

激波反射现象的研究进展*

杨 旻 姜宗林† 胡宗民

中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190

摘 要 本文依据激波反射研究领域最近十几年的研究热点问题, 回顾了激波反射现象的主要研究成果, 并着重介绍了以下几个方面的最新研究进展: 弱激波的反射结构、运动激波反射的各种反射结构及转变准则、定常激波反射波形结构的分析以及激波反射的迟滞现象等. 考虑到三维激波反射重要的工程应用需求, 本文还介绍了三维激波反射的研究进展与目前存在的问题. 最后, 作者从激波动力学的视点出发, 探讨了激波反射方面未来的学科发展方向和需要深入研究的问题.

关键词 激波反射, 马赫反射, 转变准则, 迟滞现象

1 引 言

激波作为气体动力学最具特色的基本物理现象之一, 是能够在流动气体内部诱导漩涡的唯一基本物理过程, 表现出强间断与非线性的气动物理特性. 激波反射现象是气体动力学中一个重要的研究领域, 在一百多年来的激波物理研究中一直得到了广泛的关注. 早在 19 世纪末, Mach^[1] 通过实验研究首次发现了激波反射的两种不同结构类型: 规则反射和马赫反射. von Neumann^[2-3] 于 20 世纪 40 年代对激波反射现象做出了进一步研究, 自此之后激波反射现象引起了人们的广泛关注并得到了深入研究, 人们逐步认识到在不同条件下, 激波马赫反射还可以呈现出各种不同的反射类型, 产生不同波系结构, 具有不同的物理机制. 随着各种激波反射结构的不断发现, 各种分析理论、实验技术和计算方法不断被提出, 人们对激波反射现象的认识也不断深入并日臻完善^[4].

激波反射问题得到广泛深入的研究不仅因为其本身具有的重要流体物理意义, 更重要的因素是其具有很强的工程应用背景. 激波反射问题广泛存在于超声速飞行器布局及其发动机进气道设计、发动机超声速射流、爆轰波传播以及爆炸波运动过程等工程应用方面. 图 1 是超燃冲压发动

机进气道与隔离段的流动图像^[5], 超声速气流进入进气道后形成的定常激波在上下壁面间不断反射, 形成一系列激波串, 完成了来流压缩过程. 图 2 是发动机喷气实验及其纹影图^[6], 在该超声速射流中形成了斜激波, 斜激波在对称轴反射形成马赫盘以及一系列激波/膨胀波相关的多级反射的菱形结构. 另外, 在预混可燃气体中的激波反射能够形成热点, 有助于爆轰波的起爆和发展. 图 3 是可燃气体中环形激波绕射会聚在不同时刻的压力等值线和温度云图^[7]. 当入射激波在对称轴位置形成马赫反射时, 马赫干后的高温高压区可以点燃可燃气体, 使得爆轰波成功起爆.

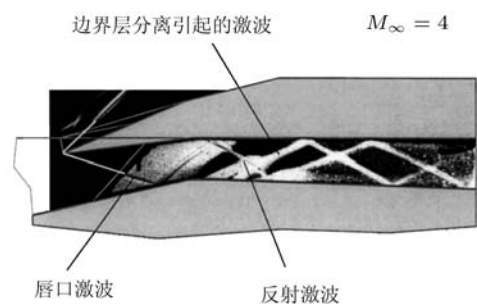


图 1 超燃冲压发动机进气道及隔离段中的激波^[5]

收稿日期: 2011-06-08, 修回日期: 2012-02-06

*国家自然科学基金项目(90916028, 11142006)资助

† E-mail: zljjiang@imech.ac.cn

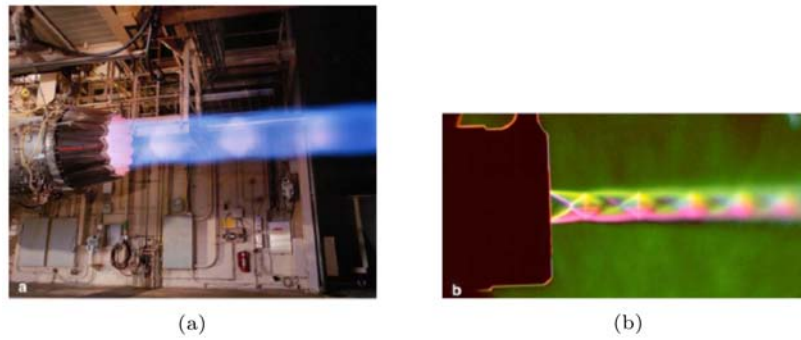


图 2 发动机喷气实验照片 (a) 及纹影图 (b) [6]

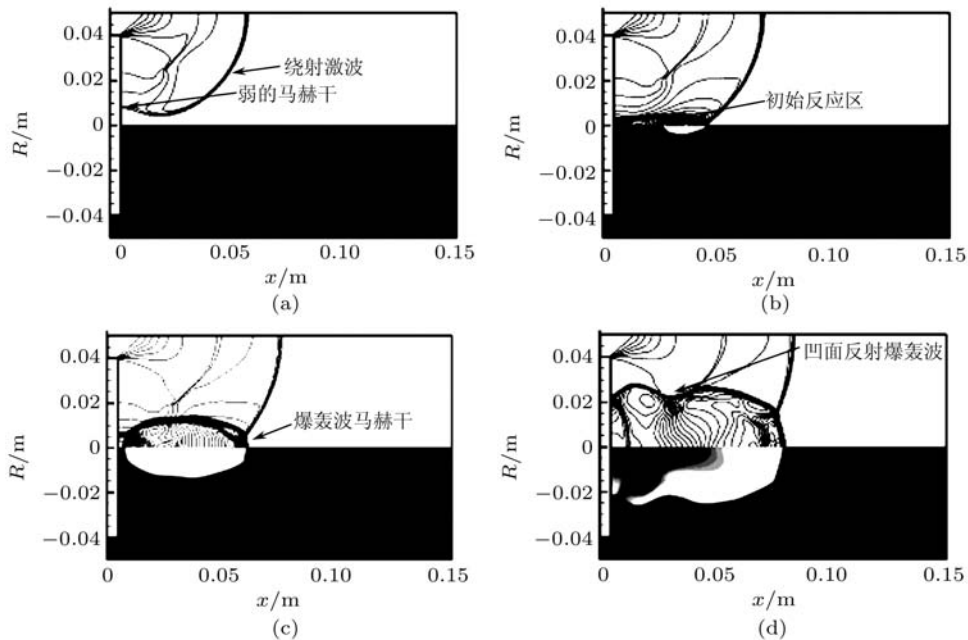


图 3 环形激波产生马赫反射后诱导爆轰波起爆的计算模拟结果 [7]

虽然距离 Mach 首次发现激波反射现象的时代已经一百多年过去了, 但是关于激波反射现象仍然有一些物理问题没有得到完全的理解和解决. Ben-Dor 等 [8] 在 20 世纪 90 年代对激波反射领域的研究进行了综述和总结, 并提出了一系列需要深入研究的问题. 本文基于该文中提出的问题, 并结合目前国内外激波反射领域的主要研究热点, 介绍了最近十几年来激波反射现象的一些研究进展, 并思考和探讨了该领域未来的研究方向.

2 激波反射的经典理论和模型

2.1 激波反射结构的分类

激波反射主要可以分为规则反射 (regular reflection, RR) 和非规则反射 (irregular reflection, IR). 规则反射结构由两个激波组成: 入射激波和反射

激波, 除此之外的激波反射结构统称为非规则反射. 非规则反射又可分为马赫反射 (Mach reflection, MR) 和弱激波反射. 马赫反射由 3 个激波 (入射激波、反射激波以及马赫干) 和一条滑移线组成, 这 4 条间断面共同汇聚于一个三波点. 人们在研究弱激波反射时发现: 对于一些较弱激波的反射, 虽然通过理论分析得出不会形成马赫反射, 然而数值模拟和实验研究中却观察到了类似马赫反射的三波结构 [9-12], 这一现象被称作 von Neumann 疑题. 为了解释这一现象, Colella 等 [13] 提出一种新的激波反射结构, 在这种结构里, 反射激波在三波点附近退化为了一系列压缩波, 被称作 von Neumann 反射 (von Neumann reflection, vNR). 激波的马赫反射还可以分为更多种反射结构类型, 除最简单的单马赫反射 (sing-Mach reflection, SMR) 以外, Smith [14] 和 White [15] 先后分别通过实验

研究发现了过渡马赫反射 (transitional-Mach reflection, TMR) 及双马赫反射 (double-Mach reflection, DMR). Courant 等^[16] 指出根据三波点运动方向与楔面的关系, 马赫反射可以分为以下 3 类: 直接马赫反射 (direct-Mach reflection, DiMR)、固定马赫反射 (stationary-Mach reflection, StMR) 以及反转马赫反射 (inverse-Mach reflection, InMR). Bend-Dor 等^[17] 提出, 既然反转马赫反射的三波点轨迹线方向是朝向反射壁面的, 那么随着激波运动该三波点最终将贴在反射壁面上, 形成一种新的反射结构, 称之为过渡规则反射 (transitioned-regular reflection, TRR). 根据两个三波点轨迹角之间的大小关系, Lee 等^[18] 将双马赫反射分为正双马赫反射 (positive double-Mach reflection, DMR+)、负双马赫反射 (negative double-Mach reflection, DMR-) 以及终结双马赫反射 (terminal double-Mach reflection, TDMR). 图 4 是截止到 20 世纪 90 年代初人们对激波反射结构分类的认识^[4]. 大量实验研究表明: 准定常激波反射可以形成规则反射、von Neumann 反射、单马赫反射、过渡马赫反射以及双马赫反射; 而定常激波反射只能形成规则反射和单马赫反射^[4].

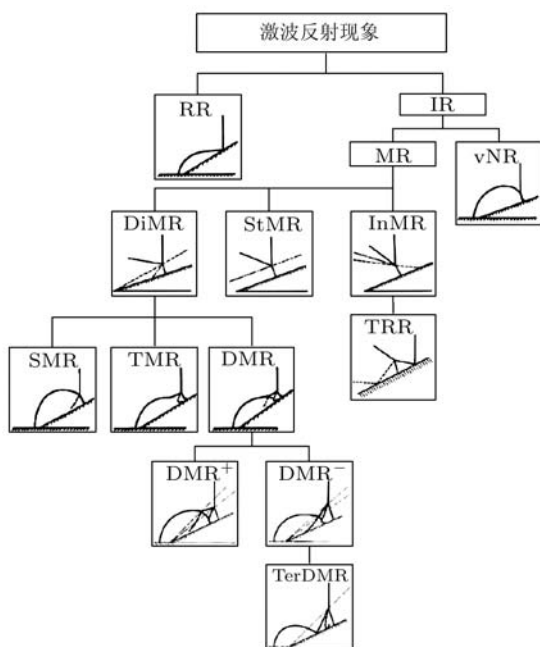


图 4 激波反射结构分类图 (截止到 20 世纪 90 年代初)^[4]

2.2 激波反射的理论分析方法

von Neumann 首先提出了用于分析激波规则反射的双激波理论和用于分析激波马赫反射的三

激波理论^[4]. 如图 5 所示, 该理论假设流场无黏并没有热传导过程, 并且在反射点或三波点附近激波为直线. 通过求解经过各激波的守恒方程组, 并结合相对应的边界条件, 即可得出流场中各变量的表达式.

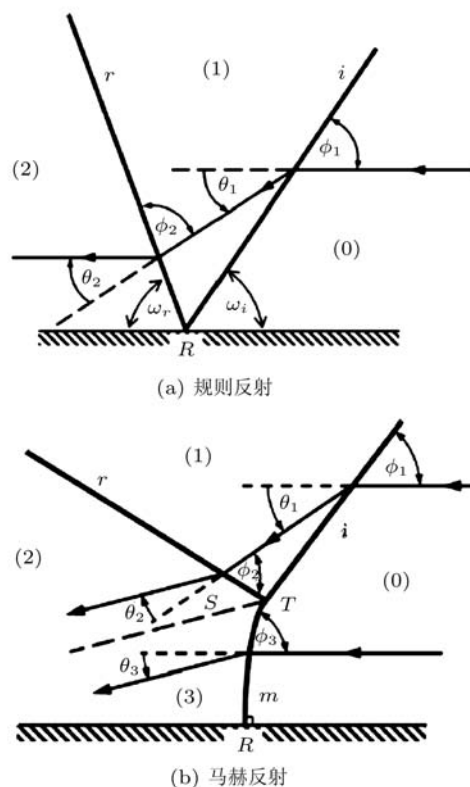


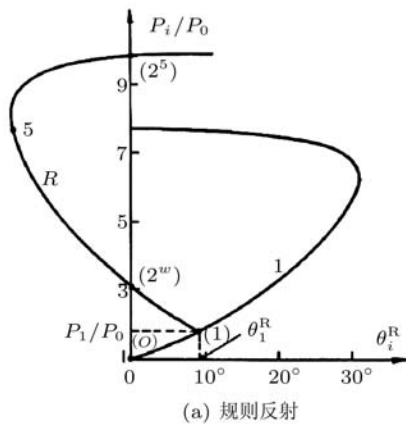
图 5 激波反射的激波关系示意图^[4]

规则反射所对应的边界条件为: $\theta_1 - \theta_2 = 0$, 表示经过两条激波压缩后气流将平行于壁面; 马赫反射所对应的边界条件为: $\theta_1 - \theta_2 = \theta_3$, $p_2 = p_3$, 表示滑移线两边气流速度方向平行, 同时静压相等.

