

研究简报

 $\phi 800$ 激波管流场参数测量

中国科学院力学研究所

竺乃宜 李红德 邹惠良 李连祥

1. 实验装置和测量原理

本实验使用不锈钢圆形直激波管, 高压段长 1.6m, 内径 223mm; 低压及实验段内径 800mm. 使用氢氧燃烧驱动, 驱动压力约 80ata. 测量支架距膜片的有效距离为 14m.

我们用薄膜电阻温度计^[1]式的金膜热探头在激波管中测量②区长度和波面形状, 用电探针来测量分界区与③区的交界处. 它们的信号直接或经过热电模拟线路^[2]以后, 输给 SBR-1 示波器.

激波波头到达时, 由于金膜表面突然得到高温气体传来的热流, 金膜温度突然开始上升, 因此, 在示波器记录的温度曲线或经过热电模拟线路以后记录的热流曲线上, 突然出现信号的地方, 就表示激波波头到达. 波头之后是均匀的②区, 高温气体传给金膜的热流率基本不变, 这时示波器上得到光滑的抛物线形温度曲线或水平的热流曲线. 当②区与分界区之间的交界面到达时, 由于交界面前后气流状态的变化, 在示波器所记录的温度曲线和热流曲线上, 都应当出现明显的拐点. 从信号出现至有明显拐点的范围, 一般说来就标志着②区均匀流的长度.

为了测定波面形状, 我们把两个以上的探头安置在与激波管轴线垂直的同一水平位置上, 使它们与激波管轴线具有不同的距离. 为了避免示波器不同扫描线的不对称性, 我们将两个热探头的信号接在示波器的同一条扫描线上, 一个正接, 另一个反接. 这样记录到的是两个金膜温度曲线的叠加. 当波面先到达金膜 I 时, 总信号突然上升, 等波面再到达金膜 II 时, 总信号又突然向下降; 反之, 若波面先到达 II, 则信号先下降, 等波面再到达 I 时, 信号突然上升. 这就可以准确地判断激波波面到达金膜的先后次序, 而且叠加信号两个突变点之间的间隔正好表示波面到达两个不同金膜所差的时间, 乘上激波速度就是两位置间波面的弯曲程度.

实际的激波管中, 边界层存在所造成的质量漏失及②区、③区之间气体的湍流混合, 使得实际上存在一个相当宽的混合分界区. 由于③区气体是冷的, 没有带电粒子存在, 而分界区中由于有②区气体混合进来, 存在着残余带电粒子, 所以我们采用电探针来测定分界区与③区之间的交界面.

2. 实验结果

根据已有的实验结果, 可将激波管内流动状态定性划分为图 1 所示的几个区域.

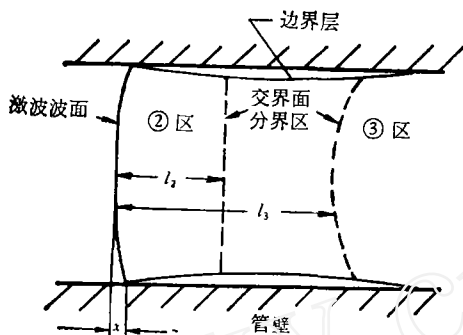


图 1 激波管中流动状态示意图

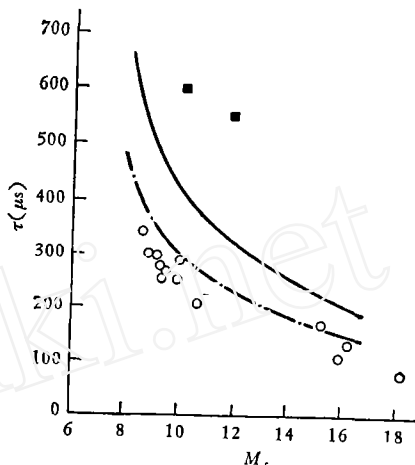


图 2 分界区位置的测定 $p_1 = 1\text{mmHg}$, $x_s = 14\text{m}$

- 热探头测得②区与分界区交界处
- 电探针测得分界区与③区交界处
- 理想激波管②区实验时间
- - - Mirels 湍流修正实验时间^[4]

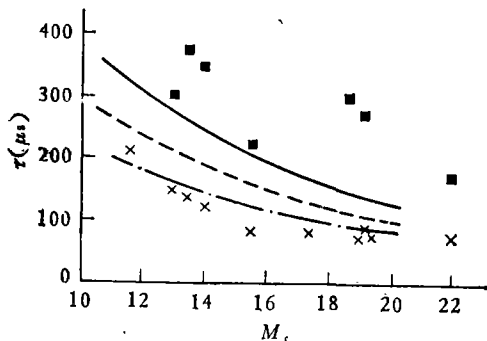


图 3 分界区位置的测定 $p_1 = 10^{-1}\text{mmHg}$, $x_s = 14\text{m}$

- × 热探头测得②区与分界区交界处
- 电探针测得分界区与③区交界处
- 理想激波管②区实验时间
- - - Mirels 层流修正实验时间^[3]
- - - Mirels 湍流修正实验时间^[4]

