半固态食品精准定量灌装技术与装备研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.3002

卢天齐 [1,2] 李永辉 [1,2]
秦琛强 [1,2] 王世光 [1,3]
黄政霖 [2,3] 吕黄珍 [1,3]

1. 中国包装和食品机械有限公司
北京 100083
2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司
北京 100083
3. 农业农村部农产品加工装备重点实验室
北京 100083

摘 要: 半固态食品作为非牛顿流体，具备高黏度、触变性等复杂流变特性，这使灌装过程的稳定性与精度对物料黏度、固形物颗粒分布以及内部流场参数等关键因素的波动极为敏感。因此，深入分析灌装过程机理，并据此研发能够实现精准控制的高性能装备，已成为该领域的研究重点。本文从灌装机理和方法、过程模拟及智能化控制等方面，系统综述半固态食品灌装技术及装备的研究进展。针对当前存在的物料兼容性差、工况稳定性不足等挑战，进一步明确了未来研究方向：需加强动态流变监测，深化多物理场耦合模拟研究，集成全链条智能控制系统，并推动装备柔性化升级。

关键词： 半固态食品；灌装机理；流变特性；数值模拟；智能控制
中图分类号： TS202.1；TB486 **文献标志码：** A
文章编号： 1674-7100(2026)03-0014-11
引文格式： 卢天齐，李永辉，秦琛强，等 . 半固态食品精准定量灌装技术与装备研究进展 [J]. 包装学报，2026，18(3)：14-24.

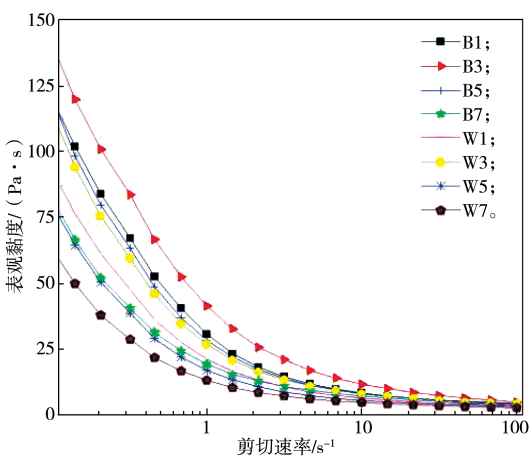
食品种类丰富，依据黏度差异可分为液态、半固态与固态 3 类。黏度低于 1000 mPa·s 的液态食品，具备良好的流动性，可依靠重力灌装 [1]。黏度介于 1000~100 000 mPa·s 之间的半固态食品，包括各类酱体、膏体、凝胶类及糜状等食品，固形物含量 15%~80%，其物理状态易受温度与剪切力影响，灌装时需施加外部压力 [2]。黏度高于 100 000 mPa·s 的固态食品，呈现粉体或固体特性，可机械输送。半固态食品的流变特性介于理想液体与完全弹性固体之间，表现出独特的黏弹双重特性。此外，半固态食品的双相、热敏、高黏度等特性，使其加工处理与液、固态食品存在显著差异。

通过自动化系统实现半固态食品的连续定量灌装，既能保障物料的卫生安全、减少物料损耗，又能满足多样化包装规格需求 [3-4]。目前，半固态食品灌装面临如下难点 [5-6]：一是受温度与剪切力的影响，物料内部结构被破坏，致使物料的均匀性差、定量不准；二是物料的黏稠性易引发挂壁、拉丝现象，且含颗粒物料在灌装过程中易堵塞管道；三是控制系统的时延与非线性特征难以精准补偿，会直接放大控制误差。国内外主要从以下两个方面攻克上述难题：一是通过数值模拟与仿真优化装备结构，以解决滴漏、计量偏差与物料堵塞等问题；二是构建融合传感器与机器学习算法的智能化控制体系，以实现参数实时调控，提升生产稳定性与柔性。基于此，本研究从机理、装备、过程模拟和智能控制 4 个方面，对半固态食品灌装领域的最新研究成果进行系统性梳理，重点剖析灌装设备的局限性、阐释数值模拟的作用、总结智能控制的应用情况，以期为半固态食品灌装行业的发展提供理论参考。

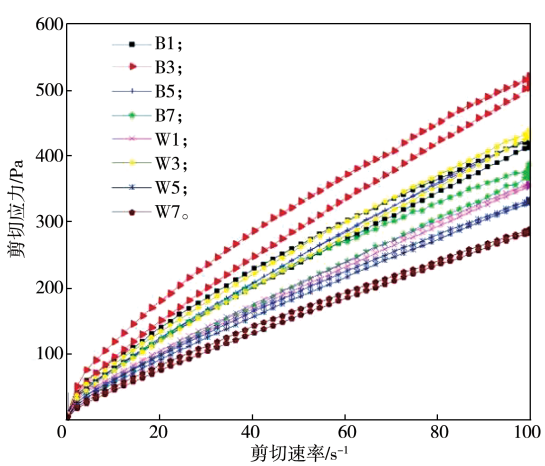
收稿日期： 2025-11-07
基金项目： 国家重点研发计划项目（2022YFD2100403-2）
作者简介： 卢天齐，女，博士生，高级工程师，主要从事农产品加工与贮藏技术装备研究，E-mail：1812889416@qq.com
通信作者： 吕黄珍，男，研究员，博士生导师，主要从事农产品加工与贮藏技术装备研究，E-mail：lvhz@caams.org.cn

1 半固态食品灌装机理

灌装机理基于流变特性揭示物料流动与变形规律，是工艺优化与装备设计的理论核心[7]。流变特性与食品成分、内部结构密切相关[8-10]。流体按剪切应力与变形率之间的关系，可分为牛顿流体与非牛顿流体，后者包括宾汉流体、假塑性流体及膨胀性流体等类型[11-13]。半固态食品属于非牛顿流体，其黏度、屈服应力等参数直接决定灌装流态与定量规律。图 1[14]直观展现了不同品种黑、白芝麻酱的流变特性，体现出其黏度与触变性的差异。因此，在半固态食品灌装中，物料复杂的流变特性与灌装机理的不匹配，是导致均匀性欠佳、定量精度较低等问题的根源[7]。



a）表观黏度与剪切速率的关系



b）触变性曲线

注：B1 为小南关黑芝麻；B3 为吉林黑芝麻；B5 为鄱阳黑芝麻；B7 为市售黑芝麻；W1 为皖芝 9 号白芝麻；W3 为周 10J5 号白芝麻；W5 为郑芝 13 号白芝麻；W7 为市售白芝麻。

图 1 不同品种黑、白芝麻酱的流变性能

Fig. 1 Rheological characteristic curves of different varieties of black and white sesame seeds