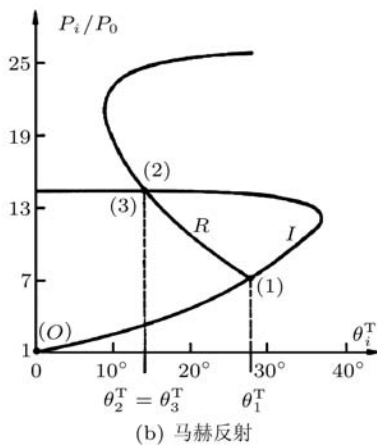
由于限制激波反射求解的边界条件是气流转角和静压, 因此 Kawamura 等^[19] 提出用激波极曲线来表示和分析激波反射过程. 图 6 是利用激波极曲线表示的激波规则反射和马赫反射, 其中横坐标为气流经过激波后的转角, 纵坐标为气流经过激波后的静压, I 和 R 分别代表入射激波和反射激波曲线. 可以看到, 当反射激波曲线与纵轴相交时形成规则反射, 而当反射激波曲线与入射激波曲线相交时形成马赫反射.

过去几十年的研究表明, 利用求解双激波理论和三激波理论方程组可以解决激波反射中的绝

大部分问题, 而利用激波极曲线表示激波反射过程则可以大大简化人们对该问题的分析. 然而, 一些类似于马赫反射的弱激波反射现象却无法用三激波理论分析解释, 而这种现象有着广泛的应用背景, 因此对于这些问题需要建立更符合实际情况的物理模型进行分析和求解.



(a) 规则反射



(b) 马赫反射

图 6 利用激波极曲线图分析激波反射 [4]

2.3 各种反射结构之间的转变准则

对于激波规则反射和非规则反射之间的转变 (RR-IR), 常用的转变准则有脱体准则 (detachment criterion)、声速准则 (sonic criterion) 以及 von Neumann 准则 (von Neumann criterion) [4], 图 7 是这 3 个准则在激波极曲线图上的表示. 其中 R_{iii} 表示脱体准则所对应的反射激波曲线, 它与纵轴相切, 表示可以形成规则反射; 当激波前气流方向与激波的夹角进一步加大时, R_{iii} 将会向右移动并脱离纵轴, 此时将无法形成规则反射. 因此, 脱体准则认为当激波后气流转角达到形成规则反射条件下的理论最大转角时, 规则反射和非规则反射之间发生转变. 声速准则认为当规则反射的反射激波

后气流从超声速变为亚声速时, 激波的规则反射和非规则反射转变发生. 由于激波极曲线上的声速点非常靠近气流最大转角点, 因此对于声速准则和脱体准则常常不加区分, 即图 7 中的 R_{iii} 也代表声速准则所对应的反射激波曲线. von Neumann 准则认为既然规则反射和非规则反射之间转变时并没有形成新的复杂波结构, 那么该转变发生时两种反射激波后的静压应该相同. 图 7 中 R_i 代表 von Neumann 准则所对应的反射激波曲线, R_i 与纵轴以及入射激波曲线共同交于一点, 表示形成规则反射或非规则反射的反射激波后的静压相同, 两种反射间的转变在该点发生. 注意到当 R_i 向左移动时非规则反射将不可能发生, 而当 R_{iii} 向右移动时规则反射不可能出现, 因此 R_i 和 R_{iii} 分别是形成非规则反射和规则反射的理论极限, 而在这两条极限之间即所谓的双解区, 这两种反射结构在理论上都可能发生.

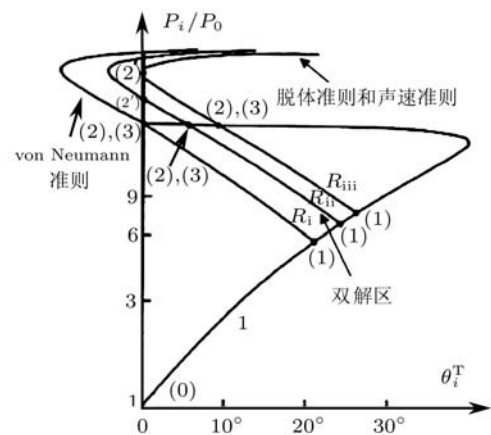


图 7 各种转变准则及双解区在激波极曲线图上的表示 [4]

对于准定常激波非规则反射 (如图 5(b) 所示), 若 1 区的气流相对于三波点的速度矢量与反射激波间的夹角 $\phi_2 > 90^\circ$, 则形成 von Neumann 反射; 若 $\phi_2 < 90^\circ$ 则形成马赫反射 [4]. 对于马赫反射, 当反射激波后的气流相对于三波点的马赫数小于 1 时, 即图 5(b) 中 2 区的气流相对于 T 点的马赫数 $M_2^T < 1$, 形成如图 8(a) 所示的是单马赫反射; 当反射激波后的气流相对于三波点的马赫数大于 1 时, 即 $M_2^T > 1$, 则会在反射激波上形成一个拐点 K, 在该点上游部分反射激波不再弯曲而形成一条直线, 拐点与壁面之间形成一系列压缩波, 该反射结构称作过渡马赫反射, 如图 8(b) 所示. 对于过渡马赫反射, 当反射激波后的气流相对于拐点 K 的

赫数大于 1 时, 即 $M_2^K > 1$, 拐点和壁面之间的压缩波转变为了一道激波, 该反射结构称作双马赫反射, 如图 8(c) 所示.

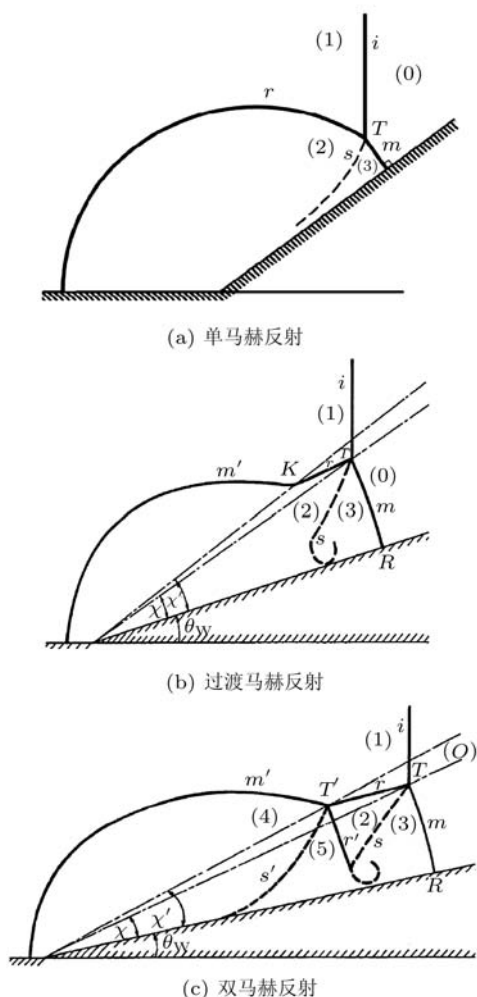


图 8 各种马赫反射结构示意图 [4]

3 激波反射波形结构的研究进展 [4]

3.1 弱激波反射

为解决弱激波反射的 von Neumann 疑题, 人们已经做了大量的研究工作 [20-25]. 较为早期的研究认为黏性是造成理论和实验产生差别的主要原因, 因此通过考虑引入黏性的影响来研究该问题 [20-21]. 然而, 进一步的研究表明虽然气体黏性在实验中确实会造成一定的影响, 但是考虑黏性并没有从理论上彻底解决这个问题. 另一种研究方法是对三激波理论进行一定的修正, 改变滑移线两侧速度和压力相等的限制, 得到了一些与实验相符的结果 [22-25]. 然而这种方法缺乏任何理论

依据的支撑, 并不能对该问题的解决给出令人信服结论.

对该问题研究进展首次形成较大影响的是 Colella 等 [13] 的研究结果. 他们通过数值研究发现反射激波在三波点附近退化为一组压缩波, 如图 9 所示. 他们认为这种反射结构不同于普通的马赫反射, 称之为 von Neumann 反射, 并提出了该反射结构与马赫反射之间的转变准则: 反射激波垂直于滑移线, 即 $\phi_2 = 90^\circ$. 该观点很快引起了人们的注意, 但并没有任何实验结果能证明该反射结构真正存在.

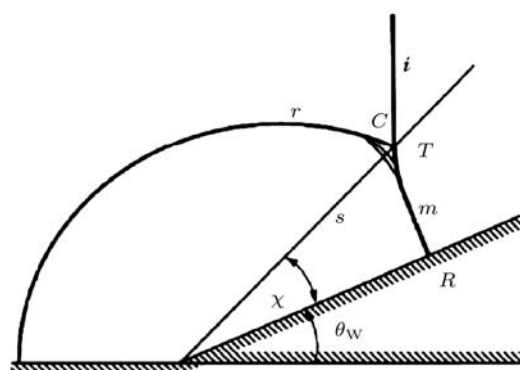


图 9 Colella 等提出的 von Neumann 反射结构 [4]

其实 Guderley [26-27] 早在 20 世纪中叶就提出了一种激波反射结构, 他认为对于弱激波反射在其反射激波后还会形成以三波点为中心的一系列中心膨胀波. 这个观点提出后被忽视了半个多世纪, 直到 Vasilev 等 [28] 通过数值模拟证明这种激波反射结构确实存在. 图 10 为该激波反射结构的计算结果, 可以看到在反射激波后存在有一系列膨胀波, 气流经过膨胀波加速形成一个超声速区. 由于反射激波后存在有一系列膨胀波, 因此不难理解为什么通过三激波理论得出的理论结果与实验结果存在差别. Hunter 等 [29] 通过求解二维无黏 Burgers 方程得出弱激波反射的近似计算结果表明在反射激波后确实存在很小的超声速区, 然而与 Vasilev 等 [28] 的计算结果不同的是他们模拟结果的声速线并不通过三波点, 而是在靠近三波点的某个位置并终止在反射激波上. Zakharian 等 [30] 通过求解 Euler 方程也得出了与 Hunter 等 [29] 相一致的数值模拟结果. Skews 等 [31] 巧妙地设计了一种特殊激波管, 在该激波管中激波反射形成的马赫干比在传统激波管中大一个量级. 利用该激

波管进行实验, Skews 等成功捕捉到了弱激波反射波后的膨胀波和超声速区, 并发现膨胀波后的超声速区的长度尺度只有马赫干高度的 2%. 由此不难理解为什么半个世纪以来, 不论是在实验研究或是数值模拟中这样的膨胀波和超声速区都没有被发现的原因, Skews 等建议将这种激波反射结构命名为 Guderley 反射.

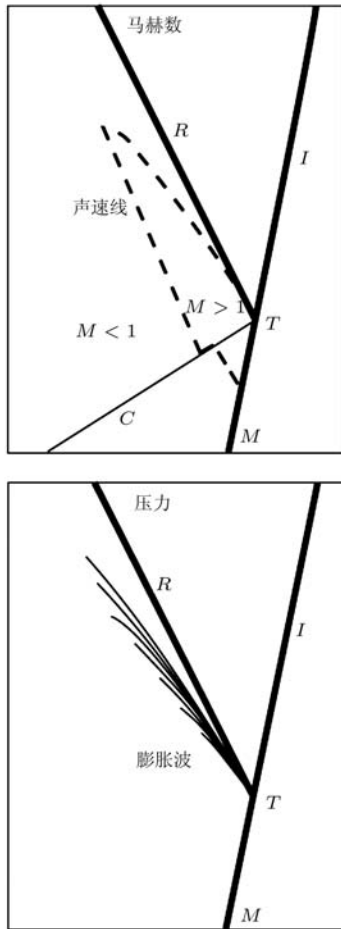


图 10 Vasilev 等计算的 Guderley 反射结构 [28]

Tesdall 等 [32] 通过数值模拟发现, 在弱激波反射波后的超声速区, 都会有一道激波作为终止边界, 并发现在马赫干上还可以形成多个由膨胀波/激波构成的超声速区, 如图 11 所示. Vasilev 等 [33] 认为上述多超声速区的反射结构并不是一个稳定的反射结构, 只是弱激波反射形成自相似反射结构过程中所经历的瞬态结构. Skews 等 [34] 通过实验研究发现了上述多超声速区的弱激波反射结构, 图 12 为该实验获得的纹影图的不同尺度的放大效果图. 图 12 中可以清楚地看到已标示出

的反射激波后的两个超声速区, 由此证实了多超声速区反射结构的存在, 然而该实验结果中并没有显示有滑移线存在. Vasilev 等 [33] 对弱激波反射进行了系统的理论分析, 将弱激波反射分为 3 类: von Neumann 反射、Vasilev 反射和 Guderley 反射. 图 13 是这 3 种反射结构的示意图, 其中白色部分表示超声速区域. 注意到这里的 von Neumann 反射的反射激波在三波点附近仍然是一道激波, 而不是 Colella 等 [13] 提出的退化压缩波. Vasilev 等通过激波极曲线分析了这 3 种弱激波反射结构的形成及相互转变过程, 并提出了它们相互间的转变准则.

