

塑料导爆管在燃烧转爆轰过程中的 火焰结构及爆轰波生成机理

阳世清 王荪源 杨权中 黄人骏
肖学忠 范钦文 高耀林
(华东工学院化工学院)

摘要 本文系统地研究了塑料导爆管从点火起至稳定爆轰时各个阶段的管内的火焰结构及火焰传播速度,分析了爆轰波的生成过程。高速扫描摄影技术证实了塑料导爆管在电火花引爆下确实存在燃烧转爆轰(DDT)过程,并显示出火焰阵面及火焰内部结构的多种变化性。发现,在燃烧阶段有一个暗区存在于火焰之中,并且火焰只是集中在管中心。清楚地观察到管内有气、固二相流动。证实了铝粉的敏化作用。在实验基础上,本文提出了一个比较符合实际情况的DDT模型及爆轰波结构。

关键词 塑料导爆管 燃烧转爆轰 爆轰波 火焰结构 粉尘炸药

引言

作为非电起爆系统而获得广泛应用的塑料导爆管,也被称作ST(Shock tube) System,具有能把初始冲击信号从管子的一端安全地传到任何远的另一端的能力,它能抗一切电磁场的干扰,因而具有广泛的使用价值。塑料导爆管传输冲击信号的方式是管内壁上附着的极薄的一层粉尘炸药在接受了足够能量激发后,在管内形成了一个大约以1900m/s速度运动的爆轰波^[1]。这种粉尘炸药极不稳定,稍有扰动即可脱离壁表面而与管中的空气混合形成气、固两相混合物。这样的气、固两相混合物形成的爆轰波就是粉尘爆炸。众所周知,粉尘爆炸具有极大的破坏性,粉尘爆炸是近几年一个很活跃的研究领域^[2],以往的实验^[3,4]研究是采用大口径的激波管进行的,既不方便又不经济。由于塑料导爆管极易生产和控制,且安全可靠,因而它可以在一定程度上替代大型激波管,作为研究粉尘爆炸机理的一种强有力,而且非常经济的手段,只要改变管内的装药成分即可研究管内各种粉尘的粉尘爆炸特性。

经过近二十年的研究,塑料导爆管在生产及其应用上得到了很大的发展。但是,有关塑料导爆管爆轰波产生的机理的实验研究还不多,也不够全面和深入。文献[1,3,6]对管内的稳定传爆机理做过一些研究,但只限于讨论稳定爆轰波,没有研究自点火开始至稳定爆轰波形成(燃烧转爆轰DDT)的整个过程。本文采用超高速转镜式扫描摄影技术对塑料导爆管在电火花起爆下的DDT过程进行研究,拍摄了各个阶段的火焰结构,对爆轰波的生成机理进行了探讨。

实验方法

实验用的塑料导爆管管内的装药是由黑索金(RDX)和铝粉(Al)组成的混合粉尘炸药RDX/Al=91/9, 粒度 $3-5\mu\text{m}$, 装药量 16mg/m , 管外径 3mm , 内径 1.5mm 。导爆管管材为聚乙烯, 呈半透明状。管内的化学反应发出强烈的光线, 可以用高速摄影拍摄火焰结构及其传播速度, 实验采用SJZ-15型超高速转镜扫描摄影仪。设定转镜转速6万转/分, 相应的扫描速度 $3\text{mm}/\mu\text{s}$, 即在底片的扫描方向上每 3mm 的长度表示 $1\mu\text{s}$ 的时间。采用航微-1高感度胶卷。实验温度 $10-18^\circ\text{C}$, 在此温度范围内, 导爆管的稳定爆速几乎不受温度的影响^[7], 实验的重复性较好。在塑料导爆管的一端插入火花隙, 外接高速摄影机控制台上的 18kV 脉冲电压, 组成塑料导爆管的电火花起爆方式。

测管内火焰的传播速度时, 将转镜扫描仪上的狭缝重叠于管轴心线上, 能观察到 15mm 长度的管子, 称此为速度扫描方式。当将狭缝垂直于管轴心线时, 可以拍摄出火焰阵面的弯曲程度, 即波头形状, 称此为波形扫描方式。该二种方法都可以获得火焰亮度的变化。通过多次实验, 每次测得一个部分, 可以获得自塑料导爆管的起爆端开始, 至管内形成稳定爆轰波时, 管内各个部分的火焰传播速度、火焰阵面形状及火焰亮度随时间和空间的变化情况。

