

灭菌牛奶在无损检测时定标样品温度对检测结果影响的研究

黄浩杰，林淑仪，梁俊健，杨爱君^{*}，何 瑛，赵永恒

(广东燕塘乳业股份有限公司，广东广州 510700)

摘 要：[目的]在乳制品行业的质量控制体系中，灭菌乳的无损检测技术因其低成本、高效率的优势愈发受到重视。本研究聚焦于不同储存温度的灭菌乳在RS-6摇包仪同一温度标准模块下检测结果的准确性。[方法]通过将一定数量的灭菌乳置于5、10、15、20、25、30、35、40 ℃等不同温度条件下保温，并分别在20、25、30 ℃条件下定标的模块进行摇包检测。[结果]试验结果表明，当定标时的标样温度与被检测样品的温度差在±5℃以内时，摇包仪检测结果的准确度最高，通过率达到100%；而当温差超过5 ℃时，检测通过率随温差增大而显著下降。[结论]这一研究成果对于优化灭菌乳的质量控制流程具有重要实践意义，能够为乳品企业提供更为精准、高效的检测方法，助力提升行业整体质量管控水平。

关键词：摇包仪；温度；灭菌乳；质量控制；无损检测

文章编号：1671-4393（2026）02-0068-06

DOI:10.12377/1671-4393.26.02.11

A Study on the Effect of Calibration Sample Temperature on Detection Results in Non-destructive Testing of Sterilized Milk

HUANG Haojie, LIN Shuyi, LIANG Jianjian, YANG Aijun^{*}, HE Ying, ZHAO Yongheng
(Guangdong Yantang Dairy Co.,Ltd.,Guangzhou Guangdong 510700)

Abstract: [Objective]In the quality control system of the dairy industry, non-destructive testing technology for sterilized milk has gained increasing attention due to its advantages of low cost and high efficiency.This study focuses on the accuracy of test results of sterilized milk stored at different temperatures when detected under the same temperature calibration module of the RS-6 dairy package shaker.[Method] A certain quantity of sterilized milk

作者简介：黄浩杰（1997-），男，广东化州人，本科，助理工程师，研究方向为乳制品生产过程的品质控制；

林淑仪（1996-），女，广东恩平人，本科，工程师，研究方向为乳制品生产过程的品质控制；

梁俊健（1987-），男，广东广州人，本科，工程师，研究方向为乳制品生产过程的品质控制；

何 瑛（1987-），女，广东广州人，本科，工程师，研究方向为乳品质量检测和质量保证；

赵永恒（2002-），男，河南洛阳人，本科，研究方向为乳制品生产过程的品质控制。

通信作者：杨爱君（1970-），女，广东潮州人，硕士，正高级工程师，研究方向为乳品质量检测和质量保证。

was incubated at different temperatures (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 °C) and tested using the shaking module calibrated at 20, 25, and 30 °C, respectively.[Result] The experimental results showed that when the temperature difference between the calibration sample during calibration and the tested sample was within ± 5 °C, the accuracy of the detection results from the shaker was the highest, with a pass rate of 100%.However, when the temperature difference exceeded 5 °C, the detection pass rate significantly decreased as the temperature difference increased.[Conclusion] This research finding holds significant practical importance for optimizing the quality control process of sterilized milk.It can provide dairy enterprises with a more precise and efficient testing method, thereby contributing to the overall improvement of quality management standards in the industry.

Keywords: dairy package shaker; temperature; sterilized milk; quality control; non-destructive testing

灭菌乳作为乳制品市场的重要品类，其质量安全直接关系到消费者健康和企业声誉。目前，乳品企业普遍依据接受质量限（Acceptable Quality Level, AQL）对灭菌乳进行抽样检验，通常在（36 $\pm$ 2）°C温度下保温7天，然后通过破包进行感官检查和pH检测，以此判定产品是否符合商业无菌的质量要求^[1]。然而，破包检验存在成本高昂、抽样量受限等问题，难以满足大规模生产中的质量管控需求。在此背景下，既能保证抽样量符合企业要求，又能大幅降低检验成本的无损检测手段逐渐成为乳制品行业的研究热点和应用趋势。