反射激波后膨胀波的出现解决了困扰学术界半个多世纪之久的 von Neumann 疑题. 对于弱激

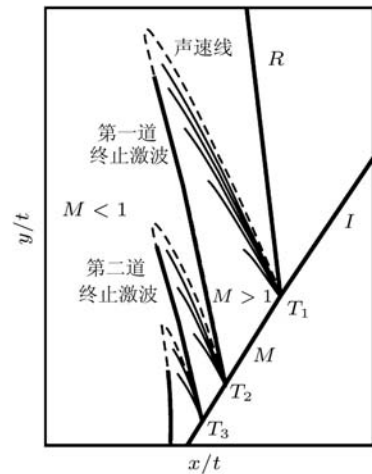


图 11 Tesdall 等的数值结果中的多超声速区 [32]

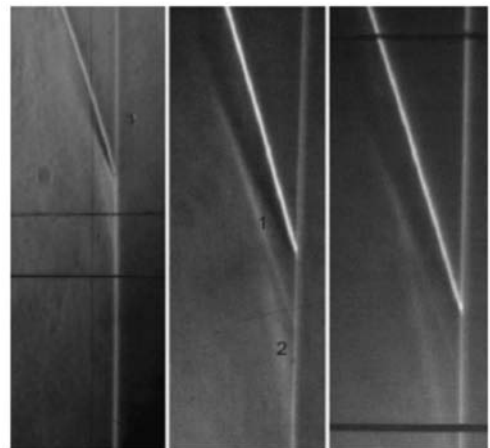


图 12 Skews 等的实验结果中的多超声速区 [34]

波反射问题, 通过应用四波理论 (3 个激波和一系列中心膨胀波) 代替三激波理论, 得出了能够与实验相符的理论分析结果. 然而对该问题的研究远远没有结束, 比如多超声速区是否在自相似反射结构中稳定存在、声速线是否必须终止于三波点等问题仍然存有争议, 都还需要进一步深入的研究探索.

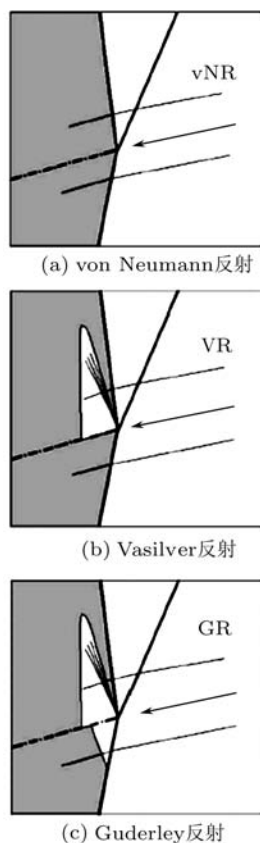


图 13 各种弱激波反射结构示意图 [33]

3.2 运动激波反射的波系结构

运动激波在二维楔面上的反射具有自相似性, 可以通过伽利略变换将其转变为定常激波反射的研究问题, 因此该激波反射结构常被称作准定常激波反射 (pseudo-steady shock reflection) [4]. 过去十几年来, 在准定常激波反射波系结构研究方面取得了很大进展. Li 等 [35] 将准定常激波反射过程假定为入射激波在反射点的反射以及楔面前缘拐角对激波后气流的扰动这两方面相互作用的结果, 据此建立了基于传统三激波理论的过渡马赫反射和双马赫反射的理论解析方法, 得到了与实验相吻合的结果. 同时基于对大量实验结果的分析归纳, 提出了单马赫反射滑移线在壁面附近卷曲与

否的判定准则. Li 等 [36] 又通过激波动力学方法建立了双马赫反射的另一种理论解析模型, 并取得了较为理想的计算结果. 随后, Li 等 [37] 分析了入射激波马赫数较大时双马赫反射马赫干的结构型态, 认为滑移线在壁面附近卷曲后形成的前向射流是造成马赫干弯曲变形的原因 (如图 14 所示), 并基于弯曲马赫干建立了双马赫反射的理论解析模型. Henderson 等 [38] 和 Ben-Dor 等 [39] 对滑移线卷曲后形成的前向射流进行了深入研究, 提出了从无射流情况到有射流情况的转变准则以及两种不同的射流类型, 并分析了射流引起的流动稳定性问题. Vasilev 等 [40] 考虑到马赫反射滑移线卷曲形成的前向射流中黏性效应的影响, 分析并模拟了自相似及非自相似黏性流动两种模型, 发现当 Re 数较小时射流结构是稳定的, 而当 Re 数较大时前向射流形成了在滑移线和反射壁面间振荡的不稳定涡. Morioka 等 [41] 在更高马赫数下的激波反射实验中观察到了弯曲马赫干上拐点的存在, 并研究了拐点和三波点随楔面角度变化的规律, 认为拐点到楔面的高度随楔面角度先增加后减小, 在某一角度上出现极值. 拐点的出现说明了 Li 等 [37] 的理论解析方法在较高马赫数下并不适用 [42]. 高云亮等 [42-43] 研究了真实气体效应对准定常强激波反射三波点轨迹及马赫干突出变形的影响, 分析得出了此条件下马赫干突出变形消失的判别准则, 并讨论了马赫干突出变形消失对波形结构演化的影响.

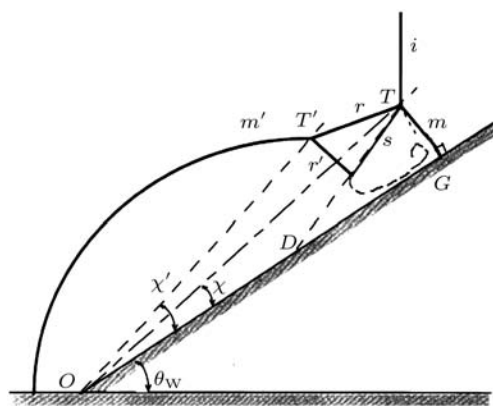


图 14 前向射流导致马赫干弯曲变形 [37]

Semenov 等 [44] 认为: 对准定常激波反射的传统分类仅仅考虑了反射激波构型的变化, 而并没有考虑其他因素的变化. 因此, 他提出了一种新的准定常激波反射的分类方法, 这种分类考虑到

了激波反射中的各间断面的形态变化 (反射激波、马赫干以及滑移线), 图 15 给出 Semenov 等提出的十种准定常激波反射类型. Semenov 等 [45] 对其

所提出的各种激波反射类型做出了实验和数值研究, 并发现对于较强的入射激波反射, 在较长的运动过程中该反射并不具有自相似性.

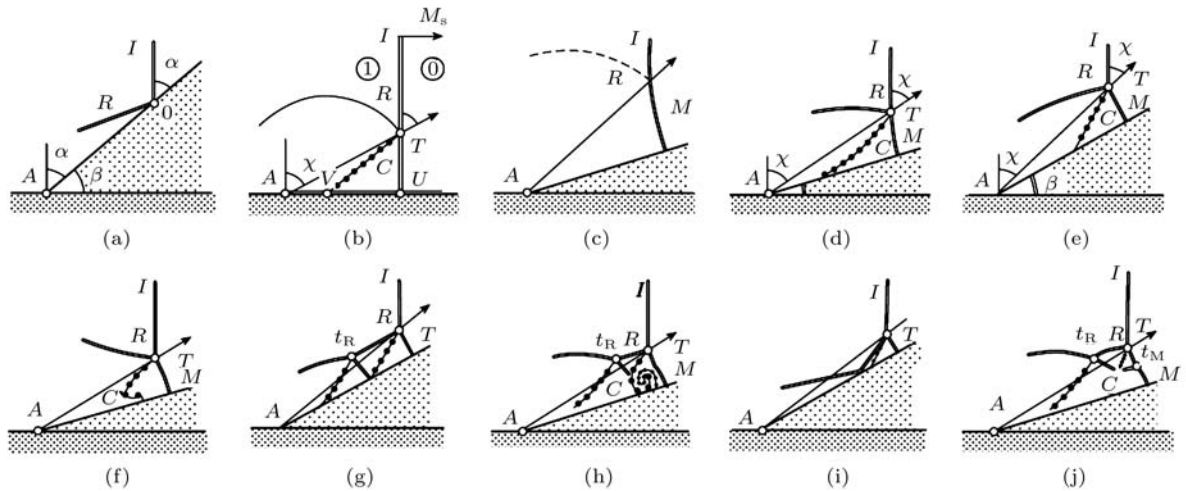


图 15 Semenov 提出的 10 种激波反射结构类型 [44]

Ben-Dor 等 [46] 曾提出: 既然单马赫反射的反射激波后的气流速度达到一定条件后可以形成过渡马赫反射或双马赫反射, 那么在双马赫反射的第二个马赫干后的气流速度达到一定条件后是否会出现另一个拐点或另一个马赫干, 从而形成过渡双马赫反射或三马赫反射? 图 16 是过渡双马赫反射和三马赫反射的理论设想构型图. Li 等 [35] 通过一系列的热力学及气体动力学分析, 得出所谓的过渡双马赫反射和三马赫反射是非物理的, 因此是不可能出现的.

有自相似性; 而对于圆柱-圆锥构型外表面的激波反射 (图 17(d)) 三波点轨迹角在反射刚建立时接近二维楔面反射的情况, 而在反射建立一段时间后又趋近于简单圆锥的反射情况, 因此该反射

运动激波在圆锥面上的反射也会呈现类似的准定常特性和波系结构, 因此在研究过程中常将运动激波的圆锥反射和楔面反射一起进行分析和比较. 早期的研究表明, 对于圆锥马赫反射, 将会形成具有直三波点轨迹线的自相似马赫反射 [47-48]. Han 等 [49] 通过激波动力学方法分析了运动激波在圆锥外表面和内表面的反射构型, 发现对于激波在圆锥外表面的反射, 三波点轨迹线是直线, 因此该反射具有自相似性; 而对于激波在圆锥内表面的反射则存在有一个转变点, 在该点之前三波点轨迹线是直线并具有自相似性, 而在该点之后三波点轨迹线是一条弯向对称线的曲线, 不再具有自相似性. Milton 等 [50] 分析了各种激波圆锥反射构型 (如图 17 所示), 发现对于简单圆锥外表面的激波反射 (图 17(c)), 三波点轨迹线是直线, 因此具

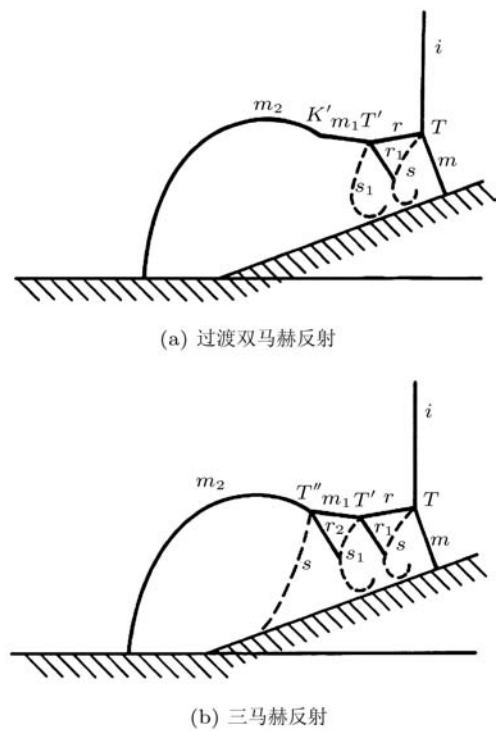


图 16 两种设想的激波反射结构 [4]

