

# 拐角角度对爆轰波拐角效应的影响<sup>①</sup>

李生才<sup>a, b</sup> 冯长根<sup>a</sup> 赵同虎<sup>b</sup>

(a. 北京理工大学爆炸灾害预防控制国家重点实验室 北京 100081)

(b. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室 绵阳 621900)

**摘要** 利用高速摄影技术研究了拐角角度分别为  $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  情况下注装 TNT 中爆轰波的拐角绕射现象。结果表明,拐角距离和死区面积随拐角角度的变化而变化。拐角为  $60^\circ$  时没有明显的爆轰波滞后现象;随着拐角角度的增大,拐角距离减小;拐角为  $120^\circ$  时,有死区(未爆区)存在。

**关键词** 爆轰波 拐角效应 拐角 角度 注装 TNT

中图法分类号 O381

## 1 前言

拐角效应是爆轰学中的重要研究内容,对于了解炸药性能、合理设计弹体以及发散爆轰波传播理论的研究等有着十分重要的意义。多年来许多学者对多种炸药中的爆轰波拐角现象进行了研究。1947年, Mitchell 和 Paterson<sup>[1]</sup> 发现,在液体炸药硝化甘油起爆过程中,径向爆速要比轴向爆速小。这是目前所知最早从实验的角度报道爆轰波特殊传播现象的论文,发表在著名的《自然》杂志上。1948年, Jones 和 Mitchell<sup>[2]</sup> 在《自然》杂志上发表了第二篇论文,将观察到的这一现象称为弯钩效应(即拐角效应),并认为这仅仅是起爆过程中短暂的低速爆轰所致,发生在部分高能炸药,特别是液体炸药和胶体炸药的起爆过程中。同年, Herzberg 和 Walker<sup>[3]</sup> 在《自然》杂志发表了第三篇论文,报道了利用转镜相机观察到在雷管的起爆过程中,药柱表面爆轰波的延迟扩展情况,认为拐角效应在没有低速爆轰情况下也会出现,而且在起爆过程中存在一个起爆距离(称为拐角距离)。这以后的一个里程碑是 1970年, Silvia 和 Ramay<sup>[4]</sup> 在研究爆炸逻辑元件时,发现和利用了炸药小直径通道拐角传爆时爆轰波的不稳定性(即拐角效应),并从此把这一现象作为爆炸逻辑零门开关装置的理论设计依据。后来,在 1976年, Dick<sup>[5]</sup> 用脉冲 X 射线照相法研究了 X-0219 和 X-0290 两种炸药中的爆轰波拐角现象,观察了拐角距离、拐角半径和不爆区的面积。Cox 和 Campbell<sup>[6]</sup> 利用多狭缝扫描技术观察了 PBX-9502 炸药中的爆轰波拐角现象,得到了炸药中不爆轰区域的大小。卫玉章、赵峰等<sup>[7,8]</sup> 进行了类似的工作。Held<sup>[9]</sup> 也利用高速摄影研究了起爆冲击波强度对拐角效应的影响。赵同虎等<sup>[10]</sup> 研究了液体炸药硝基甲烷中拐角角度变化时的爆轰波拐角现象。刘举鹏<sup>[11]</sup> 研究了肼安-硅橡胶炸药中的爆轰波拐角效应。冯长根、王树山等<sup>[12~15]</sup> 进一步研究了小尺寸拐角装药中的延迟爆轰现象和小尺寸弯曲装药中的爆速亏损现象。爆轰波拐角效应的数值模拟也取得了一定进展<sup>[16~18]</sup>。

我们采用分幅照相和多狭缝扫描照相相结合的方法时,研究得到了拐角角度对注装 TNT

① 国家自然科学基金资助(批准号 19672009)。  
李生才:男,1970年10月生,博士,讲师。  
1998-11-10 收到原稿,1999-03-16 收到修改稿。

中爆轰波拐角效应的影响。这些结果为研究新型的具有类似于半导体逻辑功能的爆炸装置等提供了科学依据,是一个重要研究方向。

## 2 实验

观察爆轰波拐角效应,除了要有性能优越的高速相机,还需要设计合理和恰当的高速摄影方法。我们的实验装置如图1所示。雷管1选用C-3高压雷管。传爆药柱2为肼安,直径32mm,厚度11mm。炸药透镜3是一个直径100mm,角度 $37^\circ$ 的平面爆轰波发生器,用于起爆炸药4。炸药4由40%的TNT和60%的RDX组成。为了避免在爆轰波绕射完成之前,爆轰

