

# 乳品加工搅拌工序对牛奶溶解氧含量的影响

李欣怡, 李秀娟, 张福祥, 李春江, 李文龙, 李 雪, 孙 爽, 陈晓民\*

[蒙牛乳业（尚志）有限责任公司，黑龙江哈尔滨 150600]

**摘 要:** [目的]探讨乳品加工过程中搅拌工序对牛奶溶解氧含量的影响。[方法]乳品加工过程中牛奶溶解氧含量会直接影响成品乳品质，罐内不同液位及搅拌速度可能导致牛奶溶解氧含量存在差异。本研究以原奶储存罐和待装罐的高、中、低液位牛奶样本为研究对象，测定并对比分析不同搅拌速率下样本中的溶解氧含量。[结果]在牛奶储存过程中，若保持转速恒定，原奶储存罐高液位牛奶溶解氧含量为 $(8.74 \pm 0.18)$  ppm，中液位为 $(9.10 \pm 0.13)$  ppm，低液位为 $(9.55 \pm 0.42)$  ppm，溶解氧含量随液位降低而显著升高；若转速随液位降低而降低，待装罐高液位为 $(8.81 \pm 0.11)$  ppm，中液位为 $(8.80 \pm 0.17)$  ppm，低液位为 $(8.79 \pm 0.13)$  ppm，溶解氧含量随液位降低无显著变化。[结论]本试验数据可为乳品降低溶解氧含量的优化生产提供理论依据和实践指导。

**关键词:** 溶解氧含量；搅拌；乳品加工；牛奶；稳定性

文章编号: 1671-4393 (2026) 04-0086-06

DOI:10.12377/1671-4393.26.04.14

## Influence of the Stirring Process on Dissolved Oxygen Content in Milk during Dairy Processing

LI Xinyi, LI Xiujuan, ZHANG Fuxiang, LI Chunjiang, LI Wenlong, LI Xue, SUN Shuang, CHEN Xiaomin\*

[Mengniu Dairy (Shangzhi) Co., Ltd., Harbin Heilongjiang 150600]

**Abstract:** [Objective]To investigate the effect of stirring process in dairy product processing on the dissolved oxygen content of milk.[Method]During the dairy processing, the dissolved oxygen content of milk directly affects the quality of the final product. Different liquid levels and stirring speeds in the tanks may result in variations in the

**作者简介:** 李欣怡 (2000-)，女，黑龙江哈尔滨人，本科，助理工程师，研究方向为乳品工程；  
李秀娟 (1986-)，女，内蒙古乌兰浩特人，本科，中级工程师，研究方向为乳品工艺；  
张福祥 (1986-)，男，黑龙江尚志人，本科，助理工程师，研究方向为食品科学与工程；  
李春江 (1982-)，男，黑龙江绥化人，本科，研究方向为食品加工与检验；  
李文龙 (1981-)，男，山东泰安人，本科，研究方向为食品加工与检验；  
李 雪 (1988-)，女，山东德州人，本科，初级工程师，研究方向为生物药物制剂研发；  
孙 爽 (1985-)，女，黑龙江哈尔滨人，本科，助理工程师，研究方向为食品安全与质量管理。

\***通信作者:** 陈晓民 (1980-)，男，黑龙江大庆人，本科，研究方向为食品加工与检验。

dissolved oxygen content. This study focused on milk samples from the high, medium, and low liquid levels of the raw milk storage tank and the filling buffer tank, and measured and compared the dissolved oxygen content in the sample under different stirring rates.[Result]During milk storage, if the rotational speed remains constant in the raw milk storage tank, the dissolved oxygen content of milk at the high liquid level is  $(8.74 \pm 0.18)$  ppm, at the medium liquid level is  $(9.10 \pm 0.13)$  ppm, and at the low liquid level is  $(9.55 \pm 0.42)$  ppm. The dissolved oxygen content significantly increases as the liquid level decreases; if the rotational speed decreases as the liquid level decreases in the filling buffer tank, the dissolved oxygen content at the high liquid level is  $(8.81 \pm 0.11)$  ppm, at the medium liquid level is  $(8.80 \pm 0.17)$  ppm, and at the low liquid level is  $(8.79 \pm 0.13)$  ppm. There is no significant change in the dissolved oxygen content as the liquid level decreases.[Conclusion]The data from this experiment can provide a theoretical foundations and practical guidance for optimizing the production of dairy products to reduce dissolved oxygen content.

