

文章编号: 1001-1455(2006)01-0027-06

# 气相爆轰波绕射流场显示研究\*

王昌建<sup>1</sup>, 徐胜利<sup>1,2</sup>, 费立森<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 采用基于红宝石激光器(波长 694.3 nm)的纹影系统, 对气相爆轰波绕射进行了初步的流场显示研究。采用单色激光和合适半带宽(15 nm)的滤光片, 有效地消除了爆轰波自发光对流场显示的影响。合理设置激光器同步控制系统的触发延时, 得到了序列的爆轰波阵面纹影照片。结果表明: 图像清晰地显示了爆轰波阵面的诱导激波、横波及化学反应区。当爆轰波在左尖点处绕射, 受稀疏波作用, 诱导激波与化学反应区明显分离, 导致爆轰波衰减为爆燃。分离的诱导激波和折皱的化学反应区在纹影图上清晰可见。诱导激波在垂直支管右壁面反射, 诱导二次起爆。畸变爆轰波在水平和垂直支管中均发生马赫反射。提高初压, 爆轰波受分叉口几何属性的影响减小, 畸变爆轰波在水平和垂直支管下游较易恢复为自持爆轰波。

**关键词:** 爆炸力学; 爆轰波绕射; 纹影照相; 气相爆轰; 二次起爆; 马赫反射

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 130·3510

**文献标志码:** A

## 1 引言

激波在 90°分叉管中绕射的流场演化得到了较深入地研究<sup>[1]</sup>。与运动激波不同, 爆轰波由诱导激波和化学反应区组成。诱导激波由入射激波和马赫杆交替组成, 不是平面波。因此, 爆轰波绕射现象更为复杂。同时, 爆轰波后化学反应(燃烧)区的自发光, 给其流场显示带来困难。研究表明<sup>[2]</sup>: 复杂管道中的爆轰波绕射问题, 压力测量难以反映该问题伴随的爆轰波衰减和重建过程, 必须借助烟迹技术和流场光学显示技术。S. B. Murray 等<sup>[3]</sup>采用烟迹技术揭示了爆轰波绕射的二次起爆机理。F. Bartlmä 等<sup>[4]</sup>采用纹影技术研究了不同预混气的平面爆轰波沿不同角度的凸角绕射问题。S. Ohyagi 等<sup>[5]</sup>利用纹影高速照相技术和烟迹片研究了爆轰波沿后台阶的绕射问题, 观察到爆轰波局部或完全熄灭后的二次起爆现象。要说明的是: 烟迹技术难以反映爆轰波传播的历程。流场光学显示技术可反映爆轰绕射过程中的诱导激波和化学反应区分离、诱导激波绕射和反射现象以及二次起爆区的流场特征。

本文中采用纹影方法对爆轰绕射流场进行光学显示, 获得爆轰波阵面演变的序列照片, 目的是认识分叉管壁面几何结构对爆轰绕射的影响以及波系演变的唯象规律。

## 2 实验装置

实验在内截面为 40 mm×40 mm、壁厚为 5 mm 的方形爆轰管中进行, 如图 1 所示。爆轰管由五部分组成: 起爆段 I, 过渡段 II、III, 实验段 IV 和分叉管实验段 V。图 2 给出了用于光学测量的分叉管示意图。分叉管内截面为 40 mm×40 mm, 分叉口左尖点 L 与同步触发传感器 T2 之间的距离为 1.72 m。可视光学观察窗长 180 mm, 宽 120 mm。本实验利用起爆器高压脉冲诱发火花塞放电来点燃预混可燃气体, 经过渡段后形成自持爆轰波。进行低初压实验时, 需在 I、II 之间夹膜, 利用起爆段高压预混气体爆轰来起爆过渡段内低压预混气体。

\* 收稿日期: 2004-12-20; 修回日期: 2005-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(10172083); 中国工程物理研究院联合基金(10076018);

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ03-2)

