参赛学生姓名：冯甄钰、艾星佑

中　　学：北京市第八十中学

省　　份：北京市

国家/地区：中国

指导老师姓名：王珩、潘凯

指导老师单位：北京市第八十中学、
北京化工大学

论文题目：微流控界面聚合制备相变微胶囊及其储热性能研究

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

微流控界面聚合制备相变微胶囊及其储热性能研究

冯甄钰，艾星佑

摘要

化石能源枯竭带来的能源短缺及能源供需不平衡是制约社会可持续发展的关键，也迫使人类在寻找新能源和节约能源上给予了更大的关注。相变材料在相变过程中对热能吸收和释放的特点为能源转换、存储和利用提供了很好的解决方案。相变微胶囊通过将相变材料封装于壳层，有效解决了相变材料泄露问题。尺寸均一可控的相变微胶囊可有效削减温度峰值，其储热性能高度依赖于液滴稳定成形、壳层界面构筑及限域效应；但传统机械搅拌法制备的微胶囊普遍粒径分布宽、壳层结构可控性弱、储热性能批次差异大，**无法从界面聚合反应层面对微胶囊壳层结构实现调控。**

本文采用微流控界面聚合法，以异佛尔酮二异氰酸酯（IPDI）和二乙烯三胺（DETA）为反应单体制备聚脲-十八烷相变微胶囊；该方法可生成分散性良好的液滴，构建出高度均一的油-水反应界面，使 IPDI 与 DETA 的加成聚合限定在规整可控的液-液界面上进行，实现界面聚合反应进程与聚脲壳层结构的有效调控。本文结合计算流体动力学（CFD）模拟分析和在线显微图像识别研究方法，定量表征微胶囊前驱体的粒径大小及分布，重点研究液滴稳定成形、聚脲壳层形成及芯材相变行为的调控机制，**其中的核心化学问题在于揭示 IPDI 与 DETA 在油-水界面聚合反应如何决定聚脲壳层的结构。**

研究结果表明，毛细管数调控的界面张力决定液滴的形态转变，当分散相毛细管数 Ca_d 为 0.0072-0.0216 时，可形成稳定的球形微胶囊前驱体，为界面聚合提供均一的反应模板；IPDI 与 DETA 在油-水界面发生逐步加成聚合，形成致密连续的聚脲壳层，壳层交联稳定性与反应单体配比直接相关。随着十八烷（OD）/IPDI 配比由 3:1 增至 7:1，芯材十八烷的结晶温度由 17.8℃升至 20.8℃，熔融焓由 151.1J/g 提升至 202.2J/g，其本质是核壳反应单体配比变化改变了壳层对相变芯材的限域效应，进而调控微胶囊整体的相变焓值；经 100 次冷热循环后，样品相变峰形与焓值无明显衰减，表明聚脲壳层具有优异的结构稳定性与限域持久性。**本研究建立了相变微胶囊的微流控界面聚合可控制备方法，揭示了微胶囊前驱体的成球机理，为高性能相变微胶囊的结构调控与储热性能优化提供了实验依据。**

关键词：微流控；界面聚合；聚脲微胶囊；壳层限域；相变行为

2026 Tsinghua High School Science Award
仅用于2026年清华中学科学奖论文公示

目录

1. 引言.....1
2. 实验设计与研究方法.....3
2.1 实验材料.....3
2.2 主要仪器与装置.....4
2.3 实验设计及步骤.....4
2.3.1 相变微胶囊前驱液滴成球实验研究.....5
2.3.2 IPDI/DETA 界面聚合与微胶囊成壳实验.....5
2.3.3 核壳组成与限域相变实验.....6
2.4 表征方法.....6
2.4.1 微胶囊及其前驱液滴形貌表征.....6
2.4.2 傅里叶红外光谱测试.....7
2.4.3 X 射线衍射测试.....7
2.4.4 差示扫描量热仪测试.....7
3. 结果与讨论.....8
3.1 相变微胶囊前驱液滴的界面成球机理.....8
3.1.1 仿真方法与界面受力参数.....8
3.1.2 仿真结果与分析.....9
3.2 在线显微图像识别辅助的液滴成球行为实验表征.....11
3.3 微胶囊的界面聚合与结构表征.....12
3.4 微胶囊相变行为与壳层限域作用.....16
4. 结论与展望.....19
4.1 结论.....19
4.2 展望.....19
参考文献.....20
致谢.....22

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

1. 引言

随着国民经济发展，人类对能源的需求日益增长，随之而来的能源供需不平衡以及化石能源带来的碳排放和环境污染问题越来越受到人们的重视，能源的转换、存储和利用对人类的生存和社会的可持续发展影响深远。因此科研工作者开始寻求更节能的技术来减轻化石能源消耗的增长对环境所造成的负担。能量存储在节约可用能源和提高利用率方面起着至关重要的作用，其中热量的存储和利用是能源存储研究的一种重要领域。**与显热存储方法相比、潜热存储方法在近年来得到了极大的关注，这种热能存储方法提供了更高的储能密度和更小的温度变化**。

相变材料是一种绿色、可循环使用的储能材料，可在特定温度区间内通过可逆固-液相变过程吸收与释放潜热，实现热能的时空转移与温度调控[1]。该类材料可以很好的对太阳能、工业余热及生活废热进行回收再利用，缓解供需平衡问题，对缓解能源危机、发展绿色经济具有重要的推动作用，在集中供热系统、光伏热电系统、生鲜食品和热敏药品等的冷链运输、电子器件的热保护和热管理、绿色节能建筑以及具有温度调节功能的纤维或纺织品等领域具有广泛的应用前景[2-3]。以相变材料为核心的**高效被动式储热技术已成为补充主动供热散热体系、提升热管理系统整体能效的重要技术路径。**

将相变芯材包覆于聚合物壳层中形成的相变微胶囊，凭借核-壳结构的空间限域作用，既能有效降低液态芯材的泄漏风险、提升冷热循环稳定性，又能完整保留芯材的高潜热特性，为在有限空间实现高效热管理、精密封装和局部精准温控提供了材料基础[4,5]。

相变微胶囊的制备工艺经历了从批量粗放制备向精准调控的发展历程。传统制备方法以搅拌乳液聚合、原位聚合、喷雾干燥等为主，其中搅拌乳液聚合法通过机械剪切作用形成油水分散体系，诱导单体在液滴界面发生聚合形成壳层，是目前应用最广泛的技术路线[6]。**但该方法中剪切场分布不均，液滴粒径分布宽、球形度差异大，壳层厚度、界面结构与致密性难以精准调控，最终导致产品储热性能一致性差，难以满足高精度局部热管理的应用需求**[7]；喷雾干燥等其他传统方法同样**存在粒径可控性弱、壳层缺陷多等共性问题，难以实现微胶囊结构与性能的定向设计**。

微流控技术为相变微胶囊的精准可控制备提供了全新的技术路径。在微米级受限通道中，通过流体剪切力与界面张力的动态平衡，生成尺寸高度均一、单分散性优异的油-水液滴体系；其既可为界面聚合提供稳定可控的反应模板，也为定量研究界面张力、流体黏性与剪切作用对液滴形成、断裂过程的调控规律提供了理想的研究平台[8]。

2026 "Tiyu Cup" High School Science Award
仅用于2026年度高中科学奖论文公示

国内外学者围绕微流控制备相变微胶囊开展了大量探索性研究。Hao等[9]利用同轴微流控装置实现了相变微胶囊的连续可控制备，验证了两相流速对液滴粒径的连续调控作用。安妮等[10]进一步系统探究了核壳流速比对微胶囊核壳比例及宏观储热性能的影响规律。现有研究已充分证实微流控技术在提升微胶囊粒径均一性、调控核壳比例方面的显著优势，**但现有工作更多集中于“如何制得尺寸均一、性能较好的微胶囊”，对液滴形成之后的界面聚合以及聚合壳层对芯材结晶/熔融的影响仍多作为独立的工艺或性能问题讨论。换言之，从瞬态流体界面到稳定聚合物限域界面的连续演化机制，以及这种界面演化如何决定最终相变行为，仍缺少系统认识。**

近年来，人工智能与计算机视觉方法正逐渐进入微流控研究领域。例如Tang等[11]采用流动聚焦法制备了水包油包水双乳液，建立了内核液滴与双乳液粒径的机器学习预测模型，为双包埋液滴的可控制备提供了量化基础。**但将视觉识别用于相变微胶囊液滴颈缩、断裂、成球全过程的在线量化，并与界面受力模型直接对应的研究仍较少。**

从材料化学的视角来看，相变微胶囊的储热性能并非单纯由芯材的本征特性决定，而是液滴界面形成、界面聚合反应、壳层限域效应等前后衔接的关键环节共同作用的结果。油-水界面处的界面聚合反应直接决定微胶囊壳层的化学结构与微观形貌，而聚合物壳层形成后产生的空间限域作用，又会进一步影响材料的相变温度、过冷度与相变焓值等核心储热参数。

基于上述研究现状，本文将聚脲-十八烷微胶囊视为一个由流体界面、反应界面、限域界面连续演化的体系，重点探讨三个相互关联的科学问题：（1）黏性/剪切作用与界面张力的竞争如何控制前驱液滴的失稳、断裂与稳定成球；（2）水相 DETA 与油相 IPDI 如何在油-水界面发生聚合并形成连续聚脲壳层，核壳组成如何影响壳层完整性；（3）聚脲壳层形成后，空间限域如何进一步影响十八烷的结晶温度、过冷度及相变焓。**本文采用 CFD 模拟仿真与在线显微图像识别建立微胶囊前驱体成球过程的“模拟-实验”对应关系，结合 FTIR、XRD 和 SEM 分析界面聚合与核-壳结构，并利用 DSC 建立核壳组成与相变行为之间的构效关系。**

本文创新之处在于：（1）建立了相变微胶囊的微流控界面聚合可控制备方法。相较传统搅拌乳液聚合法，该方法通过微流控生成单分散液滴构建均一反应界面，实现了界面聚合反应由传统无序、随机状态向分散、定量可控状态的关键转变，解决了聚脲壳层厚度与交联结构难以精准调控的技术难题。（2）采用 CFD 模拟与在线显微图像识别相结合的研究方法，揭示了微胶囊前驱体成球机理。本文为通过界面聚合化学设计主动调控相变微胶囊的储热性能提供了实验基础，对高性能相变储能微胶囊的可控制备开辟了新途径。

