

## 发酵液中添加物对气含率的影响

张 晖\* 周肇义

(成都科技大学化工系 成都 610065)

气含率是决定气液接触面积和传质系数的重要因素,也是表示气液两相流体力学特征的重要参数。发酵液中添加物对气含率的影响,过去虽有一些研究,但范围非常狭窄,仅局限于部分无机或有机小分子添加物,与实际发酵过程存在着一定的差异,特别对天然营养物质的影响尚未有研究。同时由于气含率对物性的高度敏感性,使现有的气含率关联式已不能适用于发酵液中的所有添加物。Shah<sup>[1]</sup>则建议,鉴于气含率容易测量,根据某一特定体系进行的小试结果将比任何已知关联式所预测的要好。本文研究发酵过程中常用添加物对气含率的影响,并从理论上推导出气含率的关联式,对研究发酵液中不同组分与氧传递速率的关系以及前文<sup>[2]</sup>中氧传质系数的计算均有重要意义。

### 1 实验

选用内径为 90mm 的有机玻璃鼓泡塔<sup>[2]</sup>,气体分布板为钻孔板,孔径 1mm,开孔率 0.81%。

实验中参考工业发酵液的添加物,选用了氯化钠、硫酸铵、磷酸二氢钾、葡萄糖、尿素、淀粉、酵母粉、鱼粉、黄豆粉、蛋白胨等添加剂,其浓度范围与实际发酵过程一致。

实验在常温、常压下进行。空塔气速 0.02~0.08m/s,清液层高度  $H_L$  在塔外用液位计测得,塔内鼓泡层高度  $H_F$  直接透过有机玻璃塔体目测,则气含率可由公式  $\epsilon = (H_L - H_L')/H_L$  直接计算出来。

### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 纯水中的气含率

如图 1 中点划线所示,  $\epsilon$  随气速  $u$  的增大而增大,且  $\epsilon \propto u^{0.9}$ 。当  $u$  增加时,单位时间内鼓入塔内液相中的气体量随之增加。从而导致  $\epsilon$  增大。

#### 2.2 无机盐溶液中的气含率

无机盐(以硫酸铵为例)的添加除对液体性质略有影响外,主要还在于无机盐的阻聚作用。这种阻聚作用存在着一临界离子强度  $I_c$ <sup>[3]</sup>,当  $I < I_c$  时,无机盐不显示阻聚作用。从图 1 可以看出,  $I < 0.02\text{kmol/m}^3$  的硫酸铵溶液其  $\epsilon$  值与纯水的一致;另一方面,尽管  $I > I_c$ ,但从阻聚机理上看,只有当一气泡进入另一气泡的尾流漩涡区,两气泡才可能发生聚合。如果气速小,则气含率也小,气泡间可以发生聚合的几率就小,这时无机盐的阻聚作用仍未发现出来,因此在图 1 中,当  $u \leq 0.04\text{m/s}$  时,硫酸铵对气含率没有影响,当  $u > 0.04\text{m/s}$  后,无机盐的阻聚作用已经表现出来。因而  $I > 0.02\text{mol/L}$  的硫酸铵溶液其  $\epsilon$  值明显高于纯水的值。氯化钠、磷酸二氢钾的实验结果与硫酸铵类似。

#### 2.3 低分子碳源、氮源溶液中的气含率

当葡萄糖溶于水后,亲水的羟基与水分子结合,使疏水羟基朝向气相,从而产生偶极层。偶极层的存在能抑制气泡间的聚合速率<sup>[4]</sup>,因此葡萄糖同无机盐一样,对气含率的影响主要表现在对气泡的阻聚作用上。从 2.2 的分析知道,在低气速下,这种阻聚作用未表现出来,所以在图 2 中,当  $u \leq 0.04\text{m/s}$  时,葡萄糖溶液中的  $\epsilon$  值与纯水一致,只有当  $u > 0.04\text{m/s}$  后,葡萄糖的阻聚作用才显著,因而其水溶液中的  $\epsilon$

国家自然科学基金资助项目。

\* 武汉大学环境科学系。

本文于 1993 年 12 月 25 日收到。

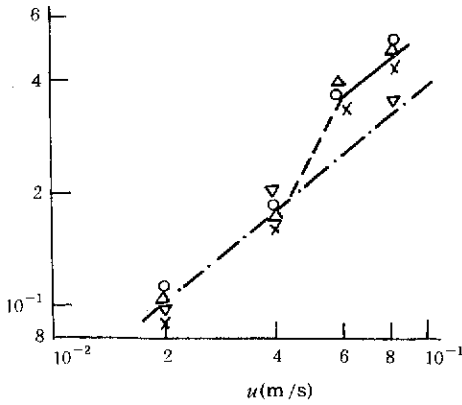


图1 硫酸铵对ε的影响

$I(\text{kmol}/\text{m}^3)$ : ▽ 0.011, × 0.019, ○ 0.17, △ 0.25;  
 - - -  $\text{H}_2\text{O}$

