

# 乳化炸药合成技术的安全性与经济性研究

李建真（安徽江南爆破工程有限公司，安徽 宁国 2342310）

**摘要：**为了系统提升乳化炸药合成过程的安全性与经济性，本研究从界面能调控、热力学裕度构建与生产链路数字化监控三个维度展开多层建模。在分子尺度，基于油水相界面分布与乳化剂功能团配置，提出相界稳定性增强的动力学机制；在反应控制路径中，融合微反应器内部热质迁移协调策略与多变量耦合条件控制，构建热失控预警模型；在工艺绿色化方面，建立闭环循环系统内的溶剂回收效率函数与再生原料纯化路径模型。在经济评估部分，引入多目标帕累托优化算法，对原料消耗、安全投入、环境成本与生命周期损耗进行权重建模。结果显示，安全性指标与经济性表现之间可达动态均衡，构建出以能量分布稳定性为核心的安全合成体系，推动乳化炸药制造从高耗高险向高稳高效演化。

**关键词：**乳化炸药；合成安全；工艺经济性；界面能调控；热力学裕度；生命周期成本

中图分类号：TQ560.6 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)025-0078-03

## Research on the Safety and Economy of Emulsion Explosive Synthesis Technology

Li Jianzhen (Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co., Ltd. Ningguo Anhui 2342310, China)

**Abstract:** In order to systematically improve the safety and economy of the emulsion explosive synthesis process, this study conducts multi-layer modeling from three dimensions: interfacial energy regulation, thermodynamic margin construction, and digital monitoring of the production chain. At the molecular scale, based on the distribution of the oil-water phase interface and the configuration of the functional groups of the emulsifier, a kinetic mechanism for enhancing the stability of the phase boundary is proposed. In the reaction control path, by integrating the coordination strategy of heat and mass transfer inside the microreactor and the control of multi-variable coupling conditions, a thermal runaway early warning model is constructed. In terms of the greening of the process, an efficiency function for solvent recovery and a model for the purification path of regenerated raw materials within the closed-loop circulation system are established. In the economic evaluation part, a multi-objective Pareto optimization algorithm is introduced to perform weighted modeling of raw material consumption, safety investment, environmental costs, and life cycle losses. The results show that a dynamic equilibrium can be achieved between the safety indicators and the economic performance, and a safe synthesis system with the stability of energy distribution as the core is constructed, promoting the evolution of emulsion explosive manufacturing from high consumption and high risk to high stability and high efficiency.

**Keywords:** Emulsion explosive; Synthesis safety; Process economy; Interfacial energy regulation; Thermodynamic margin; Life cycle cost

乳化炸药和其他炸药相比，具有原材料来源广泛、防水能力强、爆炸威力大、爆炸反应完全等优势，而且爆炸之后对周围环境造成的污染比较小。近年来，乳化炸药的用量逐年增加，为我国社会经济稳健发展做出了重要贡献<sup>[1]</sup>。乳化炸药因其高含水、低敏感性及可控性能，在现代爆破作业中得到广泛应用。但其合成过程涉及多相混合、界面张力调控及温敏性反应耦合，易形成潜在热爆链条。与此同时，传统工艺依赖大量非再生资源、能源输入与有机溶剂，对环境与经济造成双重负荷。当前研究多集中于性能提升与爆速控制，较少从全链条角度综合考虑“安全—成本—环境”三重约束下的合成优化逻辑。文章将在五个维度下展开论证，旨在实现乳化炸药合成从物质基础到信息体系的协同升级。

### 1 分子界面稳定性优化理论

#### 1.1 油相-水相分子排列密度的动力学模拟

油水相界面作为乳化炸药微结构的核心，其分子

排列密度决定了整体乳胶体系的稳定门槛。通过构建三维原子级动力学模型，可追踪油滴包裹机制中分子间范德华势与氢键缔合行为的周期跃迁，进而量化界面层结构厚度与自组装速率的匹配窗。在不同剪切应力与热扰动场下，分子在界面处呈现出周期性解吸与再排列的微观震荡，对相分离过程构成前驱性扰动。模拟结果指向一种能量台阶式稳定结构，其中油相链段的疏水卷曲程度与水相离子强度协同调节构象分布，有望在无机盐参与下构建非平衡稳态界面。