2026 S.T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

2. 实验设计与研究方法

2.1 实验材料

本实验所用主要药品及试剂包括十八烷（OD）、二乙烯三胺（DETA）、异佛尔酮二异氰酸酯（IPDI）、聚乙烯醇（PVA）和十二烷基硫酸钠（SDS），均为分析纯（AR），由上海麦克林生化科技股份有限公司提供；实验用水为去离子水。本实验主要需要配置两种液体，分散油相和连续水相，如图 1 所示。

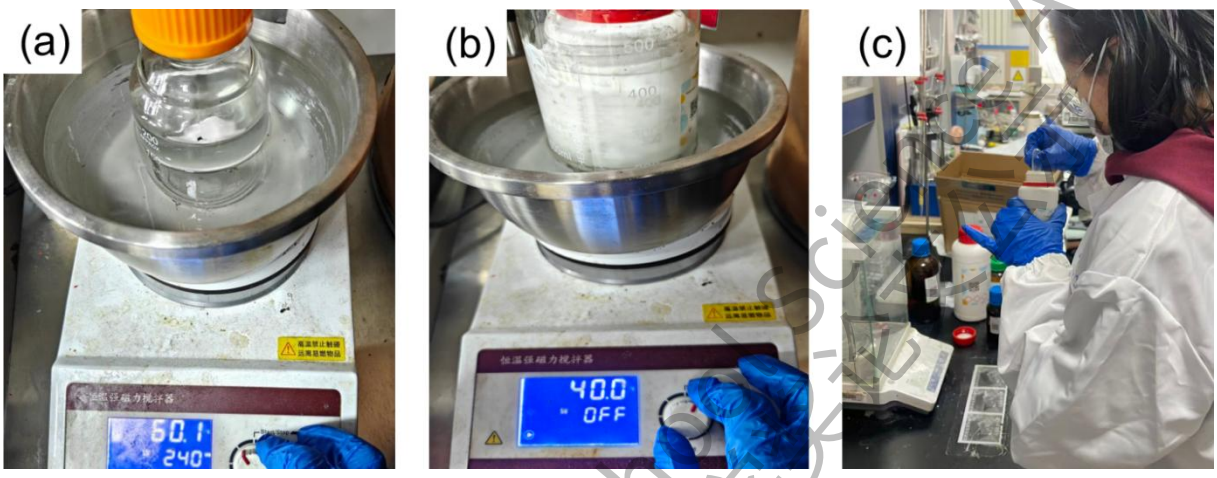


图 1. 实验原料溶液配制过程

（a）PVA、SDS 加热水溶解；（b）十八烷水浴加热溶解；（c）分散油相配制

连续水相配制：水相中 PVA 主要用于提高水相黏度，SDS 用于降低油-水界面张力、促进液滴形成。二者共同提高液滴在微流控成球及后续固化过程中的稳定性，减少液滴并聚、黏连和破裂。按照设定的质量分数，将 PVA、SDS 和二乙烯三胺（DETA）加入去离子水中配制连续水相。配制时首先向洁净容器中加入约 80%的水，在持续搅拌条件下缓慢加入 PVA，避免粉末结团。随后将溶液加热至 60°C，直至 PVA 完全溶解，形成澄清且无可见颗粒的溶液。待溶液冷却至室温后，依次加入 SDS 和 DETA，并用去离子水补足至设定总质量。连续水相中 DETA、PVA 和 SDS 的质量分数分别为 4.0wt%、1.5wt%和 1.0wt%。

分散油相配制：OD 作为相变芯材，通过固-液相变实现用于实现潜热储存与释放；IPDI 作为油溶性壳材前驱体，与熔融 OD 混合形成分散油相，实验前，OD 置于 40°C 水浴中充分熔融，待其转变为澄清、均一液体后使用。DETA 作为水溶性交联反应单体，由连续水相向油-水界面扩散，并与 IPDI 的异氰酸酯基在油-水界面发生聚合反应，逐步形成聚脲壳层。IPDI 具有较强的水分敏感性，取用过程中尽量缩短其暴露于潮湿空气中的时间，取样后立即密封保存。分散油相按照设定的 OD/IPDI 质量比配制。以 OD/IPDI 质量比为 3:1 为例，称取质量为 3 g 的熔融 OD 后，加入质量为 1 g 的 IPDI，在 40℃条件下 300 r/min 搅

2026 S.-T. Youth High School Science Award 仅用于2026上海中学科学奖评审

拌 30 min，直至体系均一且无可见分层。

各溶液均以当次实验的实际称量结果为计算基准，采用质量法确定各组分的配比，所用容器在称量前保持洁净、干燥。连续水相使用前采用静置脱泡，以减少气泡进入芯片后引起的流动波动和通道堵塞；油相配制完成后加盖保温，并尽量缩短其在进样前的停留时间，以降低 IPDI 与环境水分发生副反应的可能性。

2.2 主要仪器与装置

微胶囊实验装备（定制，购买自上海澎赞生物科技有限公司）主要由压力控制系统、流动聚焦微流控芯片、恒温水浴、液滴收集与搅拌装置、光学显微镜（M500C 型，购买自深圳市华显光学仪器有限公司）；后处理使用抽滤装置和鼓风干燥箱，采用内径 0.6 mm PTFE 的连接管将原料管和流动聚焦微流控芯片连接（图 2）。液滴动态形成过程采用 M500C 型光学显微镜及配套图像采集系统进行连续记录。正式采集前，在与实验观察相同的物镜倍率、相机分辨率和图像裁剪范围下完成空间标定。以 100μm 的液滴为例，根据软件界面记录，图像采集帧率为 9.5 fps，同时在画面中加入 100 μm 标尺，显微镜的观察倍率为 10 倍。

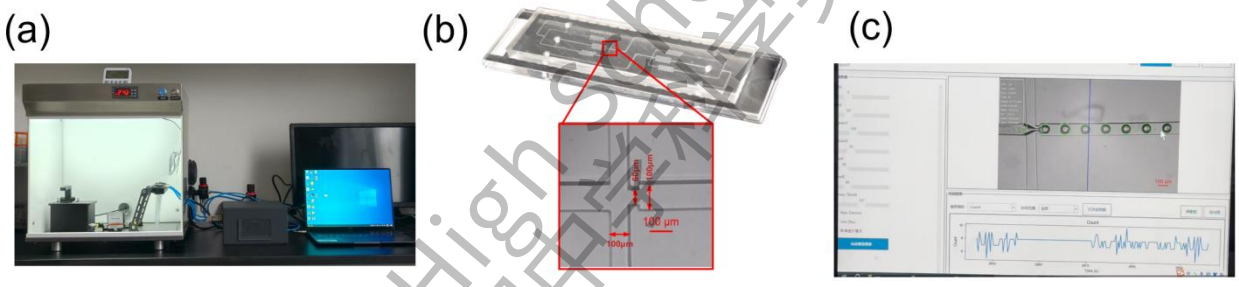


图 2. 实验装置及在线监测

（a）微流控实验装置；（b）流动聚焦芯片；（c）液滴生成动态监测

每组工况开始记录前，先调整光源强度、焦距和曝光参数，使微通道边缘及液滴轮廓清晰可辨。随后固定显微镜、镜头、相机和微流控芯片的位置，在保持相同视野、倍率、分辨率及裁剪比例的条件下进行图像采集。改变两相流量后，待液滴断裂位置、生成周期和下游运动状态基本稳定，再连续采集有效图像。显微图像按帧读取后，依据标定系数将像素尺寸换算为实际尺寸。液滴生成频率根据固定观察区域内单位时间通过的有效液滴数量计算。

2.3 实验设计及步骤

本研究以聚脲-十八烷核壳体系作为研究对象，重点关注微胶囊成球、界面成壳及壳层限域对相变行为的内在规律（如图 3），围绕成球、成壳和限域相变设置三组相互衔接的变量。第一组改变分散相与连续相流动条件，以分散相毛细管数 Ca_d 表征黏性作用与界面

2026 STEM Cup High School Science Award
仅用于2026年成利中学科学奖论文公示

张力的竞争，研究相变微胶囊前驱液滴的成球过程；第二组改变 OD/IPDI 质量比，分析壳材前驱体原料配比对泄漏、壳层完整性及聚脲特征峰的影响；第三组比较不同核壳组成以及不同尺度样品的晶型和热行为，探究相对壳层含量和颗粒尺度所产生的空间限域影响。

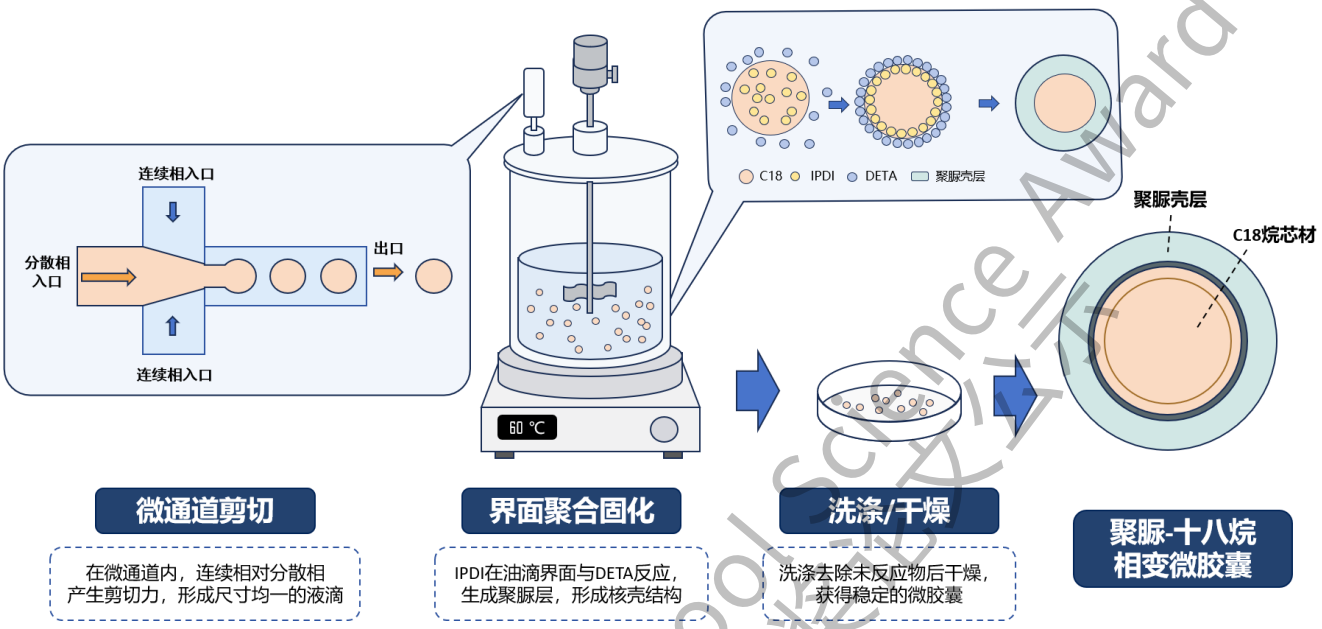


图 3. 聚脲-十八烷相变微胶囊制备流程示意图

2.3.1 相变微胶囊前驱液滴成球实验研究

为揭示界面受力对相变微胶囊前驱液滴稳定成球的调控机制。将 OD 于 40 ºC 水浴中熔融，并按设定 OD/IPDI 质量比加入 IPDI，配制分散油相；连续水相由 PVA、SDS 和 DETA 的水溶液组成，其中 DETA 浓度调节至 4 wt%。两相分别通入流动聚焦微通道，通过改变两相流动条件改变黏性/剪切作用与界面张力的相互作用。

