

苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液表观黏度模型

刘华亮, 陈守文, 孙明, 喻子牛

(农业微生物国家重点实验室, 微生物农药国家工程研究中心, 华中农业大学生命科学与技术学院, 武汉 430070)

摘要: 在30℃、电机转速为75~750 r/min下测定了苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的流变特性。分析结果表明苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液为拟塑性流体, 表观黏度随剪切速率增大而减小, 随着浓度的上升, 拟塑性增强。表观黏度随着温度的上升和浓度的降低而下降, 温度对表观黏度的影响符合Arrhenius方程。不同浓度浓缩液的流动活化能变化不大, 浓度对表观黏度的影响比温度的影响显著。分析和计算了浓度和温度对苏云金芽胞杆菌浓缩液表观黏度综合影响的数学模型及其参数, 它可用于预测在不同温度条件下苏云金芽胞杆菌发酵液在微滤过程中的表观黏度。

关键词: 苏云金芽胞杆菌; 微滤浓缩液; 流变特性; 表观黏度

中图分类号: Q81

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)02-0025-05

刘华亮, 陈守文, 孙明, 等. 苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液表观黏度模型[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 25-29

Liu Hualiang, Chen Shouwen, Sun Ming, et al. Model for predicting apparent viscosity of the microfiltration concentrated broth of *Bacillus thuringiensis*[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 25-29 (in Chinese with English abstract)

0 引言

苏云金芽胞杆菌是目前应用最为广泛的微生物农药, 它的商品化制剂主要是通过液体深层发酵而得到的, 而无论是生产高浓度的悬浮剂还是高效价的粉剂, 都需要先经过浓缩处理。目前, 中国的苏云金芽胞杆菌发酵液的后处理及制剂化主要依据经验, 对于发酵液及其浓缩液的流体性质缺乏研究。流体的流变学行为对于工程应用有十分重要的参考价值, 尤其是在用于工业设计和单元操作上, 有助于对传质、传热机理的理解^[1], 是工艺设备设计、选型的重要参数之一^[2]。

近年来, 流变学的应用研究非常广泛, 尤其在食品和发酵方面。国内外相继报道了关于果汁^[2-5]、蜂蜜^[6]、各种淀粉糊^[7,8]、乳制品^[9,10]、食品增稠剂^[11,12]等的流变特性以及发酵过程中发酵液^[13,14]的流变特性的变化。Vellank等^[15]在研究苏云金芽胞杆菌代谢热动力学时, 利用在线测扭矩的方法来校正因发酵液流变特性的变化引起热量测量系统的基线漂移, 而关于发酵液在微滤过程中流变特性的系统研究还未见报道。

在工业设计和单元操作计算中, 黏度(或表观黏度)是较重要的参数之一, 而其它流变特性参数往往很少直接用于计算。表观黏度对于苏云金芽胞杆菌发酵液的后处理有很重要的意义。例如, 在微滤过程中表观黏度影响膜通量, 而表观黏度又受操作条件的(温度、浓度和膜面流速^[16]等)影响; 在喷雾干燥过程中表观黏度影响流体的传送和喷雾干燥雾化效果。因此, 本文采用L-90

型流变仪对苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液进行了系统的测试和研究, 探讨苏云金芽胞杆菌发酵液及微滤过程浓缩液的流变特性和表观黏度, 其结果将为苏云金芽胞杆菌发酵液的微滤浓缩工艺提供理论依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

1.1.1 苏云金芽胞杆菌菌株及培养基

菌株: 苏云金芽胞杆菌工程菌BMB005(由本实验室构建并保存);

培养基: 玉米淀粉 25 g/L, 黄豆饼粉 35 g/L, 蛋白胨 15 g/L, MgSO₄ 0.5 g/L, KH₂PO₄ 2 g/L, 灭菌前pH值8.0。

1.1.2 仪器

L-90型流变仪(同济大学电机厂);

SJM-M无机陶瓷膜过滤设备(合肥世杰膜工程有限责任公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 苏云金芽胞杆菌发酵液的浓缩

