

# 低能量超声检测技术在食品工业中的应用

周向华, 刘东红, 叶兴乾

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029)

**摘要:** 综述了低能量超声波检测技术的基本原理及其在食品生产实时监控过程和在乳制品、肉制品、蔬菜水果等食品质量检测领域中的典型应用实例; 阐述了国外超声检测技术在食品工业中应用的现状及面临的困难, 分析了该领域的研究空间和发展潜力, 并对该领域的深入研究提出了合理建议和展望, 为发展中国超声食品质量检测技术提供一定的参考。

**关键词:** 低能量超声技术; 检测技术; 食品工业; 质量控制

中图分类号: S122; TB553

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)03-0292-04

## 0 引言

低能量超声检测技术是利用能量低于  $1\text{ W}/\text{cm}^2$  而频率高于  $100\text{ kHz}$  的超声波获取被测物料内部结构、物化特性等信息的测量技术。该技术在食品工业中的应用是近 30 年来发展形成的新技术, 它不仅应用于对食品加工过程的监测(如料液高度、物料流量等), 而且逐渐扩展到对产品质量控制等领域。利用超声技术对鳄梨、胡萝卜、奶酪、脂肪等产品组织结构特性的检测已经取得成功<sup>[1-4]</sup>; 目前最引人注目的研究领域是对食品成分组成及其分散特性的研究, 例如: 利用超声技术对原肉成分的检测<sup>[5]</sup>; 对瓜果中糖含量的研究<sup>[6]</sup>; 对牛奶中脂肪含量的研究<sup>[7]</sup>; 对巧克力中固体脂肪含量的研究<sup>[8]</sup> 以及对蔗糖在油水体系中分散特性的研究等<sup>[9]</sup>。国外近年来的研究表明, 低能量超声检测技术具有非破坏性、精确、设备廉价、能够对高浓度食品和光不透明性材料进行检测的独特优势, 在食品理化特性检测等领域的应用中具有巨大的潜力<sup>[10]</sup>。

中国食品加工业在超声检测方面的研究起步较晚, 对食品超声特性的研究更是少见报道, 因此, 本文阐述了低能量超声检测技术的原理, 介绍了该技术在食品工业检测中的典型应用, 为推动超声检测技术在中国食品工业中的应用和研究提供一定的参考。

## 1 加工过程实时监控

食品工业的迅速发展要求对产品加工过程实现实时、快速的在线监测, 但长期以来, 由于食品产品的多样性和食品成分结构的复杂性, 给实时监测带来了很大困难。低能量超声技术通过检测超声波在媒质中传播的声速、衰减、声散射等物理参数得到反映产品特性的理化信息, 与其它检测方法相比, 具有其独特优势: 无需单独

取样, 将超声传感器置于包装或加工容器外壁即可检测, 真正实现在线监测的非侵入性和非破坏性。目前通过检测超声速度和反射系数实现食品工业生产过程检测的应用主要有: 罐内液体或固体表面高度的检测、超声成像技术对食品中异物的监测<sup>[11]</sup>、超声温度计的设计、管壁水垢污垢的检测等<sup>[12]</sup>、超声监测控制肉制品冰晶形成过程<sup>[13]</sup>。在奶酪生产工业中更有通过检测超声衰减系数来控制奶酪最佳凝絮时间的技术<sup>[14]</sup>, 从而减少原料消耗提高产品品质; 监测牛奶絮状物形成过程<sup>[15]</sup>等。

### 1.1 液面高度的监测

低能量超声检测技术最早被用于对产品装罐生产流程的监控, 其目的是为了检测包装容器内液体或物料的高度, 或者检测包装罐内产品的位置状态。测量过程中主要应用脉冲回波技术对声波在物料中的传播时间进行检测<sup>[16]</sup>。传感器的位置要根据被检材料特性(固体、液体或颗粒)以及测量位置的预计高度来决定, 检测示意图如图 1 所示。

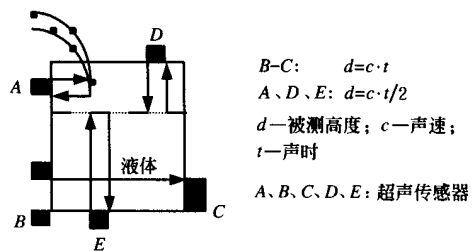


图 1 低能量超声检测技术测量罐内液体高度示意图

Fig 1 Level measurements using low-intensity ultrasonic measuring technology for fluids

