

文章编号:1006-9941(2023)08-0786-11

球形含能结构材料弹体超高速撞击多层薄钢靶的毁伤特性

曹进¹,陈春林¹,马坤¹,高鹏飞¹,田洪畅¹,冯娜^{1,2},钱秉文¹

(1.西北核技术研究所,陕西西安710024;2.北京理工大学北京100081)

摘要:为研究含能结构材料对多层薄钢靶的超高速毁伤特性,利用二级轻气炮开展了PTFE/Al基和Al基金属两种含能结构材料超高速撞击多层钢靶的典型毁伤模式研究,得到了材料类型和侵彻速度对毁伤效应的影响。研究表明,相比于惰性金属材料,两种含能结构材料对多层薄钢靶均具有明显的靶后横向毁伤增强效应,能够对第二层靶板产生大破孔的毁伤效果,破孔孔径可达弹径的4倍以上。基于AUTODYN数值仿真软件开展了含能结构材料参数有效性验证和含能弹体不同侵彻速度下毁伤效果的数值仿真,结果显示J-C强度模型联合Lee-Tarver三项式点火反应模型和J-C强度模型联合Shock状态方程分别能够较好地描述PTFE/Al基和Al基金属含能结构材料对多层薄钢靶的破孔毁伤特性。此外,材料释能机制的差异使得提高侵彻速度对提升PTFE/Al基含能结构材料的毁伤效果的作用有限,但能够明显提升Al基金属含能结构材料对多层钢靶板的毁伤效果。

关键词:PTFE/Al基含能材料;Al基金属含能材料;超高速撞击;多层钢靶;毁伤效应

中图分类号:TJ5;TJ04;O385

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2023131

0 引言

含能结构材料是一种具有较高能量密度和一定的机械强度的材料,由于其在静态具有良好的安定性,同时在动态撞击时能够快速反应释能,产生爆燃或爆轰效应,以烧蚀、引燃、超压等方式对人员或设备造成破坏^[1-3]。因此,含能结构材料成为近年来战斗部毁伤元材料的研究热点^[4-6]。目前,含能结构材料主要分为活性金属/氟聚物材料体系和全金属材料体系,其中活性金属/氟聚物材料体系以聚四氟乙烯/铝(PTFE/Al)为代表,具有能量密度高、反应速率高等特点^[7-9]。研究表明,PTFE/Al系材料能量密度达 $14.9\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[10],增压率可达 $144.8\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[11]。相比于前者,以Ni-Al基合金、Zr基合金和高熵合金为代表的金属材料体系具有较高的密度和强度,但能量密度较低^[12-13]。一般而

言,全金属含能结构材料密度一般为 $6\sim 12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。材料强度受体系影响较大,如Ni-Al系合金强度约为 300 MPa ^[14-15],而高熵合金材料断裂强度最高可达 2000 MPa 以上^[16]。在战斗部的应用研究方面,王海福^[17]、郑元枫等^[7]开展了大量PTFE/Al系含能结构材料在动能破片应用背景下的材料释能特性研究,研究表明PTFE/Al材料有大破孔、强靶后超压和强引燃效应,其在 27 L 密闭靶箱形成的超压可达 0.6 MPa ,或可直接引燃航空煤油。而全金属含能结构材料其在 27 L 密闭靶箱形成的超压达 0.2 MPa ,靶后超压特性略弱于PTFE/Al材料^[18]。

学者已通过大量实验基本明晰了含能结构材料的释能特性,但对含能结构材料的毁伤效果效应研究仍有不足之处。在已公开报道的文献中,弹体侵彻速度大都低于 $1500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,不能反应含能结构材料弹体在超高速($>5\text{ Ma}$)条件下对目标的毁伤效应。虽然张庆明等^[19-20]开展了Al和PTFE/Al材料在超高速撞击条件下相互作用机理的实验与仿真研究,但在实验中PTFE/Al材料用作为Whipple防护屏,无法将结果直接应用于含能结构材料的毁伤效应研究上。另外,鉴于两类含能结构材料在力学响应行为和释能特性上差异较大,因此两者在战斗部的设计与应用上的侧重也应

收稿日期:2023-06-20;修回日期:2023-08-12

网络出版日期:2023-08-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11772269)

作者简介:曹进(1991-),男,博士,助理研究员,主要从事冲击动态力学研究。e-mail:caojin@nint.ac.cn

通信联系人:钱秉文(1987-),男,博士,副研究员,主要从事冲击动态力学研究。e-mail:qianbingwen@nint.ac.cn

引用本文:曹进,陈春林,马坤,等.球形含能结构材料弹体超高速撞击多层薄钢靶的毁伤特性[J].含能材料,2023,31(8):786-796.

CAO Jin, CHEN Chun-lin, MA Kun, et al. Investigation on Damage Characteristics of Multilayer Thin Steel Target Penetrated by Hypervelocity Spherical Reactive Materials Projectile[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(8):786-796.

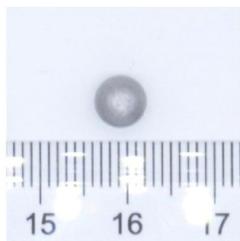
该有所不同。但现有研究未明确两类含能结构材料的毁伤特性差异,需要开展对比实验,获得两类含能结构材料在相同工况下的毁伤效果。

针对上述问题,本研究采用侵彻实验与数值仿真相结合的方式对两种含能结构材料的毁伤特性进行研究。首先利用二级轻气炮将两类典型含能结构材料弹体加速至约 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后撞击多层钢靶目标,通过对比相同状态下惰性弹体对靶标造成的毁伤形貌,明晰含能结构材料对多层钢靶的毁伤特性。再利用 AUTODYN 有限元数值仿真软件对侵彻实验进行复现,并对比验证仿真结果与实验结果的一致性。在确定一致性高的情况下,继续利用数值仿真方式,讨论在 $1600\sim 2400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度段内,侵彻速度对两种含能结构材料对多层钢靶的毁伤特性的影响规律。

