

# 升温鼓泡塔内有机溶液的气含率

黄娟, 戴干策

(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

**摘要:**以对二甲苯氧化为背景,在直径300 mm、高1.2 m、大直径多管式分布器升温鼓泡塔内,采用压缩空气为气相,自来水、醋酸、二甲苯(邻、间、对二甲苯混合物)为液相,在表观气速0.009~0.224 m/s、温度11~99 °C范围内,系统地考察了气速、温度、溶液组成对气含率的影响。结果表明,不同温度范围表观气速对气含率的影响程度不同,气速幂律指数 $n$ 在常温下约为0.6,升温情况下减小为0.4~0.5,接近沸腾时 $n$ 值仅为0.2。温度对气含率的影响可分为远沸点与近沸点两个阶段,在前一阶段气含率随温度上升而缓慢升高,在后一阶段则迅速上升。不同气速范围内临界温度不同,在0.009~0.045 m/s范围内临界温度为90 °C,在0.072~0.18 m/s范围内临界温度为70 °C。水-醋酸体系的气含率随醋酸浓度的增大先升高后降低,最大值出现在浓度80%( $\omega$ )左右;醋酸-二甲苯体系气含率低于相同浓度的醋酸-水体系;部分互溶水-醋酸-二甲苯三元体系气含率低于完全互溶体系。综合考虑各因素对气含率的影响,给出了气含率关联式。

**关键词:** 升温鼓泡塔; 气含率; 远沸点; 近沸点; 有机溶液

**中图分类号:** TQ021.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2008)02-0209-08

## 1 前言

鼓泡塔反应器结构简单,便于操作,应用广泛,如用于氧化、费托合成、生物发酵、废水处理等。气含率是其最重要的性能,用于估算气泡在塔内平均停留时间和气液接触比相界面积,直接影响鼓泡塔的结构尺寸,从而决定塔的传质强度和宏观反应速率,是鼓泡塔设计和放大必不可少的参数。

气含率实际上随时间和空间变化,沿径向和轴向呈一定分布,但总体气含率或平均气含率更为常用,它是塔几何结构及其尺寸、相流动速度、分布器类型及物系性质等的函数。由于难以建立解析函数关系,气含率数据主要由实验测定。虽然已提出了一些气含率估算式,但多数依据常温下的实验数据,而生产中鼓泡塔多在升温下操作,了解接近工业实际的鼓泡塔内气含率的特征将更有意义。

Deckwer等<sup>[1]</sup>以Fischer-Tropsch过程为背景,较早研究了温度或温度/压力对气含率的影响。随后,Chabot等<sup>[2]</sup>在直径200 mm、孔径1.59 mm的筛板(40孔)中对类似物系给出了100及175 °C温度下局部气含率的径向和轴向分布,表明温度升高改善气泡径向分布的均匀性,平均气含率增加。Behkish等<sup>[3]</sup>对N<sub>2</sub>、He/异构烷烃体系研究发现,两种体系气含率均随温度升高,加入固相后,温度效应趋缓。

除Zou等<sup>[4]</sup>、Pohorecki等<sup>[5]</sup>外,Grover等<sup>[6]</sup>研究了

空气/水和空气/NaCl, CuCl<sub>2</sub>水溶液中气含率随温度的变化和温度对流动工况转变的影响,给出了不同结论:Grover等得到气含率随温度升高而下降,Zou等得到气含率随温度上升,而Pohorecki等认为气含率与温度无关。

有机液体中的鼓泡行为虽已考察过50多种系统,但主要是在室温环境下。对升温有机液体的研究,仅有Zou等<sup>[4]</sup>对空气/乙醇,Pohorecki等<sup>[7]</sup>对N<sub>2</sub>/环己烷,Jordan等<sup>[8]</sup>对N<sub>2</sub>、He/乙醇、1-丁醇、萘烷、甲苯的研究。Pohorecki等<sup>[7]</sup>仅对N<sub>2</sub>/环己烷物系给出2个气速(0.003和0.01 m/s)不同温度下的气含率,并未考察该物系较为系统的气含率与温度、气速的关系。Zou等<sup>[4]</sup>对空气/乙醇物系气含率进行了较为系统的实际测定,但实验在直径100 mm塔中进行,没有满足通常认为塔径应大于150 mm的要求。Jordan等<sup>[8]</sup>在探讨气体密度对传质的影响时指出,在较高密度和较高气速下,气体密度对气含率有较强的影响,虽进行了3种不同温度下的实验,并未提出充足的温度对气含率影响的相关信息。

基于上述分析可以认为,有机溶液升温鼓泡文献中颇为少见,其中升温鼓泡行为尚未充分揭示,这是因为鼓泡的温度效应因物系而异,一些重要物系尚未涉及,即使作过的一些研究,因设备尺寸小、气速偏低、数据较少,还含有若干不一致的结果,而且缺乏确切的解释。气含率的温度效应的理论研究很少,气含率预测亦较少引入温度因素。本工作以聚酯基本原料精对苯二甲酸

(Purified Terephthalic Acid, PTA)生产的关键步骤对二甲苯氧化这一重要工业反应为背景,着重考察含醋酸物系的升温鼓泡行为,以期为工业操作参数的选取和优化提供依据。

## 2 实验方法及设备

实验在直径 300 mm(内径 281 mm)、高 1.2 m 的鼓泡塔内进行,装置如图 1 所示。塔主体由硼玻璃制成,底部为不锈钢,内置 9 根电加热管,每根功率为 5 kW。气体分布器为四管管式分布器,管径 21 mm。在釜底有铂热电阻以测量塔内温度。鼓泡塔顶部有冷凝器,冷凝水全部回流至鼓泡塔内。在回流处设有一标定过的冷凝水计量装置,用于测定体系在不同温度下的蒸发量。

