

空气脉冲对吹气法测量脉冲萃取柱 下澄清段压力的影响

景山, 吴秋林

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201)

摘要:本工作实验考察在吹气条件下空气脉冲对脉冲萃取柱下澄清段所测量的柱重、有机相密度、两相界面和水相密度的时均压降影响。实验结果表明:在无空气脉冲且流速为零、有空气脉冲且单相流流速为零和有空气脉冲且单相流流速不为零的条件下,吹气法所测量的有机相密度、水相密度及两相界面的时均压降是一致的,而在有空气脉冲且两相流速均不为零的条件下,吹气法所测量的水相密度、有机相密度和两相界面的时均压降误差依次增大。对于有机相,吹气法所测量的柱重时均压降随着空气脉冲振幅的增加而减小,随着流速增加而增大;对于水相,由于其流动方向与有机相相反,柱重时均压降随流速的增加而减小。

关键词:脉冲萃取柱;压力测量;吹气法;下澄清段;空气脉冲

中图分类号:TQ028.3

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)05-0408-08

Effect of Air Pulsation on Pressure Measurement in Bottom Settler of Pulsed Extraction Column by Air Purge Method

JING Shan, WU Qiu-lin

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China)

Abstract: The present research aims to determine the effect of air pulsation on pressure measurements for the column weight, the density of organic phase, the position of two-phase-surface and the density of aqueous phase in the bottom settler of pulsed extraction column by air purge method. It is shown that the time-averaged pressure drops for the density of organic phase, the position of phase surface and the density of aqueous phase remain constant under three conditions such as both the flow rate of fluid and air pulsation are zero, the flow rate of fluid is zero but air pulsation is not zero and neither the flow rate of single fluid nor air pulsation is zero, however, the relative error of these above pressure drop successively increases under the condition that neither the flow rates of two phase fluid nor air pulsation is zero. For both organic and aqueous phase, the time-averaged pressure drop of column weight decreases with the increasing of pulsed amplitude under the condition that the flow rate of fluid is zero but air pulsation

is not zero. But for organic phase, the pressure drop increases with the increasing of the flow rate of fluid, however, it is opposed for aqueous phase due to the difference of flow direction.

Key words: pulsed extraction column; pressure measurement; air purge method; bottom settler; air pulsation

目前,吹气法在国内已成为乏燃料后处理工艺过程中在线测量脉冲萃取柱水力学参数的首选技术^[1]。当有机相连续时,空气脉冲对吹气法所测量的脉冲萃取柱下澄清段中两相界面、有机相密度、水相密度和柱重压降影响很大,这是吹气法在线测量这些参数的难点所在。

陈靖等^[2]首先从测量下澄清段的真实瞬间压降时间序列信号出发,初步研究了吹气法在线测量脉冲萃取柱参数的规律,此后,王悦云等^[3]根据吹气法所测量的时均柱重压降信号确定了流比不为 1:1 时的存留分数方法,景山等^[4-5]根据吹气法测量到的柱重瞬间压降特征确定了折流板脉冲萃取柱和喷嘴板脉冲萃取柱的脉冲振幅和频率在线测量方法。另一方面,宋子龙等^[6]通过安装气容式的阻尼装置将瞬间压降时间序列的信号转化为稳定信号后,研究了吹气法测量脉冲萃取柱参数的稳定性以及刘宇^[7]也综述了吹气法在中试厂中的应用方式,随后,王健等^[8]在中试厂工程脉冲萃取柱系统调试过程中,总结了他们在吹气法研究工作中的经验以及宋子龙等^[9]对吹气法在线测量脉冲萃取柱参数的稳定性再研究的工作。这一系列的研究工作为吹气法在乏燃料后处理工艺过程中的应用奠定了基础。

本工作主要讨论当无脉冲条件且流速为零、有脉冲条件且流速为零、单相流动且有脉冲条件下以及两相逆流且有脉冲条件下的下澄清段中测量点的时均压降变化规律,为其工业应用提供依据。

