

气相爆轰波在收缩管道中的传播^{*}

郭长铭 周光泉 王正道

(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 详细介绍了对气相爆轰波沿收缩管道传播时发生 Mach 反射的系统研究。管道中安装了不同楔角的楔块,采用了多种气体组分按不同的初压分组进行实验。在烟熏玻璃片上记录到了爆轰波 Mach 反射的三波点迹线,其两侧胞格尺寸和密度的变化清晰可见。推算了爆轰波从 Mach 反射向规则反射转变的临界角。压力传感器记录了 Mach 反射时楔面上压力和速度的变化。上述参数与空气激波 Mach 反射作了比较。编制了爆轰波 Mach 反射计算程序,检验了 CCW 理论对于爆轰波传播的可用程度,理论值和实验值在楔角不大于 30° 时相当吻合。

关键词 气相爆轰 胞格结构 Mach 反射 CCW 理论

中图法分类号 O 381

1 引言

气相爆轰波在受约束空间(如管道)中传播时,边界形状的变化对爆轰波的传播产生很大影响。研究此现象不仅有学术价值,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,至今未出现一般的理论来处理这一类问题。即使是对平面冲击波,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作过较详细的研究^[1~4]。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小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。对收缩管道,一般认为也象平面冲击波那样会出现规则反射和 Mach 反射现象,但鲜见系统的研究和实验证据。文献和专著中仅有示意图^[5~6],既无照片也无烟迹记录。近年来,国际上对此又重视起来。作者在做此课题时,用特殊的方法记录到爆轰波 Mach 反射的三波点迹线,直接测到了 Mach 杆后方的爆轰波压力,并将 CCW (Chester-Chisnell-Whitham)^[7~9]理论修改后用到爆轰波中,检验了该理论推广到爆轰波的适用程序。

2 实验装置

2.1 激波管

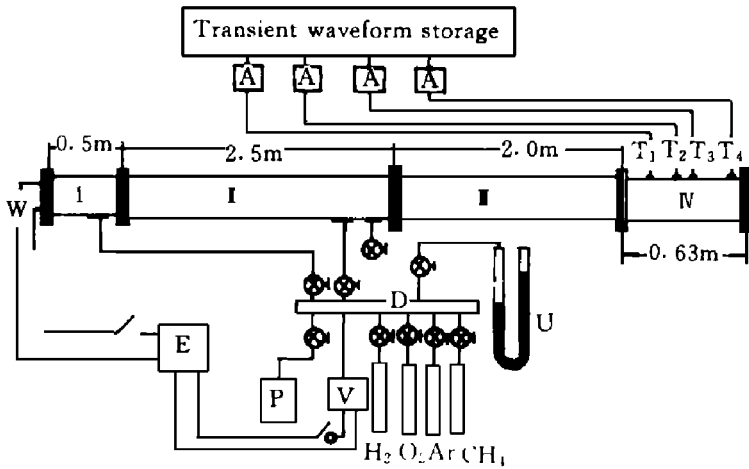
装置和测试仪器如图 1 所示。实验是在 40mm×40mm 的方型截面激波管中进行的。该管分为四段, I 为起爆段, II 为过渡段, III 为稳定爆轰段, IV 为测试段。其中测试段全长 0.63m, 有内外两层。其内层结构如图 2 所示, 1、2 为槽形固定板, 中间可嵌入活动片; 3、4 为固定平板, 两端有台阶。每块固定板上都安装三块厚 6mm 可拆卸组合的活动片。楔块就安装在侧面的活动片上,

* 国家自然科学基金(批准号 19372058)和英国文化委员会的资助。

郭长铭:男,1943年生,副教授。

1996-09-18收到原稿,1996-12-10收到修改稿。

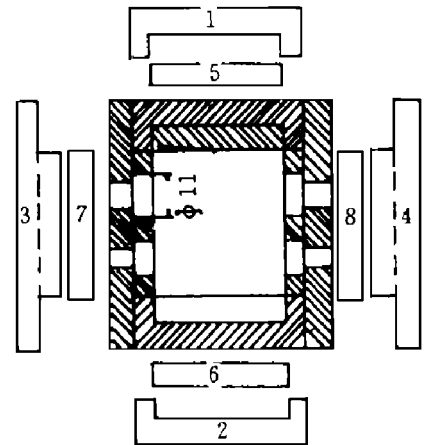
压力传感器安装在管的顶部,位置如图 3 所示。其中 T_1 记录稳定爆轰的压力可与理论值比较。偏离中心线的 T_2 和 T_3 可以尽量靠近楔面,尾部的 T_4 记录衰减后的爆轰波压力。