作者简介: 王昌建(1975—), 男, 博士。

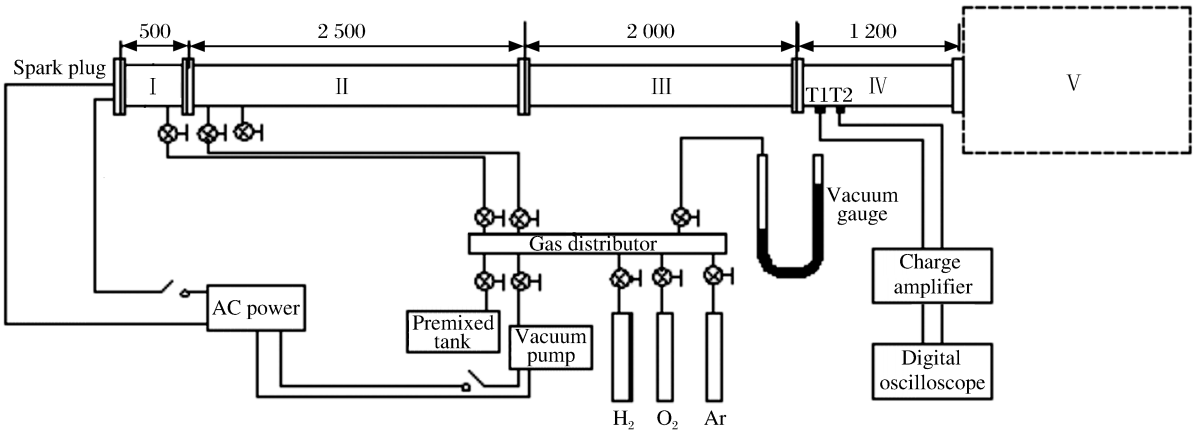


图 1 爆轰管及配套系统示意图

Fig. 1 Schematic of detonation tube and attached system

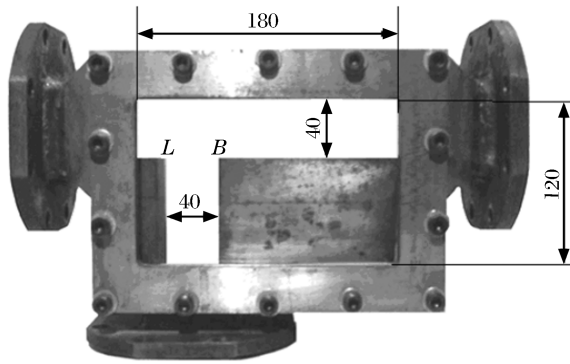


图 2 分叉管示意图

Fig. 2 Schematic of a bifurcated tube

图 3 给出了用于爆轰波测量的典型纹影系统示意图。纹影系统是通过流场中折射率变化来反映密度的一阶偏导数,可捕捉到流场中的激波和接触间断等。对于带自发光的燃烧流场,流场发光会导致底片曝光,从而干扰光源的光在底片上的成像质量。为获得清晰的纹影照片,必须滤除燃烧流场自发光。方法是:(1)纹影系统的光源是调 Q、氙灯泵浦的红宝石激光器。其产生的激光中心波长为 694.3 nm,脉冲能量为 100 mJ,脉宽约 40 ns。(2)在成像前加滤光片,允许红宝石激光通过,滤除燃烧流场自发光及其他杂散光。

