

乳化炸药存储与运输安全性能优化策略研究

李建真（安徽江南爆破工程有限公司，安徽 宁国 2342310）

摘要：为了应对乳化炸药在存储与运输过程中面临的稳定性劣化与环境耦合风险，本文在材料维度，提出界面分子动力学与纳米抑晶技术的协同路径，强化基质结构抗裂性；在环境响应层面，通过温湿振耦合模型与封闭气体调控技术，实现对存储诱变因子的多维抑制；在智能化层面，融合光纤传感网络、预警算法与边缘计算构建实时感知与动态评估机制；在运输安全方面，引入共振避让设计与极端气候适应性包装策略；最终，在系统级治理中，通过事故链建模与生命周期决策模型提出动态安全保障方案。研究结果指出，乳化炸药安全性的核心不仅依赖于单项材料改性或单域控制策略，而需构建跨尺度、全流程的协同稳定机制，方能满足复杂场景下的持续安全运行需求。

关键词：乳化炸药；存储安全；运输动力学；相变抑制；智能监测；风险评估

中图分类号：TD235.21 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)024-0160-03

Research on Safety Performance Optimization Strategies for the Storage and Transportation of Emulsion Explosives

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

Abstract: In order to address the risks of stability degradation and environmental coupling faced by emulsion explosives during the storage and transportation processes, this paper, from the material dimension, proposes a synergistic approach of interfacial molecular dynamics and nanoscale anti-crystallization technology to enhance the crack resistance of the matrix structure. At the environmental response level, through the temperature, humidity and vibration coupling model and the closed gas regulation technology, a multi-dimensional suppression of the storage-induced mutagenic factors is achieved. At the intelligent level, a real-time perception and dynamic evaluation mechanism is constructed by integrating the optical fiber sensing network, early warning algorithm and edge computing. In terms of transportation safety, a resonance avoidance design and extreme climate adaptive packaging strategy are introduced. Finally, in the system-level governance, a dynamic safety guarantee scheme is proposed through accident chain modeling and a life cycle decision-making model. The research results indicate that the core of the safety of emulsion explosives does not rely solely on single material modification or single-domain control strategies, but rather requires the construction of a cross-scale and full-process collaborative stability mechanism to meet the continuous safety operation requirements in complex scenarios.

Keywords: Emulsion explosives; Storage safety; Transportation dynamics; Phase transition suppression; Intelligent monitoring; Risk assessment

乳化炸药是指用乳化技术制备的，能使微滴均匀分散在含有分散气泡或空心玻璃微珠中的一种具有包水特性的乳胶状工业炸药^[1]。乳化炸药因其高安全性与可塑配制特性被广泛应用于民爆工程，但其物理化学结构的不稳定性在存储与运输过程中容易因环境变化诱发相变、气体逸散或微裂失稳，进而引发性能退化或潜在失控事件。传统安全保障体系多集中于静态容器防护与作业操作规范，而对材料本体结构演化、环境扰动反馈机制与实时监测响应能力的研究较为薄弱。

本文围绕乳化炸药的多阶段安全控制问题，从微观材料结构调控、宏观环境干扰耦合应答、智能监测系统构建到系统性管理逻辑重塑，提出一整套覆盖材料—环境—行为—管理多维通路的优化策略体系。通过构建跨尺度理论框架与动态响应机制，探索在高复杂度运输与存储场景中实现风险抑制与响应强化的可

能路径，为新一代乳化炸药的安全运行提供系统性理论基础与应用策略。

1 基质材料稳定性优化理论

1.1 油相—水相界面分子动力学的模拟优化

乳化类炸药成分包括硝酸铵、硝酸钠、柴油和石蜡等油相材料、水。于在煤矿冶金、石油地质、交通水电、林业建筑、金属加工和控制爆破等方面乳化炸药被广泛使用。乳化炸药的品种和产量伴随着世界经济科技的发展不断增大，并迅速得到发展。乳化炸药结构的稳定性高度依赖于油水界面处分子间相互作用的持续均衡状态。通过分子动力学模拟，可以从原子尺度重构油相与水相在界面处的排列行为、势能分布及扩散速率，揭示界面系统中的吸附机制与动态重组过程。

模型引入长程库仑相互作用和范德华力参数，分析乳化颗粒在界面处形成双分子膜结构的稳定条件。

界面张力、分子取向及链段松弛时间等物理量成为影响乳液长期均匀性的关键变量。若界面处存在疏水链穿插深度不均或极性基团局部聚集，将诱导界面能扰动，从而引发乳化体系的微观结构崩塌。模拟优化路径包括调节亲疏水基团比例、提升表面活性剂对界面电荷密度的屏蔽能力，以及强化界面层分子自组装结构的内聚性。

