

# 铵油炸药中不同还原剂的应用效果与经济性评估

王建英 李玉清 焦坤鹏 (国家能源集团准能集团炸药厂, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

**摘要:** 本研究聚焦于降低多孔粒状铵油炸药对柴油的依赖, 选取废矿物油、煤基纳米碳氢燃料和活性添加剂作为替代还原剂, 通过系统配比实验, 综合评估其爆破性能与经济性。在维持接近零氧平衡的配方基础上, 对各组样品的密度、爆速等关键指标进行测试, 并结合现行市场价格核算单位成本。结果表明, 不同替代方案在能量释放效率与成本控制方面表现各异: 部分组合在不牺牲爆破效果的前提下显著降低原料支出, 展现出良好的应用潜力, 为工业炸药的配方优化与绿色升级提供了技术支撑与实践路径。

**关键词:** 铵油炸药; 还原剂替代; 爆速性能; 经济性分析; 煤基纳米碳氢燃料; 废矿物油

**中图分类号:** TQ560.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0055-03

## Application Effectiveness and Economic Evaluation of Different Reducing Agents in ANFO Explosives

Wang Jianying, Li Yuqing, Jiao Kunpeng (Explosives Plant, CHN Energy Zhuneng Group, Ordos Inner Mongolia 010300, China)

**Abstract:** This study focuses on reducing the reliance of porous granular ammonium nitrate fuel oil (ANFO) explosives on diesel. It selects waste mineral oil, coal-based nano-carbon hydrogen fuel, and active additives as alternative reducing agents. Through systematic proportional experiments, the blasting performance and economic viability of these alternatives are comprehensively evaluated. While maintaining formulations close to zero oxygen balance, key indicators such as density and detonation velocity of each sample group are tested, and unit costs are calculated based on current market prices. The results show that different alternative schemes exhibit varying performance in terms of energy release efficiency and cost control. Some combinations significantly reduce raw material expenses without compromising blasting effectiveness, demonstrating strong application potential. This study provides technical support and practical pathways for optimizing the formulation and promoting the green upgrading of industrial explosives.

**Keywords:** ANFO explosives; alternative reducing agents; detonation velocity performance; economic analysis; coal-based nano-carbon hydrogen fuel; waste mineral oil

### 1 研究背景

民爆行业素有“工业基础的基础, 能源行业的能源”之称。作为全球最大的煤炭消费国, 中国在煤炭开采——尤其是露天煤矿作业中, 广泛采用炸药爆破技术。该技术被公认为当前世界上最经济、高效的采矿方式, 而炸药的稳定生产与应用, 对保障国家能源安全、支撑能源稳定供应具有不可替代的作用。在露天煤矿开采中, 主要使用铵油炸药和乳化炸药两大类。其中, 多孔粒状铵油炸药因其成本低廉、原料易得、生产工艺简单, 且成品不具备雷管感度(即安全性高)等优势, 已逐步成为现场混装炸药的主流选择, 并广泛应用于露天爆破作业。据行业统计数据, 2024年全国工业炸药总产量为449.37万t, 其中多孔粒状铵油炸药产量达104.04万t, 同比增长0.89%, 占工业炸药总产量的23.15%。这一占比充分体现了其在民爆产品结构中的重要地位。因此, 深入研究多孔粒状铵油炸药的关键组分及其优化路径, 对于降低露天煤矿开采成本、提升爆破效率、强化安全管理, 以及推动民爆行业高质量发展, 具有显著的现实意义和战略

价值。

### 2 目前煤矿使用炸药的基本现状及存在的问题

多孔粒状铵油炸药系由硝酸铵与柴油经机械混合制备而成。该类炸药在煤矿开采工程中得到了广泛应用。具体生产流程如图1:

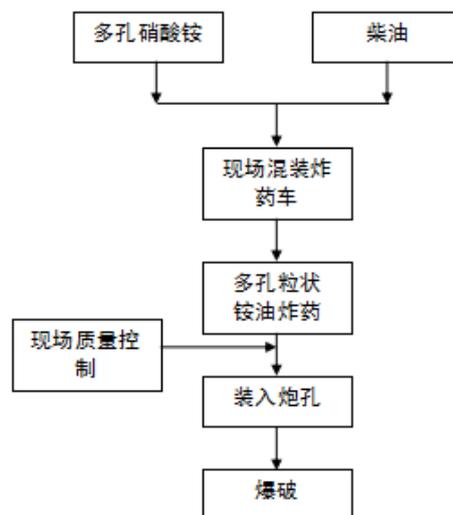


图1 多孔粒状铵油炸药生产工艺流程

柴油作为铵油炸药的关键组分,虽然在配方中占比通常不超过5%,但其成本却占到炸药总成本的30%以上。根据相关统计数据,2024年我国原油进口量约为55341.54万t,进口金额达3248亿美元,连续多年稳居全球第一大原油进口国。在此背景下,研发一种可有效替代柴油的还原剂用于铵油炸药生产,不仅有助于降低民爆行业的原料对外依存度,更对保障国家能源安全具有积极意义。当前,民爆行业面临产能结构性过剩的挑战,企业间竞争日趋激烈。为实现降本增效、提升核心竞争力,亟需开发一种兼具质量稳定性高、安全环保性能优且能有效替代柴油的新型燃料组分,用于生产多功能、高性能的现场混装铵油炸药。

