

文章编号:1006-9941(2021)07-0617-08

# PTFE基含能药型罩射流释能特性及影响因素

李延<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 张雷雷<sup>2</sup>, 王在成<sup>1</sup>, 姜春兰<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点试验室, 北京 100081; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为了研究聚四氟乙烯(PTFE)基含能药型罩的动态释能特性及其形成的射流对目标的侵爆毁伤效果,采用静爆试验测量了含能射流与铝射流在准密闭容器中的动态超压,并通过理论计算得到射流释能及释能效率。分析认为,含能射流在成型过程中会发生爆燃反应,相比于铝射流,含能射流超压峰值可提升3~4倍。对于30 g含能药形罩,钨(W)含量为0%~70%时,随着W含量提高,射流释能降低,但药型罩承受爆炸驱动载荷提高,且钨颗粒与活性金属摩擦加剧,射流释能效率提高。对于PTFE/Ti药形罩,在13~30 g范围内,随着药型罩质量增加,射流释能能量提高,但侵彻体成型压力降低,射流释能效率下降。

**关键词:** 含能药型罩; 动态超压; 射流释能; 释能效率

中图分类号: TJ410.1

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021041

## 1 引言

聚四氟乙烯基(PTFE)基含能材料在聚能装药方面的应用,为提高射流侵彻后效作用提供了新的技术途径,受到国内外学者的广泛关注。与传统金属射流不同,含能射流可对目标实现动能和化学能联合毁伤。在毁伤效应方面,Baker<sup>[1]</sup>、Daniels<sup>[2]</sup>、肖建光<sup>[3]</sup>等通过PTFE基含能药型罩聚能装药毁伤混凝土类目标试验,发现射流在侵靶同时会发生内爆效应,提升对目标的结构毁伤效果;辛春亮<sup>[4]</sup>、万文乾<sup>[5]</sup>、张雪朋<sup>[6-7]</sup>开展了PTFE基含能药型罩射流侵彻装甲类目标试验,发现射流穿透钢靶后具有明显后效作用。在射流成型方面,曹辰<sup>[8]</sup>、王永志<sup>[9]</sup>、陈杰<sup>[10]</sup>开展了PTFE基含能药型罩射流成型数值模拟,获得射流成型规律,并通过X光摄像试验,证明与传统射流相比,PTFE基含能射流具有发散性。

从国内外公开发表的文献来看,有关PTFE基药型罩的研究主要集中在射流对不同目标的毁伤效应及射流的成型特性,而有关射流在成型过程中动态释能特

性的研究仍然较少。射流的动态释能关系到射流对目标靶的侵爆毁伤效果,为此,采用静爆试验与理论分析相结合的方法,对PTFE基药型罩的射流释能特性开展研究,研究结果对于含能药型罩的设计和威力评估具有一定的参考价值。

## 2 含能射流释能测试试验

### 2.1 试验测试系统

为了研究PTFE基含能药型罩射流释能特性,设计了如图1a所示试验测试系统,主要包括含能药型罩聚能装药、防护板、密闭测试罐、盖板及超压测试系统(包括压力传感器、动态应变仪、波形存储器)。传感器选用中国航天空气动力技术研究院研制的AK-1应变式压力传感器,量程10 MPa。盖板为4 mm厚钢板,由螺栓将其与密闭测试罐固定在一起,二者之间由橡胶垫密封。罐体侧壁装有应变式压力传感器,连接动态应变仪和波形存储器,测试罐体内部超压。为了降低炸药爆炸产生空气冲击波及爆轰产物对压力传感器的影响,在罐体上方设有防护板,含能药型罩聚能装药垂直置于防护板中央,距离盖板1倍炸高,为了便于含能侵彻体通过,在防护板中心位置开有 $\Phi 40$  mm的圆孔。密闭测试罐壁容积25 L,试验现场布置如图1b所示。此外,在试验过程中,使用高速摄影仪进行同步拍

收稿日期: 2021-02-28; 修回日期: 2021-04-05

网络出版日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672042)

