

文章编号: 1001-4888(2000)03-0298-08

# 气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射的实验验证

郭长铭<sup>1</sup>, 张德良<sup>2</sup>, 谢巍<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽合肥 230026; 2 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 本文公布了气相爆轰波沿收缩管道传播时发生Mach反射的实验证据。在爆轰波通过的管道中安装不同楔角的楔块, 形成管道的收缩。爆轰波在通过楔块时会发生Mach反射。利用烟熏玻璃片记录到了爆轰波Mach反射时形成的三波点迹线及其两侧胞格尺寸和密度的变化。据我们掌握的资料, 这是首次用胞格结构变化的记录证实, 气相爆轰波与无化学反应的空气中的冲击波一样, 在一定的入射条件下会发生Mach反射。这一实验结果可使我们更深入地了解爆轰波的本质, 也为数值模拟气相爆轰波在障碍物上Mach反射现象提供了可对比的依据。

**关键词:** 气相爆轰; 胞格结构; Mach反射

**中图分类号:** O 381; O 382<sup>+</sup>. 1 **文献标识码:** A

## 1 引言

气相爆轰波在受约束空间(如管道)中传播时, 边界几何形状的变化会对爆轰波的传播产生很大影响。开展这一现象的研究不仅具有学术价值, 能更深入地了解爆轰波的本质, 而且也是工业上抑爆、隔爆、熄爆等安全技术的依据, 故一直引起人们的兴趣。然而由于问题的复杂性, 至今尚未出现一般的理论来处理这一类问题。即使是对空气中的平面冲击波来说, 我们的研究也仅局限在对单个障碍物的绕射上。

出于安全技术的需要, 国内外对爆轰波在扩张管中的传播规律作过较详细的研究<sup>[1-4]</sup>, 普遍确认存在一个临界直径, 即平面爆轰波突然从管道传播到无限空间而不熄灭的最小管径, 得到了临界直径和其它参数的关系。对于收缩管道, 一般认为也象平面冲击波那样会出现规则反

收稿日期: 1999-10-14; 修订日期: 2000-07-17

基金项目: 本课题(气相爆轰波与障碍物相互作用后流场的系统分析)得到国家自然科学基金委员会的支持  
(批准号: 19872068)

作者简介: 郭长铭(1943-), 中国科技大学力学和机械工程系副教授。长期从事激波和爆轰波的教学和研究工作。

射和 Mach 反射两种绕射现象, 但鲜见系统的研究和实验证据 文献和专著中仅有如图 1 所示的示意图<sup>[5,6]</sup>, 既无照片也无烟迹记录 这可能是实验技术上的困难造成的 因为爆轰波通过时出现的火光使普通高速摄影方法很难记录到流场的变化 近年来, 国际上对此又重视起来, 引入了数值模拟的研究方法 作者在做此课题时, 用特殊的方法记录到爆轰波 Mach 反射时出现的三波点迹线及其两侧胞格尺寸和密度的变化, 测到了爆轰波通过楔面时压力和速度的变化 本文首先公布反映胞格结构变化的烟迹记录

