

## 苹果汁热导率的试验研究

张敏<sup>1</sup> 张百良<sup>1</sup> 孙治强<sup>1</sup> 赵惠忠<sup>2</sup> 王兰菊<sup>1</sup> 李志敏<sup>1</sup> 张杰<sup>3</sup>

(1. 河南农业大学 农业部可再生能源重点试验室, 郑州 450002;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030; 3. 河南省气象局, 郑州 450000)

**摘要** 采用微热探针法测试装置进行了果汁热导率试验。该装置结构简单、使用方便, 每次只需试样 50 mL, 且测试时间 < 20 s, 试样温升 < 2 °C, 减小了自然对流造成的测试误差, 测试过程中可反映试样的真实状态。测定了 20 种不同质量分数苹果汁的热导率, 苹果汁的质量分数采用 WAY(2WJ) 型阿贝折射仪测定。试验结果表明, 苹果汁质量分数与热导率呈高度负相关 ( $r > 90\%$ ), 并得到了 27 °C 环境温度下不同质量分数区域苹果汁热导率的经验公式。对几种不同质量分数区域苹果汁热导率的测试结果表明, 实际测定结果与经验公式的计算结果能很好地吻合。

**关键词** 微热探针; 浓度; 苹果汁; 热导率

**中图分类号** TS 207.3

**文章编号** 1007-4333(2005)01-0060-04

**文献标识码** A

### An experimental study on thermal conductivities of apple juices with different concentrations

Zhang Min<sup>1</sup>, Zhang Bailiang<sup>1</sup>, Sun Zhiqiang<sup>1</sup>, Zhao Huizhong<sup>2</sup>, Wang Lanju<sup>1</sup>, Li Zhimin<sup>1</sup>, Zhang Jie<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Ministry of Agriculture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

3. Henan Meteorological Administration, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract** A tiny heat probe was used to measure the thermal conductivities of apple juices with 20 different concentrations. The juice concentration was also measured using a WAY(2WJ) Abbe refractometer. The results show that there was a high negative correlation between the concentrations and thermal conductivities. A new empirical equation was obtained to express the relationship between the thermal conductivities and concentrations of apple juice at temperature 27 °C. The simple method was showed to be convenient, easy handling, 20 seconds time-consuming, only 50 mL samples, lower than 2 °C temperature increase and could give accurate results of the samples because of the low convection error.

**Key words** a tiny heat probe; concentration content; apple juice; thermal conductivity

果汁的加工和冷藏过程伴随有热量的交换和传递, 在对果汁加工工艺和设备进行优化选择时, 需要深入了解果汁的热物性参数。果汁的热导率反映了果汁的这种热传递能力, 是重要的热物性参数之一, 但是目前这方面的数据极为缺乏, 有关文献大多是 20 世纪五六十年代发表的, 数据离散度很大, 难以有效地应用于生产实际<sup>[1]</sup>。笔者依据热物理学中

线热源瞬态加热原理, 提出并参与研制了基于微热探针法的果汁热导率测试装置。这种装置可方便地插入被测样品, 在试样温升极小(一般 < 2 °C)的情况下, 只需约 20 s 即可测定果汁热导率, 大大减小了自然对流造成的测试误差。本研究中使用此装置系统地测试了同一温度条件下 20 种不同浓度浓缩苹果汁的热导率, 分析并建立了果汁溶液热导率与

收稿日期: 2004-09-10

基金项目: 农业部可再生能源重点开放试验室资助项目, 河南省重大科技攻关项目 (0322010900)

作者简介: 张敏, 博士研究生; 孙治强, 教授, 通讯作者, 主要从事生物传热及设施园艺方面的研究, Tel: 0371-3558039,

E-mail: sunzq@public2.zz.ha.cn

其质量分数关系的回归方程。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试材为真空浓缩苹果汁(70 白利糖度(Brix),由三门峡湖滨果汁有限公司提供),用超高纯度水(电阻率 18.2 M $\cdot$ cm)分别稀释得到不同质量分数的试验样品,并用 WAY(2WJ)型阿贝折射仪(质量分数 0~95%,准确度  $\pm 0.1\%$ ,上海精密科学仪器有限公司生产)进行测量。

### 1.2 微热探针法基本原理

微热探针法测量热导率的基本原理基于线热源瞬态模型<sup>[2]</sup>。一根长径比很大的带绝缘层(厚度足够小)的铜丝置于一带尖头不锈钢套管内构成热探针,测试时,将热探针插入均匀的待测样品。初始状

