

④ 23-27

第11卷 第3期

流体力学实验与测量

Vol. 11, No. 3

1997年9月

EXPERIMENT AND
MEASUREMENT IN FLUID MECHANICS

Sep., 1997

高超声速压缩拐角再附峰值热流率*

王世恭 徐朝仪

中国科学院力学研究所, 北京 100080

0354.4
0357.4

摘要 给出三维和二维压缩拐角诱导激波与高超声速层流和湍流边界层相互作用的流场结构和前向压缩表面的热流率分布。实验气流 M 数为7.8, 单位长度 Re 数为 $3.5 \times 10^7/m$ 。结果表明: 激波与边界层相互作用能促进边界层转换。只有基于再附峰值热流率位置长度的参考温度条件下的雷诺数足够低, 相互作用过程才能是纯层流的。在全再附高超声速分离流中, 再附峰值热流率可用 Simeonides 通用相关式进行估算。

关键词 高超声速流; 分离流; 激波与边界层相互作用; 再附峰值热流率; 压缩拐角

中图分类号 O354.4, O357.4

0 引言

在高速飞行器控制翼防热设计中, 翼面再附峰值热流率是一个重要的设计参数, 因此受到广大气动工作者的关注。最近, Simeonides 等人^[1]基于参考焓方法和 Bushnell-Weinstein 峰值热流率分析模型^[2], 以平板前缘作翼面边界层的起点, 用再附峰值热流率位置上层流平板的热流率为无量纲参数, 建立了一个可预测层流、转捩和湍流三类分离流再附峰值热流率的通用相关式。由于该公式在其推导过程中, 仅使用参考焓平板层流和湍流边界层热流率公式, 对流动十分复杂的转捩分离其可靠性如何, 尤其是相关式中 x_k 与 L_k 参数的确定, 有待进一步考察与研究。

本文用光学流场显示和壁面热流率测量, 观察二维和三维压缩拐角流中高超声速层流和湍流边界层与激波相互作用流场的结构和前向压缩表面的热流率分布, 研究局部来流条件、边界层流态和压缩拐角几何尺度对分离激波角、分离点和再附点位置的影响, 深化对分离流场结构的认识, 使控制翼再附峰值热流率的预测更加合理实用。

1 实验设备、模型和测试技术

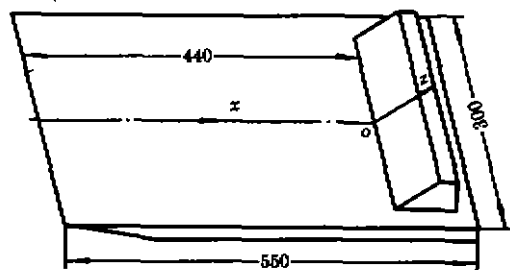
实验在中国科学院力学研究所 JF₁₆ 高超声速炮风洞中进行。试验气流 M 数为7.8, 单位长度 Re 数为 $3.5 \times 10^7/m$, 气流准定常时间为20ms。

实验模型分二种: 一种是平板和二维压缩拐角, 一种是平板和两个并列的呈二次压缩的三维拐角(图1)。前者平板长550mm, 宽300mm; 拐角流向偏角35°, 宽260mm, 高35mm, 拐角前缘与平板前缘相距440mm。后者平板长680mm, 宽380mm, 拐角下部偏角为最大展长120mm, 弦长16.1mm, 上部偏角为39.8°, 最小展长90.5mm, 弦长39.6mm。实验

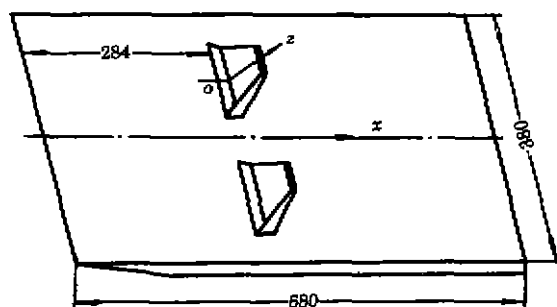
* 国家高技术研究发展计划航天技术领域资助

收稿日期: 1996-11-26

时,外形相同的两个三维拐角对称固定在平板上,拐角前缘与平板前缘相距 284mm,两拐角 34.7°,角间最小距离为 60mm。 x 表示以平板前缘为起点沿来流方向的距离, z 表示从拐角前缘算起沿拐角前向平面中心线方向的距离。



二维拐角



三维拐角

图1 实验模型

Fig. 1 Test model

模型表面热流率测量采用铂膜电阻温度计,被测信号经靖江东华测试技术开发有限公司生产的传热测量仪,输入到 DM-7100 瞬态记录仪,由 SM-2100 信号分析仪处理。

