

# 测定旋转填料床持液量的一种新方法

周莉骅, 刘有智, 李光明

(中北大学 山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要:**介绍了一种在线测定旋转填料床持液量的方法和装置, 填料持液量以闭合电路中欧姆电阻的阻值体现。考察了不同液体流量、转子转速、液体黏度和气体流量时错流旋转填料床的持液量。结果表明, 持液量随液体流量和黏度的增大而增大, 随转速增大而减小, 气体流量影响不明显。与传统填料塔比较, 旋转填料床负荷小、相接触面积大, 强化了气液传质过程。使用量纲分析法对试验数据进行非线性回归得到关于持液量的关联式, 此式较好地吻合了试验数据。

**关键词:**持液量; 旋转填料床; 计算机处理

中图分类号: TQ016.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)06-0091-04

## A new method of determining liquid hold-up in rotating packed bed

ZHOU Li-hua, LIU You-zhi, LI Guang-ming

(Research Center of High Gravity Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A new method and setup of determining liquid holdup of rotating packed bed (RPB) online is introduced. Liquid in packing behaves as an ohmic resistor of closed circuit. While different effect factors of liquid hold-up in cross-flow RPB are reviewed, mainly including liquid flow rate, centrifugal acceleration, viscosity and gas flow rate. Experimental results represent liquid holdup increases with increased liquid flow rate and viscosity, decreases with increased centrifugal acceleration and could hardly influence the gas flow rate. They indicate loading of RPB is smaller and the interphase contact area of RPB is bigger than that of the conventional tower and RPB extremely strengthens the gas-liquid mass transfer process. A correlation regresses nonlinearly with the experimental data by the way of the dimensional analysis. The expression correlates well with the experimental data.

**Key words:** liquid holdup; rotating packed bed; computer processing

旋转填料床(Rotating Packed Bed, RPB)的持液量是重要的流体力学性能和工艺设计参数, 它对液泛速度、压降、传质效率、最大允许通量、设备的稳定性和力学强度等都有重要影响。当持液量增大时, 转子的负载增大, 将导致旋转填料床的传动装置负荷增大, 严重时会影响设备的正常运行<sup>[1]</sup>。传统填料塔的持液量测量方法主要有2种: 重量法和容量法<sup>[2-3]</sup>。这2种方法对于体积大、填料多的静止填料塔可以忽略塔壁、管路、收集的影响, 误差较小, 但不适于测量旋转填料床的持液量, 旋转填料床体积小, 停留时间短, 手工操作误差较大, 得到的实验数据点数量有限、精度低。国内外对旋转填料床持液量的研究不多, 主要有 Basic 和 Burns 的报道<sup>[4-5]</sup>, 其他多为测量压降或停留时间等间接得到持液量<sup>[6-7]</sup>, 且这些研究对象均为逆流旋转床。由于在错流旋转床中气、液错流接触, 不易发生液泛, 工业应用旋转床多为错流旋转床, 但关于错流旋转床的流体力学研究甚少。该试验尝试利用溶液的电导性, 建立闭合电路, 通过数据采集系统得到填料持有

液量的电阻随时间变化的曲线图, 对照电阻-液量的标准曲线得到错流旋转填料床的持液量, 为旋转填料床的工业应用提供可靠数据。

## 1 试验研究

### 1.1 试验装置

如图1所示为试验用错流旋转填料床, 采用与工业上常用的不锈钢丝网填料相似度较高的尼龙丝网作填料(丝径0.26 mm, 具有一定弯曲度), 缠绕后的填料为内径36 mm、外径126 mm、高度60 mm的柱形, 空隙率为0.61。

溶液通过液体分布器后径向通过填料, 在填料中与气体错流接触。转子中的填料使用绝缘较好的尼龙丝作为填料, 是为了避免对电导信号的采集与传递的影响。填料内外两侧安装金属丝网电极, 若填料使用填料丝网, 则金属电极丝径需与填料丝径几乎相当, 网格大小与填料空隙率相当, 以电极不影响流体在填料内的流动为宜。

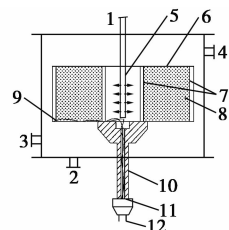
填料的上、下挡板均采用绝缘材料制作, 以使

收稿日期: 2010-03-25

基金项目: 山西省青年科技研究基金项目(2010021007-2, 2008021009-2)

作者简介: 周莉骅(1982-), 女, 硕士生; 刘有智(1958-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事超重力技术理论及应用研究和无机膜技术的制备及应用研究, 通讯联系人, 0351-3921986, liuyz@nuc.edu.cn。

