

激波绕半菱形柱体运动的实验 研究和数值模拟

张德良

(中国科学院力学所)

I. I. 格拉斯

(多伦多大学航天研究所)

摘要 激波绕过半菱形柱体流场是十分复杂的, 本文用实验方法和数值模拟对该问题作了系统研究。实验是在 UTIAS 激波管上进行的, 数值模拟采用 2 阶精度 Godunow 格式, 最后实验结果和数值模拟作了比较。

关键词 激波绕射 马赫反射 实验研究 数值模拟

一、引言

激波绕过半菱形柱体时, 流场特性是十分复杂的。本文用实验方法和数值模拟对该问题作了系统的研究。

关于激波绕流的研究可追溯到四十~五十年代。当时美国哥伦比亚大学教授 W. Bleakney 和他的同事们^[1]曾研究过类似问题。但是, 由于当时计算机尚未广泛应用, 研究工作无法深入。今天, 我们之所以要重新来研究这一课题, 理由是:

1. 当时对于激波反射问题的认识是肤浅的, 仅仅知道有正规反射 (RR), 单马赫反射 (SMR), 而今天对它的认识已相当深刻了, 激波反射除了有 RR 和 SMR 情况外, 还有复杂马赫反射 (CMR), 双马赫反射 (DMS) 以及第二个马赫反射三波点贴在壁面上的极限状态的双马赫反射 (TDMS)。

2. 在 W. Bleakney 时代, 实验是在马赫数很低的条件下进行的 ($M_s = 1.36$)。因此激波后面的诱导马赫数 $M'_i < 1$, 但随着马赫数 M_s 增加, M'_i 可以接近于 1 (跨声速) 或大于 1 (超声速)。

3. 近年来 Glass 和他的同事^[2]主要研究激波在楔表面上反射问题, 现在开展激波对半菱形柱体绕射的研究是以前工作的继续和深入。

4. 近年来计算机广泛应用, 使数值模拟这种复杂流场成为可能, 这为深入研究这一课题创造了条件。

实验是在加拿大多伦多大学航天研究所 (简称 UTIAS) 的激波管上进行的。数值模拟采用二阶精度的 Godunow 格式。最后对实验结果和数值模拟结果作了比较。

二、实验研究

实验在 UTIAS 的 $10\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ 的方激波管上进行的。一台直径为 23 cm 的全流场 Mach-Zehnder 干涉仪被用来捕捉绕流流场的图象。为了获得清晰图象, 采用无限干涉条纹技术。实验中的模型采用半菱形柱体 (底角 $\theta_w = 45^\circ$, 截面为 $28\text{ mm}/28\text{ mm}/56\text{ mm}$)。为了研究粗糙度对绕流流场影响, 在上述模型上复盖了一层粗砂纸和 5 mm 厚的泡沫塑料。此外, 还使用了表面为锯齿状的半菱形柱体模型。

来流马赫数范围为 $M_s = 1.35 - 2.85$, 以便得到不同马赫反射类型和不同流场特性。

$M_s = 1.35$	RR	$M'_i < 1$	亚声速
$M_s = 1.60$	RR	$M'_i < 1$	亚声速
$M_s = 2.02$	SMR	$M'_i \approx 1$	跨声速
$M_s = 2.45$	CMR	$M'_i > 1$	超声速
$M_s = 2.85$	DMR	$M'_i > 1$	超声速

实验结果列于图 1、2 中。

三、数值模拟

采用一个新的二阶精度的 Euler 型 Godunow 格式对激波绕流流场进行数值模拟。这个编码是根据 P. Colella^[1] 早期工作发展而来的。它具有高精度, 高分辨率和稳定性好的特点。在编码中采用了适合于各种物体形状的曲线坐标, 这样就在物面上做到严格满足二阶精度。此外, 在计算中还采用了自适应网格技术, 对流场中某些特殊部位, 例如在三波点附近网格可以自动加密。计算网格为 $440 \times 220, 480 \times 220, 600 \times 280$ 。数值模拟结果列于图中。

四、结果和分析

1. 实验和计算结果表明在激波绕流问题中激波马赫数 M_s 是一个很重要的参数。不同的马赫数, 所产生的流场特性 (例如等密度线的形状和分布) 是完全不相同的, 见图 1 和 2。