采用无机陶瓷膜过滤设备浓缩苏云金芽胞杆菌发酵液, 得到浓缩倍数分别为1.5、2.0、2.5、3.0倍的微滤浓缩液。发酵液及其微滤浓缩液的浓度(固形物含量)分别为49.7、58.5、67.3、76.1、84.9 g/L。

1.2.2 样品流变特性的测定

在30℃分别测定发酵液及其不同浓缩倍数的微滤浓缩液在不同剪切速率下(电机转速为75~750 r/min, 剪切速率 $\dot{\gamma}$ 为361~3610 s⁻¹)的剪切应力。

样品黏度值测定: 用第三单元系统转筒, 在电机转速为750 r/min($\dot{\gamma}=3610$ s⁻¹)时进行测定, 将转筒因子(Q1)乘以刻度读数, 得到单位为mPa·s的黏度值, 在本研究中, 如非特别指出, 表观黏度均指此剪切速率下的表观黏度值。

1.3 数据分析与计算

收稿日期: 2004-05-12 修订日期: 2004-12-03

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2001BA708B07-02)资助

作者简介: 刘华亮(1980-), 男, 湖北洪湖人, 从事苏云金芽胞杆菌后处理工艺及制剂的研究。

通讯作者: 陈守文(1966-), 男, 湖北大冶人, 博士, 副教授, 从事生物工程领域研究。武汉华中农业大学生命科学与技术学院, 430070。Email: chenshouwen@mail.hzau.edu.cn

1.3.1 浓缩倍数

浓缩倍数 $N = \text{发酵液体积} / \text{浓缩液体积}$

1.3.2 表观黏度

不同剪切速率下的表观黏度可用式(1)计算:

$$\eta_l = \tau / \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中 η_l ——表观黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ ——剪切应力, Pa ;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} 。

1.3.3 流变特性

物质的流变特性可以采用表观黏度 η_l 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的曲线来表示。苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液可看作拟塑性流体, 可采用幂律方程来表达苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的流变曲线:

$$\eta_l = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

式中 K ——稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n ——流变指数, 无量纲。

温度对表观黏度的影响可以用 Arrhenius 方程来描述^[1,2,4,9], 即:

$$\eta_l = K_0 \exp(E_a / RT) \quad (3)$$

式中 E_a ——流动活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; K_0 ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R ——通用气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$;
 T ——Kelvin 温标, K 。

浓度对表观黏度的影响有以下几种模型^[1,4,9,11]:

$$\eta_l = a(C)^b \quad (4)$$

$$\eta_l = 1 + a_1 C + b_1 C^2 \quad (5)$$

$$\eta_l = a_2 \exp(b_2 C) \quad (6)$$

$$\eta_l = a_3 \exp(b_3 C^2) \quad (7)$$

式中 C ——浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; a ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})^b$; b ——常数, 无量纲; a_1 ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; b_1 ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{g}^{-2}$; a_2 ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 b_2 ——常数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; a_3 ——常数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; b_3 ——常数, $\text{L}^2 \cdot \text{g}^{-2}$ 。

2 结果与讨论

2.1 样品的流变特性

在 30 ℃ 下对苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的流变特性进行了测定。图 1 为不同剪切速率下发酵液及其微滤浓缩液的表观黏度值的变化曲线。由图 1 可知, 随着剪切速率的提高, 其表观黏度值下降, 这表明微滤浓缩液有剪切变稀的特征, 而且浓度越高, 表观黏度值下降趋势越明显, 越容易剪切变稀。采用方程(2)对所测数据进行回归分析, 求出稠度系数 K 值和流变指数 n 值, 结果见表 1, 其 R^2 值均在 0.995 以上, 这表明幂律方程适于描述发酵液及其微滤浓缩液的流变曲线。流变指数 n 值越小, 意味着拟塑性越强。稠度系数 K 值是液体黏滞度的度量, K 值越大, 则液体越黏稠。苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的流变指数 n 值均小于 1, 这表明它们是拟塑性流体。发酵液的流变指数较接近 1 ($n = 0.949$), 这表明它比较接近牛顿型流体, 由图 1 也可以看出, 发酵液的表观黏度值随剪切速率的变化较小。而对于较高浓度的浓缩液 ($84.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 则为典型

