

用激光测速技术测量燃料组件 棒束间隙中的水速分布

孙渝生 李梦实 张自林 许旭铭 郭春华 田吉安 姚同生

(上海激光技术研究所)

(中国科学院上海原子核研究所)

本文描述一种测量狭窄通道中水速分布的新技术,并用这种激光多普勒测速技术测量了反应堆燃料组件全尺寸模型几排棒束之间宽约 3 mm、深 200 mm 间隙内的水流速度分布。

在几个截面上,于不同流量下,取得了详细的实验数据,并对其进行了初步分析。激光多普勒测速技术显示了它许多独特的优点:非接触测量,不干扰流场;空间分辨率高,可以测量小区域内的流速分布;在保证精度的同时,测量方便,移动迅速;一般在 45 min 内就可测出 75 点的流速,每点读数十次,得到一条线上的流速分布。

关键词 激光多普勒测速,流场,燃料组件水模。

一、引言

在激光多普勒测速技术出现之前,没有一种测量工具能够适合反应堆燃料组件全尺寸模型棒束之间水速分布的测量,这是由于棒束之间的间隙太小(本试验件中均为 3 mm 左右,局部甚至更小),毕托管不仅难以放入和移动,而且由于它占有相当的空间,对流场的干扰较大,所以通常采用的方法就是将燃料组件放大若干倍,放进风洞中用毕托管进行测量,再通过换算得到全尺寸模型中的数据。这种方法不仅耗费了大量经费和时间,数据精度也受到了一定的影响。

我们采用激光多普勒测速仪对燃料组件全尺寸模型中的流速分布进行了测试。这里,采用可转动的发送光学头部和前向接收光学系统,在水力试验回路上于三个不同流量下,测量了三个不同截面上三条通道中的流速分布,其中每一通道深约 200 mm。为了详细测出速度曲线,把通道细分成均布的 75 个点进行测量。测试表明,激光多普勒测速技术在测量这一类狭窄通道流体速度分布的场合,显示了它独特的优点。

二、被测燃料组件及水力试验回路

在水力试验回路的试验段中,安放二个燃料组件,每个组件内的棒作 15×15 mm 正方形排列,其中除 21 根棒的直径为 12.9 mm 以外,其它棒的直径均为 10 mm。每两根燃料棒之间的间隙为 3.3 mm。试验段及其中两个组件的横截面如图 1 所示。两个组件的燃料棒之间的距离为 4.1 mm,称为水隙。本实验的三个通道就是水隙及其相邻的二个组件间隙。整个水力试验回路如图 2 所示。由主泵出来的水经过电加热器、过滤器和稳压器进入试验段,经过试验段中的组件后分成两路,回到主泵入口。

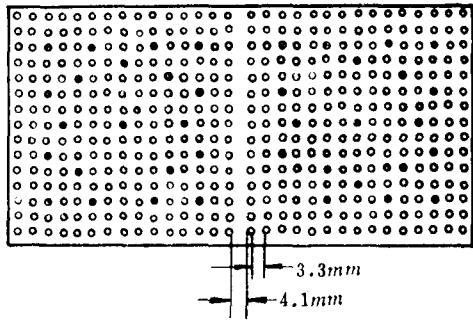


图 1 试验组件截面图

●——控制棒导向管；○——燃料棒。

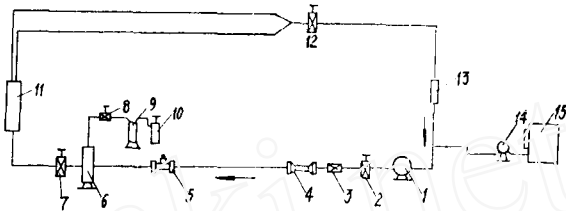


图 2 水力回路示意图

1——主循环泵；2, 7, 12——闸阀；3——电加热器；4——过滤器；5——流量计；6——稳压器；8——截止阀；9——缓冲器；10——氮气瓶；11——试验段；13——过滤器；14——补给水泵；15——水箱。

图 3 为试验段中所测三个截面位置的示意图。整个实验过程中水温保持在 $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ，三种流量分别为 300 t/h、565.8 t/h 及 900 t/h。

