

气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射后流场的分析*

郭长铭¹, 张德良², 谢 巍²

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230026; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 10080)

摘要: 论文详细分析了气相爆轰波在斜劈上 Mach 反射后的流场。根据胞格结构的烟迹记录, 得到了爆轰波 Mach 反射时三波点迹线与楔面的夹角 (也称激波角, shock-shock angle) 与楔角 的定量关系, 依此推算出爆轰波绕射楔块时从规则反射 (normal reflection) 向 Mach 反射转变的临界角范围。论文也分析了影响 角和 Mach 杆后压力的主要因素。该结果有助于更深入了解爆轰波的本质, 也为数值模拟气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射现象提供了可靠的对照依据。

关键词: 气相爆轰; 胞格结构; Mach 反射

中图分类号: O381; O382⁺.1 **文献标识码:** A

1 前言

关于研究气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射的意义, 作者在文献[1]中已作了介绍。值得指出的是, 近年来国际学术界对气相爆轰波的研究又重视起来。原因是随着计算技术的飞速发展, 目前已能对涉及复杂化学反应的现象进行数值模拟; 同时也发现了胞格结构的普遍性。Elaine S. Oren^[2]曾指出, 几乎所有的含能材料(energetic materials)在释放能量时, 从可燃气体的爆轰到宇宙中超新星的爆发, 都有胞格结构存在。因此, 目前的国际气相爆轰研究“热”是由于人们对自然的更深入认识而形成的, 并得到了更先进研究手段的支持。在国内外一系列的研究成果中, 作者在文献[1]中公布了气相爆轰波在管道中与障碍物相互作用发生 Mach 反射直接的实验证据。本文对结果进行分析。

2 实验结果的分析

2.1 三波点迹线与楔面夹角 与楔角 和可燃气体初压 P_0 的关系

同一初压的爆轰波在不同楔角的楔块上 Mach 反射时, 胞格结构的烟迹记录已在文献[1]中公布。对胞格结构的烟迹记录进行计算机处理, 结果表明, 角对楔角 的变化十分敏

* 收稿日期: 2000-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(19872068)资助项目

作者简介: 郭长铭, 男, 1943年4月生, 教授。

感. 图 1 显示了 α 角的实验值与楔角 θ 的关系. 随着楔角的增大(实验中从 10° 增加到 40°), α 角单调减小. 这与空气中平面冲击波在楔块上 Mach 反射时的结果是一致的.

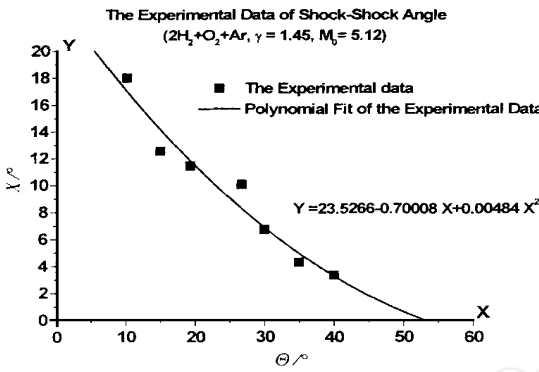


图 1 激波角 α 与楔角 θ 的关系

Fig. 1 The relation between angle α and angle θ
The Relationship between Initial Pressure

