混装乳化炸药工艺参数对爆炸性能的影响规律研究①

张建秋[1]，代周超[2]，李海谦[3]，李启月[3]，崔雪姣[3,4]
（1.中交一公局集团有限公司，北京 100000；2.甘肃合赛公路建设发展有限公司，甘肃 甘南 747000；3.中南大学 资源与安全工程学院，湖南 长沙 410083；4.保利新联爆破工程集团有限公司，贵州 贵阳 550022）

摘　要：为了精准调控混装乳化炸药爆炸性能，系统考察了水相（硝酸铵/水）、油相（柴油/机油）、剪切速度以及敏化剂比例等参数对混装乳化炸药爆炸性能的影响，利用多元线性回归与通径分析方法建立了装药密度与爆速随各因素变化的量化关联模型。结果表明，适度提高硝酸铵含量（降低水含量）可显著提升爆速；增大油相中机油比例（减小柴油比例）能增强炸药整体能量输出。增大剪切速度可降低乳胶内相粒径，从而提高爆速；但敏化剂比例增大会减小爆速。通径分析结果显示，在调控乳化炸药爆速时，应重点关注敏化剂比例和硝酸铵含量，而在调整装药密度时需主要考虑敏化剂比例和剪切速度。

关键词：乳化炸药；乳胶基质；炸药配方；爆炸性能；通径分析；通径系数；硝酸铵；敏化剂；装药密度；爆速
中图分类号：TD824　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.003
文章编号：0253-6099（2026）01-0017-06

Influence of Parameters on Performance of Site Mixed Emulsion Explosive

ZHANG Jianqiu[1], DAI Zhouchao[2], LI Haiqian[3], LI Qiyue[3], CUI Xuejiao[3,4]
(1. *CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing* 100000, *China*; 2. *Gansu Hesai Highway Construction Development Co., Ltd., Gannan* 747000, *Gansu*, *China*; 3. *School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*; 4. *Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang* 550022, *Guizhou*, *China*)

Abstract: To precisely regulate the performance of site mixed emulsion explosive (SMEE), influences of key parameters, including aqueous phase (ammonium nitrate/water), oil phase (diesel oil/engine oil), shear rate and proportion of sensitizer, on the performance of SMEE were systematically investigated. A quantitative correlation model describing the variation of charge density and detonation velocity with various factors were established by means of multiple linear regression and path analysis. The results show that moderately increasing content of ammonium nitrate or reducing water content can significantly improve the detonation velocity; increasing the proportion of engine oil in the oil phase or reducing the proportion of diesel oil can enhance the energy output of explosive. A higher shear rate can reduce the internal phase particle size of emulsion, thereby increasing detonation velocity; however, a larger proportion of sensitizer can lead to a decrease in detonation velocity. Path analysis results indicate that priority should be given to the proportion of sensitizer and content of ammonium nitrate in regulation of detonation velocity of emulsion explosive, while both the proportion of sensitizer and shear rate should be taken into consideration in adjusting charge density.

Key words: emulsion explosive; emulsion matrix; explosive formula; detonation performance; path analysis; path coefficient; ammonium nitrate; sensitizer; charge density; detonation velocity

混装乳化炸药作为一种具有高爆轰能量和较高安全性能的工业炸药，在矿山开采、基础设施施工以及隧道掘进等工程领域发挥着重要作用[1-3]。与传统硝铵炸药或纯乳化炸药相比，混装乳化炸药将多种功能组分相结合[4-5]，通过可调控的配方与乳化工艺[6-7]，实现灵活调整能量密度、抗水性和爆炸性能等[8-9]。因

① **收稿日期**：2025-09-14
基金项目：国家自然科学基金（52474163）
作者简介：张建秋（1989—），男，河北唐山人，工程师，主要从事隧道掘进与爆破工作。E-mail：446978094@qq.com
通信作者：李海谦（1995—），男，湖南双峰人，博士研究生，主要从事岩石破碎理论与技术研究。E-mail：215501005@csu.edu.cn

此,如何利用乳胶基质制备工艺及敏化技术对爆炸性能进行动态调控,使混装乳化炸药兼具高能量输出与良好安全特性,成为当今炸药技术研究的重要方向之一[10-12]。

本文针对混装乳化炸药的爆炸性能调控问题,重点考察剪切速度、水相比例、油相比例以及敏化剂比例对其爆炸性能的影响规律,并在此基础上运用多元线性回归模型与通径分析方法,定量评估各工艺参数与炸药性能指标之间的关系。通过控制主要影响因素以及对制备工艺流程进行精细化调整,力求为工业化生产与现场应用提供指导。同时,在炸药爆炸性能的测试与分析中,兼顾炸药的安全性与操作性,为进一步实现节能降耗与绿色环保奠定基础。