的拟塑性流体 ($n = 0.744$), 其表观黏度随剪切速率的上升而减小。在发酵液浓缩过程中, 随着浓度的上升, 流变指数减小, 拟塑性增强; 而稠度系数随浓度的增加而上升。

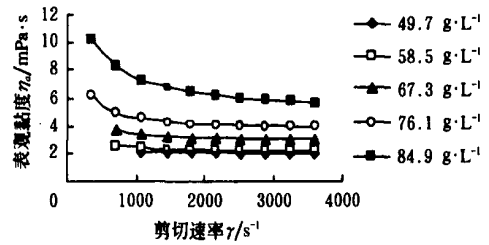


图 1 30 ℃ 下不同浓度的苏云金芽胞杆菌浓缩液的表观黏度与剪切速率的关系

Fig 1 Relationship between the apparent viscosities of concentrated broth of *B. acillus thuringiensis* and shear rate at 30

表 1 苏云金芽胞杆菌发酵液及其浓缩液的流变特性参数
Table 1 Rheological property parameters of the broth and concentrated broth with different concentrations of *B. acillus thuringiensis*

浓度 C $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	49.7	58.5	67.3	76.1	84.9
$K / \text{mPa} \cdot \text{s}^n$	3.117	4.452	8.778	15.83	44.77
n	0.949	0.917	0.867	0.827	0.744
R^2	0.9997	0.9994	0.9973	0.9952	0.9986

2.2 温度对样品表观黏度的影响

我们测定了苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液在 15、20、25、30、35、40、45、50 ℃ 下的表观黏度 ($\dot{\gamma} = 3610 \text{ s}^{-1}$)。不同浓度的苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的表观黏度与温度的关系见图 2。

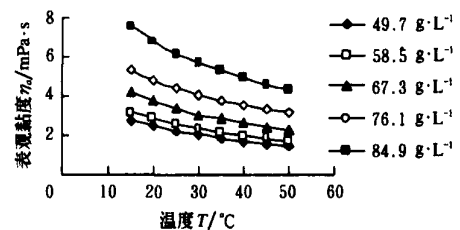


图 2 不同浓度苏云金芽胞杆菌浓缩液的表观黏度与温度的关系

Fig 2 Relationship between apparent viscosity of concentrated broth of *B. acillus thuringiensis* and temperature

由图 2 可知, 表观黏度随着温度的上升而下降, 而且表观黏度在温度较低和浓度较高时对温度或浓度的变化更敏感。当温度上升时, 分子的内能增加, 从而导致分子热运动加快, 因而分子间的作用力相应地就被减弱, 而表观黏度又与分子间的作用力正相关, 因此, 表观黏度下降^[8]。采用 Arrhenius 方程对所测数据进行回归分析, R^2 值均为 0.996 左右, 说明表观黏度与温度的关系对所选模型符合很好, 即温度对苏云金芽胞杆菌发酵液及其浓缩液的表观黏度的影响确实符合 Arrhenius 方程。活化能表示在固定剪切速率时, 使一个分子链段

克服周围分子对它的作用力, 以便能更换位置所需要的能量。活化能是温度和浓度的函数, 是黏度对温度敏感程度的一种度量。活化能值越大, 温度对黏度的影响也越大^[1]。由表 2 可以看出, 随着浓度的增大, K_0 值增加, 而流动活化能 Ea 值变化不大。这说明浓度对表观黏度的影响较为显著, 而且温度和浓度对表观黏度的影响基本上是独立的。

表 2 不同浓度苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的 Arrhenius 方程参数

Table 2 Parameters of Arrhenius equation of broth and concentrated broth of *B. acillus thuringiensis* in different concentration

样品浓度 /g · L ⁻¹	49.7	58.5	67.3	76.1	84.9
$K_0/\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	8.972	9.643	16.42	42.99	48.98
$Ea/10^4 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	13.70	13.88	13.24	11.51	12.02
R^2	0.9962	0.9958	0.9957	0.996	0.9963

