DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260313003
引用格式: 王佩佩, 李云, 尹莹, 等. 蜂蜜粉的结块机制、制备工艺及防结块剂的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 222–229.
WANG PP, LI Y, YIN Y, *et al*. Research progress on the caking mechanism, preparation processes and application of anti-caking agents in honey powder [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 222–229. (in Chinese with English abstract).

蜂蜜粉的结块机制、制备工艺及防结块剂的应用研究进展

王佩佩[1], 李　云[2], 尹　莹[1], 孙哲浩[1], 李巧玲[1*]

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 石家庄　050018;
2. 石家庄市畜产品和兽药饲料质量检测中心, 石家庄　050041)

摘　要: 蜂蜜是一种由蜜蜂酶促进转化进而形成的天然甜味食品, 它具有独特的成分、质地、色泽和风味, 是重要的天然甜味剂。然而, 液态蜂蜜具有高黏度、高吸湿性的特点, 并且具有较高的含水量(约 15%~20%), 因此在加工、包装、运输和长期储存过程中容易发生结晶、发酵及结块, 严重限制了其工业化应用。将蜂蜜制备成固体可解决上述问题, 但由于蜂蜜中低分子糖含量高及玻璃化转变温度低, 所得蜂蜜粉仍存在结块现象。这种结块行为受到原料组成、载体选择及干燥工艺参数的综合影响。本文系统阐述了蜂蜜粉的理化性质和结块机制, 对比了喷雾干燥、冷冻干燥、微波真空干燥及真空干燥等主要制备工艺在制备蜂蜜粉过程中的差异, 分析了微晶纤维素、豌豆蛋白、硅酸钙及硬脂酸钙等防结块剂在改善蜂蜜粉流动性、抑制吸湿结块中的作用机制与应用效果。建议在蜂蜜粉的制备中开展系统化的研究, 可提升蜂蜜粉的储藏稳定性和工业化应用价值。

关键词: 蜂蜜粉; 结块机制; 制备工艺; 防结块剂; 玻璃化转变温度; 喷雾干燥

Research progress on the caking mechanism, preparation processes and application of anti-caking agents in honey powder

WANG Pei-Pei[1], LI Yun[2], YIN Ying[1], SUN Zhe-Hao[1], LI Qiao-Ling[1*]

(1. *College of Food and Biology*, *Hebei University of Science and Technology*, *Shijiazhuang* 050018, *China*;
2. *Shijiazhuang Livestock Product and Veterinary Drug Feed Quality Testing Center*, *Shijiazhuang* 050041, *China*)

ABSTRACT: Honey is a kind of natural sweet food promoted by honeybee enzyme. It has unique composition, texture, color and flavor, and is an important natural sweetener. However, liquid honey has the characteristics of high viscosity, high hygroscopicity and high water content (about 15%–20%). Therefore, honey is prone to crystallization, fermentation and agglomeration during processing, packaging, transportation and long-term storage, which seriously limits its industrial application. Solidification of honey can solve the problems of storage and transportation.

收稿日期: 2026-03-13
基金项目: 石家庄市农业农村局项目(24038)
第一作者: 王佩佩(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: 2757492212@qq.com
***通信作者:** 李巧玲(1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全与检测。E-mail: lql98119@126.com

However, due to the high content of low molecular sugars in honey and the low glass transition temperature, honey powder still has the problem of agglomeration. This caking behavior is affected by the composition of raw materials, carrier selection and drying process parameters. In this paper, the physical and chemical properties and agglomeration mechanism of honey powder were systematically expounded. The differences of main preparation processes such as spray drying, freeze drying, microwave vacuum drying and vacuum drying in the preparation of honey powder were compared. Analyzed the mechanism and application effect of anticaking agents such as microcrystalline cellulose, pea protein, calcium silicate and calcium stearate in improving the fluidity of honey powder and inhibiting hygroscopic agglomeration. It was recommended to carry out systematic research in the preparation of honey powder to improve the storage stability and industrial application value of honey powder.

KEY WORDS: honey powder; caking mechanism; preparation technology; anti-caking agent; glass transition temperature; spray drying

0　引　言

蜂蜜作为一种天然营养食品, 因其丰富的功能性成分和独特的感官品质而备受青睐[1], 但是液态蜂蜜在储运和使用过程中存在流动性差、易结晶、微生物污染风险高等问题, 限制了其在食品工业中的广泛应用[2−3]。将蜂蜜加工为蜂蜜粉, 不仅可有效解决上述问题, 还能拓展其在固体饮料、烘焙食品、调味品及功能性食品配料中的应用[4]。蜂蜜粉中的主要成分为果糖和葡萄糖, 具有极低的玻璃化转变温度(glass transition temperature, Tg)和高吸湿性[5], 从而导致蜂蜜粉的流动性差并且极易结块, 这成为制约其工业化生产的关键难题[6]。当前, 围绕蜂蜜粉的制备工艺已开展了大量研究, 喷雾干燥、冷冻干燥、微波真空干燥及真空干燥等技术各具特色, 但如何在高效干燥的同时保持蜂蜜的天然活性成分并抑制其结块, 仍是研究的重点与难点[7]。此外, 防结块剂的引入为改善蜂蜜粉的结块问题提供了新思路[8], 但其作用机制、适配性及对粉体综合品质的影响仍需系统探讨。