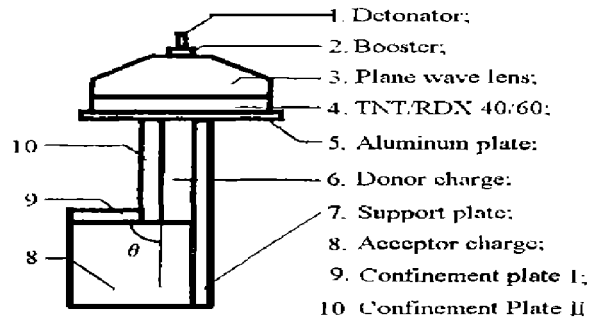


图1 观察爆轰波拐角效应的实验装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram for experimentally observing the corner-turning of detonation wave

产物将被发药柱8打坏,铝隔板5用来阻挡炸药透镜及药柱4的爆轰产物。图中10和9分别是约束板I和约束板II,用于阻挡主发药柱6的爆轰产物。主发药柱和被发药柱8均是注装TNT,密度为 $(1.56 \pm 0.01) \text{g/cm}^3$ ,爆速约 $6.7 \text{km/s}$ ,主发药柱长80mm、宽15mm,被发药柱宽60mm,主发药柱和被发药柱厚度均为50mm。为了观察不同角度下的情况,图中拐角 $\theta$ 分别取 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 。由于主发药柱较长,侧面的支撑板7(有机玻璃)起支撑作用。为了消除爆轰产物发光对摄影效果的影响,以便只记录爆轰波阵面的位置,炸药表面覆盖一块抛光有机玻璃(图中未画出),炸药和有机玻璃之间是一层医用胶布。当冲击波进到胶布的空气隙时,冲击波直接或经多次反射增强后电离空气隙中的空气而发强光,这一强光由高速相机记录下来。当冲击波离开胶布进入有机玻璃时,光源熄灭,有机玻璃受压缩而变成不透明介质,这样爆轰产物发光被遮盖住,因此有机玻璃起到了光快门的作用。在被发药柱表面设一标尺,用来确定物像比。多狭缝扫描采用7条狭缝。第一条狭缝在主发药柱的中心线,狭缝之间的间距为7.5mm。多狭缝扫描实验中将与被发药柱接触的约束板I削去 $30^\circ$ ,代之以真空封泥,用来减弱约束板I中冲击波的作用。实验所需分幅照相采用FJZ-250型高速分幅相机,扫描照相采用GSJ型高速扫描相机。

## 3 实验结果

由于爆轰实验费用较贵,我们只选择了三个具有代表性的情况,即拐角为 $90^\circ$ 以及拐角大于、小于 $90^\circ$ 的情况。在分幅照相过程中,当拐角 $\theta$ 为 $90^\circ$ 时,每幅时间间隔为 $1\mu\text{s}$ ,拐角 $\theta$ 为 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ 时,每幅时间间隔为 $0.667\mu\text{s}$ 。用高速摄影清楚地观察到了爆轰波拐角效应,典型的分幅照相结果如图2所示,图两侧的数字代表测量过程中的时间顺序。典型的多狭缝扫描轨迹如图3所示,扫描速度为 $3\text{mm}/\mu\text{s}$ 。图中爆轰波自上向下传播,图3中第 $n$ ( $n=1, 2, \dots, 7$ )条轨迹是通过第 $n$ 条狭缝得到的观察结果,交界面位置(图中标为interface)指主发药柱与被发药柱的交界面位置。把实验得到的不同角度下观察到的爆轰波分幅照相的结果(见图2)经过判读仪判读,数据处理后,得到各时刻不同角度下爆轰波阵面位置示意图如图4所示。从图中可以看出,在注装TNT中,有明显的爆轰波拐角效应,在拐角为 $120^\circ$ 时产生“死区”。在图4(c)中标有1的曲线代表从第一幅照片得到的爆轰波阵面位置,其余类推。现把观察到的爆轰波传播现象讨论如下。

