

文章编号: 1006-9941(2023)01-0026-09

硅藻土为载体的低爆速乳化炸药制备与性能

孙宝亮, 黄文尧, 汪泉, 潮捷, 檀鑫, 牛草原, 胡洁

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 以粒径为 200~300 μm 的硅藻土颗粒作为乳化基质的载体来制备低爆速乳化炸药。对硅藻土的微观性能进行表征, 分析硅藻土质量分数对炸药的粒径和爆轰机理的影响, 测量炸药的密度、爆速、空中爆炸冲击波压力, 并进行了硅藻土与乳化基质的相容性测试。结果表明, 当硅藻土质量分数由 15% 增加至 35% 时, 炸药粒径与硅藻土含量呈现负相关, 炸药的密度由 $0.79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 降至 $0.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 爆速由 $2561 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $1655 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 空中爆炸冲击波压力峰值由 0.061 MPa 降至 0.023 MPa; 硅藻土的加入对乳化基质的热安定性没有影响, 并且硅藻土和乳化基质在常温与加热条件下均不会相互反应, 储存期 2 d 和 120 d 的炸药, 其爆速和空中爆炸冲击波压力峰值降幅均小于 5%, 说明硅藻土与乳化基质有良好的相容性。

关键词: 硅藻土颗粒; 乳化基质; 低爆速乳化炸药; 热安定性; 相容性

中图分类号: TJ55; O62

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2022092

0 引言

低爆速炸药通常是在粉状硝酸类炸药中加入适量氯化钠、珍珠岩或矿物粉等惰性添加剂来降低炸药能量密度, 用于爆炸焊接、光面爆破和地质勘探等^[1-4]。乳化炸药具有制备工艺简单、应用领域广泛和爆速稳定等特点, 现已作为我国工业炸药主要品种之一^[5]。但乳化炸药爆速高, 如何降低乳化炸药的爆速, 国内外学者进行了广泛的研究。黄文尧^[6]采用乳化基质与泡沫塑料和碳酸盐类矿物粉混合制得一种低爆速爆炸焊接乳化炸药。李雪交^[7]采用玻璃微球作为敏化剂和稀释剂, 通过控制其在乳化基质中的加入量来制得低爆速乳化炸药。周国安^[8]以玻璃微球为敏化剂, 以黏土颗粒为惰性剂制得低爆速乳化炸药。高玉刚^[9]发现乳化炸药中珍珠岩含量达到 30% 时可以作为低爆速乳化炸药。上述低爆速炸药中加入的泡沫塑料密度过

小, 生产过程中易产生粉尘; 玻璃微球加入乳化基质中易成团状, 流散性较差; 膨化珍珠岩结构强度弱, 受力极易压裂, 不适合高粘性乳化基质的混合分散。

硅藻土因其具有空隙率大、比表面积大、吸附能力强、容重小、熔点高、化学性质稳定且具有较好的结构强度等工艺特性, 20 世纪 70 年代以来, 以其卓越的性能大量作为载体物质, 被广泛应用于轻工、化工、建材等领域^[10-12]。Nobel 首先将硅藻土应用于炸药制备领域, 将硅藻土和硝化甘油按照 1:3 的质量比混合制得性能稳定的 Dynamite 炸药^[13]。基于此, 本研究以硅藻土作为乳化基质的载体来制备低爆速乳化炸药, 分析了不同硅藻土质量分数对该炸药的粒径、密度、爆速、空中爆炸冲击波压力的影响, 依据文献^[14]和^[21]对炸药进行了热安定性和储存性实验。为新型低爆速乳化炸药的研究提供参考价值。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂: 硝酸铵(AN), 湖北凯龙楚兴化工集团有限公司; 硝酸钠(SN), 无锡市富友化工有限公司; 柴油、机油、高分子乳化剂(聚异丁烯丁二酰亚胺, T-152), 江南化工股份有限公司; 硅藻土, 长白朝鲜自治县鑫鑫

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-18

网络出版日期: 2022-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(11872002)

作者简介: 孙宝亮(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事乳化炸药性能研究。e-mail: 1601683979@qq.com

通信联系人: 黄文尧(1964-), 男, 教授, 主要从事爆炸作用效应及工业炸药研究。e-mail: 2426712933@qq.com

引用本文: 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 Bao-liang, HUANG Wen-yao, WANG Quan, et al. Preparation and Performance of Diatomite Emulsion Explosive with Low Detonation Velocity[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(1):26-34.

硅藻土有限公司,平均粒径为200~300 μm ,堆积密度0.25~0.27 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

仪器:JFS-550变速分散机,杭州齐威仪器有限公司;BSW-3A型爆速测试仪,湖南湘西州奇搏矿山仪器厂;TESCAN VEGA3 SBH扫描电镜-能谱仪,广州贝拓科学技术有限公司;MS2000激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;TGA2型热重分析仪,瑞士METTLER TOLEDO公司;Ultima型X射线衍射仪,日本理学公司;CY-YD-202压力传感器,YE5853电荷放大器,江苏联能电子有限公司;JEA502电子天平,昆山国晶电子有限公司;滴定管,烧杯,密度测量杯。

1.2 低爆速乳化炸药的制备

按照表1配方称取硝酸铵、硝酸钠和水混合后加热至95~105 $^{\circ}\text{C}$,制得水相,称取机油、柴油、乳化剂混合后加热至90~100 $^{\circ}\text{C}$,制得油相。设置变速分散机转速为1200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,将水相加入油相中搅拌2 min制得乳化基质。将质量分数为5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%的硅藻土颗粒分别与乳化基质混合,混合均匀后冷却,制得8种硅藻土质量分数不同的乳化炸药。其制备流程见示意图1。

