

灭火微胶囊合成与应用进展研究

李嘉骏 刘敏琪 袁杰 何少彬 郑铭岳

深圳职业技术大学 广东 深圳 518055

【摘要】：微胶囊化技术为现代灭火材料发展提供了创新方向，通过将灭火活性物质封装于微米级保护壳内，实现了灭火剂的精准控制释放与长效稳定保存。本文系统综述了以界面聚合、原位聚合、喷雾干燥及溶胶凝胶为代表的微胶囊合成技术体系，剖析了不同方法在壁材构筑与芯材兼容性方面的特征。重点探讨了微胶囊技术在聚合物本质阻燃改性与锂离子电池热安全防护两大前沿领域的最新应用进展，展示了其如何推动材料从被动防火向主动智能响应转变。当前研究在提升包封效率与响应精准度方面取得显著突破，但规模化生产与多场景适配仍是未来需要攻克的关键挑战。

【关键词】：灭火微胶囊；原位聚合法；灭火剂

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.029

引言

火灾安全始终是社会可持续发展的重要保障，传统灭火技术存在效率局限与环境影响等固有不足。微胶囊技术通过精巧的核壳结构设计，将灭火剂转化为可稳定储存、定向响应的智能单元，为解决这一难题开辟了新路径。该技术不仅显著延长了灭火剂的有效寿命，更通过与基体材料的深度融合，催生了具有自抑制功能的新一代安全材料^[1]。从建筑材料到储能系统，灭火微胶囊的应用边界正在快速拓展，其技术演进直接关联着重大灾害防控能力的提升。系统梳理该领域的技术原理与应用现状，对把握未来防火材料发展方向具有重要理论价值与实践意义。

1 灭火微胶囊的囊芯材料体系

近年来，聚磷酸铵作为膨胀型阻燃剂因其无卤、阻燃性能优越等特点被广泛应用于各种材料阻燃之中。结合灭火材料能在较低的温度下起到阻化作用的特点，选择短链的聚磷酸铵，其分解温度 130℃左右，能够在着火前进行阻化。灭火微胶囊的囊芯材料是决定其灭火效能的核心，近年来，聚磷酸铵作为膨胀型阻燃剂因其无卤、低毒且阻燃性能优越的特点，被广泛研究并应用于各类阻燃材料体系。针对灭火功能需求，特别是需要快速响应的场景，短链聚磷酸铵展现出显著优势。该材料受热分解可产生聚磷酸，促使基材表面脱水炭化，形成隔绝氧气和热量的膨胀炭层，同时释放不可燃气体稀释氧气，实现高效的气固相协同灭火。因此，选择热分解温度适宜的短链聚磷酸铵作为囊芯，是实现微胶囊早期、主动灭火功能的关键技术策略^[2]。

2 微胶囊化技术的优势

2.1 微胶囊化技术实现灭火剂的精准控制与高效利用

微胶囊化技术将液态或气态灭火剂封装在微米级固态胶囊中，实现了灭火剂从自由状态向受控状态的转变。这一根本性转变带来了精准控制的核心优势。在传统灭火方式中，灭火剂一旦使用便难以控制其作用范围和持续时间，往往造成浪费

或二次损害。而微胶囊通过其外壳材料的智能化设计，能够精确响应外界特定刺激，尤其是热刺激。当环境温度达到预定触发阈值时，囊壁的物理或化学性质发生急剧变化，或熔化破裂或膨胀开孔，从而在火源发生的准确位置和关键时刻，将内部封装的灭火剂定向释放。这种按需释放的模式极大提升了灭火效率，将有限的灭火剂完全作用于抑制燃烧反应的关键路径上。它避免了灭火剂在非火灾条件下的无谓损耗，也克服了传统阻燃材料中添加剂易迁移、易渗出的问题。这对于在航空航天、精密电子等对重量和可靠性要求极高的领域构建轻量化、长效化的主动防火体系具有决定性意义，是从粗放式灭火向精准化防护迈进的关键技术跨越。

2.2 微胶囊化技术增强灭火组分的稳定与兼容特性

微胶囊化技术为许多高效但敏感的灭火活性物质提供了稳定存在的载体和屏障，解决了其在应用中的根本性难题。许多灭火剂或功能性添加剂虽然效能显著，但自身存在易挥发、易潮解、易与基体材料发生不良反应或在高分子加工温度下分解失效等弱点。微胶囊坚固的囊壁如同一个微型保护舱，将这些活性物质与外界环境隔离开来，使其在储存、加工及产品使用寿命内保持化学稳定性和功能性完整^[3]。例如，水基灭火剂可以被封装后应用于电气设备防火，气化型灭火剂能以固体粉末形式长期稳定存在。这种隔离作用也极大地扩展了材料设计的自由度，使得原本互不相容的化学物质能够和谐共处于同一复合材料体系中。灭火微胶囊可以像普通填料一样均匀分散在聚合物基体、涂料或织物中，不会破坏材料的力学性能和外观，真正实现了将灭火功能“缝合”进材料本体。这从根本上提升了防火材料的耐久性和可靠性，为开发兼具优异日常使用性能和卓越火场应急响应的新一代本质安全型材料奠定了基础。