1 实验设备和原理

1.1 实验设备

实验设备参见文献^[10]。该设备主要由折流板萃取柱、气体脉冲发生系统、两相料液输送系统和压降测量系统组成。脉冲萃取柱下澄清段的吹气杯安装位置示于图 1。萃取柱柱体为玻璃管,折流板的板型及安装方式参见文献

^[3]。折流板脉冲萃取柱的柱径 D 为 0.05 m,板段高 2.05 m,板开孔率 23%,板间距 0.016 m,上下澄清段的高度和直径分别为 0.3 和 0.19 m。气体脉冲系统主要由气源、旋转阀、脉冲腿组成,通过调节旋转阀的转速来控制脉冲频率 f ,而脉冲振幅 A 则通过调节压缩空气的压降实现。脉冲频率和振幅用吹气法测量^[4]。

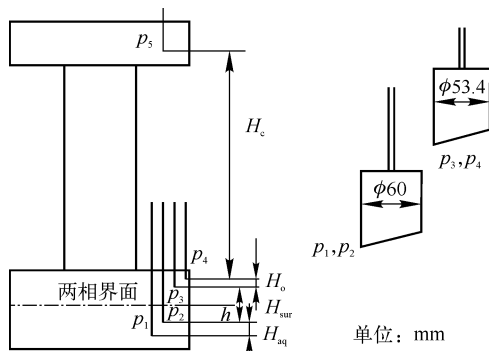


图 1 下澄清段吹气杯安装位置示意图
Fig. 1 Air purge probes and their positions in bottom settler of column

实验所用料液分别为 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 溶液和 30% TBP 煤油溶液,分以下 4 种状态进行研究。

1) 当无脉冲且流速为零时,仅通过吹气来确定下澄清段各测量点的压降。

2) 当有脉冲且流速为零时,测量脉冲振幅和频率对下澄清段各测量点压降的影响。

3) 当单相流动且有脉冲条件时,对于有机相,储槽中的 30% TBP 煤油溶液通过磁力泵、转子流量计计量后,由萃取柱底部注入柱中,向上流动并从上澄清段溢流进入储槽;相反,对于水相,储槽中的 HNO_3 溶液经磁力泵、转子流量计计量后由上澄清段注入萃取柱中,向下流动到下澄清段,由转子流量计计量后回到储槽,同时测量单相流动时下澄清段中各测压点的

压降。

4) 当两相逆流且有脉冲时, 储槽中的 HNO_3 溶液经磁力泵加压并通过转子流量计计量后, 由上澄清段注入萃取柱中, 在柱中由上向下流动, 储槽中的 30% TBP-煤油溶液通过磁力泵加压, 经转子流量计计量后由萃取柱底部加入柱中并向上流动, 两相在柱中逆流接触后, HNO_3 溶液经阀门调节流量, 经转子流量计计量后重新回到储槽, 30% TBP-煤油溶液由上澄清段溢出, 也重新回到储槽中。

1.2 数据处理原理

图 2 示出从计算机上获得的差压传感器的信号响应曲线。可见, 下澄清段 4 个吹气口受脉冲影响很大。

由图 2 可知: 4-5 吹气口的差压信号呈正弦波变化, 这恰好反映了脉冲的波形, 且正弦

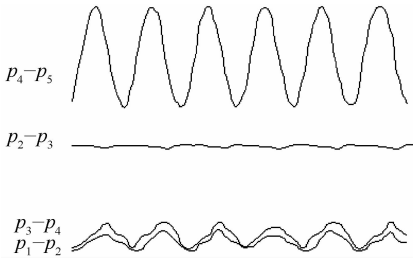


图 2 差压传感器信号响应曲线

Fig. 2 Response curves

from differential pressure sensors

波的周期与脉冲周期基本一致; 在 2-3 吹气口, 脉冲的影响基本上可抵消, 信号曲线波动较小; 1-2 和 3-4 吹气口的响应曲线呈微弱的正弦波动。

对于上述瞬间压降时间序列信号, 在系统达到稳态后, 无脉冲时, 每秒取 20 个瞬间数值, 取 400 个数据; 有脉冲时, 在 20 个周期后, 用平均的方法分别求得柱重、有机相密度、界面和水相密度的时均压降分别为 Δp_{4-5} 、 Δp_{3-4} 、 Δp_{2-3} 和 Δp_{1-2} 。

