

# 微流控技术应用于灭火微胶囊的研究进展

郑铭岳 袁杰 王浩贤 李嘉骏

深圳职业技术大学, 广东省深圳市, 518055;

**摘要:** 火灾防控是公共安全与工业生产的核心需求, 传统灭火材料存在释放不可控、污染环境、适配性差等弊端, 难以满足新能源、电力设备等复杂场景的防火需求。灭火微胶囊因能实现灭火剂稳定储存与可控释放, 成为新型灭火材料的研究热点, 但常规制备技术存在粒径不均、包覆率低、结构可控性差等问题, 限制其规模化应用。微流控技术凭借精准调控优势, 为灭火微胶囊的高性能制备提供了新路径, 推动其向高效化、精细化、环保化方向发展。

**关键词:** 微流控技术; 灭火微胶囊; 应用; 研究进展

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.05.009

## 引言

开发高性能灭火微胶囊对提升火灾防控能力、保障公共安全具有重要现实意义, 也能推动新型灭火材料产业的技术升级。微流控技术与灭火微胶囊的结合, 突破了传统制备工艺的技术瓶颈, 可实现微胶囊尺寸、结构与性能的精准调控, 提升灭火效能与储存稳定性。相关研究不仅能丰富微流控技术的应用领域, 完善灭火微胶囊的制备理论体系, 还能为复杂场景火灾防控提供新型材料支撑, 具有显著的技术价值与应用前景。

## 1 微流控技术与灭火微胶囊的适配性

### 1.1 尺寸与结构调控的精准适配性

灭火微胶囊的灭火效能、储存稳定性与粒径均一性、结构完整性密切相关, 常规制备技术难以实现微米级尺寸的精准调控, 而微流控技术的核心优势的恰好契合这一需求。微流控芯片可通过精准控制流体流速、通道尺寸, 将灭火芯材与壳材溶液制备成粒径均一( $CV < 5\%$ )、尺寸可调( $50 \sim 2000 \mu\text{m}$ )的微液滴, 完美匹配不同场景对微胶囊粒径的要求<sup>[1]</sup>。同时, 微流控技术可灵活构建单核、多核等多元结构, 既能实现单一灭火剂的高效包覆, 也能封装互不相溶的复合芯材, 解决了传统工艺中微胶囊尺寸分散、结构不规则导致的灭火剂释放不均问题, 为灭火微胶囊的性能优化提供了技术支撑, 实现了制备技术与微胶囊结构需求的精准适配。

### 1.2 芯材包覆的高效适配性

灭火微胶囊的核心需求是实现灭火芯材的稳定包

覆与可控释放, 尤其是全氟己酮等易挥发、易流动芯材的封装, 一直是行业技术痛点。微流控技术采用分步包覆、原位固化的方式, 可有效解决这一难题, 展现出优异的芯材适配性。该技术可根据芯材的理化性质(如沸点、溶解性), 灵活选择水相、油相体系及壳材材料, 实现对全氟己酮、七氟丙烷、水基灭火剂等各类芯材的高效包覆, 包覆率可达95%以上。此外, 微流控技术制备过程温和, 可避免高温、高压对芯材灭火性能的破坏, 同时通过调控壳材厚度( $0.1 \sim 50 \mu\text{m}$ ), 精准匹配芯材的释放需求, 实现“温感触发、快速释放”, 完美契合灭火微胶囊“储存稳定、高效灭火”的核心诉求, 凸显了两者的高效适配性。

## 2 微流控技术制备灭火微胶囊的工艺研究

### 2.1 同轴微流控制备工艺

同轴微流控制备工艺是目前应用最广泛的微流控制备技术, 核心是通过同轴嵌套的微通道将芯材与壳材溶液精准分层, 形成核壳结构微液滴后经固化成型, 适用于各类核壳型灭火微胶囊的制备。该工艺主要分为三步: 首先将灭火芯材(如全氟己酮)作为内相, 壳材溶液(如光敏树脂、生物基聚氨酯)作为中间相, 分散相(如PVA水溶液)作为外相, 分别注入微流控芯片的对应通道; 其次通过调控三相流体的压力与流速(内相  $27 \sim 200 \mu\text{L}/\text{min}$ 、中间相  $8 \sim 50 \mu\text{L}/\text{min}$ 、外相  $50 \sim 800 \mu\text{L}/\text{min}$ ), 使三相流体在通道出口处形成稳定的核壳液滴<sup>[2]</sup>; 最后采用紫外固化、热固化等方式对液滴进行固化, 得到结构完整的核壳型灭火微胶囊。该工艺

