

文章编号: 1672-9897(2008)02-0068-06

# 逆压梯度转捩边界层流动结构显示

郭 辉, 彭 艺, 李志勇, 王海文, 连祺祥

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:**采用氢气泡时间线方法, 对逆压梯度条件下人工激发平板边界层转捩过程中扰动的发展和演化特性进行观测, 其中引入计数器技术实现对不同位置的平面图及侧面图的流动显示结果在同一相位条件下进行分析。除了 T-S 波和发卡涡等典型的流动结构, 试验结果还揭示出转捩过程中二次发卡涡的再生、展向多个发卡涡的出现以及流动破裂等重要现象的细节和机制。

**关键词:**边界层; 转捩; 拟序结构; 逆压梯度; 流动显示**中图分类号:** O357; V211.1<sup>+</sup>9      **文献标识码:** A

## Visualization study on the flow structures in the transitional boundary layer under an adverse pressure gradient

GUO Hui, PENG Yi, LI Zhi-yong, WANG Hai-Wen, LIAN Qi-xiang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics &amp; Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** By using hydrogen bubble time-line method, the characteristics and evolution of flow structures in an excited transitional boundary layer under an adverse pressure gradient were studied. In the experiments, a digital indicator was used, by which the visualization results of plan view and side view at different position can be analyzed coherently at the same phase of the induced perturbation. Besides the T-S wave and hair-pin vortex which is typical in the transitional boundary layer, the results highlights some important detail phenomena and mechanisms of the re-generation of second hair-pin vortices, the appearance of multiple streamwise vortices, as well as the initial flow breakdown.

**Key words:** boundary layer; transition; coherent structures; adverse pressure gradient; flow visualization

## 0 引言

湍流及转捩仍是物理学界尚未解决的极少数几个难题之一。上世纪 60 年代末湍流边界层中拟序结构的发现, 改变了对湍流的传统概念, 使湍流和边界层减阻研究进入了新阶段。

边界层规则转捩(另一种为旁路转捩, 前者在小扰动条件下产生; 后者发生在大扰动条件)过程中, 湍流的产生过程可细分为 5 个阶段<sup>[1]</sup>: (1)感受性阶段; (2)线性不稳定阶段; (3)弱非线性不稳定阶段; (4)非线性后期阶段 (late nonlinear stages) (涡结构形成); (5)超后期阶段 (super late stages), 即最终流动紊乱化(也称作流动破裂)转捩到湍流。转捩后期(包括非线性后期和超后期)流动特性与充分发展湍流有强相似性<sup>[2]</sup>。于是边界层转捩后期和湍流边界层问题的关

键都归结为湍流自持续和湍流生成机理的研究。

涡结构是边界层转捩后期和湍流边界层拟序结构的核心。其他拟序结构与涡结构的形成、发展和破裂有紧密关系<sup>[3]</sup>。发卡涡是典型涡结构, 在湍流及转捩边界层中起主导作用。这里的“发卡涡”是一广义的称谓, 包含对称和非对称发卡涡、马蹄涡、Ω 涡、Λ 涡等, 因为这些结构都是同一基本流动结构在不同流动条件、不同观测手段时的不同表现。在湍流边界层中, 由于湍流脉动影响, 很少观测到完整的发卡涡。涡结构表现为多种形式, 如非对称发卡涡(单腿发卡涡), 单独流向涡(发卡涡腿)及 Ω 涡(发卡部分头部)等等。自持续本质上是涡结构的再生和破裂的动态循环过程。Smith 根据一系列在稳定层流中平板表面注入低速流体(强扰动非激发)生成的发卡涡发展演化, 提出一种二次发卡涡再生模型<sup>[4]</sup>。但在转捩和充

收稿日期: 2007-11-06; 修訂日期: 2008-02-05

基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划资助。

作者简介: 郭 辉(1967-), 男, 黑龙江省黑河市, 副教授. 研究方向: 实验流体力学. E-mail: guohui@buaa.edu.cn

分发展的湍流边界层中从未得到直接验证。

研究转捩过程流动结构及其演化除其本身的理论和工程价值外,对于研究湍流自持续和湍流生成机制是一个较理想的途径,因为与充分发展湍流边界层相比转捩阶段的流动不受湍流脉动的干扰,特别是在人工激发转捩边界层中,扰动和流动结构的发生发展在时间和空间上有较严格的周期性和重复性,便于实验实施。研究逆压转捩有实际工程意义,因为在工程中绝大部分转捩发生在逆压梯度边界层条件下。与零压力梯度平板边界层相比,逆压梯度边界层更厚,涡结构流向拉伸更强<sup>[5]</sup>,这些也有利于实验观测。