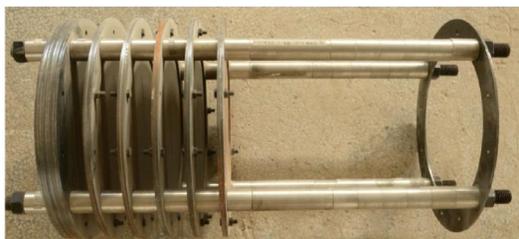
1 超高速侵彻试验

1.1 试验设置

被试材料选用 PTFE/Al 基含能结构材料和 Al 基金属含能结构材料,密度分别为 $6.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $7.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。弹体为球形结构,直径 6 mm (图 1a)。为研究含能结构材料与惰性材料的毁伤特性差异,选用同尺寸 DT1900 超高强度钢弹体作为对比,密度 $7.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。实验用靶标为等间距多层金属薄板,靶体材料为 Q355 钢,靶板尺寸为 $\Phi 380 \text{ mm}\times 1 \text{ mm}$,靶间距为 50 mm (图 1b)。



a. spherical projectile



b. multilayer thin steel target

图 1 球形弹体和多层靶板照片

Fig.1 The photography of spherical projectile and multilayer thin steel target

超高速侵彻试验利用西北核技术研究所自建 57/10 二级轻气炮实验系统进行,利用二级轻气炮将被试弹丸加速至约 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,弹体速度利用激光遮断法和高速摄像法进行综合测定。激光遮断法采用三路红外激光束联合 Tektronix DPO4000 型示波器,采样率 $10.0 \text{ MS}\cdot\text{s}^{-1}$ 。高速摄像法采用 Phantom2012 高速摄像机,帧频 100000 fps 。二级轻气炮装置示意图如图 2 所示。

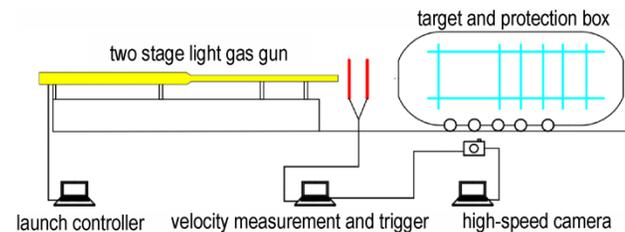


图 2 二级轻气炮实验装置示意图

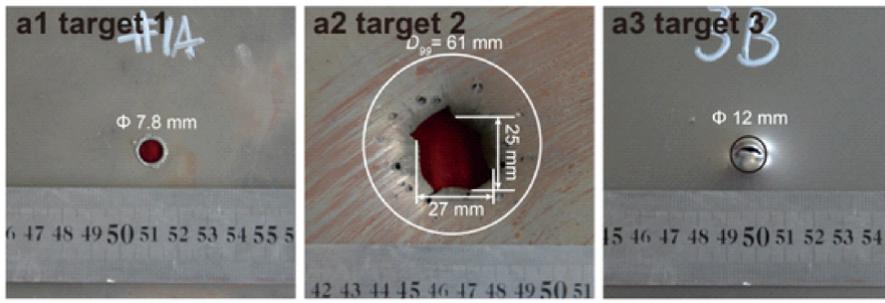
Fig.2 Schematic diagram of two stage light gas gun equipment

1.2 试验结果与毁伤特性分析

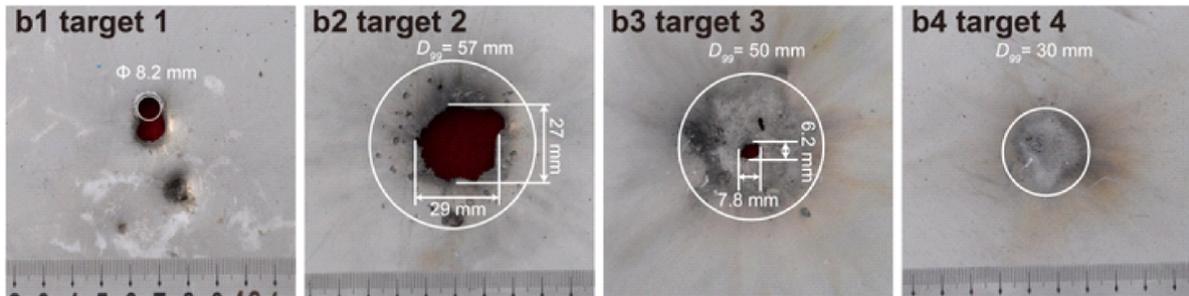
图 3 是 Q355 多层钢靶受 PTFE/Al 基、Al 基含能结构材料和 DT1900 超高强度钢弹体侵彻后的形貌,三种弹体侵彻速度分别为 $2010, 1990, 1920 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中每层靶板的破孔尺寸由中心主破孔横向和纵向最大距离的均值 d 表示,毁伤尺寸由弹坑最大散布区 D_{99} 表示^[21-22]。

由图 3a 可以看出,PTFE/Al 基含能结构材料弹体可对三层钢板造成破孔毁伤。首层靶板中心弹孔为规则圆形,破孔边缘出现“翻唇”变形,破坏模式为弹体超高速撞击导致的冲塞破坏(图 3a1)。第二层靶板中心出现远大于弹径的破孔,破孔边缘包含因靶板撕裂形成的花瓣型破孔和因靶后破片对靶板剪切作用而形成的冲塞型破孔(图 3a2)。此外,破孔边缘有含能材料释能导致的轻微烧蚀,且附近出现大量由首层靶后破片撞击产生的孔洞及弹坑。第二层靶板破坏模式为花瓣冲塞复合型破孔和卫星破孔/成坑。第三层靶板破坏模式为伴有局部撕裂的鼓包(图 3a3)。

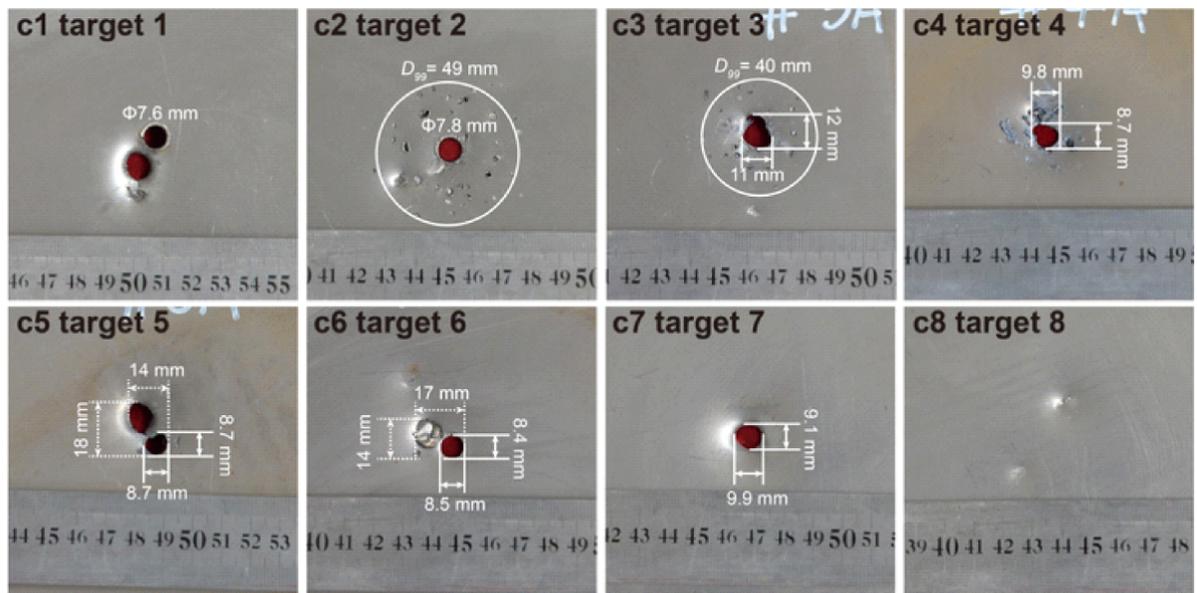
Al 基含能结构材料弹体可对四层钢板造成毁伤(图 3b),其对首层靶板破坏模式与 PTFE/Al 基含能结构材料弹体对靶板造成的破坏模式相同。第二层靶板的破坏模式虽然同样为花瓣冲塞复合型破孔和卫星破孔/成坑,但花瓣破孔边缘有大量由首层靶后碎片云撞击形成的弧形弹洞,第二层靶板的冲塞型破坏更为明显(图 3b2)。第三层靶板在冲塞破孔附近出现因含能结构材料释能导致大范围烧蚀痕迹,靶板的破坏模式