态下,热探针和被测样品处于同一温度,对热探针内的铜丝施加一稳恒电压后,会引起铜丝、电绝缘层、不锈钢套管和待测样品温度的升高,只要测出探针温度随时间的变化,并计算温升随时间对数变化的斜率,即可求得被测量样品的热导率<sup>[3]</sup>:

$$m = \frac{q}{4} \left( \frac{d^{-}(t)}{d(\ln t)} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: $q$ 为单位长度电阻丝的发热功率,W/m; $d^{-}$ 为电阻丝的温升; $t$ 为加热时间,s。

### 1.3 测试系统原理与方法

采用河南农业大学农业部可再生能源重点试验室研制的导热系数测量系统(图 1)。其中热针为长 32 mm、外径 0.7 mm、内径 0.3 mm 的不锈钢针,将直径 0.02 mm 的漆包铜线绕成螺旋状装入其中,铜线与不锈钢针之间用导热性能良好且绝缘的真空硅

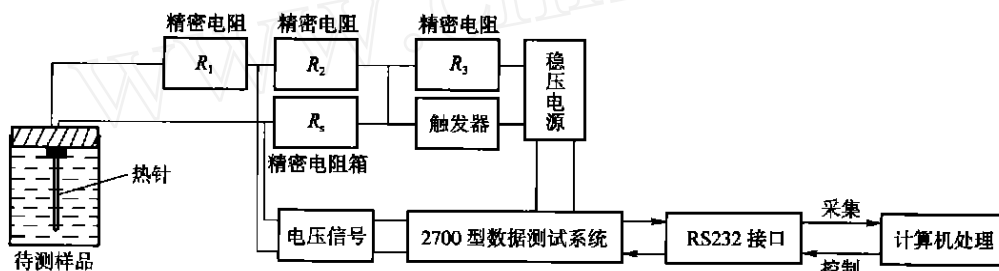


图 1 果汁热导率测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system of fruit juice

脂填充,并用环氧树脂胶将探针两端密封固定。

测试系统中, $R_1$ 、 $R_2$ 阻值相等且温度系数同号, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 远大于热探针的阻值 $R_p$ 。热探针温度在稳压电源提供的恒定电压 $E$ 作用下随时间不断升高, $R_p$ 不断变化,从而使电路中输出电压差 $U$ 随时间不断变化。经过变换整理可由式(1)得到被测样品的热导率

$$m = \frac{E^3}{R_s^2} C \left( \frac{d(U)}{d(\ln t)} \right)^{-1}$$

式中: $\alpha_0$ 、 $R_0$ 分别为 0 时待测物体的温度系数和电阻值; $C$ 为仪器常数,仅与热针材料和长度有

关<sup>[4]</sup>, $C = \frac{\alpha_0 R_0}{64 L}$ , $L$ /(m $\cdot$ K $\cdot$ s)。实际测量中,将微热探针依次直接插入标准样品(电阻率为 18.2 M $\cdot$ cm 的超高纯度水)、分析样品(体积分数 99.7%的分析纯乙醇溶液和体积分数 99%的分析纯丙三醇)和待测样品中,稳定几分钟。调节精密电阻箱的阻值 $R_s$ ,使输出电压信号 $U_i$ 接近 0,然后,调节稳压电源,使电路输入电压 $E = 2.5$  V,加热微热探

针,由 2700 型数据测试仪(下简称测试仪)将采集到的输出电压信号 $U$ 和加热时间 $t$ 输入计算机。绘出 $U-\ln t$ 曲线,取线性段拟合进行回归分析,按相关度最大的原则求出斜率 $d U/d \ln t$ ,得到仪器常数 $C$ ,即可由式(2)求出被测量样品的热导率 $m$ 。每个样品测量 8 次,取平均值作为该样品的测定值。

## 2 结果与分析

### 2.1 仪器的标定

本试验中,以 27 时超高纯度水( $m = 0.618$  W/(m $\cdot$ K)<sup>[5]</sup>)作为标准样品,根据式(2)给定电压 $E$ ,通过测试仪以 0.5 s 每点的速度采集输出电压差 $U$ 与加热时间 $t$ 的变化量,对采集的 $U$ 和 $\ln t$ 用 Excel 图表向导进行线性时段拟合处理,按相关度最大原则,计算出 $d U/d \ln t$ 。标定仪器常数 $C = 0.0355$  W/(m $\cdot$ K $\cdot$ s)。为了检验本方法的准确性,测试了几组分析样品的热导率(表 1)。可以看出,用标定后的热针测试得到的已知标准样品的热

