

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.006

铝灰替代含铝乳化炸药中铝粉的可行性研究*

何志伟^① 朱文字^① 葛玉强^① 熊佳文^② 汪扬文^① 孟 涛^①

①安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232000)

②芜湖海螺水泥有限公司(安徽芜湖,241000)

[摘 要] 采用工业制铝过程中产生的废弃副产物铝灰作为铝粉的替代物来制备乳化炸药,能够有效地降低含铝乳化炸药的制备成本,同时也是对于铝灰的一种新型节能回收利用方式。使用 TGA-FTIR 联用热分析、铅柱压缩法、爆破漏斗法、电测法及高低温循环等方法对新型铝灰替代含铝乳化炸药的热安全性、爆轰性能及储存稳定性进行了研究。结果表明:添加质量分数 10% 一次铝灰制备所得的乳化炸药,与普通含铝乳化炸药的热分解性能差异较小,且较基础乳化炸药的做功能力方面有较大幅度的提高,爆破容积提高约 50%,而猛度、爆速及机械感度等性能无明显差距;在储存稳定性方面,与添加铝粉的乳化炸药和基础乳化炸药性能差距较小。铝灰替代铝粉制备含铝乳化炸药具有可行性。

[关键词] 乳化炸药;铝灰;热安全性;爆轰性能;储存稳定性

[分类号] TJ55;TQ560

Feasibility Study on Substitution of Aluminum Powder in Aluminized Emulsion Explosive with Aluminum Ash

HE Zhiwei^①, ZHU Wenyu^①, GE Yuqiang^①, XIONG Jiawen^②, WANG Yangwen^①, MENG Tao^①

① School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232000)

② Wuhu Conch Cement Co., Ltd. (Anhui Wuhu, 241000)

[ABSTRACT] Aluminum ash, the waste by-product produced in the process of industrial aluminum production, is used as a substitute for aluminum to make emulsified explosive. It can effectively reduce the production cost of emulsified explosive containing aluminum, and it is also a new way of energy saving and recycling of aluminum ash. Thermal safety, detonation performance and storage stability of the new type of aluminum-ash emulsion explosive were studied by TGA-FTIR thermal analysis, lead column compression, blasting funnel method, electrical measurement and high and low temperature cycle. Results show that the thermal decomposition performance of the emulsion explosive prepared by adding 10% (mass fraction) primary aluminum ash has little difference from that of the ordinary aluminized emulsion explosive. In addition, compared with the ordinary emulsion explosive, the work capacity of the emulsion explosive with aluminum ash has been greatly improved, and the blasting volume has been increased by about 50%, while there is no obvious difference in the performance of the strength, detonation speed and mechanical sensitivity. There is little difference between the storage stability of emulsion explosive with aluminum ash and that of emulsion explosive with aluminum powder or that of ordinary emulsion explosive. It is feasible to prepare aluminum-containing emulsion explosive with aluminum ash instead of aluminum powder.

[KEYWORDS] emulsified explosive; aluminum ash; thermal safety; detonation performance; storage stability

0 引言

作为现代工业的基础金属材料之一,铝拥有着

诸多优异性质^[1]。从 1956 年开始,世界范围内的铝产量就超过了铜的产量,一直雄霸有色金属产量之首。在当前的工业生产中,铝的产量和用量仅仅低于钢材,是人类应用的第二大金属;而且,作为一种

* 收稿日期:2022-01-29

基金项目:国家自然科学基金(51404006);安徽理工大学研究生创新基金(2021CX2097)

第一作者:何志伟(1979-),男,副教授,硕士,主要从事含能材料配方的研究。E-mail: 751601138@qq.com

金属资源,铝的含量十分丰富。据初步估计,铝的矿藏储存量约占地壳构成物质的 8% 以上^[2]。近些年来,随着我国工业生产的不断发展,铝的需求量也在不断提高,原铝产量稳步攀升,根据国家统计局公布数据,2020 年我国原铝(电解铝)产量达到 3 708 万 t。铝产量的提高同样也带来了其他问题,而对作为工业铝冶炼副产品的铝灰的回收利用以及处理一直是一道难题。2021 年 1 月 1 日起施行的《国家危险废物名录(2021 年版)》将铝灰渣和二次铝灰收录其中。由于铝灰有毒、有害的特性,在生产过程中通常被视为无用垃圾而被废弃。若用铝灰代替铝粉来制备含铝炸药,不仅可以减少铝灰对环境的污染,也可作为绿色炸药的制备提供新的思路。

