

扩张激波管流动波图观察

俞鸿儒 林建民 李仲发 谷茹华

(中国科学院力学研究所)

1. 前言

等截面激波管的计算方法已发展得很完善。为了获得强激波,经常采用“收缩”激波管,它的驱动段截面大于被驱动段,夹膜处加上收缩喷管作过渡。在低密度气体研究或激波强度不高而又要求大的被驱动段的场合,为了节省驱动气体用量,则常选用“扩张”激波管。其驱动段截面小于被驱动段,两者通过扩张喷管相接。对于缝合分界面运行的激波管,为了防止延伸到膜片下游的稀疏波与反射激波相干扰,或者为了获得极弱激波,在夹膜处还常插入收缩-扩张喷管。对于这类变截面激波管流动,Resler等^[1]对收缩激波管,当其过渡喷管下游为声速或超音速流时,给出了计算激波强度的方法。Alpher及White^[2]将文献[1]的方法加以改进,推广用于夹膜处装有各种形状喷管的流动,不仅能处理喷管出口为声速或超声速的流动,而且亦能处理喷管内全部为亚声速的流动。

若过渡喷管为扩张型,Roscizewcki^[3]指出:当喷管出口为超声速流时,存在两种不同的流动波图——亚膨胀时下游出现稀疏波及过膨胀时出现二次激波。上述两种理论都限于驱动气体为等熵流动,因而不适用于出现二次激波的流动。Laderman^[4]给出了计算出现二次激波的流动的方法。

Russell^[5]对扩张激波管流动作过诊断。亚膨胀状态下理论预期的下游稀疏波很容易就被觉察到了,但过膨胀状态下预计的二次激波却未被观察到。

本工作的内容为对扩张激波管流动继续作实验观察,以确定过膨胀状态实际存在的流动及相应波图。

2. 诊断方法

扩张激波管存在四种不同的流动状态(图1):

a. 当主激波马赫数超过某一临界值时,喷管下游出现稀疏波。这种流动称为亚膨胀流动。若在喷管下游管壁测压,则压力曲线形状及相应波图如图2所示。随着主激波强度下降,稀疏波亦减弱,当稀疏波衰减为马赫波时,称为“最优”膨胀。

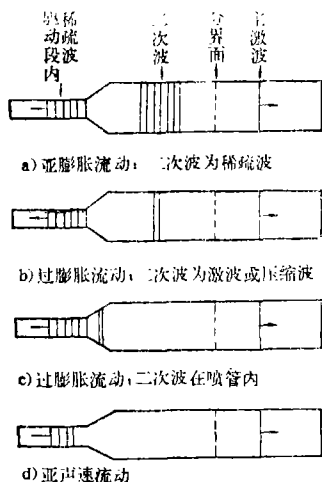


图1 扩张激波管四种流动波系

本文于1984年3月12日收到。

b. 主激波马赫数低于“最优”膨胀激波马赫数时，变为过膨胀流动。若如 Roscizewcki 预见那样出现二次激波，则压力曲线形状及相应波图应如图 3a。由于实际流动中存在的边界层干扰，亦可能只存在压缩波，这时测出的压力曲线及相应波图如图 3b。

c. 主激波强度继续下降，二次激波或压缩波将移入喷管内。

d. 主激波强度再下降，驱动气体全部变为亚声速流。

收缩激波管只存在 a 及 b 两种流动。

本实验限于观察 a、b 两种流动波图。比较图 2 及图 3 可以看出：根据压力曲线后平台高于或低于前平台，即可判定为亚膨胀或过膨胀。至于过膨胀流动中究竟是出现二次激波或压缩波要靠压力曲线形状加以区别。若忽略边界层及传感器尺寸影响，二次激波产生的后沿应是陡削的，而压缩波产生的后沿则有一定宽度。实际测量中，传感器具有一定尺寸，二次激波通过传感器需经一定时间。加上主激波后已形成边界层，激波穿过边界层可能形成分叉，分叉通过传感器亦需要一定时间，因此测出的压力曲线后沿亦会有一定宽度。但对具体情况作分析，两种宽度不会相同，可根据宽度大小作诊断。