结果及分析

图1给出了塑料导爆管被电火花起爆后在点火、燃烧及爆轰三个典型阶段时的速度扫描像; 燃烧及爆轰时的波形扫描像示于图2中。图2的每张照片是采用底片部分曝光法获得的, 可以在每张底片上获得2-3次实验的波形扫描像, 便于比较不同位置、时间的火焰结构。图3给出了火焰阵面及爆轰波运动速度与其所传播的位置的关系。上述结果清楚地说明了导爆管内的粉尘炸药经历了一个燃烧转爆轰过程, 这个DDT过程很有一些特点。

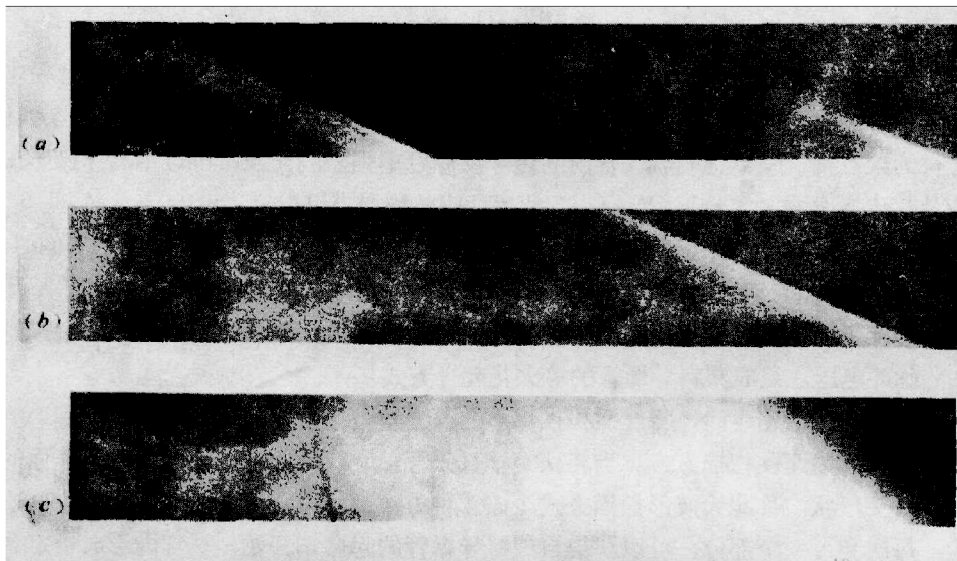
1. 起爆电火花在管内产生了一个高温冲击波(图1a左)。火花隙附近的RDX/Al粉尘被火花立刻点爆, 快速反应产生的高温气体形成一个超声速火焰往前运动, 马赫数 $M_0 \approx 2.6$ 。没有炸药支持时, 该高温火焰很快衰减(图1a右)。

2. 在DDT的燃烧阶段(图1b及图2a上), 有一个暗区出现于火焰之中。

电火花产生的超声速高温火焰在向前传播时, 一方面受火花隙发出的中心稀疏波及边界层的影响而减速, 另一方面受炸药不断燃烧而发出的系列压缩波的影响而加速, 而在前 2cm (图3), 前者起主导作用, 火焰运动速度略有下降, 此后, 后者开始起主导作用, 使得火焰运动速度不断增加。火焰在运动过程中扰动所扫过的附在管壁上的炸药, 促使炸药颗粒沿轴向和径向运动, 同时对炸药进行对流传热使得颗粒表面的温度升高, 由于 M_0 数低, 对流传热慢, 混合药粉的温度上升到点火温度的时间比较长, 便呈现出点火延迟现象。当点火延迟时间较长时, 便会在火焰中出现一个亮度相对来说很暗的暗区。