1 实验配置与实验方法

1.1 实验仪器与试剂

为研究剪切速度、水相比例、油相比例和敏化剂比例等参数对混装乳化炸药爆炸性能的影响规律,设计了16组配方制备乳胶基质,混装乳化炸药基础配方见表1。采用ME3002T型精密天平分别配制水相和油相材料,将乳化剂和柴油分别倒入夹套烧杯中均匀混合,将硝酸铵(AN)和蒸馏水倒入烧杯中,通过C-MAG HS 7型磁力加热搅拌器加热至设置温度,保证水相溶液全部溶解。通过LTC4型恒温循环水浴将水油相材料加热并保持在恒温状态。采用RW20型乳化器,设置搅拌速度为800 r/min,将水相溶液匀速倒入夹套烧杯中进行粗乳。最后提高乳化器的剪切速度,对乳胶基质进行精乳。

表1 混装乳化炸药基础配方

Table 1 Basic formula of SMEE

物料质量/g					剪切速度/($r \cdot min^{-1}$)	敏化剂比例/%
AN	H_2O	乳化剂	柴油	机油		
385	85	6	18	6	1 400	0.6

保持乳胶基质配方及敏化工艺参数不变,通过改变不同剪切强度(1 200、1 400、1 600、1 800 r/min),制备了4种不同的混装乳化炸药。同时,参考现有研究成果[13-15]并结合矿山实际生产情况,制定了不同水相、不同油相和不同敏化剂比例的乳胶基质配方。固定水相质量470 g、油相质量24 g,不同影响因素的混装乳化炸药配方如表2所示,所有原材料和配比均符合《工业炸药通用技术条件》[16]中对乳化炸药的相关规定。

表2 不同影响因素的混装乳化炸药配方

Table 2 Formula of SMEE with different influencing factors

序号	剪切速度(A)/($r \cdot min^{-1}$)	水相比例(B)(AN:H_2O)	油相比例(C)(柴油:机油)	敏化剂比例(D)/%
1	1 200	377.5:92.5	6:18	0.2
2	1 400	382.5:87.5	10:14	0.6
3	1 600	385.5:82.5	14:10	1.0
4	1 800	392.5:77.5	18:6	1.4

1.2 混装乳化炸药爆炸性能测试

爆速作为乳化炸药爆炸性能的重要参数,对现场混装乳化炸药的使用有着重要的参考价值。目前测量爆速的方法有导爆索法、高速摄影法、测时仪法(电测法)、连续示波器法等。本试验采用电测法,其原理是爆炸产物作用于断路探针后,通过高温、高压、电离等作用使断路探针导通为通路探针,输出电信号,通过测试一定间距内2根断路探针的导通时间间隔,可以求得乳化炸药的平均爆速。

现场爆速测试遵循国家现行标准GB/T 13228—2015《工业炸药爆速测定方法》[17]中的有关规定。采用外径110 mm的PVC管装满混装乳化炸药,双层塑料薄膜封口,每根塑料管在距两边端口100、500 mm处各打两对孔作为穿线孔,以缠绕漆包线作为靶线探针,每次测试可以得到一个爆速数据。本试验使用BSW-3A型智能五段爆速仪测试爆速。

2 实验结果与分析

2.1 剪切速度的影响

通过爆速和密度测试,获得4种不同剪切速度条件下混装乳化炸药爆炸性能,结果见表3;混装乳化炸药爆速及装药密度随剪切速度变化的拟合曲线见图1。

表3 不同剪切速度条件下混装乳化炸药爆炸性能

Table 3 Detonation performance of SMEE at different shear rates

剪切速度/($r \cdot min^{-1}$)	装药密度/($g \cdot cm^{-3}$)	爆速/($m \cdot s^{-1}$)
1 200	1.05	3 762
1 400	1.01	3 846
1 600	0.94	3 998
1 800	0.86	4 328

结合表3与图1可知,在保证配方组分及敏化工艺条件一致的情况下,不同剪切速度制备的现场混装乳化炸药试样的爆炸性能存在一定差异:现场混装乳化炸药试样的爆速随着剪切速度增加呈增大趋势,装药密度稍微降低。其中,剪切速度1 200 r/min时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极差,爆速为3 762 m/s;剪切