操作简便、可控性强，可精准调控微胶囊的粒径（50~200 $\mu\text{m}$ ）与壳厚（0.1~10 $\mu\text{m}$ ），制备的微胶囊单分散性优异，芯材包覆率高，目前已成功应用于全氟己酮灭火微胶囊的规模化制备，是工业应用潜力最大的工艺之一。

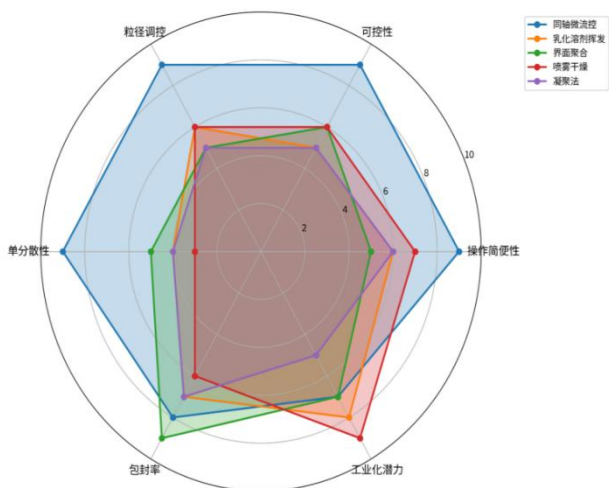


图1 微胶囊制备工艺特点对比雷达图

### 2.2 流动聚焦微流控制备工艺

流动聚焦微流控制备工艺是针对高均一性、小尺寸灭火微胶囊开发的新型工艺，核心是利用流体剪切力将芯材液滴聚焦成型，具有粒径分布窄、制备效率高的优势。该工艺采用单通道或多通道芯片，将芯材溶液通过毛细管注入主通道，主通道内的连续相流体（如壳材溶液）通过剪切力将芯材溶液剪切成均匀的微液滴，同时实现壳材的即时包覆，随后经固化处理得到灭火微胶囊<sup>[3]</sup>。与同轴微流控工艺相比，该工艺无需嵌套通道，芯片结构更简单，可通过调控连续相流速（400~800 $\mu\text{L}/\text{min}$ ）与芯材流速（4~20 $\mu\text{L}/\text{min}$ ），实现微胶囊粒径（100~1000 $\mu\text{m}$ ）的精准调控，且可批量制备多核结构微胶囊。目前该工艺已突破关键技术，实现了粒径均一性达 $\pm 5\mu\text{m}$ 的灭火微胶囊制备，尤其适用于新能源、电力设备等对微胶囊尺寸精度要求较高的场景。

### 2.3 紫外固化微流控复合工艺

紫外固化微流控复合工艺是结合微流控精准成型与紫外光快速固化优势的新型复合工艺，主要解决传统固化工艺耗时久、壳材性能不均的问题，适用于光敏型壳材灭火微胶囊的制备。该工艺以生物基超支化聚氨酯/丙烯酸酯、光敏树脂等为壳材，全氟己酮、复合灭火剂

等为芯材，通过微流控芯片制备核壳液滴后，立即采用365~385nm紫外光（光强200~500 $\text{mw}/\text{cm}^2$ ）进行快速固化，固化时间仅需10~30s，大幅缩短了制备周期。该工艺可精准控制固化速率与壳材交联度，制备的微胶囊壳材机械强度高（拉伸强度 $\geq 25\text{MPa}$ ）、热稳定性优异（热分解温度高于300 $^{\circ}\text{C}$ ），且可实现灭火剂的快速触发释放（释放时间 $\leq 3$ 秒）<sup>[4]</sup>。

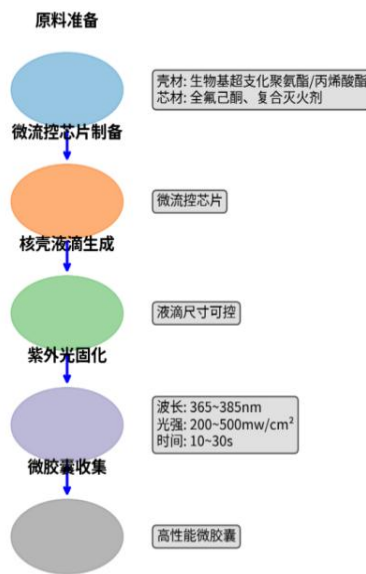


图2 紫外固化微流控复合工艺流程图

## 3 微流控制备灭火微胶囊的性能表征与调控

### 3.1 形貌与粒径性能表征及调控

形貌与粒径是灭火微胶囊的基础性能，直接影响其储存稳定性与灭火效能，微流控制备过程中可通过多手段实现表征与精准调控。表征方面，采用光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）观察微胶囊的表面形貌与内部结构，确认核壳结构完整性；采用激光粒度仪测定粒径分布，以CV值（变异系数）评价均一性，优质微胶囊CV值可控制在5%以内<sup>[5]</sup>。调控方面，核心通过调整微流控工艺参数实现：通道尺寸决定粒径上限，缩小通道尺寸可制备更小粒径微胶囊；流体流速比是关键调控因素，内外相流量等比增大可使液滴粒径增大32.56%，流动相流速增大则使粒径减小29.19%；同时可通过添加表面活性剂（如十二烷基硫酸钠）降低界面张力，改善液滴稳定性，实现粒径均一性的进一步优化，确保微胶囊形貌与粒径满足不同应用场景需求。

