

在激波风洞中转捩现象的观察

李静美

(中国科学院力学研究所)

1. 引言

众所周知,层流边界层的不稳定性分三个阶段:第一阶段由二维线性 Tollmien-Schlichting 波理论所制约(以下简称 T-S 波),已被许多实验所证实^{[1][4]}。第二阶段由于非线性和三维效应, T-S 波在向下游传播时,它的幅值不再按上述理论预计的那样变化,但仍为有限幅值。第三阶段 T-S 波失稳,也即层流边界层失稳,向湍流转捩,最后发展成湍流。第二、第三阶段无理论可循,只有借助实验。Klebanoff^[5]在低速平板上,用热线风速仪仔细地研究了层流边界层第三阶段的特征。发现当 T-S 波失稳时,突然地产生了一系列的“发卡涡”(hairpin eddy),这个涡有固有频率,它所引起的速度脉动为负值。Nagamastu^[5], Holden^[6]也在激波风洞中观察到,转捩区热流率或温度历程曲线上叠加着一些像“发卡”一样的尖峰,他们称为“猝发”(burst)。为了寻找这两种现象的内在联系,在 $M_\infty=5.0$ 来流条件下,观察了 9° 尖锥和平板边界层转捩区中“burst”形成,失稳和发展成湍流的过程,测量了它的频率,并与低速的结果进行了比较。

2. 实验设备、模型和测量系统

(1) 设备。平板边界层转捩实验是在 JF-4B 高超声速脉冲风洞中进行的^[1]。来流条件:总压 $P_0=32.4 \times 10^5 \text{ Pa}$, 总焓 $H_0=7.1 \times 10^5 \text{ J/kg}$, $M_\infty=5.2$, $Re_\infty=2.3 \times 10^7/\text{米}$ 。

尖锥转捩实验是在 JF8 激波风洞中进行的^[2]。来流条件: $M_\infty=5.3$, $Re_\infty=3 \times 10^7/\text{米}$, 总压 $P_0=45.1 \times 10^5 \text{ Pa}$, 总焓 $H_0=7.5 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。

(2) 模型。 9° 尖锥模型和平板,攻角均为零度。平板模型宽 300 毫米,长 550 毫米,在距前缘 20 毫米处有一个深 2 毫米、宽 2 毫米的横向槽。

(3) 测量系统。表面热流率用薄膜电阻温度计测量。数据采集用 DM-7100 瞬态记录仪。数据处理用 SM-2100 微处理机。

3. 转捩现象的观察

9° 尖锥在 $M_\infty=5.2$, $Re_\infty=3 \times 10^7/\text{米}$ 来流条件下,锥面边界层转捩区壁面热流率测量结果见图 1。图 1 右边是锥面上各测点热流率的时均值,实线是用平板参考焓法计算的结果,计算值与实验点基本符合。尽管由于测点距锥尖较远,未能测到完全层流的情况,但整个转捩过程还是很清楚地呈现出来。图 1 左边是锥面典型位置上热流率的

本文于 1985 年 10 月 22 日收到, 1986 年 3 月 25 日收到修改稿。

史。第一个测点位于距锥尖 $x=142.6$ 处,在这点的热流率曲线上,叠加着许多周期性的正向尖脉冲,说明边界层中出现了某种扰动。由于这些正向尖脉冲,使这点的平均热流率值比层流理论估算的值高,可见图 1 右边第一个点。当这些扰动向下游移动时,很快,这种有规律的尖峰已经看不清楚了,幅值大大减小,见图 1 左边第二点($x=149.8$)的热流率历史,这点距第一点仅几个毫米,可见这种扰动稳定性极差。当 $x=158.1$ 时,

