

光纤双探针法测量液液两相流液滴直径

刘富贵, 谢庭亮, 矫彩山*, 高 杨, 李春晖

哈尔滨工程大学 核安全与仿真国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 作为设计脉冲筛板柱的重要水力学特性参数, 分散相液滴尺寸和液滴速率有重要的研究价值。使用内径为 38 mm 的标准脉冲筛板柱, 以水为连续相, 纯煤油为分散相, 利用光纤双探针法测量分散相表观流速、连续相表观流速和脉冲强度等因素对分散相液滴尺寸的影响。结果表明, 光纤两相流参数测量系统能够很好地识别液液两相中的不同相, 验证了光纤探针法应用于液液两相流的可行性。

关键词: 脉冲筛板萃取柱; 光纤探针; 液滴尺寸

中图分类号: TL241.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)S0-0085-05

doi: 10.7538/hhx.2014.36.S0.0085

Measurement of Drop Size in Liquid-Liquid Two-Phase Flow by Dual Optical Probe Technology

LIU Fu-gui, XIE Ting-liang, JIAO Cai-shan*, GAO Yang, LI Chun-hui

College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: For the important hydraulic parameters to design pulsed sieve column, dispersed drop size and drop velocity have important research value. The experiment was carried out in a 38 mm inner diameter standard pulse sieve column. The study based on two-phase: water was set as the continuous phase, while the pure kerosene as the dispersed phase. They went on with a dual optical probe technology to explore the influence of operation data, such as dispersed phase superficial velocity, continuous phase superficial velocity and pulse intensity on dispersed drop size. In the experiment, a measurement system for two-phase flow could recognize water and kerosene well in the liquid-liquid two-phase flow. Experimental results prove the feasibility of the application of optical probe technology to the liquid-liquid two-phase flow.

Key words: pulsed sieve-plate extraction column; optical probe; drop size

脉冲萃取柱的设计、优化和操作条件的确定都要求有流体水力学的实验数据。分散相液滴直径的大小是液滴表面能与液滴在萃取柱内两相逆流过程中湍动能相平衡的结果, 故分散相液滴

直径是衡量萃取柱萃取效率的必要参数^[1]。目前, 在两相流局部参数测量方法中, 探针方法应用最多。传统的电导探针法^[2]、热膜风速仪^[3]、激光多普勒测速^[4]等技术, 由于存在稳定性不高、机械

收稿日期: 2014-10-07; **修订日期:** 2014-11-18

作者简介: 刘富贵(1989—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 核燃料循环与材料专业

* **通信联系人:** 矫彩山(1963—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 核燃料循环与材料专业, E-mail: jiaocaishan@163.com

1.3 实验方法

1.3.1 光学菲涅尔反射原理 光纤液液两相流测量方法的基本原理是利用液液两相对光的折射率不同,探针尖端接收到强度不同的反射光,反射光最终被投射到光电转换器上,将不同的光强信号转化为不同的电压信号,由此来分辨探针尖端是处于分散相还是连续相。当折射率为 n_0 的光纤探针插入到折射率为 n 的介质中,反射率^[8] (R)为:

$$R = \left(\frac{n_0 - n}{n_0 + n} \right)^2 \quad (1)$$

在本实验中,光纤的折射率 $n_0 = 1.46$,水的折射率 $n(\text{H}_2\text{O}) = 1.33$,煤油的折射率 $n(\text{煤油}) = 1.44$ 。由式(1)可计算光纤置于水相和煤油相中的反射率分别为 0.22% 和 0.69%,两者相差 3 倍多,因此采用这种光纤双探针法进行水-煤油两相的测量可行。