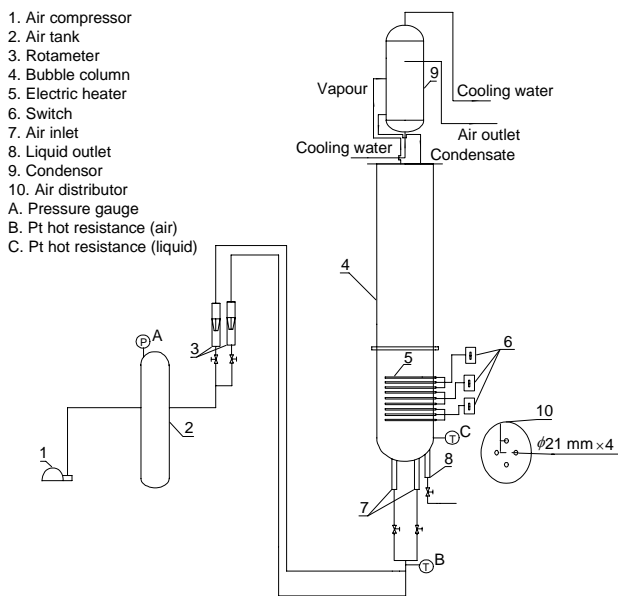


图 1 实验装置简图  
Fig.1 Experimental set-up

实验所用液相包括水和有机液体。以冰醋酸为原

料,配制不同浓度的醋酸-水溶液及醋酸(HAc)-二甲苯(Xylene)、醋酸-二甲苯-水溶液。空气由空气压缩机经气体缓冲罐(未经饱和)经转子流量计计量后,直接进入鼓泡塔,表观气速 0.009~0.224 m/s,温度 11~99 °C,在常压下操作。

气含率的测定采用床层膨胀法。在远沸点温度下,由于温度升高造成液体膨胀,初始静止液位会略有升高;同时通气过程中液体喷溅到鼓泡塔壁面、近沸点温度下液体大量蒸发都会造成液体的部分损失。因此,采用通气停止后液体静止高度  $H_L$  及通气分散液高度  $H_D$  计算气含率  $\varepsilon_g$ , 计算公式如下:

$$\varepsilon_g = 1 - H_L/H_D \quad (1)$$

## 3 实验结果与分析

鼓泡塔总体气含率受诸多因素影响,本研究着重考察表观气速、温度及物性。

### 3.1 表观气速的影响

对于给定的几何结构、温度、压力和特定物系,气含率决定于气体速度。气速决定流动工况(Flow regime)、相结构组成,  $\varepsilon_g-U_g$  曲线的特征对认识气含率规律有重要意义。所得 3 种物系典型的实验结果如图 2 所示,表明气含率随表观气速增大而单调上升,无转折点,即未发生流动工况转变。鉴于所用的分布器是大孔径,在较高气速下,不难推论两相接触处于翻腾/湍动的非均匀态。以  $\varepsilon_g-U_g^n$  拟合实验结果,得到气速幂律指数  $n$  值在 0.6 以下<sup>[9]</sup>,证明所作流型推论正确。

在不同物系、不同温度的广泛实验范围内得到的  $n$  值如下:空气-水、空气-醋酸-水体系: 70~90 °C,  $n=0.5$ , >90 °C,  $n=0.2$ ; 醋酸-二甲苯体系: 70 °C,  $n=0.6$ ; 90 °C,  $n=0.5$ ; 三元(醋酸-二甲苯-水)有机物系: 70 °C,  $n=0.6$ ; 90 °C,  $n=0.4$ 。  $n$  值随温度升高而降低,且因不同物系而

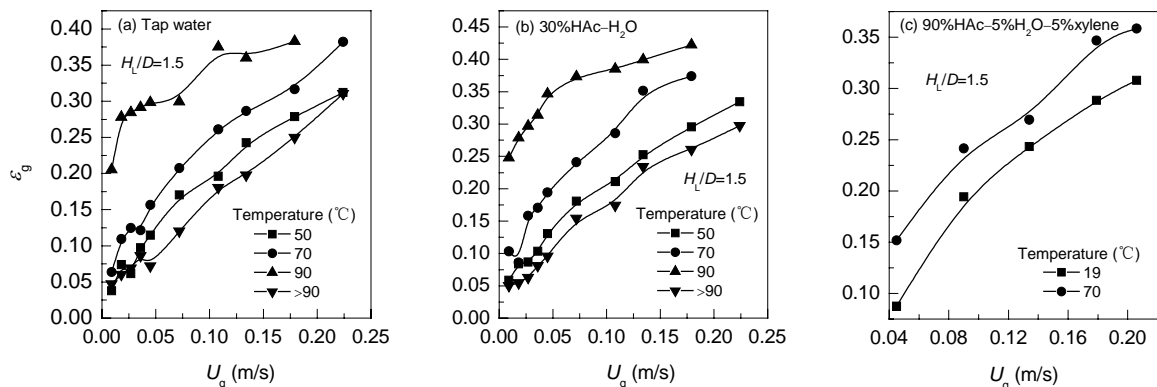


图 2 不同体系气含率与表观气速的关系  
Fig.2  $\varepsilon_g$  vs.  $U_g$  plot for different systems

异.  $n$  值的物理意义体现气含率对表观气速的敏感程度,  $n$  值下降, 表示升温条件下气相结构包含了更多大气泡. 该结论与实验现象是一致的, 升温条件下, 尤其在接近沸点温度下, 可观察到体系中有大量大气泡存在.