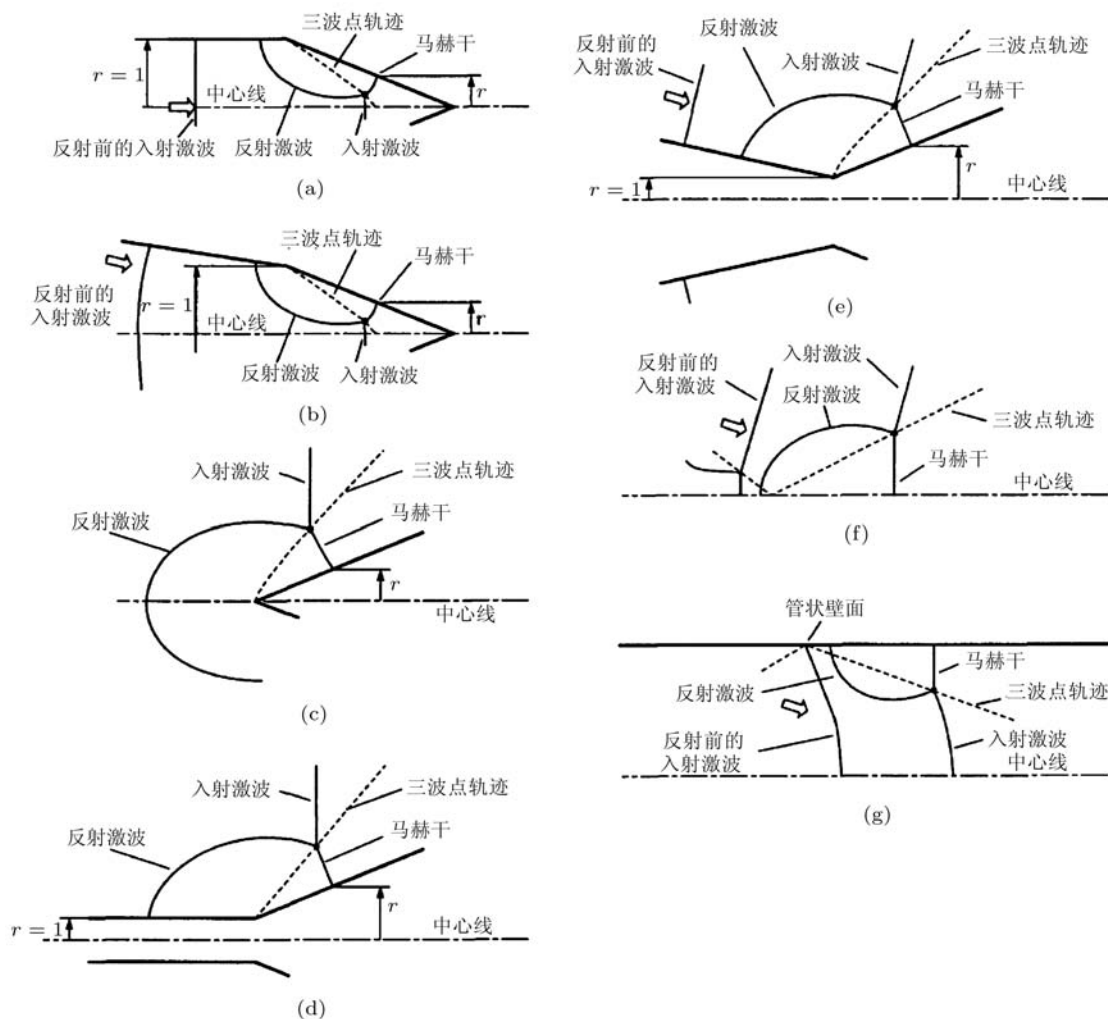


图 17 各种运动激波圆锥反射 [50]

并不具有自相似性. Yang 等 [51] 对不同马赫数和圆锥半锥角下激波反射构型开展了实验研究, 发现对于圆锥反射马赫干的运动速度总小于二维楔面反射, 因此其三波点轨迹角也较二维情况偏小. Milton 等 [52] 对各种激波圆锥反射进行了实验和数值研究, 其研究表明: 对于圆锥内表面的激波反射, 实验和数值结果与其之前的理论分析结果相吻合; 而对于圆锥外表面的激波反射, 实验和数值结果与相关的理论分析结果却差别较大.

3.3 定常激波反射的波形结构

Ben-Dor 等 [8] 曾指出: 对于定常激波反射, 如何能确定马赫干高度将是一个需要解决的问题. 对于如图 18 所示的一定来流马赫数和楔面倾角, 马赫干存在有多个可能的理论高度值, 而这些结果都符合传统的三激波理论. Azevedo 等 [53-54] 首先对这个问题建立了如图 19(a) 表示的理论模

型, 该模型将滑移线和反射壁面间的流动看做准一维的等熵收缩喷管流动, 并假定滑移线为直线且喷管中声速喉道发生在膨胀波的第一道马赫波 (RBE) 与滑移线相交的位置 (EK), 再通过应用三激波理论和该等熵流动的守恒关系即可得出马赫干的高度. Schotz 等 [55] 改进了 Azevedo 等的理论模型, 在该模型中加入了下游流场对马赫干高度的影响, 得出了改进后的解析方法. 相对于前两种模型, Li 等 [56] 提出了更为合理的模型, 波系结构如图 19(b) 所示. 他们认为 Azevedo 等的模型的最大缺陷在于强制假定声速喉道发生在第一道马赫波与滑移线相交处, 而在 Li 等的模型中去掉了该假设, 并同时认为马赫干、反射激波和滑移线都是曲线且曲率很小, 但该模型忽略了透射膨胀波和滑移线的相互作用. Mouton 等 [57] 考虑了规则-马赫反射转变过程中马赫干高度与三波点运动速度的关系, 得出了在该转变过程中马赫干高度随

时间的变化规律. 同时, 他们假定马赫干、反射激波、滑移线和膨胀波始终为直线结构, 通过建立并求解一系列几何关系及守恒关系得出了马赫干高度, 图 19(c) 给出了波系结构. 虽然在该模型中各间断面都被假设为直线结构, 但计算结果表明由该模型得出的结果比之前的模型都更为接近于实验或数值模拟结果. 然而高波后继的研究 [58] 指出, 当马赫干高度值较大时, 该模型给出的理论值也将会严重偏高. Gao 等 [59] 通过数值模拟研究发现反射激波后三波点附近流场具有明显的非均匀性, 因此滑移线上表面会形成一系列膨胀波. 由此他们建立了更为复杂的理论分析模型, 其中包括各激波、膨胀波以及滑移线之间的相互作用. 研究结果显示该模型不仅得出了比其他模型更为准

确的马赫干高度值, 同时也很好地预测了反射激波和滑移线的位置与形状.

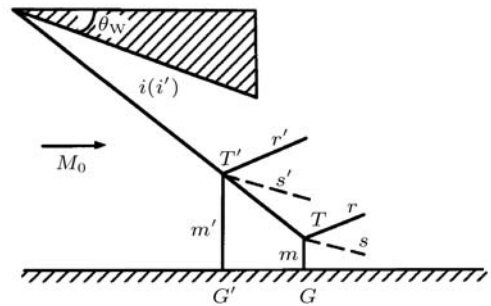


图 18 两个可能的马赫干理论高度 [56]

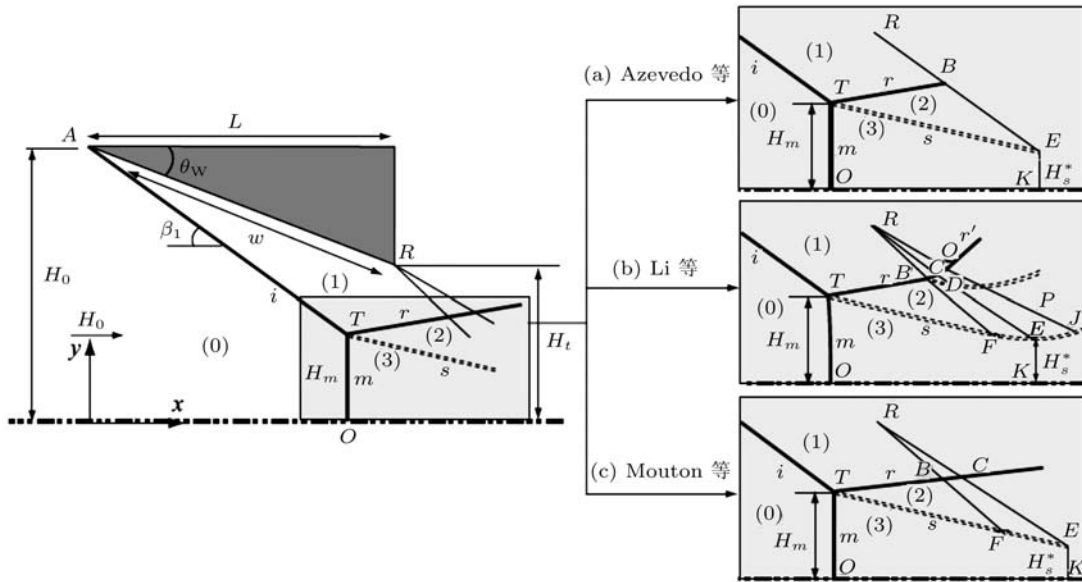


图 19 各种定常激波反射结构模型 [59]

对于定常激波反射中马赫干的形状, Tan 等 [60] 进行了理论研究. 他们在马赫干后的亚声速流场应用小扰动势流方程, 并结合几何条件, 推导出马赫干的形状表达式. 他们的结果表明, 马赫干的形状是一段圆弧, 且其底部垂直于壁面. Chpoun 等 [61] 考虑下游流场对马赫干高度和形状的影响开展了实验研究, 其实验结果显示马赫干的高度和形状并不依赖于楔尾附近气流的膨胀过程. Ben-Dor 等 [62] 对下游流场的影响开展了理论分析和数值研究, 发现下游流场对前方马赫干的影响与楔尾分离区的压力 p_w 和形成喉道的马赫波与反射激波相交处的压力 p_c 之间的大小关系有关: 若 $p_w < p_c$, 则下游流场对马赫干没有影响; 若

$p_w > p_c$, 则马赫干的高度会随着 p_w 的增大而增大. 当 p_w 进一步增大时, 下游流场会形成更为复杂的波系结构, 同时形成了之前在定常激波反射中从未发现的反转马赫反射结构. Burtschell 等 [63] 通过数值模拟研究了在热化学非平衡条件下高来流马赫数定常激波反射结构, 发现加入热化学非平衡效应后, 马赫干的高度较加入前有非常明显的降低. Li 等 [64] 通过理论分析和实验研究探讨了两个非对称楔面间的定常激波反射问题, 发现了两道入射激波相互作用后形成的各种激波反射结构组合. 同时, 也发现了在非定常激波反射中才会形成的反转马赫反射结构, 但此反转马赫反射结构只能是两个非对称激波反射结构之一, 另外一

个反射结构则必须是直接马赫反射. 从物理上讲, 这种“反转-直接组合”马赫反射结构稳定存在的条件是: 两条滑移线构成一个缩放流管结构, 以便实现马赫干下游亚声速区与全局超声速区的流动匹配. Hu 等 [65] 通过数值模拟高超声速双楔面流动, 发现在特定的几何条件下, 一个双反转组合马赫反射结构也可以稳定存在. 谭廉华 [66] 对定常激波轴对称反射结构和马赫干形状进行了理论分析和数值模拟, 并进一步分析了各种不同的轴对称几何结构对该反射的影响.

4 各种反射结构之间转变准则的研究进展

4.1 运动激波反射结构之间的转变准则

Li 等 [35] 和 Ben-Dor [67] 对准定常激波反射结构之间的转变准则开展了深入的研究, 他们认为对于准定常激波反射, 当楔面前缘拐角产生的扰动能够到达入射激波在壁面上的反射点时, 规则反射将转变为马赫反射. 因此, 他们认为声速准则, 即反射激波后的气流速度相对于反射点达到声速 ($M_2^R = 1$), 是准定常激波反射规则-马赫反射的转变准则. 他们提出了一种新的反射结构: 准

过渡马赫反射 (pseudo-transitional-Mach reflection, PTMR), 这种反射结构在三波点后的一部分反射激波也是直线, 但与普通过渡马赫反射不同的是, 这种反射结构的反射激波不会出现曲率方面的变化, 因此在反射激波上并没有明显的拐点. 在之前的实验研究中, 这种激波反射结构被误认为是单马赫反射, 因此理论分析得出的各种反射结构的分布范围与实验结果存在较大的差别. Li 等和 Ben-Dor 认为, 对于反射激波后气流相对于三波点的马赫数大于 1 的情况 ($M_2^T > 1$), 当入射激波后的气流在实验室坐标系下的马赫数小于 1 时, 即 $M_1^L < 1$ 时, 准过渡马赫反射将会形成; 而当 $M_1^L > 1$ 时, 过渡马赫反射或双马赫反射将会形成. 之前的研究认为, 当反射激波后的气流相对于拐点的马赫数小于 1 时 (即 $M_2^K < 1$) 则形成过渡马赫反射. Li 等和 Ben-Dor 通过分析发现, $M_2^K < 1$ 的情况是非物理的. 因此, 他们认为当过渡马赫反射形成时, $M_2^K = 1$ 在反射激波后处处成立; 而当该气流相对于拐点的速度大于 1 时, 即 $M_2^{T'} > 1$ 时, 该拐点 K 转变为一个新的三波点 T' , 双马赫反射形成. 图 20 为经过 Li 等和 Ben-Dor 的改进后准定常激波反射各种反射结构之间转变准则.

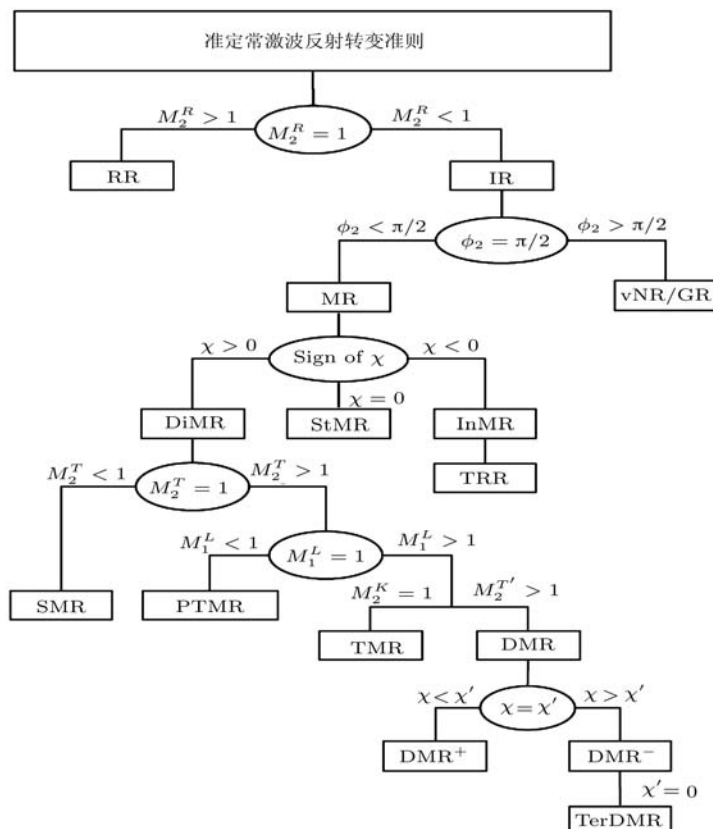


图 20 准定常激波反射各种反射结构间的转变准则 [67]

图 21 为改进后的各种反射结构分布范围的理论分析与实验结果的对照, 其中 B 区为新提出的准过渡马赫反射.