本文基于 Web of Science、Scopus、ScienceDirect 及中国知网等数据库, 对 2015—2025 年间以“honey powder”“drying technology”“anticaking”“glass transition”等为关键词的相关文献进行检索, 并筛选与蜂蜜粉制备工艺、结块机制及防结块技术密切相关的研究进行综述。本文综述蜂蜜粉的结块机制、制备工艺及防结块剂的研究进展, 分析现有技术的优势与不足, 提出了蜂蜜粉未来研究的发展方向, 以期为蜂蜜粉的高品质化、工业化制备提供理论依据和实践指导。

1　蜂蜜粉的理化性质及结块机制

液态蜂蜜因高黏度、高吸湿性及低的 Tg 的特点而不便于运输和贮藏[9]。将液态蜂蜜制备成粉体后, 虽然流动性和便携性得到改善, 但粉体的无定形结构容易在储藏和包装过程中吸湿, 进而促进颗粒间固桥形成, 从而引起结块。蜂蜜粉的理化性质是决定其结块特性的核心基础, 其高吸湿性与结块行为由化学组成和 Tg 共同决定。蜂蜜粉主要成分为果糖与葡萄糖, 这两类单糖的 Tg 极低, 因此直接赋予蜂蜜粉极强的吸湿性[10]。相关研究表明, 纯无水蜂蜜粉的 Tg 仅 30~43 ℃, 具体数值随干燥剂种类与配比波动, 且其临界水分含量极低, 低于 2 g/100 g 样品, 微量水分即可改变粉体物理状态[11]; 蜂蜜粉微观结构呈完全无定形或部分无定形, 结构类型由制备工艺决定, 无定形比例越高, 粉体稳定性越差、吸湿性越强。此外不同蜜源的蜂蜜原料对蜂蜜粉的结块行为也具有显著影响[12]。单花种蜂蜜, 例如赤楠蜜、锥属蜜和壳斗蜜, 这类蜂蜜其 Tg 相对较高, 吸湿性中等, 无定形比例较低, 因此粉体的结块速率较慢。在加工过程中, 这类蜂蜜粉适宜采用喷雾干燥或冷冻干燥, 并可添加微晶纤维素或豌豆蛋白等防结块剂, 以改善粉体流动性并维持活性成分。相比之下, 多花种蜂蜜例如百花蜜、邦山蜂蜜和崖蜜成分复杂, 含多种低分子糖及有机酸, Tg 偏低, 吸湿性高, 无定形比例较高, 粉体容易在短时间内发生吸湿结块。因此, 多花蜜粉宜采用微波真空干燥或真空干燥, 并配合微晶纤维素与豌豆蛋白复配防结块剂, 以兼顾粉体稳定性和天然活性成分的保留。此外, 蜂蜜中果糖与葡萄糖的比例(F/G)也是影响结块的重要因素: 高 F/G 比可提高 Tg, 延缓结块, 而低 F/G 比则易加速结块并形成固桥。不同产地和蜜源的糖度及水分敏感性差异也会影响粉体吸湿性和结块速率[13]。因此, 根据蜜源类型、糖度、Tg 及无定形比例选择合适的干燥工艺并选择合适的防结块剂, 可显著改善蜂蜜粉的流动性和储存稳定性。蜂蜜粉结块本质是水分增塑引发 Tg 降低, 进而导致粉体宏观性能劣变的物理过程[14]。同时, 蜂蜜粉中糖组分的结晶行为也会进一步影响其结构稳定性。葡萄糖较易形成结晶核并发生析晶, 可能改变无定形糖比例和水分分布; 果糖吸湿性较强, 易加剧水分增塑作用, 使 Tg 进一步降低。因此, 蜂蜜粉结块过程并非孤立发生, 而是与糖组分

比例、水分迁移及无定形结构稳定性密切相关。储存过程中，蜂蜜粉吸附环境水分，水分充当增塑剂，大幅降低蜂蜜粉 Tg，使其低于环境储存温度[15]；当 Tg 低于室温时，蜂蜜粉从玻璃态转变为高弹态，颗粒软化、黏连、塌陷，最终表现为结块、发黏、流动性丧失[16]。该变化速率与环境温度和 Tg 的差值正相关，差值越大，结块速率越快[17]；同时，颗粒吸湿后表面糖分会溶解形成液桥，水分蒸发后液桥转化为固桥，进一步强化颗粒黏结强度，从软结块发展为硬结块，严重影响产品品质与使用性能。

2 蜂蜜粉的制备工艺

蜂蜜粉的制备工艺比较多，喷雾干燥、冷冻干燥、微波真空干燥及真空干燥是目前制备蜂蜜粉的核心工艺方法。图 1 直观呈现了 4 种干燥技术从蜂蜜原料处理到制得蜂蜜粉成品的关键操作环节。

2.1 喷雾干燥技术

喷雾干燥是将蜂蜜基料液经雾化器形成细小雾滴，与热空气接触后大幅增大蒸发表面积，实现水分快速蒸发的干燥方式[18]；该工艺干燥速度快、物料受热时间短，工艺参数易调节、产品品质易把控[19]，设备适配性强且易规模化生产，是蜂蜜粉工业化制备的主流技术[20]。主要的工艺流程是蜂蜜→调配→加热→混合→均质→调节 pH→喷雾干燥(表 1)。

