

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.022

废旧炸弹露天浅埋爆炸销毁次生灾害 控制技术研究

韩学军^{1,2}, 刘兵兵¹, 文韬³, 崔哲森³, 孙金山³, 刘晓康⁴

(1. 湖北凯龙工程爆破有限公司, 荆门 448000;

2. 湖北凯龙化工集团股份有限公司 武汉高新设计研究院, 武汉 430205;

3. 江汉大学 精细爆破全国重点实验室, 武汉 430056; 4. 武汉市公安局治安支队, 武汉 430077)

摘要: 针对废旧炸弹露天浅埋爆炸销毁过程中伴生的飞散物、粉尘、冲击波、噪声及振动等次生灾害, 提出一套综合防护技术体系。该体系以“源头减量—过程削弱—定向泄压—末端拦阻”为主线, 集成多项协同控制措施: 采用聚能诱爆技术以降低等效爆炸总药量; 利用水凝胶包覆爆炸体, 以降低爆生气体温度并阻滞破片飞散; 通过防爆纤维毯与 EPS 泡沫构成不耦合装药坑, 削减气体压力峰值并实现靶向泄压; 同时辅以柔性防护网拦截填塞物飞散, 从而显著削弱浅埋爆炸对周边环境的影响。试验结果表明: 水凝胶的蒸发速率显著低于等量清水, 可有效延长吸热降温过程; 在相同装药量下, 聚能装药对钢管的炸断能力约为普通装药的 2 倍。武汉市废旧爆炸物品集中销毁工程实践进一步验证: 综合防护坑的粉尘飘散范围明显收窄, 填塞包装物最大飞散距离为 50 m, 销毁后现场未发现残余器材。研究成果可为城市周边受限场地废旧炸弹的安全销毁提供技术参考与工程支撑。

关键词: 废旧炸弹; 爆炸销毁; 浅埋防护; 聚能诱爆; 防灾减灾

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0222-11

Research on Secondary Hazard Control Technology for Open-air Shallow-buried Explosive Disposal of Obsolete Bombs

HAN Xue-jun^{1,2}, LIU Bing-bing¹, WEN Tao³, CUI Zhe-sen³, SUN Jin-shan³, LIU Xiao-kang⁴

(1. Hubei Kailong Engineering Blasting Co., Ltd., Jingmen 448000, China;

2. Wuhan High-tech Design and Research Institute of Hubei Kailong Chemical Group Co., Ltd.,

Wuhan 430205, China; 3. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University,

Wuhan 430056, China; 4. Public Security Management Detachment of Wuhan Municipal

Public Security Bureau, Wuhan 430077, China)

Abstract: To address the secondary hazards, including flying debris, dust, shock waves, noise, and vibration, that accompany the open-pit shallow-buried explosion disposal of obsolete bombs, this paper proposes an integrated protective technology system. The system follows the main line of ‘source reduction, process attenuation, directional pressure relief, terminal interception’ and integrates multiple synergistic control measures: shaped-charge induced detonation is adopted to reduce the equivalent total explosive charge. Meanwhile, the hydrogel is used to wrap the ex-

收稿日期 (Date of reception): 2026-07-19

网络首发日期 (Published online): 2026-08-19

作者简介: 韩学军 (1969-), 男, 湖北天门人, 正高级工程师、学士, 主要从事企业管理和爆破技术研究, (E-mail) 1975825070@qq.com。

通信作者: 刘兵兵 (1991-), 男, 安徽潜山人, 工程师、学士, 主要从事工程爆破技术研究, (E-mail) 1099829300@qq.com。

About the author: HAN Xue-jun (1969-), male, born in Tianmen city, Hubei province, professor-level senior engineer, bachelor of science, mainly engaged in enterprise management and blasting technology, (E-mail) 1975825070@qq.com.

Corresponding author: LIU Bing-bing (1991-), male, born in Qianshan city, Anhui province, engineer, bachelor of science, mainly engaged in engineering blasting technology, (E-mail) 1099829300@qq.com.

plosive charge to lower the detonation gas temperature and impede fragment projection, and a decoupled charge pit constructed with blast-resistant fiber blankets and EPS foam is employed to reduce the peak gas pressure and achieve targeted pressure relief. Besides, the flexible protective nets are supplemented to intercept ejected stemming materials, thereby significantly mitigating the environmental impact of shallow-buried explosions. Experimental results show that the evaporation rate of hydrogel is significantly lower than that of an equal volume of water, effectively prolonging the endothermic cooling process. Under the same charge weight, the shaped charge has approximately twice the capability of a conventional charge in severing steel pipes. The centralized disposal practice of obsolete explosive articles in Wuhan further verifies that the integrated protective pit markedly narrows the dust dispersion range, with the maximum projection distance of stemming and packaging materials being 50 m, and no residual hardware was found at the site after disposal. The research findings can provide technical reference and engineering support for the safe disposal of obsolete bombs in confined sites adjacent to urban areas.

Key words: obsolete bomb; explosive disposal; shallow-buried protection; shaped-charge initiation; disaster prevention and mitigation

废旧炸弹主要指战争遗留、仍具有部分或全部杀伤破坏威力的航空炸弹、炮弹、手榴弹、地雷、鱼雷等,也包括制式弹药和土法自制弹药。部分未爆炸弹药长期残留于土地或水域中,随着工程建设推进,这类弹药被陆续发现。为避免安全事故,通常需要集中收存并实施销毁。

废旧炸弹常用销毁方法包括爆炸法、燃烧法、水溶解法和化学分解法等。黄鹏波等认为^[1],国内外废旧弹药常规销毁方式主要有焚烧、爆破、掩埋、深海倾倒、切割和机械拆分等。相关新技术包括聚能切割、射孔弹销毁、爆炸装置摧毁、高热剂处理、导爆索切割、磨料水切割和高压液氮低温切割等。

燃烧法、水溶解法和化学分解法通常需要先拆卸或切割弹体,再处理内部装药。废旧炸弹年代久远,弹体锈蚀严重,装药成分和感度难以准确判断。拆卸、水刀切割或高热剂处理均可能扰动引信或装药,后续近距离补充处置风险更高。因此,工程实践中多采用爆炸法销毁。