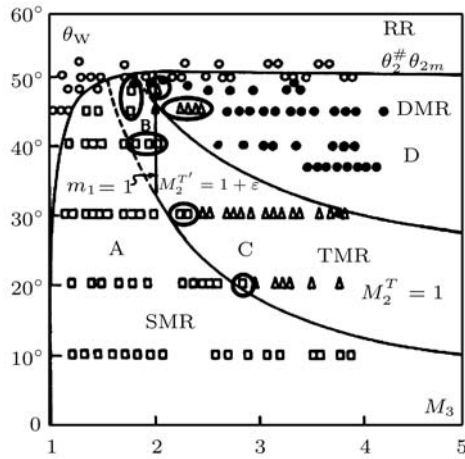


图 21 准定常激波反射各种反射结构的分布范围 [67]

Vasilev 等 [33] 对准定常弱激波反射的几种反射结构之间的转变准则做出了深入的研究, 发现当传统的三激波理论存在有非标准形式的解时, 若此解是物理的, 则会形成 von Neumann 反射; 若此解是非物理的, 则形成的是 Vasilev 反射. 而当传统的三激波理论没有任何解时, 形成的是 Guderyley 反射. 图 22 为弱激波反射几种反射结构之间的转变准则, 图 22 中的 VR 现被称为 Vasilev 反射, 而 M_2 和 M_3 分别表示反射激波后和马赫干后的气流相对于三波点的马赫数. 图 23 为弱激波反射各种反射结构分布范围的理论分析结果.

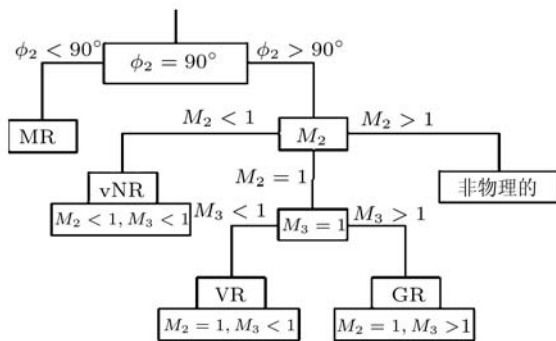


图 22 准定常弱激波反射各种反射结构的转变准则 [33]

对于运动激波在圆锥外表面的反射, Yang 等 [51] 通过实验研究发现, von Neumann 反射-马赫反射的转变角度要比激波二维楔面反射大 5° 左

右, 而马赫反射-规则反射的转变角度则比激波二维楔面反射小 1° 到 2°.

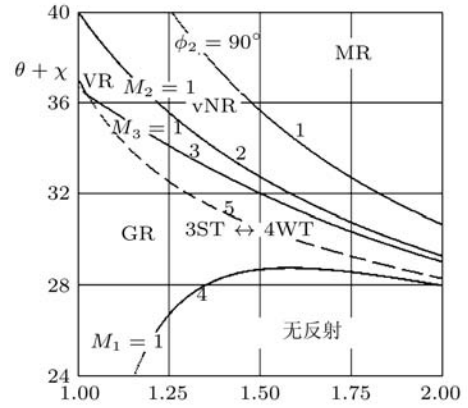


图 23 准定常弱激波反射各种反射结构的分布范围 [33]

4.2 激波反射的迟滞现象

对于激波规则-马赫反射之间的相互转变, von Neumann 提出了脱体准则和压力平衡准则 (又称 von Neumann 准则 [4]). 图 24 为定常激波反射类型随来流马赫数及楔面倾角的形成区域, 其中 $\theta_w^D(M)$ 表示脱体准则, 而 $\theta_w^N(M)$ 表示 von Neumann 准则. 当 $\theta > \theta_w^D(M)$ 时, 只可能出现马赫反射; 而当 $\theta < \theta_w^N(M)$ 时, 只可能出现规则反射; 当 $\theta_w^N(M) < \theta < \theta_w^D(M)$ 时, 规则及马赫反射理论上都有可能出现, 即形成所谓的双解区. Hornung 等 [68] 首先提出了规则-马赫反射相互转变时会发生迟滞现象, 认为当楔角逐渐增大时规则反射向马赫反射的转变会发生在 $\theta_w^D(M)$; 而当楔角逐渐减小时, 马赫反射向规则反射的转变会发生在 $\theta_w^N(M)$. 然而, Hornung 等 [69] 在随后的实验中发现规则-马赫反射间的相互转变都发生在 $\theta_w^N(M)$, 而预测中的迟滞现象并没有出现. 他们将此现象归结为风洞实验中存在的流场扰动的影响, 并认为该迟滞现象是“无法证实的”. 但是在十几年后, 迟滞现象几乎同时在 Ivanov 等 [70] 的数值模拟及 Chpoun 等 [71] 的实验研究中得到了证实. Chpoun 等 [71] 通过实验发现, 规则反射向马赫反射转变发生在激波角 37.2°, 比脱体准则小 2°; 而马赫反射向规则反射的转变则发生在激波角 30.9°, 与 von Neumann 准则相符. 图 25 为 Chpoun 等的实验结果, 在实验过程中楔角先逐渐减小 (从 (a) 到 (c)), 后又逐渐增大 ((c) 到 (e)). 可以看到 (b) 和 (d) 图中虽然楔角大小相同, 却分别形成了马赫反射

和规则反射. 随后的许多数值结果也都证实了迟滞现象的存在 [72-75], 并与 Hornung 等 [68] 的预测基

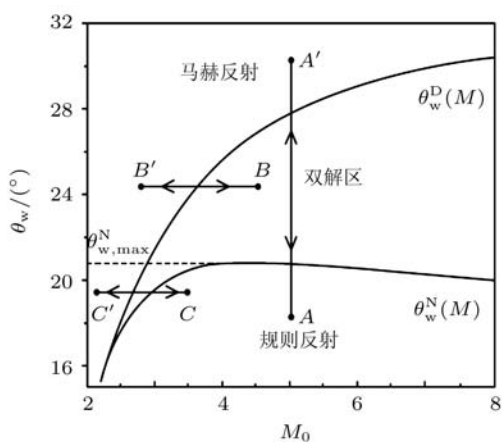


图 24 双解区示意图 [4]

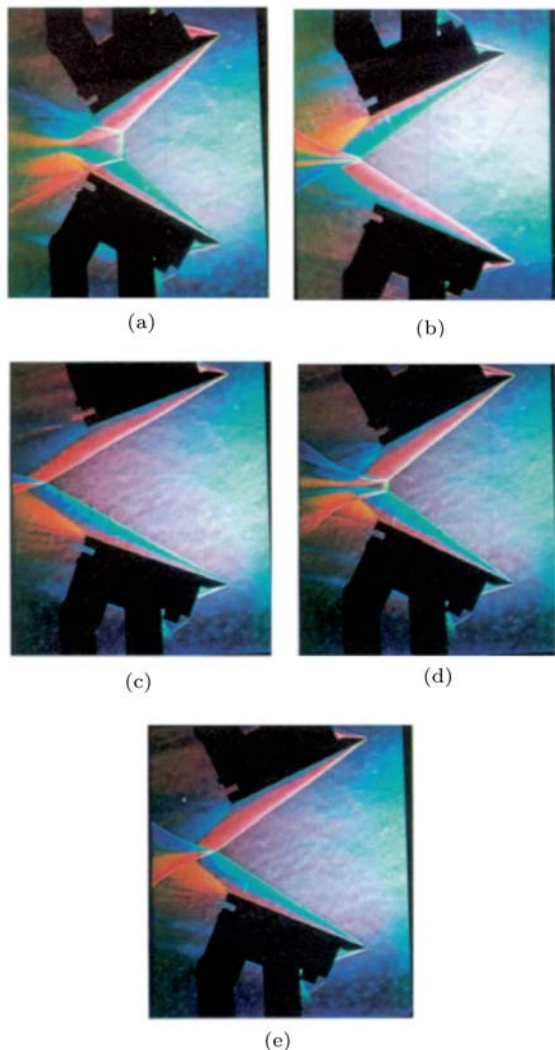


图 25 Chpoun 等的实验结果 [71]: (a) MR, $\beta = 42^\circ$; (b) MR, $\beta = 34.5^\circ$; (c) RR, $\beta = 29.5^\circ$; (d) RR, $\beta = 34.5^\circ$; (e) MR, $\beta = 37.5^\circ$

本吻合. Fomin 等 [76] 和 Ivanov 等 [77] 在封闭试验段风洞以及自由射流风洞中对该问题进行了实验研究, 发现在封闭试验段风洞实验中几乎没有迟滞现象存在, 而在自由射流风洞中存在有 $3^\circ \sim 4^\circ$ 的迟滞回路. Sudani 等 [78] 通过实验研究发现在封闭试验段风洞实验中也会出现大约几度范围的迟滞回路.

值得注意的是: 对于数值研究而言, 比较容易发现与 Hornung 等 [68] 预测相吻合的迟滞现象; 而对于风洞实验而言 [69,71,76-78], 不论采用哪一种风洞, 虽然也可能发现迟滞现象, 但实验结果总是与 Hornung 等 [68] 的预测存在较大的差别, 即规则反射向马赫反射转变的角度明显低于 $\theta_w^D(M)$. 对于风洞实验结果出现的这一问题, 现阶段人们公认有两个方面的影响: 即风洞中气流的扰动和实验中的三维效应.

关于风洞中气流扰动的影响, Ivanov 等 [79] 通过在数值模拟中反射点附近增加自由来流扰动的方法研究了规则反射和马赫反射的稳定性, 发现在双解区马赫反射比规则反射更加稳定. Li 等 [80] 运用最小熵增原理分析了规则及马赫反射的稳定性, 发现在双解区的绝大部分区域, 规则及马赫反射都是稳定的, 提出当流场完全无扰动时规则反射到马赫反射的转变将会在很靠近脱体准则 $\theta_w^D(M)$ 的位置发生, 而当流场中存在扰动时该转变可能在双解区任何位置发生, 这取决于流场的不稳定效应及下游流场的影响. Hornung [81] 通过对规则及马赫反射的激波极曲线的分析得出了类似的观点. Sudani 等 [82] 通过数值模拟验证了 Hornung 的观点, 并研究了改变反射点下游反射壁面角度对两种激波反射结构间相互转变的影响. Ivanov 等 [77] 提出在双解区规则及马赫反射结构相对于小扰动而言都是稳定的, 而对振幅超过一定阈值的较大扰动而言规则反射则变得不稳定, 且该阈值的大小是随着楔角改变而变化的. 因此在具有气流扰动的风洞实验中, 规则反射向马赫反射转变的位置取决于该扰动的大小. 随后, 为了证实该观点, Ivanov 等 [83] 在低噪声风洞中进行了实验, 发现了与 Hornung 等 [68] 的理论预测基本一致的迟滞现象. Kudryavtsev 等 [84] 通过在数值模拟中添加激波、膨胀波以及接触间断等多种扰动的方式研究扰动对反射结构转变的影响, 发现在一定的扰动下规则及马赫反射之间可以相互转变, 并提出风洞实验中在双解区之所以更容易形成马赫反射不仅是由于马赫反射更为稳定, 还

因为马赫反射向规则反射转变所需要的扰动范围更大. Sudani 等 [85] 通过向风洞中加水的方法增加气流扰动, 发现加水后规则反射在 von Neumann 准则附近就转变为了马赫反射, 而不加水时可以观察到明显的迟滞现象, 由此通过实验证明了气流扰动对于规则-马赫反射转变的影响. Yan 等 [86] 通过在实验流场中添加激光能量的方法研究了扰动的作用, 发现通过该方法并不能实现马赫反射向规则反射的转变. Khotyanovsky 等 [87] 通过数值模拟进行了类似的研究, 发现能量的添加可以促使规则反射转变为马赫反射, 而相反方向的转变则无法实现.

以上对气流扰动作用的研究解释了风洞实验中难以观察到完整迟滞现象的原因, 同时也表明风洞中对迟滞现象的实验还会受到三维效应的影响. Skews [88] 对风洞实验的三维效应对激波反射结构间转变的影响进行了深入分析, 认为在规则反射向马赫反射转变过程中会在楔面的两个边缘处形成三维效应引起的马赫反射, 该马赫反射将会促使楔面中部二维区域的规则反射在 von Neumann 准则下转变为规则反射. Skews 同时给出了规则反射实验中可以避免三维效应影响的最小的楔面展长/入口比 (inlet aspect ratio), 并认为马赫反射实验中处处都具有三维效应影响. 随后, Skews [89] 通过风洞实验研究了三维情况下激波反射结构不同与二维反射的现象, 并提出对于明显的二维反射, 即使受到很小程度的三维效应影响, 其转变和迟滞特性都会与理论预测产生很大的差别. Ivanov 等 [90] 通过实验和数值模拟研究了三维效应对规则-马赫反射转变的影响, 发现了在不同情况下几种不同的三维反射构型: 楔面边缘的马赫反射、楔面展向高度不均匀的马赫干以及楔面展向的马赫-规则-边缘马赫反射构型. Brown 等 [91] 对不同展弦比的楔面进行了实验研究, 得出了三维效应影响随楔面展弦比的变化规律.

