

# 后向台阶湍流拟序结构的实验研究<sup>1)</sup>

连 淇 祥

(北京航空航天大学, 100083)

**提要** 在水槽中用氢气泡法观测了一个后向台阶的回流区、再附区和边界层再生区的大涡和湍流团的发展,以及近壁区的流动结构,观察到大涡结构对湍流团产生的作用。

**关键词** 拟序结构,后向台阶,流动显示

## 一、引 言

分离流的再附是一种重要的流动现象。它出现在机翼上、建筑物上和突然扩大的管流中。许多研究者把后向台阶作为一种典型的再附流。它的分离线固定在台阶边缘,起始条件最单纯,是最简单的再附流。但是其流动仍是很复杂的,它包括了结构不同的几个区域,即自由剪切层,拐角区,回流区,再附区和边界层再附区等。虽然已有的文献很多,但流动结构仍不清楚。Eaton<sup>[1]</sup>评述了它的研究意义,困难与发展状况。实验研究,一般使用热线或激光测速,获得时均速度型、湍流度、相关、能谱等数据。如 Bradshaw 和 Wong<sup>[2]</sup>, Chandrsuda 和 Bradshaw<sup>[3]</sup>, Sinha 等<sup>[4]</sup>, Armaly 等<sup>[5]</sup>。固定点测速不易获得瞬态空间流动结构,故关于后向台阶的拟序结构的文献很少。而对其拟序结构的研究可以加深对复杂流动的认识,并可能启发找到控制再附的方法。Troutt 等<sup>[6]</sup>用多个热线测量了后向台阶流的展向分布,找到流速沿展向快慢交替变化,有一定相关性,是一种拟序结构。随后, Bhattacharjee 等<sup>[7]</sup>用声激励控制,明显地提高了沿展向的相干性。不过热线测速不易测量大涡结构。Frederick 和 Kegelmann<sup>[8]</sup>用烟线法观测了后向台阶流中的大涡结构。氢气泡法显示的图象通常比烟线法清晰,并可作一些定量,自 Kline 等<sup>[9]</sup>开始,已广泛用于湍流边界拟序结构的观测。Prochick 和 Kline<sup>[10]</sup>使用了氢泡法观察后向台阶流,不过发表的资料很少。作者比较系统地用氢泡法作了观测,本文着重叙述再附区及其附近的上下游的观测结果。

## 二、实验设备与实验方法

实验在一个回流水槽中进行,试段截面为  $0.4 \times 0.4\text{m}^2$ 。后向台阶高度为 2.0cm,紧贴侧壁,如图 1。x, y 坐标如图所示,原点取在台阶的展向中点。台阶展长 40cm,展高比为 20。De Brederode 和 Bradshaw 的实验表明展高比大于 10 即可避免端部影响<sup>[11]</sup>。台阶的对侧的上流为一收缩段,收缩比为 1:2。

1) 自然科学基金和航空科学基金资助。

本文于 1991 年 8 月 5 日收到第一次稿,1992 年 5 月 6 日收到修改稿。

自由流流速  $U$  可调, 本实验用 9.5, 18.2 cm/s 两种, 对应的雷诺数  $Uh/\nu$  为 1800 与 3400.

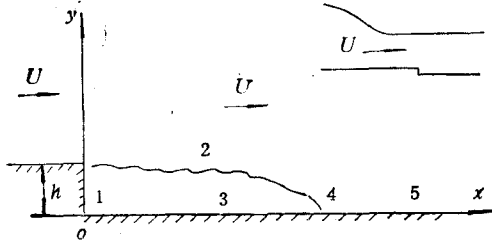


图 1 后向台阶模型示意图,

1. 角流区, 2. 剪切层, 3. 回流区, 4. 再附区,  
5. 边界层再生区.

Figure 1. The sketch of the flow of a backward step model.

1. corner flow, 2. shear layer, 3. re-circulation flow, 4. re-attachment region, 5. boundary layer regeneration region.

产生氢泡的铂丝直径为 0.025 mm. 本试验所用的氢泡发生频率为 12, 16 Hz. 脉冲电压为 50—200 伏, 细节请参考文献[12]. 台阶入口处上游的壁面边界层速度型为 Blasius 速度型, 其流动为层流. 台阶下游的通道宽度为 22 cm. 产生氢泡的铂丝布置有两种; 与  $oy$  轴平行的产生侧面图像, 与  $oz$  轴平行的产生平面图像. 侧面图像在  $xy$  平面内, 而平面图像则在平行于壁面的平面内.

