

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.026

混装乳化炸药基质温度与敏化剂浓度 匹配试验研究及应用*

陈运成¹, 管伟明², 杨志勇³, 赵明生¹, 颜世留¹, 李铁龙¹, 侯得峰³

(1. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510000; 2. 新疆大学, 乌鲁木齐 830017;
3. 新疆天池能源有限责任公司, 昌吉 831700)

摘要: 为解决现场混装乳化炸药在生产过程中因基质温度与敏化剂(亚硝酸钠)浓度不匹配所引起的炸药密度不均匀、爆破威力不稳定等问题,本研究系统探讨了基质温度与亚硝酸钠浓度之间的协同作用关系。通过采用正交试验设计方法,系统设置了40℃至70℃的基质温度梯度和1.2%至2.8%的亚硝酸钠浓度梯度,开展了多组对比试验,深入分析了两因素对乳化炸药密度影响的规律。试验结果显示:基质温度是影响发泡反应速率的关键因素,在较高温度条件下,反应速率显著加快,发泡过程更为迅速,但易造成过度发泡,导致炸药密度偏低;而在低温条件下,反应迟缓,发泡不充分,则易引起炸药密度偏高,影响爆破效果稳定性。同时,亚硝酸钠作为敏化剂,其浓度直接影响发泡效果与气泡结构稳定性,不同基质温度条件下均存在一个最佳浓度区间,以实现理想的炸药密度与爆轰性能。基于大量试验数据,本研究构建了适用于不同基质温度范围的亚硝酸钠配比指导表,明确了从低温至高温条件下对应的推荐敏化剂浓度,为现场操作提供了量化依据。经现场应用验证,采用该匹配表及相关调控方法后,乳化炸药的密度控制精度显著提高,不仅提升了爆破能量释放的稳定性,也降低了因密度异常诱发的拒爆等安全隐患,从而全面优化了爆破效果与作业安全性。本研究成果对提升现场混装炸药的质量控制水平、实现爆破性能的系统优化具有重要的理论指导与实践应用价值。

关键词: 混装乳化炸药; 基质温度; 敏化剂浓度; 密度控制

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0245-08

Experimental Study and Application on the Matching of Temperature and Sensitizer Concentration for Bulk Emulsion Explosive Matrix

CHEN Yun-cheng¹, GUAN Wei-ming², YANG Zhi-yong³, ZHAO Ming-sheng¹,
YAN Shi-liu¹, LI Tie-long¹, HOU De-feng³

(1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830017, China;
3. Xinjiang Tianchi Energy Co., Ltd., Changji 831700, China)

Abstract: This study systematically investigated the synergistic relationship between matrix temperature and so-

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-28

网络首发日期 (Published online): 2025-10-31

作者简介: 陈运成 (1991-), 男, 安徽省淮北市, 在职研究生、高级爆破工程师, 从事露天矿山爆破施工, (E-mail) 563618010@qq.com。

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项基金资助项目 (2024ZD1003406); 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室开放课题基金资助项目 (2024-K03, 2024-K05)

About the author: CHEN Yun-cheng (1991-), male, born in Huaibei city, Anhui province, senior blasting engineer and part-time master's candidate, specializing in surface mining blasting, (E-mail) 563618010@qq.com.

Fund Programs: National Major Science and Technology Project for Deep Earth Exploration and Mineral Resources Exploration (2024ZD1003406), Open Fund Project of the National Mine Safety Administration Key Laboratory for Safe and Intelligent Mining of Non-coal Open-pit Mines (2024-K03, 2024-K05)

dium nitrite concentration to resolve density unevenness and explosive power instability in site-mixed emulsion explosives caused by the mismatch between matrix temperature and sensitizer(sodium nitrite) concentration during production. Using an orthogonal experimental design, matrix temperature gradients ranging from 40°C to 70°C and sodium nitrite concentration gradients ranging from 1.2% to 2.8% were systematically established. Multiple sets of comparative tests were conducted to comprehensively examine the impact of these two factors on the density of emulsion explosives. The experimental results demonstrate that matrix temperature plays a critical role in determining the foaming reaction rate, with elevated temperatures markedly accelerating the reaction and, consequently, the foaming process. However, this acceleration often leads to excessive foaming, consequently reducing the explosive density. In contrast, lower temperatures slow the reaction, often resulting in insufficient foaming, which increases explosive density and adversely affects blasting stability. Additionally, the concentration of sodium nitrite, acting as the sensitizer, directly influences both the foaming efficiency and the structural stability of the bubbles. For different matrix temperatures, there is an optimal concentration range to achieve ideal explosive density and detonation performance. Based on comprehensive experimental data, this study developed practical guidelines for sodium nitrite proportions across various matrix temperature ranges. These guidelines explicitly recommended specific sensitizer concentrations for low-to-high-temperature conditions, providing quantitative references for field applications. Field validation confirmed that implementing this matching table and associated control techniques substantially enhanced the accuracy of emulsified explosive density regulation. This improvement not only boosted the effective release of explosive energy but also mitigated safety risks, including density-related misfires, resulting in overall optimization of both blasting performance and operational safety. This study's findings offer valuable theoretical insights and practical applications for enhancing quality control in field-mixed explosives and systematically improving blasting performance.