通过人工弱扰动激发逆压梯度平板边界层转捩,利用氢气泡方法在不同流向位置和法向位置得到平面图和侧面图,试验结果揭示了转捩超后期二次发卡涡产生、多个流向涡形成以及初始流动紊乱化等重要流动现象和演化机制。

## 1 实验装置

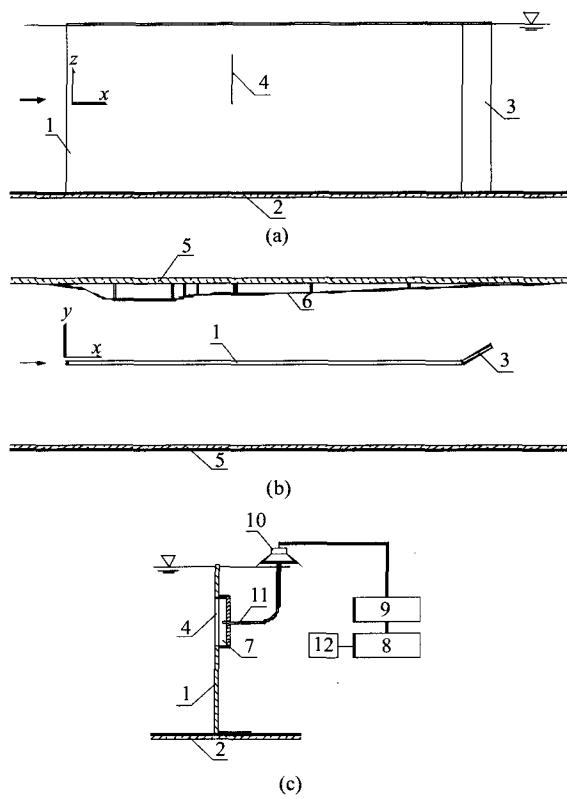
实验在北京航空航天大学多用途低速水洞中完成。水洞试验段尺寸  $1.2m \times 1.0m \times 16m$  (高  $\times$  宽  $\times$  长)。实验装置如图 1 所示。

### 1.1 实验平板和逆压梯度

有机玻璃实验平板垂直立于水洞实验段底壁,如图 1(a)所示。平板厚 20mm, 长 2.4m, 宽 1m。前缘为 3:1 半椭圆形。后缘装有 200mm 宽尾鳍, 调整其偏角可实现对平板前缘驻点位置微调, 保证平板工作面的边界层为稳定层流状态。扰动源为宽 2.5mm 长 300mm 的展向狭缝, 距实验平板前缘  $x_s = 1000mm$ 。坐标系的设置如图 1 所示,  $x$  指自由流方向,  $y$  和  $z$  分别指平板法向和展向。平板前缘  $x = 0$ , 平板壁面  $y = 0$ , 狹缝展向中心  $z = 0$ 。平板边界层外自由流逆压梯度选取 Hartree 系数  $\beta_H = -0.115$ , 属中等程度逆压梯度。沿平板工作面对面的试验段侧壁装有一流向收缩/扩张曲面板, 如图 1(b)。在实验平板和曲面板之间形成二维槽道, 曲面板扩张部分外形曲线可调整, 以保证  $\beta_H = -0.115$ 。扩张部分平板边界层外自由流速度沿流向分布测量结果如图 2, 与理论曲线相吻合。图中  $U_e/U_0$  为自由流速与喉道流速之比。本次实验自由流速度分布不均匀度 0.4%, 湍流度 0.5%。

### 1.2 扰动装置

如图 1(c), 人工扰动源于数字信号发生器产生的正弦波, 通过功率放大器驱动一扬声器, 扬声器产生的周期性压力波动通过一个内径  $\phi 12mm$  的圆管导



1 实验平板 2 水洞底壁 3 尾鳍 4 扰动源狭缝 5 水洞侧壁  
6 曲面板 7 扰动源驻室 8 数字信号发生器 9 功率放大器  
10 扬声器 11 圆管 12 计数器