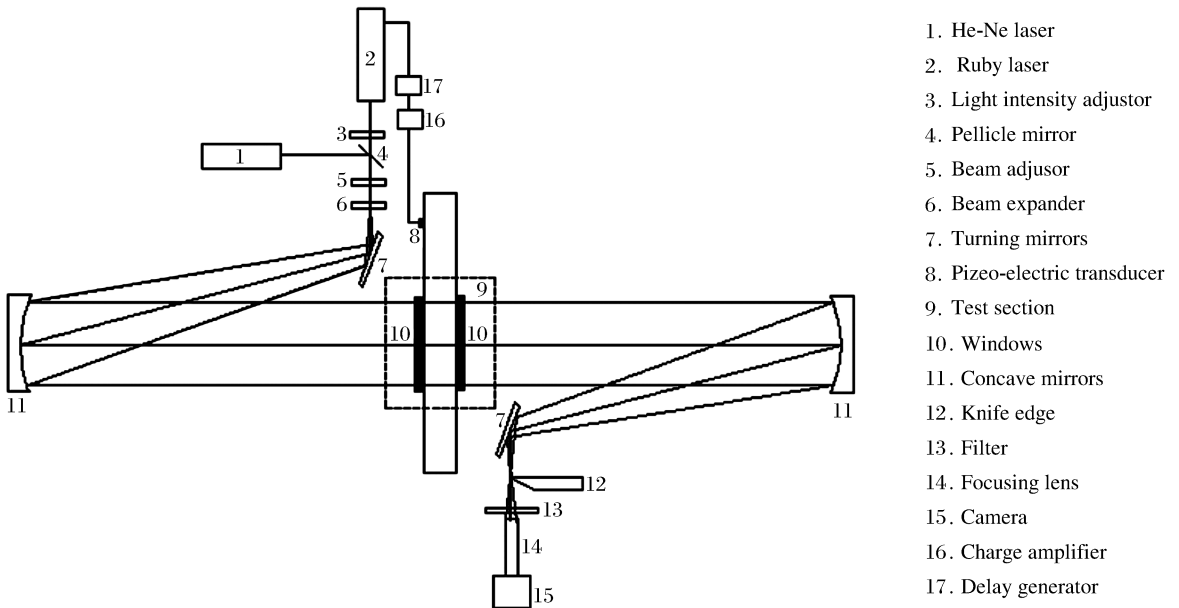


图 3 纹影系统示意图

Fig. 3 Schematic of schlieren system

### 3 纹影结果及讨论

图 4 给出了气相爆轰波在分叉管中传播的系列纹影图。在所有纹影图中,爆轰波自左向右传播。为准确捕捉爆轰波阵面,刀口法向水平,导致无法清楚分辨沿爆轰波阵面传播的横波。纹影图单次拍摄,通过改变延时时间,获得系列纹影图片。延时误差大约为 $\pm 2 \mu\text{s}$ 。纹影图是流场沿光线方向的积分。