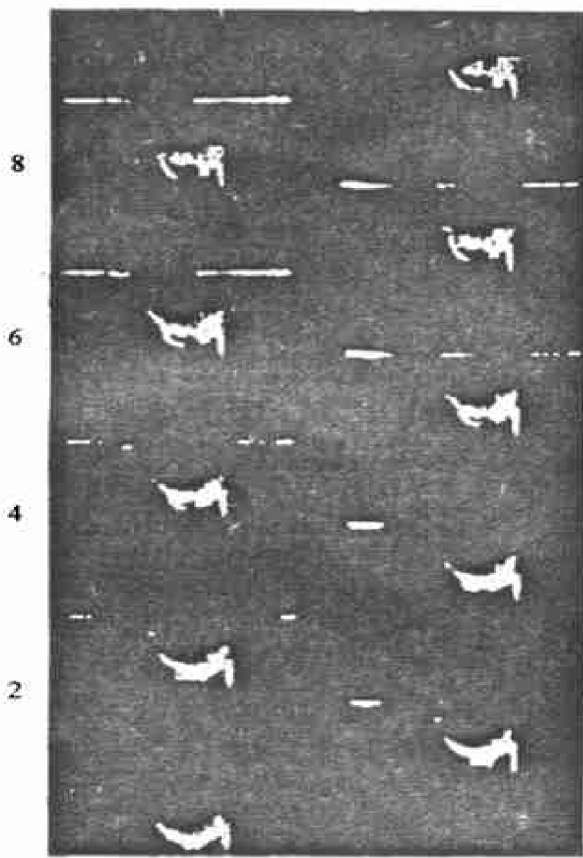
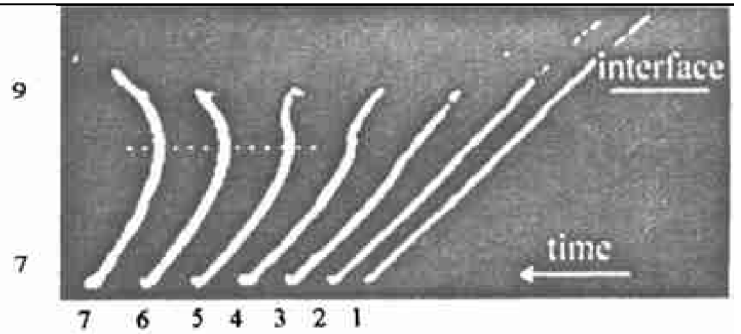
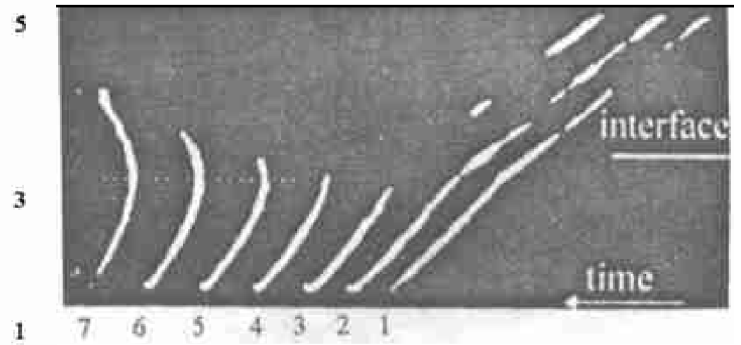


图 2 拐角  $\theta$  为  $120^\circ$  时的分幅照片  
(每幅时间间隔  $0.667\mu\text{s}$ , 顺序如两侧数字所示。)  
Fig.2 Framing photographs of detonation waves passing  
round  $120^\circ$  convex angle (The interval between  
the two photographs is  $0.667\mu\text{s}$  and the numbers  
indicates the sequence)



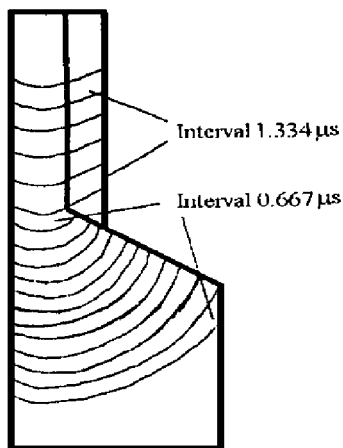
(a)  $\theta = 90^\circ$



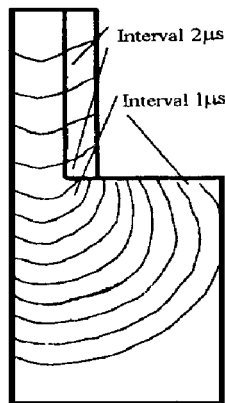
(b)  $\theta = 120^\circ$

图 3 典型的多狭缝扫描轨迹照片  
(水平方向为时间轴;爆轰波自上向下传播;  
图中 interface 所标位置指主发药柱  
与被发药柱间的交界面。)