实验过程中连续采集液滴生成的显微图像，并采用实验设备配套软件，在线显微图像识别提取液滴轮廓、平均粒径、标准差、CV 值及生成频率等参数，以此和 CFD 模拟仿真预测的界面形变和断裂状态相互验证，从动态实验角度判定稳定成球对应的毛细管数范围。

2.3.2 IPDI/DETA 界面聚合与微胶囊成壳实验

本部分实验旨在阐明 IPDI/DETA 界面聚合形成聚脲壳层的反应机制。微流控生成的前驱液滴连续进入含 DETA 的水相收集体系，水相 DETA 向油-水界面扩散，其氨基与油相 IPDI 中的异氰酸酯基发生加成反应并生成脲键。由于聚脲在油、水两相中的溶解度较低，初生聚合物优先在界面沉积；随着单体持续迁移和反应，局部沉积层逐渐连接并形成连续包覆层，从而把液态 OD 固定在壳层内部。

为研究壳材前驱体配方比例对壳层形成的影响（如图 4），在保持其他条件一致的基础上，设置不同 OD/IPDI 质量比（3:1、5:1 和 7:1 等），比较壳材前驱体相对含量变化所

2026 S.-T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

对应的泄漏、黏连、壳层完整性及聚脲特征变化。随后将收集液置于 60 ℃ 恒温水浴中保温反应 6 h，并在恒定 60 r/min 转速下、温和搅拌下维持颗粒分散，使界面反应继续进行并完成壳层固化。

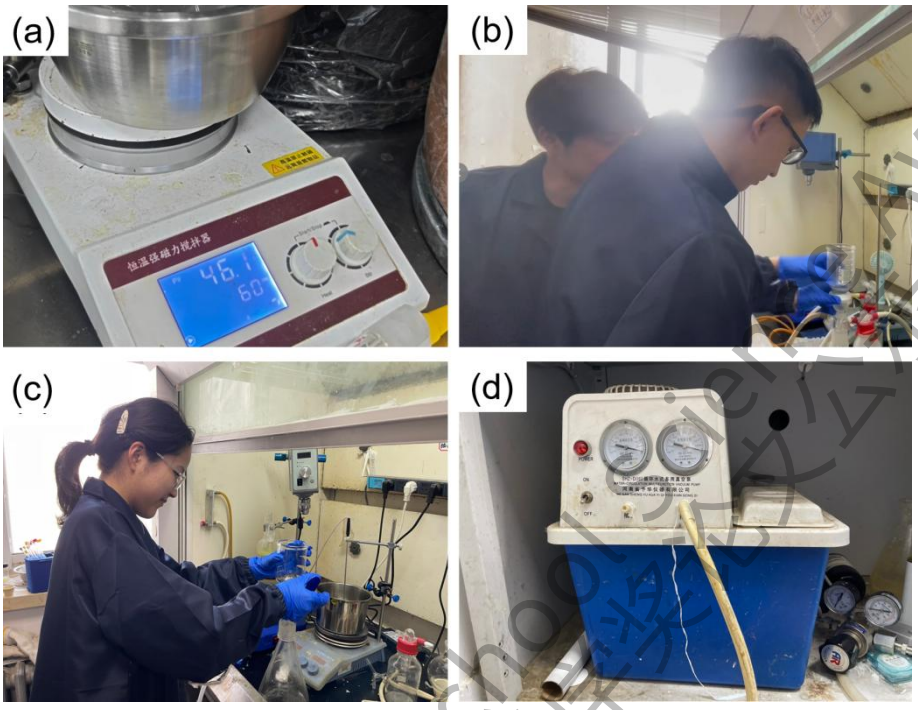


图 4. 固化实验研究

（a）加热固化升温阶段；（b-c）抽滤装置组装；（d）真空抽滤用真空泵

反应完成并冷却至室温后，采用抽滤收集微胶囊。滤饼先以去离子水洗涤以除去水相中的残留物，再以正己烷洗涤以除去颗粒表面未包覆的 OD 和油溶性残留物；去离子水洗与正己烷洗交替进行 3-5 次。洗涤后的样品置于 60 ℃鼓风干燥箱中干燥 12 h，冷却后密封保存，供后续测试研究。

2.3.3 核壳组成与限域相变实验

该部分实验用于分析聚脲壳层限域对十八烷相变行为的调控机制。选取不同 OD/IPDI 质量比以及 100、300 和 500 μm 尺度的微胶囊作为对比对象，并以纯 OD 为基准样品。在芯材化学组成不变的前提下，先通过 FTIR 确认各样品的特征官能团，再通过 XRD 比较特征衍射峰位置及相对强度，判断壳层形成和颗粒尺度变化是否改变 OD 的基本晶型；随后利用 DSC 比较熔融温度、结晶温度、过冷度及相变焓。

2.4 表征方法

2.4.1 微胶囊及其前驱液滴形貌表征

利用M500C型光学显微镜记录液滴形成过程，在固定视野和稳定流动阶段采集图像，

2026 SJTU High School Scientific Paper Award 仅用于2026年成都市学科竞赛论文公示

并结合在线显微图像识别软件获得平均粒径和生成频率。干燥微胶囊采用 S-4700 型扫描电子显微镜（SEM，日本日立公司）观察整体球形度、粒径一致性、表面连续性、黏连和破损情况，为界面聚合是否形成稳定核-壳颗粒提供形貌证据。SEM 测试前，将充分干燥的微胶囊轻撒于导电胶上，去除未黏附颗粒后进行喷金处理。

2.4.2 傅里叶红外光谱测试

采用傅里叶红外光谱（FTIR，Agilent Technologies Cary630）分析纯 OD 及干燥微胶囊的官能团组成，光谱范围 4000-500 cm^{-1}。重点比较 2950-2850 cm^{-1}、1460 cm^{-1} 和 720 cm^{-1} 附近的 OD 烷烃特征吸收，以及 1650 cm^{-1} 和 1550 cm^{-1} 附近的聚脲相关吸收。通过不同 OD/IPDI 条件下峰位是否出现、相对峰强如何变化，判断聚脲壳层是否形成以及壳材相对含量的变化趋势。

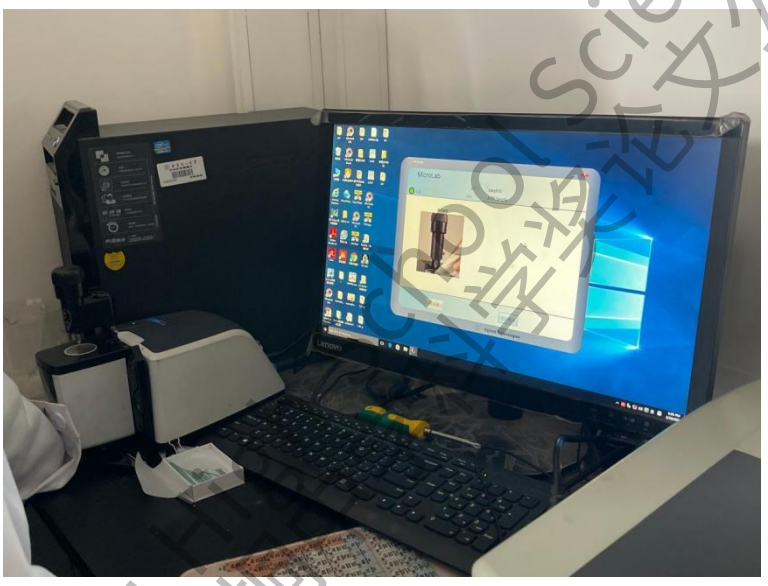


图 5. 对样品进行傅里叶红外光谱仪测试

2.4.3 X 射线衍射测试

采用 X 射线衍射（XRD，Bruker D8 ADVANCE）分析纯 OD 与各组干燥微胶囊的晶体结构，扫描范围 2θ=5-90°、扫描速率 5°/min，Cu Kα，λ=0.154 nm。XRD 测试前将干燥样品轻柔研散并均匀铺入样品槽，保持各组样品铺展状态一致，比较 2θ=10°-30° 范围内 OD 特征衍射峰的位置、峰形及相对强度。峰位是否偏移用于判断界面聚合和空间限域是否诱导新的晶型变化，相对强度变化则作为结晶程度及芯材相对含量变化的辅助证据。

2.4.4 差示扫描量热仪测试

采用差示扫描量热法（DSC，德国耐驰公司）表征纯 OD 及微胶囊的结晶/熔融行为，测试温区为-10-70°C，升温和降温速率均为 10°C/min，并在 N_2 保护下测试。由升温曲线获得熔融峰温及熔融焓，由降温曲线获得结晶峰温及结晶焓；相变焓通过相应吸、放热峰面

2026 S.-T. Yau College Student Science Award 仅用于2026丘成桐大学生科学奖论文公示

积积分得到，过冷度按熔融峰温与结晶峰温之差计算。不同样品采用一致的温度程序和数据处理方法，以便比较 OD/IPDI 质量比及粒径变化对相变温度和储热能力的影响。

DSC 测试时称取 5-10 mg 样品置于铝坩埚中密封，以空坩埚作为参比；氮气流量为：40 mL/min。各样品的积分基线、起止温度和峰温读取方法保持一致，并保留原始热流曲线。热循环稳定性实验采用相同的升降温边界对样品进行 100 次冷热循环，循环前后分别比较 DSC 峰位、峰形和相变焓。