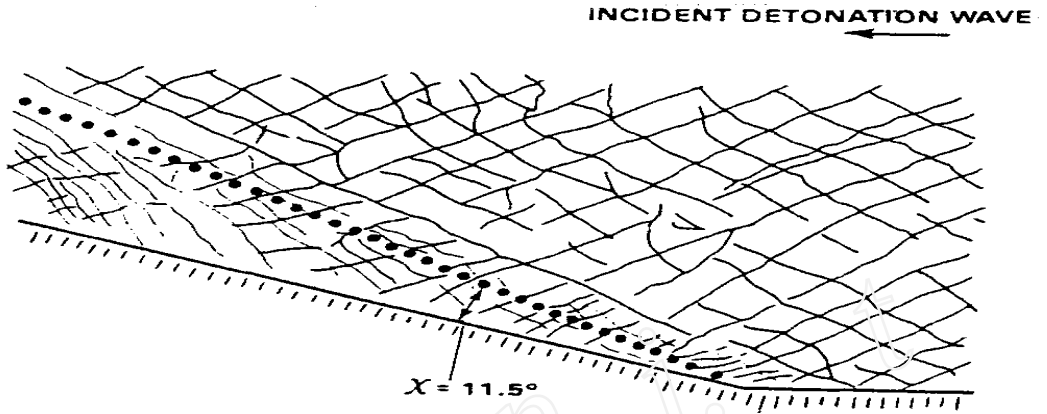


图 1 文献[6]中 30% (2C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+ 5O<sub>2</sub>) + 70% Ar 爆轰波绕射 18.5 楔块时 Mach 反射的示意图 ( 为三波点迹线)  
 Fig 1 The scheme of cellular structure produced by 30% (2C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+ 5O<sub>2</sub>) + 70% Ar detonation diffracting on a wedge  $\theta = 18.5^\circ$

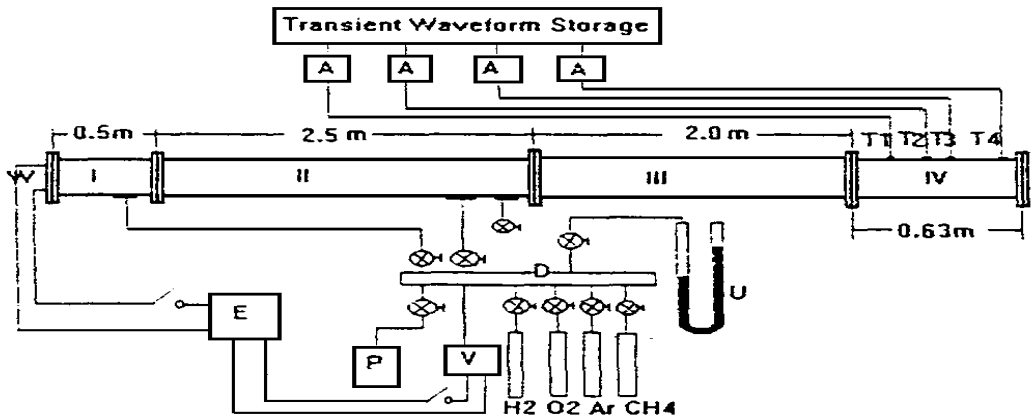


图 2 实验装置

A: 电荷放大器 D: 配气柱 E: 交流电源 P: 气体预混罐 T: 传感器 U: U 型真空计 V: 真空泵 W: 电热丝

Fig 2 Experimental facilities

## 2 实验装置

### 2.1 激波管

设备装置和测试仪器如图 2 所示 实验是在 40 × 40mm 的方型截面激波管中进行的 该管分为 4 段, I 为起爆段, II 为过渡段, III 为稳定爆轰段, IV 为测试段 其中测试段全长 0.63m, 有内外两层 楔块安装在侧面的内活动板上, 如图 3 所示 压力传感器安装在管的顶部, 位置如图

所示 其中  $T_1$  记录在直管中传播的稳定爆轰的压力 偏离中心线的  $T_2$  和  $T_3$  可以尽量靠近楔面, 尾部的  $T_4$  记录衰减后的爆轰波压力

## 2.2 配气系统

气体预混罐、真空泵、配气柱和水银真空压力计组成配气系统, 如图 2 所示 实验中采用了  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ,  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  和  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$  三种气体组分

## 2.3 起爆方式

采用电热丝加热法 当做 16kPa 以下的低初压爆轰时, 采用破膜起爆方式

## 2.4 楔块的制备

实验中使用了楔角为  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $19.3^\circ$ ,  $26.7^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  和  $40^\circ$  等 7 种楔块 所有楔块的高度都设计成 35mm, 即给所有楔角的楔块都留出 5mm 的气流通道, 如图 4 所示

## 2.5 烟熏玻璃片

烟熏玻璃片为 3mm 厚的平板玻璃, 裁成  $417 \times 40\text{mm}$  的条状 熏烟前先将玻璃片洗净吹干, 特别要用酒精或四氯化碳擦拭以去除表面的油污

