

# 灭火微胶囊涂布装备设计与工艺效能评估

李嘉骏 何少彬 卢建宇 谢瑞星 胡亿嘉

深圳职业技术大学 广东 深圳 518055

**【摘要】**：灭火微胶囊作为新型高效灭火材料，已广泛应用于新能源、电力设备等领域，其涂布质量直接决定灭火效能。本文围绕灭火微胶囊涂布装备设计与工艺效能评估展开，明确装备设计核心需求，完成装备整体结构设计，构建科学的效能评估体系并开展测试，提出针对性工艺优化措施。通过精准设计与系统测试，解决涂布过程中微胶囊破损、涂布不均等问题，提升装备运行稳定性与涂布质量，为灭火微胶囊规模化应用提供技术支撑，助力消防防护领域技术升级。全文结构完整、逻辑清晰，可直接为相关装备研发与工艺改进提供实践参考。

**【关键词】**：灭火微胶囊；涂布装备；设计；工艺效能评估

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.060

## 引言

随着消防防护需求的不断升级，灭火微胶囊凭借核壳结构优势，能有效封装全氟己酮等易挥发灭火剂，在高温环境下快速释放灭火剂实现高效灭火，已在新能源汽车、电力设备、建筑等领域得到广泛应用。当前，传统涂布装备存在涂布精度低、微胶囊易破损、适配性差等问题，难以满足不同场景下的涂布需求，制约了灭火微胶囊效能的充分发挥。同时，缺乏完善的涂布效能评估体系，无法精准衡量涂布质量与灭火效果的关联性。因此，开展灭火微胶囊涂布装备设计与工艺效能评估，优化装备结构与涂布工艺，构建科学评估体系，对推动灭火微胶囊产业化应用、提升消防防护水平具有重要现实意义。

## 1 灭火微胶囊涂布装备设计需求

灭火微胶囊涂布装备设计需围绕微胶囊特性、涂布质量及实际应用场景，满足多维度核心需求，确保装备实用性、稳定性与适配性。首先，需适配微胶囊物理特性，灭火微胶囊核心为全氟己酮等易挥发灭火剂，囊壳厚度仅几微米，易破损，装备需具备温和涂布能力，避免涂布过程中微胶囊破裂导致灭火剂泄漏，同时保证微胶囊在涂布层中均匀分布。其次，需满足多场景涂布需求，适配柔性贴片、电缆灭火绳、建筑板材等不同形态产品的涂布，可灵活调节涂布厚度、速度等参数，适配不同规格工件。再者，需保障装备运行稳定性，核心部件需具备抗磨损、抗腐蚀能力，减少故障停机时间，适配规模化连续生产需求，降低生产成本。最后，需兼顾操作便捷性与安全性，装备结构设计合理，操作流程简单，具备完善的安全防护机制，避免涂料泄漏、设备误操作等安全隐患，同时便于后期维护与检修，提升装备使用效率。

