

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.01.008

磨料水射流切割防暴弹的试验研究*

蒋大勇^① 白云^②

^①武警工程大学装备工程学院(陕西西安,710086)

^②武警工程大学军事基础教育学院(陕西西安,710086)

[摘要] 针对前混合式磨料水射流切割防暴弹的过程,分析磨料水射流对装药的切割安全性,探讨射流参数的选取及工程化处废的可行性。根据弹性力学的固体接触理论,建立磨料水射流冲击弹体时的数学模型,从而选取射流出口压力等工艺参数。依据射流的冲击理论和装药的热感度及撞击感度,结合射流作用时的升温试验,分析证实在该射流参数下的冲击安全性。结果表明,以手投催泪(或发烟)弹、枪射催泪(或发烟)弹为代表的4种防暴弹,其试验结果与实例计算相吻合,切割安全可靠度不低于98.57%。该研究可为防暴弹的工程化处废提供理论依据和技术支持。

[关键词] 防暴弹药;磨料水射流;切割;安全性

[分类号] TJ410.89

Experimental Study on Cutting Anti-riot Ammunition by Abrasive Water Jet

JIANG Dayong^①, BAI Yun^②

^① Equipment Engineering College, Engineering University of CAPF (Shaanxi Xi'an, 710086)

^② Military Basic Education College, Engineering University of CAPF (Shaanxi Xi'an, 710086)

[ABSTRACT] Aiming at the process of cutting anti-riot ammunition by former mixed abrasive water jet, the cutting safety of the abrasive water jet to the charge was analyzed, and the feasibility of the jet parameter selection and the engineering waste was also discussed. Depending on the rationale of solid contact of elasticity, the mathematical model of abrasive water jet impact missile was established, and the process parameters such as jet outlet pressure were selected. According to the impact theory of the water jet and thermal sensitivity and impact sensitivity of the charge, the impact safety of the jet parameters was confirmed by the temperature rise test when the jet was applied. Tear gas grenade, hand throwing smock bomb, gun tear gas grenade and gun smock projectile were used in the test. Results are in agreement with the calculation of the case, and the cutting safety reliability is not less than 98.57%. The study can provide both theoretical and technical supports for the engineering waste.

[KEYWORDS] anti-riot ammunition; abrasive water jet; cutting; security

引言

防暴弹是现代反恐行动中必不可少的武器装备,在生产、使用和储存的数量不断增加的同时,随之而来的处废问题也日渐突出^[1]。出于环保压力以及存在部分零部件需要回收利用的考虑,露天焚烧、爆破法处理废旧防暴弹受到越来越多的限制;且由于防暴弹存在非可逆的装配设计,安全拆解便成为处废的首要步骤和关键技术。利用高压水射流对

含能材料可实施较为安全的作业已成为业内共识,前混合磨料水射流切割技术便是其中的一种代表性加工方法。该方法事先利用高压水带动固体磨料颗粒,通过小孔径喷嘴以每秒数百米的高速度喷出,借助这种高速混合射流动能的冲击作用来切割目标物,应用在易燃易爆的危险场合具有独特优势。但不可否认的是,磨料水射流虽然具有无热、无烟、无火花等独特优势,但与防暴弹之间仍属于刚性接触,仍存在燃烧、爆炸的可能性,必须对其过程安全性进行分析,方能应用于工程化处废。文章中,通过分析

* 收稿日期:2017-05-11

基金项目:国家自然科学基金(51503224);武警工程大学基础研究项目(2015XJK-003)

作者简介:蒋大勇(1981-),男,博士,副教授,主要从事含能材料处废方面研究。E-mail:wanghe717@163.com

磨料水射流对防暴弹金属弹体的切割过程,选择合适的射流参数,进而对装药的冲击安全性进行评估。在此基础上,应用智能水刀排爆机器人^[2]对 4 种防暴弹进行切割试验,验证理论部分。

1 射流参数的选择

在废旧防暴弹的拆解过程中,磨料水射流的切割方向首先要规避防暴弹的击发装置,以免发生不必要的危险;然后,射流与防暴弹的弹体发生接触,将其在较短时间内切割开来;最后,射流到达装药部位。多数防暴弹采用金属弹体,以防锈铝材质最为常见。因此,射流参数的选择至关重要,一方面要保证射流在最短的时间内对弹体实施破坏,另一方面要保证在此作用下装药不发生冲击起爆。通过研究,可以确定合适的射流参数,特别是选取最低出口压力,为切割试验寻找理论基础根据。

