

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.006

# TNT 近地爆炸三波点高度预测及验证\*

张玉磊<sup>①</sup> 袁建飞<sup>①</sup> 蒋海燕<sup>①</sup> 杨啸天<sup>②</sup> 李芝绒<sup>①</sup>  
①西安近代化学研究所(陕西西安,710065)  
②空装驻西安地区第七军事代表室(陕西西安,710065)

[摘 要] 在已有研究数据的基础上,通过提取大量数据并借助数学计算工具进行了高精度拟合,得到了 TNT 近地爆炸三波点高度预测公式,并开展了文献数据验证和试验验证。结果表明,公式预测结果与文献、试验结果高度一致,可用于 TNT 近地爆炸冲击波三波点高度的精确预测,也为其他高爆炸药的三波点高度预测提供了参考。  
[关键词] 爆炸力学;爆炸冲击波;超压峰值;马赫反射;三波点  
[分类号] O381

## Prediction and Verification of Triple Point Height of Near Ground TNT Explosion

ZHANG Yulei<sup>①</sup>, YUAN Jianfei<sup>①</sup>, JIANG Haiyan<sup>①</sup>, YANG Xiaotian<sup>②</sup>, LI Zhirong<sup>①</sup>  
① Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

② The Seventh Representative Office of Air Force Equipment Department in Xi'an (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Based on the research results of the TM5-1300 high-precision fitting was carried out using a large amount of data and mathematical calculation tools to obtain the formula in calculating the triple point height of near ground TNT explosion. The correctness of the predicted data was verified by comparing with the literature data and the experimental data. Results show that the calculated results are in well agreement with the experimental or reference ones, which can be applied to the accurate prediction of the triple point height of near ground TNT explosion. It also provides a reference for the prediction of the triple point height of other high explosives.  
[KEYWORDS] mechanics of explosion; explosion shockwaves; overpressure peak; Mach reflection; triple point

## 引言

由马赫(Mach)发现的马赫反射现象既有理论研究意义,又有工程应用背景,受到研究人员的高度重视。由于装药近地爆炸后马赫波的形成是非定常的,涉及到变强度冲击波由规则反射向马赫反射的转变准则等复杂问题,迄今为止,冲击波(尤其是曲面冲击波)的马赫反射问题,如三波点迹线、马赫杆形状及高度等,还没有得到完全解决。

研究人员采用理论分析、试验测试和数值仿真等多种手段研究马赫反射现象,试图寻找三波点高度的变化规律。徐彬等<sup>[1]</sup>对球面激波在固壁上的马赫反射现象进行了数值计算和试验研究,得到了不同马赫数下的三波点迹线计算程序。文献[2-4]

报道了近地爆冲击波传播试验,获得了三波点上、下方的波形曲线。Swisdak<sup>[5]</sup>将 TNT 空中爆炸的三波点高度、对比炸高、比例距离之间的关系用图表进行了描述。乔登江<sup>[6]</sup>对大量的空爆实验结果进行分析,给出了 TNT 空中爆炸三波点高度计算的公式;但公式中地面修正系数取值范围较大(0.035 ~ 0.100),计算结果难以满足使用需要。段晓瑜、商行等<sup>[7-8]</sup>基于 AUTODYN 开展了 RDX 基炸药三波点高度的数值计算研究,但结果不具有普适性,且未开展试验验证。郭炜等<sup>[9]</sup>采用改变自由场传感器高度的方法得到了 TNT 爆炸三波点高度,但研究结果有待完善。

本文中,基于现有的研究成果,得到近地爆炸的三波点高度计算的高精度公式,可判断爆炸场中各位置处的冲击波类型,对冲击波威力参数测试的测

\* 收稿日期:2019-09-27  
基金项目:国家安全重大基础研究项目  
第一作者:张玉磊(1987-),男,副研究员,从事毁伤测试与评估工作。E-mail:kaka-zyl@163.com  
通信作者:李芝绒(1968-),女,研究员,主要从事舰船目标毁伤效应评估工作。E-mail:lzr204@163.com

点布设、威力评估具有重要意义。

## 1 理论分析

典型的近地爆炸冲击波传播过程如图 1。炸药装药起爆后,形成图 1 中 A 所示的球面入射波并向周围扩展;入射波与地面接触后,形成如 B 所示的近似半球面反射波并向上扩展。当入射波与地面的入射角大于临界入射角(约  $40^\circ$ )之后,就会出现马赫反射。于是就产生了马赫波。反射波、入射波和马赫波的界面就是三波点,如图 1 中 C、D、E 所示。

