

文章编号: 1672-8785(2010)01-0036-05

用光散射技术检测牛乳蛋白质时的 影响因素研究

周 真¹ 温建军¹ 秦 勇¹ 黄很金¹ 丁国超²

(1. 哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 八一农垦大学信息技术学院, 黑龙江大庆 163319)

摘 要: 虽然利用光散射技术可以实现对牛乳中蛋白质成分的检测, 但在检测过程中有很多因素会影响其检测精度。本文在对牛乳中蛋白质的光散射特性进行分析的基础上, 应用米氏散射理论和光学仿真软件, 研究了检测过程中光源波长、散射角度和环境温度等因素对牛乳中蛋白质散射光强的影响。通过仿真实验, 确定最佳的光源波长为 1333nm 或 1600nm, 较好的散射角度为 0° 、 $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$, 适宜的检测环境温度为 $40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 从而提高仪器的检测精度提供了方案与数据上的支持。该方法不需要现成检测仪器的参与, 因而可避免检测仪器的繁琐操作, 杜绝人为误差。另外, 它还可根据要求随意调整实验中各环节的参数, 以节约研究成本。

关键词: 蛋白质; 波长; 散射角度; 温度

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.008

Study of Influence Factors of Milk Protein Detection by Light Scattering

ZHOU Zhen¹, WEN Jian-jun¹, QIN Yong¹, HUANG Hen-jin¹, DING Guo-chao²

(1. Academy of Measure-Control Technology and Communication Engineering, Harbin University
of Science and Technology, Harbin 150040, China;

2. College of Information Science and Technology, August First Land Reclamation
University, Daqing 163319, China)

Abstract: Although the light scattering technology can be used to detect the proteins in milk, there are many factors which have influence on its detection accuracy in practical use. The light scattering characteristics of the proteins in milk are analyzed. On the basis of this analysis, the Mie scattering theory and optical simulation software are used to study the factors such as laser wavelength, scattering angle and ambient temperature etc which have influence on the scattering light intensity of the proteins in milk to be detected. Through simulation, the best laser wavelength is determined to be 1333nm or 1660nm; the better scattering angles are determined to be 0° , $\pm 30^\circ$ and $\pm 90^\circ$ and the suitable ambient temperature is from 40°C to 60°C . This can provide the data support for the improvement of the detection accuracy of an instrument. The method does not need any actual detection instruments. Thus, it can avoid the complicated operation of a detection instrument and eliminate any artificial errors. More-

收稿日期: 2009-09-16

基金项目: 2008 年黑龙江省自然科学基金 (F200804)

作者简介: 周真 (1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授、博士生导师, 从事传感器测试技术、精密仪器及机械、嵌入式系统等研究。E-mail: wenjianjun08@126.com

over, all parameters can be adjusted according to the requirement in experiment and the study cost can be saved.

Key words: proteins; wavelength; scattering angle; temperature

1 引言

随着光散射技术的快速发展, 人们对生物组织光学的研究也得到进一步的深入。光在生物组织中传输时会发生明显的散射和吸收现象, 其中散射占主导地位^[1]。近几年来, 光散射技术开始应用于牛乳成分检测方面的研究, 并逐渐成为研究的热点^[2-3]。许多科研院所已经通过应用光散射原理研制出牛乳成分的检测分析仪器^[4-5]。然而, 光在牛乳中的传输会受到其中成分物质(如蛋白质等)的物理及化学性质的影响。随着周围检测环境因素的变化, 牛乳成分物质的物理及化学性质变化表现得极为复杂。这将导致牛乳中的散射光强发生波动, 使检测结果产生较大的偏差, 从而导致检测精度不高。因此, 目前利用光散射技术对牛乳成分的检测还停留在实验室阶段。

本文利用光散射技术, 研究了在不同波长的光照射下接收到的散射光强的变化情况, 不同散射角度时接收到的散射光强的变化情况, 以及在不同的温度环境下牛乳成分物质的物理性质变化对光散射情况的影响。通过分析散射光强的变化, 研究了环境因素对检测结果的影响, 为提高仪器的检测精度提供了方案与数据上的支持。