在研究制备高威力炸药的过程中发现,在炸药中添加适量的金属粉末,能够提高炸药的能量密度,从而对炸药的爆轰性能产生显著的影响^[3-4]。由于铝粉具有高燃烧热、来源较广泛等特点,自 1897 年铝粉首次被加入到炸药中以来,含铝炸药在军用炸药以及工业炸药领域被广泛使用^[5]。乳化炸药具有原料来源广泛、抗水性高、成本低、生产自动化程度高等优点,已成为我国工业炸药中的主导产品^[6],不少研究者将铝粉添加入乳化炸药中,探究含铝乳化炸药的性能。许祖熙等^[7]探究了不同质量分数及不同颗粒度的铝粉对乳化炸药爆速与做功能力的影响;Satonkina 等^[8]对铝参与乳化炸药的反应过程进行了探究;钱海^[9]探究了铝粉对乳化炸药爆轰性能和热安定性的影响;胡浩川^[10]对含铝乳化炸药的爆轰性能进行了研究。研究发现,铝粉对于乳化炸药的综合性能有着较为显著的提高。但由于铝粉的市场价格较高,工业生产实践中考虑到经济因素,含铝乳化炸药在实际应用中并未被广泛使用。

本文中,采用工业副产品铝灰代替铝粉添加入乳化炸药中,可以避免传统方法处理铝灰的高能耗、高污染以及低效率的缺点,既能合理处理并利用铝灰,又能够对乳化炸药的爆轰性能产生积极的影响,还能避免传统含铝乳化炸药成本较高的缺点。

1 试验

1.1 铝灰的来源

铝灰,又被称作铝渣,主要分为一次铝灰与二次铝灰^[11]。一次铝灰是指在电解铝或铸造铝过程直接产生的铝灰,因颜色呈现出的灰白色,所以又被称作白铝灰,它的主要成分是铝以及铝的氧化物。二次铝灰是指经二次铝工业回收处理后产生的铝

灰,它的成分相较于一次铝灰来说复杂得多,主要是少量的铝、铝的氧化物、盐熔剂等形成的黑铝灰以及废铝料等^[12]。铝灰的类型及组成见表 1^[13]。

表 1 铝灰的类型及组成(质量分数)

Tab. 1 Type and composition (mass fraction) of aluminum ash				%
铝灰类型	金属铝	氧化铝	盐	
一次铝灰	15~80	20~85	<5	
二次铝灰	7~50	30~50	30~50	

工业上,铝灰的资源化利用途径主要包括对铝灰中的铝、盐及氧化铝的回收利用。其中,对铝的回收方法大体上可分为热处理回收法和冷处理回收法两类^[14],这两类方法耗费的能源与资源比较多;对盐及氧化铝的回收利用不但需要使用较多的能源与化工原料,回收过程中更是会产生多种有毒、有害的气体^[15]。

1.2 试验药剂及仪器

试验药剂:铝粉;一次铝灰,铝的质量分数约 70%;二次铝灰,铝的质量分数约 30%;硝酸铵;硝酸钠;水;油相(复合蜡、乳化剂);亚硝酸钠;磷酸。

试验仪器:立式行星磨磨机;TGA-FTIR 联用热分析仪;BSW-3A 型智能五段爆速仪;80-3 型落锤仪;WL-111 型摩擦摆;程式式高低温箱。

1.3 样品制备

将铝粉经由研钵研磨,过 60 目筛,装瓶备用;分别将一次铝灰及二次铝灰经球磨机以 360 r/min 的转速研磨 30 min,再将研磨后的铝灰样品分别过 60 目筛,装瓶备用。