流场显示采用 640 型纹影仪光学照相,以获得分离激波和再附激波的位置。

2 实验结果和讨论

2.1 来流边界层状态

边界层流态和转捩位置是影响激波和边界层相互作用特性的一个重要因素。要判断分离流的类型,首先必须确定光平板的边界层流态。大量的实验表明:边界层转捩的第一迹象是在边界层中出现不稳定性,其后是有序破坏,变成随机结构。这一流动特性反映到平板边界层转捩区沿流向同步采集到各测点热流率脉动信号上(图 2);在转捩开始,湍流

猝发,热流率脉动出现尖峰状的信号;随着转捩过程向下游的推移,猝发强度加大,并形成新涡,尖峰信号的大小和频率随之增大,热流率脉动呈间歇式,其瞬时值来回在层流值和湍流值间变化;转捩终止,瞬时热流率合并成一高值,间歇性几乎消失。图中横坐标为时间,纵坐标为信号输出值,有效实验时间在两虚线之间。

图 3 给出本实验平板中心线上热流率平均值和参考焓方法计算出的平板层流边界层和湍流边界层热流率分布。不难看出:在 $M_\infty = 7.8$ 、 $Re_\infty = 3.5 \times 10^7/m$ 气流条件下,680mm \times 380mm 光平板的边界层在 $x = 290$ mm 处开始转捩,而在 $x = 380$ mm 处转捩终止,但 550mm \times 300mm 光平板的边界层转捩位置约前移 160mm,估计是该平板前缘局部缺损和壁温略高所致。由此可知本文三维拐角模型研究属于激波与层流边界层相互作用,而二维拐角模型则涉及激波与湍流边界层相互作用。

2.2 分离流场结构

图 4 分别给出用光学显示所获得的三维和二维压缩拐角诱导激波与边界层相互作用的流场照片。就波系结构而言,两个流场十分相似,均在分离点和再附点上方形成一分离和再附激波。但就流场属性及其特征尺度而言,因受边界层流态的影响,两个流场又存在明显的差别。在三维拐角诱导的分离流场中,分离点上游存在一条近似与平板平行的亮带(白线),这表明来流边界层流动稳定,具有层流特性。但在分离点和再附点之间,这条反映

自由剪切层中最大密度梯度位置变化的亮带(白线)不再像纯层流分离为一条等斜率的直线^[3],而出现折转。在分离点邻近下游,由于边界层脱体,这条亮带开始随着向拐角的靠拢逐渐向板外偏斜,但在 x 约为 175mm 处,亮带略向板面折回,当 x 大于 201mm,亮带才以更大的斜率向板外偏斜。根据 Chapman 给出的由流场阴影照片判断边界层转捩位置的方法^[3],可以确认:在本工况下,分离的剪切层在 $x=170\sim 201$ mm 发生转捩,其分离流场为转捩分离。在二维拐角诱导的分离流场中,因分离点上游的边界层早已发展成湍流,抗逆压梯度能力强,分离距离短,为湍流分离流场。

本实验结果表明,激波与层流边界层相互作用不仅能引起边界层分离,而且能促进其转捩。与湍流分离相比,转捩分离的分离激波角小,分离距离长。在本实验条件下,湍流分离和转捩分离的分离激波角可用二维湍流和层流分离平台压力相关式进行初步估算。

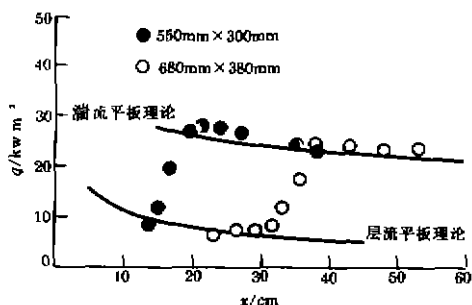


图 3 平板上流向热流率分布
Fig. 3 Heat transfer distributions along the streamwise over flat plate

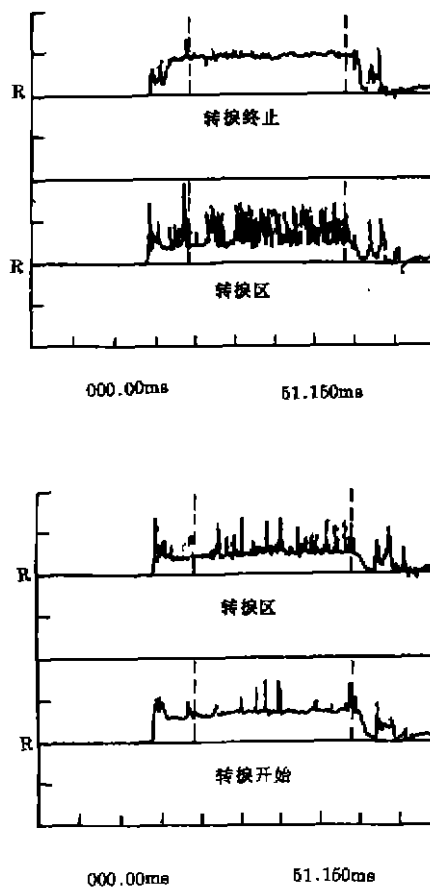


图 2 在平板边界层转捩区沿流向同步采集到各测点的热流率脉冲信号

Fig. 2 Time-history plots of the simultaneously recorded multi-channel streamwise heat transfer fluctuations in the transition region of flat plates