2. 众所周知, 当激波在楔面上反射时, 马赫反射三波点轨迹是直线, 因此流场是自相似的。但是, 激波绕过半菱形柱体顶点后, 流场变得比楔面上反射的情况要复杂得多, 然而, 实验结果表明, 即使在这种复杂情况下, 激波绕过半菱形柱顶点后的三波点轨迹仍然近似地看作是直线, 见图 3 (a, b)。数值结果也表明在一定程度上是合理的。因此, 在某种近似程度上说有自相似性。

3. 激波绕过半菱形柱体后, 流场的复杂性使流场的密度分布计算变得十分困难。原有的一套密度分布计算方法^[1] 在这里已不适用了。然而, 幸运的是, 流场三波点轨迹仍是直线因此, 可以设想在激波绕过半菱形柱顶点后的流场, 可以等同于激波在另一个楔面上反射所产生的流场。这个想象的楔面的顶点就是半菱形柱的顶点, 它的楔角 θ_w 是未知的, 见图 4。对于激波在这个想象楔面上反射所产生的流场密度分布是可以计算的, 具体计算步骤如下:

(I) 从干涉照片上测量出 δ 角值。

(II) 根据 M_s 和 δ 角值, 利用三波理论可以计算出三波点附近 (1), (2), (3) 区的流动参数。

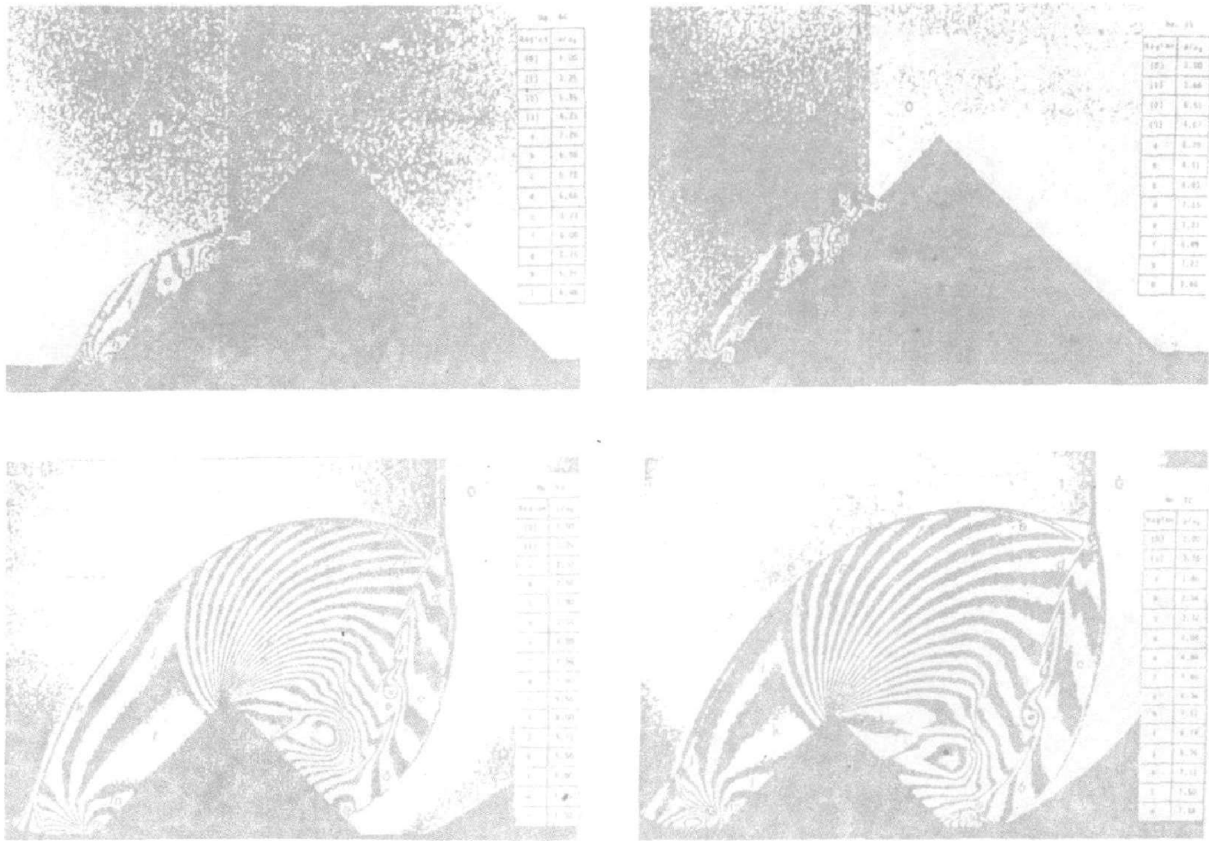


图1 激波绕半菱形柱体的流场密度分布

Fig.1 Density distribution of the shock wave diffraction field over half-diamond cylinder

(Ⅲ) 由它们根据照片上干涉条纹分布可以进一步推算出整个流场密度分布。

(Ⅳ) 同时根据 M_1 和 δ 角值可以反算出想象楔面的楔角 θ_w ，这样可确定想象楔面形状。

为了检验我们的算法是否合理，我们也可以由 M_1 和 δ 值反算 α 角值，同时 α 角值又可以从干涉照片上得到，见图4中 δ 、 θ_w 、 α 角的定义。比较结果表明 α 角的计算值和实测值是很一致的。最后和数值模拟结果比较，密度分布完全一致，从而证实了这一算法是合理的。

4. 在工程设计中压力是一个更为重要的参数，但压力分布很不容易被计算。在我们所研究范围内，由于诱导马赫数 M_1 略大于1（大约是1.2左右），激波后流动是低超声速的，因此可以假设波后流动参数变化是等熵的，即有