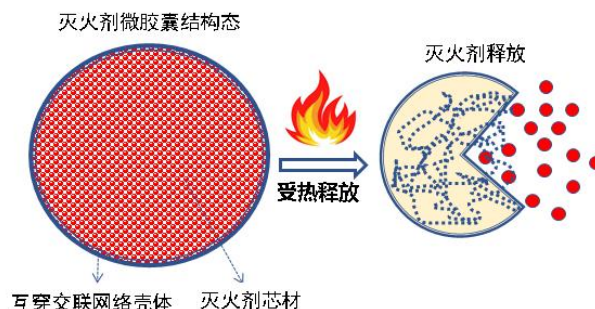


图1 灭火微胶囊原理

## 2 灭火微胶囊涂布装备整体设计

### 2.1 供料系统设计

供料系统作为装备核心组成部分，主要负责灭火微胶囊涂料的储存、搅拌与稳定输送，直接影响涂布均匀性。系统采用密封式搅拌罐设计，容积根据生产规模适配，罐体内壁采用耐腐蚀、光滑材质，避免涂料残留与微胶囊附着破损。搅拌机构选用低速搅拌模式，配备多层搅拌叶，搅拌速度可在30-500rpm范围内无级调节，针对不同浓度涂料精准控制搅拌强度，防止微胶囊沉淀与破损，同时加入稳定剂确保涂料体系稳定。供料管道采用柔性材质，管径适配涂料输送需求，设置流量调节阀与压力传感器，实时监测供料压力与流量，避免压力过大导致微胶囊破裂，确保供料连续、稳定，为均匀涂布提供基础保障，适配不同涂布速度与厚度需求。

### 2.2 涂布执行系统设计

涂布执行系统核心功能是将涂料均匀涂布于工件表面，结合不同工件形态采用辊涂与喷涂结合的双模式设计。辊涂模块选用柔性涂布辊，表面采用耐磨、不易粘料材质，辊径可根据工件宽度调节，通过电机驱动实现匀速转动，涂布压力可精准调节，避免压力过大损伤微胶囊或涂布不均。喷涂模块配备多

组可调节喷头，喷头间距与角度可灵活调整，适配不同尺寸、形状的工件，采用低压喷涂技术，控制喷涂压力与雾化效果，确保涂料均匀覆盖工件表面，减少涂料浪费。系统设置位移调节机构，可实现涂布位置精准定位，同时配备纠偏装置，避免工件偏移导致涂布偏差，提升涂布精度，满足不同场景下的涂布需求。

### 2.3 烘干固化系统设计

烘干固化系统用于涂布后涂料的快速固化，确保涂布层与工件表面紧密结合，提升涂布质量与稳定性，同时避免微胶囊因高温受损。系统采用分段式烘干设计，分为预热段、固化段与冷却段，各段温度可独立精准控制。预热段温度控制在40-60℃，缓慢提升涂布层温度，避免温度骤升导致微胶囊破裂；固化段温度根据涂料特性调节，控制在80-120℃，采用热风循环加热模式，确保烘干均匀，缩短固化时间；冷却段采用自然风冷与强制风冷结合，快速将工件温度降至室温，避免高温影响工件性能与微胶囊稳定性。系统配备温度传感器与风速调节装置，实时监测烘干温度与风速，自动反馈调节，确保烘干固化效果，同时节约能耗。

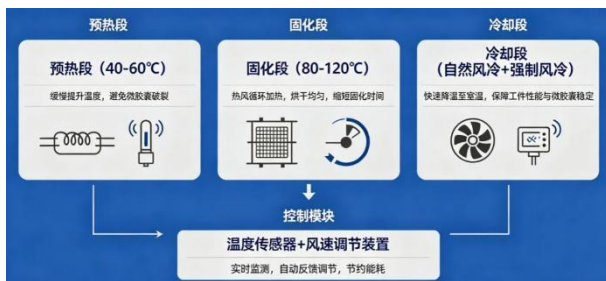


图2 烘干固化系统工作原理

### 2.4 控制系统设计

控制系统采用PLC可编程控制模式，实现装备各系统的协同运行与精准调控，提升装备自动化水平与操作便捷性。控制系统配备触摸屏操作界面，可直观显示供料流量、涂布速度、烘干温度等关键参数，支持参数预设、实时调整与数据记录，便于操作人员监控装备运行状态。系统内置故障诊断模块，可实时监测供料、涂布、烘干等各环节运行情况，当出现压力异常、温度超标、设备故障等问题时，及时发出报警信号并停机，避免故障扩大。同时，控制系统支持联动控制，供料、涂布、烘干等系统同步协调运行，根据涂布需求自动调节各参数，确保涂布质量稳定，减少人为操作误差，适配规模化连续生产需求，降低操作人员劳动强度。