表1 乳化基质的配方

Table 1 Formula of emulsion matrix

components	AN	SN	H ₂ O	diesel	engine oil	T-152
mass/%	78.5	5	10	2.5	2	2

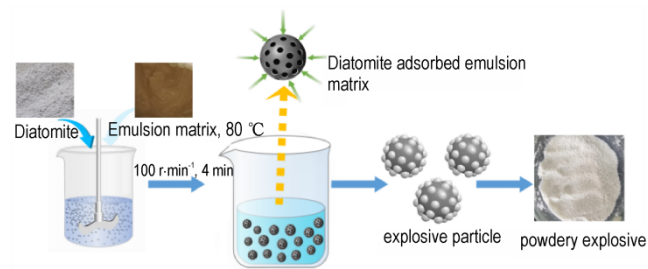


图1 低爆速乳化炸药的制备流程

Fig.1 Preparation process of low detonation velocity emulsion explosive

1.3 性能测试

(1)硅藻土的成分与结构表征:通过能谱仪分析硅藻土的主要成分。用扫描电镜观察单个硅藻土颗粒微观外形和内部空隙^[15]。

(2)炸药粒度测试:使用激光粒度仪对制得的炸药颗粒进行粒度测试^[16]。取3 g炸药于样品池表面,选择适当标准作业程序进行试验,测量颗粒表面积 S 来表示平均粒径。

(3)硅藻土质量分数对乳化炸药密度和爆速的影响:用密度测量杯测量炸药的堆积密度,测量3组取平均值。

采用爆速测量仪测量不同硅藻土质量分数的炸药爆速变化,测量爆速实验的聚氯乙烯管外径为32 mm,内径28 mm,长度500 mm。两探针间距为60 mm,测试2组取平均值^[17]。

(4)空中爆炸冲击波压力测试:分别称取硅藻土质量分数为15%、20%、25%、30%的乳化炸药50 g。在爆炸容器内,将乳化炸药用聚乙烯塑料袋包裹成球形,固定于爆炸容器中央,距压力传感器60 cm(如图2)。炸药起爆时冲击波被传感器接收,产生的电荷信号被电荷放大器放大并由示波器采集,得到空中爆炸冲击波压力-时间曲线。

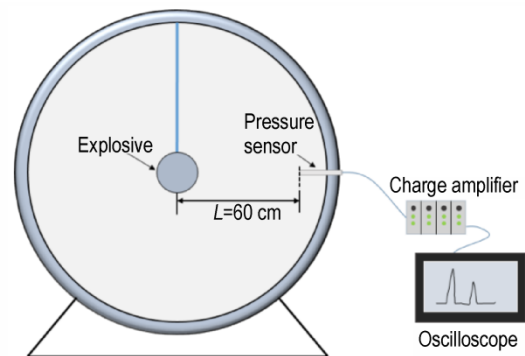


图2 空中爆炸冲击波压力试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of air explosion shock wave pressure test device

(5)乳化基质与硅藻土的相容性测试:采用热重分析仪对制备的乳化基质和不同硅藻土质量分数的乳化炸药进行热重实验;测试条件:样品质量 (3 ± 0.2) mg,升温速率为5, 10, 15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,升温区间为25 $^{\circ}\text{C}$ 至400 $^{\circ}\text{C}$,氧化铝坩埚,氮气流速为50 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;并对热重实验前后的炸药样品和硅藻土进行X射线衍射分析,对比其组分变化;扫描电镜观测储存期为2 d和120 d的低爆速乳化炸药颗粒微观形貌,并测试乳化炸药的爆速和空中爆炸冲击波压力^[18]。

2 结果及讨论

2.1 硅藻土成分和微观形貌表征

对硅藻土进行能谱分析,获取其元素分布和元素质量比例,得出样品的基本成分。能谱分析如图3所示,从图3中可以看出,硅藻土的主要元素有C、O、Na、Al、Si等,其中的主要元素是Si和O,并以 SiO_2 形

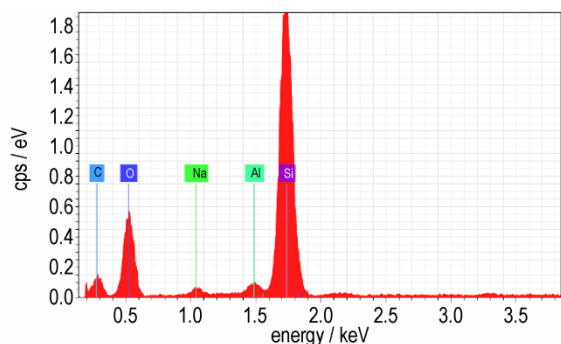
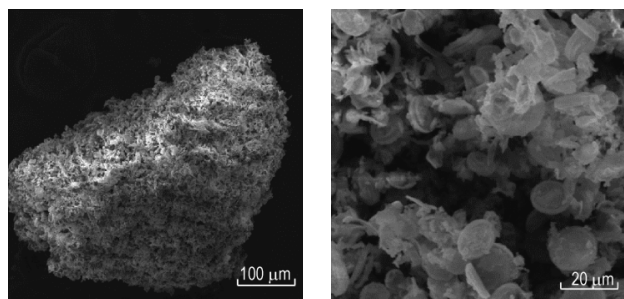