2.3 压缩拐角中心线上表面热流率分布和再附峰值热流率估算

从图 5 所示本实验所获得的压缩表面上中心线上热流率分布可知:热流率开始随着弦长的增加迅速上升,达极大值后明显下降,流场为全再附型,其再附峰值热流率及其位置是局部来流条件、边界层流态和拐角几何参数函数。

根据 Simeonides 再附峰值热流率相关关系式^[1]

$$q_t/q_1 = B(Re_{x_t}^*)^a (p_t u_3 / p_1 u_1)^{1-a} (x_t / L_t)^n$$

其中

$$q_1 = 0.332 p_r^{-2/3} (\mu_1^* T_1 / T_1^* \mu_1)^{0.5} \rho_1 u_1 (H_r - H_w) Re_{x_t}^{-0.5}$$

$$Re_{x_t} = \rho_1 u_1 x_t / \mu_1, \quad Re_{x_t}^* = \rho_1^* u_1 x_t / \mu_1^*, \quad x_t = x_c + L_c + L_t$$

p_r 为普朗特数, q_t 、 p_t 和 u_3 为再附区气流的峰值热流率、峰值压力和速度, p_1 、 ρ_1 、 T_1 、

u_1, μ_1, H_1 和 H_w 分别为无干扰平板气流的压力、密度、温度、速度、粘性系数、恢复焓和

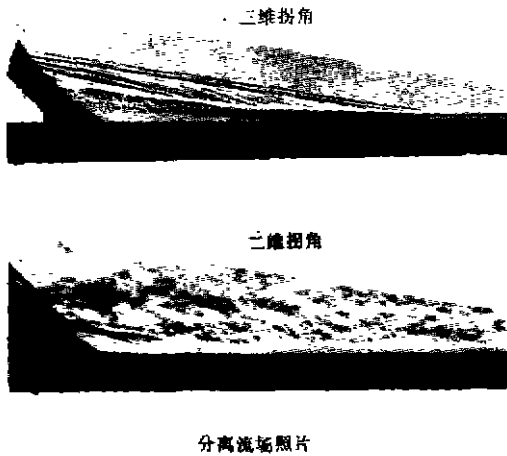


图4 分离流场照片

Fig. 4 Separation flowfield photographs

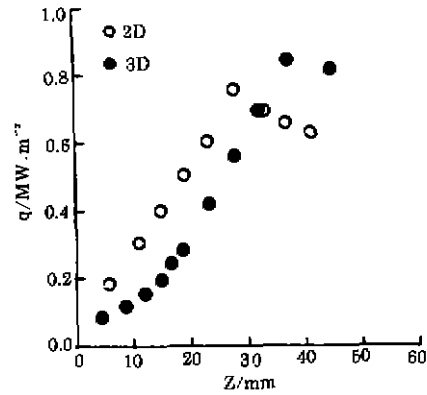


图5 二维和三维压缩表面中心线上热流率分布

Fig. 5 Heat transfer distributions along the centerline over 2D and 3D ramps

壁焓, 上标 * 为 Eckert 参考温度下的物理参数。 x_s 为分离点距平板前缘距离, L_s 和 L_r 分别为再附点与分离点、再附点与再附热流率峰值点的距离。对于纯层流分离, $a=0, B=1$ 和 $n=0.5$, 对于转捩或湍流分离, $a=0.3, B=0.072$ 和 $n=0.2$ 。

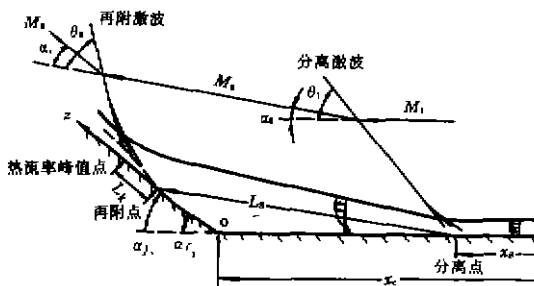


图6 压缩拐角对称面分流——再附模型

Fig. 6 Separation-reattachment model in the symmetric section for compression corner