1.1 切割原理

磨料水射流的突出优点就是射流含有大量的刚性磨料颗粒,在保证相同切割能力的前提下可以大幅度降低射流出口压力,从而降低切割过程的部分危险。在射流冲击金属弹体时,弹体表面会受到磨料颗粒的撞击;在撞击瞬间,磨料颗粒与流体可视为等速。这相当于金属弹体通过很小的接触面,将高速运动的磨料颗粒突然制动停止,因而在接触区域将产生极大的应力,使金属微粒从弹体表面上剥落,逐渐累积,出现凹陷。在磨料水射流连续的冲击作用下,不断产生新的凹坑,从而连成较大面积的凹坑,并逐渐加深。一般而言,金属弹体的抗剪强度远低于它的抗拉、抗压强度。由于磨料颗粒与弹体接触产生的接触剪切应力超过弹体的接触剪切强度,因此,金属弹体在磨料水射流作用下被穿孔和切割成缝,从而发生剪切破坏。

1.2 切割模型的建立

当磨料水射流对金属弹体进行切割时,弹体的内壁系圆柱面,将其视为以圆柱直径 R_2 为半径的球面,即将 R_2 改为负,根据弹性理论,磨料颗粒与弹体相接触时产生的最大接触剪应力由式(1)求得^[3]:

$$\begin{cases} \tau_{\max} = 0.31 \left[\frac{6F(R_1 + R_2)^2}{\pi^5(k_1 + k_2)^2 R_1^2 R_2^2} \right]^{\frac{1}{3}}, \\ k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}, \\ k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为最大接触剪应力; R_1 为磨料颗粒粒度, mm; E_1 为磨料颗粒弹性模量, MPa; μ_1 为磨料颗粒的泊松比; R_2 为弹体金属球半径, mm; E_2 为弹体的弹性模量, MPa; μ_2 为弹体材质的泊松比; F 为磨料颗粒与弹体接触时的作用力, N。

只要求出颗粒与弹体接触时的作用力 F , 便可计算出最大接触剪应力 τ_{\max} 。如果 τ_{\max} 大于弹体的接触剪应强度, 弹体即发生破坏。也就是说磨料水射流在此工作压力下, 可以对该弹体进行切割。

磨料颗粒对弹体的打击力 F 与磨料水射流撞击弹体时的速度有关, 由动量定理可求得磨料水射流对弹体总打击力。

若射流中磨料流体与弹体接触断面为磨料颗粒投影面积 πR_1^2 , 由于单位面积颗粒磨料作用于弹体的力为 $\rho_s u^2$, 因而得到单个磨料颗粒对被切割弹体的作用力

$$F_i = \pi R_1^2 \rho_s u^2. \quad (2)$$

式中: u 为射流撞击弹体时的速度, m/s; ρ_s 为磨料颗粒密度, kg/m³;

前混合磨料水射流采用圆锥形喷嘴, 其直径为 D 。射流是水与磨料颗粒的混合物, 属于固液两相自由紊动射流, 由于速度很高, 可近似认为轴向射流速度即为射流的初速度 u_0 。当靶距 $x > 6.2$ mm 时, $u = 6.2u_0 D/x$; 当 $x < 6.2$ mm 时, $u = u_0$ 。根据经验公式, 射流初速度 u_0 可表示为

$$u_0 = 44.77 \sqrt{p}. \quad (3)$$

式中: p 为出口压力, MPa。

根据经验公式, 射流的密度 ρ_0 可表示为

$$\rho_0 = (1 - \alpha_s) \rho_w + \alpha_s \rho_s. \quad (4)$$

式中: ρ_0 为混合流体的密度, kg/m³; α_s 为磨料的质量分数, %; ρ_w 为水的密度, kg/m³。

整理得到磨料颗粒与弹体相接触时的最大接触剪切应力:

$$\tau_{\max} = 0.31 \left[\frac{230.4(R_1 + R_2)^2 \rho_0 u_0^2 D^2}{\pi^2(k_1 + k_2)^2 R_1^2 R_2^2} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