Key words: bulk emulsion explosive; matrix temperature; sensitizer concentration; density control

现场混装乳化炸药技术因其施工便捷、安全性高、爆破效果好等特点,已成为矿山开采、隧道掘进等工程爆破领域的主要应用技术之一^[1]。混装乳化炸药通过现场混合乳胶基质和敏化剂(如亚硝酸钠溶液)混合发生化学反应后生成,其密度直接影响炸药的爆轰性能和安全稳定性^[2]。然而,在实际生产过程中,由于基质温度与敏化剂浓度常常不匹配,导致乳化炸药密度不均、爆破效果差等问题。

基质温度对乳化炸药发泡反应速率有显著影响^[3],而敏化剂浓度则是控制发泡量和密度的关键参数^[4]。基质温度与敏化剂浓度的匹配关系对炸药密度和爆轰性能具有决定性作用^[5]。当基质温度较高时,若敏化剂浓度过高,可能导致反应过于剧烈,产生过多气泡,使炸药密度不稳定;反之,当基质温度较低时,若敏化剂浓度过低,则可能导致反应速率过慢,发泡量不足,炸药密度偏高。因此,研究基质温度与敏化剂浓度的匹配关系,建立适用于不同温度条件下的敏化剂配比指导表,对于提高现场混装乳化炸药的生产质量、优化爆破效果具有重要意义。

乳化炸药的化学敏化机理与工艺优化一直是国内外工业炸药领域的研究热点。其敏化过程本质是亚硝酸钠在酸性条件下分解产生氮气,并在乳胶基质中形成均匀、稳定的微小气泡群^[6]。在机理研究方面,国内外学者已取得了显著进展。国际上的研

究更为侧重于发泡过程的微观机制与动力学建模。国内研究则更侧重于工艺参数的实用化影响,具有明确的工程导向。例如,孙伦奎、杨敏会等系统地研究了基质温度、pH 值及敏化剂浓度对发泡速率的综合影响^[7],明确指出温度升高会显著加速反应进程,为生产工艺控制提供了重要参考。在参数优化方面,现有研究大多聚焦于单一因素(如基质温度、敏化剂种类或浓度)对炸药最终性能(如密度、爆速)的影响规律。这些研究为理解各参数的独立作用奠定了基础,但未能充分揭示温度与浓度这两个关键变量之间的交互作用与协同机制。此外,多数研究是在实验室可控条件下进行,与现场复杂的、动态变化的生产环境存在差距,导致其研究成果在指导现场实时调控时的普适性和可操作性不足。本研究旨在系统研究基质温度与亚硝酸钠浓度之间的匹配关系,建立适用于不同基质温度条件下的敏化剂配比指导表,并提出现场应用的调控措施与优化建议。具体研究内容包括:

(1)分析乳化炸药的化学发泡机理,明确硝酸铵与亚硝酸钠反应生成氮气的过程。

(2)研究基质温度、敏化剂浓度对发泡速率的影响规律。

(3)设计正交试验,研究基质温度和 NaNO_2 浓度两因素的交互作用。

(4)分析密度-时间曲线,建立基质温度 -

NaNO₂ 浓度匹配表。

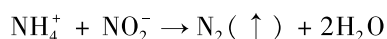
(5) 根据现场应用基质温度-浓度匹配表的结果,提出质量控制要点。

研究目标是建立一套科学、实用的现场混装乳化炸药参数控制体系,通过控制基质温度与敏化剂浓度的匹配关系,实现乳化炸药密度的精准控制,从而提高炸药的爆轰性能和安全稳定性。

1 混装乳化炸药敏化机理与关键影响因素分析

1.1 化学发泡机理

混装乳化炸药的敏化过程主要通过基质中游离的硝酸铵(NH₄NO₃)与亚硝酸钠(NaNO₂)的化学反应实现^[8],其本质是一个复杂的液相离子反应。该反应的核心步骤通常表示为