图3 样品能谱分析图

Fig.3 The energy spectrum analysis of the sample

式存在,故硅藻土的主要成分是 SiO_2 。

用扫描电镜观察单个硅藻土颗粒微观外形和内部空隙分别见图4a和4b,从图4a中可以看出,硅藻土颗粒微观外形极不规则,且颗粒外表面含有多个微空隙。从图4b中可以看出,硅藻土内部结构中含有20~50 μm 空隙,这就使得硅藻土具有比表面积大的特征,物质表面质点方向作用力处于不平衡状态,使得硅藻土具有更好的吸附能力^[19],且内部空隙可作为炸药的有效热点。



a. shape of diatomite b. internal structure of diatomite

图4 硅藻土颗粒外形和内部结构扫描电镜图

Fig.4 SEM images of diatomite particle shape and internal structure

2.2 硅藻土质量分数对乳化炸药形貌及粒径变化的影响

为分析硅藻土质量分数对乳化炸药形貌及粒径变化的影响,分别将质量分数为5%、10%、15%、20%、25%、30%的硅藻土颗粒与乳化基质进行分散混合,炸药样品形貌见图5。

从图5可以看出,当硅藻土质量分数为5%或10%时,炸药呈团聚状(图5a~5b),当硅藻土质量分数由15%增至30%(图5c~5f)时,炸药均呈粉状,这是因为硅藻土与乳化基质分散混合的过程中,乳化基质以物理吸附和机械黏附的形式附着在硅藻土颗



图5 不同硅藻土质量分数的炸药样品形貌

Fig.5 Morphologies of explosive samples with different mass fractions of diatomite

粒表面,且每一个硅藻土颗粒对乳化基质吸附和被覆的量是一定的,当硅藻土质量分数为5%或10%时,包覆在硅藻土颗粒上的乳化基质量相对较多,故炸药呈现团聚现象。当硅藻土质量分数达到15%时,由于硅藻土颗粒数目增多使得其表面被覆的乳化基质量相对少,相邻炸药颗粒之间乳化基质接触时产生的黏着力不足以使炸药颗粒黏连,所以炸药开始呈现粉状分散状态。此后,随硅藻土质量分数增加炸药完全为粉状。

对硅藻土样品和硅藻土质量分数为15%、20%、25%、30%的乳化炸药粒度分析如图6。

由图6可知,炸药颗粒的平均粒径与硅藻土添加量呈现负相关,随着硅藻土在乳化基质中质量分数由15%增至30%,炸药颗粒的平均粒径由550 μm 降低

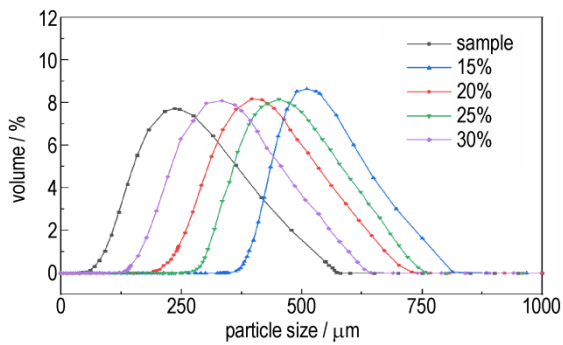


图6 硅藻土样品和不同硅藻土质量分数的乳化炸药粒度
Fig.6 Diatomite sample and particle size of emulsified explosive with different mass fraction of diatomite

至 300 μm 。

将单个硅藻土颗粒近似为一个球体,当乳化基质包覆每个硅藻土颗粒表面后,设乳化基质均匀包覆每个颗粒,如图 7a。图 7a 和 7b 分别为单个硅藻土被乳化基质包覆示意图和相邻炸药颗粒的示意图。

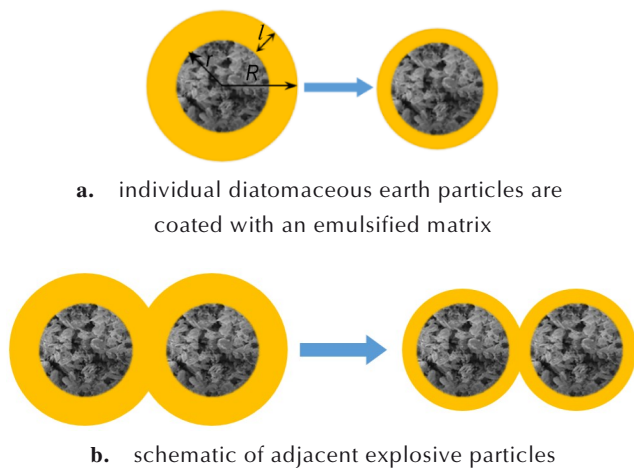


图7 乳化基质包覆硅藻土颗粒示意图

Fig.7 Schematic diagram of diatomite particles coated by emulsified matrix

则包覆厚度可推导为:

$$\begin{cases} l = R - r \\ V = \frac{4n\pi}{3}R^3 - \frac{4n\pi}{3}r^3 \end{cases} \quad (1)$$

$$l = \left(\frac{3V}{4n\pi} + r^3 \right)^{\frac{1}{3}} - r \quad (2)$$

式中, l 为乳化基质包覆厚度, μm ; V 为加入乳化基质的体积, m^3 ; n 为硅藻土颗粒数; r 为硅藻土颗粒半径, μm 。

由式(2)可知,硅藻土被覆乳化基质厚度与硅藻土颗粒数呈负相关,随着乳化基质中硅藻土含量越多,

硅藻土颗粒被覆的乳化基质厚度降低,从而使得炸药的颗粒粒径变小。由图 7b 所示,硅藻土颗粒表面包覆乳化基质,当颗粒间距减小到乳化基质膜开始接触时,基质之间就会产生黏着力,使得颗粒之间的分散能力变差。随着包覆基质膜厚度降低,相邻炸药颗粒之间接触面积从而变小,颗粒之间的黏着力降低,在相同机械力作用下更容易分散^[20],从而使得炸药的形貌由连续相向非连续相过渡,直至炸药形貌完全成为粉状。