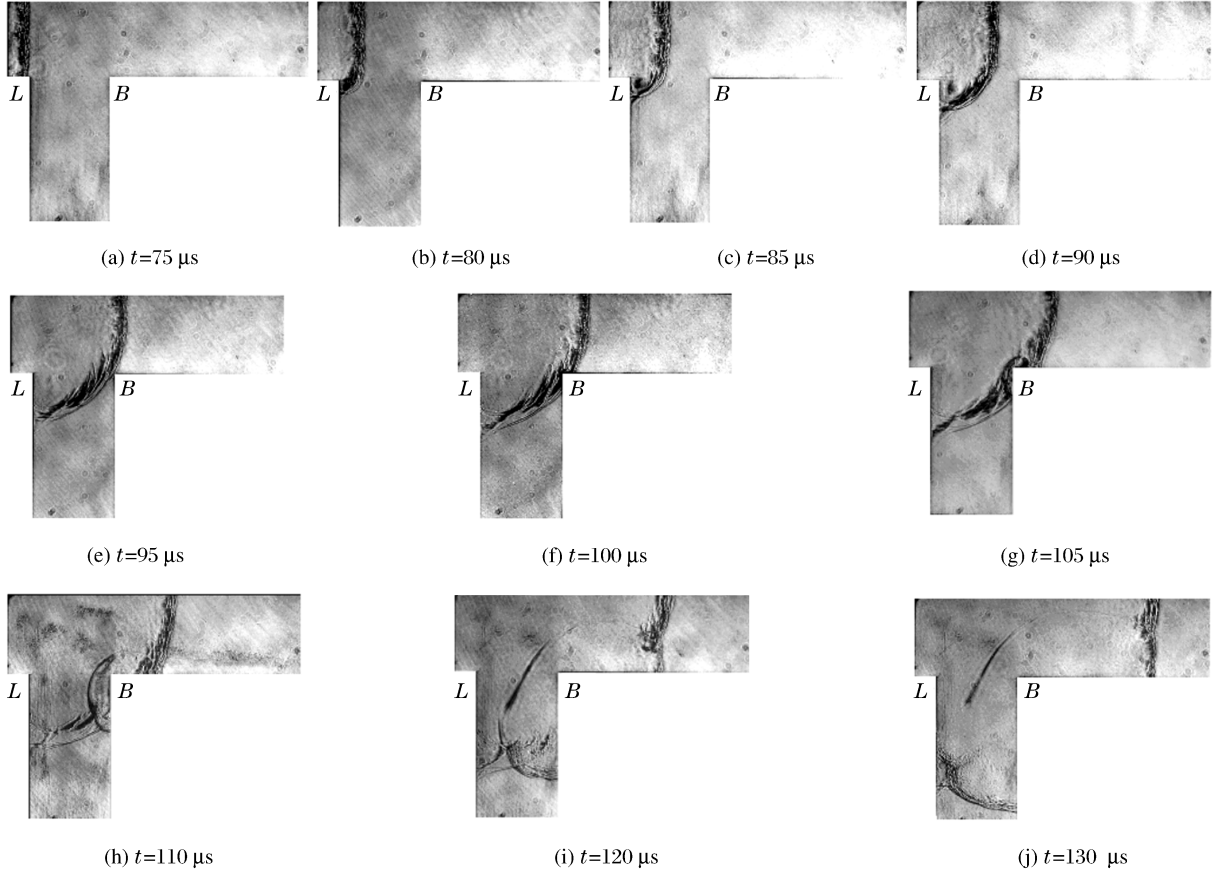


图 4 分叉管中的纹影图( $75\%(\text{2H}_2 + \text{O}_2) + 25\% \text{Ar}$ ,  $p_0 = 16.00 \text{ kPa}$ )

Fig. 4 Schlieren images of detonation fronts in a bifurcated tube at  $p_0 = 16.00 \text{ kPa}$

图 4(a)表明:在到达分叉口之前,爆轰波自持传播,胞格尺寸均匀(如图 5 中 I 区)。由于初压较低和纹影本身的积分效应,爆轰波阵面和反应区较宽。图 4(b)表明:爆轰波在分叉口左尖点  $L$  绕射,由于受到来自点  $L$  的稀疏波严重影响,诱导激波强度急剧衰减,波后压力和温度也降低。由于化学反应速率强依赖于温度,因此温度降低导致化学反应速率明显下降和诱导区变长,化学反应区和诱导激波逐渐分离,同时诱导激波阵面发生弯曲。另外,由于管道截面突然扩大,靠近下壁面附近的横波失去同伴或壁面的碰撞而衰减甚至消失。上述两原因导致水平支管在分叉口附近的胞格尺寸变大(如图 5 中 II 区)。随着化学反应区与诱导激波的进一步分离,诱导激波强度也急剧衰减且分离后的诱导激波阵面相对平滑。图 4(b)~(e)表明:稀疏波产生的密度梯度较小,且纹影反映密度的一阶导数,因此在纹影图上不能清楚分辨出稀疏波。图 4(c)~(d)表明:爆轰波在点  $L$  绕射后流场的涡环能依稀可见。图 4(e)表明:由于受到二次起爆强自发光影响,涡环不能清楚地分辨。

图 4(f)表明:诱导激波已经过分叉口右尖点  $B$ 。在水平和垂直支管中,诱导激波均发生规则反射。垂直支管中的化学反应区与诱导激波完全分离,爆轰衰减为爆燃,胞格结构消失(如图 5 中 IV 区),折皱的反应区能清楚分辨。图 4(g)表明:在水平支管,爆轰波已由规则反射转变为马赫反射,在点  $B$  附近反

射激波清晰可见。在垂直支管,反射激波在诱导激波产生的非定常流中传播,进一步提高波后压力和温度。受反射激波再加温的未燃介质(介于诱导激波和化学反应区之间)化学反应速率加快,发生二次起爆。二次起爆诱发当地微爆炸加强反射激波,并导致化学反应区与反射激波的重新耦合。图4(h)表明:在垂直支管中,规则反射已转变为马赫反射。反射激波可分为两部分:传播在经诱导激波压缩的未燃气体中的横向爆轰波和传播在完全反应气体中的无反应反射激波。横向爆轰波的横波非常细密,导致了图5中V区内细密的胞格结构。无反应反射激波、横向爆轰波和解耦的反应阵面交叉于三波点,该三波点迹线即为胞格结构图5中无胞格区IV与细密胞格区V的分界线FB。马赫反射的三波点标记了图5中的分界线GH。

图4(i)~(j)表明:在垂直支管中,由于马赫杆传播速度快于与化学反应区分离的诱导激波,它会赶上并超过诱导激波。在水平支管中,马赫杆逐渐成长。马赫杆后反应区厚度比受扰动的入射爆轰波薄,其理由是:强马赫杆诱导高温和高反应速率。

受观察窗尺寸限制,未获得随后的波阵面演变图。图5中III区和VII区下游胞格均匀,且其尺寸与分叉口上游I区的胞格基本相同。这表明:在水平和垂直支管下游,爆轰波最后恢复至与分叉口上游强度相同的自持爆轰波。