但实际上,亚硝酸根离子(NO₂⁻)在与环境中的氢离子(H⁺)结合后,会生成不稳定的亚硝酸(HNO₂),进而与铵离子(NH₄⁺)发生氧化还原反应,生成氮气。因此,整个反应的速率受反应物浓度(特别是NO₂⁻)和反应温度的协同控制。

该反应在乳胶基质中进行,释放的氮气(N₂)被包裹在基质中形成微小气泡,从而降低炸药密度并提高敏感度^[9]。

1.2 关键影响因素及其作用机制

1.2.1 基质温度的影响

温度是影响化学反应速率的最主要因素。根据阿伦尼乌斯方程^[10],反应速率常数 k 与温度 T 呈指数关系

$$k = A \cdot e^{-E_a/(RT)}$$

A 为指前因子,与反应的频率有关,体现反应发生的难易程度。 E_a 是活化能,代表反应发生所需克服的能量障碍。 R 是摩尔气体常数,数值约为8.314 J/(mol·K)。 T 为绝对温度,单位是开尔文,对反应速率影响显著。

1) 高温促进机制

(1) 分子动能增加: 温度升高,反应物分子(NH₄⁺, HNO₂等)的平均动能显著增加,拥有足够能量以跨越反应能垒(E_a)的分子比例大幅提升。

(2) 反应速率常数激增: 由阿伦尼乌斯方程可知, k 值随 T 升高呈指数增长。这意味着,在高温下,不仅反应启动更快,其每一步微观反应的速率都得到了本质上的提升。这直接导致了宏观上观察到的“反应速率显著加快,发泡过程更为迅速”。

(3) 气泡成核与生长失控: 过快的反应速率会

导致单位时间内、单位体积内产生过多的氮气核。气泡核的快速生成和生长会相互合并,形成大气泡,甚至冲破乳胶基质的束缚,导致过度发泡。这就是高温下若不相应降低敏化剂浓度,会导致炸药密度偏低和不均匀的根本原因。

2) 低温抑制机制

(1) 分子动力不足: 温度降低,大量反应物分子无法获得足够的动能来克服活化能垒,有效碰撞频率急剧下降。

(2) 速率常数骤减: k 值随 T 降低而指数式减小。反应在微观层面变得极其缓慢。

(3) 发泡不足与密度偏高: 缓慢的反应速率无法产生足量的氮气核,或者气泡生长不完全,难以形成均匀、细密的敏化气泡结构。最终导致炸药密度偏高,甚至可能因为气泡结构不稳定而影响爆轰感度。

1.2.2 敏化剂浓度的影响

根据化学反应的速率方程,反应速率与反应速率常数 k 、反应物浓度的幂次方成正比。对于亚硝酸钠分解生成HNO₂/NO₂⁻的这一关键步骤,其浓度对速率的影响尤为显著。反应的速率方程可以近似表示为^[11]

$$v = k \cdot [\text{H}^+]^m \cdot [\text{NO}_2^-]^n$$

式中, m 和 n 为反应级数(通常为正整数)。这表明,反应速率 v 直接依赖于亚硝酸根离子浓度[NO₂⁻]的 n 次方。

1) 高浓度驱动机制

(1) 提高亚硝酸钠浓度,即直接增加了关键反应物NO₂⁻的数量密度。

(2) 根据速率方程,[NO²]的升高会直接导致反应速率增长。这意味着,即使温度不变,仅仅提高浓度也能通过增加反应物分子间的有效碰撞频率来大幅提升反应速率。

(3) 与温度的协同: 在高温环境下,分子本身已处于高动能状态,此时若再施加高浓度,相当于“火上浇油”。高动能分子与高密度反应物相结合,导致反应在极短时间内剧烈进行,极易引发前述的过度发泡问题。

2) 低浓度限制机制

(1) 降低亚硝酸钠浓度,意味着限制了反应所必需的反应物NO₂⁻的供给。

(2) 即使是在高温下,分子拥有足够的能量,但由于“巧妇难为无米之炊”,找不到足够的反应对象(NO₂⁻),整体反应速率依然会被限制在一个较低的水平。这解释了为何在低温下,如果浓度也过低,反

应会趋于停滞。

(3) 温度与浓度的协同机制: 动态平衡与最佳窗口温度(T) 和亚硝酸钠浓度($[\text{NO}_2^-]$) 并非独立作用, 而是通过化学反应动力学方程耦合在一起, 共同决定了最终的宏观发泡效果。

1.3 基质温度与敏化剂浓度协同作用机制及控制策略

将阿伦尼乌斯方程代入速率方程, 得到协同控制反应速率 v' 表达式

$$v' = A \cdot e^{[-Ea/(RT)]} \cdot [\text{H}^+]^m \cdot [\text{NO}_2^-]^n$$

这个公式清晰地表明, 最终的反应速率是温度(T) 的指数函数和浓度($[\text{NO}_2^-]$) 的幂函数的乘积。任何一个参数的改变, 其影响都会被另一个参数放大或抑制。

