

非定常激波三维双楔面反射的数值研究¹⁾

杨 旻²⁾ 滕宏辉 王 春 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 采用基于 MUSCL-Hancock 插值的有限体积方法, 在非结构自适应网格上求解三维 Euler 方程, 研究了非定常激波在三维垂直双楔面上的反射现象. 研究表明, 由于三维效应的影响, 通过二维非定常激波反射理论预测的三维马赫反射区域范围存在着一定的局限, 在该区域范围内出现了一种非典型的三维突起结构, 即第二类三维马赫干. 另外, 对于不同的激波马赫数和楔面倾角组合, 非定常激波在三维双楔面上会形成具有四波结构的三维马赫反射或具有三波结构的三维规则反射.

关键词 非定常激波, 三维双楔面, 三维马赫干, 数值模拟

中图分类号: O354.5 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2012)02-0205-08

引 言

激波反射是激波动力学中一个重要的基础性问题, 同时也有着较强的应用背景, 例如在超燃冲压发动机进气道设计、超声速气流叶栅绕流, 以及爆炸波传播等方面应用广泛. 关于激波反射问题已经有许多研究工作. Mach^[1] 首先通过实验研究发现了激波反射的两种类型: 规则反射和马赫反射; von Neumann 等^[2] 对激波反射问题进行了深入研究, 提出马赫反射还可以分为更多不同种类的反射结构; Ben-Dor^[3] 对激波楔面反射做出了细致研究, 得出了一系列分析方法和研究结果; Hornung 等^[4] 首先提出定常激波反射中规则反射向马赫反射的转变可能存在迟滞现象; Chpoun 等^[5] 通过实验研究证实了该现象的存在; Takayama 等^[6] 将先进的实验方法应用于激波反射的研究中并取得了成功. 然而, 之前的研究大多集中在二维激波反射问题, 对三维的激波反射现象研究得并不多. 这主要是由于三维激波反射流场结构复杂, 常用的实验测量方法对其内部细微结构难以清楚地显示.

非定常激波在三维双楔面上的反射问题是三维激波反射问题中一个较基本的问题, 其物理模型结构如图 1 所示, 两个楔面的底面垂直相交, 激波在双楔面结构上运动并反射. Meguro 等^[7] 首先对这个问题做出了研究. 该研究表明, 对于一定的激波

马赫数和楔面倾角组合, 激波在双楔面夹角处反射会形成一种向前突起的三维结构, 即三维马赫干. 同时, 该研究给出了三维马赫干的形成条件, 即当激波在两个楔面上分别形成二维的马赫-马赫反射时双楔面夹角处一定会形成三维马赫干; 而当在两个楔面上分别形成规则-规则反射时则一定不形成三维马赫干; 而形成规则-马赫反射时则可能形成三维马赫干. 该形成条件是利用二维激波反射理论推出: 对于激波在两个楔面上分别形成规则-马赫反射的情况, 如图 2(a) 所示, 垂直于侧楔面的马赫干平面可以看做在底楔面上形成二维反射, 在该反射中楔面倾角为 θ_m , 马赫干平面的激波马赫数为 $M_{m'}$. θ_m 和 $M_{m'}$ 可以通过几何关系得到

$$\theta_m = \arctan(\tan \alpha \cos \beta)$$

$$M_{m'} = M_s \cos \chi_\beta / \cos(\chi_\beta + \beta)$$

其中 χ_β 为入射激波面在侧楔面上形成二维马赫反射的三波点轨迹角. 可以看到, 虽然以马赫数 M_s 运动的入射激波在角度为 α 的底楔面上形成二维规则反射, 然而由于 $M_{m'}$ 大于 M_s , 同时 θ_m 小于 α , 因此垂直于侧楔面的马赫干平面在底楔面上的反射有可能是二维马赫反射. 如果该反射是马赫反射, 则三维马赫干就会形成. 同样, 对于激波在两个楔面上分别形成马赫-马赫反射的情况, 如图 2(b) 所示, 也可以由该方法得出是否形成三维马赫干. 本文通

2010-11-30 收到第 1 稿, 2011-08-29 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (90916028) 和中国科学院知识创新工程 (KJ CX2-EW-L05) 资助项目.

