

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.006

铝粉粒径对销毁某未爆弹药影响的试验研究^{*}

李政阳^① 安振涛^① 李金明^① 张启功^②
①军械工程学院(河北石家庄,050003)
②75170部队(广西桂林,541000)

[摘 要] 为提高某种新型未爆弹销毁方式的工作效能和操作安全性,基于销毁装置内复合高热剂自蔓延燃烧过程,利用试验分析研究了铝粉粒径大小对销毁该种未爆弹药的影响。结果表明:74 ~ 178 μm 范围内,铝粉粒径越大,金属熔流出口速度达到的峰值越低;同时,铝粉粒径过小($\leq 89 \mu\text{m}$),会导致销毁装置内复合高热剂反应过于激烈,容易出现燃爆现象;而124 ~ 178 μm 粒径范围的铝粉适用于榴弹弹丸、破甲弹战斗部、手榴弹、地雷等多种壳体厚度不超过9 mm的猛炸药弹丸的未爆弹销毁工作。为以后提高未爆弹销毁工作效能、保护销毁人员安全提供参考。

[关键词] 铝粉粒径;未爆弹销毁;销毁装置;金属熔流

[分类号] TJ410.89

Experimental Study on the Effect of Particle Size of Aluminum Powder on Destroying Some Unexploded Ordnance

LI Zhengyang^①, AN Zhen tao^①, LI Jinming^①, ZHANG Qigong^②
①Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)
②Unit 75170 (Guangxi Guilin, 541000)

[ABSTRACT] In order to improve the destruction efficiency and safety of some new unexploded ordnance, influence of the particle size of aluminum powder on the destruction of unexploded ordnance was experimentally studied based on the self-propagating combustion process of composite thermite in the destruction device. Results show that, in the range of 74-178 μm , the higher the particle size of aluminum powder, the lower the peak value of metal melt outlet velocity reaches. At the same time, extremely small aluminum powder particle size ($\leq 89 \mu\text{m}$) will lead to intense reaction of composite thermite in destruction device. While aluminum powder with particle size of 124-178 μm could be applied to the destruction of high explosive projectile with thickness of shell less than 9 mm, such as shrapnel, shaped charge warhead, hand grenade, and land mine. It will provide some references for improving the performance of unexploded ordnance destruction and protecting the safety of personnel.

[KEYWORDS] particle size of aluminum powder; destruction of unexploded explosive projectile; destruction device; metal melt flow

引言

未爆弹销毁是军事训练和军事行动不可缺少的保障性工作^[1]。未爆弹不仅严重威胁周边人员、设施和设备的安全,而且制约军事行动和部队训练工作的正常开展,需要采取措施尽快排除。现有的销毁方法多需近距离接触未爆弹,操作过程复杂、危险

性高;销毁作业过程中会产生冲击波,引起破片飞散。面对存在于建筑物内、残留于重要设施附近(如:水坝、电厂、雷达等)、布放于人员密集区等情况的未爆弹药,现有的销毁方法难以适用。所以,寻找一种快捷、安全、成本较低的新型危险未爆弹销毁方法势在必行。

金属熔流销毁危险未爆弹技术^[2-6]是利用复合高热剂燃烧产生的高温高速熔融金属射流(以下简

^{*} 收稿日期:2017-01-10
作者简介:李政阳(1995 -),男,硕士研究生,主要研究方向为弹药储存、供应与销毁。E-mail:591729313@qq.com

称金属熔流),快速熔穿危险未爆弹弹丸的金属壳体并引燃弹丸内部炸药,使弹丸装药主要以燃烧的方式释放能量。利用该方法可在人员不接触危险未爆弹的条件下较为安全地销毁危险未爆弹药。

金属熔流由复合高热剂发生剧烈反应后产生。这其中,铝粉作为金属可燃剂,发挥着重要的作用。本文中,通过试验研究铝粉粒径与复合高热剂燃烧性能的关系,确定适合某型弹药销毁工作的铝粉粒径的范围。