a. the photography of targets after penetration by PTFE/Al-based reactive material (RM)



b. the photography of targets after penetration by Al-based all-metal RM



c. the photography of targets after penetration by DT1900 steel

图3 三种材料球形弹体侵彻后的靶板形貌

Fig.3 The photography of targets after penetration by three kinds of materials

为中心冲塞破孔和烧蚀毁伤(图 3b3)。第四层靶板破坏模式为冲击成坑和烧蚀毁伤,烧蚀面尺寸较第三层有所减小。

DT1900 超高强度钢弹体可对 8 层钢板造成毁伤(图 3c)。首层靶板的破坏模式与前两者相同。第二、三层靶板在中心穿孔附近出现因靶后碎片云撞击形成的弹坑,靶板的破坏模式为中心冲塞破孔和卫星成

坑。需要特别说明的是,在图 3c1 中,中心圆孔左下方出现的第二个破孔为塑料弹拖未分离干净撞击上靶导致。由于塑料弹拖在撞击后迅速破碎燃烧,仅对第二层靶板中心圆孔左下方位置形成浅凹坑。且第二层靶卫星坑呈以中心弹孔为圆心的环状分布,为金属弹体超高速正撞击导致。因此,塑料弹拖撞击首层靶板对后续分析 DT1900 超高强度钢弹体对多层钢靶的毁伤

机制无明显影响。第四~六层靶板在中心破孔附近出现残余碎片和与主破孔尺寸近似破孔,分析为弹体前端冲塞块在飞行过程中与弹体分离后撞击靶板形成,靶板的破坏模式为中心冲塞破孔和碎片破孔/成坑。第七、八层分别仅有一个规则圆形破孔和撞击坑。

图4为三种弹体对多层钢靶毁伤的统计结果,图中实线和虚线分别代表相对破孔尺寸和相对毁伤尺寸随毁伤层数的变化规律,定义平均破孔尺寸和毁伤尺寸与弹体直径(BD)之比为破孔尺寸和相对毁伤尺寸。由图4可知,DT1900超高强度钢弹对靶板的破孔尺寸始终在1.3~1.9 BD,随侵彻层数的变化较小,毁伤尺寸在第二层靶板达到最大(8.2 BD),随后逐渐减小。原因在于DT1900超高强度钢强度远高于靶板强度,弹体在超高速侵彻时不易发生破坏,因此破孔大小无明显变化。由于弹体速度在侵彻过程中不断降低导致弹靶相互作用机制发生变化,因此靶板的破坏机制和毁伤特性随侵彻层数出现了明显变化。在超高速侵彻阶段,靶板的毁伤尺寸由前层靶后碎片云状态决定,由于靶后碎片云径向膨胀距离和动能均随侵彻速度的降低而下降^[23],因此随着侵彻层数升高,靶板毁伤面尺寸降低。当弹体速度降低至高速侵彻阶段,弹体对靶板以冲塞破坏为主且靶后不再产生碎片云。在侵彻过程中,弹体前端堆积的冲塞块破碎剥落,对后层靶板造成破孔/成坑毁伤。而在中低速侵彻阶段,弹靶相互作用进一步减弱,弹体仅对靶板造成破孔/成坑毁伤。

PTFE/Al基含能结构材料对首层靶板的破孔尺寸约为1.3 BD,其对第二层靶板的破孔尺寸和毁伤尺寸分别为4.3 BD和10.2 BD,具有破孔大和毁伤范围大的毁伤特性。对第三层靶板,PTFE/Al基含能结构材料弹体仅形成直径约为2.0 BD的鼓包,且鼓包处靶板

发生撕裂。对于Al基含能结构材料弹体,其对第二层靶板具有与前者相同的毁伤效果,破孔尺寸和毁伤尺寸分别为4.7 BD和10.0 BD。此外,相比于PTFE/Al基含能结构材料弹体,Al基含能结构材料弹体不仅侵彻能力更强,还可在第三、四层靶板上发生明显的烧蚀毁伤,毁伤尺寸分别约为8.3 BD和5.0 BD。两种含能结构材料体系之间能量释放机制的差异是导致弹体的毁伤特性呈现出明显不同的根本性原因。由于PTFE/Al基含能结构材料自身可发生氧化还原反应且反应速率高,在侵彻完首层靶后,材料的快速反应导致对后续靶板的破坏主要依靠首层靶后破片,具体表现为在第二层靶板上未出现明显的烧蚀痕迹。而Al基含能结构材料需要通过撞击产生绝热温升后再与空气中氧气产生氧化还原反应并产生大量热^[24]。因此Al基含能结构材料反应速率较低,在侵彻首层靶时,Al基含能结构材料弹体首先发生动态破碎,弹体前端部分区域先行反应。随后,反应不完全或未反应的弹体碎片形成的主体碎片云与外泡碎片云共同对第二层靶板形成大破孔毁伤^[25]。虽然大量弹体碎片在侵彻第二层靶板时参与反应,但仍有部分反应不完全或未反应的弹体碎片在穿过二层破孔后继续对第三、四层靶板进行毁伤。具体表现为在第二层靶板破孔边缘和第三、四层靶板中心出现明显的烧蚀痕迹。

综上所述,对多层金属薄板靶,DT1900超高强度钢弹体对目标的侵彻能力强,但破孔孔径小、侵彻后效果差。而两种含能结构材料弹体均能够对第二层靶板产生大破孔、强后效的毁伤效果。此外,Al基含能结构材料对多层金属薄板目标的侵彻能力和板面毁伤能力要略强于PTFE/Al基含能结构材料。