乳化基质配方(质量分数):硝酸铵 73%;硝酸钠 8%;水 12%;油相(复合蜡、乳化剂) 7%。

按照上述配方制备乳化基质,以质量分数 0.1% 的亚硝酸钠及质量分数 0.1% 磷酸对乳化基质进行敏化,再按照表 2 所示配方分别将铝粉、一次铝灰及二次铝灰与已制备好的乳化炸药混合,从而制得不同配方的含铝乳化炸药样品。先称量少量样品质量 m ,再将少量样品用薄膜包裹后利用排水法测量体积 V ,通过计算便可得出各样品的密度。

配置好的样品微观结构如图 1 所示。从图 1 可以明显发现,添加铝粉后的样品 B 中仅存在部分大小均匀的铝粉颗粒,而添加铝灰的样品 C 和样品 D 中除了均匀的铝粉微粒,还存在大小不一、分布不均的杂质颗粒。其中,添加二次铝灰的样品 D 中杂质颗粒明显更多。

表 2 不同炸药配方
Tab.2 Different explosive formulations

样品	质量分数 $\omega/\%$				密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
	乳化炸药	铝粉	一次铝灰	二次铝灰	
A	100	0	0	0	1.17
B	90	10	0	0	1.34
C	90	0	10	0	1.38
D	90	0	0	10	1.38

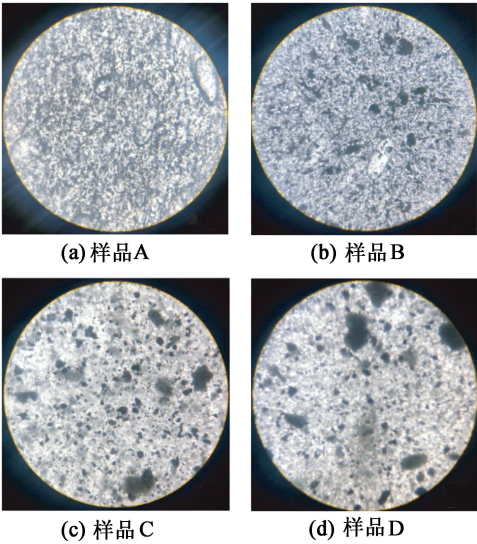


图 1 样品微观显微结构
Fig.1 Microstructure of samples

1.4 TGA-FTIR 联用热分析

采用 TGA-FTIR 联用热分析仪对样品进行热分析,并对析出气体进行红外光谱检测。设置试验条件为:氧化铝敞开式坩埚,动态气氛为 N_2 ,气体流速为 30 mL/min ,升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$,升温区间为 $30\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$,波数范围为 $800\sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.5 做功能力

采用爆破漏斗法对样品炸药的做功能力进行了测定。爆破漏斗法是指将被测炸药药包按照统一的标准(相同质量、相同形状、相同大小等)埋入介质中相同的深度进行爆破;通过比较爆破产生的爆破漏斗的最小抵抗线及爆破半径来比较炸药的做功能力。

选取均质河沙作为介质,在整平的介质表面挖出深度为 20 cm 、直径 3 cm 的孔,再将由不同样品炸药制作的定型、定量药包埋入孔中,填满沙子。引爆药包,测量最小抵抗线 W 及爆破半径 R ,计算出爆破容积

$$V=\frac{1}{3}\pi R^2W。$$

(1)

将爆破容积 V 作为不同样品炸药的做功能力的比较标准。

1.6 猛度

采用铅柱压缩法对样品的猛度进行测定。按照 GB/T 12440—1990 标准,准备好雷管、铅柱、钢片及钢底座等,将炸药样品装入药包,布置好试验装备。引爆样品后,对铅柱压缩高度进行测定,用铅柱被压缩前、后的高度差表示各样品的猛度。计算公式为

$$\Delta h=h_0-h_1。$$

(2)