在脉冲萃取柱中, 各吹气杯的安装是固定的, 因此, 各吹气杯间相对高度也是确定的。为便于比较 4 种操作条件下测量的时均压降变化的特点, 消除物性密度的影响, 将 4 个时均压降值转化为所对应的测量高度, 即柱重测量高度 H_c 、有机相密度测量高度 H_o 、界面测量高度 H_{sur} 和水相密度测量高度 H_{aq} , 有:

$$H_c = \Delta p_{4-5} / \rho g \quad (1)$$

$$H_o = \Delta p_{3-4} / \rho g \quad (2)$$

$$H_{sur} = \Delta p_{2-3} / \rho g \quad (3)$$

$$H_{aq} = \Delta p_{1-2} / \rho g \quad (4)$$

2 实验结果和讨论

2.1 H_{sur} 、 H_{aq} 和 H_o 的规律

1) 进料速率为零时, 不同料液中的 H_c 、 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 分别列于表 1 和 2。

表 1 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 溶液中的 H_c 、 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq}

Table 1 Values of H_c , H_o , H_{sur} and H_{aq} for $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ solution

f/Hz	A/m	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H_c/m	H_o/m	H_{sur}/m	H_{aq}/m
1.5	0.005 5	0	2.126	0.055	0.096	0.070
1.5	0.006 6	0	2.123	0.056	0.096	0.070
1.5	0.007 6	0	2.125	0.056	0.095	0.071
1.33	0.005 5	0	2.124	0.055	0.097	0.071
1.33	0.007 1	0	2.123	0.056	0.096	0.070
1.33	0.009 0	0	2.125	0.057	0.096	0.070
1.16	0.013 1	0	2.126	0.057	0.096	0.071
1.16	0.011 0	0	2.125	0.056	0.096	0.071
1.16	0.008 3	0	2.120	0.056	0.096	0.071
1	0.010 0	0	2.128	0.056	0.096	0.072
1	0.015 0	0	2.128	0.057	0.096	0.072
1	0.016 7	0	2.124	0.058	0.096	0.072
0	0	0	2.136	0.056	0.095	0.071

表 2 30%TBP-煤油溶液中的 H_c 、 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq}
 Table 2 Values of H_c , H_o , H_{sur} and H_{aq} for 30%TBP-kerosene solution

f/Hz	A/m	$u/(m \cdot s^{-1})$	H_c/m	H_o/m	H_{sur}/m	H_{aq}/m
1.5	0.004 7	0	2.129	0.055	0.096	0.071
1.5	0.006 7	0	2.124	0.055	0.095	0.071
1.5	0.007 5	0	2.121	0.055	0.095	0.071
1.33	0.010 0	0	2.125	0.056	0.095	0.071
1.33	0.008 3	0	2.124	0.055	0.096	0.071
1.33	0.006 0	0	2.124	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007 0	0	2.124	0.055	0.096	0.071
1.16	0.010 0	0	2.124	0.056	0.096	0.071
1.16	0.014 0	0	2.120	0.057	0.095	0.071
1	0.005 0	0	2.129	0.056	0.095	0.070
1	0.008 7	0	2.123	0.056	0.095	0.071
1	0.014 0	0	2.118	0.057	0.095	0.071
1	0.017 0	0	2.118	0.058	0.095	0.071
1	0.024 0	0	2.108	0.060	0.094	0.072
0	0	0	2.136	0.056	0.095	0.071

由表 1 和 2 可知:无论是水相还是有机相,当无脉冲条件且流速为零时, H_c 、 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 是恒定的,分别为 2.136、0.056、0.071 和 0.095 1 m。这可用于通过吹气法来标定脉冲萃取柱下澄清段中各吹气杯的安装位置。

同时,由表 1 和 2 可知:对于水相和有机相, H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 均不随 A 的增加而发生变化。目前实验测量的数据说明,这 3 个高度分别为 (0.056 ± 0.001) 、 (0.095 ± 0.001) 和 (0.071 ± 0.001) m。其中, H_c 的规律将在 2.2 节中讨论。