三、测试仪器

由于被测流道狭窄，散射光的收集受到立体角的限制，所以只能收集到测点散射光的一小部分。对此采用前向散射的接收方式比较适宜。为进行这一测试，专门设计研制了一

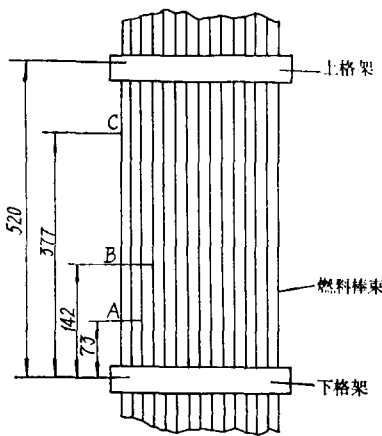


图 3 被测体(壹组)及被测截面的位置

台前向散射激光多普勒测速仪，其光学系统示意图如图 4 所示。它的光学发射头部可以绕光轴作 360° 转动，以便于不同方向流速的测量。

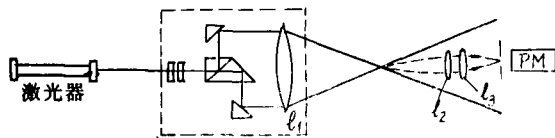


图 4 光学系统光路图

从 5 mV 氦氖激光器输出的光束经过分束器一分为二后，经由透镜，进入狭窄的被测流道聚焦于被测点，形成明暗相间的干涉区。当水流中自然存在的散射微粒在垂直于两光束角平分成的方向经过这一测量区时，就依次散射出光强随时间变化的散射光，其频率(称之为多普勒频率 f_D)与这点的流速成正比

$$f_D = \left(\frac{2n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v$$

其中 λ 为激光束波长， n 为流体折射率， θ 为两会聚光束之间的夹角。

将光强变化的散射光由透镜 2 和 3 收集，送至光电倍增管，转换为电讯号。然后再送入以频率跟踪器为主体的讯号处理机进行处理，直接以 m/s 的数字形式显示。跟踪器备有模拟输出插孔，用光线示波器记录它输出的模拟电压波形就可直接观察流体中测点的速度波动。用记忆示波器接在光电倍增管后面前置放大器的输出端，就可观察和拍摄到清晰的多普勒波形。接收器及面对的窗口如图 5 所示。

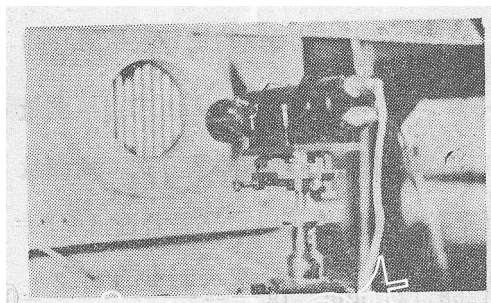


图 5 接收器部分图
(从侧面看)

四、狭窄流道测试中提高讯噪比的措施

1. 激光测速仪的接收系统 该系统接收的是流体中微粒通过光束相交区域时的散射光，其讯号光是非常微弱的，而狭窄的流道又限制了接收时的立体角，使讯号光大大减弱。因此，环境光及其它杂散光都会降低多普勒讯号的讯噪比，严重时将使讯号处理更加困难，甚至无能为力。由于燃料组件中棒的表面反射光的性能很好，必将增加噪声的成份，因此必须考虑合理设计光电倍增管前的针孔光栏，其作用就是用来阻挡背景杂散光进入光电倍增管，但又最大限度地通过有用的讯号光。光栏的针孔直径根据测量体积及接收部分的光学系统进行选择，这里选用的直径为 $\phi 17 \text{ mm}$ 。

讯号接收系统中的两块接收透镜装在一个筒子里(如图 6 所示)，其内壁涂无光黑漆，它使进入接收透镜的环境杂散光在筒壁多次反射而被吸收，使测量区两光束的交点在针孔光栏上成像清晰，背景杂光大大减少，便于针孔精确对准测点，提高讯噪比。讯号接收系统结构图如图 6 所示。