1 试验方法

根据试验要求,在 40 ~ 200 目范围内,筛选出 5 种粒径范围的铝粉,分别编号 A₁ ~ A₅,如表 1 所示。每种粒径范围内称取等化学计量铝粉,与等质量 Fe₃O₄ 粉末(80 目)和 Fe₂O₃ 粉末(80 目)均匀混合后,得到 5 组对照组,置于容器中备用。

表 1 试验铝粉的颗粒度

Tab. 1 Granularity of Al powder for testing

试验 编号	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
粒径范 围/ μm	74 ~ 89	89 ~ 104	104 ~ 124	124 ~ 178	178 ~ 220

Fe₂O₃/Al 系和 Fe₃O₄/Al 系按质量比 1 : 2 混合,分别加入等质量的造气剂、稀释剂及辅助药剂,配制 5 组复合高热剂。保证铝粉粒径为唯一变量。

已经配置好的复合高热剂装入销毁装置中,借助成型机构对复合高热剂施以适当的压力。在内壳中,将复合高热剂由粉状压缩成相对密实的药柱。

试验时,将销毁装置固定于支架上。被销毁工件为某弹药外壳材料金属板,与传感器固定连接,测定复合高热剂燃烧时间和金属熔流出口速度,数据通过数据采集卡传送至计算机进行处理。为确保安全,架设无线点火机,连接点火导线。

试验结束后,对该金属板进行清理,测定熔孔深度及熔孔平均直径。

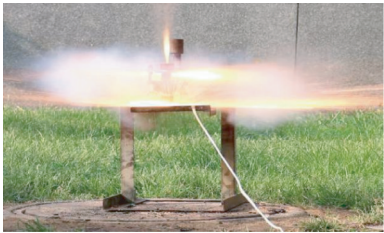
2 试验结果分析

2.1 燃烧速率

试验发现,A₅ 销毁装置复合高热剂药柱点燃效果不好,反应速率缓慢,喷出的金属熔流断断续续;A₄ 燃烧速率较为平稳,工作时间适中,可控性能好;A₃ 金属熔流飞溅较大,对金属板的熔穿效果较差;

A₂ 反应较为剧烈,在引燃瞬间,金属熔流冲破装置壳体,如图 1(a) 所示,使内部压力瞬间降低,随后金属熔流由于重力作用从喷管流出,严重影响作业效果;A₁ 燃烧反应过于剧烈,甚至会发生燃爆,造成试验支架的损坏,如图 1(b) 所示。

通过传感器对燃烧时间的测定,实测销毁装置燃烧时间,如图 2 所示。可知,铝粉粒径在 74 ~ 220 μm 范围内,复合高热剂燃烧时间随粒径的增大而增大,即燃烧速率随铝粉粒径增大而减小。



(a) A₂ 销毁装置



(b) A₁ 销毁装置

图 1 不同粒度的铝粉的销毁作业

Fig. 1 Destruction operation by Al powder with different granularities

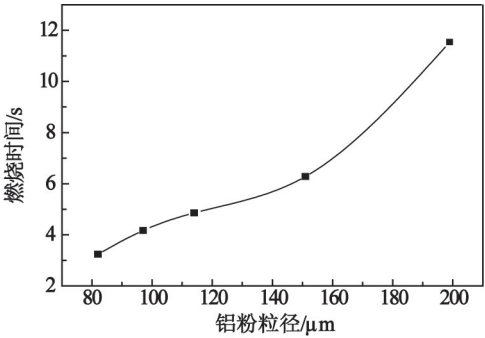
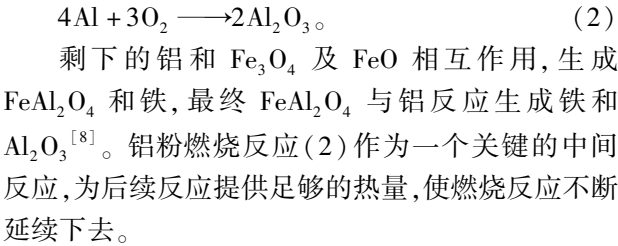
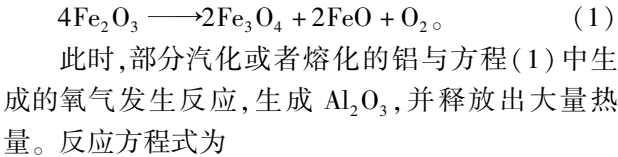


