DOI:10.12441/spyswjs.20250829001 [文章编号] 1673-1689(2026)06-0012-09

变性淀粉制备技术及应用研究进展

李 雪[1] 赵亚飞[1] 黄 奕[1] 白瑞华[2*] 陈 悦[1] 陈小强[1]

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院,湖北 武汉 430068; 2. 国家林业和草原局竹子研究开发中心,浙江 杭州 310012)

摘要: 天然淀粉因成本低、可生物降解、可再生及原料易得等优势而备受关注,然而其较差的水溶性、机械稳定性和冻融稳定性限制了其应用范围。淀粉经变性处理后,透光率显著提高,表观黏度增大,体系的冻融稳定性、酸碱耐受性以及贮藏稳定性均得到显著增强,表现出更为优异的加工与应用性能。作者主要从物理变性、化学变性、酶法变性及复合变性等方面,对变性淀粉的制备策略及不同方法的优缺点展开系统描述,概括了变性技术对淀粉内部结构及理化性质的影响,介绍了变性淀粉在各个领域的应用现状,为开发更高效、更具针对性的变性淀粉技术提供参考。

关键词: 变性淀粉;淀粉精准设计;淀粉应用

Research Progress in Preparation Technology and Applications of Modified Starch

LI Xue[1] *ZHAO Yafei*[1] *HUANG Yi*[1] *BAI Ruihua*[2*] *CHEN Yue*[1] *CHEN Xiaoqiang*[1]

(1. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. China National Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Natural starch has attracted much attention due to its low cost, biodegradability, renewability, and easy availability of raw materials. However, its poor water solubility, mechanical stability, and freeze-thaw stability limit its application scope. After modification treatment, the transmittance of starch significantly increases, and the apparent viscosity also increases. Moreover, the system exhibits significantly enhanced freeze-thaw stability, acid-base tolerance, and storage stability, showing more excellent processing and application performance. The author systematically describes the preparation strategies of modified starch, mainly from physical, chemical, enzymatic and composite modification methods, summarizes the influences of modification technology on the internal structure and physicochemical properties of starch, and introduces the application status of modified starch in various fields, laying a foundation for the development of more efficient and targeted modified starch technologies.

Keywords: modified starch; precise design of starch; starch application

淀粉是植物通过光合作用积累的葡萄糖聚合而成的大分子碳水化合物,其基本构成单位是*α-D*-吡喃葡萄糖,见图1。淀粉在自然界中非常丰富,具有易获取、低成本、可降解、无毒无害等优点[1],在食品、生物医药、化妆品、造纸、环保、纺织等众多领域得到广泛使用。

天然淀粉的糊化特性差、冻融稳定性低、耐酸及耐碱性差、成膜与阻隔性能差,在实际应用中受到很大限制,因此淀粉变性技术应运而生。其中,物理变性技术具有简单、安全、环保等特点,一般通过破坏或重组淀粉颗粒的分子排列[2]达到变性目的,从而影响淀粉热稳定性和消化率等特性。常见的物理变性技术包括热处理和非热处理,热处理中常见的是湿热处理、退火处理、预糊化处理、挤压处

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20181406)。

通信作者: 白瑞华(1975—),男,硕士,副研究员,主要从事竹笋及竹资源食药品开发研究。E-mail:oscar_bai168@aliyun.com

收稿日期: 2025-08-29 **修回日期:** 2025-09-18

理等；非热处理主要包括超声波处理、γ射线辐照、脉冲电场处理等。化学变性技术是将化学试剂中的官能团引入淀粉聚合物，进而生成不同类型的淀粉。然而，在制备化学变性淀粉的过程中，多余化学试剂的处理是一项新的挑战，不过目前仍缺乏关于化学变性淀粉对人类健康的潜在长期影响的研究。酶法变性技术是使用各种酶单独或者协同对淀粉进行处理[3]。酶促反应简单、快速、活化能较低，且通过酶法变性可以得到具有不同功能的淀粉[4]。由于不含人工合成的成分，此技术较为环保，符合“清洁标签”理念[5]。与其他2种变性技术相比，酶法变性表现出显著优势，如不良产物形成减少、反应条件温和、更加安全健康、部分酶可回收再利用。在此基础上，还可以植物纤维为骨架、淀粉为黏结剂设计新型可生物降解淀粉基复合材料，以缓解“白色污染”问题。

变性淀粉在许多领域中的使用范围正在扩大，并且在未来将更具吸引力。作者综述了物理变性、化学变性、酶法变性和复合变性技术的特点及应用，为进一步开发具有特定性质的淀粉提供参考。