黏度是流变特性的核心参数，其剪切稀化和温敏特性直接影响灌装流动稳定性。研究表明，假塑性半固态食品黏度随剪切速率升高呈显著下降趋势。在 10~100 s^{-1} 区间内，果酱的黏度降幅达 80%[15]，高浓度花生酱的黏度降低 60%[16]。该特性会导致灌装流速非线性升高，若未通过实时调节泵体转速或阀体开度予以补偿，极易造成单次灌装量误差超标。此外，在低温环境下，物料黏度骤升，可能引发流道堵塞，需通过优化阀口过流速度抑制黏度的异常波动。由此可见，在流速调控机理的研究中，还需综合考量温度对黏度的影响，构建“温度－黏度－流速”灌装机理耦合模型，通过动态调整灌装时间或泵体压力，以应对温度对流速的影响，进而为提高定量精度提供保障。

屈服应力是物料启动流动的最小剪切应力，直接决定灌装动力系统设计阈值。相关实验显示，芝麻酱、芝麻花生酱及花生酱的屈服应力在 7~10 Pa[17] 之间，且对应不同的泵体压力。当动力参数值低于屈服应力阈值时，食品易在管道“死区”堆积，形成残留层，这不仅对灌装精度产生影响，还存在一定的安全风险。因此，通过旋转流变仪预先测定屈服应力，进而推导泵体压力、阀体开启力等关键参数，可实现动力与物料的精准匹配。

触变性对半固态食品动态定量补偿机制具有直接影响。触变性指的是物料在受到剪切作用时，其内部结构会遭到破坏，而在剪切停滞后，需经过一定时间才能恢复至原有结构的流变特性[17]。因此，需引入“剪切时间－黏度”预测模型，通过实时调节灌装时间或阀口开度来补偿黏度波动。例如，对触变性强的芝麻酱采用“前慢后快”流速控制策略，以确保定量灌装精度。黏弹性会导致物料在流道中发生弹性回缩，进而引起阀口拉丝和挂壁残留。前者容易造成物料损耗与容器污染，后者则容易滋生微生物。故采用“渐缩－扩张”型阀口结构[18]设计流道，可降低物料弹性形变。

综上所述，半固态食品灌装机理的本质是流变特性驱动的流动与控制规律。以流变参数为基础解析灌装全流程的动力学行为，是解决灌装均匀性差、定量精度低等技术难题的根本途径。

2 半固态食品灌装装备研究

灌装装备通过自动化计量、充填机构实现物料

精准灌装，通常由定量缸、伺服电机等部件组成（见图 2）[2]。其分类方式具有多样性，依据物料定量方式可划分为流量式灌装机、称重式灌装机、容积式灌装机；按照灌装原理可分为常压灌装机、等压灌装机、负压灌装机、压力灌装机；根据物料排列形式可分为直线式灌装机与回转式灌装机。各类装备的原理、应用范围及精度差异显著（见表 1）[19−25]。本研究以应用最广泛的物料定量方式展开论述。

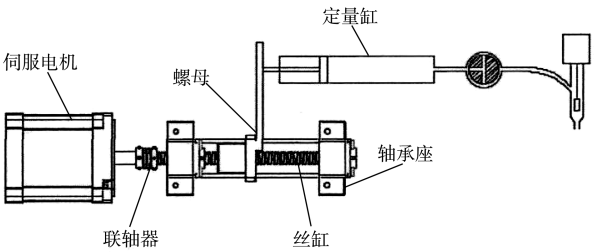


图 2　灌装装备结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of filling equipment structure

表 1　灌装装备分类

Table 1　Classification of filling equipment

分类依据	灌装机类型	基本原理	应用范围	特　点
物料定量方式	流量式灌装机	实时监测物料瞬时流量，结合时间参数计算累计流量，实现定量灌装	番茄酱、果酱、带果肉饮料等含少量颗粒混悬液，蜂蜜、糖浆等高黏度半流体物料	具有响应迅速、易于与自动化系统集成的优势[26−31]；精度±（0.5%~2.0%）；对于易产生大量泡沫、流动性极差或含有大颗粒的物料，可能因流量检测失真或管道堵塞，导致精度下降
	称重式灌装机	基于称重传感器实时监测容器内物料重量，当达到预设值时，控制系统触发灌装阀关闭[5, 32−34]	原浆、植物油等半流体及膏状物料，尤其是高价值或质量管控严格的物料	精度±（0.1%~0.5%）；不受物料密度、黏度或温度的影响
	容积式灌装机	以固定容积为基准，通过机械结构控制每次灌装物料体积	适用物料范围较广，适合对黏度变化不敏感或计量精度要求较高的场景	精度±（0.5%~1.0%）；灌装量仅由预设容积参数决定
灌装原理	常压灌装机	依靠物料自身重力自动流进包装容器，灌装系统在敞开状态下工作	适用于乳品、调味品等低黏度物料	精度±（1%~3%）；物料损伤小，结构简单，成本较低
	等压灌装机	通过储液箱上部气室的压缩气体对空容器充气，使容器内外压力平衡，物料在密闭系统中靠自重流入	适用范围较广	精度±（0.5%~2.0%）；减少物料与空气的接触
	负压灌装机	利用待装物料与容器排气口的压力差实现灌装	适用于不含气或低含气量的果汁等物料	精度±（1%~3%）
	压力灌装机	利用外部机械压力将物料充填到包装容器内	适用于不含气的高黏度、半流体等难以靠自重流动的物料	精度±（1%~2%）
物料排列形式	直线式灌装机	间歇式步进输送	适用于膏体、半流体等物料，不同形态的物料对应不同的灌装结构	结构简单，调整方便，易实现清洗和维护，生产效率较低，适合小批量、多品种生产；灌装精度受输送方式影响，一般在±（1%~3%）
	回转式灌装机	通过旋转工作台带动容器同步运动，在旋转过程中完成定位、灌装、止灌等一系列动作	广泛应用于饮料、调味品等物料	连续化大批量生产、高精度灌装，生产效率高，适应多种瓶型；灌装精度一般在±（0.5%~2.0%）

图 3 是典型称重式灌装试验平台[32]。与容积式灌装机相比，称重式灌装机精度更高，然而其成本与维护难度较大，且效率相对偏低；与流量式灌装机相比，称重式灌装机精度更为稳定，并且适用于高黏度含颗粒的物料，但容易受到容器质量波动的影响。

容积式灌装机通过固定容积的计量腔（如活塞、齿轮泵、量杯等）实现物料定量灌装[35−37]。该方法分为定量泵、定量杯、控制液位 3 种类型，其基本原理与特点见表 2[20, 38−39]。

定量泵包括活塞泵、柱塞泵、转子泵等类型，其性能存在显著差异（见表 3）[2, 20, 40−50]。

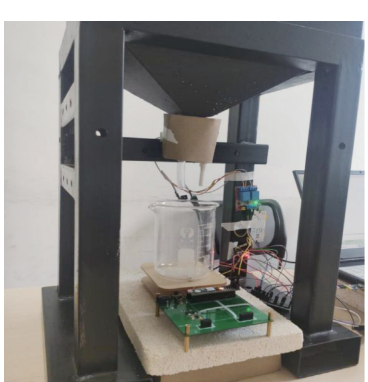


图 3　称重灌装试验平台

Fig. 3　Weighing and filling experiment platform

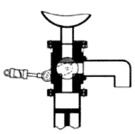
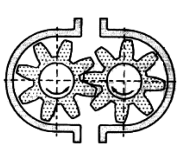
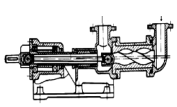
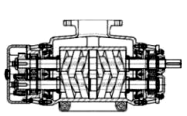
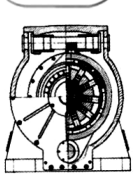
表 2　容积式定量法分类