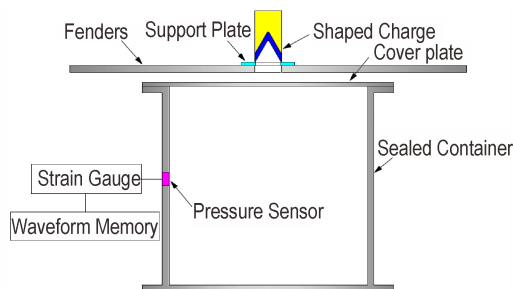
作者简介: 李延(1991-),男,博士,工程师,主要从事弹药设计研究。e-mail: 446032176@qq.com

通信联系人: 姜春兰(1962-),女,教授,博士生导师,主要从事弹药设计研究。e-mail: jiangchunwh@bit.edu.cn

引用本文: 李延,王伟,张雷雷,等. PTFE基含能药型罩射流释能特性及影响因素[J]. 含能材料, 2021,29(7):617-624.

LI Yan, WANG Wei, ZHANG Lei-lei, et al. Jet Energy Release Characteristics and Influencing Factors of the PTFE-based Energetic Liner[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021,29(7):617-624.

摄,记录试验现象,拍摄频率设为20000帧/s。



a. schematic diagram of test arrangement



b. test arrangement photo

图1 试验测试系统及现场布置

Fig. 1 Schematic diagram and physical picture of test arrangement

## 2.2 试验方案

以PTFE/Ti/W含能药型罩为研究对象,药型罩结构为圆锥形,锥角 $60^\circ$ ,口径(CD)40 mm,主装药高度1.25 CD,质量约85 g。试验共分为三组,第一组(方案1、方案7)以惰性铝罩为参照,探索含能药型罩的释能属性;第二组(方案1、方案2、方案3、方案4)在一定药型罩质量条件下,研究W含量对射流释能的影响,第三组(方案1、方案5、方案6)以未添加W粉的含能

罩为对象,研究药型罩质量对射流释能的影响,具体试验方案如表1所示,其中含能药型罩中PTFE和Ti的相对质量始终遵循零氧平衡下PTFE/Ti热化学方程式。

表1 试验方案

Table 1 Test plan

No.	materials	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	liner mass/g
1	PTFE/Ti/W (68/32/0)	2.64	30.0
2	PTFE/Ti/W (47/23/30)	3.56	30.0
3	PTFE/Ti/W (34/16/50)	4.65	30.0
4	PTFE/Ti/W (21/10/70)	6.67	30.0
5	PTFE/Ti/W (68/32/0)	2.64	21.5
6	PTFE/Ti/W (68/32/0)	2.64	13.0
7	Al	2.70	30.0

## 3 试验测试结果与分析

### 3.1 高速摄像结果与分析

含能罩与铝罩聚能装药在不同时刻的静爆图像如表2所示,可以看出,在静爆过程中,除了炸药爆炸产生的火光之外,测试罐上方还出现一股向上喷射的火光,这是由于罐内高温高压气体从盖板穿孔泄出而造成的。从火光程度上来看,含能射流产生的火光更为明亮,且范围较大,持续时间较长,达到了20 ms以上,相比之下,铝射流产生的火光较为微弱,持续时间较短,在20 ms时火光就已基本消失。由此可以判断,含能射流在测试罐内部发生了强烈的放热化学反应,释放出大量能量。而惰性铝罩之所以也喷射出小股火光,分析认为,这是由于在静爆过程中,少量爆轰产物会不可避免的跟随射流进入罐体内部,形成超压,引发泄压效应。

表2 含能罩与铝罩静爆试验对比

Table 2 Test comparison of energetic and aluminum liners

materials	time / ms					
	0	4	8	12	16	20
PTFE/Ti						
Al						

此外,不同W含量含能罩的静爆图像如表3所示。可见,随着W含量的增加,泄压产生的火光整体呈现出削弱的趋势,火光范围减小,持续时间缩短,射流释能效应减弱,这也说明了W粉在射流成型过程中