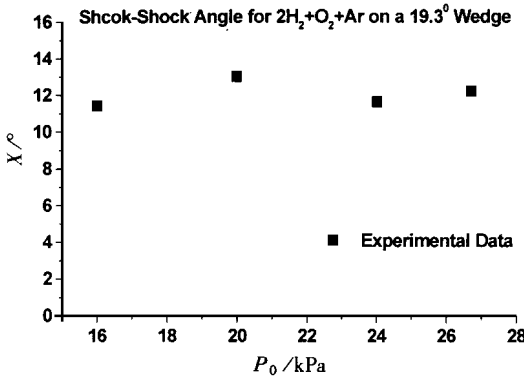


图 3 激波角 α 与初压的关系

Fig. 3 The relation between angle α and initial pressure P_0

在不同初压下,爆轰波在同一楔块 (19.3°) 上 Mach 反射的胞格结构如图 5 ~ 图 7 所示. 数据分析表明,尽管当初压由 16 kPa 升至 26.7 kPa 时,胞格尺寸发生了明显变化(如图 2 所示),但初压 P_0 对 α 角的影响甚微,最大变化仅为 1.59° (如图 3 所示). 从理论上分析,以气体组分 $2H_2 + O_2 + Ar$,初始温度 288 K 为例,当初压由 16 kPa 至 60 kPa 时,爆轰速度由 2 188 m/s 提高到 2 248 m/s,增幅仅为 2.7%. 在上述条件下,空气中平面冲击波若按 CCW (Chester-Chisnell-Whitham) 理论^[3-5]估算, α 角几乎没有变化. 这与空气中平面冲击波在楔块上 Mach 反射时的结果也是一致的.

上述两个系列的实验研究(即先固定初压,变换楔块的楔角;后固定楔块的楔角,改变初压)说明,尽管气相爆轰波和空气中的平面冲击波是性质不同的两种波,但在绕射楔块时它们的表现有共同点. 其原因不难理解. 因为按照爆轰波的 ZND (Zeldovich-Von Neumann-Doering) 模型,爆轰波的基本结构包括前导冲击波 (Precursor Shock Wave) 和紧跟其后的化学反应

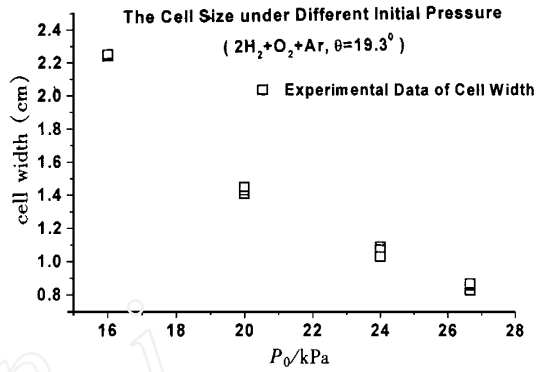


图 2 胞格尺寸与初压的关系

Fig. 2 The relation between cell width and initial pressure

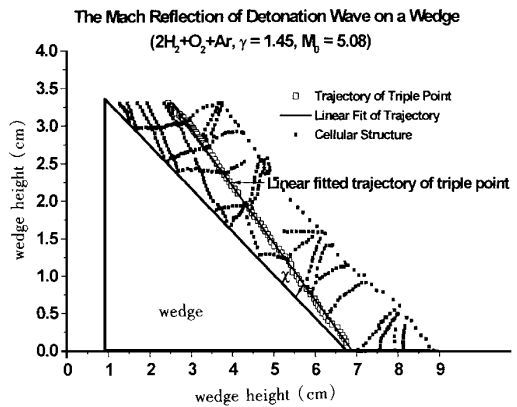


图 4 计算机处理爆轰波 Mach 反射示意图

Fig. 4 The sketch of measuring shock shock angle

区. 在气相爆轰波中前导冲击波是强激波. 如初压为 16 kPa, 初温为 288 K 时, 马赫数 (Mach Number) M_0 是 5.12, 已属强激波. 当爆轰波在传播过程中遇到障碍物而发生 Mach 反射时, 这种强激波决定了爆轰波的基本行为, 即三波点迹线与楔面的夹角 θ 对楔角 α 的变化敏感而对可燃气体初压 P_0 的变化不敏感. 爆轰波的这一性质为我们后面在理论上分析 θ 对楔角 α 的变化关系提供了依据.

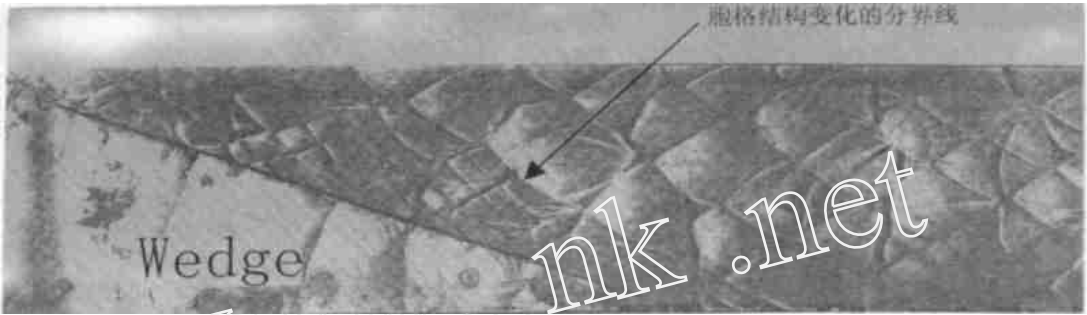


图5 $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $\alpha = 19.3^\circ$, Mach 反射的胞格结构烟迹记录 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\lambda = 1.45$, $M_{\text{cj}} = 5.12$), 三波点迹线自楔块顶点的上游开始形成