图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Sketch of the test setup

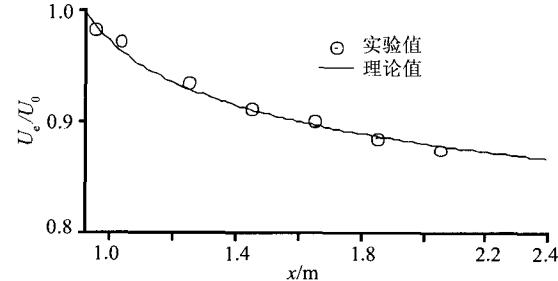


图 2 平板边界层外自由流速度沿流向变化  
Fig. 2 Streamwise velocity distribution of the freestream outside the boundary layer

入与狭缝相连的驻室。驻室内的水在压力波动作用下在狭缝处形成周期性零质量流量微弱射流, 以此激发边界层内 T-S 波。圆管出口位于狭缝展向中心, 扰动稍强, 相当于在二维扰动基础上叠加一局部三维扰动, 调制发卡涡形成的展向位置。

实验观测采用平面图和侧面图两种方式, 平面图(如图 4)观测时氢气泡丝平行平板垂直来流布置, 观测方向垂直于平板; 侧面图(如图 3(a)和(b))实验中氢气泡丝垂直平板布置, 观测方向平行于平板垂直于来流。利用数字信号发生器的计数器输出实现液晶

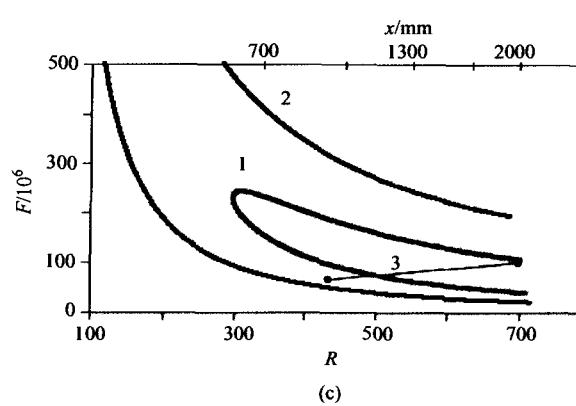
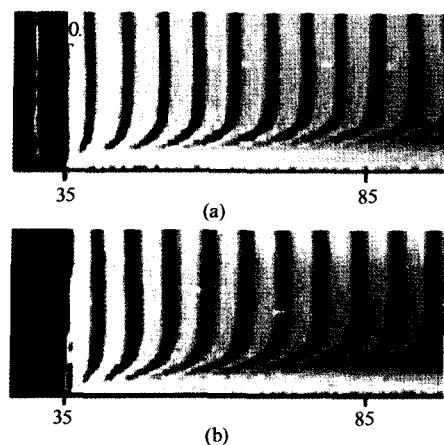


图3 平板边界层状态和扰动条件

Fig.3 State of the boundary layer and the perturbation condition (a) and (b) show the velocity profile across the boundary layer before and after the perturbation excited, and the perturbation condition is indicated by "3" in (c), where "1" and "2" denote the instability curves corresponding to  $\beta_H = 0$  and  $-0.115$  respectively.

数字识别,记录在观测图像中,用以判断对应于扰动的相位。当流动现象周期性较强时,这种方法可以将不同观测位置的平面图和侧面结果依照相位相同的条件对应起来,以揭示流动结构的三维性质。氢气泡丝为 $\phi 20\mu\text{m}$ 的铂丝,氢气泡时间线显示结果中的时间线频率都为12Hz。利用摄像机(25帧/s)记录显示图像并存入计算机。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 初始边界层和扰动条件

未加扰动时,对平板边界层进行平面图和侧面图观测,结果表明在本次实验的主要观测区域 $x - x_s = 0 \sim 600\text{mm}$ ,边界层基本保持稳定层流状态。图3(a)给出未加扰动时扰动源后 $x - x_s = 35\text{mm}$ 处的侧面图时间线显示结果,显示出的速度分布呈典型的层流边界层特征。图3(b)是施加扰动后同一位置的侧面图,与图3(a)相比,差异并不明显,表明施加的为弱扰动,不会引起流动分离和旋涡,但足以激发T-S波(见下文)。所加扰动的条件见图3(c),图中纵坐标 $F = 2\pi f v / U_e^2$ 为无量纲频率,横坐标 $R = (U_e x / \nu)^{1/2}$ ,