2 数值仿真

2.1 材料模型及参数

利用3D-AUTODYN有限元数值软件进一步研究两种含能结构材料在不同速度下对多层金属薄板的毁伤特性,仿真算法采用在解决超高速撞击下材料大变形问题具有明显优势的光滑粒子流体动力学SPH方法^[26],计算模型选用三维平面对称1/2模型,建模大小与超高速侵彻实验相同,弹体直径6 mm,靶板厚度1 mm,靶间距50 mm,弹体速度 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,粒子光滑长度0.2。由于PTFE/Al基含能材料在冲击作用下会发生氧化还原反应并释放气体,虽然其反应速率和

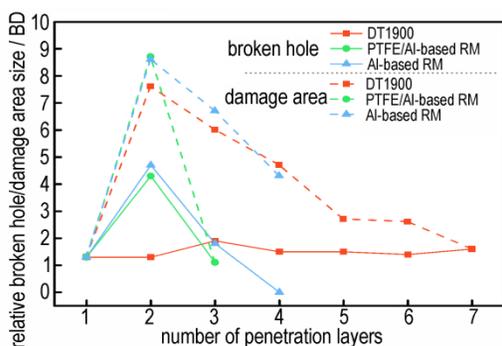


图4 三种弹体相对破孔与毁伤尺寸图

Fig. 4 The graph of relative broken hole and damage area size

反应后气体生成量均不及常规炸药。但张庆明团队^[19]研究表明,PTFE/Al含能材料的反应具有类爆轰的特点, Lee-Tarver 三项式点火反应模型和 JWL 产物状态方程可以对 PTFE/Al 含能材料的冲击反应特性进行较好的描述,因此选用该模型对 PTFE/Al 基含能材料反应特性进行描述。采用 Johnson-Cook 强度模型对 PTFE/Al 基含能材料反应前的力学特性进行描述^[17]。

Lee-Tarver 三项式点火反应模型为:

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d \rho^y + G_2(1-F)^e F^g \rho^z \quad (1)$$

式中,等号右边的3项分别描述材料热点形成过程、慢速反应过程以及快速反应过程。由于 Al/PTFE 基含能结构材料反应速率较低,快速反应过程对冲击波压力

的影响较小,所以另 $G_2=0$ ^[2]。式中 F 为材料反应度, t 为时间, ρ 为材料密度, ρ_0 为材料初始密度, I, b, a, x, G_1, c, d, y 为材料反应常数。

JWL 状态方程为:

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B_1 \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta E \quad (2)$$

式中, p 为爆轰产物压力, MPa; η 材料初始密度与材料密度之比; A_1, B_1, R_1, R_2 和 ω 为常数。

Johnson-Cook 材料模型为:

$$\sigma = (A_2 + B_2 \varepsilon^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 - (\Delta T / (T_m - T_r))^m \right] \quad (3)$$

式中, σ 为流动应力, MPa, ε 为有效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为有效塑性应变率与参考应变率之比, ΔT 为材料温度与室温 T_r 温差, T_m 为材料熔点, K。 A_2, B_2, n, c, m 为常数。 Al/PTFE 基含能结构材料各参数值见表 1。

表 1 PTFE/Al 基含能结构材料 Lee-Tarver 模型参数^[6,19]

Table 1 Parameters of Lee-Tarver model of PTFE/Al-based RM

A_1 / MPa	B_1 / MPa	R_1	R_2	ω	denotation velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	energy per unit mass / $\text{KJ} \cdot \text{g}^{-1}$	I	G_1	c
15700	2.3	7	0.6	0.38	5200	5.43	44	200	0.222
d	γ	C_1 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	S_1	A_2 / MPa	B_2 / MPa	n	C	m	
0.666	1.6	1450	2.25	8.04	250.6	1.8	0.4	1.0	

Note: $A_1, B_1, R_1, R_2, \omega$, are constants for equation of state of material. I, G_1, c, d, γ are parameters for material reaction rate equation. C_1, S_1 are material constants from plate-on-plate impact tests. A_2, B_2, n, C, m are constants for material strength model.

而全金属含能结构材料的反应机理为在强冲击载荷下首先发生形变破坏,后形成的碎片再与空气反应进行释能,其在强冲击载荷下力学行为响应与惰性金属类似,因此选用 Johnson-Cook 强度模型和 Shock 状态方程进行描述,材料模型参数通过静动态拉伸/压缩实验和平板撞击实验获得。Q355 钢靶选用 Johnson-Cook 强度模型和 Shock 状态方程。各模型参数取值见表 2。

2.2 含能结构材料模型有效性验证

为研究两种含能结构材料弹体在不同速度下对多层薄钢板的毁伤效果,需要首先验证模型算法、材料模型及参数有效性。验证方法为利用数值仿真方法获得含能结构弹体以 $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 侵彻后靶板的破

孔与毁伤尺寸与试验结果进行比对。当仿真结果与试验结果误差小于 15%,即认为算法和模型参数有效。两种含能结构材料弹体侵彻多层金属钢板后的靶板试验仿真对比图和破孔和毁伤尺寸数据分别如图 5 和表 3 所示。图 5 中标尺为有效塑性应变的颜色-数值显示条,数值 0 表示材料未发生塑性变形, 0~1 之间表示材料塑性变形程度,数值越高则塑性变形程度越大。

由图 5 表 3 可知,两种含能结构材料对靶板侵彻层数的仿真结果与试验结果相同。PTFE/Al 基含能结构材料弹体对三层钢板毁伤模式的仿真结果分别为冲塞破坏、花瓣冲塞复合型破孔和卫星破孔/成坑、鼓包,与试验结果相同。除第三层靶板鼓包尺寸仿真结果较实际略大外,其余靶板破孔和毁伤尺寸的仿真结果均与试验结果基本相同。Al 基含能结构材料弹体对四层钢板毁伤模式的仿真结果分别为中心冲塞破坏、花瓣冲塞复合型破孔和卫星破孔/成坑、中心冲塞破孔和卫星成坑、中心成坑,与试验结果相同。Al 基含能结构材料弹体对前三层靶板破孔尺寸的仿真结果与试验

表 2 Al 基含能结构材料和 Q355 材料模型参数^[27]

Table 2 Parameters of Al-based RM and Q355 steel materials

	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	A_2 / MPa	B_2 / MPa	n	C	m
Al-based RM	7.9	365	1153	0.404	0.0125	1.391
Q355	7.8	339	620	0.403	0.02	0.659