Fig. 5 Cellular structure produced by $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ($\lambda = 1.45$, $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $M_{\text{cj}} = 5.12$) detonation diffracting a wedge with $\alpha = 19.3^\circ$. The trajectory of triple point is formed in front of the apex of wedge

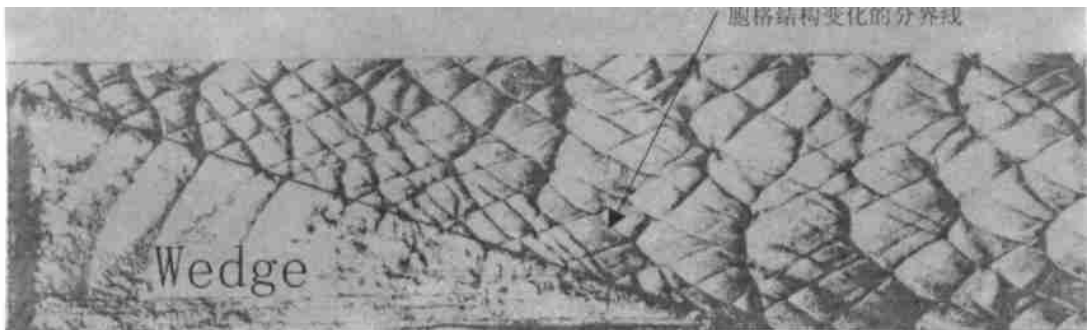


图6 $P_0 = 20 \text{ kPa}$, $\alpha = 19.3^\circ$, Mach 反射的胞格结构烟迹记录 ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\lambda = 1.45$, $M_{\text{cj}} = 5.15$), 三波点迹线在楔块的顶点开始形成

Fig. 6 Cellular structure produced by $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ($\lambda = 1.45$, $P_0 = 20 \text{ kPa}$, $M_{\text{cj}} = 5.15$) detonation diffracting a wedge with $\alpha = 19.3^\circ$. The trajectory of triple point is formed at the apex of wedge

2.2 关于爆轰波 Mach 反射时三波点迹线的形状和起始位置的随机性

然而气相爆轰波和空气中的平面冲击波毕竟是性质不同的两种波. 爆轰波本身就具有横波结构 (transverse wave). 正是这种横波结构维持了爆轰波自持稳定的传播^[6]. 所以二者在发生 Mach 反射时应有不同之处.

首先, 爆轰波 Mach 反射产生的三波点迹线并非完全象以前所认为的是一条直线^[7]. 由文献[1]中的照片可看出, 当楔角小于 30° 时, 三波点迹线实际上是一条不规则的折线. 在折线的两侧, 胞格的密度、形状和尺寸出现突变. 我们在测量角 θ 时, 对不规则的折线作了线性拟合处理. 图 4 是拟合处理的示意图. 当楔角超过 30° (含 30°), 三波点迹线就基本上呈直线状.

其次,图 5、图 8 和图 9 显示了在相同的气体组分($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$)和相同初压(16 kPa)条件下绕射相同的楔块(19.3°)时,三波点迹线不同的起始位置.图 5 中的三波点迹线在楔块

