数:峰值超压、正压作用时间和正压区比冲量,将 AUTODYN 计算值和相似律公式计算值以及 Baker 测试值进行对比分析。

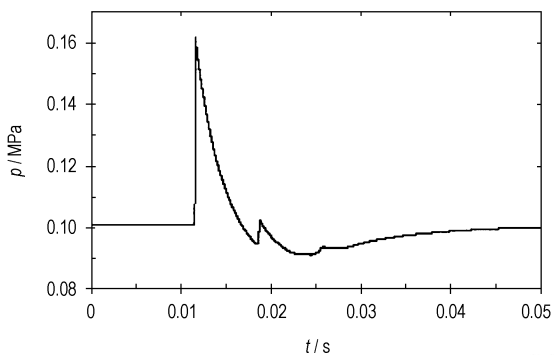
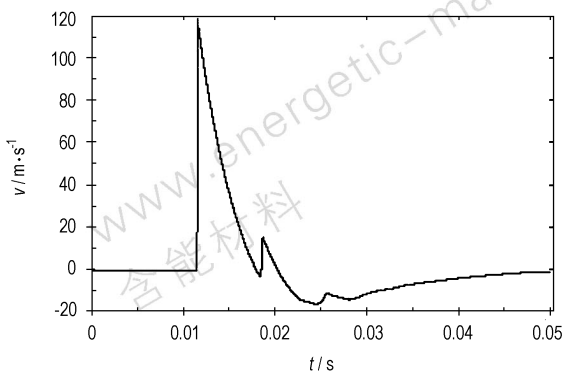
a. $p-t$ 曲线b. $v-t$ 曲线

图1 距爆心 8 m 处单元压力和质点速度曲线

Fig. 1 Pressure and velocity curves at 8 m away from center of explosion

3.1 峰值超压

炸药附近空气域是爆轰产物直接作用区,此处的压力曲线应有三个峰值,第一个峰值是空气冲击波引起的,第二个峰值是随后赶来的爆轰产物造成的,第三个则是前面提到的二次压力波峰值,三者都以指数规律衰减,但前者衰减快,后二者慢。由于数值计算不能反映冲击波这种强间断,需要在几个网格内用人工粘性抹平强间断,峰值之前有个压力爬升过程,因此,在离炸药非常近的单元中就看不到第一个压力峰值(见图2),空气冲击波引起的压力尚未达到峰值,很快赶来的爆轰产物就叠加上去,而在离炸药中心 0.16 m 处的单元输出的压力曲线中就可以清楚地观察到前两个峰值(见图3曲线A)。离炸药越近,第二个峰值比第一个峰值超出越多,离炸药稍远处,第二个峰值逐渐被第一个峰值赶上并超过(见图3曲线B),此压力峰值也越来越不明显(见图3曲线C)。

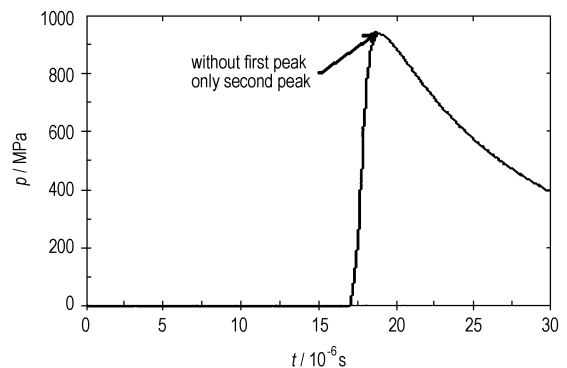


图2 距爆心 0.12 m 处单元压力曲线

Fig. 2 Pressure curve at 0.12 m away from center of explosion

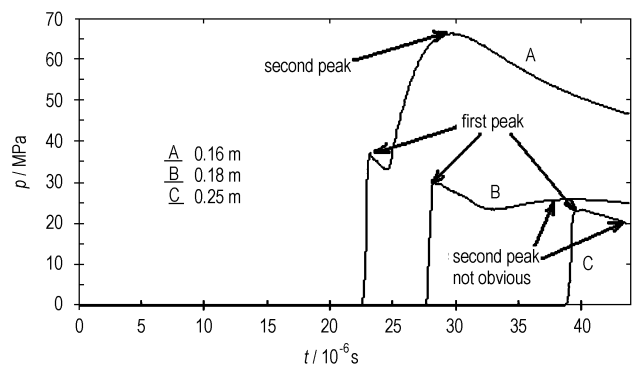


图3 距爆心 0.16, 0.18, 0.25 m 处单元压力曲线

Fig. 3 Pressure curves at 0.16, 0.18, 0.25 m away from center of explosion

常用于计算 TNT 空气中爆炸冲击波峰值超压的公式有 Henrych 和 Brode 公式,这两种公式小比例距离下的计算结果差别很大,最高可达数十倍。

Brode^[3]用有限差分法计算了无限大理想气体中爆炸冲击波超压(冲击波峰值压力与大气压力之差),并将计算结果拟合成下面的形式:

