

文章编号:1009-038X(2001)05-0471-05

番茄浆料的流变特性

罗昌荣, 麻建国, 许时婴

(无锡轻工大学 食品学院, 江苏 无锡 214036)

摘要: 对不同浓度的番茄浆料在 30~60 ℃ 时的流变学性质进行了研究. 结果显示, 番茄浆料为假塑体系, 屈服应力值的范围比较宽(40~140 Pa). 通过回归分析得到数学模型: $K = K_0 \exp(Ea/RT)$ 和 $K = A \exp(BC)$. 可以分别用来描述温度和浓度对番茄浆料稠度系数的影响. 利用这些方程, 可以预测实际加工过程中不同温度和不同浓度条件下番茄浆料的粘度.

关键词: 番茄浆料; 浓度; 温度; 流变特性

中图分类号: O 351.3

文献标识码: A

Rheological Properties of Tomato Puree

LUO Chang-rong, MA Jian-guo, XU Shi-ying

(School of Food Science and Technology, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036, China)

Abstract: The rheological properties of tomato purees were determined at four temperatures, and four concentrations. It showed that the systems exhibited pseudoplastic behavior with large magnitudes of Casson yield stresses(40-140Pa). Two models, $K = K_0 \exp(Ea/RT)$ and $K = A \exp(BC)$, could be used to describe the effect of temperature and concentration on the consistency coefficient of tomato purees respectively by regression analysis. Results showed that those two models fitted the experimental data well within the experimental conditions used in this study. Some equations that described the effects of temperature and concentration on the viscosities of tomato purees at the same time were derived. And these equations could be utilized to predict the viscosities of tomato purees processed at different temperatures and different concentrations.

Key words: tomato puree; concentration; temperature; rheological properties.

研究番茄浆料的流变特性, 对于番茄制品生产工艺及设备的设计以及番茄浆料在其它食品中的应用都具有很重要的指导意义^[1].

物质的流动特性可以采用剪切应力—剪切速率的流动曲线来表示. 当剪切应力与形变率成正比, 那么该流体就是牛顿型流体, 剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的比值定义为该物质的粘度 η .

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

对牛顿型流体, 可用粘度表示它的流动特性. 但是, 对于非牛顿型流体, 其粘度不是一个定值, 随着剪切速率的变化而变化. 非牛顿型流体的粘度可用表观粘度 η_a 来表示. 大多数食品呈现非牛顿型流体的特点: 它们的粘度与剪切速率有关. 根据剪切应力和剪切速率的关系, 下面两个经验模型可用描述

收稿日期: 2001-02-12; 修订日期: 2001-09-06.

作者简介: 罗昌荣(1970-), 男, 湖南衡阳人, 食品科学与工程博士研究生.

番茄浆料的流动特性^[2,3]。

幂定律:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

卡淞公式:

$$\tau^{0.5} = \tau_0^{0.5} + K_c \dot{\gamma}^{0.5} \quad (3)$$

式中 K 和 K_c 为稠度系数, n 为流动指数, $n < 1$, 表明流体为假塑性流体; $n > 1$, 表明流体为胀流体; $n = 1$, 流体为牛顿流体。由式(2)可得到非牛顿流体的表观粘度 $\eta_a = \tau/\dot{\gamma} = K\dot{\gamma}^{n-1}$ 。影响非牛顿型流体流动特性的其它因素还包括温度、压力和固形物浓度等。关于番茄浆料的流变学性质, 已经有许多作者进行了大量的研究工作。研究发现, 幂定律可以较好地用来描述番茄浆料的流动特性^[4]。但是, 关于浓度和温度对稠度系数以及流动指数的影响报道很少, 且尚未得出一致结论^[5]。因此, 关于温度和浓度对番茄浆料稠度系数和流动指数的影响尚需进行大量的研究工作。作者着重研究温度和番茄浆料的浓度对番茄浆料流变特性的影响。非牛顿型流体的温度依赖性非常复杂, 不能用上述简单关系式来表示。温度可能会影响流动模型中的一个或几个参数, 流动指数受温度的影响较小, 而稠度系数受温度的影响较大。