2.2 冷冻干燥技术

冷冻干燥技术是蜂蜜粉制备中典型的低温干燥工艺，核心利用升华现象实现水分脱除：先在低温环境下将蜂蜜基料冻结，使料液中水分完全凝固为冰晶体，再将冻结后的样品置于真空条件中，让水分直接从固态升华为水蒸气，全程无需经过液态阶段，最终获得干燥蜂蜜粉[27]。生产蜂蜜粉的主要工艺流程是蜂蜜调配→均质→预冻→冷冻干燥→粉碎、包装。该工艺全程在低温、真空环境下进行，从根本上规避了高温对蜂蜜中热敏性生物活性成分的破坏，也能减少因高温引发的粉体黏连问题，是制备高附加值蜂蜜粉的重要技术手段[28]。但该技术也存在明显局限性，其设备投入成本高、干燥周期长、能耗大，生产效率远低于喷雾干燥技术，难以实现工业化大规模连续生产[29]。周治德等[30]以紫云英蜂蜜为原料、麦芽糊精为辅料，采用单因素实验结合 $L_9(3^4)$正交实验优化蜂蜜粉冷冻干燥工艺，确定最优工艺为麦芽糊精添加比例 40%、可溶性固形物 20%、加热温度 100 ℃、真空度 80 Pa，所得蜂蜜粉呈蜂窝状并且水分小于 2%，溶解性好且吸湿性低；同时证实冷冻干燥可较好保留蜂蜜中蔗糖、还原糖、总糖及淀粉酶活性，对主要营养成分无显著影响。GANAIE 等[31]进行的研究中，与真空干燥的蜂蜜粉末相比，观察到玻璃转变温度、密度和吸湿性更低。此外乳清分离蛋白在冻干中比麦芽糊精更具有更强且更高的干蜂蜜培养载体潜力。

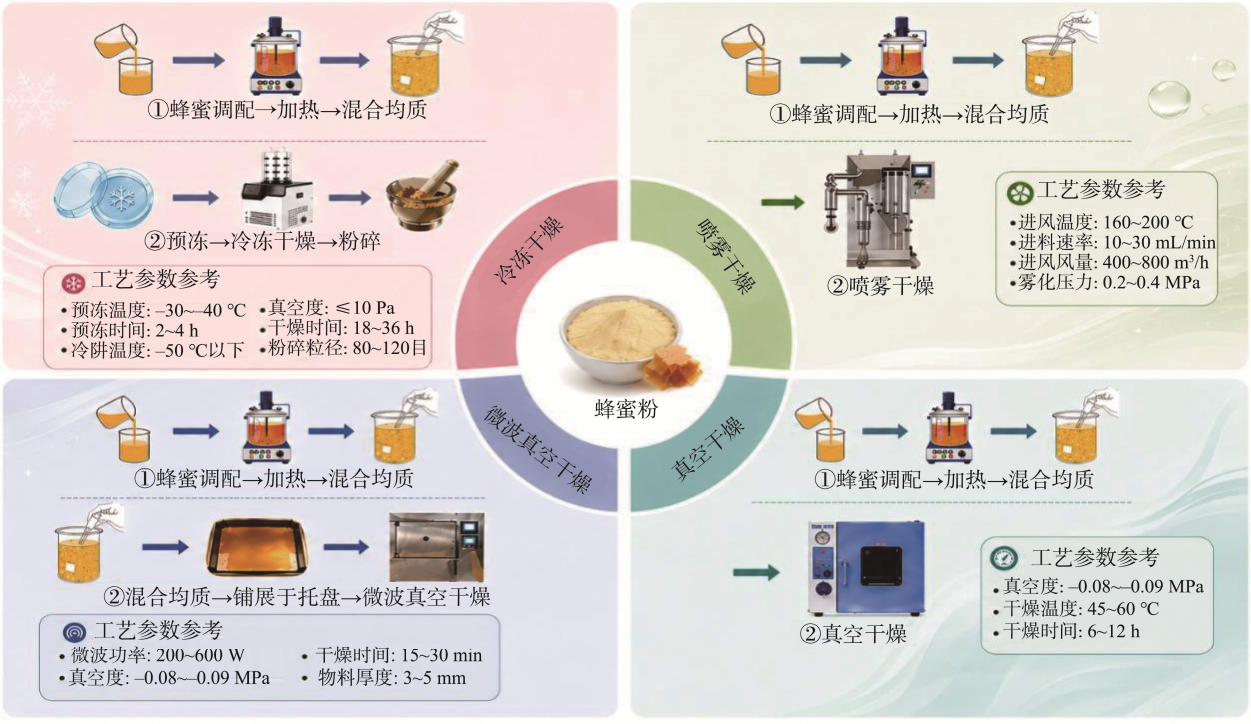


图 1 4 种干燥技术制备蜂蜜粉的工艺流程

Fig.1 Technological processes of honey powder preparation by 4 kinds of drying technologies

表 1　喷雾干燥参数对蜂蜜粉理化及功能特性的影响

Table 1　Effects of spray drying parameters on physicochemical and functional properties of honey powder