保持了较高的惰性,不会或很少参与到化学反应当中;不同质量含能罩的静爆图像如表4所示,随着药型罩质量的增加,药型罩携带含能材料增多,泄压火光整体呈现出增强的趋势,射流释能效应增强。

表3 不同W含量含能罩静爆试验对比

Table 3 Test comparison of energetic liner with different W contents

W content /%	time/ms					
	0	4	8	12	16	20
0						
30						
50						
70						

表4 不同质量含能罩静爆试验对比

Table 4 Test comparison of energetic liners with different masses

mass / g	time/ms					
	0	4	8	12	16	20
13.0						
21.5						
30.0						

### 3.2 动态超压结果与分析

含能射流在密闭测试罐内释能产生超压效应, 超压测试系统测得典型实际压力如图2黑线所示, 可以看出, 压力在3 ms内上升到最大值, 然后开始缓慢下降。在压力上升与下降过程中均出现规律性的震荡, 这主要是由于含能射流在测试罐内产生的超压脉冲会不断地在罐体壁面发生反射, 从而引发压力波形震荡, 经脉冲多次反射后, 罐内压力逐渐趋于均匀, 此时, 波形震荡也随之减弱。实际测试压力只能代表传感器位置处的局部瞬态超压, 为了反映测试罐内的宏观整体超压, 需对试验测得的压力曲线进行平滑处理, 得到射流释能的准静态超压-时间曲线, 如图2红线所示。

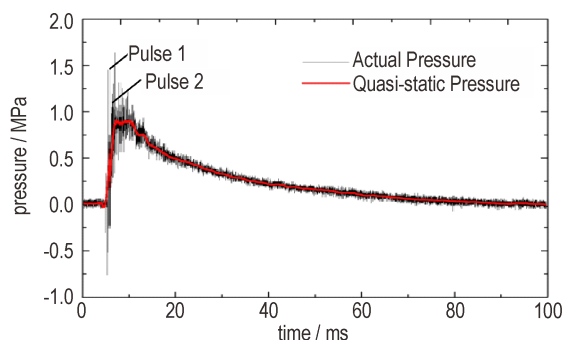


图2 实际压力与准静态压力

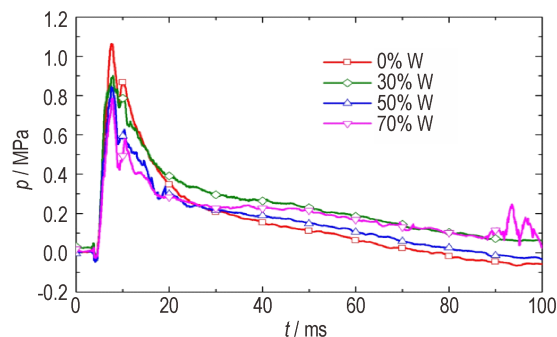
Fig.2 Actual and quasi-static pressures

不同方案下射流释能准静态超压-时间曲线如图3所示。由图3可以看出, 含能射流超压在2~4 ms上升到最大值, 说明射流在测试罐内发生了强烈的爆燃反应。随着药型罩W含量的增加, 超压峰值从1.06 MPa下降到了0.78 MPa, 如图3a所示, 射流爆燃效应减弱, 另外, 随着药型罩质量的增加, 超压峰值从0.83 MPa上升到了1.06 MPa, 如图3b所示, 射流爆燃效应增强。以上两种变化规律表明, 含能射流的爆燃效应与药型罩所携带含能材料的质量具有明显的正相关性, 这也与泄压火光强度所呈现出的规律相吻合。

