稀释比例与遮光度对酸奶粒径测定的影响

杨丽花，张春杰，郭明刚，杨　云，梁凤玲，郭百儒，陈　娟，崔永静，张鹏鹏

蒙牛乳业（焦作）有限公司，河南焦作 454000

摘　要：[目的]酸奶的粒径分布对其口感、稳定性和消化吸收具有重要影响，而激光粒度仪的测定结果易受样品前处理条件的影响。[方法]本研究系统探讨不同稀释比例（1∶1～1∶20）、遮光度（0%～25%）对酸奶粒径测定的影响，旨在建立标准化检测方法。[结果]稀释比例为1∶10时，D50平均值最接近真实值（20.766 μm），相对标准偏差（RSD）最小（1.52%），且粒径分布最集中（D90/D10=2.28）。遮光度在5%～10%范围内时，测定精密度最佳（RSD=1.50%）。基于此，推荐采用玻璃棒搅拌混匀样品、1∶10稀释比例、5%～10%遮光度作为标准化操作流程。[结论]本研究为乳品企业的质量控制、学术研究提供可靠的方法依据。

关键词：酸奶；粒径测定；稀释比例；遮光度；激光粒度仪；标准化方法

文章编号：1671–4393（2025）10–0076–06　　DOI:10.12377/1671–4393.25.10.12

0 引言

酸奶作为一种营养丰富、风味独特的发酵乳制品，其品质特性与内部颗粒结构密切相关。其中，脂肪球和蛋白质颗粒的粒径大小及分布不仅影响酸奶的口感（如细腻度、顺滑度），还对产品的物理稳定性（如乳清析出、分层现象）和消化吸收效率具有重要影响。研究表明，当酸奶中脂肪球粒径控制在1～5 μm时，产品质地均匀、口感细腻，且更

作者简介：杨丽花（1986–），女，河北邯郸人，工程师，本科，研究方向为食品工程；
张春杰（1986–），女，河南焦作人，工程师，本科，研究方向为食品工程；
郭明刚（1987–），男，河南焦作人，工程师、本科，研究方向为食品质量与安全；
杨　云（1980–），女，河南南阳人，工程师，本科，研究方向为食品安全管理；
梁凤玲（1982–），女，内蒙古赤峰人，本科，研究方向为食品安全管理；
郭百儒（1987–），男，内蒙古赤峰人，本科，研究方向为食品安全管理；
陈　娟（1987–），女，内蒙古呼和浩特人，工程师、本科，研究方向为食品质量与安全；
崔永静（1984–），女，河南新乡人，工程师、本科，研究方向为食品质量与安全；
张鹏鹏（1986–），女，河南焦作人，工程师、本科，研究方向为食品质量与安全。

中国乳业线上阅读

易被人体消化酶作用[1]；而粒径过大或分布不均则可能导致口感粗糙、货架期缩短等问题[2]。

在乳制品行业中，激光粒度仪是测定颗粒粒径的常用设备，但其测定结果易受样品前处理、仪器参数等因素影响[3]。目前，行业内对于酸奶粒径测定的标准化操作尚未完全统一，不同实验室采用的稀释比例、遮光度控制存在较大差异，导致检测数据缺乏可比性[4]。例如，部分企业采用1∶5稀释比例，而学术研究中常见1∶20稀释比例，这种差异可能导致同一批次样品的粒径测定结果偏差超过10%。此外，遮光度作为反映样品中颗粒浓度的关键参数，其是否会影响酸奶粒径测定的准确性，相关研究仍存在争议。

基于上述背景，本研究系统探讨不同稀释比例（1∶1～1∶20）和遮光度（0%～25%）对酸奶粒径测定结果的影响，旨在明确最优检测条件，为乳品企业的质量控制提供标准化方法，同时为学术研究中的数据可比性奠定基础。

1 工作原理

激光粒度仪测定粒径的核心原理基于米氏散射理论（Mie Scattering），即当一束单色激光照射到颗粒上时，光的散射强度和角度分布与颗粒的大小、形状及折射率密切相关[5]。对于球形颗粒（如酸奶中的脂肪球），散射光的空间分布呈现特定规律：小颗粒（粒径<1 μm）主要产生大角度散射，而大颗粒（粒径>10 μm）则以小角度散射为主[6]。

激光粒度仪的光学系统由光源、样品池、探测器阵列三部分组成[7]。本研究使用的仪器采用633 nm氦氖激光作为光源，其相干性好、波长稳定，可减少杂散光干扰。样品池中的颗粒悬浮液在搅拌作用下均匀分布，激光穿过样品池时，部分光被颗粒散射，散射光被位于不同角度的探测器接收。图1中探测单元序号1～46对应不同散射角度。探测器将光信号转化为电信号，通过计算机软件基于米氏理论反演计算，得到颗粒的粒径分布及特征参数（如D50、D10、D90）。