3. 导爆管管内的火焰有多重结构。既有第一及第二火焰, 又有层流及紊流火焰。

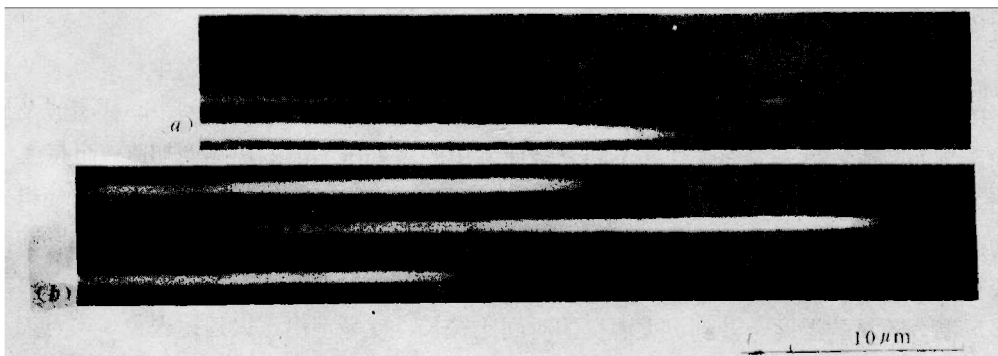
如图1b所示, 暗区前后各有一股火焰。第一火焰是点火火焰, 在其从 45mm 传到 60mm 的过程中, 由亮变暗, 由宽变窄, 说明点火火焰的温度在下降, 这是因为它原本是等离子高温火焰, 在向前运动过程中因辐射、边界摩擦及点燃药粉而损失了能量, 所以温度要下降; 但其运动速度却略有增加, 这是因为第二火焰产生的气体不断提供压缩波推动了点火火焰。第



- (a) 点火区, $x=0-15\text{mm}$ 。速度 $0.91\text{mm}/\mu\text{s}$ (左图)。空管内的电火花速度 $0.94\text{mm}/\mu\text{s}$ (右图)。
 (b) 燃烧区, $x=45-60\text{mm}$ 。速度 $0.83\text{mm}/\mu\text{s}$ 。
 (c) 爆轰区, $x=410-425\text{mm}$ 。速度 $1.90\text{mm}/\mu\text{s}$ 。
 (a) Ignition zone, $x=0-15\text{mm}$, velocity: $0.91\text{mm}/\mu\text{s}$ (left). Spark velocity in a plastic tube without explosive: $0.94\text{mm}/\mu\text{s}$ (right).
 (b) Deflagration zone, $x=45-60\text{mm}$, velocity: $0.83\text{mm}/\mu\text{s}$.
 (c) Detonation zone, $x=410-425\text{mm}$, velocity: $1.90\text{mm}/\mu\text{s}$.

图1 塑料导爆管内火焰速度扫描象

Fig.1 The photographs of flame velocity in the plastic shock tubes.



- (a) 燃烧区, 上: $x=50\text{mm}$; 下: $x=100\text{mm}$
 (b) 爆轰区, 上: $x=500\text{mm}$; 中: $x=400\text{mm}$; 下: $x=450\text{mm}$ 。
 (a) Deflagration zone, upper: $x=50\text{mm}$; lower: $x=100\text{mm}$.
 (b) Detonation zone, upper: $x=500\text{mm}$; middle: $x=400\text{mm}$; lower: $x=450\text{mm}$.

图2 塑料导爆管火焰结构照相(在管子不同位置处)

Fig.2 The photographs of flame structures at various locations x of the plastic shock tubes

二火焰由暗缓慢地变亮，经20—30 μ s的延迟时间才能达到前一个火焰的亮度。在转变（图2a下）及爆轰（图1c及图2b）阶段，第一火焰已衰减成一个微微发亮的小区域，第二火焰紧随其后，很明亮。

在燃烧阶段，火焰运动速度低， $M_0 \approx 2.4$ ，火焰只是集中在管中心（图2a上），而不是在附有粉尘炸药的管壁上，因而火焰是层流火焰，管内的流动是层流流动。在转变及爆轰阶段时，火焰运动速度增加， M_0 分别约为3.7及5.5，火焰变粗充满了整个管内腔，亮度均匀，无明显的层流边界层。因此，原层流火焰已发展成紊流火焰，管内流动呈紊流状态。