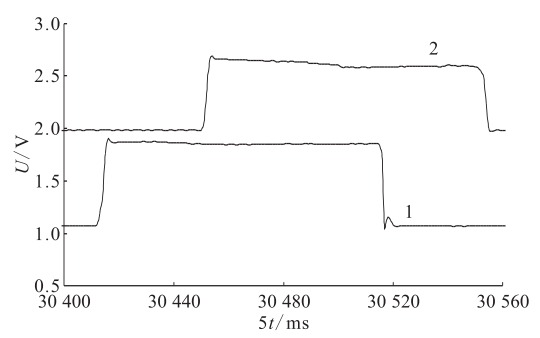
1.3.2 液滴速率与液滴弦长的求取 光纤探针检测到的光信号,通过光纤两相流测试系统进行采集,并转换成电信号,然后将电信号数据以文本文档形式自动储存在与该系统相连接的计算机上。当设定采集频率为 5 000 时,即系统每秒采集数据 5 000 次。图 2 是将采集到的某组数据绘图后从中截取的一段图像。其中纵坐标代表的是显示的电压值,横坐标代表的是从计时开始后采集信号的次数。图 3 是图 2 中第五个液滴信号的放大图,从中可以看出靠下方的那个波形信号是前探针探测到的,靠上方的那个波形信号是后探针探测到的。要通过获得的信号数据计算出液滴的速率和液滴直径,需要先将原始信号波形图进行方波化处理,这一般采用阈值方法^[9]。取 $0.1(U_{\max} - U_{\min})$ 为每根探针各自的阈值,其中 $U_{\max}$ 为探针探测的最大电压值, $U_{\min}$ 为探针探测的最小电压值。通过探针测得的原始信号计算出阈值,将大于阈值的值取为 1,小于或等于阈值的值取为 0。图 4 是将实验测得

的某个液滴信号的实际波形图利用阈值方法进行方波化处理之后的矩形波图。图 4 中, ΔT_1 , 前探针从接触到刺穿该液滴所经历的时间; ΔT_2 , 后探针从接触到刺穿该液滴所经历的时间。根据得到的有效液滴信号,由液滴速率^[8,10] 的计算公式,可以计算出液滴速率(v_d):

$$v_d = \frac{\Delta x}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

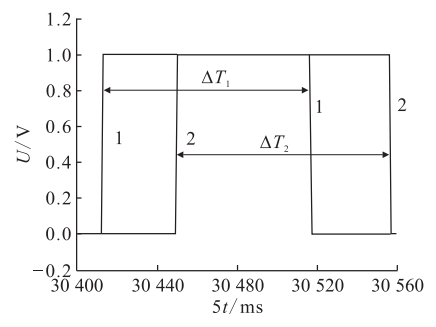
式中: Δx , 前、后探针之间的距离, mm; t_1 , 前探针接触液滴的起始时刻; t_2 , 后探针接触液滴的起始时刻。放大 200 倍的高清数码电子显微镜照片示于图 5。由于双探针刺入液滴时比单个探针刺入液滴时对液滴向上运动的阻力大得多,因此采用前探针与液滴的接触时间来求得液滴弦长(L)^[8,10-11]:

$$L = v_d \Delta T_1 \quad (3)$$



1——前探针(The front probe), 2——后探针(The rear probe)

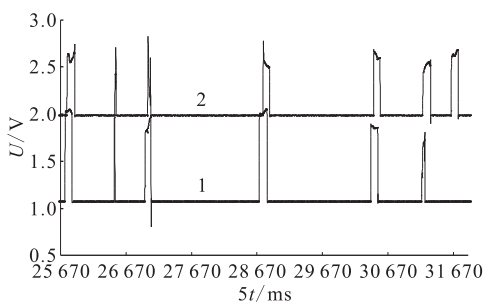
图 3 典型的单个液滴信号图
Fig. 3 Typical signals corresponding to a single drop passing the probe



1——前探针(The front probe), 2——后探针(The rear probe)

图 4 矩形波信号图
Fig. 4 Rectangular wave signals diagram

1.3.3 液滴的弦长与 Sauter 平均直径(D_{32})的关系 假设被测液滴是刚性球体,对于探针检测单个液滴,光纤针刺穿直径为 ξ 液滴的弦长在 $L \sim L + dL$ 内的概率密度是 $P(L|\xi)dL$,这是一个几何概率



1——前探针(The front probe), 2——后探针(The rear probe)

图 2 光纤探针信号波形图

Fig. 2 Optical fiber probe signals oscillogram

问题,由图 6 探针刺穿液滴的弦长 L 与液滴直径 ξ 之间的关系可知:

$$\int_L^\xi P(L|\xi)dL = \frac{\pi r^2}{\frac{1}{4}\pi\xi^2} = \frac{\xi^2 - L^2}{\xi^2} \quad (4)$$

式中: $P(L|\xi)$ 是探针刺穿直径为 ξ 的液滴时弦长为 L 的概率密度函数, r 为液滴球心到弦的距离。将式(4)两边对 L 微分,则有 $P(L|\xi)=\frac{2L}{\xi^2}(0<L\leq \xi)$ 。