式中: Δh 为铅柱压缩高度; h_0 为压缩前铅柱的平均高度; h_1 为压缩后铅柱的平均高度。

1.7 爆速

采用电测法对样品进行爆速测定。按照 GB/T 13228—2015 标准,提前制备好探针及药包等。将爆破测速仪、探针及药包按要求布置,采用两段式测爆速,设置靶距 50 mm 。当炸药引爆样品后,爆轰波在炸药中传播,探针受热后表面绝缘漆融化,电路导通,记录一次信号,爆速仪通过测量探针信号间的间隔时间,进而对爆速进行测定。每组样品重复测试两次,取平均值。

1.8 机械感度

按照 GJB 772A—1997 标准中的方法 601.3 测量炸药的撞击感度。试验前,用乙醇清洗击柱及击柱套,设置 80-3 型落锤仪的落锤高 30 cm ,单发药量 $(50\pm 2) \text{ mg}$,25 次试验为 1 组。每份样品做两组试验,取平均值。

按照 GJB 772A—1997 标准的方法 602.1 测量炸药的摩擦感度。试验前,用乙醇清洗滑柱及滑柱套,单发药量 $(20\pm 2) \text{ mg}$,25 次试验为 1 组。每份样品做两组试验,取平均值。

1.9 储存稳定性

利用高低温循环测试法对样品的储存稳定性进行测定。设置低温 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、8 h 和高温 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、16 h 进行循环,直至药品有明显的析晶、破乳现象为止。期间每隔 24 h 观察 1 次,析晶后利用显微镜观察微观结构。

2 结果与分析

2.1 TGA-FTIR 联用热分析

用铝灰替代含铝乳化炸药中的铝粉时,由于铝灰中含有少量无机盐成分,需分析铝灰在高温环境下的析出产物及分解作用。对铝灰进行 TGA-FTIR 联用热分析。如图 2 所示。

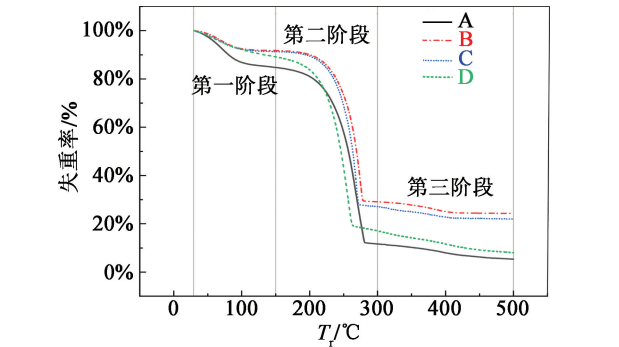


图2 样品的TGA图
Fig.2 TGA of samples

由图2可以得出:第一阶段(30~150℃),样品皆处于失水阶段,基础乳化炸药样品A较其他3种样品含水量大,因此失重较多,曲线处于下方;在100~200℃区间,样品A、样品B及样品C处于相对稳定状态。对于样品D,主要成分之一的二次铝灰中含有大量成分复杂的无机盐(氮化铝、碳化铝等)以及部分结晶水。在高温环境下,氮化铝、碳化铝等无机盐相互反应,放出气体,结晶水发生挥发^[16]。因此,相较于样品B、样品C,样品D失重现象更为明显。第二阶段(150~300℃),各样品均发生强烈的失重现象,并伴随大量气体的放出;主要是由复合油相和铝粉与硝酸铵及其盐氧化燃烧形成的。其中,A样品曲线失重约75%,残留物约15%;D样品失重约70%,残留物约19%;B样品、C样品失重约60%,残留物约20%。第三阶段(300~500)℃,各样品曲线趋于平缓,样品内物质反应近乎完全,剩余残留物在高温下较为稳定。

图3为第二阶段(150~300℃)不同样品热分解析出气体的红外光谱图。对红外光谱进行解析可知:所有乳化炸药样品在热分解放热过程中都产生了大量的一氧化碳气体。以样品A产生的气体红外光谱曲线作为参考,可以发现,样品B曲线较样品A曲线在1500~2000cm⁻¹波段多出数峰,即加入铝粉会对乳化炸药热分解的气体产物产生一定的影响。以样品A、样品B产生的气体红外光谱曲线作为参考,可发现样品C曲线在1500~2000cm⁻¹及3500~4000cm⁻¹波段多出数峰。分析可知:样品C中一次铝灰所含的少量盐在高温环境下发生自分解,乳化炸药内硝酸铵等其他成分也发生反应产生气体。以样品A、样品B、样品C产生的气体红外光谱曲线作为参考发现,样品D曲线在多个波段出现大量的波峰;主要原因为二次铝灰中含有大量的成分复杂的无机盐,这些无机盐在高温环境中发生自分解及相互反应,从而产生大量成分复杂的气体。