速度 1 800 r/min 时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极优,爆速达到了 4 328 m/s。最大爆速为最小爆速的 1.15 倍。

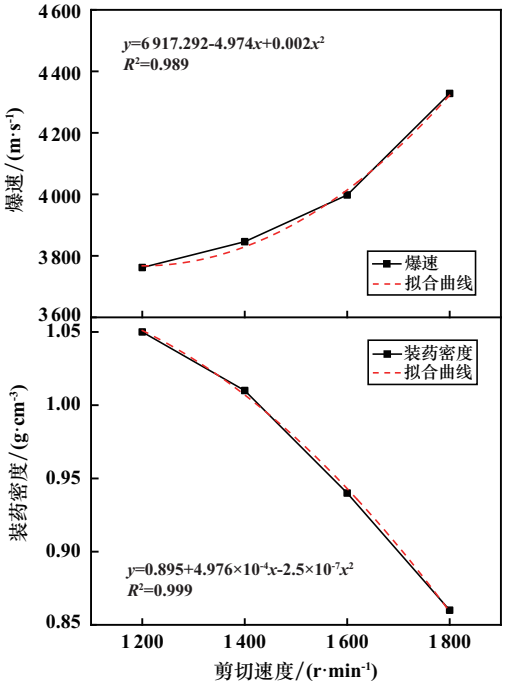


图 1　混装乳化炸药爆速及装药密度随剪切速度变化的拟合曲线

Fig. 1　Variation of detonation velocity and charge density of SMEE with shear rates

分析认为,在保证配方组分及敏化工艺条件一致的情况下,不同剪切速度制备的现场混装乳化炸药,其内相粒径随剪切速度增加呈减小趋势,内相粒径较小的炸药试样中,内外相的汽化时间更接近,因而能够在较短时间内同步完成汽化并参与爆轰反应,从而加速爆炸反应的传播,宏观表现为爆速增大。相反,粒径较大的试样中,内外相汽化及参与爆轰反应的时间不一致,使爆轰反应在较长时间内逐步完成,降低了单位时间的爆轰反应功率,宏观表现为爆速减小。

2.2　水相比例的影响

通过爆速和密度测试,获得 4 种不同水相比例条件下混装乳化炸药爆炸性能,结果见表 4;混装乳化炸药爆速及装药密度随水相比例变化的拟合曲线见图 2。

结合表 4 与图 2 可知,在保证其他配方组分及乳化、敏化工艺条件一致的情况下,不同水相比例条件下制备的现场混装乳化炸药试样的爆炸性能存在一定差异:现场混装乳化炸药试样的爆速和装药密度均随着水相中 AN 比例增大(水比例相应减小)而呈增大趋势。其中,AN 与水比例为 392.5∶77.5 时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极优,爆速达到 4 387 m/s;AN 与水比例为 377.5∶92.5 时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极差,爆速为 3 859 m/s。最大爆速为最小爆速的 1.14 倍。

表 4　不同水相比例条件下混装乳化炸药爆炸性能

Table 4　Detonation performance of SMEE with different proportions of water phase

AN 质量/g	水质量/g	装药密度/(g·cm^{-3})	爆速/(m·s^{-1})
377.5	92.5	0.86	3 859
382.5	87.5	0.89	3 964
387.5	82.5	0.94	4 123
392.5	77.5	1.00	4 387

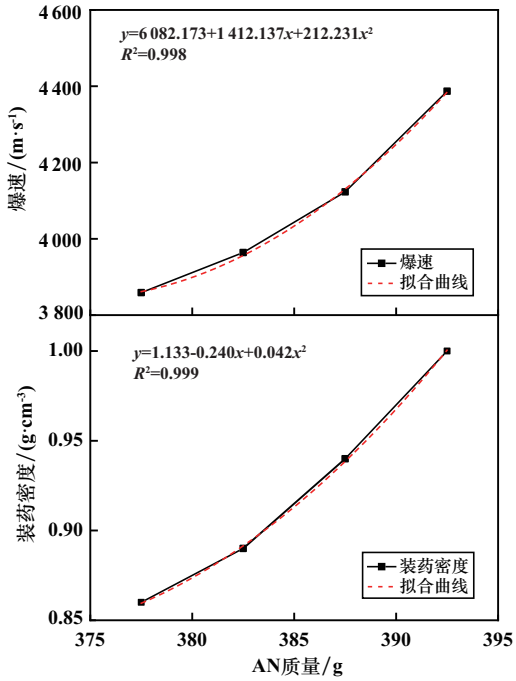


图 2　混装乳化炸药爆速及装药密度随水相比例变化的拟合曲线

Fig. 2　Variation of detonation velocity and charge density of SMEE with proportions of water phase

