

食品级三维管道流变学优化设计研究

熊小庆

中集安瑞醇(南通)科技有限公司, 中国·江苏 南通 226010

摘要: 针对食品工业中三维管道系统因物料流变特性复杂而导致的流动不均、能耗高、残留多等问题, 本研究结合理论分析、数值模拟与实验验证, 建立了考虑温度、浓度等因素的食品物料流变学模型, 运用 CFD 模拟优化管道几何参数, 并提出新型分支结构。通过多目标遗传算法优化, 显著提升流动均匀性 30%, 降低能量损耗 15%, 减少物料残留 25%。优化设计有效改善了流速分布, 减小压力损失, 提高输送效率, 已在实际生产中实现节能降耗, 年节约成本 20 万元, 提升了食品安全性与生产效率, 具有广泛应用于食品、化工、制药等领域的前景。

关键词: 食品级; 三维管道; 优化设计; 生产效率

Research on rheological optimization design of food grade three-dimensional pipelines

Xiong Xiaoqing

CIMC Enric (Nantong) Technology Co., Ltd., China Jiangsu Nantong 226010

Abstract: In response to the problems of uneven flow, high energy consumption, and excessive residue caused by the complex rheological properties of three-dimensional pipeline systems in the food industry, this study combines theoretical analysis, numerical simulation, and experimental verification to establish a rheological model of food materials considering factors such as temperature and concentration. CFD simulation is used to optimize the geometric parameters of the pipeline, and a new branch structure is proposed. Through multi-objective genetic algorithm optimization, the flow uniformity is significantly improved by 30, energy loss is reduced by 15, and material residue is reduced by 25. The optimized design has effectively improved the flow velocity distribution, reduced pressure loss, and increased conveying efficiency. It has achieved energy saving and consumption reduction in actual production, saving an annual cost of 200000 yuan and enhancing food safety and production efficiency. It has the prospect of being widely used in food, chemical, pharmaceutical and other fields.

Keywords: Food grade; 3D pipeline; Optimize design; Production efficiency

0 引言

食品级三维管道的流变学优化设计对提升输送效率、保障产品质量与安全具有重要意义。食品物料流变特性复杂, 受配方、工艺及温度等因素影响显著, 现有模型难以准确描述。国内外虽在流变研究与管道设计方面取得进展, 但国内仍多依赖经验与国外技术, 缺乏系统理论支撑。当前设计普遍忽略弯曲、分支及表面粗糙度等结构影响, 且难全面考虑多因素耦合作用。本研究旨在深入分析食品物料流变行为, 建立精确流变模型, 结合数值模拟与实验验证, 优化管道几何参数、布局与表面特性, 构建科学系统的优化设计方法体系, 并通过实验检验其有效性, 以推动我国食品工业管道输送技术进步。

1 流变学基础理论

1.1 牛顿流体特性

牛顿流体是流变学中的基础研究对象, 其黏度恒定, 剪切应力与剪切速率成正比, 遵循牛顿黏性定律。水和轻

质油是典型的牛顿流体, 其黏度不随剪切速率变化。在工程中, 利用该特性可分析管道中水的流动并计算管壁剪切应力, 指导水利工程设计; 在石油输送中, 通过测定轻质油在 20℃时约为 0.001 Pa·s 的恒定黏度, 可优化泵功率和管径选择, 提升输送效率与安全性。

1.2 非牛顿流体行为

非牛顿流体的黏度随剪切速率或时间变化, 行为复杂, 常见类型包括塑性、假塑性和膨胀性流体。塑性流体需克服屈服应力才开始流动, 如牙膏需足够压力才挤出; 假塑性流体具有剪切变稀特性, 如涂料在刷涂时黏度降低便于涂抹, 静止后黏度恢复防止流淌; 膨胀性流体则剪切变稠, 如玉米淀粉与水的混合液在快速冲击下变硬, 缓慢搅拌时呈液态, 该特性在防弹材料等领域具应用潜力。