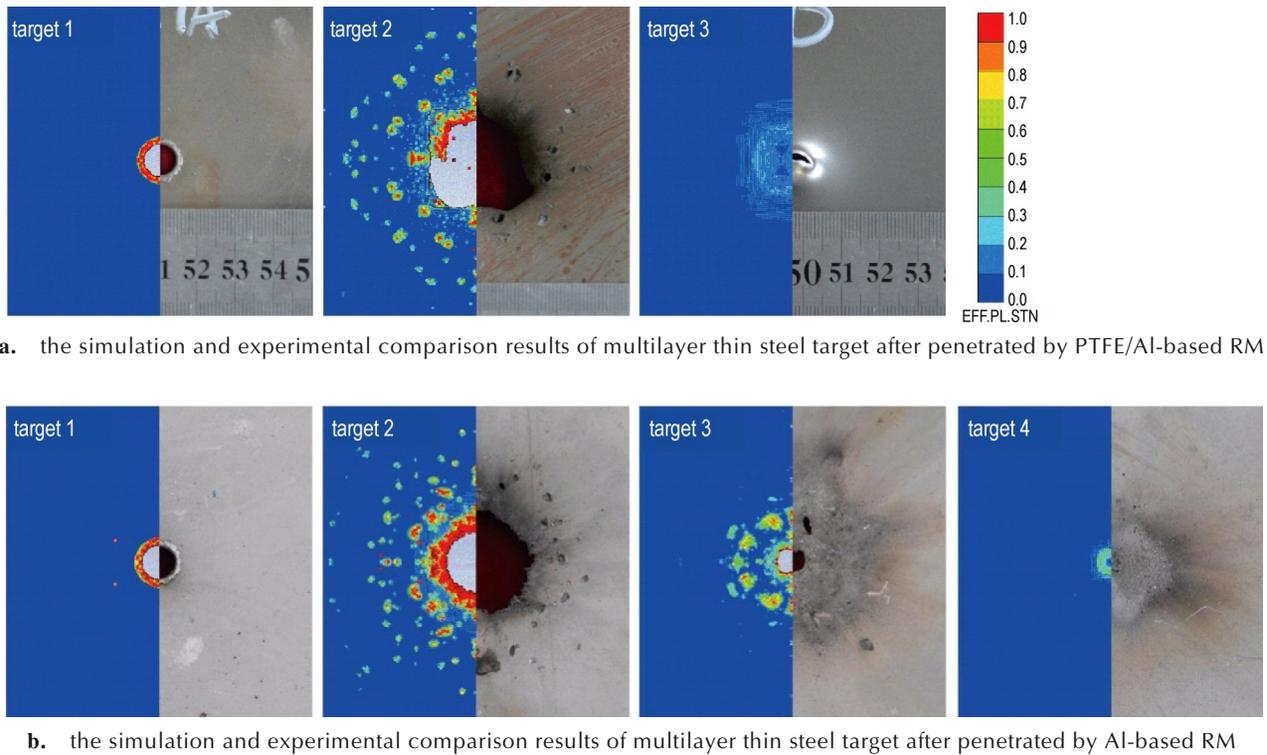


图5 两种含能结构材料弹体侵彻后多层金属靶板毁伤模式仿真与实验结果对比

Fig.5 The damage mechanisms of simulation and experimental comparison results of multilayer thin steel target after penetrated by two kinds of RM

表3 金属靶板破孔尺寸和毁伤面尺寸仿真与实验结果对比

Table 3 Simulation and experimental comparison results of broken hole and damage area size

	target 1		target 2		target 3		target 4									
	PTFE/Al-based RM	Al-based RM														
	d	D_{99}	d	D_{99}	d	D_{99}	d	D_{99}								
Experimental result /BD	1.3	-	1.4	-	4.3	10.2	4.7	10.0	-	2.0	1.2	8.3	-	-	-	4.2
Simulation result /BD	1.4	-	1.4	-	4.2	11.6	4.2	9.5	-	3.7	1.3	6.2	-	-	-	-
Error	7.7%		0%		2.3%	13.7%	10.6%	5.0%	-	85%	8.9%	25.3%	-	-	-	-

Note: BD is short for bullet diameter.

结果一致性良好,但弹体对第三、四层靶板毁伤尺寸的仿真结果小于实验结果。主要原因为Al基含能结构材料模型采用了基于纯力学的J-C强度模型和Shock状态方程,因此仿真结果未能体现材料撞击释能对靶板产生的烧蚀破坏,这也从侧面反映出靶板的破孔毁伤主要由弹体材料的力学行为决定。

综上所述,本研究所采用的数值仿真算法、材料模型以及材料参数的模型合理有效,能够较好描述两种含能结构材料弹体对多层钢板的毁伤模式及特性。因此继续利用该方法研究侵彻速度对含能结构材料弹体侵彻多层薄钢靶毁伤特性的影响规律。

2.3 侵彻速度对多层钢板的毁伤机制及特性影响

利用数值仿真方法研究了PTFE/Al基和Al基含能结构材料弹体在1600,1800,2000,2200,2400 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 5个侵彻速度条件下对多层钢靶的毁伤效果。PTFE/Al基含能结构材料弹体在不同侵彻速度条件下对靶板造成的毁伤形貌仿真结果及破孔尺寸变化规律分别如图6、7所示。由图6可知,在1600~2400 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的侵彻速度条件下,PTFE/Al基含能结构材料弹体均只能对三层靶板实施毁伤。随着撞击速度由1600 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升高至2200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,首层靶破孔尺寸由1.4 BD升高至1.5 BD后不再继续升高,破坏机制均为冲塞破坏。第