分析认为,AN 作为混装乳化炸药能量的主要供应体,在一定范围内增大水相溶液中 AN 比例,可以有效提高混装乳化炸药爆轰总能量。同时减小混装乳化炸药中水的比例能够减少炸药爆炸反应过程中水汽化散失的能量。因此,增大水相中 AN 比例(减小水比例)能够有效提升混装乳化炸药的爆速。

2.3　油相比例的影响

通过爆速和密度测试,获得 4 种不同油相比例条件下混装乳化炸药爆炸性能,结果见表 5;混装乳化炸药爆速及装药密度随油相比例变化的拟合曲线见图 3。

结合表 5 与图 3 可知,在保证其他配方组分及乳化、敏化工艺条件一致的情况下,不同油相比例条件下

制备的现场混装乳化炸药试样的爆炸性能存在一定差异:现场混装乳化炸药试样的爆速随着油相中机油比例增大(柴油比例相应减小)而呈增大趋势,而装药密度变化趋势不明显。其中,机油与柴油比例为 18∶6时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极优,爆速达到 3 846 m/s;机油与柴油比例为 6∶18 时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极差,爆速为 3 473 m/s。最大爆速为最小爆速的 1.11 倍。

表 5 不同油相比例条件下混装乳化炸药爆炸性能

Table 5 Explosive performance of SMEE with different proportions of oil phase

油相质量/g		装药密度/(g·cm^{-3})	爆速/(m·s^{-1})
柴油	机油		
6	18	1.02	3 846
10	14	0.99	3 758
14	10	0.94	3 624
18	6	0.87	3 473

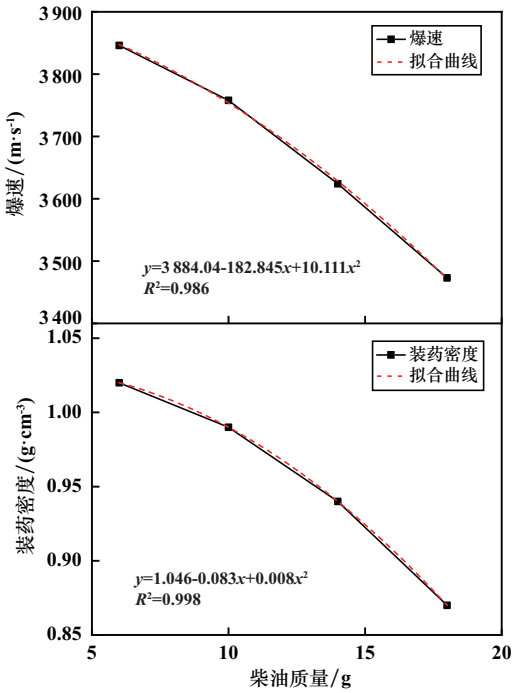


图 3 混装乳化炸药爆速及装药密度随油相比例变化的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of detonation velocity and charge density of SMEE varying with proportions of oil phase

分析认为,机油作为混装乳化炸药能量的供应体之一,在一定范围内增大油相溶液中机油比例可以有效提高混装乳化炸药爆轰总能量。现场混装乳化炸药组分中机油比例增大,且分散相液滴平均粒径减小,发生爆轰时内部各微粒基本同时释放能量,炸药的实际爆速提高。因此,增大油相中机油比例(减小柴油比例)能够有效提升混装乳化炸药的爆速。

2.4 敏化剂比例的影响

通过爆速和密度测试,获得 4 种不同敏化剂比例条件下混装乳化炸药爆炸性能,结果见表 6;混装乳化炸药爆速及装药密度随敏化剂比例变化拟合曲线见图 4。

表 6 不同敏化剂比例条件下混装乳化炸药爆炸性能

Table 6 Explosive performance of SMEE with different proportions of sensitizer

敏化剂比例/%	装药密度/(g·cm^{-3})	爆速/(m·s^{-1})
0.2	0.98	4 205
0.6	0.96	4 048
1.0	0.93	3 816
1.4	0.85	3 543