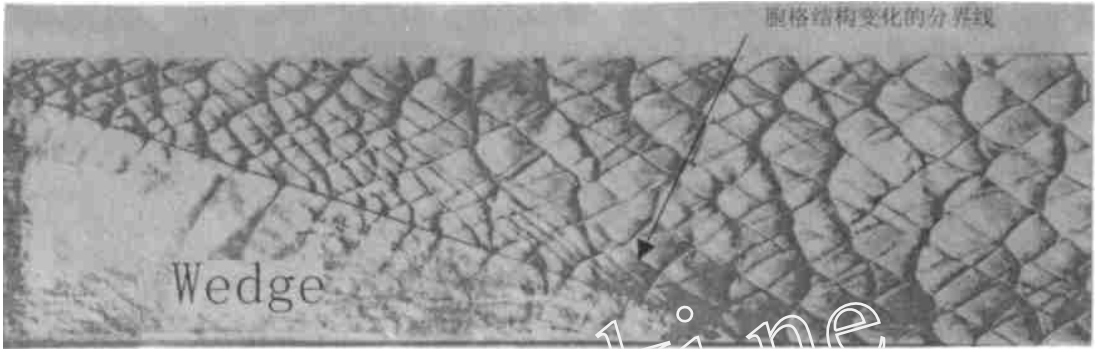


图 7 $P_0 = 24 \text{ kPa}$, $\alpha = 19.30^\circ$, Mach 反射的胞格结构烟迹记录($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $M_{\text{c}j} = 5.17$), 三波点迹线在楔块的顶点开始形成

Fig. 7 Cellular structure produced by $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ($\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $P_0 = 24 \text{ kPa}$, $M_{\text{c}j} = 5.17$) detonation diffracting a wedge with $\alpha = 19.30^\circ$. The trajectory of triple point is formed at the apex of wedge



图 8 $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $\alpha = 19.30^\circ$, Mach 反射的胞格结构烟迹记录($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $M_{\text{c}j} = 5.12$), 三波点迹线在楔块斜面上开始形成

Fig. 8 Cellular structure produced by $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ($\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $M_{\text{c}j} = 5.12$) detonation diffracting a wedge with $\alpha = 19.30^\circ$. The trajectory of triple point is formed above the wedge slope



图 9 $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $\alpha = 19.30^\circ$, Mach 反射的胞格结构烟迹记录($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$, $\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $M_{\text{c}j} = 5.12$), 三波点迹线在楔块顶点开始形成

Fig. 9 Cellular structure produced by $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ ($\lambda = 1.45 \mu\text{m}$, $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $M_{\text{c}j} = 5.12$) detonation diffracting a wedge with $\alpha = 19.30^\circ$. The trajectory of triple point is formed just at the apex of wedge

顶点前方就开始形成,这与 C. K. Chan 观察到的火焰在可燃介质中沿楔面传播时的现象十

分类似^[8]。图8则是在楔块的斜面上方才形成三波点迹线。在上述两种情况中,角 θ 分别为 11.4° 和 12.7° 。考虑到实验和测量的误差,可以认为是一致的。笔者称这种现象为爆轰波 Mach 反射时“起始位置的随机性”。实验表明,随楔角 θ 的增大,这种随机性越来越小。楔角 θ 超过 30° (含 30°),三波点迹线一般都从楔块顶点就开始形成,且很接近直线,这可参阅文献[1]的图10~图12。爆轰波 Mach 反射时,三波点迹线可以是折线以及迹线起始位置的随机性这两点,与空气中的平面冲击波 Mach 反射是不同的。

对这一现象的粗略理解,恐怕要归结到爆轰波本身的横波与由 Mach 反射产生的反射激波之间的相互作用。胞格结构的形成是横波相互碰撞的结果。Mach 反射时,在三波点迹线下方,横波与不断上升的楔面相碰,缩短了它的行程,加密了胞格的分布;另一方面,横波又会与入射爆轰波 Mach 反射后产生的反射激波相碰,反射后形成新的胞格。这一点可从图8上看得很清楚。箭头所指处,三波点迹线上方并没有胞格线传过来,但迹线上却产生了一道新的胞格线向迹线下方传播。笔者认为,也是由于横波的影响,使三波点迹线成为一条不规则的折线。当楔角超过 30° (含 30°)时,迹线两侧压比增大,胞格尺寸变得越来越小,使迹线接近直线。当楔角超过 35° 时,迹线下方的胞格变得如此之密,以至于把烟熏玻片上的烟层全都扫掉了,看不到任何胞格结构,迹线更接近直线。

总结上述两点,我们有理由对爆轰波的 Mach 反射作出这样的理解:爆轰波的前导强激波决定了三波点迹线与楔面的夹角 θ 与楔块楔角 θ_0 和可燃气体初压 P_0 的关系,而前导强激波后方的横波则是三波点迹线起始位置的随机性和迹线是一条不规则折线的主要原因。