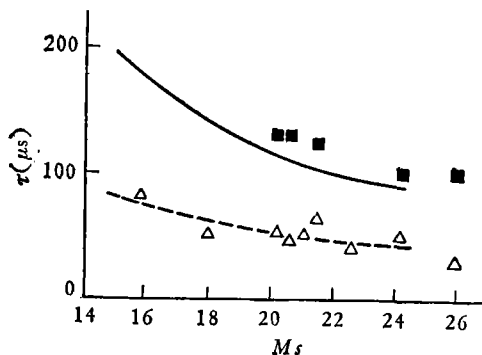


图 4 分界区位置的测定 $p_1 = 10^{-2}\text{mmHg}$, $x_s = 14\text{m}$

- △ 热探头测得②区与分界区交界处
- 电探针测得分界区与③区交界处
- 理想激波管②区实验时间
- - - Mirels 层流修正实验时间^[3]

1) 二区长度 图 2—4 分别给出了 $p_1 = 1, 10^{-1}, 10^{-2}\text{mmHg}$ 时测到的②区均匀流动的时间。 τ_2 随 M_s 变化的趋势与理论分析是一致的。实际测到的 τ_2 值一般只有理想激波管的 1/2 到 2/3 左右, 这说明边界层漏失和分界面混合使真实激波管中②区的有效实验时间损失了很多。

不少作者研究和讨论了激波管中边界层的存在使得②区长度缩短这个问题。一般认为 Mirels 的理论^[3,4]比较可靠。将我们测量的结果与 Mirels 理论修正对比, $p_1 = 1\text{mmHg}$ 状态的实验点比湍流边界层修正曲线还要稍低一些; 在 $p_1 = 10^{-1}\text{mmHg}$ 状态, 当 M_s 较小和较大时, 实验点落在层流修正曲线与湍流修正曲线之间, 当 M_s 处于中等值时, 实验点比湍流修正曲线要低一些; 在 $p_1 = 10^{-2}\text{mmHg}$ 状态, 实验点在整个 M_s 范围内都与层流修正曲线较好地符合。 我们的实验结果与林绍基等人^[5] 24 英寸激波管 $p_1 = 10^{-1}$ 和

10^{-2} mmHg 状态下的实验也基本一致. 另外,值得注意的是,显示了这样一种趋势: 当 p_1 较低时,实验与层流边界层理论比较一致;当 p_1 较高时,实验与湍流边界层理论比较一致;中间则有一个过渡区.

为了进一步探讨 τ_2 随 p_1 变化的规律,我们又测量了同一 M_s 下,不同 p_1 所对应的 τ_2 值. 图 5 和 6 给出了 $M_s=10$ 和 15 两种情况下的结果. 结果表明, $p_1 = 10^{-2}$ mmHg 或更低时, τ_2 与层流理论一致,即这时激波管边界层中的流动主要是层流状态. 当 $p_1 = 1$ mmHg 或更高时, τ_2 与湍流理论一致,而比层流理论低很多,这时激波管边界层中的流动主要是湍流状态. 上述两个区域里面, τ_2 都随 p_1 的增大而增大. 在二者中间的过渡区,边界层中层流状态和湍流状态的贡献都不可忽略,随着 p_1 的增加, τ_2 变化较小甚至下降. 我们这个激波管的过渡区大约出现在 10^{-1} 与 1mmHg 之间.