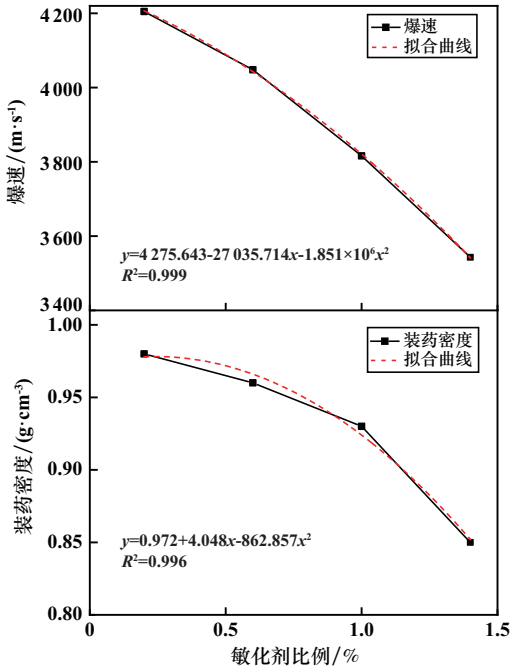


图 4 混装乳化炸药爆速及装药密度随敏化剂比例变化的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of detonation velocity and charge density of SMEE varying with proportions of sensitizer

结合表 6 与图 4 可知,在保证配方组分及乳化工艺条件一致的情况下,不同敏化剂比例条件下制备的现场混装乳化炸药试样的爆炸性能存在一定差异:现场混装乳化炸药试样的爆速和装药密度均随着敏化剂比例增大而呈降低趋势。其中,敏化剂比例 0.2%时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极优,爆速达到 4 205 m/s;敏化剂比例 1.4%时制备的混装乳化炸药试样爆炸性能极差,爆速为 3 543 m/s。最大爆速为最小爆速的 1.19 倍。

分析认为,炸药敏化剂比例关系到炸药的装药密度,从而影响炸药的爆速等宏观性能,在一定范围内,炸药的爆速随着装药密度增大逐渐增大。随着敏化剂比例增大,炸药装药密度和爆速均不断减小。

2.5　多元线性回归分析

综合表 3~6,以剪切速度(X_1)、水相比例(X_2)、油相比例(X_3)和敏化剂比例(X_4)为自变量,装药密度(Y_1)和爆速(Y_2)为因变量,分别进行不加权多元线性回归:

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_4X_4 \quad (1)$$

通过回归分析,得到混装乳化炸药装药密度和爆速的多元线性回归结果,如表 7 所示。

表 7　混装乳化炸药爆炸性能多元线性回归结果

Table 7　Multiple linear regression of detonation velocity of SMEE

变量		装药密度 Y_1	爆速 Y_2
截距	A_0	0.764 41	−554.525 56
	标准误差	0.184 19	1 018.647 51
剪切速度 X_1	A_1	$-2.265\ 3\times10^{-4}$	1.110 27
	标准误差	$5.410\ 55\times10^{-5}$	0.299 22
水相比例 X_2	A_2	0.139 88	690.070 80
	标准误差	0.035 47	196.135 50
油相比例 X_3	A_3	−0.025 65	14.658 20
	标准误差	0.007 77	42.989 64
敏化剂比例 X_4	A_4	−10.659 89	−46 777.965 7
	标准误差	2.705 27	14 960.967 1
统计	R^2(COD)	0.704 74	0.587 87
	调整后 R^2	0.661	0.526 82

获得的装药密度 Y_1、炸药爆速 Y_2 与 X_1、X_2、X_3、X_4 参数的关系为:

$$Y_1 = 0.764\ 41 - 2.265\ 31\times10^{-4}X_1 + 0.139\ 88X_2 - 0.025\ 65X_3 - 10.659\ 89X_4 \quad (2)$$

$$Y_2 = -554.525\ 56 + 1.110\ 27X_1 + 690.07X_2 + 14.66X_3 - 46\ 777.97X_4 \quad (3)$$

3　讨论

通过上述分析得到了影响混装乳化炸药爆炸性能的诸多因素,既有配方组分的变量因素,如硝酸铵、水、机油、柴油质量等,又有乳化敏化工艺的变量因素,如剪切速度、敏化剂比例等,它们的共同作用决定了混装乳化炸药的爆炸性能。通过统计学的通径分析,可以得出影响混装乳化炸药爆炸性能各因素之间的主次关系,为混装乳化炸药配方多样性研究提供理论基础。