A. Electric charge amplifier; D. Gas distributor;
E. AC Power; T. Transducer; P. Gas pre mixing tank;
U. Vacuum gauge; V. Vacuum pump; W. Heating wire

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental facilities



1 2 Channel section fixed plate
3 4 Fixed plate
5 6 7 8 Free section

图 2 测试段内层结构剖面图

Fig. 2 Inner structure section of test zone

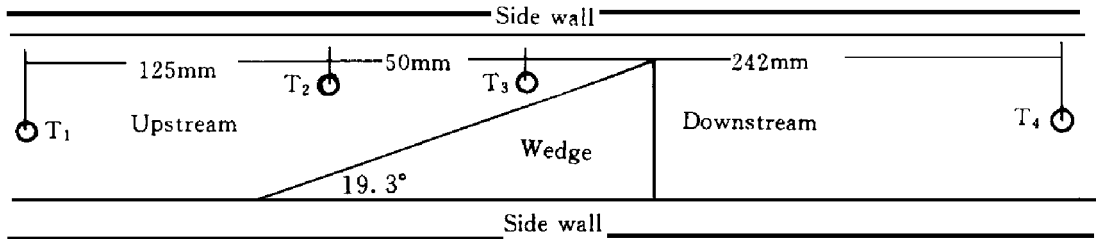


图 3 楔块安装示意图

Fig. 3 Scheme of wedge mounting

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 1 所示。实验中采用了 $2H_2 + O_2$, $2H_2 + O_2 + Ar$, $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 和 $CH_4 + 2O_2$ 四种气体组分。

2.3 起爆方式

采用电热丝加热法。当做 15kPa 以下的低初压爆轰时,采用破膜起爆方式。

2.4 烟熏玻璃片的制备

烟熏玻璃片为 3mm 厚的平板玻璃,裁成 417mm × 40mm 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试以去除油污。

2.5 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。

3 实验程序

调节置入测试段的楔块位置,使传感器 T_1 在楔块前方而 T_2 和 T_3 在楔面上方,而且使 T_3 尽

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。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均匀喷一层发胶保护烟迹。将玻璃片上的胞格结构制成照片，用读数显微镜测量。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 10° , 15° , 19.3° , 26.6° , 30° , 35° , 40° 和 45° ，重复上述过程。

4 实验结果

1. 首次用烟迹方法得到了一组爆轰波 Mach 反射的胞格结构照片，如图4和图5所示。令人注意的是在楔块顶点附近形成一道明显的界线向下游延伸，形成与楔面的夹角，两测的胞格结构明显不同。实验中仅在初压低于26.7kPa时才能得到清晰的胞格结构。初压提高，胞格尺寸变小、密度变大，难以辨别，但界线清晰。最佳初压是在16.0kPa左右。
2. 记录了爆轰波 Mach 反射时各传感器的压力波形，可得楔面上压力和传播速度的变化。
3. 利用烟迹法，得到了爆轰波通过狭缝时，胞格结构的消失和恢复过程的照片(图6)。



图4 爆轰波绕射 19.3° 楔块时胞格结构烟迹记录照片($2\text{H}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$, $\gamma=1.447$, $p_0=16\text{kPa}$, $M_0=5.12$, 分界线在楔块顶点上游开始形成)

Fig. 4 Cellular structure produced by $2\text{H}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$ ($\gamma=1.447$, $p_0=16\text{kPa}$, $M_0=5.12$) detonation diffracting on a wedge $\theta_w=19.3^\circ$. The trajectory of the triple point formed in front of the apex of the wedge