Table 2　Classification of volumetric quantitative method

灌装方法	基本原理	应用范围	特　点
定量泵定量法	通过转速或行程等控制，实现对物料的精准定量灌装	适用于多种黏度的物料，包括部分含颗粒的物料	精度±1%，定量调节灵活，依靠机械结构实现定量，稳定性较强
定量杯定量法	将物料注入定量杯实现灌装，通过改变调节管高度或更换定量杯调整灌装量	适用于低黏度、流动性好且不含气的物料	精度±0.5%
控制液位定量法	通过控制容器内液位高度实现定量灌装	适用于对定量精度要求不高、容器规格统一的物料灌装	精度±（2%~3%），设备结构简单，应用范围广泛

表 3　不同定量泵的性能对比表

Table 3　Comparison of performance of different quantitative pumps

类　型	装置简图	基本原理	混合性能	应用范围	特　点
活塞泵		通过往复式活塞运动实现灌装	混合能力弱，适合单一均质物料	水、油、化学品等低黏度物料	精度±（0.5%~1.0%），结构简单，易拆卸维护
柱塞泵		通过往复式柱塞运动实现灌装	混合能力弱，适用于无混合需求场景	酱料等高黏度液体及含少量细小颗粒物料	精度±（0.1%~0.5%），结构简单，易拆卸维护
转子泵		转子与泵腔形成固定容积腔室，通过转子旋转实现输送	混合性能中等	酱料、泥浆等中高黏度液体及含颗粒物料	精度±（1%~2%），结构复杂，部件加工要求高，拆卸难
齿轮泵		齿轮啮合挤压输送	混合能力弱，无主动混合能力	油类等低中黏度无颗粒或少量小颗粒物料	精度±（1%~2%），结构简单，易拆卸维护
单螺杆泵		螺杆与定子形成密封腔，螺旋推动输送	混合能力弱，仅适合低黏度、均质物料	米面制品等低黏度、均质物料	精度±（1%~3%），设备成本低，维护简单
双螺杆泵		啮合螺杆反向转动，将物料经密闭腔室实现输送	混合能力强，适合分布混合	聚合物等高黏度、高填充、热敏性及复杂反应物料	精度±（0.5%~1.5%），受物料和场景影响，结构复杂，需专业拆卸
蠕动泵		通过滚轮挤压软管实现输送	无混合作用，物料可保持原有状态	高纯度、易污染、含少量颗粒物料	精度±（1%~3%），易受软管弹性和磨损的影响，结构简单，仅需更换软管
正弦泵		通过转子与弹性定子的协同作用，形成连续的正弦波运动，进而实现物料输送	混合能力强，可兼顾物料输送与特定工况下的物料状态保持	可处理高黏度、含固相颗粒的物料	流量脉动小、压力稳定，具有超低剪切、长寿命和高可靠性优势

定量杯定量法因具备较高的精准度、简易的机械构造以及良好的经济性而受到广泛关注。但该方法采用固定容腔，难以补偿含气物料的体积变化，故而成为低黏度、流动性好且不含气体的物料灌装生产线的首选方案。通过优化定量杯的调节结构，可显著提升调节精度与使用便捷性，以更好满足不同场景的定量

需求 [51]。

控制液位定量法是食品、饮料等行业灌装生产中常用的定量方式，具有结构简单、成本低、操作便捷等优点。但该方法存在明显局限：容器规格偏差、物料起泡或黏度变化，均会影响灌装精度；进行小容量灌装时，液位微小误差易造成较大定量偏差。

相关研究也提出了创新的定量方案。S. M. H. Muhammad 等 [52] 研发了基于 Arduino 的超声波传感灌装系统，实现了自动化定量；胡飞 [53] 提出了容积－称量双效计量技术，以提升黏稠物料灌装速度与精度。

表 4 对适配半固态食品的灌装方式及其选择依据进行了汇总，可为实际生产提供参考。

表 4　适配半固态食品的灌装方式汇总表

Table 4　Summary of filling methods adapted for semi-solid foods

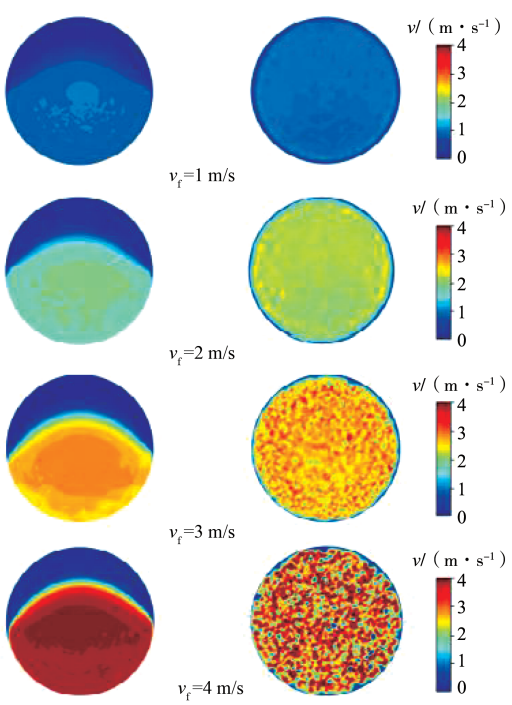
灌装方式	适用物料	选择依据
压力式灌装	高黏坚果黄油、呈牙膏状的食品、具有热敏性的果胶凝胶等	解决流动难题；防滴漏喷溅；保护物料品质
容积式定量灌装	中低黏度且无大颗粒的物料，如芝麻酱、蛋黄酱、番茄酱、甜面酱、豆腐柴叶果胶凝胶等	适配高黏物料；兼容细小颗粒
称重式定量灌装	高价值、含大颗粒或黏度波动大的物料，如坚果酱（含核桃碎）、多颗粒态油辣椒、婴幼儿辅食（含肉糜）等	避免密度、黏度干扰；适配大颗粒物料；修正挂壁误差
容积－称重组合式定量灌装	含颗粒的高黏酱料，如香菇牛肉酱、黏度波动大的复合酱料等	兼顾效率与精度；适配复杂流变

3　半固态食品灌装数值模拟研究

数值模拟是通过计算模型获取物料流动的速度、压力等物理量的时空分布，进而揭示流场特性与边界作用 [18, 54-56]，广泛应用于固液混合领域 [57-60]。在灌装技术研究中亦取得系列成果，主要体现在流动特性分析与设备结构优化两方面。