基于上述协同机制, 在实践中需采用以下配对控制策略:

1) 高温-低浓度配对: 在高温下, 为了获得适中、可控的反应速率(以实现均匀细密的气泡结构), 必须降低亚硝酸钠浓度。这是因为指数增长的温度项 $e^{[-Ea/(RT)]}$ 已经很大, 必须通过降低幂次方浓度项 $[\text{NO}_2^-]^n$ 来“对冲”, 使二者的乘积达到一个理想值。

2) 低温-高浓度配对: 在低温下, 指数温度项 $e^{[-Ea/(RT)]}$ 很小, 为了维持足够的反应速率, 必须提高亚硝酸钠浓度, 通过增大浓度项 $[\text{NO}_2^-]^n$ 来补偿温度的不足, 使二者的乘积达到所需水平。

2 试验设计与方法

2.1 试验材料与设备

1) 试验材料主要有: 固定配方的乳胶基质、亚硝酸钠、水。

2) 试验设备包括:

(1) 恒温水浴: 用于控制基质温度 ($30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$)

(2) 密度杯: 用于测量乳化炸药密度

(3) 搅拌器: 用于混合基质和敏化剂

(4) 电子天平: 用于称量原材料

(5) 秒表: 用于计量反应时间

2.2 试验方案

为系统研究基质温度与敏化剂浓度对乳化炸药发泡过程与最终密度的影响, 本研究采用全因子试验设计。

1) 因素与水平

基质温度(A): 设置为 40°C 、 50°C 、 60°C 、 70°C 四个水平。此设计旨在拓宽温度范围, 精细捕捉可能

的临界反应温度点。

亚硝酸钠浓度(B): 设置为 1.2%、1.4%、1.6%、2.0%、2.4%、2.8% (质量分数) 六个水平。

2) 试验过程

每个温度-浓度组合条件下, 均进行 3 次独立重复试验, 以确保数据的可靠性与统计意义。具体步骤如下: 将装有 1 kg 乳胶基质容器置于恒温水浴中加热至目标温度并保持稳定, 随后加入预定质量的亚硝酸钠溶液(固定基质质量的 3.5%), 立即以恒定转速(300 rpm) 搅拌 1 分钟以确保混合均匀, 搅拌开始即开始计时。

3) 数据采集

自反应开始后, 每隔 5 min 使用密度杯测量一次炸药密度, 持续监测至 30 min, 以完整记录密度随时间变化的动力学过程。

2.3 数据处理方法

试验数据处理主要包括以下内容:

1) 对每个试验条件下的 3 次重复测量值, 计算其平均值基于平均密度值, 绘制密度-时间变化曲线, 分析发泡动力学过程。

2) 建立基质温度-浓度匹配模型, 确定最佳匹配关系。

3 试验结果与分析

3.1 基质温度对发泡速率的影响

相同浓度的敏化剂溶液条件下, 不同基质温度对应的炸药密度随时间的变化结果见表 1 ~ 表 6, 变化过程曲线见图 1 ~ 图 6, 试验结果表明: 基质温度对发泡速率有显著影响。高温下反应加速, 低温下反应迟缓。具体表现为:

敏化剂浓度为 1.6% 时, 在基质温度 40°C 条件下, 炸药密度从初始值降至目标密度 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 需约 30 min, 在基质温度 70°C 条件下, 炸药密度从初始值降至目标密度 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 仅需 5 min。

达到目标密度所需时间随温度升高而显著缩短, 这与阿伦尼乌斯方程预测的温度对反应速率的影响规律一致。高温环境下, 反应速率常数 k 增大, 发泡过程加速; 低温环境下, k 减小, 反应速率降低。

3.2 敏化剂浓度对发泡效果的影响

相同温度的基质, 不同敏化剂浓度对应的炸药密度随时间的变化结果如见表 7 ~ 表 10, 变化过程曲线见图 7 ~ 图 10, 试验结果表明, 敏化剂浓度对发泡效果的影响同样显著。在不同温度条件下, 存在最佳的 NaNO_2 浓度范围, 如:

在 40°C 条件下, 最佳 NaNO_2 浓度为 2.0% ~

2.4%, 过低浓度则会导致反应不完全, 炸药密度过大。在 60℃ 条件下, 最佳 NaNO_2 浓度为 1.2% ~ 1.4%, 此时发泡均匀, 密度稳定性好。