1.2 纳米添加剂对晶体生长的抑制机理

乳化炸药中晶体的非控制性生长会引发体系结构的局部失稳，特别是在低温或周期性湿热条件下，晶体扩展极易穿透乳胶膜并诱导相分离。引入纳米尺度抑晶添加剂作为干扰核心，通过界面吸附与晶格错配机制干扰晶体正常取向，从而构建“晶核阻断-生长面钝化-三维张力弥散”的立体干预模型。这些纳米粒子因表面自由能高，易聚集于晶核形成界面，削弱晶格连续生长路径的各向同性，从而延缓结晶速率。部分功能性粒子还可通过静电屏蔽、配位络合或表面活性调节，破坏晶体形成的临界自由能阈值，诱发晶体结构畸变或诱导非晶相生成^[2]。此外，添加剂的粒径分布与形貌异质性决定其在乳化体系中的弥散程度与干预效力。

2 存储环境适应性研究

2.1 温湿度循环下的奥斯特瓦尔德熟化抑制路径

乳化炸药在温湿度周期性扰动环境中极易发生奥斯特瓦尔德熟化现象，其核心机制为小晶体向大晶体的扩散性转移所诱发的微结构重构。该过程由温度激发的分子振幅增强与湿度诱导的水分子介入协同推动，最终导致界面能重排与结构相分离。抑制路径需引入粒径分布调控与界面能障构建机制，通过构建双峰分布的乳化颗粒体系实现晶体间扩散梯度的钝化。同时，可引入具有低扩散系数的稳定剂包覆层，使粒子间界面迁移路径转化为高耗能通道，从而提升熟化阻力。在材料改性维度，构建高度交联结构或刚性有机骨架介质，可实现对晶体再聚合行为的结构性压缩^[3]。

2.2 振动载荷引发的微裂纹扩展阈值分析

在长时静置与运输相结合的工况中，乳化炸药常处于低幅但高频的振动扰动状态，微裂纹的潜在生长成为结构失稳的核心隐患。微裂纹扩展的启动并非取决于单一能量输入，而是与乳胶膜局部应力集中的临界应变密度直接相关。通过建立振动响应频谱与应力集中因子联动模型，明确振动在特定频率区间会诱发微观疲劳裂纹的周期性积累效应。当外部激振频率接近乳胶结构的次谐共振频段时，应力场呈现指数型增长，易导致内部能耗阈值突破，引发裂纹链式演化。微裂纹路径受膜层弹性模量分布、界面键合能以及缺

陷初始几何形态影响，若未形成有效耗散机制，裂纹将在短周期内从萌生跃迁至扩展态。模型需引入裂尖屏蔽区扩展系数与应力重分布因子，构建多点干预机制，实现对微裂破坏模式的前瞻性干预与路径阻断。

3 智能安全监测系统设计

3.1 多参数（温度/压力/形变）光纤传感网络

在复杂环境下长期贮运的乳化炸药系统中，传统点位式监测手段易被局部失效、覆盖死角与响应迟滞所限制。构建多参数光纤传感网络，依托分布式布拉格光栅（FBG）技术，将温度、压力、形变等关键指标以实时全域分辨方式进行同步采集。光纤系统本身具备电磁抗扰、柔性嵌入与微型化部署优势，可实现对罐体表面、内部结构乃至周边环境的同步感知。在核心节点设定“应变-温升-气压”三联触发规则，形成动态联锁预警机制，提升响应灵敏度。传感数据以毫米尺度空间分布、秒级时间解析输出，构建三维应力场演化图谱，捕捉爆炸敏感区段的微结构异常信号^[4]。光纤传感网络可被部署于静态仓储系统或移动运输容器，具备可嵌入性、自诊断能力与跨系统适配性能，是构建多维安全闭环的核心感知模块。

3.2 基于机器学习的相变早期预警算法

乳化炸药在高温或高湿条件下常表现出复杂的相变行为，包含乳状液体解构、晶体析出与相界面重构等微观过程。传统阈值预警方法难以精准刻画这些非线性演化路径。基于机器学习框架构建相变预警模型，以卷积神经网络（CNN）与长短时记忆网络（LSTM）作为核心架构，处理来自传感网络的多维时间序列数据。

模型训练阶段引入异常点放大机制与扰动可变权重函数，使模型能在微幅参数波动中辨别潜在结构失稳倾向。算法输出不以单一指标超限为准，而采用联合分布偏移与多参数协同偏差分析，生成风险热力分布图，标注高敏感区与潜在破坏链起点。模型具备自学习能力，可根据实时数据流进行权重自适应调整，保证其在环境扰动条件变化后的持续有效性，为贮运系统提供可前移的主动干预时间窗口。

4 运输动力学安全理论

4.1 车辆振动频谱与材料共振频率匹配分析

乳化炸药在运输过程中的振动响应具有高度复杂性，车辆底盘结构、路面等级、负载重心与轮轴布置等变量均可引发不同频率成分的激发谱。若炸药包装系统的材料固有频率与外部振动频谱发生耦合，即使是低幅度扰动也可能在频域共振中快速积累应变能，诱发结构应力集中。为规避共振激发路径，需构建材料模态响应数据库，通过频率响应函数（FRF）映射

动态特征，识别结构敏感区的动态窗口^[5]。该分析体系引入耦合态振型识别与频谱滤波机制，使运输容器在设计阶段即避开常见公路、铁路运输频段的激发带；通过阻尼系数调控与层间隔离界面配置，打散振动传导链路，降低高能频率对结构核心区的穿透概率。