通径分析[18-19]是:对任意一个关联的系统,其简单相关系数可分为许多部分,即自变量对因变量的直接作用,或自变量通过影响其他的自变量继而对因变量产生的间接作用。通常认为,通径分析是以多元回归分析为基础,假设因变量 y 与多个自变量 $x_i(i=1,2,\cdots,n)$ 之间存在线性关系,其线性方程为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \quad (4)$$

剩余通径系数用于衡量模型中未被解释的那一部分因变量变化量,其公式为:

$$P_e = \sqrt{1 - R^2} \quad (5)$$

式中:R^2 为决定系数,反映模型对因变量的解释能力;P_e 为剩余通径系数,表示模型未能解释的部分。根据通径分析理论,结合表 7 及式(5)计算了装药密度与爆速回归模型的剩余通径系数,结果分别为 0.54 和 0.64,说明模型中仍存在一定程度的未解释信息。

本文选取了影响现场混装乳化炸药爆炸性能的主要因素进行敏感性通径系数分析,包括剪切速度、硝酸铵质量、水质量、机油质量、柴油质量和敏化剂比例,计算得到混装乳化炸药爆炸性能爆速及密度与因素之间的关联度,如表 8 所示。

表 8　混装乳化炸药爆炸性能特征参量与影响因素的关联度

Table 8　Correlation degree between characteristic parameters of explosive performance of SMEE and influencing factors

特征参量	硝酸铵质量	水质量	柴油质量	机油质量	剪切速度	敏化剂比例
爆速	0.723	0.392	0.307	0.378	0.529	0.782
密度	0.652	0.364	0.284	0.329	0.667	0.745

由表 8 可以看出,在影响混装乳化炸药爆炸性能的诸多因素中,敏化剂比例对爆速的影响最大,其他影响因素对爆速的影响程度依次为:硝酸铵质量>剪切速度>水质量>机油质量>柴油质量。结合多元线性回归分析结果可以看出,在本试验配方范围内,硝酸铵质量与爆速呈正相关,而敏化剂比例偏高会导致炸药孔隙率增大,密度下降,从而对爆速呈负效应。因此,现场混装乳化炸药要提高其爆速,应优先考虑在一定范围内增加硝酸铵质量,并减小敏化剂比例。制备现场混装乳化炸药时,增加硝酸铵质量容易导致混装乳化炸药生产成本升高,不利于总体成本控制。因此,需要调控好敏化剂比例,保证混装乳化炸药能够均匀有效发泡,从而提高混装乳化炸药的爆炸性能。

混装乳化炸药密度与影响因素的关联度与爆速的关联度趋势大体一致。对混装乳化炸药密度影响最大的是敏化剂比例,其他因素与密度的关联度为:剪切速度>硝酸铵质量>水质量>机油质量>柴油质量。除敏化剂比例、剪切速度和硝酸铵质量外,其他因素对炸药密

度的影响都很小。因此,在对混装乳化炸药密度进行调控时应首先考虑敏化剂比例以及水相中硝酸铵的比例。此外,还可从剪切速度等方面来调控混装乳化炸药的密度,提高混装乳化炸药的爆炸性能。

4 结论

1) 从工艺和组分两方面出发,系统考察了水相(硝酸铵/水)、油相(柴油/机油)、剪切速度以及敏化剂比例等关键因素对混装乳化炸药爆炸性能的影响,并通过多元线性回归与通径分析方法,建立了装药密度与爆速的量化关联模型。

2) 适当提高硝酸铵质量(即降低水质量)可有效提高爆速,最大爆速与最小爆速之比可达1.14;增大油相中机油比例(减小柴油比例)亦能促进爆轰反应,最大爆速为最小爆速的1.11倍。两者共同作用显著增强炸药整体能量输出,为在不同使用环境下灵活调配乳胶基质成分提供了数据支撑。

3) 随着剪切速度增大,乳胶内相粒径减小,炸药爆速显著升高,爆速最大值可达最低值的1.15倍;增大敏化剂比例会导致爆速逐渐下降,爆速最大值是最小值的1.19倍。在保证乳化均匀度的前提下,应根据需要合理控制敏化剂用量,以平衡炸药爆速与敏感度之间的关系。

4) 多元线性回归与通径分析结果表明,调控爆速应主要关注敏化剂比例和硝酸铵质量,而调整装药密度则需重点考虑敏化剂比例和剪切速度。

参考文献(References):

[1] ZHOU J M, WANG X G, GONG M, et al. The effect of surfactant on the rheology and stability properties of emulsion explosive matrices[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2022,43(14):2156-2164.