### 三、实验结果与讨论

对后向台阶分离流, 通常划分了几个流动有显著差异的区域; 混合层区, 回流区, 再附区, 角流区, 边界层再生区等, 如图 1. 这种分区, 是基本上根据测速结果. 从流动显示看, 回流与再附都受大涡结构影响, 随着大涡结构的发展与移动而变化. 而边界层的再生则受近壁区流动结构的影响.

图版 I 照片 1 是氢泡显示的混合层的波动与大涡出现的图像. 剪切层不稳定, 产生波动, 有时波幅小, 如图版 I 照片 1(a), 有时波幅大如图版 I 照片 1(b). 前者波幅约为  $0.125h$ , 后者约为  $0.33h$ , 增大约 2.7 倍. 大小波幅交替出现, 无固定周期, 有明显拟序性质. 大涡结构往往是随着大幅度波出现的, 如图版 I 照片 1(b). 大涡发生的周期  $t$  的规格化值  $Ut/h$  约为 1.05、( $Re_h = 1800 \sim 3600$ ).

图版 I 照片 2 是回流区的侧面图像, 铂丝位于  $x = 2.5h$  处. 铂丝处近壁区经常有倒流, 氢泡流向上游. 有时倒流速度大, 如图版 I 照片 2(a); 有时小, 如图版 I 照片 2(b). 回流区常有明显的大涡. 图版 I 照片 2(a) 上的大涡在照片左端的近壁区. 在图版 I 照片 2(a) 上, 一大涡正处于铂丝处. 在照片 2(b) 上此涡下移到第 3 条氢泡时间线附近(按涡上下游氢泡线形状判断). 在大涡前面, 自由流的流体被卷入, 表现为氢泡时间线的下端, 从图版 I 照片 2(a) 到 2(b), 逐渐接近壁面. 在图版 I 照片 2(b) 上, 它们几乎已紧贴壁面. 这部分卷入的流体中的氢泡时间线边缘清晰, 没有紊乱现象. 在大涡后面, 经常是从壁面升起的紊乱流体, 表现为氢泡时间线完全散开, 成为轮廓不清的区域. 升高的流团, 最厚处可达  $2h$ . 由于涡的诱导, 涡的上方和下游的氢泡时间线, 其下端向下游突出. 这时局部流速大于自由流的结果. 从逐幅底片比较, 涡上方的局部瞬时流速大约可达  $1.3U$ . 照片 1 上, 混合层中形成的大涡, 开始时离壁面较远. 照片 2 上, 大涡已很靠近壁面. 大涡有三维性, 沿展向变化可在平面图像上看出.

图版 II 照片 3 是再附区附近的侧面图像. 其主要特点是铂丝近壁区的顺流与倒流的速度较小, 交替出现顺倒流. 图版 II 照片 3(a) 上有微弱顺流, 图版 II 照片 3(b) 上

顺流速度已接近于零, 且  $\partial u / \partial y = 0$ , 因氢泡时间线几乎停留在铂丝处, 且近于垂直壁面。在图版 II 照片 3(c) 上近壁区铂丝处则有微弱倒流。图版 III 照片 4 则是在同一位置同样流动条件下显示的平面图像。可以看到顺流与倒流是沿展向交替分布。从时均流速测量, 后向台阶流场是二维(准二维), 再附线是一条平行于台阶的直线。从流动显示的结果, 瞬时的再附线应是类似图版 III 照片 4 的不整齐的波状曲线, 在这条线上可能有若干鞍点和结点。再附区的流动很复杂, 现有的结论尚不足以描绘其瞬时结构的拓扑图形。