图 2 燃烧时间与铝粉粒径的关系

Fig. 2 Relationship between burning time and particle size of Al powder

在反应速率极为缓慢(A₅)和由于销毁装置内压力过大而燃爆(A₁)的两个临界值内,销毁装置燃烧速率随铝粉粒径增大而减小。这是由于销毁装置内复合高热剂燃烧是自蔓延燃烧反应中的铝热剂燃烧,其反应过程为:引燃药柱被无线点火装置引燃后,迅速反应放热,点燃复合高热剂药柱。由于

Fe₂O₃、Fe₃O₄ 和铝粉中,铝的熔点最低(933 K),所以,铝粉首先熔化,随着温度的升高,Fe₂O₃ 持续吸热,分别分解为 Fe₃O₄ 和 FeO,同时放出氧气^[7]。反应方程式为



可以认为,高温下复合高热剂反应为固-液(铝熔化)反应,同时有固相产物(铁)从熔体中析出。且为由片层状混合组元(铝和铁的氧化物)受扩散控制的反应,则反应速率 $d\eta/dt$ 为^[9]

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{D}{a_0(a_0 + b_0)} \cdot \frac{1}{\eta}。$$

(3)

式中: a_0 、 b_0 分别为铝层及铁的氧化物层的厚度; D 为扩散系数,它与温度的关系符合 Arrhenius 公式

$$D = D_0 e^{-\frac{E^*}{RT}}。$$

(4)

式中: D_0 为频率因子,是不随温度变化而变化的常数; E^* 为扩散激活能。

因此,反应速率方程可表示为

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{D_0}{a_0(a_0 + b_0)} \cdot \frac{1}{\eta} e^{-\frac{E^*}{RT}}。$$

(5)

由式(5)可得,随着铝粉粒径的增大,铝层厚度随之变大,即 a_0 变大,则反应速率降低;宏观上表现为复合高热剂点燃效果不好,反应时间长。

另一方面,铝粉粒度越小,与 Fe₃O₄ 或 Fe₂O₃ 粉末混合越均匀,反应表面积也越大,铝熔化后,各组分间易于扩散而发生液-固反应,由此提高反应速率;而对于粗铝粉,粒度的增大导致熔化速率降低,只有部分铝粉表面层液化,且熔化后需要通过毛细管漫流后同 Fe₃O₄ 或 Fe₂O₃ 颗粒表面进行接触^[10],导致反应速率缓慢。

2.2 金属熔流出口速度

试验测得 A₁ ~ A₅ 组的喷嘴出口速度的变化如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,A₁ ~ A₄ 出口速度均迅速达到一个峰值,之后不断下降,直至燃烧结束。而且,74 ~ 178 μm 范围内,铝粉粒径越大,达到的峰值越

低。这是因为,反应过程中由于各种金属氧化物的分解或者蒸发,会有气体产生^[11]。铝粉粒度越小,反应速率越快,气体生成速率也越快,导致销毁装置内压强快速升高,从而使出口速度增大。