## 2.6 数据的采集和记录

由测试段上的四个压电晶体压力传感器采集爆轰波压力波形的数据和爆轰波到达的时间, 经电荷放大器后输入瞬态波形存储仪检测, 读数和保存

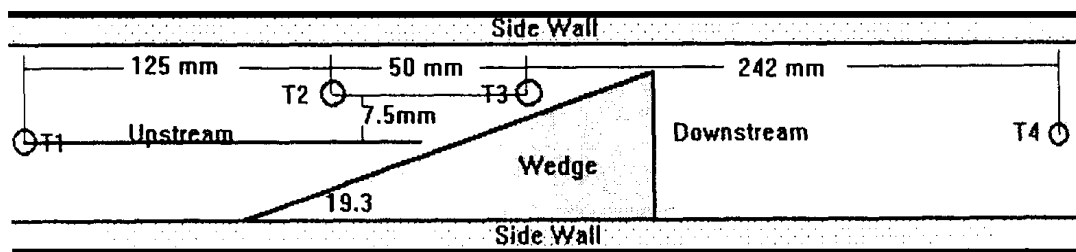


图 3 楔块安装示意图

Fig 3 Scheme of wedge mounting

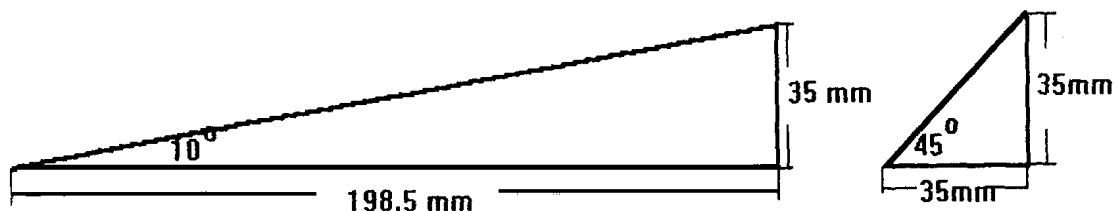


图 4 楔块尺寸的设计

Fig 4 Scheme of wedges

## 3 实验程序

调节置入测试段的楔块位置, 使传感器  $T_1$  在楔块的前方而  $T_2$  和  $T_3$  在楔面上方, 而且要使  $T_3$  尽量靠近楔面 抽真空, 注入预混的可燃气体 设置好仪器的各项参数, 处于等待触发状态, 点燃气体的, 检查并储存各传感器记录的压力波形, 取出玻璃片观察形成的胞格结构并在熏

烟一侧均匀喷一层发胶保护烟迹 将玻璃片上的胞格结构烟迹记录制成照片,用扫描仪将照片制成图像软件供计算机处理 对每一种气体组分,初压从低到高分9组进行,即16.0, 17.3, 20.0, 26.7, 33.3, 40.0, 46.7, 53.3和60.0kPa, 每组3发取平均值(误差小于5%). 改变楔角,即分别置入10°, 15°, 19.3°, 26.7°, 30°, 35°和40°楔块,重复上述过程

#### 4 实验结果

首次得到了爆轰波Mach 反射时清晰的、可供定量分析的胞格结构烟迹记录 这里公布一



图5 初压为16kPa的稳定爆轰波胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 5 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation without wedge

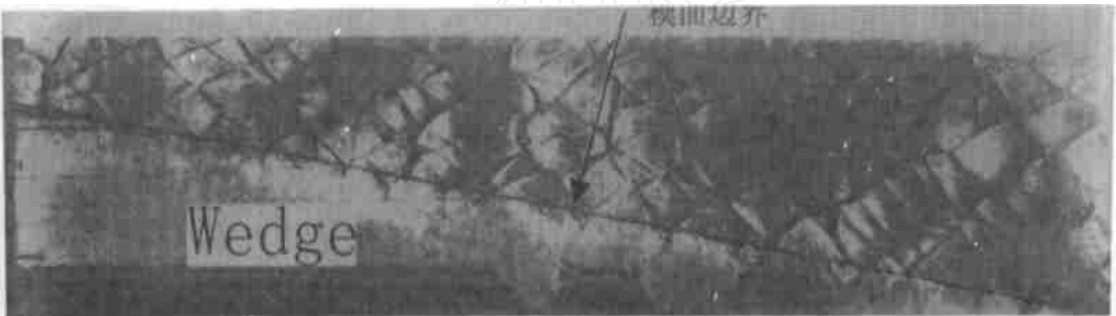


图6 初压为16kPa的爆轰波绕射10.0°楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 6 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 10.0^\circ$