2.3 乳化炸药密度、爆速、空中爆炸冲击波压力峰值变化

对硅藻土质量分数分别为 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40% 的乳化炸药进行密度和爆速测试,测试结果见表 2。

表2 不同硅藻土质量分数乳化炸药的密度和爆速

Table 2 Density and detonation velocity of emulsion explosive with different diatomite contents

$\omega/\%$	$\rho_w/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$D/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
5	1.11	misfire
10	0.93	half-exploded
15	0.79	2561
20	0.70	2327
25	0.62	2099
30	0.56	1862
35	0.51	1655
40	0.47	misfire

Note: ω is the mass fraction of diatomaceous earth in % units, D is the explosive explosion velocity, the unit is $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, ρ_w is the density of the explosives in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

由表 2 可知,硅藻土质量分数分别为 5% 和 10% 时,炸药分别发生拒爆和半爆现象,这是由于硅藻土颗粒与玻璃微球和膨化珍珠岩相比,玻璃微球和膨化珍珠岩粒径为 20~200 μm ,密度为 0.05~0.10 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,密度较小,且为中空薄壁结构,当冲击波绝热压缩时易形成热点,加入量为 3% 时就能达到较好的敏化效果^[12]。而硅藻土颗粒粒径为 200~300 μm ,密度为 0.25~0.27 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,虽然其粒径比玻璃微球和膨化珍珠岩大,但密度较大,且内部的生物网状空隙使得本身空隙率降低。当乳化基质包覆硅藻土颗粒后,仅靠这种硅藻土的内部空隙不能形成足够数量的有效热点,故炸药不能稳定起爆和传爆。

当硅藻土质量分数为 15% 时,爆速为 2561 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,密度为 0.79 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,炸药达到稳定爆轰,随着硅藻土质

量分数的增大,爆速逐渐下降,当硅藻土质量分数为35%时,炸药爆速降至 $1655 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,密度降至 $0.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

乳化炸药的密度随着硅藻土质量分数增加而降低,根据混合炸药理论密度公式为

$$\rho_t = \frac{\sum V_i \rho_i}{\sum m_i / \rho_i} \quad (3)$$

式中, ρ_t 为炸药理论密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; m_i 为第 i 组分的质量, g ; V_i 为第 i 组分的体积, cm^3 ; ρ_i 为第 i 组分的密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 硅藻土的密度为 $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 乳化基质密度为 $1.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

炸药空隙率公式为

$$\varepsilon = (1 - \rho_w / \rho_t) \times 100\% \quad (4)$$

式中, ρ_w 为炸药测试密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; ρ_t 为炸药理论密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。计算得出硅藻土质量分数为5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%的炸药的孔隙率分别为0.89%、1.06%、2.46%、2.78%、3.12%、3.45%、3.77%。随着硅藻土加入量的增加,使得炸药空隙率逐渐增大。

通过 Origin2019 软件^[8]对实验结果拟合,得到该型乳化炸药中硅藻土质量分数与爆速的经验公式如下:

$$D = -45.54b + 3239.3 \quad (5)$$

式中, D 为爆速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; b 为乳化炸药中的硅藻土质量分数, 范围为 $0.15 \leq b \leq 0.35$, 式中 R-Square 为 0.9994。

分析认为,当炸药中硅藻土质量分数达到15%时,炸药形貌完全为粉状,硅藻土颗粒被乳化基质包裹形成炸药颗粒。不仅有乳化基质包裹硅藻土颗粒的空隙,同时炸药颗粒之间形成的空隙也增多。如图8所示,当雷管起爆时,这种炸药颗粒内部空隙和颗粒之间的空隙共同形成热点,发生爆轰反应,迅速扩展到整个炸药体系,故炸药稳定起爆和传爆。

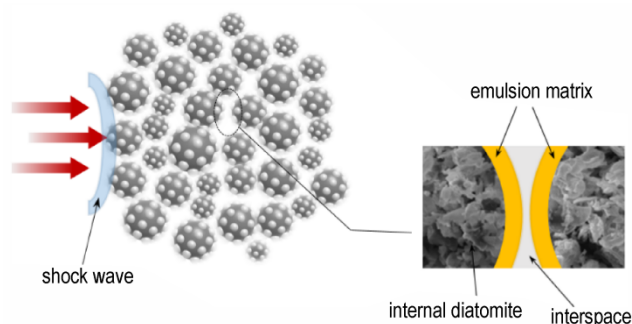


图8 粉状炸药起爆原理示意图

Fig.8 Schematic diagram of initiation principle of powdery explosive

当硅藻土质量分数由15%增加至35%时,炸药爆速和密度随着硅藻土质量分数的增加而降低。这是由于硅藻土质量分数的增多,炸药的密度下降,单位质量炸药的乳化基质量降低,而硅藻土颗粒的主要成分为 SiO_2 , 在爆炸反应时不参与反应,稀释了爆轰反应区的能量,降低了前沿冲击波的压力,进而降低了炸药爆轰传播的速度。当硅藻土质量分数为40%时,硅藻土质量分数较大,炸药的密度降到 $0.47 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,使得单位体积内有效炸药量更低,爆轰反应区所放出的能量不足以支持前沿冲击波传播所需要的能量,故炸药发生拒爆。