2 蛋白质胶束散射光强的求取

光散射的种类主要是根据散射粒子的大小来区分的: 汤姆逊散射适用于电子级别大小的粒子; 瑞利散射适用于尺寸小于 $0.05\mu\text{m}$ 的微粒; 米氏散射适用于尺寸小于 $10\mu\text{m}$ 的微粒; 夫琅和费衍射适用于尺寸范围为 $1\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 的微粒; 干涉法适用于尺寸大于 $3\mu\text{m}$ 的粒子。作为牛乳的主要物质成分之一, 蛋白质胶束的平均粒径为 $0.4\mu\text{m}$ 。因此, 本文采用米氏散射作为牛乳成分检测的光散射理论基础。

如图 1 所示, 波长为 λ 、强度为 I_0 的平行光束沿 z 轴的正方向传播, 电场的振动方向与 x 轴平行。球形散射颗粒的直径为 d , 相对折射率为 m 。根据米氏散射理论, 散射光场中 P 点的散射光强可写为

$$I(r, \theta, \varphi) = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta) \sin^2 \varphi + i_2(\theta) \cos^2 \varphi] \quad (1)$$

式中, r 为 P 点到散射颗粒的距离, θ 为散射角, $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 为散射强度函数, 分别表示平行和垂直于散射面的强度分量。

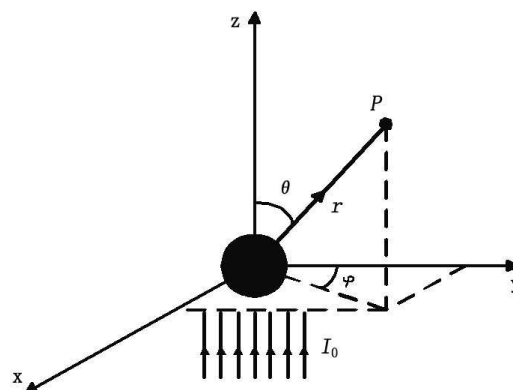


图 1 球形颗粒的散射

散射振幅函数可分别表示为

$$i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2 \quad (2)$$

$$i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2 \quad (3)$$

按照米氏散射理论, 散射振幅函数的表达式为

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (4)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \quad (5)$$

式中, a_n 和 b_n 为散射系数。

$$a_n = \frac{\psi_n(\alpha) \psi'_n(m\alpha) - m \psi'_n(\alpha) \psi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha) \psi'_n(m\alpha) - m \xi'_n(\alpha) \psi_n(m\alpha)} \quad (6)$$

$$b_n = \frac{m \psi_n(\alpha) \psi'_n(m\alpha) - \psi'_n(\alpha) \psi_n(m\alpha)}{m \xi_n(\alpha) \psi'_n(m\alpha) - \xi'_n(\alpha) \psi_n(m\alpha)} \quad (7)$$

式中, α 为颗粒的尺寸参数, 且

$$\alpha = \frac{\pi d}{\lambda} \quad (8)$$

$$\psi_n(z) = J_{n+\frac{1}{2}}(z) \sqrt{\frac{z\pi}{2}} \quad (9)$$

$$\xi_n(z) = H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z) \sqrt{\frac{z\pi}{2}} \quad (10)$$

林中, z 表示 α 或 $m\alpha$, $J_{n+1/2}(z)$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}(z)$ 分别表示半整阶的贝塞尔函数和第二类汉克函数, $\psi'_n(z)$ 和 $\xi'_n(z)$ 分别表示 $\psi_n(z)$ 和 $\xi_n(z)$ 对各自变量的微商。式 (4) 及式 (5) 中 $\pi_n(\cos\theta)$ 、 $\tau_n(\cos\theta)$ 为散射角的函数, 其表达式分别为

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} P_n^1(\cos\theta) \quad (11)$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^1(\cos\theta) \quad (12)$$

式中, $P_n^1(\cos\theta)$ 为一阶缔合勒让德函数。

根据米氏散射公式可知, 在入射光强 I_0 不变的前提下, 粒子散射光强的大小由波长 λ 、散射角 θ 以及粒子尺寸 d 决定, 即 λ 、 θ 和 d 的变化是引起散射光强变化的主要原因。