图7 初压为16kPa的爆轰波绕射15.0°楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 7 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 15.0^\circ$   
组在同一初压(16kPa, 即120torr)下改变楔块的楔角所得的记录,如图5至图12所示 图5是



图 8 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 19.3 楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 8 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 19.3^\circ$ . The trajectory of triple point is shaped in front of the apex of wedge



图 9 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 26.7 楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 9 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 26.7^\circ$

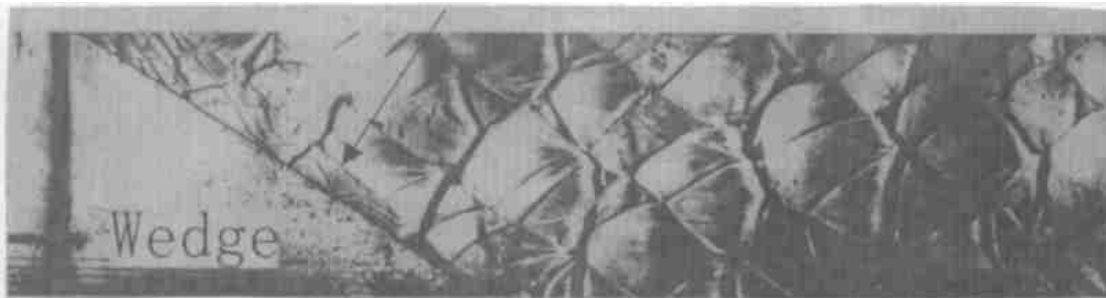


图 10 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 30.0 楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )

Fig 10 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 30.0^\circ$

无楔块的胞格结构记录, 供对照。从图 6 开始是有楔块的胞格结构记录。图 8 显示, 在楔块顶点附近形成一道明显的界线(箭头所指)向下游延伸, 形成与楔面的夹角, 其两侧的胞格结构(形状、密度、尺寸)明显不同。这道界线就是爆轰波  $M_{ach}$  反射时形成的三波点迹线。实验发现, 初压低于 26.7kPa (200torr) 时能得到清晰的胞格结构。随初压提高, 胞格尺寸变小密度变大, 难以辨别, 但界线仍清晰(篇幅所限, 将另文发表)。最佳初压是在 16.0kPa 左右。图 11 和图 12 显示, 当楔角大于 35 时, 三波点迹线与楔面的夹角变得很小, 在此区域内的胞格结构已难以辨

认, 只看到一片烟迹被扫掉了. 对这些烟迹记录我们已有了一套计算机处理分析的方法, 分析结果另文发表



图 11 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 35.0 楔块时胞格结构烟迹记录(2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar,  $\gamma=1.45, M_{ej}=5.12$ )

Fig 11 Cellular structure produced by 2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar ( $\gamma=1.45, P_0=16\text{kPa}, M_{ej}=5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta=35.0^\circ$

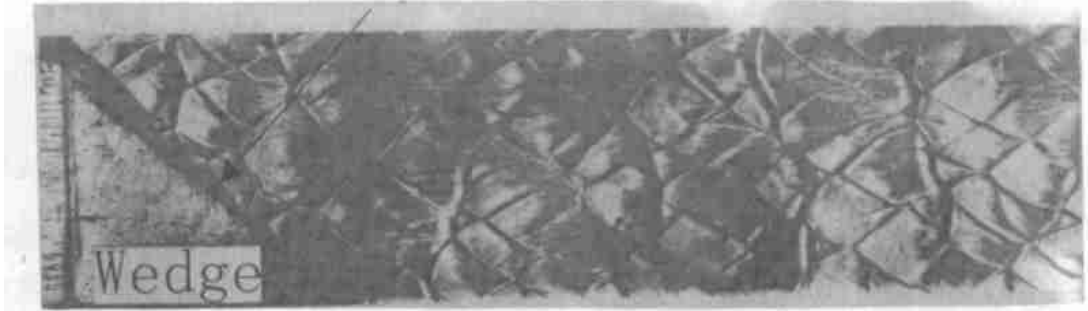


图 12 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 40.0 楔块时胞格结构烟迹记录(2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar,  $\gamma=1.45, M_{ej}=5.12$ )