3.1　流动特性分析

数值模拟为深入理解复杂流动过程提供了有效手段，在固液混合与灌装工艺优化中发挥了重要作用。李仁祥等 [55] 针对深海矿产开发中涉及的水平、垂直及倾斜管道内固液混输问题，采用数值模拟研究，实现了对超长管道内高雷诺数颗粒输运现象的模拟，得到了管道内颗粒和流场的速度及粒子分布等流动特征，其固相与液相的速度云图如图 4 所示。在灌装过程方面，杨明涛 [18] 针对 5 种变径结构的液体灌装管道开展建模分析，发现 150° 管道为最优结构，并且变径过程越平缓，灌装效果越佳；进一步明确了影响灌装效果的主次因素以及最优参数组合，揭示了不同形状喷嘴内部的流动特性与压力分布情况（见图 5）。吕帅等 [61] 对灌装装置内带颗粒黏稠物料的流场进行了模拟分析。结果表明，当颗粒浓度为 35%、颗粒大小为 3 mm、灌装量为 16.8 L/min 时，灌装阀内流场更稳定，有利于实现高质量灌装。周游 [62] 研究了水力输送固液两相流动特性，发现在竖直管中，输送速度增加会强化颗粒向管中心聚集；在 60° 倾斜管内，随着输送速度增加，颗粒轴向速度增加，且颗粒逐渐分散，压降和总能耗急剧增加。唐术等 [56] 对油辣椒灌装问题展开研究，发现提高物料输送速度在一定程度能提升管道内固体颗粒混合的均匀性。可见，基于数值模拟的流动特性分析，能够有效揭示物料在加工与输送过程中的动态行为，为优化生产工艺、调控操作参数、改善产品品质提供了重要参考。



a）固相速度云图　　b）液相速度云图

图 4　固相和液相的速度云图

Fig. 4　Velocity contours of solid and liquid phases

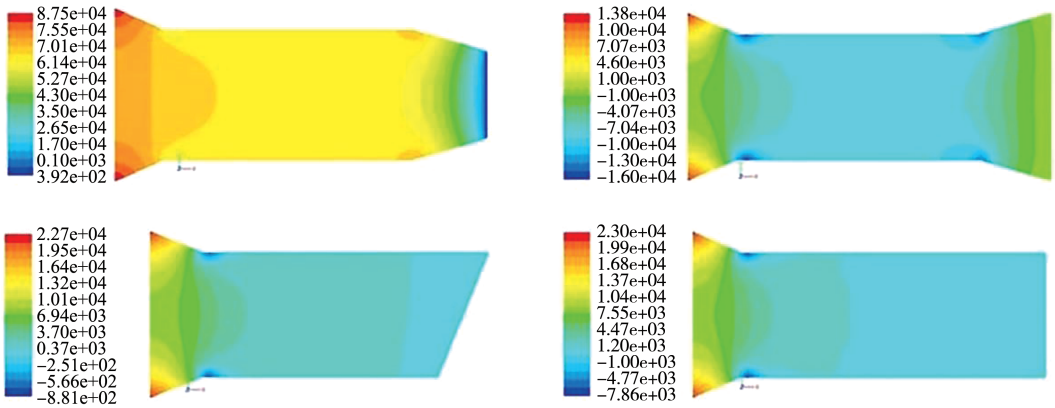
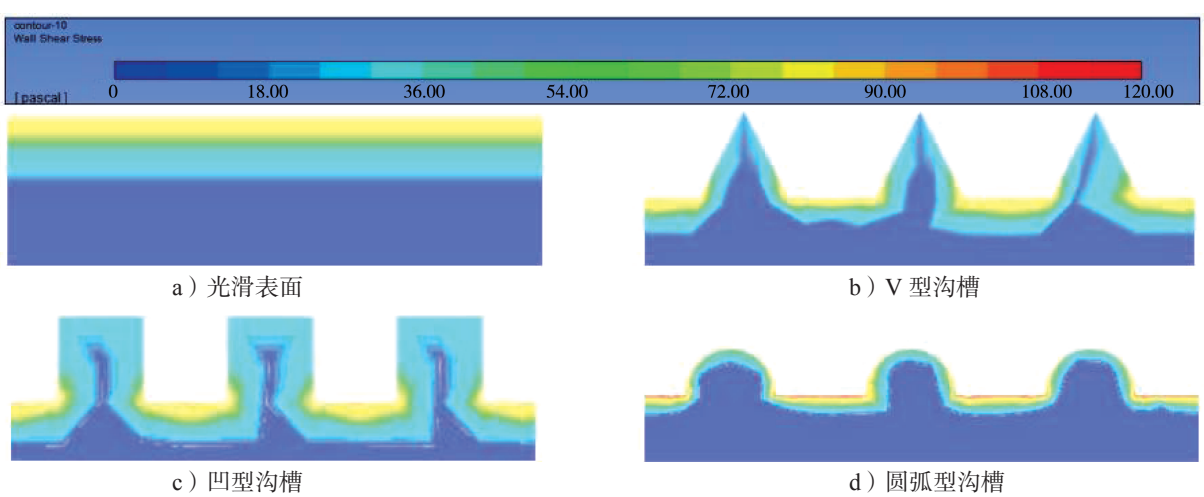


图 5　不同喷嘴的压力分布云图

Fig. 5　Contour of pressure distribution of different nozzles

3.2　结构设计与优化

在灌装装备的结构设计与优化中，邓桓 [63] 通过仿真分析了沟槽形貌（V 型、凹型、圆弧型）对酱料流动阻力的影响，发现 3 种沟槽管道均比光滑管道能够减少输送阻力，槽宽为 1~2 mm 时阻力随流速增加而降低（见图 6）；唐术等 [56] 针对辣椒油输送问题开展模拟，发现减小三通管支管夹角有助于降低压力损失与局部能量损耗，从而延长管件使用寿命；王雨欣等 [64] 基于数值模拟，突破传统圆柱形喷嘴结构，提出采用锥形渐缩段与出口扩张段的设计，以降低能量损失并提升射流性能；石伟超 [46] 构建圆弧和摆线两种型线转子泵模型并进行流动特性仿真分析。研究结果表明，圆弧型线使转子泵性能更优，当间隙大于 0.25 mm 时可输送黏度高达 500 000 mPa·s 的物料。基于数值模拟的设备结构设计与优化，可显著缩短研发周期并降低整体成本。



a）光滑表面　　b）V 型沟槽

c）凹型沟槽　　d）圆弧型沟槽

图 6　近壁面剪切应力云图

Fig. 6　Contour of near-wall shear stress

在灌装装备设计合理性验证方面，数值模拟同样发挥了关键作用。徐锦华等 [45] 以牙膏灌装机构为研究对象，通过模拟分析发现，牙膏流速随管道截面积减小而增大，在最大灌装速度 0.337 m/s 下，所需推力为 1681 N（见图 7），这为灌装机的结构设计提供了依据；黎光辉 [65] 对黏稠膏体（牙膏、洗面奶和护手霜）进行灌装流动仿真，依据最高生产速度和最大灌装容量下的最大灌装推力数据，对灌装推杆做静力学分析，进而分析灌装推杆发生的变形量，由此评估灌装机设计的合理性。数值模拟为装备设计方案合理性的验证提供了科学、可靠的技术支撑。