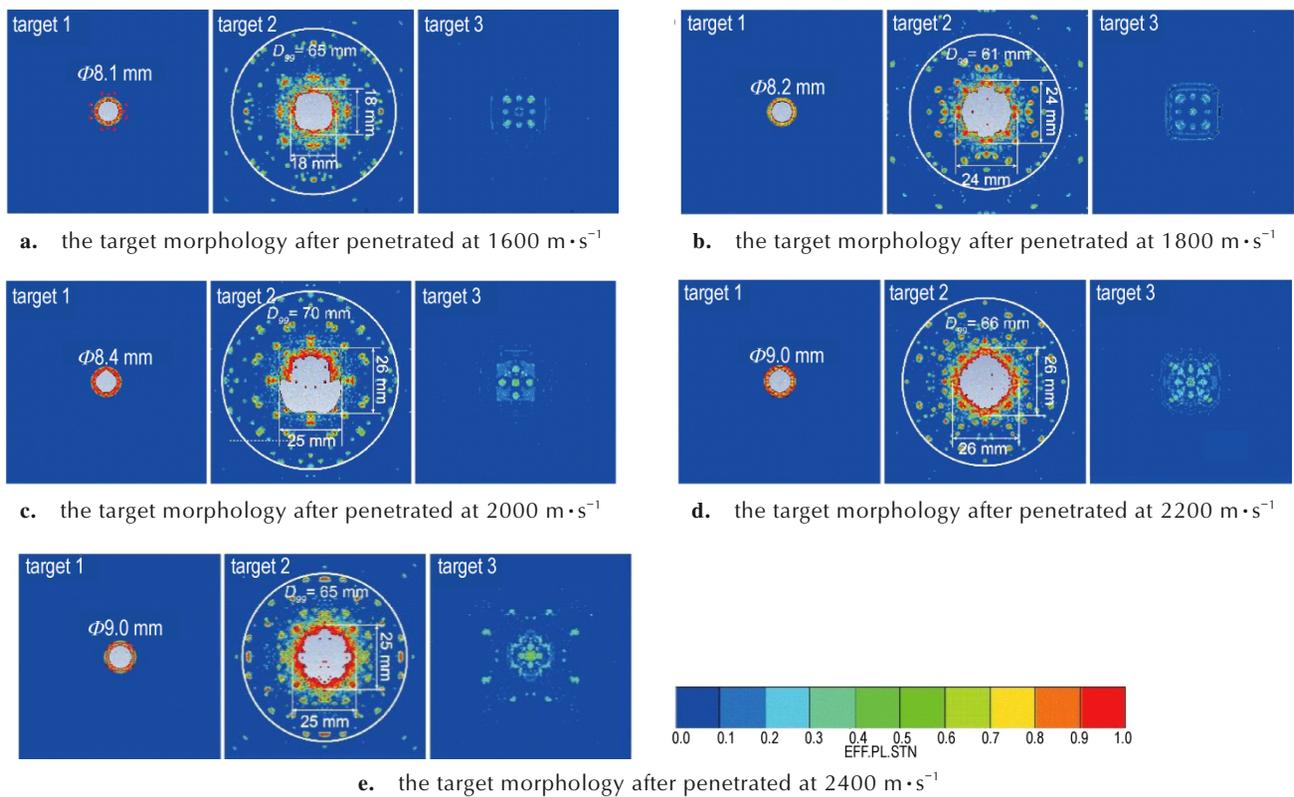


图6 PTFE/Al基含能结构材料弹不同速度侵彻Q355靶板后靶板形貌

Fig.6 The simulation results of Q355 target morphology after penetrated by PTFE/Al-based RM projectile at different velocity

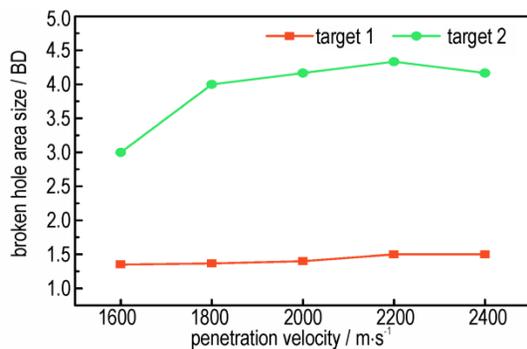


图7 PTFE/Al基含能结构材料不同速度侵彻Q355靶板后靶板破孔尺寸变化规律

Fig.7 The variation of broken hole size of Q355 target after penetration by PTFE/Al-based RM projectile at different velocity

二层靶板中心破孔尺寸由3.0 BD升高至4.3 BD后便不再发生明显变化,毁伤尺寸在10.2~11.7 BD范围内波动,破坏机制均为中心花瓣形破孔和卫星破孔/成坑。第三层靶板破坏机制均为靶后破片导致冲击成坑/鼓包,不随侵彻速度提高发生明显变化。

Al基含能结构材料弹体在不同侵彻速度条件下对靶板造成的毁伤形貌仿真结果及破孔尺寸变化规律分别如图8、9所示。由图8可知,在1600~2400 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的侵彻速度段内,全金属含能结构材料弹体均只能对

四层靶板实施有效毁伤。随着侵彻速度升高,首层靶破孔尺寸由1.3 BD逐渐升高至1.5 BD后不再变化,靶板的破坏机制均冲塞破坏。第二层靶板中心破孔尺寸随侵彻速度升高呈现先升高后小幅下降的趋势,当侵彻初速为2000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最高为3.9 BD,靶板的破坏机制均为花瓣冲塞复合型破孔和卫星破孔/成坑。对第三层靶板,弹体初始动能的提高导致耦合进二层靶后碎片云对第三层靶的侵彻能力增强,破孔尺寸有所提高,靶板破坏机制为由第二层靶后碎片云前端冲击形成的破孔和后续破片形成的成坑毁伤。第四层靶板破坏机制为靶后破片导致冲击成坑/鼓包。

上述研究表明两种含能结构材料在不同侵彻速度下毁伤效果的差异主要体现在第二、三层靶板的破孔尺寸和毁伤范围上,因此为研究材料体系和侵彻速度对弹体超高速侵彻机理的影响规律,对PTFE/Al基和Al基含能结构材料弹体在首层靶板后的碎片云的速度分布进行分析。图10为 $t=2 \text{ ms}$ 时靶后碎片云的速度分布图,以弹体着靶前的初始速度 v_0 为基准将靶后碎片云分为四个速度区域,碎片云橙红色部分代表的高速区(0.8~0.9 v_0),黄色部分代表的中高速区(0.7~0.8 v_0),黄绿色部分代表的中低速区(0.6~0.7 v_0)和绿色部分