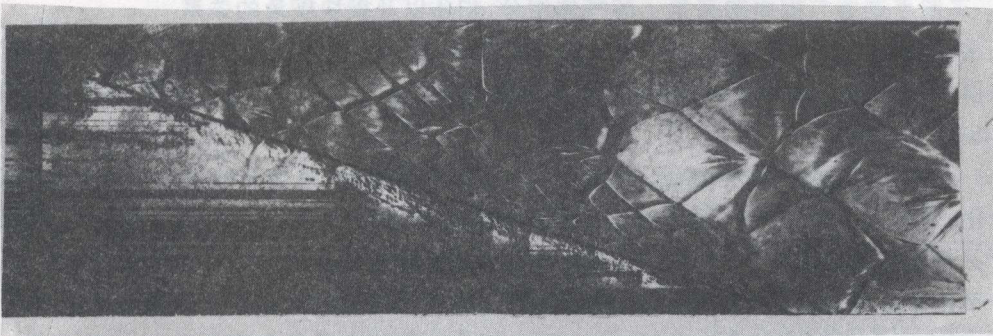


图5 爆轰波绕射 19.3° 楔块时胞格结构烟迹记录照片(条件同图4, 分界线在楔面上形成)

Fig. 5 Cellular structure produced by $2\text{H}_2+\text{O}_2+\text{Ar}$ ($\gamma=1.447$, $p_0=16\text{kPa}$, $M_0=5.12$) detonation diffracting on a wedge $\theta_w=19.3^\circ$. The trajectory of the triple point formed above the wedge slope

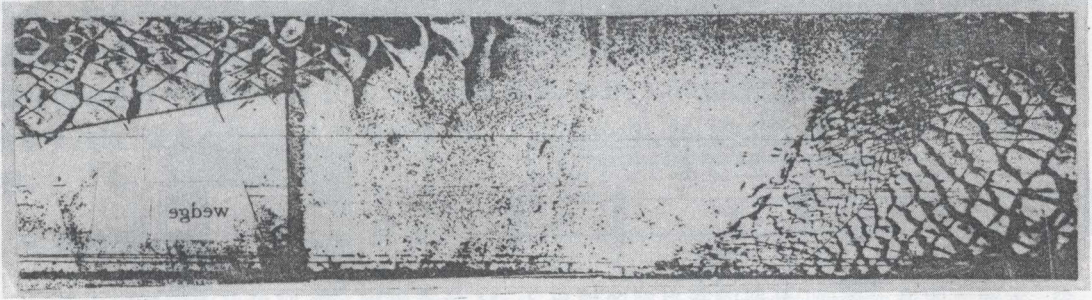


图 6 蜂窝状结构通过纤维后格的消夫对麻过居 (2H₂O + O₂) γ =1.402, ρ_0 =26.67kPa, M_0 =2.24
 Fig. 6 Cellular structure produced by 2H₂O + O₂) γ =1.40, ρ_0 =26.67kPa, M_0 =2.24, detonation diffraction on a wedge $\theta_w=10.0^\circ$. The process of dispersing and restructuring of the cellular structure is presented

2 纤维状结构

2.1 关于纤维状结构的形成

图 4 显示了在纤维状结构中纤维的分布情况。在纤维状结构中，纤维的分布是不均匀的，纤维的直径和长度也是不均匀的。纤维的直径一般在 1.0~2.0 μ m 之间，纤维的长度一般在 10~100 μ m 之间。纤维的分布密度在纤维状结构的中心区域最高，而在边缘区域最低。纤维的分布密度与纤维状结构的形成条件有关。纤维状结构的形成是由于纤维的聚集和生长。纤维的聚集是由于纤维的相互碰撞和粘附。纤维的生长是由于纤维的端部不断吸收新的物质。纤维状结构的形成是一个复杂的过程，涉及到纤维的聚集、生长、断裂和重组等多种物理和化学过程。纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度以及纤维状结构的形成条件等多种因素有关。纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度以及纤维状结构的形成条件等多种因素有关。纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度以及纤维状结构的形成条件等多种因素有关。

2.2 纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度的关系

纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度等多种因素有关。纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度是影响纤维状结构形成的主要因素。纤维的初始长度越长，纤维的初始直径越大，纤维的初始分布密度越高，纤维状结构的形成就越容易。纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度是影响纤维状结构形成的主要因素。纤维的初始长度越长，纤维的初始直径越大，纤维的初始分布密度越高，纤维状结构的形成就越容易。

2.3 纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度的关系

纤维状结构的形成与纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度等多种因素有关。纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度是影响纤维状结构形成的主要因素。纤维的初始长度越长，纤维的初始直径越大，纤维的初始分布密度越高，纤维状结构的形成就越容易。纤维的初始长度、纤维的初始直径、纤维的初始分布密度是影响纤维状结构形成的主要因素。纤维的初始长度越长，纤维的初始直径越大，纤维的初始分布密度越高，纤维状结构的形成就越容易。