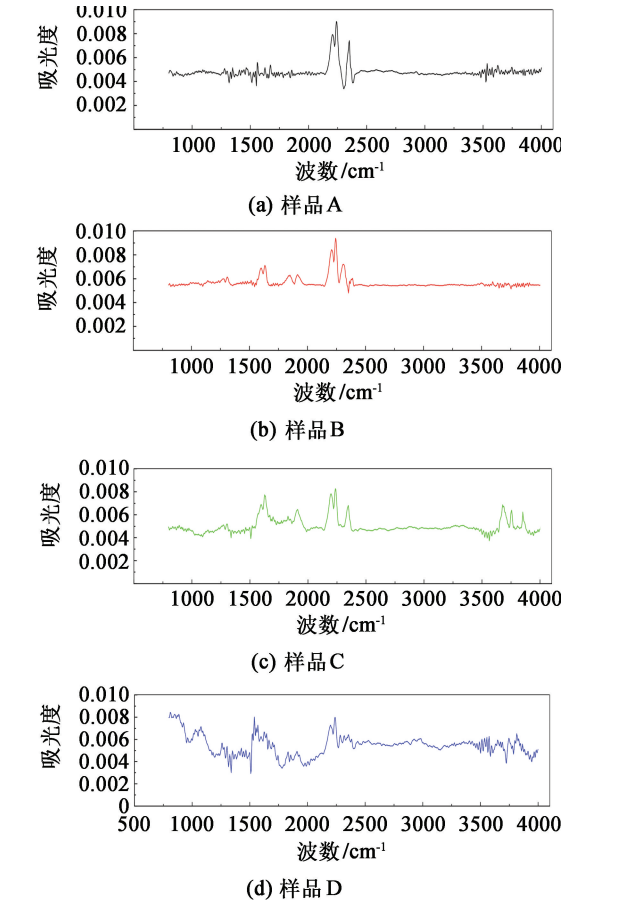


图3 不同样品高温环境下析出气体的红外光谱
Fig.3 Infrared spectra of gases precipitated from different samples under high temperature environment

结合TGA-FTIR联用热分析所得数据及图2、图3所示相关分析可知:一次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药与普通含铝乳化炸药的热分解性能差异较小;与二次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药相比,热分解产生气体成分较为简单。二次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药与基础乳化炸药、含铝乳化炸药、一次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药在热分解过程中的差异比较大,放出成分复杂的各类气体。

2.2 爆轰性能

通过爆破漏斗法、铅柱压缩法及电测法对样品的做功能力、猛度及爆速等爆轰性能进行测定,结果如表3所示。

试验结果表明:

添加铝粉的乳化炸药样品B较基础乳化炸药样品A的最小抵抗线及爆破半径有大幅度增加,爆破容积提升约77.6%,做功能力显著增强。添加一次铝灰的乳化炸药样品C较基础乳化炸药样品A的最小抵抗线及爆破半径有较大幅度增加,爆破容

表 3 爆轰性能测试结果

Tab.3 Test results of detonation performances

样 品	做功能力			猛度 (铅柱 压缩高度)/ mm	平均 爆速/ (m·s ⁻¹)
	最小抵 抗线/ cm	爆破 半径/ cm	爆破 容积/ cm ³		
A	27.0	40.0	45 239	17.7	4 804
B	34.0	47.5	80 333	18.9	4 886
C	32.0	45.0	67 858	17.4	4 778
D	28.5	41.0	50 170	16.2	4 640