2) E-mail: yy@imech.ac.cn

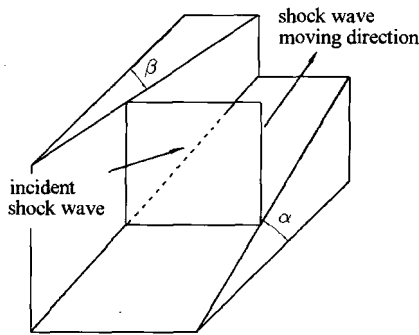
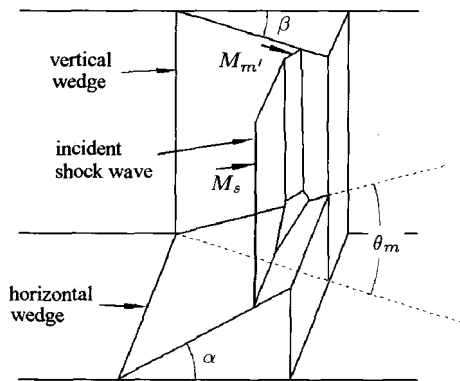


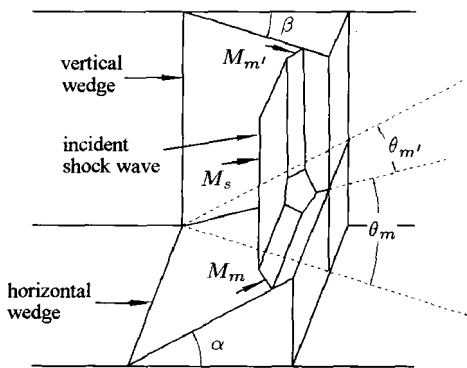
图 1 非定常激波双楔面反射物理模型

Fig.1 The sketch of shock wave reflection over two intersecting wedges



(a) 马赫-规则反射组合

(a) Mach-regular reflection



(b) 马赫-马赫反射组合

(b) Mach-Mach reflection

图 2 三维马赫反射示意图

Fig.2 The sketch of 3-D Mach reflection

过数值模拟，重新检验了该二维近似理论得出的结论，提出了两种不同的三维马赫干构型以及几种激波三维反射结构。

1 控制方程组与数值方法

仅研究非定常激波在三维复杂外形上的反射结构，则流体的黏性、热传导等效应通常可以忽略。在这些假设条件下，运动激波反射现象可以通过求解三维 Euler 方程得到。对于理想气体，直角坐标下的控制方程可以表达为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0$$

其中

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho E + p)u \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho vw \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho E + p)v \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho w^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho E + p)w \end{pmatrix}$$

式中， ρ, p 和 E 分别代表气体密度、压力和单位质量总内能， u, v 和 w 为气体在 x, y 和 z 方向上的速度分量，单位质量总内能表达式为

$$E = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$

利用有限体积方法求解时，控制方程可以转化为控制容积上的积分形式

$$\iiint_{\Omega} \frac{\partial U}{\partial t} dx dy dz + \iint_{\Gamma} (F dy dz + G dx dz + H dx dy) = 0$$

其中， Ω 为控制容积的体积， Γ 为控制容积的边界，控制容积采用非结构网格六面体单元，控制变量固定在单元中心上。本文采用 HLLC 格式构造控制单元边界上的流动通量，单元中心的控制变量采用二阶的 MUSCL 算法及一阶的时间积分进行重构。

非结构网格根据流场密度梯度进行自适应加密，最高加密层数 3 层。网格加密通过阈值函数来控制，当阈值函数大于设定的拆分阈值时，控制单元通过拆分为 8 个子单元进行自适应加密；当阈值函数小于设定的合并阈值时，通过拆分得到的 8 个子单元重新合并为一个单元。阈值函数定义为 [8]

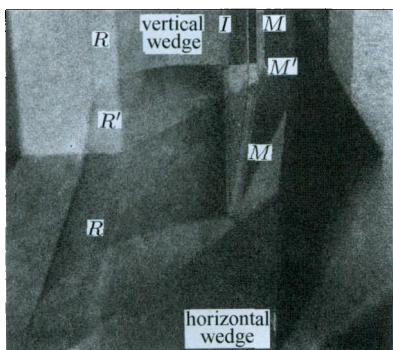
$$\epsilon = \max \left(\frac{|\nabla_i \rho|_c - |\nabla_i \rho|_i}{\alpha_f \rho_c / dl + |\nabla_i \rho|_i}, \frac{|\nabla_i \rho|_c - |\nabla_i \rho|_j}{\alpha_f \rho_c / dl + |\nabla_i \rho|_j} \right)$$

其中, i 和 j 代表两个相邻的控制单元, c 代表两个相邻的控制单元之间的中心边界. ∇_i 和 d_i 代表从单元 i 中心到单元 j 中心的梯度和空间尺度. α_f 为小参数, 避免出现除零.

本文的数值模拟中, 激波前为静止气体, 激波后根据激波关系给定气体参数. 楔面表面、主流外边界、气流进口处和出口处分别给定固壁条件、自由边界条件以及进、出口边界条件. 模型在激波运动的 x 方向上尺度为 60 mm, 在 y 和 z 方向依双楔面倾角不同分别为 45~80 mm.