### 3.2 温度的影响—近沸点、远沸点

一定条件下, 空气-水体系气含率随温度的变化如图 3, 不同气速下存在转折点, 超过该点(临界温度),

气含率随温度显著上升, 在此温度以下, 气含率上升缓慢, 可以认为几乎不受温度影响. 表观气速在 0.009~0.045 m/s 范围内, 临界温度为 90℃, 温度高于 90℃, 即近沸点温度, 气含率急剧升高; 表观气速在 0.072~0.18 m/s 范围内, 临界温度为 70℃. 在 50~70℃内可看作过渡区, 在该区域内, 气含率随温度升高的速率开始逐渐增大.

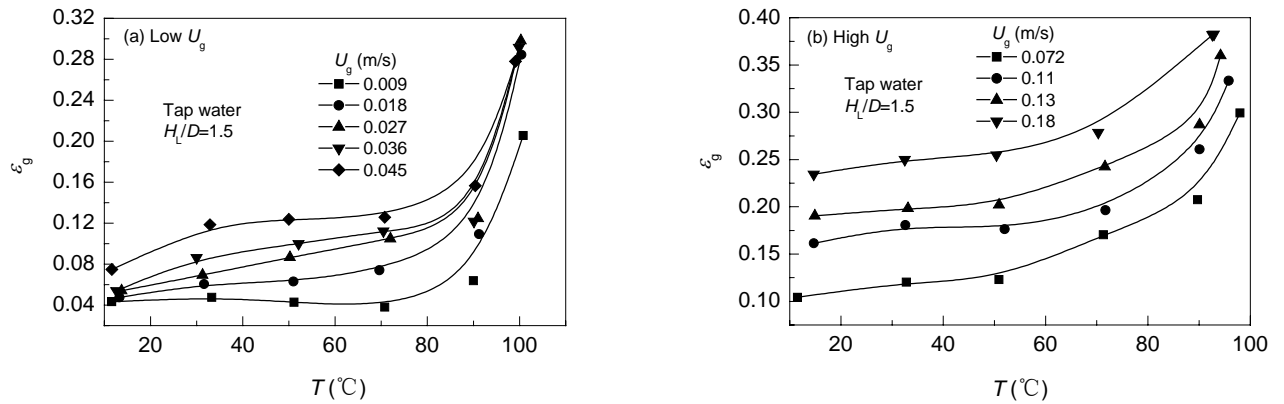


图 3 空气-水体系气含率随温度的变化  
Fig.3 Effect of temperature on gas holdup in air-water system

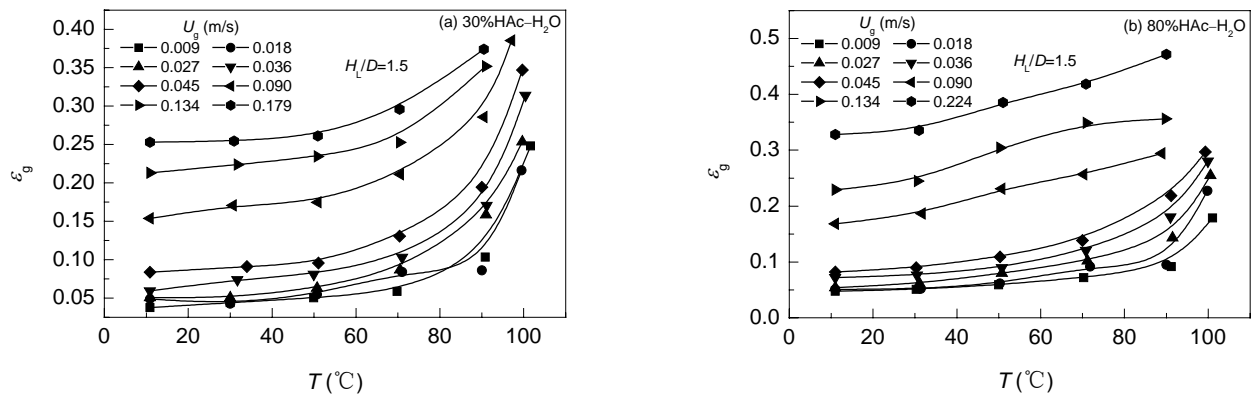


图 4 醋酸-水体系气含率随温度的变化  
Fig.4  $\epsilon_g$  vs.  $T$  plot for acetic acid-water system

在不同浓度醋酸-水溶液、二甲苯-醋酸-水溶液中, 温度对气含率的影响与空气-水体系有相同的趋势, 如图 4, 5 所示, 随着温度升高, 气含率增大. 温度达到一定值, 温度影响显著. 由图 4 可见, 不同气速下曲线分成“稀疏”和“密集”两组, 显现气含率的温度效应依赖于气速, 随气速增加, 温度影响显著.

考察气含率随温度的变化时区分远沸点和近沸点, 有利于理解温度效应. 解释气含率随温度变化从两方面考虑: (1) 变性质效应, (2) 传热/传质效应. 两者同时存在, 远沸点时以(1)为主, 近沸点时以(2)为主.

在远沸点时, 温度影响气含率是由于变性质效应

(Variable property effect). 随着温度升高, 液体粘度和表面张力下降. 当温度从 30℃升至 90℃, 水、醋酸、二甲苯的粘度分别下降 60%, 51%, 61%, 表面张力下降 15%, 22%, 22%. 在相关的物系性质中, 表面张力尤为值得关注. 当表面张力降低, 维持气泡形状的内聚力 (Cohesive force) 减小, 任何气体动量的增加(如气速增加使动量增加)均有利于导致大气泡分裂成小气泡 (Rayleigh Taylor 不稳定性), 使气含率增加. 这也在一定程度上解释了温度效应对气速的依赖<sup>[10]</sup>. 若考虑气泡分裂是因液相涡旋脉动, 由于液相湍动依赖于气相, 因而所得结论是一致的.

