

气相爆轰波与空气冲击波在斜劈上 Mach 反射的特征参数比较

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 100080)

摘要:以传统的烟迹技术记录胞格结构,证实了气相爆轰波在管道中与斜劈相互作用发生 Mach 反射,得到了系统的实验结果.在此基础上详细地分析了爆轰波反射后流场的特征参数(三波点迹线与楔面的夹角 X 与斜劈楔角 θ 及气体初压 P_0 的关系等),并与空气冲击波在斜劈上 Mach 反射后流场的特征参数进行了比较,初步探讨了参数偏差的原因.这一研究有助于比较深入、全面地了解爆轰波的前导冲击波和横波在 Mach 反射中所起的作用.

关键词:气相爆轰;冲击波;Mach 反射

中图分类号:O381;O382⁺.1 **文献标识码:**A

前 言

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^[1].发现了胞格结构的这一普遍性后,国际学术界对气相爆轰波的研究十分重视.通过实验和数值模拟对气相爆轰作了大量的研究^[2,3].他们在实验中主要采用激光纹影摄影,烟迹记录只作为一种定性分析的手段.作者在文献[4,5]中,以烟迹记录为定量分析的手段,对气相爆轰波沿管道传播时在斜劈上发生 Mach 反射的实验结果作了详细的介绍和分析讨论.空气平面冲击波在斜劈上的 Mach 反射在过去已进行了充分的研究.本文对这两种波形在斜劈上 Mach 反射的特征参数作了分析,比较它们之间的异同.这一分析对深入、全面地了解爆轰波的前导冲击波和横波(Transverse wave)在 Mach 反射中所起的作用是很有必要的.

1 分析和讨论

1.1 三波点迹线与楔面的夹角 X 和楔角 θ 的关系及临界角 θ_{crit}

由文献[5]可知,尽管气相爆轰波和空气平面冲击波是性质不同的两种波,但在绕射斜

收稿日期:2000-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19872068)

作者简介:郭长铭,男,1943年生,教授.

劈时它们有共同点. 爆轰波的基本结构是前导冲击波和其后的化学反应区. 气相爆轰波的前导冲击波是强激波. 当爆轰波遇到斜劈而发生 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 对斜劈楔角 θ 的变化敏感, 而对可燃气体初压 P_0 的变化不敏感. 这就为理论分析 θ 与 M_0 的关系提供了一点依据. 也就是说, 我们可以借用分析冲击波 Mach 反射的 CCW (Chester-Chisnell-Whitham) 方法^[6~8]来估算爆轰波发生 Mach 反射时 θ 对 M_0 的依赖关系. CCW 方法亦称 Whitham 方法, 是一个处理二维或三维冲击波运动近似但十分有效的方法. Chester^[6]和 Chisnell^[7]首先得到了冲击波在变截面管道中传播时强度变化的近似关系. Whitham^[8]将这种截面积和冲击波强度变化的函数关系应用于二维冲击波的传播, 由几何关系导出了拟线性性双曲型 Whitham 方程组. 该方程组近似描述了多维冲击波的传播. 在各种情况下求解 Whitham 方程组, 可以有效地解决冲击波绕射、反射和相互作用等一系列问题. 由于爆轰波阵面后方三维结构的复杂性和随机性, 目前尚无普遍的方法来分析爆轰波在变截面管道中传播时的强度变化, 我们只能根据爆轰波与冲击波绕射斜劈时有类似的表现这一点, 尝试用 CCW 方法来分析爆轰波的 Mach 反射. 图 1 分别给出了冲击波 — θ 曲线和爆轰波 — θ 关系的实验值以及对实验值拟合所得的曲线 ($2H_2 + O_2 + Ar$, $M_0 = 1.45$, $P_0 = 16 \text{ kPa}$, $M_0 = 5.12$). 该图表明, 具有同样马赫数 ($M_0 = 5.12$) 的爆轰波和冲击波发生 Mach 反射时, θ — M_0 关系曲线的变化趋势是一致的, 但冲击波的 θ 角大于爆轰波的 θ 角.