其中 $\nu$ 为运动粘性系数, $U_e$ 为边界层外自由流速度, $f$ 为扰动频率。图中“1”为零压力梯度平板(Blasius)边界层的不稳定曲线;“2”为逆压梯度 $\beta_H = -0.115$ 条件下的不稳定曲线;“3”为本次试验中扰动参数沿平板流向的表达,扰动源处 $F = 88$ , $R = 415$ ,外加激发扰动处于不稳定区中。

### 2.2 T-S 波和发卡涡

在本次试验中,观测到同以往零压力梯度平板边界层弱扰动人工激发转捩实验<sup>[6]</sup>相同的T-S波和发卡涡,分别见图4和图5,各给出氢气泡丝位于 $x - x_s = 50\text{mm}$ 和 $200\text{mm}$ 时一个扰动周期( $T = 1.67\text{s}$ )内平面图时间线的流动显示结果。在 $x - x_s = 50\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 之间,见图4,沿流向时间线间距显示出明显的周期性疏/密变化,A区疏,B区密,表明流向速度周期性变化,这是T-S波的典型特征。 $x - x_s > 150\text{mm}$ ,T-S波开始卷成展向涡,表现为上游的时间线逐渐赶上并超越下游时间线。狭缝展向中部与其他展向位置现象略有差别,因为当地扰动稍强。

发卡涡在 $x - x_s = 300\text{mm}$ 以后开始形成,图5清晰显示出一个扰动周期内,发卡涡的形成和发展过

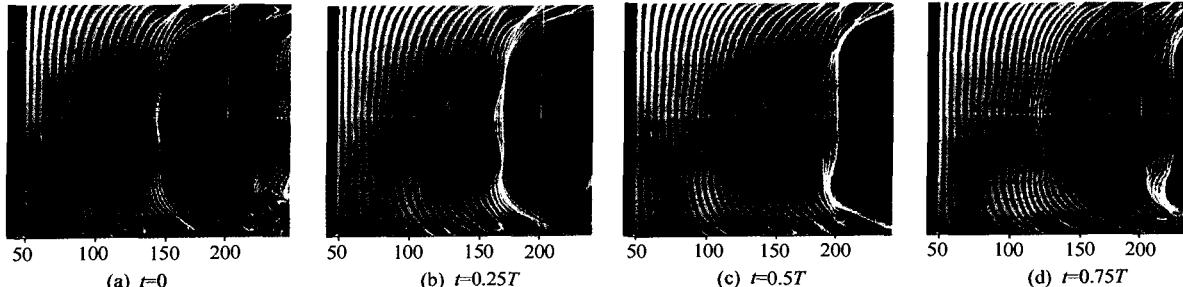
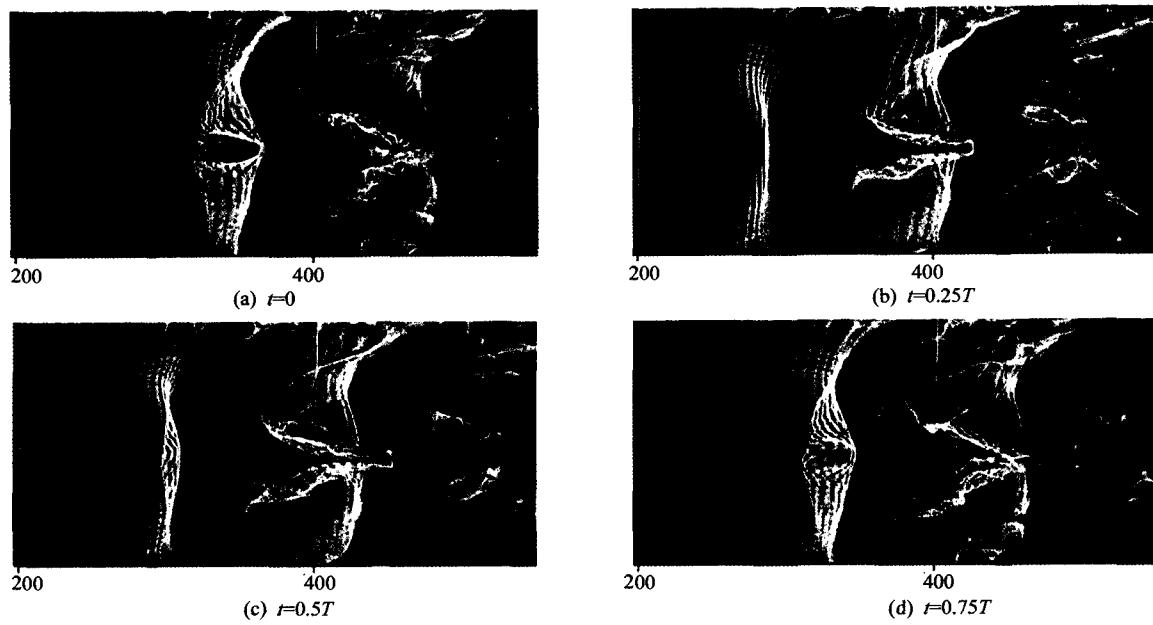
图4 平面图时间线显示的T-S形态(氢气泡丝位于 $x - x_s = 50\text{mm}$ , $y = 7\text{mm}$ )