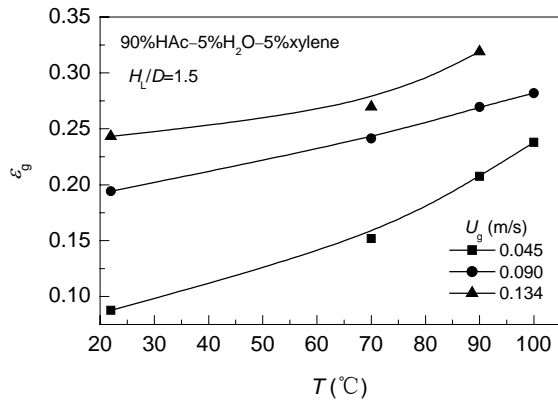


图5 水-醋酸-二甲苯体系气含率随温度的变化  
Fig.5  $\varepsilon_g$  vs.  $T$  plot for water-acetic acid-xylene system

在近沸点时,釜内液体大量蒸发,则气相在气液两相中所占比例增大,使气含率升高.同时由于液体温度高于进气温度,则气体温度升高,气体密度降低.对于一定质量的气体,气体体积增大,则气含率升高.

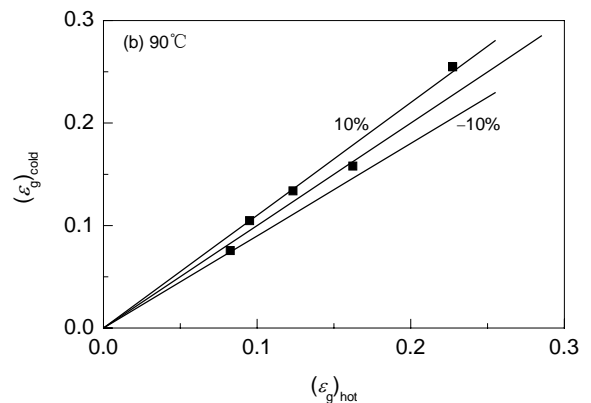
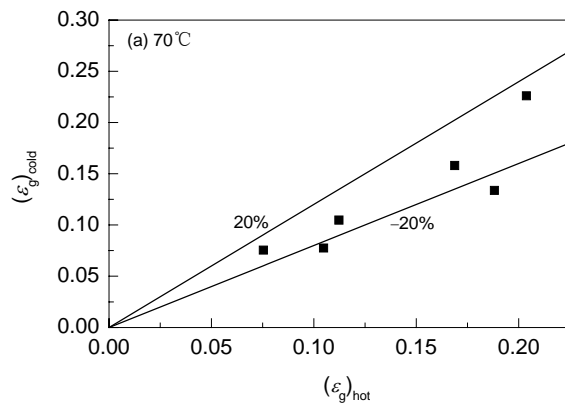


图6 环境温度下与升温条件下气含率对比  
Fig.6 Comparison of  $(\varepsilon_g)_{hot}$  with  $(\varepsilon_g)_{cold}$

由图6可以看出,这一假设在90 °C时符合得较好,在70 °C下误差偏大.这似乎在一定程度上表明前面所作推论有合理性.可以认为,温度对气含率的影响要同时考虑液体的物理性质、蒸汽压随温度的变化.远沸点时前者为主,近沸点时后者为主.

90 °C时,考虑表观气速为空气速度与蒸汽速度之和,将气含率与表观气速进行关联,得到

$$\varepsilon_g = 0.48U_{gv}^{0.48}, \quad (2)$$

式中  $U_{gv}$  为通气量与蒸汽量之和所对应的表观气速,将关联结果与环境温度下相应表观气速时的气含率对比,误差示于图7.由图可以看出,考虑液体饱和蒸汽压可以很好地校正近沸点温度下体系的气含率.

近沸点温度下,气体饱和蒸汽压迅速增大,液体大量蒸发,体系内有大量的蒸汽产生,蒸汽占了整体气含率的大部分,正如 Clark<sup>[11]</sup>指出的“蒸汽压效应”,即蒸汽加入气相,使塔顶部局部气含率是塔底部气含率的4倍.

以空气-水体系为例,在不同温度下,实验测定蒸发量,发现当体系温度在90 °C以下时,所测蒸发量与通气量的倍数关系与理论值基本相符(如70 °C下,蒸发量/通气量的理论值为1/3,而实测值也为1/3).在近沸点温度下,液体蒸发量急剧升高(99 °C,蒸发量/通气量的理论值为20).实验中,由于冷凝器的冷却能力不够,实验所测蒸发量与理论值存在一定差别,但蒸发量急剧升高的结论仍然成立.在70及90 °C条件下,考虑升温条件下表观气速为水蒸汽与空气气速之和,将升温条件下气含率  $(\varepsilon_g)_{hot}$  与相等表观气速时室温下的气含率  $(\varepsilon_g)_{cold}$  进行对比,如图6所示.

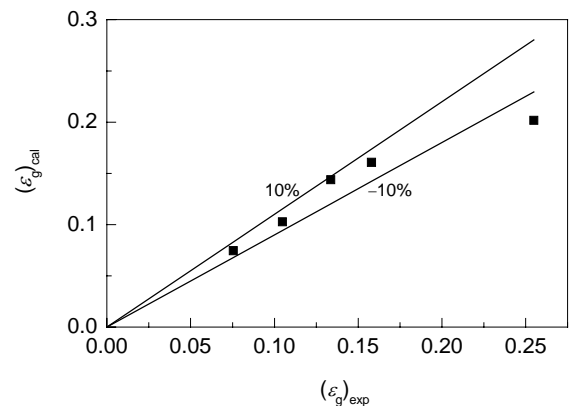


图7 气含率关联误差  
Fig.7 Comparison between experimental and predicted data using Eq.(2)

3.3 溶液组成的影响

考察 3 种溶液 HAC-H<sub>2</sub>O, HAC-xylene 和 H<sub>2</sub>O-HAc-

xylene 的升温鼓泡行为, 着重探讨溶液组成对气含率的影响.