以国内某大型能源集团下属的露天煤矿为例,其岩石与煤炭破碎主要依赖工程爆破,年爆破方量约3.7亿m<sup>3</sup>,年炸药需求量近10万t,其中铵油炸药约8万t,乳化炸药约2万t。经测算,穿孔与爆破环节占煤炭开采总成本的24%,在各工序中位列第二;而炸药、柴油、轮胎等关键物资合计构成露天开采总成本的78%。其中,炸药消耗是爆破成本中最大的直接支出项。因此,推动柴油替代技术的研发与应用,不仅可显著降低炸药生产成本,还将有效缓解能源供应链风险,为民爆行业绿色转型与高质量发展提供有力支撑。

### 3 探索还原剂使用的基本思路

通常而言,当炸药配方达到零氧平衡或接近零氧平衡时,其组分在爆炸反应中能够实现充分氧化还原,主要生成物为水(H<sub>2</sub>O)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和氮气(N<sub>2</sub>)。在此状态下,炸药的释放能量最为完全,做功能力达到最大;同时,几乎不产生一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)等有毒有害气体,显著降低对环境和作业人员的危害。因此,零氧平衡不仅是衡量炸药能量利用效率的重要指标,也是实现高效、清洁爆破的关键技术目标。

### 4 实验设计

为确保本次试验取得实效,并结合近年来民爆行业在绿色低碳炸药领域的研究趋势,本试验选取废矿物油、煤粉、煤基纳米碳氢燃料及活性添加剂等作为潜在还原剂,用于部分替代传统柴油,开展多组对比实验。相关原材料的基本情况如下:

#### 4.1 氧化剂

多孔粒装硝酸铵:分子式NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>;含水量<0.3wt%,堆积密度为0.73~0.86g/cm<sup>3</sup>,吸油率≥7wt%,以个数计粒径范围为0.50~2.50mm的粒子的粒度分布≥90%,以干基计硝酸铵含量≥99.5wt%。

#### 4.2 还原剂

①废矿物油的主要成分为烷烃、多环芳烃、烯烃

等烃类有机物。在露天矿山大型设备的使用过程中,高温、高压、高转速等机械摩擦、氧化分解使得矿物油中的各种添加剂失去作用,但其本身的润滑基础油的理化性质基本没有变化。②活性添加剂:是一种用来提高多孔粒状铵油炸药爆炸性能和降低生产成本的液体混合物,它由多种表面活性剂及高热值物质组成。能量提高剂具有闪点高、无毒、无爆炸性和使用安全等特点。③煤基纳米碳氢燃料是煤、水和少量添加剂经先进的纳米化处理工艺制成的一种基本颗粒粒度为纳米级、具有较高表面活性的液态煤基特种燃料,是一种新型、高效、清洁的环保燃料,具有原料热值低、燃料固含低、点火温度低、燃料热值高“三低一高”的特点。

根据上述还原剂特性,设计以下不同的组别进行实验,其中D组为对照组,每组的具体情况见表1。

表1 不同还原剂代替柴油的分类

组别	多孔粒状硝酸铵	还原剂种类及含量			
		柴油	废矿物油	煤基纳米碳氢添加剂	活性添加剂
A	94%	3.5%	2.5%	—	—
B	89%	1%	—	10%	—
C	94%	4%	—	—	2%
D	94%	6%	—	—	—

按照表1的配方,制作25kg对应组别的多孔粒状铵油炸药的研发与应用,按照不同类别的组分进行配比。①选取各类原材料。②将准备好的材料进行混合,顺序:硝酸铵→柴油→其他原材料。③将混合好的小样进行装药。配置成功的样品如图2所示。



图2 从左到右依次为A、B、C、D配方设计出的炸药外观

### 4.3 检测流程

#### 4.3.1 测试前准备

将一段公称外径110mm,壁厚4.2mm~5.3mm,长1000mm,PVC管外壁距一端100mm(N)和500mm(M)处,各打一对直径为2mm穿孔,作为安装靶线用的穿线孔。各对穿线孔的孔心连线应穿过并垂直塑料管的轴线。取一段长60cm的漆包线,对折后并行缠绕,缠绕部分不小于5cm,将漆包线头漆皮

打磨掉备用。将被测试样品均匀的装入 PVC 桶内, 运送到爆破试验场待检测区域等待测试。

#### 4.3.2 连线起爆

将 1 号、2 号爆破脚线与穿过 PVC 桶上 M、N 两孔的把线连接后接通爆速仪电源。分别连接 1 号、2 号爆破脚线的两根线路测试线路是否畅通。无故障将把线与爆破脚线用电器胶带固定。