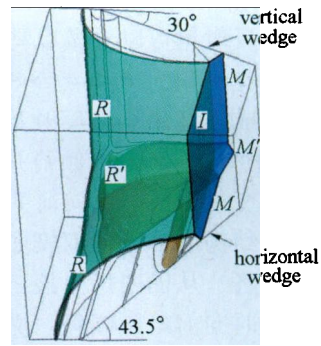
2 数值结果验证

根据文献 [7] 提供的实验结果, 应用同样的初始条件, 本文计算所得的数值结果与实验结果的对比如图 3 所示. 图 3(a) 为两个楔面角度分别是 $\alpha = 43.5^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$, 入射激波马赫数 $M_s = 2.0$ 时激波在三维双楔面反射的实验结果. 从图中可以看到, 入射激波在底楔面上形成了二维的单马赫反射. 由于侧楔面倾角较小, 其上的反射激波强度较弱, 因此该反射激波并不是很清晰. 然而可以肯定的是入射激波在侧楔面上的反射也是马赫反射, 因为侧楔面上也存在有二维的马赫干平面 (M). 在两个楔面夹角处附近的三维区域内, 两个二维马赫干平面相交并向前突起, 形成一个三维马赫干结构. 在三维马赫干后方, 由于入射激波在夹角处的再次反射, 形成了又一道反射激波 (R'). 图 3(b) 为本文的数值结果, 图中包括了各楔面表面和计算域边界面上的密度等值线, 以及 3 个密度等值面. 这 3 个密度等值面可以表示出流场中的各道激波结构. 从该图中可以清楚地看到与实验结果相对应的波系结构: 入射激波 (I)、二维马赫干 (M, M)、反射激波 (R, R)、三维马赫干 (M') 以及夹角处的又一道反射激波 (R').



(a) 实验结果

(a) Experimental result



(b) 数值结果

(b) Numerical result

图 3 $\alpha = 43.5^\circ, \beta = 30^\circ, M_s = 2.0$ 非定常激波双楔面反射实验及数值结果对比

Fig.3 Experimental and numerical results of shock wave reflection over two intersecting wedges for $\alpha = 43.5^\circ, \beta = 30^\circ$ and $M_s = 2.0$

通过以上算例数值结果与实验结果的对比可以看出, 数值与实验结果相互吻合, 数值模拟基本上可以反映该问题的真实物理结构. 利用该数值方法, 对以下另外几个算例进行了计算和结果分析.

3 结果与讨论

3.1 马赫-马赫反射组合

图 4 是各楔面角度分别是 $\alpha = \beta = 20^\circ$, 入射激波马赫数 $M_s = 3.0$ 时激波在三维双楔面上的反射结构. 图中包括了各楔面表面及计算域边界面上的密度等值线和 3 个密度等值面. 3 个密度等值面分别代表入射激波面和两个反射激波面. 可以看出, 入射激波在两个二维楔面上反射分别形成单马赫反射. 利用上述所介绍的二维理论分析方法, 垂直于侧楔面的二维马赫干平面在底楔面上的反射可以看做以马赫数 $M_{m'} = 3.46$ 运动的激波在倾角为 $\theta_m = 18.88^\circ$ 的二维楔面上的反射, 并形成了第 2 道马赫反射及

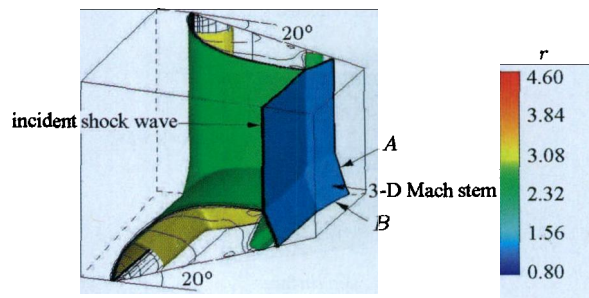


图 4 马赫-马赫反射 ($\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)

Fig.4 Mach-Mach reflection ($\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)

二维马赫干 A ; 同样, 垂直于底楔面的二维马赫干平面在侧楔面上的反射也可以看做以马赫数 $M_m = 3.46$ 运动的激波面在倾角为 $\theta_{m'} = 18.88^\circ$ 的二维楔面上的反射, 也形成第 2 道马赫反射及二维马赫干 B . 由于二维马赫干 A 和 B 向前倾斜并相互作用, 使得在两个楔面相交处形成一个向前突起的三维结构, 即三维马赫干结构. 图 5 为双楔面夹角处三维马赫干的局部放大图, 从图中可见该三维马赫干近似于一个平面, 同时向前略微倾斜, 说明其运动速度大于入射激波面和二维马赫干平面.