UHT产品的无损检测技术基于对其组织状态变化的精准量化，主要通过监测脂肪水解与蛋白凝固程度等指标实现质量评估。当微生物入侵灭菌乳时，其代谢产酸会导致产品pH值下降，酪蛋白胶束所携带的负电荷逐渐减少，在磷酸键的作用下，胶束体积逐步增大，进而引起牛奶黏度增加^[2]。与此同时，温度变化会影响分子之间的内聚力，这也是导致牛奶黏度改变的重要因素^[3, 4]。温度作为影响灭菌乳物理性质的关键参数，其对无损检测结果的影响不容忽视。

尽管无损检测技术在乳制品行业的应用日益广泛，但现有研究多聚焦于常温或单一温度点下的检测效果，缺乏系统的温度梯度数据支撑。这使得企业在实际生产中难以根据不同储存温度和环境条件

制定科学的检测方案，可能导致检测结果准确性不足，给产品质量管控带来潜在风险。基于此，本研究以灭菌乳的样品储存温度作为单一变量，将同一批次的灭菌乳分别存放在5、10、15、20 °C、25、30、35、40 °C条件下恒温保存，并在20、25、30 °C条件下定标的3个模块进行摇包检测，系统探究不同储存温度对RS-6摇包仪检测结果的影响，旨在为乳品企业优化质量控制流程提供理论依据和实践指导。

1 实验原理

RS-6摇包仪的检测原理基于计算机惯性动能识别系统。在检测过程中，待测样品由自动装置带动，转动一定角度后进入惯性衰减过程。传感器实时采集样品在惯性衰减过程中的运动参数，计算机则对这些参数进行识别和处理，通过分析计算机惯性动能系统中的惯动衰减比和衰减周期的变化，精准检测出待测样品组织状态的细微变化^[5]。对于灭菌乳而言，其黏度、密度等物理性质的变化会直接影响惯性衰减过程中的运动参数，而温度是导致这些物理性质发生变化的重要因素，因此摇包仪能够通过捕捉这些参数变化来反映灭菌乳的质量状态。

2 材料与方法

2.1 材料

试验样品为生产批次、品种、规格完全一致的

低酸性灭菌乳，确保样品初始质量状态均匀，减少因样品本身差异对试验结果造成的干扰。

2.2 仪器与设备

RS-6摇包仪，中国农业机械化科学研究院机电所；温度测量仪，德图仪器国际贸易（上海）有限公司；pH计，梅特勒-托利多仪器上海有限公司；电热恒温培养箱，上海延翌仪器仪表有限公司；冷藏柜，广州市穗凌电器有限公司。

2.3 试验方法

2.3.1 定标

试验开始前，首先打开主机和设备电源，预热15 min，确保仪器处于稳定工作状态。随后连接设备并获取零点，进行精度校验，要求仪器空摇100次的重复性标准偏差 $\leq 0.3\%$ ^[6]，以此确保设备处于正常运行状态，为后续实验的准确性奠定基础。

分别选取温度为20、25、30℃的灭菌乳各100盒进行定标，建立不同温度的检测模块。定标完成后，将所有定标样品进行破包检测，仔细观察其组织状态并检测pH值，确认产品无异常包，保证定标样品的质量可靠性。

2.3.2 检测

选取88盒试验灭菌乳，首先在20、25、30℃三个定标模块下进行摇包检测，筛选出合格样品以排除异常包对实验结果的影响。然后将试验灭菌乳分别在5、10、15、20、25、30、35、40℃的条件下保温储存，每个温度梯度存放11盒，其中10盒作为摇包试验样，1盒作为温度确认样（不参与摇包）。使用温度测量仪对温度确认样进行实时监测，待灭菌乳温度达到指定温度并稳定后，将每个温度梯度的10盒试验样分别在20、25、30℃的定标模块下进行摇包检测。