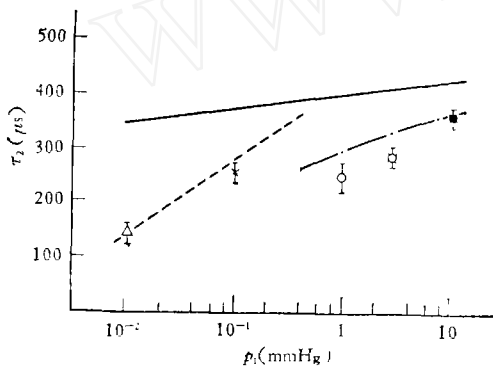


图 5 ②区实验时间随 p_1 的变化 $M_s = 10, x_r = 14$ cm

— 理想激波管②区实验时间
 --- Mirels 层流修正实验时间
 -·-·- Mirels 湍流修正实验时间

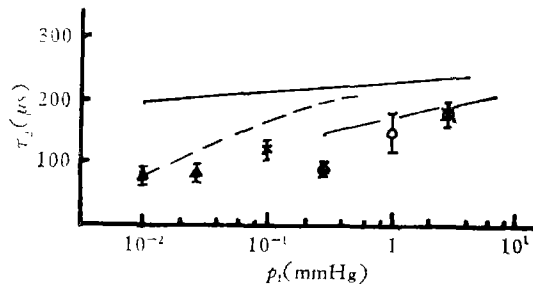


图 6 ②区实验时间随 p_1 的变化 $M_s = 15, x_r = 14$ cm

— 理想激波管②区实验时间
 --- Mirels 层流修正实验时间
 -·-·- Mirels 湍流修正实验时间

为了验证上述观点是否正确,我们使用装在激波管侧壁上的金膜热探头来测量边界层中的转捩点位置 l_t ,并与管内测得的②区长度 $l_2 = \tau_2 \cdot u_2$ 进行比较. 在 $p_1 = 1$ mmHg 状态下, $l_t \lesssim l_2/3$ (这时转捩雷诺数 $Re_t = (W-1)^2 u_{c,0} \cdot \rho_{c,0} \cdot l_t / \mu_{c,0} \approx 2 \times 10^6$), 这说明转捩点位于分界面前面很远的地方,②区范围内相应的边界层大部分处于湍流状态,因此基本上应当按湍流边界层来估计漏失对②区长度缩短的影响. 在 $p_1 = 3 \times 10^{-2}$ mmHg 状态下, $l_t > l_2$,转捩点位于分界面的后面,即②区范围内相应的边界层完全是层流状态,因此应当按照层流理论来估计边界层漏失对于②区长度缩短的影响.

2) 波面形状 图 7 给出了 $p_1 = 1 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$ mmHg, $M_s = 20$ 状态下波面形状的测量结果. 图中 r 表示测量点距激波管轴心的距离; x 表示波面在测量点与中心处的差距,以波面中心为原点,落后为正,超前为负. 实验所测到的波面不平整度平均说来比按照现有边界层理论^[6,7]计算的值要大 5 倍左右,且比林绍基等人^[5]的结果也要大 2—3 倍. 在边壁附近 x/R 的平均值约为 7% 左右,说明波面的不平整度是相当大的. 但在中心附近半径为 10cm 左右的区域里,波面基本上可以认为是平的. 当 p_1 增大时,波面的不平整度减小. 本设备中波面弯曲较严重的原因可能是由于内径大以及氢氧燃烧驱动不够稳定所造成.

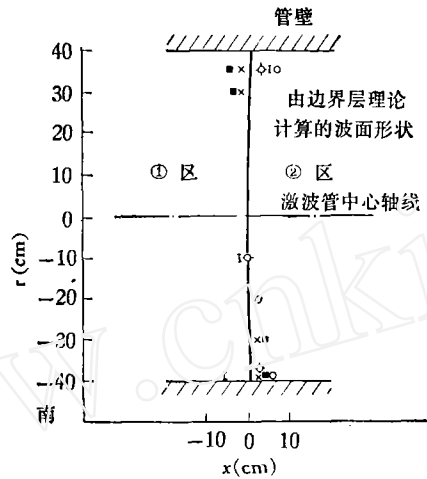


图 7 波面形状的实验测量结果
 $M_s = 20, p_1 = (1-3) \times 10^{-2} \text{ mmHg}$
 以波面中心处为坐标原点
 ■, ×, □, ·, ○ 分别代表
 五次典型的测量结果

3) ②区与③区之间的分界区 图 2—4 同时给出了②区与分界区的交界面位置 l_2 或 τ_2 及分界区与③区的交界面位置 l_3 或 τ_3 。粗略看来, τ_3 比 τ_2 大 1 倍左右, 即 l_3 比 l_2 长 1 倍左右, 也就是说分界区的长度与②区长度是同量级的。将电探针在管内测得的上述 τ_3 值与崔季平等同志以前用电探针在管壁边界层中所测得的 τ_3 值进行比较, $p_1 = 10^{-2} \text{ mmHg}$, $M_s = 20$ 状态下, 管内 $\tau_3 = 130 \mu\text{s}$ 左右, 而管壁 τ_3 大约有 400—500 μs , 这就证明了如图 1 所示, 管壁上边界层的尾巴拖得比分界区还要长得多。

在热电模拟线路的使用和金膜热探头的制作中得到了俞鸿儒、单泽珍等同志的大力帮助, 作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Rose, P. H. and Stark, W. I., *J. Aero. Sci.*, 25, 2 (1958), 86.
- [2] Meyer, R. F., N.R.C. of Canada Aero. Report, LR-375 (1963); Skinner, G. T., *A. R. S. J.*, 30, 6(1960), 569.
- [3] Mirels, H., *Phys. Fluids*, 6, 9(1963), 1201.
- [4] Mirels, H., *AIAA J.*, 2, 1(1964), 84.
- [5] Lin, S. C. and Frfe, W. I., *Phys. Fluids*, 4, 2(1961), 238.
- [6] Hartunian, R. A., *Phys. Fluids*, 4, 9(1961), 1059.
- [7] De Boer, P.C.T., *Phys. Fluids*, 6, 7(1963), 962.