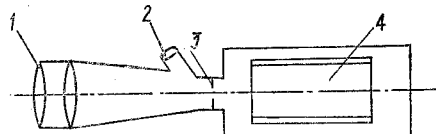


图 6 信号接收系统结构示意图
1—接收透镜；2—观察筒；3—
针孔光栏；4—光电倍增管。

2. 光束扩展器 为了测出狭窄流道中速度场，得到更高的体积分辨率，可在光学发送头部前放置一个光束扩展器。它将激光束的发散角缩小 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ ，使测量体积缩小 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{64}$ ，这样不仅提高了空间分辨率，而且由于测点功率密度提高了好几倍，因而增加了有用讯号的强度，大大提高了讯噪比。

五、测量误差分析

1. 光路上引起的误差 分束器输出两束光间距的误差将使 θ 角产生误差，导致多普勒频率的误差 Δf_D 。下面以具体数值计算为例，说明这一误差的大小。由式 $f_D = \left(\frac{2n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v$ ，若 $v = 1 \text{ m/s}$ ， $n = 1$ ，则 $f_D = \left(\frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \text{ m/s}$ 。

以下对三种情况进行计算和讨论：

(1) 两光束间距为设计数值 $d=30.434976$ mm, 会聚透镜焦距 $f=240$ mm, $\text{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{d}{2f}$, $\frac{\theta}{2} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{d}{2f} \right)$; 由于直接测量 $d=30.434976$ 这一长度不可能得到高的精度, 所以采取如图 7 所示的测量方式, 用测量 DE 来代替测量 AB。可想而知, 选取 CF 愈长, 则 DE 的测量精度可以愈高。若选取 $CF=10$ m, 则 $DE = \frac{AB}{GC} \cdot CF = \frac{30.434976}{240} \times 10000 = 1268.124$ mm, $\text{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{1268.124/2}{10000} = 0.0634062$, $\frac{\theta}{2} = 3^{\circ}37'41''$, $\sin \frac{\theta}{2} = \sin 3^{\circ}37'41'' = 0.06328$, 因此 $f_D = \left(\frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot 1 \text{ m/s} = \frac{2 \times 0.06328}{6328 \times 10^{-10}} = 200$ kHz。

这一设计数值表示, 1 m/s 的速度将产生频率为 200 kHz 的多普勒讯号。

(2) 当两光束间距有 +1 mm 的测量误差, 其实际 DE 值为 +1269.124 mm 时, 可以算得由于这一间距的不准确所引起的多普勒频率的误差: $\text{tg} \frac{\theta'}{2} = \frac{1269.124/2}{10000} = 0.0634562$, $\frac{\theta'}{2} = 3^{\circ}37'51''$, $f'_D = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta'}{2} = 200.15044$ kHz, 其相对误差为 $\frac{200 - 200.15044}{200} = -0.075\%$ 。

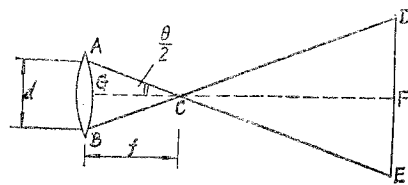


图 7 光束间距测量方法

(3) 当 DE 实际测量值为 1267.124 时 $\text{tg} \frac{\theta''}{2} = \frac{1267.124}{10000} = 0.0633562$, $\frac{\theta''}{2} = 3^{\circ}37'30''$; $\sin \frac{\theta''}{2} = 0.0632259$, 则 $f''_D = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta''}{2} = 199.82901$ kHz, 其相对误差为 $\frac{200 - 199.82901}{200} = 0.085\%$ 。由于实际测量 DE 时精度达到毫米量级是可以做到的, 所以由于 θ 角引起的误差可以控制得比较小。

2. 电路上引起的误差 以频率跟踪器为主的讯号处理装置, 其精度在 $\pm 1\%$ 以内。

六、测试结果的分析与讨论

共测试了三个截面, 位置如图 3 所示。每个截面测三条流道 (水隙及其两边相邻的流道), 每一流道又各测三个流量, 所以共测量了 27 根流速分布曲线。为了测出每个流量下各流道中的速度分布, 在 200 mm 左右长度上等分为 75 个测点进行测量, 然后将测量结果绘成速度分布曲线。共测量了约 2000 多个测点, 每个测点重复测量 10 次。部分测量结果如图 9 和图 10 所示。图 9 表示 B 面水隙左面第一个棒束间隙中测得的流速分布。图 10 表示 A、B、C 三个截面中水隙的速度分布, 图中横坐标表示从水力试验回路试验段壳体壁面一头至另一头的位置。