诱爆爆炸法可一次性销毁弹体,相对其他前置处置方式对弹体的扰动小,同时也避免操作人员近距离作业。但该方法会产生破片和填塞物飞散、粉尘、振动、冲击波和噪声等次生灾害。以往销毁多选择河湖沙滩、海滩、废弃矿山等空旷区域,并通过深坑或硐室降低危害。随着城市建设推进,适宜场地逐渐减少。废旧弹药又不宜长距离转运,因而就近开展安全销毁成为现实选择。

在城市周边废弃矿山等场地销毁,销毁深坑和室往往又难以开挖。浅埋销毁虽然便于组织施工,但对飞散物、粉尘和振动控制提出了更高要求。本文结合小尺度试验、现场验证和武汉市废旧爆炸物品集中销毁实践,提出一套适用于露天浅埋销毁场景的综合防护技术体系。

1 浅埋爆炸销毁次生灾害分析

1.1 飞散物

飞散物是废旧炸弹爆炸销毁的主要次生灾害。其来源主要包括弹体破片、沙袋碎屑和填塞物中的碎块等。对于废旧航空炸弹等大装药弹体,破片飞散风险更为突出。章克凌等提出^[2],无防护条件下,地面销毁炮弹时,防止弹片伤人的安全距离宜为2000~2500 m。

浅埋销毁时,飞散物受爆炸气体压力、温度、泄压方向和覆盖结构共同影响。通过降低爆炸气体压力峰值、降低爆生气体温度、设置靶向泄压通道,并对填塞物实施柔性拦阻,可减小飞散物影响范围。

1.2 冲击波及噪声

露天爆破容易产生较强冲击波和噪声。我国军事防护工程中,人员轻度伤害的冲击波超压允许值通常取0.02 MPa。该值主要依据防止耳膜破裂确定。根据《爆破安全规程》^[3],露天裸露爆破时,掩体内避炮作业人员的防冲击波安全距离可按式(1)估算。

$$R_k = 25Q^{1/3} \quad (1)$$

式中: R_k 为防冲击波安全距离,m; Q 为一次爆炸总药量,kg。

结合式(1)和既往销毁经验,采用浅埋爆炸销毁时,结合《爆破安全规程》及废旧爆炸物品销毁相关安全管理要求,浅埋销毁作业应严格控制单次起爆药量,并根据待销毁弹药类型、现场环境及保护对象合理确定警戒范围。

1.3 粉尘及有害气体

爆炸销毁前应严格进行弹种鉴别,剔除毒气弹、生物弹和燃烧弹等特殊弹种。一般弹药爆炸销毁产生的有害气体与常规爆破类似,主要为碳、氮氧化

物。粉尘主要来自填塞物受爆炸气体冲击后的抛撒和破碎。

粉尘控制可从两方面开展。一是减少散土直接填塞,优先采用装袋填塞、表面覆水袋和爆前润湿等措施。二是在爆炸体表面布置水凝胶,气化吸热降低爆轰产物温度,同时气化产生的水蒸气吸附粉尘颗粒,促进粉尘沉降。

1.4 爆破振动

废旧炸弹内装炸药和诱爆炸药共同作用,会产生一定爆破振动。多坑同时销毁时,可采用坑间微差起爆,并结合不耦合装坑方式减小振动影响。

年鑫喆等研究表明^[4],炸药在岩体空腔内爆炸

时,岩体振动小于填实爆炸。随着耦合程度降低,岩体振速呈减小趋势。空腔的存在使部分爆炸能量以冲击波形式在腔体内耗散,作用于岩体的压力降低,从而减小振动和应力幅值。该结论为浅埋销毁中采用不耦合装坑提供了参考。

2 浅埋爆炸销毁综合防护技术体系

露天浅埋销毁的防护目标不是单一削弱某一类灾害,而是同时控制飞散物、粉尘、振动和冲击作用。基于这一目标,本文将综合防护思路概括为“源头减量—过程削弱—定向泄压—末端拦阻”。各环节的技术措施和作用机理见表1。

表 1 综合防护技术体系
Table 1 Comprehensive protection technology system

防护环节 Protection link	技术措施 Technical measure	主要作用对象 Main acting object	作用机理 Action mechanism
源头减量 Source reduction	聚能诱爆、多点同步起爆 Shapedcharge initiation, multi-point synchronous detonation	诱爆药量、弹体破片 Initiating charge, projectile fragments	提高局部切割能力,减少不必要装药量,增强可靠诱爆 Improve local cutting capacity, reduce unnecessary charge mass and enhance reliable initiation
过程削弱 Process weakening	水凝胶包覆 Hydrogel coating	高温爆生气体、粉尘 Hightemperature explosion-generated gas, dust	汽化吸热,降低温度,促进粉尘沉降 Absorb heat via vaporization, lower temperature and promote dust settlement
能量缓冲 Energy buffering	防爆纤维毯、EPS 泡沫不耦合装坑 Explosionproof fiber blanket, EPSfoam decoupling pit	冲击波压力峰值、破片初速度 Peak shockwave pressure, fragment initial velocity	吸能缓冲,延长压力作用过程,降低瞬时冲击 Absorb energy for buffering, prolong pressureacting process and reduce transient impact
定向释放 Directional release	排气泄压管 Exhaust pressurerelief pipe	爆炸气体、填塞物 Explosion gas, stemming	引导气体向安全方向释放,降低上抛作用 Guide gas to release toward safe directions and weaken upwardthrowing effect
末端拦阻 Terminal interception	柔性防护网、沙袋配重 Flexible protective net, sandbag counterweight	沙袋碎屑、填塞包装物 Sandbag debris, stemming packaging	迟滞抛掷速度,缩小飞散范围 Retard throwing velocity and narrow scattering range

2.1 聚能诱爆减药量技术

宋桂飞等研究表明^[5],采用聚能爆破方式销毁航弹具有可行性。该方法可在保证销毁效果的同时减少炸药用量,并提高安全性和环保性。聚能诱爆药包铺贴于弹体上表面后起爆。诱爆炸药先形成向外扩散的