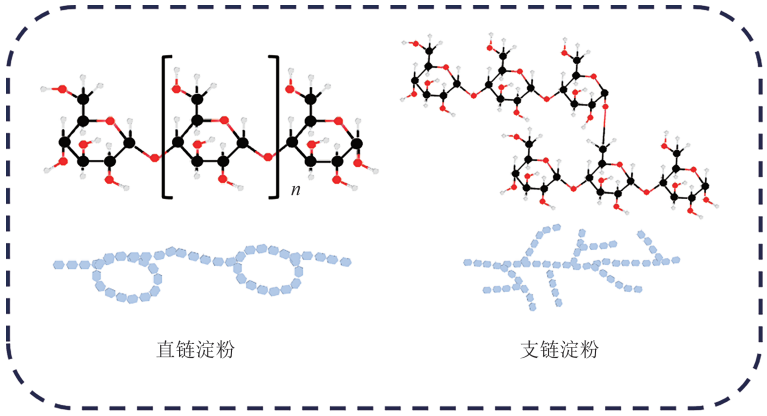


图1　直链淀粉和支链淀粉分子结构式

Fig. 1　Structural formulae of amylose and amylopectin molecules

1　物理变性技术

物理技术制备变性淀粉是指利用热、机械力、射线等物理手段处理天然淀粉，通过破坏淀粉颗粒内的分子间氢键与结晶结构，诱导其发生物理重构，针对性改善淀粉的糊化、黏度、稳定性及溶解性等应用性能，得到新的淀粉或者淀粉衍生物，从而使淀粉可适应各种特定使用环境[6]。

1.1　热处理

1.1.1　湿热处理

湿热处理需要具备高温和低水分质量分数（10%~35%）2个条件。处理前将淀粉密封，防止水分因湿热处理中的高压而蒸发，从而维持体系内水分的恒定。水分在其内部作为“塑化剂”和“能量介质”，通过分子热运动的形式向体系输入能量，促使氢键网络逐级松弛，引发淀粉分子链的构象熵增与大规模节段运动[7]。然而，该技术的改性效果高度依赖工艺参数和淀粉来源，水分质量分数越低，淀粉颗粒表面的变化就越大，进而增强其对其他变性处理的敏感性。湿热处理改变了淀粉颗粒的结晶层和非结晶层，降低了溶胀性、溶解度和黏度，同时提高了糊化温度[8]。因此，湿热处理后的变性淀粉可以作为稳定剂和增稠剂，用在灭菌乳制品、汤料及面条等产品中，有效防止产品在高温处理或长途运输后出现析水、糊化等问题。

1.1.2　退火处理

退火处理通常是在一定的水分质量分数（>40%）下，将淀粉置于高于玻璃化转变温度但低于糊化温度的条件下保持一段时间。为增强变性效果，经常连续使用退火技术[9]或与其他技术联用。研究表明，水分质量分数和处理时间能够影响淀粉的理化性质，如溶解度、持水力、持油能力、糊化度及形成凝胶的质地，因此退火处理是一种有效、低成本、绿色的淀粉变性方法。淀粉颗粒在退火后通常能够保持完整，但是会出现颗粒表面不平整、糊化温度变高、结晶熔化温度范围变窄、淀粉溶胀能力和溶解度降低、缓慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加等现象[10]。这些结构及功能特性的变化表明，退火处理通过促进淀粉分子链重排和结晶区优化，增强了淀粉的营养功能与加工适用性，尤其

适合于需要改善热稳定性和消化特性的食品体系与应用场景。

1.1.3 预糊化处理

预糊化淀粉是将淀粉加热糊化后快速脱水干燥制得。预糊化处理会导致淀粉氢键断裂、形成多孔结构，使其具有高溶胀性、低结晶度和冷水可溶性等特性，通常在方便食品中作为增稠剂使用[11]。预糊化过程中淀粉中的水分质量分数很关键，不同水分质量分数会显著影响预糊化淀粉的回生行为：水分通过调控不溶性组分中直链淀粉的溶出与分布，引发分子间聚集及有序重排，进而促进有序结构与重结晶的形成。此过程主要分为3个阶段，包括可逆阶段、不可逆阶段、淀粉粒解体[12]。水分与直链淀粉相互作用的重结晶机制仍需深入研究，以更精准地调控淀粉回生行为，拓展其在高稳定性食品体系中的应用。

1.1.4 挤压处理

挤压处理法制备变性淀粉的工艺流程包括原料预处理、挤压、干燥、冷却及成品制备。挤压机的螺旋杆数量及参数（如转速、温度、水分质量分数）是影响淀粉理化性质的关键因素，决定了淀粉的糊化程度、力学性能和结构特征。挤压处理常与预糊化处理[13]、羟丙基化处理[14]、加湿处理[14]或绿原酸处理[15]等方法联用，并通过协同作用优化淀粉的加工性能。研究表明，挤压处理可以改变淀粉的链长分布、短程有序结构和相对结晶度，使淀粉具备良好的流变性和成形稳定性，适用于3D打印[16]。然而，目前对多技术协同使用中的工艺适配性与机制仍缺乏系统研究，未来需进一步明确挤压过程中淀粉结构演变的动态机制，以推动该技术在食品智能制造中的精准设计与应用。