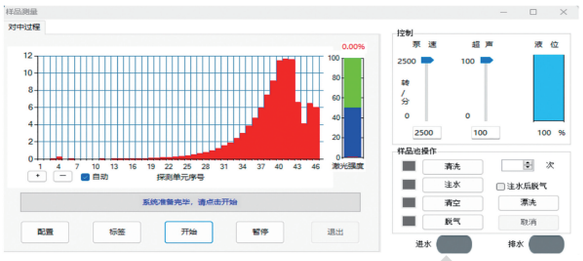


图 1 样品光能示意图

爱里斑（Airy Disk）是理解粒径与散射关系的关键概念[8]。它是由光的衍射作用形成的明暗交替圆环，中心亮斑的半径与颗粒粒径成反比：粒径越小，爱里斑半径越大，散射光分布范围越广（对应图1中高序号探测单元接收信号）；粒径越大，爱里斑半径越小，散射光集中在小角度范围（对应低序号探测单元）。仪器通过分析不同角度探测器的信号强度比例，即可反推出颗粒的粒径分布。

2 材料与仪器

2.1 材料选择依据

2.1.1 D90清洗液

一种高效碱性清洗液，含表面活性剂和螯合剂，可有效去除样品池残留的脂肪、蛋白质等有机物，避免交叉污染。试验验证显示，经该清洗剂清洗后，样品池残留量<0.01 mg，对后续测定无影响。

2.1.2 三级水

符合《GB/T 6682—2008分析实验室用水规格和试验方法》标准，电导率<0.5 μS/cm，总有机碳<0.05 mg/L。使用前经0.22 μm滤膜过滤并真空脱气（−0.09 MPa，30 min），以去除水中的微小颗粒和气泡，减少背景干扰。

2.1.3 一次性塑料吸管

选用聚丙烯材质，其表面惰性高，不易吸附酸奶中的脂肪颗粒，避免样品损失。对比试验表明，聚丙烯吸管与玻璃吸管的测定结果偏差<0.5%。

2.2 仪器参数优化试验

为确定最佳仪器参数，进行预试验。

中国乳业线上阅读

2.2.1 泵速

设置500、1 000、1 500、2 000 r/min四个梯度，测定同一稀释样品的D50值。结果显示，泵速<1 000 r/min时，颗粒易沉降，D50测定值随时间波动（RSD>5%）；泵速≥1 500 r/min时，颗粒分布稳定（RSD<2%），但2 000 r/min时易产生气泡，故选择1 500 r/min。

2.2.2 超声时间

设置0、5、10、20 s四个梯度。超声可分散团聚颗粒，但过度超声会破坏脂肪球结构。试验显示，超声10 s时D50值稳定（20.76 μm），超声20 s时D50降至19.82 μm（脂肪球破裂），故选择10 s。

2.2.3 背景光检查

仪器要求背景光能≥80%（图1中激光强度4+），若低于该值，可能因样品池污染或光路偏移导致。

3 样品处理

酸奶样品的预处理直接影响测定结果的准确性，核心目标是实现颗粒均匀分散且无气泡干扰。

3.1 混匀方式的优化

对比3 种混匀方式。

3.1.1 手动振摇

将酸奶样品包装（200 g）倒置，上下振摇30 次（振幅20 cm），静置5 min 除气泡。该方法操作简便，但振摇力度差异可能导致结果偏差（RSD=3.2%）。

3.1.2 玻璃棒搅拌

取50 g酸奶倒入烧杯，用玻璃棒顺时针搅拌1 min（60 r/min），搅拌后静置2 min。该方法分散更均匀（RSD=1.8%），且气泡易消除，为优选方法。

3.1.3 磁力搅拌

500 r/min搅拌2 min，虽效率高，但高速搅拌易卷入空气，产生微小气泡（需静置10 min才能消除），故不推荐。

3.2 稀释操作规范

稀释过程需严格控制比例，避免颗粒浓度过高（多重散射）或过低（信号弱）。具体步骤如下：（1）用10 mL移液管准确移取10 mL酸奶至烧杯中。（2）按稀释比例加入对应体积的三级水（如1∶10比例需加90 mL水）。（3）玻璃棒搅拌30 s，确保稀释液均匀。（4）倾倒稀释液时沿烧杯壁缓慢注入，避免湍流产生气泡。