爆炸气团,随后诱爆弹体内装药。向上运动的爆炸破片受到上方爆炸气团抑制,飞散程度随之降低^[6]。

在此基础上,可采用聚能装药和多点同步起爆方式,利用爆轰波对撞和聚能效应提高销毁可靠性。常见航弹销毁所需装药量见表2。

表 2 销毁航弹所需装药量
Table 2 Required blasting charge for aerial bomb disposal

航弹重量 Aerialbomb weight/kg	25 ~ 50	100	250	500
所需装药量 Required charge mass/kg	0.5	1	2	5

航弹或炮弹壁厚通常为 10~26 mm,诱爆药量可按钢板炸断面面积确定^[7]。杨军等开展了废旧炸弹诱爆药量对比试验^[8]。结果表明:仅按经验公式取最大药量时,未必能击穿弹径 40 cm、壁厚 1.5 cm 的航弹^[9]。这说明弹体表面积较大时,装药集中度会显著影响诱爆效果。因此,除药量外,还应合理确定装药直径、厚度和铺贴位置。

实际销毁作业中,还应考虑乳化炸药 TNT 当量较低等因素。可在弹体上表面主要部位铺贴线装药量为 5~10 kg/m 的聚能诱爆药包,并在相邻聚能药包间隔处平铺直径 50 mm 以上的乳化炸药药卷。该布置可使待销毁炸弹上表面被较均匀覆盖,从而增强诱爆效果,并对向上破片形成一定被覆抑制。

2.2 水凝胶吸热降温与抑尘技术

高吸水树脂是一类特殊功能高分子材料,具有较强的吸水和保水能力^[10]。其与水接触后,可在较短时间内膨润形成水凝胶,并吸收自身重量数百倍至数千倍的水。吸水后的凝胶在受压条件下也不易脱水。

水凝胶具有一定黏附性和成膜性。受热失水时,凝胶中水分汽化并消耗热量。用于废旧炸弹浅埋销毁时,水凝胶可包覆爆炸体表面,削弱高温爆生气体作用。汽化形成的水蒸气还可吸附粉尘颗粒,加快粉尘沉降。

2.3 防爆纤维毯阻滞破片技术

采用耐高温无机纤维材料包裹爆炸体,可阻滞破片飞散并降低破片初速度。为减少纤维材料破坏后产生的潜在粉尘危害,本研究选用环保型耐高温、低生物持久性防爆纤维毯。该材料主要由氧化镁、二氧化硅和氧化钙等组成,在模拟人体肺液中溶解性高,与硅酸铝纤维、玄武岩纤维等无机耐高温纤维相比,其人体危害相对较低。

防护结构采用水凝胶袋包裹爆炸体,水凝胶袋外覆盖防爆纤维毯。爆炸时,炮弹破片首先刺穿水凝胶袋,随后受到凝胶体和纤维毯共同阻滞。该结构可降低破片初速度,也可减少高温气体对上部泡沫板的直接破坏。

2.4 EPS 泡沫不耦合缓冲技术

空气、水和泡沫材料等间隔介质,已被广泛用于光面爆破、预裂爆破等控制爆破工程。与耦合装药相比,空气间隙可缓冲爆炸冲击波,使波峰变缓,并降低压力峰值^[11]。同时,压力降低后,炮孔扩张速率下降,径向裂隙形成时间延后,压力作用时间延长,衰减过程变缓。

王志亮等对径向不耦合爆破中聚苯乙烯泡沫的

吸能作用进行了数值研究^[12]。结果表明:EPS 泡沫作为填充介质可有效吸收爆炸能量,降低炮孔壁冲击压力峰值。与水不耦合相比,在不耦合系数相同条件下,EPS 泡沫填充时质点振动速度较小,且衰减较快。

在废旧炸弹浅埋销毁中,可在防爆纤维毯上方填充阻燃 EPS 泡沫板,形成不耦合空间。泡沫层可缓冲爆炸冲击,减小对压覆沙袋的直接冲击。

2.5 靶向泄压与柔性防护技术

在不耦合空间内设置朝向安全方向的排气泄压管,可降低爆炸气体压力峰值,并引导填塞物向预定方向抛撒。该措施适用于场地一侧有天然屏障、另一侧相对空旷的销毁环境。

压覆沙袋顶部可铺设带配重的柔性防护网。爆炸气浪掀动沙袋和填塞物时,柔性网通过变形吸能迟滞抛掷速度。与刚性防护结构相比,柔性网施工简单,适应浅埋销毁坑的临时防护需要。

3 关键试验与现场验证

3.1 水凝胶加热失重试验

取两份体积相同的水样,体积均为 100 mL。一份加入 2.7 g 高吸水树脂并搅拌形成水凝胶,另一份作为空白对比样。将两只烧杯置于 360 °C 恒温台上,每 5 min 测量一次质量。两组试样的加热失重曲线见图 1。

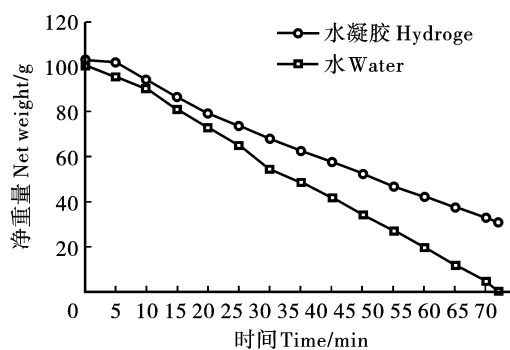


图1 一定水量水凝胶与水的蒸发时间曲线

Fig. 1 Evaporation time curves of hydrogel with fixed water content and pure water

试验结果表明:水凝胶的蒸发曲线斜率明显小于空白水样。说明水凝胶可延缓水分蒸发过程,并延长吸热时间。废旧炸弹销毁时,水凝胶包覆爆炸体可利用凝胶内水分汽化吸热,降低爆炸气体温度。汽化形成的水蒸气还能捕获填埋物扬尘,缩小粉尘飘散范围。

3.2 聚能装药破坏钢管试验

选用外径 50 mm、壁厚 3 mm 的钢管开展爆炸模拟试验。按文献经验公式计算,诱爆所需最小药量为 235 g,最大药量为 377 g。各次试验结果如下。

(1)将直径 32 mm、150 g 乳化炸药作为诱爆药,置于长 200 mm、内装乳化炸药至钢管的中部,并紧贴钢管外表面。起爆后,钢管内乳化炸药被诱爆,钢管破碎成片。