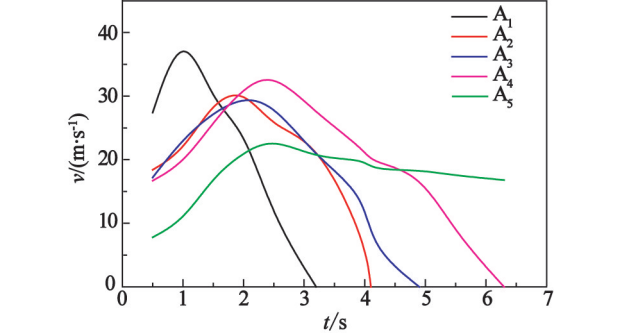


图 3 出口速度变化曲线
Fig. 3 Velocity curves at nozzle exit

A₅ 中铝粉粒径过大,导致高温自蔓延燃烧推进过于缓慢,达到峰值后,由于复合高热剂只燃烧了外层部分,内层药柱还未被点燃,产生气体速率基本保持不变;所以,该组的复合高热剂出口速度长时间内保持为峰值,并未出现明显的下降趋势。

2.3 熔穿效果

由于 A₁ 燃烧反应过于剧烈,发生燃爆,造成试验支架的损坏,所以对目标金属板几乎未作用。其他各组复合高热剂引燃后对目标金属板熔穿效果如图 4 所示。

A₂ 引燃后,火花四溅,产生大量烟雾,喷出高温熔体和气体,虽熔穿目标金属板,但形成的熔孔内径较小。A₃ 也可熔穿目标金属板,但熔孔内径同样较小。A₄ 燃烧均匀、燃烧时间稍长,能够熔穿目标金属板,且形成的熔孔孔径较大;适用于采用目标金属板作为弹丸壳体的未爆弹销毁工作。A₅ 反应速率缓慢,并未熔穿目标金属板,这可能是由于燃烧时间长,所以产生气体速率慢,形成的吹力相对较小,使目标金属板的熔孔中不断积累熔渣或金属球。研究表明,对基于高温自蔓延原理的金属熔穿,其熔穿效能主要受“挂渣”现象的影响^[12]。熔化过程中,燃烧产生的金属熔流遇到冷的被熔穿金属板之后凝固成固态残渣,并堆积在被切割金属材料表面;使得后续金属熔流不能直接与金属板接触,而是与固态残渣接触,使热传导受到了阻碍。

通过对实弹进行销毁试验发现,该结果适用于榴弹弹丸、破甲弹战斗部、手榴弹、地雷等壳体厚度不超过 9 mm 的猛炸药弹丸(不包含铝混合炸药)。

此外,熔穿目标金属板时,金属板所吸收的热量公式为

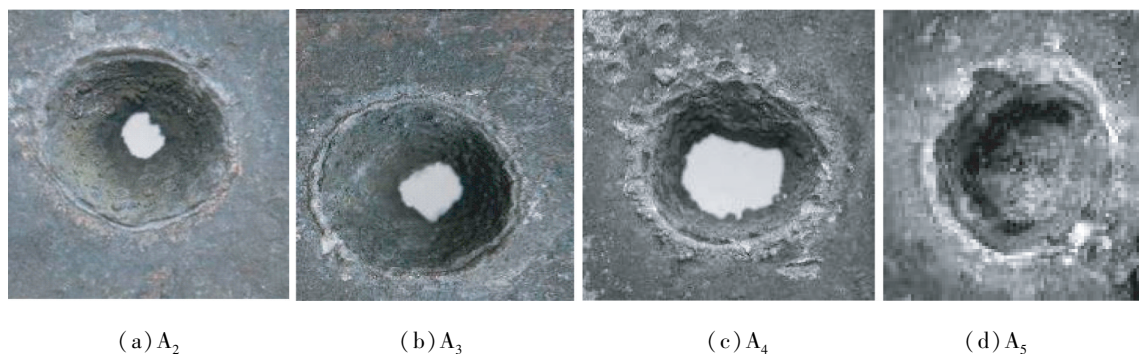


图 4 金属板的熔穿效果

Fig.4 Appearance of the cutting holes

$$Q_{\text{吸}} = c\Delta m\Delta T。 \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{吸}}$ 为吸收热量,J; c 为目标金属板比热容,J/($\text{kg} \cdot \text{K}$); Δm 为熔化质量,kg; ΔT 为金属熔流与目标金属板表面温度差,K。