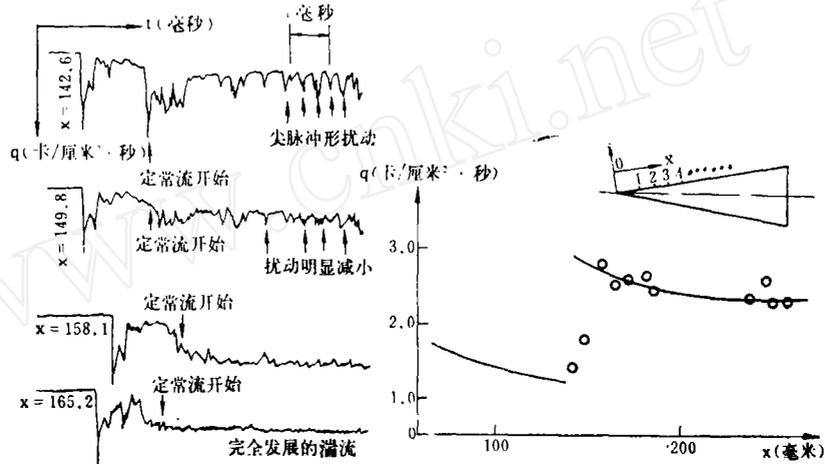
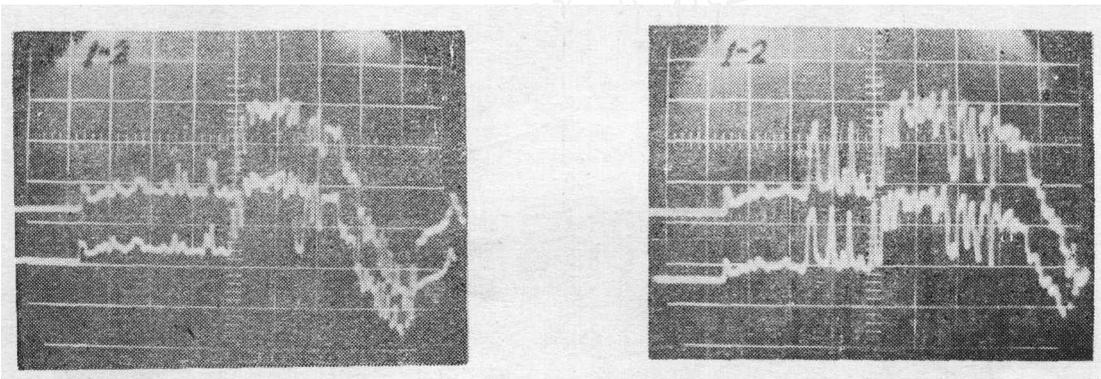
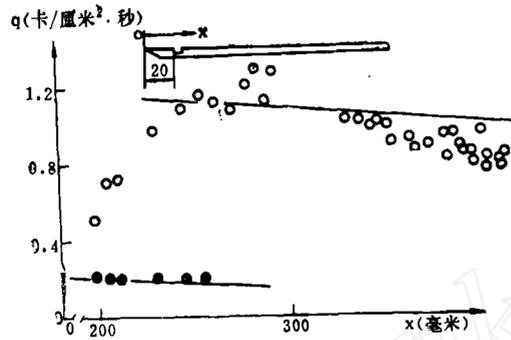


图 1 9° 尖锥转换区热流率历史和分布曲线

即第三点,热流率的时均值大大增加,已经达到湍流值,但还有一些不稳定、不规则的扰动存在。当 $x=165.2$ 时,这点的热流率历史已经呈现出完全发展的典型湍流曲线,即在平均值上叠加着一些高频随机脉动。热流率的时均值也达到湍流平板参考焓法计算的结果。

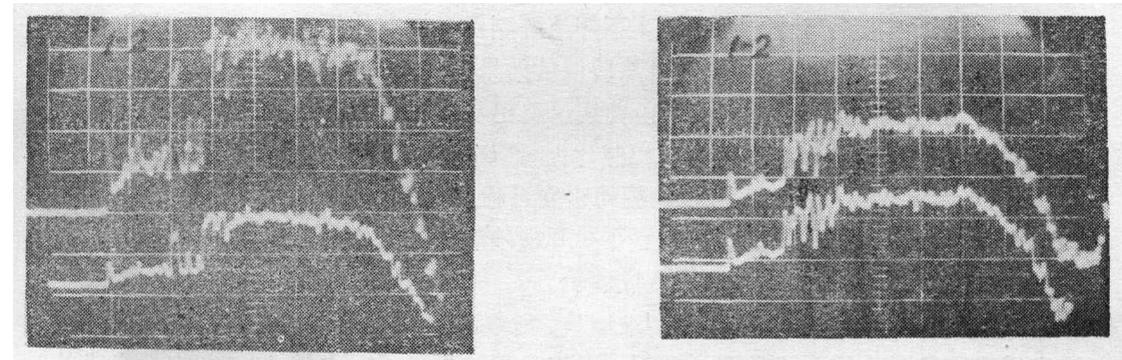
平板边界层转换区热流率的测量结果见图 2。图 2 上部是各测点热流率的时均值随 x (x 为距平板前缘距离)的变化。图 2 下部是各测点热流率的历史。由于在平板前缘开有扰动槽,所以,平板的结果与上述自然转换的结果不完全相同。每个测点前半段曲线与后半段曲线截然不同,每个测点前半段曲线反映出与尖锥相同的转换过程,同一测点似乎也反映出转换过程。这一现象在第二幅照片上可以清楚地看出来,(上线距前缘 $x=208$, 下线距前缘 $x=228$,)在约 1 毫秒的流动建立过程后,出现了较“光滑”的层流曲线,接着周期性的尖脉冲式的扰动出现了。突然在 3.6 毫秒后热流大增,曲线呈现过渡状态,似乎那些尖脉冲立即消失了,使边界层变成湍流。