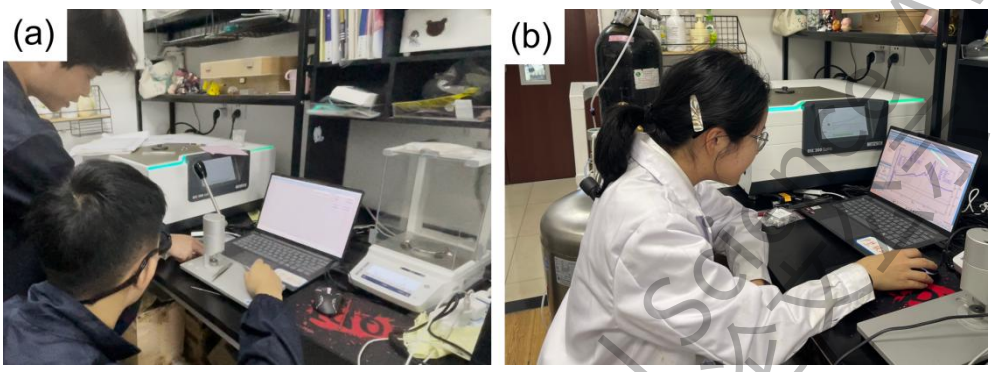


图 6. 对样品进行 DSC 热性能测试

3. 结果与讨论

3.1 相变微胶囊前驱液滴的界面成球机理

受限微通道中的液滴成球并非简单的流速优化，而是液滴界面在黏性/剪切作用与界面张力共同作用下发生形变、颈缩和断裂的过程。本节采用 CFD 仿真分析方法，研究不同毛细管数下的界面形态演变，并结合实验结果分析界面受力与液滴成球状态之间的关系。

3.1.1 仿真方法与界面受力参数

本文采用流动聚焦微通道研究聚脲-十八烷前驱液滴的形成过程。如图 7 所示，油相为分散相，水相为连续相，连续相从上下两侧对分散相进行挤压和剪切；通道宽度和深度均为 240 μm。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文评审

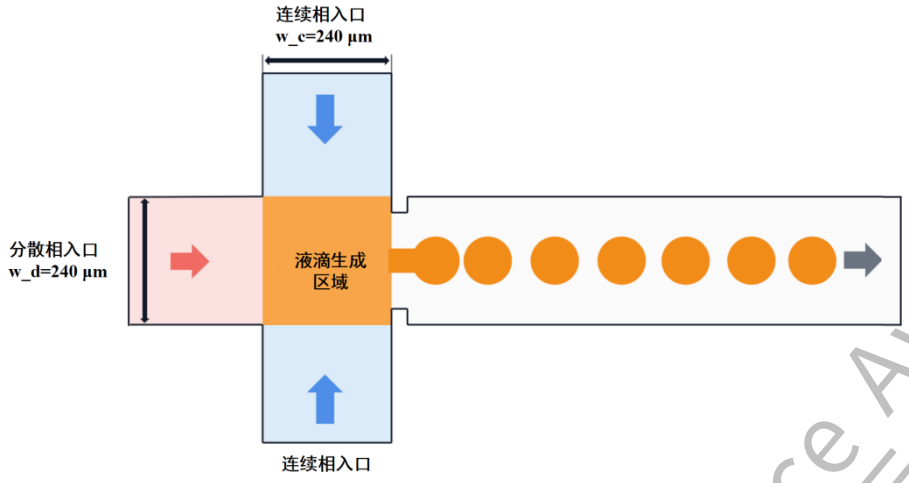


图 7. 微流控通道成球过程示意图

采用 COMSOL 瞬态两相流模型，并通过 VOF 方法追踪油-水界面的动态变化。模型采用经典质量与动量守恒方程，假设两相不可压缩、互不相溶且处于层流状态，忽略重力影响；两相物性参数见表 1。仿真的重点在于比较不同界面受力条件下液滴形态的演变，而非对经典流体力学模型本身进行修正。

为表征分散相黏性作用与界面张力之间的相对关系，采用分散相毛细管数 Ca_d 作为关键无量纲参数：

$$Ca_d = \frac{\mu_d v_d}{\sigma} \tag{1}$$

式中，μ_d 为分散相动力黏度，v_d 为分散相流速，σ 为油-水界面张力。

Ca_d 反映黏性作用相对于界面张力的强弱，其变化可用于判断液滴界面由稳定恢复向持续变形、拖尾和射流转变的趋势。

3.1.2 仿真结果与分析

在固定连续相流速 v_c=1.0×10^{-2} m/s 的条件下改变分散相流速 v_d，使 Ca_d 随之变化；两支路截面积相同时，流量比 q 可近似表示为 v_d/v_c。材料参数见表 1，不同 Ca_d 对应的液滴形态见表 2 和图 8。

表 1 两相材料模拟仿真参数

项目	分散相（油相）	连续相（水相）
密度 ρ/(kg·m^{-3})	890	1000
动力粘度 μ/(Pa·s)	0.117	0.072
界面张力参数 σ/(N·m^{-1})	0.02	0.02

2026 Shi Yan Hui High School Science Award
仅用于2026实验相学科学论文公示

在连续相条件保持不变时，分散相流速及 Ca_d 的增加会改变液滴界面受力平衡，使液滴由周期性断裂逐渐向拖尾和射流状态转变。

表 2. 固定连续相流速下的液滴成型参数及状态

v_c (m/s)	v_d (m/s)	Ca_d	q	液滴成型状态
0.01	0.002	0.0072	0.2	液滴较小，形成周期较长，下游液滴数量少
	0.004	0.0144	0.4	稳定成球，液滴大小及间距较均匀
	0.006	0.0216	0.6	液舌明显延长，断裂位置向下游移动并出现拖尾
	0.008	0.0288	0.8	拖尾更加显著，出现液滴粘连、局部融合现象
	0.010	0.036	1.0	形成连续射流，观察时间内未发生完整断裂

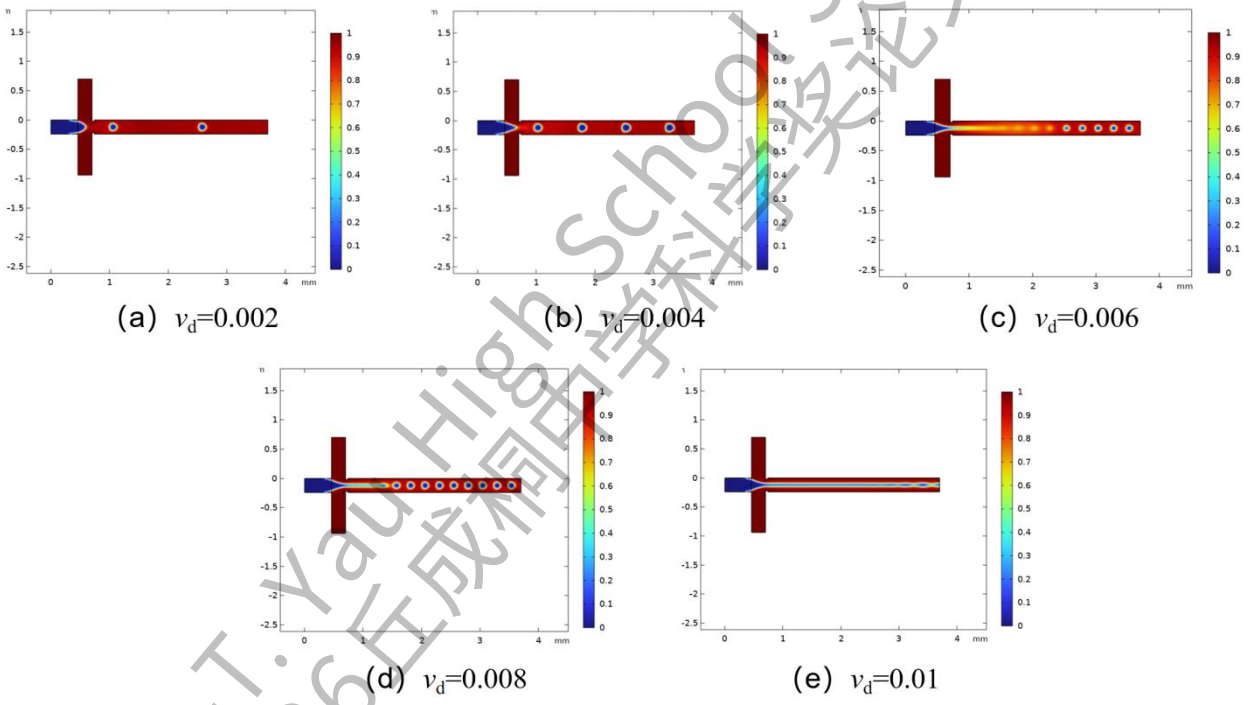


图 8. 分散相流速对液滴成球的仿真影响（图中单位为 m/s）

当 Ca_d=0.0072 时，界面张力相对占优，液滴能够断裂，但分散相补充较慢，形成周期较长；当 Ca_d 增至 0.0144 时，黏性/剪切作用与界面张力达到较协调的动态平衡，液滴周期性经历“膨胀-颈缩-断裂-回缩”，形成较规则的液滴；当 Ca_d 进一步增至 0.0216 及以上时，分散相持续推进使界面变形增强，颈缩位置向下游移动，并逐步出现拖尾和射流。由此可见，液滴形态转变来源于界面变形驱动力与界面恢复力之间的竞争，而不是流速单一增加带来的工艺改善。图 9 进一步概括了上述受力机制。在本体系中，Ca_d=0.0072～0.0216 范

2026 S. T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

围内液滴仍可完成断裂成球，其中适中的 Ca_d 更有利于形成规则、周期性的液滴；当 Ca_d 继续增大时，界面张力难以及时恢复液滴形态，体系逐渐向拖尾和射流状态转变。