### 1.2 流量检测

超声检测技术对流量的检测原理与高度检测有所不同, 如图 2 所示<sup>[12]</sup>。声波在运动介质中传播时, 若界面向着声源运动, 则传播时间较长; 界面背向声源运动时, 则传播时间较短, 这就是著名的多普勒效应。通过比较超声波沿液体“顺流”方向与“逆流”方向传播的速度就能得到溶液的流速, 再由流速推算出流量。

### 1.3 牛奶凝固状态的检测

奶酪的形成过程需要经过凝固、脱水、加盐和熟化

收稿日期: 2002-12-19 修订日期: 2003-11-18

基金项目: 科技部“十五”科技攻关奶业重大专项“乳品质量安全监测关键技术研究与应用”资助项目(2002BA518A06)

作者简介: 周向华, 硕士研究生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院

通讯作者: 刘东红, 副教授, 杭州市凯旋路 268 号 浙江大学华家池校区生物系统工程与食品科学学院, 310029. Email: dhliu@zju.edu.cn

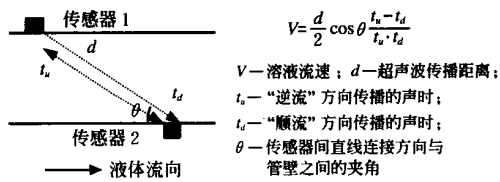


图2 低能量超声检测技术测量液体流量

Fig 2 Flow measurement using low-intensity ultrasonic measuring technology

过程,掌握确切的牛奶凝固时间在奶酪生产工业中极其重要。丁志成等<sup>[15]</sup>利用超声在牛奶中的衰减特性测定了牛奶在凝固过程中的物理性能变化,从而确定了牛奶凝固点和凝块切割的最佳时间。Nassar<sup>[17]</sup>等用低能量超声谐振检测技术监测了牛奶絮状物的动态形成过程,分析了原乳温度、凝乳酶浓度对牛奶结絮的影响。

牛奶属于油-水分散的非均匀介质体系,由于声波在不同介质中受到的阻抗不同,因此在非均匀体系的声学界面处发生反射、折射和散射现象,导致声信号衰减。研究表明,液态介质的声衰减主要来源于介质粘滞系数和热传导,而固态或半固态介质中的声衰减则主要来自弹性迟滞。鉴于此,牛奶从液态向半固态转变的过程中,超声衰减特性曲线会出现一个转折点(Turning Point)。通过超声谐振法获得声波在牛奶中的衰减曲线,就能准确确定其实际凝结点,并据此确定最佳切割时间。

## 2 产品质量检测

利用低能量超声检测技术对产品质量的检测是当前研究的热点<sup>[18]</sup>。检测关键在于通过对声波信号变化的分析了解产品的成分或组织结构特性,主要考察的参数是声速,在某些特殊情况下也需要辅以声衰减分析和频谱分析。

早在1938年,Parthasarathy通过试验检测了超声波在多种有机液体中的传播速度,首次提出声速与有机液体分子量、碳链结构、异构体结构等存在密切关系<sup>[19]</sup>。1940年,Rao在对液体有机物声速的研究基础上推导出联系声速( $v$ )、分子量( $M$ )、液体摩尔体积( $V$ )和密度( $\rho$ )的经验公式: $v^{1/3}(M/\rho) = R, v^{1/3} \cdot V = R, R$ 对同成分的均质液体而言是与温度无关的常数,Lagemann将其定义为分子声速度(*molecular sound velocity*)。在前人的研究基础上,Jacobsen首次提出了液体的分子自由长度理论<sup>[21]</sup>,他认为液体声速是与液体的分子自由长度密切相关的,分子自由长度是表征分子自由活动空间的参量,代表相邻分子表面间的距离。液体分子自由程 $L$ 与液体声速 $c$ 、液体密度 $\rho$ 之间的关系为: $Lc\rho^{1/2} = K, K$ 是与温度有关的常数。因此液体声速是由分子结构决定的,分子结构发生改变,使得分子之间的相互作用也发生改变,从而导致声速度变化。目前超声检测技术在工业生产检测液体浓度(如在线检测醋酸<sup>[21]</sup>、NaOH溶液<sup>[22]</sup>、甘油-乙醇混合液<sup>[23]</sup>等)中的应用已经成功地验证了这一理论。