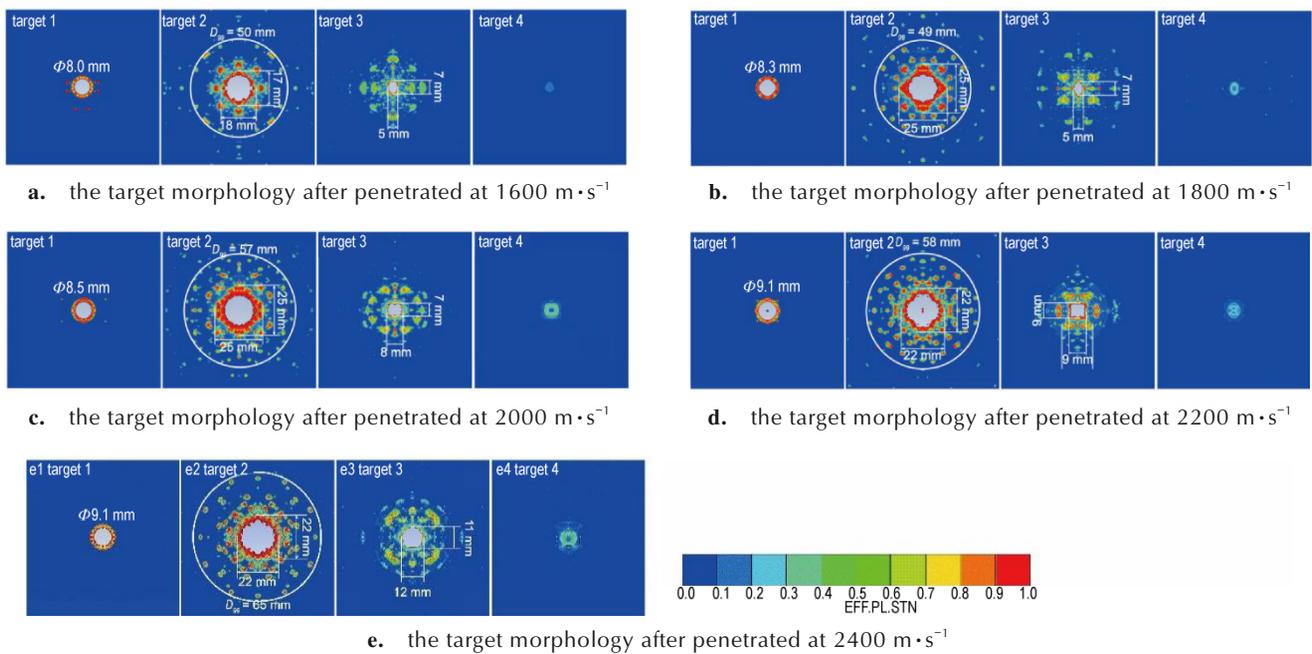


图8 Al基含能结构材料不同速度侵彻Q355靶板后靶板形貌

Fig.8 The simulation results of Q355 target morphology after penetrated by Al-based projectile RM at different velocity

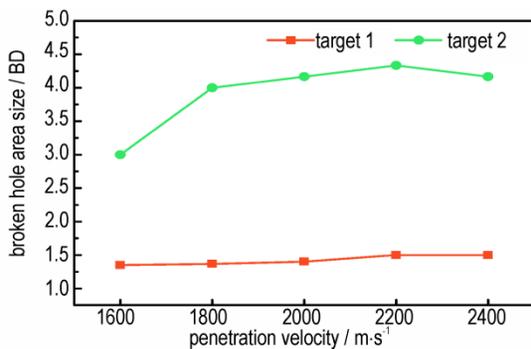


图9 Al基含能结构材料不同速度侵彻Q355靶板后靶板破孔尺寸变化规律

Fig.9 The variation of broken hole size of Q355 target after penetration by Al-based RM projectile at different velocity

代表的低速区 ($<0.6 v_0$)。为研究可对二层靶板造成破孔毁伤的碎片分布情况,以弹体中点的侵彻速度方向为中轴线,分别在一、二层靶板位置建立与靶板破孔尺寸相等的辅助线,并将两条辅助线相连形成梯形区域。由于靶后碎片运动参数不再变化,因此梯形区域所框选的碎片云区域即为可对第二层靶板造成破孔毁伤的部分。由图10可知,PTFE/Al基含能结构材料对第二层靶板形成的花瓣形破孔毁伤主要由首层靶后的碎片云前端的高速区碎片完成,当 $v_0 \geq 1800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,碎片云高速区范围基本不随 v_0 发生改变(图10a)。对于Al基全金属含能结构材料(图10b),当 $v_0 = 1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,由于 v_0 较低导致仅碎片云头部的高速区可对第二层靶

板造成破孔毁伤,碎片云中高速区仅能够对靶板造成坑毁伤。随着 v_0 提高,靶后中高速区破片动能随之提高,靶后高速区与中高速区破片共同作用导致中央主破孔尺寸提高。而当 v_0 继续提高至 $2200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 及以上,靶后高速区碎片与中高速区碎片在 y 方向上的速度差增大导致两区域碎片相对分离,碎片云前端碎片质量不集中导致其对第二层靶板的破孔尺寸减小,毁伤尺寸增大。

为进一步揭示材料体系和侵彻速度对弹体超高速侵彻机理的影响,对图10中靶后碎片云粒子的动能进行了统计分析,结果如图11所示。相比于Al基含能结构材料,由于PTFE/Al基含能结构材料当受到的冲击载荷达到 21 GPa 或对应撞击速度为 $1500 \sim 1800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,PTFE/Al材料即会发生完全反应^[28-30]。所以当PTFE/Al基含能结构材料弹体以超过 $1800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度撞击首层靶板后,对第二层靶板的毁伤主要由首层靶板形成的外泡碎片云完成,弹体本身不再参与对后续靶板的侵彻。由图11可知,当侵彻速度由 $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升至 $2400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,靶板粒子总动能仅由 8.2 J 提升至 18.3 J 。弹体与靶板相互作用后耦合进入靶板碎片动能有限,因此提升侵彻速度对PTFE/Al基含能结构材料弹体毁伤效果的提升不明显。而Al基含能结构材料弹体先撞击破碎后撞击释能的毁伤机制使得靶后破碎弹体与靶板破片共同对后续靶板进行侵

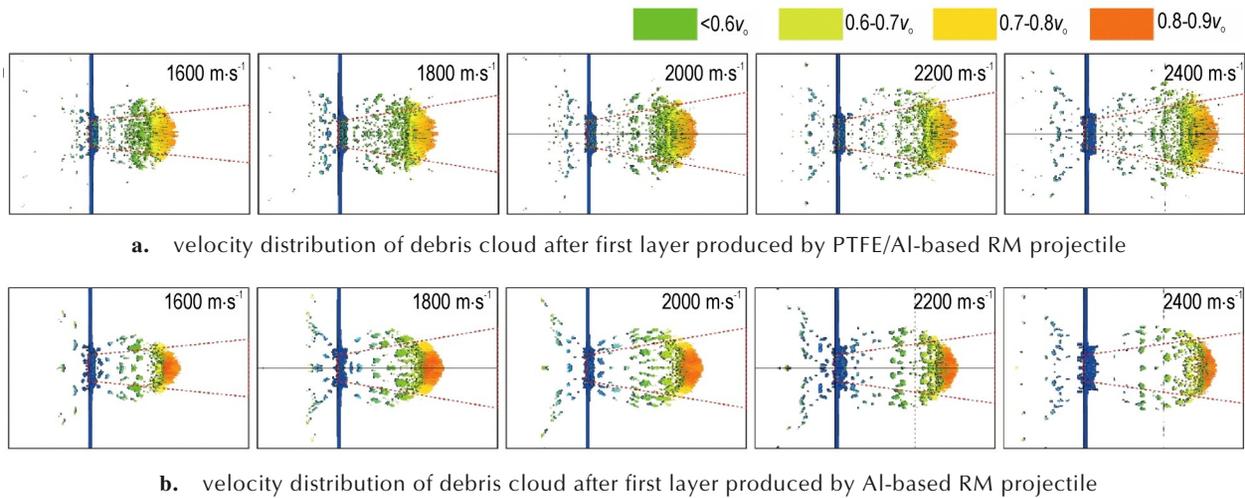


图 10 PTFE/Al 基与 Al 基含能结构材料弹体侵彻首层靶后碎片云速度分布情况

Fig.10 Velocity distribution of debris cloud after first layer produced by PTFE/Al-based and Al-based RM projectile