迄今为止, 人们通过实验研究和数值模拟不仅观察到了最初由 Hornung 等 [68] 预言的对称楔面间激波定常反射的迟滞现象, 还发现了多种其他的迟滞现象, 包括: 非对称楔面间激波定常反射的迟滞现象 [64,92-93]、改变来流马赫数引起的迟滞现象 [94-95]、轴对称圆锥激波反射的迟滞现象 [96-97]、改变下游流场压力引起的迟滞现象 [62,98] 以及改变两楔面间距离所引起的迟滞现象 [85]. Li 等 [64] 通过理论分析指出对于非对称楔面间的激波定常反射同样会形成双解区, 而在双解区同样

也会形成类似对称楔面间激波定常反射的迟滞现象, 并通过实验研究证实了该现象的存在. Ivanov 等 [92] 通过数值模拟得出了与 Li 等 [64] 相同的结论. Hu 等 [93] 通过理论分析提出了非对称楔面间激波反射的最大转角准则, 认为此情况下规则反射向马赫反射的转变将发生在声速准则和最大转角准则之间, 并通过数值模拟对该理论进行了验证. Ivanov 等 [94] 通过数值模拟研究了来流马赫数变化对激波反射结构之间转变的影响 (图 24 中 $B \leftrightarrow B', C \leftrightarrow C'$), 发现改变马赫数也可以观察到迟滞现象. 图 26 是 Ivanov 等的数值模拟结果, 可以看到: 虽然子图 2 和图 6, 图 3 和图 5 中的来流马赫数相同, 但是由于马赫数变化的方向不同而在相同马赫数下得到了不同的激波反射结构. Durand 等 [95] 通过实验对该问题进行了研究, 然而并没有在实验中发现改变来流马赫数引起的迟滞现象, 他们将该原因归结为风洞实验中气流扰动的影响. 然而在数值模拟中, Durand 等得到了与 Ivanov 等 [94] 相一致的结果. Ben-Dor 等 [96-97] 对轴对称圆锥激波反射开展了数值和实验研究. 在这种激波反射中, 反射过程不会受到风洞实验三维效应的影响. 他们的研究发现, 当改变圆锥位置或来流马赫数时, 圆锥激波反射也会形成类似定常斜激波平面反射的迟滞现象. Ben-Dor 等 [62,98] 又通过数值模拟发现, 当下游压力很高时会影响激波反射结构间的转变并引起迟滞现象.

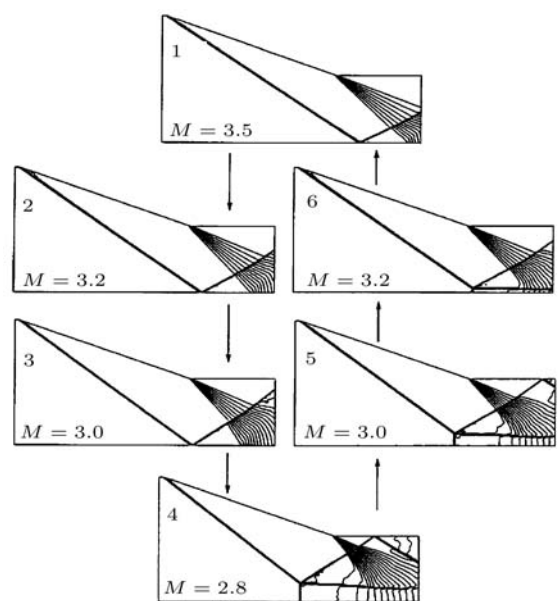


图 26 改变来流马赫数引起的迟滞现象 [94]

图 27 是 Ben-Dor 等的数值结果, 其中 p_w 表示下游楔尾分离区的压力, p_0 表示来流压力. 当无量纲下游压力 p_w/p_0 增大到 18 至 20 之间时, 规则反射转变为马赫反射; 而当 p_w/p_0 减小到 10 至 12 之间时, 马赫反射转变为规则反射. Sudani 等^[85] 通

过风洞实验发现, 改变两个对称楔面之间的距离也会影响到规则-马赫反射间的转变, 当减小或增大两个楔面间距离时, 激波反射结构在双解区将会保持为规则反射或马赫反射, 由此形成一种新的迟滞现象.

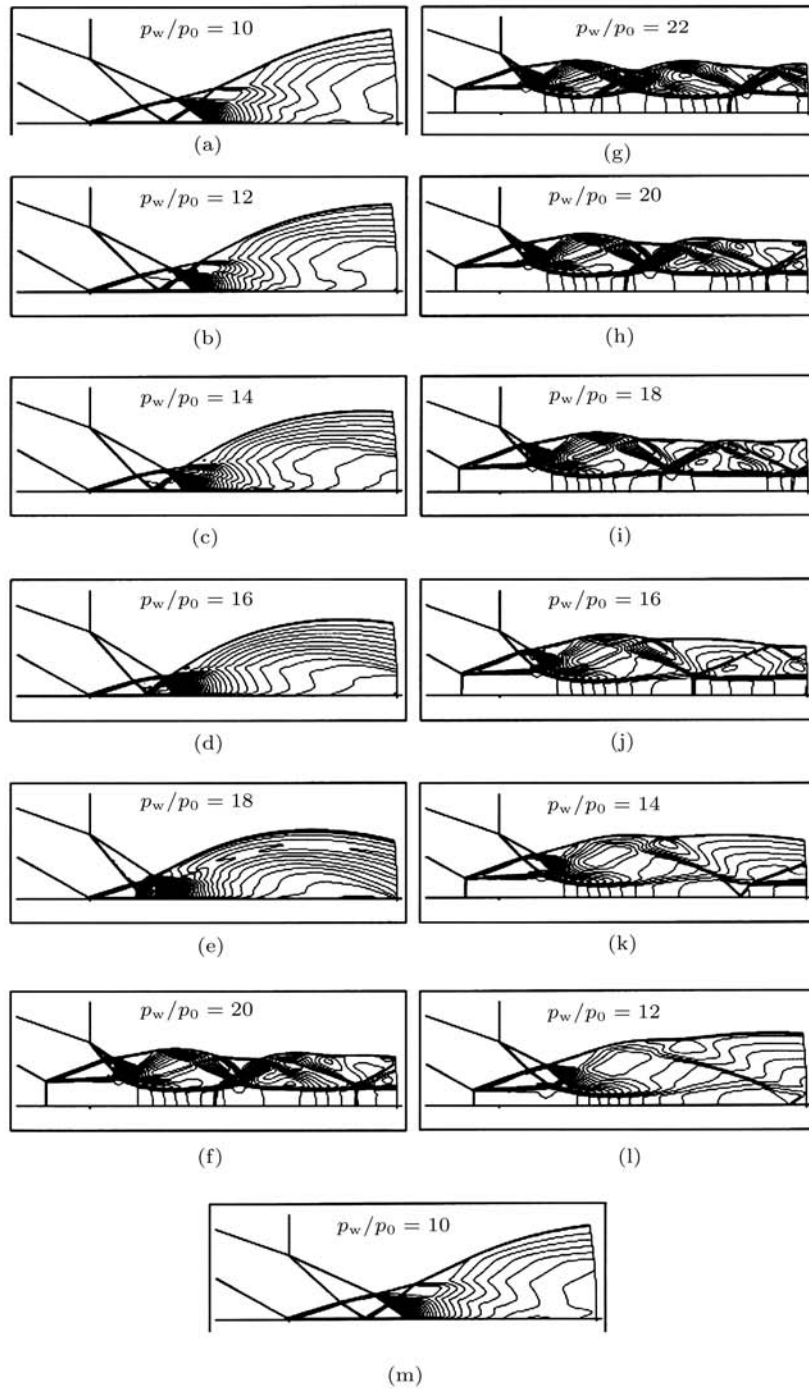


图 27 改变下游压力引起的迟滞现象^[98]

5 三维激波反射的研究进展

最近十几年来,人们对二维激波反射问题进行了深入的研究并形成了系统的理论认识.但是相对于二维激波问题,关于三维激波反射的研究进展并不是很多^[99]. Skews^[88-89]和 Ivanov等^[90]对定常激波反射风洞实验中形成的三维激波结构进行了研究,但这些研究都是针对风洞实验的三维效应对二维反射影响的探讨,而并非着眼于研究三维激波的反射结构及其物理规律.比较重要的进展是 Meguro等^[100]通过实验和数值模拟研究的运动激波面在三维垂直双楔面上的反射结构.他们的研究结果显示,对于某些激波马赫数和楔面倾角的组合,入射激波在双楔面夹角处会反射能够形成三维马赫干. Meguro等通过二维激波反射理论对该问题进行了简化分析并得出了三维马赫干的存在范围. Goonko等^[101-102]通过理论分析和数值模拟研究了三维双楔面上超声速流动形成的定常激波结构,其研究结果表明定常斜激波面在该结构对称面反射可以形成类似二维准定常激波反射的多种反射结构,即规则反射、单马赫反射、过渡马赫反射及双马赫反射等,并通过分析给出了规则-马赫反射的分界线. Zambelli等^[103]通过实验和数值模拟研究了运动激波在具有凹陷结构的三维楔面上的反射,得出了几种复杂的三维激波反射结构并分析了其形成过程. Numata等^[99]通过激波管实验研究了运动激波在横向楔角不等的三维楔面的反射,实验结果清晰地显示出了该三维反射结构:入射激波在楔角较大处形成了规则反射,而在楔角较小处形成了马赫反射,规则及马赫反射在同一个楔面上同时存在. Numata等利用二维激波理论并结合三维效应的影响,分析了该楔面上激波三维反射结构的形成过程和机理.

在三维激波反射方面, Jiang等^[104]通过数值模拟研究了运动激波面在三维变截面方腔中的绕射和反射.在探讨激波在方腔夹角处的反射现象时,首次提出了三维激波马赫反射的四波结构,即入射激波、马赫干、第1道及第2道反射激波.图28是他们的一个数值模拟结果,其中包含了两个密度等值面和对角面上的密度等值线.从图28中可以看到在方腔的4个夹角处,都形成了上述的三维马赫反射四波结构以及三维接触面结构. Jiang等认为,该四波结构的形成主要是由于激波在夹角处两个壁面分别反射并使得两边反射激波相互

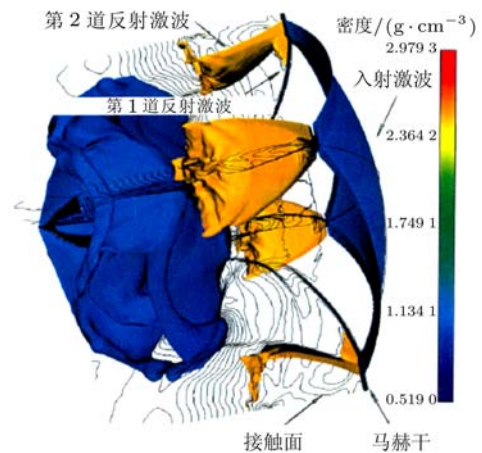


图 28 运动激波在三维变截面方腔中的绕射和反射^[104]

作用而形成的,同时,他们还观察到不同时刻三维规则反射向三维马赫反射转变的物理过程. Yang等^[105]在 Meguro等^[100]的基础上,对三维激波双楔面反射做出了更为深入的研究,阐述了该流场中形成的三维激波马赫反射的四波结构和三维激波规则反射的三波结构,如图29所示. Yang等认为 Meguro等对该三维反射构型的二维简化并不尽合理,提出该反射中不仅会出现典型的三维马赫干,还可能形成另一种非典型的三维突起结构,即第二类三维马赫干.同时,给出了不同激波马赫数下各三维马赫干构型的出现范围.在三维双楔面定常流动激波结构方面,杨旻等^[106]也做出了理论分析和数值研究.三维双楔面定常流动问题具有很强的应用背景,是高超声速飞行器中经常遇到的典型问题,尤其对于三面压缩高超声速进气道,该三维流动中的过渡马赫反射和双马赫反射三维激波结构将会造成很大的高总压降低区,严重影响进气道的气动性能.在这方面的研究,之前的一些学者大多采用实验或数值模拟方法, Goonko等^[101]的研究虽然分析得出了规则-马赫反射转变界限,但并没有给出各种马赫反射的形成范围,也没有解释在该定常三维流动中形成多种马赫反射的原因.杨旻等通过理论分析指出,从本质上来说,该三维定常激波相互作用可以在某个特征方向上转变为二维运动激波反射,由此解释了在该三维空间内出现过渡马赫及双马赫反射结构的原因.同时,利用已有的二维运动激波楔面反射结果便可分析得出该三维空间内激波结构.图30是三维空间内形成的各种激波结构随来流马赫数和楔面倾角的分布范围,其中曲线是理论分析结果,各图标表示数值验证结果.可以看到,

数值和理论结果吻合良好. 此外, 杨旻等还对双楔面间夹角非垂角、楔面带有前缘后掠角等情况做出了研究, 得到了一系列与数值模拟相一致的理论分析结果.