Fig.4 The T-S wave shown by the time-lines in the planview (the hydrogen bubble wire is at  $x - x_s = 50\text{mm}$ ,  $y = 7\text{mm}$ )

图 5 发卡涡形成和发展(氢气泡线位于  $x - x_s = 200\text{mm}$ ,  $y = 7\text{mm}$ )Fig. 5 Forming and evolution of the hair-pin vortices (the hydrogen bubble wire is at  $x - x_s = 50\text{mm}$ ,  $y = 7\text{mm}$ )

程。 $t = 0$  时, 见图 5(a), 约在  $z = 0$  即当地扰动最强的展向位置首先出现  $\Delta$  型涡结构(箭头“1”所指), 继续发展, 涡头向边界层外边界移动, 速度不断增大; 涡腿“脚”部(最上游部分)向壁面伸展, 速度不断降低。涡结构在法向贯穿整个边界层厚度, 发展成发卡涡, 见图 5(b)和(c)。整个过程中涡腿不断受到拉伸, 涡量增强, 两条涡腿在靠近头部的部分由于相互诱导不断靠近, 涡头呈  $\Omega$  形。不断靠近的涡腿部分最后合并, 涡头演变成环状涡脱出, 见图 5(d)。此时, 上游约  $x - x_s = 300\text{mm}$  处, 下一个扰动周期的发卡涡开始形成, 如箭头“2”所指。

### 2.3 二次发卡涡和展向多个流向涡的生成

涡结构的再生, 即二次发卡涡的生成是转捩发展的关键之一, 也是湍流边界层自持续过程的本质。本次试验在流向位置  $x - x_s = 400\text{mm}$  附近观测到二次

发卡涡的再生现象, 见图 6。观测方式与平面图和侧面图有所不同: 氢气泡丝的布置同平面图, 观测方向同侧面图。从图 6(a)  $t = 0$  到 (c)  $t = 0.5$  可以看到箭头“1”所指的主发卡涡(即上文观测到的发卡涡)涡头的不断抬升, 涡腿拉伸。靠近涡头的两条涡腿部分由于相互诱导不断靠近的同时迅速向壁面移动, 当其接近壁面时, 在主发卡涡涡头上游沿流向依次出现多个二次发卡涡, 如图 6(a)和(d)所示。图 6(b)中  $t = 0.19T$  时可以看到第一个二次发卡涡涡头卷起的形态(箭头“2”所指); 图 6(c)中  $t = 0.5T$  显示出接下来的两个二次发卡涡, 箭头“3”、“4”分别所指; 第四个二次发卡涡卷起的形态在图 6(d)  $t = 0.88T$  时可看到。在动态录像结果中有时可以观测到第 5 个二次发卡涡。在图 6 中可以看到主涡涡头的环状, 在发展过程中涡头部分的涡面与平板夹角不断增大到接近  $90^\circ$ 。