其释放的热量使波后的流动变为亚音速, 导致临界角变大。

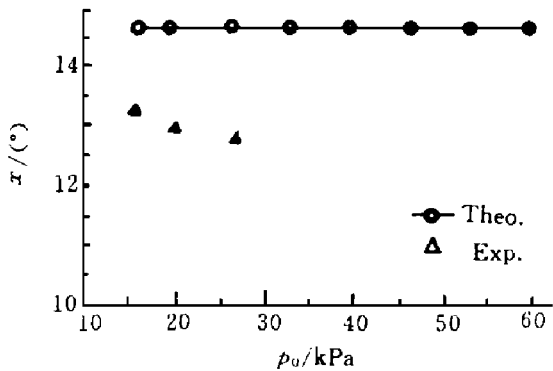


图 7 初压 p_0 对 α 角的影响

Fig. 7 The influence of initial pressure p_0 on the angle α

(With $2H_2 + O_2$, $T_0 = 288K$, $V_0 = 1.40$, $\theta = 19.3^\circ$)

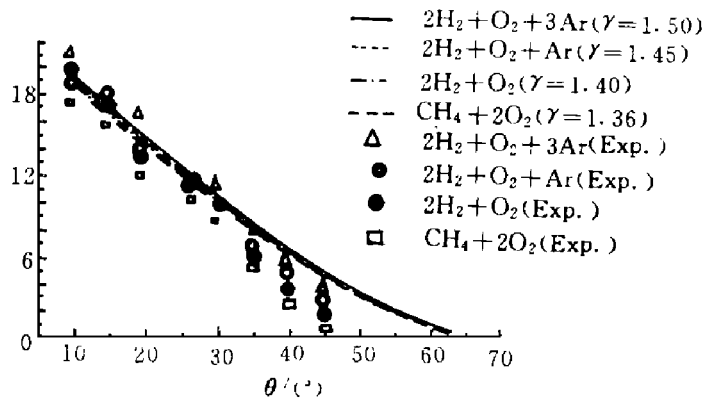


图 8 气体组分和楔角 θ 对 α 角的影响

Fig. 8 The influence of composition and wedge angle θ on the angle α

(With different composition $p_0 = 16kPa$)

实验和理论都表明, Mach 反射的 α 角主要依赖于楔角 θ , 爆轰介质的比热比 γ (气体组分不同, γ 值不同) 和速度 M_0 , 而临界角 θ_c 则依赖于爆轰波的速度 M_0 和比热比 γ

5.4 关于楔面上压力的跳跃

Mach 杆后方的压力 p_w / p_0 的变化如图 9 所示。压力的跳跃与楔角和气体组分的关系如图 10 所示。该图说明, 压比 p_w / p_0 随楔角的增大而提高, 而且比热比 γ 增大, 压比下降。与空气中平面冲击波 Mach 反射相比, 爆轰波 Mach 反射的压力的跳跃远远低于冲击波。这仍是由于化学反应区释放的热量使气体膨胀, 压力降低。对于图示的两种气体组分来说, 压比 p_w / p_0 的实验值总是低于用 CCW 理论估算的值。楔角小于 30° 时, 二者还相当吻合, 大于 30° 后, 实验值平坦延伸, 而理论值继续上升。这可能是由实验设备的局限造成的。在爆轰激波管尺寸不变的情

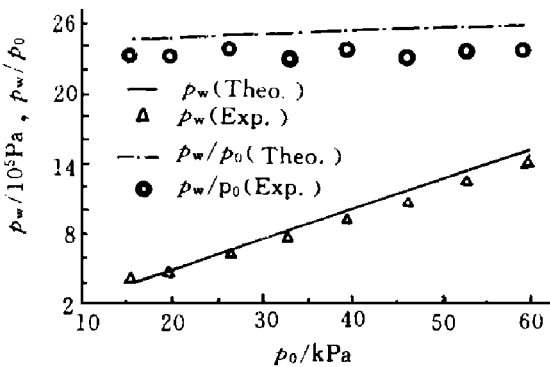


图 9 初压 p_0 对 Mach 杆压力和压比的影响

Fig. 9 The influence of initial pressure p_0 on the pressure behind Mach stem and the pressure ratio across Mach stem