和拐角前向平面中心线上热流率分布确定的再附峰值热流率位置 z_s , 用图中所示特征几何参数间关系和激波关系式可求出 L_s, x_s, p_s 和 u_s , 即得本实验实测的无量纲再附峰值热流率 $q_s^* \cdot q_1^{-1} / (p_s u_s / p_1 u_1)^{1-n} (x_s / L_s)^n$ 和相应的 $Re_{x_s}^*$ 。

将实验结果与 Simeonides 相关式(图7)作一比较, 不难发现本文数据全落在转捩/湍流分离数据带中, 这表明双激波模型和 simeonides 相关式是一个有效预测再附峰值热流率的模式。本实验再一次证明, 只有 $Re_{x_s}^*$ 足够低、激波与层流边界层相互作用才能形成纯层流分离, 反之为转捩分离。

目前, 使用该式的最大困难是 x_s, L_s 和 L_r 三个特征参数尚无一个准确预测方法。本文假设分隔流线为直线, 拐角前对称面分离——再附模型为双激波模型(图6)。图中 M_1, M_2 和 M_3 分别表示平板无干扰区、分离区和再附区气流 M 数, α_s, α_r 和 α_f 分别表示分离气流, 再附气流和拐角前向平面相对来流和平板表面的偏转角, θ_1 和 θ_2 分别表示分离激波角和再附激波角, x_s 和 x_r 分别为分离点与平板前缘、拐角前缘与平板前缘的距离。根据来流条件及光学显示测定的 x_s, θ_1

3 结 论

在 $M_\infty=7.8$ 、 $Re_\infty=3.5 \times 10^7/m$ 气流条件下,通过铂膜电阻温度计对平板边界层流态的观测,二维和三维压缩拐角诱导激波与边界层相互作用流场的显示和热流率分布测量,可得如下结论:

(1) 铂膜电阻温度计是观测边界层流态的一种有效工具,它不仅确定边界层转换起始和终止位置,而且能揭示转换的物理过程。

(2) 激波与层流边界层相互作用能促进边界层转换。只有 Re_{x^*} 足够低,相互作用过程才能是纯层流的。

(3) 在全再附分离流中,Simeonides 建立的无量纲再附峰值热流率与 Re_{x^*} 相关关系式有其广泛的应用基础,可用于层流、转换和湍流分离的再附峰值热流率工程估算。

参 考 文 献

- 1 Simeonides G, Haase W, Manna M. Experimental, analytical and computational methods applied to hypersonic compression ramp flows. *AIAA Journal*, 1994, 32(2): 301-310
- 2 Bushnell D M, Weinstein L M. Correlation of peak heating for reattachment of separated flows. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1968, 5(9): 1111-1112
- 3 Chapman D R, Kuehn D M, Larson H K. Investigation of separated flows in supersonic and subsonic streams with emphasis on the effect of transition. *NACA Report 1356*, 1958

PEAK HEAT TRANSFER OF REATTACHMENT FOR HYPERSONIC COMPRESSION CORNER FLOWS

Wang Shifen Xu Zhaoyi

Institute of Mechanics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100080

Abstract This paper presents flowfield structures and heat transfer distributions on compression ramp in the interaction between shock/hypersonic laminar and turbulent boundary layer induced by three- and two-dimensional compression corner. The nominal test conditions were freestream Mach number of 7.8 and unit Reynolds number of $3.5 \times 10^7/m$. The laminar-turbulent transition is promoted by the interaction process. The process doesn't exhibit fully laminar unless the reference Reynolds number based on the location of peak heat transfer on compression ramp is low enough. In hypersonic separated flow with fully reattachment, the peak heat transfer of reattachment may be predicted by the agency of Simeonides' universal correlation.

Key words hypersonic flow; separated flow; shock/boundary layer interaction; peak heat transfer of reattachment; compression corner.

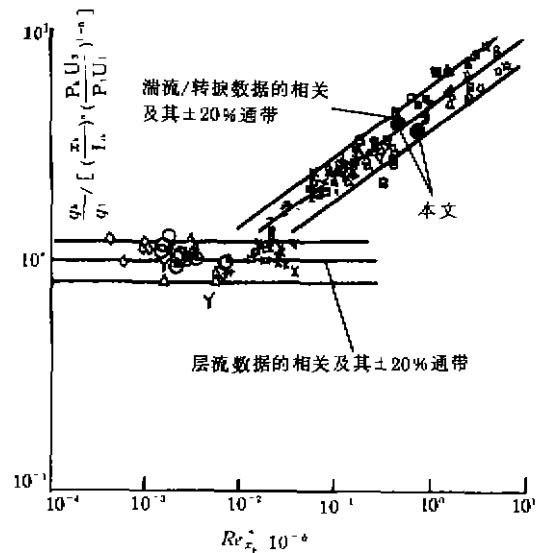


图7 再附峰值热流率相关
Fig. 7 Correlation of peak heat transfer of reattachment