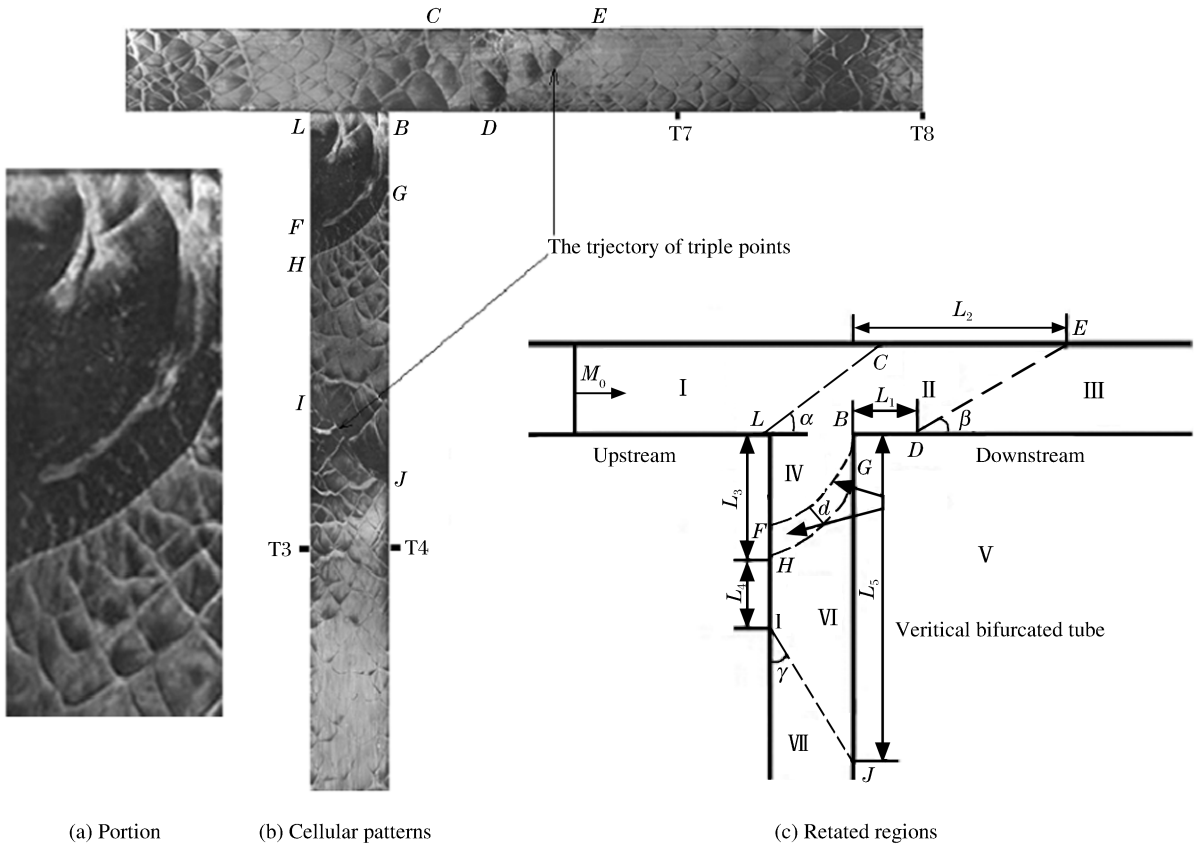


图5 分叉管内胞格结构及对应的分区(75% (2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) + 25% Ar,  $p_0 = 16.00$  kPa)

Fig. 5 Cellular patterns and corresponding related regions in a bifurcated tube at  $p_0 = 16.00$  kPa

图6~7给出了不同初压下分叉管的纹影图。表明:波阵面的演变与图4基本一致。但提高初压,化学反应区宽度减小,受分叉口影响减小,畸变爆轰波在水平和垂直支管下游较容易恢复为自持爆轰波。

由于受火花塞与触发传感器之间距离的确限制,当预混气初压低于10.67 kPa时,在触发传感器上游未完成燃烧转爆轰,导致延时的不确定性,纹影照相同步控制十分困难。因此,本实验未能获得临界条件( $p_0 = 2.00$  kPa)下的波阵面演变纹影图,不能与文献[6]中胞格结构图10相对应。