2) 有脉冲且单相流条件下, H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 分别由式(2)、(3)和(4)求得,结果列于表 3 和 4。

由表 3 和 4 可知:当水相脉冲频率为 1 Hz 和有机相脉冲频率为 1.16 Hz 时, H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 在脉冲存在条件下均不随 u 增加而变化。由于表中的单相流速率是根据柱横截面积来计算的,而下澄清段的横截面积是柱横截面积的 16 倍,所以,对应的单相流流速对下澄清段的压降测量影响可忽略。对于目前实验测量的数据, H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 分别为 (0.056 ± 0.001) 、 (0.095 ± 0.001) 和 (0.071 ± 0.001) m,且其它

频率条件下,结论亦相同。

3) 对于脉冲且两相流条件,主要数据来自于连续相为有机相时水力学实验中所测量数据的总结。在实验中测得两相界面的高度 h 后,代入下式求得 H_{sur} 、 H_o 和 H_{aq} 分别由式(2)和(4)求得。计算的 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq} 列于表 5。

$$\Delta p_{2-3} = \rho_c g (H_{sur} - h) + \rho_d g h \quad (5)$$

由表 5 可知:当有机相为连续相时,在实验测量的范围内,下澄清段的 H_{aq} 的值基本上在 (0.071 ± 0.003) m 范围内,测量值的波动范围比上述两个条件下的增大; H_o 的测量的最大值为 0.058 m,最小值为 0.047 m,这样使得吹气法测量的压力波动范围增加; H_{sur} 值一般高于上述两个条件下的值,其原因在 2.2 节中加以说明。

2.2 H_c 的规律

1) 有脉冲且进料速率为零

表 1 和 2 中的 H_c 值由式(1)计算得到,它与 A 的关系示于图 3。

由图 3a 可知:随着 A 增加, H_c 比无脉冲振幅测量值小,但基本上是 1 条平行线。实验中观察到,随着 A 增加,吹气杯和吹气管道中的气体被压缩,这时测量到的时均压降所对应的高度减小,但在本实验范围内,其压缩的程度是

表3 $Af \neq 0$ 且 $u \neq 0$ 条件下 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 溶液中的 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq}
 Table 3 Values of H_o , H_{sur} and H_{aq} for $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 solution at $Af \neq 0$ and $u \neq 0$

f/Hz	A/m	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H_o/m	H_{sur}/m	H_{aq}/m
1	0.011	0	0.056	0.096	0.071
1	0.011	0.012 5	0.056	0.096	0.072
1	0.011	0.010 0	0.056	0.096	0.072
1	0.011	0.007 5	0.056	0.096	0.071
1	0.011	0.005 0	0.056	0.096	0.072
1	0.011	0.002 5	0.056	0.096	0.071
1	0.015	0	0.057	0.096	0.072
1	0.015	0.002 5	0.057	0.096	0.072
1	0.015	0.005 0	0.057	0.096	0.072
1	0.015	0.007 5	0.057	0.096	0.072
1	0.015	0.010 0	0.057	0.096	0.072
1	0.015	0.012 5	0.057	0.097	0.072
1	0.018	0	0.058	0.096	0.072
1	0.018	0.012 5	0.058	0.096	0.072
1	0.018	0.010 0	0.058	0.096	0.072
1	0.018	0.007 5	0.058	0.096	0.071
1	0.018	0.005 0	0.058	0.096	0.071
0	0	0	0.056	0.095	0.071