(2)将直径 32 mm、60 g 乳化炸药作为诱爆药,采用相同方式布置。起爆后,钢管内乳化炸药被诱爆,钢管破碎成片。

(3)将直径 32 mm、60 g 乳化炸药作为主爆药,置于长 200 mm 空钢管中部,并紧贴钢管外表面。起爆后,爆炸冲击波首先作用于近药侧管壁,并在钢管内部形成反射及叠加效应,使远离药包侧管壁局部受到拉伸破坏,因此出现上下表面均被破坏但未完全断裂的现象。

(4)将 2 只直径 32 mm、60 g 乳化炸药作为主爆药,置于长 200 mm 空钢管中部,并紧贴钢管外表面(见图 2),与上述(3)试验对比局部药量增加起爆情形。起爆后,钢管完全炸断。

(5)将直径 32 mm、180 g 乳化炸药沿轴线置于长 200 mm 空钢管外表面,并紧贴钢管。起爆后,钢管与炸药接触部位被炸开,下表面保持完整(见图 3)。

(6)用直径 32 mm、180 g 乳化炸药制作聚能药包。聚能罩采用易于获取的紫铜薄板板加工制作,厚度为 0.2 mm,顶角 60°,宽度为 20mm,利用金属罩受爆轰作用形成聚能射流,提高局部冲击压力。将药包沿轴线置于长 200 mm 空钢管外表面,并紧贴钢管。起爆后,钢管被炸成碎条状(见图 4)。

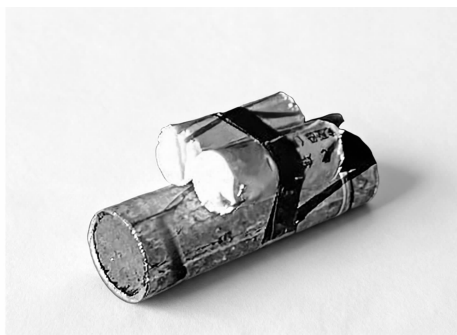


图 2 药卷放置方法

Fig. 2 Schematic of explosive cartridge placement

试验结果表明,在相近药量条件下,聚能结构能够明显提高钢管局部破坏效果。与普通装药相比,聚能装药在相同作用方向上形成更加集中的破坏区

域,表现出更高的切割效率。用于废旧炸弹销毁时,可在减少不必要药量的同时提高可靠诱爆能力。

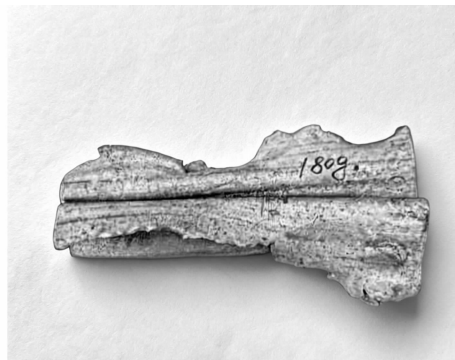


图 3 普通药卷炸毁的钢管

Fig. 3 Steel pipe destroyed by ordinary explosive cartridges



图 4 聚能装药炸毁的钢管

Fig. 4 Steel pipe destroyed by shaped charges

3.3 靶向泄压现场验证

湖北省荆门市漳河风景名胜区某小岛发现一枚废旧 60 mm 迫击炮弹。销毁前,该弹尾翼部分露出地面,弹头陷入泥土。为避免移动引发危险,现场采用就地爆破销毁方案。

作业时,用沙袋在弹体四周码放形成沙袋围挡,在弹体露头部位设置 1 kg 聚能药包。药包上覆盖水凝胶袋,再压覆沙袋。沙袋围挡形成的空间内设置一根直径 75 mm 的塑料泄压管。泄压管直通地表,并朝向安全空旷一侧,布置形式见图 5。



图 5 沙袋防护

Fig. 5 Sandbag protection

起爆后,填塞物主要朝泄压管方向飞散,飞散半径控制在 30 m 以内(见图 6)。弹体销毁彻底。除原地发现一枚弹体碎片外,周围未见明显金属碎片。该案例表明,靶向泄压通道可影响填塞物飞散方向,水凝胶覆盖也可对炮弹爆炸破片起到一定阻滞作用。



图 6 靶向飞散

Fig. 6 Targeted fragmentation

3.4 综合作用机制分析

上述试验和现场验证说明,各项防护措施具有不同作用。聚能诱爆主要解决可靠销毁和减药量问题。水凝胶主要控制高温爆生气体和粉尘。防爆纤维毯和 EPS 泡沫主要削弱冲击作用并阻滞破片。泄压管和柔性防护网主要控制填塞物抛撒。

这些措施组合后,可形成多级防护。首先,通过聚能药包提高局部破坏能力,减少不必要诱爆药量。其次,通过水凝胶、防爆纤维毯和 EPS 泡沫削弱高温、高压气体的直接作用。最后,通过泄压管和柔性防护网控制填塞物运动方向和速度。该体系适合在深坑或硐室难以开挖的受限场地使用。

4 数值模拟分析

4.1 模型构建

为进一步揭示沙袋覆盖与水凝胶覆盖条件下钢管爆炸过程中覆盖层的动态响应机理,在爆炸试验的基础上,采用 PFC 模拟技术建立了钢管爆炸的数值模型,并利用试验结果对模型进行验证,分析了爆炸荷载作用下覆盖层的位移演化规律,从细观尺度揭示两种覆盖方式的防护机制。

模型几何尺寸如图 7 所示,主要由岩土层、覆盖层及钢管三部分组成,其中钢管布置于覆盖层底部中心位置,钢管外径为 40 mm,覆盖层厚度为 300 mm,岩土层尺寸能够满足爆炸波传播要求,以避免边界反射对计算结果产生影响。为了保证不同覆盖介质之间具有可比性,沙袋模型与水凝胶模型采用完全一致的边界条件,仅改变覆盖层材料参数。