4. 管内的爆轰波的形成过程是一个典型的燃烧转爆轰过程。

随着燃烧区的火焰往前运动，不断地燃烧的炸药所产生的压缩波使波后压力不断地升高，促使第一个火焰加速运动，同时使对流传热效应增大，点火延迟时间减小，暗区逐渐消失（图2a下图），点火区的压缩波已追赶上来，冲击波即将形成。此后，冲击波得到加强，速度进一步提高，最后大约在离点火端200—220 mm处，导致燃烧转成稳定爆轰，其扫描像类似于图1c及图2b，稳定爆速1900 m/s， $M_0 = 5.5$ 。爆轰波头部的微光区的时间尺度（ t ）约3 μ s，空间尺度（ x ）约6 mm，其后，是一个反应很剧烈的明亮区，持续25—30 μ s时间，它是维持爆轰波传播的化学反应区。

5. 管内有气、固两相流动。

从图1c后部可见，有许多细长的亮度衰减的线条，可以认为是燃烧着的混合炸药颗粒运动的轨迹，因而管内流动是气、固两相流。图3给出了颗粒运动速度随时间变化曲线，可见速度在波头扫过16 μ s后达到最高，为980 m/s。燃烧着的混合炸药颗粒在管内的高速运动，为压缩波的传播提供了更多的能量，对提高爆速及维持高爆速无疑具有重要意义。

6. 铝粉的敏化作用

只含RDX的塑料导爆管发出的暗红色光线在同一实验条件下是不能被底片所记录下来的。那么，爆轰波波头部的微光区，应是铝粉与管中的氧气先反应或铝粉与RDX粉尘共同形成的热点所致，经历约3 μ s的延迟时间后，诱致颗粒群发生支持爆轰波传播的剧烈化学反应。有实验表明，铝粉使起爆感度增大^[8]，并且，在强冲击波的作用下，如 $M_0 = 4.8 - 4.9$ 时，对于2—37 μ m的RDX，点火延迟时间约10 μ s^[3]；对表面积为3—4 m²/g的铝粉，点火延迟时间仅约1—2 μ s^[4]。由此可以断定铝粉的敏化作用具体表现在缩短了点火延迟时间上，铝粉使混合粉尘炸药RDX/Al

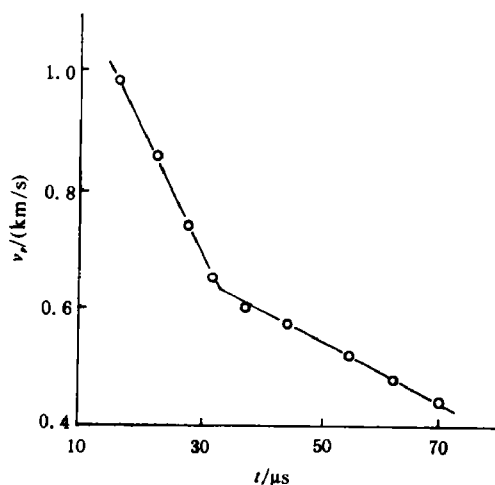


图3 混合颗粒炸药轴向运动速度与时间 t 的关系

t : 爆轰波阵面扫过 $x=42$ cm处所经历的时间

Fig.3 The axial velocity of mixed explosive particle vs time t .

t : The time record when the detonation wave pass through the location at $x=42$ cm.

的点火延迟时间在总体上缩短到仅约 $3\ \mu\text{s}$ 。

7. 火焰阵面呈多维变化。在燃烧阶段(图2a), 火焰阵面是弯曲的; 在爆轰阶段(图2b), 爆轰波波头暗淡无明显弯曲, 可以认为爆轰波是平面型的。

8. 在DDT过程中, 粉尘颗粒的着火方式大不一样。在燃烧阶段(图2a上), 暗区之后, 最先出现火焰的地方是在管中心, 然后再逐步扩大到其它空间, 似乎说明壁上的颗粒由于点火火焰的扰动向管中心运动, 颗粒脱离壁面后受管中心高温气流作用而被点火燃烧。在爆轰阶段, 如上所述, 点火延迟时间短, 而且波头是平面的, 因此可以认为壁面上的颗粒尚来不及脱离壁面即开始反应。