对硅藻土质量分数为15%、20%、25%、30%、35%的乳化炸药进行空中爆炸冲击波压力测试,其空中爆炸冲击波压力-时间曲线如图9所示。

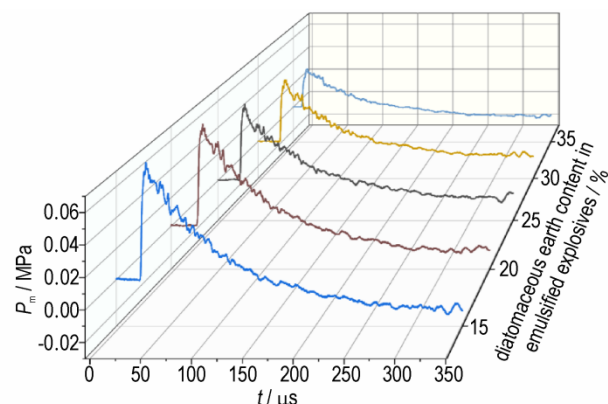


图9 不同硅藻土质量分数乳化炸药冲击波超压-时间曲线

Fig.9 Pressure-time curves of air shock wave of emulsified explosive with different diatomite contents

由图9可以看出,当硅藻土质量分数为15%时,测得炸药的空中爆炸冲击波压力峰值为0.061 MPa,当硅藻土质量分数为35%时,空中爆炸冲击波压力峰值降至0.023 MPa,这是因为炸药的爆轰压力与其装药密度和爆速的平方成正比。炸药的装药密度和爆速随着硅藻土质量分数的增大而降低,使得炸药爆炸时的冲击波能量和速度同时降低,故炸药空中爆炸冲击波压力随着硅藻土质量分数的增加而降低。

2.4 乳化基质与硅藻土相容性测试

2.4.1 TG分析

乳化炸药在其储存或者运输过程中都会产生缓慢的热分解反应,若热量不能及时释放,就有可能造成热量聚集导致爆炸等严重后果^[21]。为研究硅藻土对乳化基质热分解特性影响,对制备的乳化基质和硅藻土质量分数为15%、20%、25%的乳化炸药取样进行热分析实验,其TG曲线如图10所示。