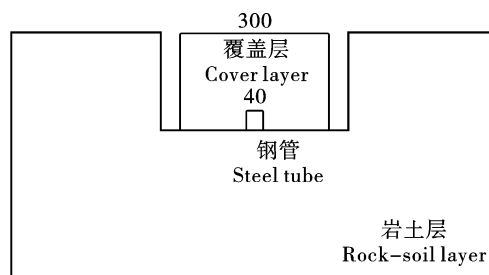


图 7 数值模型构建(单位:mm)

Fig. 7 Model construction(unit:mm)

钢管内部采用与试验一致的炸药装药方式,爆炸荷载通过预先施加的瞬态冲击作用于钢管内壁,实现爆轰产物对覆盖层的动态加载过程。模型顶部为自由边界,以保证覆盖层能够充分发生抬升与抛掷运动,其它边界采用无反射边界。

4.2 位移场演化规律

如图 8 所示,覆盖层在爆炸荷载作用下经历了初始阶段、冲击起始阶段、能量传播阶段、抛掷发展阶段以及最终抛掷阶段五个连续演化过程。整个过程中,位移以钢管中心为起始向自由面扩展,位移场整体保持轴对称分布,说明爆炸能量主要沿炮孔轴向释放,而沙袋覆盖层主要依靠颗粒接触形成初始约束,对爆炸产物的侧向扩散具有一定抑制作用。

在初始阶段(Stage I),炸药起爆后,爆轰产物迅速膨胀,并通过钢管内壁向外传递冲击载荷。覆盖层整体几乎未发生明显运动,说明爆炸能量主要集中于装药附近,尚未向覆盖层扩散。在冲击响应阶段(Stage II),钢管内壁的瞬态冲击载荷已传递至覆盖层,中心区域先发生抬升。沙袋覆盖层由离散砂土颗粒构成,颗粒在受压和相对位移过程中发生压实、滑移与接触摩擦,从而耗散部分机械能;外围颗粒的受力与位移响应相对滞后,因此位移场呈现由中心向周边递减的梯度分布。

在能量传播进入覆盖层阶段(Stage III),大位移区域进一步向自由面扩展,整体形成连续的半椭球状位移场,覆盖层开始由局部隆起向整体抬升过渡。不同区域位移差异明显,顶部颗粒运动明显快于底部颗粒,两侧区域位移增长依然缓慢,爆炸能量主要沿中心区域快速释放,而外围区域仍依赖颗粒接触逐级传递,导致位移场具有较大的空间梯度和明显的非均匀性。

在抛掷发展阶段(Stage IV),覆盖层整体快速上升,大位移区域迅速扩大,并逐渐形成完整的抛掷体轮廓。但与此同时,覆盖层内部颗粒开始出现明显的相对滑移,中心区域持续保持较高速度,而边缘区域受颗粒摩擦、边界约束及惯性影响,其运动明显滞后,位移梯度进一步增大。这说明随着爆炸压力持续释

放,颗粒间接触网络逐渐削弱,此时中心颗粒获得较大的向上运动速度,而外围颗粒仍受边界及邻近颗粒

约束,中心与外围的位移差逐渐增大;随着颗粒接触关系被破坏,覆盖层的整体约束能力随之下降。

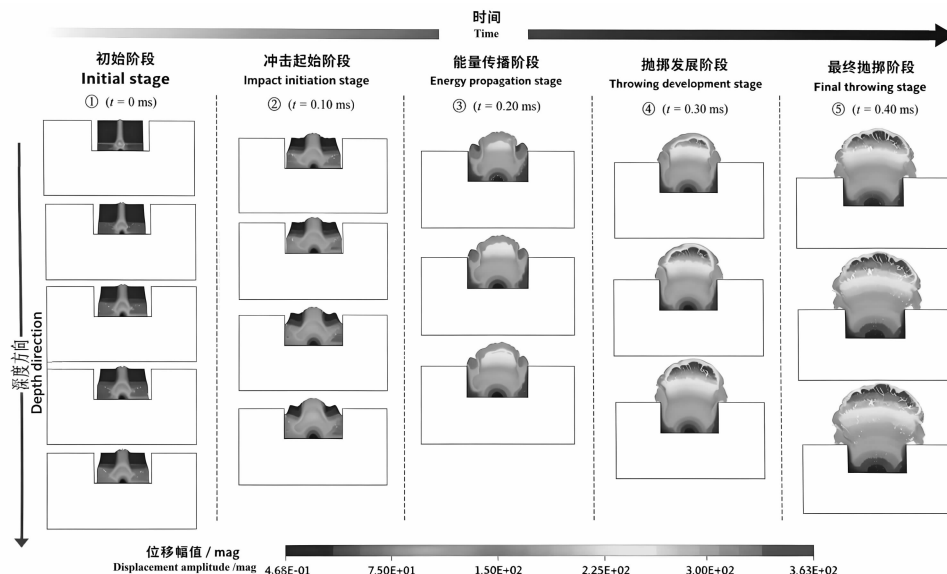


图8 沙袋模拟钢管爆炸位移场变化

Fig. 8 Variation of displacement field of steel pipe under explosion with sandbag simulation

在抛掷最后阶段(Stage V),覆盖层上部中心区的竖向位移较大,边缘及底部区域位移较小。颗粒间原有接触关系进一步破坏,覆盖层由整体抬升逐步转为离散飞散,最终形成较大的抛掷范围。

综上所述,沙袋覆盖层的约束作用具有明显的阶段性,其能量耗散主要依赖颗粒间摩擦、碰撞及重排过程。在冲击波到达后,覆盖层响应随颗粒相对滑移和整体抬升逐步发展,最终发展为离散抛掷,数值结果显示,沙袋覆盖条件下中心区域的位移响应早于并大于外围区域,位移场空间梯度较明显;当颗粒接触关系削弱后,覆盖层难以长期维持均匀的整体约束。

图9展示了水凝胶覆盖钢管条件下爆炸过程中位移场的时空演化规律。整体来看,覆盖层经历了初始阶段—能量传播阶段—抛掷发展阶段—最终抛掷阶段四个连续演化过程。不同于沙袋覆盖过程中颗粒间接触关系不断破坏所导致的离散运动,水凝胶覆盖层在整个爆炸过程中始终保持连续完整的结构形态,大位移区域由药包中心向自由面均匀扩展,位移场具有良好的连续性和轴对称特征,表明爆炸能量能够通过覆盖层整体变形持续向外传递,而非局部集中释放。