数值模拟作为研究两相流问题的重要方法，具有成本低廉、周期短等优势。同时，与试验方法相结合，可弥补传统试验周期长、精度低的局限 [66]。因此，借助数值模拟对半固态食品在灌装通道内的流动特性展开分析，能够进一步优化阀口直径、泵体结构等

关键组件，进而减少堵塞现象，提升灌装精度与效率。

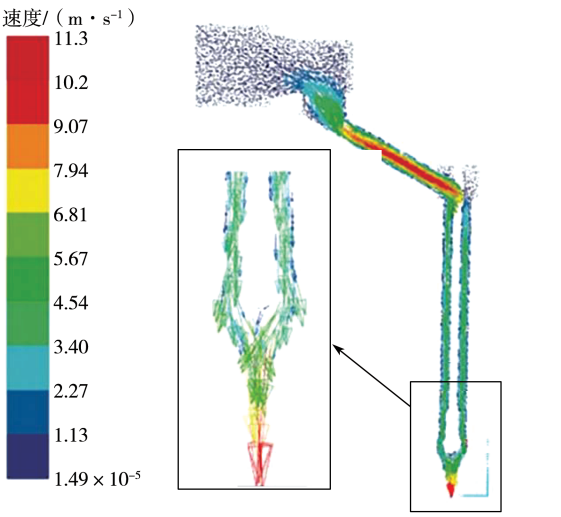


图 7　牙膏灌装速度流场矢量图

Fig. 7　Speed vector diagram of toothpaste filling speed and flow field

4　半固态食品灌装装备的智能化控制研究

智能化控制是食品灌装装备的重要发展方向，在提效降本、精准定量灌装、优化工艺流程及保障产品质量等方面具有显著成效[67]。现阶段的研究主要围绕两个方面：一是对灌装工艺参数进行精确控制，以提升生产效率；二是建立预测模型，以实现更精准的过程控制。

4.1　灌装控制系统

目前，针对半固态食品灌装装备的智能控制系统基本实现了灌装量的实时动态监测与控制。根据核心控制器的不同，主流技术路线可分为可编程逻辑控制器（PLC）、树莓派、复合控制等类型。

4.1.1　基于 PLC 的控制系统

PLC 以其高稳定性、强抗干扰能力和灵活的编程特性，已成为流体灌装机控制系统的主流方案。金银城等[68]针对高黏度液体易喷溅问题，开发了基于 PLC 的全自动灌装机，采用潜流式灌装方法，优化流体出口流动状态，实现防喷溅、防滴漏。张柯、魏孔贞等[69−70]将 PLC 应用于通用饮料灌装作业。此类系统能按设定流量注料，当称重模块检测到重量达标时，立即控制电磁阀关闭，在保障效率的同时，兼顾了注料精度。

PLC 广泛应用于高黏度物料、含颗粒物料及通用物料灌装场景。然而，PLC 控制系统存在对非线性系统适应性弱、复杂任务处理能力不足及智能化程度不高等局限性[30, 71]。

4.1.2　基于树莓派的控制系统

为满足特定场景下的低成本与轻量化需求，将树莓派等微型计算机应用于控制系统中。李学基等[5]针对高黏度流体的小批量灌装需求，设计了通过树莓派控制气动隔膜泵的方案。当称重达到设定值时，树莓派立即输出信号关闭隔膜泵，完成定量控制。该系统结构简单、成本低廉，在中小型高黏度流体灌装场景中具有较强的实用价值。基于树莓派的控制系统为低成本自动化方案提供了参考，但在工业环境适应性、实时控制性能以及扩展能力方面存在一定局限[72]。

4.1.3　复合控制系统

对于物料特性复杂（如高黏度、密度不稳定等）的灌装场景，采用伺服驱动与称重反馈相结合的复合控制系统成为有效解决方案。杨政通等[4]构建了颗粒黏稠物料自动灌装机控制系统，通过半闭环伺服系统控制计量缸活塞位移，以保障初步灌装量，并在灌装末端加入称重反馈装置，以实时监测实际灌装质量。龙飞帆等[3]设计的多颗粒态油辣椒灌装机控制系统（见图 8）是一个典型方案。该方案通过 PLC 控制伺服电机进行螺旋下料，以实现颗粒的定量供给，并运用刮板确保颗粒供给量的一致性；同时，油液采用在线补偿并配合称重反馈，形成质量闭环控制。该方案在固体含量高达 63.6% 时，实现了 100% 的灌装合格率。该类系统重点解决了高黏度、密度波动物料的灌装精度问题，但也面临灌装速度慢、动态响应滞后、多变量干扰抵御能力弱等问题[73−74]。

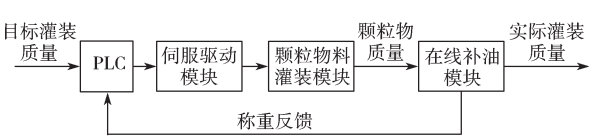


图 8　多颗粒态油辣椒灌装机的控制流程图

Fig. 8　Control flow chart of multi-particle chili oil filling machine

4.2　灌装预测控制模型

传统 PID 控制器具备安全可靠、鲁棒性高等优点[39]。但传统控制系统在处理复杂流体特性及动态灌装环境时，存在响应滞后、超调及参数固化等问题，难以满足高精度、低损耗及智能化的要求。为此，学者们尝试引入智能预测控制算法，以优化灌装控制系统的精度与适应性。

目前，基于模糊神经网络、遗传算法等改进的PID方案虽在一定程度上提升了控制性能，但未能从根本上突破PID控制的局限。例如，刘伟[75]提出的基于模糊神经网络的PID控制系统（见图9），在饮料灌装作业中，灌装质量的最大偏差可达1.7 g，此算法难以满足高精度灌装场景需求；Xiao L. Q.等[76]提出的基于遗传算法的PID控制系统，仍未解决复杂工况下参数自适应调整的鲁棒性问题；乔海晔[77]所提出的基于模糊神经网络的PID自校正系统，虽提升了补灌精度，但其控制逻辑仍依赖PID结构，对非线性、时变系统的适应能力有限。

