

寸。

照片(10)是用小分光角的W稜鏡,并把仪器调在无限条纹宽度状态下,移相值约为 $\pi/2$ 所摄取的电灯泡热流干涉图。证明了在光学元件加工良好时,此种干涉仪在移相干涉状态下工作是可能的。

单W稜鏡激光差分干涉仪的结构简单,很容易在纹影仪的基础上实现,从而可获得流场的干涉图。特别是可在差分干涉仪上实现移相干涉技术。因其测量灵敏度高,是解决显示低密度流场的重要途径之一。

感谢中国科学院长春光机所顾去吾在原理方面对我们的指导。

参 考 文 献

- [1] Merzkirch, W., Flow Visualization, Academic Press Inc., New York & London (1974), 115—126.
- [2] Smeets, G., et al., Proc. of the 10th International Congress on High Speed Photography (1972), 244.
- [3] 束继祖,刘方,激光,4(1977),31.
- [4] C. Э. 福里斯等,普通物理学,第三卷一分册(东北人民大学物理系译),高等教育出版社(1956),140.
- [5] 李华煜,徐朝仪等,力学学报,2(1979),171.

(本文于1980年5月26日收到)

氢气泡显示技术的应用

李秉录 呼和敖德 罗明辉 阎明山

(中国科学院力学研究所)

一、引 言

流场显示主要是把流体(如水、气、油)在流动过程中或物体绕流时所产生的流动图案(即流谱)用某些特定的方法以直观的形式显现、记录下来,从而为建立数学模型、理论分析以及直接定性、定量测量提供实验资料。

氢气泡显示技术就是用于水介质设备(水洞、水槽、水池等)流场显示的一种电控方法。一般适于水速为1cm/s—1m/s。但也有成功地使用在低于5mm/s和高于7m/s的水速中。这种方法不污染水介质、操作容易,尤其是可以进行定量测量。

二、氢气泡显示技术的原理和设备

水经过电解可在阳极得到氧气,在阴极得到氢气,且氢气的体积是氧气的两倍。在流动的水中放入一根极细的金属丝作为阴极,在另一适当的地方置一阳极,并在两极间施加电压,则在阴极丝上产生大量细小的氢气泡随水流动,

从而清晰地显示出流场形态。

根据电解定律,在1个大气压下 $t^{\circ}\text{C}$ 纯水中,单位时间产生的氢气体积是:

$$Q = 0.396 \times 10^{-3} \times (273 + t) \times I \quad (1)$$

式中: I 为电解电流强度(安培), Q 为电解产生的氢气体积(cm^3/min) 产生氢气泡的装置如图1所示。

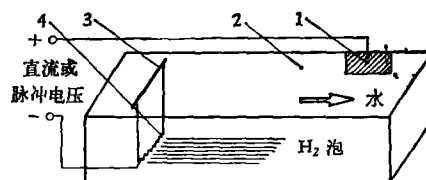


图1 氢气泡技术示意图

1. 阳极板 2. 水槽 3. 支架 4. 阴极丝

电极

阳极板可以用任何金属板制成,一般用铜箔,阴极丝也可用任何材料和任意直径的金属丝。实验表明氢气泡的大小和丝的直径相当。当氢气泡直径在60—150 μm 时,跟随性较好,

可不考虑其上浮作用。但在低速水流中，阴极丝上的氢气泡随水流动慢，易于合并，应采用较细的阴极丝；而在较高的水速时，氢气泡随水流动的快。合并机会少，可用较粗的丝，从丝的强度和电解电流强度考虑也宜采用较粗的阴极丝。