表 1 敏化剂浓度 1.2% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 1 Explosive density vs. matrix temperature (1.2% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.23	1.22	1.12	1.10
10	1.20	1.16	1.07	1.06
15	1.19	1.14	1.03	1.02
20	1.17	1.12	1.01	1.00
25	1.16	1.11	0.99	0.99
30	1.15	1.10	0.99	0.98

表 2 敏化剂浓度 1.4% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 2 Explosive density vs. matrix temperature (1.4% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.22	1.20	1.11	1.09
10	1.19	1.15	1.05	1.01
15	1.17	1.12	1.01	0.97
20	1.16	1.11	1.00	0.94
25	1.15	1.10	0.99	0.94
30	1.15	1.10	0.98	0.94

表 3 敏化剂浓度 1.6% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 3 Explosive density vs. matrix temperature (1.6% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.21	1.17	1.10	1.07
10	1.17	1.11	1.02	1.00
15	1.15	1.08	0.97	0.96
20	1.14	1.06	0.95	0.91
25	1.13	1.05	0.95	0.91
30	1.13	1.05	0.95	0.91

浓度过高或过低均会对密度稳定性产生负面影响。浓度过高时, 反应过于剧烈, 产生过多气泡, 导致炸药密度过低; 浓度过低时, 反应速率过慢, 发泡量不足, 炸药密度偏高。

表 4 敏化剂浓度 2.0% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 4 Explosive density vs. matrix temperature (2.0% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.15	1.13	1.07	1.04
10	1.10	1.08	1.00	0.96
15	1.08	1.06	0.96	0.90
20	1.07	1.03	0.94	0.88
25	1.06	1.03	0.93	0.88
30	1.06	1.03	0.93	0.88

表 5 敏化剂浓度 2.4% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 5 Explosive density vs. matrix temperature (2.4% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.13	1.08	1.03	1.02
10	1.08	1.03	0.95	0.92
15	1.06	1.02	0.91	0.86
20	1.03	1.01	0.89	0.85
25	1.02	1.00	0.88	0.85
30	1.02	1.00	0.88	0.85

表 6 敏化剂浓度 2.8% 时炸药密度 (g/cm^3) 与基质温度的关系

Table 6 Explosive density vs. matrix temperature (2.8% sensitizer)				
敏化时间 Sensitization time/min	40℃	50℃	60℃	70℃
0	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.11	1.04	1.02	1.01
10	1.05	1.00	0.92	0.91
15	1.02	0.99	0.88	0.85
20	1.01	0.98	0.86	0.84
25	1.00	0.97	0.86	0.84
30	0.99	0.97	0.86	0.84

表 7 基质温度 40℃ 时炸药密度 (g/cm^3) 与敏化剂浓度的关系

Table 7 Explosive density vs. sensitizer concentration (40℃)						
敏化时间 Sensitization time/min	1.2%	1.4%	1.6%	2.0%	2.4%	2.8%
0	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.23	1.22	1.21	1.15	1.13	1.11
10	1.20	1.19	1.17	1.10	1.08	1.05
15	1.19	1.17	1.15	1.08	1.06	1.02
20	1.17	1.16	1.14	1.07	1.03	1.01
25	1.16	1.15	1.13	1.06	1.02	1.00
30	1.15	1.15	1.13	1.06	1.02	0.99

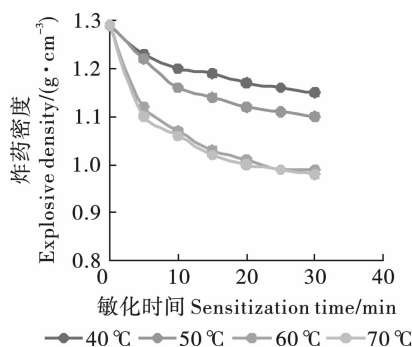


图 1 敏化剂浓度 1.2% 时炸药密度与基质温度的关系

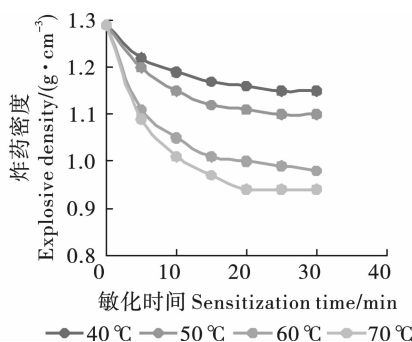
Fig. 1 Explosive density vs. matrix temperature
(1.2% sensitizer)