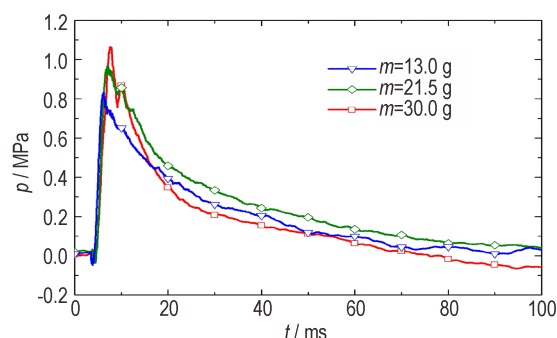
对于惰性铝射流来说, 测试罐内仍然产生了0.20 MPa的超压, 如图3c所示。分析认为, 这主要是由于少量炸药爆轰产物会跟随射流进入罐体内部, 另外, 炸药爆炸产生的空气冲击波同样会对超压测试造成干扰, 再有, 无论是含能射流还是惰性射流, 其动能最终都会向热能发生转换, 而这些因素均会造成测试罐内部压力升高。

### 3.3 射流侵彻盖板结果与分析

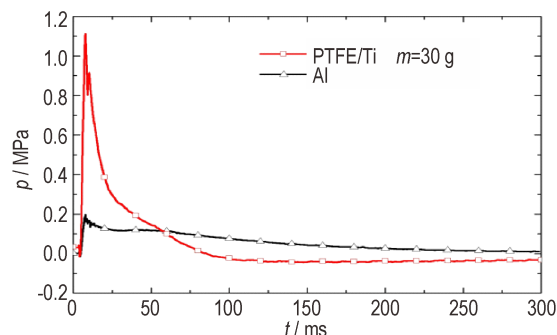
含能罩与铝罩在静爆后的盖板情况如图4所示。由图4可以看出, 铝罩的盖板除了中心射流侵彻形成



a. different W contents



b. different masses



c. comparison of energetic and aluminum jets

图3 射流释能准静态超压-时间曲线

Fig.3 Quasi-static overpressure-time curves of jet energy release

的穿孔外, 基本没有发生太大变化, 而含能罩的盖板明显被熏黑, 这是由于射流反应生产单质碳附着于盖板表面。而盖板外表面被熏黑也说明了部分含能材料并未进入罐体内部, 而是在盖板外发生化学反应。另外, 相比于铝罩的盖板, 含能罩的盖板发生了明显的鼓起现象, 这是由于含能射流在罐内释能产生气体膨胀效应, 膨胀气体作用于盖板使其发生变形, 将盖板的鼓起高度记为  $h$  (图5)。试验数据见表5, 从表5可以看出, 盖板的鼓起高度与罐内峰值超压呈现出一定的正相关性, 即超压峰值越高, 盖板鼓起越高。因此盖板的鼓起高度也从一个侧面反映出含能射流的爆燃做功能力。