由于测量的弦长 L 不可能大于 ξ ,所以 $P(L|\xi)=0$ ($L>\xi$)。对于探针检测液滴群,设探针刺穿液滴的弦长为 L 的概率密度函数为 $Z(L)$,则:

$$Z(L)dL = \int_L^\infty Y(\xi)[P(L|\xi)dL]d\xi \quad (5)$$

式中: $Y(\xi)$ 为探针刺穿直径为 ξ 的液滴的概率密度函数。利用(4)式与(5)式以及 Sauter 平均直径 D_{32} 的定义,经过一系列数学推导,可以得出液滴弦长与 D_{32} 的关系式^[12]:

$$D_{32} = \frac{3\int_0^\infty \xi Z(\xi)d\xi}{2\int_0^\infty Z(\xi)d\xi} = 1.5\bar{L} \quad (6)$$

式中: $\bar{L}=\frac{\int_0^\infty \xi Z(\xi)d\xi}{\int_0^\infty Z(\xi)d\xi}$,即探针所测得的球形液滴弦长的数学期望值。

假设光纤探针刺破直径大小不同液滴的概率都相同,那么液滴弦长的数学期望值等于它的算术平均值,故可从探针所测得的球形液滴弦长的算术平均值计算出 D_{32} 。

2 结果与讨论

实验中,探针接触不同相时,电压值会发生骤变,骤变时刻即是探针从一相中转到另一相的时刻,这样就能够准确得到探针接触每一相的时间,从而计算出液滴的 Sauter 平均直径。通过光纤双探针方法来测量水-煤油两相流中分散相的液滴 Sauter 平均直径切实可行,且非常方便、灵敏。

2.1 脉冲强度对液滴 Sauter 平均直径的影响

图 7 为当连续相表观流速(u_c)为 24 cm/min、分散相表观流速(u_d)为 36 cm/min 时,液滴 Sauter 平均直径随脉冲强度的变化趋势。由图 7 可以看出,液滴 Sauter 平均直径随脉冲强度的增大而显著减小。这是因为脉冲强度增大使单位体积分散相所受到的湍动能更大,使液滴 Sauter 平均直径越小。

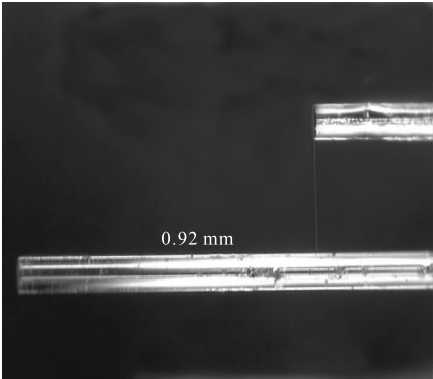


图 5 前后探针的距离
Fig. 5 Distance between two probes

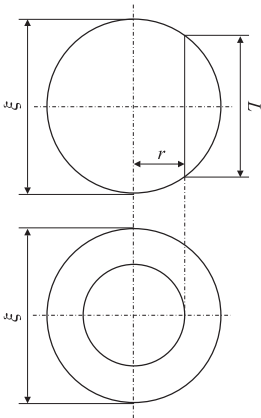


图 6 探针刺穿气泡的弦长与液滴直径的关系
Fig. 6 Relationship between chord and diameter of drops pierced by probes

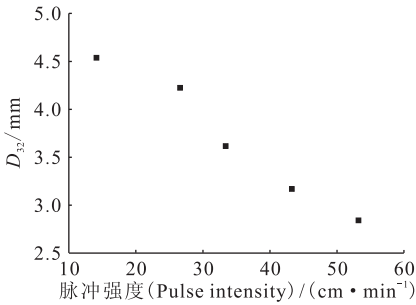


图 7 脉冲强度对液滴 Sauter 平均直径的影响
Fig. 7 Influence of pulse intensity on dispersed drop size

2.2 分散相表观流速对液滴 Sauter 平均直径的影响

图 8 为当 $u_c=16$ cm/min、脉冲强度为 30.26 cm/min 时,液滴 Sauter 平均直径随分散相表观流速的变化趋势。由图 8 可以看出,液滴 Sauter 平均直径随分散相表观流速增大而减小。这主要是因为分散相表观流速增大会使雷诺数增加,湍动能增大。