$$p/\rho^\gamma = p_2/\rho_2^\gamma$$

其中 p 、 ρ 为波后流场中不同位置的压力和密度值； γ 是比热比，下标0,1,2表示在三波点附

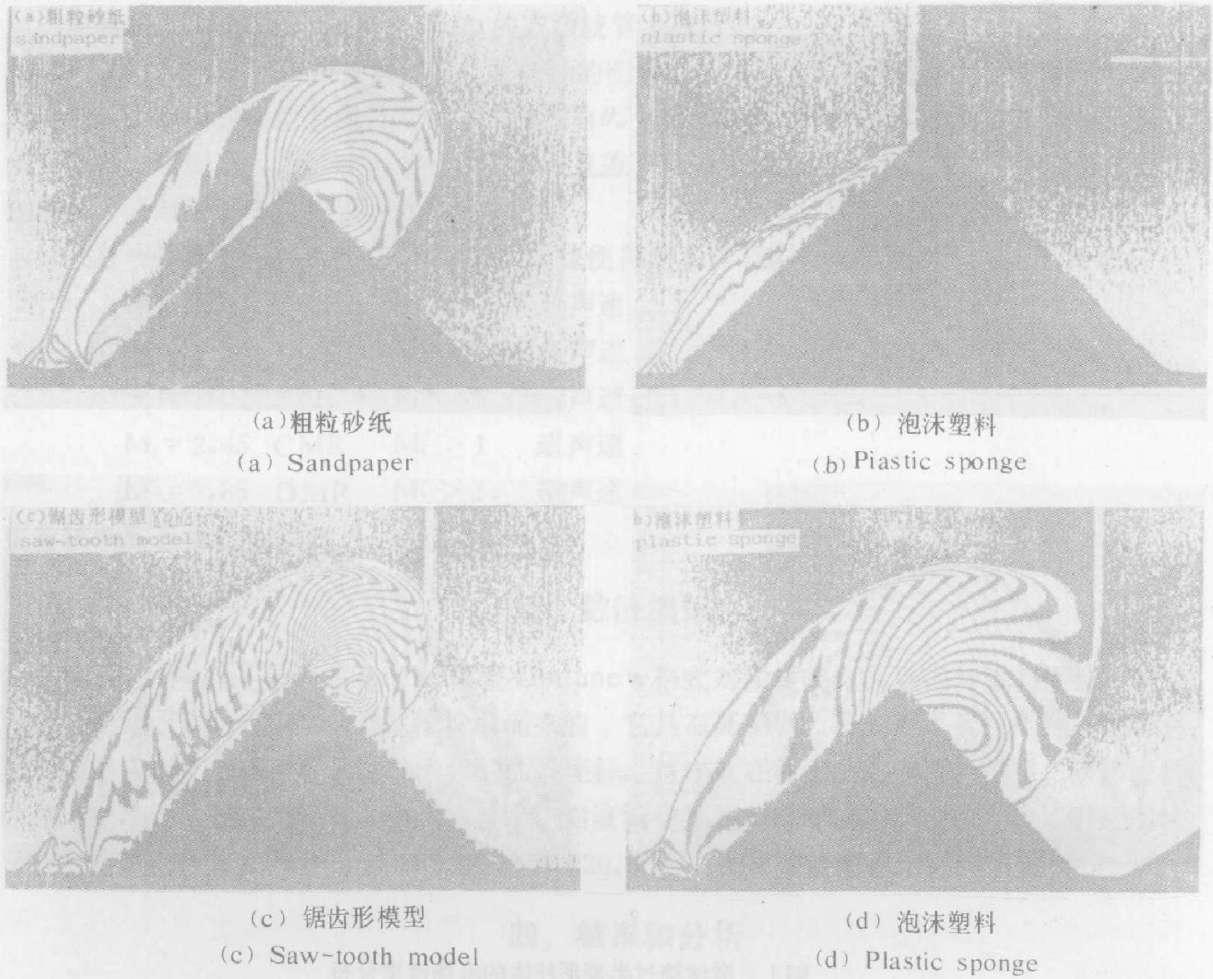


图2 粗糙度对流场影响的干涉照片 $M_s = 2.45$ (CMR)

Fig.2 Interferogram of the surface roughness effect on flowfield

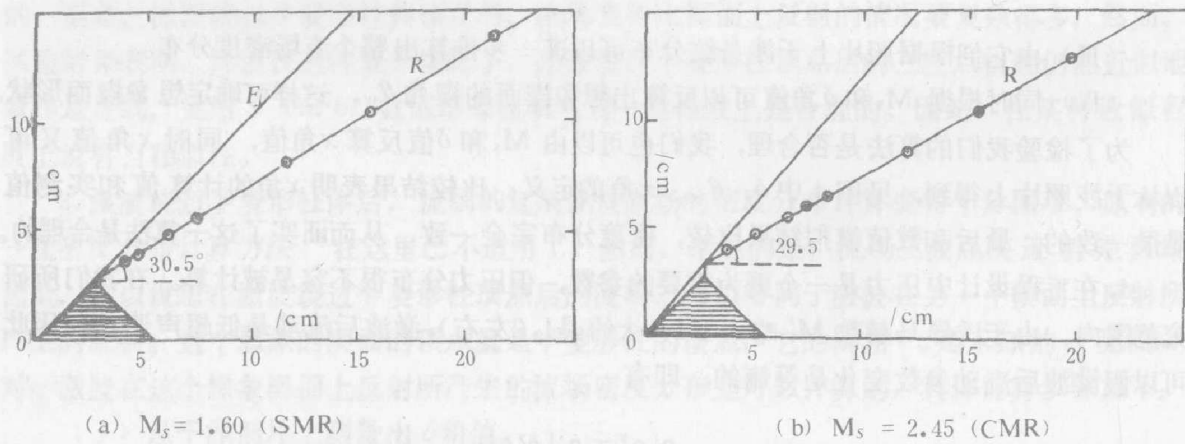


图3 激波绕过半菱形柱体时三波点轨迹

Fig.3 Triple point locus for planar shock wave over half-diamond cylinder

近，入射激波前，入射激波后和反射激波后的参数值，见图4。由此可以得到如下关系

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{p_2}{p_0}\right) \left(\frac{p_0}{p_2}\right) \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\gamma}$$

其中 p_2 , ρ_2 值可以根据三波理论计算得到。这样，如果流场的密度分布已经知道，那末压力也就可以计算出来。不同时刻物面上压力分布列在图5中。

5. 粗糙度对流场特性的影响已在图2中给出。从这组干涉照片中可以看出，粗糙度对流场特性影响是重要的，无论对反射波的形状还是波后密度分布。特别要提到的是表面为锯齿形的模型，流场在壁面附近还形成一个强烈的