积提升约 50.0%，做功能力增强明显；较添加铝粉的乳化炸药样品 B 的最小抵抗线及爆破半径有所降低，爆破容积降低约 15.2%。添加二次铝灰的样品 D 较基础乳化炸药样品 A 的最小抵抗线及爆破半径有所提高，但并不明显，爆破容积提升约 10.9%，做功能力有一定的提升；较添加铝粉的乳化炸药样品 B 及添加一次铝灰的乳化炸药样品 C 的爆破容积明显降低，做功能力降低明显。铝粉具有氧化热高的特点，能大幅增加炸药的爆热^[17]；因此，样品 B、样品 C、样品 D 较样品 A 的做功能力更强。一定程度内，做功能力与含铝乳化炸药中的铝含量成正比关系^[18]，相同质量的铝、一次铝灰及二次铝灰中的铝含量依次下降，故样品 B、样品 C、样品 D 的做功能力依次降低。

猛度试验铅柱压缩效果如图 4 所示。通过测量分析后得出：添加铝粉后的乳化炸药较基础乳化炸药的猛度差距较小，样品 B 较样品 A 猛度提升为 6.7%；添加一次铝灰的乳化炸药样品 C 较样品 A 下降约 1.7%，较样品 B 猛度下降约 7.9%；添加二次铝灰的乳化炸药样品 D 较样品 A 猛度下降更为明显，降低了约 8.5%，较样品 B 下降约 14.3%。分析认为，猛度的大小主要取决于爆炸的能量输出是否集中，爆炸完成时间越短，猛度越大。



图 4 样品压缩后铅柱

Fig.4 Lead column of samples after compression

而添加铝粉后的乳化炸药较基础乳化炸药的爆速有微弱的提升，样品 B 较样品 A 的爆速提高约 1.7%；添加一次铝灰的乳化炸药样品 C 较基础炸

药样品 A 及样品 B 爆速有所降低，较样品 A 爆速降低约 0.5%，较样品 B 降低约 2.2%；添加二次铝灰的乳化炸药样品 D 较样品 A、样品 B、样品 C 爆速明显降低，样品 D 较样品 A 爆速降低约 3.4%，较样品 B、样品 C 分别降低约 5.0%、2.9%。

分析认为，添加质量分数 10% 的铝粉及铝灰对乳化炸药的爆速有一定的影响。主要是由于加入铝粉后，铝粉在炸药的爆炸反应过程中并非充当惰性物质，而是参与二次反应；在爆轰反应区上，铝粉反应会吸收炸药用于爆轰波传播的能量，同时自身反应释放能量，产生的能量在反应波正面上促进了爆轰波能量的增加。在铝粉添加质量分数为 10% 时，二次反应的能量对爆速的增加有一定的贡献；而铝灰中不仅含有铝粉，还有大量杂质，大多数杂质在爆炸反应中充当惰性物质，稀释了样品，减少了爆炸用于爆轰波传播的能量。因此，含铝灰的样品爆速有所降低，但杂质添加量有限，对于整体的爆速影响并不大。

综上所述：铝灰替代含铝乳化炸药比基础乳化炸药的爆轰性能均有所提高。其中，一次铝灰替代含铝乳化炸药较基础乳化炸药爆破容积提升约 50.0%，铅柱压缩高度下降约 1.7%，爆速下降约 0.5%，做功能力显著提高，爆速和猛度变化较小；二次铝灰替代含铝乳化炸药较基础乳化炸药爆破容积提升约 10.9%，铅柱压缩高度下降约 8.5%，爆速降低约 3.4%，做功能力虽有提高，但不明显。

2.3 机械感度

测得 4 组样品在设定试验条件下均未发生爆炸，机械感度为 0。分析认为：添加的铝粉或铝灰均匀地混合在乳化基质内；在受到冲击和摩擦后，乳化基质能够起到缓冲的作用，抑制热点的产生；同时，乳化基质自身含水量较高，机械感度很低。因此，在加入铝粉或铝灰后，乳化炸药的机械感度没有受到影响。

