

平板湍流边界层内的锥形涡¹⁾²⁾

孙 葵 花 舒 玮

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘要 用拟三维流动显示技术观察与分析了平板边界层内的流动结构, 讨论了雷诺数 Re 在 300–650 范围内大尺度结构间的联系, 并指出锥形涡的形成是边界层中一系列复杂运动现象产生的关键。

关键词 湍流边界层, 相干结构, 拟三维流动显示, 锥形涡, U 形涡

1. 引言

从 1967 年 Kline 等^[1]发现固壁边界层底层条纹结构以来, 用流动显示技术发现了边界层中许多现象, 如湍斑, 流向涡, 喷射, 扫掠等. 这些现象的发现对拓扑分析和条件采样等方法有指导作用. 但是这些大尺度运动间的联系是什么? 各种条件采样方法能否反映同一种大尺度结构? 数值计算得出的涡结构与真实湍流结构是否一致? 这许多问题一直困扰着人们. 尽管有人如 Smith 等^[2]尝试研究人工形成的 U 形涡, 但不同的生成机制及环境条件决定了它的局限性. 本文用拟三维流动显示技术, 对平板边界层中大尺度结构及其演化过程进行分析, 强调锥形涡的形成是边界层复杂运动现象产生的关键。

2. 实验装置及实验条件

实验使用有机玻璃制成的循环水槽, 实验段 $130 \times 14 \times 10 \text{ cm}^3$. 内放一前缘加工成半尖劈形的平板. 来流湍流度小于 3%, 流速为 10 cm/s 和 15 cm/s.

用两根阳极丝 (铂丝) 组成拟三维流动显示, 即: 两根阴极丝互相垂直或平行, 放于不同的流向或法向位置, 利用光源的变化及脉冲信号的变化从不同角度进行观察。

3. 实验过程

距极前缘 80 cm, 法向高度 1 mm 处放一展向阴极丝, 加上脉冲信号后可观察到平板边界层底层条纹结构及其变化. 由于低速条纹能维持较长的可见时间, 我们给阴极丝加上直流信号并跟踪低速条纹进行观察。

(1) 一个低速条纹的演化 ($U_\infty = 10 \text{ cm/s}$)

1) 低速条纹向下游发展过程中, 会突然出现斜向高动量下扫, 形成一个锥形涡. 涡轴与流向展向及法向均有夹角, 涡头部在下游处. 下扫过程中流向速度变慢, 使上

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目的一部分。

²⁾ 锥形涡为区别以往的流向涡和 U 形涡, 而且它的包络是类似锥形的。

本文于 1992 年 11 月 7 日收到第一稿, 1993 年 2 月 15 日收到修改稿。

游流体追上来, 流向尺寸变小, 同时涡头都抬升到外层, 即涡轴与壁面夹角变大, 最大可达 45° , 这一变化过程如图 1(a) 所示, 也可见照片 1.

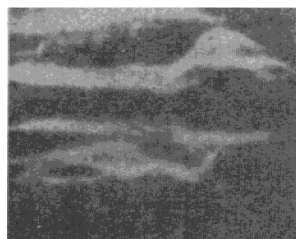
2) 锥形涡头抬升到外层较高动量区, 使局部瞬时 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 很大, 强剪切而形成不完整的 U 形涡, 如图 1(b) 所示.



(a)



(b)



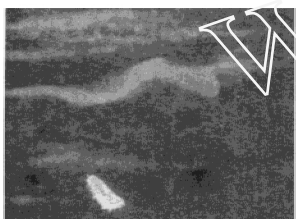
(c)



(d)

照片 1 锥形涡形成及演化

Picture 1 Illustrating formation and evolution of cone-shaped vortex



(a)



(b)

照片 2 同一低速条纹形成的两个反向锥形涡

Picture 2 Two opposite cone-shaped vortex from one low-speed streak

3) 在 1) 中出现两个或多个斜向下扫, 而且经常依次方向相反, 类似 1) 的发展过程形成一对反向旋转的锥形涡. (象鼻子一样的涡对) 如图 1(c) 和照片 2(a), (b) 所示, 涡对头部已到对数区或更外区域.