Fig 12 Cellular structure produced by 2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar ( $\gamma=1.45, P_0=16\text{kPa}, M_{ej}=5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta=40.0^\circ$

实验还发现, 当爆轰波在楔面上发生 Mach 反射时, 三波点迹线并不都象图 1 所示从楔块的顶点开始形成, 而可以是随机的 图 13 和图 14 显示出, 在与图 8 完全同样的条件下三波点



图 13 初压为 16kPa 的爆轰波绕射 19.3 楔块时胞格结构烟迹记录  
(2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar,  $\gamma=1.45, M_{ej}=5.12$ )三波点迹线在楔面上开始形成

Fig 13 Cellular structure produced by 2H<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ Ar ( $\gamma=1.45, P_0=16\text{kPa}, M_{ej}=5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta=19.3^\circ$ ; The trajectory of triple point is shaped above the wedge slope

迹线形成的位置各不相同 这与 C. K. Chan 最近研究火焰在可燃介质中沿楔面传播时观察到的现象十分类似<sup>[7]</sup>. 随楔角的增大, 这种随机性越来越小 楔角超过 30 (含 30), 三波点迹线一

般都从顶点开始形成 这一现象涉及到爆轰波本身的横波(Transverse Wave)与由Mach反射产生的反射激波之间的相互作用 在分界线下,横波与不断上升的楔面发生碰撞,缩短了行程,加密了胞格的分布;另一方面,横波又与Mach反射产生的反射激波相碰,反射回来形成新的胞格 从图13上可看到,箭头处界线上方并没有胞格线传过来,但界线上却产生了一道新的胞格线 这是爆轰波和空气中平面冲击波的Mach反射的区别 换言之,在爆轰波Mach反射中不能忽略横波与反射激波的相互作用

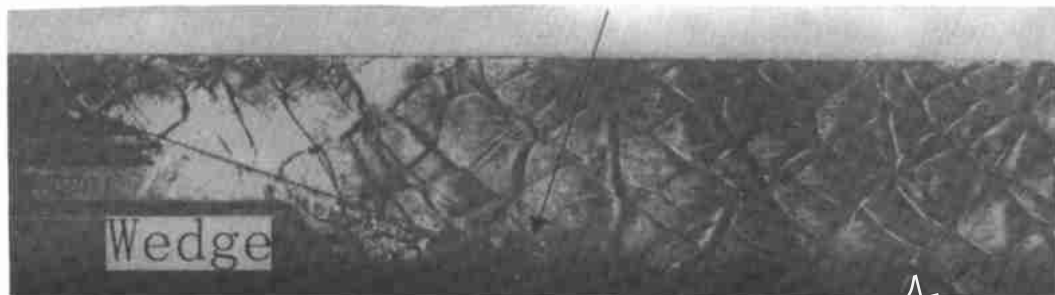


图14 初压为16kPa的爆轰波绕射 $19.3^\circ$ 楔块时胞格结构烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\gamma = 1.45$ ,  $M_{ej} = 5.12$ )三波点迹线在楔块顶点开始形成

Fig. 14 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$  ( $\gamma = 1.45$ ,  $P_0 = 16\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.12$ ) detonation diffracting a wedge with  $\theta = 19.3^\circ$ . The trajectory of triple point is shaped just at the apex of wedge

实验中还记录了爆轰波在通过楔面与管壁间5mm的狭缝时,爆轰波胞格结构消失和恢复的过程 图15显示,爆轰波刚“挤”过狭缝时还残留有胞格结构,在狭缝下游30mm处胞格结构完全消失,然后在狭缝下游80mm处(恰是管壁尺寸的两倍)胞格结构开始恢复,胞格由密变疏,尺寸由小变大,按弧线分布 胞格记录反应了爆轰波压力由大变小,波形由平面波转化为球面波的变化过程 这说明爆轰波在传播过程中若遇到干扰(本实验中是管道截面的变化),其正常的传播不能维持,前导激波(Precursor Shock Wave)和横波都发生畸变(胞格消失),但一旦干扰消失,它有一定的恢复能力,胞格结构重新出现