载体	实验方法	关键评价指标	结果	结块风险评价	参考文献
麦芽糊精+变性淀粉+阿拉伯胶(15:2:1)的复合型壁材	固形物含量为 50%, 芯壁比为 0.8:1, 进料速度为 40 mL/min, 进风温度为 180 ℃	—	固形物含量>芯壁比>进风温度>进料速度, 其中固形物含量对得率的影响最大, 而进料速度的影响最小	中	[21]
麦芽糊精含量为 61%	进风温度为 150 ℃	得率: 40% 水分: 4.9% 挥发物保留率: 71% 溶解时间: 242 s 羟甲基糠醛: 232 mg/kg	生产具有良好理化性质的蜂蜜粉的最佳条件	中偏高	[22]
添加 10%~20%乳清蛋白	160 ℃进风温度下	水分: 4.1%; 水活度: 0.21; 抗氧化活性: 10%乳清蛋白组更优	20%乳清蛋白组水分 4.1 %、水活度 0.21; 10%乳清蛋白组增强了蛋白结合的抗氧化活性	中低	[23]
麦芽糊精+β-环状糊精+明胶+可溶性淀粉(15:3:1:5)	固形物含量为 35%、芯壁比为 0.8:1、进料速度为 40 mL/min、进风温度为 190 ℃, 出风温度为 65 ℃	得率: 64.28%	蜂蜜粉得率最大为 64.28%	中低	[24]
全脂奶粉、麦芽糊精和β-环糊精	进风温度为 130 ℃, 进风量为 100%、空气流量表显示 650、进料量为 10%。	得率: 52.63% 感官评分: 25.90	经过正交实验得到蜂蜜粉的最优配方为: 蜂蜜 32 g, 麦芽糊精 24 g, 全脂奶粉 24 g, β-环糊精	中	[25]
麦芽糊精、蛋白质、淀粉、甲基纤维素、阿拉伯胶	进风温度范围: 150~200 ℃, 出风温度: 70~106 ℃, 进料速率: 0.08~0.13 mL/s, 干燥前进行渗滤预处理	粉得率: 5.0%~77.1%	在 170 ℃、0.11 mL/s 进料速率下, 可获得品质优良、营养丰富的干燥蜂蜜粉	中	[26]
大米分离蛋白	进风温度: 130 ℃, 进料速率: 10 mL/min, 气流量: 35 m^3/h	水分: 6.53% 水活度: 0.399 吸湿性: 13.01 g/100 g 得率: 53.81% 蜂蜜回收率: 35.93% 溶解性: 45.67%	蜂蜜粉得率大于 50%, 蜂蜜回收率 35.93%, 蛋白质回收率 68.54%	中	[20]

注: —表示无此数据。

2.3　微波真空干燥技术

微波真空干燥技术将微波干燥与真空干燥相结合发展而来的新型干燥技术, 该工艺结合了微波与真空的双重优势, 兼具快速、高效、低温的特点, 因此可以很好的保留蜂蜜粉的热敏性成分和活性物质。在蜂蜜的干燥过程中展现出独特优势, 也为蜂蜜粉制备提供了新的技术路径。

微波真空干燥制备蜂蜜粉的核心原理是通过微波的介电加热特性, 使蜂蜜料液内部的水分子快速振动、碰撞从而产生热量, 实现物料内部均匀加热, 同时利用真空环境来降低水的沸点, 让蜂蜜中的水分在低温、低压条件下被快速汽化, 进而实现蜂蜜的快速干燥, 最终获得干燥蜂蜜粉。该工艺全程干燥温度可控且处于低温区间, 显著抑制了美拉德反应的发生, 同时大幅减少高温对蜂蜜中酚类、黄酮类等热敏性营养成分及生物活性成分的降解, 是兼顾蜂蜜粉干燥效率与品质保留的优质技术。CUI 等[32]以洋槐蜜为原料, 研究微波真空干燥制备干蜂蜜的工艺与品质, 确定最优工艺为样品厚度小于 8 mm、真空压力 30 mbar, 可在 30~50 ℃条件下约 10 min 将水分降至 2.5%以下, 且无美拉德反应、色泽无明显变化; 糖类组分变化与转化酶活性相关而非热降解, 香气成分虽有改变, 但整体风味保留较好。SAMBORSKA 等[26]以波兰蜂蜜为原料, 采用微波真空干燥技术制备高级干燥蜂蜜, 该技术具有能量利用率高、干燥速率快、能较好保留酶活性且羟甲基糠醛生成量低的优势, 干燥时间较真空干燥或冷冻干燥缩短 70%~80%。

2.4　真空干燥技术

真空干燥技术是一种中低温干燥蜂蜜粉的方法, 干燥技术并不复杂, 成本也相对可控。能高效地将液态蜂蜜转化为稳定性良好的蜂蜜粉[33]。该技术的核心原理为在密闭设备中创造低压真空环境, 从而大幅降低了水的沸点, 让蜂蜜在温和温度下就可以完成水分汽化干燥; 跟常压环境相比, 低压条件能让水分在更低的温度下快速蒸发。且

蜂蜜在低压环境中会形成泡沫状结构，这将进一步提升干燥速率，从而大幅优化干燥效率[34]。真空干燥的一个突出优点是整个过程基本没有氧气参与。这样可有效减少蜂蜜中酚类、黄酮类、酶类等热敏性成分的氧化降解，同时还可以抑制美拉德反应与氧化反应的发生，完整保留蜂蜜的天然色泽与营养组分；更值得关注的是，相较于喷雾干燥制品，真空干燥制备的蜂蜜粉在香气保留上表现更优，成为其差异化品质亮点[35]。此外通过微胶囊技术还可有效提升蜂蜜粉的 Tg，从根本上改善粉体的吸湿特性，降低储存过程中的结块风险，进一步提升产品稳定性。DEVI 等[36]以印楝蜜为原料，在 20~60 mmHg、70 ℃下真空干燥，压力驱动的传质使颗粒形貌与颜色更均匀，所得蜂蜜粉货架期达 189 d；NURHAD 等[37]证实真空干燥制备的蜂蜜粉得率为 72.98%~73.74%，高于同研究中的冷冻干燥法，且风味与香气保留完整；RUSLI 等[38]则指出，以 70%麦芽糊精为载体真空干燥丁香蜜时，产品在吸湿性、水分含量及外观方面表现更优。