1.2 非热处理

针对淀粉高温不稳定、易回生等问题，选择合适的非热处理方法很关键。目前常用方法包括机械研磨、超声波处理、γ射线辐照、脉冲电场处理、冷等离子体处理等。不同变性方法的作用机制、适用淀粉类型及变性效果存在显著差异，例如超声波处理更利于提高反应活性，而高压处理更易调控结晶结构。现阶段仍缺乏系统性的技术筛选准则与机理对比研究，未来需结合淀粉源特性与应用需求构建变性方法-结构-功能之间的关联模型，以推动绿色物理变性技术在淀粉精准设计中的应用。

1.2.1 机械研磨

机械研磨是一种通过摩擦力和其他机械力作用，使淀粉颗粒内部存储机械能，产生大量活性结合位点，使淀粉和其他物质反应更充分，从而得到变性淀粉的方法。在机械力作用下，淀粉颗粒的结晶结构遭到破坏，颗粒尺寸显著减小[17]，随着研磨时间的延长，颗粒比表面积显著增大，吸附能力显著增强，同时支链淀粉的比例和结晶度也会发生变化。由于研磨过程中无任何化学试剂的加入，因此机械研磨是一种操作简单、安全性高且环境友好的绿色变性方式[18]。目前研究多集中于宏观性能分析，而对机械力作用下淀粉分子链断裂、重组及活性位点形成的微观机制仍缺乏深入研究，未来需结合多尺度结构表征方法，系统阐明机械能-结构-功能之间的构效关系，以推动该方法在淀粉基功能材料中的应用。

1.2.2 超声波处理

超声波处理的特点是效率高、操作简单、不易造成环境污染，还能够增加表观直链淀粉的含量、减小粒径、破坏晶体结构[19]。其原理是针对淀粉颗粒的无定形部分，使颗粒表面微孔化，从而得到变性淀粉。朱志成[20]利用超声波等手段处理不同品种的玉米淀粉，发现玉米原淀粉的结晶区与无定形区的二相结构、透明度、冻融稳定性、溶解度、膨胀度均发生了改变，为淀粉的多尺度结构与功能性质的关联机制研究提供了重要依据。超声波处理作为一种无化学残留的物理处理手段，可有效克服天然淀粉在加工与应用中的局限，在食品工业中显示出良好的应用前景。

1.2.3 γ射线辐照

γ射线辐照作为一种非热物理改性技术，可以在常温下高效处理淀粉，具有样品需求量少、无需添加催化剂、处理速度快等优点。其作用机制主要为：由辐照诱导产生的自由基引发淀粉分子链断裂与结构重组，进而显著改变淀粉的功能性质，如降低黏度、提高水溶性等。Chung等[21]采用5种不同剂量（1、5、10、25、50 kGy）的γ射线处理玉米淀粉（含不同比例直链淀粉和支链淀粉），发现γ射线辐照对淀粉糊化特性和结晶度的影响具有剂量依赖性，尤其在高剂量下更为显著，但淀粉颗粒的形态和晶体结构保持不变。γ射线辐照可促使长链淀粉断裂并降低直链淀粉含量，加速淀粉回生

过程，从而提升抗性淀粉含量并改善其冻融稳定性、吸水能力和透光性[22]。该方法在功能调控方面潜力显著，但目前关于辐照剂量、淀粉来源与功能响应之间的关系仍不明确，自由基具体作用路径与回生促进机制也有待深入研究。未来需结合多尺度结构分析与功能评价，以提高γ射线辐照法在淀粉精准变性中的安全性与应用性。

1.2.4　脉冲电场处理

脉冲电场处理是一种新兴的非热物理变性技术，其基本原理是将淀粉悬浮液与氯化钾混合，通过施加高压脉冲电场诱导电穿孔效应。该处理在淀粉中的作用主要表现为破坏晶体结构、降低结晶度，其变性效果受淀粉形态、晶体类型和淀粉来源的影响。研究表明，当比能量增加时，小麦淀粉的黏度、粒径及糊化温度均呈下降趋势[23]。在玉米和木薯淀粉中，脉冲电场处理可引起颗粒解离和分子重排[24]，甚至使晶体结构向无定形结构转变[25]。脉冲电场技术在淀粉变性中具备高效、非热加工等优势，但目前对其能量-结构-功能之间的定量关系仍缺乏系统研究，尤其是不同种类淀粉的响应机制与结构演变路径尚未明晰。未来需结合多尺度结构表征与模拟技术，进一步阐明脉冲电场诱导淀粉变性的分子机制，以推动该技术在淀粉基材料绿色加工中的精准应用。