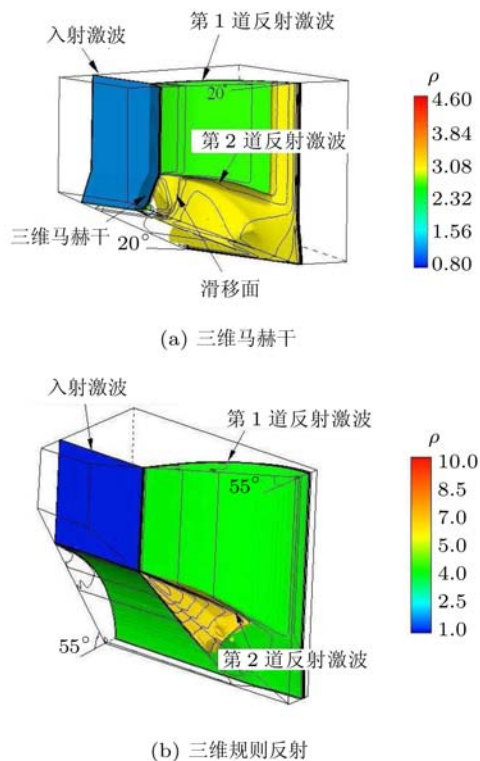


图 29 三维双楔面运动激波反射 [105]

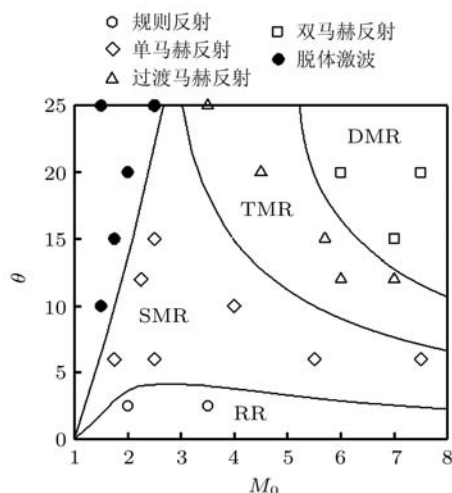


图 30 三维垂直双楔面定常流动激波结构分布范围 [106]

6 存在的问题及其展望

最近十几年来, 人们对激波反射问题展开了广泛关注与深入研究, 取得了显著的进展; 特别是

对几个基础研究热点方面进行了更加深入的探讨, 并取得了重大突破. 这些研究进展使得人们对激波反射问题的理解和认识更加系统和全面, 然而尽管如此, 由于激波反射问题的复杂性, 在该方面还需要开展进一步的深入研究.

在弱激波反射方面: 三波点后的多超声速区是否真正稳定存在仍没有定论. 尽管该结构已在激波管实验中得到证明, 但是仍然有理由怀疑该实验结果仅仅只是一个暂态现象. 一般来说, 三波点后的超声速区只有马赫干长度的 2% 左右. 在如此小的范围内长时间捕捉多超声速区等流场细节是一个极具挑战的实验工作, 需要更为先进的实验技术、实验方法和实验设备. 同时, 在理论分析方面仍然有一些问题需要解决: 如果多超声速区流场结构真正稳定存在, 其出现的物理机制及其出现与否的判定准则是什么? 如果只是暂态现象, 那么它们在长时间流动中其最终消失的原因何在? 此外, 目前弱激波反射的研究主要集中在运动激波, 定常弱激波反射是否具有类似的流场结构及转变准则, 也是今后值得研究探讨的问题.

对于定常激波反射的波形结构, 许多学者给出了各自的理论分析模型. 由于该流场中涉及多种波的相互作用 (激波、膨胀波、滑移线、膨胀波反射后形成的压缩波等), 流场结构十分复杂, 因此各模型都有所不同程度的简化, 计算结果也具有不同的近似性. 虽然经过不断努力, 理论分析结果向实验结果不断逼近, 但至今仍有一定的误差, 所以建立更为完善的理论模型进行分析研究, 是未来的研究方向之一.

对于激波反射的迟滞现象: 由于较强应用背景的驱动, 人们只关注于定常激波反射. 但作为完整激波理论的一部分, 运动激波反射是否存在迟滞现象仍然需要研究. 在目前发表的论文中并没有相关的结果报道. 该问题研究的主要难点大概有如下两方面: 一方面是激波运动非常快, 有效实验时间非常短, 在这样短的时间内记录激波反射的变化过程十分困难, 需要巧妙的实验技术; 另一方面, 数值模拟中研究定常激波反射迟滞现象时采用多套不同楔角的网格重复代入计算过程的方法并不适用于运动激波反射, 否则将改变入射激波的构型. 因此, 对于该问题的研究需要发展更加先进的实验设备和计算模拟方法.

对于三维激波反射现象: 在工程应用中, 绝大部分的激波反射构型都具有明显的三维特性, 因此三维激波的反射现象是一个最重要的研究方向.

然而, 由于三维激波反射现象的复杂性, 目前在这方面的研究还并不够深入, 很多机理并不清楚. 尤其在理论分析方面, 很多研究结果都是基于不尽合理的二维简化, 丢失了三维流场的一些特有信息, 往往理论分析结果与实际物理问题具有较大差别. 值得强调的是三维激波反射并不遵循 von Neumann 的三激波或双激波理论, 如何发展三维激波反射的理论分析方法、并通过实验和数值模拟深入研究三维激波反射现象, 必将成为未来激波反射领域研究的重要方向之一.

另外, 关系高超声速飞行器气动布局和气动热问题的激波主导的超高速复杂流动, 是激波反射问题重要的应用背景之一. 对于这样的高超声速流动, 激波现象的出现常伴随着明显的黏性流动特性, 例如, 激波/边界层相互干扰; 同时, 激波诱导的高温气体效应的影响也会逐渐明显, 在这样复杂流动中激波反射一定具有与理想气体流动的不同现象与特性. 所以, 高超声速流动中的激波反射问题研究将是未来值得深入探讨的新研究领域.

激波反射是一个传统的研究课题, 人们对它的研究和不断认识已经持续了一百余年. 迄今为止, 关于激波反射现象的研究已经形成了一个比较完整的理论体系. 但是, 持续发展的工程需求不断扩展了激波反射研究的范畴, 拓展了研究内涵. 那么, 如何在经典理论的基础上进一步发展激波反射理论, 去认识新的激波反射物理规律, 解决更为复杂工程实际问题, 对于相关研究人员依然是任重道远.

参 考 文 献

- Mach E. Uber den Verlauf von Funkenwellen in der Ebene und im Raume. *Sitzungsbr Akad Wiss Wien*, 1878, 78: 819-838
- von Neumann J. Oblique reflection of shocks. *Explos Res Rep 12*, Navy Dept Bureau of ordinance, Washington DC, USA, 1943
- von Neumann J. Refraction, intersection and reflection of shock waves. *NAWORD Rep 203-45*, Navy Dept Bureau of ordinance, Washington DC, USA, 1943
- Ben-Dor G. *Shock Wave Reflection Phenomena*. 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag Press, 2007
- Goonko Y P, Latypov A F, Mazhul I I, et al. Structure of flow over a hypersonic inlet with side compression wedges. *AIAA Journal*, 2003, 41(3): 436-447
- Kleine H, Settles G S. The art of shock waves and their flowfields. *Shock Waves*, 2008, 17: 291-307
- 滕宏辉, 张德良, 李辉煌, 等. 用环形激波聚焦实现爆轰波直接起爆的数值模拟. *爆炸与冲击*, 2005, 25(6): 512-518
- Ben-Dor G, Takayama K. The phenomena of shock wave reflection—a review of unsolved problems and future research needs. *Shock Waves*, 1992, 2: 211-223
- White D R. An experimental survey of the Mach reflection of shock waves: [PhD Thesis]. New Jersey: Princeton University, 1951
- Zaslavsky B I, Safarov P A. Mach reflection of weak shock waves from a rigid wall. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1973, 14(5): 624-629
- Henderson L F, Siegenthaler A. Experiments on the diffraction of weak blast waves: the von Neumann paradox. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 1980, 369: 537-555
- Sasoh A, Takayama K. Characterization of disturbance propagation in weak shock wave reflections. *J. Fluid Mech.*, 1994, 277: 331-345
- Colella P, Henderson L F. The von Neumann paradox for the diffraction of weak shock waves. *J. Fluid Mech.*, 1990, 213: 71-94
- Smith L G. Photographic investigation of the reflection of plane shocks in air. OSRD Rep 6271, Off Sci Res Dev, Washington DC, USA, 1945
- White D R. An experimental survey of the Mach reflection of shock waves. Department of Physics, Princeton University Technical Report No. II-10, 1951
- Courant R, Friedrichs K O. *Supersonic flow and shock waves*. New York: Wiley Interscience, 1948
- Ben-Dor G, Takayama K. The dynamics of the transition from Mach to regular reflection over concave cylinders. *Israel J. Tech.*, 1986/7, 23: 71-74
- Lee J H, Glass I I. Pseudo-stationary oblique-shock wave reflection in frozen and equilibrium air. *Prog. Aerospace Sci.*, 1984, 21: 33-80
- Kawamura R, Saito H. Reflection of shock waves—1. Pseudo-stationary case. *J. Phys. Soc. Japan*, 1956, 11: 584-592
- Sternberg J. Triple-shock-wave intersections. *Phys. Fluids*, 1959, 2: 179-207
- Birkhoff G. *Hydrodynamics: A Study in Logic, Fact, and Similitude*, 2nd. New Jersey: Princeton University Press, 1960
- Olim M, Dewey J M. A revised three-shock solution for the Mach reflection of weak shocks. *Shock Waves*, 1992, 2: 167-176
- Skews B W. The flow in the vicinity of the three shock intersection. *CASI Trans.*, 1972, 4: 99-107
- Dulov V G. Motion of triple configuration of shock waves with formation of wake behind branching point. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1973, 14: 791-797
- Shindyapin G P. Mach reflection and interaction of weak shock waves under the von Neumann paradox. *Fluid Dyn.*, 1996, 31: 318-324
- Guderley K G. Considerations on the structure of mixed subsonic-supersonic flow patterns. Air Materiel Command Technical Report No. F-TR-2168-ND, ATI No. 22780, GS-AAF-Wright Field No. 39, US Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, OH, 1947
- Guderley K G. *The Theory of Transonic Flow*. New York: Pergamon Press, 1962
- Vasilev E, Kraiko A. Numerical simulation of weak shock diffraction over a wedge under the von Neumann paradox conditions. *Comput. Math. Math. Phys.*, 1999, 39: 1335-1345
- Hunter J K, Brio M. Weak shock reflection. *J. Fluid Mech.*, 2000, 410: 235-261
- Zakharian A R, Brio M, Hunter J K, et al. The von Neumann paradox in weak shock reflection. *J. Fluid Mech.*, 2000, 422: 193-205
- Skews B W, Ashworth J T. The physical nature of weak shock wave reflection. *J. Fluid Mech.*, 2005, 542: 105-114