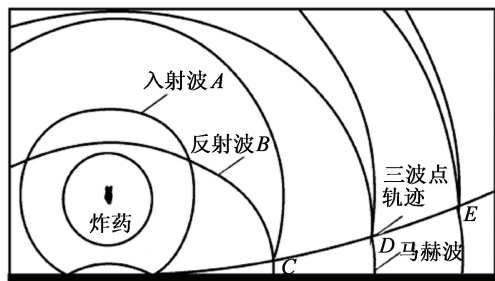


图 1 爆炸冲击波传播示意图

Fig. 1 Distribution of explosion shock wave

三波点上方为入射波区和反射波区,该区内的压力时程曲线为双峰压力波,如图 2 所示;其中,首峰为入射波压力峰值,二峰为反射波压力峰值。三波点下方为马赫波区,该区内的压力时程曲线为单峰压力波,如图 3 所示,波峰为马赫波峰值,马赫波峰值压力大于相同距离处入射波峰值压力。马赫波的前沿为马赫杆,马赫杆高度(即三波点高度)随着传播距离的增加而增加。

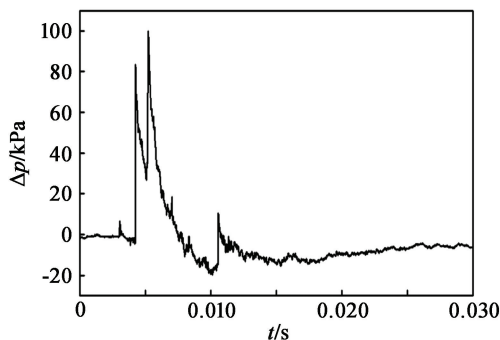


图 2 三波点上方的双峰冲击波

Fig. 2 Shape of shock wave above triple point

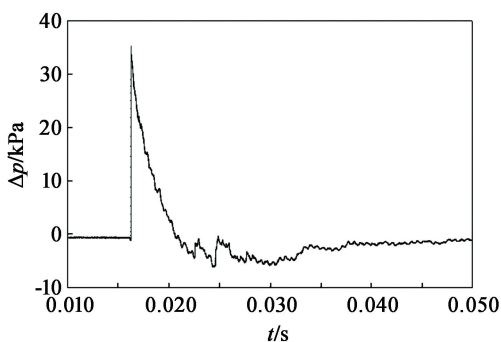


图 3 三波点下方的单峰冲击波

Fig. 3 Shape of shock wave below triple point

的方法给出,而数值计算结果的准确性需要试验验证;因此,基于大量的试验数据开展三波点高度预测公式研究是可行且可靠的。由于该方法需要海量的试验数据,为此专门开展大量的试验耗时且耗力。本文中,在前人的研究基础上得到三波点的预测公式,通过搜集文献数据,结合试验数据对预测结果的正确性进行验证。

为获得弹药爆炸冲击波威力,美军开展了大量的试验研究,其成果集成于 TM5-1300 手册,其中就给出了 10 种比例炸高  $H_c$  条件下 TNT 爆炸的三波点高度预测曲线<sup>[10]</sup>,如图 4 所示。图 4 中,  $H_c$  的单位为  $\text{m/kg}^{1/3}$ 。

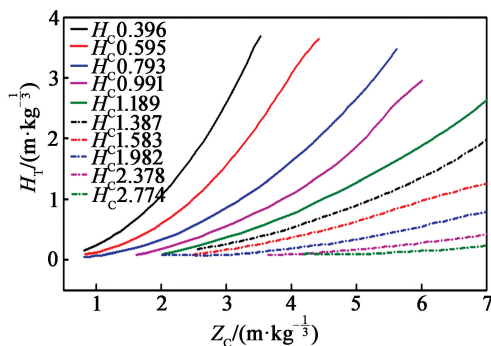


图 4 10 种炸高条件下三波点的比例高度

Fig. 4 Scale heights of triple point at 10 kinds of blasting heights

从图 4 可以看出,比例距离  $Z_c$  和比例炸高  $H_c$  是影响三波点比例高度  $H_T$  的主要因素。在相同比例炸高条件下,三波点的比例高度随着比例距离的增加而增加;在相同比例距离处,三波点的比例高度随比例炸高的增加而减小。