1.2.5　冷等离子体处理

冷等离子体完全或部分由电离气体组成，主要是由于气体分子在外加能量作用下发生电离，形成了包括自由电子、自由基、正离子和负离子、激发态粒子等组分的复杂体系[26]。冷等离子体处理可以显著改变淀粉的吸水性、冻融稳定性、透明性等，变性效果通常受冷等离子体类型、功率和其他加工参数的影响。研究发现，冷等离子体处理大米淀粉会导致淀粉分子解聚并改变其特性，如增强凝胶水合特性、滞后性和浑浊度[27]。在香蕉淀粉成膜过程中，经过冷等离子体处理的样品在颗粒、悬浮液、薄膜3个状态表现出更高的短程有序性、更强的疏水性、更大的拉伸强度和良好的抗穿刺性[28]。尽管冷等离子体处理在淀粉变性中展现出独特优势，但目前对其活性粒子与淀粉相互作用的机制、能效优化及不同淀粉结构的响应差异仍缺乏系统研究。

2　化学变性技术

如图2所示，化学变性技术主要分为2类：一类是降低相对分子质量的技术，如酸解法或氧化法；另一类则是增加相对分子质量的技术，如通过交联、酯化、醚化或接枝共聚等反应实现。化学变性淀粉的性质不仅取决于变性方式，还与淀粉来源、直链淀粉/支链淀粉比例以及淀粉颗粒的形态密切相关。因此，可以通过选择不同的条件来制备具有特定功能的淀粉[29]。

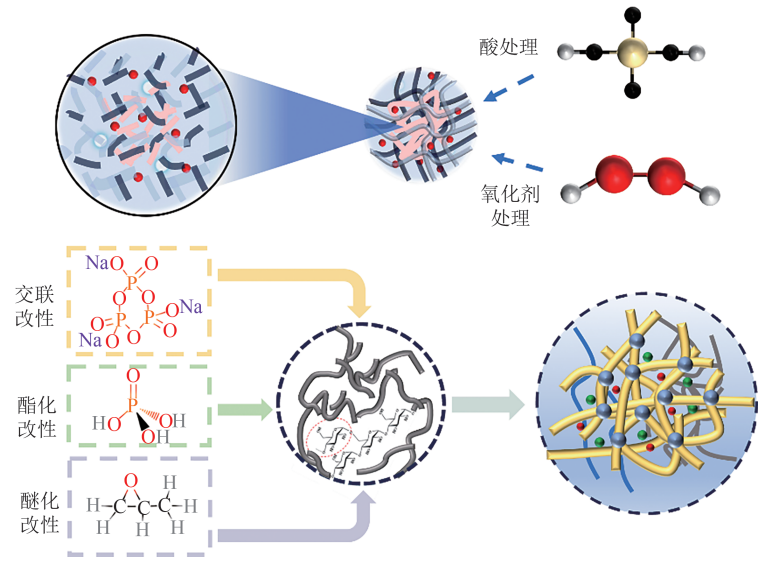


图2　化学变性技术改变淀粉相对分子质量的过程

Fig. 2　Chemical modification changes the relative molecular mass of starch

2.1 降低淀粉相对分子质量的技术

降低淀粉相对分子质量主要通过化学键断裂和分子链解聚实现。酸解法是在低于糊化温度条件下，用酸溶液或乙醇溶液处理，通过水解淀粉的α-1，4糖苷键与α-1，6糖苷键，导致分子链缩短、相对分子质量下降，最终经碱中和、洗涤及干燥获得产物。氧化法是利用过氧化氢等氧化剂，将淀粉分子中的羟基氧化为羰基、醛基或羧基，使分子链断裂，从而降低氧化淀粉的糊化温度及黏度，并提高白度、透明度及成膜性。Barbosa等[30]指出，氧化淀粉黏度取决于相对分子质量降低和分子链间作用增强之间的平衡，泡沫内部黏合强度与氧化剂浓度呈正相关。上述方法的共性是利用酸或氧化剂等外部因素破坏淀粉分子链结构，促使其发生不可逆解聚，从而有效降低淀粉相对分子质量[31]。

2.2 提高淀粉相对分子质量的技术

淀粉交联是一种通过三偏磷酸钠、环氧氯丙烷等交联剂在淀粉分子间形成磷酸盐桥键，构成稳定的三维网络结构，从而使淀粉变性的技术。交联处理可显著改善淀粉的糊化特性、质构特性等，并增强其抗剪切性与耐酸性[32]，进而扩大淀粉在食品、工业等领域的应用范围[33]。随着交联程度的提高，其相对分子质量与结构复杂性同步增加。接枝共聚是通过在淀粉骨架上引入乙烯等单体以改变其性能。例如，Zheng等[34]将淀粉在70、80、90 ℃下预热处理后与醋酸乙烯酯接枝，其黏接能力与抗冻稳定性均提高了约18%，表明接枝单体的选择与预处理条件共同决定了产物的最终性能。酯化和醚化则通过引入不同取代基实现功能改性。酯化时常采用2-辛烯基琥珀酸酐（OSA）[35]、叶酸[36]和醋酸酐[37]等酯化剂，引入疏水链段以增强淀粉保水性和乳化性。Xia等[38]发现，随着OSA取代度提高，淀粉的接触角与乳化能力增强，乳液储藏稳定期可达28 d。醚化则通过引入羟丙基等基团增强分子间作用，提高溶胀度与溶解度，部分醚化产物还表现出高吸水性与生物可降解性。研究证实，通过双重化学变性可协同提升淀粉的溶胀性、透明度等功能特性[39]，表明通过精准选择变性剂与反应条件，可实现淀粉功能特性的定向调控与应用拓展。