3 牛乳成分的光散射检测装置

虽然许多科研机构和企业都是利用光散射的原理来检测牛乳成分, 但他们根据自己的研究特色所设计和制作的检测装置各有不同。然而, 由于所应用的检测原理相同, 各个检测装置的结构大体一致。如图 2 所示, 用激光照射装有牛乳样品的样品池, 并在样品池周围的一个或多个位置放置光电元件来接收数据, 再对接收到的数据作进一步的处理和分析, 最终得到检测结果。

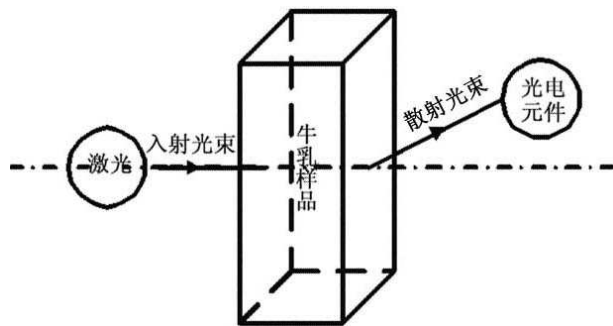


图 2 牛乳成分的检测装置示意图

4 牛乳样品的光散射仿真

根据米氏散射理论的数值计算方法并结合生物组织的相关光学特性, 我们对牛乳中蛋白质的光散射特性进行了模拟计算和分析, 并结合光学仿真软件进行光学仿真: 激光光束垂直于样品池入射到牛乳样品的中心位置, 并发生光的散射与透射。仿真效果如图 3 所示。

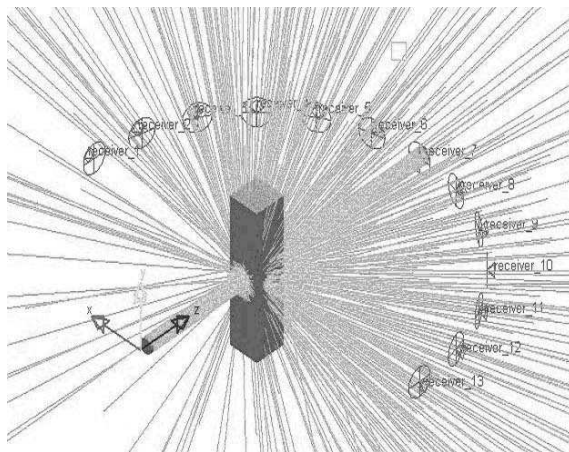


图 3 牛乳样品光散射现象的仿真

激光光源到样品池中心的距离为 20mm, 以样品池中心为圆心, 在半径为 30mm 的前半圆的周围均匀放置 13 个光接收器 (相邻的两个光接收器间所成的弧度为 $\pi/12$), 用以从不同的散射角度来接收仿真光强。在建立的牛乳样品的模型中, 我们假设: 牛乳中的蛋白质胶束的粒径大小相等且均匀地分布在牛乳溶液中; 蛋白质胶束的粒径大小随温度的变化而变化; 仿真光源的波长可调。因此, 我们可以在不同散射角、不同波长以及不同温度的情况下对牛乳样品的光散射进行模拟仿真。

4.1 不同角度的散射光强分析

当激光光束射入样品池时, 光束发生反射、折射、散射以及被被测样品吸收等光学现象。根据光的传输规律, 散射光束在样品池四周的光强分布并不均匀。不同散射角位置所接收的散射光强的仿真结果如图 4 所示。

从仿真结果可以看出: 散射光束基本上以入射光线为轴呈对称分布, 该现象与米氏散射的角度分布规律基本一致, 这与样品中成分的

物质在空间上的均匀分布存在关系; 由于样品池两壁相接于 45° 方向, 该方向上的散射光有大部分被反射与折射, 因此在 45° 方向上所接收的散射光强几乎为零; 在 0° 散射角位置接收的散射光强最大, $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 方向次之, 其他散射角位置接收到的光强都比较小。由于样品中的分子与颗粒时刻发生着布朗运动, 在样品池四周分布的光强也就都会存在相对的起伏。这种相对的起伏率随接收点上光强的增大而减小, 即在 0° 、 $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 90^\circ$ 方向上检测光强时, 相对误差较小, 所以取这五个方向上的位置点作为散射光强的检测点比较好。