2.5 不同蜂蜜粉干燥技术优缺点对比

为直观对比上述 4 种蜂蜜粉干燥技术的应用特点，明晰各工艺在实际生产中的适配性与局限性，现将喷雾干燥、冷冻干燥、微波真空干燥及真空干燥的核心优缺点整理如表 2 所示。

表 2 不同蜂蜜粉干燥技术优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of different honey powder drying technologies

干燥技术	优点	缺点	参考文献
喷雾干燥	1. 工业化主流，连续化强、量产适配性好； 2. 干燥快、能耗可控； 3. 可通过载体复配优化性能，得率较高	1. 高温易降解热敏成分、引发褐变； 2. 大液滴易裹水，增加结块风险； 3. 性能对参数敏感，需严格把控	[39]
冷冻干燥	1. 低温真空，营养、香气保留极佳； 2. 产品疏松多孔，溶解性、复水性好； 3. 色泽贴近原料，适配高附加值产品	1. 设备与能耗成本高，效率低； 2. 周期长，难大规模连续生产； 3. 产品吸湿性强，需载体优化稳定性	[24]
微波真空干燥	1. 低温快速，无褐变，色泽天然； 2. 内部加热均匀，热敏成分保留优于喷雾干燥； 3. 适配高黏度蜂蜜，效率高于冷冻干燥	1. 大规模生产易受热不均，品质波动； 2. 设备造价与维护成本高； 3. 挥发性香气有损失，工业化参数待优化	[40]
真空干燥	1. 低温无氧，保留天然色泽与营养； 2. 成本低于冷冻干燥，适配中小规模生产； 3. 载体可选性强，高黏度蜂蜜兼容性好	1. 效率低于喷雾干燥，需控制料液厚度； 2. 流动性中等，需抗结剂优化； 3. 受温度、湿度影响大，需严格控储	[26]

蜂蜜粉在生产的过程中仍面临困难，因此需要不断地优化工艺参数，并且要突破设备的限制。喷雾干燥的雾化不均和热风分布不佳会导致粉体黏壁，进而造成蜂蜜粉的浪费，同时高温还会导致蜂蜜粉的活性成分。因此可以优化雾化器、改善空气流场及低温或超声辅助喷雾来解决以上问题。冷冻干燥虽能保留活性物质，但是能耗多，并且干燥所需时间较长，因此可以增大冻干面积和升级冷却系统来提高效率，以及缩短介质预处理周期。微波真空干燥在缩短干燥时间和提升热质效率上具优势，但存在加热不均和局部热点问题，可采用多点微波耦合、旋转托盘及实时反馈协同控制来解决。总之要不断地优化参数，推动设备更新，利用响应面法建模和开发混合干燥系统，实现工艺协同，从而提高能效并且改善粉体的品质，增强工业化干燥系统的可持续性和性能。

3 防结块剂对蜂蜜粉特性的影响

3.1 微晶纤维素

微晶纤维素是蜂蜜粉制备中常用的载体，它是高结晶度的纯化纤维素衍生物[41]，分散性良好，具备低吸湿性和高热稳定性的理化特征，同时拥有良好的结构支撑性与抗黏聚性，可在蜂蜜粉干燥过程中形成骨架结构，从而减少颗粒间的黏连，提升粉体的流动性能与储存抗结块能力[42]。MASYITHOH 等[43]以花卉蜜、多花种森林蜜、无刺蜂蜜 3 种蜂蜜为原料，以微晶纤维素为载体，蜂蜜与微晶纤维素干重比为 1:1，微晶纤维素按 1:1 的比例水合分散，经 70 ℃、25 英寸汞柱真空压力干燥 5 h 并添加 2%二氧化硅为助流剂制备蜂蜜粉，系统探究其对蜂蜜粉的影响并对比糊精载体的作用效果，结果显示微晶纤维素基蜂蜜粉的流动性、孔隙率表现更优，吸湿性整体偏低，制备产率较高且水分含量均符合储存稳定性要求，对蜂蜜粉酸度与 pH 无显著调控作用，热降解抑制作用弱于糊精，颜色参数受蜂蜜原料影响显著且对天然色素有物理稀释作用，但其溶解性、复水性远差于糊精基样品，抗氧化性能也整体显著偏低，相关分析表明微晶纤维素基蜂蜜粉的流动性与孔隙率呈显著正相关、与溶解性呈强负相关，抗氧化相关参数间呈强正相关但与粉体物理特性无显著关联，聚类分析则显示其物理性能与抗氧化特性呈独立聚类，说明微晶纤维素能有效优化蜂蜜粉物理结构、提升抗结块与流动性能，但无法兼顾蜂蜜中抗氧化活性成分的保留[44]。

3.2　豌豆蛋白

植物蛋白被用作载体, 引起了人们的极大兴趣, 并反映了目前食品工业中的“绿色”趋势[45–46]。豌豆蛋白作为蜂蜜粉载体的防结块效果, 与其低黏度、分散稳定性、乳化成膜性、微粉化颗粒特性及水分调控能力密切相关: 低黏度减少体系黏结, 分散稳定性助力形成均匀干燥骨架, 乳化成膜性降低颗粒黏性并阻隔水分, 微粉化颗粒提升流动性、优化孔隙率以减少团聚, 水分调控能力降低水活度、抑制颗粒吸湿黏连, 综合增强蜂蜜粉稳定性[47]。TONIAZZO 等[7]研究者研究发现, 微粉化豌豆蛋白是蜂蜜喷雾干燥的优质有效载体, 其干物质蛋白含量达 84 g/100 g, 且具有低黏度、优良乳化性的特点, 经微粉化处理后可成功实现雾化干燥; 该载体在干燥过程中能维持低温环境, 完整保留蜂蜜中的酚类等生物活性物质, 制得的豌豆蛋白基蜂蜜粉水活度均低于 0.6, 吸湿性与其他植物蛋白载体无显著差异, 满足食品微生物稳定性要求, 且颗粒粒径仍小于 100 μm, 完全符合食品配料的应用标准。