使用手持机扫描雷管二维码录入雷管信息后将雷管插入起爆具起爆孔。将起爆具插入被测样品内 2/3, 连接数码雷管与起爆线后人员撤离测试区域。

设定爆速仪使其进入测试状态待机, 下载雷管起爆密码, 将手持机与起爆线连接, 检测网络畅通后, 为雷管充电。充电完成后, 满足起爆要求后按下两个起爆按钮, 起爆炸药。设置爆速仪, 保存或打印测试数据。

#### 4.3.3 数据处理

爆速值计算方法为:  $D_i=L/t_i \times 10^3$

式中:  $D_i$ —第  $i$  次试验爆速 (I 靶至 II 靶精确至整数), m/s;  $L$ —测量段长度 (I 靶至 II 靶距离), mm;  $t_i$ —第  $i$  次试验测量 (I 靶至 II 靶电信号) 时间的数值 (精确至 0.1), us。

平均爆速计算:  $D=(D_1+D_2+D_3)/3$

式中:  $D$ —平均爆速的数值 (精确至两位有效数值), m/s;  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  为三发平行样所测爆速值。

爆速极差值计算:  $R_D=D_{\max}-D_{\min}$

式中:  $R_D$ —爆速极差的数值 (精确至整数), m/s;  $D_{\max}$ —三个爆速值中最大值的数值, m/s;  $D_{\min}$ —三个爆速值中最小值的数值, m/s。其中爆速极差值  $R_D$  应不大于 300m/s。

#### 4.3.4 正异常数据判定及补测

当爆速极差值小于 300m/s 时, 判定三次试验数据有效。当 1 发数据与另外两发爆速极差值大于 300m/s 时, 补充测试一发, 取三个爆速相近的值计算爆速。当任意两发样品爆速极差值大于 300m/s 时, 三发全部为无效数据, 重新进行检测。

### 5 应用效果和经济效益分析

#### 5.1 应用效果分析

照上述流程, 测得相关爆速数据如表 2。

以废矿物油部分替代柴油所制备的铵油炸药, 其爆速与对照组基本持平, 表明该替代方案在保持爆破性能方面具有可行性; 而采用活性添加剂和煤基纳米碳氢燃料作为还原剂的试验组, 爆速分别较对照组提升了约 10% 和 12%, 显示出显著的性能增强效果。

#### 5.2 经济性评价

以 2025 年第三季度为例: 柴油: 6966 元/t, 多孔粒状硝酸铵: 2039 元/t, 多孔粒状铵油炸药每吨的成本为:  $(0.94 \times 2039)+(0.06 \times 6966)=2334.62$  元/t。

使用废矿物油的成本计算: 废矿物油价格约 1000 元/t, 因此吨成本  $= (0.94 \times 2039)+(0.035 \times 6966)+(0.025 \times 3000)=2185.47$  元/t。

使用煤基纳米碳氢燃料的成本计算: 煤基纳米碳氢添加剂的成本约为 2800 元/t。炸药成本  $= (0.89 \times 2039)+(0.01 \times 6966)+(0.10 \times 2800)=2164.37$  元/t。

使用活性添加剂的成本计算: 活性添加剂 6716.99 元/t, 炸药厂成本  $= (0.94 \times 2039)+(0.04 \times 6966)+(0.02 \times 6716.99)=2329.64$  元/t。

### 6 结论

废矿物油在保持爆破性能基本不变的同时, 显著降低原料成本, 提供了废矿物油的依法依规低碳高效的处理渠道。煤基纳米碳氢燃料在降低成本的同时, 爆速提升 12%, 综合性能最优。活性添加剂对爆速提升明显但经济性较差。研究表明, 合理选用替代还原剂可在保障爆破效率的前提下有效降本增效, 助力民爆行业绿色低碳转型。

#### 参考文献:

- [1] 云庆夏, 杨万根, 雷化南. 国外矿用工业炸药 [M]. 北京: 冶金出版社, 1975.
- [2] 宋日. 废矿物油在铵油炸药中的应用 [J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 51-54.
- [3] 汪泉. 微米级煤粉水浊液制备粒状铵油炸药的试验研究 [J]. 火炸药学报, 2024, 47(11): 1016-1021.
- [4] 李柯, 赵永平, 王肇中. 新型油相材料在现场混装铵油炸药生产中的应用 [J]. 工程爆破, 2024, 30(4): 118-121.
- [5] 汪旭光. 乳化炸药 [M]. 北京: 冶金出版社, 2008.

表 2 不同种类还原剂代替部分柴油生产的炸药爆速对比表

序号	组别	样品数量	密度 g/cm <sup>3</sup>	平均爆速 m/s
1	A (废矿物油)	3	0.86	2834
2	B (煤基纳米碳氢添加剂)	3	0.81	3227
3	C (活性添加剂)	3	0.82	3165
4	D (对比组)	3	0.86	2862