4) 在 3) 中的鼻形涡对头部, 由于局部高剪切而形成一个完整的 U 形涡, 两个涡腿伸得很长, 通常涡腿的展向距离很小. 如图 1(d) 所示.

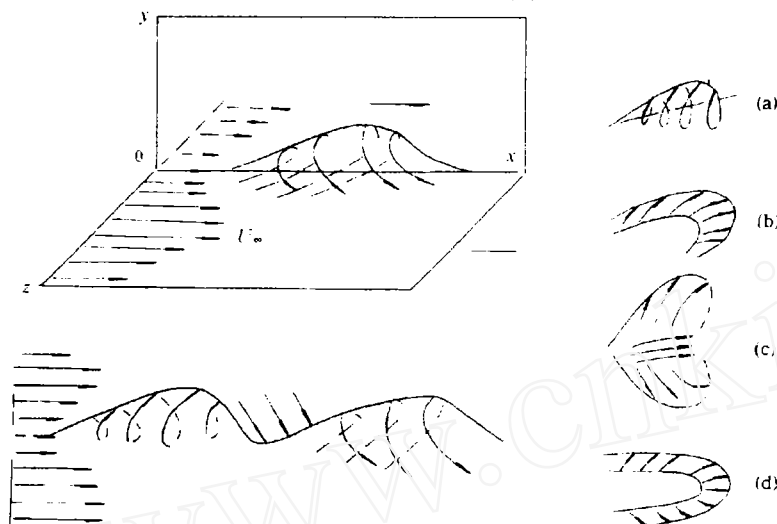


图 1 锥形涡形成及演化

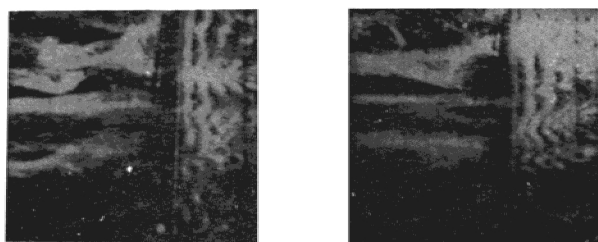
Fig.1 Formation and evolution of cone-shaped vortex

(2) 两个低速条纹相互作用 ($U_{\infty} = 15\text{cm/s}$)

随着流速变大, 低速条纹合并, 消失与再生变得剧烈, 相邻两个低速条纹间相互作用增强. 每个低速条纹各自产生的斜向下扫 (锥形涡) 并不对应, 但由于锥形涡产生的展向及法向动量交换会诱导邻近新的涡结构的产生. 如果相邻低速条纹产生的锥形涡方向相反, 则互相削弱或消失, 否则被加强. 流速大时锥形涡产生的频率变高. 见照片 1(c)(d).

(3) 两根阴极丝的情况 ($U=15\text{cm/s}$)

为了验证锥形涡结构的普遍性及观察其细部演化, 在平板不同流向位置平行放置两根展向阴极丝, 上游丝称丝 I, 下游丝称丝 II, 相距 20cm, 两丝同时加上脉冲信号, 则两丝处各自产生快慢相间的条纹结构及 (1) 中所述情况. 若将两丝产生的条纹结构对应起来观察, (丝 I 加直流信号) 就会发现: 当丝 I 下游的某一慢速条形成锥形涡或锥形涡在演化过程中碰到丝 II, 丝 II 处局部条纹结构会出现展向快速移动, 条纹中断, 低速条纹集中、抬升等常见现象. 否则丝 II 的低速条纹会与丝 I 的低速条纹相接续, 即没有剧烈的条纹扭摆合并, 抬升等现象, 当丝 II 距壁面 2mm y^+ 约为 15 时, 这种现象表现得最强烈. 从录相上可明显看到这一情况, 照片 3(a)(b) 可见略见一斑, 由于丝 I 产生的氢泡经过丝 II 时会污染丝 II, 使照片质量变差, 但图中可见亮条对应当地的低动量流体.



照片 3 组合阴极丝的情况
Picture 3 Compose of transverse bubble-wires

(4) 实验段截面上图像

眼睛可观察三维图像,但录相或照片只能反映平面,因此我们从另一角度进行观察.从剖面图(见照片 4)可见,低速条的抬升表现为流向涡,抬升高度可达边界层厚度量级,照片 4(b)为单个锥形涡,照片 4(a)(c)为同一低速条产生的依次反向旋转的锥形涡,它们经常相继通过同一剖面.从剖面图中也可见到相邻低速条产生的流向涡的相互作用(见图 2).