阴极丝应选用具有产生气泡均匀，易焊接、受腐蚀小、强度大和气泡易脱离等优点的材料。以白金丝和钨丝为佳。

阴极丝的形状决定了氢气泡的流迹。图2是不同形状的阴极丝产生的氢气泡群。

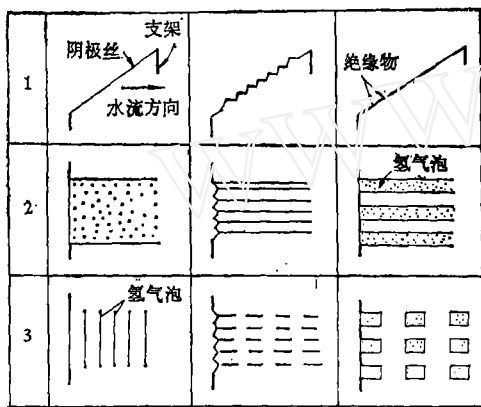
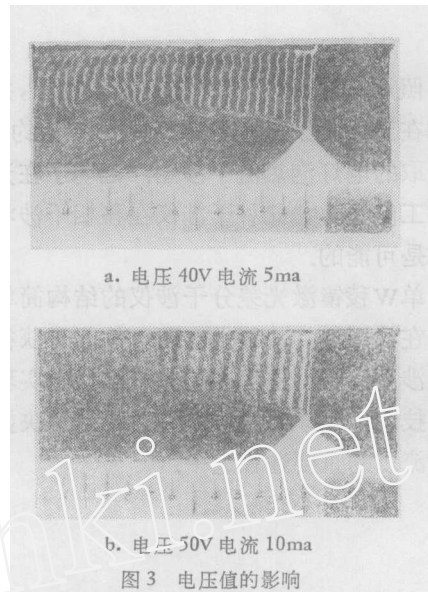


图2 几种电极形状和产生的氢气泡群

1. 阴极丝形状；
2. 加以直流电压时产生的气泡群；
3. 加以脉冲电压时产生的气泡群

电压

要想使水电解，必须在两极间施加直流电压。图2还给出了不同形状电极施加不同电压得到的氢气泡群。实验中我们发现，在一定条件下，加在两极间的电压有一最佳值（图3a），低于此值时气泡少，流谱显示不够清楚；高于此值，气泡大，上浮严重，不利于显示（图3b）。对于电源的要求则视所做实验要求而定。在我们实验中能供给电压0—300V，电流0—300mA的直流电源都可使用。脉冲电压则是使用开关电路控制直流电源而得到的。我们所采用的脉冲电源如图4所示。其工作原理是， T_1, T_2 构成自由多谐振荡器，形成周期 T 可调的方波。经R-C微分电路取出周期为 T 的触发脉冲，触发由 T_6, T_7 组成的脉宽 W 可调的单稳触发器，再经R-C微分 T_9, T_{10}, T_{11} 整形，得到周期为 T 宽度为



a. 电压 40V 电流 5ma

b. 电压 50V 电流 10ma

图3 电压值的影响

实验条件水速 $u = 4.6\text{cm/s}$, $T = 200\text{ms}$, $W = 14\text{ms}$

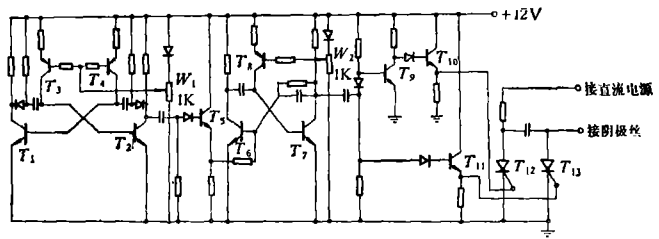


图4 脉冲电源原理图

W 的脉冲去控制 T_{12}, T_{13} 组成的可控硅直流断续器，得到幅度为 U_m 的脉冲电压。 T_3, T_4 和 T_8 作变阻元件，可在较宽范围内改变 T 和 W 。脉冲幅度 U_m 和电流大小由直流电源决定。图中二极管均为2CP81，三极管除 T_3, T_4, T_8 为 $3A \times 31$ 外，均为3DK4B， T_{12}, T_{13} 为3CT5/800。

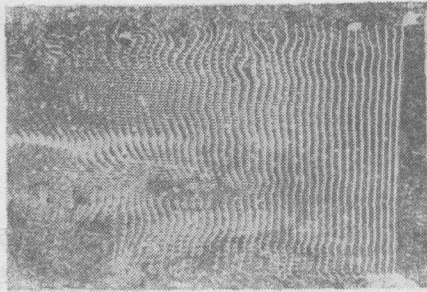
三、应用

1. 流场观测

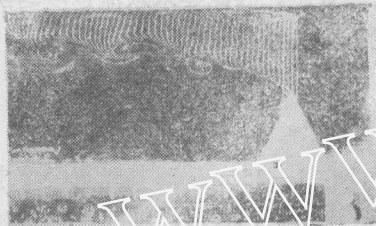
氢气泡技术做为一种显示手段可以很清楚地观察到设备中水的流动品质，图5a就是在水槽中观察到的。这时水中并没有任何物体，但是还出现了涡和卷曲。这说明从上游流过来的水本身就不平稳，这对实验将造成不应有的误差。