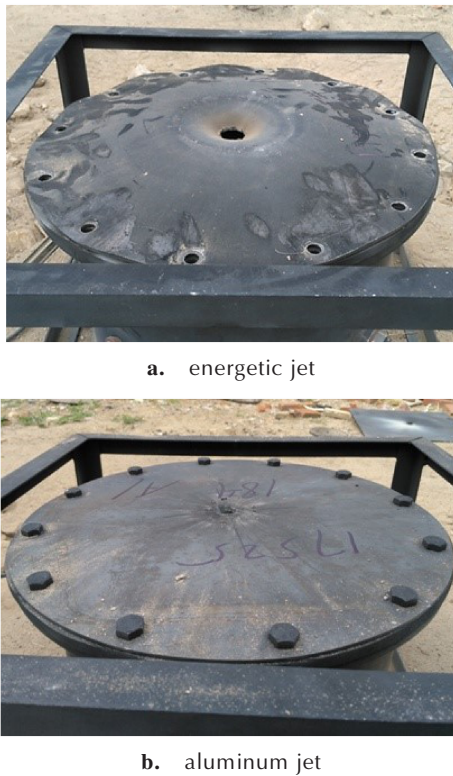


图4 试验后盖板情况  
Fig.4 Cover condition after test

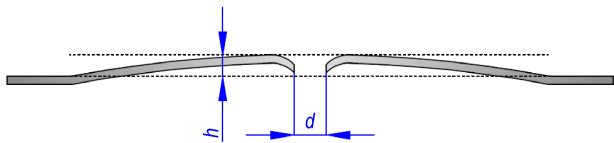


图5 盖板变形示意图  
Fig.5 Cover deformation diagram

表5 试验数据统计

Table 5 Test data statistics

No.	program	height $h / \text{mm}$	overpressure peak $\Delta p / \text{MPa}$
1	0%W, 30.0 g	21.5	1.06
2	30%W, 30.0 g	20.5	0.90
3	50%W, 30.0 g	20.0	0.85
4	70%W, 30.0 g	16.5	0.78
5	0%W, 21.5 g	21.0	0.96
6	0%W, 13.0 g	20.5	0.83
7	Al, 30.0 g	5.0	0.20

## 4 含能射流密闭容器释能模型

### 4.1 射流密闭容器释能过程

含能射流在密闭容器内的释能过程伴随着射流爆燃与超压传递,结合试验现象与数据,可以将该过程分

为四个阶段:射流撞板、反应膨胀、超压反射以及压力排泄,如图6所示。

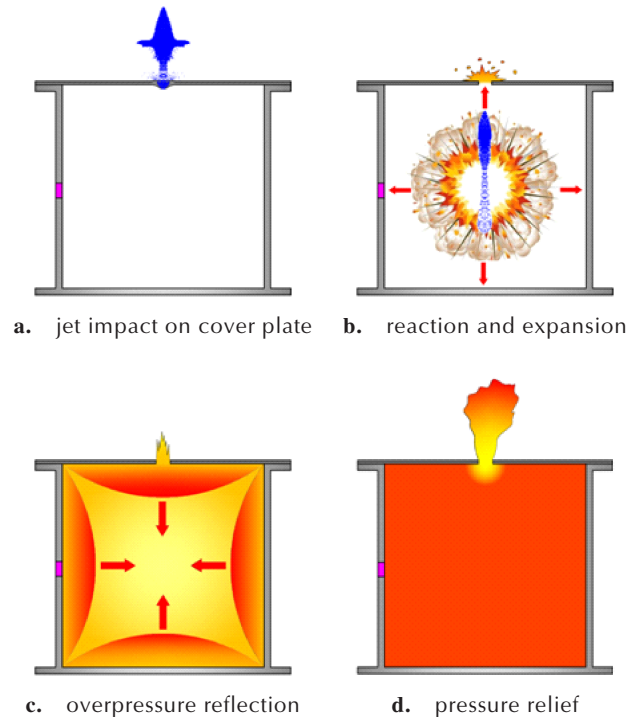


图6 含能射流密闭容器释能示意图  
Fig.6 Schematic diagram of jet energy release in the chamber

首先,含能药型罩在炸药爆炸驱动下形成射流,在炸药强冲击载荷作用下,含能材料化学反应被激发,但此时反应程度较低,射流并未发生明显膨胀。随后,射流侵彻盖板进入密闭容器内部,如图6a所示,在该过程中,射流受到盖板的冲击作用而使得反应被二次激发,但由于盖板很薄,冲击脉冲的持续时间非常短,而侵彻体较长,因此,只有射流头部受到短暂冲击,盖板对整个射流的激发作用非常有限。

随着射流反应的进行,PTFE不断解聚生成气态 $\text{C}_2\text{F}_4$ ,并与活性Ti粉发生氧化还原反应,射流逐渐由凝聚态转化为气态,射流直径不断加粗,体积不断膨胀,密度不断降低。当射流整体穿过盖板进入到容器内时,侵彻体的尾裙及部分杆体由于直径较大,速度较低,无法跟随射流进入,而是留在穿孔附近,撞击盖板,在穿孔周围形成局部爆燃反应。而进入到容器内的射流则发生强烈的爆燃反应,生成大量热量和一定量的气态产物,并形成爆燃波向四周传播,如图6b所示。

