

高压物理学报

水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响

李天浩 吴红波 汪泉 黄文尧 孙彦臣 牛草原 黄菓树 叶紫阳

Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive

LI Tianhao, WU Hongbo, WANG Quan, HUANG Wenyao, SUN Yanchen, NIU Caoyuan, HUANG Guoshu, YE Ziyang

引用本文:

李天浩, 吴红波, 汪泉, 等. 水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(3):031302. DOI: 10.11858/gywlb.20240885

LI Tianhao, WU Hongbo, WANG Quan, et al. Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(3):031302. DOI: 10.11858/gywlb.20240885

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240885>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响

Effect of Hexamethylenetetramine Content on the Performance of Ammonium–Amine Explosives

高压物理学报. 2023, 37(5): 055201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230691>

甲酸铵含量对现场混装乳胶基质流变及热分解性能的影响

Influence of Ammonium Formate Content on Rheological and Thermal Decomposition Properties of On-Site Mixed Emulsion Matrix

高压物理学报. 2025, 39(1): 011302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240845>

C_2H_4/N_2O 预混气体的爆轰性能与火焰淬熄特性

Detonation and Quenching Characteristics of Premixed C_2H_4/N_2O

高压物理学报. 2020, 34(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190845>

不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征

Energy and Damage Evolution Characteristics of Rock Materials under Different Water Contents

高压物理学报. 2023, 37(3): 034105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220699>

低温环境对乳化炸药爆炸性能的影响

Effect of Low Temperature Environments on the Explosive Properties of Emulsion Explosives

高压物理学报. 2024, 38(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240712>

模拟高原环境下敏化方式对乳化炸药爆轰性能的影响研究

Effect of Aensitization Methods on Detonation Performance of Emulsion Explosive in Simulated Plateau Environment

高压物理学报. 2024, 38(4): 045202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230838>

水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响

李天浩¹, 吴红波¹, 汪 泉¹, 黄文尧¹, 孙彦臣¹, 牛草原², 黄菓树¹, 叶紫阳¹

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中安联合煤化有限责任公司, 安徽 淮南 232000)

摘要: 为研究水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响, 通过控制水相中的水含量, 制备5组不同水含量的现场混装铵胺炸药。使用扫描电镜观测多孔粒状硝酸铵的微观结构, 用Brinkley-Wilson法计算了炸药的爆热和爆速。测试了不同水含量下多孔粒状硝酸铵的溶解度, 以及铵胺炸药基质的黏度、炸药的浸水电导率和爆速。结果表明: 当水的质量分数由9%增至17%时, 铵胺炸药基质的混合均匀度增加, 初始黏度由218 539 mPa·s降至99 443 mPa·s; 不同水含量炸药浸水3 h后的电导率先由1.416 mS/cm降至1.234 mS/cm, 后升至2.600 mS/cm; 理论爆速由4 943 m/s降至4 716 m/s; 实际爆速受到固体硝酸铵含量影响, 先由3 376 m/s增至3 676 m/s, 后下降至3 631 m/s。实际生产中现场混装铵胺炸药中水的质量分数应控制在13%左右, 此时炸药的抗水性最佳, 实际爆速较高。

关键词: 水含量; 铵胺炸药; 黏度; 抗水性; 爆速

中图分类号: O521.3; O383

文献标志码: A

矿产资源是工业发展的重要基础, 炸药爆破是采矿过程中最常用手段之一^[1], 在矿山爆破成本中占比较大。目前, 工业炸药市场形成了铵油炸药、乳化炸药、水胶炸药三足鼎立的局面, 3种炸药各有缺点: 铵油炸药的爆轰性能低, 储存稳定性差, 且不具备抗水性^[2]; 乳化炸药需要高温、高速剪切的生产条件^[3]; 水胶炸药的原料硝酸甲胺在生产过程中的危险性较大^[4]。针对现有工业炸药的实际情况, 国内外专家进行了很多研究工作^[5-9]。

准能集团研发了一种煤基纳米碳氢硝铵炸药^[10], 使用煤基纳米碳氢材料替代了铵油炸药中的柴油, 研究发现, 相较于传统的铵油炸药, 煤基纳米碳氢硝铵炸药的爆速提升了26.8%; 何志伟等^[11]用铝灰替代乳化炸药中的铝粉, 发现添加质量分数10%的一次铝灰制备所得的乳化炸药与普通含铝乳化炸药的性能差异较小, 但爆破容积提高了约50%; 黄麟等^[12]采用低共熔物、表面活性剂、极性添加剂与硝酸铵水溶液组合添加的方法制备乳化炸药, 发现在水相温度60℃、油相温度50℃的条件下能快速成乳, 乳化炸药的密度为1.18 g/cm³, 爆速达到4 700 m/s。

黄文尧等^[13]研发了一种新型抗水工业炸药, 并针对该炸药进行研究。孙彦臣等^[14]研究硝酸铵细度对铵胺炸药性能的影响时发现, 随着硝酸铵细度的增加, 铵胺炸药的爆速、猛度、储存稳定性都得到了显著提升。胡洁等^[15]研究了六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响, 结果表明, 当六亚甲基四胺的质量分数从5.5%增大至9.5%时, 铵胺炸药的交联时间由7 h延长至13 h, 爆速由3 552 m/s上升至4 070 m/s, 而后又下降至3 663 m/s, 铵胺炸药的表现活化能由93.71 kJ/mol上升至124.71 kJ/mol。Shi等^[16]研究了田菁胶含量和pH值对铵胺炸药性能的影响, 发现当铵胺炸药的pH值为4.4时, 爆速达到最大, 田菁胶的质量分数为0.9%时, 铵胺炸药的抗水性能最佳。