填料及挡板对溶液电导的影响减小到最低;内外环柱可采用不锈钢制作,原因是填料电极之间除液体外无其他导电介质,环柱不影响液体欧姆电阻,还可以固定电极及填料;丝网电极为紫铜丝网,铜质量分数为98%,具有高电导性。电极导线通过中空转轴与滑环连接,与滑环运动端子相连,数据采集系统通过导线与滑环静止端子相连,将运动的电信号转化为静止的电信号,滑环是重要的中间传递部件。

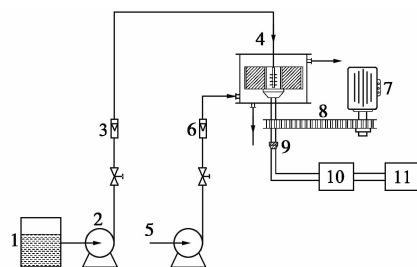


1—液体入口;2—液体出口;3—气体入口;4—气体出口;  
5—液体分布器;6—转子;7—电极;8—填料;9—导线;  
10—转轴;11—运动端子;12—静止端子

图1 试验用错流旋转填料床

## 1.2 试验流程

如图2所示,溶液泵入旋转填料床的同时,气体通过风机进入旋转填料床,二者在高速旋转填料中错流接触后分别通过气、液出口流出旋转填料床;转子通过同步带由电机带动,转轴上端连接转子,下端与滑环连接;滑环与数据采集系统连接,由计算机在线实时采集得到数据曲线,并保存数据文件(TXT文档)。旋转填料床填料中持有液体在闭合电路中相当于一个液体欧姆电阻,需使用高频交流电源,以消除旋转填料床工作中水溶液电解的影响。



1—溶液储槽;2—液泵;3—液体流量计;4—旋转填料床;  
5—风机;6—气体流量计;7—电机;8—同步带及同步带轮;  
9—滑环;10—数据采集系统;11—计算机

图2 试验流程图

## 1.3 测定方法

旋转填料床的气液流量稳定后,开启数据采集软件采集电阻数据;采集间隔时间可设定,最小可达1 ms,当气液流量稳定后,得到实时稳定电阻-时间

曲线;填料内、外两侧电极之间填料持有的液量通过电阻体现。由数据采集系统在线测量得到电阻值,再由电阻-液量标准曲线得到对应液量,计算可得持液量。

电阻-液量标准曲线可由以下方法测定:当旋转填料床停止供给溶液后,让转子再高速空转10 min左右,测量可得“最小电阻值”;将转子停止转动,缓慢注入大量溶液将填料淹没,再快速放出全部溶液,测量可得“最大电阻值”;让转子空转10 min以上,收集并计量溶液体积;将所得体积分成若干等份,分批次均匀再次注入填料,每加一次在线测量一次电阻值,即可得到标准溶液电阻值 $R$ 与溶液量 $Q$ 的对应曲线图(见图3)。通过Data软件可将曲线图拟合成计算公式,将电阻直接代入公式可得溶液量,此法更简便、准确。

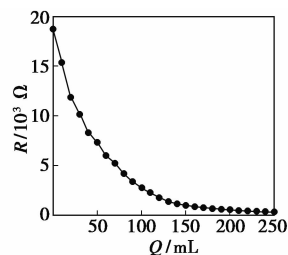


图3 水的电阻值与溶液量的对应曲线

## 1.4 数据采集系统

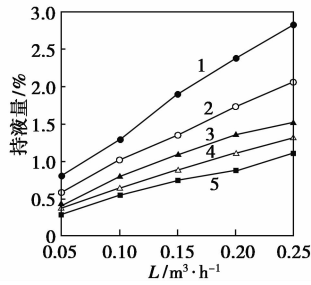
数据采集系统程序由Visual Basic编写,软件的上位机主界面包括实验通道选择、滤波选择、开始试验、数据显示和数据保存。试验通道可选择单通道和双通道,即试验可同时采集两对电极的电信号情况;数字滤波为可选设置,如需要采集原始数据可将滤波关闭,若选择数字滤波并设置滤波参数后,原始采样数据经过滤波、淘汰可疑数据、略去零点值等操作,再进入数据保存。开始试验后计算机控制液体阀门,开启阀门后调节液量,待流量计稳定后即可采集数据。开始采集数据后,主界面显示采集曲线,曲线右侧实时显示电阻值及采集时间,鼠标点击曲线上任一点可显示该点电阻值。停止采集数据后即可进行数据保存,系统自动将数据形成TXT文件,也可保存图像文件。