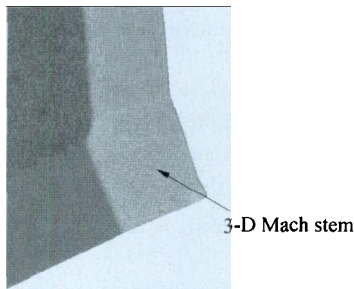


图 5 激波双楔面反射形成的三维马赫干 ($\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.5 The three-dimensional Mach stem for $\alpha = \beta = 20^\circ$ and $M_s = 3.0$

图 6 是从另一个方向观察该三维反射内部结构. 入射激波在远离双楔面夹角处的各楔面上分别形成二维的马赫反射以及第 1 道反射激波面; 在双楔面夹角处附近, 形成了三维的马赫反射和三维马赫干, 以及在三维马赫干后所连接的第 2 道反射激波面. 相比于二维马赫反射的三波结构, 激波在双楔面上的三维马赫反射形成了一种四波结构, 即入射激波、三维马赫干、第 1 道反射激波和第 2 道反射激波. 同时, 形成了一个类似于二维激波马赫反射中滑移线结构的三维滑移面结构. 由于三维马赫干较其他激波面具有更大的速度, 即具有更大的激波强度, 因而在三维马赫干后的第 2 道反射激波面内, 密度、压力以及温度等都相对较大, 而在第 2 道

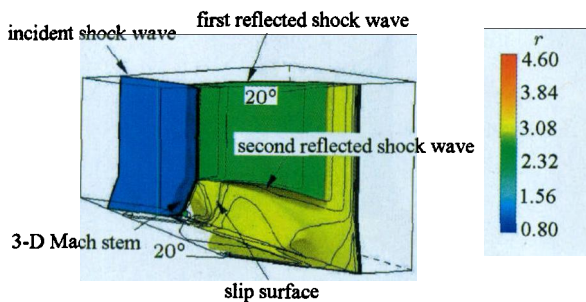


图 6 马赫-马赫反射 ($\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.6 Mach-Mach reflection ($\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)

反射激波面外的区域, 气体各参数值与二维反射情况基本一致. 因此, 入射激波在第 2 道反射激波面内产生复杂的三维反射波系结构, 形成三维反射区; 而在第 2 道反射激波面外是二维反射区, 激波反射仍然遵循二维反射规律.

图 7 是各楔面倾角分别为 $\alpha = \beta = 45^\circ$, 入射激波马赫数 $M_s = 3.0$ 时激波在三维双楔面上的反射结构. 激波在各楔面上分别形成双马赫反射, 在双楔面夹角处形成三维马赫干. 在该反射结构中, 也存在着由入射激波、三维马赫干、第 1 道反射激波和第 2 道反射激波构成的三维马赫反射四波结构. 图 8 是双楔面夹角处三维马赫干的局部放大图. 可以看到, 由于楔面角度的增大, 三维马赫干不再近似于平面结构, 而发生了明显的弯曲变形. 这主要是由于双楔面倾角较大时三维压缩效应在双楔面夹角处引起的壁面前向射流造成的. 文献 [9] 指出, 对于二维非定常激波马赫反射, 在较高的激波马赫数和较大的楔面倾角下, 马赫干后的滑移线与楔面相交时会形成一个局部高压区, 在该高压的驱动下楔面壁面会形成一股向前的射流. 当该射流速度大于马赫干运动速度时, 射流就会追上马赫干并导致其弯曲变形. 在该三维马赫反射中, 虽然激波马赫数并不是很大, 但由于两个楔面倾角较大, 同时楔面相互垂直存在三维压缩效应, 因此在双楔面夹角处同样形成了局部高压区和较强的壁面前向射流. 图 9 是三维马赫反射中双楔面相交线上的压力分布. 图中横轴代表双楔面相交线上的长度在激波运动方向上的投影, 纵轴代表当地压力与波前压力的比值. 实线部分表示的是 $\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$ 的算例. 可以看到, 在三维马赫干后的滑移面与壁面相交处形成了一个较强的压力峰值, 在该高压的驱动下形成一股较强的壁面前向射流, 最终射流追赶上三维马赫干并造

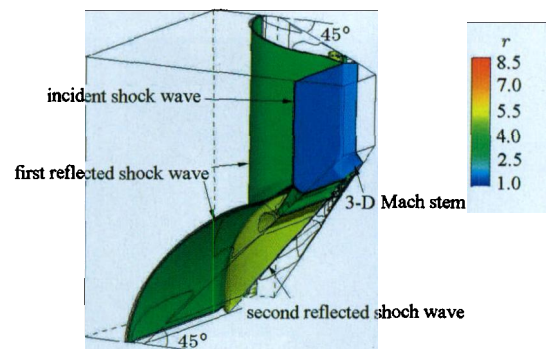


图 7 马赫-马赫反射 ($\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.7 Mach-Mach reflection ($\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)

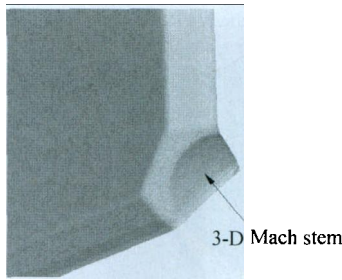


图 8 激波双楔面反射形成的三维马赫干 ($\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)
 Fig.8 The three-dimensional Mach stem for $\alpha = \beta = 45^\circ$
 and $M_s = 3.0$