固定试验时的磨料水射流参数: 喷嘴直径为 1 mm, 靶距 x 为 10 mm, 磨料质量分数为 50%, 弹体与磨料材质的相关参数见表 1。当选取智能水刀排爆机器人的最低出口压力为 25 MPa 时, 应用以上参数计算得出 $\tau_{\max} = 1.22$ GPa。该数值远远超过了弹体的接触剪切强度 150 MPa^[4]。可以认为, 磨料水射流对弹体能够实施有效切割。由于两者级数相差较大, 且弹体壁厚仅为 2 ~ 3 mm, 切割过程将非常迅速, 且射流的动能损失很少, 一般认为不超过

5%^[5]。

表1 弹体与磨料的相关技术参数

Tab.1 Technical parameters of projectile
body and abrasive

名称	材质	密度/ (kg·m ⁻³)	直径/ mm	弹性模 量/GPa	泊松 比
防暴弹体	防锈铝	2.8×10 ³	37.000	70	0.30
磨料颗粒	石榴石	4.6×10 ³	0.178	310	0.26

2 安全性分析

在磨料颗粒冲击作用下,弹体在短时间内将被切开,此时磨料水射流将直接与防暴弹内部的装药接触,通过冲蚀粉碎以达到销毁的目的。防暴弹装药中含能组分为氯酸钾,其余为功能剂,采取压装结构。由于选用的氯酸钾粒度较小(100目左右),其爆炸威力高于一般单质装药,且具有一定的机械感度^[6]。因此,还需对装药的切割过程进行安全性分析。射流到达装药表面后会产生短暂的水锤压力,随后转化为滞止压力,射流出口压力的合理选择是保证装药发生破碎和过程安全性的首要条件。因此,过程安全性可以分为两个阶段,分别是水锤压力为危险源的冲击转爆轰(SDT)过程和以滞止压力为危险源的持续脉冲起爆(LALDS)过程^[7]。基于装药的临界起爆判据 $p_i^2 \cdot \tau = K$,以临界起爆压力衡量水锤压力在SDT过程中的安全性,并通过撞击感度相关数据加以验证。结合装药热感度,主要是5s临界爆点温度,用于评判LALDS过程中滞止压力作用下红外热感应试验方法确定的升温范围是否处于危险阈值。

2.1 SDT过程的安全性分析

磨料水射流作为冲击源时,由于刚性特征明显,属于强冲击载荷范围,符合对冲击载荷的动态响应理论。当水射流的头部刚刚接触到装药表面时,一旦射流速度达到某一临界值,装药的表面状态参数会发生突变,并形成应力波以加速破坏,该应力波的作用可产生通常意义上的水锤压力。该过程被称为动态加载过程,即SDT过程。水锤压力的危险程度通常用撞击感度来衡量。撞击感度指在机械撞击作用下,装药发生燃烧或爆炸的难易程度,可用落锤法测定^[7]。水锤压力对装药的影响,其总打击力包括磨料颗粒及水两部分的打击力之和。磨料颗粒的打击力由式(2)可以求出;水流的打击力可根据前苏联狄克霍米诺夫、巴巴宁经验公式^[8],对试验数据

进行数学分析得出

$$F_f = 120 \left(\frac{p}{100} \right)^{1.15} d^{1.75} \quad (6)$$

式中: F_f 为水射流对装药的表面打击,MPa; p 为出口压力,MPa; d 为喷嘴直径,mm。

因此,水锤压力 F 可表示为

$$F = F_i + F_f \quad (7)$$

在1.2节的水力参数条件下,可计算得出射流对装药表面打击的最大压力为262.4 MPa。接下来对氯酸钾落锤试验时受到的打击力进行计算,并将两者进行对比。氯酸钾在落锤质量为2 kg、落高为64 cm、落锤与之接触面小于10 mm、接触时间为100 μs时的撞击感度为50%^[9]。

根据动能定理,可得

$$v = \sqrt{2gh} \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度,m/s²; h 为落高,cm; v 为落锤与装药撞击时的速度,m/s。

根据动量定理:

$$Ft = mv \quad (9)$$

式中: F 为落锤与装药的撞击力,N; t 为落锤与装药的碰撞时间,s; m 为落锤的质量,kg; v 为落锤与装药撞击时的速度,m/s。

联立式(8)、式(9)得

$$F = \frac{m \sqrt{2gh}}{t} \quad (10)$$

计算出落锤对装药的冲击压力为715.2 MPa时,氯酸钾发生燃烧、爆炸的概率为50%。通过以上数据的比较,可知射流对装药的冲击压力(262.4 MPa)远远小于落锤试验中落锤对装药的冲击压力(715.2 MPa),可以间接证明水射流切割装药的安全性。同时由于水本身的冷却作用,更加保障了安全性。