1 材料与方 法

1.1 样品制备

成熟鲜红的番茄清洗干净后, 去蒂, 经单道打浆机打浆(筛网孔径 0.6 mm), 去皮去籽后, 迅速灭酶, 灭酶后, 迅速冷却, 4℃ 冰箱冷藏备用。

1.2 实验设备

单道打浆机: 江苏靖江食品机械厂生产; TA1000 流变仪: TA 公司生产。

1.3 番茄浆料流变特性测定

可溶性固形物含量分别为 15%、18%、20%、24%(阿贝折光仪测定)的番茄浆料, 利用 TA1000 流变仪, 40 mm 平行板, 板间隙为 1 mm。分别在温度为 30、40、50、60℃ 条件下测定其流变性质。装样后用石蜡油进行油封以减少水分的蒸发。

2 结果与讨论

2.1 番茄浆料的流变性质

从图 1 和图 2 可以很明显地看出, 番茄浆料体系属假塑体系。剪切应力随剪切速率的增加而增加, 番茄浆料的表观粘度随剪切速率的增加而逐渐

降低, 因此番茄浆料属于典型的剪切变稀体系。体系的粘度随着体系温度的升高而下降。大量的研究报导, 番茄浆料的剪切应力与剪切速率之间的关系可以用幂定律来描述。但是, 番茄浆料体系并不是完全符合幂定律的流体, 因为番茄浆料体系具有屈服应力, 当剪切速率很低时, 体系不能产生流动; 只有施加给体系的力克服屈服应力时, 番茄浆料才能产生流动。

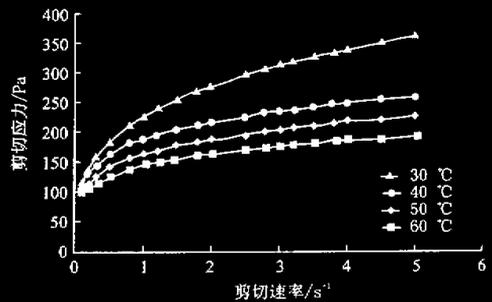


图 1 番茄浆料的流动曲线图

Fig.1 Plot of shear rate versus shear stress for tomato puree

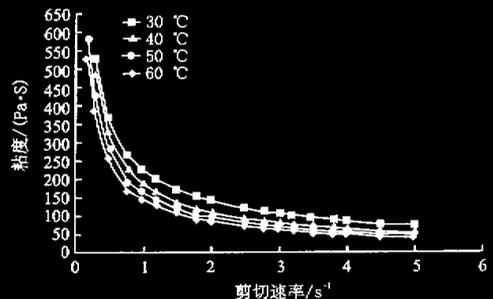


图 2 番茄浆料的粘度曲线图

Fig.2 Plot of shear rate versus apparent viscosity for tomato puree

2.2 浓度和温度对番茄浆料流变性质的影响

从图 3 可以看出, 番茄浆料浓度从 15% 增加至 24% 时, 流动指数 n 值大约在 0.1143~0.2962 范围内, 这与 M. A. Rao 和 H. J. Cooley^[6] 的实验结果比较一致, 他们得到的 n 值为 0.16~0.35, 番茄浆料表现出较强的假塑性。从图 3 的数据来看, 流动指数 n 值随着温度的升高, 大致呈下降的趋势, n 值越小, 意味着番茄浆料剪切越易变稀, 假塑程度越大; n 值越大, 意味着番茄浆料越难剪切变稀, 假塑程度越小。浓度对流动指数的影响没有明显的规律性。许多研究者^[5] 也认为: 番茄浆料的流动指数 n 同温度和浓度之间的关系还不是非常清楚, 到目前为止, 温度和浓度对流动指数的影响还不能用具

体的表达式表示出来,这可能是由于番茄浆料的流动指数同时受温度和浓度的影响,也就是说,流动指数是温度和浓度的二元函数,即:

$$n = f(T, C)$$

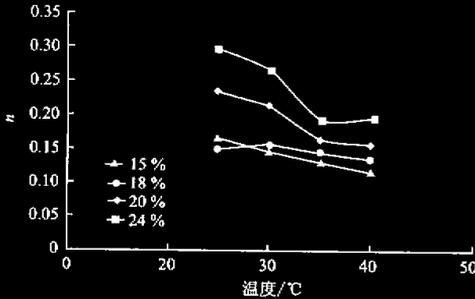


图 3 温度对不同浓度番茄浆料流动指数的影响

Fig. 3 Effect of temperatures on the flow behavior index of tomato purees with different concentrations