表4 $Af \neq 0$ 且 $u \neq 0$ 条件下 30%TBP-煤油溶液中的 H_o 、 H_{sur} 和 H_{aq}
 Table 4 Values of H_o , H_{sur} and H_{aq} for 30%TBP-kerosene solution at $Af \neq 0$ and $u \neq 0$

f/Hz	A/m	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H_o/m	H_{sur}/m	H_{aq}/m
1.16	0.007	0	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007	0.013 3	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007	0.010 6	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007	0.008 0	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007	0.005 3	0.055	0.096	0.071
1.16	0.007	0.002 7	0.055	0.096	0.071
1.16	0.010	0	0.056	0.096	0.071
1.16	0.010	0.002 7	0.056	0.096	0.071
1.16	0.010	0.005 3	0.056	0.096	0.071
1.16	0.010	0.008 0	0.056	0.096	0.071
1.16	0.010	0.011 0	0.056	0.096	0.071
1.16	0.010	0.013 3	0.056	0.096	0.071
1.16	0.014	0	0.056	0.095	0.071
1.16	0.014	0.013 3	0.056	0.095	0.071
1.16	0.014	0.010 6	0.056	0.095	0.071
1.16	0.014	0.008 0	0.056	0.095	0.071
1.16	0.014	0.005 3	0.056	0.095	0.071
1.16	0.014	0.002 7	0.056	0.095	0.071
0	0	0	0.056	0.095	0.071

表5 $Af \neq 0$ 且 $u \neq 0$ 条件下 30%TBP-煤油溶液为连续相时的 H_o , H_{sur} 和 H_{aq}
 Table 5 Values of H_o , H_{sur} and H_{aq} for 30%TBP-kerosene solution at $Af \neq 0$ and $u \neq 0$

f/Hz	A/m	H_o/m	H_{sur}/m	H_{aq}/m
1	0.012	0.058	0.101	0.069
1	0.013	0.054	0.105	0.068
1	0.016	0.051	0.107	0.068
1.16	0.007	0.050	0.106	0.070
1.16	0.009	0.055	0.101	0.069
1.16	0.011	0.050	0.107	0.067
1.16	0.013	0.050	0.107	0.067
1.16	0.007	0.050	0.106	0.070
1.33	0.007	0.049	0.109	0.071
1.33	0.009	0.052	0.104	0.071
1.33	0.010	0.050	0.107	0.066
1.33	0.010	0.049	0.107	0.067
1.5	0.006	0.047	0.107	0.071
1.5	0.007	0.052	0.103	0.070
1.5	0.008	0.054	0.103	0.068
1.5	0.010	0.049	0.109	0.067
0.83	0.011	0.049	0.109	0.070
0.83	0.015	0.056	0.105	0.069
0.83	0.020	0.063	0.104	0.068
0.83	0.022	0.058	0.107	0.067
0	0	0.056	0.095	0.071

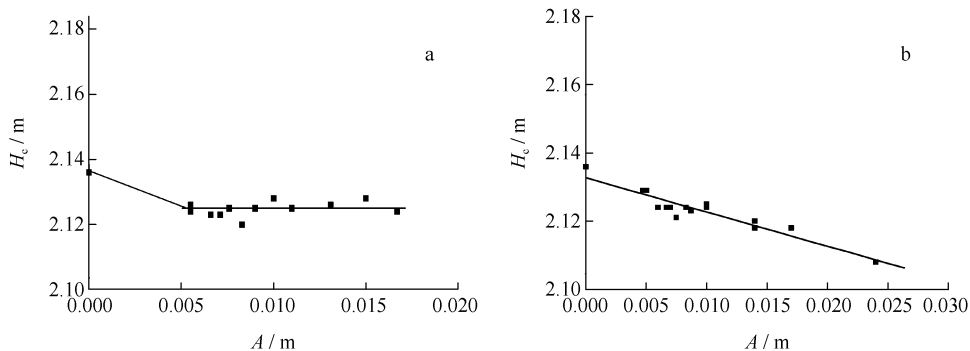


图3 水相(a)和有机相(b)进料速率为零时 H_c 和 A 的关系

Fig. 3 Relationship between H_c and A at $u=0$ for $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ solution (a) and 30%TBP-kerosene solution (b)

一致的, 因此, 在脉冲振幅存在时, H_c 约为 $(2.125 \pm 0.005) \text{ m}$ 。由图 1 可知, 空气脉冲对上澄清段中的吹气管道测量压降 p_5 影响最小,