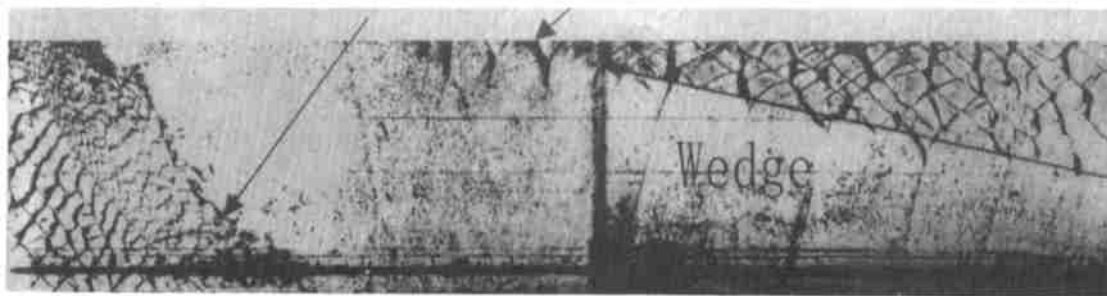


图15 初压为26.7kPa的爆轰波通过 $10.0^\circ$ 楔块与壁面间的狭缝时胞格结构消失和恢复过程的烟迹记录( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ,  $\gamma = 1.40$ ,  $M_{ej} = 5.24$ )

Fig. 15 Cellular structure produced by  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  ( $\gamma = 1.40$ ,  $P_0 = 26.7\text{kPa}$ ,  $M_{ej} = 5.24$ ) detonation propagating through the slot between a wedge with  $\theta = 10.0^\circ$  and the tube wall

这样,我们就比较全面地研究了爆轰波绕射障碍物后的流场,既了解了它在楔面上发生

Mach 反射的过程, 也了解了它通过障碍物后的畸变和恢复过程。鉴于篇幅所限, 我们将另文发表对上述实验结果的分析。

### 参考文献

- [1] Lee J H, Knystautas R and Lee B H K. Structure of gaseous detonation in a convergent-divergent channel [J]. *AA J.*, 1956, 3: 1786
- [2] Moen IO, Donato M, Knystautas R, *et al*. The Influence of Confinement on the Propagation of Detonations near the Detonability Limit in its [C]. 18th Symp. (Int.) Comb., Comb. Inst., Pittsburgh, 1981. 1615
- [3] Knystautas R, Lee J H and Guirao CM. The critical tube diameter for detonation failure in hydrocarbon-air mixtures [J]. *Comb. and Flame*, 1982, 48: 63
- [4] 徐胜利, 陈成光, 李剑. 爆轰波在扩张管内临界传播特性的研究[J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(1).
- [5] Edwards D H, Walker J R and Nettleton M A. On the propagation of detonation waves along Wedges [J]. *Arch. Comb.*, 1984, 4: 197
- [6] Nettleton M A. *Gaseous Detonation: Their Nature, Effects and Control* [M], published by Chapman and Hall Ltd., 1987. 151
- [7] Chan C K. Collision of Shock Wave with Obstacle in a Combustible Mixture [J], *Comb. and Flame*, 1995, 100: 341-348

## The Experimental Evidence for Mach Reflection of Gaseous Detonation Waves Acting on an Obstacle

GUO Changming<sup>1</sup>, ZHANG De-liang<sup>2</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** The experimental evidence for Mach reflection of gaseous detonation waves acting on an obstacle is presented in this paper. Wedges with different wedge-angle are mounted on the side-wall of tube to form convergent tube. The Mach reflection is shaped when detonation waves propagate on a wedge. The trajectory of triple point of Mach-reflected detonation wave was recorded for the first time by smoked foil. On both sides of the trajectory, the change of cell size and shape is very obvious. According to the literature known to us, it is confirmed for the first time by cellular structure that as shock waves in non-reactive air, the detonation waves can also shape Mach reflection under certain conditions. These experimental results not only help us deeply understanding the nature of detonation waves but also afford a reference for comparison when we make numerical simulation for this phenomenon.

**Key words:** gaseous detonation; cellular structure; Mach reflection