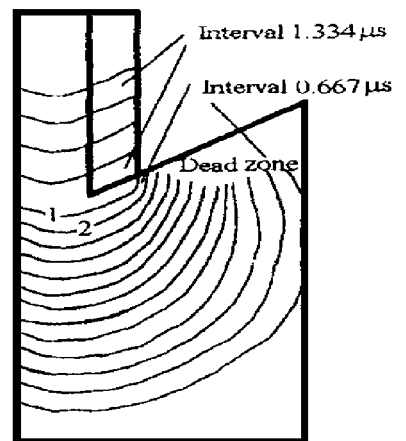
Fig.3 Typical smear film trace of 7 slits (The time  
axis is horizontal;the detonation proceeds from top to  
bottom, and the line indicated "interface" is the contact  
surface of the donor charge and the accepting charge)



(a)  $\theta = 60^\circ$



(b)  $\theta = 90^\circ$



(c)  $\theta = 120^\circ$

图 4 各时刻爆轰波阵面位置的示意图  
(图中 "interval" 指两幅分幅照片的结果, 即图中两条曲线之间的时间间隔, "dead zone" 指未爆轰区)

Fig.4 Diagram of the variation of the position of detonation wave front with time  
( "interval" indicates the time interval between two lines corresponding to the results taking from  
two photographs, and "dead zone" means the undetonated zone)

### 3.1 拐角距离

多狭缝轨迹照片(见图3)给出了非常直观的爆轰波发展过程和爆轰波的拐角效应。根据文献[6]的方法,在扫描轨迹上如果某一点处的切线与主发药柱边缘平行,则将此扫描轨迹拟合为三次多项式,然后进行微分,可以得到这一切点,定义此点到被发药柱起爆面的距离为拐角距离。在图3所示的扫描轨迹照片中,每幅有3条轨迹表明发生了拐角现象,即狭缝5、6、7得到的轨迹上的起始突破点在弯钩的顶端(图中虚线与扫描轨迹的交点)。在拐角角度为 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 时,计算得到的拐角距离列于表1。由表1可知,拐角角度对拐角距离有较大的影响,当拐角角度增大(由 $90^\circ$ 增大到 $120^\circ$ )时,拐角距离是下降的(由11.2mm降为5.2mm)。

表1 拐角距离随拐角角度的变化

Table 1 The variation of corner-turning distance with convex angles

Convex angle $\theta$	Distance from the edge of the donor charge/mm	Corner-turning distance/mm	Average corner-turning distance/mm
$90^\circ$	22.5	10.9	11.9
	30	12.3	
	37.5	12.4	
$120^\circ$	22.5	5.1	5.2
	30	5.3	
	37.5	5.2	

我们的实验中,被发药柱顶端的约束材料是有机玻璃。它的冲击阻抗低于注装TNT的冲击阻抗,因此在爆轰波拐角过程中,被发药柱顶端边界将有稀疏波传入炸药。 $120^\circ$ 拐角与 $90^\circ$ 拐角相比,被发药柱中,与主发药柱中爆轰波传播方向成 $90^\circ$ 角处的介质,前者是连续介质注装TNT,后者是有机玻璃。因此在爆轰波拐角过程中,该处冲击波的强度将发生变化,在拐角为 $90^\circ$ 情况下,从有机玻璃处传出的稀疏波将减弱冲击波的强度。而拐角为 $120^\circ$ 情况下则不会出现这一问题,属于爆轰波的绕射。因此造成的拐角距离在两种拐角角度情况下有所不同。拐角角度为 $90^\circ$ 时的爆轰波的拐角距离大于拐角角度为 $120^\circ$ 时的拐角距离。

### 3.2 未爆轰区

图4是从分幅照片中(见图2)得到的,它给出了比图3更多的信息。图5是由图4(c)中的熄爆点位置的拟合曲线。从图4中可以看到爆轰波在样品中的发展以及因爆轰波拐角效应而出现的未爆轰区。爆轰波拐角效应的原因,在于爆轰波传播媒介(TNT炸药)由小直径向大