2.3 浓度与表观黏度的关系

苏云金芽胞杆菌发酵液在微滤浓缩过程中, 由于透过液中含有一些可溶性小分子物质, 因此, 浓缩液的固形物浓度增加幅度较慢, 但是表观黏度值却随固形物浓

度的上升而迅速上升, 如图 2 所示。发酵液微滤浓缩 3 倍, 其固形物浓度提高了 70.8%, 在不同温度条件下 (15~ 50 °C), 其表观黏度值分别增至原来的 2.73~ 2.92 倍。为了能更好地反映苏云金芽胞杆菌发酵液在微滤浓缩过程中的表观黏度的变化规律, 采用前述几种模型: 式 (4)~ (7), 对所测样品的表观黏度值进行回归, 结果见表 3。由表 3 可知, 式 (7) 能更好地反映苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液的表观黏度与浓度的变化关系, 其 R^2 值均大于 0.99, 这说明实验测定值与此模型拟合程度很好, 因而可以利用它更为准确地预测在微滤过程中苏云金芽胞杆菌浓缩液的表观黏度的变化。式 (6) 的 R^2 值大都在 0.98~ 0.99 之间, 根据回归曲线的趋势线可知, 当浓度较大时计算值与实测值相差较大; 式 (5) 和式 (6) 相似, 其 R^2 值稍小, 在 0.97~ 0.98 之间, 式 (4) 并不能很好地与实测值拟合, 虽然其 R^2 值也在 0.95~ 0.96 之间, 但根据回归曲线的趋势线可知它在浓度较高和较低时都不能与实测值较好地吻合。

表 3 用不同模型表示的苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液的表观黏度与浓度的关系的回归结果

Table 2 Regressive results of the relationship between apparent viscosity described by different models and the concentration of concentrated broth of *B. acillus thuringiensis*

温度/	$\eta = a(C)^b$	$\eta = 1 + a_1C + b_1C^2$	$\eta = a_2\exp(b_2C)$	$\eta = a_3\exp(b_3C^2)$
15	$\eta = 0.0017C^{1.8696}$ $R^2 = 0.9629$	$\eta = 1 - 0.0353C + 0.0013C^2$ $R^2 = 0.9723$	$\eta = 0.6208\exp(0.0288C)$ $R^2 = 0.986$	$\eta = 1.5772\exp(2.14 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.997$
20	$\eta = 0.0016C^{1.8623}$ $R^2 = 0.958$	$\eta = 1 - 0.0352C + 0.0012C^2$ $R^2 = 0.9716$	$\eta = 0.5639\exp(0.0287C)$ $R^2 = 0.9835$	$\eta = 1.4275\exp(2.14 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9966$
25	$\eta = 0.0013C^{1.8885}$ $R^2 = 0.9584$	$\eta = 1 - 0.0358C + 0.0011C^2$ $R^2 = 0.976$	$\eta = 0.495\exp(0.0291C)$ $R^2 = 0.9835$	$\eta = 1.2697\exp(2.17 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9959$
30	$\eta = 0.0011C^{1.8959}$ $R^2 = 0.9475$	$\eta = 1 - 0.0372C + 0.0011C^2$ $R^2 = 0.9699$	$\eta = 0.4497\exp(0.0293C)$ $R^2 = 0.9765$	$\eta = 1.1577\exp(2.19 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.993$
35	$\eta = 0.0008C^{1.9579}$ $R^2 = 0.9564$	$\eta = 1 - 0.0389C + 0.001C^2$ $R^2 = 0.9756$	$\eta = 0.3895\exp(0.0302C)$ $R^2 = 0.9822$	$\eta = 1.0343\exp(2.25 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9953$
40	$\eta = 0.0006C^{2.0204}$ $R^2 = 0.9654$	$\eta = 1 - 0.004C + 0.001C^2$ $R^2 = 0.9815$	$\eta = 0.3397\exp(0.0311C)$ $R^2 = 0.9874$	$\eta = 0.9308\exp(2.31 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9966$
45	$\eta = 0.0005C^{2.0275}$ $R^2 = 0.9614$	$\eta = 1 - 0.0402C + 0.001C^2$ $R^2 = 0.9807$	$\eta = 0.3136\exp(0.0312C)$ $R^2 = 0.9854$	$\eta = 0.8622\exp(2.32 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9966$
50	$\eta = 0.0005C^{2.018}$ $R^2 = 0.9565$	$\eta = 1 - 0.0396C + 0.0009C^2$ $R^2 = 0.9797$	$\eta = 0.2973\exp(0.0311C)$ $R^2 = 0.982$	$\eta = 0.8137\exp(2.32 \times 10^{-4}C^2)$ $R^2 = 0.9947$