这种图表形式在指导实际应用时存在诸多不便,如比例炸高不连续,对于任意炸高对应的马赫杆高度预测需要进行插值计算,且插值得到的结果准确性有待验证。

## 2 预测公式及验证

### 2.1 公式拟合

如前文所述,三波点的高度难以通过理论分析

针对这一问题,为满足实际工程需要,在 TM5-1300 手册的基础之上,通过数学计算的方法得到连续的马赫杆高度预测公式,并通过试验进行验证。

令

$$H_T = \frac{h_t}{\sqrt[3]{Q}}; \tag{1}$$
$$Z_c = \frac{z_c}{\sqrt[3]{Q}}; \tag{2}$$
$$H_c = \frac{h_c}{\sqrt[3]{Q}}. \tag{3}$$

式中: $H_T$  为三波点比例高度,  $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ;  $Z_c$  为比例距离,  $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ;  $H_c$  为比例炸高,  $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ ;  $h_t$  为三波点高度,  $\text{m}$ ;  $z_c$  为爆心距,  $\text{m}$ ;  $h_c$  为炸高,  $\text{m}$ ;  $Q$  为装药量,  $\text{kg}$ 。

采用图像处理软件,在不同比例炸高条件下的三波点高度曲线上各选取 100 个数据点;经数据拟合软件处理可以发现,在比例炸高一定的条件下,三波点的比例高度随比例距离的增加呈指数增加,其函数形式为

$$H_T = \alpha Z_c^\beta. \tag{4}$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  为待定系数。

不同比例炸高条件下的  $\alpha$ 、 $\beta$  值如表 1 所示。

表 1 不同比例炸高条件下的 $\alpha$ 、 $\beta$ 值		
Tab. 1 $\alpha$ and $\beta$ at different scale heights		
$H_c/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$\alpha/10^{-3}$	$\beta$
0.396	227.230	2.216
0.595	131.080	2.265
0.793	72.040	2.243
0.991	32.100	2.512
1.189	33.650	2.242
1.387	19.370	2.376
1.583	17.240	2.224
1.982	5.860	2.529
2.378	2.180	2.699
2.774	0.926	2.827

采用数据拟合软件辅助分析,得到  $\alpha$ 、 $\beta$  与  $H_c$  的关系如下:

$$\alpha = 0.456e^{-2.232H_c}, R^2 = 0.99; \tag{5}$$

$$\beta = -0.225H_c^4 + 1.463H_c^3 - 3.174H_c^2 + 2.744H_c + 1.512, R^2 = 0.84. \tag{6}$$

表 1 中的  $\alpha$ 、 $\beta$  值和式(5)、式(6)拟合曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,  $\alpha$  随比例炸高的增加而减小,式(5)的拟合精度很高;而  $\beta$  随比例炸高的增加,总

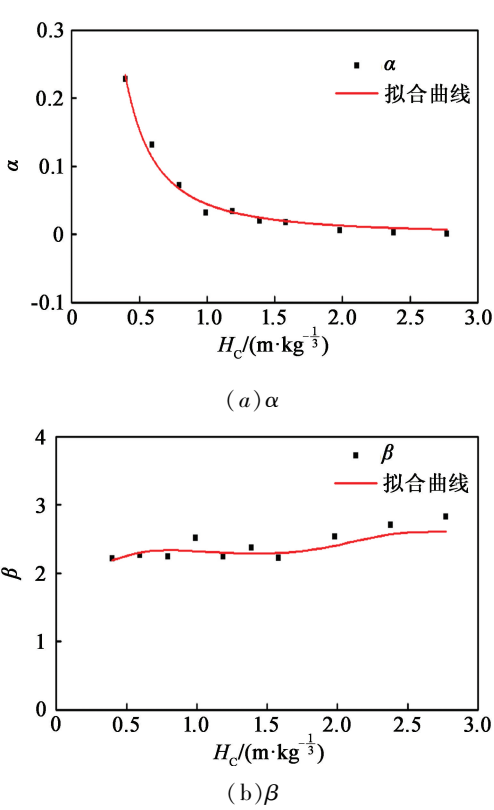


图 5  $\alpha$  和  $\beta$  的拟合  
Fig. 5 Fittings of  $\alpha$  and  $\beta$

体上呈增加趋势,但在比例炸高小于  $2.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,  $\beta$  值振荡分布于 2.3 上下,故式(6)的拟合精度稍欠。因此,拟合得到的三波点比例高度计算公式的精度主要取决于  $\beta$  值的精度。

通过试验数据,可以对三波点比例高度预测的准确性进行验证。

将式(5)、式(6)代入式(4),可得

$$H_T = 0.456e^{-2.232H_c} \cdot Z_c^{(-0.225H_c^4 + 1.463H_c^3 - 3.174H_c^2 + 2.744H_c + 1.512)}. \tag{7}$$