表 3-1 灭火微胶囊形貌与粒径表征及调控表

类别	具体内容	核心效果
表征手段	光学显微镜、SEM	观察形貌及核壳结构完整性
	激光粒度仪	测定粒径分布, CV 值 $\leq 5\%$ (优质)
调控因素	通道尺寸	决定粒径上限, 缩小则粒径减小
	内外相流量等比增大	粒径增大 32.56%
	流动相流速增大	粒径减小 29.19%
	添加表面活性剂	提升粒径均一性

### 3.2 芯材包覆与释放性能表征及调控

芯材包覆率与释放性能是衡量灭火微胶囊灭火效果的核心指标, 微流控技术可通过工艺优化实现双重调控, 同时采用精准方法完成性能表征。表征方面, 采用重量法、高效液相色谱 (HPLC) 测定芯材包覆率, 目前微流控工艺可实现包覆率 $\geq 95\%$ ; 通过热重分析 (TGA)、恒温释放实验, 测定微胶囊的释放温度与释放速率, 明确灭火剂释放规律, 优质微胶囊可在 80~200°C 预设温度下快速释放。调控方面, 包覆率可通过调整壳材与芯材的质量比 (1:1~1:6)、流体流速比 (1~5:1) 优化, 增大壳材用量可提高包覆率, 但需避免壳材过厚影响释放速率; 释放性能主要通过壳材组成调控, 选择热响应型壳材 (如生物基聚氨酯), 可实现温感触发释放, 调整壳材厚度可调控释放速率, 厚壳层微胶囊释放温度更高, 单次释放量更多, 多核结构则可实现单次大量释放衔接缓慢释放的模式<sup>[6]</sup>。

### 3.3 机械与热稳定性表征及调控

机械强度与热稳定性决定灭火微胶囊的储存寿命与使用安全性, 微流控制备过程中可通过材料选择与工艺优化实现性能提升与精准调控。表征方面, 采用万能试验机测定微胶囊的抗压强度与拉伸强度, 确保其在储存、运输过程中不破损; 通过差示扫描量热 (DSC)、热重分析 (TGA), 测定微胶囊的热分解温度与热稳定性, 要求其在常温下稳定, 在火灾温度下快速破裂。调控方面, 机械强度主要通过壳材材料优化, 选择生物基超支化聚氨酯/丙烯酸酯等高强度壳材, 或添加含磷、含硅阻燃单体, 可使壳材拉伸强度 $\geq 25\text{MPa}$ <sup>[7]</sup>; 热稳定性可通过调整固化工艺实现, 延长紫外固化时间、提高固化温度, 可增强壳材交联度, 从而提升其热分解温度至 300°C 以上; 同时可通过调控微胶囊粒径与壳厚, 优化其热传导效率, 确保微胶囊在常温下稳定储存, 遇火时

快速响应, 兼顾储存安全性与灭火及时性。

## 4 微流控制备灭火微胶囊的应用场景研究

### 4.1 新能源领域应用研究

新能源领域是灭火微胶囊的核心应用场景之一, 微流控制备的高精度、高稳定性灭火微胶囊, 可有效解决储能、新能源汽车等设备的火灾防控痛点。在储能领域, 针对储能电柜、储能电池的热失控问题, 将微流控制备的全氟己酮灭火微胶囊与涂料、硅胶结合, 制备成灭火涂层或封装防火胶, 涂覆于电池表面或填充于电柜间隙, 当电池发生热失控、温度达到 110°C 左右临界值时, 微胶囊快速破裂, 释放灭火剂阻断燃烧链式反应, 实现早期灭火, 目前已开发出无压储能场景专用灭火方案<sup>[8]</sup>。在新能源汽车领域, 将微胶囊制备成灭火贴片、灭火绳, 安装于电池仓、充电桩等部位, 其体积小、安装方便, 无需额外设备, 可在火灾初期快速响应, 有效抑制电池火灾蔓延, 同时其绿色环保特性契合新能源产业的可持续发展需求。