在初始阶段(Stage I),水凝胶覆盖层在爆炸加载过程中保持连续结构。位移较大的区域由钢管上方中心向自由面扩展,位移场较为连续。与沙袋覆盖相比,水凝胶覆盖层不易局部失稳,其变形能够使冲击载荷在覆盖层内更均匀地传递。爆轰气体膨胀

及其引起的冲击波通过钢管内壁向外施加瞬态载荷。水凝胶覆盖层在该载荷作用下开始响应,其连续介质特性有助于限制爆轰产物的快速外逸,并为后续覆盖层的整体变形提供约束条件。

进入能量传播阶段(Stage II)后,大位移区域由药包中心迅速向覆盖层扩展,位移场由细长结构逐渐演化为连续的拱形分布,覆盖层整体开始发生隆起。随着爆炸荷载持续作用,位移梯度明显减小,两侧区域与中心区域几乎同步响应,说明爆炸能量能够沿连续介质快速传播,并通过整体变形不断重新分配局部冲击荷载,使局部高应力逐渐向周围区域扩散。相比沙袋覆盖依赖颗粒碰撞耗散能量,水凝胶更多通过整体拉伸和压缩变形吸收爆炸能量,从而有效降低局部位移集中程度。

在能量传播进入覆盖层阶段(Stage III)。高位移区域继续向自由面扩展,并形成完整的半椭球状位移场,覆盖层整体呈同步抬升趋势,各区域位移变化连续平缓,没有出现明显的颗粒滑移、局部鼓包或结构分离现象。在加载和卸载过程中,水凝胶发生拉伸、压缩及黏性流动等变形,部分输入的机械能以材料变形和黏性耗散的形式消减,减弱局部区域的快速抬升。

在最终抛掷阶段(Stage IV),覆盖层达到最大位移状态,整体形成规则且连续的半球状抛掷体,高位移区域由中心向外围呈梯度分布,两侧边缘始终保持与主体连续连接,未出现明显的局部破碎和离散飞散现象。整个覆盖层运动趋于稳定,各区域位

移分布均匀,通过连续介质的较大变形不断吸收、传递和耗散爆炸冲击能量,有效降低局部高速抛掷颗粒

的产生,提高覆盖层整体稳定性和爆炸防护能力。

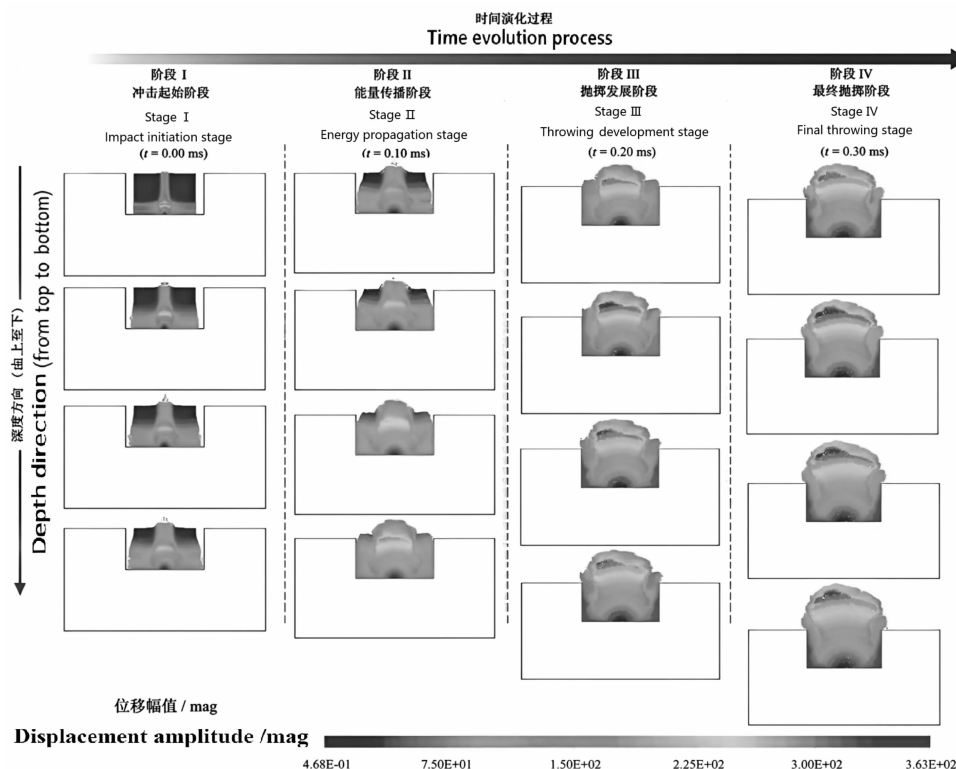


图 9 水凝胶模拟钢管爆炸位移场变化

Fig. 9 Variation of displacement field of steel pipe in explosion simulation with hydrogel

综上所述,水凝胶覆盖层的响应过程表现出典型的连续介质变形特征,其能量耗散机制主要依赖材料整体黏弹性变形,而非颗粒碰撞耗能。数值结果表明,水凝胶的连续介质特性使冲击载荷在覆盖层内的传递更均匀;材料的拉伸、压缩和黏性变形可耗散部分机械能,并降低局部位移集中和高速抛掷倾向。相比沙袋覆盖后期约束能力迅速衰减,水凝胶能够在整个爆炸过程中持续保持覆盖层整体完整性,显著降低位移梯度和抛掷强度,体现出更优异的持续约束能力、能量耗散能力及爆炸抛掷控制效果。

4.3 防护机理分析

在废旧弹爆炸销毁过程中,覆盖层的防护效果本质上取决于其对爆炸能量传播路径及释放方式的调控能力。数值模拟结果表明,沙袋与水凝胶虽然均能够在爆炸初期对爆轰产物形成一定约束,但由于材料结构特性不同,其能量耗散机制及约束能力存在显著差异。沙袋中的土或砂属于典型的离散颗粒介质,在爆炸波到达自由面之前,主要依靠颗粒的变形、升温、粘滞性消耗冲击波的能量。在爆炸波到达自由面以后,高压压缩波波阵面在自由面上反射为拉应力,由于离散的土、或砂不能承受拉力,将脱离沙袋飞散出去;在爆炸冲击波作用的同时,高温、