* 收稿日期: 2024-09-06; 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 安徽高校自然科学研究重大项目(2024AH040070)

作者简介: 李天浩(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事工业炸药研究. E-mail: 1099285250@qq.com

通信作者: 吴红波(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆破器材与安全研究. E-mail: hbwu@aust.edu.cn

以上研究着重于六亚甲基四胺含量、多孔粒状硝酸铵细度、田菁胶含量及 pH 值等对铵胺炸药性能的影响, 罕有水含量对现场混装铵胺炸药性能影响的研究, 然而, 水含量关系到铵胺炸药的流动性、抗水性及爆轰性能; 同时, 水在炸药中是惰性成分, 爆轰反应时, 水发生相变会吸收大量热量, 影响炸药的爆热和爆速。因此, 在保证现场混装铵胺炸药爆轰性能的前提下, 提高水含量对铵胺炸药的研发及实际生产应用具有重要意义。

本研究拟制备 5 种不同水含量的现场混装铵胺炸药, 通过 Brinkley-Wilson 法则计算炸药的理论爆热和理论爆速, 通过电导率仪分析水含量对现场混装铵胺炸药抗水性的影响, 对炸药的黏度进行测试, 并结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观测多孔粒状硝酸铵的形貌, 对其爆轰机理进行分析。

1 实 验

1.1 试剂与仪器

试剂: 多孔粒状硝酸铵(pg-AN), 工业级, 河南晋开化工集团有限公司; 硝酸钠(SN), 工业级, 河北轩然化工有限公司; 六亚甲基四胺(hexamethylenetetramine, HMT)、醋酸(acetic acid), 焦作润华化学工业有限公司; 田菁粉, 工业级, 广饶六合化工有限公司; 0 号柴油, 中国石油化工集团有限公司; 去离子水, 自制; 发泡剂, 质量分数为 20% 的亚硝酸钠水溶液, 自制; 交联剂, 焦锑酸钾水溶液, 自制。

仪器: JB90-S 电动搅拌器, 上海梅颖浦仪器制造有限公司; Flex SEM 1000 扫描电镜, 日本 Hitachi 公司; RVDV-1 数字黏度计, 上海平轩科学仪器有限公司; DDS-608 智能多功能电导率仪, 成都世纪方舟科技有限公司; BSW-3A 型爆速测试仪, 湖南湘西州奇博矿山仪器厂。

1.2 铵胺炸药的制备

以表 1 所示的配方为基础, 控制加入水的质量分数, 制备 5 组不同水含量的现场混装铵胺炸药, 其中水的质量分数分别为 9%、11%、13%、15% 和 17%。

现场混装铵胺炸药的制备流程如图 1 所示, 根据表 1 配方称取硝酸钠、六亚甲基四胺、醋酸及不同质量分数的水加入搅拌器(搅拌器转速为 100 r/min), 搅拌均匀后加入多孔粒状硝酸铵, 搅拌至硝酸铵颗粒不再溶解, 制得水相; 称取田菁粉和柴油, 混合均匀后加入搅拌器, 搅拌均匀使溶液完全胶凝, 制得铵胺炸药基质; 加入发泡剂及交联剂进行发泡交联, 制得 5 种不同水含量的现场混装铵胺炸药。

表 1 现场混装铵胺炸药的基础配方

Table 1 Base formula for field mixed ammonium explosive

Ingredient	Mass fraction/%
pg-AN	71.0
SN	2.5
H ₂ O	11.0
HMT	6.5
Acetic acid	6.7
Diesel oil	1.0
Sesbania gum	0.9
Foaming agent	0.3
Cross-linking agent	0.1

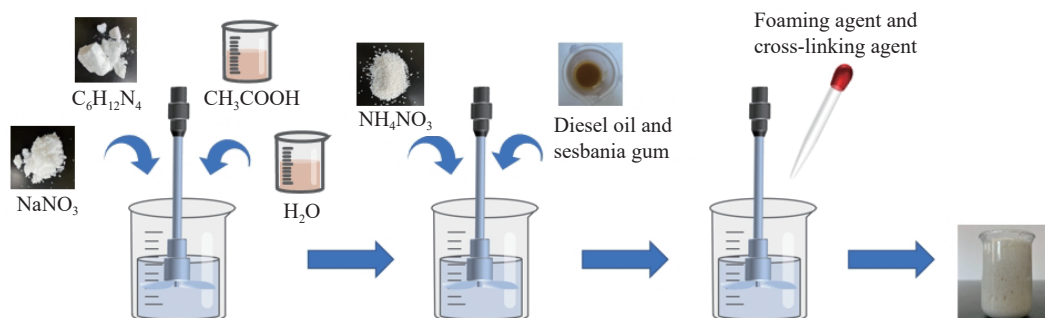


图 1 现场混装铵胺炸药的制备工艺

Fig. 1 Preparation technology of on-site mixed ammonium amine explosive

1.3 性能测试

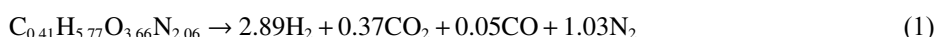
(1) 多孔粒状硝酸铵的内部结构表征: 通过 SEM 观测多孔粒状硝酸铵的内部结构^[17-18], 分析其对现场混装铵胺炸药性能的影响。