表1详细列出了塑料导爆管在燃烧转爆轰过程中各个阶段的特征及参数。

表1 塑料导爆管DDT过程的特征
Table 1 The characteristics of the DDT processes of plastic shock tubes

区 域	点火区	燃烧区	转变区	爆轰区
距离/mm	0	50	100	≥ 200
速度/(mm/ μs)	0.91	0.83	1.3	1.9
M_s	2.6	2.4	3.7	5.5
暗 区	无	有	无	无
波头形状		弯曲	弯曲	平齐
第一火焰		亮	暗	暗
第二火焰		渐亮	亮	亮
点火延迟时间/ μs		15-20	~ 8	3
点火延迟距离/mm		13-17	10	6

机 理 与 模 型

综合以上的实验结果, 可以建立这样的一种塑料导爆管的燃烧转爆轰机理, 见图4。从点火区OA发出的高温火焰形成第一火焰ABC向前传播, 该火焰扰动塑料导爆管壁上的粉尘炸药, 粉尘炸药因点火延迟在较晚的时刻发出第二火焰AGC, 区域ABCGA相当于高速摄影反映出来的暗区。ABC也就是燃烧阶段。第一火焰先是因各种能量损耗而略有减速(AB段), 相应于图5中火焰阵面运动速度变化的低谷区; 以后, 不断燃烧的炸药提供的一系列压缩波使第一火焰在BC段加速运动。在C点, 暗区消失。随后在D点形成冲击波。DE为冲击波加速运动的转变区。最后, 在E点形成一个以恒定速度运动的爆轰波EF, 完成了DDT过程。

塑料导爆管内的爆轰波是一个复杂的多相爆轰波。根据图1c的爆轰波速度扫描像及图2b的爆轰波波形扫描像, 结合文章中关于波阵面形状、火焰结构及颗粒运动等几个方面的分析, 我们提出如下的塑料导爆管的爆轰波模型, 见图6。

爆轰波最前面的是一个向静止区(a)运动的前缘冲击波阵面AA, $M_s \approx 5.5$; 管壁上的粉尘炸药受冲击波波后高速气流作用被加热, 经过冲击波点火延迟区(b)后, 粉尘炸药在

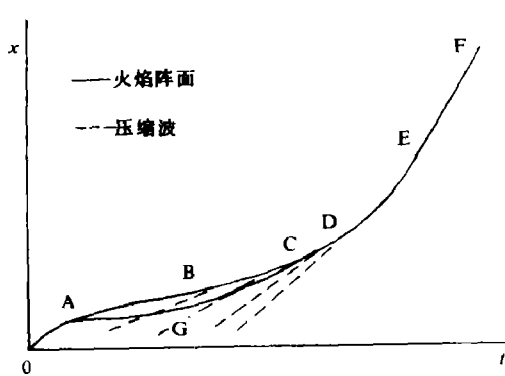


图4 塑料导爆管的燃烧转爆轰机理
Fig.4 The mechanism of the DDT for plastic shock tubes
1. Flame front 2. Compression wave

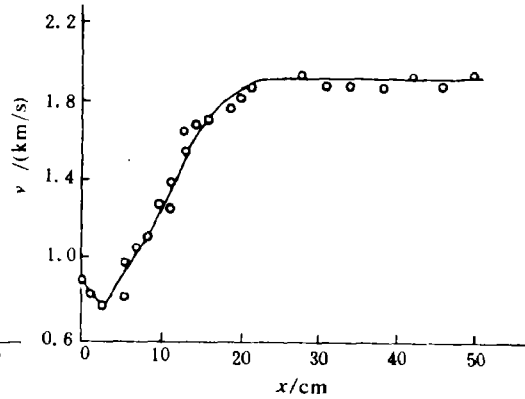


图5 离起爆点不同距离点的火焰阵面速度v
Fig.5 The flame velocity v vs the distance from initiating point to the observed points