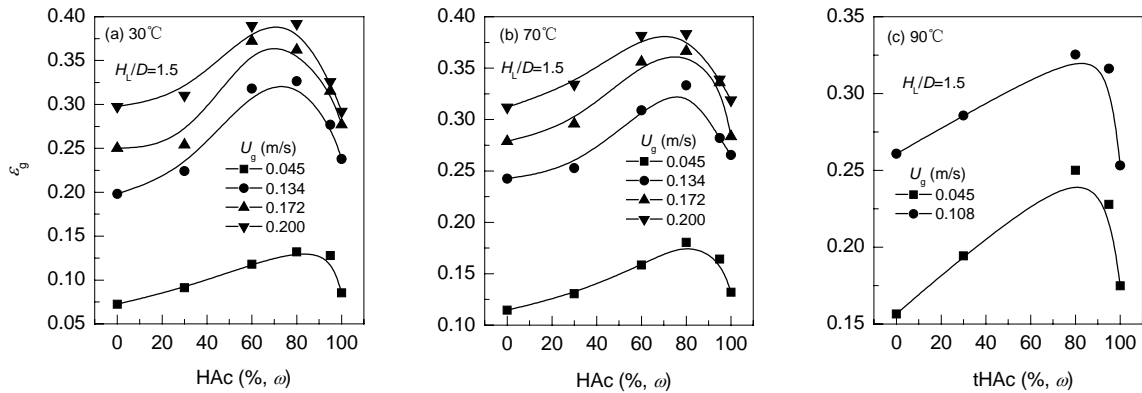


图 8 气含率随醋酸浓度变化关系  
Fig.8 Effect of concentration of acetic acid on gas holdup

如图 8 所示, HAC-H<sub>2</sub>O 溶液气含率随浓度变化的显著特征是, 无论常温[图 8(a)中 HAC=0 时, 气含率为 22 °C 时的值]还是升温, 在 HAC 浓度 60%~80% 间气含率存在最大值( $\epsilon_{g,max}$ ), 在临界温度以下, 该值随温度的变化不显著; 高于临界温度, ( $\epsilon_{g,max}$ ) 随温度的升高而增大. 这种最大值现象对室温环境已有报道, 但并无确切解释, 不同体系可能原因不同. 对本研究系统, 可能的原因是, 临界浓度以下, 醋酸-水溶液的表面张力随醋酸浓度的增大而降低, 如图 9 所示, 则气含率升高; 同时, 在有水存在的条件下, 醋酸可在其中离解产生较为稳定的酸根负离子, 离子的存在抑制了气泡的聚并, 气含率升高; 而在临界浓度以上, 即水含量极少及没有水存在的条件下, 醋酸分子则以 2 个氢键的形式发生双分子缔合, 生成较稳定的二聚体, 离解的酸根负离子减少, 从离子存在抑制气泡聚并的角度考虑, 高浓度醋酸溶液抑制气泡聚并的能力弱于浓度较低的醋酸溶液, 则气含率有所下降. 对于电解质抑制气泡聚并存在临界浓度已有

研究者表明了此观点<sup>[12,13]</sup>.

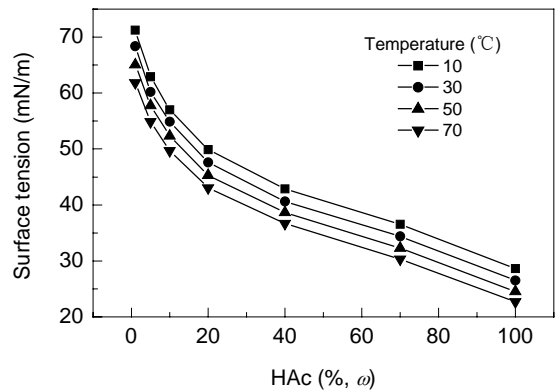


图 9 醋酸体系表面张力随浓度的变化  
Fig.9 Dependence of  $\sigma$  on the concentration of acetic acid

图 10 表明, 与 HAC-H<sub>2</sub>O 体系气含率对比, 在常温及升温条件下, HAC 含量相同的 HAC-xylene 体系的气含率明显低于相应的水体系.

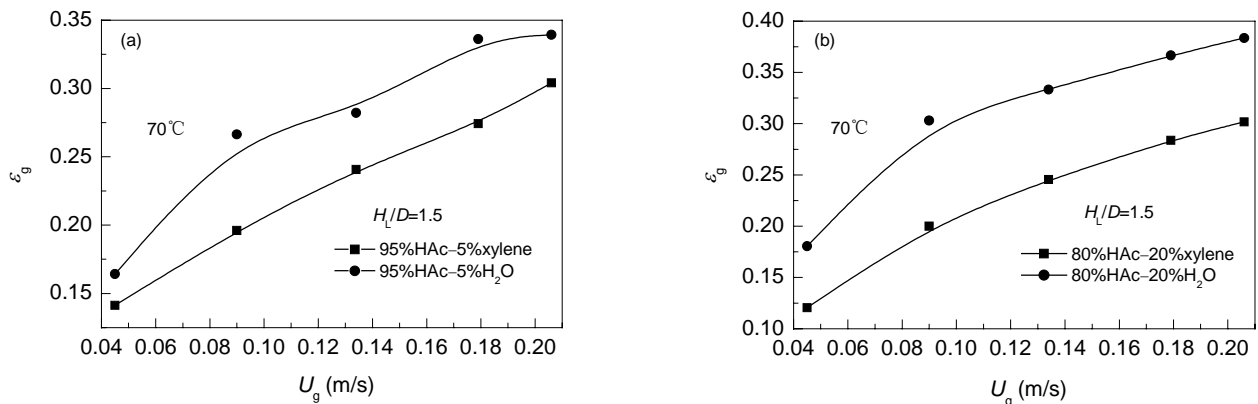


图 10 HAC-H<sub>2</sub>O 体系与 HAC-xylene 体系气含率对比  
Fig.10 Comparison of gas holdup between acetic acid-water and acetic acid-xylene systems