当爆燃波传至容器壁面时,传感器被瞬间触发,压力信号急剧上升,动态超压达到脉冲峰值1,见图2。爆燃波经壁面反射后,又向容器中心传去,如图6c所示,

此时, 压力信号迅速衰减。随着爆燃波不断向内聚合, 容器中心又一次形成了气体高压区, 当气体被压缩到一定程度时将再次发生膨胀效应, 形成超压脉冲向容器壁面传播, 动态超压达到脉冲峰值 2 见图 2, 如此往复。

当超压气体经历多次膨胀与反射的脉动过程后, 容器内的气体分布逐渐趋于均匀, 此时, 含能射流的化学反应基本结束, 容器内的超压震荡幅度明显降低, 准静态压力达到最大值。高温高压气体不断从盖板穿孔泄出, 罐内压力逐渐下降, 如图 6d 所示。在这一阶段, 容器内各个位置的参数状态基本可以认为是均衡的, 仅在盖板穿孔附近的一小部分半球形区域内呈现梯度变化。

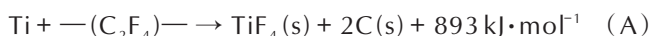
#### 4.2 射流密闭容器释能计算及分析

假设罐内气体为理想气体, 根据 Ames<sup>[11]</sup> 的理论, 气体热增率与准静态压力变化率以及泄压孔处气体质量变化率之间的关系如(1)式:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V}{\gamma - 1} \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\gamma p_1 V}{m(\gamma - 1)} \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

其中,  $Q$  为气体热力学能, J;  $p_1$  为罐内准静态压力, Pa;  $V$  为罐体容积, L;  $\gamma$  为气体绝热指数;  $m$  为气体质量, g。

PTFE/Ti 反应体系的热化学方程式如下:



含能射流在测试罐中发生爆燃反应时, 容器内气体压力急剧升高, 当气体准静态压力达到最大值时, 射流化学反应基本结束。在容器内压力上升的这段时间里, 虽然有部分气体会从盖板穿孔流出, 造成一定的泄压效应, 但由于孔径很小, 且压力上升时间非常短, 因此可以认为在该过程中容器是近似密闭的; 另外, 由方程(A)可知, 含能射流在反应过程中无气态产物生成, 虽然产物 C 会与  $\text{O}_2$  继续发生二次反应生成  $\text{CO}_2$ , 但该反应持续时间较长, 大约为数百毫秒<sup>[12]</sup>, 因此在计算射流爆燃过程中气体质量变化时, 可以忽略二次反应的影响。那么有  $dm/dt = 0$ , 方程(1)可简化为:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V}{\gamma - 1} \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (2)$$

对方程(2)求积分, 得到:

$$\Delta Q = \frac{V}{\gamma - 1} \Delta p \quad (3)$$

其中,  $\Delta Q$  为容器内气体热力学能增量,  $\Delta p$  为准静态压力峰值。

由于压力上升时间非常短, 因此可以忽略升压阶段气体热量的散失。在此过程中, 气体热能增加有以下三个方面原因: (1) 含能射流化学反应释放能量;

(2) 少量爆轰产物跟随射流进入罐体内部造成气体内能增加; (3) 射流的动能向热能发生转换。其中, 射流发生化学反应是最主要的原因, 但在计算射流释能时还需考虑其他因素带来的影响。为此, 可将惰性铝射流设为参照, 含能射流的释能量  $\Delta E$  等于气体热增量  $\Delta Q$  减去相同条件下铝射流产生的气体热增量  $\Delta Q_{\text{Al}}$ , 即:

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta Q_{\text{Al}} = \frac{V}{\gamma - 1} (\Delta p - \Delta p_{\text{Al}}) \quad (4)$$

那么, 含能射流的释能效率  $\eta$  可表示为:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_T} \quad (6)$$

其中,  $E_T$  为含能射流的理论释能量, 即药型罩携带含能材料的理论总释能量, J。由方程(A)可知 PTFE/Ti (67.6/32.4) 的热值为  $6.04 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ , 进而计算得到各药型罩的理论释能量, 如表 6 所示。

