

井下矿用低黏度可泵送乳化炸药：制备、性能与推广应用

熊 波

湖南南岭衡阳民用爆破服务有限公司，湖南 衡阳 421600

[摘要]为了解决井下乳化炸药泵送装药时黏度大、低温流动性差、上向孔返药量大的问题，提出一种低黏度可泵送乳化炸药配方及制备工艺。通过改变油水比、加入复配乳化剂和降黏剂、采用延迟敏化工艺，使乳胶基质在 25℃时的动力黏度不大于 2200mPa s，在 0℃时的动力黏度不大于 7500mPa s。从检测结果可知该炸药爆速大于等于 4300m/s，猛度不小于 13mm，储存期为 30d，泵送管路压力不大于 1.2MPa。井下试验中装药速度比人工药卷装药快 60%以上，上向孔返药量控制在 5%以内。从原材料供应、设备维护、人员培训、成本测算四个方面给出可操作的推广条件和分阶段实施办法。

[关键词]低黏度；乳化炸药；可泵送；井下爆破

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20476

中图分类号: TD235.2

文献标识码: A

Low Viscosity Pumpable Emulsion Explosives for Underground Mining: Preparation, Performance, and Promotion and Application

XIONG Bo

Hunan Nanling Hengyang Civil Blasting Service Co., Ltd., Hengyang, Hunan, 421600, China

Abstract: In order to solve the problems of high viscosity, poor low-temperature flowability, and large amount of backflow from the upward hole when pumping emulsion explosives underground, a low viscosity pumpable emulsion explosive formula and preparation process are proposed. By changing the oil-water ratio, adding complex emulsifiers and viscosity reducers, and using delayed sensitization technology, the dynamic viscosity of the latex matrix at 25 °C is not greater than 2,200mPa s, and at 0 °C it is not greater than 7,500mPa s. According to the test results, the explosive has a detonation velocity of 4300m/s or greater, a strength of not less than 13mm, a storage period of 30 days, and a pumping pipeline pressure of not more than 1.2MPa. In the underground experiment, the loading speed is over 60% faster than that of the artificial medicine roll, and the amount of medicine returned to the upward hole is controlled within 5%. Provide feasible promotion conditions and phased implementation methods from four aspects: raw material supply, equipment maintenance, personnel training and cost estimation.

Keywords: low viscosity; emulsion explosive; pumpable; underground blasting

引言

井下矿山爆破作业由原来的现场混装、机械化装药向现在的现场混装、机械化装药发展。乳化炸药由于抗水性好、安全，所以被广泛用于井下爆破。但是常规乳化炸药黏度偏高，在低温时流动性变差，泵送阻力增大，容易堵塞管路。上向孔、倾斜孔装药时，高黏度基质会在孔口堆积或者向下流动，造成装药不实、浪费。一些矿山为了适应泵送的要求而降低乳化炸药的黏度，但是单纯的降低黏度会造成储存稳定性变差、爆轰性能波动等问题。怎样在保证爆炸性能和储存期的前提下达到低黏度、可泵送的目的，是配方与工艺设计要解决的主要问题。

1 低黏度可泵送乳化炸药配方与制备工艺

低黏度可泵送乳化炸药由水相、油相、乳化剂、降黏剂和敏化剂组成。水相以硝酸铵为主，加入硝酸钠来降低析晶点。水相质量分数控制在 83%~86%，硝酸铵质量分数为 75%~78%，硝酸钠质量分数为 8%~10%，水含量为 12%~14%。适当提高水含量可以明显降低乳胶基质的黏度，但是水含量过高会使炸药的爆热和爆速降低。经过配方筛选，水含量取 13%时黏度和爆轰性能达到较好的平衡。

油相用低黏度矿物油和石蜡混合而成。矿物油 40℃运动黏度不大于 15mm²/s，石蜡质量分数占油相的 10%~

15%。油相总质量分数控制在 4%~6%。油相含量过低会造成乳胶粒子界面膜变薄, 储存时容易破乳; 油相含量过高会增大基质黏度, 不利于泵送。乳化剂选用失水山梨醇单油酸酯和聚异丁烯丁二酰亚胺复配, 二者质量比为 2:1, 总用量占油相质量的 25%~30%。该复配体系用较低的用量可以形成稳定的油包水结构, 防止乳化剂过多造成体系变稠。

为了降低黏度, 在配方中加入脂肪酸甲酯做降黏剂, 质量分数为 0.3%~0.5%。脂肪酸甲酯在油水界面可以形成润滑层, 减小乳胶粒子之间的摩擦阻力, 又不会破坏界面膜的完整性。试验表明, 加入 0.4%脂肪酸甲酯后, 25℃动力黏度由 2800mPa s 降至 2100mPa s, 0℃动力黏度由 9500mPa s 降至 7200mPa s。