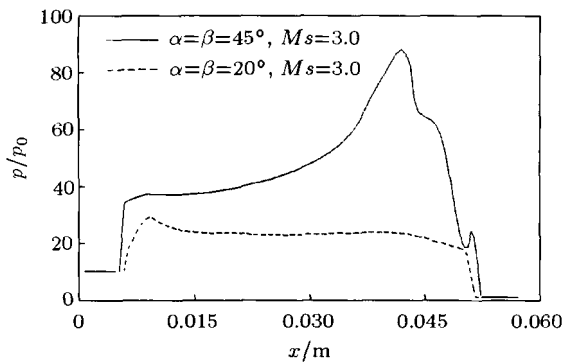


图 9 双楔面相交线上的压力分布 ($\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$ 和
 $\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$)
 Fig.9 The pressure distribution along the intersecting line of
 two wedges for $\alpha = \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$ and
 $\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$

成其向前弯曲变形. 虚线部分表示的是 $\alpha = \beta = 20^\circ, M_s = 3.0$ 的算例. 与实线部分的图形相比, 该三维马赫反射中滑移面与壁面相交处并没有出现明显的压力峰值, 因此形成的射流强度较弱, 如图 5 所示, 并没有引起三维马赫干的明显变形.

3.2 马赫 - 规则反射组合

图 10 为各楔面倾角分别为 $\alpha = 52^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$ 时激波的三维反射结构, 入射激波在各楔面上分别形成规则反射和双马赫反射. 图中包括各楔面表面及计算域边界面上的密度等值线和 3 个密度等值面. 3 个密度等值面分别表示入射激波面、第 1 道反射激波面、第 2 道反射激波面. 应用前述的二维理论分析, 垂直于侧楔面的二维马赫干平面在底楔面上的反射可以看做以马赫数 $M_{m'} = 4.51$ 运动的激波面在倾角为 $\theta_m = 42.15^\circ$ 的二维楔面上的反射, 并形成第 2 道马赫反射和马赫干 A, 如图 11 所示. 同时入射激波在侧楔面表面反射形成马赫干 B. 由于二维马赫干 A 和 B 向前倾斜并相互作用, 因此在双楔面夹角处的三维空间内形成了向前突起

的三维马赫干. 图 11 为该三维马赫干的局部放大图. 相比于以上几种三维马赫干结构, 该三维马赫干显得不很明显, 因为构成它的二维马赫干 A 很短. 这主要是由于垂直于侧楔面的二维马赫干平面在底楔面上的反射并不完全等同于二维情形. 在该近似的二维反射中, 楔面结构具有明显的三维特征, 同时激波后的气流具有横向速度, 因此该反射形成的二维马赫干 A 与同等马赫数和倾角下的二维反射马赫干相比明显偏小.

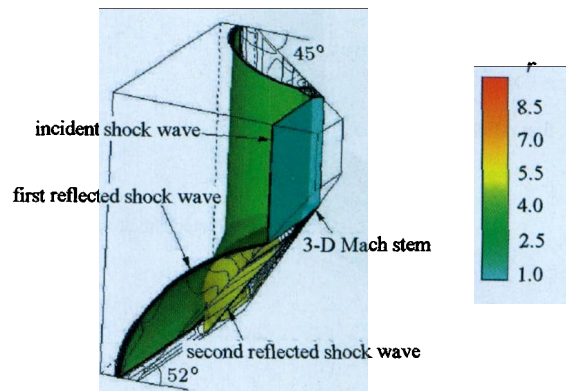


图 10 马赫 - 规则反射 ($\alpha = 52^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)
 Fig.10 Mach-regular reflection ($\alpha = 52^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)

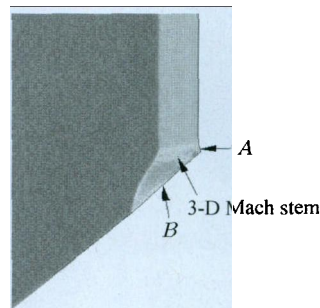


图 11 激波双楔面反射形成的三维马赫干
 ($\alpha = 52^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)

Fig.11 The three-dimensional Mach stem for $\alpha = 52^\circ,$
 $\beta = 45^\circ$ and $M_s = 3.0$

图 12 为当各楔面倾角分别为 $\alpha = 55^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$ 时, 入射激波在各楔面上分别形成规则反射和双马赫反射. 虽然垂直于侧楔面的马赫干平面沿底楔面运动的激波马赫数和楔面倾角分别为 $M_{m'} = 4.51, \theta_m = 45.28^\circ$, 应该形成马赫反射, 但由于三维效应的影响最终形成的却是规则反射. 如图 13 所示, 激波在双楔面夹角处附近反射形成另一种突起结构. 该结构很类似于图 11 中的三维马赫干结构,