$$\Delta p_+ = \frac{0.096}{Z} + \frac{0.143}{Z^2} + \frac{0.573}{Z^3} - 0.0019$$

$$(0.0098 \leq \Delta p_+ \leq 0.98)$$

$$\Delta p_+ = \frac{0.657}{Z^3} + 0.098 \quad (\Delta p_+ \geq 0.98)$$

Henrych^[3]根据TNT在空气自由场中爆炸冲击波峰值超压试验测试结果,提出了如下相似律公式。

$$\Delta p_+ = \frac{1.379}{Z} + \frac{0.543}{Z^2} - \frac{0.035}{Z^3} + \frac{0.006}{Z^4} \quad (0.05 \leq Z \leq 0.3)$$

$$\Delta p_+ = \frac{0.607}{Z} - \frac{0.032}{Z^2} + \frac{0.209}{Z^3} \quad (0.3 \leq Z \leq 1)$$

$$\Delta p_+ = \frac{0.065}{Z} + \frac{0.397}{Z^2} + \frac{0.322}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 10)$$

这里, Δp_+ 的单位为 10^6 Pa, Z 是比例距离 ($R/W^{1/3}$); R 是到炸药中心的距离单位, m; W 是装药质量, kg。图4是分别采用AUTODYN和相似律公式计算得到的不同比例距离处空气冲击波峰值超压对比图。

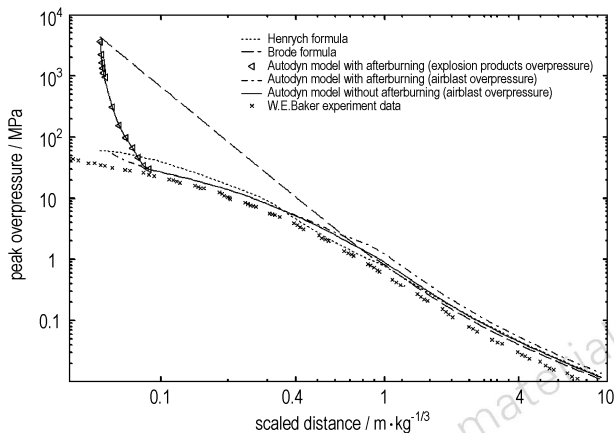


图4 峰值超压对比

Fig. 4 Comparison of peak overpressures

从图4可以看出,当比例距离 $Z \leq 0.3 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,AUTODYN空气冲击波峰值超压计算值和Henrych公式计算值比较接近,而Brode公式计算值明显偏大,如果将爆轰产物造成的峰值超压跟Brode公式计算值进行比较,就会发现二者更为接近,文献[4]中初始空气冲击波峰值超压为 $(1.86 \sim 3.38) \times 10^3$ MPa,与Brode公式计算值 4×10^3 MPa大致相当,因此很有可能这些作者都没有将空气冲击波和爆轰产物造成的峰值超压区别开来。黄正平^[5]认为:临近炸药装药表面的超压测试技术难度较大,常规的超压测试系统的响应速度太

慢,无法获取正确的超压值,至今为止没有一个经验公式能较好地表达这种近爆心的冲击波压力场分布。另外,比例距离本质上是点爆炸相似参数,因此当利用它计算超压时已经默认了冲击波压力场的点爆炸相似律的存在,但由于存在特征尺寸——炸药装药半径,在炸药附近的冲击波压力场不可能满足点爆炸相似律。

从图4中还可以发现,比例距离大于0.7时,考虑后燃烧效应计算出的峰值超压比不考虑时稍微大一些。TNT爆炸反应结束后爆轰产物中的 H_2 和 CO 与氧气发生放热反应,继续为冲击波补充能量,相当于冲击波波阵面背后有一堵更为强大的后墙的支持,因此峰值超压的衰减比不考虑后燃烧效应时要慢。

随着比例距离的加大,几条曲线的计算结果逐渐趋于一致。

3.2 正压作用时间

正压作用时间是对目标破坏作用大小的重要标志参数之一,相似律计算公式^[7]为 $\tau_+ / \sqrt[3]{W} = 1.35Z^{1/2}$, $R > 12R_0$ 。Baker^[6]指出,从实验测试数据中判读压力何时降低到大气压非常困难,这会使获得的正压作用时间因人而异。图5是AUTODYN计算值与Baker^[6]根据实验数据拟合的正压作用时间以及相似律公式计算值的对比。