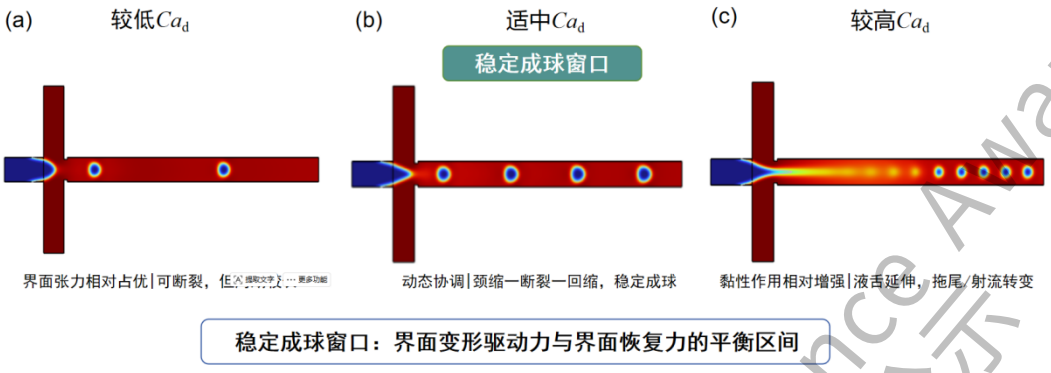


图 9. 受限微通道中界面受力竞争驱动的液滴成球机理示意图

3.2 在线显微图像识别辅助的液滴成球行为实验表征

为检验 CFD 所揭示的“界面受力-液滴形态”关系，本文采用在线显微图像识别对微流控显微图像进行定量分析。采用实验设备配备的显微图像在线识别软件提取液滴粒径、CV 值和生成频率，用于判断液滴是否处于规则、周期性的断裂成球状态，识别结果见图 10。随着分散相流速提高，平均粒径由 77.6 μm 增至 136 μm 和 194.9 μm，同时液滴生成频率增加，说明分散相供给增强后液滴在断裂前经历更明显的界面扩张，与 CFD 中观察到的液舌延伸趋势一致。

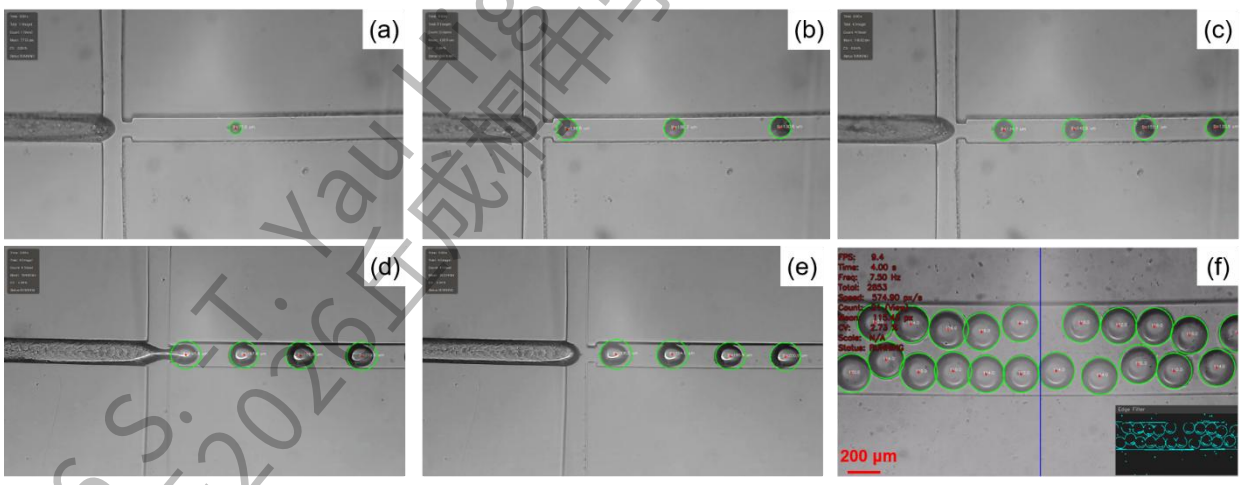


图 10. 在线显微图像识别微球成型结果展示

进一步选取连续相流速 0.01 m/s、分散相流速 0.005 m/s 进行实验与模拟对比（图 11）。显微图像在线识别得到液滴平均粒径 196.6 μm、CV 值约为 1.88%，实验中液滴能够持续、规则生成；相同条件下的模拟同样表现出周期性断裂。两者的一致性为界面受力控制液滴

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

成球状态的分析提供了动态实验佐证，而不是单纯用于筛选最优工艺参数。

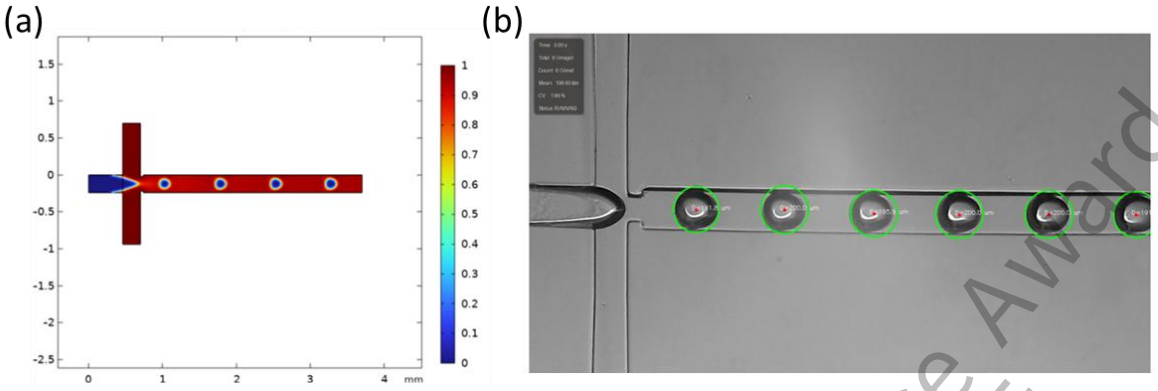


图 11. 微球成型仿真结果与实验验证

3.3 微胶囊的界面聚合与结构表征

为分析 OD/IPDI 配比对聚脲壳层形成及微胶囊形貌的影响，对不同配比下制备的微胶囊进行 SEM 表征，结果如图 12 所示。随着油相中 IPDI 用量的增加，微胶囊的形貌完整性逐渐提高，破损及团聚现象逐渐减少。如图 12（a）所示 IPDI 用量较低时，样品中出现较多不规则颗粒及局部破损现象，部分颗粒表面存在塌陷或包覆不完整现象；如图 12（b）所示，适当提高 IPDI 用量后，具有完整球形轮廓的微胶囊明显增多，颗粒间的黏连有所减轻，但仍可观察到少量形貌不规则的微胶囊；如图 12（c）所示，当 IPDI 用量进一步增加至适宜范围时，大部分微胶囊呈现较规则的球形，颗粒边界清晰，表面形貌较为完整，破损和团聚现象进一步减少。这一变化可能与界面聚合过程中反应基团的供给量有关。IPDI 分子中含有两个异氰酸酯基，DETA 分子中含有多个胺基。在其他条件不变的情况下，增加油相中 IPDI 的相对用量，能够提高体系中—NCO 基团的供给量，有利于其与水相中的 DETA 发生界面聚合反应，从而促进聚脲壳层的形成及连续覆盖。当 IPDI 用量相对不足时，参与界面成壳反应的-NCO 基团数量较少，可能导致聚脲壳层形成不充分，局部包覆不完整或连续性下降，使熔融 OD 更容易从壳层缺陷处渗出，如图 12（d）所示。渗漏的 OD 会使微胶囊表面发黏，并在后续固化、过滤和干燥过程中引起颗粒黏连、桥联及结块，这与图 12（e-f）观察到的不规则颗粒及团聚现象相对应。实验结果表明，当 DETA 浓度保持为 4 wt%、OD/IPDI 质量比不高于 7:1 时，所得微胶囊整体球形度和分散性较好，壳层表面较为连续，未观察到明显的芯材渗漏；当 OD/IPDI 质量比进一步增大时，单位质量 OD 所对应的 IPDI 用量减少，导致体系中异氰酸酯组分相对不足，微胶囊的壳层完整性下降，芯材渗漏、黏连和结块的风险增加。SEM 形貌与样品宏观状态的变化基本一致，共同说明适当提高 IPDI 用量有利于聚脲壳层的形成和微胶囊形貌完整性的改善。

2026 S. T. Yau High School Science Award 仅用于2026年成绩中学组参赛论文公示

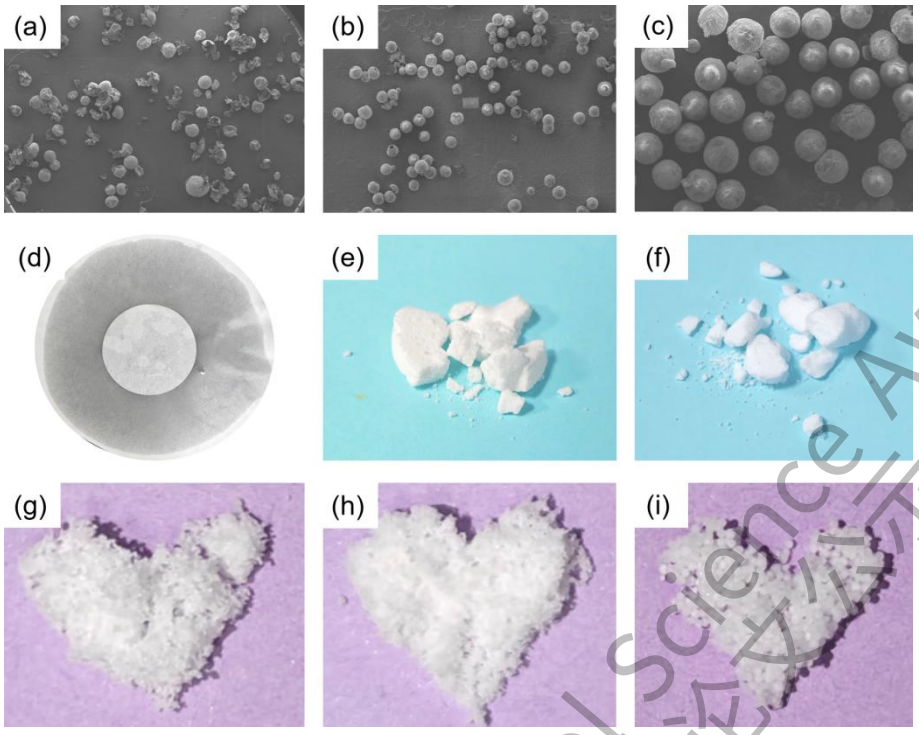


图 12. 聚脲-十八烷相变微胶囊形貌

（a-c）不同 IPDI 相对用量下聚脲-十八烷相变微胶囊的 SEM 形貌；（d-f）IPDI/DETA 质量比不适宜条件下出现芯材泄漏、颗粒黏连及结块的微胶囊宏观形貌；（g-i）壳层完整、无明显泄漏的 100、300 和 500 μm 正十八烷@聚脲相变微胶囊宏观形貌