根据射流释能计算模型得到不同方案下射流释能量及释能效率(表 6), 可以看出, 随着药型罩 W 含量的提高(方案 1, 2, 3, 4), 射流释能量从 53.8 kJ 下降到了 36.3 kJ, 但释能效率却从 29.7% 上升到了 66.7%。这主要是由于当药型罩 W 含量提高时, 材料密度增加, 波阻抗同时会增加, 在炸药驱动下, 药型罩材料内部会达到更高的压力, 进而产生更高的冲击升温, 加剧含能材料的化学反应。另外, 由于钨粉具有较高的硬度, 在冲击作用下会与活性 Ti 粉发生强烈的摩擦, 从而增加局部热点的形成, 提高反应的激活程度。

此外, 随着药型罩质量的增加(方案 6, 5, 1), 射流释能从 39.4 kJ 上升到了 53.8 kJ, 但释能效率却从 50.2% 下降到了 29.7%。这是由于当药型罩质量增加时, 爆炸产生的冲击波沿壁厚方向传播的距离变长, 相应的衰减也增加, 因此, 药型罩整体承受的驱动压力降低, 反应激发程度也随之减弱; 另外, 药型罩的压垮速度降低, 在罩壁微元自身挤压汇合形成射流的过程中, 侵彻体内部压力降低。

从以上结果和分析可以看出, 含能药型罩在射流成型过程中的释能效率大约在 29.7%~66.7%。笔者以为, 这一数据与实际值会存在一定误差, 主要有以下两方面原因: 首先, 在上述有关射流释能行为的分析中已经提到, 侵彻体的尾裙及杵体直径较大, 且速度较低, 无法全部跟随射流穿过侵孔, 进入容器内部, 部分含能材料会遗留在盖板外发生爆燃反应; 另外, 当测试罐内超压达到最大值时, 含能射流的化学反应并没有

表6 含能射流释能统计

Tab.6 Statistics of jet energy release

No.	program	theoretical energy / kJ	actual energy / kJ	effectiveness / %
1	0%W, 30.0 g	181.2	53.8	29.7
2	30%W, 30.0 g	126.8	43.8	34.5
3	50%W, 30.0 g	90.6	40.6	44.8
4	70%W, 30.0 g	54.4	36.3	66.7
5	0%W, 21.5 g	129.9	47.5	36.6
6	0%W, 13.0 g	78.5	39.4	50.2

完全结束,在泄压过程中仍有少量含能材料会继续发生化学反应,部分能量甚至会在测试罐外释放出来,而试验分析并未考虑超压峰值后含能射流的释能,因此本研究所获得的射流释能应低于实际值。

## 5 结论

设计了PTFE基含能药型罩聚能装药射流释能测试系统,测试结果揭示了含能射流与惰性射流的释能差异,获得含能射流释能随药型罩W含量及质量的变化规律,并建立射流释能计算模型,主要研究成果如下:

(1)含能射流在成型过程中会发生爆燃反应,形成超压效应。对于试验设计方案来说,含能射流在25 L容器中形成的准静态超压峰值介于0.78~1.06 MPa,与传统铝射流的0.20 MPa相比,超压效果显著。

(2)含能药型罩射流释能受W含量影响,对于30 g含能药型罩,当W含量由0%提高到70%时,射流释能能量从53.8 kJ下降到了36.3 kJ,射流释能效率从29.7%上升到了66.7%。

(3)含能药型罩射流释能受药型罩质量影响,对于PTFE/Ti药型罩,当质量由13.0 g增加到30.0 g时,射流释能能量从39.4 kJ上升到了53.8 kJ,射流释能效率从50.2%下降到了29.7%。