- 32 Tesdall A M, Hunter J K. Self-similar solutions for weak shock reflection. *Siam. J. Appl. Maths.*, 2002, 63: 42-61
- 33 Vasilev E I, Elperin T, Ben-Dor G. Analytical reconsideration of the von Neumann paradox in the reflection of a shock wave over a wedge. *Phys. Fluids*, 2008, 20: 046101
- 34 Skews B W, Li G, Paton R. Experiments on Guderley Mach reflection. *Shock Waves*, 2009, 19: 95-102
- 35 Li H, Ben-Dor G. Reconsideration of pseudo-steady shock wave reflections and the transition criteria between them. *Shock Waves*, 1995, 5: 59-73
- 36 Li H, Ben-Dor G. A shock dynamics theory based analytical solution of double Mach reflections. *Shock Waves*, 1995, 5: 259-264
- 37 Li H, Ben-Dor G. Analysis of double-Mach-reflection wave configuration with convexly curved Mach stems. *Shock Waves*, 1999, 9: 319-326
- 38 Henderson L F, Vasilev E I, Ben-Dor G, et al. The wall-jetting effect in Mach reflection: theoretical consideration and numerical investigation. *J. Fluid Mech.*, 2003, 479: 259-286
- 39 Ben-Dor G, Vasilev E I, Henderson L F, et al. The wall-jetting effect in Mach reflection: a numerical investigation. In: Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves, Beijing, China, 2004. 461-466
- 40 Vasilev E I, Ben-Dor G, Elperin T, et al. The wall-jetting effect in Mach reflection: Navier-Stokes simulations. *J. Fluid Mech.*, 2004, 511: 363-379
- 41 Morioka T, Suzuki Y, Honma H. Radiation observation of strong shock wave reflection in air. In: Proceedings of the 22th International Symposium on Shock Waves, Southampton, UK, 2000. 1201-1206
- 42 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
- 43 高云亮, 姜宗林. 准定常强激波反射马赫杆突出变形准则的探讨. *爆炸与冲击*, 2009, 29: 143-148
- 44 Semenov A N, Betezka M K, Krasovskaya I V. Classification of shock wave reflection from a wedge. Part 1: boundaries and domains of existence for different types of reflection. *Technical Physics*, 2009, 54(4): 491-496
- 45 Semenov A N, Betezka M K, Krasovskaya I V. Classification of shock wave reflection from a wedge. Part 2: experimental and numerical simulations of different types of Mach reflections. *Technical Physics*, 2009, 54(4): 497-503
- 46 Ben-Dor G. Regions and transitions of nonstationary oblique shock wave diffractions in perfect and imperfect gases. *UTIAS Pept.*, 1978. 232
- 47 Bryson A E, Gross R W F. Diffraction of strong shocks by cones, cylinders and spheres. *J. Fluid Mech.*, 1961, 10: 1-16
- 48 Takayama K, Sekiguchi H. Shock wave reflection by cones. Rept. Inst. High Speed Mech. Japan: Tohoku University, 1976
- 49 Han Z Y, Milton B E, Takayama K. The Mach reflection triple-point locus for internal and external conical diffraction of a moving shock wave. *Shock Waves*, 1992, 2: 5-12
- 50 Milton B E, Archer R D. Conical Mach reflection of moving shock waves, Part 1: analytical considerations. *Shock Waves*, 1996, 6: 29-39
- 51 Yang J, Sasoh A, Takayama K. The reflection of a shock wave over a cone. *Shock Waves*, 1996, 6: 267-273
- 52 Milton B E, Takayama K. Conical Mach reflection of moving shock waves, Part 2: physical and CFD experimentation. *Shock Waves*, 1998, 8: 93-103
- 53 Azevedo D J. Analytic prediction of shock patterns in a high-speed, wedge-bounded duct. [Ph.D. Thesis]. State University of New York, Buffalo, NY, 1989
- 54 Azevedo D J, Liu C S. Engineering approach to the prediction of shock patterns in bounded high-speed flows. *AIAA Journal*, 1993, 31(1): 83-90
- 55 Schotz M, Levy A, Ben-Dor G, et al. Analytical prediction of the wave configuration size in steady flow Mach reflections. *Shock Waves*, 1997, 7(6): 363-372
- 56 Li H, Ben-Dor G. A parametric study of Mach reflection in steady flows. *J. Fluid Mech.*, 1997, 341(1): 101-125
- 57 Mouton C A, Hornung H G. Mach stem height and growth rate predictions. *AIAA Journal*, 2007, 45(8): 1977-1987
- 58 高波. 二维定常超音速流中激波马赫反射的波系结构与转捩研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010
- 59 Gao B, Wu Z N. A study of the flow structure for Mach reflection in steady supersonic flow. *J. Fluid Mech.*, 2010, 656: 29-50
- 60 Tan L H, Ren Y X, Wu Z N. Analytical and numerical study of the near flow field and shape of the Mach stem in steady flows. *J. Fluid Mech.*, 2006, 546: 341-362
- 61 Chpoun A, Leclerc E. Experimental investigation of the influence of down stream flow conditions on Mach stem height. *Shock Waves*, 1999, 9: 269-271
- 62 Ben-Dor G, Elperin T, Li H, et al. The influence of the downstream pressure on the shock wave reflection phenomenon in steady flows. *J. Fluid Mech.*, 1999, 386: 213-232
- 63 Burtshell Y, Zeitoun D E, Ben-Dor G. Steady shock wave reflections in thermochemical nonequilibrium flows. *Shock Waves*, 2001, 11: 15-21
- 64 Li H, Chpoun A, Ben-Dor G. Analytical and experimental investigations of the reflection of asymmetric shock waves in steady flows. *J. Fluid Mech.*, 1999, 390: 25-43
- 65 Hu Z M, Wang C, Zhang Y, et al. Computational confirmation of an abnormal Mach reflection configuration. *Physics of Fluids*, 2009, 21: 011702
- 66 谭廉华. 平面与轴对称定常激波马赫反射中的激波形状研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2007
- 67 Ben-Dor G. A state-of-the-knowledge review on pseudo-steady shock-wave reflections and their transition criteria. *Shock Waves*, 2006, 15: 277-294
- 68 Hornung H G, Oetel H, Sandemann R J. Transition to Mach reflection of shock waves in steady and pseudosteady flow with and without relaxation. *J. Fluid Mech.*, 1979, 90: 541-560
- 69 Hornung H G, Robinson M L. Transition from regular to Mach reflection of shock waves. Part 2: the steady-flow criterion. *J. Fluid Mech.*, 1982, 123: 155-164
- 70 Ivanov M S, Gimelshein S F, Beylich A E. Hysteresis effect in stationary reflection of shock waves. *Phys. Fluids*, 1995, 7(4): 685-687
- 71 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
- 72 Chpoun A, Ben-Dor G. Numerical confirmation of the hysteresis phenomena in the regular to the Mach reflection transition in steady flows. *Shock Waves*, 1995, 5(4): 199-204
- 73 Ivanov M S, Zeitoun D, Vuilon J, et al. Investigation of the hysteresis phenomena in steady shock reflection using kinetic and continuum methods. *Shock Waves*, 1996, 5(6): 341-346
- 74 Hadjadj A, Kudryavtsev A N, Ivanov M S, et al. Numerical investigation of hysteresis effects and slip surface

- instability in the steady Mach reflection. In: Proc. of 21st Int. Symp. on Shock Waves, 1998, 2: 841-847, Panther Publishing, Great Keppel, Australia
- 75 Ivanov M S, Markelov G N, Kudryavtev A N, et al. Numerical analysis of shock wave reflection transition in steady flows. *AIAA J.*, 1998, 36(11): 2079-2086
- 76 Fomin V M, Ivanov M S, Kharitonov A M, et al. The study of transition between regular and Mach reflection of shock waves in different wind tunnel. In: Proc. of 12th Int. Mach Reflection Symp., 1996, 137-151, Pilanesberg, South Africa
- 77 Ivanov M S, Klemenkov G P, Kudryavtsev A N, et al. Experimental and numerical study of the transition between regular and Mach reflections of shock waves in steady flows. In: Proc. of 21st Int. Symp. on Shock Waves, 1998, 2: 819-824, Panther Publishing, Great Keppel, Australia
- 78 Sudani N, Sato M, Watanabe M, et al. Three-dimensional effects on shock wave reflections in steady flows. AIAA paper 1999-0148, 1999
- 79 Ivanov M S, Gimelshein S F, Markelov G N, et al. Numerical investigation of shock-wave reflection problems in steady flows. In: Proc. of 20th Int. Symp. on Shock Waves, 1996. 471-476, World Scientific
- 80 Li H, Ben-Dor G. Application of the principle of minimum entropy production to shock wave reflection. I: steady flows. *J. Appl. Phys.*, 1996, 80(4): 2027-2037
- 81 Hornung H G. On the stability of steady-flow regular and Mach reflection. *Shock Waves*, 1997, 7: 123-125
- 82 Sudani N, Hornung H G. Stability and analogy of shock wave reflection in steady flow. *Shock Waves*, 1998, 8: 367-374
- 83 Ivanov M S, Kudryavtsev A N, Nikiforov S B, et al. Experiments on shock wave reflection transition and hysteresis in low-noise wind tunnel. *Phys. Fluids*, 2003, 15(6): 1807-1810
- 84 Kudryavtsev A N, Khotyanovsky D V, Ivanov M S, et al. Numerical investigations of transition between regular and Mach reflections caused by free-stream disturbances. *Shock Waves*, 2002, 12: 157-165
- 85 Sudani N, Sato M, Karasawa T, et al. Irregular effects on the transition from regular to Mach reflection of shock waves in wind tunnel flow. *J. Fluid Mech.*, 2002, 459: 167-185
- 86 Yan H, Adelgren R, Elliott G, et al. Laser energy deposition in intersecting shocks. AIAA paper 2002-2729, 2002
- 87 Khotyanovsky D V, Kudryavtsev A N, Ivanov M S. Effects of a single-pulse energy deposition on steady shock wave reflection. *Shock Waves*, 2006, 15: 353-362
- 88 Skews B W. Aspect ratio effects in wind tunnel studies of shock wave reflection transition. *Shock Waves*, 1997, 7: 373-383
- 89 Skews B W. Three-dimensional effects in wind tunnel studies of shock wave reflection. *J. Fluid Mech.*, 2000, 407: 85-104
- 90 Ivanov M S, Vandromme D, Fomin V M, et al. Transition between regular and Mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results. *Shock Waves*, 2001, 11: 199-207
- 91 Brown Y A, Skews B W. Three-dimensional effects on regular reflection in steady supersonic flows. *Shock Waves*, 2004, 13: 339-349
- 92 Ivanov M S, Ben-Dor G, Elperin T, et al. The reflection of asymmetric shock waves in steady flows: a numerical investigation. *J. Fluid Mech.*, 2002, 469: 71-87
- 93 Hu Z M, Myong R S, Kim M S, et al. Downstream flow condition effects on the RR→MR transition of asymmetric shock waves in steady flows. *J. Fluid Mech.*, 2009, 620: 43-62
- 94 Ivanov M S, Ben-Dor G, Elperin T, et al. Mach-number-variation-induced hysteresis in steady flow shock wave reflections. *AIAA J.*, 2001, 39(5): 972-974
- 95 Durand A, Chanetz B, Benay R, et al. Investigation of shock waves interference and associated hysteresis effect at variable-Mach-number upstream flow. *Shock Waves*, 2003, 12: 469-477
- 96 Ben-Dor G, Vasiliev E I, Elperin T, et al. Hysteresis phenomena in the interaction process of conical shock waves: experimental and numerical investigations. *J. Fluid Mech.*, 2001, 448: 147-174
- 97 Ben-Dor G, Elperin T, Vasiliev I. Floe-Mach-number-induced hysteresis phenomena in the interaction of conical shock waves-a numerical investigation. *J. Fluid Mech.*, 2003, 496: 335-354
- 98 Ben-Dor G, Elperin T, Li H, et al. Downstream pressure induced hysteresis in the regular-Mach reflection transition in steady flows. *Phys. Fluids*, 1997, 9: 3036
- 99 Numata D, Ohtani K, Takayama K. Diffuse holographic interferometric observation of shock wave reflection from a skewed wedge. *Shock Waves*, 2009, 19: 103-112
- 100 Meguro T, Takayama K, Onodera O. Three-dimensional shock wave reflection over a corner of two intersecting wedges. *Shock Waves*, 1997, 7: 107-121
- 101 Goonko Y P, Kudryavtsev A N, Chpoun A. 3D interaction of shock waves in corner flow. In: Proc. of 24th Int. Symp. on Shock Waves, 2004. 437-442, Springer, Beijing, China
- 102 Goonko Y P, Kudryavtsev A N, Rakhimov R D. Supersonic inviscid corner flows with regular and irregular shock interaction. *Fluid dynamics*, 2004, 39(2): 304-318
- 103 Zambelli J, Skews B W. Shock wave propagation into a surface depression. *Shock Waves*, 2008, 18: 79-87
- 104 Jiang Z, Wang C, Miura Y, et al. Three-dimensional propagation of the transmitted shock wave in a square cross-sectional chamber. *Shock Waves*, 2003, 13: 103-111
- 105 Yang Y, Teng H, Jiang Z, et al. Numerical investigation on three-dimensional shock wave reflection over two perpendicularly intersecting wedges. *Shock Waves*, 2012, DOI 10.1007/s00193-011-0350-y
- 106 杨畅, 滕宏辉, 姜宗林. 三维双楔面定常超声速流动研究. 空气动力学学报, 2012

ADVANCES IN SHOCK WAVE REFLECTION PHENOMENA*

YANG Yang JIANG Zonglin[†] HU Zongmin

LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Advances in the study on shock wave reflection phenomena are reviewed. Some aspects of the advances are particularly elaborated in accordance with the research focuses of shock wave reflection phenomena in the past decade: weak shock reflection, wave configurations and transition criteria of nonstationary shock wave reflection, wave configurations of steady shock wave reflection, and the hysteresis of shock wave reflection. In view of their significances in practical applications, the advances in three-dimensional shock wave reflection phenomena are also presented and the problems confronted are discussed. In the mean time, directions of further studies on shock wave reflection are suggested.

Keywords shock wave reflection, Mach reflection, transition criterion, hysteresis phenomenon



姜宗林, 研究员. 于 1993 年在北京大学获得博士学位, 导师为周培源教授. 毕业后留校任副教授, 1994 年赴日本东北大学任激波研究中心副教授. 1999 年入选中科院百人计划, 在中科院力学所任研究员至今. 目前主要研究领域为高温气体流动、激波与爆轰物理. 现任高温气体动力学国家重点实验室主任, 中国空气动力学学会副理事长, 国际激波研究院执行委员, 同时任三个国际学术期刊编委和两个系列国际会议咨询委员会成员. 在国内外学术杂志发表学术论文 106 篇, 其中 SCI 收录 50 余篇. 2005 年 7 月获得国际激波研究院荣誉成员称号, 2008 年 6 月获得“第六届明斯克国际传热与传质论坛”重要学术贡献奖.

* The project was supported by the National Natural Foundation of China (90916028, 11142006).

[†] E-mail: zljjiang@imech.ac.cn