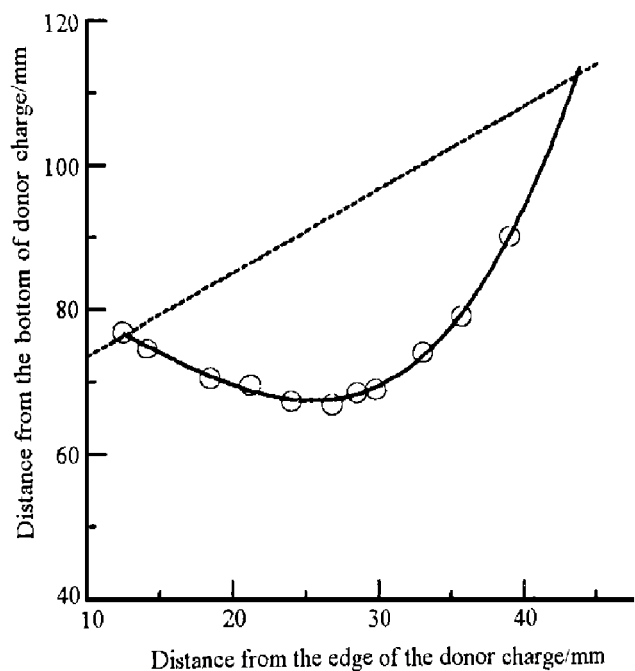


图5 拐角为 $120^\circ$ 时熄爆点位置,拟合线为四次多项式,用来确定死区边界及面积;虚线代表炸药的边界面

Fig. 5 The positions of the detonation failure points.

The solid line represents the forth-order polynomial fitting used to define the dead region and to determine its area.

The dash line represents the edge of the explosive

直径的突然变化(见图1),使得前沿冲击波由于面积突然扩张而强度下降。有一扰动向冲击波阵面传播。当地前沿冲击波能量的不同造成炸药反应速率不同,爆轰状态不同,在拐角处出现爆轰波滞后现象和部分炸药未发生爆轰。由图4可知,拐角处的爆轰波滞后区随拐角角度的不同而不同。当拐角为 $120^\circ$ 时,分幅照相和多狭缝扫描都发现有未爆轰区(死区)存在,当拐角为 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 时,没有发现死区。在图4(c)中,未爆轰区(死区)指由爆轰波阵面上的熄爆点(接近被发药柱起爆面)与被发药柱边界面围成的区域。为了计算死区的面积,将这些熄爆点拟合为四次多项式曲线(见图5)。此曲线与炸药边界面包围的面积即死区的面积,经计算图5中死区面积为 $268\text{mm}^2$ 。

### 3.3 有机玻璃中冲击波的起爆作用

实验同时显示了有机玻璃中冲击波的起爆作用,这是值得注意的效应。在图4(c)中,从图4(c)中标有“1”的曲线可以看到拐角处与约束板 I 接触的炸药,在绕射爆轰波没有传到前已发生反应,即从约束板 I 传出的冲击波可以起爆与之接触的注装 TNT。

## 4 结 论

应用高速摄影技术研究拐角角度变化时注装 TNT 中的爆轰波拐角现象,得到以下重要结论:

(1)注装 TNT 中,在本文的样品尺度(主发药柱宽 15mm,被发药柱宽 60mm)下,有明显的爆轰波拐角效应,拐角处存在爆轰波滞后现象。

(2)爆轰波滞后区的大小随拐角角度的不同而不同。拐角为 $60^\circ$ 时,没有明显的爆轰波滞后现象;拐角为 $90^\circ$ 时,在被发药柱与约束板 II 的交界面处爆轰波出现滞后;拐角为 $120^\circ$ 时,观察到明显的死区(未爆区),死区面积为 $268\text{mm}^2$ 。