2.3 爆轰波绕射楔块时由规则反射向 Mach 反射转变的临界角 θ_{crit} 范围

将图1上的实验数据点用光滑曲线拟合,由曲线与横轴(楔角 θ)的交点,可推算出爆轰波绕射楔块时由规则反射向 Mach 反射转变的临界角 θ_{crit} 的范围。对于气体组分 $2H_2 + O_2 + Ar$,由图1可知,临界角范围为 $50^\circ \sim 55^\circ$ 。对于这个估算值,尚需实验来验证。笔者拟在今后进行验证。

表1 爆轰波压力实测值($2H_2 + O_2$, 楔角 19.3°)

Tab. 1 The experimental data of detonation pressure (wedge angle 19.3° , $2H_2 + O_2$)

P_0 / kPa	P_{theo} / kPa	P_1 / kPa	P_2 / kPa	P_3 / kPa	P_2 / P_1	P_3 / P_1	P_3 / P_0	P_2 / P_0	P_1 / P_0	Err / %
17.33	317.9	334.1	339.6	401.5	1.02	1.20	23.17	19.60	19.28	5.1
20.00	368.6	380.7	391.0	463.5	1.03	1.22	23.18	19.55	19.04	3.3
26.67	496.8	498.7	491.5	625.1	0.99	1.25	23.44	18.43	18.70	0.4
33.33	625.9	612.5	614.4	762.0	1.00	1.24	22.86	18.43	18.38	2.1
40.00	755.9	772.5	760.8	932.0	0.99	1.21	23.30	19.02	19.31	2.2
46.67	886.6	896.7	898.4	1 073.3	1.00	1.20	23.00	19.25	19.22	1.2
53.33	1 018.0	1 013.5	1 027.9	1 257.8	1.01	1.24	23.58	19.27	19.00	0.4

P_0 :初压值, P_{theo} :爆轰压力理论值, P_1 :传感器 T_1 实验值, P_2 :传感器 T_2 实验值, P_3 :传感器 T_3 实验值, Err: P_i / P_0 的实验值与理论值的误差

2.4 楔面上压力的跃增

由文献[1]的图3可知,传感器 T_1 用于测量稳定爆轰波的压力,可与理论值对照; T_2 和

T_3 用来测量爆轰波 Mach 反射时 Mach 杆后方的压力. 用两个传感器来测量, 是由于在我们的设计中为了统一障碍物对爆轰波传播的堵塞作用, 给所有的楔块留下的气流通道都是 5 mm 的狭缝, 即楔块的高度都是 35 mm. 这样一来, 当楔角从 10 增加到 45 时, 楔块的长度从 198.5 mm 缩至 35 mm. 为了确保能测到 Mach 杆后方的压力, 我们安排了两个传感器. 表 1 列出了各传感器测得的数据. 在这组实验中, 传感器 T_1 的位置在楔块前方 110 mm 处, T_2 在楔块斜面上方 15 mm, T_3 在斜面上方 65 mm. 表 1 表明, P_1 和 P_2 的值十分接近, 这说明传感器 T_2 (尽管已在斜面上方) 测到的不是 Mach 杆后方的压力. P_3 的值出现跃增, 说明测到的是 Mach 杆后方的压力. 该现象在其它绕射楔块的实验中也同样存在.