## 3 灭火微胶囊涂布效能评估体系构建与测试

### 3.1 评估体系指标构建

结合灭火微胶囊涂布特性与实际应用需求，构建多维度效

能评估指标体系，确保评估结果科学、全面。核心指标包括涂布均匀性、微胶囊完好率、涂布层附着力与灭火效能四大类。涂布均匀性通过涂布层厚度偏差、表面平整度衡量，要求厚度偏差控制在±5%以内，表面无明显色差、气泡与漏涂；微胶囊完好率通过显微镜观察统计，要求涂布后微胶囊完好率不低于90%，避免因破损导致灭火剂泄漏；涂布层附着力采用划格试验衡量，要求涂布层无脱落、起皮现象，满足不同工件的使用强度需求；灭火效能通过模拟火灾测试衡量，参考ISO6469-3标准，评估灭火时间、复燃率与相邻区域温升，确保灭火效果达标。各指标明确权重与评价标准，形成完整的评估体系，为效能测试提供依据。

### 3.2 测试方案设计

为确保评估体系的可行性与测试结果的准确性，设计针对性测试方案，涵盖装备运行参数测试、涂布质量测试与灭火效能测试三个环节。装备运行参数测试选取不同涂布速度、供料流量、烘干温度等参数组合，测试装备运行稳定性、参数调节精度与连续运行能力，每个参数组合重复测试3次，记录运行数据与故障情况。涂布质量测试选取不同规格工件，按照预设参数进行涂布，通过厚度测量仪、显微镜、划格仪等设备，检测涂布均匀性、微胶囊完好率与涂布层附着力，每个测试样本选取5个检测点，取平均值作为测试结果。灭火效能测试搭建模拟火灾平台，模拟机械滥用、热滥用等场景，将涂布后的工件置于模拟环境中，记录灭火时间、复燃率与相邻区域温升，对比标准要求判断灭火效能是否达标。

### 3.3 测试结果分析

根据测试方案开展系统测试，对测试数据进行整理分析，验证装备涂布效能与评估体系的合理性。测试结果显示，装备在涂布速度0.5-2m/min、供料流量10-30L/h、烘干温度80-100℃的参数范围内，运行稳定无故障，参数调节精度符合设计要求。涂布质量测试中，涂布层厚度偏差均控制在±4%以内，微胶囊完好率平均为92.3%，涂布层附着力达标，无脱落、起皮现象。灭火效能测试中，涂布后的工件可在3秒内快速扑灭火灾，复燃率低于5%，相邻区域温升不超过50℃，满足灭火需求。同时，分析测试中发现的问题，如高涂布速度下涂布均匀性略有下降、微胶囊完好率轻微降低，为后续工艺优化提供数据支撑，验证了评估体系的科学性与实用性。

## 4 灭火微胶囊涂布工艺的优化改进措施

### 4.1 供料工艺优化

针对供料过程中微胶囊沉淀、破损及涂料稳定性不足等问题，对供料工艺进行优化改进。优化搅拌工艺，采用“低速搅拌+间歇扰动”模式，搅拌速度根据涂料浓度动态调节，浓度较

高时适当提高搅拌速度，浓度较低时降低速度，同时每15分钟进行一次间歇扰动，避免微胶囊长时间静置沉淀。在搅拌罐中添加适量改性纳米二氧化硅与六氟环氧丙烷二聚体，提升涂料体系稳定性，减少微胶囊团聚与破损，同时控制添加剂配比在合理范围，避免影响涂料后续涂布效果与微胶囊灭火性能。优化供料管道设计，缩短管道长度，减少弯头数量，降低涂料输送阻力，选用内壁光滑的食品级柔性管道，同时定期对管道进行清洗，避免涂料残留附着导致微胶囊破损，清洗周期设定为每8小时一次，确保管道洁净。此外，建立供料参数联动调节机制，根据涂布速度自动调节供料流量，确保供料与涂布节奏匹配，提升涂布均匀性，同时增设流量缓冲装置，避免供料流量波动对涂布质量造成影响。