全部模块摇包检测结束后，将试验灭菌乳放置至室温，然后进行破包处理，观察其组织状态并检测pH值，以验证样品本身质量是否存在异常。

3 结果与分析

3.1 3个温度的定标模块参数分析

分别用温度为20、25、30℃的灭菌乳进行定标，建立不同温度的检测模块，所得参数结果见表1。从表中数据可以看出，3个温度定标模块的基线均为19 810，保持一致。在检测下限方面，25℃定标模块的检测下限最高，为0.95057，30℃定标模块次之，20℃定标模块最低；检测值基准呈现出随定标温度升高而上升的趋势，20℃定标模块为0.950 60，25℃定标模块为0.955 60，30℃定标模块为0.956 40；检测上限同样随定标温度升高而有所增加；检测值标准差方面，20℃和25℃定标模块均为0.001 70，30℃定标模块稍高，为0.002 50。这些参数差异表明不同温度定标模块的检测特性存在一定区别，可能会对不同温度样品的检测结果产生影响。

3.2 摇包检测结果统计

按照2.3.2的试验步骤进行试验，80盒试验灭菌乳在不同温度时的摇包检测结果见表2。从表中数据能够清晰地看出，在不同定标模块下，不同储存温度的灭菌乳检测通过率存在显著差异。

在20℃定标模块下，样品温度为15、20、25℃时，检测通过率均达到100%；样品温度为10℃和30℃时，通过率为80%；样品温度为5℃和35℃时，通过率降至60%；而样品温度为40℃时，通过率仅为10%。

在25℃定标模块下，样品温度为20、25、30℃

表 1 20、25、30℃三个温度定标模块参数

Table 1. Parameters of the temperature calibration modules at 20, 25, and 30℃

定标温度（℃）	基线	检测下限	检测值基准	检测上限	检测值标准差
20	19810	0.94564	0.95060	0.95565	0.00170
25	19810	0.95057	0.95560	0.96067	0.00170
30	19810	0.94894	0.95640	0.96387	0.00250

表 2 不同储存温度的灭菌乳在 20、25、30 °C 三个定标模块下的摇包检测结果

Table 2. Shake test results of sterilized milk stored at different temperatures, measured using the calibration modules at 20, 25, and 30 °C					
定标模块 (°C)	样品温度 (°C)	检测数量 (盒)	合格数 (盒)	标准差 (%)	通过率 (%)
20	5	10	6	0.023	60
	10	10	8	0.029	80
	15	10	10	0.017	100
	20	10	10	0.012	100
	25	10	10	0.014	100
	30	10	8	0.014	80
	35	10	6	0.020	60
	40	10	1	0.087	10
25	5	10	0	0.015	0
	10	10	0	0.010	0
	15	10	6	0.021	60
	20	10	10	0.018	100
	25	10	10	0.013	100
	30	10	10	0.019	100
	35	10	6	0.013	60
	40	10	6	0.028	60
30	5	10	0	0.018	0
	10	10	1	0.012	10
	15	10	7	0.015	70
	20	10	8	0.011	80
	25	10	10	0.014	100
	30	10	10	0.012	100
	35	10	10	0.013	100
	40	10	0	0.018	0

时，检测通过率为100%；样品温度为15、35、40 °C 时，通过率为60%；样品温度为5 °C 和10 °C 时，通过率为0。

在30 °C 定标模块下，样品温度为25、30、35 °C 时，检测通过率为100%；样品温度为20 °C 时，通过率为80%；样品温度为15 °C 时，通过率为70%；样品温度为10 °C 时，通过率为10%；样品温度为5 °C 和40 °C 时，通过率为0。

同时，不同温度条件下检测结果的标准差也有所不同，总体而言，通过率高的温度区间对应的标准差相对较小，表明检测结果的稳定性更好。

3.3 摇包检测结果深度分析

88 盒试验灭菌乳放至室温后破包观察其组织状态和检测pH值，结果显示所有样品均正常，且每

10 盒试验样的标准差均≤0.3%，符合仪器标准差要求，这表明样品本身质量不存在问题，检测结果的差异主要由温度因素导致。

为更直观地呈现温度差对检测结果的影响，将定标温度与样品温度的差值作为变量，对检测通过率进行分析（图1）。由图1可知，当定标时的标样温度和被检测样品的温度差在±5 °C 内时，检测通过率达到100%，与破包检测结果一致，说明在此温差范围内，温度变化对检测结果的影响极小，可以忽略不计。