**Keywords:** dissolved oxygen content; stirring; dairy product processing; milk; stability

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,消费者对高品质乳品的关注度显著上升,对其感官品质和营养价值提出了更严格的要求,而溶解氧是影响乳品品质的关键因素之一。通常情况下,牛奶自离开乳腺后会迅速摄取环境中的氧气,导致其溶解氧含量显著上升。这一过程不仅会促进牛奶中维生素(如维生素C、E)及脂质的氧化反应,加快加热过程中氨基还原酮的氧化降解速率,从而降低牛奶的营养价值及抗氧化特性,还可能引发风味劣变。例如,当溶解氧含量超过8 ppm时,UHT纯牛奶在储存3个月后易产生纸板味、氧化味等不良感官特征。这一现象在近期的相关研究中得到验证,如李泽鹏<sup>[1]</sup>揭示了溶解氧在UHT纯牛奶货架期内导致风味变化的机制;习鸿杰<sup>[2]</sup>将溶解氧含量作为常温酸奶和UHT纯牛奶包装货架期预测的核心指标之一;Jiang等<sup>[3]</sup>针对闪蒸条件对UHT牛奶溶解氧含量及品质的影响展开研究,当溶解氧含量为1.14 ppm时,UHT纯牛奶在135℃灭菌10 s条件下表现出最佳稳定性及最低氧化程度;桂仕林等<sup>[4]</sup>对乳品包装材料的氧气透过率进行了深入研究,发现康美包与利乐砖的氧气透过率最低,利乐枕次之,百利包最高。除高温和包装材料因素外,现有研究多聚焦于风味变化、光氧

化、发酵影响<sup>[5]</sup>、不同工艺对比<sup>[6]</sup>、货架期指标<sup>[7]</sup>等维度。其中,李泽鹏<sup>[1]</sup>探讨了溶解氧导致牛奶风味变化,发现乳脂的光氧化过程本质上是不饱和乳脂肪酸与氧气分子直接发生反应,该反应在多种催化因素作用下得以加速,生成无嗅无味的中间产物——过氧化物。此类过氧化物极不稳定,极易与脂肪酸发生进一步的次级反应,生成二级氧化产物,最终导致乳品变质,由此揭示了溶解氧在牛奶货架期内的异味影响;张清阳等<sup>[8]</sup>强调了氧气在牛奶光氧化中起到重要作用,系统阐释了光照条件下溶解氧是导致巴氏杀菌乳产生酸败味的主要原因。搅拌工序作为乳品加工中持续时间长、涉及环节多的关键操作,其溶解氧影响机制的相关研究较少。但在实际生产中,搅拌参数设置不合理已成为部分乳品企业产品溶解氧超标的重要原因。鉴于此,本研究聚焦乳品加工过程中的搅拌工序,深入探讨不同搅拌速率、罐内液位分布等因素与溶解氧含量之间的相关性,为降低灭菌乳品中溶解氧含量提供理论依据和工艺优化策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

生鲜乳(脂肪含量 $\geq 3.1\%$ 、蛋白质含量

≥2.9%），源于规模化牧场，符合《GB19301—2010 食品安全国家标准 生乳》<sup>[9]</sup>要求。

1.2 试验仪器

Seven2Go Pro S9 溶解氧测定仪（测量范围0~20 mg/L，精度±0.01 mg/L），梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；食品级不锈钢材质原奶储存罐（容积100 t）、待装罐（容积50 t），扬州续辉饮料设备有限公司；HVA-85/HIRAYAMA灭菌器，株式会社平山制作所；采样瓶，南京水杉塑料制品有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

本研究首先核查了原奶储存罐和待装罐在实际生产过程中设定的搅拌速率参数，发现原奶储存罐与待装罐内部的搅拌程序设定存在显著差异。原奶储存罐采用匀速搅拌模式，即始终保持同一速度进行搅拌，此模式可确保生鲜乳在储存过程中处于较为均匀的状态，而待装罐的搅拌速率会随着罐内液位的逐渐降低而呈递减趋势。取样工具（无菌采样瓶）需经121 ℃高压灭菌15 min，罐口采样区域用75%酒精擦拭消毒，待酒精挥发后操作；取样打开采样阀，将采样瓶装满至无空隙，并立即密封以避免空气接触，采集后的样本立即完成测定。开启清水阀冲洗采样管道，避免采样滞留牛奶对后续生产带来质量隐患。基于此，研究设计以下取样方案（表1）。