照片 4 锥形涡剖面图
Picture 4 Section of cone-shaped vortex

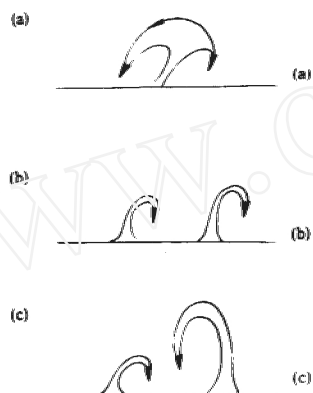
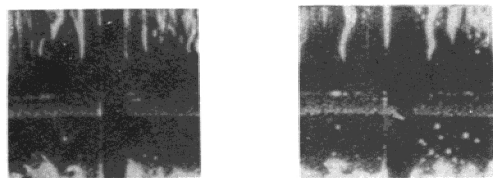


图 2 (a) 同一低速条纹产生的反向锥形涡剖面图
(b),(c) 不同低速条纹产生的锥形涡剖面图
Fig.2 (a) Section of opposite cone-shaped vortex from one low-speed streak
(b),(c) Section of cone-shaped vortex from different low-speed streak

(5) 俯视图与剖面图同时观察

在实验段上方与水平 45° 角斜放一平面镜, 用来观察俯视图. 照片 5(a)(b) 为用一台摄像机同时观察得到的 (上半部分为从平面镜中观察到的俯视图, 流体向上流, 下半部分为剖面图, 中间水平条为水面反射, 垂直条为轴流泵中轴) 从中可见条纹扭摆及锥形涡与剖面图中流向涡对应的情况. 当流速小时无条纹结构, 剖面图中亦看不到流向涡; 流速增大条纹结构形成, 就可观察到锥形涡及流向涡; 流速再变大, 条纹结构的变化及锥形涡的形成变剧烈.



(a) (b)
照片 5 俯视图和剖面图同时录像
Picture 5 Quasi-3D flow visualization

4. 测量与分析

实验参数为: 来流速度 $U_\infty = 15\text{cm/s}$, 边界层名义厚度 $\delta \approx 2\text{cm}$, 摩擦速度 $u_\tau \approx 0.83\text{cm/s}$, 阴极丝距片光截面 12cm , 经验条纹宽度 $\lambda = 100 \frac{\gamma}{u_\tau} \approx 1.2\text{cm}$.

经验猝发频率: 用公式 $\frac{U_\infty}{\delta \cdot f_1} \approx 5$ (详见 [4]) 得猝发频率 $f_1 = 1.5\text{Hz}$, 用公式 $\frac{\gamma \cdot f_2}{u_\tau^2} = 0.0102$ (详见 [5]) 得猝发频率 $f_2 = 0.69\text{Hz}$.

从近 140 分钟的录像资料人工计数测得: 流向涡平均间距为 1.3cm , 发生频率为 0.70Hz , 喷射高度可达 1.2cm 或更高. 在远下游由于卷吸挟带作用, 涡尺度会变大.

Robinson 1990 年 [6] 和 Hussain 1992 年 [7] 分别得出湍流边界层内涡结构的理想模型如图 3 所示, 本文认为湍流边界层内外层不是孤立的, 其动量交换是强烈三维性的, 展向移动起着不可忽视的作用. 而锥形涡是边界层近壁区表现最强烈的一种结构. 它产生展向动量交换缓解快慢条纹间的剪切, 而且使低动量流体迅速集中抬升, 增强了内外层动量交换, 外层高动量流体流入, 为新的涡结构产生创造必要的条件.

我们可做如下分析: 湍流边界层中存在壁面阻尼引起的法向速度梯度, 当快慢条纹间剪切足够强时, 产生二维法向涡的尺度从壁面向外会由小变大, 而且涡轴向下游倾斜, 某些因素会使涡轴偏离流向一个小角度, 即如上面观察到的具有强烈三维性的锥形涡.