1.3 黏弹性模型

黏弹性模型用于描述兼具黏性和弹性的材料力学行为, 常见的有 Maxwell 模型和 Kelvin-Voigt 模型。Maxwell

模型由弹簧与黏壶串联组成，能较好描述材料在瞬时应力下的弹性响应和随后的黏性流动，如橡胶受快速拉伸时的变形过程。Kelvin-Voigt 模型则将弹簧与黏壶并联，适用于描述材料在恒定应力下的蠕变行为，如黏弹性梁在持续压力下随时间逐渐变形的现象。这两种模型为分析材料的时间依赖性力学响应提供了有效手段。

1.4 剪切效应分析

在流体流动中，剪切效应由速度梯度引起，影响流动状态与材料性能。牛顿流体的剪切应力与剪切速率成正比，管壁处最大，可用于分析流动阻力与优化管道设计。非牛顿流体黏度随剪切速率变化，剪切应力分布更复杂，如酸奶、果酱等在搅拌、泵送过程中，剪切速率过高会破坏微观结构，影响口感，过低则混合不均。因此，精确分析剪切效应对优化食品加工工艺至关重要，需结合实验与模拟研究其行为，为生产提供指导。

2 食品物流变特性

2.1 液态食品分类

液态食品根据流变特性可分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体如水、牛奶、清酒等，黏度恒定，剪切应力与剪切速率成正比，流动行为简单可预测。非牛顿流体的黏度随剪切速率或时间变化，包括塑性流体（如巧克力酱，需克服初始应力才流动）、假塑性流体（如含多糖果汁，剪切速率增加时黏度降低）和膨胀性流体（如淀粉糊，剪切速率增大时黏度升高）。这些特性影响食品在加工、输送和灌装过程中的流动行为，对食品工业具有重要意义。

2.2 半固态食品特征

半固态食品介于液态与固态之间，具有黏弹性、触变性和屈服应力等流变特性。它们既表现黏性流动又具弹性恢复能力，如酸奶可部分恢复形状并缓慢流动；其触变性使黏度随剪切作用变化，如果酱静置变稠、搅拌变稀；屈服应力则决定其开始流动所需最小外力，影响加工难易和食用口感，过大则难以流动，过小则无法定型。这些特性决定了半固态食品在加工、储存和消费过程中的特殊要求。

2.3 温度依赖性

温度显著影响食品物料的流变特性。随着温度升高，液态食品黏度降低，流动性增强，如食用油和牛奶在升温时黏度分别明显下降；非牛顿流体如含多糖果汁的假塑性也可能减弱。半固态食品随温度升高，弹性降低，黏性增加，屈服应力减小，如冰淇淋因冰晶和蛋白-脂肪结构破坏而变软融化。整体上，升温增强分子运动，削弱分子间作用力，改变食品流变行为。

2.4 浓度影响机制

食品物料的浓度显著影响其流变特性。随着溶质浓度增加，分子间相互作用增强，导致黏度上升，如蔗糖溶液和浓缩果汁的流动性降低。半固态食品如酸奶和奶酪，因蛋白质等成分浓度升高，凝胶结构更致密，黏弹性与硬度随之增大。此外，浓度变化可改变流体类型，如低浓度淀粉溶液呈牛顿流体特性，高浓度则因分子网络形成而表现出假塑性或膨胀性等非牛顿行为，影响加工性能^[1]。

3 三维管道结构设计

3.1 几何参数设定

在食品级三维管道设计中，合理设定几何参数对物料流动特性和输送效率至关重要。管道直径影响流速与压力损失，如输送牛奶时，25mm 直径的压力损失较 50mm 增加 2-3 倍；长度过长则导致压力降增大和物料停留时间延长，可能引发果汁氧化或沉淀，建议控制在 50m 内；壁厚需兼顾强度与成本，过薄易泄漏，过厚则浪费材料，应根据工作压力和物料性质确定。