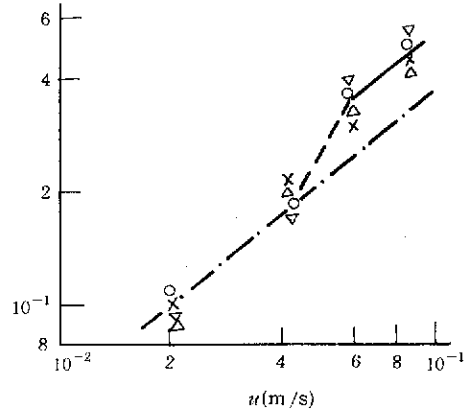


图2 葡萄糖对ε的影响

$W(\%)$ : ▽ 0.5, × 1.5, ○ 2.0, △ 5.0  
 - - -  $\text{H}_2\text{O}$

值高于纯水的数值。

由于尿素对气泡没有明显的阻聚作用<sup>(3)</sup>,而且尿素的添加对液体性质也没有太大的改变,因此从图3看出尿素溶液中的ε值与纯水一致。

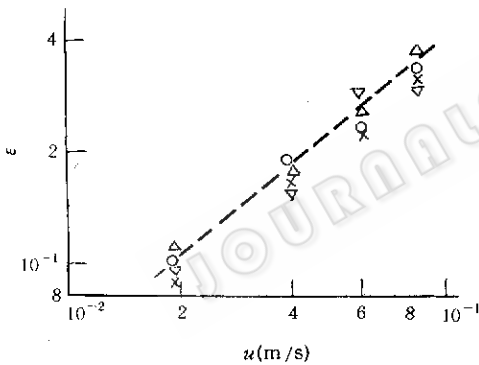


图3 尿素对ε的影响

$W(\%)$ : ▽ 0.6, × 1.2, ○ 2.4, △ 0.5  
 - - -  $\text{H}_2\text{O}$

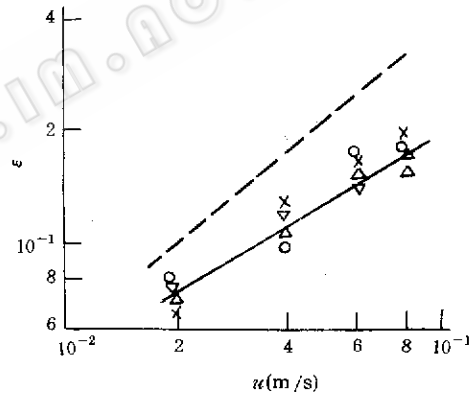


图4 淀粉对ε的影响

$W(\%)$ : ▽ 2, × 4, ○ 6, △ 8  
 - - -  $\text{H}_2\text{O}$

### 2.4 大分子碳源、氮源水解液中的气含率

由于淀粉水解液粘度的增大,以及悬浮粒子的影响,使气泡的直径增大,而大气泡的上升速度快于小气泡的上升速度,造成气泡在塔内液体中的停留时间缩短,所以从图4可以看出淀粉水解液中的ε值明显低于纯水的数值。

各种大分子氮源水解液中也存在未溶的固体粒子,同时由于这种水解液具有很强的起泡能力,在实验或工业生产中都必须加入消泡剂,这会促进气泡间的聚合,因而使塔内气泡直径增大,导致气含率降低。大分子氮源物质如酵母粉、黄豆粉、鱼粉和蛋白胨等的实验结果与淀粉类似。

### 3 实验结果的关联

从理论上分析鼓泡层中的气含率决定于气泡在鼓泡层中的上升速度  $\bar{u}_B$  和空塔气速  $u$ 。

气泡在鼓泡层中的平均停留时间为:

$$\theta = H_f / \bar{u}_B \quad (1)$$

在  $\theta$  时间内进入鼓泡层的气体量为:

$$Q = S u \theta = S H_f u / \bar{u}_B \quad (2)$$

根据气含率的定义,  $\epsilon$  为单位体积鼓泡层中的气体量, 因此

$$\epsilon = Q / (S H_f) = \left( \frac{S H_f u}{\bar{u}_B} \right) / (S H_f) = u / \bar{u}_B \quad (3)$$

气泡在鼓泡层中的上升速度主要与气泡直径有关, 也和液体的物性如密度有关, 而气泡直径在气泡间无聚合的情况下, 主要受表面张力的影响。

气体从孔径为  $d_0$  的孔口形成气泡, 在离开孔口时按浮力等于表面张力的简化模型有:

$$d_0 = \{6\delta_L d_0 / [(\rho_L - \rho_g)g]\}^{1/3} \approx \{6\delta_L d_0 / (\rho_L g)\}^{1/3} \quad (4)$$

单个球形气泡的上升速度为:

$$u_B = [4(\rho_L - \rho_g)gd / (3C_d \rho_L)]^{1/2} \approx [4gd / (3C_d)]^{1/2} \quad (5)$$