为了定量地测量水速，可用脉冲电压产生一系列氢气泡线做为定时线随水流动。记录下脉

冲所走过的距离便可计算出水之流速。如图 5b。



a. 水槽中水流品质观察

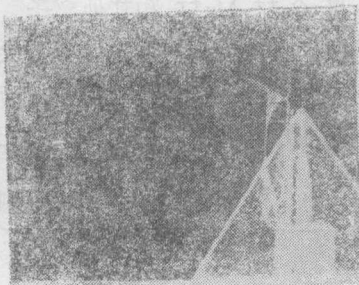


b. 水洞中 53° 山定常测量
 $T = 50\text{ms}$ $W = 5\text{ms}$
 计算速度 $v = 4\text{cm/s}$
 激光测量 $u = 4.0\text{cm/s}$

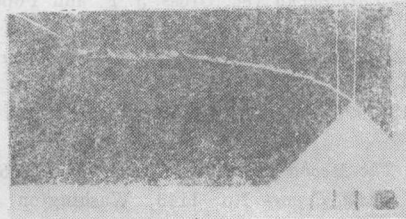
图 5 流场的观察与测量

2. 局部流场显示

在某些物体绕流时,即使工作电压很低,但由于很多流线被挤压在一起,大量气泡合并,上升快,影响显示。此时可将电压再降低,使整个



a. 回流区显示



b. 一点显示
 图 6 局部显示

丝上几乎没有气泡产生,但在被挤压的地方却成功地显示了流场.图 6a 就是用这种方法显示的山定常绕流回流区的情况.为了显示局部流场还可将丝做成一点放在需要显示的地方,如图 6b.

3. 脉冲流线的显示

利用脉冲泡列不仅可以定量测量水之流速,还可以记录定常涡的脱落周期(图 7).由于水流速往往较低,除用低电压外,还可以改变 W/T 的比值,达到最佳显示.

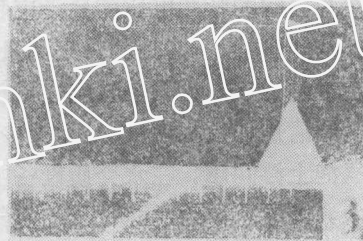
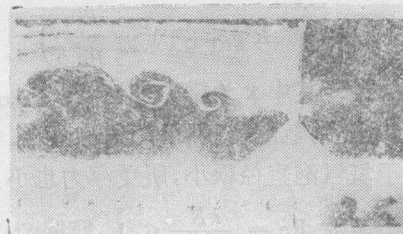


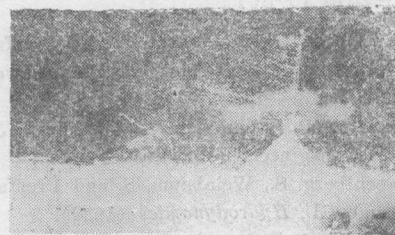
图 7 涡的测量
 $T = 50\text{ms}$ $W = 5\text{ms}$
 涡的形成周期 0.4 秒

四、讨论

1. 由(1)式可知,在一定实验条件下,电解所得到的氢气泡量仅与电解电流强度有关,而



a. $u = 8.5\text{cm/s}$
 极板间距离 $d = 110\text{cm}$
 $V = 60\text{V}$ $I = 30\text{ma}$



b. $u = 8.5\text{cm/s}$
 极板间距离 $d = 55\text{cm}$
 $V = 60\text{V}$ $I = 55\text{ma}$

图 8 改变两极间距离的影响

与加在两极间电压大小无关。为满足显示的需要,在实验中除改变两极间电解电压外,还可以改变两极间距离,改变水温和水的电解率以改变电解电流强度,从而达到改变发生氢气泡量多少的目的。图 8a、b 表示两极间距离改变时对显示的影响。