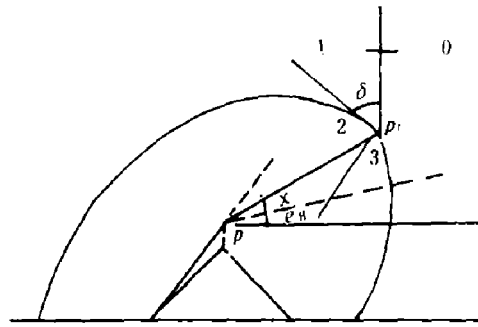


图1 压力分布计算示意图

Fig. 1 Schematic drawing of calculated pressure distribution

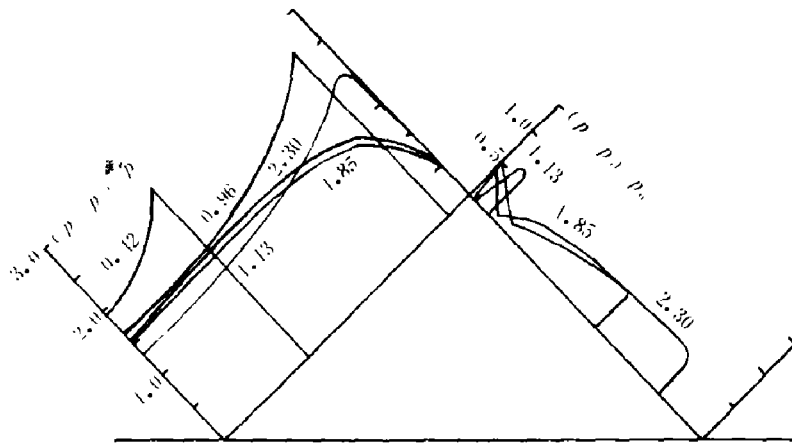


图5 激波绕过半菱形柱体时表面压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of shock wave diffraction over half-diamond cylinder

扰动附面层和一组小的涡系，见图2c。此外，对于模型表面复盖一层泡沫塑料的情况，流场中出现两个反射激波，见图2b，当激波绕过顶点后，反射波被稀疏波削弱，从而使第二个反射激波完全消失。所有这一切对工程设计来说是很重要的。总的说来，粗糙颗粒的尺度控制着流动特性。

6 数值模拟和实验结果比较列在图6中。从比较结果可以看出，除了在粘性起重要作用的尾部区域以外，整个流场密度分布，马赫杆高度和位置，滑移线，涡的形成和发展都十分一致。尤其是滑移线和涡，数值结果给出了精确位置和很高的分辨率，这表明 Godunow 格式是数值模拟激波相互作用的一个十分理想的格式。它具有精度高、分辨率好的特点。