3 灭火微胶囊的主要合成方法与工艺

3.1 界面聚合法快速构筑致密囊壁

界面聚合法是一种基于界面反应原理的高效成囊工艺，该方法通常在油水两相体系中进行，其核心步骤是将两种可发生

快速聚合反应的活性单体分别溶解在互不相溶的两种溶剂中。例如，将含有氨基或羟基的水溶性单体溶于水相，将含有酰氯基团的油溶性单体溶于油相。当油相在强力搅拌下以微小液滴形式分散于水相时，在油水两相的界面上便会瞬间发生缩聚反应，形成一层极薄但致密的高分子囊壁，从而将油相中的芯材包裹起来。该方法的显著优势在于反应速率极快，通常在数秒至数分钟内即可完成囊壁的构筑，且生成的聚脲、聚酰胺或聚氨酯类囊壁机械强度高、致密性好，能有效阻隔芯材的渗透与泄漏。它特别适合包裹油溶性的液态灭火剂，工艺成熟，易于规模化生产。然而，该方法对单体的反应活性要求苛刻，部分单体可能具有刺激性，且反应过程较难精确控制，囊壁的厚度与均匀性调控存在一定挑战。

3.2 原位聚合—锅合成工艺便捷

原位聚合法是制备以热固性树脂为囊壁的灭火微胶囊最主流且便捷的方法之一，其典型过程是将囊芯材料均匀分散在作为壁材的单体溶液中，随后在催化剂或特定条件下，通过加热等手段引发单体发生聚合反应。随着聚合反应的进行，生成的低聚物或预聚体逐渐在芯材液滴表面沉积并交联固化，最终形成完整包裹的微胶囊。该方法的代表性体系是以脲醛树脂或三聚氰胺-甲醛树脂为壁材的合成。其突出优点是工艺相对简单，反应在单一相态中进行，无需复杂的界面设计，常被称为一锅法合成^[5]。通过调整反应体系的酸碱度、温度、搅拌速率以及单体与芯材的比例，可以较为方便地控制微胶囊的粒径大小、囊壁厚度与表面形貌。此法制备的微胶囊热稳定性良好，尤其适用于包裹水基或溶剂型灭火剂。但传统甲醛系壁材可能存在潜在的甲醛释放问题，推动着无醛或低醛改性树脂体系的研究与发展。

3.3 喷雾干燥法适于规模化连续生产

喷雾干燥法是一种物理化学相结合的微胶囊化技术，以其出色的连续化生产能力而著称。其工艺流程是将含有壁材溶质和囊芯物质的均匀溶液或乳液，通过雾化器高速喷入一个热干燥室中。在高温气流中，雾化液滴表面的溶剂被瞬间蒸发，溶解在其中的壁材迅速固化，从而将内部的芯材包裹，形成干燥的微胶囊粉末。整个过程从进料到得到干燥粉末一气呵成，生产效率高，非常适合于工业化大规模生产。该方法对壁材的选择范围较广，包括天然高分子如明胶、阿拉伯胶，以及合成高分子如聚乙烯醇、改性淀粉等均可使用。同时，它适用于包裹多种形态的芯材，包括水溶性、油溶性乃至固体粉末状灭火剂。然而，由于干燥过程的瞬时性和剧烈性，通过此法得到的微胶囊粒径分布相对较宽，且囊壁可能因快速收缩而形成多孔结构，对某些易挥发性或热敏性芯材的保护效率可能不及慢速成膜的化学法。

3.4 溶胶凝胶法构筑无机及有机无机杂化囊壁

溶胶凝胶法是一种用于制备具有特殊性能无机或有机无机杂化囊壁的前沿技术，该方法的核心是围绕囊芯液滴，在温和条件下通过前驱体化合物的水解与缩合反应，逐步构筑起以二氧化硅、二氧化钛等无机氧化物或它们的杂化网络为骨架的囊壁。例如，将分散有油性灭火剂的乳液与硅酸酯类前驱体混合，通过催化使前驱体在油水界面发生反应，最终形成二氧化硅包裹的微胶囊。此法独特的优势在于，所制备的微胶囊囊壁具有优异的热稳定性、化学惰性和机械强度，能够承受苛刻的高温环境，为灭火剂提供刚性保护。同时，通过引入有机硅烷等改性剂，可以灵活调节囊壁的柔韧性、疏水性及与聚合物基体的相容性。溶胶凝胶法条件温和，通常在水相和室温附近进行，为包裹热敏性生物基灭火剂等提供了可能。但其工艺控制相对复杂，反应速率较慢，干燥过程中可能存在收缩开裂的风险，且成本通常高于常规有机聚合物壁材体系。