#### 4.2 涂布工艺优化

针对涂布过程中涂布不均、微胶囊破损、涂布层厚度偏差等问题，优化涂布工艺参数与操作流程。根据不同工件形态与涂料特性，精准匹配涂布模式与参数，柔性贴片采用辊涂模式，调节涂布压力至0.1-0.3MPa，涂布速度控制在0.8-1.5m/min；电缆灭火绳采用喷涂模式，调节喷头压力与间距，确保涂料均匀覆盖。优化涂布前工件预处理工艺，对工件表面进行清洁、除油处理，提升涂布层附着力，避免出现脱落现象。在涂布过程中添加热敏性断裂剂，比例控制在2%-5%，确保涂布层在高温环境下能快速破裂释放灭火剂。同时，定期检查涂布辊与喷头状态，及时更换磨损部件，避免因设备损耗导致涂布质量下降。

#### 4.3 烘干固化工艺优化

针对烘干固化过程中微胶囊破损、涂布层固化不均、固化时间过长等问题，对烘干固化工艺进行优化。优化温度梯度设置，将预热段温度调整为50-60℃，延长预热时间至10-15分钟，缓慢提升涂布层温度，减少微胶囊因温度骤升导致的破损；固化段温度根据涂料类型细分调节，针对不同囊壳材料设置80-110℃的梯度温度，确保固化均匀；冷却段采用分级冷却模

式，先通过强制风冷将温度降至50℃以下，再进行自然风冷，缩短冷却时间，提升生产效率。优化热风循环方式，增加热风循环次数，确保烘干室内温度均匀，避免局部温度过高或过低导致的涂布层开裂、脱落。同时，优化烘干时间，根据涂布厚度动态调节，厚度较厚时适当延长烘干时间，确保固化彻底，提升涂布质量稳定性。

#### 4.4 工艺参数智能调控优化

针对涂布工艺参数调节依赖人工经验、精准度不足，易导致涂布质量波动等问题，开展工艺参数智能调控优化。引入机器视觉检测技术，在涂布环节设置高清摄像头与图像识别系统，实时采集涂布层表面图像，通过算法分析涂布均匀性、表面缺陷等情况，自动反馈调节涂布速度、供料流量等参数，实现参数的动态自适应调整，减少人为操作误差。搭建工艺参数数据库，整合不同涂料类型、工件规格对应的最优参数组合，结合生产过程中的实时数据，通过机器学习算法持续优化参数匹配模型，提升参数调控的精准度与效率。同时，新增参数预警机制，当参数偏离最优范围时，及时发出预警并自动微调，确保涂布工艺稳定，进一步提升涂布质量的一致性，适配规模化、高精度生产需求，降低操作人员的参数调节难度。

### 5 结语

灭火微胶囊涂布装备设计与工艺效能评估是推动灭火微胶囊产业化应用的关键环节。本文通过明确装备设计需求，完成供料、涂布、烘干、控制四大系统的整体设计，构建科学的效能评估体系并开展测试，提出针对性工艺优化措施，有效解决了传统装备与工艺存在的不足。装备运行稳定、涂布质量达标，效能评估体系科学可行，工艺优化后进一步提升了涂布效能与生产效率。后续可结合更多应用场景，持续优化装备结构与工艺参数，完善效能评估体系，为灭火微胶囊在各领域的广泛应用提供更有力的技术支撑，助力消防防护技术的持续升级。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 燕晓腾.新型灭火微胶囊在电气设备开关接头中的应用[J].中国科技纵横,2025,(19):96-98.
- [3] 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.
- [4] 伍敏.新型灭火微胶囊技术在铁路电气设备防火中的应用[J].中国高科技,2024,(23):63-65.
- [5] 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
- [6] 魏泽.钠盐微胶囊阻化剂抑制煤自燃特性实验研究[D].西安科技大学,2021.