[2] ZHANG K M, ZHAO H R. Perspectives in the stability of emulsion explosive[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022,307:102745.

[3] MARANDA A, MARKOWSKA D, KUKFISZ B, et al. A comprehensive review of the influence of sensitizers on the detonation properties of emulsion explosives[J]. Applied Sciences, 2025,15(5):2417.

[4] ZHAO H R, WU J, XU M X, et al. Advances in the rheology of emulsion explosive[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021,336:116854.

[5] 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.
GE Lifang, WEI Guo, WU Panyu, et al. Effect of oil phase materials on the non-isothermal thermal decomposition characteristics of field-mixed emulsion explosive matrix[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2025(2):59-67.

[6] 赵明生,张力,韦剑,等. 水相组分对混装乳化炸药的性能影响研究[J]. 工程爆破, 2021,27(5):90-92.
ZHAO Mingsheng, ZHANG Li, WEI Jian, et al. Study on the influence of water phase components on mixed emulsified explosives[J]. Engineering Blasting, 2021,27(5):90-92.

[7] 黄胜松,赵明生,张义平,等. 水相pH对现场混装乳化炸药基质储存稳定性的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(7):111-114.
HUANG Shengsong, ZHAO Mingsheng, ZHANG Yiping, et al. Effect of pH value of aqueous phase on storage stability of on-site mixed emulsion explosive matrix[J]. Mining Research and Development, 2020,40(7):111-114.

[8] 徐乾. 深水抗压型乳化炸药的制备及性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
XU Qian. Study on preparation and properties of deep-water pressure-resistant emulsion explosive[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[9] 黄麟,田丰,田惺哲,等. 抗低温地下混装乳化炸药工艺配方研究[J]. 工程爆破, 2018,24(5):35-39.
HUANG Lin, TIAN Feng, TIAN Xingzhe, et al. Study on the process formulation of underground mixing emulsion explosives with low temperature resistance[J]. Engineering Blasting, 2018,24(5):35-39.

[10] 高铭,郭乃德,孙玉华,等. 适应连续化生产的小直径乳化炸药配方研究[J]. 煤矿爆破, 2006,24(2):4-6.
GAO Ming, GUO Naide, SUN Yuhua, et al. Formula of minor diameter emulsion explosive adapted to continuous production[J]. Coal Mine Blasting, 2006,24(2):4-6.

[11] 侯煜. 金堆城钼业公司TM系列乳化炸药的研制和应用[J]. 工程爆破, 2002,8(2):55-58.
HOU Yu. Development and application of TM-series emulsion explosives in Jinduicheng Molybdenum Company[J]. Engineering Blasting, 2002,8(2):55-58.

[12] 程扬帆,陶臣,夏煜,等. 基于增稠微囊的地下矿用乳化炸药配方设计及性能表征[J]. 金属矿山, 2022(1):142-147.
CHENG Yangfan, TAO Chen, XIA Yu, et al. Fabrication and characterization of underground mining emulsion explosive containing thickening microcapsules[J]. Metal Mine, 2022(1):142-147.

[13] 吴勇,周建敏,汪帅文,等. 剪切参数对混装乳化炸药稳定性及爆炸性能的影响[J]. 爆破器材, 2024,53(3):10-16.
WU Yong, ZHOU Jianmin, WANG Shuaiwen, et al. Influence of shear parameters on the stability and explosion performance of mixed emulsion explosives[J]. Explosive Materials, 2024,53(3):10-16.

[14] 周建敏,汪旭光,龚敏,等. 剪切强度对乳胶基质流变特性影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2021,41(9):125-129.
ZHOU Jianmin, WANG Xuguang, GONG Min, et al. Effect of shear strength on rheological properties of emulsion matrix[J]. Mining Research and Development, 2021,41(9):125-129.

[15] 魏国. 机油/柴油比例对现场混装乳化炸药性能的影响[D]. 淮南:安徽理工大学, 2022.
WEI Guo. Effect of the ratio of engine oil and diesel oil on the properties of field mixed emulsion explosive[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.

(下转第29页)

析[J]. 安全与环境学报, 2019,19(1):8-13.
FANG Qiancheng, SHANG Li. Analysis of the rock slope stability for the open-pit mine based on the game theory and the cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2019,19(1):8-13.

[15] 侯克鹏,王黎蝶. 基于改进的 FAHP-CRITIC 法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型[J]. 安全与环境学报, 2021,21(6):2443-2451.
HOU Kepeng, WANG Lidie. Risk assessment model of open-pit mine slope based on improved FAHP-CRITIC method and cloud theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(6):2443-2451.