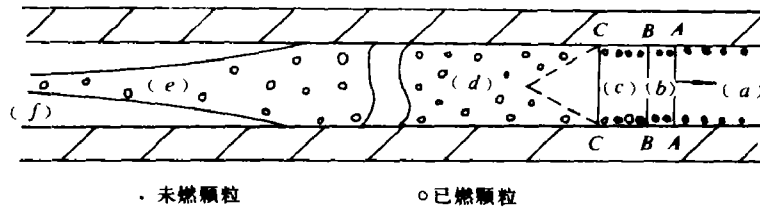


图6 塑料导爆管的爆轰波模型
Fig.6 The detonation wave model for plastic shock tubes
· not burned particles. ○ burning particles

BB环线上被部分点火燃烧，在CC环线上被全部点火燃烧。区域(b)很短，小于1-2mm；(c)区为第一火焰，相应于爆轰波波头的微光区(图2b)，宽度约6mm；BB及CC分别为第一及第二火焰阵面。在维持爆轰波运动的化学反应区(d)中，炸药颗粒已被全部点燃，并脱离表面向管腔混合，区域(d)约5-6cm长，区域(d)为紊流区。区域(e)为火焰尾流，为二次反应区。区域(f)为层流边界层。

结 论

本文以RDX/Al型塑料导爆管为例进行了高速扫描摄影实验。发现塑料导爆管在电火花起爆下，经历了点火、燃烧、转变及爆轰四个阶段的燃烧转爆轰过程。并发现在燃烧阶段，有一个暗区存在于火焰之中，该火焰聚集在管中心。从燃烧至爆轰的转变中，火焰阵面由弯曲转为平面，管内的流动由层流转向紊流。清晰地看到粉尘炸药在管中以高速运动，存在着气、固两相流动。实验结果还表明在燃烧阶段，炸药颗粒是脱离管内壁后被点火燃烧的，而

在爆轰状态, 则颗粒尚来不及离开壁面即开始反应。本文还证实了铝粉的敏化作用在于缩短了点火延迟时间。

参 考 文 献

- [1] 陈嘉琨等, 塑料导爆管, 国防工业出版社, (1987).
- [2] John H.S. Lee, Dust Explosion: An Overview, *Proceedings of the 16th International Symposium on Shock Tubes and Waves*, Aachen, (1987), 21.
- [3] Sichel, M., Back, S. W., Kauffman C. W., et al., The Shock Wave Ignition of Dusts, *J. AIAA*, 23 (9) (1985), 1374.
- [4] Allen, J. Tullis, Detonation tube Studies of Aluminum Particles Dispersed in Air, *19th Symposium (Int.) on Combustion*, (1982), 655.
- [5] 陈士海, 导爆管传爆机理研究, 民爆器材学会, 第三次年会, 1988年7月, 厦门.
- [6] 魏伴云等, 爆炸与冲击, 4 (4) (1984), 54.
- [7] 高耀林等, 温度对塑料导爆管爆速影响的理论分析, 爆破器材, 23 (6) (1984), 1.
- [8] 高耀林等, 敏化剂对塑料导爆管起爆感度的影响, 民爆器材第三次年会, 1987年, 厦门.

THE FLAME STRUCTURE AND THE FORMATION MECHANISM OF DETONATION WAVE FOR THE PLASTIC SHOCK TUBE SYSTEM DURING DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION PROCESS

Yang Shiqing, Wang Sunyuan, Yang Quanzhong, Xiao Xuezhong,
Huang Renjun, Fan Qingwen, Gao Yaoling

(College of Chemical Engineering East China Institute of Technology)

ABSTRACT A streak camera was utilized to observe the structure and velocity of the flame in plastic shock tube system during DDT process initiated by an electric spark. A dark zone within the flame at deflagration stage was observed on the photograph of the streak camera. The complexity of the flame front and its structure was shown for the whole DDT process. Gas-solid two phase flow was observed in the tube clearly. The sensitization of aluminum was verified. An applicable model of DDT and the structure of the detonation wave have been proposed on the basis of these experiments at the end of this paper.

KEY WORDS plastic shock tube, DDT (deflagration-to-detonation transtion), detonation wave, flame structure, dusty explosive.