另外,其它一些因素,如压强等也可能会对稠度系数和流动指数产生一定的影响。

从图 4 可以看出,屈服应力值随着温度的升高而呈下降的趋势,随浓度的增加呈上升的趋势,但温度的升高对屈服应力值的影响比较小,而浓度对屈服应力值的影响比较大。当温度从 30 °C 上升到 60 °C,番茄浆料的可溶性固形物含量为 15% 时,屈服应力值从 48.42 Pa 下降到 40.67 Pa;当固形物含量为 24% 时,屈服应力值从 132.1 Pa 下降到 95.2 Pa。而番茄浆料浓度从 15% 上升到 24% 时,屈服应力值从 48.42 Pa(30 °C) 上升到 132.1 Pa(30 °C)。也就是说,番茄浆料的浓度对其屈服应力的影响要比温度的影响大得多。这可能是随着固形物含量的增加,颗粒与颗粒之间的距离愈来愈近,颗粒之间的相互作用力也愈来愈大,故颗粒之间相互作用所形成的网状结构也越来越致密,因此,要克服颗粒之间的相互作用而使它们之间产生定向排列和运动所需施加的力也就会越来越大;而番茄浆料固形物含量低时,颗粒之间的距离比较大,相对而言,颗粒周围的水分子较多,而水分子对颗粒具有润滑作用,因此,颗粒之间的相互作用力比较小,在受到剪切作用时,要使颗粒产生定向排列和运动所需要施加的力就会比较小。当固形物含量一定时,随着温度的升高,颗粒运动速度增加,颗粒间相互作用力减弱,因此,要克服颗粒的相互作用而使它们产生定向排列和运动所需施加的力也会随温度的升高而有所下降,但下降的幅度与番茄浆料的固形物含量有关。固形物含量越低,下降的幅度越小;固形物含量越高,屈服应力值下降的幅度越大。M. A. Rao

和 H. J. Cooley^[6] 对不同浓度和品牌的番茄酱的流变性质进行了研究,测得这些番茄酱的屈服应力值为 78~212 Pa, 作者的实验结果与之较相符。

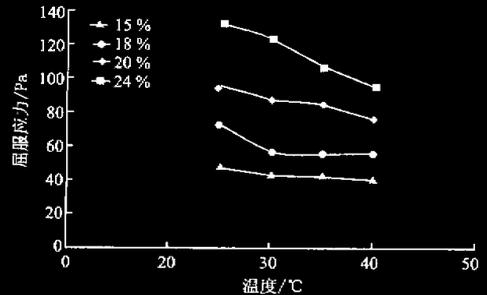


图 4 温度对不同浓度番茄浆料屈服应力的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the yield stress of tomato purees with different concentrations

2.3 温度对番茄浆料稠度系数的影响

图 5 给出了番茄浆料的粘度随温度的变化情况。可以看出,随着温度的升高,番茄浆料的粘度逐渐下降,但是下降的幅度同番茄浆料的温度和浓度有关,由于稠度系数与温度的关系也符合阿累尼乌斯方程^[7]:

$$K = K_0 \exp(Ea/RT) \quad (5)$$

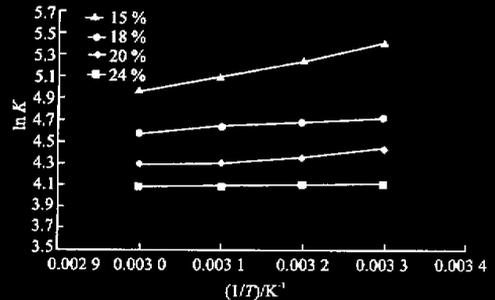


图 5 温度对番茄浆料稠度系数的影响

Fig. 5 Effect of temperature on the consistency coefficient of tomato puree

式中 K 为番茄浆料的稠度系数, K_0 为常数, Ea 为流体的活化能, R 为气体常数, T 为绝对温度。

利用 $\ln K$ 和 $1/T$ 作图, 得到温度对番茄浆料粘度影响图。对各关系线进行回归分析, 得到如下回归方程:

$$\text{番茄浆料固形物为 15\% 时, } \ln K = 129/T + 3.6984 \quad R^2 = 0.9757$$

$$\text{番茄浆料固形物为 18\% 时, } \ln K = 501/T + 3.0926 \quad R^2 = 0.9723$$

番茄浆料固形物为 20% 时, $\ln K = 544/T + 2.6444$ $R^2 = 0.9562$

番茄浆料固形物为 24% 时, $\ln K = 1499/T + 0.4649$ $R^2 = 0.9932$

从 R^2 值可以知道, 稠度系数 K 与温度 T 能较好地符合阿累尼乌斯方程。

2.4 浓度对番茄浆料稠度的影响

从图 6 可以看出, 番茄浆料固形物对稠度系数的影响较大。据国外文献报导, 固形物含量对稠度系数的影响, 主要有以下两种数学模型^[7]:

$$K = AC^B \quad (5)$$

$$K = A \exp(BC) \quad (6)$$

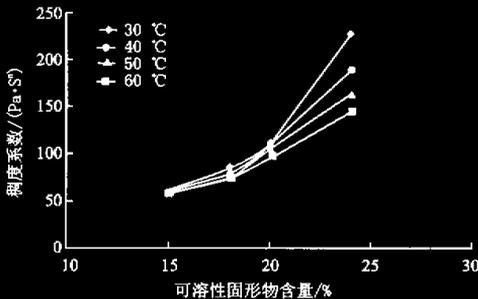


图 6 固形物含量对稠度系数的影响

Fig. 6 Effect of concentration on the consistency coefficient of tomato puree

式中 A 、 B 为常数, C 为体系的质量分数。利用 (5)、(6) 两式对番茄浆料的稠度系数与质量分数关系曲线进行回归分析, 得到如下拟合方程。

利用 $K = AC^B$ 进行拟合所得曲线方程:

$$30\text{ }^\circ\text{C 时, } K = 0.0315C^{2.7613} \quad R^2 = 0.9647$$

$$40\text{ }^\circ\text{C 时, } K = 0.0740C^{2.4901} \quad R^2 = 0.9673$$

$$50\text{ }^\circ\text{C 时, } K = 0.1544C^{2.1787} \quad R^2 = 0.9653$$

$$60\text{ }^\circ\text{C 时, } K = 0.2193C^{2.0352} \quad R^2 = 0.9875$$

利用 $K = A \exp(BC)$ 进行拟合所得曲线方程:

$$30\text{ }^\circ\text{C } K = 6.5401e^{0.1458C} \quad R^2 = 0.9874$$

$$40\text{ }^\circ\text{C } K = 8.3714e^{0.1289C} \quad R^2 = 0.9871$$

$$50\text{ }^\circ\text{C } K = 10.3880e^{0.1145C} \quad R^2 = 0.9819$$

$$60\text{ }^\circ\text{C } K = 11.2900e^{0.1064C} \quad R^2 = 0.9952$$

可以看出, 指数关系式 (6) 能更好地反映番茄浆料的稠度系数与浓度的变化关系。 R^2 均大于 0.98, 说明实验测定值拟合模型程度较好, 因而可以利用这些拟合曲线方程在实际生产中快速准确地预测番茄浆料的稠度。

2.5 公式的导出和验证

由于温度对流动特性指数的影响目前仍不能用一个确定的关系式来表示, 因此, 作者利用不同

温度条件下所得到的流动指数 n 的平均值来进行下式的推导。表 1 给出了不同浓度番茄浆料的流动指数的平均值 n 、活化能 E_a 和稠度系数 K_0 。

表 1 不同浓度番茄浆料的流动指数的平均值、活化能 E_a 和 K_0

Tab. 1 Average flow behavior index, activation energy and K_0 of tomato purees with different concentrations

可溶性固形物含量/%	n	E_a / (KJ/mol)	K_0
15	0.1907	2.32	24.86
18	0.1454	4.84	12.55
20	0.1376	5.73	11.93
24	0.2227	12.46	1.59

根据公式 $\eta_a = K\gamma^{n-1}$ 和 $K = K_0 \exp(E_a/RT)$, 把表 1 中的数据 n 、 E_a 和 K_0 值代入式中得到以下公式:

$$\eta_{15} = 24.86\gamma^{0.8093} \exp(279/T) \quad (7)$$

$$\eta_{18} = 12.55\gamma^{0.8546} \exp(583/T) \quad (8)$$

$$\eta_{20} = 11.93\gamma^{0.8624} \exp(690/T) \quad (9)$$

$$\eta_{24} = 1.59\gamma^{0.7773} \exp(1499/T) \quad (10)$$

为了验证理论值和实测值之间的拟合程度, 选用固形物为 18% 的番茄浆料在 50 °C 和 60 °C 粘度实测值和由式 (8) 计算得出的理论值进行误差分析和相关性分析。