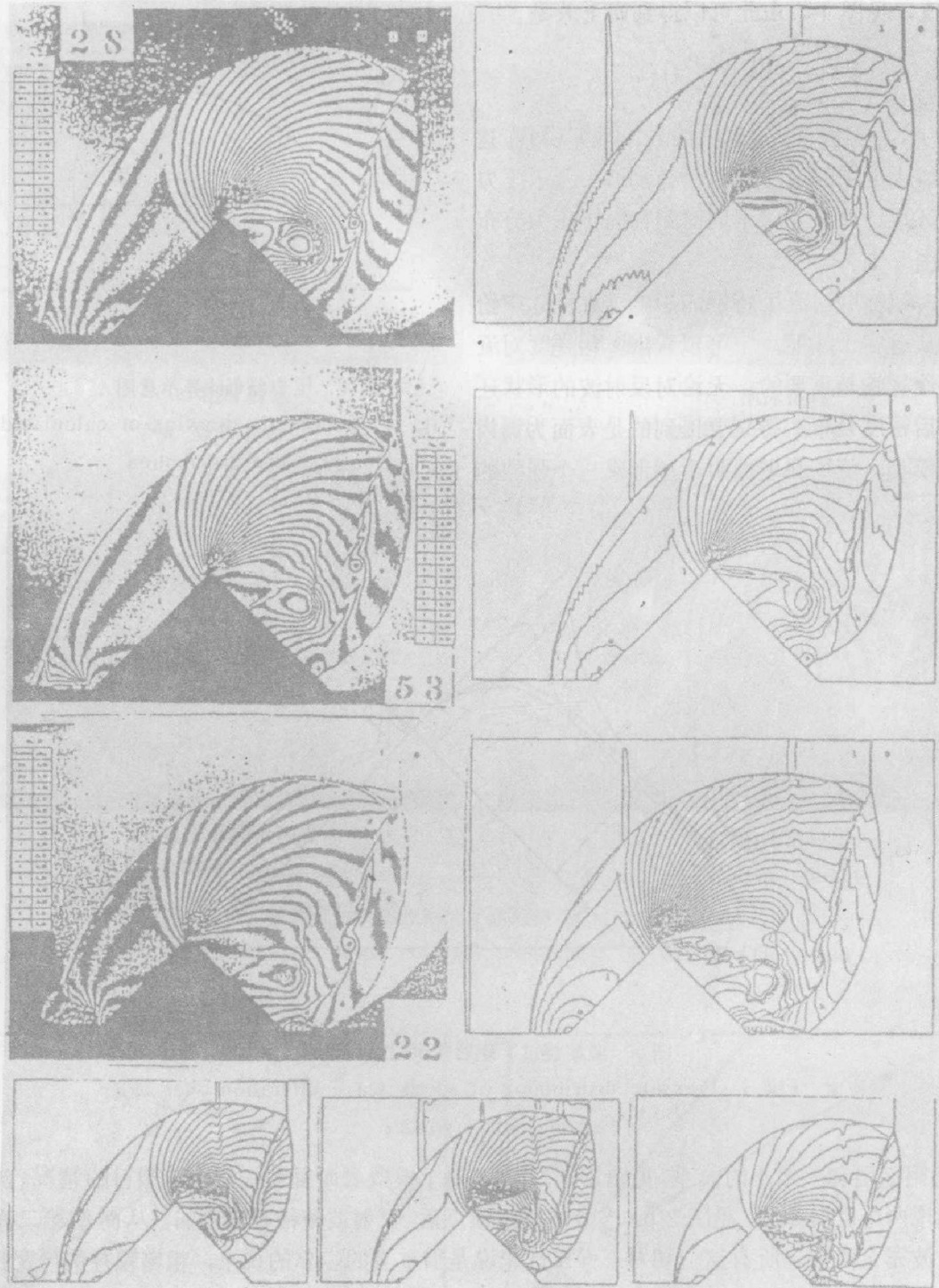


图6 激波绕过半菱形柱体的三种流场密度的实验和计算比较

$\theta_w = 45^\circ$, $M_s = 2.02$ (SMR), 2.45 (CMR), 2.85 (DMR), 计算网格分别是: 440×220 , 480×220 , 600×280 , 其中包括总焓的等值线图 (H_0)

Fig.6 Comparison between experiments and computations in three flowfield cases: $M_s = 2.02$ (SMR), 2.45 (CMR), 2.85 (DMR), $\theta_w = 45^\circ$, Computational mesh is 440×220 , Enthalph H is included

参 考 文 献

- [1] Bleakney, W., White, D.R., Griffiths, W.C., *J. of Applied Mechanics* 17 (4) (1950), 430.
[2] Glass, I.I., *AIAA J.*, 25 (2) (1985), 214.
[3] Hu, T.C.J., Shirouzu, M., UTIAS Report No.283, part 1 and 2 (1985).
[4] Colella, P., Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-17023 (1983).
[5] Zhang, D.L., Glass, I.I., UTIAS Report No.322, 1988.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND NUMERICAL
SIMULATION FOR THE SHOCK WAVE
MOVEMENT OVER A HALF-
DIAMOND CYLINDER

Zhang Deliang

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

I. I. Glass

(*Institute of Astronautics, Toronto University*)

ABSTRACT The flowfield of diffraction of shock wave over a half-diamond cylinder is very complex. In this paper the phenomena of diffraction were investigated experimentally and numerically. The experiments were conducted at UTIAS shock tube and the second-order scheme was adopted to simulate flowfield numerically. Finally, experimental results were compared with numerical simulations.

KEY WORDS Diffraction of shock wave, Mach reflection, Experimental investigation, Numerical simulation.