当温差超过5 °C 时，摇包检测结果通过率开始呈现下降趋势，且温差越大，通过率下降越明显。例如，在20°C 定标模块下，样品温度为40 °C 时，温差达到20 °C，通过率仅为10%；在25 °C 定标模块下，

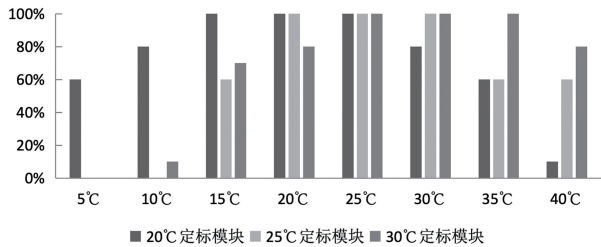


图 1 不同储存温度的灭菌乳在不同定标模块下的检测通过率

Figure 1 Detection pass rates of sterilized milk stored at different temperatures under various calibration modules

样品温度为5℃时，温差为20℃，通过率为0；在30℃定标模块下，样品温度为5℃时，温差为25℃，通过率同样为0。这一规律充分表明温度差是影响摇包仪检测准确性的关键因素。

进一步分析不同定标模块的适用温度范围可以发现，20℃定标模块在样品温度较低的区间（15~25℃）表现优异，25℃定标模块在常温区间（20~30℃）检测效果最佳，30℃定标模块则更适合样品温度较高的区间（25~35℃）。这一特点为企业根据不同季节和环境温度选择合适的定标模块提供了重要参考。

3.4 温度对检测信号稳定性的影响分析

温度差异会影响被检测样品的物理性质，如黏度、密度等，进而影响摇包仪检测信号的稳定性^[7]。当样品温度与定标温度差异较小时，样品的物理性质变化较小，摇包仪能够准确捕捉到样品的组织状态信息，检测信号稳定，因此通过率高；而当温差较大时，样品的黏度、密度等物理性质发生显著变化，导致惯性衰减过程中的运动参数异常，摇包仪难以准确识别样品的真实质量状态，检测信号稳定性下降，通过率降低。

从不同温度下的标准差数据也能印证这一点，在通过率高的高温区间，标准差相对较小，说明检测结果的重复性和稳定性更好；而在通过率低的低温区间，标准差往往较大，检测结果的波动更为明显。例如，20℃定标模块下，样品温度为40℃时，标准差达到0.087%，远高于其他温度区间，检测结果的不稳定性显著增加。

4 讨论

4.1 温度影响检测结果的机制探讨

从微观机制来看，温度对摇包仪检测结果的影响源于灭菌乳物理性质的温度依赖性。当样品温度与定标温度存在差异时，牛奶中的酪蛋白胶束运动速率、脂肪球分布状态及水分子缔合程度均会发生改变：低温条件下，分子热运动减缓，酪蛋白胶束间相互作用增强，导致样品黏度升高；高温条件下，分子动能增加，胶束结构松散，黏度降低^[8]。这种黏度变化直接影响摇包仪惯性衰减过程中的运动参数——黏度升高会使衰减周期延长、惯动衰减比降低，而黏度降低则导致相反的参数变化。当温差在±5℃以内时，黏度变化幅度较小（通常≤5%），未超出仪器的参数识别阈值，因此检测通过率保持100%；当温差超过5℃，黏度变化幅度突破阈值（如40℃样品较20℃定标温度黏度下降约15%），仪器无法准确区分物理性质变化与微生物污染导致的组织状态异常，最终表现为通过率显著下降。

4.2 对乳制品质量控制体系的实践价值

本研究成果为乳制品企业优化无损检测流程提供了可操作的技术规范。传统破包检验因抽样量限制（通常≤5%）难以覆盖全批次质量风险，而摇包仪无损检测可实现100%抽样，但检测准确性受温度干扰的问题长期制约其应用效果。本研究提出的“±5℃温差控制标准”，使企业能够通过动态调整定标模块（如夏季启用30℃模块、冬季启用20℃模块）将检测误差控制在可接受范围。同时，不同定标模块适用温度范围的明确（20℃模块适用于15~25℃等），为企业制定季节性检测方案提供了科学依据，有助于构建更精准的质量预警体系。