(2) 现场混装铵胺炸药黏度测试: 称取不同水含量的现场混装铵胺炸药基质各 200 g, 搅拌均匀, 使铵胺炸药基质充分胶凝^[19]。水平校准黏度计后, 把转子垂直插入炸药基质中心, 启动黏度计, 测量黏度变化数据。

(3) 现场混装铵胺炸药电导率测试: 室温下, 称取制备好的现场混装铵胺炸药样品每组各 20 g, 样品置于 400 mL 去离子水中浸泡, 将电导率仪的电导电极垂直浸入去离子水^[16], 用磁力搅拌器使溶液保持混合均匀, 记录电导率随时间的变化。

(4) 现场混装铵胺炸药爆速测试: 根据国家标准 GB/T 13228-2015 现场混装炸药要求, 使用爆速测试仪对炸药爆速进行测试, 如图 2 所示, 选用外径为 50 mm、内径为 46 mm、管长为 400 mm 的 PVC 塑料管进行爆速测试, 两探针靶线间距 (L) 为 50 mm, 装药后用 80 g 成品乳化炸药作为起爆具, 记录 2 组爆速数据, 取平均值^[20-21]。

(5) 现场混装铵胺炸药的理論爆轰参数计算: 根据经验确定法^[19] 计算不同水含量现场混装铵胺炸药的爆热和爆速。通过 Brinkley-Wilson 法确定炸药爆轰产物^[17, 22]。根据表 1 配方给出爆炸反应方程式



根据盖斯定律计算炸药的理論爆热, 环境温度为 25 °C, 已知炸药各组分及爆炸产物的生成热, 即可确定炸药的定压爆热和定容爆热^[19]

$$Q_p = Q_{p1,3} - Q_{p1,2} \quad (2)$$

$$Q_v = Q_p + nRT \quad (3)$$

式中: $Q_{p1,3}$ 为炸药爆炸产物的定压生成热之和, kJ/kg; $Q_{p1,2}$ 为炸药各组分的定压生成热之和, kJ/kg; Q_p 和 Q_v 分别为炸药的定压爆热和定容爆热, kJ/kg; n 为爆炸反应中各气态产物的物质的量之和, mol; R 为气体常数, 8.314×10^{-3} kJ/(mol·K); T 为环境温度, 298 K^[17]。

由经验公式推断, 炸药爆速、爆热与气体产物的绝热指数相关

$$v_D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_v} \quad (4)$$

式中: v_D 为炸药的理論爆速, m/s; γ 为气体产物的绝热指数, 计算得出 $\gamma=2.29$ 。

2 结果与讨论

2.1 多孔粒状硝酸铵的内部结构

使用 SEM 观测多孔粒状硝酸铵的内部结构, 由图 3 可以看出, 多孔粒状硝酸铵内部因晶体交错形成了大量不规则孔隙, 孔隙直径在 10~100 μm 之间。根据工业炸药热点理论^[23], 晶体间含有的气泡、空腔、空隙可在爆轰波作用下产生绝热压缩形成热点, 因此, 使用多孔粒状硝酸铵作为主氧化剂制作铵胺炸药可增加炸药中的有效热点数量, 提高铵胺炸药的起爆感度及冲击波感度。

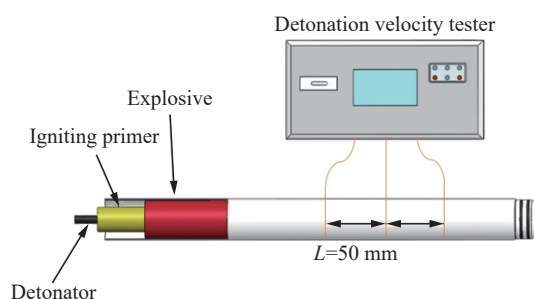


图 2 爆速测试系统

Fig. 2 Detonation velocity test system

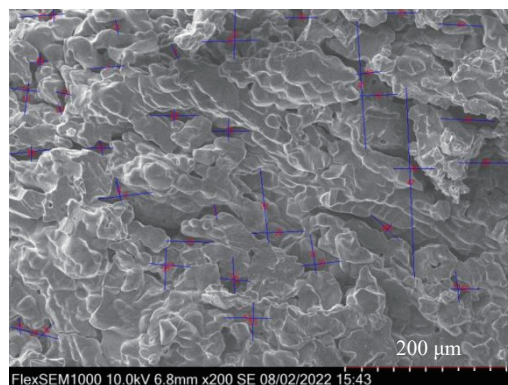


图 3 多孔粒状硝酸铵内部结构 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of the internal structure of porous granular ammonium nitrate

2.2 水含量对铵胺炸药基质外观和黏度的影响

由于田菁胶分子中含有丰富的非离子型羟基,对液态水具有极大的亲和性,因此,田菁胶分子可以分散在常温水中,吸水膨润发生水合反应,从而形成高黏度的胶质溶液。对于现场混装炸药而言,在泵送至炮孔过程中,需要较高的流动性及可泵送性,该性能指标的优劣可通过基质黏度来表征^[14]。