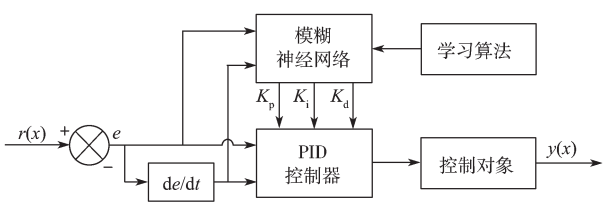


图9　基于模糊神经网络的PID液位控制流程图

Fig. 9　Flow chart of PID liquid level control based on fuzzy neural network

为进一步突破传统控制瓶颈，现代控制理论与人工智能的深度融合催生了神经网络预测控制（neural network predictive control，NNPC），为灌装控制提供了全新的解决方案。深度学习的融入使NNPC在复杂工业系统控制领域展现出显著优势。经典神经网络模型包括反向传播神经网络（back propagation neural network，BP）、径向基函数神经网络（radial basis function neural network，RBF）、循环神经网络（recurrent neural network，RNN）及长短时记忆网络（long short-term memory，LSTM）等。不同网络结构具备不同优势，如：RBF网络具有较强的局部逼近能力，适用于快速动态响应场景；LSTM网络的时序记忆特性可精准捕捉灌装过程中的时变干扰。在黏稠食品灌装、液体灌装控制及液压系统流量测量领域，多种预测模型已展现出良好的应用效果。孙琳[74]提出了基于LSTM-Attention的黏稠食品灌装流量检测模型（见图10），以解决RNN在训练过程中可能出现梯度消失的问题。此模型以压力、压差、温度、流动噪声及物料黏度为输入，实现累计流量输出预测。相比RNN模型，此模型在测试集的均方根误差为0.1265，降低了75.13%，训练时间仅需113.84 s，缩短了28.70%。张昌凡等[30]针对黏稠食品灌装流量高精度检测难题，提出基于LSTM-Attention的实时检测方法。经自适应矩估计优化后的LSTM-Attention模型流量检测精度更高、实时跟踪效果更好。周洁等[78]针对传统灌装定量控制方法存在控制稳定性不高、控制精度较差等问题，引入RBF神经网络用于高精度灌装定量控制。洪琳[79]提出了基于BP神经网络的动态流量软测量方法，以提高流量在线测量精度。Ke W. S.等[80]提出基于LSTM的软测量建模方法，成功解决工业过程中的动态性问题。

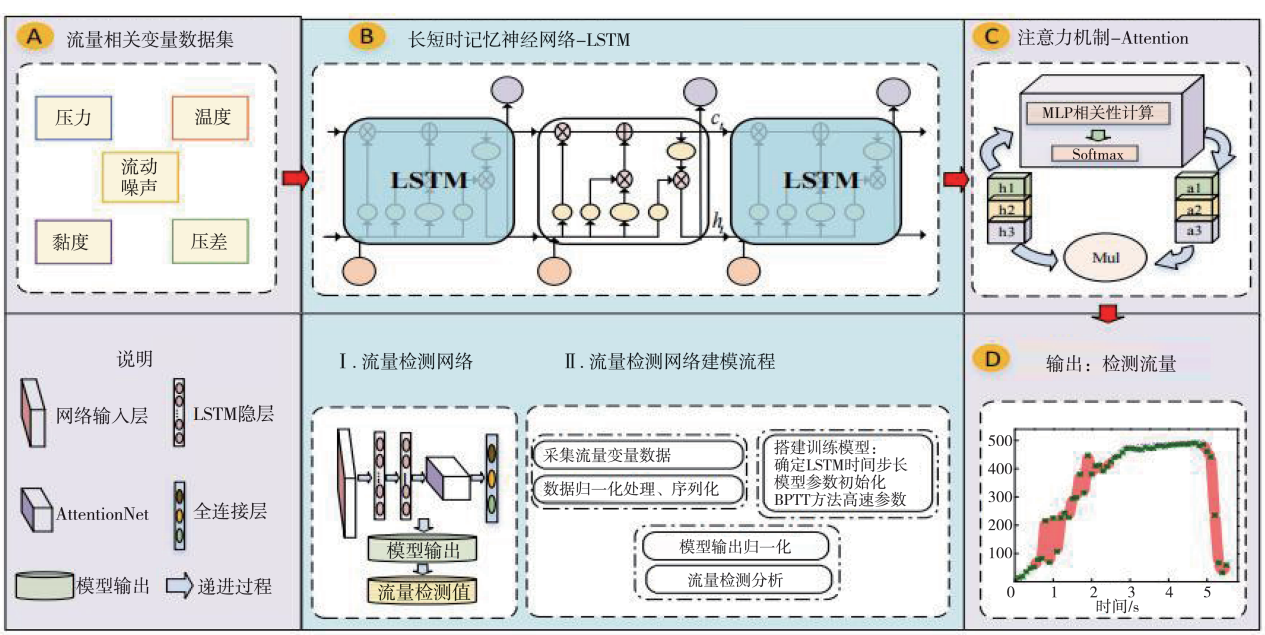


图10　基于LSTM-Attention灌装流量检测总体框架图

Fig. 10　Frame of filling flow detection model based on LSTM-Attention

综上所述，在半固态食品灌装系统的智能化升级进程中，构建以流变学机理为核心的灌装参数智能预测模型，已成为实现精准定量控制的关键方向。基于模型的定量预测方法，不仅为生产线的实时动态调控与前馈补偿提供了可靠的理论基础与决策支持，更在实践中显著提升了灌装的体积 / 重量精度与整线生产效率。这高度契合了现代食品工业对柔性化、智能化及高精度制造的核心需求。

5 结论与展望

现有研究表明，半固态食品灌装技术的研究需围绕流变特性、装备技术、数值模拟、智能化控制等方向展开，并通过多技术协同实现整体优化。半固态食品的黏度、屈服应力等核心流变参数受加工条件与添加剂影响显著，构成了流场仿真、装备设计与精准灌装实现的理论基础。在装备方面，容积式、称重式等定量方式与压力式等结构设计相结合，已形成针对不同精度要求、物料价值与生产规模需求的场景化适配格局；组合式定量技术则为高黏稠物料灌装提供了创新路径。数值模拟技术能够有效揭示物料流动规律与堵塞机制，显著缩短装备研发周期。智能化控制体系则逐步解决了系统时延与非线性问题，显著提升了灌装精度与效率。

未来，通过深化流变 - 工艺耦合、拓展多物理场仿真、构建智能控制系统等，推动技术向高精度、高效及智能化升级；同时融合新型驱动与模块化设计，提升装备柔性化与响应能力，为行业高质量发展提供系统化技术支撑。