图 11 给出了不同温度下二甲苯含量对气含率的影响,二甲苯的存在抑制了气含率,但在所研究的 Xylene 浓度范围内(5%~20%),气含率随二甲苯浓度增大而升高,三者之间的差别随温度的升高而减小。

二甲苯在醋酸-水体系中有一定溶解度,即当水在三元体系中所占分数达到一定值,便会析出二甲苯,出现不互溶的现象。本实验中(图 12),90%HAc-5% $H_2O$ -

5%*xylene* 为完全互溶系统,而 76%HAc-19% $H_2O$ -5%*xylene* 为部分互溶系统,即气-液-液体系。结果表明,对于本实验所研究的物系,气-液两相体系的气含率高于气-液-液三相体系。其可能的原因是,对于 76%HAc-19% $H_2O$ -5%*xylene* 体系,不互溶的二甲苯以液滴的形式存在于溶液中,抑制了气泡的形成,使气含率降低。气-液-液三相体系的流体力学行为有待进一步研究。

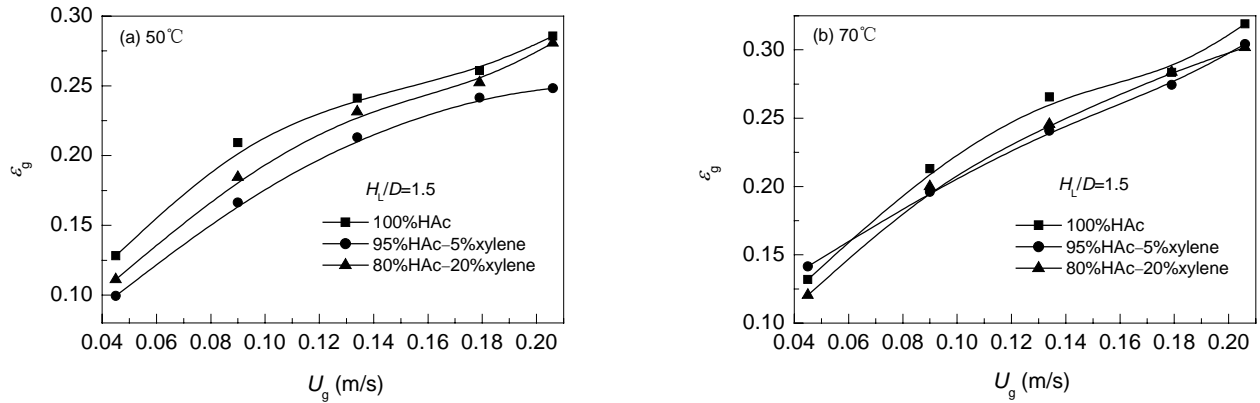


图 11 二甲苯浓度对气含率的影响

Fig.11 Effect of concentration of xylene on gas holdup

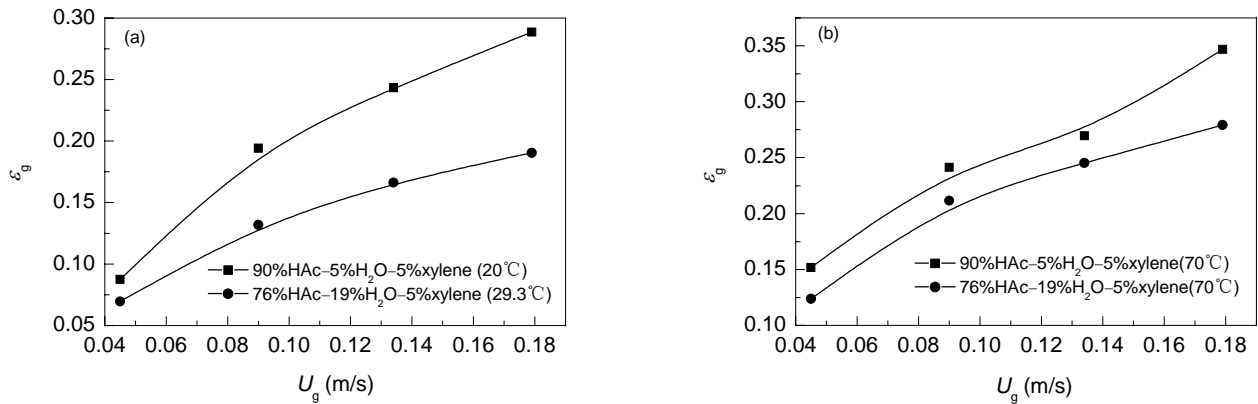


图 12 HAc- $H_2O$ -*xylene* 三元体系气含率对比

Fig.12 Comparison of gas holdup in HAc- $H_2O$ -*xylene* system

#### 4 气含率的关联

已有不少文献提出过气含率关联式<sup>[14]</sup>,采用 Hikita 公式<sup>[15]</sup>关联本实验数据,分析其误差,如图 13 所示。由图可见, Hikita 公式未能满足关联误差至少应在 $\pm 20\%$ 范围内变化的基本要求,公式的适用范围限制了其应用。针对本实验条件,需提出合适的关联式。