如图 4 所示,制备 5 组不同水含量的现场混装铵胺炸药基质,现场混装铵胺炸药整体呈透明凝胶态,内部不均匀分散着多孔粒状硝酸铵颗粒,外观形貌如稠状米粥。当水含量增加时,硝酸铵颗粒的分布更均匀,颗粒团减少,搅拌时转子与固体硝酸铵颗粒发生摩擦引起的阻塞摩擦感逐渐减弱,炸药混合均匀度及流动性均显著增加。

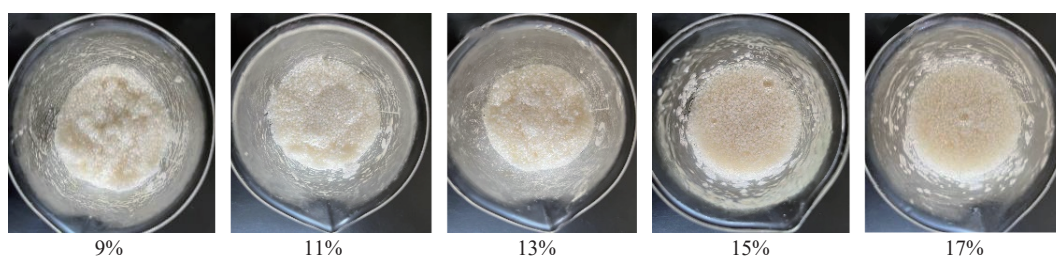


图 4 不同质量分数水的混装铵胺炸药基质的俯视图

Fig. 4 Top views of on-site mixed ammonium amine explosive with different water mass fraction

静置 48 h 后,5 组铵胺炸药基质的形貌如图 5 所示。现场混装铵胺炸药在泵送至炮孔前需经历远程运输^[24],拥有良好的均相稳定性显得尤为重要,即静置储存条件下,铵胺炸药基质的液相水溶胶溶液和硝酸铵颗粒不发生离析,若铵胺炸药基质发生了离析沉淀,则需要重新进行搅拌混合,增加成本。由图 5 可知:当水的质量分数为 9% 时,铵胺炸药基质混合最均匀,未发生离析及沉淀现象;当水的质量分数由 9% 增至 13% 时,铵胺炸药基质上层开始出现轻微离析,小部分硝酸铵固体颗粒开始向下沉淀;当水的质量分数大于 13% 时,铵胺炸药基质发生严重分层,液相浮于烧杯上层,硝酸铵固体颗粒沉淀聚集

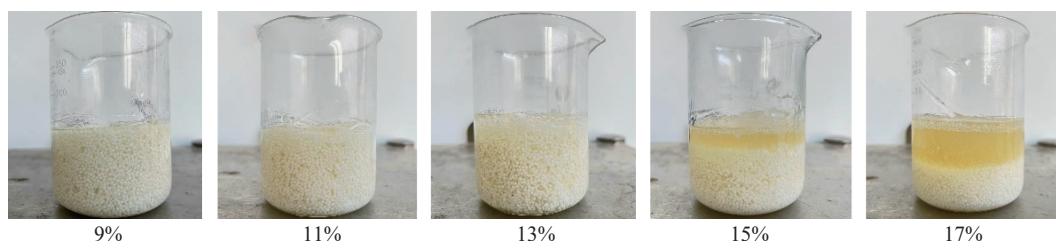


图 5 静置 48 h 后铵胺炸药基质的外观形貌

Fig. 5 Appearances of the matrices of ammonium amine explosive after 48 h

在烧杯底部, 各组现场混装铵胺炸药基质均随着放置时间的增长而发生不同程度的离析。分析认为, 出现该现象的原因可能是固体硝酸铵颗粒的密度大于液相水溶胶溶液, 固液两相的密度差导致重力作用下的固体颗粒具有向下沉淀的趋势。在静置过程中, 液相水溶胶溶液对固体硝酸铵颗粒的包覆力不足以抵抗重力作用, 液相与固体颗粒间无法保持均匀分布而发生了离析和沉淀。

由图 6 和表 2 可知, 铵胺炸药基质的黏度与水含量呈负相关: 当水的质量分数为 9% 时, 初始黏度最大, 为 218 539 mPa·s; 水的质量分数为 17% 时, 初始黏度最小, 为 99 443 mPa·s。这种现象是由于水含量的增加使得炸药中固体硝酸铵溶解度和分散程度增大, 提高了炸药基质的流动性所致。田菁胶分子中包裹了卷曲着的半乳糖侧链, 会限制甘露糖链中甬键的自由旋转, 导致体系黏度增加^[25]; 当水含量提高时, 田菁胶分子在水中进一步溶胀舒展, 卷曲的分子链充分展开, 甘露糖链中甬键受到限制而减弱, 使得铵胺炸药基质的黏度降低。