高压的爆轰产物也在不断地向外膨胀,推动沙袋向外运动;当反射拉应力引起的飞散与爆轰产物连通后,爆轰产物就会从飞散的颗粒空隙逸出,此时,沙袋就失去了覆盖的作用。

相比之下,水凝胶覆盖层表现出完全不同的防护机制。由于水凝胶属于连续介质材料,且具有很强的膨胀变形能力,在爆炸初期与沙袋类似也是通过颗粒的变形、升温、压缩和粘滞性消耗冲击波的能量,但当爆炸波到达水凝胶的自由面反射为拉伸波时,水凝胶膨胀、拉伸而不发生飞散,当反射拉伸波达到水凝胶与爆轰产物的交界面时,水凝胶仍然是一个整体,爆轰产物不易快速从水凝胶覆盖层中逸出,水凝胶依然具有防护作用;在冲击波和爆轰产物的共同作用下,水凝胶的体积膨胀直达到其膨胀的极限状态,爆轰产物才从水凝胶的内逸出,水凝胶覆盖层才失去防护作用。

对比两种覆盖材料的响应规律可以发现,其防护性能差异主要来源于材料特征及能量耗散机制的不同。沙袋依赖离散颗粒之间的接触作用吸收爆炸能量,具有良好的初始缓冲能力,但后期由于颗粒体系逐渐离散,约束能力不断减弱;而水凝胶则依靠连续介质结构及黏弹性变形形成持续稳定的能量耗散

作用,在整个爆炸过程中更久地保持覆盖层地相对完整性,使爆炸荷载能够更加均匀地传递和耗散,从而有效降低覆盖层抛掷高度及抛掷范围。

5 工程应用

5.1 工程概况与场地条件

随着武汉市城市建设规模扩大,战争期间遗留的废旧炸弹被发现的数量有所增加。过去一段时期,废旧爆炸物品处置中曾存在专业化和规范化不足的问题,安全隐患较大。武汉市公安局治安支队按照公安工作“五个现代化”要求,依据《湖北省公安机关处置爆炸物品工作规范(试行)》制定了《武汉市公安局处置爆炸物品工作安全规范》。该规范明确了处置原则,并对报警接警、现场处置、运输贮存、销毁和经费保障等环节作出要求。

2024 年,武汉市公安局收缴各类废弃爆炸物品 902 枚,涉及航弹、炮弹、手榴弹、地雷和雷管等多个品种,其中特大型航弹 3 枚。除少量可确认的教练弹和过期雷管外,大部分弹体已腐蚀生锈,型号难以辨识。经省军区专业人员确认,现场未发现化学弹和燃烧弹。为消除安全隐患,最终决定采用爆炸法集中销毁。

爆炸销毁场宜选在远离建筑物、公路、铁路、通信设施和风电场等保护对象的偏僻区域。场地出入口应便于管控,道路运输应顺畅,现场视线应良好。废旧炸弹不宜在地表裸露爆破,宜在销毁坑或硐室内进行^[13]。

根据武汉市周边场地条件及废旧爆炸物品仓库位置,销毁场地选在江夏区武钢矿业有限责任公司乌龙泉矿闭坑矿区内。该场地可同时降低销毁风险和运输风险。矿区地势相对平整,道路交通便利,周边环境较简单。销毁点 500 m 范围内无重点保护对象。矿区内负采形成的水坑面积较大,可作为应急灭火水源。

销毁点位于矿区预留道路边坡底部,南侧边坡高约 25 m,可作为天然防护屏障。销毁点北侧 800 m 范围内均为停采矿区,正南侧厂房距销毁点约 900 m,西侧 1000 m 范围内无保护对象。东偏南 30°方向 480 m 处有停产石料成品堆棚。销毁场地周边环境见图 10。

5.2 销毁坑布置

销毁点共开挖 4 个销毁坑。各坑四周码放沙袋,用于缓冲爆炸作用,并阻滞飞散物。销毁坑靠近矿区边坡布置,可利用南侧边坡作为天然防护屏障。坑深为 1.2 m,底部长 1.5~2.0 m、宽 1.0~1.2 m。口部长宽以满足现场作业需要为准。



图 10 销毁场地周边环境

Fig. 10 Surrounding environment of destruction site

装坑前,对待销毁弹药逐个鉴定和甄别,剔除化学弹、燃烧弹等特殊弹种。坑底先铺设 10 cm 厚湿沙和土工布。随后按销毁药量分单元均匀装坑。一个大型弹体作为一个单元,两列地雷或两列炮弹作为一个单元。待销毁炸弹采用单层码放,弹体轴线与销毁坑后方山崖保持平行。

5.3 装坑与防护结构

大型弹体沿轴线方向设置聚能诱爆药包。并列摆放的小型炸弹沿径向设置聚能诱爆药包。相邻聚能诱爆药包之间用乳化炸药药卷连接,使得销毁炸弹上表面被诱爆炸药较均匀覆盖。

1 号销毁坑装填 1 枚长 90 cm、直径 30 cm 航空炸弹,周围缝隙填充 6 枚小口径炮弹和迫击炮弹,待销毁药量超过 100 kg。2 号坑装填 1 枚 80 cm 航弹,1 枚地雷和 10 余枚炮弹。3 号坑装填 1 枚航弹及其他废旧弹药。4 号坑用于销毁手榴弹、雷管等小型器材。

1、2、3 号销毁坑采用不耦合装坑形式。装药空隙现场用发泡聚氨酯泡沫固定弹体与聚能诱爆药包。聚能药包纵列布置于弹体装药集中部位,中型弹设置 2~3 个聚能药包(图 11)。随后采用水凝胶覆盖(图 12),并用防爆纤维毯包裹(图 13)。包裹层上方填充 EPS 泡沫板(图 14),填充层厚度大于 2 倍装药厚度。