水相 DETA 扩散至油–水界面后，其氨基与油相 IPDI 的异氰酸酯基发生加成反应，生成脲键；生成的聚脲溶解性较低，因而优先在油–水界面沉积。该界面聚合反应路径与 Yang 等报道的 IPDI–DETA 界面聚合机制一致[12]。结合本研究微胶囊的核–壳形貌，可以推断随着反应持续，界面聚脲由局部沉积逐渐演化为连续壳层，最终将液态油滴固定为稳定的核–壳结构，其形成过程如图 13 所示。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

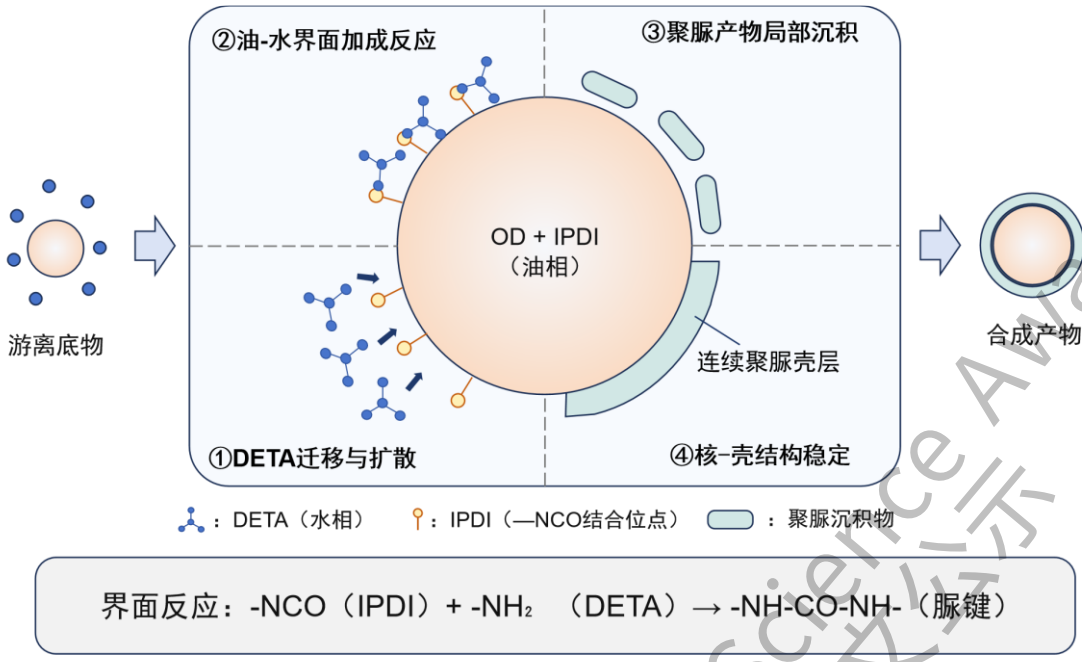


图 13. IPDI/DETA 在油-水界面的聚脲成壳机理示意图

为探究不同 OD/IPDI 配比聚脲-十八烷相变微胶囊的化学组成、界面反应行为与芯材结晶特性。对样品进行了傅里叶红外光谱（FTIR）与 X 射线衍射（XRD）表征，结果如图 14 所示。

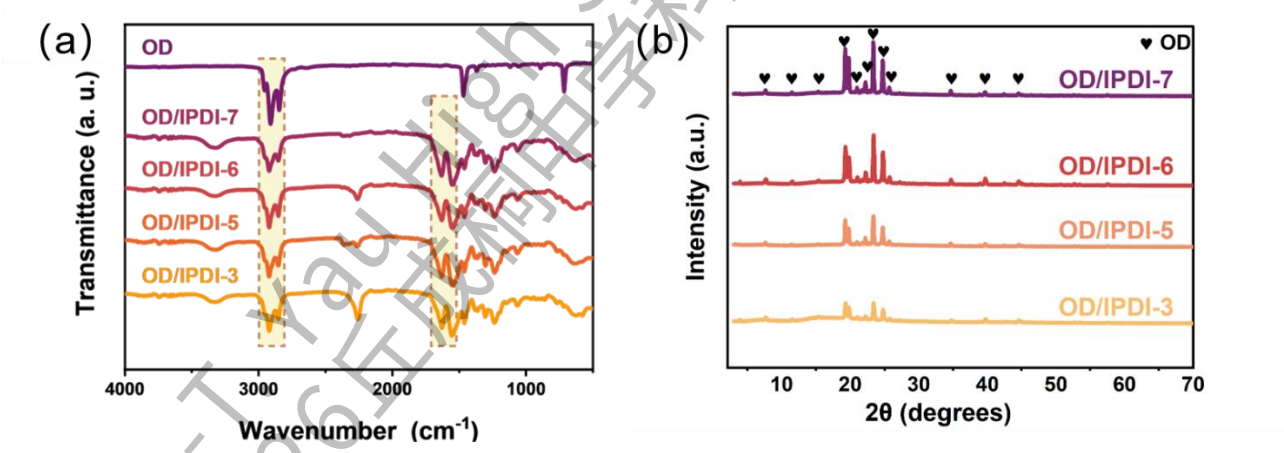


图 14. 不同 OD/IPDI 配比聚脲-十八烷微胶囊的化学结构与晶体结构表征

（a）不同核壳质量比下 100 μm 级微胶囊的傅里叶红外光谱；（b）不同核壳质量比下 100 μm 级微胶囊的 X 射线衍射图谱

图 14（a）为不同 OD/IPDI 核壳配比的微胶囊红外光谱（FTIR）图，由图可知分别在 2950-2850 cm^{-1}（-CH_2/-CH_3 的不对称与对称伸缩振动）、1460 cm^{-1}（-CH_2弯曲振动）及 720 cm^{-1}（长链烷烃面内摇摆振动）处，出现明显的 OD 特征峰[13]；随着体系中 IPDI 比例提高，1650 cm^{-1}（脲基 C=O 伸缩振动）与 1550 cm^{-1}（N-H 弯曲振动）处的聚脲特征峰逐

2026 S - Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

渐增强[14]，证明成功制备生成了聚脲结构。与此同时，OD 特征峰的相对强度减弱，与芯材质量分数降低、聚脲壳层相对含量增加的变化趋势一致。图 14（b）为不同 OD/IPDI 配比微胶囊的 XRD 图谱。纯 OD 在 2θ 为 10°-30°的范围内呈现明显的特征衍射峰。不同配比的微胶囊样品的 OD 特征衍射峰位置未发生明显偏移，说明聚脲包覆未改变 OD 的基本晶型，芯材仍能保持其结晶与相变能力。

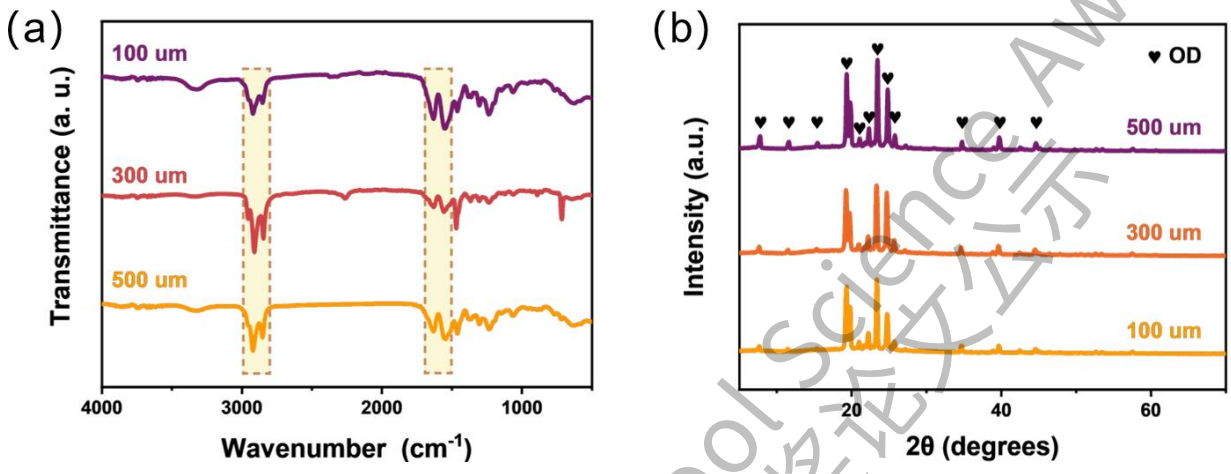


图 15. 不同粒径的聚脲-十八烷微胶囊的化学结构与晶体结构表征

（a）100、300 和 500 μm 级微胶囊的傅里叶红外光谱；（b）100、300 和 500 μm 级微胶囊的 X 射线衍射图谱

图 15（a）为粒径为 100、300、500 μm 微胶囊 FTIR 光谱。所有样品均同时呈现 OD 的烷烃特征峰与聚脲的特征吸收峰，且主要峰位基本一致，表明改变微胶囊粒径未引起其主要化学组成和官能团结构的明显变化，各粒径条件下均能发生 IPDI/DETA 界面聚合反应。图 15（b）为不同粒径微胶囊的 XRD 图谱，不同粒径样品均呈现与纯 OD 完全匹配的特征衍射峰，表明不同粒径微胶囊中的 OD 均保持原有晶体结构。较大粒径样品的 OD 特征衍射峰相对较强，说明其结晶有序程度可能有所提高。这可能是由于微胶囊粒径增大后，单位体积芯材受到的壳层空间限域作用相对减弱，从而有利于 OD 分子的有序排列与结晶。

较大粒径胶囊中 OD 受聚脲壳层的空间约束作用更弱，结晶度略有提升，为微胶囊的相变储热性能提供了保障。从构效关系看，IPDI 比例增加首先表现为聚脲特征峰增强和壳层相对含量提高，而 OD 晶型峰位基本保持不变，说明核壳组成变化主要改变的是界面与限域环境，而非诱导十八烷发生新的晶型转变；这为后续从壳层限域角度解释相变温度、过冷度和焓值变化提供了结构依据。

对成功制备的不同尺度的相变微胶囊进行了形貌与结构表征。图 16（a-c）的光学显微图像表明，不同粒径的微胶囊均呈规整球形，粒径均匀，无明显团聚、粘连或破碎现象，

2026 S.-T. Yau High School Science Award 仅用于2026匹凡湘中学科学奖论文公示

证明微通道乳化结合界面聚合的制备工艺可实现微胶囊尺寸的精准调控。图 16（d-f）的扫描电子显微镜图像进一步证实了不同粒径的微胶囊表面均呈现致密的表面形貌，无明显裂纹、针孔或壳层缺陷，表明界面聚合反应充分，形成了完整、连续的聚脲包覆层，可有效维持微胶囊结构。因此，完整连续的聚脲壳层不仅是界面聚合形成核-壳结构的形貌证据，也是后续产生稳定空间限域、限制液态芯材迁移并维持可逆相变的结构前提。