(With $2H_2 + O_2$, $T_0 = 288K$, $V_0 = 1.40$, $\theta = 19.3^\circ$)

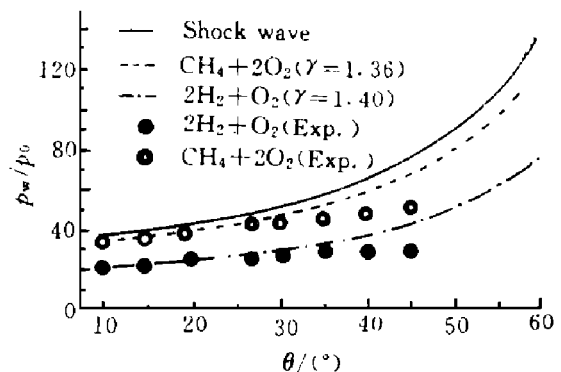


图 10 气体组分和楔角 θ 对压比的影响

Fig. 10 The influence of composition and wedge angle θ on the pressure ratio across Mach stem

(With different composition, $p_0 = 16kPa$)

况下, 楔角越大, 楔块越短。此时 Mach 杆还没来得及充分成长就已经传到了压力传感器位置。

5.5 关于爆轰波速度的变化

传感器 T_1 和 T_2 测到的是入射爆轰波的到达时间, T_3 可测到 Mach 杆到达的时间。图 11 显示 Mach 杆的 Mach 数 M_w 随初压 p_0 的提高而提高, 但 M_w/M_0 的变化不大。这与 α 角和压比 p_w/p_0 对初压 p_0 的不敏感是一致的。图 12 显示了两种气体组分下 M_w/M_0 随楔角的变化关系。实验值总是低于理论值, 而且随着楔角的增大, 误差也变大。这仍是由实验设备的局限造成的。随着 V 值的下降, M_w/M_0 也减小。爆轰波 Mach 反射时波速的变化主要依赖于楔角 θ 和比热 V

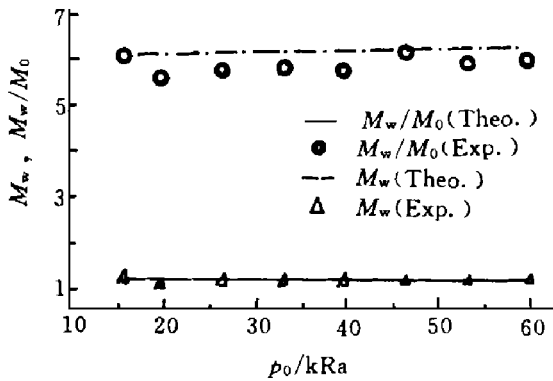


图 11 初压 p_0 对 Mach 数比 M_w/M_0 的影响

Fig. 11 The influence of initial pressure p_0 on the Mach number ratio M_w/M_0

(with $2H_2 + O_2$, $T_0 = 288K$, $V_0 = 1.40$, $\theta = 19.3^\circ$)

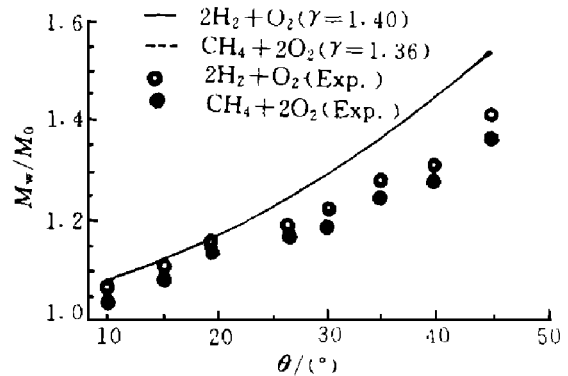


图 12 气体组分和楔角 θ 对 M_w/M_0 的影响

Fig. 12 The influence of composition and wedge angle θ on the Mach number ratio M_w/M_0

(with different composition)