### 4.2 电力设备领域应用研究

电力设备运行过程中易因过载、短路引发火灾, 且多为狭小空间火情, 微流控制备的灭火微胶囊凭借尺寸均一、释放可控的优势, 成为该领域的理想灭火材料。在配电设备领域, 针对配电箱、环网柜、柱上开关等狭小空间, 将微流控灭火微胶囊制备成灭火片、灭火胶带, 直接安装于设备内部, 其灵敏度高、无需维护, 故障发生率为 0%, 可在设定温度范围内迅速释放灭火剂, 扑灭初期火灾, 避免供电中断<sup>[9]</sup>。在通信电力领域, 将微胶囊融入 IDC 机柜、5G 基站的封装材料中, 可实现设备内部的全方位防火保护, 其绝缘阻燃特性不会影响设备正常运行, 同时可有效解决传统灭火器难以覆盖狭小间隙、灭火不及时的问题, 目前已在电力通信系统中实现小规模应用, 效果显著。

### 4.3 民生消防领域应用研究

民生消防领域对灭火材料的安全性、便捷性要求较高,微流控制备的灭火微胶囊凭借自主灭火、绿色环保的优势,逐步拓展至各类民生场景。在家庭与小型场所,将微流控灭火微胶囊制备成灭火涂料、灭火胶,涂覆于充电宝、排插、煤气阀等易起火部位,或制成小型灭火装置,其体积小、安装方便,可在火灾初期自主触发灭火,有效防范家庭火灾隐患。在交通工具与民生设施领域,将微胶囊融入电瓶车电池仓、电热毯等产品的生产过程中,赋予其自主防火性能,解决电瓶车自燃、电热毯起火等民生安全痛点;同时,微流控灭火微胶囊可与纺织纤维结合,制备成灭火毯,用于家庭、商铺的初期火灾扑救,其灭火效率高、无残留,相较于传统灭火毯更轻便、易储存。

### 4.4 航空航天领域应用研究

航空航天领域对灭火材料的轻量化、高效化、无残留要求极为严苛,微流控制备的灭火微胶囊凭借独特优势,成为该领域火灾防控的新型潜力材料。针对飞机发动机舱、卫星设备舱等密闭狭小空间,以及航天器件精密、耐腐蚀的特点,微流控技术可制备出粒径均一(100~500 $\mu\text{m}$ )、壳材轻薄且耐高温的灭火微胶囊,选用全氟己酮等洁净灭火剂作为芯材,灭火后无残留、不腐蚀器件,可避免对精密设备造成二次损伤<sup>[10]</sup>。将其与航空复合材料结合,制备成防火结构件或填充于设备间隙,当发生局部过热或火情时,微胶囊可快速响应破裂,精准释放灭火剂,实现早期灭火,防止火情蔓延至关键部件。目前该应用已进入实验室验证阶段,可有效解决航空航天领域传统灭火方式重量大、适配性差的痛点,为航空航天设备的安全运行提供重要保障。

## 5 结束语

微流控技术在灭火微胶囊制备中的应用,已在适配性、工艺优化、性能调控及场景应用等方面取得显著进展,有效突破了传统制备技术的局限,推动灭火微胶囊

向高性能、多元化方向发展。该技术可精准匹配不同场景的防火需求,为新能源、电力设备、民生消防等领域提供了新型高效的灭火解决方案。未来,需进一步攻克规模化制备成本高、高端芯片依赖进口等问题,推动技术落地普及,同时深化性能调控与场景适配研究,助力火灾防控体系的持续完善,彰显其广阔的应用前景与发展潜力。

### 参考文献

- [1]严水文,邹豆豆,陈浩佳,等.微流控技术对乳液的生成和稳定研究进展[J].化学工业与工程,2026,43(01):99-108.
- [2]高瑞君,师瑶,徐云云,等.微流控技术快速检测食品中病原微生物研究进展[J].食品安全质量检测学报,2026,17(01):106-114.
- [3]余浩澜,龙隆,姚其莹,等.微流控技术在油水两相流研究中的应用与展望[J].石油化工应用,2025,44(12):1-5.
- [4]梅依琳,韦湘滢,卢舒瑜,等.基于微流控技术的食品凝胶微纤维制备与性质研究[J/OL].食品与发酵工业,1-11[2026-02-24].
- [5]陈丽芬.微胶囊无烟主动灭火产品在铁路电缆线路和电气设备防火中的应用[J].中国战略新兴产业,2025,(29):147-149.
- [6]刘溢,黄冬梅,郭晨宁,等.流量调控微胶囊灭火剂结构对释放模式的影响[J].武汉理工大学学报,2025,47(06):8-15.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]季燕男.微胶囊阻化剂制备优选及阻化性能研究[D].安徽理工大学,2024.
- [10]佟京京.基于温度响应微胶囊的锂离子电池热失控抑制机理研究[D].北京交通大学,2024.