## 2 结果与讨论

恒温283.65 K时,该试验考察了液体流量、气体流量、转子转速和液体黏度对持液量的影响。

### 2.1 液体流量 $L$ 对持液量的影响

从图4可以看出,对于黏度不变的水溶液,当

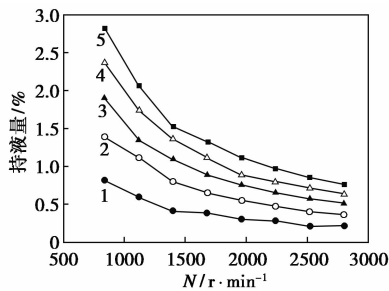


1—840 r/min; 2—1120 r/min; 3—1400 r/min;  
4—1680 r/min; 5—1960 r/min  
 $\mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}, G = 0$

图4 液体流量对持液量的影响

气体流量为0时,即单相持液量随着液体流量的增大而增大,当液体流量由0.05 m<sup>3</sup>/h增加到0.25 m<sup>3</sup>/h时,持液量由0.3%增至2.8%。这是由于液体在高速旋转的填料中液体同时受到向下的地球引力场的重力和水平方向高速旋转的填料模拟的超重力场的离心力,当转子转速为840 r/min时,液体在床层内径处受到的水平离心力约80倍于地球引力场的重力,液体几乎为水平运动。填料内径至外径距离固定,当液体流量增大时,单位填料内持有液量增大,即持液量增大。

2.2 转子转速  $N$  对持液量的影响



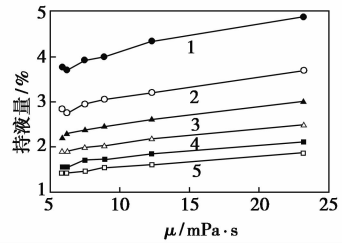
1—0.05 m<sup>3</sup>/h; 2—0.10 m<sup>3</sup>/h; 3—0.15 m<sup>3</sup>/h;  
4—0.20 m<sup>3</sup>/h; 5—0.25 m<sup>3</sup>/h  
 $\mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}, G = 0$

图5 转子转速对持液量的影响

从图5可以看出,黏度不变且气体流量为零时,单相持液量随着转速的增大而减小,当转子转速由840 r/min增加到2800 r/inm时,持液量由2.7%降至0.2%。这是由于液量不变时,填料表面液膜厚度不变,从液膜内流速分布看,接近于填料表面的液体流速由于黏滞力的影响接近填料运动的速度,而远离填料表面的液体流速快得多。因此内径处液体流量一定,液体进入填料层并与其撞击后,其动能迅速被填料吸收,液体再向前运动的能量由填料提供。

当转子转速增大时,液膜表面液体速度快,更早地离开填料,则持液量减小。

2.3 液体黏度  $\mu$  对持液量的影响

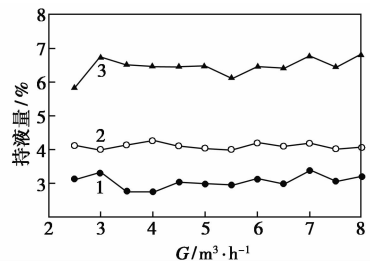


1—840 r/min; 2—1120 r/min; 3—1400 r/min;  
4—1680 r/min; 5—1960 r/min; 5—2240 r/min  
 $L = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}, G = 0$

图6 液体黏度对持液量的影响

以羧甲基纤维素钠调节水溶液的黏度,测定气体流量为零、液体流量为0.1 m<sup>3</sup>/h时,不同黏度情况单相持液量的变化。从图6可以看出,持液量随黏度的增大逐渐增大,当黏度由5.9 mPa·s增加到23.2 mPa·s时,持液量从0.7%增至5%。相同操作条件下,黏性溶液持液量比纯水持液量略大。这是由于液体流量不变,即填料内径处液膜厚度相同时,若转速不变,液膜表面液体速度与转子填料运动速度几乎相同,由于黏性溶液分子间作用力大,则溶液黏度越大,液膜表面液体相对速度降低,所以持液量略大。

2.4 气体流量  $G$  对持液量的影响



1—840 r/min; 2—1680 r/min; 3—2520 r/min  
 $L = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}, \mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

图7 气体流量对持液量的影响

从图7可以看出,当液体黏度不变、液体流量为0.1 m<sup>3</sup>/h时,转子转速分别为840、1680、2520 r/min,气体流量由2.5 m<sup>3</sup>/h增加到8.0 m<sup>3</sup>/h时,气体流量对持液量几乎没有影响。原因是当转子转速为840 r/min时,液体在床层内径处受到约80倍于地球引力场的重力作用,若要阻止液体的流动,所需的力是相当可观的。气体流量为8.0 m<sup>3</sup>/h时,内径处0.16 m/s的气体流速在气液界面上造成的剪应