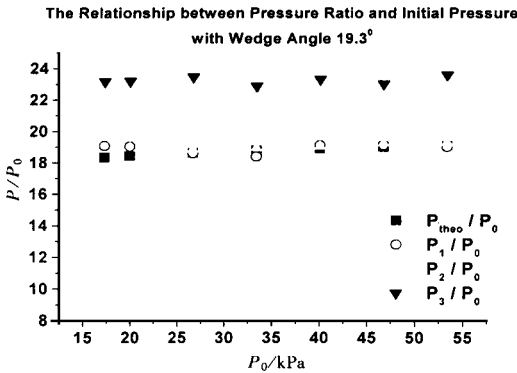


图 10 初压 P_0 对压力的影响

Fig. 10 The influence of initial pressure P_0 on pressure

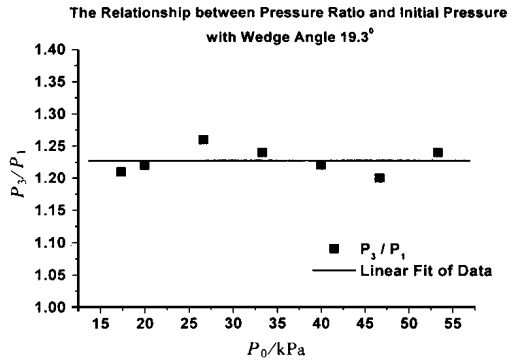


图 11 初压 P_0 对压比 P_3/P_1 的影响

Fig. 11 The influence of P_0 on pressure ratio P_3/P_1

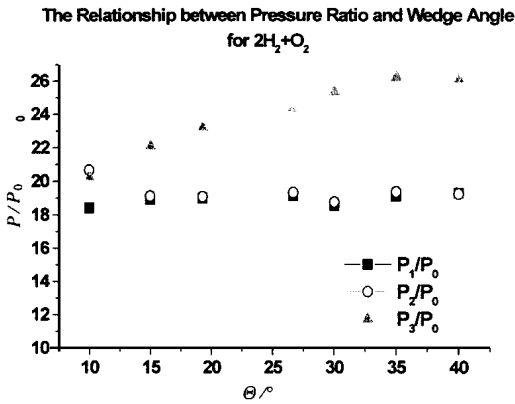


图 12 楔角 对压力的影响

Fig. 12 The influence of wedge angle on pressure

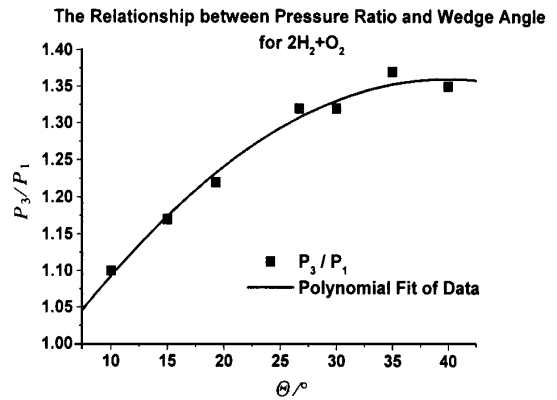


图 13 楔角 对压比 P_3/P_1 的影响

Fig. 13 The influence of on pressure ratio P_3/P_1

如图 10 所示, 对同一楔角 (19.3°), 尽管传感器 T_1 、 T_2 和 T_3 测得的压力 P_1 、 P_2 和 P_3 随初压 P_0 的增加而增加 (见表 1), 但它们与初压 P_0 的压比变化不大. 而且, Mach 杆后的压力与入射爆轰波后的压力之比 (P_3/P_1) 变化也很小, 数据可用直线拟合, 如图 11 所示. 另一方面, 在同一初压下, P_1 、 P_2 和 P_3 与初压 P_0 之比与楔角的关系如图 12 所示. 该图说明, 对各楔角, P_1 和 P_2 的压力很接近 (仅 10° 例外), 但压比 P_3/P_0 随楔角的增大而提高. 而且 Mach 杆后的压力与入射爆轰波后的压力之比 (P_3/P_1) 也随楔角的增大而提高, 如图 13 所示. 这两

点充分说明,正是楔角而不是初压影响压比 P_3/P_1 的变化.值得注意的是,对于气体组分 $2H_2 + O_2$ 来说,楔角大于 30° 后,压比 P_3/P_0 和 P_3/P_1 皆呈平坦延伸趋势,与楔角小于 30° 时的上升趋势不同.笔者认为这是由实验设备的局限造成的.在爆轰激波管尺寸不变和留给不同楔角的楔块气流通道的情况下,楔角越大,楔块越短.对短楔块来说,可能 Mach 杆还没来得及充分成长就已经传到了压力传感器位置.也就是说,此时传感器测到的并非是真正的 Mach 杆后方的压力.另外,楔角越大,三波点迹线与斜面的夹角越小,甚至小到 Mach 杆后方的区域比传感器感受部分的截面积还小.此时很难保证测量的精度.