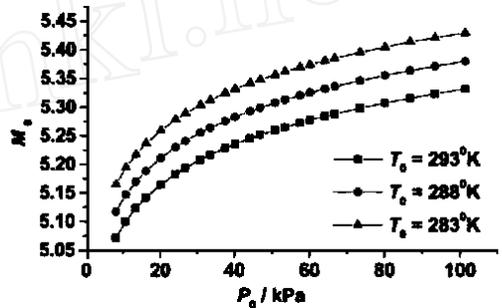


图 1 冲击波与爆轰波的 θ — M_0 关系比较
Fig. 1 The θ — M_0 relation for detonation and shock wave

从而, 冲击波的临界角 (从规则反射向 Mach 反射转变的角度) θ_{crit} 也大于爆轰波的临界角.

1.2 角对可燃气体初压 P_0 变化不敏感原因的初析

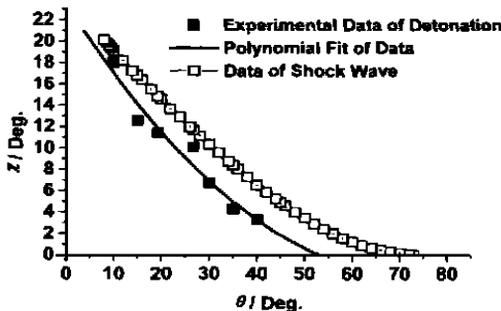


图 2 不同初温的爆轰波 M_0 — θ 关系
Fig. 2 The M_0 — θ relation at different initial temperature

根据爆轰波理论, 对不同气体组分、初始压力和初始温度的可燃气体, 其传播速度、马赫数以及波后的压力、温度等参数都可以进行理论估算. 图 2 是按当量比混合的氢氧气体 ($2H_2 + O_2$) 在三种初始温度下, 爆轰波马赫数 M_0 与初压 P_0 的关系. 该图表明, 初始温度相同时, 随着初压提高, 爆轰波马赫数 M_0 呈缓慢单调递增的趋势. 但随着初温提高, 混合气体的声速也相应提高, 而爆轰波的传播速度则缓慢下降. 这两方面因素的共同作用, 使爆轰波马赫数随初始温度的提高而减小. 同样, 对用氩气稀释的混合气体 $2H_2 + O_2 + Ar$, 当初温 $T_0 = 288 \text{ }^\circ K$, 初压由 16

kPa 升至 60 kPa 时, 爆轰速度由 2188 m/s 提高到 2248 m/s, 马赫数由 5.12 增至 5.26, 增幅仅为 2.7%. 对在上述范围内变化的 M_0 , 按 CCW 方法估算, θ 角几乎没有变化. 笔者认为这就

是 角对初压 P_0 的变化不敏感的原因. 这就说明, 当气体组分和 角不变时, 角主要由入射爆轰波的马赫数 M_0 决定.

1.3 楔面上压力跃增的比较

图 3 对按当量比混合的氢氧气体 ($2H_2 + O_2$) 给出了三种初始温度下, 爆轰波波后压力 P_1 与 P_0 之比与 P_0 关系的理论估算值. 该图表明, 当初温不变时, 随着 P_0 提高, P_1/P_0 呈缓慢单调增的趋势; 当 P_0 不变时, P_1/P_0 随初温的提高而减小.

图 4 给出了 (P_1/P_0) 与 关系的理论估算值以及爆轰波实验值. 该图表明, 当 M_0 不变时, 冲击波的压比远高于爆轰波对应值. 对于爆轰波来说, 之所以出现上述现象, 是因为前导激波后面是化学反应区. 化学反应所释放的热量使该区域温度升高, 体积膨胀, 压力和密度降低.

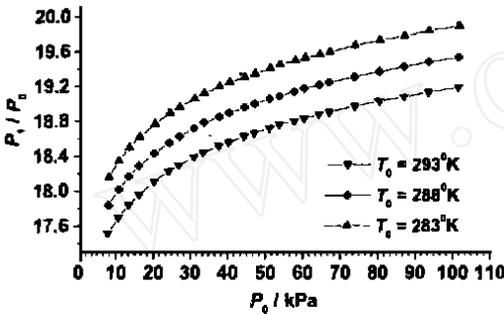


图 3 不同初温下压比 (P_1/P_0) 与 P_0 的关系

Fig. 3 The (P_1/P_0) — P_0 relation at different initial temperature

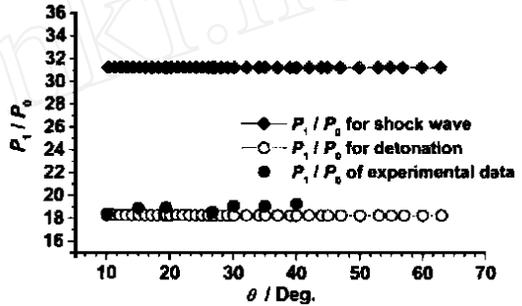


图 4 压比 (P_1/P_0) 与 的关系 ($M_0 = 5.12$)