3.3　硅酸钙、硬脂酸钙

硅酸钙、硬脂酸钙主要通过抢吸水分、形成颗粒屏障、降低颗粒间摩擦抑制蜂蜜粉结块[48]; 硅酸钙靠多孔结构竞争水分, 还能在蜂蜜粉颗粒间形成物理间隔[49]; 硬脂酸钙借助疏水性在颗粒表面形成疏水膜, 阻隔水分接触, 同时抑制无定形组分重结晶, 还能降低颗粒间摩擦。NURHADI 等[50]的这项研究结果显示, 2 种抗结块剂均未改变蜂蜜粉水分吸附等温线特征[51], 且都能提升其堆密度, 将流动性从易流动提至自由流动; 其中硅酸钙对蜂蜜粉结构稳定性无明显改善, 硬脂酸钙能有效抑制其无定形组分重结晶和结构坍塌[52], 改善流动性的效果也更优, 1%和 2%的添加比例呈现出一致的实验效果。

为便于横向比较不同防结块剂的应用特点, 现将微晶纤维素、豌豆蛋白、硅酸钙和硬脂酸钙在蜂蜜粉中的主要作用机制、防结块效果、对品质的影响、适配工艺及添加比例整理如表 3 所示。

表 3　不同防结块剂在蜂蜜粉中的应用特性对比

Table 3　Comparison of application characteristics of different anticaking agents in honey powder

防结块剂	主要作用机制	防结块效果	对蜂蜜粉品质的影响	添加比例
微晶纤维素	高结晶度骨架支撑; 低吸湿、耐热; 在颗粒间形成物理隔离, 降低黏连	中—高: 可改善流动性、孔隙率和储藏抗结块性	与糊精体系相比, 微晶纤维素体系溶解性更低、溶解时间更长; 抗氧化指标整体偏低; 色泽参数仍主要受蜜源影响, 微晶纤维素本身更多表现为稀释/支撑效应	蜂蜜:载体常用 1:1(干基); 微晶纤维素预水合约 1:1
豌豆蛋白	乳化成膜与包埋保护; 微粉化后改善分散、雾化和水分调控, 减轻黏壁	中等: 有助于提高粉体稳定性, 但作为“直接防结块剂”的证据弱于无机抗结块剂	总酚未因喷雾干燥而明显降低; 水活度均低于 0.6; 粒径小于 100 μm。对色泽影响相对温和, 但直接“抑制结块”量化数据仍有限	可单独作载体, 也可与其他壁材复配; 当与米蛋白复配时, 豌豆蛋白比例宜≤50:50(以获得较高得率)
硅酸钙	多孔结构吸附自由水; 在颗粒间形成间隔, 降低黏连与团聚	中等: 可改善流动性, 但对抑制无定形结构坍塌和重结晶作用有限	在蜂蜜粉体系中, 对溶解性、抗氧化性和色泽的直接影响未见明确报道; 现有证据主要指向其改善物理稳定性与流动性	常见添加量为 1%~2%
硬脂酸钙	疏水表面膜阻隔水分; 降低颗粒间摩擦; 延缓无定形组分重结晶与结构坍塌	较高: 流动性改善优于硅酸钙, 延缓结块更明显	在蜂蜜粉体系中, 对抗氧化性和色泽的直接影响未见明确报道; 由于疏水性, 可能使润湿和溶解速度略降, 但这一点在蜂蜜粉中的定量证据仍有限	常见添加量为 1%~2%

4　结　论

蜂蜜粉结块的本质是水分增塑引起 Tg 降低, 进而导致颗粒黏连。因此, 解决结块问题, 关键就在于提高蜂蜜粉的 Tg 值、降低它的吸湿性, 同时让无定形体系变得更稳定。现有研究表明, 低温干燥工艺与复合载体/防结块剂协同应用, 是保留蜂蜜粉活性、改善其流动性和提高储藏稳定性的有效路径。其中, 喷雾干燥适合规模化生产, 但需通过载体复配和优化参数来降低热损伤与黏壁风险; 冷冻干燥品质保留效果较好, 但受到了成本和效率限制; 微波真空干燥及真空干燥在低温脱水和活性成分保留方面具有潜力, 但仍需提升设备连续化。微晶纤维素、豌豆蛋白、硅酸钙和硬脂酸钙等防结块剂可通过骨架支撑、水分调控、物理隔离和表面疏水作用改善粉体稳定性, 但其应用效果受到蜜源组成、干燥方式和添加比例共同影响。

未来研究应围绕蜂蜜粉“原料-工艺-载体-储藏”全过

程开展系统优化: (1)建立不同蜜源蜂蜜的糖组成、Tg 值、吸湿性与结块速率之间的关联模型, 提高工艺适配的针对性; (2)开发天然、高效、低添加量的复合防结块剂, 明确不同载体间的协同机制及其对溶解性、色泽和功能性成分保留的影响; (3)优化微波真空干燥等低温干燥设备结构, 提升加热均匀性、连续化生产能力和能效水平; (4)结合在线水分监测、响应面优化和机器学习预测等方法, 开展蜂蜜粉防结块的智能调控研究。通过上述研究, 可进一步提升蜂蜜粉的储藏稳定性和工业化应用价值。

参考文献

[1] JAYA F, RADIATI LE, ESTIASIH T, *et al*. Effect of honey powder concentration on physicochemical and sensory characteristics of spray-dried yogurt [J]. CyTA-Journal of Food, 2025, 23(1): 2566758.