为了进一步揭示这一现象,分别求出前六个测点热流曲线前半段(不包括尖脉冲的值)和后半段的时均值,标在图 2 上部,黑点代表前半段的时均值,圆圈代表后半段的时均值。可以看出前半段曲线的热流时均值与层流估算结果相符。后半段的热流时均值大大高于层流计算值,但仍未达到湍流值,为过渡状态。这似乎更加证明了同一测点的热流率历史也反映的是转换过程。后半段热流率的突然增加,可能是由平板前缘的扰动槽造成的。扰动槽形成的涡尺度大、速度慢,但扰动强度显然要比“burst”大,因此当它追上“burst”后,就将 burst 淹没了。



上线 $x = 196$
下线 $x = 203$

上线 $x = 208$
下线 $x = 228$ (注意: 1.6毫秒后出现的发卡形尖锋)



上线: 242
下线: 252 (注意上线1.8毫秒处的尖锋
为新产生的, 下线也衰减了)

上线: $x = 266$
下线: $x = 268$ (充分发展的湍流)

图 2 平板转换区热流率历史和分布曲线

4. 讨论

$$Re_c = 1 \cdot 10^6 / \text{米}$$

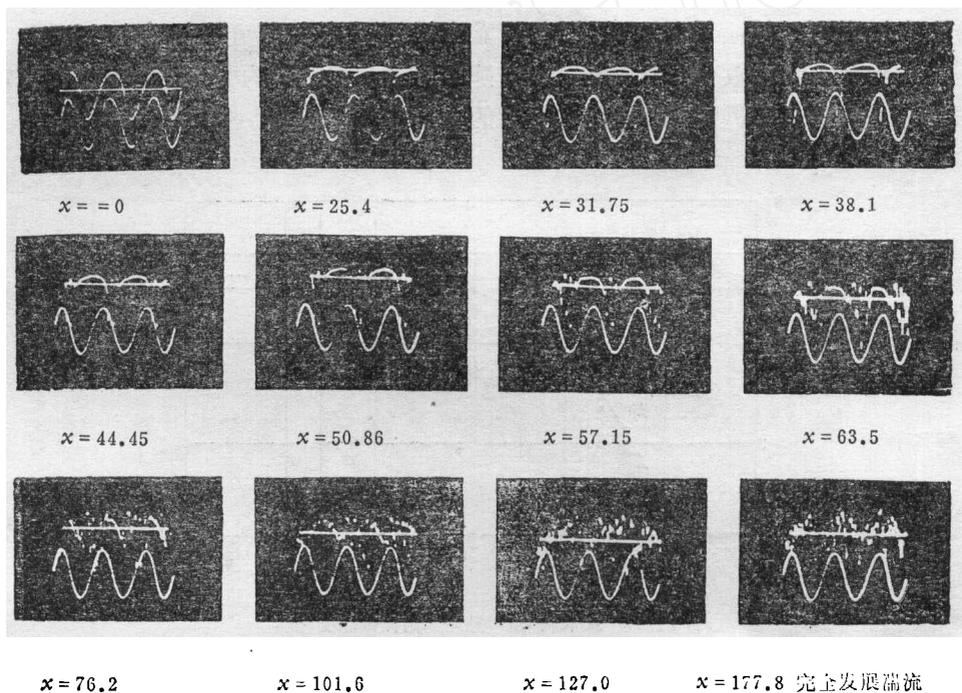
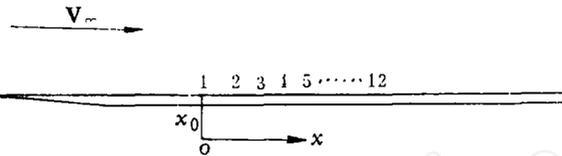


图3 低速平板转换区 x 方向速度脉动的历史
上线为热线讯号， 下线为振动带讯号

为了揭示这些扰动的实质，把上述结果与 Klebanoff 在低速下作的类似研究进行了比较。取 Klebanoff 在低速平板层流边界层转换区，用热线风速仪测得的 x 方向速度脉动 u' 的历史，见图3。图3上每幅照片中，下线是在平板不同位置所测速度脉动的历史，上线是装在前缘的振动带发出的标准讯号。可以看出，图3所反映的转换过程与图1很相似，扰动的产生都是突然的、大幅值的、尖脉冲型、稳定性极差，而且它们的失稳都伴随着湍流的形成。