5.6 关于爆轰波的稳定性

图 6 显示了爆轰波在通过由楔块和管壁所形成的狭缝时, 胞格结构的消失和恢复过程说明爆轰波的胞格结构具有稳定性。

6 结 论

1 气相爆轰波在绕射楔块时也和空气中平面冲击波一样会出现 Mach 反射, 胞格结构的突变和压力波形峰压的跳跃都证实了这一点。与冲击波不同的是爆轰波 Mach 反射的起始过程有随机性。从胞格结构来看, 三波点的迹线并不都严格地从楔块顶点开始, 而是在顶点附近形成。作者认为, 不能忽略横波与反射激波相互作用的影响。

2 初压 p_0 对三波点迹线与楔面的夹角 α , Mach 杆的速度 M_w 影响甚微。初压的提高会使 Mach 杆后方的压力 p_w 也提高, 但压比 p_w/p_0 的变化很小。

3 对爆轰波 Mach 反射各参数产生影响的是爆轰介质的比热比 V 以及楔块的楔角 θ_w 。比热比下降 (其它条件不变), α 角减小, 临界角 θ_{cr} 也减小, 压比 p_w/p_0 增大, 速度比 M_w/M_0 减小; 而随着楔角 θ_w 的增大, α 角减小, 压比 p_w/p_0 增大, 速度比 M_w/M_0 也增大。

4 与平面冲击波 Mach 反射相比, 在 M_0 和楔角 (小于 30°) 相同时, 二者的 α 角十分接近, 说明有化学反应的气体与无化学反应的气体在这一点上表现相同。因此 CCW 理论对爆轰波的 Mach 反射仍能适用。不过, CCW 理论在描述爆轰波压力变化上的适用程度要高于描述 α 角的变化。但二者的压比相差甚远, 冲击波的压比是爆轰波 ($2H_2 + O_2$) 的 1.7 倍。这是由于爆轰

波前导激波后方存在化学反应区, 其释放的热量使气体膨胀, 压力降低。

周光泉教授生前积极参加了本基金课题的申请, 并承担了其中一部分工作。他于 1994 年夏亲赴英国威尔士大学进行有关本课题的合作研究。他的英年早逝也是本课题组的重大损失。

李剑讲师参加了本课题的部分工作, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Lee JH, Knystautas R, Lee B H K. Structure of Gaseous Detonation in a Convergent-divergent Channel. *AIAA 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. 18th Symp (Int) Comb. Pittsburgh Comb Inst, 1981, 1615
- 3 Knystautas R, Lee JH, Guirao C M. The Critical Tube Diameter for Detonation Failure in Hydrocarbon Air Mixtures. *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. *爆炸与冲击*, 1995, 15(1): 69
- 5 Edwards D H, Walker J R, Nettleton M A. On the Propagation of Detonation Waves along Wedges. *Arch Comb*, 1984 (4): 197
- 6 Nettleton M A. *Gaseous Detonation Their Nature, Effects and Control* Published by Chapman and Hall Ltd, 1987, 151
- 7 Chester W. The Quasi-cylindrical Shock Tube. *Phil Mag*, 1954, 45-1293
- 8 Chisnel R F. The Motion of a Shock Wave in a Channel with Applications to Cylindrical and Spherical Shock Waves. *J Fluid Mech*, 1957, (2): 286
- 9 Whitham G B. *Linear and Non-linear Waves* London: Wiley Interscience, 1974
- 10 Chan C K. Collision of Shock Wave with Obstacle in a Combustible Mixture. *Comb Flame*, 1995, 100-341 ~ 348

THE INVESTIGATION ON THE GASEOUS DETONATION WAVES PROPAGATING ALONG A CONVERGENT CHANNEL

Guo Changming, Zhou Guangquan, Wang Zhengdao

(Dept. of Modern Mechanics, Univ. of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

ABSTRACT Systematic investigation on the gaseous detonation waves propagating along a convergent channel with different composition and wedge angle and under different initial pressure was carried out. With specially designed test section of the tube and smoked foil record, the trajectory of triple point of Mach-reflected detonation wave was recorded for the first time. On the both sides of the trajectory, the change of cell size and cell density is very obvious. The critical angle, at which the transition from Mach to regular reflection of detonation wave is occurred, can be estimated. The influence of initial pressure, specific heat ratio of the medium and wedge angle on the Mach reflection was studied. The comparison of Mach reflection of the detonation with the shock wave indicates that CCW theory performs much satisfactorily in describing the pressure ratio across Mach stem only with a tolerable variation in the angle of the trajectory to the wall.

KEY WORDS gaseous detonation, cellular structure, Mach reflection, CCW theory