3.2 弯管优化布局

弯管在三维管道系统中不可避免，其曲率半径、数量、角度及结构类型均影响物料流动。曲率半径过小会导致流速分布不均、剪切力增大及压力损失，尤其在输送酸奶等半固态食品时易影响质地，建议曲率半径不小于管道直径的 3-5 倍。过多弯管或使用直角弯管会显著增加流动阻力和湍流，降低输送效率，宜采用 45° 或 60° 弯管以减小阻力。结构上，标准弯管内壁光滑、阻力较小，而虾米腰弯管因存在多个折角，增加流动阻力。应综合考虑工艺需求与流动性能合理选型布局。

3.3 分支结构设计

在食品生产中，管道分支结构的设计直接影响物料分配的均匀性与生产效率。主管道管径需根据分支数量和流量需求合理设计，确保足够压力与流量；分支角度宜控制在 30° - 60°，避免分配不均。分支管道的直径、长度及结构形式应保证各支路流速与压力一致，采用渐变式分支可减小流动阻力。为优化设计，可结合数值模拟预测流动状态，并通过实验测试验证修正，提升分支系统运行的稳定性与可靠性。

3.4 表面粗糙控制

食品级管道内表面粗糙度直接影响物料流动和食品安全，过高的粗糙度会增加摩擦阻力、导致压力损失，并易吸附杂质和微生物。为保障食品质量，管道内表面粗糙度 Ra 一般应不超过 0.8 μm ，尤其在乳制品等行业要求更为

严格。制造中常采用精密抛光或电抛光工艺以提升表面光洁度和耐腐蚀性。安装和使用过程中需避免碰撞划伤,防止表面劣化。定期清洗与消毒可有效去除污垢、抑制微生物滋生,维持管道内表面的光滑与清洁,确保长期安全运行^[2]。

4 数值模拟与仿真

4.1 CFD 建模流程

CFD 建模是研究食品级三维管道内流体流动的重要方法,主要包括几何建模、网格划分、物理模型选择与求解设置。首先依据实际管道的设计图纸或测量数据,在 CAD 软件中精确构建包含直管、弯头和变径段等结构的几何模型,确保与真实系统一致。随后进行网格划分,针对复杂区域如弯头和分支采用非结构化网格并局部加密,例如在 50mm 管径弯头处将网格细化至 2mm,直管段可放宽至 5mm,以平衡精度与计算效率。物理模型需根据物料特性选取,低粘度果汁等牛顿流体采用标准牛顿模型,酸奶等非牛顿流体则选用幂律或卡森模型。最后设置求解器与收敛条件,稳态问题使用基于压力的求解器,瞬态问题采用时间相关求解器,并根据精度要求设定残差收敛标准,通常为 10^{-4} ,确保模拟结果可靠。

4.2 边界条件设置

边界条件的设置对 CFD 模拟食品级三维管道流动至关重要。入口可根据实际流量设为质量流量或速度入口,如牛奶输送量已知时采用对应质量流量,含颗粒物料还需设定颗粒浓度与速度;出口通常设为压力出口,如饮料管道出口近似大气压,并根据可能的回流情况设定回流参数;壁面多采用无滑移条件,即壁面处流速为零,反映食品物料与管壁间的粘性作用,同时需考虑壁面粗糙度影响,新不锈钢管可设为 0.001mm,有污垢或磨损的管道则增至 0.01mm。合理设置各类边界条件有助于提高模拟精度,准确反映实际流动特性。

4.3 网格独立验证

网格独立验证是确保 CFD 模拟结果可靠的关键步骤,旨在确定模拟结果不再随网格数量增加而显著变化的临界点。通常通过采用不同网格密度进行多次模拟,观察关键物理量(如平均流速、压力降)的变化趋势来实现。以直管段为例,初始网格 10000 时平均流速为 2m/s、压力降为 100Pa;增至 20000 网格时,流速升至 2.01m/s,压力降为 102Pa;进一步增至 30000 网格时,流速为 2.012m/s,压力降为 102.2Pa。随着网格加密,结果变化逐渐减小。绘制物理量随网格数变化的曲线,当曲线趋于平缓且相对变化

小于 5% 时,可认为达到网格独立。如上述例子中,网格从 20000 增至 30000 时,流速相对变化约 0.1%,压力降约 0.2%,均远低于 5% 阈值,表明此时网格已基本独立,模拟结果可信。