力不足以产生明显影响。正是由于这一原因,在旋转填料床中泛点气速大大提高。

## 2.5 持液量的回归

持液量受到体系性质和填料形态、尺寸的强烈影响,故可采用量纲分析方法<sup>[8]</sup>对旋转填料床的持液量进行处理。影响持液量的参数见表1。

表1 影响持液量的物理量

影响参数	符号	量纲
液体质量通量	$D$	$\text{ML}^{-2} \cdot \theta^{-1}$
液体黏度	$\mu$	$\text{M}\theta^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$
转子转速	$\omega$	$\theta^{-1}$
气体流量	$G$	$\text{L}^3 \cdot \theta^{-1}$
填料半径	$r$	$\text{L}$

影响持液量主要有5个物理量,这些物理量涉及3个基本量纲:长度(L)、质量(M)和时间( $\theta$ ),量纲为1的数量有2个,可以把持液量表示为式(1):

$$\phi = f(D, \mu, \omega, G, r) \quad (1)$$

将各物理量的量纲代入得式(2):

$$\phi = D^a \mu^b \omega^c G^d r^e \quad (2)$$

整理变形得式(3):

$$\phi = K(Dr/\mu)^a (G/\omega r^3)^d \quad (3)$$

其中, $K, a, d$ 为待定系数,运用DATAFIT软件对式(3)进行非线性回归,得式(4):

$$\phi = 2.77 \times 10^{-4} (Dr/\mu)^{0.77} (G/\omega r^3)^{11} \quad (4)$$

在试验条件范围为  $0.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq D \leq 4.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $2.78 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \leq G \leq 22.22 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $87.9 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 293.1 \text{ rad/s}$ 、 $5.9 \text{ mPa} \cdot \text{s} \leq \mu \leq 23.2 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  时,平均相对误差为5.2%,很好地拟合了试验数据,如图8所示。

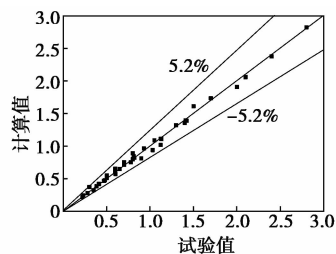


图8 试验值与计算值的比较

## 3 结论

(1) 尝试利用溶液的电导性,建立闭合电路,测量旋转填料床的持液量。该试验装置主要分为试验工艺装置、试验电路、数据采集系统3个部分,工艺简单,采集方便,大大提高了工作效率。

(2) 在试验条件范围内,通过对液体流量、转子转速、液体黏度和气体流量等影响持液量因素的分析,认为持液量随着液体流量的增大而增大,随转子转速的增大而减小,随液体黏度的增大而增大,气体流量对持液量的影响不大。

(3) 在试验条件范围内,试验测得持液量均小于5%,最小值为0.2%,比传统塔设备(10%)小,且填料表面更新速率快,试验证明,旋转填料床负荷小,具有极大的相间接触面积。

(4) 应用量纲分析方法,对试验数据进行非线性回归,得到有关持液量的关联式,很好地吻合了实验数据。

## 符号说明

$D$ —液体质量通量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$G$ —气体流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

$Q$ —液量,  $\text{mL}$

$L$ —液体流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

$N$ —转子转速,  $\text{r}/\text{min}$

$R$ —转子内外半径的几何半径,  $\text{m}$

$R$ —电阻,  $\Omega$

$\mu$ —液体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$

$\omega$ —角速度,  $\text{rad/s}$

$\phi$ —持液量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$  填料

## 参考文献

- [1] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009:24.
- [2] 佟泽民, 莫锡荣. 填料塔持液量的研究[J]. 化学工程, 1983, 11(6):17-21.
- [3] 唐涌濂, 余蔚芝. 气液并流填料塔的持液量[J]. 化学工程, 1991, 19(4):41-48.
- [4] Andjelko Basic, Milorad P. Dudukovic. Liquid holdup in rotating packed beds; Examination of the film flow assumption[J]. AIChE Journal, 1995, 41(2):301-316.
- [5] Burns J R, Jamil J N, Ramshaw C. Process intensification: operating characteristics of rotating packed beds-determination of liquid holdup for a high-voidage structured packing[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55:2401-2415.
- [6] Lin Chia-chang, Chen Yu-shao, Liu Hwai-shen. Prediction of liquid holdup in countercurrent-flow rotating packed bed[J]. Trans IChemE, 2000, 78(A):397-403.
- [7] 陈建峰. 超重力技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:52.
- [8] 蒋维钧, 戴猷元, 顾惠君. 化工原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2003:334-336. ■