熔穿过程中,销毁装置中复合高热剂燃烧对流换热传递给目标金属板的热量为

$$Q_{\text{传}} = \varphi\Delta t。 \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{传}}$ 为传递热量,J; φ 为对流换热热量,W; Δt 为燃烧时间,s。

由于销毁装置熔穿目标金属板实质为对流换热,所以其过程遵循牛顿冷却公式^[13]

$$\varphi = hA\Delta T。 \quad (8)$$

式中: h 为表面传热系数,W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$); A 为换热表面面积, m^2 。

对于熔流冲击的换热方式, h 与金属熔流速度 u 的关系为 $h \propto u^{0.5}$ ^[14]。代入式(7)和式(8),得 $Q_{\text{传}} \propto u^{0.5}\Delta t$ 。结合图 2、图 3 可知,74 ~ 220 μm ($A_1 \sim A_4$) 范围内,随着铝粉粒径的增大, $u^{0.5}\Delta t$ 不断增大,即 $Q_{\text{吸}} = Q_{\text{传}}$ 不断增大,故在 74 ~ 220 μm 范围内,铝粉粒径越大,穿孔越浅,但传热热量越多,适合较薄金属板 (<5 mm) 作为弹丸壳体的未爆弹销毁工作。

3 结论

1) 销毁某未爆弹药时,铝粉粒径大小对复合高热剂药柱燃烧速率、金属熔流喷出速度和目标金属板熔穿效果均有影响。

2) 铝粉粒径过小 ($\leq 89 \mu\text{m}$),会使复合高热剂燃烧过于激烈,容易出现燃爆现象,对人员安全产生威胁;铝粉粒径过大 ($\geq 178 \mu\text{m}$) 会严重影响复合高热剂燃烧速度,导致燃烧不充分、未爆弹销毁不成功等后果。

3) 销毁装置产生的金属熔流出口速度会迅速

达到一个峰值,之后不断下降,直至燃烧结束。而且,74 ~ 178 μm 范围内,铝粉粒径越大,达到的速度峰值越低。

4) 榴弹弹丸、破甲弹战斗部、手榴弹、地雷等壳体厚度不超过 9 mm 的猛炸药未爆弹销毁工作,宜采用 124 ~ 178 μm 粒径范围的铝粉。

5) 74 ~ 220 μm 范围内,铝粉粒径越大,穿孔越浅,但传热热量越多,故大粒径铝粉适用于较薄金属板 (<5 mm) 作为弹丸壳体的未爆弹销毁工作。

参 考 文 献

- [1] 李金明,雷彬,丁玉奎. 通用弹药销毁处理技术[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
LI J M, LEI B, DING Y K. Technology of conventional ammunition disposal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] FISCHER S H, GRUBELICH M C. A survey of combustible metals, thermites, and intermetallics for pyrotechnic applications [C]//32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Lake Buena Vista, Florida, 1996.
- [3] SONG E. Thermite destructive device; US5698812 [P]. 1997-12-16.
- [4] HEINRICH H. Hazardous material disposal, especially chemical munition disposal; DE19740089 [P]. 1998-12-03.
- [5] 易建坤,贺五一,吴腾芳,等. 高热剂在弹药销毁领域应用初探[J]. 工程爆破,2004,10(4): 21-25.
YI J K, HE W Y, WU T F, et al. Preliminary investigation into application of thermite in destruction of ammunition [J]. Engineering Blasting, 2004, 10 (4): 21-25.
- [6] 张启功. 基于金属熔流的未爆弹销毁方法与实验研究 [D]. 石家庄:军械工程学院,2015.
ZHANG Q G. The method and experimental study on the

YU H J, FAN X Z, FU X L, et al. Rheological properties of cast smokeless CMDB propellants [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(1): 71-75.