3 酶法变性技术

酶法变性使用的酶制剂主要有α-淀粉酶、β-淀粉酶、普鲁兰酶、分支酶以及环状糊精糖基转移酶[40]等，通过特异性催化实现淀粉结构和性能的定向调控。Almeida等[41]依次采用α-淀粉酶和淀粉葡糖苷酶处理淀粉，其水解率由4.46%提升至8.63%以上，淀粉颗粒呈球形，且非淀粉类活性成分减少，表明酶解作用主要发生在无定形区。Wang等[42]通过微波高压灭菌结合异淀粉酶及普鲁兰酶制备大麦抗性淀粉，显著提高了抗性淀粉的含量，增强了其溶胀能力、水结合能力以及结晶度，为开发功能性淀粉食品提供了重要思路。酶法变性不仅可精准调控淀粉的组成与结构，还能有效改善其功能特性，具有重要的应用潜力。

4 复合变性技术

复合变性技术是由2种或多种变性方法协同处理淀粉，以获得优于单一变性方式的性能表现。常见的组合形式包括物理-化学、化学-酶法或物理-化学-酶法等。例如，将OSA酯化与电干热处理相结合应用于糯米淀粉，可在保持颗粒结构的同时提高其三相接触角与体外消化率，相对结晶度从32.46%降低到24.87%，所得Pickering乳液的储藏稳定期可达300 d[43]。采用三偏磷酸钠与退火复合处理，玉米淀粉表现出更低的击穿黏度和回升值，以及更高的热稳定性，更适用于冷冻和罐头食品[44]。这2种复合处理虽然均是先进行化学处理，再进行物理处理，但因化学处理机制不同，所得淀粉的热稳定性不同。OSA酯化引入的疏水基团产生了强烈的空间位阻，破坏氢键网络与结晶有序性，削弱耐热性；而交联处理构建了由磷酸二酯键连接的稳固三维网络，退火处理进一步优化该结构，从而赋予体系卓越的热稳定性。

此外，同类技术的双重处理也具有协同效应。例如，双重物理改性（如湿热处理与超声联用）可改善淀粉的溶胀性、透明度与冻融稳定性[45]；双重化学处理（如OSA与三偏磷酸钠联用）可有效调控直链淀粉/抗性淀粉比例，提升其在药物控释与功能性食品中的应用潜力[46]；双重酶法处理（如α-淀粉酶与普鲁兰酶联用[47]、变形链球菌的糖原分支酶与多糖淀粉酶联用[48]等）能显著提高缓慢消化淀粉和抗性淀粉含量。因此，复合变性技术通过

多方法协同作用，可更精准、高效地调控淀粉结构与功能，拓展其应用场景。

5　变性淀粉的应用

如图3所示，在食品工业中，变性淀粉可作为增稠剂、稳定剂、持水剂等添加剂，广泛应用于乳制品、罐头、肉制品加工、饮料及烘焙等领域，有效改善产品稠度、冻融稳定性及外观品质[49]。如提高肉糜持水性、抑制脂质和蛋白质氧化[50]，延长食品保质期并维持感官品质稳定；此外，通过物理变性获得的抗性淀粉与缓慢消化淀粉，在大肠中发酵产生短链脂肪酸，具有益生元功能[51]，有助于防治代谢性疾病[52]。

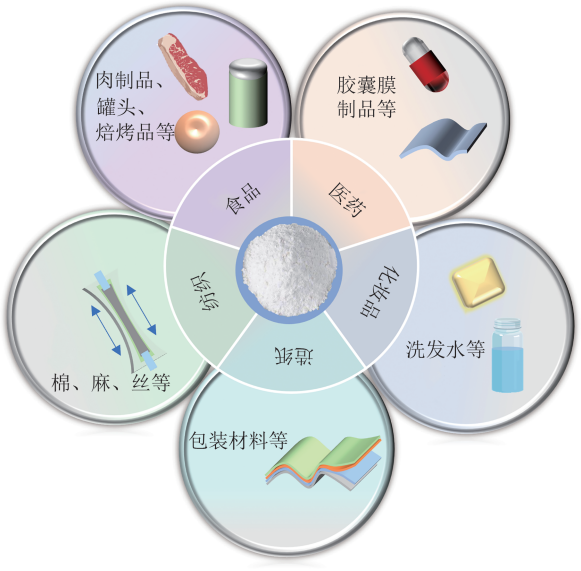


图3　变性淀粉的应用

Fig. 3　Applications of modified starch

淀粉基材料的流变性能对3D打印食品的成形精度与结构稳定性具有决定性影响。研究表明，使用OSA变性淀粉构建的高内相乳液体系，在引入质量分数0.8%的柑橘纤维作为增强相后，96 h形状保持率可达90%[53]。采用超声（振幅70%~90%）与冻融循环（1~5次）协同处理木薯淀粉，直链淀粉质量分数由19.5%降至17.1%，持水性由53.7%增至66.1%，并优化成形表面质量[54]，为淀粉基材料的食品结构精准制造与功能化设计提供了可靠的技术路径。