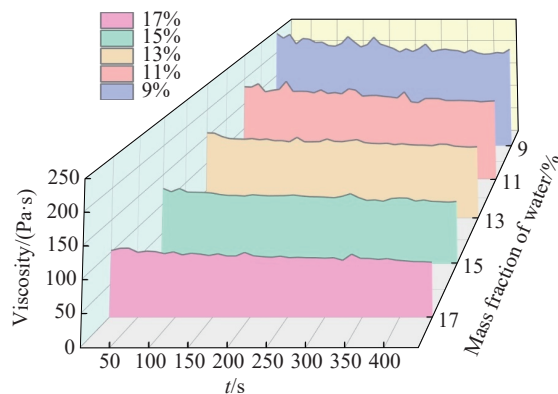


图 6 铵胺炸药基质黏度与水质量分数的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between the viscosity of ammonium amine explosive matrix and mass fraction of water

表 2 不同水质量分数的铵胺炸药基质的黏度(部分)

Table 2 Viscosities of ammonium amine explosive matrix with different mass fractions of water (part)

No.	Mass fraction of water/%	Viscosity/(mPa·s)				
		12 s	24 s	36 s	48 s	40 s
1	9	218 539	213 917	208 948	201 272	208 110
2	11	177 683	165 572	166 761	165 073	165 222
3	13	145 348	140 874	140 316	142 264	138 693
4	15	117 442	110 735	106 030	106 877	104 661
5	17	99 443	94 217	92 879	92 009	93 606

当水的质量分数为 9% 时, 炸药基质体系混合不均匀, 基质中的硝酸铵颗粒发生了不规则的团聚和胶结现象, 在剪切过程中, 黏度计的转子易与不规则的硝酸铵颗粒团发生摩擦, 导致转子在旋转过程中受到的阻力发生变化, 故稳态剪切下炸药基质黏度会出现较大波动。由图 6 可以看出, 当水含量提高时, 硝酸铵颗粒在炸药体系中的分布更加均匀, 颗粒不规则团聚现象减少, 转子与硝酸铵颗粒间的摩擦力分布更均匀, 剪切过程中的黏度波动幅度小, 铵胺炸药基质的黏度曲线趋于平滑。因此, 随着水含量的增加, 现场混装铵胺炸药的流动性及混合均匀度有所提高, 泵送过程中螺杆泵的摩擦损耗降低, 利于实际工程应用, 硝酸铵颗粒团减少, 不易造成输药管堵塞。同时, 由表 2 可以看出, 在固定剪切速率下, 随着剪切时间增加, 炸药基质黏度逐渐降低, 而后消除外力, 静置一段时间后再次进行测试, 基质恢复初始黏度, 说明铵胺基质属于非牛顿流体, 具有触变性。

2.3 水含量对现场混装铵胺炸药抗水性的影响

加入交联剂进行凝胶化的铵胺炸药具有较大的表面张力并且富有黏弹性, 外界环境的水无法直接进入炸药体系, 只能通过扩散作用进行渗透, 其抗水性具体表现为铵胺炸药中溶质在水中缓慢溶失的速率^[25]。溶质在水中溶失得越快, 相同浸水时间内溶液的电导率越高, 炸药的抗水性就越差。为此, 通过电导率仪测试炸药样品在水中的电导率来判断该炸药的抗水性。

由图 7 可以看出: 在铵胺炸药浸泡初期, 周围水的离子电导率不断升高, 主要是炸药胶体与水溶液之间的高浓度差导致炸药中的溶质不断向水中快速扩散; 浸泡 80 min 后, 炸药与水之间的浓度差减小,

扩散速率降低,离子电导率的上升速率逐渐下降;浸泡 200 min 后,炸药与周围溶液间的渗透压接近,基本不再发生扩散现象,离子电导率进入平台期,保持稳定。

铵胺炸药主要依靠其分子链上的邻位顺式羟基及半乳糖侧链产生氢键键合活性,与交联剂中的金属离子发生络合反应,链和链交缠后形成三维体型网络结构,使体系呈凝胶结构^[26],凝胶结构使得炸药体系具有水凝胶特性,炸药体系中的溶质被体型网状结构产生的各个巢穴隔离在内,被连续的水凝胶介质所包围,使得炸药具有良好的抗水性。由图 7 中的关系曲线推断,当铵胺炸药中水的质量分数由 9% 增加至 13% 时,田菁胶分子存在的半乳糖侧链充分展开,更容易与水产生氢键,炸药的胶凝骨架进一步吸水溶胀,骨架结构强度增加,对溶质的包覆及约束能力加强,故铵胺炸药浸泡在水中的离子电导率逐渐降低。由于铵胺炸药的三维网状结构为孔网状,胶凝体系的骨架孔网对于溶质的包覆存在临界直径,当水含量增加时,田菁粉的水合程度增大,胶凝骨架体积及其孔网直径增大,部分孔网超出临界直径,溶质分子的包覆固定能力下降,溶质分子更容易溶失,故水的质量分数由 13% 增大至 17% 时,炸药的电导率反而急剧增加,抗水性大幅降低。

2.4 水含量对现场混装铵胺炸药理论爆热及爆速的影响

不同水含量的现场混装铵胺炸药的水相配方组成及理论爆热、爆速计算结果见表 3。现场混装铵胺炸药氧平衡为 $-0.0224 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 由于铵胺炸药属于含水炸药,其炸药组分中的水不参与反应,在爆炸过程中仅由液态转为气态,故氧平衡与水含量无关。

表 3 现场混装铵胺炸药的理論爆轰参数
Table 3 Theoretical detonation parameters of on-site mixed ammonium amine explosive