但图 11 中典型的三维马赫干结构是由两道向前倾斜的二维马赫干相交构成，而构成该三维马赫干结构的二维马赫干 A 在图 13 中的三维突起结构中已经消失。在该突起结构之后仍然有滑移面及第 2 道反射激波结构，因此该突起结构可以称之为第二类三维马赫干，而前述的典型三维马赫干即第 1 类三维马赫干。

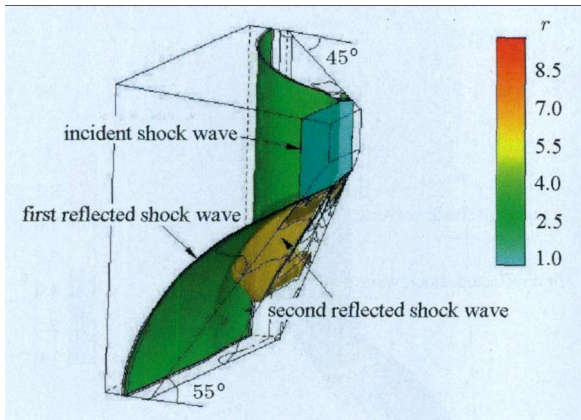


图 12 马赫-规则反射 ($\alpha = 55^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.12 Mach-regular reflection ($\alpha = 55^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)

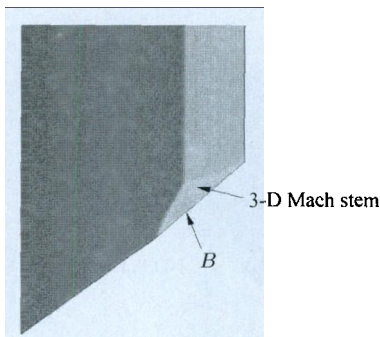


图 13 激波双楔面反射形成的三维马赫干
($\alpha = 55^\circ, \beta = 45^\circ, M_s = 3.0$)

Fig.13 The three-dimensional Mach stem for $\alpha = 55^\circ,$
 $\beta = 45^\circ$ and $M_s = 3.0$

图 14 为当各楔面倾角分别为 $\alpha = 58^\circ, \beta = 10^\circ, M_s = 3.0$ 时，入射激波在各楔面上分别形成规则反射和单马赫反射。图 15 是双楔面夹角处的局部放大图，从中可以看出，垂直于侧楔面的二维马赫干平面在底楔面上形成了规则反射，这是由于 θ_m 较大的原因。因此入射激波在双楔面上反射没有形成上述的任何三维突起结构，形成了具有入射激波和两道反射激波构成的三维激波规则反射的三波结构。

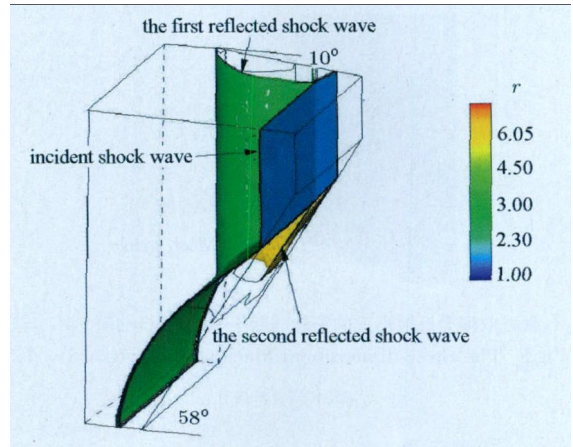


图 14 马赫-规则反射 ($\alpha = 58^\circ, \beta = 10^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.14 Mach-regular reflection ($\alpha = 58^\circ, \beta = 10^\circ, M_s = 3.0$)

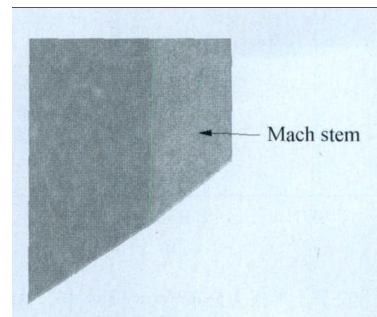


图 15 激波双楔面反射无三维马赫干结构
($\alpha = 58^\circ, \beta = 10^\circ, M_s = 3.0$)

Fig.15 There is no three-dimensional Mach stem for $\alpha = 58^\circ,$
 $\beta = 10^\circ$ and $M_s = 3.0$

3.3 规则-规则反射组合

图 16 为各楔面倾角分别为 $\alpha = \beta = 55^\circ, M_s = 3.0$ 时激波的三维反射结构，入射激波面在各楔面上分别形成了规则反射。在两个楔面夹角处附近，同样没有任何三维突起结构形成，但仍然形成了第 2 道反射激波，这是由于两个二维规则反射