考虑无量纲参数 Morton 数,  $Mo = \mu_1^4 g / (\rho_1 \sigma_1^3)$  及毛细数  $U_g \mu_1 / \sigma_1$ , 对实验数据进行关联,结果如下式:

$$\varepsilon_g = 0.285 \left( \frac{p_T}{p_T - p_S} \right)^{0.2803} \left( \frac{\mu_1^4 g}{\rho_1 \sigma_1^3} \right)^{-0.1453} \left( \frac{U_g \mu_1}{\sigma_1} \right)^{0.6142} \quad (\text{两相}), \quad (3)$$

关联误差如图 14 所示,误差在 $\pm 20\%$ 以内。

式(3)的适用范围:温度 11~99 $^{\circ}C$ ,  $U_g$  0.009~0.224 m/s,  $\sigma_1$  0.024~0.074 N/m,  $\mu_1$  (0.2~2) $\times 10^{-3}$  Pa·s,  $\rho_1$  958.07~1059.42 kg/m<sup>3</sup>,  $p_S$  1318.45~10124.74 Pa。若所用液体为混合物,相应的物理性质应采用混合物的性质。对出现特殊现象的体系(醋酸-二甲苯、水-醋酸-二甲苯)的气含率,本工作未做关联。

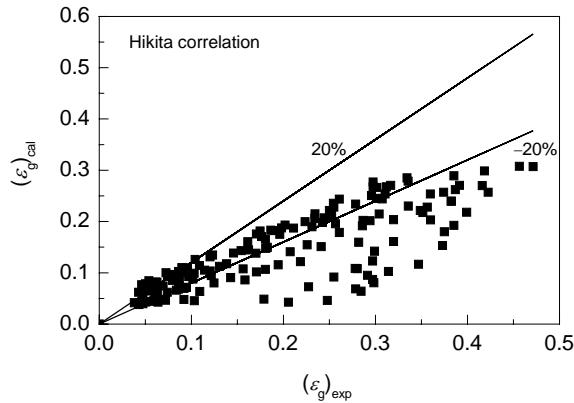
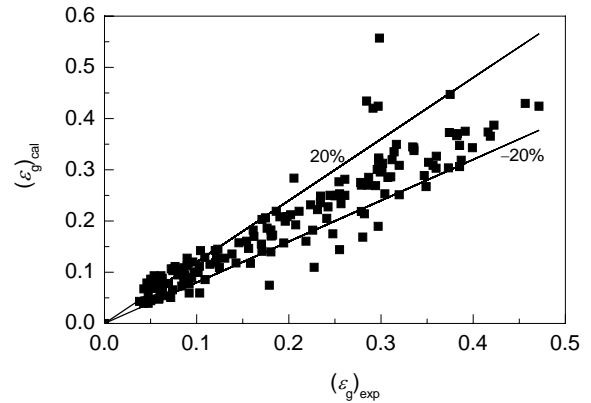
图13 Hikita<sup>[15]</sup>关联式对本实验数据的预测Fig.13 Comparison of present experimental data with Hikita<sup>[15]</sup> correlation

图14 式(3)的关联误差

Fig.14 Prediction of experimental data using Eq.(3)

## 5 结论

对有机溶液(二甲苯氧化反应物系)升温鼓泡行为进行研究, 得到以下结论:

(1) 气速是决定总体气含率最重要的因素. 表观气速 0.009~0.224 m/s 范围内, 无论在环境温度、升高温度甚至接近沸点情况下, 气含率均随表观气速增加; 不同温度下, 表观气速影响气含率的灵敏程度不同, 气速幂律指数  $n$  值随温度下降, 从 0.6 降至 0.4~0.5, 接近沸腾时  $n$  值仅为 0.2.

(2) 温度对气含率的影响可分为近沸点与远沸点两个阶段. 不同气速范围临界温度不同. 常压 11~99 °C 条件下, 表观气速 0.009~0.045 m/s 范围内, 临界温度为 90 °C; 0.072~0.18 m/s 范围内为 70 °C, 且温度效应较低气速更为显著. 临界温度以下, 温度对气含率影响甚微, 几乎可以忽略; 超过一定温度, 温度效应明显地显现出来; 接近沸点, 气含率随温度急剧上升.

(3) 溶液组成对气含率的影响不容忽视. 醋酸-水体系气含率高于空气-水体系, 随着醋酸浓度的增大, 气含率上升, 在醋酸浓度为 80% ( $\omega$ ) 左右达到最高值(极值), 随后开始下降; 对于具有相同浓度的醋酸-水及醋酸-二甲苯体系, 前者的气含率明显大于后者; 醋酸-水-二甲苯三元互溶体系的气含率高于其部分互溶体系.

对二甲苯氧化反应操作条件的确定往往基于反应工艺, 本研究结果期望从反应器传递特征提供一定参考作用. 表观气速增大是有利的, 但要适度. 近沸点尽管有利于移热, 气含率也高, 但气相结构发生变化, 主要是由蒸汽组成的大气泡, 其传质效果下降, 不利于反应的进行, 所以实际生产中应避免在近沸点温度下操作. 溶液气含率是随组成而变的, 要确定合适的进料比及不同组分之间的配料比, 避免不互溶现象的出现, 合理确

定能达到高气含率的优化配比.