值得注意的是，乳制品无损检测技术正朝着多维度融合的方向发展。除摇包仪外，高光谱成像技术凭借其快速、无损的特性，在牛奶蛋白质、脂肪等成分检测中展现出显著优势。例如，基于改进鲸鱼算法（WOA）与Elman神经网络结合的高光谱检

测方法,可实现牛奶蛋白质含量的高精度检测,决定系数达0.997 3,均方根误差低至 0.000 3,且检测时间仅1.56 s^[9];而空间分辨高光谱技术通过提取牛奶的吸收系数(μ_a)和约化散射系数(μ_s')等光学特性参数,结合遗传算法(GA)与支持向量机(SVM)建立的模型,对脂肪含量的预测集决定系数达0.951 3,均方根误差为0.055 5^[10]。这些技术与摇包仪检测形成互补,共同推动乳制品质量控制体系向更高效、更精准的方向升级。

4.3 研究局限性与未来研究方向

本研究存在两方面局限性:一是研究对象仅为低酸性灭菌乳,未涵盖高脂、调味等其他类型灭菌乳,而不同成分的灭菌乳因脂肪含量、添加剂种类的差异,其黏度-温度敏感性可能不同;二是仅采用RS-6型摇包仪,不同厂家或型号仪器的参数设定与识别算法存在差异,结果普适性需进一步验证。未来研究可从三方面展开:其一,扩大样品类型覆盖范围,对比分析高脂灭菌乳、含乳饮料等产品的温度敏感性差异,建立分类别的温差控制标准;其二,结合流变仪等精密设备,量化不同温度下灭菌乳的黏度、密度等物理参数变化,构建温度、物理性质、检测信号的三者关联模型,为摇包仪参数优化提供理论支撑;其三,探索智能化温度适配技术,融合高光谱成像、机器学习算法(如改进WOA、GA-SVM等),开发集成实时温度传感与自动定标调整功能的摇包仪系统,通过算法补偿消除温度干扰,进一步提升无损检测的自动化与智能化水平。

5 结论

本研究通过系统的实验探究,明确了温差对灭菌乳无损检测结果的重要影响。实验结果表明:

当定标时的标样温度与被检测样品的温度差控制在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内时,RS-6摇包仪的检测准确度最高,通过率达到100%;当温差超过 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,检测通过率随温差增大而显著下降,检测结果的准确性和稳定性受到严重影响。不同定标模块具有差异化的适用温度范围,其中 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定标模块适用于 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的较低温度样品, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定标模块适用于 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的常温样品, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定标模块适用于 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的较高温度样品。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.GB 4789.26-2023 食品安全国家标准 食品微生物学检验 商业无菌检验[S].
- [2] 赵化平,刘刚,赵秀忠.UHT牛奶无损检测的新方法与应用效果[C]//中国乳制品工业协会第十三次年会.中国乳制品工业协会,2007.
- [3] 刘国信.液奶UHT成品无损检测技术应用前景好[J].中国包装,2006,26(3):115.
- [4] 施润苗,杨茜,程凤云.探究液体表面张力与液体温度、粘度的关系[C]//中国化学会第29届学术年会,2014.
- [5] 赵化平,刘刚,秦峰,等.液奶UHT成品无损检测新技术的应用[C]//中国乳制品工业协会第十一次年会论文集.2005.
- [6] 石翠娟,王琴,任远庆.RS系列摇包仪在超高温灭菌利乐枕牛奶检测中的运用[J].中国乳业,2014(9):4.
- [7] Muthupandian, Ashokkumar, Raman, et al.The ultrasonic processing of dairy products—An overview[J].Dairy Science & Technology, 2010.
- [8] Farrell H M, Malin E L, Brown E M, et al.Casein micelle structure:What can be learned from milk synthesis and structural biology?[J].Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2006, 11(2-3):135-147.
- [9] 杨莹莹,潘嘹,卢立新,等.基于空间分辨高光谱技术的牛奶脂肪含量无损检测研究[J/OL].食品与发酵工业. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041830>.
- [10] 曹纪磊,高沛鑫,李鑫宇,等.基于改进WOA-Elman神经网络的高光谱牛奶蛋白质快速无损检测[J].食品与机械,2023,39(12):55-59,116.