[9] 周建栋, 崔永鲜, 陈少镇, 等. RDX 含量对 NC-DBP-RDX 体系流变性和弹性效应的影响[J]. 含能材料, 1994, 2(4): 7-11.

ZHOU J D, CUI Y X, CHEN S Z, et al. RDX content influence on the rheologic behavior and elastic effect of NC-DBP-RDX system [J]. Energetic Materials, 1994, 2(4): 7-11.

[10] 张洁, 郝晓东. HAAKE 转矩流变仪及其应用[J]. 塑料科技, 2003(5): 41-43.

ZHANG J, HAO X D. HAKKE torque rheometer and its applications [J]. Plastics Science and Technology, 2003 (5): 41-43.

[11] 杜启玫, 周持兴. 哈克转矩流变仪在聚合物加工中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2004, 23(7): 46-47.

DU Q M, ZHOU C X. Research on the polymer reactive processing based on haake mixer [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2004, 23(7): 46-47.

[12] 李玉宝, 宣超. 转矩流变仪系列实验设备在 PVC 加工中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2004 (5): 21-24.

LI Y B, XUAN C. The application of experimental torque rheometer series in the processing of PVC [J]. Polyvinyl Chloride, 2004 (5): 21-24.

[13] 杨国娟. 转矩流变仪在测定 PVC 树脂塑化性能方面的应用[J]. 中国氯碱, 2004 (9): 26-28.

YANG G J. Application of torque rheometer in plasticization property determination of PVC resin [J]. China Chlor-Alkali, 2004 (9): 26-28.

[14] 王晓青, 刘滨, 李晓萌, 等. 热塑性聚氨酯弹性体黏合剂的加工流变性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(11): 1191-1194.

WANG X Q, LIU B, LI X M, et al. Research on the processing rheological behavior of thermoplastic polyurethane elastomer binders [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(11): 1191-1194.

[15] 李迎, 陈长明, 陈亨, 等. 用转矩流变仪测量高分子材料的流变特性[J]. 塑料科技, 2002(6): 43-45.

LI Y, CHEN C M, CHEN T, et al. Measuring of the rheological characteristics of high polymer with torque rheometer [J]. Plastics Science and Technology, 2002 (6): 43-45.

(上接第 32 页)

destruction of non explosive projectile based on metal melt flow [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2015.

[7] 吴艺英, 朱秀英, 高显明, 等. 铝粉粒度对切割弹燃烧和切割机理的影响[J]. 火工品, 2015(5): 9-13.

WU Y Y, ZHU X Y, GAO X M, et al. Influence of aluminum granularity on burning and cutting mechanism of cutting ammunition [J]. Initiator & Pyrotechnics, 2015 (5): 9-13.

[8] LI Y X, YAO J K, LIU Y. Synthesis and cladding of Al₂O₃ ceramic coating son steel substrates by a laser controlled thermite reaction [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172: 57-64.

[9] 殷声. 燃烧合成 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.

YIN S. Combustion synthesis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.

[10] 张保元, 辛文彤, 武斌, 等. 铝粉颗粒度对燃烧型焊条燃烧的影响[J]. 热加工工艺, 2007, 36(19): 47-49.

ZHANG B Y, XIN W T, WU B, et al. Effect of Al particle size on burning of combustion welding rod [J]. Hot Working Technology, 2007, 36(19): 47-49.

[11] CHENG J L, HNG H H, LEEY W, et al. Kinetic study of thermal and impact-initiated reactions in Al-Fe₂O₃ nanothermite [J]. Combustion and Flame, 2010, 157 (12): 2241-2249.

[12] 王鹏, 张靖. 烟火切割热力学分析及药剂配方设计与实验 [J]. 含能材料, 2011, 19(4): 459-463.

WANG P, ZHANG J. Thermo dynamic analysis composition design and experimental study on metal-cutting pyrotechnic composition [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 459-463.

[13] 张靖周, 常海萍. 传热学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[14] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 等. 强化传热 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.