### 参考文献:

- [1] Baker E L, Daniels A S, Ng K W, et al. Barnie: a Unitary Demolition Warhead [C]//19th International Symposium on Ballistics, Defence Procurement Agency, RUAG Land Systems and RUAG Munition, Interlaken, Switzerland, 2001: 569-574.
- [2] Daniels A S, Baker E L, DeFisher S E, et al. BAM: Large Scale Unitary Demolition Warheads [C]//23rd International Symposium on Ballistics, Universidad Politécnica de Madrid and International Ballistics Committee, Tarragona, Spain, 2007: 239-246.
- [3] 肖建光. 活性聚能侵彻体作用混凝土结构靶毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.  
XIAO Jian-guang. Research on Damage Effects of Multi-layered

- Concrete Targets Impacted by Explosively Formed Penetrator [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [4] 辛春亮,余道建,史文卿,等. 活性药型罩聚能装药子弹毁伤效应研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 217-221.  
XIN Chun-liang, YU Dao-jian, SHI Wen-qing, et al. Damage effects of shaped charge comprised of reactive materials liner [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2): 217-221.
- [5] 万文乾,余道强,彭飞,等. 含能材料药型罩的爆炸成型及毁伤作用[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2): 235-240.  
WAN Wen-qian, YU Dao-qiang, PENG Fei, et al. Formation and terminal effect of an explosively-formed penetrator made by energetic materials [J]. *Explosion and Shock Wave*, 2014, 34(2): 235-240.
- [6] 张雪朋. 活性射流作用钢靶侵彻爆炸联合毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.  
ZHANG Xue-peng. Research on penetration and blast combined damage effects of reactive material jet against steel target [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [7] 张雪朋,肖建光,余庆波,等. 活性药型罩聚能装药破甲后效超压特性研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1388-1394.  
ZHANG Xue-peng, XIAO Jian-guang, YU Qing-bo, et al. Armor penetration aftereffect overpressure produced by reactive material liner shaped charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1388-1394.
- [8] 曹辰. 活性聚能装药反机场跑道毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.  
CAO Chen. Research on damage effects of Reactive Material Liner Shaped Charge Against Airport Runway [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [9] WANG Yong-zhi, YU Qing-bo, ZHENG Yuan-feng, et al. Formation and Penetration of Jets by Shaped Charges with Reactive Material Liners [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41: 18-622.
- [10] 陈杰,尹建平,韩阳阳,等. 基于SPH方法的低密度粒子流成型数值仿真[J]. 含能材料, 2017, 25(9): 756-762.  
CHEN Jie, YIN Jian-ping, HAN Yang-yang, et al. Numerical simulation of low density particle jets formation based on SPH method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(9): 756-762.
- [11] Richard G. Ames. Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials [R]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2005-279: 2005.
- [12] Richard G Ames, Samuel S Waggner. Reaction Efficiencies for Impact-Initiated Energetic Materials [C]//In Proceedings of the 32nd International Pyrotechnics Seminar, Karlsruhe, Germany, 28 June-1 July 2005.

## Jet Energy Release Characteristics and Influencing Factors of the PTFE-based Energetic Liner

LI Yan<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Lei-lei<sup>2</sup>, WANG Zai-cheng<sup>1</sup>, JIANG Chun-lan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The dynamic energy release characteristics of the PTFE-based energetic liner are related to the damage effect of the jet to the target. In this paper, the dynamic overpressure of energetic and aluminum jets in a quasi-closed chamber was measured by static explosion test. The jet energy release and energy release efficiency were obtained by theoretical calculation. The results showed that the energetic liner underwent a deflagration reaction during the forming process, and the overpressure peak of the energetic jet can be increased by 3 times to 4 times compared with that of aluminum jet. For PTFE/Ti energetic liner, in the content range of 0% to 70%, as the tungsten content increased, the jet energy release decreased. But the energy release efficiency was improved due to the increased explosive driving load and the intensified friction between tungsten particles and active metals. For PTFE/Ti energetic liner, in the mass range of 13–30 g, as the mass of the liner increased, the jet energy release was improved. But the energy release efficiency dropped due to the decreased forming pressure of the penetrator.

**Key words:** energetic liner; dynamic overpressure; jet energy release; energy release efficiency

**CLC number:** TJ410.1

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021041

(责编: 王艳秀)