式(7)的适用范围为  $0.396 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3} \leq H_c < 2.774 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 、 $Z_c < 7.133 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。当比例炸高大于  $0.350 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  且小于  $0.396 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,可作空中爆炸处理;当比例距离大于  $7.000 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,入射压已衰减到  $0.02 \text{ MPa}$  以下,对各类目标的毁伤能力可以忽略。因此,式(7)的使用范围已经基本满足近地爆炸的威力预测等需求。

图 6 为式(7)的三维曲面图,可以看出,当比例距离  $Z_c > 3.0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  时,三波点比例高度随着比例炸高的减小迅速增加。

图 1 所示的近地爆炸冲击波传播过程表明,要准确地测到冲击波入射压,传感器布设高度须大于三波点高度。但是,传感器布设高度大于  $2 \text{ m}$  后,高而细的传感器安装杆在冲击波和动压的作用下很难

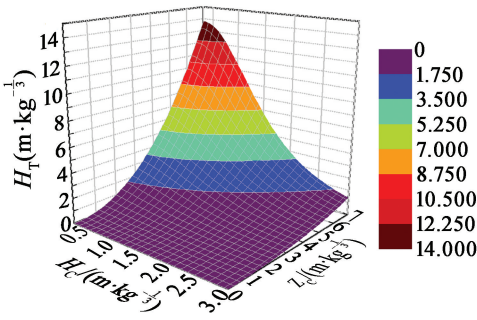


图 6 三波点比例高度的曲面图

Fig. 6 Surface graph of the scale heights of triple point

保持稳定,对冲击波压力测试精度影响不可忽略,爆炸冲击波入射压力全域测试仍是一个难题。

2.2 验证

通过调研文献值和验证试验,开展对式(7)的准确性验证。文献[9]开展了装药量为 1.17 kg 的 TNT 炸药、炸高为 1.5 m、测点高度为 1.5 m 的爆炸试验,不同爆心距处的冲击波压力峰值测试结果如图 7 所示。结果显示,爆心距小于 6.5 m 内的冲击波峰值单调递减,而 7.0 m 处的冲击波峰值大于 6.5 m 处的。这表明,在该试验条件下,三波点高度为 1.5 m 对应的爆心距位于 6.5 m 和 7.0 m 之间。由式(7)可得,当爆心距为 6.9 m 时,三波点高度为 1.5 m,预测结果符合测试结果。

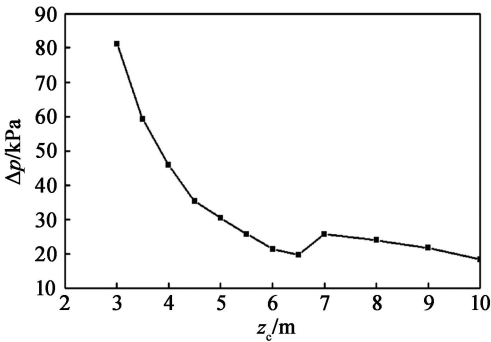


图 7 超压峰值随爆心距的变化

Fig. 7 Variation of overpressure peak with distance

文献[9]还采用调整两个自由场压力传感器之间的高度,使其逼近三波点高度的试验方法,通过多发试验,得到了低于 1.5 m 范围内不同距离处的三波点高度。式(7)计算的结果与试验值对比如表 2 所示。从偏差结果来看,除爆心距为 3.0 m 外,预测误差均不超过 10.0%,平均偏差为 6.1%,可用于三波点高度的预测。

爆心距为 3.0 m 处预测偏差达 18.5%,其原因可能有两方面:其一,式(6)对  $\beta$  值的拟合精度稍

表 2 三波点高度计算结果与试验结果的偏差

Tab. 2 Error analysis of the experimental data and calculated data

爆心距/m	试验值/m	计算值/m	相对偏差/%
3.0	0.27	0.22	-18.5
3.5	0.32	0.31	-3.1
4.0	0.40	0.42	5.0
4.5	0.50	0.55	10.0
5.0	0.70	0.70	0.0
5.5	0.87	0.87	0.0
6.5	1.00	1.06	6.0

欠;其二,对比爆心距小于 3.0 m 的测试重复性较差,试验结果本身的误差也较大。

由于高空布设传感器的难度较大,近地爆炸的冲击波入射压测试样本量较少,为进一步验证式(7)的准确性,开展了装药量为 2 kg 的 TNT 炸药、炸高为 1.5 m 的爆炸试验。冲击波压力测点高度 1.5 m,测点距离分别为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 m,各测点获得的冲击波压力曲线如图 8 所示。