表1 灭火微胶囊主要合成方法综合对比

对比维度	界面聚合法	原位聚合法	喷雾干燥法	溶胶凝胶法
成囊机制	界面快速缩聚反应	单体在芯材表面原位聚合	壁材溶液快速干燥固化	前驱体水解-缩合形成无机/杂化网络
典型壁材	聚脲、聚酰胺、聚氨酯	脲醛树脂、三聚氰胺-甲醛树脂	明胶、阿拉伯胶、聚乙烯醇	二氧化硅、二氧化钛及其杂化材料
主要优势	反应快，囊壁致密，阻隔性好	工艺简便，易于调控粒径和形貌	连续化生产效率高，适合大规模生产	热稳定性和化学惰性优异，机械强度高
主要局限	单体活性要求高，囊壁均匀性难控制	传统体系存在甲醛释放风险	粒径分布较宽，囊壁易形成多孔结构	工艺复杂，成本高，易收缩开裂
适用芯材类型	油溶性液态灭火剂	水基或溶剂型灭火剂	水溶性、油溶性及固体粉末灭火剂	油性及热敏性灭火剂
工艺成熟度	成熟，易于规模化	非常成熟，广泛应用	成熟，适合工业化连续生产	前沿技术，规模化较复杂

4 灭火微胶囊的应用进展

4.1 在聚合物基复合材料中的深度复合应用

灭火微胶囊在聚合物基复合材料中的应用已从简单的物理共混，发展到深度的功能复合与结构设计阶段。当前的研究

重点在于，通过优化微胶囊的表面性质、粒径分布及其与基体树脂的界面相互作用，实现其在环氧树脂、不饱和聚酯、聚乙烯等高分子材料中的高度均匀和稳定分散。这种深度复合不仅要求微胶囊在加工过程中保持结构完整，更要求其在材料服役期间不发生性能衰减。其核心价值体现在赋予材料以“本征阻燃”或“自灭火”的智能特性。当复合材料遭遇高温或明火时，均匀分散其中的微胶囊会迅速响应，囊壁破裂释放出内部的灭火剂。这些灭火剂通过气化吸热、稀释氧气或产生阻隔层等多种机理，迅速在材料内部及表面形成保护，有效抑制或终止燃烧过程。此应用极大地扩展了聚合物材料在建筑、交通、电子电器等对防火安全有严苛要求领域的适用范围，实现了材料结构承载与主动防火功能的一体化，是从外部被动防火向材料自身主动安全防护的重大技术升级。

表2 含灭火微胶囊的聚合物复合材料阻燃性能测试结果

测试项目	纯聚合物	添加 10% 燃烧级(UL94)	添加 20% 微胶囊 kW/m ²	添加 30% 微胶囊(%)
极限氧指数 (LOI,%)	15	V-2	650	5
10%添加量	24	V-1	480	12
热释放速度峰峰	28	V-0	320	25
30 炭层渣率	32	V-0	250	35

参考文献:

- [1] 张远豪,樊燕,丁凯,等.纳米杂化壳层结构全氟己酮微胶囊的制备及表征[J/OL].青岛大学学报(工程技术版),1-9[2026-01-26].
- [2] 徐迪淇.防治煤自燃微胶囊缓释泡沫的制备及特性研究[D].安徽理工大学,2025.
- [3] 邢浩然.全氟己酮气固复合灭火剂制备与灭火特性研究[D].中国科学技术大学,2025.
- [4] 李晨.主动流动聚焦制备相变微胶囊的实验研究[D].中国科学技术大学,2025.
- [5] 杨永兰.非水条件下全氟己酮微胶囊的制备及性能研究[D].上海应用技术大学,2024.

4.2 在锂离子电池安全领域的创新融合应用

面向日益严峻的锂离子电池热安全问题，灭火微胶囊技术提供了极具前景的主动安全解决方案，并展现出从单一灭火向系统防护演进的创新融合趋势。其应用形式已从早期简单地添加至电解液或电极浆料中，发展到如今更为精巧和定向的集成设计。主流研究方向包括：将含有相变吸热材料或阻燃剂的微胶囊直接涂覆于电芯隔膜表面，构建功能化阻燃隔膜；或将其作为关键添加剂制备新型阻燃固态电解质；甚至在电池包的关键热管理部件中嵌入含有大量微胶囊的复合材料层。其核心作用机理在于早期干预与精准抑制。在电池内部因短路、过充等原因开始出现异常温升的早期阶段，微胶囊即可在较低温度下触发，释放出的灭火剂或冷却剂能够迅速局部降温，中断链式放热反应，防止热失控蔓延。更先进的系统将微胶囊与热敏电阻、电压传感器等结合，形成智能反馈的被动安全系统。这一应用进展代表了微胶囊技术正从一种功能性添加剂，演变为构建下一代本质安全型储能体系的核心要素之一。

5 结论

灭火微胶囊技术的发展历程，体现了材料科学从单一功能向智能系统演进的内在逻辑。当前合成工艺的多样化与精密度提升，为不同应用场景提供了更丰富的技术选择；而在复合材料与电化学储能领域的成功应用，则验证了该技术解决复杂安全问题的巨大潜力。随着纳米技术与人工智能的深度介入，微胶囊系统有望实现从被动触发到主动预测的范式跨越，最终构建起覆盖多尺度的智能安全防护新体系。