表 2 固形物为 18% 的番茄浆料在 50 °C 和 60 °C 粘度实测值和理论值

Tab. 2 Determined and theoretical viscosities of tomato puree (18%) at the temperatures of 50 °C and 60 °C

剪切速率/ s^{-1}	Pa·s			
	理论值 (50 °C)	实测值 (50 °C)	理论值 (60 °C)	实测值 (60 °C)
1	76.30	74.82	72.27	73.87
2	42.20	41.32	39.97	40.53
3	29.84	29.20	28.26	28.53
4	23.33	22.82	22.10	22.23
5	19.28	18.85	18.27	18.33

从图 7 和图 8 可以看出, 由公式所计算得到的番茄浆料理论粘度值和实测值相关性非常好。从直线的斜率可以知道, 公式计算值和实际值之间存在一定的偏差, 但其相对误差小于 5%。因此, 所推导出的番茄浆料粘度计算公式准确度很高。在实际生产中, 可以利用这些公式快速推算出不同固形物含

量的番茄浆料在不同温度下的表观粘度值,从而指导实际生产和工艺的设计。

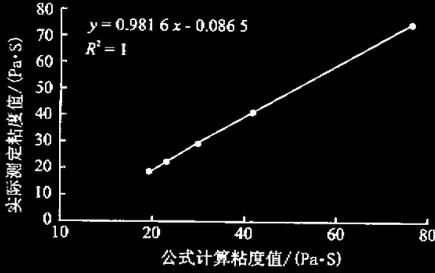


图 7 50 °C 时理论值和实测值相关性

Fig.7 The correlation between the determined viscosities and theoretical viscosities at 50 °C

3 小 结

不同浓度的番茄浆料呈现出假塑性质,随着剪切速率的增加,番茄浆料的粘度逐渐下降。番茄浆料在剪切过程中都具有屈服应力,随着固形物含量的增大,屈服应力值也随之增大。温度对番茄浆料

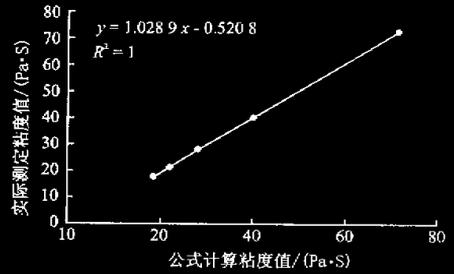


图 8 60 °C 时理论值和实测值相关性

Fig.8 The correlation between the determined viscosities and theoretical viscosities at 60 °C

的粘度有一定的影响,但不如固形物含量的影响显著。固形物含量对番茄浆料稠度系数的影响符合指数关系,其数学模型为: $K = A \exp(BC)$, 但 A、B 值与温度的大小有关。温度对番茄浆料稠度系数的影响符合阿累尼乌斯方程。另外,作者还推导出了不同浓度的番茄浆料在不同温度下的表观粘度计算公式,从而用来指导实际生产和工艺的设计。

参考文献:

[1] KYEREME M, SCOTT A H, BRIAN E F. Modeling the temperature effect on the flow behavior of sweet potato puree[J]. *J Food Proc Eng*, 1999, 20:235~247.

[2] CRANDALL P G, CHEN C S, CARTER R D. Models for predicting viscosity of orange juice concentrates[J]. *Food Technol*, 1982, 36(5):245.

[3] 陈克复,卢晓江,金醇哲等.食品流变学及其测量[M].北京:轻工业出版社,1989.

[4] FILKOVA J, LAWAL A, KOZISKOVA B, MAJUMDAR A S. Heat transfer to a power law fluid in tube flow: numerical and experimental studies[J]. *J Food Eng*, 1987, 6:143~151.

[5] HAYES W A, SMITH P G, MORRIS A E J. The production and quality of tomato purees. *CRC Rev*[J]. *Food Sci Nutr*, 1998, 38(7):537~564.

[6] RAO M A, COOLEY H J. Rheological behavior of tomato pastes in steady and dynamic shear[J]. *J Texture Studies*, 1992, 23: 415~425.

[7] 陈萃仁,李旭平,沈振华等.澄清胡萝卜汁的流变特性及其粘度的数学模型[J]. *食品与发酵工业*, 1994, (5):44~47.

(责任编辑:朱明,杨萌)