变性淀粉在生物医药领域已经成为一种重要的药用辅料，凭借良好的生物相容性、可降解性以及丰富的来源，常作为稀释剂、崩解剂、黏合剂应用于常规片剂和胶囊中。在专业药物递送领域，变性淀粉的低回生性、优良成膜性及快速溶解特性使其在口腔分散膜等剂型中表现突出。近年来，有研究者利用物理变性淀粉制备口腔分散膜，其膜内部含有活性药物成分，当置于舌尖或舌底时，膜会立即湿润，被唾液迅速水化，并在不饮水或咀嚼的情况下分解或者溶解，提高了用药便利性[55]。

在造纸和纺织工业中，变性淀粉主要用于增强材料间的黏合性与力学性能，并逐步应用于可降解包装材料以及生物燃料等可再生资源领域[56]。在纺织工业中，淀粉及其衍生物主要作为上浆剂和整理剂使用，增加纱线的刚度和光滑度，减少破损并改善织物外观与手感[57]。有研究者通过交联、阳离子化等改性手段，增强了变性淀粉对废水中染料、抗生素等污染物的吸附能力[58]，其中交联玉米淀粉对有机物的吸附量可达256.41 mg/g[59]，在环境治理中展现出应用潜力。

此外，酶法变性淀粉因保水性和乳化稳定性良好，常用于化妆品领域。如应用在洗发水中，促进头发的生长并增强柔软度，在美白霜中改善色素暗沉等问题。Chang等[60]探究了青稞淀粉的水、油结合能力和乳化稳定性，其制备的保湿乳可以保持长期稳定，推动了化妆品向绿色化与功能多元化方向发展。

6　展望

淀粉变性技术将向着源头精准化、过程智能化与产品功能化三大方向深度融合发展。

1）源头精准化：“基因改性淀粉”主要是通过CRISPR/Cas9等基因编辑工具定向调控淀粉合成关键酶（如颗粒结合型淀粉合酶GBSS、淀粉分支酶SBE等）的表达，从源头创制直链/支链淀粉比例、链长分布乃至晶体类型可控的“设计型”淀粉原料。例如，抑制GBSS活性可获得高支链淀粉，可用作增稠剂；调控SBE活性可获得高直链淀粉，可作为抗性淀粉的理想原料。该领域需要进一步解析基因型-淀粉结构-功能特性之间的定量构效关系，绘制淀粉基因设计图谱以应对生物安全、代谢网络复杂性等挑战。

2）过程智能化：可构建汇集工艺参数-结构演变-功能表现多维度数据的数据库。利用人工智能与机器学习算法，挖掘深层规律，建立预测模

型。研究者只需输入目标功能需求(如高乳化稳定性、低消化率),模型便能反向推荐最优的复合改性方案与工艺参数。

3)产品功能化:变性淀粉的开发将更紧密地对接前沿需求。在食品领域,基于基因设计与智能改性制备的“定制化淀粉”,将为实现个性化营养(如特定人群的慢消化需求)和3D打印食品的精准制造提供核心材料。在材料科学领域,高性能淀粉基可降解塑料、水响应型智能包装膜等将成为研究热点,为缓解“白色污染”提供新的解决方案。

“基因设计”提供理想的源头材料,“智能化改性”实现功能的精准定位,这两大技术路径的深度融合将推动淀粉基材料在食品工业、医药载体及可持续包装等领域的创新应用,为生物基材料的功能化与智能化发展提供新动能。

参考文献

[1] Boahemaa L V, Dzandu B, Amissah J G N, et al. Physico-chemical and functional characterization of flour and starch of taro (*Colocasia esculenta*) for food applications[J]. Food and Humanity, 2024, 2: 100245.

[2] Vela A J, Villanueva M, Ronda F. Ultrasonication: an efficient alternative for the physical modification of starches, flours and grains[J]. Foods, 2024, 13(15): 2325.

[3] Dura A, Rose D J, Rosell C M. Enzymatic modification of corn starch influences human fecal fermentation profiles [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(23): 4651-4657.

[4] Doan H X N, Song Y, Lee S, et al. Characterization of rice starch gels reinforced with enzymatically-produced resistant starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 76-82.

[5] Wu K R, Li C M, Li Z X, et al. Highly-branched modification of starch: an enzymatic approach to regulating its properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109433.

[6] Chen R Y, Williams P A, Shu J X, et al. Pectin adsorption onto and penetration into starch granules and the effect on the gelatinization process and rheological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107618.

[7] Wang Q F, Li L M, Zheng X L. Recent advances in heat-moisture modified cereal starch: structure, functionality and its applications in starchy food systems [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128700.

[8] Rosa Z E, Dias A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 317-328.