参考文献：

[1] 熊家慧 . 基于 PLC 实现酱料灌装机生产线控制系统设计 [J]. 自动化技术与应用，2019，38(6)：24-28.
[2] 丁春龙 . 黏稠物料计量灌装技术研究与装置开发 [D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学，2019.
[3] 龙飞帆，李荣隆，刘 芳 . 多颗粒态油辣椒物料自动灌装机控制系统研究 [J]. 食品与机械，2020，36(7)：114-116，174.
[4] 杨政通，李少波，何 玲，等 . 颗粒黏稠物料自动灌装机控制系统研究 [J]. 食品工业，2016，37(7)：234-236.
[5] 李学基，吕伟珍，罗 洋，等 . 基于树莓派的高黏度流体灌装系统设计与实现 [J]. 工业控制计算机，2023，36(4)：16-18.
[6] 李玉霞，宫 哲，雷志伟，等 . 旋转式自动灌装装置 [J]. 机械工程与自动化，2021，50(3)：128-129.
[7] 杨福馨 . 灌装机械中黏性流体断流机理与技术研究 [D]. 上海：东华大学，2011.
[8] ZHOU L Y，GUAN Y J，BI J F，et al. Change of the Rheological Properties of Mango Juice by High Pressure Homogenization[J]. LWT-Food Science and Technology，2017，82：121-130.
[9] AUGUSTO P E D，FALGUERA V，CRISTIANINI M，et al. Influence of Fibre Addition on the Rheological Properties of Peach Juice[J]. International Journal of Food Science & Technology，2011，46(5)：1086-1092.
[10] CHHABRA R P. Non-Newtonian Fluids：An Introduction[M]. Berlin：Springer，2010：3-34.
[11] IONESCU C M，BIRS I R，COPOT D，et al. Mathematical Modelling with Experimental Validation of Viscoelastic Properties in Non-Newtonian Fluids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A：Mathematical，Physical and Engineering Sciences，2020，378(2172)：20190284.
[12] AZIZ T，MAHOMED F M，MASON D P. A Unified Compatibility Method for Exact Solutions of Non-Linear Flow Models of Newtonian and Non-Newtonian Fluids[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics，2016，78：142-155.
[13] BARMAN P C，KAIRI R R，DAS A，et al. An Overview of Non-Newtonian Fluid[J]. International Journal of Applied Science and Engineering，2016，4(2)：97-101.
[14] 刘素慧 . 复合芝麻酱制备技术研究 [D]. 郑州：河南工业大学，2019.
[15] 于 甜 . 软质食品流变学特性及测量方法的研究 [D]. 青岛：中国海洋大学，2012.
[16] SHUAI X X，LI Y，ZHANG Y H，et al. Gelation of Whole Macadamia Butter by Different Oleogelators Affects the Physicochemical Properties and Applications[J]. LWT，2024，198：115961.
[17] 刘素慧，汪学德，马宇翔，等 . 芝麻花生酱的制备及其流变学性质的研究 [J]. 中国油脂，2019，44(2)：141-146.
[18] 杨明涛 . 活塞式液体灌装试验系统的流场分析与研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2014.
[19] 夏春艳，刘秀娟，程 焰 . 液体灌装机结构综述 [J]. 佳木斯大学学报（自然科学版），2000，18(2)：176-179.
[20] 吕 帅 . 用于带硬颗粒黏稠物料的活塞式定量灌装装置研究 [D]. 无锡：江南大学，2013.
[21] 刘丁丁，谭保辉，冯志华，等 . 等压及常压灌装阀灌装时间的分析计算 [J]. 苏州大学学报（工科版），2012，32(4)：33-39.
[22] 曾向华，周尤龙 . 一种常压旋转式灌装机控制系统：

CN221114710U[P]. 2024-06-11.
[23] 高文俊，巴根纳，李　恒，等 . 浅谈一种无菌碳酸化及等压灌装系统的设计 [J]. 饮料工业，2021，24(4)：64-67.
[24] 黄秋丽 . 盐酸灌装负压系统的技术改造 [J]. 氯碱工业，2024，60(7)：21-26.
[25] 吴朝武，吴彬豪，叶　森，等 . 回转型真空泵压式牙膏灌装机工艺分析与设计 [J]. 包装工程，2025，46(13)：245-250.
[26] AMILUHUR T Y，ISLAMIYAH M. Analysis of Filling Machines in an Alcoholic Beverage Company at PT. Karunia Jaya Abadi Inds[J]. Jurnal Pengabdian Masyarakat，2024，5(2)：708-719.
[27] 张廷宁，朱德兰，李　钊，等 . 基于流量调节阀的变量喷灌装置设计与试验 [J]. 农业机械学报，2024，55(10)：339-345，359.
[28] 童伦伟 . 时间 - 压力法定量灌装技术特点 [J]. 机电信息，2005(24)：37-38.
[29] 吉永林 . 基于 FPGA 的高精度液体灌装控制系统设计 [J]. 轻工机械，2021，39(3)：69-72.
[30] 张昌凡，孙　琳，孙　晓 . 基于 LSTM-Attention 的高黏稠食品灌装流量检测 [J]. 包装学报，2020，12(1)：36-42.
[31] 许　伟，徐科军，梁利平，等 . 基于 PWM 控制的电磁流量计脉冲励磁系统分析与研制 [J]. 计量学报，2018，39(4)：525-530.
[32] 陈　坤 . 定量精准灌装称重控制系统及动态去噪技术研究 [D]. 成都：四川大学，2022.
[33] 宋照鹏 . 定量称重灌装机流体仿真及智能控制技术研究 [D]. 广州：华南理工大学，2024.
[34] 张　梁，盛浩威，徐云杰，等 . 转盘式八宝饭灌装机的设计 [J]. 包装与食品机械，2023，41(5)：76-81.
[35] 张玉华，郭　鹤 . 多颗粒态油辣椒物料特性与灌装方式 [J]. 食品工业，2021，42(1)：241-243.
[36] 黄子琛，汪志祥 . 一种含乳饮料生产用灌装装置：CN220907113U[P]. 2024-05-07.
[37] 吴　尧，黄　培，李秋实 . 一种液体定量取样方法及其取样装置：CN117990430A[P]. 2024-05-07.
[38] 徐乐年，林　敏，孙崇雨，等 . 电容式灌装液位检测系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器，2019(2)：72-74.
[39] 步同杰，王亚刚 . 基于改进灰狼算法的啤酒灌装 PID 液位控制 [J]. 包装工程，2023，44(21)：245-252.
[40] 吕黄珍，张梦瑶，杜爱丽，等 . 食品挤压装备技术及控制方法研究进展 [J]. 包装与食品机械，2025，43(2)：1-12.
[41] 罗金刚，何　玲，王仁伟 . 基于动网格的固液多相流灌装的数值模拟 [J]. 机械工程师，2016(1)：21-22.
[42] 薄汉奇，杜兴安，耿玉焕 . 一种酱料用的自动定量灌装机：CN219363243U[P]. 2023-07-18.
[43] 何咸荣，潘　嘹，卢立新，等 . 无菌灌装机预成型凸轮连杆组合机构运动可靠性分析 [J]. 食品与机械，2021，37(4)：98-102.
[44] 黎光辉，孟　爽，张　炜 . 软管灌装封尾机的灌装机构设计与分析 [J]. 机械工程师，2023(3)：120-123.
[45] 徐锦华，黎光辉，孟　爽，等 . 牙膏灌装机构设计及流动特性分析 [J]. 包装工程，2022，43(17)：157-164.
[46] 石伟超 . 基于 CFD 的小排量高黏度转子泵设计及性能分析 [D]. 杭州：浙江科技学院，2022.
[47] 谭林涛，潘玉兰，邵　东 . 全自动伺服系统转子灌装机：CN221093696U[P]. 2024-06-07.
[48] 王瑞鹏，张彦峰，汪　强，等 . 蠕动泵灌装工艺稳定性改进研究 [J]. 化工自动化及仪表，2024，51(5)：924-928.
[49] 张冠豪，于源华 . 基于 S 型曲线误差补偿模型优化蠕动泵微量灌装精度的研究 [J]. 长春理工大学学报（自然科学版），2023，18(6)：105-111.
[50] 丁问司，张　旭 . 正弦液压泵建模与仿真 [J]. 机床与液压，2012，18(6)：25-30.
[51] 魏思瑶 . 颗粒态油辣椒灌注装置研究与关键部件设计 [D]. 贵阳：贵州大学，2019.
[52] MUHAMMAD S M H，CHE G S A. Volume Measuring System Using Arduino for Automatic Liquid Filling Machine[J]. International Journal of Applied Engineering Research，2017，12(24)：14505-14509.
[53] 胡　飞 . 自动灌装机输送机构及控制系统的研究 [D]. 贵阳：贵州大学，2015.
[54] 陆　海，王　竞，陈文洛 . 基于 CFD 模拟的压力管道内固液两相流速度分布研究综述 [J]. 长春工程学院学报（自然科学版），2023，24(1)：1-7.
[55] 李仁祥，赵伟文，万德成 . MPS -DEM 方法数值模拟超长管道固液混输流动 [J]. 计算力学学报，2023，40(3)：395-402.
[56] 唐　术，孙　晓 . 基于 CFD 的灌装机三通管道固液两相流动特性研究 [J]. 机电产品开发与创新，2025，38(1)：102-105.
[57] 吴龙奇，孔立堵 . 包装机黏稠物料断流管径数学模型的推导与验证 [J]. 农业机械学报，2006，37(8)：211-213.
[58] 屈文英 . 半固态浆料微观组织演变及多相流动机理数值模拟研究 [D]. 北京：北京有色金属研究总院，2019.
[59] MA Z，WANG Y，REN N X，et al. A Coupled CFD-DEM Simulation of Upward Seepage Flow in Coarse Sands[J]. Marine Georesources & Geotechnology，2019，37(5)：589-598.
[60] 文孝贵，段单峰 . 计算流体力学在充填料浆管道输送模拟分析的应用及研究发展方向 [J]. 矿业研究与开发，2022，42(12)：18-23.
[61] 吕　帅，张裕中 . 高黏稠物料在灌装阀体内的流动状态分析 [J]. 包装工程，2012，33(15)：10-15.
[62] 周　游 . 管道系统固 - 液两相流水力输送特性的数值