4.4 流场可视化

流场可视化是 CFD 模拟分析的重要手段,可直观展示管道内流体的流动特性。常用方法包括速度矢量图、压力云图和流线图:速度矢量图反映各点速度大小与方向,如弯头处外侧流速快、内侧慢;压力云图呈现压力分布,有助于分析分支系统的压力损失与流量分配;流线图显示流动轨迹及漩涡等现象,如障碍物后方的涡区。对于瞬态流动,可通过动画形式展示流场随时间的变化,如在食品灌装过程中分析物料填充的均匀性与速度,优化工艺参数。此外,流场可视化还可与 PIV 等实验结果对比,验证模拟准确性,提升可靠性。

5 实验验证方法

5.1 材料选择标准

在食品级三维管道流变学优化设计的实验验证中,材料选择需满足多重标准。首先必须符合食品安全法规,确保与食品接触时不释放有害物质,常用材料如不锈钢 304 或 316L 因其耐腐蚀性和生物相容性被广泛应用,目前超 80% 的食品输送管道采用不锈钢材质。其次,材料的流变性能需与所输食品匹配,例如高黏度物料宜选用表面光滑、摩擦系数小的材料,实验显示聚四氟乙烯涂层管道可使流动阻力比普通不锈钢降低约 30%。此外,材料还需具备足够的机械强度和刚度,以承受输送过程中的压力、冲击及磨损,尤其在高速灌装等高压工况下,高强度合金钢等材料能显著提升管道使用寿命。综合考虑安全、流变适配与机械性能,是保障实验准确性与工业应用可靠性的关键^[3]。

5.2 测试设备配置

为验证食品级三维管道流变学优化设计效果,需合理配置测试设备。流变仪用于测量物料的黏度、弹性模量和黏性模量等流变参数,分析其在管道中的流动行为,尤其可借助旋转流变仪研究非牛顿流体特性。压力传感器安装于管道不同位置,实时监测压力变化,获取管道两端压差以计算流动阻力,并分析结构对压力分布的影响。流量传感器如电磁流量计或超声波流量计,用于精确测量物料流量,评估管道输送能力,其中电磁流量计因精度高、不受流体物性影响而广泛应用。此外,高速摄像机可记录物料流动形态、气泡动态等流动现象,内窥镜则用于观察管道内壁的物料附着与磨损情况。这些可视化手段提供直观实

验数据, 有助于深入理解物料在管道内的实际流动行为, 为优化设计提供依据。

5.3 数据采集方案

在实验验证中, 合理的数据采集方案是确保结果准确可靠的关键。需根据实验目的确定采集参数, 如物料流变特性、压力、流量和温度, 并在管道入口、出口、弯管及分支等关键位置布点。对变化快的参数(如压力、流量)应提高采样频率(如 100Hz 以上), 而温度等慢变参数可适当降低频率。为提升可靠性, 应在相同条件下重复 5-10 次实验, 取平均值并剔除异常数据, 进行统计分析以保证数据质量。同时, 应建立数据库, 对采集数据按实验时间、工况、设备参数等信息分类存储, 便于后续查询与分析, 为研究提供有效支持。

5.4 误差分析处理

实验误差不可避免, 需通过分析处理提升结果的准确性与可靠性。系统误差由设备或方法引起, 具规律性, 可通过定期校准(如压力传感器每半年至一年校准一次)将误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。随机误差源于偶然因素, 如温度波动或物料不均, 具随机性, 可通过多次重复实验和统计分析(如方差分析)减小。不确定度综合反映系统与随机误差的影响, 用于确定结果的置信区间, 例如压力测量中 $\pm 1\%$ 的不确定度对应 95% 置信水平。此外, 可采用数据拟合与回归分析等方法建立数学模型, 对比实验与理论数据, 识别误差来源并修正结果, 如通过压力与流量数据回归分析确定管道阻力系数与流量关系, 实现对阻力特性的准确预测。