No.	Mass fraction/%									$Q_f/$ (J·g ⁻¹)	$v_D/$ (m·s ⁻¹)
	pg-AN	SN	H ₂ O	HMT	Acetic acid	Diesel oil	Sesbania gum	Foaming agent	Cross-linking agent		
1	73.0	2.5	9.0	6.5	6.7	1.0	0.9	0.3	0.1	3430	5454
2	71.0	2.5	11.0	6.5	6.7	1.0	0.9	0.3	0.1	3402	5403
3	69.0	2.5	13.0	6.5	6.7	1.0	0.9	0.3	0.1	3351	5333
4	67.0	2.5	15.0	6.5	6.7	1.0	0.9	0.3	0.1	3299	5234
5	65.0	2.5	17.0	6.5	6.7	1.0	0.9	0.3	0.1	3247	5165

随着水的质量分数由 9% 增至 17%, 炸药的理論爆热由 3430 J/g 降至 3247 J/g , 理論爆速由 5454 m/s 降至 5165 m/s 。水在炸药中是惰性成分, 具有较大的比热容和蒸发潜热, 在爆轰反应中, 水发生了相变, 由液态转变为气态, 这一过程会吸收大量热量, 导致爆轰波阵面上的热量无法有效累积。故随着水含量的增加, 炸药的爆热减少, 引起炸药其他组分反应的能量减少, 炸药的理論爆速随之降低。

2.5 水含量对现场混装铵胺炸药实际爆速的影响

对于现场混装铵胺炸药而言, 硝酸铵在溶液中的溶解度随着水含量的升高而增加, 其余硝酸铵以固体颗粒形式不均匀分散于炸药体系中, 固体硝酸铵含量与水含量呈负相关。实验测得固体硝酸铵含量和铵胺炸药爆速与水含量的关系如图 8 所示。

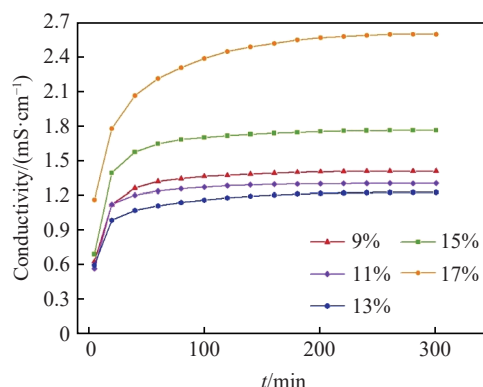


图 7 铵胺炸药电导率随时间的变化曲线

Fig. 7 Conductivity curves of ammonium amine explosive with time

由图 8 中的关系曲线结合多孔粒状硝酸铵内部结构扫描电镜观测结果可知, 多孔粒状硝酸铵内部含有丰富的微孔隙, 在炸药中起到热点的作用。同时, 炸药体系中固体硝酸铵含量与水含量呈负相关, 水是惰性成分, 含有较高的比热容及蒸发潜热, 会降低炸药威力及感度, 从而影响炸药实际爆速。分析认为, 爆轰过程中, 铵胺炸药的水含量与硝酸铵含量等因素均会对炸药爆速产生影响, 且彼此之间存在主次关系。当水的质量分数为 9% 时, 固体硝酸铵含量最高, 炸药中微孔隙数目最多, 但是过多的微孔隙会降低单位体积炸药供给波阵面的能量密度, 且炸药爆轰时过多的微孔隙会阻碍爆轰波的传播, 使得炸药实际爆速降低, 故此时炸药的爆速最低, 为 3 376 m/s; 当水的质量分数由 9% 升至 15% 时, 硝酸铵的溶解度增加, 固体多孔粒状硝酸铵含量及微孔隙数量减少, 有利于爆轰波的稳定传播, 且装药密度会随着固体硝酸铵含量降低而增加, 单位能量密度随之增加, 此时固体硝酸铵含量对炸药爆速的影响高于水含量, 对实际爆速的影响占主要因素, 故爆速逐渐增加, 水的质量分数为 15% 时, 铵胺炸药爆速达到最大, 为 3 676 m/s; 水的质量分数超过 15% 时, 固体硝酸铵含量进一步降低, 对爆轰波传播效率的提高作用不再明显, 同时炸药体系内的热点数量降低导致铵胺炸药的爆轰波感度降低, 此时水含量对炸药爆速的影响占主导地位, 故水的质量分数从 15% 升至 17% 时, 铵胺炸药的爆速呈降低趋势。

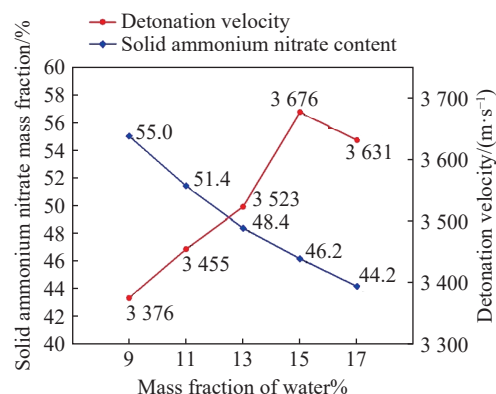


图 8 固体硝酸铵含量和铵胺炸药爆速与水质量分数的关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between solid ammonium nitrate content and detonation speed of ammonium amine explosive with mass fraction of water