研究 [D]. 镇江：江苏大学，2022.
[63] 邓　桓 . 面向黏稠食品酱料管道输送的沟槽减阻研究 [D]. 天津：天津科技大学，2023.
[64] 王雨欣，王志文，张梦洁，等 . 高压喷嘴流动机理与结构优化设计研究 [J]. 真空科学与技术学报，2024，44(11)：962−968.
[65] 黎光辉 . 粘稠物料的灌装流动分析及柱塞式灌装机构设计 [D]. 哈尔滨：哈尔滨商业大学，2022.
[66] 栗　阳，王振文，吴　敏 . 双螺杆挤出机流道流场和操作参数的数值模拟研究进展 [J]. 食品工业科技，2021，42(2)：338−344.
[67] 王圣斌 . 自动化食品包装机械的控制系统优化设计 [J]. 机械设计与制造，2020(11)：297−300，304.
[68] 金银城，华成平，陈　云 . 全自动高黏度液体灌装机：CN117682469A[P]. 2024−03−12.
[69] 张　柯，张　琦 . 饮料食品定量灌装智能控制系统设计 [J]. 食品工业，2020，41(11)：229−232.
[70] 魏孔贞，张光中 . 基于亚龙 YL−158GA1 现代电气控制平台的食品自动灌装系统设计 [J]. 现代制造技术与装备，2024，60(8)：25−27.
[71] 刘成伟，闻　娜，沈海军 . 基于 PLC 的旋转型液体灌装机控制系统研究 [J]. 食品工业，2017，38(12)：204−206.
[72] 郭柏乔 . 基于树莓派的无人机避障技术研究 [J]. 工业控制计算机，2025，38(10)：43−44，47.
[73] 孟德志 . 基于卷积神经网络的黏稠食品灌装质量检测研究 [D]. 株洲：湖南工业大学，2021.
[74] 孙　琳 . 基于循环神经网络的黏稠食品灌装流量检测 [D]. 株洲：湖南工业大学，2021.
[75] 刘　伟 . 基于模糊神经网络的啤酒灌装精度控制技术 [J]. 食品与机械，2022，38(4)：104−108.
[76] XIAO L Q. Parameter Tuning of PID Controller for Beer Filling Machine Liquid Level Control Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Computational Intelligence and Neuroscience，2021，2021：7287796.
[77] 乔海晔 . 基于模糊神经网络的液体灌装自校正控制系统 [J]. 包装工程，2018，39(3)：206−210.
[78] 周　洁，郑　维，张玉芳 . 基于 RBF 神经网络的灌装机控制系统设计 [J]. 包装工程，2021，42(19)：254−259.
[79] 洪　琳 . 基于 BP 神经网络的饮料灌装精度控制 [J]. 科技视界，2024，14(22)：84−88.
[80] KE W S，HUANG D X，YANG F，et al. Soft Sensor Development and Applications Based on LSTM in Deep Neural Networks[C]//2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Honolulu：IEEE，2017：1−6.

（责任编辑：邓　彬）

Research Progress of Precise Quantitative Filling Technology and Equipment for Semi-Solid Food

LU Tianqi[1,2]，LI Yonghui[1,2]，QIN Chenqiang[1,2]，WANG Shiguang[1,3]，
HUANG Zhenglin[2,3]，LÜ Huangzhen[1,3]

（1. China National Packaging and Food Machinery Co., Ltd.，Beijing 100083，China；2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd.，Beijing 100083，China；3. Key Laboratory of Agricultural Products Processing Equipment in the Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Beijing 100083，China）

Abstract：As a typical non-Newtonian fluid, semi-solid food has complex rheological properties such as high viscosity and thixotropy, making the stability and accuracy of its filling process highly sensitive to fluctuations in key parameters such as material viscosity, solid particle distribution, and internal flow field parameters. Therefore, in-depth analysis of the filling process mechanism and the development of corresponding high-performance equipment for precise quantitative control has become the research focus in this field. The research progress of semi-solid food filling technology and equipment is systematically reviewed from the aspects of filling mechanism, methods, process simulation, and intelligent control. In response to the current challenges of poor material compatibility and insufficient working stability, the future research directions are further clarified as enhancing the dynamic rheological monitoring, conducting in-depth research on multi-physical field coupling simulation, integrating the full-chain intelligent control system, and promoting the flexible upgrading of equipment.

Keywords：semi-solid food；filling mechanism；rheological property；numerical simulation；intelligent control