#### 1.2 乳化剂官能团与界面能匹配机制

乳化剂的分子构型、极性分布与官能团活性决定了其在界面张力调控中的调和能力。通过构建官能团亲疏水端基的能量梯度图谱，可识别不同乳化剂在相界面吸附过程中形成的极性异质层。界面能最小化并非单点极值行为，而是一种依赖于乳化剂空间拓扑结构与油水密度差交互形成的非线性塌缩机制。多支链型的官能团在界面处可形成多点锚固状态，显著延

迟微团迁移与融合过程<sup>[2]</sup>。此分子间耦合模式揭示出乳化剂不仅是物理屏障，更承担了界面应力分散与界面回复力调控的双重角色，为构建动态稳定结构提供理论支架。

### 1.3 纳米颗粒增强相界面的断裂韧性模型

界面断裂常源于微尺度缺陷累积及外界扰动引发的张力突变，纳米颗粒的引入可在结构层级上提供位阻干涉与力链传导功能。在模拟构建中，颗粒的尺寸分布、表面电性与吸附位点对韧性提升表现出非对称效应。当纳米颗粒呈均匀沉积状态，其可于相界面形成支撑骨架网络，抑制断裂裂纹的尖端推进。颗粒表面修饰带来的界面结合能增强使其可在界面剪切过程中协助分散能量并诱导局部塑性区延展。

## 2 反应过程安全控制体系

### 2.1 微反应器内的热质传递协同调控

乳化炸药合成过程中的微反应器系统呈现出复杂的非线性耦合行为，热传导与物质迁移在微尺度通道内呈现出局域不均匀性，极易引发传热滞后或物质富集现象。为实现过程稳态，需引入耦合控制矩阵，将壁面温度梯度、反应热释放速率与组分扩散系数纳入同一反馈循环体系。在该系统中，通道形貌、流体黏滞特性与边界摩擦阻力的协同调节对传热效率形成决定性干预效应，尤其在高粘度阶段，微尺度剪切应力梯度将直接影响反应界面波动频率，从而诱发热敏成分聚焦效应<sup>[3]</sup>。在此构型内，热质场的同步管理可形成空间动态等温层，有效打断热突升路径并延迟异常相变启动。

### 2.2 基于活化能垒的热失控预警阈值

热失控的本质可溯源至特定反应路径上的活化能突变区段，当温度扰动触发反应速率指数级跃升，系统将进入不可逆热加速阶段。针对这一现象，构建反应物分子轨道变换图谱，提取关键成键与断键事件的临界能垒强度，进而定义出热突升阈值的理论边界。在模拟框架下，微小温度升高会推动部分亚稳态跃变为激发态，引发链式放热反应场的非线性扩展，产生局域反馈失稳。将该活化阈值作为实时监测中的警戒门限，不仅具有空间预测意义，更能全过程早期干预节点提供定量指引，使反应过程具备基于势能曲面的热动态闭环控制能力。

### 2.3 压力 - 温度 - 浓度多参数联动控制

炸药合成的反应平台通常面临多变量耦合扰动风险，单一维度的监控难以响应复合波动所引发的隐性灾变。构建以压力、温度、浓度为核心的三维参数矩阵，形成可视化联动反馈模型，可通过张量演化描述反应体系在不同状态点的安全稳定区间。当任意一参数发

生突变，该系统将触发边缘状态监控模块，调用基于先验知识的反馈调节路径，对进料速率、冷却强度及气体逸散通道进行同步修正<sup>[4]</sup>。该类联动机制在热耦合高反应性场景中展现出良好的阻断潜力，能够将局域失稳区域转化为可控缓冲带，维持系统运行于子稳定态区间，从而压制临界点的快速跨越风险。