制备工艺分为水相配制、油相配制、乳化、敏化四步。水相配制时, 将硝酸铵、硝酸钠、水按比例加入溶解罐, 加热到 95℃~105℃, 搅拌至完全溶解, 用硝酸或氨水调节 pH 值为 4.0~4.5。弱酸性环境有利于抑制亚硝酸钠的过快分解, 保证延迟敏化的效果。水相保温在 90℃以上时使用^[1]。油相配制时, 将矿物油、石蜡、乳化剂、降黏剂加入油相罐中, 加热到 75℃~85℃, 搅拌均匀透明, 保温待用。

乳化用连续乳化器, 水相和油相按质量比 93:7 同时进入乳化器。乳化器为定转子结构, 剪切转速控制在 1200 r/min 至 1800 r/min, 乳化温度 85℃至 95℃。出料乳胶基质应为均匀细腻的膏状, 颜色乳白, 无游离水析出。乳化器出料口装有冷却夹套, 使基质温度在进入敏化段之前降到 70℃以下, 防止高温造成亚硝酸钠过早分解。敏化用亚硝酸钠化学敏化。井下现场混装时, 用计量泵将质量分数 20%的亚硝酸钠溶液注入装药管前端的静态混合器, 加入量为基质质量的 0.15%~0.25%。发泡反应在基质进入炮孔后 3min 至 5min 内完成, 密度由 1.35g/cm³ 降至 0.95g/cm³ 至 1.10g/cm³。延迟敏化使基质在管路中保持低黏度, 进入炮孔后变稠定型, 降低泵送阻力, 减少上向孔返药。

2 主要性能指标与检测方法

2.1 黏度、低温流动性与泵送阻力

黏度属于衡量可泵送性的重要指标。用旋转黏度计测定 25℃、0℃的动力黏度。取乳胶基质 400mL, 放入恒温水浴中保温 30min 后测定。转子转速设定为 12r/min, 读数稳定后记录。25℃动力黏度应不大于 2200mPa s, 0℃动力黏度应不大于 7500mPa s。

低温流动性用倾斜板试验来评价。将乳胶基质放在倾斜 30°的不锈钢板上, 在 0℃下保持 1h, 测得基质沿板面流动的距离。流动距离大于 200mm 视为合格。该试验模拟的是井下低温环境下基质在管路、炮孔内流动的能力。低温流动性差会使泵送压力增大, 装药不连续。

泵送阻力在模拟管路中测得。管路内径 25mm, 长度 20m, 末端接背压阀, 背压设定 0.3MPa。用螺杆泵以 15L/min 流量泵送乳胶基质, 记录泵出口压力。管路压力应不大于 1.2MPa。压力大于 1.5MPa 时要检查配方黏度、管路内壁粗糙度或者接头缩径。现场泵送前可用清水做管路阻力试验, 来判定管路状况。

2.2 爆速、猛度与储存稳定性

爆速用测时仪法测定。将敏化的炸药装入内径 32mm、长度 300mm 的钢管, 两端装有电离探针, 用 8 号工业雷管起爆。爆速应不低于 4300m/s。每组测定 3 次, 取平均值。猛度用铅柱压缩法测定。铅柱直径 40mm、高度 60mm, 药量 50g, 放置在厚度 20mm 钢板上起爆。猛度值应不小于 13mm。殉爆距离用药卷法测定。主发药卷、受发药卷直径均为 32mm, 长度 200mm, 轴线对齐, 在沙地上起爆。殉爆距离不小于 3cm 为合格。储存稳定性用常温储存、高低温循环试验来评价。常温保存 30 天后, 重新测定爆速和猛度, 性能下降幅度不应大于初始值的 8%。高低温循环条件为-20℃~40℃, 循环 10 次, 每次 8h。循环后观察基质是否有破乳、析晶、分层现象。表 1 给出了低黏度可泵送乳化炸药主要性能指标及检测方法。

从表 1 可以看出各项指标都是根据井下装药实际需要来确定的。黏度指标既考虑泵送性又考虑炮孔内留存性, 爆速、猛度指标满足中硬岩爆破要求, 储存稳定性指标考虑井下周转时间一般不超过 30d。

表 1 低黏度可泵送乳化炸药主要性能指标及检测方法

检测项目	指标要求	检测方法
25℃动力黏度	不大于 2200mPa s	旋转黏度计法
0℃动力黏度	不大于 7500mPa s	旋转黏度计法
低温流动距离	不小于 200mm	倾斜板法, 0℃保温 1h
泵送管路压力	不大于 1.2MPa	内径 25mm, 长度 20m 模拟管路
爆速	不小于 4300m/s	测时仪法, 钢管约束
猛度	不小于 13mm	铅柱压缩法
殉爆距离	不小于 3cm	药卷法, 主发与受发药卷直径 32mm
储存期	不小于 30d	常温储存后复测爆速、猛度