食品成分往往不如工业产品成分般单一,其成分的多样性对超声检测技术的应用提出了挑战。混合后的媒质声速并不是纯液体成分声速的简单叠加,它与组分浓度及其相互作用都有密切关系。目前国外用超声检测食品成分的研究还限制在对总类物质含量的分析,如检测牛奶中脂肪含量和非脂固形物含量、检测食品中总糖含量<sup>[24]</sup>等。虽然目前掌握的检测技术仍然不能将目的定位到具体成分含量的检测,但这必将成为今后一段时间研究的重点。

### 2.1 在乳制品品质检测中的应用

乳制品是组成成分相对复杂的系统,为典型的油水分散体系,脂肪小颗粒分散在含有胶质蛋白、可溶性蛋白、盐和乳糖的水相中,其品质受到产乳动物种类、健康程度、年龄、产乳季节等众多因素的影响,因此对乳及乳制品(如奶油、乳酪)物理特性的检测是乳品工业用来确定产品质量的重要手段。

低能量超声检测技术在乳制品工业中首先被用于对产品成分含量的检测,最常见的检测项目是脂肪小液滴含量的检测、非脂乳固体(SNF)含量的检测和总固形物(TS=脂肪+非脂乳固体)含量的检测。Fairley P.等通过大量的试验建立了乳制品成分与超声特性之间的经验关系式<sup>[25]</sup>,超声波在水中的传播速度随温度升高而加快,而在脂肪中的传播速度则随温度升高而减慢,当温度在13~14左右时,脂肪中的声速与水的声速基本相同,此时的温度被称为临界温度。在临界温度下,乳中声速的变化均只受到SNF含量的影响,而与脂肪含量无关,从而能够准确测得非脂乳固体的含量;当温度远离临界温度,脂肪中声速与水中声速差异及其明显,乳中声速的变化主要由脂肪含量变化而产生,由此即可实现对乳脂含量的检测。

乳制品中声速和声衰减的变化除了依赖于乳品成分含量之外,还与其微结构状态有关。Griffin W.和Miles C.等通过对超声衰减的研究成功检测了乳中脂肪和酪蛋白的颗粒大小<sup>[26]</sup>。Ay C.等利用声衰减对凝乳酶作用导致的乳品凝絮过程实现了无损监测,并得到加酶时间与衰减系数之间的关系表达式<sup>[27]</sup>。此外,超声检测技术还被用于检测冰淇淋和奶酪产品质量,通过回波声速的检测确定奶酪熟化程度,检测成品乳酪中是否存在裂缝和空穴<sup>[28]</sup>。最近也有研究者通过声速检测成功估计了生奶油和酸奶酪中的泡沫大小和浓度<sup>[29]</sup>。

### 2.2 在肉制品品质检测中的应用

随着人们科学饮食观念的提高,消费者希望肉制品更精瘦、更美味、口感更柔嫩。为了适应这种消费需求,肉制品工业需要寻求快速无损的检测方法对原料肉的品质进行控制。低能量超声检测技术在此显示出突出优势。由于声波在精肉和肥肉中的传播速度存在明显差异,因此能够轻易地检测动物活体或屠宰后的畜体中精肉的厚度。此外,通过简单的超声成像技术还能检测原料肉中肥瘦相间的肉和有特殊组织结构的区间。

除了对瘦肉厚度的检测之外,最近有研究者还将超

声检测技术用于对成品鱼、鸡肉中的固体脂肪含量进行检测<sup>[30, 31]</sup>。通常采用的方法是用干肉粉、玉米油、蒸馏水等成分调和配制成成分含量不同的模拟鸡肉或鱼,通过检测不同温度下不同模拟肉中的声速确定超声特性与肉成分之间的关系。Chanamai R. 等对鸡肉成分声特性的研究表明,在任一温度下,声速随鸡肉中非脂固体含量的增加而增加;声速与脂肪含量的关系比较复杂,在 15 左右,超声声速变化与脂肪含量无关,低于 15 声速随脂肪含量增加而增加,而高于 15 声速则随脂肪含量增加而降低。通过对试验结果的分析建立起声速( $c$ )与鸡肉非脂固形物含量( $Q_{mf}$ )及温度( $t$ )之间的经验表达式: $c = 1411.3 + 313.3Q_{mf} + 473.8Q_{mf}^2 + 4.83T - 0.043T^2 - 3.338Q_{mf}T$ ,以此作为检测标准对未知样品的检测结果与标准方法检测结果十分吻合( $r^2 > 0.97$ )。