图 2 敏化剂浓度 1.4% 时炸药密度与基质温度的关系

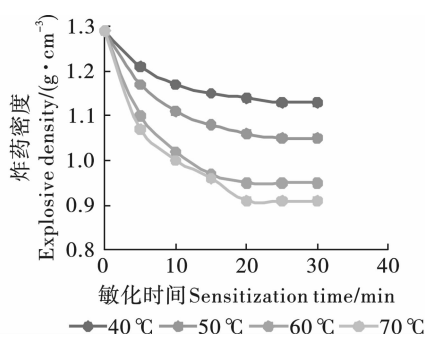
Fig. 2 Explosive density vs. matrix temperature
(1.4% sensitizer)

图 3 敏化剂浓度 1.6% 时炸药密度与基质温度的关系

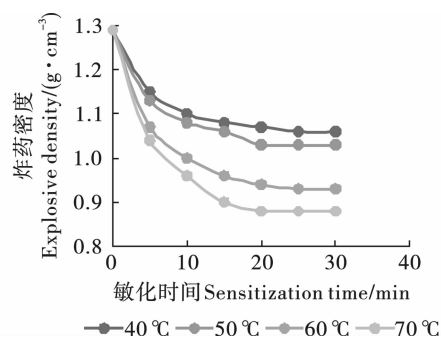
Fig. 3 Explosive density vs. matrix temperature
(1.6% sensitizer)

图 4 敏化剂浓度 2.0% 时炸药密度与基质温度的关系

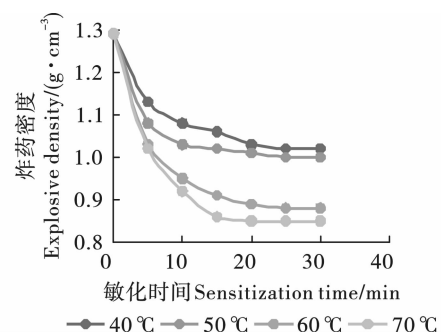
Fig. 4 Explosive density vs. matrix temperature
(2.0% sensitizer)

图 5 敏化剂浓度 2.4% 时炸药密度与基质温度的关系

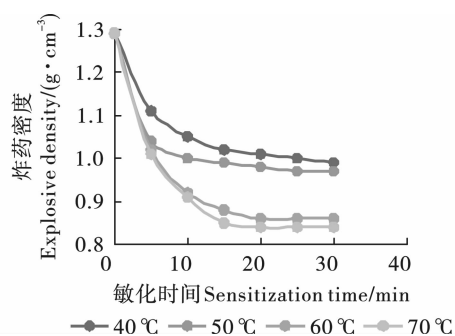
Fig. 5 Explosive density vs. matrix temperature
(2.4% sensitizer)

图 6 敏化剂浓度 2.8% 时炸药密度与基质温度的关系

Fig. 6 Explosive density vs. matrix temperature
(2.8% sensitizer)表 8 基质温度 50 °C 时炸药密度 (g/cm³) 与敏化剂浓度的关系
Table 8 Explosive density vs. sensitizer concentration (50 °C)

敏化时间 Sensitization time/min	1.2%	1.4%	1.6%	2.0%	2.4%	2.8%
0	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.22	1.20	1.17	1.13	1.08	1.04
10	1.16	1.15	1.11	1.08	1.03	1.00
15	1.14	1.12	1.08	1.06	1.02	0.99
20	1.12	1.11	1.06	1.03	1.01	0.98
25	1.11	1.10	1.05	1.03	1.00	0.97
30	1.10	1.10	1.05	1.03	1.00	0.97

表 9 基质温度 60 °C 时炸药密度 (g/cm³) 与敏化剂浓度的关系
Table 9 Explosive density vs. sensitizer concentration (60 °C)

敏化时间 Sensitization time/min	1.2%	1.4%	1.6%	2.0%	2.4%	2.8%
0	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.12	1.11	1.10	1.07	1.03	1.02
10	1.07	1.05	1.02	1.00	0.95	0.92
15	1.03	1.01	0.97	0.96	0.91	0.88
20	1.01	1.00	0.95	0.94	0.89	0.86
25	0.99	0.99	0.95	0.93	0.88	0.86
30	0.99	0.98	0.95	0.93	0.88	0.86

表 10 基质温度 70℃时炸药密度(g/cm³)与敏化剂浓度的关系
Table 10 Explosive density vs. sensitizer concentration (70℃)

敏化时间 Sensitization time/min	1.2%	1.4%	1.6%	2.0%	2.4%	2.8%
0	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
5	1.10	1.09	1.07	1.04	1.02	1.01
10	1.06	1.01	1.00	0.96	0.92	0.91
15	1.02	0.97	0.96	0.90	0.86	0.85
20	1.00	0.94	0.91	0.88	0.85	0.84
25	0.99	0.94	0.91	0.88	0.85	0.84
30	0.98	0.94	0.91	0.88	0.85	0.84