[2] KRISHNAN R, MOHAMMED T, KUMAR GS, *et al*. Honey crystallization: Mechanism, evaluation and application [J]. The Pharma Innovation Journal, 2021, 10(5): 222–231.

[3] SAMBORSKA K, SOKOŁOWSKA P, SZULC K. Diafiltration and agglomeration as methods to improve the properties of honey powder obtained by spray drying [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 33–41.

[4] CANTERO L, GONZÁLEZ-CEBALLOS L, VALLEJOS S, *et al*. Impact of the drying procedure and botanical origin on the physico-chemical and potentially bioactive properties of honey powders [J]. Foods, 2023, 12(21): 3990.

[5] FAN F, ROOS YH. Physicochemical properties, structural transformation, and relaxation time in strength analysis for honey powder models [J]. Food Research International, 2019, 122: 137–148.

[6] VOSOGHI M, YOUSEFI S, HONARVAR M. Physicochemical and sensory properties of honey powder from different climatic regions [J]. Applied Food Research, 2025, 5(1): 100843.

[7] TONIAZZO T, COLLADO-GONZALEZ M, TADINI CC, *et al*. Evaluation of physicochemical properties of honey powder using rice and pea proteins as carriers [J]. Food Research International, 2023, 167: 112692.

[8] LUO X, DONG Y, GU C, *et al*. Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 727181.

[9] AMARIEI S, NOROCEL L, SCRIPCĂ LA. An innovative method for preventing honey crystallization [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102481.

[10] JI P, LIU X, YANG C, *et al*. Natural crystallization properties of honey and seed crystals-induced crystallization process for honey performance enhancing [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134972.

[11] HAN W, CHAI X, ZAABOUL F, *et al*. Beeswax crystals form a network structure in highly unsaturated oils and O/W emulsions under supersaturation and cool temperature conditions [J]. LWT, 2022, 164: 113594.

[12] 孙晓杰, 黄学者, 赵玉强, 等. 云南 5 种蜂蜜 12 种糖组分和 20 种氨基酸含量的测定与分析[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 148–155.
SUN XJ, HUANG XZ, ZHAO YQ, *et al*. Determination and analysis of 12 sugar components and 20 amino acids in five kinds of honey from Yunnan [J]. Food Science, 2025, 46(2): 148–155.

[13] 吴海涛, 张艺玮. 椴树蜂蜜多糖和多花种蜂蜜多糖加工特性的比较[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 323–328.
WU HT, ZHANG YW. Comparison of processing characteristics between linden honey polysaccharide and multifloral honey polysaccharide [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 323–328.

[14] NURHADI B, MAIDANNYK VA, DJALI M, *et al*. Physical and functional properties of agglomerated coconut sugar powder and honey powder using polyvinylpyrrolidone as a binder [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 93–104.

[15] GARCÍA-TENESACA M, NAVARRETE ES, ITURRALDE GA, *et al*. Influence of botanical origin and chemical composition on the protective effect against oxidative damage and the capacity to reduce *in vitro* bacterial biofilms of monofloral honeys from the Andean region of Ecuador [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 19(1): 45.

[16] PASIAS IN, RAPTOPOULOU KG, MAKRIGENNIS G, *et al*. Finding the optimum treatment procedure to delay honey crystallization without reducing its quality [J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132301.

[17] NAYIK GA, DAR BN, NANDA V. Rheological behavior of high altitude Indian honey varieties as affected by temperature [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17(3): 323–329.

[18] DANTAS A, PIELLA-RIFÀ M, COSTA DP, *et al*. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application [J]. Applied Food Research, 2024, 4(1): 100382.

[19] NIK-ABD-RAHMAN NFN, ZUBAIRI SI, HASHIM H, *et al*. Revolutionizing spray drying: An in-depth analysis of surface stickiness trends and the role of physicochemical innovations in boosting productivity [J]. Journal of Food Quality, 2024, 2024(1): 8929464.

[20] TONIAZZO T, FIOROTO AM, DA SILVA-ARAÚJO E, *et al.* Honey powder produced by spray drying as an ingredient: A new perspective using a plant-based protein as a carrier [J]. Drying Technology, 2023, 41(10): 1651–1662.

[21] 袁观富, 郑田要, 韦杰, 等. 蜂蜜粉的喷雾干燥工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2016(12): 139–142.
YUAN GF, ZHENG TY, WEI J, *et al.* Study on spray drying technology of honey powder [J]. China Food Additives, 2016(12): 139–142.

[22] CUEVAS-GLORY LF, PINO JA, SOSA-MOGUEL O, *et al*. Optimization of the spray-drying process for developing stingless bee honey powder [J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(1): 20160217.

[23] SUHAG Y, NAYIK GA, KARABAGIAS IK, *et al*. Development and characterization of a nutritionally rich spray-dried honey powder [J]. Foods, 2021, 10(1): 162.

[24] 李园园, 杨文超, 叶丹榕, 等. 蜂蜜粉的加工工艺[J]. 蜜蜂杂志, 2021, 41(2): 9–13.
LI YY, YANG WC, YE DR, *et al*. Processing technology of honey powder [J]. Journal of Bee, 2021, 41(2): 9–13.