图版 III 照片 5 是再附区下游的侧面图像。它与再附区不同的一个主要特点是铂丝近壁区不再有倒流。这些图像上可以看到明显的层流流团与湍流流团。前者出现在大涡之前, 由自由流卷入。后者出现在大涡之后。图版 III 照片 5(a) 上第 8 至 10 条氢泡时间线和图版 III 照片 5(b) 上靠最右端的时间线的近壁区都是大涡前的层流流团。其特征是氢泡线平滑且边缘清晰。大涡处的特征是其上部的氢泡时间线向下游突出, 如图版 III 照片 5(a) 的第 4 至第 6 条时间线。这是由于涡的诱导使涡上方局部流速高于自由流流速的结果。大涡后部, 氢泡时间线通常呈现拐点, 图版 III 照片 5(a) 上第二与第三条时间线。时间线的拐点, 也代表瞬时速度型的拐点。有拐点区域的流团, 往往发展成湍流流团。例如图版 III 照片 5(b) 上第 5 至第 7 条时间线的近壁区是一个湍流流团。其特征是氢泡时间线弥散, 互相混合。湍流团的中心的氢泡往往迅速消失, 变成“黑斑”区, 如图版 III 照片 5(a) 至 5(b) 上都有这样的“黑斑”。“黑斑”区的边缘往往很不规则而且模糊。这很可能是由于有小尺度紊乱运动, 造成氢泡线条从平滑变为不规则锯齿; 同时也加速了氢泡溶解的速度, 使之迅速消失。逐幅跟踪底片上的大涡后的呈现了拐点的的时间线, 可以看到一部演变成上述湍流团的过程。大涡的诱导, 可使其上部流速增加, 前部流体从自由流区流向壁面, 使其后下方流体减速并上升, 因而可使该区速度型(时间线)呈现拐点, 并可能发展成湍流团。因而大涡结构对后向台阶流中的湍流产生有重要作用。大涡结构的消失很缓慢, 这可能是边界层再生区很长的主要原因。据文献 [2], 再生区长达  $52h$ 。

从图版 I 照片 1 至图版 III 照片 5, 都可看到流动结构的时间变化。在剪切层区 ( $x/h = 1 \sim 2$ ) 是波动, 在  $x/h = 2 \sim 3$ , 铂丝处的倒流速度有快与慢的变化。在再附区, 有顺流与倒流的变化。在再生区, 有层流流团与湍流流团的交替流过铂丝。这些变化频率  $f$  都可以从底片上逐幅观察计数。图版 III 照片 6 是计数结果, 以  $S_t = fh/U$  表示。在波动区频率较高, 再附前频率较快下降, 再生区趋于恒定。再附后, 大涡已靠近壁

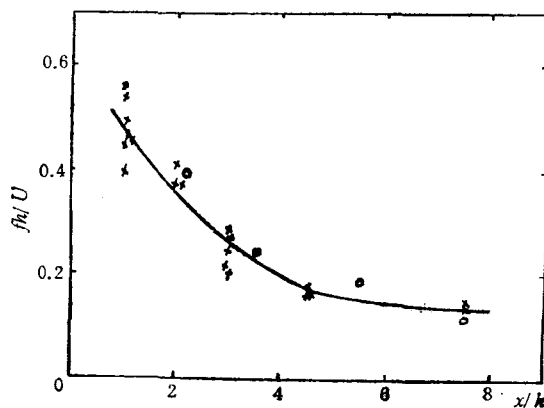


图 2 流动结构变化的无量纲频率,  $S_t = fh/U$ .  
Figure 2. The non-dimensional frequency of the change of the structures,  $S_t = fh/U$ .

面,自由剪切层已消失。故大涡结构再合并的可能性较少,频率趋于恒定。图2中的“o”点是引自文献[8]中功率谱曲线(图2)中峰值处的 $S_i$ 数,虽然该实验 $Re_h$ 比本实验大三倍,结果仍相当一致; $U$ 是自由流流速; $h$ 是台阶高度; $f$ 是结构变化频率;“x”代表本实验值。

再生区的近壁区,流动结构开始出现一般湍流边界层的某些特征,如快慢斑,长带条等,如图版 III 照片 6。不过和一般湍流边界层的近壁区平面图象还有很大差别,因为此图是在再生区的初始区域。