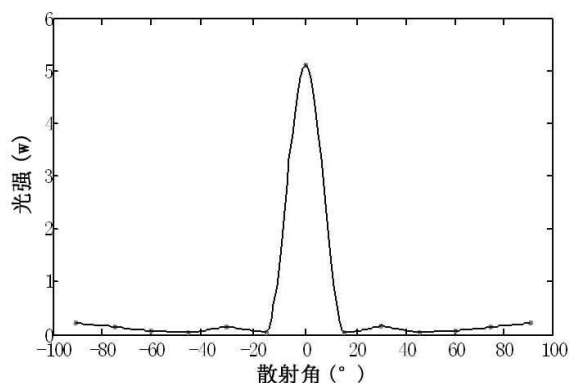


图4 不同散射角位置所接收的光强结果

4.2 牛乳对不同波长光的敏感度分析

近几年的研究表明, 牛乳对近红外光谱范围的光散射比较敏感。但因为近红外光谱的波长范围大 ($780\text{nm} \sim 2500\text{nm}$), 而在实际检测过程中所使用的又是只能产生某一线状光谱的激光器, 所以必须确定牛乳对近红外光谱中某一波长的光散射敏感性。通过改变模拟光源的波长, 建立了波长与散射光强的模型。如图5所示, 在 $1000\text{nm} \sim 1700\text{nm}$ 的波长范围内, 牛乳的光散射敏感度在 1600nm 处达到最大值, 次最大值是取在 1333nm 波长处。这就表明在近红外光谱区, 牛乳中的蛋白质对光的散射特性在 1600nm 处达到最大化, 用该波长的光能够最大限度地表征牛乳中蛋白质的信息。因此, 在实际检测中应该选用 1333nm 、 1600nm 等波长段的激光器进行单波长或多波长测量。

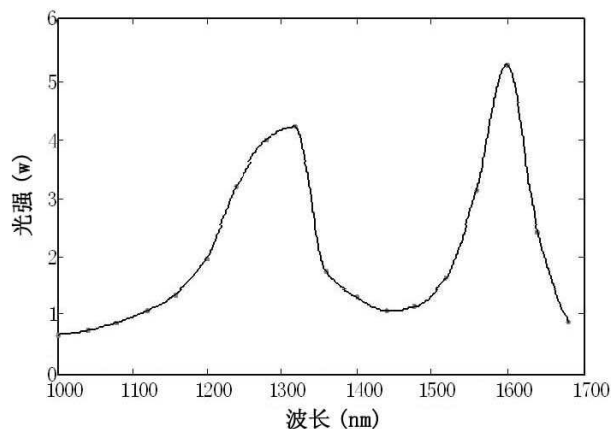


图5 牛乳对不同波长光的散射光强仿真

4.3 温度变化对散射光强的影响

酪蛋白在牛乳蛋白质中占 80% 以上, 因此牛乳中的蛋白质成分可以用酪蛋白来表征。在检测过程中, 温度的变化会引起疏水作用、静电作用以及范德华力等这些维持蛋白胶束的作用力的改变, 从而导致蛋白胶束粒径的改变, 这是引起牛乳蛋白质的光散射不稳定的主要因素, 也就决定了温度在牛乳的成分检测中是本文必须考虑的因素。

如图6所示, 在 $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 范围, 牛乳中酪蛋白对光的散射敏感度快速上升。这是由于温度的升高破坏了维持酪蛋白胶束稳定结构的氢键, 这使酪蛋白胶束发生离解, 胶束所含的单体数目减少, 胶束的尺寸也随之减小, 从而使散射光强增大。当温度达到 60°C 时, 散射光强达到最大值; 然而, 随着温度的继续升高, 酪蛋白胶束中的静电作用、范德华力等作用力逐渐占主导地位, 酪蛋白胶束发生聚合, 胶束的尺寸增大, 从而使散射光强缓慢减小。当样品的浓度较低时, 蛋白质对光的散射敏感度较大; 反之, 则较小。因此, 温度对光散射的影响有明显的规律可循: $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 是散射光强快速增大的阶段, 在这一温度段中酪蛋白胶束的光散射特性较强; $40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 是散射光强趋于稳定的阶段, 在这一温度段中酪蛋白胶束的光散射特性平稳; 在 70°C 以后, 随着温度的升高, 牛乳中的蛋白质结构被破坏, 并发生离解变性。所以在利用光散射技术对牛乳成分进行检测时, 环境温度选 $40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 为最好。