3.3 气泡测定与消除

气泡会散射光线，导致粒径测定值偏大（误将气泡识别为大颗粒）。采用以下方法判断气泡是否消除。

3.3.1 目视检查

稀释液应澄清无可见气泡。

3.3.2 仪器监控

若图1中激光强度突然下降（>10%），提示存在气泡，需重新静置或离心（3 000 r/min、1 min）消除气泡。

4 分析步骤

4.1 仪器预热与校准

4.1.1 预热

开机后需预热30 min，确保激光强度稳定（波动<2%）。

4.1.2 校准

每次测定前选择碳化硅质控样品进行检测，对比标准物质范围值。如超出标准范围，进行全面清洗、维护，直至达到标准范围再检测样品。

4.2 背景测量的关键控制

背景测量反映稀释剂（三级水）的散射信号，需满足：背景光能：≥80%（图1中激光强度≥4）。

中国乳业线上阅读

4.3 样品测量的操作细节

4.3.1 加样量控制

根据遮光度调整加样量，如目标遮光度5%～10%，需加入约2 mL稀释后的酸奶（具体量因样品浓度而异）。

4.3.2 加样技巧

滴管深入液面下1 cm左右缓慢释放样品，避免冲击产生气泡。

4.3.3 测定次数

每个样品连续测定3 次，取平均值作为结果，残差需≤2.5%，否则重新测定。

4.4 仪器清洗流程

样品测定后需彻底清洗，避免残留污染。

5 结果与分析

5.1 不同稀释比例对粒径的影响

由表1可知，随稀释比例增大，D50逐渐增大。原因是低稀释比例（如1∶1）时颗粒浓度高，颗粒间相互遮挡导致散射信号减弱，仪器误判为小颗粒；高稀释比例（如1∶20）时颗粒浓度过低，信号噪声增加，导致测定值偏大。

精密度则是在1∶10比例时RSD最小（1.52%），且无样品超出3%精密度要求，表明该比例下颗粒分散状态最佳，信号稳定。在1∶10比例的D90/D10比值最小（2.28），说明粒径分布最集中，匹配仪器的最佳检测范围。

5.2 不同遮光度对粒径的影响

由表2可知，各遮光度范围的D50平均值偏差<0.23 μm（21.476～21.702），远小于粒径测定的允许误差（3%），表明遮光度对测定值影响较小。遮光度5%～10%时RSD最小（1.50%），超出3%精密度要求的样品数量最少（5 个），原因是该范围与仪器的探测器灵敏度匹配，信号强度适中，噪声低。激光粒度仪具有自动校正功能，可在一定范围内（5%～20%）补偿遮光度波动对信号的影响；但遮光度<5%时信号过弱、>25%时多重散射增强，导致精密度下降。

6 讨论

吴伟都等[1]提出搅拌型酸奶的最优稀释比例为1∶8～1∶12，与本研究的1∶10稀释比例结果一

表 1 20 批样品在不同稀释比例下的测定结果

稀释比例	D50 平均值（μm）	标准差（μm）	RSD（%）	超出 3% 精密度数量（个）	D10（μm）	D90（μm）
1 ∶ 1	19.724	0.852	4.32	1	12.15	31.26
1 ∶ 5	20.479	0.631	3.08	3	13.52	32.89
1 ∶ 10	20.766	0.315	1.52	0	14.01	31.98
1 ∶ 15	21.128	0.726	3.43	6	14.67	33.54
1 ∶ 20	21.523	0.914	4.25	8	15.23	34.76

表 2 20 批样品在不同遮光度下的测定结果

遮光度范围（%）	D50 平均值（μm）	标准差（μm）	RSD（%）	超出 3% 精密度数量（个）
0 ～ 5（不含 5）	21.507	0.682	3.17	11
5 ～ 10（不含 10）	21.702	0.325	1.50	5
10 ～ 15（不含 15）	21.693	0.418	1.92	10
15 ～ 20（不含 20）	21.613	0.452	2.09	10
20 ～ 25（不含 25）	21.476	0.573	2.67	6

中国乳业线上阅读

致，验证结论的可靠性。同时，苏格毅等[5]指出遮光度对激光粒度测定的影响与颗粒折射率相关，而酸奶中脂肪的折射率（1.46）与水（1.33）差异较小，因此遮光度影响不显著，这也与本研究发现5%～10%遮光度适用的结果吻合。本研究确定的1∶10稀释比例和5%～10%遮光度适用于搅拌型酸奶，但需注意两点：（1）样品类型差异。对于高蛋白或高纤维酸奶，可能需要适当提高稀释比例（如1∶15），避免颗粒团聚。（2）仪器型号差异。不同品牌仪器的光学系统存在差异，建议企业根据自身仪器进行验证，但1∶8～1∶12可作为参考范围。需要指出的是，本研究仅使用同一批次样品，未来研究需扩展至不同批次、不同配方的酸奶（如低脂、益生菌酸奶），并进一步考虑温度对粒径的影响（低温可能导致脂肪结晶进而影响测定结果）。此外，可结合动态光散射仪（DLS）验证激光粒度仪的测定结果，提高数据可靠性。