### 2.3 在蔬菜、水果品质检测中的应用

利用超声检测技术对水果蔬菜品质检测的关键在于建立声特性(声速 $c$ 、衰减系数 $\alpha$ 和声阻抗 $Z$ )与产品特性(成熟度、硬度等)之间的关系。决定果蔬超声特性的主要因素是果蔬细胞间存在的空穴结构<sup>[32]</sup>,一定频率范围内的超声波在这种特殊结构中会形成谐振效应,通过研究果蔬杨氏模量与共振频率的关系能够反映果蔬硬度随成熟度的变化关系。正是因为谐振效应的存在,导致超声波在果蔬中的衰减系数较大,声波传播速度甚至低于空气中的波速。由于声波无法穿透整个果蔬体,因此通常采用的检测方法为回波检测,通过对反射波信号振幅的检测来了解果蔬组织中气穴的大小、形状和密集度。

### 3 结论

利用低能量超声检测技术对食品工业生产过程进行实时监测以及对食品质量品质进行无损检测的技术是超声学、电子学、计算机、有机化学、生物生理学等技术在食品加工中的综合利用技术,其测量仪器设计简单,成本低,操作方便,测量迅速,能够实现食品生产线的实时监控和对产品品质的无损快速检测,是目前国外研究十分活跃的领域。经过半个世纪的研究发展,在不少发达国家该技术被广泛应用于食品工业的各个领域,显示出独特的优势。

同时,食品成分的复杂多样性给超声检测技术在该领域的应用提出了巨大挑战。尽管大量试验数据表明,食品声特性与产品成分含量以及微观组织结构之间存在着密切关系,但是要建立食品成分含量检测模型还需大量的试验研究;对不同检测对象采取不同的检测手段,建立产品特性与超声参数之间的经验关系表达式仍然是一项十分艰巨的工作。此外,从分子微观结构和物质成分间分子作用力方面解释食品材料声特性的研究还有待完善。

因此,要真正将低能量超声检测技术在食品工业中进行推广应用,还需从以下几方面进行研究工作:

1) 超声检测技术在食品生产在线控制和品质检测上的应用主要是受到检测精度和稳定性的限制,因此开发设计高精度、更稳定的超声信号检测系统是实现这一检测技术的前提。

2) 由于超声特性与品质成分间关系的复杂性,因此对信号处理技术和数据分析方法的要求较高。目前尽管频谱分析技术已经在超声检测技术中得到应用,但基于神经网络、小波分析等的信号分析技术具有更精确的细节分析及综合分析能力,因此可以更准确、更全面地建立声特性与食品品质特性间的关系。

3) 目前的研究应用主要建立在试验研究和经验公式的基础上,要使这一技术得到广泛应用,还需不断完善和探索食品物理化学特性与声特性间的关系,为超声食品品质检测提供理论基础。

### [参 考 文 献]

- [1] Benedito J, Carcel J, Clemente G, et al. Cheese maturity assessment using ultrasonics[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83: 248- 254
- [2] Benedito J, Carcel J, Sanjuan N, et al. Use of ultrasound to assess Cheddar cheese characteristics[J]. *Ultrasonics*, 1999, 38(1- 8): 727- 730
- [3] Miles C A, Fursey G A J, Jones R C D. Ultrasonic estimation of solid/liquid ratios in fats, oils and adipose tissue[J]. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 1985, 36: 215- 228
- [4] Nielsen M, Martens H J. Low frequency ultrasonics for texture measurements in cooked carrots[J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62: 1167- 1175
- [5] Benedito J, Carcel J A, Rossello C, et al. Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics[J]. *Meat Science*, 2000, 57: 365- 370
- [6] Mizrach A, Galili N, Rosenhouse G, et al. Acoustical mechanical and quality parameters of winter grown melon tissue[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34: 2135- 2138
- [7] Wagner R J, Winder W C. Automatic fat standardization of raw milk with the Darison composition controller[J]. *Journal of Dairy Science*, 1975, 58(5): 800- 801
- [8] McClements D J. Ultrasonic characterization of foods and drinks: principles, methods, and applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1997, 37(1): 1- 46
- [9] Saggini R, Coupland J N. Measurement of solid fat content by ultrasonic reflectance in model systems and chocolate[J]. *Food Research International*, 2002, 35: 999 - 1005
- [10] Mulet A, Benedito J, Golas Y. Noninvasive ultrasonic measurements in the food industry[J]. *Food Reviews International*, 2002, 18(2- 3): 123- 133
- [11] Cho B K, Irudayaraj. Foreign object and disorder detection in food materials using noncontact ultrasound imaging[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(3): 967- 974