2.4 储存稳定性

通过高低温循环试验测试各样品的储存安定性。观察样品的储存情况如图 5 所示。

添加二次铝灰的样品 D 首先在第 4 d 破乳析晶，药品表面能明显看见硝酸铵结晶；通过显微镜观察，能观察到大量针状硝酸铵晶体，乳胶粒子明显减少。添加一次铝灰的样品 C 在第 10 d 破乳析晶。紧接着添加铝粉的样品 B 在第 12 d 破乳，样品表面均有白色晶体析出。没有添加铝粉和铝灰的基础乳化炸药样品 A 在第 14 d 出现明显破乳现象；由于样品颜色较淡，表面析出白色晶体不明显，但药品已经

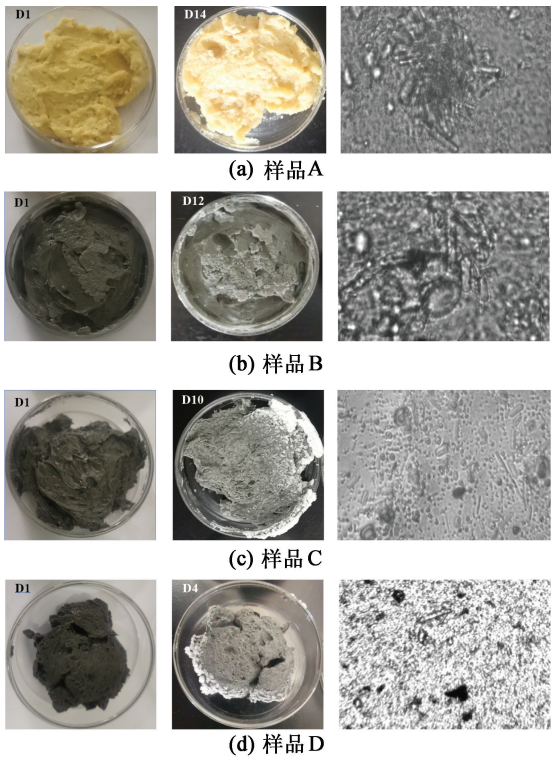


图 5 高低温循环后的样品对比及微观结构图

Fig.5 Comparison of samples after high and low temperature cycling treatment and their microstructure

有明显颗粒感,油包水结构已经被破坏。因此,加入铝粉和铝灰会对炸药的储存安定性造成不利影响。其中,添加二次铝灰的作用最为明显。这是因为,二次铝灰中含有较多的杂质,杂质中含有氧化铝、氮化铝及多种盐类化合物,这些杂质会影响硝酸铵的溶解度,促进晶体的成长成核,针状晶体和杂质中的微粒会刺破界面膜,进而破坏乳胶基质的稳定性。而一次铝灰和铝粉的加入对乳化炸药储存稳定性影响比二次铝灰的影响要小。因为相较于二次铝灰,一次铝灰和铝粉组分主要为铝粉或铝的氧化物,较为单一,铝粉粒子表面较为光滑,对乳化基质的影响较小,对乳化炸药的储存安定性影响较小,且性能与基础乳化炸药较为接近。

3 结论

1) 添加质量分数 10% 的一次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药与普通含铝乳化炸药的热分解性能差异较小;与二次铝灰替代铝粉制备所得的乳化炸药相比,热分解产生的气体成分简单。

2) 添加质量分数 10% 的一次铝灰的乳化炸药比基础乳化炸药的做法能力有较大幅度的提升,爆破容积提高约 50%;而对于猛度和爆速的影响较

小,猛度下降约 1.7%,爆速下降约 0.5%。添加二次铝灰的乳化炸药较基础乳化炸药做功能力稍有提升;但猛度和爆速明显降低,较基础乳化炸药其猛度降低了约 8.5%,爆速降低了约 3.4%。

3) 添加质量分数 10% 的一次铝灰或铝粉后,乳化炸药在储存安定性上性能差距较小,且与基础乳化炸药性能接近;因此,使用一次铝灰替代铝粉制备含铝乳化炸药具有可行性。

4) 将含铝乳化炸药中的铝粉用铝灰代替,有利于降低含铝乳化炸药的成本、提高其经济效益。这是一种新型的回收利用铝灰的方法,符合行业绿色发展的理念。

参 考 文 献

[1] 冯倩. 水平管道中铝粉爆炸冲击波传播特性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
FENG Q. Study on propagation characteristics of shock wave of aluminum dust explosion in horizontal pipe [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.