从图10中可以看出,4种试样的TG曲线基本相

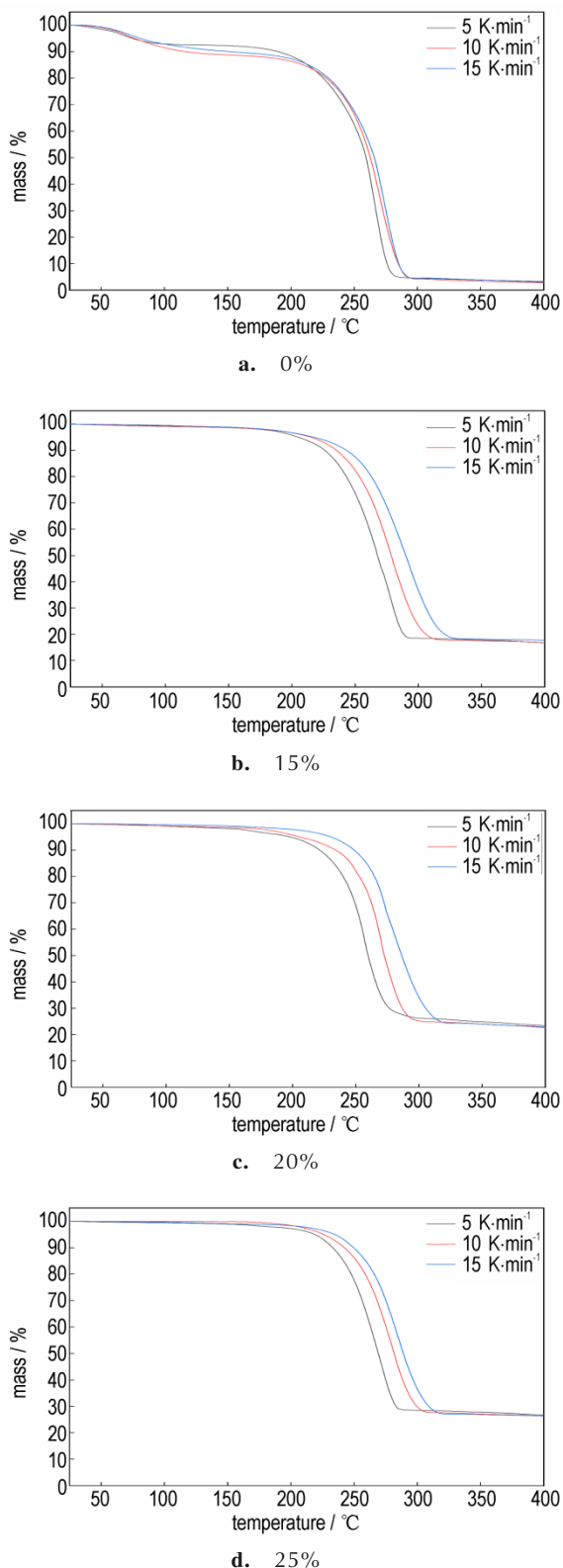


图 10 乳化基质和乳化炸药的TG曲线

Fig. 10 TG curves of emulsion matrix and emulsion explosive

同,表明其热分解过程基本相似,受热后样品的分解主要分为3个阶段。第一阶段为25~200 °C,乳化基质(如图10a)的TG曲线平缓下降,其质量损失均在12%左右。而3种炸药样品(如图10b~10d)质量损失为3%左右,这是由于硅藻土与乳化基质在高温搅拌过程中游离水分大量蒸发,只是少量不稳定的乳化基质的热分解,质量损失较小。第二阶段为200~325 °C, TG曲线迅速下降,在高温作用下,乳化基质中硝酸铵和燃料油开始快速分解,质量损失为70%~80%。第三阶段为325~400 °C, TG曲线趋于平缓,质量几乎不发生变化,4种样品剩余质量分别约为2%、18%、23%、27%。3种乳化炸药反应后的剩余质量与炸药中硅藻土含量基本相同,说明炸药的热分解过程是炸药中乳化基质的分解,硅藻土的加入对基质的热安定性未造成明显变化。

2.4.2 X射线衍射分析

对硅藻土和热重实验后的3种不同硅藻土含量的乳化炸药残留物取样进行X射线衍射分析,其XRD衍射图如图11所示。硅藻土与炸药的残留物在20.8°位置处都显示出了强烈的SiO₂衍射峰,其他位置未出现明显衍射峰值。

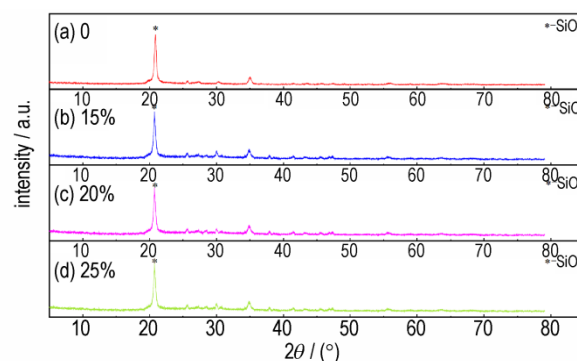


图 11 硅藻土和乳化炸药残留物的XRD衍射图

Fig. 11 XRD patterns of diatomite and emulsion explosive residues

图11中,4种试样的XRD衍射曲线趋势基本相同,样品的晶体结构未发生变化,说明炸药残留物主要成分为硅藻土,未产生其他副反应产物。这表明硅藻土与乳化基质混合后在常温和加热的情况下,硅藻土未与乳化基质相互发生化学反应。

2.4.3 储存稳定性分析

抽取硅藻土质量分数为15%、20%、25%的乳化炸药在储存期为2 d和120 d,任取其中一个颗粒观测到的扫描电镜图见图12,实测炸药的爆速和空中爆炸冲击波压力峰值见表3。

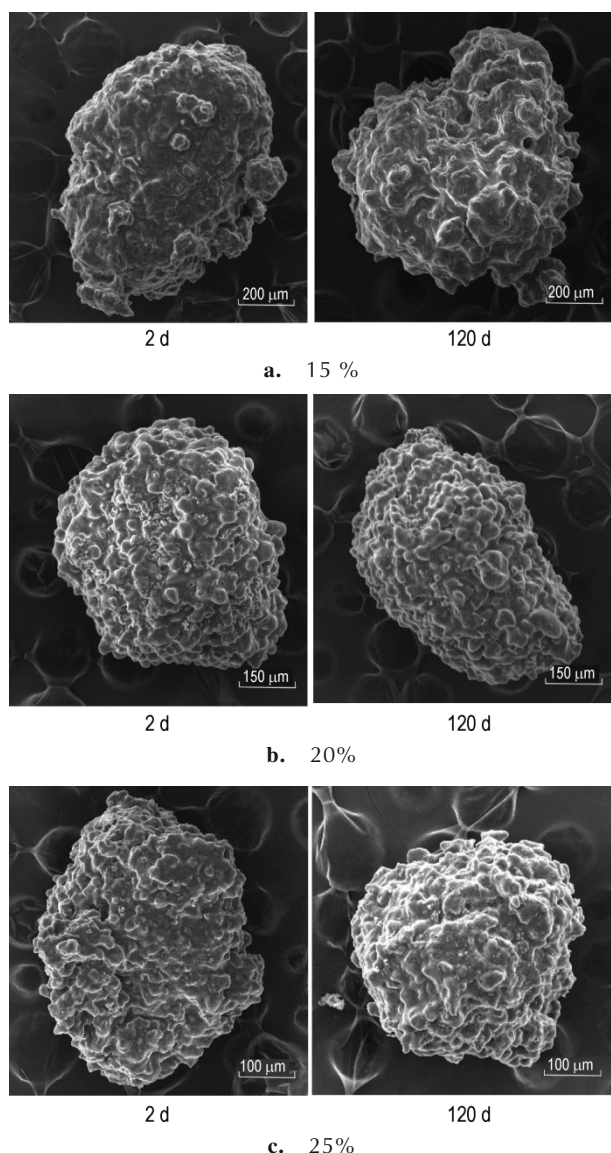


图12 储存期为2 d与120 d的炸药颗粒扫描电镜图

Fig.12 SEM images of explosive particles stored for 2 d and 120 d

表3 不同质量分数硅藻土的炸药样品储存期为2 d和120 d的爆速、空中爆炸冲击波压力峰值和平均粒径

Table 3 The detonation velocity, peak pressure of air explosion shock wave and average particle size of diatomite samples with different mass fractions during storage period of 2 d and 120 d