[9] Zhang B, Wu H, Gou M, et al. The comparison of structural, physicochemical, and digestibility properties of repeatedly and continuously annealed sweet potato starch [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 2050-2058.

[10] Wang J J, Ye Y X, Chai Z Q, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of proso millet starch modified by heat-moisture treatment and annealing processing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 235: 123829.

[11] Lee H, Yoo B. Particle agglomeration and properties of pregelatinized potato starch powder[J]. Gels, 2023, 9(2): 93.

[12] 杨世雄,高飞虎,张玲,等. 预糊化淀粉在食品中应用的研究进展[J]. 中国粮油学报,2022,37(8):314-320.
Yang S X, Gao F H, Zhang L, et al. Research progress on application of pregelatinized starch in food[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(8): 314-320.(in Chinese)

[13] Yan X D, Luo S J, Ye J P, et al. Effect of starch degradation induced by extruded pregelatinization treatment on the quality of gluten-free brown rice bread [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 272: 132764.

[14] Zehra N, Ali T M, Mustafa G. Impact of hydroxypropylation coupled with extrusion treatment on the morphological, structural, and rheological properties of sorghum and corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134173.

[15] Zeng X X, Chen L, Zheng B. Extrusion and chlorogenic acid treatment increase the ordered structure and resistant starch levels in rice starch with amelioration of gut lipid metabolism in obese rats[J]. Food & Function, 2024, 15(10): 5224-5237.

[16] Wang Y S, Zhao R X, Liu W, et al. Effect of twin-screw extrusion pretreatment on starch structure, rheological properties and 3D printing accuracy of whole potato flour and its application in dysphagia diets[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134796.

[17] Deng W J, Hu J, Rong M Q, et al. Ultrafine starch particles as Pickering emulsion stabilizers with different interfacial behaviors[J]. Starch-Stärke, 2024, 76(9/10): 2400028.

[18] Arora M, Kumar A, Sakhare S D, et al. Application and effect of hybrid grinding techniques on the quality of stone chakki atta (whole wheat flour) and flat bread [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(9): 3522-3529.

[19] Ding Y B, Xiao Y W, Ouyang Q F, et al. Modulating the *in vitro* digestibility of chemically modified starch ingredient by a non-thermal processing technology of

ultrasonic treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021,70:105350.

[20] 朱志成. 超声波对不同品种玉米淀粉结构和特性的影响[J]. 农业与技术,2023,43(23):29-33.
Zhu Z C. Effects of ultrasonic wave on the structure and characteristics of different varieties of corn starch [J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(23): 29-33.(in Chinese)

[21] Chung K H, Othman Z, Lee J S. Gamma irradiation of corn starches with different amylose-to-amylopectin ratio [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(10):6218-6229.

[22] Verma R, Jan S, Rani S, et al. Physicochemical and functional properties of gamma irradiated buckwheat and potato starch [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018,144:37-42.

[23] Achayuthakan P, Wongsagonsup R, Sriprablom J, et al. Effect of pulsed electric field treatment on the protein, digestibility, and physicochemical properties of starch granules in wheat flour[J]. Polymers, 2023, 15(20): 4087.

[24] Han Z, Zeng X N, Zhang B S, et al. Effects of pulsed electric fields (PEF) treatment on the properties of corn starch[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(3): 318-323.

[25] Han Z, Zeng X A, Fu N, et al. Effects of pulsed electric field treatments on some properties of tapioca starch[J]. Carbohydrate Polymers,2012,89(4):1012-1017.

[26] Leandro G C, Laroque D A, Monteiro A R, et al. Current status and perspectives of starch powders modified by cold plasma: a review[J]. Journal of Polymers and the Environment,2024,32(2):510-523.

[27] Thirumdas R, Trimukhe A, Deshmukh R R, et al. Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157:1723-1731.

[28] Marenco-Orozco G A, Rosa M F, Fernandes F A N. Effects of multiple-step cold plasma processing on banana (*Musa sapientum*) starch-based films [J]. Packaging Technology and Science,2022,35(8):589-601.

[29] Adewale P, Yancheshmeh M S, Lam E. Starch modification for non-food, industrial applications: market intelligence and critical review [J]. Carbohydrate Polymers,2022,291:119590.

[30] Barbosa J V, Martins J, Carvalho L, et al. Effect of peroxide oxidation on the expansion of potato starch foam [J]. Industrial Crops and Products,2019,137:428-435.

[31] Okekunle M O, Adebowale K O, Olu-Owolabi B I, et al. Physicochemical, morphological and thermal properties of oxidized starches from Lima bean (*Phaseolus lunatus*) [J]. Scientific African,2020,8:e00432.

[32] Min Y, Yi J, Dai R, et al. A novel efficient wet process for preparing cross-linked starch: impact of urea on cross-linking performance[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 320:121247.

[33] Singh A V, Nath L K. Synthesis and evaluation of physicochemical properties of cross-linked sago starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012,50(1):14-18.