由于低速条纹两侧的高动量流体速度并不一定相等, 这种锥形涡并非两侧同时产生, 而是受环境的诱导, 一侧的锥形涡使低速条纹展向移动, 相继诱发另一侧锥

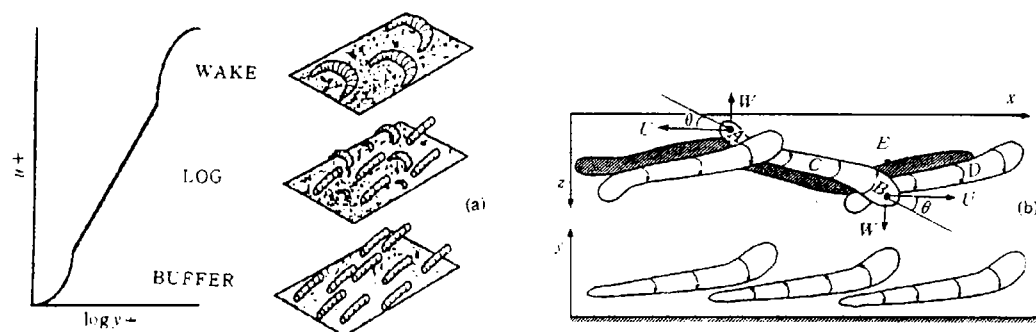


图 3 数值模拟结果

(a) Robinson(1991) 湍流边界层不同区域涡结构理想模型

(b) Hussain(1992) 底层条件采样得出的理想模型

Fig.3 Results of Numerical Simulation

(a) Robinson(1991) (b) Hussain(1992)

形涡的产生, 这就是低速条纹的展向扭摆及剖面图上的同一低速条纹产生的反向涡对, 两涡大小未必相同。

上面的过程具有准周期性性质。

5. 结论

对大尺度结构的准确描述, 影响着各种条件采样判据的构成和对湍流控制的实现。在反复观测的基础上, 对这种类似锥形的涡结构进行了分析, 在低雷诺数下得出以下结论:

(1) 锥形涡结构是边界层底层表现很强烈的一种结构, 它由展向剪切和法向速度梯度而产生, 同时又使低动量流体展向移动和抬升及高动量流体流入, 完成法向动量交换, 这一过程具有准周期性性质, 其平均周期与猝发周期十分接近。

(2) 同一低速条纹经常会依次产生反向旋转的锥形涡, 涡的尺度不一定相同。

(3) 用拟三维流场显示能更有效地揭示流动现象, 但湍流边界层内流动现象十分复杂, 需要实验技术的改进以得到全场三维准确的流动数据。

致谢: 在实验进行过程中得到了周恒教授的建议和有益指导, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Kline SJ, Reynolds WC, Schraulo FA, Rundstadler PW. The structure of turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1967, 30:741-773
- [2] Acarlar MS, Smith CR. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1987, 175:1-83
- [3] 舒玮等. 湍流边界层的猝发频率. *力学学报*, 1989, 21(4):391-305
- [4] Kim HT, Kline SJ, Reynolds WC. The production of turbulent near a smooth wall in a turbulent boundary laryer. *J. Fluid Mech.*, 1971, 50:133-160
- [5] 连其祥等. 湍流边界层中马蹄涡的形成方式. *力学学报*, 1992, 24(2):145-151
- [6] Robinson SK. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1991, 23:601-640

- [7] Jeong J, Hussain F. Coherent Structure near the wall in a Turbulent Boundary Layer. Proc of The 5th Asian Congress of Fluid Mech., August 10-14, 1992, Taejon Korea. 2:1262-1265
- [8] Head MR, Kline SJ. New aspects of turbulent boundary layer structure. *J. Fluid. Mech.*, 1981, 107:297-338

THE CONE-SHAPED VORTEX STRUCTURE IN FLAT PLATE BOUNDARY LAYER

Sun Kuihua Shu Wei

(*Dept. of Mech., Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract The quasi-3D flow visualization method is used to study the coherent structure in the flat plate boundary layer at low Reynolds number. It was found that the formation of the cone-shaped vortex plays an important role in the large eddy structures of turbulent boundary layer.

Key words turbulent boundary layer, coherent structure, visualization, cone-shaped vortex, hairpin vortex