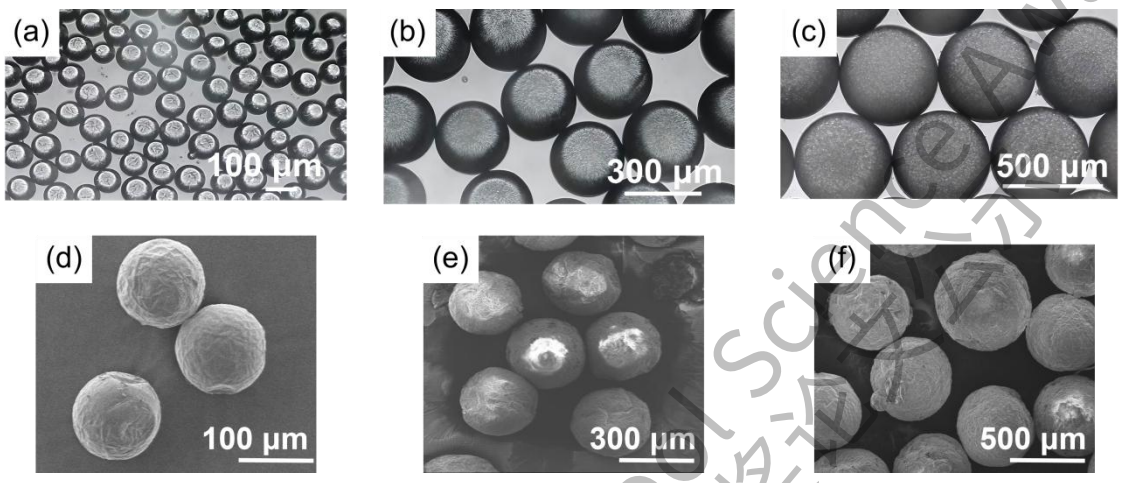


图 16.不同尺度的微胶囊图像

（a-c）光学显微镜图像；（e-f）不同尺度的微胶囊扫描电子显微镜图像

3.4 微胶囊相变行为与壳层限域作用

为探究相变微胶囊相变储热性能，对样品进行了差示扫描量热（DSC）表征（如图 17）。DSC 升温曲线（图 17a）与降温曲线（图 17b）显示，所有配比的微胶囊样品在升温过程中均呈现明显的吸热峰，降温过程中出现对称的放热峰，表明聚脲壳层的包覆未抑制其结晶-熔融行为，具备相变储热功能。微胶囊的熔化温度 T_m整体分布在 32.3-34.1 ℃ 区间（如图 17c），略高于纯十八烷的熔点（28.2 ℃）。结晶温度 T_c随 OD 配比升高呈单调上升趋势，从 3:1 的 17.8 ℃ 升至 7:1 的 20.8 ℃，对应的过冷度从 16.0 ℃ 降至 11.5 ℃，表明芯材占比越高，过冷度越小，这是因为高芯材含量下，十八烷分子受聚脲壳层的空间约束减弱，结晶成核的位阻降低[15]，成核过程更易发生，更利于实际储热应用。图 17d 表明，随着 OD/IPDI 配比提高，微胶囊的熔化焓 ΔH_m从 151.1 J/g 显著提升至 202.2 J/g，凝固焓 ΔHc 从 151.1 J/g 增加至 203 J/g，证明相变过程可逆性良好，无明显热损失或不可逆结构变化。焓值随芯材占比升高而增大，与相变焓和芯材质量分数的理论正比关系一致，说明通过调整 OD/IPDI 配比可有效调控微胶囊的储热密度。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026正成杯青少年科学奖论文评选

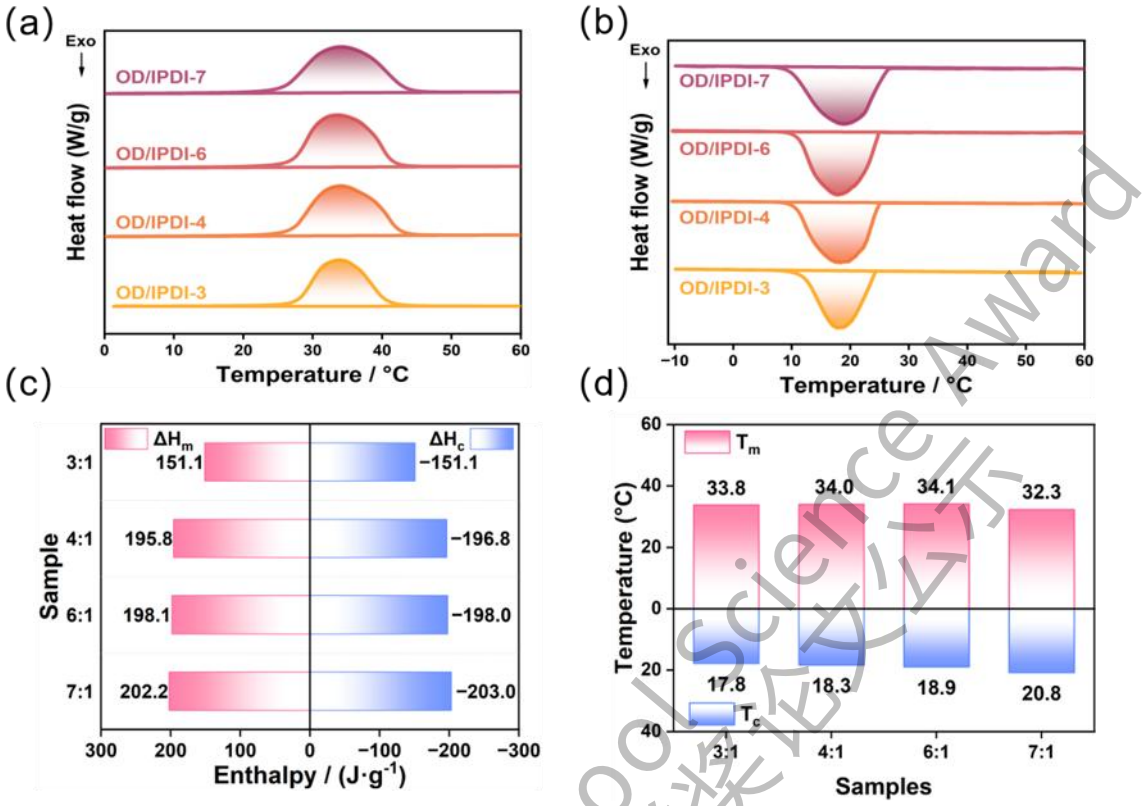


图 17 不同核壳比的 100μm 微胶囊热性能

（a）差示扫描量热升温熔融曲线；（b）差示扫描量热降温结晶曲线；

（c）熔化温度及结晶温度；（d）熔融焓与结晶焓

图 18 进一步揭示了壳层限域条件下十八烷的可逆相变过程。升温时，十八烷晶体的有序结构逐渐破坏，并在熔融过程中吸收潜热；熔融后的十八烷仍被封装于聚脲微腔内。降温时，十八烷分子内重新排列，并经历成核与晶体生长过程，同时释放潜热。结合不同 OD/IPDI 配比的 DSC 结果可知，壳层相对占比提高时空间限域增强，结晶重排受到更明显约束；OD 比例提高后限域相对减弱，结晶温度升高、过冷度降低。由此形成核壳组成、限域程度、结晶行为与储热响应的构效映射。

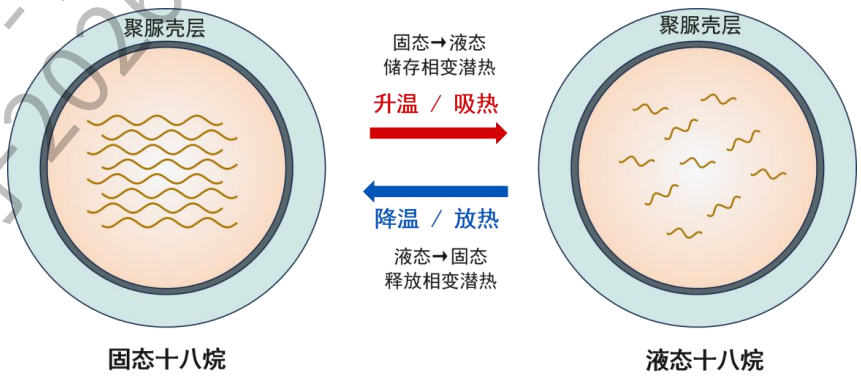


图 18 聚脲限域十八烷的相变吸热/放热与热量调节机理示意图

2026 S.T.Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

为评估聚脲-十八烷相变微胶囊的热循环稳定性和储热性能耐久性，对粒径分别为 100 μm、300 μm 和 500 μm 的微胶囊进行了 100 次冷热循环测试。由图 19 可知，循环后三种粒径微胶囊的熔融吸热峰和结晶放热峰仍清晰、完整，峰位未发生明显偏移，熔融温度和结晶温度仅出现较小变化，表明微胶囊的相变过程具有良好的可逆性。同时，相变焓值未出现显著减小，说明其潜热储存能力在循环过程中基本保持稳定。上述结果表明，聚脲壳层能够承受十八烷反复固-液相变所产生的体积变化，其包覆作用和空间限域效应未发生明显弱化。DSC 曲线在循环前后保持稳定，进一步说明微胶囊核壳结构稳定性与相变储热性能的稳定性之间具有对应关系。