- [12] Baklanov A N, Bokhan Y V, Chmilenko F A. A analysis of food products using carbonization and ultrasonic techniques[J]. *Journal of Analytical Chemistry*, 2003, 58(5): 489- 493
- [13] Sigfusson H, Ziegler G R, Coupland J N. Ultrasonic monitoring of food freezing [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(3): 263- 269
- [14] Nassar G, Nongaillard B, Noel Y. Study by ultrasound of the impact of technological parameters changes in the milk gelation process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 63(2): 229- 236
- [15] 丁至成, 文友先, 刘俭英. 用超声谐振法确定牛奶凝固时间的试验研究[J]. *农业工程学报*, 1995, 11(4): 149- 154
- [16] Povey M J W. Rapid determination of food material properties[M]. New York: Thomson Science, 1998, 30 - 65
- [17] Nassar G, Nongaillard B, Noel Y. Monitoring of milk gelation using low-frequency ultrasonic technique [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 48, 351- 359
- [18] Henning B, Daur P C, Prange S, et al. In-line concentration measurement in complex liquids using ultrasonic sensors[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38(1- 8): 799 - 803
- [19] Parthasarathy S. Velocity of sound in liquids and molecular weight [J]. *Ultrasonic Velocity in Liquids*, 1953, 4, 453
- [20] Jacobson B. Intermolecular free lengths in liquid state I: adiabatic and isothermal compressibilities[J]. *Acta Chem Scand*, 1952, (6): 1485
- [21] 田 华, 尚志远. 醋酸水溶液声速与温度浓度关系研究[J]. *陕西师范大学学报*, 2003, 31(2): 40- 42
- [22] 卢 杰, 梁军汀, 朱士明. 智能化超声波NaOH溶液浓度在线检测仪[J]. *应用声学*, 2003, 22(3): 7- 10
- [23] 刘镇清. 一种超声波液体浓度传感器的研制[J]. *传感技术学报*, 1994, (1): 5- 8
- [24] Mecozzi M, Acquistucci R, Amici M. Improvement of an ultrasound assisted method for the analysis of total carbohydrate in environmental and food samples [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2002, 9(4): 219- 223
- [25] Bhatti S S, Bhatti R, Singh S. Ultrasonic testing of milk [J]. *Acustica*, 1986, 62: 96- 101
- [26] Miles C, Shore D, Langley K R. Attenuation of ultrasound in milk [J]. *Ultrasonics*, 1990, 28: 394- 399
- [27] Ay C, Gunasekaran S. Evaluating milk coagulation time with ultrasonics[J]. *Food Technol*, 1994, 48: 74
- [28] Saggin R, Coupland J N. Non-contact ultrasonic measurements in food materials [J]. *Food Research International*, 2001, 34, 865- 870
- [29] Chanamai R, McClements D J. Ultrasonic determination of chicken composition [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 1999, 47: 4686- 4692
- [30] Sugiyama J, Otake K, Hagashi S, et al. Firmness measurement of muskmelons by acoustic impulse transmission [J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(4): 1235- 1241
- [31] Simal S, Benedito J, Clemente G. Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 58(3): 253- 257
- [32] Mizrach A, Bechar A, Grinshpon Y, et al. Ultrasonic classification of mealiness in apples[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 397- 400

## Application of low-intensity ultrasonic measurements in the food industry

Zhou Xianghua, Liu Donghong, Ye Xingqian

(College of Bio-systems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** Low-intensity ultrasonics was used in food industries for both process control and product assessment in all food industries especially in vegetables, dairy, and meat. In this paper, the basic principle of low-intensity ultrasonic measurement was reviewed. This article reviews the current status and facing difficulties of ultrasound in the food industry, presents the basic principles of ultrasonic monitoring of foods, and highlights areas where ultrasound proves to be the most useful in the future. The developing potential and applying future in this field were analyzed, and some reasonable suggestions and prospects were put forward, which provide some references for developing ultrasonic food measuring technologies in China.

**Key words:** low-intensity ultrasonics; measurement technology; food industry; quality control