#### 四、结 论

大涡结构对后向台阶流有重要影响。除了对流速的快慢变化外,本实验还观察到它对湍流团的产生的一些影响(图版 III 照片 5)。

#### 参 考 文 献

- [1] Eaton J K & Johnstone J P. A review of research on subsonic flow reattachment. *AIAA J.*, 1981, 19: 1093—1100
- [2] Bradshaw P & Wong F Y F, The reattachment and relaxation of turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1972, 52: 113—135
- [3] Chandrsuda C & Bradshaw P. Turbulence structure of a reattaching mixing layer, *J. Fluid Mech.*, 1981; 110: 171—194
- [4] Sinha S N, Gupta A K, Oberai M M. Laminar separating flow over backsteps and cavities. part 1. *AIAA J.*, 1981, 12: 1527—1530
- [5] Armaly B F, Durst F, Pereira J & Schonung B. Experimental and theoretical investigation of backward facing step flow, *J. Fluid Mech.*, 1983, 127: 473—496
- [6] Troutt T R, Scheelke B & Norman T R. Organized structures in reattaching separated flow field. *J. Fluid Mech.*, 1984, 143: 413—427
- [7] Bhattacharjee S, Scheelke B & Troutt T R. Modification of vortex interactions in a reattaching separated flow. *AIAA J.*, 1986, 24: 623—629
- [8] Frederick W R & Kegelman J T. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layer. *AIAA J.*, 1986, 24: 1956—1963
- [9] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A & Rundstadler P W. The structure of turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 1967, 30: 741—773
- [10] Prochick S W & Kline S J. An experimental investigation of the structure of a turbulent reattaching flow behind a backward facing step. Rep. MD-42(1983) Thermoscience Div., Dept. of Mechanical Engng., Stanford University
- [11] De Brederode V & Bradshaw P. Three dimensional separation bubble. 1. Flow behind a rearward facing step, Imperial College, 1972. Aero. Rept. 72, 19
- [12] Lian Q X & Huang Z. Starting flow and structures of starting vortex behind bluff bodies with sharp edges. *Exp. in Fluids*, 1989, 8: 95—103

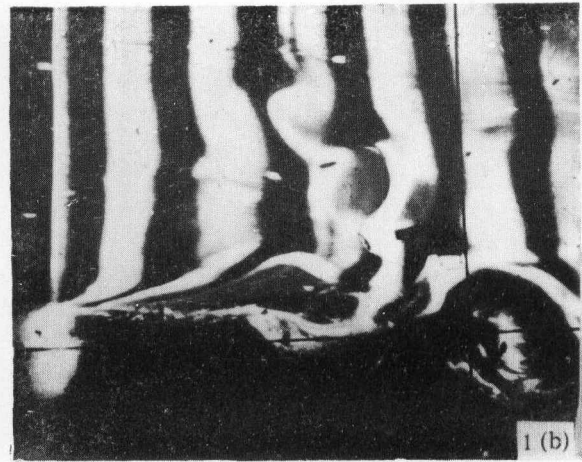
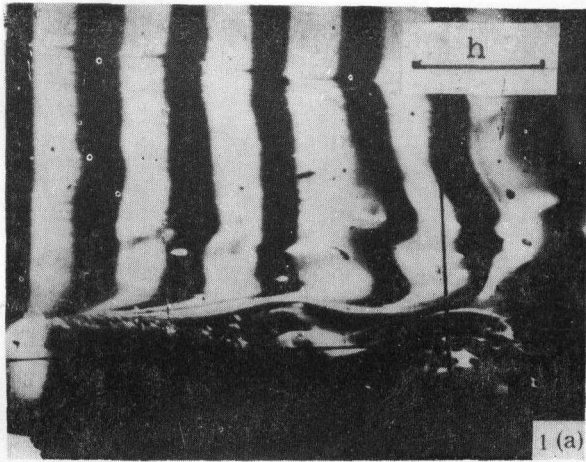
## AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COHERENT STRUCTURES OF THE FLOW BEHIND A BACKWARD FACING STEP

Qi Xiang Lian

(*Beijing Univ. of Aero. and Astro Beijing 100083, China*)

**Abstract** The coherent structures of the flows in the recirculate region, reattaching region and the boundary layer redeveloping region behind a backward facing step were investigated experimentally. The step height is 2cm, and the Reynolds number based on step height is 1900 to 3400. The flow structures were visualized by hydrogen bubble technique. The large vortical structures in the outer region and the streaky structures in the wall region were investigated.