[25] 刘彩珍. 蜂蜜粉的研制技术研究[J]. 蜜蜂杂志, 2014(5): 11–13.
LIU CZ. Research on the preparation technology of honey powder [J]. Journal of Bee, 2014(5): 11–13.

[26] SAMBORSKA K. Powdered honey–drying methods and parameters, types of carriers and drying aids, physicochemical properties and storage stability [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 133–142.

[27] DUAN X, YANG X, REN G, *et al*. Technical aspects in freeze-drying of foods [J]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1271–1285.

[28] WAGHMARE R, KUMAR M, YADAV R, *et al*. Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovative approach for the retention of nutraceutical quality in foods [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134571.

[29] FERRASSI H, ELOUAFY Y, EDDINE OJ, *et al*. Antioxidant properties, phytochemical characterization and quantification of sugars, HMF, pesticides by liquid chromatography in Moroccan monofloral honey [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2025, 19(12): 9822–9837.

[30] 周治德, 李桂银, 章军. 蜂蜜粉冷冻干燥工艺参数的研究[J]. 食品工业科技, 2010(9): 254–255.
ZHOU ZD, LI GY, ZHANG J. Study on the freeze-drying process parameters of honey powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010(9): 254–255.

[31] GANAIE TA, MASOODI FA, RATHER SA, *et al*. Exploiting maltodextrin and whey protein isolate macromolecules as carriers for the development of freeze dried honey powder [J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100040.

[32] CUI ZW, SUN LJ, CHEN W, *et al*. Preparation of dry honey by microwave–vacuum drying [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(4): 582–590.

[33] MAHARANI AR, RADIATI LE, SUSILO A, *et al*. Formulation optimisation for pilot-scale honey powder production: A response surface methodology and central composite design approach [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2024, 42(1): 45–54.

[34] ISLAM MZ, KITAMURA Y, YAMANO Y, *et al*. Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 131–140.

[35] MUTLU C, KOÇ A, ERBAŞ M. Some physical properties and adsorption isotherms of vacuum-dried honey powder with different carrier materials [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110166–110173.

[36] DEVI KD, PAUL SK, SAHU JK. Study of sorption behavior, shelf life and colour kinetics of vacuum puffed honey powder at accelerated storage conditions [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(5): 2334–2341.

[37] NURHAD B, ANDOYO R, INDIARTO R. Study the properties of honey powder produced from spray drying and vacuum drying method [J]. International Food Research Journal, 2012, 19(3): 849–854.

[38] RUSLI AA, MOHAMAD NJ, MAHMOOD A, *et al*. Characterisation of vacuum dried honey-sugar powder as affected by drying temperature and sugar carrier ratio for further application in chocolate [J]. International Food Research Journal, 2024, 31(2): 352–367.

[39] LI Z, SUN C, NAEEM A, *et al*. Advancements in spray drying, part I: From critical factors to variegated applications [J]. Drying Technology, 2024, 42(16): 2299–2327.

[40] FAROOQ S, ZAHOOR I, GANAIE TA, *et al*. Honey powder: Drying methods, physicochemical properties, and its applications in food formulations [J]. Future Postharvest and Food, 2025, 2(3): 248–261..

[41] WANG W, ZHOU W. Characterisation of spray dried soy sauce powders made by adding crystalline carbohydrates to drying carrier [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 417–422.

[42] NSOR-ATINDANA J, CHEN M, GOFF HD, *et al*. Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 159–174.

[43] MASYITHOH D, JAYA F, ESTIASIH T, *et al.* Characterization of vacuum-dried honey powder: Effect of honey type and carrier composition on functional, physicochemical, and antioxidant properties [J]. International Journal of Food Properties, 2025, 28(1): 2557992.

[44] SILVA DM, NUNES C, PEREIRA I, *et al*. Structural analysis of dextrins and characterization of dextrin-based biomedical hydrogels [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 114: 458–466.

[45] MOSER P, NICOLETTI VR, DRUSCH S, *et al*. Functional properties of chickpea protein-pectin interfacial complex in buriti oil emulsions and spray dried microcapsules [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105929.

[46] NESTERENKO A, ALRIC I, SILVESTRE F, *et al*. Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 42: 469–479.

[47] FU A, LIU L, XIONG X, *et al*. Pea protein: Advances in applications, protein-flavor interactions, and flavor enhancement strategies [J]. Food Research International, 2026: 118347. DOI: 10.1016/j.foodres.2026.118347

[48] STOKLOSA AM, LIPASEK RA, TAYLOR LS, *et al*. Effects of storage conditions, formulation, and particle size on moisture sorption and flowability of powders: A study of deliquescent ingredient blends [J]. Food Research International, 2012, 49(2): 783–791.

[49] LIPASEK RA, TAYLOR LS, MAUER LJ. Effects of anticaking agents and relative humidity on the physical and chemical stability of powdered vitamin C [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(7): C1062–C1074.

[50] NURHADI B, ROOS YH. Dynamic water sorption for the study of amorphous content of vacuum-dried honey powder [J]. Powder Technology, 2016, 301: 981–988.

[51] NURHADI B, ROOS YH. Water sorption and water plasticization behavior of vacuum dried honey [J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(6): 1370–1380.

[52] NURHADI B, ROOS YH. Influence of anti-caking agent on the water sorption isotherm and flow-ability properties of vacuum dried honey powder [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 76–82.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)