Fig. 4 The (P_1/P_0) — relation for shock and detonation ($M_0 = 5.12$)

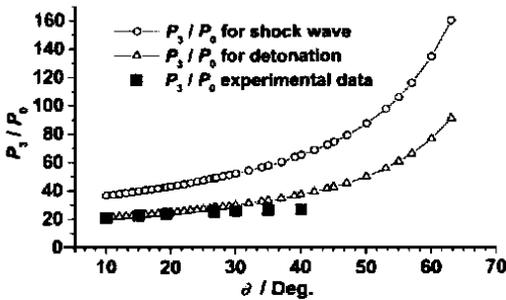


图 5 压比 (P_3/P_0) 与楔角 的关系 ($M_0 = 5.12$)

Fig. 5 The (P_3/P_0) — relation for shock and detonation with ($M_0 = 5.12$)

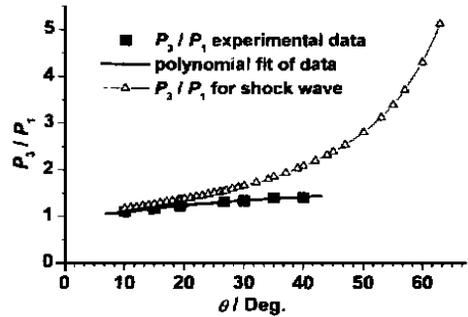


图 6 压比 (P_3/P_1) 与楔角 的关系 ($M_0 = 5.12$)

Fig. 6 The (P_3/P_1) — relation for shock and detonation with ($M_0 = 5.12$)

图 5 给出了入射冲击波和爆轰波 Mach 杆后的压力 P_3 与初压 P_0 的比值 (P_3/P_0) 与 的关系 (理论估算值) 以及爆轰波实验值. 由于上述同样的原因, 冲击波的压比高于爆轰波对应值. 楔角大于 30° 后, 压比 P_3/P_0 呈平坦延伸趋势, 与楔角小于 30° 时的上升趋势不同, 原因如后述.

当 $M_0 = 5.12$ 时,图 6 给出了入射冲击波 Mach 杆后的压力 P_3 与入射波后压力 P_1 的比值与楔角 θ 的关系(理论估算值)以及爆轰波的 P_3/P_1 实验值.图 5 和图 6 表明,尽管冲击波的压比(P_3/P_0)要远远高于爆轰波的对应值,但冲击波与爆轰波的压比 P_3/P_1 在楔角小于 30° 时却很接近.这说明同一马赫数的冲击波和爆轰波在同一楔角的斜劈上 Mach 反射后, Mach 杆后方压力的增长幅度是很接近的.这是空气冲击波和爆轰波在 Mach 反射时表现一致的另一面.

图 5 和图 6 中楔角大于 30° 后的爆轰波压比 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,与冲击波曲线差异甚大.笔者认为,这主要是实验设备的局限造成的.在爆轰激波管尺寸不变和不同楔角的斜劈留出的气流通道相同的情况下,楔角越大,斜劈越短.对短斜劈来说,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真正 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 杆后的区域比传感器感受压力面的截面积(直径 6 mm)还小.此时就很难保证测量的精度.这一现象是否反映了 CCW 方法用于爆轰波的局限性,目前尚无充分的实验结果加以说明.若能在大尺度的爆轰激波管内做类似的实验,也许可以做出比较有根据的判断.对此有兴趣的读者可参阅文献[2].

图 7 是一典型的爆轰压力时程曲线.该图说明,楔角为 19.3° 时 P_1 和 P_2 的压力很接近,(实际上在实验中这是一个普遍现象,仅 10° 楔角是个例外),但压比 P_3 的值有大幅提高.因为传感器 T_1 在斜劈的前方,测到的是入射爆轰波的压力.而传感器 T_2 虽已在楔面上方,但触发时 Mach 杆尚未到达 T_2 ,测到的不是 Mach 杆后的压力,仍是入射爆轰波的压力,所以两条曲线的峰值十分接近.而 T_3 在 T_2 后面 50 mm 处,它的位置在设计中又作了调整,与斜面很接近,目的就是为了测到 Mach 杆后的压力.对此有兴趣的读者可见文献[5].