式中曳力系数对湍流情况为 0.44。

假定  $J = C_1 d$

$$(6)$$

式中  $C_1$  主要决定于气泡离开分布器后的聚合频率。

$$\bar{u}_B = [4gd / (3C_d)]^{1/2} = [4gC_1 u / (3C_d)]^{1/2} = \sqrt{C_1} u_B \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 经整理得:

$$\epsilon = u / \bar{u}_B = C_1^{-1/2} u / u_B = C B_0^{1/6} Fr \quad (8)$$

考虑到气泡群中气泡的实际上升速度, 试(8)应改写成

$$\epsilon = C B_0^{1/6} Fr^m \quad (9)$$

式中  $C$  和  $m$  由实验确定。

对纯水、尿素、 $I < 0.02$  的无机盐溶液, 以及  $u \leq 0.04 \text{ m/s}$  下的无机盐和葡萄糖溶液有

$$\epsilon = 0.6020 B_0^{1/6} Fr^{0.9} \quad (10)$$

$$u > 0.04 \text{ m/s} \text{ 下的葡萄糖和 } I \geq 0.02 \text{ 的无机盐溶液有: } \epsilon = 0.7597 B_0^{1/6} Fr^{0.9} \quad (11)$$

从大分子碳源、氮源物质的实验结果可知, 各物质均能降低气含率, 且降低的程度大致相同, 从它们的  $\epsilon-u$  图可得出  $\epsilon \propto u^{0.59}$ , 即  $m = 0.59$ 。此时  $C$  也为常数, 由实验数据确定为 0.3196。

$$\text{则 } \epsilon = 0.3196 B_0^{1/6} Fr^{0.59} \quad (12)$$

根据(9)式计算各种添加剂及纯水中的  $\epsilon$  值与相同条件下的实测值在图 5 中比较, 可见绝大多数实测值与计算值的相对误差在  $\pm 15\%$  以内。

#### 4 结 论

大分子碳源、氮源物质能降低气含率, 尿素和离子强度低于  $0.02 \text{ kmol/m}^3$  的无机盐溶液对气含率没有影响, 离子强度高于  $0.02 \text{ kmol/m}^3$  的无机盐和葡萄糖溶液在气速小于  $0.04 \text{ m/s}$  时对气含率也无影响, 当气速超过  $0.04 \text{ m/s}$  后, 则能提高气含率。

由理论分析推导出的气含率关联式, 尽管其中作了一些假设, 但仍可以将本实验所有液体介质中的气含率较好地关联起来。此关联式可用来提供前文<sup>(2)</sup>氧传质系数模型式中气含率项的理论预测值。

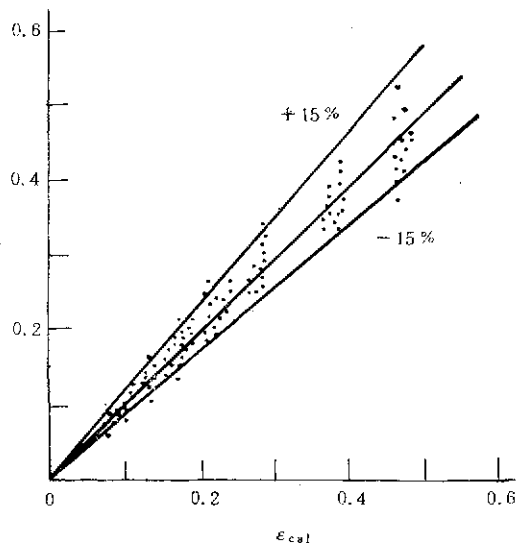


图 5  $\epsilon$  实测值与(9)式计算值的比较

## 参 考 文 献

- [1] Shah Y T, Kelkar B G, Godbole S P. *AIChE J.* 1982, 28(3), 353~379.  
[2] 张 晖, 周肇义. *化工学报.* 1993, 44(4), 457~464.  
[3] 张红晶. 学位论文. 成都, 成都科技大学出版社, 1992.  
[4] Zieminski S A, Caron M M, Blackmore R B. & Fundl, 1967, 6(2), 233~242.

## Gas Hold-up in Fermentation Broth Related to Various Nutrients

Zhang Hui Zhou Zhaoyi

(*Department of Chemical Engineering, Chengdu University  
of Science and Technology, Chengdu 610065*)

**Abstract** The effects of various nutrients in fermentation broth on the gas hold-up  $\epsilon$  were studied in a bubble column. The correlation of  $\epsilon$  was derived theoretically as follows  $\epsilon = CB_0^{1/6} Fr^m$ . It was shown that the presence of macromolecular carbon source or nitrogen source made  $\epsilon$  decrease, while that of urea and inorganic salts with low ion strength ( $< 0.02 \text{ kmol/m}^3$ ) had no effect on  $\epsilon$ . When  $u \leq 0.04 \text{ m/s}$ , the presence of glucose and inorganic salts with higher ion strength ( $\geq 0.02 \text{ kmol/m}^3$ ) had no effect on  $\epsilon$ , either. It could increase  $\epsilon$  when  $u > 0.04 \text{ m/s}$ . Parameters of the correlation were determined according to the different effects of various nutrients. Values of  $\epsilon$  from the correlation agree with the measured values.

**Key words** Fermentation broth, gas hold-up, bubble column