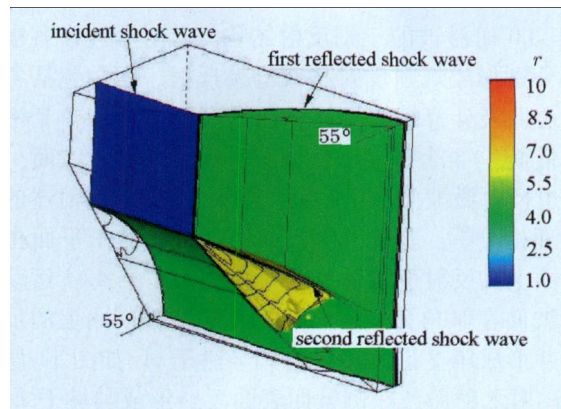
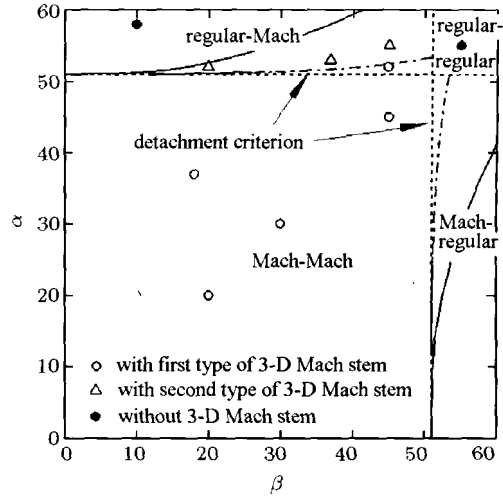


图 16 规则-规则反射 ($\alpha = \beta = 55^\circ, M_s = 3.0$)
Fig.16 Regular-regular reflection ($\alpha = \beta = 55^\circ, M_s = 3.0$)

在双楔面相交处垂直叠加形成的。入射激波面、第 1 道反射激波面和第 2 道反射激波面相交于一点，形成一个具有三波结构的三维规则反射。

3.4 三维马赫反射存在区域

综上所述，类似于二维非定常激波楔面反射，对于不同激波马赫数和双楔面倾角的组合，三维非定常激波双楔面反射同样存在着马赫反射和规则反射。Meguro 等^[7]利用二维激波反射理论方法预测了存在三维马赫反射和三维马赫干的区域。然而，由于二维马赫干平面在底楔面的反射并不能完全等同于非定常激波二维楔面反射，因此由简单二维理论预测的区域范围存在着一定的局限，即在应当形成典型三维马赫干的区域内形成了一种非典型的三维突起结构，即第 2 类三维马赫干。图 17(a) 和图 17(b) 分别为马赫数 $M_s = 1.5$ 和 3.0 时三维马赫干的存在区域，其中横轴为侧楔面角度，纵轴为底楔面角度。两条虚线分别表示入射激波在侧楔面或底楔面上形成马赫反射和规则反射的分界线，该分界线利用二维激波反射的脱体准则 (detachment criterion) 分析得出；点划线表示形成第 1 类及第 2 类三维马赫干的分界线，该分界线是由本文中的数值模拟结果归纳得出；实线表示形成及不形成三维马赫干的分界线，该分界线是由 Meguro 等^[7]通过二维激波反射理论方法分析得出。图中的实心圆、空心圆和空心三角分别代表本文数值模拟中得到的无三维马赫干、第 1 类三维马赫干及第 2 类三维马赫干构型。从图中可以看到，激波在双楔面上分别形成马赫-马赫反射时一定会伴随着第 1 类三维马赫干的出现，而形成规则-规则反射时一定没有三维马赫干出现，而形



(b) $M_s = 3.0$

图 17 三维马赫干的存在区域

Fig.17 The region of three-dimensional Mach stem

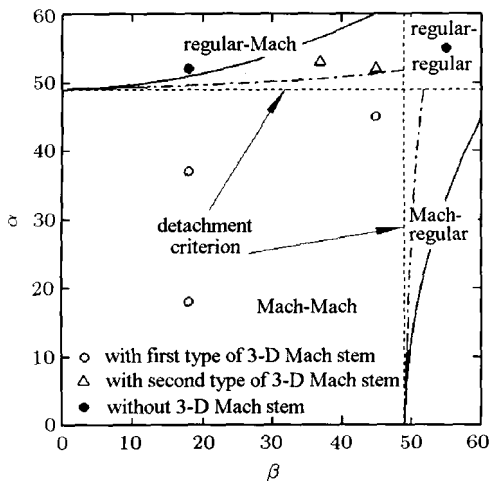
成规则-马赫反射时可能有 3 种情况出现，即形成第 1 类三维马赫干、形成第 2 类三维马赫干或不形成三维马赫干。注意到形成第 1 类和第 2 类三维马赫干的区域分界线随着侧楔面倾角 β 值的增大而向高 α 值的方向弯曲，这是由于对于相同的底楔面倾角 α ，随着侧楔面倾角 β 的增大侧楔面上的马赫干平面在底楔面反射时所对应的倾角 $\theta_m = \arctan(\tan \alpha \cos \beta)$ 则会减小，因此就更趋于形成马赫反射从而形成第 1 类三维马赫干。