表1 27 条件下标准试样的热导率

Table 1 The thermal conductivities of standard sample at 27

样品	热导率/[W/(m·K)]		相对偏差/%
	测量值	文献值 <sup>[5]</sup>	
丙三醇	0.287	0.286	0.35
乙二醇	0.256	0.258	-0.78
无水乙醇	0.164	0.166	-1.20

注:样品均为分析纯;和 体积分数 99%, 体积分数 99.7%。

表2 测试过程试样最大升温

Table 2 The maximum temperature changes during measurement

序号	质量分数/%	加热时间/s	最大输出电压/mV	试样升温/	序号	质量分数/%	加热时间/s	最大输出电压/mV	试样升温/
1	0.5	20	1.57	0.65	11	14.0	18	2.01	0.83
2	1.0	20	1.71	0.71	12	15.0	20	1.65	0.69
3	1.5	20.5	1.86	0.77	13	16.0	19	1.62	0.68
4	3.0	20	1.98	0.82	14	18.0	21	1.82	0.92
5	4.0	19	1.18	0.69	15	20.0	20	1.35	0.56
6	5.0	20	1.26	0.52	16	30.0	20	1.88	0.78
7	6.0	21	1.48	0.61	17	40.0	20	1.11	0.46
8	8.0	20	1.50	0.62	18	50.0	20	2.24	0.94
9	10.0	20	1.27	0.93	19	60.0	21	1.59	0.66
10	12.0	18	1.67	0.70	20	70.0	20	2.60	1.08

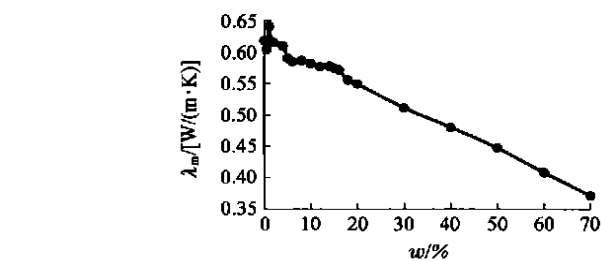
### 2.3 果汁质量分数对热导率的影响

在恒温 27 条件下,系统地测量了质量分数为 0.5%~70%的苹果汁溶液的热导率(图2)。可以看出,苹果汁的热导率总体上随果汁质量分数的增大而呈递减趋势,但是,当质量分数约为 1%时出现

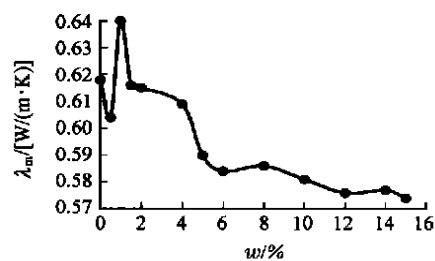
波动,与文献值的相对偏差 < 2%,说明标定后的热针可较准确地测定液体的热导率<sup>[6]</sup>。

### 2.2 不同质量分数试样的测试时间及升温

从表2可以看出,用微热针法测量果汁的热导率时,测试时间短,试样升温小,可较好地抑制自然对流对测试造成的影响,测试结果能较准确反映试样的实际状态,且测量结果复现性好。



(a) 0 w 70 %



(b) 0 w 15 %

图2 热导率  $\lambda_m$  与苹果汁质量分数  $w$  的关系

Fig. 2 Relationships of thermal conductivities and concentras of apple juice

### 2.4 热导率预测模型

通过对不同质量分数区段苹果汁热导率的分析,利用计算机对苹果汁质量分数和热导率进行线性回归,建立回归方程:

$$\left. \begin{aligned} &= -0.82w + 0.6342, r = 0.9402 \quad 1\% \leq w < 6\% \\ &= 0.58, r = 0.9194 \quad 6\% \leq w < 15\% \\ &= -0.36w + 0.624, r = 0.9986 \quad 15\% \leq w < 70\% \end{aligned} \right\} (3)$$

式中  $r$  为相关系数。实际生产应用中,在果汁质量分数 < 1%的区域,热导率以水的热导率代替<sup>[7]</sup>。利用式(3),在一定外界环境条件(本试验数据仅限于环境温度 27 )下,只要测出果汁质量分数,便可迅速测算出其热导率,反之亦然。

为检验回归方程(式(3))的准确性,测定了质量分数为 3%,9%和 25%的苹果汁溶液的热导率,分

别为 0.604, 0.576 和 0.540 W/(m·K); 回归方程的计算结果分别为 0.610, 0.580 和 0.534 W/(m·K)。经显著性检测分析, 实际测定结果与计算结果能很好地吻合, 验证了所建立的预测模型的可靠性。