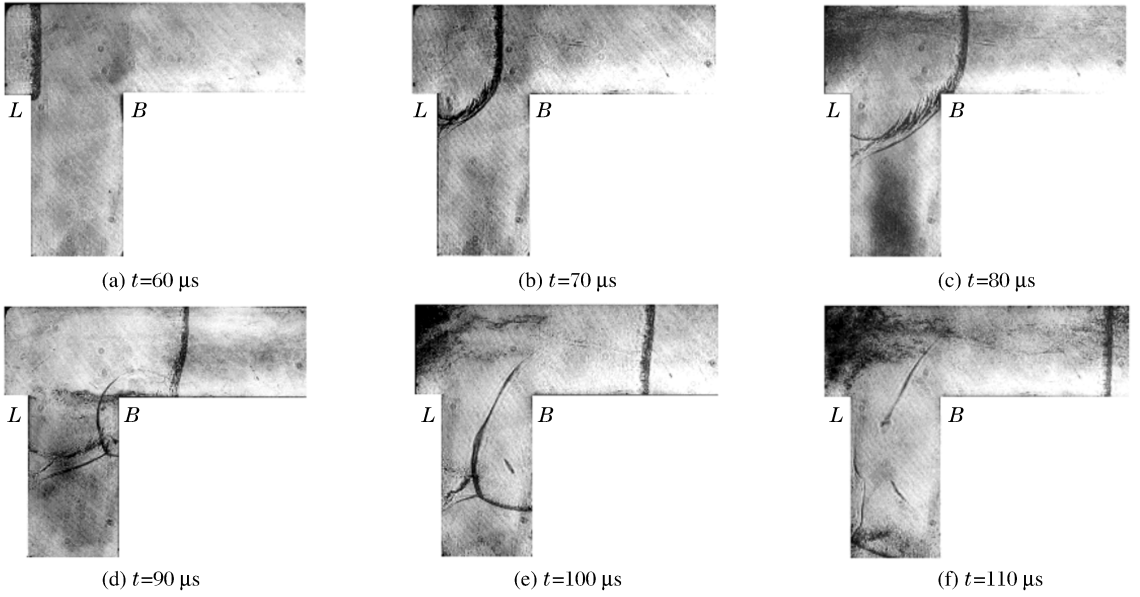


图 6 分叉管中的纹影图(75%(2H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)+25%Ar, p<sub>0</sub>=26.67 kPa)

Fig. 6 Schlieren images of detonation fronts in a bifurcated tube at  $p_0 = 26.67 \text{ kPa}$

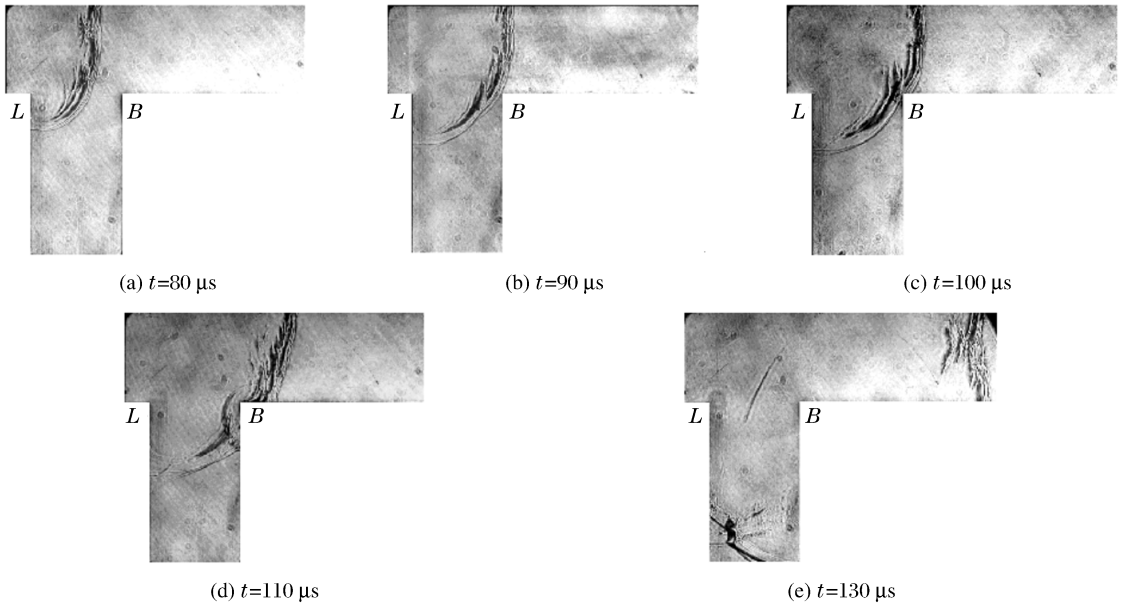


图 7 分叉管中的纹影图(75%(2H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)+25%Ar, p<sub>0</sub>=10.67 kPa)