$\omega/\%$	2 d			120 d		
	v_D / $m \cdot s^{-1}$	p_m /MPa	$S(0.5)$ / μm	v_D / $m \cdot s^{-1}$	p_m /MPa	$S(0.5)$ / μm
15%	2561	0.061	550	2489	0.058	560
20%	2327	0.05	460	2252	0.048	460
25%	2099	0.041	400	2001	0.039	390

Note: v_D is the detonation velocity of the explosive, The p_m is the peak pressure of the air blast shock wave. $S(0.5)$ is the average particle size of the explosive.

从图12可以看出,储存期为120 d的炸药颗粒与制备2 d后的炸药颗粒相比,炸药外形结构完全相同,未发现有乳化基质脱落或析晶现象。由表3可知,储存期为120 d的硅藻土质量分数为15%、20%、25%的乳化炸药的爆速的相较于2 d的爆速分别下降了2.81%、3.22%、4.67%,空中爆炸冲击波压力峰值分别下降了4.92%、4.00%、4.87%,其爆速和空中爆炸冲击波压力峰值变化幅度均小于5%。虽然乳化基质是热力学和动力学不稳定体系,但硅藻土呈颗粒状,且主要成分为 SiO_2 ,当乳化基质包覆在硅藻土颗粒表面时,并没有破坏乳化基质的W/O型结构,同时乳化基质本身具有较好的防水、防潮和防结块功能,故炸药颗粒形貌及粒径不发生变化。在储存120 d后,炸药的爆轰性能未发生明显下降,这说明硅藻土作为载体制备的低爆速乳化炸药储存稳定性良好。

3 结论

(1)硅藻土颗粒外形不规整,其内部为微米级空隙结构,当乳化基质与硅藻土分散混合时,乳化基质包覆在硅藻土颗粒表面,并封闭着空隙,使得低爆速乳化炸药具有一定的自敏化功能。

(2)实验结果表明,当硅藻土质量分数增至15%时,炸药形貌开始呈现粉状。当硅藻土质量分数为15%~35%时,炸药的密度由 $0.79 g \cdot cm^{-3}$ 降至 $0.51 g \cdot cm^{-3}$,由拟合得到炸药的爆速与硅藻土质量分数满足经验公式: $D = -45.54b + 3239.3$ (式中, D 为爆速, $m \cdot s^{-1}$, b 为硅藻土质量分数,%),空中爆炸冲击波压力峰值变化趋势与爆速一致。

(3)通过TG实验证明硅藻土的加入对乳化基质的热安定性没有明显影响,XRD衍射证明硅藻土与乳化基质在常温或加热时不会相互反应。对比储存期为2 d和120 d的硅藻土含量为15%、20%、25%的低爆速乳化炸药,炸药颗粒粒径未发生变化。观察炸药微观形貌,乳化基质未出现析晶脱落现象,其爆速和空中爆炸冲击波超压降幅均小于5%,说明该低爆速乳化炸药具有较好的储存稳定性,硅藻土和乳化基质相容性良好。

参考文献:

- [1] Sherpa B B, Kumar P D, Upadhyay A, et al. Low Velocity of Detonation Explosive Welding (LVEW) Process for Metal Joining[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(10):