2. 测量精度。做定量测量时其精度除与距离标尺读数精度有关外,还取决于脉冲周期的精度和稳定性。应选取 W/T 在 0.1 左右,且每张照片记录的脉冲线在 10 条以上,以减少平均误差。加在两极间的脉冲电压前后沿应越陡越好,否则脉冲泡的边缘不清楚而带来测量误差。

在做定常涡脱落周期测量时应选用较宽的周期 T , 以分清是那条线形成的涡,减少误差。

3. 氢气泡上浮问题,在水介质设备中使用氢气泡技术,则要求做为示踪粒子的氢气泡在水流动中具有较好的跟随性,不上浮或上浮效应极小。通过分析氢气泡在水中的运动可以求出其上浮速度并可建立氢气泡直径(即阴极丝的直径)与水速的关系。

氢气泡在水中以流速 u_∞ 随水一起流动。如果坐标取在气泡上,则气泡在水中只有向上的运动。这是由于它在水中受浮力

$$F = \frac{4}{3} \pi R^3 g \rho_{H_2O} \left(1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (2)$$

作用的结果。其中 g 为重力加速度, ρ_{H_2O} 为水的密度, ρ_{H_2} 为氢的密度, R 为气泡直径。

由于氢气泡直径很小,所受浮力也小,气泡的运动雷诺数 $Re = \frac{uR}{\gamma_{H_2O}} \ll 1$, 根据 Stokes 理

论其所受的阻力 F_i

$$F_i = 6\pi\mu_{H_2O}u_fR \quad (3)$$

式中 μ_{H_2O} 为水的粘性系数; u_f 为气泡上浮速度。因为 $F = F_i$ 并取 $\rho_{H_2}/\rho_{H_2O} \approx 10^{-4}$, 则气泡在水中的上浮速度为

$$u_f = \frac{2}{9} \frac{g}{\gamma_{H_2O}} R^2 \quad (4)$$

若取气泡直径为 10—50 μm 则上浮速度为 $5 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 。当假设气泡直径与丝直径相同时,并认为 $u_f/u_\infty < 0.005$ 时,可以忽略气泡上浮效应,因此要求水流速度与阴极丝之间满足下列关系

$$\frac{R^2}{u_\infty} \leq 4.34 \times 10^{-7} \quad (5)$$

即水流速度在 1—25 cm/s 时其丝直径要求小于 10—50 μm 。流速越低要求丝越细,反之亦然(上述计算采用 cgs 制)。

4. 干扰。阴极丝和丝的支架对流场有一定的干扰,因此在非显示地方尽量不放丝。此外电解出来的氢气泡不可能百分之百随水流动,有一部份要合并且附着在实验段壁面或实验模型上而造成干扰。但只要随时清除便可解决。

5. 在使用未经软化处理的水时,由于水中含有大量 Ca^{++} Mg^{++} 和其他离子。在电解时除在阴极丝上产生 H_2 外,这些杂质会附着在阴极丝的表面形成覆盖层影响 H_2 泡的产生。这就需要不断地用交换电极的方法清除它。

(本文于 1981 年 10 月 12 日收到)

(上接第 17 页)

- [9] Gluckman, M., Weinbaum, S. and Pfeffer, R., *J. Fluid Mech.*, 55(1972), 677—709.
 [10] Weinbaum, S. and Chien, S., *Mathematics of Microcirculation Phenomena* (ed. Gross, J. F. and Popel, A.) (1980), 109—131.
 [11] Ganatos, P., Weinbaum, S., Fischbarg, J. and Liebovitch, L., *Advances in Bioengineering*, Amer. Soc. Mech. Engineers (1980), 193.
 [12] Leichtberg, S., Weinbaum, S. and Pfeffer, R., *Biorheology*, 13(1976) 165—179
 [13] Lamb, H., *Hydrodynamics* (1932).
 [14] Caro, C. G., Pedley, T. J., Schroter, R. C. and Seed, W. A., *The Mechanics of the Circulation* (1978),
 [15] Haberman, W. L. and Savre, R. M., *David W. Taylor Model Basin Report No. 1143*, Washington D. C. (1958).
 [16] Stimson, M. and Jeffery, G. B., *Proc. Roy. Soc., A*, 111(1926) 110.
 [17] 严宗毅,力学与实践, 3, 2(1981), 4—9.