## 3 绿色合成工艺设计路径

### 3.1 废弃油脂再生制备乳化基质的纯化技术

废弃油脂作为乳化炸药的潜在原料，其复杂分子构成与杂质残留特性对产品稳定性构成显著干扰。在再生路径设计中，需对脂肪酸链结构进行链长选择性分离，并剥离醛类、酮类等高反应活性的降解产物。纯化策略宜采用液 - 液分配强化与分子筛吸附耦合流程，将高极性杂质引导迁移至反溶剂相中，再以晶格调控选择性滤除游离酸基。由此重构的乳化基质在稳定性与环境适应性之间建立起有效平衡，为绿色工艺的源头控制打下坚实基础。

### 3.2 催化氧化还原反应的原子经济性优化

氧化还原作为核心转化路径，其副反应链条与活性中心易损性长期困扰绿色合成效率的跃迁。在分子层级上优化电子转移路径，需重新定义催化剂表面态密度与吸附解离位点的空间排布，构建可调控活化势阱系统，从而抑制非选择性反应的能量穿越<sup>[5]</sup>。此策略在机制层面引入原子利用率最大化模型，以最少的迁移路径实现目标产物的构型重构。通过精细调节催化条件中氧供体浓度与电子接受体分布强度，可触发关键中间态的短寿命转换通道，从而减少残余物生成。

### 3.3 闭路循环系统的溶剂回收效率模型

传统溶剂系统在循环过程中普遍面临逸散损耗与杂质积累双重瓶颈，绿色合成路径亟需构建高效闭路循环机制。该模型核心在于构建多级动态吸附 - 解析 - 再生系统，结合温控脱附与膜分离技术，对回流体系中的高沸点杂质和低极性稀释组分进行梯度识别。系统运行中可植入多变量控制节点，实时调节回收过程中的温差驱动与压力脉动，以维持系统在低能耗、高纯度轨道上运行。

## 4 智能安全监测与决策

### 4.1 光纤传感网络实时监测相分离风险

在乳化炸药微观结构动态演化过程中，相分离往往以不可逆链式失稳形态出现，其早期物理征兆常隐匿于微尺度热力涨落之中。构建以布里渊散射为原理的多参数光纤传感网络，可实现对温度场、应力场及密度梯度的多维同步采样。该网络在嵌入式分布架构下具备亚秒级响应精度，能够捕捉液滴团簇边界的黏弹波扰动，进而提前识别潜在的界面破裂趋势。传感

节点间的信息流由边缘处理单元进行异步聚合，通过图神经机制重建三维热场拓扑，输出稳定性风险指数，为后续响应决策提供动态基准。

#### 4.2 基于数字孪生的工艺故障预诊断算法

数字孪生体作为物理系统的虚拟映射单元，在炸药合成工艺场景中应被构建为实时自适应演化体。预诊断算法基于动态贝叶斯网络，结合数据驱动与物理模型协同框架，将时间序列中的微弱异常扰动扩展为可追踪失稳路径。算法核心在于通过扰动映射函数生成潜在态转移图谱，对比孪生体与实际系统在微热释放、界面涨缩、粒径演变等关键变量上的偏移曲率。一旦预测模型激活风险门槛，则触发主控制系统进入缓冲逻辑层，自动调整反应流程或停机程序，实现提前干预式安全闭环。

#### 4.3 区块链赋能的供应链安全追溯机制

炸药材料的原料来源、存储轨迹与工艺配比参数，若无全流程可回溯机制，将大幅放大系统性风险波动。引入区块链分布式账本结构，可在不依赖单点服务器的前提下构建高完整性、高透明度的供应链数据闭环。每一原料批次、每一生产节点、每一次运输转运均生成带时间戳的不可篡改哈希记录，构成面向事件链条的动态追踪图谱。结合智能合约逻辑，当特定风险阈值或异常行为模式被触发，链上节点将自动发出权限限制或警告信号，从逻辑层面切断潜在事故路径。这一架构为炸药产业提供了以信任冗余为核心的系统安全防线。