**Key words** coherent structure, backward facing step, flow visualization

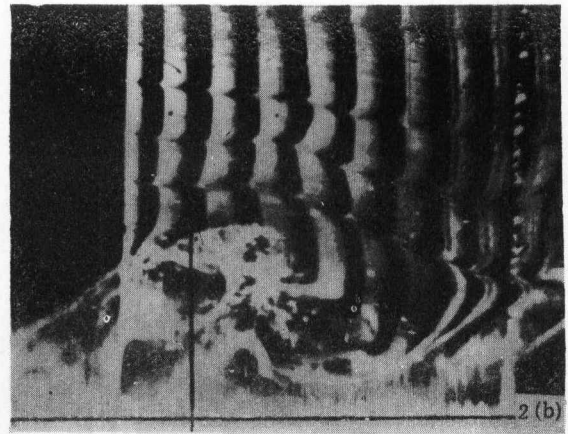
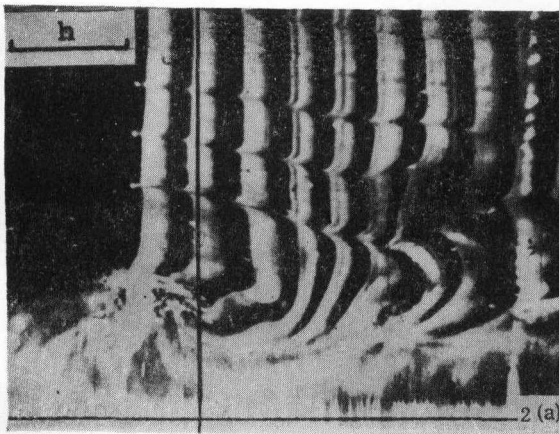


(a) 界面波幅较小的状态  
 (a) the case while the amplitude of the wave is small,

(b) 界面波幅大, 出现大涡结构  
 (b) the wave amplitude is large and a large vortex is formed.

照片 1 混合层流动的侧面图像, 铂丝位于  $x = 0$ ,  $Re_h = 3400$

Photo 1 The side view of the mixing layer, the platinum wire at  $x = 0$ ,  $Re_h = 3400$ .

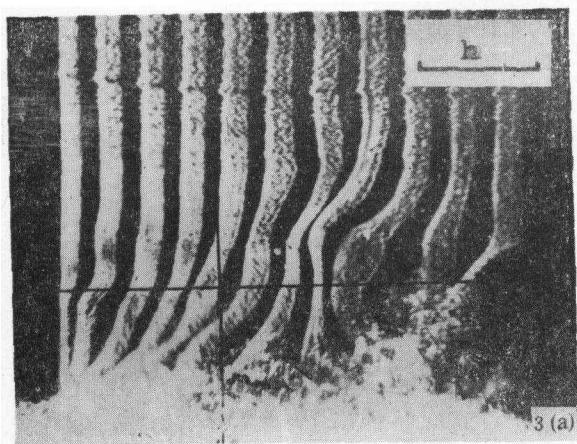


(a)  $t = 0$

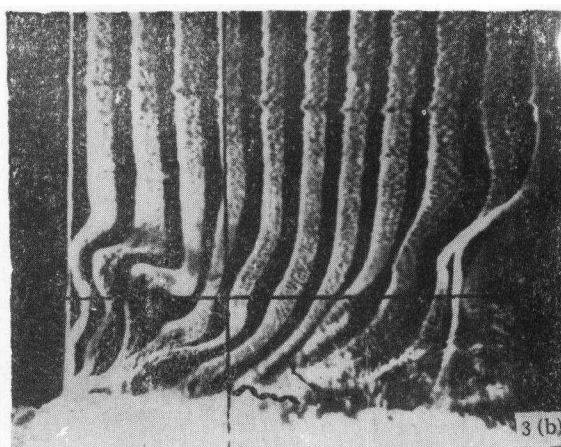
(b)  $t = 0.31s$

照片 2 回流区侧面图像, 铂丝位于  $x = 2.5h$  处,  $Re_h = 1900$

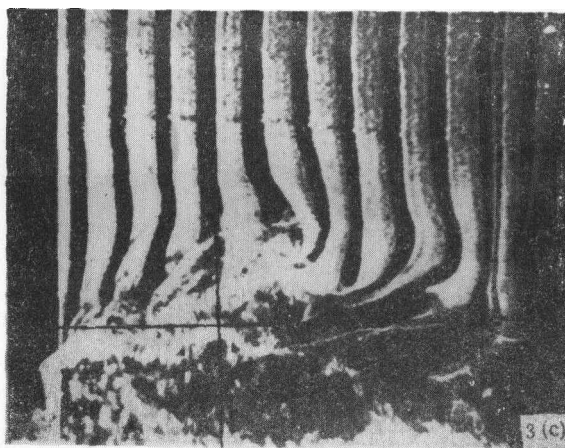
Photo 2. The side view of the re-circulating region, the platinum wire at  $x = 2.5h$ ,  $Re_h = 1900$ .