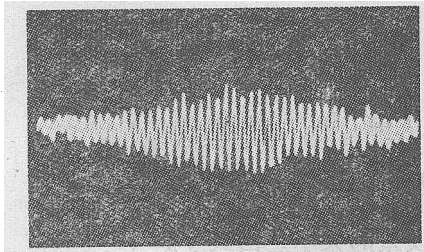


图 8 水隙中点的多普勒波形图

图 8 为摄得的水隙中点的多普勒波形。

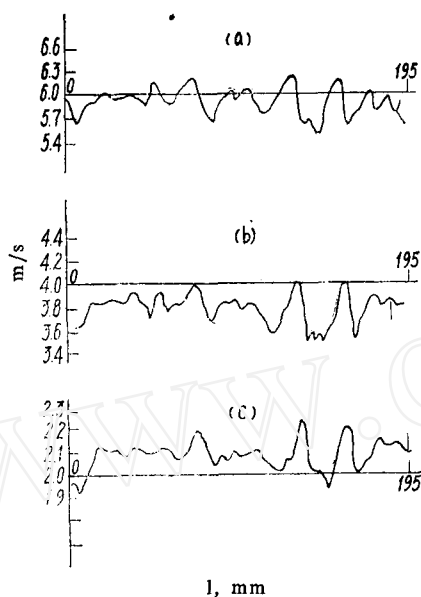


图 9 B 平面水隙左面第一个棒束间隙中的流速曲线
(a) 900 t/h; (b) 561 t/h;
(c) 300 t/h.

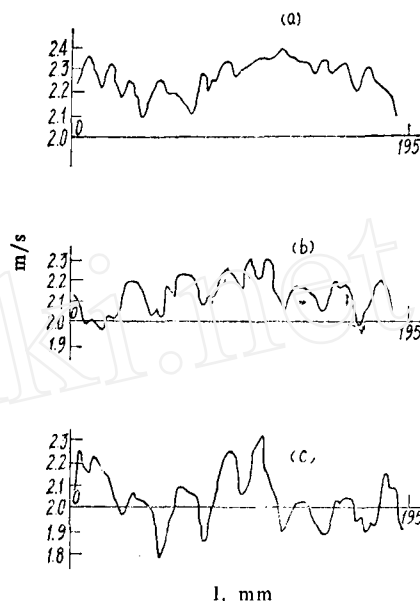


图 10 三个被测截面中水隙的速度分布曲线
(a) 水隙(C面)300 t/h;
(b) 水隙(B面)300 t/h;
(c) 水隙(A面)300 t/h.

从所测量得到的曲线可以看出：

1. 组件棒束间和两组件间的水隙中的速度分布与被测点的几何位置密切相关。这一点与参考文献[1]中用毕托管所得结果一致。

2. 测点离格架愈远，流速愈稳定(水是由下经上流的)，并且速度曲线愈平滑。

此外，还测试了离水隙较远的组件棒束间流速，由于这里存在较粗的控制棒导向管，所以通光缝隙更小，但实测证明，运用这台仪器可以测量窄到 1.85 mm 的流道。

在测试中发现，水隙中的速度波动较大，与它相邻的组件间隙中的速度波动就小一些，而在再隔壁的棒束间隙中，流速波动就更趋于平稳。

利用这台测速仪还测量了 3.3 mm 组件间隙中从一根棒束壁面至另一边相邻棒束壁面之间的速度分布，每对共测 8 个点。测试数据表明，水道中心速度最高，愈靠两边愈低，这是符合一般规律的。

从以上测试结果可以看到，用激光多普勒测速技术来测量这一类狭窄通道中的流速分布，发挥了它独特的优点，得到了用其它方法无法取得的良好效果。

参 考 文 献

[1] Yoshio TAKADA et al., *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 10, № 2, 126(1969).

(编辑部收到日期：1981年3月30日)