7 结论

本研究通过系统探讨稀释比例、遮光度对酸奶粒径测定的影响，得出以下结论：稀释比例显著影响测定结果的准确性和精密度，1∶10是最优比例，此时D50平均值最接近真实值（20.766 μm），RSD最小（1.52%），粒径分布最集中。遮光度在0%～25%范围内对D50 平均值影响较小（偏<0.23 μm），但5%～10%遮光度时精密度最佳，建议优先控制在该范围。

推荐标准化操作流程：酸奶样品经玻璃棒搅拌混匀→1∶10比例稀释→控制遮光度5%～10%→激光粒度仪测定，可确保测定结果的准确性和重复性。

本研究结果可为乳品企业的质量控制提供标准化方法，减少检测误差，同时为学术研究中酸奶粒径的测定提供参考，提高数据的可比性和可靠性。

参考文献

[1] 吴伟都，朱慧，欧凯，等.激光粒度仪测定搅拌型酸奶粒径的研究[J].粮食与饲料工业，2018（8）：4.
[2] 章银良，杨慧，周文权，等.基于粒度分析的酸奶品质研究[J].食品工业，2011，32（11）：60–62.
[3] 楚秉泉，冯城，丁黎，等.粒径对覆盆子粉体发酵乳品质的影响[J].核农学报，2024，38（12）：2385–2392.
[4] 熊绍百，杨晓莉，陈婷婷，等.糙米粉粒径对糙米直条米粉品质的影响[J].食品与机械，2024，40（9）：174–178，199.
[5] 苏格毅，孙存金，邓飞，等.遮光度对激光散射法粒径测量影响及修正[J].工程热物理学报，2024，45（9）：2696–2701.
[6] 李丹，林丽萍，王雅，等.激光粒度分析仪测试条件对粒径分析的影响[J].实验室研究与探索，2024，43（1）：32–35.
[7] 程海斌，刘桂珍，李立春，等.激光散射法测定粒径的样品处理方法[J].武汉理工大学学报，2003（3）：7–9.
[8] 纪运景，卞保民，贺安之.激光衍射法测量粒子群粒径分布的反演新算法[J].光电子·激光，2002（12）：1285–1288.

The Influence of Dilution Ratio and Opacity on the Particle Size Measurement of Yogurt

YANG Lihua，ZHANG Chunjie，GUO Minggang，YANG Yun，LIANG Fengling，
GUO Bairu，CHEN juan，CUI Yongjing，ZHANG Pengpeng
Mengniu Dairy（Jiaozuo）Co.，Ltd.，Jiaozuo Henan 454000

Abstract：[Objective]The particle size distribution of yogurt significantly affects its taste，stability，and

下转87页

中国乳业线上阅读

used as the extraction medium instead of traditional dichloromethane. By optimizing the pretreatment process（sample weighing，extraction，concentration and reconstitution），combined with the Prognosis enzyme-linked immunosorbent assay （ELISA） kit for detection; the recovery rate，relative error and operation efficiency of the method were systematically evaluated by verifying spiked samples with different concentrations such as limit of quantification （LOQ），2-fold LOQ and 5-fold LOQ. [Result] In the optimized method，the recovery rate of AFM_1 was stably between 70% and 120%，which met the requirements of GB/T 33411—2016 General Rules for Enzyme-Linked Immunosorbent Assay Kits; the relative error was controlled within ±25%，which complied with the standard of SN/T 2775—2023 Evaluation Method for Commercial Food Detection Kits.The pretreatment time was shortened from 70 min of the traditional method to 25 min，and the operation steps were simplified from 4 steps to 2 steps. [Conclusion] The optimized methanol extraction-ELISA detection method has good extraction effect，detection accuracy and efficiency，can meet the batch detection needs of dairy enterprises，and provides accurate and reliable technical support for the detection of AFM_1 content in cheese sticks.

Keywords：methanol extraction；aflatoxin M_1（AFM_1）；cheese stick；enzyme-linked immunosorbent assay；method optimization

▲上接80页

digestibility，while the measurement results of laser particle size analyzers are susceptible to sample pretreatment conditions.[Method]This study systematically investigated the effects of different dilution ratios（1∶1～1∶20）and obscuration levels（0%～25%） on yogurt particle size measurement，aiming to establish a standardized detection method.[Result]The results showed that at a dilution ratio of 1∶10，the D50 average value was closest to the true value（20.766 μm），with the smallest relative standard deviation（RSD=1.52%） and the most concentrated particle size distribution（D90/D10=2.28）.When the obscuration level was within 5%～10%，the measurement precision was optimal（RSD=1.50%）.Based on these findings，a standardized operation protocol is recommended，including sample homogenization by glass rod stirring，a 1∶10 dilution ratio，and an obscuration level of 5%～10%.[Conclusion]This study provided a reliable methodological reference for quality control in dairy enterprises and academic research.

Keywords：yogurt；particle size measurement；dilution ratio；obscuration；laser particle size analyzer；standardized method

中国乳业线上阅读