[16] 张向东,姜革鑫. 基于可拓学理论的矿山边坡稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2018,18(6):2141-2145.
ZHANG Xiangdong, JIANG Gexin. Analysis of the mining slope stability from the point of view of the theory of extenics[J]. Journal of Safety and Environment, 2018,18(6):2141-2145.

[17] 康志强,周辉,冯夏庭,等. 大型岩质边坡岩体质量的可拓学理论评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007,28(12):1770-1774.
KANG Zhiqiang, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Evaluation of high rock slope quality based on theory of extenics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007,28(12):1770-1774.

[18] 阮永芬,陈赵慧,吴龙,等. 基于可拓云理论的泥炭质土场地沉降风险评价[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):59-67.
RUAN Yongfen, CHEN Zhaohui, WU Long, et al. Risk assessment of the settlement of peat soil field based on the extension cloud theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):59-67.

[19] 王晓玲,戴林瀚,吕鹏,等. 基于 DSR-可拓云的渗流安全综合评价研究[J]. 天津大学学报, 2019,52(1):52-61.
WANG Xiaoling, DAI Linhan, LYU Peng, et al. Study on comprehensive evaluation model of seepage safety based on DSR-extension cloud[J]. Journal of Tianjin University, 2019,52(1):52-61.

[20] 涂圣文,赵振华,邓梦雪,等. 基于云化物元耦合模型的岩质高边坡工程爆破施工安全风险评估[J]. 安全与环境工程, 2021,28(2):102-108.
TU Shengwen, ZHAO Zhenhua, DENG Mengxue, et al. Safety risk assessment of blasting construction in rock high slope engineering based on the cloud matter-element model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(2):102-108.

[21] 高松,滕克难,陈健,等. 基于 MCM-可拓云的装备体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(2):20-24.
GAO Song, TENG Kenan, CHEN Jian, et al. Effectiveness evaluation of equipment system of system based on MCM-extension cloud[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2020,41(2):20-24.

[22] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995,22(7):763-770.

[23] 张立军,张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J].统计与决策, 2015,31(22):65-68.
ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on improved CRITIC method[J]. Statistics & Decision, 2015,31(22):65-68.

[24] 王坚浩,王龙,张亮,等. 灰色群组聚类和改进 CRITIC 赋权的供应商选择 VIKOR 多属性决策[J]. 系统工程与电子技术, 2023,45(1):155-164.
WANG Jianhao, WANG Long, ZHANG Liang, et al. Supplier selection VIKOR multi-attribute decision making of grey group clustering and improved CRITIC weighting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023,45(1):155-164.

[25] 赵军,宋扬. 改进熵权-正态云模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2016,34(4):120-122.
ZHAO Jun, SONG Yang. Slope stability evaluation based on improved entropy weight-cloud model[J]. Water Resources and Power, 2016,34(4):120-122.

引用本文:任赢,沈国卓,张良喜,等. 基于 CRITIC 法-可拓云模型的露天矿高陡边坡稳定性动态评价[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):23-29.
REN Ying, SHEN Guozhuo, ZHANG Liangxi, et al. Dynamic stability evaluation for high and steep slope of open-pit mines based on CRITIC - extension cloud model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):23-29.

(上接第 22 页)

[16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 工业炸药通用技术条件: GB/T 28286—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. General technical specifications for industrial explosives: GB/T 28286—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[17] 王曙光,朱建生,陈栋,等. 炸药爆炸理论基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020.
WANG Shuguang, ZHU Jiansheng, CHEN Dong, et al. The theoretical basis of explosive detonation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020.

[18] 徐晓东. 基于通径系数的隧道爆破振动影响因素敏感性分析[J]. 现代矿业, 2023,39(12):223-225.
XU Xiaodong. Sensitivity analysis of influencing factors of tunnel blasting vibration based on path coefficient[J]. Modern Mining, 2023,39(12):223-225.

[19] 杜玉洁. 基于回归的通径及决策分析模型应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
DU Yujie. Research on path and decision analysis model application based on regression analysis[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

引用本文:张建秋,代周超,李海谦,等. 混装乳化炸药工艺参数对爆炸性能的影响规律研究[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):17-22.
ZHANG Jianqiu, DAI Zhouchao, LI Haiqian, et al. Influence of parameters on performance of site mixed emulsion explosive [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):17-22.