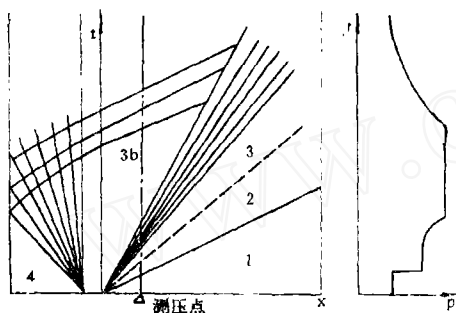


图 2 亚膨胀波图及压力曲线形状

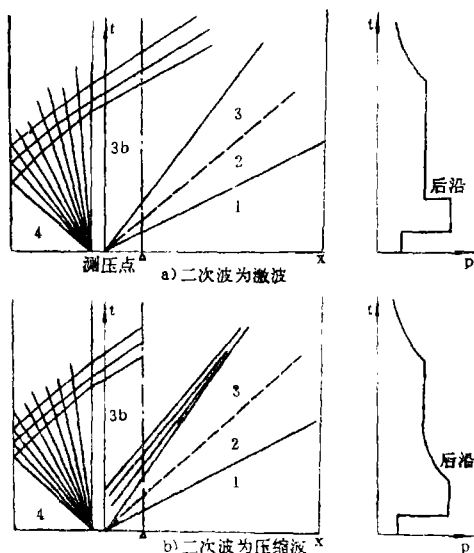


图 3 过膨胀波图及压力曲线形状

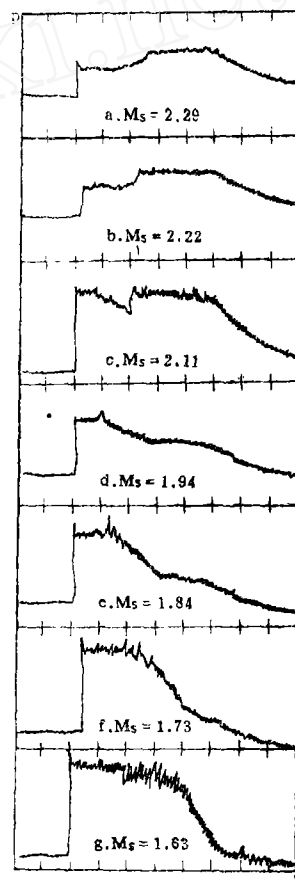


图 4 不同马赫数下的压力记录曲线

3. 实验结果及讨论

本实验所用扩张激波管，驱动段内直径80mm，长2000mm；被驱动段内直径185mm，长5,000mm。两者用单调扩张喷管相接。驱动段及被驱动段工作气体均为室温氮气。安装在距喷管出口1.22m处管壁上的压电传感器记录的压力-时间曲线示于图4。分析图中的曲线，可以得出：

(1) 图4 a及 b分别为 $M_1=2.29$ 及 $M_1=2.22$ 的压力曲线，由前平台低于后平台 ($p_2 < p_{3b}$) 可诊断为亚膨胀流动。

(2) 图4 c 为 $M_1=2.11$ 时的压力曲线。前平台与后平台持平 ($p_2 \approx p_{3b}$) 可认为接近“最优”膨胀状态。曲线中段出现的凹坑表明：即使在“最优”膨胀状态，分界面上游也并非如理想条件下所预期的那样平稳，而是还有扰动，只不过能最终互相抵销。

(3) 图4 d, e, f 分别为 $M_1=1.94, 1.84, 1.73$ 的压力曲线。由前平台均高于后平台 ($p_2 > p_{3b}$) 故为过膨胀流动。两平台的过渡时间约为3ms。主激波速度约为 6×10^3 m/s。主激波从夹膜处到达测压点约需2~3ms，二次波在主激波后2~4ms到达该处，速度量级为 10^3 m/s。若二次波为激波，则扫过 $\phi 5.5$ mm 传感器所需时间量级为 10^{-2} ms；激波穿过边界会形成的分叉宽度估计为厘米量级，扫过传感器时间量级亦只有 10^{-1} ms。上述三根曲线过渡时间为3ms，故可诊断扫过的二次波为压缩波。

(4) 图4 g 为 $M_1=1.63$ 的曲线。后平台已不明显，二次波在测压点已被驱动段反射波赶上。

从以上观察结果及分析可以得出： $M_1 > 2.11$ 为亚膨胀状态，分界面后确实存在稀疏波。 $M_1 < 2.11$ 为过膨胀状态。分界面后并非如文献[3]预见的那样存在二次激波，实际观察到的却是压缩波。

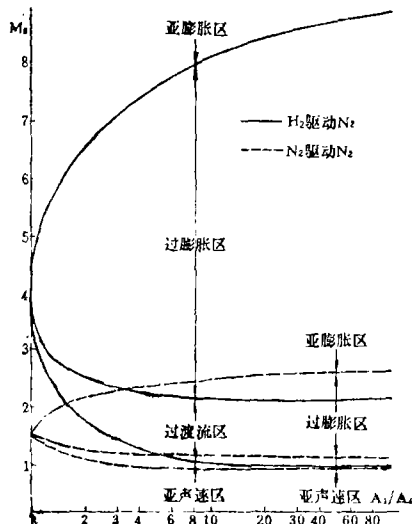


图5 扩张激波管四种流动区域范围

扩张激波管存在四种不同的流动区域，在分析计算中要认真选用适合该区域流动特性的计算方法。图5列出各流动区域范围（限于篇幅，计算公式略）。由图可以看出：过膨胀流占有宽广的范围。许多实际运用的参数均在此区内。若过膨胀区存在二次激波，则其计算方法与亚膨胀区不一样。幸而过膨胀区存在的是压缩波，由于压缩波与亚膨胀区出现的稀疏波均为不定常等熵波，波前后参数关系式相同。因而过膨胀区可采用与亚膨胀区相同的公式，给计算带来很大方便。

袁生学及李振华同志参加了本实验的测量及设备改建，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Resler, E. L., Lin, S. C. & Kontrowitz, A. *Jour. Appl. phys.*, Vol 23, 1952, p.1390.
- [2] Alpher, R. A. & white, D. R., *Jour. Fluid Mech.*, Vol 3, part 2, 1958.
- [3] Rosciszewcki, J., *Phys. Fluids*, Vol 5, No 1, 1962.
- [4] Laderman, A. L., *AIAA Jour.*, Vol 5, No 10, 1967.
- [5] Russell, D. A., *Phys. Fluids*, Vol 5, No 4, 1962.

**OBSERVATION OF WAVE DIAGRAMS FOR SHOCK
TUBE WITH THE DIVERGENT NOZZLE AT
DIAPHRAGM SECTION**

Yu Hongru, Lin Jianmin, Li Zhongfa, Gu Jiahua
(*Institute of Mechanics, Academia sinica*)

Abstract

Piezoelectric pressure data were obtained in ϕ 185mm shock tube with divergent section at shock Mach number range $1.5 < M_s < 2.5$. It is shown that in underexpansion flow exist rarefaction wave as previous predict, but in overexpansion flow exist compressive waves instead of secondary shock wave which was predicted by Rosciszewcki^[3].