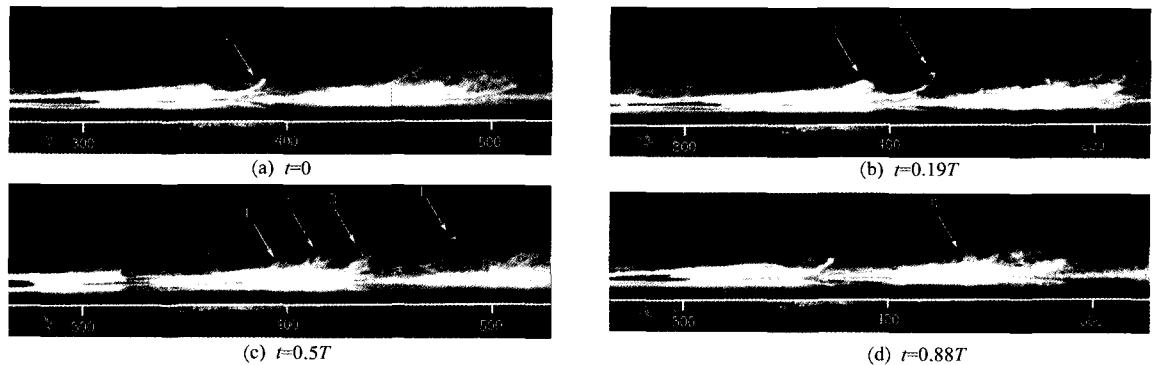


图 6 二次发卡涡生成现象(平面图的氢气泡线布置, 侧视)

Fig. 6 Forming of the secondary hair-pin vortices (sideview when hydrogen bubble wire set in the case of phanview)

图 7 的侧面图结果也显示出环状涡和接下来的二次发卡涡涡头的形态,箭头“1”“2”“3”指向主发卡涡、第一、第二个二次发卡涡的涡头。

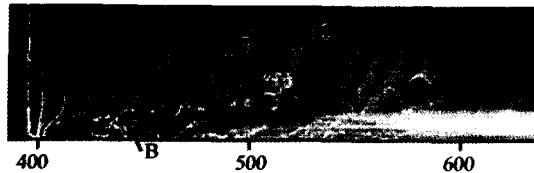


图 7 侧面图显示的发卡涡涡头( $x - x_s = 400\text{mm}$ ,  $z = 0$ )

Fig. 7 Heads of the hair-pin vortices in the sideview

图 6 和图 7 中观测到的只是二次发卡涡的涡头,其涡腿卷起的形态在图 8 给出的相同流向位置( $x - x_s = 400\text{mm}$ )的平面图时间线结果可以看到。图 8 中成对出现的箭头“1”“2”“3”分别指向旋转方向相反的主涡、第一和第二个二次发卡涡的两条涡腿。

根据以上观测结果,二次发卡涡形成机制如下:主发卡涡头部向外边界抬升过程中,靠近头部的两条涡腿部分由于拉伸引起强相互诱导,相互靠近并迅速向壁面运动,当其接近壁面时,在两涡之间的近壁区低速流体受到强烈诱导而抬升,形成一沿流向的局部凸起并引起局部高剪切层,绕这一凸起的流动形成一系列二次发卡涡。Haidari 和 Smith 在稳定的层流边界层中通过流向的狭缝注入低速流体观测到相似的发卡涡形成现象<sup>[7]</sup>。

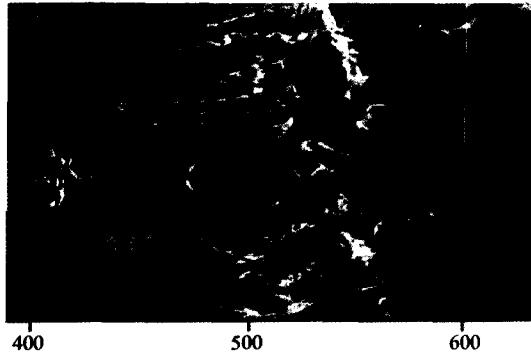


图 8 平面图显示的二次发卡涡涡腿( $x - x_s = 400\text{mm}$ ,  $y = 8\text{mm}$ )

Fig. 8 Legs of the secondary hair-pin vortices shown in the planview

最初的流动紊乱化(亦称流动破裂)伴随二次发卡涡的形成出现在近壁区,如图 7 中箭头“B”所指。在相同流向位置、相同扰动相位靠近壁面的平面图图 9 中,流动紊乱化在相同的位置被观测到(箭头“B”所指)。结合二次发卡涡的形成,分析流动紊乱化原因:当地形成的局部高剪切层不稳定<sup>[2]</sup>,结果导致在外层流动演化成一系列二次发卡涡,而在近壁区的流动破裂。