2.3 连续相表观流速对液滴 Sauter 平均直径的影响

图 9 为当 $u_d=28\text{ cm/min}$ 、脉冲强度为 34.48 cm/min 时,液滴 Sauter 平均直径随连续相表观流速的变化趋势。由图 9 可以看出,液滴 Sauter 平均直径随连续相表观流速的增大而减小,但是减小程度非常小。这是因为连续相表观流速增大除了会使雷诺数、湍动能增大,从而导致液滴 Sauter 平均直径减小之外,还会使分散相液滴向上运动速率减小,分散相平均停留时间增加,液滴间聚合概率增大,从而使液滴 Sauter 平均直径增大。但总的来说,当达到平衡时,后一种作用常常小于前一种作用。

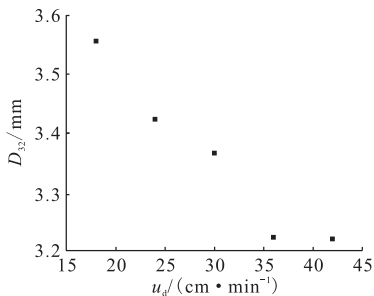


图 8 分散相表观流速对液滴 Sauter 平均直径的影响

Fig. 8 Influence of dispersed phase superficial velocity on dispersed drop size

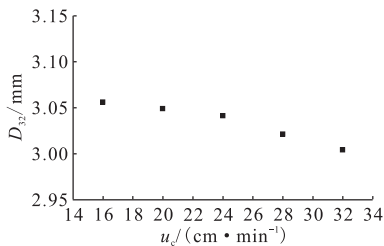


图 9 连续相表观流速对液滴 Sauter 平均直径的影响

Fig. 9 Influence of continuous phase superficial velocity on dispersed drop size

3 结 论

利用光纤双探针方法研究了在没有传质发生时,脉冲萃取柱中分散相液滴 Sauter 平均直径随一些工艺条件的变化规律,并得到以下结论:

- (1) 当脉冲强度、分散相表观流速增大时,即输入到萃取柱中的能量增多,雷诺数增大,湍动能增大,从而使分散相液滴 Sauter 平均直径显著减小;
- (2) 当连续相表观流速增大时,虽然湍动能

会增大,但同时也增加了分散相液滴由下向上运动的阻力,即降低了液滴的运动速率,增加了液滴在筛板下的平均停留时间,使得液滴聚合的概率增大。因此,随着连续相表观流速的增加,液滴的 Sauter 平均直径并未随之发生显著变化。

参考文献:

- [1] 远藤一夫,西村肇. 化学工学[J]. 1964, 28: 495-499.
- [2] Kataoka I, Ishii M, Serizawa A. Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow[J]. Int Multiphase Flow, 1986, 12(4): 505-529.
- [3] Utiger M, Stuber F, Duquenne A M, et al. Local measurements for the study of external loop airlift hydrodynamics[J]. Can J Chem Eng, 1999, 77(2): 375-382.
- [4] 路展民,李广达,彭五顺,等. 气泡-水流两相流的激光多普勒测量[J]. 力学学报, 1988, 20(6): 489-495.
- [5] Shen X Z, Kaichiro M, Hideo N. Error reduction, evaluation and correction for the intrusive optical four-sensor probe measurement in multi-dimensional two-phase flow[J]. Int J Heat Mass Tran, 2008, 51: 5882-5895.
- [6] Shen X Z, Kaichiro M, Hideo N. A method for measuring local instantaneous interfacial velocity vector in multi-dimensional two-phase flow[J]. Int J Multiphas Flow, 2008, 34: 502-509.
- [7] Barrau E, Riviere N, Poupot C, et al. Single and double optical probes in air-water two-phase flows: real time signal processing and sensor performance[J]. Int J Multiphase Flow, 1999, 25(2): 229-256.
- [8] Hamad F A, Pierscionek B K, Bruun H H. A dual optical probe for volume fraction, drop velocity and drop size measurements in liquid-liquid two-phase flow[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11: 1307-1318.
- [9] Chang S G, Bin Yu, Vetlerli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. Ieee T Image Process, 2000, 9(9): 1532-1546.
- [10] Hamad F A, Imberton F, Bruun H H. An optical probe for measurements in liquid-liquid two-phase flow[J]. Meas Sci Technol, 1997, 8: 1122-1132.
- [11] Cartellier A, Barrau E. Monofiber optical probes for gas detection and gas velocity measurements: optimized sensing tips[J]. Int J Multiphase Flow, 1998, 24(8): 1295-1315.
- [12] 吕砚山,张进明. 气液两相流特征参数的电子测量[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1989: 63-64.