2.4 温度与浓度对表观黏度的综合影响

根据有关文献^[1,4], 在式 (3) 和式 (7) 的基础上, 综合考虑温度和浓度对表观黏度影响, 通过对所测数据进行二元非线性回归, 可得到温度和浓度对表观黏度综合影响的方程:

$$\eta = a_3\exp(Ea/RT + b_3C^2) \quad (8)$$

式中 $a_3 = 6.973 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$, $Ea = 12.85 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $b_3 = 2.230 \times 10^{-4} \text{L}^2 \cdot \text{g}^{-2}$, $R^2 = 0.995$ 。

为了验证方程 (8) 的应用可靠性, 取苏云金芽胞杆

菌微滤过程中的微滤浓缩液两份 (浓度分别为 $71.2 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $79.5 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 分别在两组温度条件下考察方程理论计算值和实测值之间的拟合程度 (图 3), 并进行误差分析。

从图 3 可以看出, 由公式所计算得到的苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液理论表观黏度值和实际测量值之间比较吻合, 浓度为 $71.2 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓缩液的误差范围在 0.9%~ 2.5% 之间, 而浓度为 $79.5 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓缩液的误差范围在 1.3%~ 5.6% 之间, 除了个别数据外, 其它

数据的误差均在 5% 以内, 这表明所推导出的苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液的表观黏度计算公式能较好反映温度和浓度对浓缩液表观黏度的综合影响, 用此式可以方便快速地预测苏云金芽胞杆菌发酵液在微滤浓缩过程中表观黏度的变化。

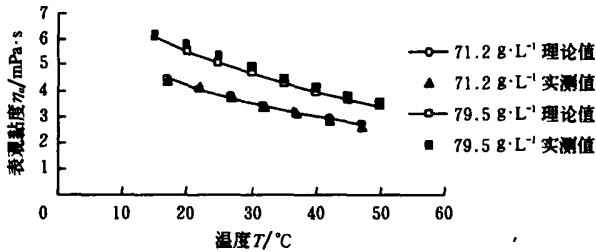


图3 苏云金芽胞杆菌微滤浓缩液在不同温度条件下的表观黏度理论与实测值

Fig. 3 Determined and theoretical apparent viscosities of concentrated broth of *Bacillus thuringiensis* at different temperature

3 结论

在试验浓度范围内, 苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液均为拟塑性流体, 其表观黏度值随剪切速率的增加而降低。随着浓缩倍数的增加, 流变指数 n 值减小, 拟塑性增强, 其稠度系数 K 值随浓度的增加而上升。苏云金芽胞杆菌发酵液及其微滤浓缩液的表观黏度随着温度的升高而降低, 随着浓度的增加而上升。表观黏度与温度的关系服从 Arrhenius 方程, 不同浓缩倍数下浓缩液的表观黏度与浓度的关系可用经验回归方程 $\eta = a_3 \exp(b_3 C^2)$ 来描述; 浓度对表观黏度的影响比温度要明显。在固形物浓度范围 $49.7 \sim 84.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 $15 \sim 50$ 条件下, 温度、浓度对表观黏度综合影响的关系式为: $\eta = a_3 \exp(Ea/RT + b_3 C^2)$, 式中 $a_3 = 6.973 \text{ } \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$, $Ea = 12.85 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $b_3 = 2.230 \times 10^{-4} \text{ L}^2 \cdot \text{g}^{-2}$ 。并对该公式的可靠性进行了检验, 结果表明由该公式计算的理论值与实测值吻合程度较高。