3 结论

1) 实验证明,气相爆轰波绕射楔块时也和空气中平面冲击波一样会出现 Mach 反射.烟迹记录上胞格密度、形状和尺寸的突变以及压力波形峰值的跳跃都证实了这一点.对比爆轰波和空气中平面冲击波的 Mach 反射,我们有理由作出如下的理解:爆轰波的前导强激波决定了三波点迹线与楔面的夹角 α 与楔块楔角 θ 及气体初压 P_0 的关系;而前导强激波后方的横波结构则是三波点迹线是一条不规则的折线和迹线起始位置的随机性的主要原因.爆轰波的这一性质为理论分析角 α 对楔角 θ 的关系提供了依据.

2) 初压 P_0 的提高会使 Mach 杆后方的压力也提高,但初压对角 α 以及 Mach 杆后的压力与入射爆轰波后的压力之比 (P_3/P_1) 的影响甚微.

3) 对同一气体组分,影响爆轰波 Mach 反射后流场参数的是楔角 θ .随着 θ 的增大,角减小,压比 P_3/P_1 增大.这与空气中平面冲击波在楔块上 Mach 反射的结果是一致的.

4) 通过对实验数据的曲线拟合,对于气体组分 $2H_2 + O_2 + Ar$ 来说,推算出由规则反射向 Mach 反射转变的临界角范围在 $50^\circ \sim 55^\circ$.当然,对于这个估算值,我们今后将以实验来验证.

参 考 文 献

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>[1] 郭长铭,张德良,谢巍.气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射的实验验证[J].实验力学,2000,15(3):298~305.</p> <p>[2] Oran E S. The structure of propagating detonations: lessons from numerical simulations [C]. Proceedings of International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Bremen Germany, 1999. 1~4.</p> <p>[3] Chester W. The quas-cylindrical shock tube [J]. Phil. Mag. 1954, 45: 1293.</p> <p>[4] Chisnell 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.</p> | <p>[5] Whitham GB. Linear and Nonlinear Waves[M]. London: Wiley Interscience, 1974.</p> <p>[6] Dupre G, et al. Propagation of detonation waves in acoustic absorbing walled tube [C]. Dynamics of Explosions, Prog. Astronautics and Aeronautics 114, AIAA Washington, 1988, 248~263.</p> <p>[7] Nettleton M A. Gaseous Detonation Their Nature, Effects and Control [M]. London: Chapman and Hall Ltd., 1987, 151.</p> <p>[8] Chan C K. Collision of shock wave with obstacle in a combustible mixture [J]. Comb. and Flame, 1995, 100: 341~348.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Analysis of Flow Field after Gaseous Detonation Wave is Mach Reflected on an Obstacle

GUO Chang-ming¹, ZHANG De-liang², XIE Wei²

(1. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, USTC, Hefei 230026, China)

(2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract : The experimental evidence of Mach reflection of gaseous detonation waves diffracting an obstacle are presented in our paper. A detailed quantitative analysis of the flow field that forms behind Mach reflection is presented in this paper. According to the recorded cellular structure, the relationship between shock-shock angles (the angle formed by trajectory of triple point and the slope of wedge) and wedge angles can be determined. Therefore the range of critical angle, on which the regular reflection is transferred into Mach reflection when detonation wave is diffracting on a wedge, can be estimated reasonably. The main factor that determines the shock-shock angle and the pressure behind the Mach stem is also analysed here. These results will further our understanding of the nature of detonation, in addition to providing the reference for comparison when making numerical simulation for this phenomenon.

Key words : gaseous detonation; cellular structure; Mach reflection

(上接第 724 页)

- [2] GEANT3. CERLIB program library long writeup D506 [CP]. <http://wwwinfo.cern.ch/asd/cernlib/>.
W5013 [CP]. <http://wwwinfo.cern.ch/asd/cernlib/>.
- [3] MINUIT, CERN program library long writeup [CP], <http://wwwinfo.cern.ch/asd/cernlib/>.
- [4] PAW, CERN program library long writeup Q121 [CP], <http://wwwinfo.cern.ch/asd/cernlib/>.

A Fast Convolution Fitting Method for Energy Spectrum

XU Tong, SHAO Ming, LI Cheng, CHEN Hongfang, XU Zi-zong Xu

(Department of Modern Physics, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract : This paper presents a fast convolution method to be used in fitting the spectrum of scintillation crystal PbWO_4 and gives the light yield of the crystal. It replaces the time-consuming convolution calculation with a series recursion, which greatly improves the speed of fitting with little loss of precision.

Key words : scintillator; spectra; convolution; fitting