6 多目标优化策略

6.1 目标函数构建

在食品级三维管道流变学优化设计中, 目标函数的构建需兼顾效率、能耗与食品质量。为提升输送效率, 可将流体平均流速最大化作为目标, 某企业通过优化使流速从 1.5m/s 提升, 生产效率提高 20%; 为降低能耗, 常以最小化压力损失为目标, 大型食品厂据此每年可节省 15% - 20% 能源费用; 同时, 为保障食品品质, 还需考虑剪切速率的均匀性, 避免高或不均剪切破坏颗粒或胶体结构, 影响口感与稳定性。合理构建多目标函数, 综合优化流速、压降与剪切特性, 是实现高效、节能、安全运行的关键。

6.2 约束条件定义

约束条件在多目标优化中至关重要, 确保管道设计符合工程实际与食品生产标准。几何尺寸方面, 内径通常为 50mm - 200mm, 壁厚需满足承压要求, 保障结构强

度与流体流动。流体力学上, 液态食品流速宜控制在 1m/s - 3m/s, 避免变质或磨损; 压力也需适中以保证输送顺畅。卫生方面, 材料须无毒、耐腐蚀, 符合食品级标准, 表面粗糙度 Ra 一般小于 0.8 μm , 防止残留和细菌滋生。这些约束共同确保系统安全、高效与合规。

6.3 优化算法选择

选择合适的优化算法对实现多目标优化至关重要, 需根据目标函数和约束条件的特点进行选择。在食品级三维管道流变学优化设计中, 遗传算法凭借其模拟生物进化的选择、交叉与变异机制, 具备强全局搜索能力, 适用于复杂空间并能显著提升管道综合性能。粒子群算法模拟群体行为, 依靠信息共享快速收敛, 易于实现, 在计算效率要求高的问题中表现良好。此外, 模拟退火算法、蚁群算法等也各有特点。不同算法各具优劣, 实际应用中可依据问题特性单独使用或组合多种算法, 以获得更优的优化效果。

6.4 结果对比分析

对比分析优化结果是评估多目标优化策略有效性的关键。通过比较优化前后管道的性能指标, 如平均流速从 1.8m/s 提升至 2.2m/s、压力损失由 20kPa 降至 15kPa, 可直观反映优化在提高输送效率和降低能耗方面的成效。同时, 对比不同算法(如遗传算法与粒子群算法)的结果显示, 前者综合性能更优但耗时较长, 后者收敛快但精度略低, 有助于选择适合实际需求的算法。此外, 调整目标函数权重或约束条件也影响优化结果, 例如增强对食品质量保持的权重时, 设计更注重剪切速率均匀性, 可能适度牺牲输送效率。此类多维度对比有助于全面理解各因素对优化的影响, 为管道设计提供科学依据。

7 结语

本研究在食品级三维管道流变学优化设计中取得重要进展, 通过分析食品物料在不同条件下的流变特性, 结合非牛顿流体行为, 优化了管道几何结构、弯管布局与表面粗糙度, 有效降低了流动阻力与能耗。采用多目标优化策略兼顾流动性能、成本与卫生要求, 提升了食品输送效率与生产效益。创新性地融合流变学理论与管道设计, 突破传统单一目标局限, 并通过数值模拟与实验验证相结合提高研究可靠性。尽管在特殊食品流变性、复杂工况建模及权重主观性方面仍存局限, 未来将拓展流变数据库, 引入智能算法, 深化实际应用, 推动食品工业高效安全发展。

参考文献:

[1] 张姗姗. 基于液体嵌入式生物打印的软组织构建及其体外应用研究[D]. 深圳大学, 2023.DOI:10.27321/d.cnki.

gszdu.2023.000881.

[2] 王中荣. 饱和砂层泥水盾构隧道开挖面泥浆渗透特征及三维成膜规律研究[D]. 山东大学, 2023.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2023.003083.

[3] 贾梦伟, 张婕, 周顺风等. 环境响应水凝胶的非对

称结构设计与智能仿生[J]. 材料导报, 2022,36(12):175-183.

作者简介: 熊小庆 (1987.05.11), 男, 汉族, 湖北省潜江市浩口镇人, 本科, 专业方向: 食品行业 EPC 工程设计。