3 结 论

(1) 现场混装铵胺炸药基质水含量的增加提高了固体硝酸铵颗粒溶解度及分散均匀度, 降低了炸药均相的稳定性, 其初始黏度由 218 539 mPa·s 降至 99 443 mPa·s。当剪切应力保持不变时, 随着时间的增加, 铵胺炸药基质的黏度逐渐降低, 消除了剪切应力, 可在一段时间内恢复到初始状态。

(2) 水含量对铵胺炸药胶凝结构有较大影响, 水含量增加导致炸药胶凝骨架结构强度增加, 炸药的抗水性提高, 归因于其胶凝骨架孔网结构及田菁胶分子溶胀特性。当水的质量分数大于 13% 时, 炸药的电导率明显增加, 炸药的浸水电导率在水的质量分数为 13% 时最低, 此时炸药的抗水性最佳。

(3) 现场混装铵胺炸药爆轰反应中水发生相变, 吸收了大量的热, 导致爆轰波阵面上的热量无法有效积累, 故水含量增加, 炸药的理论爆热和理论爆速降低。炸药实际爆速受水含量及固体硝酸铵含量共同影响, 固体硝酸铵溶解度增加能提高炸药爆速, 但同时水含量的提高会降低炸药能量, 炸药的 actual 爆速在水的质量分数为 15% 时最高, 为 3 676 m/s。

参考文献:

- [1] 汪旭光. 关于低碳经济与民爆行业发展的思考 [J]. 工程爆破, 2009, 15(3): 1-4, 13.
WANG X G. Thinking on the development of low carbon economy and civil blasting industry [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3): 1-4, 13.
- [2] 牛斌, 李仕洪. 改进型多孔粒状铵油炸药生产工艺的设计 [J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 96-101.
NIU B, LI S H. Design of production technology of improved prilled porous ANFO [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 96-101.
- [3] 唐秋明, 张爱军, 任卫东, 等. 乳化炸药乳化的爆炸危险性研究 [J]. 爆破器材, 2018, 47(1): 1-9.
TANG Q M, ZHANG A J, REN W D, et al. Study on explosion hazard of emulsification of emulsion explosive [J]. Explosive

- [Materials](#), 2018, 47(1): 1–9.
- [4] 潮捷, 黄文尧, 吴红波, 等. 铝粉对化学敏化水胶炸药性能影响的实验研究 [J]. [工程爆破](#), 2021, 27(6): 110–115.
CHAO J, HUANG W Y, WU H B, et al. Study on the influence of aluminum powder on the performance of water gel explosives sensitized by chemical method [J]. [Engineering Blasting](#), 2021, 27(6): 110–115.
- [5] 杜善周, 叶涛, 黄涌波, 等. 用于铵油炸药的煤基纳米碳氢添加剂、其制备方法及应用: CN116375546A [P]. 2023-07-04.
DU S Z, YE T, HUANG Y B, et al. Coal-based nano hydrocarbon additive for ammonium nitrate fuel oil explosive as well as preparation method and application of coal-based nano hydrocarbon additive: CN116375546A [P]. 2023-07-04.
- [6] HE Z W, LI Y Y, YU Y K, et al. Preparation and performance of ANPyO/emulsion explosive composite energetic system [J]. [Propellants, Explosives, Pyrotechnics](#), 2022, 47(11): e202200121.
- [7] ZHANG K M, ZHAO H R. Perspectives in the stability of emulsion explosive [J]. [Advances in Colloid and Interface Science](#), 2022, 307: 102745.
- [8] CHEN J P, MA H H, WANG Y X, et al. Effect of hydrogen-storage pressure on the detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by glass microballoons [J]. [Defence Technology](#), 2022, 18(5): 747–754.
- [9] SUN W B, GAO X F, WANG Y, et al. Thermal safety analysis of on-site emulsion explosives mixed with waste engine oil [J]. [Energies](#), 2022, 15(3): 895.
- [10] 庞伟, 刘娟. 准能集团煤基纳米碳氢硝铵炸药工业化应用取得重大突破 [N]. 中国能源报, 2024-01-08(13).
- [11] 何志伟, 朱文字, 葛玉强, 等. 铝灰替代含铝乳化炸药中铝粉的可行性研究 [J]. [爆破器材](#), 2023, 52(2): 32–38.
HE Z W, ZHU W Y, GE Y Q, et al. Feasibility study on substitution of aluminum powder in aluminized emulsion explosive with aluminum ash [J]. [Explosive Materials](#), 2023, 52(2): 32–38.
- [12] 黄麟, 赵旭东, 席韬, 等. 现场混装乳化炸药中低温制备及性能表征 [J]. [工程爆破](#), 2023, 29(4): 143–148.
HUANG L, ZHAO X D, XI T, et al. Midow temperature preparation and properties characterization of on-site mixed emulsion explosive [J]. [Engineering Blasting](#), 2023, 29(4): 143–148.
- [13] 黄文尧, 牛草原, 孙宝亮, 等. 一种胶状铵胺炸药及其制备方法: CN115650809A [P]. 2023-01-31.
HUANG W Y, NIU C Y, SUN B L, et al. Colloidal ammonium amine explosive and preparation method thereof: CN115650809A [P]. 2023-01-31.
- [14] 孙彦臣, 黄文尧, 梁昊, 等. 硝酸铵细度对铵胺炸药性能的影响 [J]. [火灾药学报](#), 2024, 47(4): 316–323.
SUN Y C, HUANG W Y, LIANG H, et al. Effect of fineness of ammonium nitrate on properties of ammonium amine explosive [J]. [Chinese Journal of Explosives & Propellants](#), 2024, 47(4): 316–323.
- [15] 胡洁, 黄文尧, 孙彦臣, 等. 六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响 [J]. [高压物理学报](#), 2023, 37(5): 055201.
HU J, HUANG W Y, SUN Y C, et al. Effect of hexamethylenetetramine content on the performance of ammonium-amine explosives [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2023, 37(5): 055201.
- [16] SHI R, FANG G J, QIAO C X, et al. Investigation into the gel substrate fabrication of a novel ammonium amine explosive and its generic properties exploration [J]. [Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects](#), 2024, 682: 132918.
- [17] 牛草原, 黄文尧, 刘小辉, 等. 多孔粒状硝酸铵含量对现场混装乳化炸药的性能影响 [J]. [火灾药学报](#), 2023, 46(11): 999–1006.
NIU C Y, HUANG W Y, LIU X H, et al. Influence of porous granular ammonium nitrate content on the performance of field mixed emulsion explosive [J]. [Chinese Journal of Explosives & Propellants](#), 2023, 46(11): 999–1006.
- [18] 王明烨, 韩志伟, 李席, 等. 铝粉粒径对温压炸药爆炸性能及热安定性的影响 [J]. [高压物理学报](#), 2018, 32(3): 035201.
WANG M Y, HAN Z W, LI X, et al. Influence of aluminum particle size on explosion performance and thermal stability of thermobaric explosive [J]. [Chinese Journal of High Pressure Physics](#), 2018, 32(3): 035201.
- [19] 黄文尧, 颜事龙. 炸药化学与制造 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
HUANG W Y, YAN S L. Explosives chemistry and production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [20] 孙宝亮, 黄文尧, 汪泉, 等. 硅藻土为载体的低爆速乳化炸药制备与性能 [J]. [含能材料](#), 2023, 31(1): 26–34.
SUN B L, HUANG W Y, WANG Q, et al. Preparation and performance of diatomite emulsion explosive with low detonation velocity [J]. [Chinese Journal of Energetic Materials](#), 2023, 31(1): 26–34.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 工业炸药爆速测定方法: GB/T 13228—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization