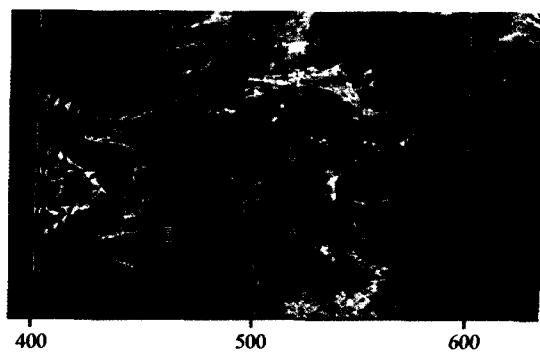


图 9 平面图显示的最初流动紊乱化( $x - x_s = 400\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$ )

Fig. 9 The initial flow breakdown shown in the planview

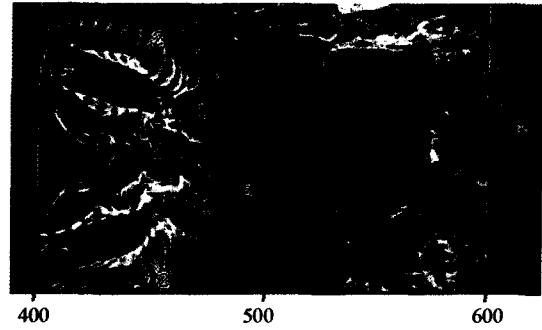
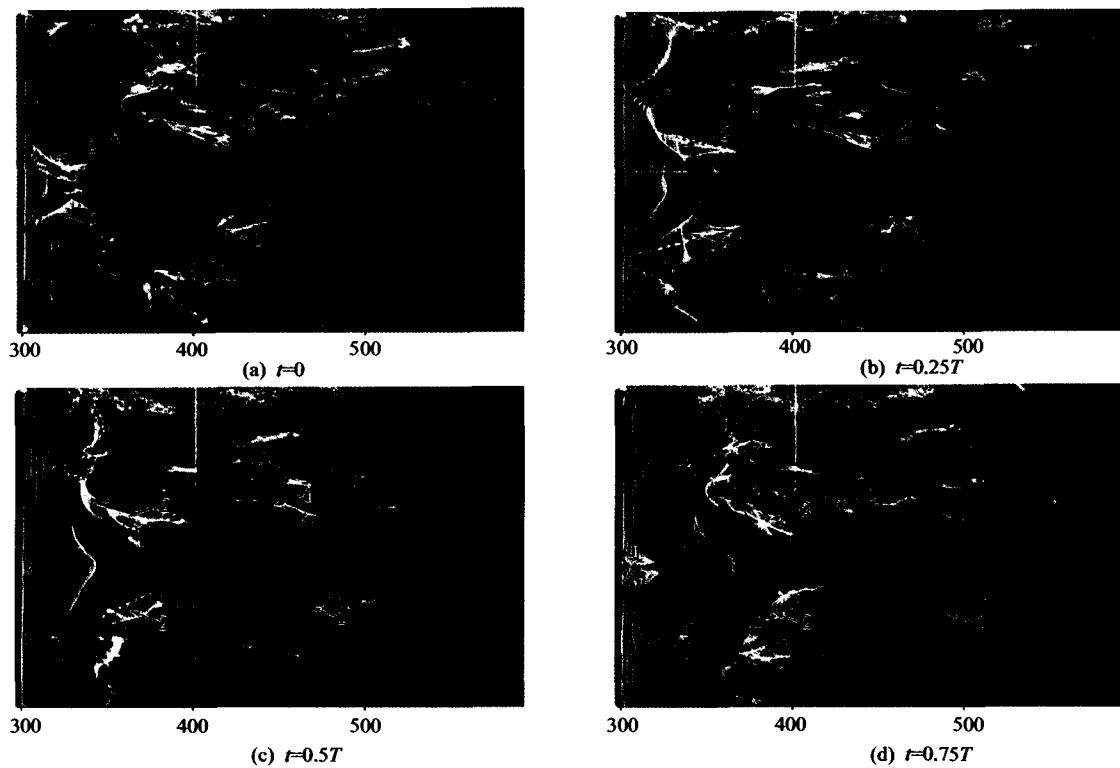