那么, 吹气杯 4 则反映了下澄清段中吹气杯中气体被压缩的状态。

在单相流且脉冲存在条件下, 下澄清段中

的吹气杯 1 和 2、2 和 3 及 3 和 4 之间的气体被压缩的程度近似相同,因此,造成此状态下 H_{aq} 、 H_{sur} 和 H_o 值与无脉冲条件下的相同;同样,在有脉冲且两相流条件下,吹气杯 1 和 2 均浸没在水相中,两者中的空气被压缩的程度也基本相同,因而,在此操作条件下的 H_{aq} 与无脉冲条件下的基本一致。

由图 3b 可知:随着 A 增加, H_c 线性减小,这与水相规律是不同的。其主要原因是:相对于水相,有机相的表面张力较小,在下澄清段中吹气杯内,有机相与空气易形成气油混合相(此现象易从脉冲腿中观察到),且随着 A 增加,气油混合相的强度相应增大,在气杯内被压缩的高度相应增加,从而使得测量的柱重压降减小。在单相流且脉冲存在条件下,下澄清段中的吹气杯 1 和 2、2 和 3 及 3 和 4 之间的气体被压缩的程度近似相同,因此,造成了此状态下 H_{aq} 、 H_{sur} 和 H_o 与无脉冲条件下的相同。同样,在有脉冲且两相流动条件下,吹气杯 3 和 4 均浸没在有机相中,吹气杯 4 距离脉冲腿的高度较近,空气脉冲对它的影响大于对吹气杯 3 的影响,造成了 H_o 的误差较大;测量界面的吹气杯 2 浸没在水相中,由图 3b 可知,吹气杯 2 中的气体压缩随着 A 的变化是常量,而吹气杯 3 浸没在有机相中,气体压缩程度随着 A 增加而增大,因此,造成了 H_{sur} 值比无脉冲且流速为零时的值大。

2) 有脉冲且单相流不为零

频率为 1 Hz 时,不同 A 条件下,有机相和

水相流速对 H_c 的影响示于图 4。由图 4a 可知,随着 u 增大, H_c 线性增加,并随着 A 增加,线性斜率也增大。其它频率条件下的规律是相同的。与图 3b 相比, H_c 增加的幅值远比脉冲条件且流速为零时的大,因此,所增加的 H_c 是有机相流速引起的时均摩擦压降的贡献。

由图 4b 可知,随着 u 增大, H_c 线性减小,且随着 A 增加,线性斜率也增大。这一现象主要是因水相是从脉冲萃取柱上端向下流动,其时均摩擦压降造成了柱中时均静压的减少,因此,导致 H_c 数值降低。其它频率条件下也是相同的规律。

单相流时均摩擦压降主要用于计算流道影响因子,这方面的工作详见文献[3]。两相流动条件下柱重时均压降包括时均摩擦压降和由于存留分数存在时的时均静压降两部分,它主要用于在线测量脉冲萃取柱的分散相存留分数,这方面的工作也详见文献[3]。