Fig. 7 Schlieren images of detonation fronts in a bifurcated tube at  $p_0 = 10.67 \text{ kPa}$

### 4 结 论

- (1) 采用基于红宝石激光器的纹影系统, 结合滤光片和同步控制系统, 可有效地消除燃烧自发光的影响, 成功地对气相爆轰波绕射流场进行了光学显示研究。
- (2) 序列纹影照片清晰地反映了壁面几何属性导致的诱导激波与化学反应区分离、爆轰波衰减为爆燃、二次起爆等现象以及诱导激波在水平和垂直支管由规则反射向马赫反射转变。
- (3) 流场显示还表明: 提高初压, 爆轰波绕射受分叉口几何属性影响减小, 受扰爆轰波在水平和垂直支管下游更容易恢复为自持爆轰波。

## 参考文献:

- [1] Igra O, Wang L, Palcovitz J, et al. Shock wave propagation in a branched duct [J]. *Shock Waves*, 1998,8:375—381.
- [2] 王昌建. 气相爆轰波在复杂管道中传播的研究 [D]. 安徽合肥:中国科学技术大学,2004.
- [3] Murray S B, Lee J H. On the transformation of planar detonation to cylindrical detonation [J]. *Combustion and Flame*, 1983,52:269—289.
- [4] Bartlmä F, Schröder K. The diffraction of a plane detonation wave at a convex corner [J]. *Combustion and Flame*, 1986,66:237—248.
- [5] Ohyagi S, Obara T, Hoshi S, et al. diffraction and re-initiation of detonations behind a backward-facing step [J]. *Shock Waves*, 2002,12:221—226.
- [6] 王昌建,郭长铭,徐胜利,等. 气相爆轰波在 T 形管中传播现象的实验研究 [J]. *力学学报*, 2004,36(1):16—23.  
WANG Chang-jian, GUO Chang-ming, XU Sheng-li, et al. Experimental investigation on gaseous detonation propagation through a T-shape tube [J]. *Acta Mechannica Sicica*, 2004,36(1):16—23.

## Flow-field visualization for gaseous detonation diffraction experiments

WANG Chang-jian<sup>1\*</sup>, XU Sheng-li<sup>1,2</sup>, FEI Li-sen<sup>1</sup>

(1. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering,*  
*University of Science and Technology of China,*  
*Hefei 230026, Anhui, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,*  
*Beijing Institute of Technology,*  
*Beijing 100081, China)*

**Abstract:** Based on a Ruby-laser schlieren system, the flow-field of detonation diffraction in a bifurcated tube has been experimentally studied. By employing the ruby laser and a bandpass filter of 15 nm FWHM, the combustion luminescence was successfully removed in experiments. By setting proper predetermined time delay of the synchronization unit, schlieren image series at the different time were obtained. The results show that the transverse waves, leading shock and reaction zone can be clearly observed in the consecutive images. Influenced by the rarefaction waves from the left sharp corner, the leading shock was disturbed and separated from the reaction zone. Therefore, the detonation wave was degenerated into a deflagration wave. The decoupled leading shock and the wrinkled reaction front can also be identified in the schlieren images. Re-initiation was induced by the leading shock reflection on the right wall in the vertical branch. Mach reflections of the disturbed detonation waves occur in both the vertical and the horizontal branches. With increasing the initial pressure of the premixed mixture, it was earlier for the disturbed detonation waves to be recovered to self-sustaining detonation waves in the vertical and horizontal branches.

**Key words:** mechanics of explosion; detonation diffraction; schlieren photography; gaseous detonation; initiation; Mach reflection

\* Corresponding author: WANG Chang-jian  
E-mail address: chjwang@ustc.edu.cn  
Telephone: 0551-3607322