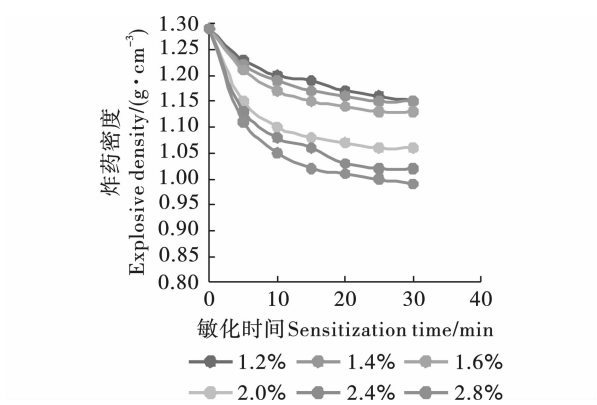


图 7 基质温度 40℃时炸药密度与敏化剂浓度的关系
Fig. 7 Explosive density vs. sensitizer concentration (40℃)

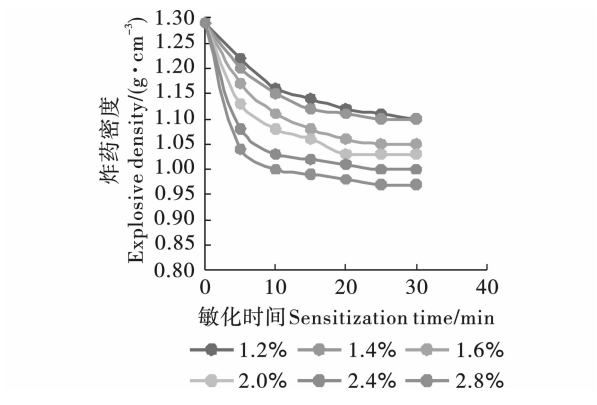


图 8 基质温度 50℃时炸药密度与敏化剂浓度的关系
Fig. 8 Explosive density vs. sensitizer concentration (50℃)

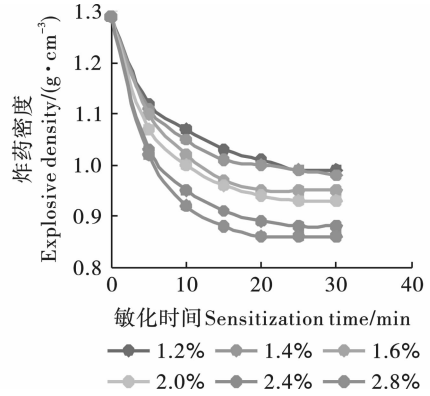


图 9 基质温度 60℃时炸药密度与敏化剂浓度的关系
Fig. 9 Explosive density vs. sensitizer concentration (60℃)

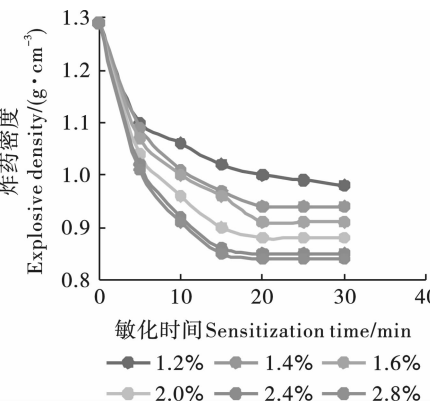


图 10 基质温度 70℃时炸药密度与敏化剂浓度的关系
Fig. 10 Explosive density vs. sensitizer concentration (70℃)

4 现场应用与调控措施

4.1 温度-浓度匹配表的建立

基于试验结果,结合宏大爆破工程集团清远某项目现场实际工程应用数据,建立了适用于不同基质温度条件下的乳化炸药敏化剂配比指导表,见表 11,旨在实现不同温度条件下的最佳密度控制。

4.2 质量控制要点

现场应用中的质量控制要点主要包括:
1) 现场应用中,需根据基质温度及时调整敏化剂浓度。

表 11 混装乳化炸药敏化剂配比指导表
Table 11 Sensitizer dosage guide for bulk emulsion explosives

序号 No.	乳化基质温度 Emulsified matrix temperature/℃	敏化剂配比 Sensitizer ratio	炸药初始密度 Initial explosive density/(g·cm³)	炸药最终密度 Final explosive density/(g·cm³)
1	70	0.9%	1.29	1.08 ~ 1.12
2	60	1.0%	1.29	1.08 ~ 1.12
3	50	1.4%	1.29	1.08 ~ 1.12
4	40	1.8%	1.29	1.08 ~ 1.12
5	70	1.0%	1.29	0.98 ~ 1.02
6	60	1.2%	1.29	0.98 ~ 1.02
7	50	2.4%	1.29	0.98 ~ 1.02
8	40	2.7%	1.29	0.98 ~ 1.02