（1）原奶储存罐：选定3个原奶储存罐作为研究对象，编号A1、A2、A3，搅拌速率设定为50%开

启，高液位（60~70 t）、中液位（30~50 t）、低液位（<20 t），每种液位搅拌1 h，重复采集3个平行样本。在实际生产进程中，鉴于排产状况的不同，不同罐的样本获取时间及对应的生产批次具有随机性。

（2）待装罐：选定3个待装罐作为研究对象，编号B1、B2、B3，搅拌速率随液位变化而改变，当液位处于高位（30~40 t）时，搅拌速率设定在70%~80%；当液位处于中位液位（20~30 t）时，搅拌速率设定为60%；当液位处于低位液位（<20 t）时，搅拌速率设定为50%，每种液位搅拌1 h后，重复采集3个平行样本。在实际生产进程中，鉴于排产状况的不同，不同罐的样本获取时间以及对应的生产批次具有随机性。

1.3.2 牛奶溶解氧含量评价

为确保测量结果更贴近罐内牛奶的实际溶解氧含量，排除回温对溶解氧含量的影响，本研究在采集样品后，立即测定溶解氧含量，记录数据。采用Seven2Go Pro S9溶解氧测定仪对采集的样品进行精确测量，测定前已用饱和溶解氧标准液完成仪器校准以保障精度。

1.4 数据处理与统计分析

本研究中原奶储存罐和待装罐样本每罐、每种液位分别制备3份平行样，所得数据以“平均值±标准偏差”形式呈现。使用Origin 2018进行图形绘制，统计分析通过IBM SPSS 27.0软件执行，数据处理前先通过Shapiro-Wilk检验验证正态性，符合正态分布后进行Levene方差齐性检验，方差齐时采用常

表 1 样品制备概览表  
Table1 Overview of Sample Preparation

| 取样点   | 编号       | 取样液位（t）    | 开启搅拌速度（%） | 搅拌时间（h） | 取样数量（个） |
|-------|----------|------------|-----------|---------|---------|
| 原奶储存罐 | A1、A2、A3 | 高液位（60~70） | 50        | 1       | 3       |
|       |          | 中液位（30~50） | 50        | 1       | 3       |
|       |          | 低液位（<20）   | 50        | 1       | 3       |
| 待装罐   | B1、B2、B3 | 高液位（30~40） | 70~80     | 1       | 3       |
|       |          | 中液位（20~30） | 60        | 1       | 3       |
|       |          | 低液位（<20）   | 50        | 1       | 3       |

规单因素ANOVA分析及多重比较，方差不齐时则用Welch法，显著性水平设为 $P<0.05$ （表示显著）和 $P<0.01$ （表示极显著），数据以“平均值±标准偏差”呈现。

使用Origin 2018绘制图形时，误差棒代表标准偏差，坐标轴需明确标注变量名称及单位，有效数字保留规则为平均值和标准偏差保留两位小数， $P$ 值保留三位小数。

2 结果与分析

2.1 原奶储存罐液位与牛奶溶解氧含量的相关性分析

表2显示，原奶储存罐高液位下的溶解氧含量为 $(8.74\pm0.18)$  ppm，中液位下为 $(9.10\pm0.13)$  ppm，低液位下为 $(9.55\pm0.42)$  ppm。鉴于数据方差不齐性的存在，本研究采用了韦尔奇（Welch）方法进行后续分析，计算得出的F值为20.36， $P<0.001$ 。基于上述结果可得，组间差异具有极高的

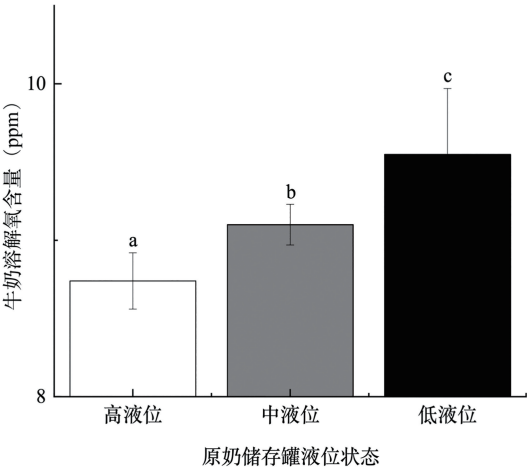


图 1 原奶储存罐不同液位下的溶解氧含量  
Figure 1 Dissolved Oxygen Content in Raw Milk Storage Tanks at Different Liquid Levels