进一步讨论这种扰动——“发卡涡”（以下将借用这个词来表示转换过程出现的这种尖脉冲型扰动）——的速度和频率。Klebanoff 认为“发卡涡”是由 S-T 波失稳形成的。根据线化理论，“发卡涡”的速度应等于临界层的速度。下表是不同马赫数下临界层速度 V_c 和发卡涡速度 V_v 的比较。前者由计算得到，后者由测量得到。 V_∞ 为边界层外缘速度。

M_c	3.5	8	4.7	5.2	10.2	低速
V_c/V_e	0.56	0.89	0.77	0.81	0.98	0.325
V_h/V_e	0.60	0.90	/	/	~0.85	0.336
来源	[9]	[7]	本	文	[6]	[8]

由表上结果看出,从低速到高超声速,“发卡涡”的速度和临界层的速度都符合得很好。这一事实说明,在超声速和高超声速时,“发卡涡”产生的机制可能与低速时相同。

转换现象与雷诺数有着密切的关系,那么伴随转换出现的“发卡涡”也应该与雷诺数有关,图4是“发卡涡”频率随当地雷诺数的变化曲线。

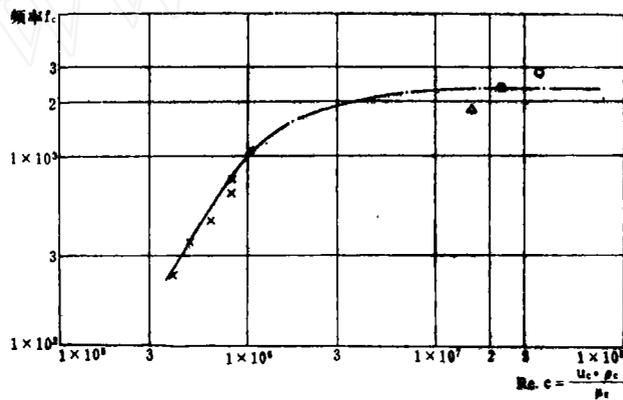


图4 “发卡涡”频率随局部雷诺数的变化

符号	当地M数	模型	来源
x	低速	平板	[8]
O	4.7	9°锥	本文
●	5.2	平板	本文
△	10.2	6°锥	[6]

由图可见,在低速时,“发卡涡”频率随来流雷诺数增加很快,来流雷诺数从 4×10^3 变为 1×10^4 ,“发卡涡”频率 f_c 从 $0.23K$ 变化为 $1K$,在超声速时,频率变化却不大。若由 Klebanoff 在低速下得到的结果推算,在目前的来流雷诺数下(3×10^7 /米)“发卡涡”的频率应该是几百千周,而目前只有 2 千周左右。

5. 结论

在超声速和低速时相同,边界层在转换时会形成“发卡涡”。它们在转换区的热流率曲线和脉动速度曲线上以“发卡”形尖脉冲表现出来,由于它们的失稳使边界层发展为湍流。低速时,它们的频率随雷诺数变化较大;超声速时,频率几乎不变。“发卡涡”的速度约等于临界层的速度,超声速与低速相同。

参 考 文 献

- [1] 唐贵明, 平板突起物干扰区热特性的实验研究, 力学研究所报告, 82.12。
[2] 李静美, 湍流底部热流率随来流的变化, 力学研究所报告, 83.4。
[3] Schubauer, G.B.; *J. A. S.*, 14, 2 (1947).
[4] Dougherty, N.S.; *AIAA paper* 80-0154.
[5] Nagamatsu, H.T.; *AIAA J.* 13, 1. (1965).
[6] Holden, M.S.; AD-A065173.
[7] Nagamatsu, H.T. et al; *J.F.M.* 24 (1966), 1~13.
[8] Klebanoff, P.S. et al; *J.F.M.* 12 (1962), 1~34.
[9] Schubauer, G.B.; *NACA Rep.* No.1289. (1956).

THE OBSERVATION OF TRANSITION IN SHOCK WIND TUNNEL

Li Jingmei

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, China*)

Abstract

The observation of "burst" during transition on flat plate and 9° -cone is made in shock wind tunnel at $M_\infty=5.2$, $Re_\infty=2.3\times 10^7/m$ and $M_\infty=5.3$, $Re_\infty=3\times 10^7/m$. The "burst" is compared with "hairpin" eddy in low-speed. Obviously the mechanism of, "burst" and "hairpin" eddy are the same. Their speed equals critical layer's one. Their frequency increases with Reynolds number in Low-speed, but nearly no changes in supersonic and hypersonic. The break down of the "burst" results in turbulence.