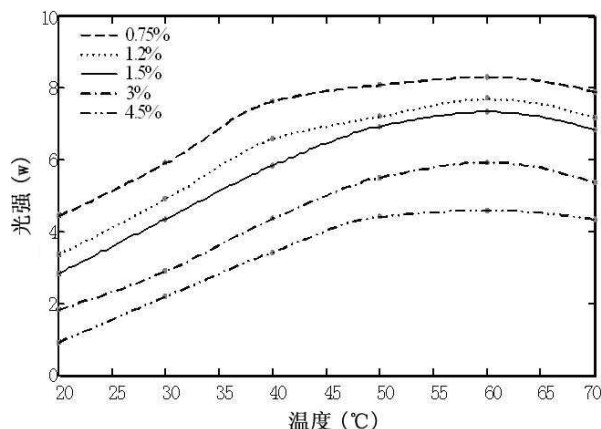


图 6 不同蛋白质浓度下温度对光散射的影响

5 结论

本文研究了牛乳蛋白质成分检测中散射角度、光源波长和检测温度等环境因素的变化对检测精度的影响,利用米氏散射理论对牛乳中蛋白质的光散射特性进行了模拟计算和分析,并结合光学仿真软件进行了仿真试验。由仿真数据与结果得到了这些环境因素对牛乳蛋白质成分的检测中散射光强的影响规律,从而选取出光源波长、散射角度和环境温度等方面的最佳参数,为提高仪器的检测精度提供了方案与数据上的支持。

参考文献

- [1] 韩永辉. 牛奶成分近红外测量的光学基础理论与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005: 3-5.

- [2] 周真, 吴娟, 李中刚, 等. 基于激光散透比的牛奶成分检测的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1185-1186.
- [3] 彭丹, 徐可欣, 宋扬. 用多维校正法提高近红外牛奶成分校正模型稳健性的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 913-916.
- [4] 吴娟. 基于 ARM 的牛乳成分检测仪的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- [5] 聂迎利, 汤承超. 中红外检测技术: 全球认可的第三方乳成分分析技术 [N]. 中国乳业, 2007-2-20.
- [6] Ping Feng, Wei Qun Shu, Cheng Zhi Huang, et al. Total Internal Reflected Resonance Light Scattering Determination of Chlortetracycline in Body Fluid with the Complex Cation of Chlortetracycline-Europium-Trioctyl Phosphine Oxide at the Water/Tetrachloromethane Interface [J]. Anal.Chem, 2001, 73: 4307-4312.
- [7] M Mellema, F A M Leermakers, C G de Kruif. Molecular Mechanism of the Renneting Process of Casein Micelles in Skim Milk, Examined by Viscosity and Light-Scattering Experiments and Simulated by Model SCF Calculations [J]. Langmuir, 1999, 15: 6304-6313.
- [8] Marcela Alexander, Douglas G. Dalgleish. Dynamic Light Scattering Techniques and Their Applications in Food Science [J]. FOBI REVIEW, 2006, 1: 2-13.
- [9] Philip J Wyatt, David T Phillips, Edward H Allen. Laser Light Scattering Bioassay for Veterinary Drug Residues in Food Producing Animals [J]. J. Agric. Food Chem., 1976, 24(5): 984-988.

新闻动态 News

美国前视红外系统公司发布 T 型非致冷长波热像仪核心部件

据《Photonics Spectra》杂志报道,美国前视红外系统公司最近发布了一款 T 型非致冷长波热像仪核心部件(见图 1)。该核心部件内装有一个 25 μm 焦平面列阵探测器和专用的数字细节增强图像处理算法,可用于手持式热像仪、无人驾驶飞机视觉系统、消防用相机以及热武器瞄准具。同时,它备有三种结构和七种透镜可选。其

重量为 70g, 功耗 < 1W。用户可利用图形用户界面及软件开发工具控制其各种功能、选择模拟视频格式和配置数字接口。



图 1 T 型非致冷长波热像仪核心部件的外形

□ 高国龙