统计显著性。进一步应用塔姆黑尼（Tamhane）事后多重比较方法对不同液位的溶解氧含量进行两两比较，可得原奶储存罐高液位与中液位、高液位与低液位以及中液位与低液位之间的比较， $P$ 值均 $<0.05$ ，表明不同液位间的牛奶溶解氧含量存在显著统计学差异（图1）。原奶储存罐低液位下的牛奶溶解氧含量显著高于中液位下的溶解氧含量，中液位下的牛奶溶解氧含量显著高于高液位。基于上述分析，结合图1和表2可得，转速恒定时，牛奶溶解氧含量与原奶储存罐液位高低存在极显著性差异，具体表现为溶解氧含量随液位的降低而升高。

2.2 待装罐液位与牛奶溶解氧含量的相关性分析

表3显示，待装罐高液位下的牛奶溶解氧含量为 $(8.81\pm0.11)$  ppm，中液位下为 $(8.80\pm0.17)$  ppm，低液位下为 $(8.79\pm0.13)$  ppm。使用单因素方差分析，得出 $P>0.05$ ，表明待装罐高液位、中液位和低液位下的牛奶溶解氧含量无显著统计学差异。基于上述数据分析可得，当液位由高至低，转速也相应下降时，3 种不同液位下牛奶溶解氧含量无显著统计学差异。这是由于待装罐搅拌转速随液位降低而递减（高液位70%~80%、中液位60%、低液位50%），该动态调控机制有效平衡了因液位下降导致的溶解氧含量升高趋势，从而维持其水平稳定。

| 表 3 待装罐不同液位对牛奶溶解氧含量的影响                                                                                               |      |              |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------|-------|
| Table 3 The Influence of Different Liquid Levels of the Filling Buffer Tanks on the Dissolved Oxygen Content of Milk |      |              |       |
| 搅拌方式                                                                                                                 | 取样液位 | 牛奶溶解氧含量(ppm) | P 值   |
| 70%~80% 转速                                                                                                           | 高液位  | 8.81±0.11    | 0.918 |
|                                                                                                                      | 中液位  | 8.80±0.17    |       |
|                                                                                                                      | 低液位  | 8.79±0.13    |       |

| 表 2 原奶储存罐不同液位对牛奶溶解氧含量的影响                                                                                           |                        |                        |                        |       |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|--------|
| Table 2 The Influence of Different Liquid Levels in Raw Milk Storage Tanks on the Dissolved Oxygen Content of Milk |                        |                        |                        |       |        |
| 搅拌方式                                                                                                               | 牛奶溶解氧含量 (ppm)          |                        |                        | F 值   | P 值    |
|                                                                                                                    | 高液位                    | 中液位                    | 低液位                    |       |        |
| 转速 50% 开启                                                                                                          | 8.74±0.18 <sup>c</sup> | 9.10±0.13 <sup>b</sup> | 9.55±0.42 <sup>a</sup> | 20.36 | <0.001 |

注：字母不同代表差异显著

3 讨论

3.1 搅拌参数对溶解氧的影响机制

基于2.1与2.2的分析结果，对比原奶储存罐与待装罐的2种搅拌工艺参数发现，液位变动时，恒定转速会导致牛奶溶解氧含量有显著差异，而随液位降低，动态调整转速可维持牛奶溶解氧含量稳定。此发现可为乳品企业优化搅拌工艺提供理论支撑；从湍流机制分析，搅拌产生的湍流会增加气液界面面积，加速氧气传递；液位降低时，相同转速下湍流强度增大导致牛奶溶解氧含量升高，动态降速则减弱湍流维持气液传质平衡。在实际生产中，乳品企业可采用动态调整，以避免因搅拌参数的无规律设定导致牛奶溶解氧含量升高，从而规避其对后续乳品保质期内品质产生不良影响。

3.2 搅拌工艺优化建议

动态调整搅拌转速以适配液位变化的策略可有效调控罐内牛奶溶解氧含量，避免其波动对后续灌装及产品质量造成负面影响；现代乳品加工设备可引入液位-转速联动控制系统，通过传感器实时监测液位数据，并据此自动调整搅拌电机的运行频率，其应用稳定性可达98%以上。该技术的应用有助于乳品企业显著降低牛奶溶解氧含量的波动，从而有效抑制其对产品保质期和品质的负面影响。