2) 现场应用中还需注意敏化剂添加后应搅拌均匀,避免局部浓度不均匀。

3) 敏化剂溶液比例建议控制在 3.5%,过高会导致乳胶基质稀释,影响炸药稳定性。

4) 装药前应进行炸药密度测量,确保数据准确性。

5 结论

本研究系统分析了混装乳化炸药基质温度与敏化剂浓度对敏化过程的影响,主要结论如下:

1) 基质温度显著影响发泡反应速率,高温下反应加速,低温下反应迟缓。因此,不同温度条件下需采用不同的敏化剂浓度以确保反应在适当时间内完成并达到目标密度。

2) 敏化剂浓度对发泡效果和炸药密度有重要影响。浓度过高会导致反应过于剧烈,产生过多气泡,使炸药密度不稳定;浓度过低则会导致反应不完全,发泡量不足,炸药密度偏高,不同温度下存在最佳 NaNO_2 浓度范围。

3) 建立了温度-浓度匹配表,为现场应用提供了科学指导。该表考虑了基质温度对反应速率的影响、浓度对发泡效果的影响,可有效控制乳化炸药密度,提高混装乳化炸药爆破稳定性和安全性。

本研究为现场混装乳化炸药的生产质量控制和爆破效果优化提供了重要理论支持和实践指导,有助于解决基质温度与敏化剂浓度不匹配导致的密度不均和爆破效果差等问题,提升工程爆破的安全性和经济性。

参考文献 (References)

- [1] 安振伟,张小勇,黎 勇,等. 智能现场混装炸药车的发展现状与展望[J]. 爆破,2025,42(2):140-145.
- [1] AN Zhen-wei, ZHANG Xiao-yong, LI Yong, et al. Development status and prospects of intelligent site-mixed explosive trucks[J]. Blasting, 2025, 42(2): 140-145. (in Chinese)
- [2] 严正团. 基于现场混装的动态密度调控乳化炸药爆炸性能及破岩能力研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2025.
- [2] YAN Zheng-tuan. Study on the explosive properties and rock-breaking capacity of emulsion explosives based on dynamic density adjustment with site-mixed loading(Doctoral dissertation) [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2025. (in Chinese)
- [3] 刘震宇,谢 强,刘 威,等. 乳化炸药中硝酸铵-亚硝酸钠的发泡动力学研究[J]. 爆破器材,2020,49(3):10-15.
- [3] LIU Zhen-yu, XIE Qiang, LIU Wei, et al. Study on the foaming kinetics of ammonium nitrate-sodium nitrite in emulsion explosives [J]. Explosive Materials, 2020, 49(3):10-15. (in Chinese)
- [4] 赵 宇. 乳化炸药的化学敏化影响分析[J]. 山西化工,2023,43(9):29-30,43.
- [4] ZHAO Yu. Analysis of the influence of chemical sensitization on emulsion explosives[J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(9):29-30,43. (in Chinese)
- [5] 孙永夺,龚 兵,任 斌,等. 现场混装乳化炸药高温敏化工艺技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(5):114-117.
- [5] SUN Yong-duo, GONG Bing, REN Bin, et al. Research on high-temperature sensitization technology of site-mixed emulsion explosives [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(5):114-117. (in Chinese)
- [6] 杨敏会. 现场混装乳化炸药敏化的试验研究[J]. 煤矿爆破,2019,37(6):1-4.
- [6] YANG Min-hui. Experimental study on sensitization of site-mixed emulsion explosives[J]. Coal Mine Blasting, 2019, 37(6):1-4. (in Chinese)
- [7] 孙伦奎,周伟光,赵 乾. 现场混装乳化炸药的密度的控制[J]. 广东化工,2013,40(1):126-127.
- [7] SUN Lun-kui, ZHOU Wei-guang, ZHAO Qian. Density control of site-mixed emulsion explosives[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(1):126-127. (in Chinese)
- [8] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [9] 刘震宇. 乳化基质的化学敏化动力学研究[D]. 南京:南京理工大学,2020.
- [9] LIU Zhen-yu. Study on the chemical sensitization kinetics of emulsion matrix [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] 贾 琼,周伟红,曲保中. 新大学化学[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2024.
- [11] 王 运,胡先文. 无机及分析化学[M]. 4 版. 北京:科学出版社,2016.