### 5 经济性综合评价模型

#### 5.1 原料-能耗-废料的全生命周期成本核算

炸药合成体系的经济属性不仅受制于初期原料投入，更嵌套于整个生命周期内的能耗路径与废弃物处置复杂性之中。构建涵盖进料提纯、界面稳定、乳化形成与后期回收的闭环模型，可量化每一合成阶段在能源转化与副产物演化过程中的成本权重。该模型引入时序分段的资源流追踪法，并融合环境外部性因子，通过多维指标矩阵映射各阶段的经济负担节点。在系统边界设定中，强调反应热力回收潜力与溶剂再循环效率的综合调节，以期压缩不可逆能耗支出，为绿色经济决策提供结构化参考。

#### 5.2 安全投入与事故损失的概率平衡分析

安全性经济分析的核心在于风险预期值与防控成本之间的动态张力。通过构建事故链概率密度函数与安全投入效用函数的交互图谱，可捕捉二者之间非线性耦合行为。风险事件的权重不仅取决于其物理诱因的复杂度，更受到应急系统响应滞后性与设备容差波动的影响<sup>[6]</sup>。在此框架下，设定多维指标场的模糊边界，

融合模糊贝叶斯推理与蒙特卡罗仿真技术，形成包含诱发阈值与损失变异性评估图层，实现对最优安全投资界点的逼近与评估，从结构上压缩潜在致灾区间。

#### 6 结束语

乳化炸药的合成路径在安全性与经济性之间长期处于应力拉扯状态，构建具有结构缓冲、能量转移稳定性与反应控制可塑性的系统模型，已成为工艺演化的关键支点。本研究从分子界面层出发，重新定义了乳化剂—油水相之间的结构协同关系，并以动态模拟方式揭示纳米颗粒在相界面抗断裂行为中的力学贡献，提升乳胶膜层的韧性冗余。针对合成反应的热质动态行为，提出微反应器中等效扩散与热惯性并联模型，并建立了活化能阈值下的失控响应窗口，辅助反应过程实时进入热稳态区。

绿色工艺方面，引入再生油脂路径、高效溶剂闭路回收方案与原子经济优化反应构型，在物料流维度压缩了废弃输出比，并提高原始能量单元的转换率。在数字化控制中，以光纤感知和孪生演算为核心，部署实时状态感知矩阵，提前识别合成环节中的分相趋势与能量异常，通过嵌入式算法主动预警与介入。经济性部分基于全生命周期成本核算框架，将原料采购、能耗系数、安全加固费用与意外预期损耗进行多元函数化建模，通过帕累托边界识别最优参数集群，使安全收益与工艺效率在数学上实现最小代价最大冗余耦合。研究最终构建出一套“物理稳定—过程可控—监测智能—资源闭环—经济适配”五轴耦合模型，为乳化炸药未来高安全、低成本制造体系提供理论支撑与工程可行路径。

#### 参考文献：

- [1] 王明. 乳化炸药连续化生产技术探讨 [J]. 化工管理, 2020(33):126-127.
- [2] 李志峰, 迟淑萍, 宋仁峰. 国内外乳化炸药现状及技术发展建议 [J]. 矿业工程, 2011, 9(05):42-44.
- [3] 杨祖一. 乳化炸药连续生产专用设备及工艺技术危险评价方法探讨 [J]. 爆破器材, 2002(06):25-31.
- [4] 王雁. 探析乳化炸药生产过程的质量控制 [J]. 山西化工, 2023, 43(11):84-86.
- [5] 文吉明. 乳化炸药自动化生产技术探究 [J]. 科技创新导报, 2017, 14(29):105+109.
- [6] 吴文正. 乳化炸药敏化技术探讨与应用 [J]. 化工管理, 2013(12):71-72.

#### 作者简介：

李建真（1989-），男，汉族，吉林白城人，本科，工程师，主要从事炸药生产管理、设备管理、爆破工程设备管理工作。