[参 考 文 献]

- [1] Togrul H, Arslan N. Mathematical model for prediction of apparent viscosity of molasses [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62: 281- 289
- [2] 罗昌荣, 麻建国, 许时婴. 蕃茄浆料的流变特性 [J]. *食品科学*, 2001, 22(7): 28- 32
- [3] 路福绥, 黄雪松. 浓缩梨汁的流变特性研究 [J]. *山东农业大学学报*, 1995, 127(1): 44- 47.
- [4] 路福绥, 盛 锋, 李丽芳, 等. 浓度、温度对山楂汁流变特性的影响 [J]. *山东农业大学学报*, 1996, 27(4): 463- 466
- [5] 陈萃仁, 李旭平, 沈振华, 等. 澄清胡萝卜汁的流变特性及其黏度的数学模型 [J]. *食品与发酵工业*, 1994, (5): 44- 47.
- [6] 唐继国, 武玉斌, 王淑兰. 槐花蜂蜜的流变性能 [J]. *青岛化工学院学报*, 1994, 15(4): 311- 317.
- [7] 王清章, 邱承光, 彭光华, 等. 莲藕粉糊的流变特性实验研究 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 116- 119.
- [8] 刘利平, 马晓建. 小麦粉糖化醪流变特性研究 [J]. *科技通报*, 2003, 19(4): 306- 308
- [9] Velez-Ruiz J F, Barbosa-canovas G V. Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration, temperature and storage time [J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 35: 177- 190
- [10] Yanes M, Duran L, Costell E. Effect of hydrocolloid type and concentration on flow behaviour and sensory properties of milk beverages models systems [J]. *Food Hydrocolloids*, 2002, 16: 605- 611.
- [11] Michele M, Hoshahili A R T, Ramaswamy H S. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature [J]. *Food Research International*, 2001, 34: 695- 703
- [12] Gomez-Diaz D, Navaza J M. Rheology of aqueous solutions of additives: effect of concentration, temperature and blending [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56: 387- 392
- [13] 李雁群, 章克昌. 苦参对灵芝发酵液流变特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2003, 24(12): 34- 35
- [14] Goudar C, Strevett K A, Shah S N. Influence of microbial concentration on the rheology of non-Newtonian fermentation broths [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1999, 51: 310- 315
- [15] Vellanki P, Jayaraman G, Marison I W, et al. Calorimetric optimization of growth and sporulation of *Bacillus thuringiensis* var. *gaoeriae* [J]. *Thermochimica Acta*, 1998, 309: 105- 110
- [16] Krusteva E D, Doneva T A, Vassiliev C S. Pseudoplasticity of filter cakes explains cross-flow microfiltration [J]. *Colloids and Surfaces A*, 1999, 149: 499- 506

Model for predicting apparent viscosity of the microfiltration concentrated broth of *Bacillus thuringiensis*

Liu Hua liang, Chen Shou wen, Sun Ming, Yu Ziniu

(State Key Laboratory of Agricultural Microbiology, National Engineering Research Center for Microbial Pesticides, College of Life Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The rheological behavior of the *Bacillus thuringiensis* fermentation broth and its microfiltration

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

concentrated broths was studied at 30 °C and rotational speed ranging from 75 to 750 r/min. As the results confirmed, they were pseudoplastic fluid, the apparent viscosities decreased with the increase of shear rate and the pseudoplasticity increased with the increment of concentration. As to the concentrated broths, the apparent viscosities decreased with the increase of temperature or reduction of concentration, and the effect of temperature on their apparent viscosities was further described by Arrhenius model. The activation energy (E_a) had no obvious variation in different concentrations and the effect of concentration on apparent viscosity was more noticeable than that of temperature. Moreover a model for describing the combined effects of temperature and concentration on the apparent viscosity was given, which could be used to predict apparent viscosity of the concentrated broth of *Bacillus thuringiensis* at different temperatures and concentrations in the process of microfiltration.

Key words: *Bacillus thuringiensis*; microfiltration concentrated broth; rheological property; apparent viscosity