3 井下现场混装与爆破应用

3.1 泵送设备与管路配置

井下泵送装药系统是由泵送车、输药管、装药管三部分组成的。泵送车用防爆柴油机驱动螺杆泵,泵送能力为20L/min~40L/min,额定出口压力为2.5MPa。螺杆泵定子用耐油橡胶制成,转子表面喷镀铬,减少乳胶基质的黏附。泵送车应设置在距作业面不大于60m处,防止管路过长造成压力损失过大。

输药管采用内径25mm或32mm的防静电软管,壁厚不小于5mm,耐压不低于4MPa。管路连接用快装接头,接头处设有防脱扣装置。装药管前端安装背压阀,背压设为0.2MPa~0.4MPa,防止炸药在孔口自由流淌。管路弯曲半径不小于管径的10倍,铺设时不能有急弯、压折。

每次装药前用少量清水润滑管路,装药后用压缩空气吹扫。吹扫压力不高于0.3MPa,残留药量不超过0.5kg。对管路内壁定期检查有磨损、龟裂、接头松动的应予更换。冬季施工时,管路要保温。

3.2 装药速度与密度控制

装药速度由泵送流量、炮孔体积来决定。该铜矿掘进工作面炮孔直径为45mm,深度为3m,单孔装药量约4.5kg。泵送流量15L/min时,单孔装药时间约25s至30s。一个循环30个炮孔,装药时间大约为15min,比人工药卷装药缩短了60%以上。装药工由4人减少到2人,劳动强度明显降低。

装药密度用敏化发泡程度来控制。调整亚硝酸钠溶液加入量,使敏化后炸药密度稳定在 $0.95\text{g/cm}^3\sim 1.10\text{g/cm}^3$ 。密度过低会减小爆轰压力,密度过高会增大起爆难度。每班装药前应做一次密度标定,取100mL敏化后的炸药称重,求得密度。当发现密度偏差大于 $\pm 0.05\text{g/cm}^3$ 时,调节亚硝酸钠的流量。

操作时操作人员将装药管慢慢插入孔底,随装药随退管。退管速度控制在 $0.1\text{m/s}\sim 0.2\text{m/s}$,使炸药连续充满孔腔。装药至孔口剩余0.3m时停止,留出堵塞段长度。每孔装药量用流量计计量,误差不大于 $\pm 5\%$ 。装药完毕后由专人检查孔内炸药是否全部充满,发现空段及时补装。

3.3 上向孔、倾斜孔返药控制

上向孔、倾斜孔装药的主要问题就是炸药在重力的作用下向下流动。经过延迟敏化处理的基质进入炮孔时黏度较低,在3min~5min内就能达到发泡增稠的效果,黏度迅速上升,可以有效地防止返药^[2]。为了进一步降低返药量,在装药管前端加装伞形挡药器。挡药器直径稍小于炮

孔直径,装药时撑开形成临时封堵,退管时挡药器随管退出。

对于倾角大于 60° 的上向孔,在装药后立即用炮泥堵住。堵塞长度不小于0.3m。炮泥宜选用快硬型材料,3min内产生一定强度。在现场试验中,经过上述措施后,上向孔返药量控制在5%以下,炮孔装药充实度大于95%。与不使用挡药器的普通管口相比,返药量由原来的18%降低到现在的4%以下。

倾斜孔装药时退管速度控制在 0.1m/s 以内。倾角为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 的炮孔,在装药到孔深的一半的时候暂停10s~15s,等下部炸药变稠再继续装药,可以减少向下流淌。

3.4 现场安全操作与异常处置

泵送装药作业必须遵守爆破安全规程。装药前要切断作业面电源,检查瓦斯浓度。乳胶基质温度不能超过 70°C 。泵送管路应有静电接地,接地电阻不大于 10Ω 。操作人员着防静电服和绝缘鞋。

异常情况有管路堵塞、泵压突然上升、泄漏和敏化异常。当泵压大于1.8MPa时立即停止泵,关闭背压阀,从末端逐段检查管路。严禁带压下拆卸接头。发生泄漏时先停泵泄压,用惰性材料吸附漏药,清理干净后再进行作业。敏化异常指装药后密度偏高或者偏低,应立即调节亚硝酸钠流量,对已装炮孔进行补装或者清孔。每次装药结束后,应做好泵送压力、流量、装药量及异常情况的记录,形成当班记录。