### 3 结束语

采用微热探针测试装置可方便、快捷地测试果汁的热导率。测试过程中, 被测果汁的温升小, 对试样的物性影响小, 测试结果可较准确地反映果汁的实际状态。通过对同一外界温度(27℃)下不同质量分数苹果汁热导率的测试, 得出了热导率与果汁质量分数的经验关系式, 果汁质量分数 0~70% 时, 热导率随果汁质量分数的增大而呈线性递减趋势, 这一结果可为果汁加工业提供理论参考与测试方法。果汁热导率与外界温度的关系, 将作为下一步的研究。

### 参 考 文 献

[1] Peacock S. Predicting physical properties of factory juices

and syrups[J]. *Int Sugar*. 1995, 97:571

- [2] Hooper F C, Lopper F R. Transient heat flow apparatus for the measurement of thermal conductivities[J]. *Trans Am Soc Heat Vent Engres*, 1950, 14: 1435 - 1439
- [3] Cheng S X, Jiang Y F, Liang X G. A tiny probe for measuring the thermal conductivities of non-rigid materials[J]. *Meas Sci Technol*. 1994, 5:1339 - 1344
- [4] 张海峰, 程曙霞, 何立群. 微探针法测量低温下生物材料导热系数研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(2): 53 - 56
- [5] 陈则韶, 葛新石, 顾沁. 量热技术和热物性测量[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990:171 - 174
- [6] Christopher M R, Dabir S V, Fuhung H. A Group Contribution Method for the Prediction of Thermal Conductivity of Liquids and Its Application to the Prandtl Number for Vegetable Oils [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1999, 38(11): 4513 - 4519
- [7] 华泽钊, 李里特, 丹阳, 等. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999:171

(上接第 9 页)

不具备典型肽及蛋白质特征。依据 B<sub>53</sub> 的菌株形态、生理生化及遗传特征, 鉴定 B<sub>53</sub> 菌株为枯草芽孢杆菌。

### 参 考 文 献

- [1] Ivánovics G, Erdős L. Ein Beitrag zum Wesen der Kapselsubstanz des Milzbrandbazillus[J]. *Z Immunitätsforsch*, 1937, 90:5 - 19
- [2] Bovarnick M J. The formation of extracellular D(-) glutamic acid polypeptide by *Bacillus subtilis* [J]. *J Biol Chem*, 1942, 145:415 - 424
- [3] 汤谷平. 聚氨基酸材料在药物控释系统中的应用[J]. *生物医学工程学杂志*, 2001, 18(2): 169 - 172
- [4] 洼田英俊, 南部洋子, 远藤刚. 微生物生产的聚-谷氨酸的性质[J]. *化学与粘合*, 1994, 4:244 - 246
- [5] 游庆红, 张新民, 陈国广, 等. -聚谷氨酸的生物合成及应用[J]. *现代化工*, 2002, 22(12): 56 - 59
- [6] Young H K, Richard A G. Effects of glucose and glycerol on -poly(glutamic acid) formation by *Bacillus licheniformis* ATCC9945a[J]. *Biotechnology and bioengineering*, 1998, 57(4): 430 - 437

- [7] Masao Kunioka, Atsuo Goto. Biosynthesis of poly(-glutamic acid) from L-glutamic acid, citric acid, and ammonium sulfate in *Bacillus subtilis* IFO 3335[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1994, 40:867 - 872
- [8] 杨革, 陈坚, 曲音波, 等. 聚-谷氨酸生产菌地衣芽孢杆菌的 He-Ne 激光辐照效应[J]. *激光生物学报*, 2001, 10(4):255 - 260
- [9] 张新民, 游庆红, 徐虹, 等. 生物可降解型聚谷氨酸高吸水树脂的制备[J]. *高分子材料科学与工程*, 2003, 19(2):203 - 205
- [10] Sung Ho Yoon, Jin Hwan Do, Sang Yup Lee. Production of poly(-glutamic acid) by fed-batch culture of *Bacillus licheniformis* [J]. *Biotechnology Letters*, 2000, 22: 585 - 588
- [11] 汪家政, 范明. 蛋白质技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 2000:76 - 101
- [12] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001:349 - 412
- [13] 张纪忠. 微生物分类学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990:82 - 88
- [14] Kunst F, Ogasawara N, Moszer L, et al. The complete genome sequence of the gram-positive bacterium *Bacillus subtilis*[J]. *Nature*, 1997, 390 (6657): 249 - 256