2.2 LALDS过程的安全性分析

水锤压力作用于装药表面的持续时间仅为微秒级,然后会迅速衰减并基本稳定为滞止压力,随着冲击作用的持续,便形成了准静态加载过程,即LALDS过程。与其相对应的冲击起爆转换为长持续脉冲时间压力起爆,LALDS过程中滞止压力作用下的升温范围的危险阈值需要借助热感度来衡量。热感度指火炸药在热作用下发生燃烧或爆炸的难易程度,热起爆理论认为火炸药发生热爆炸有一个临界温度,一旦超过,系统产生的热量就急剧增加,从而发生爆炸,通常可用5s爆点来表示^[10]。在长时间压力作用下,含有磨料颗粒的射流与药柱接触面会形成较大的持续压力,伴有热量产生、热点形成

和升温变化,如果达到装药的爆点,在理论上会引起热爆炸。换言之,通过对防暴弹中的装药进行全程切割测温试验,与5 s爆点进行比较,可以判断在该过程下的安全性。

试验仪器:ThermaCAM S65型红外热成像仪(测温范围:−10~55℃)。试验条件:测温距离2 m;环境温度22.3℃。试验方法:当射流平稳运行5 min后,用红外热成像仪记录1 min内被切割装药区域(LI01)和水射流区域(LI02)的升温变化(图1)。

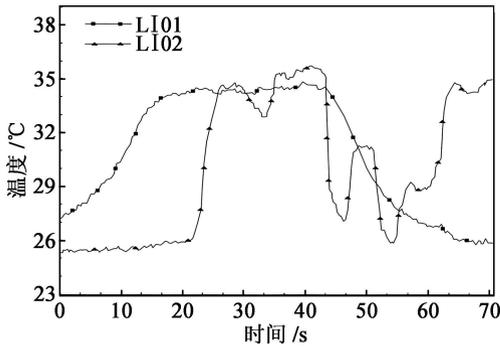


图1 切割过程中的红外热图

Fig. 1 IR thermo gram during the cutting process

由图1可知,水射流对药柱的冲击温度在前30 s内随时间的延长而升高,随后呈下降趋势。这是由于磨料水射流冲击药柱主要是通过磨料颗粒的冲击动压进行冲蚀破碎作用,过程中存在热量聚集现象。但随着时间的延长,药柱被破坏,热量被大量的冷态水包围并随之被迅速带走,因此,不能形成持续的热点。由表2可知,磨料水射流对药柱的冲击温度最高为38.1℃,远小于氯酸钾的爆点467℃(5 s),因此在LALDS过程中不会引发热起爆。

表2 红外热图解析

Tab. 2 Analysis for IR thermogram

标签		温度/℃
红外热图	最大值	38.1
	最小值	24.7
LI01	最大值	35.0
	最小值	25.3
	差值	9.7
LI02	最大值	38.3
	最小值	25.3
	差值	13.0

3 切割验证试验

3.1 试验过程

在切割机理和切割安全性的研究分析基础上,

利用前混合磨料水射流对4种型号的防暴弹分别进行切割试验。

试验条件中的水力参数:出口压力25 MPa,喷嘴直径1 mm,靶距8~10 mm,横移速度20~40 mm/min;磨料参数:粒度为80目,质量分数为50%,前混合添加方式。

试验对象选用4种防暴弹,分别为手投催泪(或发烟)弹和枪射催泪(或发烟)弹,弹体材质均为防锈铝,数量分别为40枚。除去外包装后依次放置于切割卡槽内,放置时互相贴紧防止晃动。试验人员在室外通过远程操作控制,并观察防暴弹的弹体和药柱是否完全分离,过程中是否出现燃烧、爆炸现象,试验如图2、图3所示。