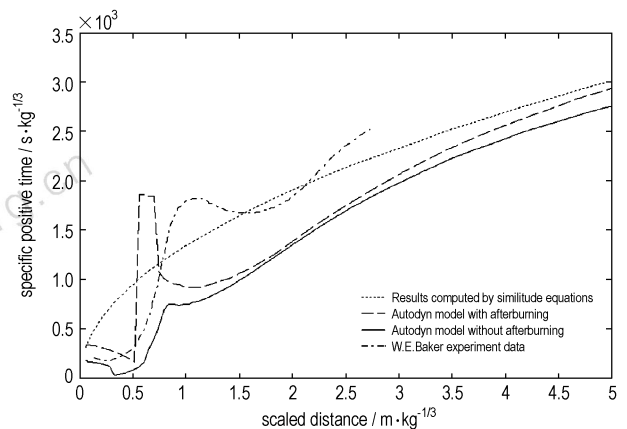


图5 正压作用时间对比

Fig. 5 Comparison of specific positive time

Baker^[6]指出:由于TNT炸药的后燃烧效应,正压作用时间呈现非单调性。考虑后燃烧效应的AUTODYN计算结果趋势与Baker测试曲线一致,也呈现非单调性,只是由于后燃烧效应阶段的能量释放过于急促导致数值计算曲线过于陡峭,这说明在能量的添加方式上,还需要进一步进行研究。相似律计算公式没有分段不能反映这种非单调性。

3.3 正压区比冲量

正压区比冲量相似律公式^[7]为: $i_+/\sqrt[3]{W}=210/Z$ 。图6是该相似律公式计算值与 AUTODYN 计算结果的对比。

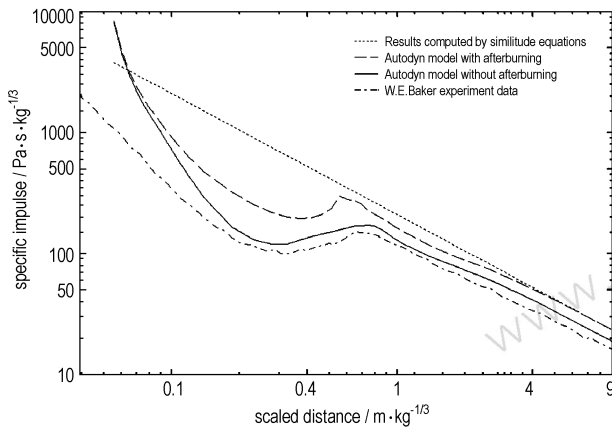


图6 比冲量对比

Fig. 6 Comparison of specific impulse

从图6中可以看出,考虑后燃烧效应、不考虑后燃烧效应的 AUTODYN 计算结果位于相似律公式计算值和 Baker 测试值之间,且与 Baker 测试曲线的走势一致。另外,正压区比冲量的相似律公式也应该按照比例距离分段进行拟合,否则会带来很大的计算误差。

4 结论

(1) 炸药附近空气域是爆轰产物直接作用区,此处的压力曲线应该有三个峰值,第一个峰值是空气冲击波引起的,第二个峰值是随后赶来的爆轰产物造成的,第

三个则是二次压力波峰值。由于 AUTODYN 有限差分计算不能反映冲击波这种强间断,计算软件采用人工粘性在几个网格内光滑强间断,这使得炸药附近单元内的空气冲击波还没有来得及上升到峰值压力就被爆轰产物压力叠加掉了。而离炸药稍远处的空气单元压力曲线只有空气冲击波、二次压力波的两个峰值。

(2) 解析计算得到 TNT 空气中爆炸初始空气冲击波峰值超压为 60 MPa 左右^[6], Brode 公式在比例距离小于 0.2 时的计算结果都远远超过此值,可能作者将爆轰产物造成的峰值超压误认为空气冲击波峰值超压。

(3) 小比例距离下没有考虑高温高压下空气的离解($\gamma=1.2$),但 AUTODYN 冲击波峰值超压计算结果仍和 Henrych 公式计算值比较接近,远场计算结果和 Henrych 公式以及 Brode 公式吻合得更好。

(4) AUTODYN 计算负氧平衡炸药空气中爆炸时可以考虑后燃烧效应,计算得到的冲量、正压作用时间比不考虑后燃烧效应时更为接近相似律公式计算值。

参考文献:

- [1] Muzychuk E, Mayselless M, Belsky I. Influence of the post-detonation burning process on blast wave parameters in air[C] // 22nd International Symposium on Ballistics, Canada, 2005: 536-543.
- [2] ANSYS AUTODYN Manuals Version 11.0 [CP/CD]. ANSYS, 2007.
- [3] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use[M]. Amsterdam: Elsevier, 1979.
- [4] Army T M. Structures to resist the effects of accidental explosions [R]. ADA 243272, 1990.
- [5] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [6] Baker W E. Explosions in Air. US: Texas, 1973.
- [7] 隋树元. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

Numerical Simulation of TNT Explosion with Post-detonation Burning Effect in Air

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 of TNT explosion in air was performed by AUTODYN software. Post-detonation burning effect in negative oxygen balance explosive was considered in the numerical calculation model. Calculated results including peak overpressure, specific impulse and positive time were compared with that calculated by similitude equations and experimental data from Baker. Results show that airblast peak overpressure near explosive calculated by Brode equation is much larger than that AUTODTN software and Henrych equation, because the peak pressure of airblast can not be distinguished from that of detonation products.

Key words: explosion mechanics; AUTODYN software; post-detonation burning effect; Henrych equation; Brode equation; TNT explosion