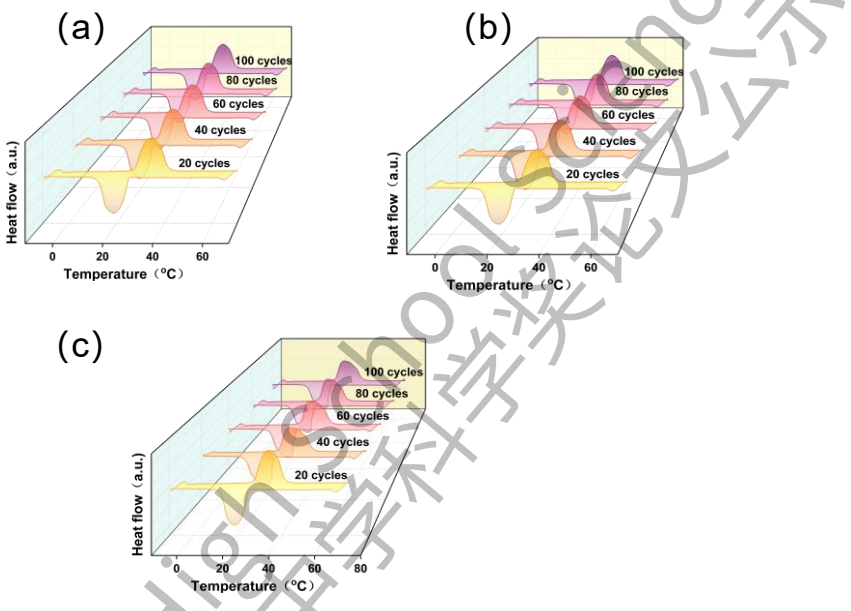


图 19. 相变微胶囊不同热循环次数下的差示扫描量热相变曲线

（a）100μm 级；（b）300μm 级；（c）500μm

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

4. 结论与展望

4.1 结论

本研究针对传统相变微胶囊制备工艺中胶囊尺寸均一性不足、储热性能一致性差、壳层缺陷较多、难以满足高精度热管理需求等问题，基于前驱体液滴成球过程与机理，以微流控单分散液滴为模板，结合界面聚合技术，调控成球与成壳过程，制备了尺寸精准可控的聚脲-十八烷相变微胶囊；系统探究了液滴前驱体稳定成球、油-水界面聚合成壳、核壳结构与芯材相变行为及储热性能的内在联系，揭示了相变微胶囊形成及尺寸调控机制，建立了工艺参数条件对相变行为及储热性能的影响规律，主要结论如下：

（1）在受限微通道中毛细管数是调控微胶囊前驱体成球行为的核心无量纲参数：当分散相毛细管数 Ca_d 处于 0.0072~0.0216 区间时，可生成尺寸均一、球形度良好的稳定液滴，当液滴平均粒径为 196.6μm 时，CV 值约为 1.88%；

（2）微胶囊聚脲壳层形成过程如下：水相 DETA 向油-水界面迁移，并与油相 IPDI 在界面处发生加成聚合反应，生成的聚脲在界面持续富集和沉积，逐步形成连续致密的聚合物壳层；

（3）微胶囊聚脲核壳反应单体配比变化改变了相变芯材的结晶过程与相变焓值；随着 OD/IPDI 质量比由 3:1 提升至 7:1，芯材十八烷的结晶温度升高，过冷度显著降低，相变焓由 151.1J/g 提升至 202.2J/g；经过 100 次冷热循环后，微胶囊的 DSC 峰形与相变焓仍保持稳定，表明其具有良好的循环稳定性。

本文建立了相变微胶囊的微流控界面聚合制备方法，实现了界面聚合反应由传统无序、随机状态向分散、可控态的关键转变，突破了微胶囊尺寸均一性不足以及聚脲壳层结构难以精准调控的技术难点，为有效调控相变微胶囊的相变行为和储热性能提供了实验和理论基础，对高性能相变储能微胶囊的可控制备提供了新途径。

4.2 展望

（1） 新材料研究：未来可以探索更多新型相变材料和壁层材料，进一步提高相变焓和循环稳定性；

（2）制备工艺优化：研发多通道、高通量微流控芯片，实现微胶囊大规模生产；

（3）智能化应用：通过与传感器、控制系统的结合，实现微胶囊的自动温度调节和热管理，提高能源利用效率。

2026 S.T. Qiu Shi School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

参考文献

[1] Lawag R A, Ali H M. Phase change materials for thermal management and energy storage: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105602.

[2] Zhang Y, Li H, Zhou Y, et al. Beyond conventional cooling: Advanced micro/nanostructures for managing extreme heat flux[J]. Advanced Materials, 2026, 38(5): e04706.

[3] He Z, Yan Y, Zhang Z. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review[J]. Energy, 2021, 216: 119223.

[4] Tian Y, Liu Y, Zhang L, et al. Preparation and characterization of gelatin-sodium alginate/paraffin phase change microcapsules[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 586: 124216.

[5] Jiang Z, Yang W, He F, et al. Modified phase change microcapsules with calcium carbonate and graphene oxide shells for enhanced energy storage and leakage prevention[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(4): 5182-5191.

[6] Duran M, Serrano A, Nikulin A, et al. Microcapsule production by droplet microfluidics: A review from the material science approach[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111230.

[7] Zhang J, Zhao T, Chai Y, et al. Preparation and characterization of high content paraffin wax microcapsules and micro/nanocapsules with poly(methyl methacrylate) shell by suspension-like polymerization[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2017, 35(4): 497-506.

[8] Guo Y, Hou T, Wang J, et al. Phase change materials meet microfluidic encapsulation[J]. Advanced Science, 2024, 11(37): 2304580.

[9] Hao G, Yu C, Chen Y, et al. Controlled microfluidic encapsulation of phase change material for thermo-regulation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122738.

[10] 安妮，汪伟，潘大伟，等. 高储能性石蜡相变微胶囊的微流控制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(7): 98-103.

[11] Tang C, Chagot L, Angeli P. Controlled encapsulation and droplet size prediction in two-step microfluidic double emulsions[J]. Lab on a Chip, 2026, in press.

[12] Yang Y, Xia R, Zhao J, et al. Preparation and thermal properties of microencapsulated polyurethane and double-component poly(ethylene glycol) as phase change material for thermal energy storage by interfacial polymerization[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(1): 1024-1032.

[13] Hu Q, Chen Y, Hong J, et al. A smart epoxy composite based on phase change microcapsules:

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

Preparation, microstructure, thermal and dynamic mechanical performances[J]. Molecules, 2019, 24(5): 916.

[14] Bao M, Liu T, Tao Y, et al. The hydrogen bonding in the hard domains of the siloxane polyurea copolymer elastomers[J]. Polymers, 2024, 16(17): 2438.

[15] Wang X, Li C, Wang M, et al. Bifunctional microcapsules with n-octadecane/thyme oil core and polyurea shell for high-efficiency thermal energy storage and antibiosis[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2226.

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

致谢

本课题由八十中学国际部冯甄钰、艾星佑共同申报、独立完成，研究周期为 2025 年 11 月至 2026 年 8 月，历时 10 个月。

课题始于冯甄钰的亲身经历：奶奶瘫痪卧床无法言语，发烧时常难以及时察觉，这份牵挂让她在初中就思考：能否做一种不用电、一眼就能看出发烧的材料？后来在北京化工大学潘凯教授组会中，她首次知道相变微胶囊技术，开始研究，并成功制备可用于发烧预警的热敏相变微胶囊，项目荣获北京市青少年科技创新大赛一等奖、全球发明大会中国区总决赛一等奖。但她没有停止研究，琢磨怎么突破传统制备工艺的局限，并将其用到更多地方。在王珩老师课上讲到移动终端芯片局部过热的现实问题——手机发烫、笔记本电脑过热等，让她打开了思路：相变材料能否给芯片降温、缓解局部过热？基于此，她邀请化学社社长艾星佑一起将研究逐步推进到界面聚合精准调控与壳层限域相变机制的更深层面。

王珩是冯甄钰的 AP 化学教师、艾星佑的 A-Level 化学教师，也是我们的年级组长。选题时她结合两校实验室条件，与我们共同讨论方向可行性；确定方向后，我们加入她的荣誉导师工作室，利用课余时间系统学习实验操作、实验设计与数据处理方法；论文撰写阶段，她通过 IB 学术论文写作课程给予我们具体修改意见与方向引导。整个研究周期她全程跟进，在我们遇到瓶颈时耐心引导思路。北京化工大学潘凯教授为课题提供深层次学术引领，从选题论证、机理梳理到实验设计、论文架构均给予系统性指导；正是与他深入讨论后，我们最终确立了微流控界面聚合的核心技术路线。

实验期间，我们常与北京化工大学实验室的陈轲老师研讨聚脲-十八烷微胶囊的制备方案；热性能、循环稳定性等核心专业知识，并通过文献检索自主学习实践。基于实验室的安全管理规定，李一学长每次都等我们完成实验、整理清洗器材后才一起离开。电子显微镜、傅里叶红外光谱仪、X 射线衍射仪、差示扫描量热仪等各类大型仪器的操作与测量方法，都由他亲手示范讲解。百次冷热循环测试阶段，仪器昼夜运行，我们常实验至深夜，他始终耐心陪同。

以上提到的所有人的指导与帮助均为无偿提供。实验操作、原始数据采集记录与论文写作，均由我们独立完成。课题分工明确，我们优势互补、协同推进。冯甄钰负责课题选题与前期调研，完成 CFD 仿真，探究液滴稳定成球的调控规律以及不同 OD/IPDI 配比下的微胶囊成型过程；艾星佑负责基于机器视觉的液滴在线成型验证，以及微胶囊的热性能和循环热稳定性。论文初稿由冯甄钰执笔，艾星佑补充完善，最终两人共同修改定稿。

2026 Tsinghua High School Science Award 仅用于2026年度清华中学科学奖论文公示

实验过程我们遇到三个核心难题。实验初期前驱体液滴难以稳定成球，通过查阅大量文献、反复调试流速与界面张力，将分散相毛细管数精准控制在 0.0072–0.0216，实现球形前驱体稳定生成。针对人工计数微胶囊效率低、误差大的问题，我们引入微流控微球实时视觉分析系统，实现粒径数据实时采集与自动统计。针对制备流程繁琐、难以连续稳定产出的问题，我们通过不停优化工艺参数，最终制得平均粒径 196.6μm、粒径变异系数（CV）仅 1.88%的单分散微胶囊。

AI 使用情况声明：课题涉及的 AI 相关技术均事先经指导老师确认后使用，所有结果均经人工逐一核验。实验所用微流控微球实时视觉分析系统（V1.0，软件著作权登记号：2026SR0625514）由北京化工大学提供，基于 OpenCV 图像处理算法开发，可实时识别液滴与微胶囊的尺寸、形态和数量，自动计算频率、体积分布及 CV 值等指标，属于实验监测工具，非生成式 AI。

最后，衷心感谢北京市中学生英才计划的科研平台，感谢两校各位老师的悉心指引。现在只是开始，未来我们想做的更多。材料层面可优化聚脲壳材结构与组分，精准调控相变性能；工艺层面可结合 AI 图像识别技术优化成型控制，探索多通道批量制备；应用可延伸至低能耗建筑温控、动力电池热管理等领域，助力低碳发展。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示