3.3 溶解氧对乳品品质的影响

牛奶溶解氧含量过高会促进其中需氧微生物的生长与繁殖，加速牛奶中脂肪氧化和蛋白质变性，进而对牛奶保质期内品质稳定性产生不良影响，引发异味、结块等不良感官体验。除搅拌工艺外，均质工艺会破坏乳脂肪球膜完整性，导致膜中磷脂类成分变化，进而影响脂肪球的保留<sup>[10]</sup>。该过程可促进游离脂肪酸的生成，其中不饱和脂肪酸因含较多碳碳双键，其自动氧化反应速率较高，易与溶解氧结合发生氧化反应，并生成醛酮类不良气味物质。对降低牛奶溶解氧含量的研究显示，在储存过程中，乳品中的溶解氧含量随时间呈递减趋势，蛋白质水解度逐步上升。相关性分析表明，褐变指数、

羰基含量、蛋白水解度与感官评分呈显著相关性，溶解氧含量与UHT纯牛奶储存期间感官品质变化存在关联，若溶氧含量较高，易引发蛋白质水解及脂肪分解等不良影响。

3.4 溶解氧控制策略

本研究相关策略结合牛奶溶解氧含量变化机制与实际生产条件，系统阐释了罐内高、中、低3种不同液位下牛奶溶解氧含量与搅拌转速之间的关系。实际上，除搅拌外，脱气工艺中的低温沸腾过程也是影响产品最终溶解氧含量的关键参数之一。作为关键环节，当脱气工艺中低温沸腾阶段温度控制在65~70℃、真空度维持在-0.09~-0.08 MPa时，可有效去除原料乳中约80%溶解氧；若温度低于60℃或真空度不足-0.07 MPa，脱气效率将降至50%以下。季节性因素对溶解氧含量的影响同样显著，夏季环境温度较高，生鲜乳在收集与运输过程中溶解氧吸收速率较冬季更快；冬季低温条件下，生鲜乳黏度增大，搅拌过程中氧气融入速率相应降低，但该工艺参数是否存在季节性调整需求，仍需进一步研究。

4 结论

本研究旨在有效控制牛奶溶解氧含量，减少因氧化导致的产品劣变，降低原料损耗与返工成本，提升成品货架期稳定性及市场竞争力。这一动态调整策略突破了传统恒定转速模式的局限性，为乳品加工工艺优化提供了关键理论依据。同时，本研究存在一定局限性，因此，在后续生产研究中，有必要进一步探究从生鲜乳至成品全加工过程中的其他影响因素，从而为乳品企业提供更全面的溶解氧含量管控建议。试验未全面覆盖乳品生产全流程，仅聚焦搅拌工序，未深入分析脱气、均质等其他环节对溶解氧含量的影响机制，也未探讨季节性因素（如夏季原料乳溶解氧吸收速率加快、冬季黏度增大影响氧气融入）及脱气工艺参数（如低温沸腾温度、真空度）的季节性调整需求。后续研究可探索脱气工艺与搅拌参数的联合优化，构建全流程溶解

氧管控体系，为乳品企业提供更精准的品质提升策略，构建坚实的理论依据与实践指导。

参考文献

[1] 李泽鹏.UHT纯牛奶光氧化特性及其包装货架期研究[D].无锡：江南大学，2023.

[2] 习鸿杰.常温酸奶/UHT纯牛奶包装货架期预测[D].无锡：江南大学，2023.

[3] Jiang S, Luo W, Peng Q, et al.Effects of flash evaporation conditions on the quality of uht milk by changing the dissolved oxygen content in milk[J].Foods, 2022, 11（15）： 2371-2387.

[4] 桂仕林，邢慧敏，郭利春，等.包装类型对牛奶溶氧量的影响研究[J].农产品加工，2012，（10）： 67-69，73.

[5] Larsen N, Werner B B, Vogensen F K, et al.Effect of dissolved oxygen on redox potential and milk acidification by lactic acid bacteria isolated from a DL-starter culture[J].Journal Dairy of Science, 2015, 98（3）： 1640-1651.

[6] Harwood WS, Carter B G, Cadwallader D C, et al.The role of heat treatment in light oxidation of fluid milk[J].Journal Dairy of Science, 2020, 103（12）： 11244-11256.

[7] Mestdagh F, De Meulenaer B, De Clippeleer J, et al. Protective influence of several packaging materials on light oxidation of milk[J].Journal Dairy of Science, 2005, 88（2）： 499-510.

[8] 张清阳，白莹，王少雷，等.牛奶光氧化感官评价的影响因素探究[J].中国乳品工业，2021，49（12）： 28-32.

[9] 中华人民共和国卫生部.GB 19301—2010 食品安全国家标准生乳[S].

[10] 王鑫，于景华，赵亭亭，等.基于乳脂肪球膜结构以提高液态乳体系的稳定性：乳脂肪球膜构建机制综述[J].食品科学，2025，46（2）： 2308-2316.