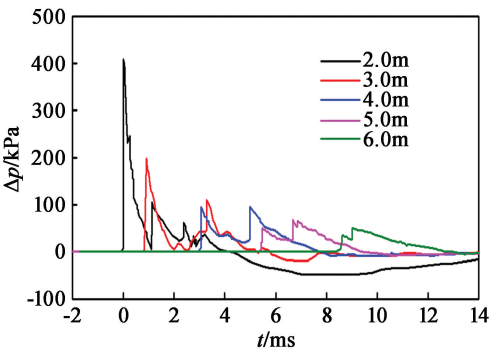


图 8 不同距离处的空中压力测点波形

Fig. 8 Air pressure waveforms of measuring points at different positions

该试验条件下,在爆心距大于 1.3 m 后开始形成马赫反射。从图 8 可以看出,空中各测点压力波形均出现了双峰,根据近地爆炸冲击波传播规律可知,所有测点均位于三波点上方,其中第一个峰是冲击波入射压力峰,第二个峰是地面反射压力峰。随着爆心距的增加,反射压力峰逐渐接近入射压力峰,在 6.0 m 测点处反射压力峰与入射压力峰最为接近,故在该试验条件下 6.0 m 处三波点高度仍小于 1.5 m。可以推断,在水平爆心距大于 6.0 m 的某处,三波点高度将达到并超过 1.5 m,反射波峰和入射波峰将叠加形成单峰波形,该峰值压力大于入射压力峰值。将试验条件代入式(7)可得,当水平爆心距为 6.1 m 时,三波点高度为 1.5 m,预测结果符



合试验结果。

3 结论

在现有研究基础之上,分析了不同比例炸高和比例距离条件下 TNT 近地爆炸的三波点高度,拟合得到了 TNT 爆炸场三波点高度预测公式。通过与文献数据和试验数据的对比表明,该公式计算结果与试验结果符合度较高,可为爆炸冲击波威力测试测点布局、测试结果评估等工作提供依据,同时可为其他种类装药爆炸场三波点高度计算提供参考。

参 考 文 献

[1] 徐彬,陈志坚,郭长铭. 球面激波在固壁上马赫反射的数值计算及试验研究(I) [J]. 爆炸与冲击,1987,7(3):223-229.  
XU B, CHEN Z J, GUO C M. Numerical computation and experiments of Mach reflection of spherical shock wave on rigid wall (I) [J]. Explosion and Shock Waves,1987,7(3):223-229.

[2] 王建灵,郭炜,冯晓军. TNT、PBX 和 Hexel 空中爆炸冲击波参数的实验研究[J]. 火炸药学报,2008,31(6):42-44,68.  
WANG J L, GUO W, FENG X J. Experimental research on the air explosive shock wave parameters of TNT, PBX and Hexel[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008,31(6):42-44,68.

[3] 陈昊,陶钢,蒲元. 冲击波的超压测试与威力计算[J]. 火工品,2010(1):21-24.  
CHEN H, TAO G, PU Y. The measurements of overpressure of shock wave and analysis of TNT equivalent [J].

Initiators and Pyrotechnics,2010(1):21-24.

[4] 杜红棉,曹学友,何志文,等. 近地爆炸空中和地面冲击波特性分析和验证[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(4):65-68.  
DU H M, CAO X Y, HE Z W, et al. Analysis and validation for characteristics of air and ground shock wave near field explosion [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2014,34(4):65-68.

[5] SWISDAK M M. Explosion effects and properties. Part I. Explosion effects in air; A018544 [R]. New York: Naval Surface Weapons Center,1975:10-16.

[6] 乔登江. 空中爆炸冲击波(I)基本理论[J]. 爆炸与冲击,1985,5(4):78-85.  
QIAO D J. Explosion waves in air (I) basic theory [J]. Explosion and Shock Waves,1985,5(4):78-85.

[7] 段晓瑜,郭学永,聂建新,等. RDX 基含铝炸药三波点高度的数值模拟[J]. 高压物理学报,2018,32(3):73-80.  
DUAN X Y, GUO X Y, NIE J X, et al. Numerical simulation of the three-wave point of RDX-based aluminized explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018,32(3):73-80.

[8] 商航. RDX 含铝炸药空中爆炸特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

[9] 郭炜,俞统昌,金朋刚. 三波点的测量与实验技术研究[J]. 火炸药学报,2007,30(4):55-57,61.  
GUO W, YU T C, JIN P G. Test of triple point and study on its test technology [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2007,30(4):55-57,61.

[10] TM5-1300, The design of structures to resist the effects of accidental explosions, technical manual [M]. Washington: US Department of the Army, Navy, and Air Force,1990.