4 结 论

(1) 在较大的激波马赫数和楔面倾角下，由于壁面射流的影响三维马赫干会向前弯曲变形，形成不规则的三维曲面结构；

(2) 非定常激波除了在各楔面上反射形成一道二维反射激波面外，在两个楔面夹角处附近反射形成了第 2 道反射激波面。在第 2 道反射激波面外是二维反射区，激波反射仍是二维结构，遵循激波二维反射理论；在第 2 道反射激波面内是三维反射区，形成复杂的三维反射结构；

(3) 非定常激波在两个楔面夹角处反射形成一种四波或三波结构，即当激波在各楔面上分别形成马赫-马赫反射时，在两个楔面夹角处三维空间内形成由入射激波、第 1 道反射激波、三维马赫干及第 2 道反射激波组成的四波结构；当激波在各楔面上分别形成规则-规则反射时，在两个楔面夹角处三维空间形成由入射激波、第 1 道反射激波及第 2 道反射



(a) $M_s = 1.5$

激波组成的三波结构; 当激波在各楔面上分别形成马赫-规则反射时, 在两个楔面夹角处形成上述四波或三波结构;

(4) 在各楔面上分别产生马赫-规则反射的某些倾角组合区域内, 虽然通过二维激波反射理论分析预示三维空间内应该形成三维马赫干, 但实际形成的并不是典型的三维马赫干, 而是另一种类似的三维突起结构, 称之为第 2 类三维马赫干.

参 考 文 献

- 1 Mach E. Über den verlauf von funkenwellen in der ebene und im raume. *Sitzungsber Akad Wiss Wien*, 1878, 78: 819-838
- 2 von Neumann J. Oblique reflection of shocks. *Explos Res Rept. 12*, Navy Dep., Bureau of Ordnance, Washington, DC., 1943
- 3 Ben-Dor Gabi. *Shock Wave Reflection Phenomena*. New York: Int. Springer-Verlag, 1992
- 4 Hornung HG, Oertel H, Sandeman RJ. Transition to Mach reflexion of shock waves in steady and pseudosteady flow with and without relaxation. *J Fluid Mech*, 1979, 90: 541-560
- 5 Chpoun A, Passerel D, Li H, et al. Reconsideration of oblique shock wave reflections in steady flows. Part 1. Experimental investigation. *J Fluid Mech*, 1995, 301: 19-35
- 6 Takayama K. Application of holographic interferometry to shock wave research. *Proc SPIE*, 1983, 398: 174-180
- 7 Meguro T, Takayama K, Onodera O. Three-dimensional shock wave reflection over a corner of two intersecting wedges. *Shock Wave*, 1997, 7: 107-121
- 8 李辉煌. 非定常复杂流动及波系干扰的实验和数值研究. [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005 (Li Huihuang. Experimental and numerical study on unsteady complex flow and wave interaction. [PhD Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005 (in Chinese))
- 9 高云亮. 超高速流动实验模拟方法及基础气动问题研究. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2008 (Gao Yunliang. Study on hypervelocity flow generation techniques and essential hypersonic phenomena. [PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, CAS, 2008 (in Chinese))

(责任编辑: 刘 丽)

NUMERICAL INVESTIGATION ON UNSTEADY SHOCK WAVE REFLECTIONS OVER THREE DIMENSIONAL INTERSECTING WEDGES¹⁾

Yang Yang²⁾ Teng Honghui Wang Chun Jiang Zonglin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract An investigation into unsteady shock wave reflections over three-dimensional intersecting wedges is described. The finite volume method with the MUSCL-Hancock interpretation is used on self-adaptive unstructured meshes. Numerical results demonstrate that three-dimensional Mach reflection region predicted by the relations of two-dimensional oblique shock wave reflection has limitations because of the three-dimensional effect of shock reflections. An atypical three-dimensional structure appears in this region, namely the second type of three-dimensional Mach stem. Besides, for different combinations of shock wave Mach numbers and wedge angles, the three-dimensional four-shock Mach reflections or three-shock regular reflections appear in the corner of the two intersecting wedges.

Key words unsteady shock wave, three-dimensional intersecting wedges, three-dimensional Mach stem, numerical simulation

Received 30 November 2010, revised 29 August 2011.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (90916028) and Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-EW-L05).

2) E-mail: yy@imech.ac.cn