[2] 吴晔康. 工业纯铝表面等离子电解氧化膜层生长机理及耐蚀性能研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
WU Y K. Investigation on growth mechanism and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on commercial pure aluminium [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

[3] 黄开书, 万力伦, 陈洋, 等. 含某金属粉炸药爆轰性能分析 [J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 94-96.
HUANG K S, WANG L L, CHEN Y, et al. Analysis of detonation performance of explosives containing metal powder [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(9): 94-96.

[4] VOSKOBOINIKOV I M, KOTOMIN A A. Calculation of detonation parameters for explosive mixtures with inert additions [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1986, 21(5): 93-97.

[5] 龚悦. 高能添加剂对乳化炸药爆轰性能及热分解特性的影响研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
GONG Y. Influence of high energy additive on detonation properties and thermal decomposition characteristics of emulsion explosive [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.

[6] 王娜峰. 乳化炸药能量提高及能量输出结构的若干因素研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
WANG N F. Studies on energy improvement and energy output structure of emulsion explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.

- [7] 许祖熙, 段卫东, 刘瑞, 等. 铝粉含量及颗粒度对乳化炸药做功能力的影响[J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 86-90.
XU Z X, DUAN W D, LIU R, et al. The effect of aluminum content and granularity on workability of emulsion explosives [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 86-90.
- [8] SATONKINA N P, BORDZILOVSKY S A, DANILKO D A, et al. Influence of aluminum on the characteristics of detonating emulsion explosives[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1128: 012063.
- [9] 钱海. 铝粉对乳化炸药爆炸性能和热安定性的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
QIAN H. Effect of aluminum powder on detonation performance and thermal stability of emulsion explosives [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [10] 胡浩川. 含铝乳化炸药爆炸性能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
HU H C. Explosion performance research on aluminum-containing emulsion explosive [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016.
- [11] 曹云霄, 王志强, 李国锋, 等. 工业铝灰资源化利用及管理政策研究现状与展望[J]. 环境保护科学, 2020, 46(4): 128-136.
CAO Y X, WANG Z Q, LI G F, et al. Research status and prospects of industrial aluminum dross utilization and management[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(4): 128-136.
- [12] 邢修君, 吴跃东. 国内外铝灰资源化利用技术发展现状[J]. 环境工程, 2021, 39(3): 148-152.
XING X J, WU Y D. Review on development on the utilization of aluminum dross [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(3): 148-152.
- [13] MESHRAM A, SINGH K K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: a review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 130: 95-108.
- [14] 李远兵, 孙莉, 赵雷, 等. 铝灰的综合利用[J]. 中国有色冶金, 2008, 4(6): 63-67.
LI Y B, SUN L, ZHAO L, et al. Utilization of aluminum ash [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008, 4(6): 63-67.
- [15] 沈凌峰, 王丽, 徐芮, 等. 铝灰的处理技术、环境影响评价及相应管理政策[J]. 金属矿山, 2021(7): 16-26.
SHEN L F, WANG L, XU R, et al. Treatment technology, environmental evaluation and the corresponding management policies of aluminum ash [J]. Metal Mine, 2021(7): 16-26.
- [16] 李勇, 彭莉, 王海斌, 等. 二次铝灰高温焙烧脱氮固氟试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 133-140.
LI Y, PENG L, WANG H B, et al. Study on removal of fluoride and nitride in secondary aluminum dross by high temperature roasting [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 133-140.
- [17] 张虎, 谢兴华, 郭子如, 等. 铝粉含量对乳化炸药性能影响[J]. 含能材料, 2008, 16(6): 738-740.
ZHANG H, XIE X H, GUO Z R, et al. Effect of aluminum powder content on performance of emulsion explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(6): 738-740.
- [18] ADEOSUN S O, SEKUNOWO O I, TAIWO O O, et al. Physical and mechanical properties of aluminum dross [J]. Advances in Materials, 2014, 3(2): 48-51.