2 结论

(1) 当 M_0 保持不变,爆轰波与空气中平面冲击波发生 Mach 反射时,二者的三波点迹线与楔面的夹角随楔角变化趋势是一致的.这说明爆轰波中前导强激波决定了 θ 与 M_0 的关系,有或无化学反应的气体在这一点上表现相同.因此,用来分析冲击波 Mach 反射 θ — M_0 关系的 CCW 方法仍能基本适用于爆轰波 Mach 反射的分析,特别是在楔角小于 30° 的情况下.至于 CCW 方法能在多大范围内适用与爆轰波 Mach 反射的分析,有待进一步的研究.

(2) 当 M_0 保持不变,爆轰波与空气中平面冲击波发生 Mach 反射时,二者的压比(包括入射波后压力与初压之比 P_1/P_0 以及 Mach 杆后压力与初压之比 P_3/P_0)却相差甚远,冲击波的压比约是爆轰波($2H_2 + O_2$)的 1.7 倍.原因是爆轰波前导激波后方存在化学反应区,其

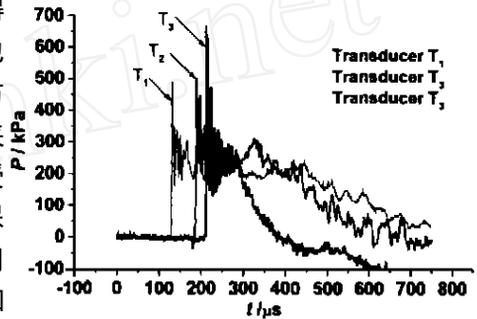


图 7 典型的爆轰压力波时程曲线

($2H_2 + O_2 + Ar$, $\gamma = 1.45$,
 $P_0 = 20 \text{ kPa}$, $\theta = 19.30^\circ$)

Fig. 7 A typical detonation pressure time history curve for transducers $T_1 - T_3$

释放的热量使气体膨胀,压力降低.

(3) Mach 反射时, Mach 杆后的压力 P_3 与入射波波后压力 P_1 的比值 P_3/P_1 反映了 Mach 杆的强度, 该强度由楔角 和入射 Mach 数决定. 实验确定, 冲击波和爆轰波 (P_3/P_1) 的实验值非常接近. 这从另一个侧面反映了空气冲击波和爆轰波在 Mach 反射上的表现一致.

参 考 文 献

- [1] Oran E S. The structure of propagating detonations: lessons from numerical simulations [A]. Proceedings of international minisymposium on gaseous detonation [C], Washington D. C., 1999. 1~5.
- [2] Roza Akbar. Mach reflection of gaseous detonation [D]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, August, 1997.
- [3] Qiang Yu. Experimental and numerical study of unsteady shock and detonation waves [D]. Aachen: Aachen Polytechnic Institute, December, 1996.
- [4] 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.
- [5] 郭长铭, 张德良, 谢巍. 气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射后流场的分析 [J]. 中国科学技术大学学报, 2000, 30(6): 685~692.
- [6] Chester W. The quasi-cylindrical shock tube [J]. Phil. Mag., 1954, 45, 1293~1302.
- [7] 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: 286~297.
- [8] Whitham GB. Linear and non-linear Waves [M]. London: Wiley Interscience, 1974.

The Comparison of the Characteristic Parameters of Flow Fields Behind a Mach Reflected Gaseous Detonation and an Air Shock Wave on a Wedge

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

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

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

Abstract: Using traditional soot print technique, the authors confirmed the existence of Mach reflection of gaseous detonation waves diffracting a wedge and obtained systematic experimental results. Based on these results, the characteristic parameters of flow field behind reflected waves such as the density, shape and size of cells, the peak value of detonation pressure, and the relation between trajectory angle of triple points X and wedge angle and initial pressure P_0 are analyzed in detail. The characteristic parameters of a Mach reflected gaseous detonation are compared with air shock waves, and the causes of the difference are discussed tentatively.

Key words: gaseous detonation; Mach reflection; shock wave