(a)  $t = 0$



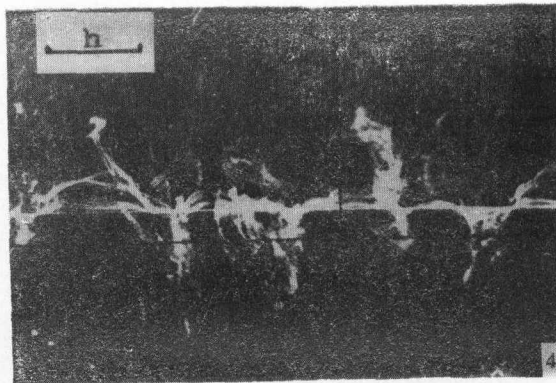
(b)  $t = 0.38s$



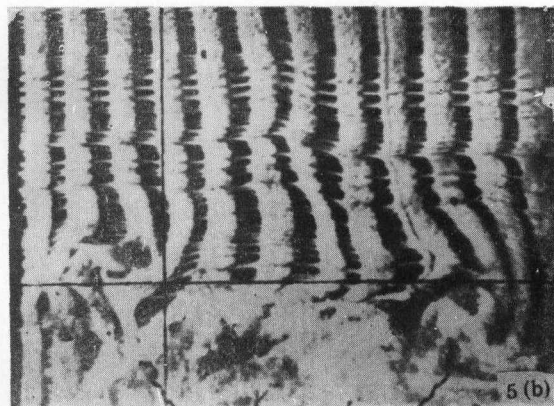
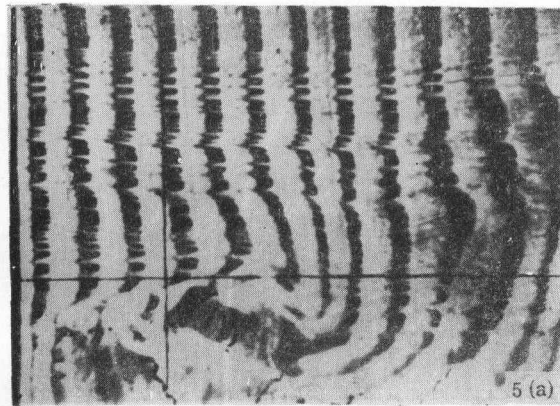
(c)  $t = 1.14s$

照片 3 再附区附近的侧面图像, 铂丝位于  $x = 4.5h$ ,  $Re_\delta = 1900$

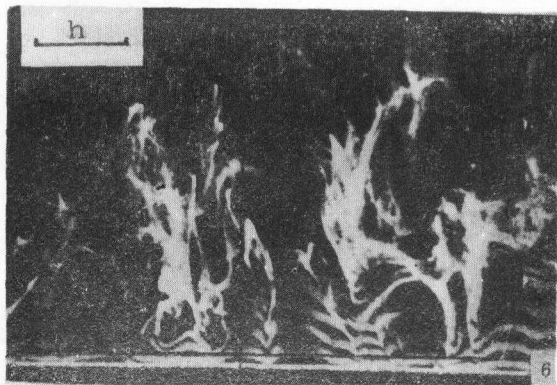
Photo 3. The side view of the re-attaching region, the platinum wire at  $x = 4.5h$ ,  $Re_\delta = 1900$ .



照片 4 再附区附近的平面图像, 铂丝位于  $x = 4.5h$ ,  $y = 0.025h$ ,  $Re_h = 1900$   
Photo 4 A plan view of the re-attaching region, the platinum wire at  $x = 4.5h$ ,  $y = 0.025h$ ,  $Re_h = 1900$ .



照片 5 边界层再生区的侧面图像,  $Re_h = 1900$ ,  $x = 7.5h$  照片时间间隔为  $0.312s$   
Photo 5. The side view of the boundary layer re-generating region, the platinum wire at  $x = 7.5h$ ,  $Re_h = 1900$ , the time interval between photos is  $0.312s$ .



照片 6 边界层再生区(初始区)近壁区平面图像, 铂丝位于  $x = 7.5h$ ,  $y = 0.025h$ ,  $Re_h = 1900$   
Photo 6 The plan view of boundary layer re-generating region (initial region) the platinum wire at  $x = 7.5h$ ,  $y = 0.025h$ ,  $Re_h = 1900$ .