### 符号表:

$D$	鼓泡塔内径 (mm)
$g$	重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )
$H_D$	通气后液体分散高度 (mm)
$H_L$	液体静止高度 (mm)
$Mo$	Morton 数 [ $Mo = \mu_l^4 g / (\rho_l \sigma^3)$ ]
$n$	气速幂律指数
$p_s$	液体饱和蒸汽压 (Pa)
$p_r$	系统总压 (Pa)
$T$	液体温度 (°C)
$U_g$	表观气速 (m/s)
$U_{gv}$	蒸汽与空气表观气速之和 (m/s)
$\epsilon_g$	平均气含率
$(\epsilon_g)_{cal}$	计算气含率
$(\epsilon_g)_{cold}$	室温下气含率
$(\epsilon_g)_{exp}$	实验气含率
$(\epsilon_g)_{hot}$	升温条件下气含率
$(\epsilon_g)_{max}$	最大气含率
$\mu_l$	液体粘度 (Pa·s)
$\rho_l$	液体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma$	液体表面张力 (N/m)

### 参考文献:

- [1] Deckwer W D, Louisi Y, Zaldi A, et al. Hydrodynamic Properties of the Fischer-Tropsch Slurry Process [J]. Ind. Eng. Chem. Process. Des. Dev., 1980, 19(4): 699-708.
- [2] Chabot J, De Lasa H I. Gas Holdups and Bubble Characteristics in a Bubble Column Operated at High Temperature [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1993, 32(11): 2595-2601.
- [3] Behkish A, Lemoine R, Sehabiague L, et al. Gas Holdup and Bubble Size Behavior in a Large-scale Slurry Bubble Column Reactor Operating with an Organic Liquid under Elevated Pressures and Temperatures [J]. Chem. Eng. J., 2007, 128(2/3): 69-84.
- [4] Zou R J, Jiang X Z, Li B Z, et al. Studies on Gas Holdup in a Bubble Column Operated at Elevated Temperatures [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1988, 27(10): 1910-1916.
- [5] Pohorecki R, Moniuk W, Zdrójkowski A. Hydrodynamics of a Bubble Column under Elevated Pressure [J]. Chem. Eng. Sci., 1999, 54(21): 5187-5193.
- [6] Grover G S, Rode C V, Chaudhari R V. Effect of Temperature on Flow Regimes and Gas Hold-up in a Bubble Column [J]. Can. J. Chem.

- Eng., 1986, 64(3): 501–504.
- [7] Pohorecki R, Moniuk W, Zdrojkowski A, et al. Hydrodynamics of a Pilot Plant Bubble Column under Elevated Temperature and Pressure [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(3): 1167–1174.
- [8] Jordan U, Schumpe A. The Gas Density Effect on Mass Transfer in Bubble Columns with Organic Liquids [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56(21/22): 6267–6272.
- [9] Deckwer W D. Bubble Column Reactors [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1992. 171.
- [10] Bhaga D, Pruden B B, Weber M E. Gas Holdup in a Bubble Column Containing Organic Liquids Mixtures [J]. Can. J. Chem. Eng., 1971, 49(3): 417–420.
- [11] Clark K N. The Effect of High Pressure and Temperature on Phase Distribution in a Bubble Column [J]. Chem. Eng. Sci., 1990, 45(8): 2301–2307.
- [12] 藏晓红, 王军, 刘延来, 等. 微量醇及电解质强化气液传质的研究 [J]. 化学反应工程与工艺, 2005, 21(3): 221–226.
- [13] Prince M J, Blanch H W. Transition Electrolyte Concentrations for Bubble Coalescence [J]. AIChE J., 1990, 36(9): 1425–1429.
- [14] Behkish A, Lemoine R, Oukaci R. Novel Correlation for Gas Holdup in Large-scale Slurry Bubble Column Reactors Operating under Elevated Pressures and Temperatures [J]. Chem. Eng. J., 2006, 115(3): 157–171.
- [15] Hikita H, Asai S, Tanigawa K, et al. Gas Hold-up in Bubble Columns [J]. Chem. Eng. J., 1980, 20(1): 59–67.

## Gas Holdup in a Bubble Column at Elevated Temperature with Organic Liquid Solutions

HUANG Juan, DAI Gan-ce

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** Gas holdup ( $\varepsilon_g$ ) was studied in a bubble column operated at elevated temperature. The column is 300 mm in diameter and 1.2 m in height, and the distributor has four nozzles with large diameter. The adjusted mixture of acetic acid (the solvent of the reaction) and p-, m-, o-xylene (homologous compound mixture of the reactant) was employed as the liquid phase, considering the oxidation of p-xylene. The experiments were conducted systematically to investigate the influences of superficial gas velocity ( $U_g$ ), temperature, composition of the organic solutions on  $\varepsilon_g$ . The research ranges of superficial gas velocity and temperature were 0.009~0.224 m/s and 11~99 °C respectively. The effect of superficial gas velocity was summed up by  $\varepsilon_g-U_g^n$ , the value of  $n$  varied with temperature, that is,  $n=0.6$  at ambient temperature,  $n=0.4\sim0.5$  at elevated temperature and 0.2 at the nearing boiling point. There was a transition point at  $\varepsilon_g-T$  curve, so the effect of temperature on  $\varepsilon_g$  can be classified into two stages, one far from the boiling point and another near to the boiling point.  $\varepsilon_g$  was nearly a constant at the first stage and increased significantly at the second. The critical temperature was varied with the superficial gas velocity, it was 90 °C in the range of 0.009~0.045 m/s and 70 °C from 0.072 to 0.18 m/s. As to the effect of the composition of organic liquid solutions,  $\varepsilon_g$  increased at first, and decreased when the mass concentration of acetic acid was higher than 80% in tap water-acetic acid system,  $\varepsilon_g$  in the acetic acid-xylene solution was lower than that of the water-acetic acid, while solutions had the same acetic acid content,  $\varepsilon_g$  in partly soluble water-acetic acid-xylene system was lower than that of the completely soluble system. A gas holdup correlation implicating the effects of various factors was given.

**Key words:** elevated temperature bubble column; gas holdup; far from the boiling point; near to the boiling point; organic liquid solutions