4 推广应用条件与保障措施

4.1 原材料供应与质量验收

低黏度可泵送乳化炸药对原材料质量要求高。硝酸铵应选用多孔粒状或者结晶状的工业品,纯度不低于99.5%,水分不大于0.5%。硝酸钠的纯度不低于98.5%。矿物油 40°C 运动黏度不大于 $15\text{mm}^2/\text{s}$,闪点不低于 160°C 。乳化剂、降黏剂每批进厂应检验酸值、羟值、外观,酸值不大于 2mg KOH/g 。亚硝酸钠应该使用分析纯或者化学纯试剂。

原材料验收为批批检验。每批硝酸铵、硝酸钠和油相材料取样送检,检测项目有纯度、水分、黏度、闪点。检验合格后才能入库。库存周期不宜超过30d。乳化剂、降黏剂要密封保存,防潮、防酸败。

4.2 设备维护与计量校准

泵送设备主要的部件就是螺杆泵的定子、转子。定子为橡胶材质,长期接触油相材料会溶胀,应每20个作业班次检查一次^[3]。发现定子内径磨损超过2mm或表面龟裂时更换。泵出口压力表、流量计、温度传感器每季度校

准一次。流量计校准用称重法,误差不大于 $\pm 2\%$ 。管路及接头每班作业前检查外观,发现裂纹、鼓包、接头松动的停止使用。

建立设备台账,记录每一台泵的运行小时数、维修项目及更换的备件。备用泵不少于1台,备用定子、转子、密封件的库存量应能满足30d的使用量。每月做一次管路阻力试验,当压力异常升高时查找原因。

4.3 人员培训与操作考核

泵送装药作业人员必须有40学时以上理论和操作培训。培训内容为乳化炸药基本性能、泵送设备结构原理、管路铺设要求、异常处置程序、爆破安全规程。考核分理论考试和现场实操两部分。理论考试内容有配方基本知识、压力控制、返药控制、安全规定^[4]。现场实操要求操作人员独立完成一套炮孔的装药作业,装药密度、装药量、返药量均符合要求。

实行持证上岗制度。操作人员每一年进行一次复训,复训不合格者不得上岗。班组长、值班技术人员应具备常见故障的判断、处理能力。每季度进行一次应急演练,模拟管路堵塞、泄漏的场景来提高现场处置能力。

4.4 成本测算与分阶段推广办法

低黏度可泵送乳化炸药成本比常规药卷有所变化。药卷装药人工费高,泵送装药可减少装药工2~3人。单个工作面年节约人工成本约15万~20万元。炸药原材料成本上,低黏度配方中乳化剂、降黏剂的用量比原来增加,每吨成本增加80~120元。设备折旧和维护费用每吨约为60元。经过计算可知,泵送装药比药卷装药每吨综合成本降低180~240元。

推广宜分三阶段进行。第一阶段选择一个中硬岩掘进

工作面,连续试验30个循环,主要对管路压力、返药量、爆破效果进行考察。第二阶段扩大到3~5个工作面,完善原材料供应和设备维修程序,得到不同的倾角炮孔装药参数。第三阶段在全矿范围内推行,制定出标准的作业程序以及考核指标。每一个阶段结束之后都会组织一次技术总结会,按照实测数据来调节配方以及设备的配置。

5 结束语

低黏度可泵送乳化炸药通过优化油水比、复配乳化剂、延迟敏化工艺,在保证爆速、猛度、储存稳定性的情况下,使25℃动力黏度控制在2200mPa·s以下,满足井下上向孔、倾斜孔机械化装药的要求。现场使用发现该炸药泵送阻力小、装药速度快、返药率 $\leq 5\%$ 。推广时要重点抓好原材料质量、设备保养、人员培训,分阶段推进,不能盲目铺开。

[参考文献]

- [1]梁昊,孙建辉,李洪伟,等.PIBSA 质量分数对现场混装乳化基质热分解特性和流变特性的影响[J].工程爆破,2024,30(6):102-113.
 - [2]王建斐,翟小鹏,李昊,等.现场混装乳化基质抗剪切性能研究[J].工程爆破,2025,31(5):126-131.
 - [3]杨敬轩,郭宝伟,许文彪,等.煤矿深孔液爆压裂技术研发及应用[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):750-760.
 - [4]葛立芳,魏国,吴攀宇,等.油相材料对现场混装乳化炸药基质非等温热分解特性的影响[J].火工品,2025(2):59-67.
- 作者简介:熊波(1989—),男,汉族,重庆市开州区人,本科,辽宁工程技术大学机械工程及自动化毕业,现就职于湖南南岭衡阳民用爆破服务有限公司,从事民用爆炸物品生产、技术、安全及设备物资等管理。