4.2 碰撞能量吸收的梯度材料设计准则

突发碰撞事件对乳化炸药运输系统构成结构性破坏风险，其动能释放过程呈现高度瞬态化、非均匀性及多轴耦合冲击特征。传统刚性缓冲结构无法对冲击能进行渐进耗散，易在瞬间发生整体脆断。梯度材料结构在此背景下提出，以空间应变分布为设计核心，通过弹性模量、密度及微观结构的阶梯式递变，实现能量波的多级吸收与分布性削减。

该类材料构成通常结合多孔基质、蜂窝单元与形变导向微结构，构建出“高刚区-过渡区-低刚区”协同吸能路径。在撞击初段，高模量区承接初始能量；在次级阶段，中间过渡区域诱导应力分布展宽，并启动非线性压缩行为；末端低模量层延缓能量峰值，完成系统缓释。

5 全生命周期安全管理

5.1 存储-运输参数动态优化决策树

乳化炸药的安全属性在其全生命周期内受多重变量联动影响，需构建具备实时响应能力的动态决策架构，以匹配环境扰动与状态转移特征。决策树设计以

“节点-路径-反馈”三层嵌套结构展开，每一节点对应一个关键控制变量（如温度梯度、振动频率、湿度波动），路径则反映变量间的交互权重与状态转移规则。系统可融合历史运行数据、环境预测模型与材料演化数据库，通过贝叶斯修正机制动态调节参数优先级与权重，提升结构响应的精度与前瞻性。

在执行层面，决策树输出形式为多方案集群，按风险等级与响应时延排序，形成由安全冗余率驱动的路径选择体系，实现多路径预判与自动切换。此模型强调的是“参数-状态-行为”的链式映射逻辑，适用于常态、过载、极端三类情境中的安全策略生成与调度。

5.2 老化过程的分子降解预测模型

乳化炸药在长期贮存或重复运输过程中，其分子结构易受到温度扰动、界面氧化与乳胶膜疲劳的复合影响，诱发主链断裂、侧链迁移与界面微重构等多重老化路径。为了实现对这一不可逆过程的精准掌控，需构建面向分子尺度的动态降解预测模型。模型以量子力学反应轨道理论为底层支撑，结合分子动力学仿真与反应活性中心识别算法，追踪分子骨架的稳定性演变与断裂概率迁移。

其中引入动态关联矩阵结构，对热激、光解、水合等外源因子的作用路径进行时域分层，输出降解速率映射函数与残余稳定指数曲线^[6]。在预测端，模型可联动实时传感输入，生成分子完整性评估图谱，并反馈至包装更新与运输周期再设计机制中，实现对老化窗口的结构性压缩与风险临界点前移。

6 结语

乳化炸药的存储与运输安全问题是一个涉及多维结构耦合、多场信息响应与多阶段行为干预的系统性工程，其最本质的安全核心在于建立跨尺度、跨系统的协同调控体系。本文从材料微结构出发，提出了以分子动力学调控油水界面稳定性为基础，辅以纳米尺度抑晶因子的多点分布干预策略，构建了具备高界面张力保持力与抑制熟化能力的乳化基质体系。在环境响应机制方面，围绕温湿度循环、振动扰动与气体累积等诱发路径，建立热-力-气多耦合演化模型，精确界定环境扰动下的相变临界条件与微裂演化阈值。

基于这些预测机制，结合高密度光纤传感矩阵与算法预警模块构建智能监测系统，具备高频率、高灵敏度与现场部署能力，并通过边缘计算平台实现本地化数据解析与风险等级动态分级响应。在运输环节，本文以车辆动力频谱匹配与材料共振规避为前提，提出多层次缓冲材料与温控防护结构的集成方案，对极端气候下的包装性能构建稳定防护冗余层。

最终，将存储-运输全周期安全指标嵌入动态决策树结构，辅以分子老化演化路径与事故链断裂模型，实现自适应参数调整与事故过程闭环阻断。以上策略共同指向一个高度集成的乳化炸药安全管理系统，强调由材料层向信息层、再向决策控制层的连续协同响应机制，为复杂应用场景下的炸药安全运行提供理论支持与技术路径。

参考文献：

- [1] 黄志林. 乳化炸药在生产和运输方面存在的问题及对策[J]. 东方企业文化, 2013(11):116.
- [2] 赵国刚. 乳化炸药的生产安全研究与过程管理[J]. 企业科技与发展, 2012(12):32-33.
- [3] 张鑫, 王明. 乳化炸药现场混装设备安全联锁保护功能探讨[J]. 机电信息, 2019(26):38-39.
- [4] 罗彦舟, 李晖. 浅谈安全连锁在乳化炸药生产中的应用[J]. 石化技术, 2017, 24(12):177.
- [5] 朱火平, 郭佳甲. 浅谈乳化炸药生产工艺及其安全管理[J]. 石化技术, 2017, 24(12):179.
- [6] 李向宇. 浅析如何提高乳化炸药生产线安全检查与故障诊断[J]. 广东化工, 2016, 43(03):104+107.