- Administration of the People's Republic of China. Test method of detonation velocity for industrial explosive: GB/T 13228-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [22] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. 氯化镁储氢型乳化炸药的爆炸特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2013, 27(1): 45–50.
CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(1): 45–50.
- [23] 黄寅生. 炸药理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
HUANG Y S. Explosives theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016.
- [24] 李鑫, 查正清. 远程配送乳胶基质专用运输车的研制 [J]. *工程爆破*, 2014, 20(3): 40–42.
LI X, ZHA Z Q. Development of special transport vehicle for long-distance distribution of emulsion matrix [J]. *Engineering Blasting*, 2014, 20(3): 40–42.
- [25] 吕春绪, 刘祖亮, 陆明, 等. 工业炸药理论 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
LU C X, LIU Z L, LU M, et al. Industrial explosive theory [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003.
- [26] MAITI S, KHILLAR P S, MISHRA D, et al. Physical and self-crosslinking mechanism and characterization of chitosan-gelatin-oxidized guar gum hydrogel [J]. *Polymer Testing*, 2021, 97: 107155.

Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive

LI Tianhao¹, WU Hongbo¹, WANG Quan¹, HUANG Wenyao¹, SUN Yanchen¹, NIU Caoyuan²,
HUANG Guoshu¹, YE Ziyang¹

(1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, Anhui, China;

2. Zhongan United Coal Chemical Co., Ltd., Huainan 232000, Anhui, China)

Abstract: In order to study the effect of water content on the performance of porous granular ammonium nitrate on-site mixed ammonium amine explosives, five groups of on-site mixed ammonium amine explosives with different water contents were prepared by controlling the water content in the aqueous phase. We used scanning electron microscope to observe the internal microstructure of porous granular ammonium nitrate, and Brinkley-Wilson method to carry out theoretical calculations on the heat of detonation and detonation velocity of the explosives. The solubility of porous granular ammonium nitrate at different water contents was tested, and the viscosity of the ammonium amine explosive matrix, the immersion conductivity and the detonation velocity were tested. The results show that with the increase of water mass fraction from 9% to 17%, the mixing homogeneity of ammonium amine explosive matrix increased, the initial viscosity decreases from 218539 mPa·s to 99443 mPa·s; the conductivity of the explosive immersed in water with different water content for 3 h first decreased from 1.416 mS/cm to 1.234 mS/cm, and then increases to 2.600 mS/cm; the theoretical detonation velocity decreases from 4943 m/s to 4716 m/s; the actual detonation velocity is affected by the content of solid ammonium nitrate, first increasing from 3376 m/s to 3676 m/s, and then decreasing to 3631 m/s. In actual production, the mass fraction of water in on-site mixed ammonium amine explosives should be controlled at approximately 13%. At this water content, the explosives exhibit optimal water resistance, and achieve a relatively high actual detonation velocity.

Keywords: water content; ammonium amine explosive; viscosity; water-resistance; detonation velocity