图2 防暴弹切割实例

Fig. 2 Cutting example of anti-riot ammunitions



图3 防暴弹切割效果

Fig. 3 Cutting effect for anti-riot ammunitions

3.2 结果与分析

对4种防暴弹进行了分组切割试验,每组的切割数量均为40枚,平均每枚切割用时8 s,切口平整光滑,过程中无一发火,结果见表3。

根据可靠性理论中二项分布的单置信下限估计法,结合表3结果,实际未发生燃烧、爆炸情况下的概率,即对应可靠度下限 R 的置信度 c 为^[11]

$$c = 1 - R^n. \quad (11)$$

即可靠度下限值为

$$R = (1 - c)^{\frac{1}{n}}. \quad (12)$$

式中: n 为没有发生燃烧、爆炸的试验次数。

表3 4种防暴弹的切割结果

Tab.3 Cutting results of four anti-riot ammunitions

种类	尺寸/(mm × mm)	装药配比	装药量/g	试验枚数	发火枚数
XX-枪射催泪弹	∅38 × 140	氯酸钾 + CS + 其他功能助剂	82 ± 4	40	0
XX-枪射发烟弹		氯酸钾 + 染料 + 其他功能助剂		40	0
XX-手投催泪弹	∅37 × 126	氯酸钾 + CS + 其他功能助剂	82 ± 4	40	0
XX-手投发烟弹		氯酸钾 + 染料 + 其他功能助剂		40	0

选取 $c=0.9$, 已知 $n=160$, 则 $R=0.9857$ 。据此可知, 在上述射流参数范围值内, 水射流切割装药的安全不燃烧、爆炸的可靠度为: 在 90% 的置信水平下, 安全可靠度不低于 98.57%。

4 结论

1) 磨料水射流在最低出口压力 25 MPa 时, 磨料颗粒与弹体接触产生的接触剪切应力超过弹体的接触剪切强度, 可以实施有效作业。

2) 磨料水射流直接作用于装药时, 从装药感度的角度考虑, 分别对以水锤压力为危险源的 SDT 过程和以滞止压力为危险源的 LALDS 过程的安全性进行了分析。以临界起爆压力衡量水锤压力在 SDT 过程中的安全性, 并通过撞击感度相关数据加以验证。结合热感度评判 LALDS 过程中滞止压力作用下红外热感应试验方法确定的升温范围。两者均证明磨料水射流切割装药的过程是安全的。

3) 在理论分析的基础上, 完成了对 4 种型号共计 160 枚防暴弹的切割试验, 并取得了预期的效果: 在 90% 的置信水平下, 安全可靠度不低于 98.57%。试验表明, 前混合磨料水射流切割技术是一种安全、可靠的防暴弹处废方法。

参考文献

[1] 郭涛, 齐世福, 王树民, 等. 大批量废旧弹药爆破销毁技术的应用[J]. 工程爆破, 2011, 17(2): 89-91.
GUO T, QI S F, WANG S M, et al. Applications of destruction technology of large quantities of discarded ammunitions[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(2): 89-91.

[2] 蒋大勇. 智能水刀排爆机器人: CN 105945966A [P]. 2016-09-21.
[3] 于鸿春, 张永利. 磨料射流切割金属套管机理及计算公式[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 850-853.
YU H C, ZHANG Y L. Mechanism of abrasive jet slotting and establishment of its mathematical model [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(6): 850-853.
[4] 张沙, 龚烈航, 王稳华. 前混合磨料水射流切割金属火雷管研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(2): 72-75.
ZHANG S, GONG L H, WANG W H. Research on cutting metal flash detonator by premixed abrasive water jet [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(2): 72-75.
[5] 徐梵城. 前混合磨料水射流弹药切割机系统设计及切割模型的研究[D]. 长江: 长沙矿业研究院, 2011.
[6] 娄建武, 卢云. 氯酸钾炸药爆炸性能研究[J]. 爆破器材, 2008, 37(1): 15-17.
LOU J W, LU Y. Study on blasting characteristics of potassium chlorate explosive [J]. Explosive Materials, 2008, 37(1): 15-17.
[7] 蒋大勇. 废弃 HTPB 推进剂预处理与再利用中关键问题研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2011.
[8] 钟树良, 李振泉, 柏平, 等. 水射流切割炸药的安全性及试验研究[J]. 理论与探索, 2006(3): 44-46.
[9] 张国文, 陈新发. 炸药模拟件水射流切割参数的试验研究[J]. 含能材料, 2001, 9(1): 24-26.
ZHANG G W, CHEN X F. Research on waterjet cutting parametrization test for simulated material of explosive [J]. Energetic Materials, 2001, 9(1): 24-26.
[10] 欧育湘. 炸药分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
[11] BOMPAS—SMITH J H. 机械的可靠性: 可靠性数据资料的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.