图 10 平面图显示的多个流向涡( $x - x_s = 400\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$ )

Fig. 10 Multiple streamwise vortices shown in the planview

在充分发展湍流边界层中,流向涡(包括发卡涡的涡腿)出现的频率和数量比本次实验观测的转捩阶段要多得多。流向涡数量的不断增多也是流动从层流到湍流转捩的重要环节之一。试验中发现流向涡数量增多的现象。在  $x - x_s = 400\text{mm}$  处的平面图(图 10 中),在发卡涡腿对应的两条流向涡(箭头“1”所指)的外侧,各出现一条与相邻的发卡涡腿旋转方向相同的流向涡,如箭头“2”所指。经分析,这两条流向涡源自前一个周期主发卡涡的两个涡腿,从氢气泡线位于  $x - x_s = 300\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$  的平面图(图 11)可以得到证实。在图 11(a)中( $t = 0$ ) $x - x_s = 400\text{mm}$  处显示出有两个流向涡(箭头“1”所指),对应于前一个周期发卡涡的两条涡腿,在上游  $x - x_s = 300\text{mm}$  附近相邻下一个周期发卡涡的两条涡腿已开始显现(箭头“2”所指)。图 11(a)~(d)显示出前后相邻两组发卡涡腿在一个周期内随时间的运动。发卡涡发展过程中,由于涡腿的脚部(上游端部)不断向壁面延伸,因此流向运动速度越来越慢,会被相邻下一个周期的发卡涡追赶上,如图 11(d),在  $x - x_s = 400\text{mm}$  位置就会有至少 4 条较强的发卡涡存在(更前面周期的发卡涡遗留的涡腿强度已经很弱),图 10 中显示出的就是这 4 个较强的流向涡。

图 11 展向多个流向涡的形成, 氢气泡线位于  $x - x_s = 300\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$ Fig. 11 Forming of the multiple streamwise vortices (the hydrogen bubble wire is at  $x - x_s = 300\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$ )

### 3 结 论

利用氢气泡时间线实验技术实现对有逆压梯度的人工激发转捩边界层中流动结构的细致研究, 观测到一些重要流动现象的细节并对其机制进行了分析, 主要结论:

(1) 二次发卡涡的一种生成机制: 主发卡在发展过程中, 靠近涡头的涡腿部分受到强拉伸, 相互诱导强, 彼此靠近并向壁面运动, 对近壁区强诱导导致近壁区低速流体抬升形成局部高剪切层, 高剪切层不稳定, 结果在外层生成一系列二次发卡涡, 近壁区流动破裂, 这是转捩过程中最初的流动紊乱化;

(2) 多个流向涡生成的一种机制: 前一个周期的发卡涡腿上游端部不断接近壁面, 速度降低, 被相邻后一周期的发卡涡超越, 在某一流向位置后(如本次实验  $x - x_s = 400\text{mm}$ ), 就会沿展向出现多个流向涡。

### 参 考 文 献:

[1] BORODULIN V I, KACHANOV Y S and KOPTSEV D B. Ex-

perimental study of resonant interactions of instability waves in self-similar boundary layer with an adverse pressure gradient: I. Tuned resonances[J]. Journal of Turbulence. 2002.

- [2] KACHANOV Y S. Physical mechanism of laminar-boundary-layer transition[J]. Ann Rev Fluid Mech. 1994 26:411-482.
- [3] 连祺祥. 湍流边界层拟序结构的实验研究[J]. 力学进展, 2006 36(3):373-388.
- [4] SMITH C R, WALKER J D A. Sustaining mechanisms of turbulent boundary layers: the role of vortex development and interactions[J]. Advances in Fluid Mechanics, 1997. 15:13-47.
- [5] 连祺祥, 郭辉. 湍流边界层中的下扫流和‘反发卡涡’[J]. 物理学报, 2004 53(7):2226-2232.
- [6] GUO H, LIAN Q X, LI Y, and WANG H W. A visual study on complex flow structures and flow breakdown in boundary layer transition[J]. Experiments in Fluids. 2004, 37:311-322.
- [7] HAIDERI A H, SMITH C R. The generation and regeneration of single hairpin vortices[J]. J. fluid Mech. 1994, 277: 135-162.