3 结论

1) 在无脉冲且流速为零时,吹气法所测量的时均压降可用来标定用于测量柱重、有机相密度、两相界面和水相密度的 2 个吹气杯之间的安装位置。

2) 有脉冲且流速为零时,空气脉冲对下澄清段中有机相密度、两相界面和水相密度的测量无影响,但无论是水相还是有机相,柱重压降均因吹气杯气体被压缩而减小。

3) 有脉冲且单相流存在时,单相流流速

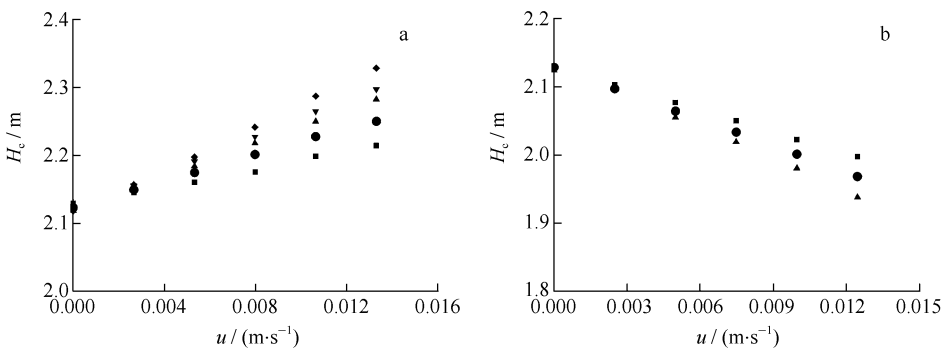


图 4 $f=1$ Hz 时溶液中 H_c 与 u 的关系

Fig. 4 Relationships between H_c and u at $f=1$ Hz for different solutions

a, 30% TBP-煤油溶液: ■ — $A=0.004$ 8 m, ● — $A=0.008$ 8 m, ▲ — $A=0.014$ 1 m, ▼ — $A=0.017$ 1 m, ◆ — $A=0.021$ m; b, 1 mol · L⁻¹ HNO₃ 溶液: ■ — $A=0.011$ m, ● — $A=0.015$ m, ▲ — $A=0.018$ m

对下澄清段中的有机相密度、界面和水相密度的测量无影响,但单相流流速对柱重压降的影响却不可忽略。

4) 有脉冲且两相流存在时,因浸没在水相中吹气杯气体被压缩程度相似,从而造成了空气脉冲对下澄清段中水相密度测量影响最小;浸没在有机相中的吹气杯气体受脉冲腿高度影响,压缩程度略有差异,造成了空气脉冲对下澄清段中有机相密度测量影响次之;浸没在界面两端吹气杯气体所压缩的程度相差最大,造成了空气脉冲对下澄清段中界面测量影响最大。同时,两相流速对柱重高度的影响是不可忽略的。

参考文献:

- [1] 袁世颐. 乏燃料后处理中试厂间接式和非接触式测量仪表的研究及应用[J]. 核科技进展, 2005(3): 24-32.
- [2] 陈靖,徐世平,吴秋林,等. 吹气法在线测量脉冲萃取柱参数研究[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(增刊): 34-40.
CHEN Jing, XU Shiping, WU Qiulin, et al. On-line measurement of pulsed column parameters by air purge[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(Suppl.): 34-40(in Chinese).
- [3] 王悦云,景山,吴伟,等. $\phi 50$ 折流板脉冲萃取柱吹气法测量存留分数[J]. 化工学报, 2005, 56(7): 1 253-1 259.
WANG Yueyun, JING Shan, WU Wei, et al. Determination of holdup by air purge in $\phi 50$ mm discs and doughnuts pulsed extraction column[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(7): 1 253-1 259(in Chinese).
- [4] 景山,王悦云,吴秋林. 吹气法在线测量折流板脉冲萃取柱脉冲操作参数[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(6): 716-721.
JING Shan, WANG Yueyun, WU Qiulin. On-line determination of pulsed parameters for pulsed extraction column with discs and doughnuts by air purge method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(6): 716-721(in Chinese).
- [5] 景山,吴秋林,王悦云. 喷嘴板脉冲萃取柱脉冲振幅在线测量[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(4): 292-295.
JING Shan, WU Qiulin, WANG Yueyun. On-line measurement of pulsed amplitude for standard spray-sieve-plate pulsed extraction column[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(4): 292-295(in Chinese).
- [6] 宋子龙. 脉冲萃取柱有关参数稳定测量的研究[J]. 核科技进展, 2005(3): 35-46.
- [7] 刘宇. 吹气仪表在中试厂的应用[J]. 核科技进展, 2005(3): 47-57.
- [8] 王健,张正斌,李靖,等. 中试工程脉冲萃取柱系统调试与改进[J]. 核科技进展, 2006(3): 225-243.
- [9] 宋子龙,赵晓兰,牛爱文,等. 脉冲萃取柱有关参数稳定测量的继续研究[J]. 核科技进展, 2006(3): 252-268.
- [10] 毕升,景山,吴秋林,等. 30% TBP-煤油- HNO_3 体系在折流板脉冲萃取柱中的水力学性能[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(4): 410-415.
BI Sheng, JING Shan, WU Qiulin, et al. Hydrodynamics characteristics of 30% TBP-kerosene/nitric acid solution in discs and doughnuts pulsed extraction column[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(4): 410-415(in Chinese).