(3)拐角距离随拐角角度的变化而变化。拐角角度由 $90^\circ$ 增大到 $120^\circ$ 时,拐角距离由 11.2mm 降为 5.2mm。

(4)从有机玻璃中传出的冲击波能够起爆拐角处的注装 TNT。

本文得到中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室韩立石、张广生两位同志在实验上的协助,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Mitchel D, Paterson S. Spread of Detonation in High Explosives. *Nature*, 1947, 160: 438 ~ 439
- 2 Jones E, Mitchel D. Spread of Detonation in High Explosives. *Nature*, 1948, 161: 98 ~ 99
- 3 Herzberg G, Walker G R. Initiation of High Explosives. *Nature*, 1948, 161: 647 ~ 648
- 4 Silvia D A, Ramay R T. Explosive Elements. U S Patent 3496868, 1970
- 5 Dick R D. Insensitive Explosive Studies Using PHERMEX. In: Lawrence E B, JR, ed. Proceedings of the Flash Radiography Symposium. Columbus, USA: The American Society for Nondestructive Testing, 1976. 179 ~ 192
- 6 Cox M, Campbell A W. Corner-Turning in TATB. In: Short J M, ed. The Proceedings of the 7th Symposium (International) on Detonation. White Oak MD, USA: Naval Weapons Center, 1981. 624 ~ 633
- 7 Wei Yuzhang, Zheng Peisen. The Divergence and Transmission of Detonation Wave in the TATB/HMX Boosters. In: Ouyuxiang, Feng Changgen, Zhang Baoping, eds. The Proceedings of the 17th International Pyrotechnics Seminar Com-

- bined with the 2nd International Symposium on Pyrotechnics and Explosive. Beijing, China: Beijing Institute of Technology Press, 1992. 864 ~ 870
- 8 Zhao Feng, Wei Yuzhang. The Divergence Detonation Propagation in Plastic-bonded TATB. In: Zhang Guanren, Huang shihui, eds. The Proceedings of the 2nd International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effect. Chengdu, China: Sichuan University Press, 1992. 133 ~ 137
  - 9 Held M. The Effect of the Strength of Initiation upon the Corner Effect. In: Zheng Zhemin, Ding Jing, eds. The Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and its Effects. Beijing, China: Science press, 1986. 136 ~ 143
  - 10 赵同虎, 于 川, 韩立石, 等. 硝基甲烷中爆轰波的拐角绕射实验研究与数值模拟. 爆炸与冲击, 1994, 14 (2): 169 ~ 174
  - 11 刘举鹏. 爆轰波的拐角绕射现象机理及其应用研究: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 1990
  - 12 Feng Changgen, Wang Shushan, Jiao Qingjie, et al. The Time Delay of Detonation at Turning Corner. In: Tulis A J, ed. The Proceedings of the 20th International Pyrotechnics Seminar. Chicago, USA: IIT Research Institute, 1994. 309 ~ 314
  - 13 Feng Changgen, Wang Shushan, Jiao Qingjie, et al. Experimental Phenomenon of Detonation Propagating along a Curved Small Charge. In: Fraunhofer-Institute fur Chemische Technologie (ICT), ed. The 26th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany: DWS Werbeagentur und Verlag GmbH, 1995. 73
  - 14 王树山, 焦清介, 冯长根, 等. 有限尺寸弯曲装药的爆速亏损. 北京理工大学学报, 1994, 14(1): 36 ~ 39
  - 15 王树山, 焦清介, 冯长根. 爆轰波转弯传播的延迟现象. 北京理工大学学报, 1994, 14(4): 337 ~ 340
  - 16 Mader C L, Forest C A. Two-Dimensional Homogeneous and Heterogeneous Detonation Wave Propagation. LA 6259, 1976
  - 17 Jia Quansheng, Liu Jupeng, Feng Changgen. Numerical Modeling for Turning Corner Effect of Detonation Wave and Convergent Wave Effect. In: Zhang Guanren, Huang Shihui, eds. The Proceedings of the 2nd International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effect. Chengdu, China: Sichuan University, 1992. 137 ~ 140
  - 18 毛金生. 爆炸逻辑网络技术与非理想爆轰现象: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 1992

## THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF CONVEX CORNER ON THE EFFECT OF DETONATION WAVES

Li Shengcai<sup>a, b</sup>, Feng Changgen<sup>a</sup>, Zhao Tonghu<sup>b</sup>

(a. National Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters,  
Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

(b. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,  
Institute of Fluid Physics, CAEP Mianyang, 621900)

**ABSTRACT** In this paper, the diffraction of detonation wave passing around  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $120^\circ$  convex corners in cast TNT was studied by means of the high-speed photographic techniques. The result indicates that the corner-turning distance and the volume of the dead region change with the angle of the convex corner. The corner-turning distance decreases with the increase of the angle of the convex corner. The delay of the detonation wave is small for the case of  $60^\circ$  convex corner, but the dead (undetonated) region appears for the case of  $120^\circ$  convex corner.

**KEY WORDS** detonation wave, corner effect, convex corner, angle, cast TNT