- 1554-1565.
- [2] 黄文尧, 余燕, 吴红波, 等. 低爆速膨化铵油爆炸焊接炸药的实验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(6):784-788.
HUANG Wen-yao, YU Yan, WU Hong-bo, et al. Experimental study on expanded ANFO explosive of low detonation velocity used in explosive welding[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2012, 20(6):784-788.
- [3] 堵平, 黄东定, 王泽山. 一种低爆速炸药及其在地震勘探中的应用[J]. 兵工学报, 2005, 26(4):465-468.
DU Ping, HUANG Dong-ding, WANG Ze-shan. Application of low detonation velocity explosive in geologic exploration[J]. *Acta Armentarii*, 2005, 26(4):465-468.
- [4] Sil'Vestrov V V, Plastinin A V. Investigation of low detonation velocity emulsion explosives[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2009, 45(5):124-133.
- [5] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
WANG Xu-guang. Emulsion explosive[M]. 2nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [6] 黄文尧, 张凯, 吴红波, 等. 低爆速爆炸焊接乳化炸药的制备与性能[J]. 含能材料, 2013, 21(3):357-362.
HUANG Wen-yao, ZHANG Kai, WU Hong-bo, et al. Preparation and performance of low detonation velocity emulsion explosives used in explosive welding[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3):357-362.
- [7] 李雪交, 缪广红, 杨明, 等. 蜂窝型低爆速乳化炸药的制备及应用[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2):153-158.
LI Xue-jiao, MIAO Guang-hong, YANG Ming, et al. Preparation and application of low detonation emulsion explosive with honeycomb structure[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(2):153-158.
- [8] 周国安, 马宏昊, 沈兆武, 等. 以黏土颗粒为惰性剂的低爆速乳化炸药爆炸性能及爆轰机理[J]. 火炸药学报, 2018, 41(3):289-293.
ZHOU Guo-an, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, et al. Detonation properties and mechanism of low detonation velocity emulsion explosives with clay particles as the inert agents[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(3):289-293.
- [9] 高玉刚. 珍珠岩对乳化炸药爆炸性能的影响[J]. 火工品, 2021(2):49-52.
GAO Yu-gang. The effect of perlite on explosion property of emulsion explosive[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021(2):49-52.
- [10] YONG Deng, LI Jin-hong, QIAN Ting-ting, et al. Preparation and characterization of KNO_3 /diatomite shape-stabilized functionalization of diatomite and its applications[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3):23-33.
- [11] 彭立华, 顾晓滨, 刘鹏, 等. 硅藻土基相变储能材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5):1006-1016.
PENG Li-hua, GU Xiao-bin, LIU Peng, et al. Diatomite based change energy storage materials-a short review [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(5):1006-1016.
- [12] 王学凯, 王金淑, 杜玉成, 等. 硅藻土功能化及其应用[J]. 材料导报, 2020, 34(3):23-33.
WANG Xue-kai, WANG Jin-shu, DU Yu-cheng, et al. Functionalization of diatomite and its applications[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3):23-33.
- [13] 黄文尧, 颜事龙. 炸药化学与制造[M]. 第1版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
HUANG Wen-yao, YAN Shi-long. Explosives Chemistry And Production[M]. 1nd Edition. Beijing: Metallurgical Industry.
- [14] 程扬帆, 方华, 沈兆武, 等. 乳化炸药中空功能微囊的制备方法及性能表征[J]. 含能材料, 2019, 27(9):792-800.
CHENG Yang-fan, FANG Hua, SHEN Zhao-wu, et al. Preparation and application of functional hollow microcapsules in emulsion explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(9):792-800.
- [15] 周德志, 曹小华, 占昌朝, 等. $\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ /酸改性硅藻土催化剂的制备、表征及催化合成乙酸正丁酯[J]. 化工进展, 2020, 39(2):554-560.
ZHOU De-zhi, CAO Xiao-hua, ZHAN Chang-chao, et al. Preparation, characterization of acid modified diatomite supported $\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ and its catalytic performance for n-butyl acetate synthesis [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(2):554-560.
- [16] 吴攀宇, 刘锋, 魏国, 等. 动态挤压对现场混装乳化炸药稳定性的影响[J]. 含能材料, 2021, 29(12):1160-1167.
WU Pan-yu, LIU Feng, WEI Guo, et al. Influence of dynamic extrusion on stability of field mixed emulsion explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(12):1160-1167.
- [17] 国家市场监督管理总局. GB/T 13228-2015: 工业炸药爆速测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] Hua Fang, Yang-Fan Cheng, Hong Su, et al. Effects of content and particle size of cenospheres on the detonation characteristics of emulsion explosive[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2021, 39(2):197-214.
- [19] 孙剑锋, 张红, 梁金生, 王菲, 段昕辉, 王亚平. 生态环境功能材料领域的研究进展及学科发展展望[J]. 材料导报, 2021, 35(13):13075-13084.
SUN Jian-feng, ZHANG Hong, LIANG Jin-sheng, et al. Research & development of the field of ecological environment functional material and its discipline prospect[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(13):13075-13084.
- [20] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
REN Jun, SHEN Jian, LU Shou-ci. KELI FENSAN KEXUE YU JI-SHU[M]. 1nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.
- [21] 吴红波, 杨柳, 沈占军, 张续, 高郁凯. 二甲基亚砜对乳胶基质耐低温性能及热分解特性的影响[J]. 含能材料, 2022, 30(3):242-249.
WU Hong-bo, YANG Liu, SHEN Zhan-jun, et al. Effect of dimethyl sulfoxide on low temperature resistance and thermal decomposition of emulsion explosive matrix[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(3):242-249.

Preparation and Performance of Diatomite Emulsion Explosive with Low Detonation Velocity

SUN Bao-liang, HUANG Wen-yao, WANG Quan, CHAO Jie, TAN Xin, NIU Cao-yuan, HU Jie

(School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Diatomite particles with size distribution of 200–300 μm were used as emulsifying matrix carrier to prepare low detonation velocity emulsified explosive. The microscopic properties of diatomite were characterized. The effects of diatomite mass fraction on the particle size and detonation mechanism of explosive were analyzed. The density, detonation velocity and air explosion shock wave pressure of explosive were measured. The compatibility of diatomite and emulsified matrix was tested. The results show that when the mass fraction of diatomite increases from 15% to 35%, the particle size of explosive is negatively correlated with the content of diatomite, the density of explosive decreases from $0.79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ to $0.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, and the detonation velocity decreases from $2561 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $1655 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The peak pressure of air explosion shock wave decreases from 0.061 MPa to 0.023 MPa. The addition of diatomite has no effect on the thermal stability of emulsified matrix, and the diatomite and emulsified matrix do not react with each other under room temperature or heating conditions. The detonation velocity and the peak pressure of air explosion shock wave of the explosive stored for 2 days and 120 days drop less than 5%, indicating that diatomite has good compatibility with emulsified matrix.

Key words: diatomite particles; emulsion matrix; low detonation velocity emulsion explosive; thermal stability; compatibility

CLC number: TJ55; O62

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022092

Grant support: Research on propagation law of blast shock wave and dynamic response of cylinder under negative pressure (11872002), National Natural Science Foundation of China, 780000 yuan, 2019.1~2022.12

(责编: 姜梅)