图 11 聚能药包安装

Fig. 11 Installation of shaped charge packages



图 12 水凝胶覆盖

Fig. 12 Hydrogel covering



图 13 防爆纤维毯包裹

Fig. 13 Wrapping by explosion-proof fiber blankets



图 14 EPS 泡沫填塞

Fig. 14 EPS foam tamping

4号坑采用常规装坑形式。销毁物上方覆盖炸药卷,药卷上压覆沙包,沙包上方堆积散沙土填塞。该坑可作为常规防护效果的对照。

5.4 回填防护与起爆网路

弹药及防护材料装坑完毕后,在泡沫覆盖层上方架设竹排。竹排上安装排气泄压管,并铺设一层橡胶炮被(图15)。炮被上方用沙袋压实,沙袋压覆

高度为1.0~1.5 m。随后在沙袋表面铺设一层尼龙绳网(图16),四角用沙袋固定。当压覆沙袋受爆炸气浪作用被掀动时,柔性防护网可迟滞沙袋抛撒。



图 15 靶向泄压管安装

Fig. 15 Installation of targeted pressure relief pipes



图 16 柔性防护网安装

Fig. 16 Installation of flexible protective net

销毁坑内每个聚能药包安装1枚激发数码雷管。同坑内雷管设置相同延期时间。相邻销毁坑采用微差起爆,一次起爆全部弹坑。每个弹坑内设置5发数码雷管,弹坑之间延期时间为200 ms。

5.5 销毁效果与对比分析

起爆后,填塞物抛撒产生一定爆破粉尘,但沉降较快,飘散范围较小。图17右侧为4号小药量常规销毁坑。对比可见,常规坑粉尘飘散高度和范围均明显大于左侧综合防护坑。

现场检查表明,销毁彻底,未发现残余器材。聚能切割破片断裂线较齐整。压覆沙包包装袋碎屑最大飞散距离为50 m(图18)。距爆区边缘70 m处的水坑水面未见明显波动,销毁效果达到防灾减灾预期。

从工程结果看,综合防护结构对粉尘飘散和填塞物飞散具有明显控制作用。其原因在于,聚能诱爆减少了无效装药量,水凝胶和防爆纤维毯削弱了

高温破片和爆生气体作用, EPS 泡沫降低了上部覆盖层所受冲击,泄压管和柔性防护网进一步控制了填塞物的抛撒方向和速度。



图 17 销毁爆炸瞬间

Fig. 17 Instant of destruction explosion



图 18 填塞包装物飞散范围

Fig. 18 Scattering range of tamping packages

6 结论

(1)露天浅埋爆炸销毁废旧炸弹的主要风险来自弹体破片、填塞物飞散和粉尘飘散。采用“源头减量—过程削弱—定向泄压—末端拦阻”的综合防护思路,可提高受限场地销毁作业的安全性。

(2)聚能诱爆可提高局部切割和诱爆能力。钢管爆炸模拟试验表明,在相同药量条件下,聚能装药炸断钢管的能力约为普通装药的 2 倍。该方法有利于减少不必要诱爆药量,并增强废旧炸弹销毁可靠性。

(3)水凝胶可通过汽化吸热降低爆生气体温度,并促进粉尘沉降。水凝胶、防爆纤维毯和 EPS 泡沫组合后,可形成不耦合缓冲结构,削弱爆炸冲击并阻滞破片飞散。

(4)靶向泄压管可引导爆炸气体和填塞物向安全方向释放。柔性防护网可迟滞沙袋及包装物抛掷速度。现场验证中,填塞包装物最大飞散距离为 50 m,距爆区边缘 70 m 处水面未见明显波动。

(5)武汉市废旧爆炸物品集中销毁实践表明,

综合防护坑粉尘飘散高度和范围小于常规防护坑,销毁后未发现残余器材。该技术体系可为城市周边废弃矿山等受限场地废旧炸弹浅埋销毁提供工程参考。

参考文献 (References)

- [1] 黄鹏波,张怀智,谢全民,等. 废弃常规弹药销毁技术综述[J]. 工程爆破,2013,19(6):53-56.
- [1] HUANG Peng-bo, ZHANG Huai-zhi, XIE Quan-min, et al. Summary of destruction technology for abandoned conventional ammunition [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(6):53-56. (in Chinese)
- [2] 章克凌,徐 春. 航、炮弹销毁的安全距离计算[J]. 爆破,2003,20(4):24-26.
- [2] ZHANG Ke-ling, XU Chun. Calculation of safety distance for destruction of aerial bombs and artillery shells [J]. Blasting, 2003, 20(4):24-26. (in Chinese)
- [3] 国家安全生产监督管理总局. GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [3] State Administration of Work Safety. GB 6722—2014 Blasting safety regulations; [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [4] 年鑫喆,谢全民,孙金山,等. 岩体中空腔对爆炸振动的解耦效应[J]. 爆破器材,2023,52(1):44-48.
- [4] NIAN Xin-zhe, XIE Quan-min, SUN Jin-shan, et al. Numerical simulation of decoupling effect of cavity in rock mass on explosion vibration [J]. Explosive Materials, 2023, 52(1):44-48. (in Chinese)
- [5] 宋桂波,李成国,夏福君,等. 利用聚能射流销毁大壁厚弹药试验研究[J]. 工程爆破,2010,16(3):93-95.
- [5] SONG Gui-fei, LI Cheng-guo, XIA Fu-jun, et al. Experimental study on destruction of thick-wall ammunition by shaped charge jet [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(3):93-95. (in Chinese)
- [6] 于淑宝,汪旭光,王伯银. 被覆爆炸法——销毁常规废旧弹药的技术[J]. 工程爆破,2016,22(6):83-86.
- [6] YU Shu-bao, WANG Xu-guang, WANG Bo-yin. Coated explosion method: technology for destruction of conventional waste ammunition [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(6):83-86. (in Chinese)
- [7] 朱绍武,谢先启,罗启军. 炮(航)弹及过期爆破器材销毁研究与实践[J]. 爆破,2001,18(2):87-89.
- [7] ZHU Shao-wu, XIE Xian-qi, LUO Qi-jun. Research and practice on destruction of artillery(aerial) bombs and expired blasting materials [J]. Blasting, 2001, 18(2):87-89. (in Chinese)