[34] Zheng X Y, Cheng L, Gu Z B, et al. Effects of heat pretreatment of starch on graft copolymerization reaction and performance of resulting starch-based wood adhesive [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017,96:11-18.

[35] Cao F, Zheng M Y, Wang L, et al. Amylose and amylopectin contents affect OSA-esterified corn starch's solubilizing efficacy and action mode on hesperetin[J]. LWT-Food Science and Technology,2023,183:114904.

[36] Borah P K, Rappolt M, Duary R K, et al. Effects of folic acid esterification on the hierarchical structure of amylopectin corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 86:162-171.

[37] Xue X Z, Liang Q, Gao Q Y, et al. One-step synthesis of cross-linked esterified starch and its properties [J]. Applied Sciences,2022,12(8):4075.

[38] Xia C Y, Li J Y, Li J W. Synthesis, physicochemical, and emulsifying properties of waxy maize starch esterified with octanoic acid[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111141.

[39] Mehfooz T, Ali T M, Shaikh M, et al. Characterization of hydroxypropylated-distarch phosphate barley starch and its impact on rheological and sensory properties of soup [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020,144:410-418.

[40] Tian Y Q, Wang S X, Tong Q Y, et al. Thermal and crystalline properties of slowly digestible starch prepared from the starches physically modified by β-cyclodextrins [J]. Starch-Stärke,2017,69(3/4):1500370.

[41] Almeida R L J, Dos Santos P T, De Andrade F V, et al. Influence of enzymatic hydrolysis on the properties of red rice starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,141:1210-1219.

[42] Wang C, Zhang X Y, Tian X Y, et al. Physical and enzymatic modifications of starch from blue highland barley and their characterizations, digestibility, and lipolysis inhibitory activities[J]. LWT-Food Science and Technology,2023,180:114722.

[43] Song X Y, Gong H, Zhu W, et al. Pickering emulsion

stabilized by composite-modified waxy corn starch particles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 205: 66-75.

[44] Golshahi M, Taslikh M, Nayebzadeh K, et al. Dual modification of normal corn starch by cross-linking and annealing: investigation of physicochemical, thermal, pasting, and morphological properties [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(3): 2719-2729.

[45] Das A, Sit N. Modification of taro starch and starch nanoparticles by various physical methods and their characterization[J]. Starch-Stärke, 2021, 73(5/6): 2000227.

[46] Núñez-Bretón L C, Torres-González C E, del Ángel-Zumaya J A, et al. Functionalization of starches from Mexican *Oxalis tuberosa* using dual chemical modification [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109500.

[47] Liu Y J, Jiang F, Du C W, et al. Optimization of corn resistant starch preparation by dual enzymatic modification using response surface methodology and its physicochemical characterization[J]. Foods, 2022, 11(15): 2223.

[48] Jo A R, Kim H R, Choi S J, et al. Preparation of slowly digestible sweet potato Daeyumi starch by dual enzyme modification [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 143: 164-171.

[49] Obadi M, Qi Y J, Xu B. High-amylose maize starch: structure, properties, modifications and industrial applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120185.

[50] Zhang S L, Wang L N, Wang Q Y, et al. Effects of different types of starch on physicochemical properties and microstructure of beef during cold storage [J]. Foods, 2024, 13(17): 2767.

[51] Palanisamy A, Parimalavalli R. Resistant starch: a functional ingredient in dairy products [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17126.

[52] De Oliveira L S, Cordon C A D, Freitas C P H, et al. Physicochemical characterization of *in situ* annealed starch and its application in a fermented dairy beverage [J]. Fermentation, 2024, 10(6): 321.

[53] Wei J J, Li Y K, Blennow A, et al. 3D printing of high internal phase emulsions stabilized by OSA modified potato starch: effect of *Citrus* fiber addition [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 163: 111114.

[54] Tagrida M, Gulzar S, Martín-Belloso O, et al. Ultrasound and freeze-thaw modifications of cassava starch: microstructure, functionality, and 3D printing potential [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110963.

[55] Limpongsa E, Jaipakdee N. Physical modification of Thai rice starch and its application as orodispersible film former[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116206.

[56] 汪德林, 邓龙. 交联淀粉胶在包装领域应用性能研究[J]. 胶体与聚合物, 2022, 40(4): 162-164.
Wang D L, Deng L. Research on the application of cross-linked starch glue in the field of packaging[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2022, 40(4): 162-164. (in Chinese)

[57] Meshram M W, Patil V V, Mhaske S T, et al. Graft copolymers of starch and its application in textiles [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(1): 71-78.

[58] Crini G. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment[J]. Progress in Polymer Science, 2005, 30(1): 38-70.

[59] Abid R K, Abbas A S. Adsorption of organic pollutants from real refinery wastewater on prepared cross-linked starch by epichlorohydrin[J]. Data in Brief, 2018, 19: 1318-1326.

[60] Chang Y N, Lv Y D. Structure, functionality, and digestibility of acetylated hulless barley starch [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(8): 1818-1828.