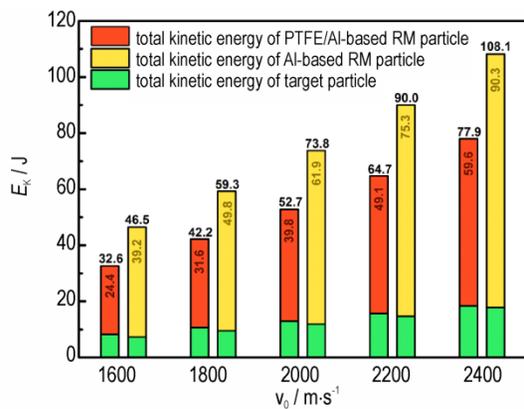


图 11 首层靶后碎片云粒子动能统计

Fig.11 Kinetic energy statistics results of debris cloud particles behind the first layer of target

彻破坏。随着初始侵彻速度升高,首层靶后弹靶粒子总动能由 46.5 J 大幅提升至 108.1 J,提高了弹体对多层钢靶整体的毁伤效果,主要体现在对第三层靶板的破孔尺寸上。

3 结论

为研究含能结构材料对多层钢靶的超高速毁伤特性,利用二级轻气炮获得了 PTFE/Al 基和 Al 基全金属含能结构材料在 $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度下对多层薄钢靶的毁伤效果。在校核数值仿真有效性后,讨论了侵彻速度对两种材料弹体毁伤效果的影响规律,获得以下结论:

(1) 相比于超高强度钢惰性弹体,PTFE/Al 基和 Al 基含能结构材料弹体表现出明显的横向毁伤增强效果,对第二层靶板均能产生大破孔的毁伤效果,破孔孔

径和毁伤尺寸分别达弹径的 4 倍和 8 倍以上。含能结构材料对多层钢靶的毁伤模式主要包括冲塞型破孔、花瓣冲塞复合型破孔、靶后碎片云成坑和释能烧蚀毁伤;

(2) J-C 强度模型联合 Lee-Tarver 三项式点火反应模型能够较好描述 PTFE/Al 基含能结构材料对多层薄钢靶的毁伤效果和破坏机制。J-C 强度模型联合 Shock 状态方程能够反映 Al 基含能结构材料对多层薄钢靶的破孔毁伤特性,但仍需要对材料模型进行进一步完善优化来描述材料撞击释能对靶板造成的烧蚀毁伤;

(3) 能量释放机制差异是两种含能结构材料在 $1600\sim 2400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度段内对多层薄钢靶毁伤特性差异的主要原因。PTFE/Al 基含能结构材料撞靶后快速自反应导致提高侵彻速度对提升材料的毁伤效果的作用有限。Al 基全金属含能结构材料先破碎后撞击释能的毁伤机制使得提高侵彻速度能够明显提升靶后碎片云总动能,进而增强对多层薄钢靶的毁伤效果。

参考文献:

- [1] 刘晓俊. 活性材料动态力学性能及冲击反应机理研究[D]. 北京:北京理工大学,2017.
LIU Xiao-jun. Research of Mechanical Behavior and Impact-Induced Reaction Mechanism for Reactive Materials [D]. Beijing :Beijing Institute of Technology,2017.
- [2] 郭俊. 活性分段动能杆对混凝土靶的毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学,2016
GUO Jun. Damage of Concrete Target Induced by Reactive Segmented Kinetic Rods[D]. Beijing :Beijing Institute of Technology,2016.
- [3] 梁君夫. 活性破片作用屏蔽装药引爆增强效应研究[D]. 北京:

- 北京理工大学, 2016.
- LIANG Jun-fu. Research on Enhanced Initiation Behavior of Reactive Material Fragment Impacting Covered Explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [4] 谢剑文, 李沛豫, 王海福, 等. 活性破片撞击油箱毁伤行为与机理[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1565-1577.
- XIE Jian-wen, LI Pei-yu, WANG Hai-fu, et al. Damage behaviors and mechanisms of reactive fragments impacting fuel tanks [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(7): 1565-1577.
- [5] ZHANG H, ZHENG Y, YU Q, et al. Penetration and internal blast behavior of reactive liner enhanced shaped charge against concrete space [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(6): 952-962.
- [6] GUO H, ZHENG Y, TANG L, et al. Effect of wave shaper on reactive materials jet formation and its penetration performance [J]. *Defence Technology*, 2019, 15(4): 495-505.
- [7] LIU S, YUAN Y, ZHENG Y, et al. Enhanced ignition behavior of reactive material projectiles impacting fuel-filled tank [J]. *Defence Technology*, 2019, 4(15): 533-540.
- [8] GE C, HU D, WANG J, et al. Trans-scale study on the thermal response and initiation of ternary fluoropolymer-matrix reactive materials under shock loading [J]. *Defence Technology*, 2023, 21(3): 12.
- [9] SUN T, WANG H F, WANG S P, et al. Formation behaviors of rod-like reactive shaped charge penetrator and their effects on damage capability [J]. *Defence Technology*, 2023, 21: 184-159.
- [10] 阳世清, 徐松林, 张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 39-42+62.
- YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong. Preparation and performance of PTFE/Al reactive materials [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39-42+62.
- [11] LAN J, LIU J, ZHANG S, et al. Influence of multi-oxidants on reaction characteristics of PTFE-Al-XmOY reactive material [J]. *Materials & Design*, 2019, 186: 108325.
- [12] HU Q, LIU R, ZHOU Q, et al. Effects of microstructure on mechanical and energy release properties of Ni-Al energetic structural materials [J]. *Materials Science & Engineering, A*, 2022, 849: 143332.
- [13] SI S P, HE C, LIU S, et al. Influence of impact velocity on impact-initiated reaction behavior of Zr-Ti-Nb alloy [J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110846.
- [14] LI S, HUANG C, CHEN J, et al. Effect of W on the impact-induced energy release behavior of Al-Ni energetic structural Materials [J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1217.
- [15] XIONG W, ZHANG X, WU Y, et al. Influence of additives on microstructures, mechanical properties and shock-induced reaction characteristics of Al/Ni composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 648: 540-549.
- [16] 唐宇, 王睿鑫, 李顺, 等. 高熵合金含能结构材料的潜力与挑战 [J]. 含能材料, 2021, 29(10): 1008-1018.
- TANG Yu, WANG Rui-xin, LI Shun, et al. Potential and challenges of high-entropy alloy energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 1008-1018.
- [17] WANG H, XIE J, GE C, et al. Experimental investigation on enhanced damage to fuel tanks by reactive projectiles impact [J]. *Defence Technology*, 2021, 2(17): 599-608.
- [18] 任柯融. Al/Ni 基含能结构材料冲击释能行为实验与数值模拟研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- REN Ke-rong. Probing the impact release behaviour of Al/Ni-based energetic structural materials adopting experimental and numerical method [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [19] REN S, ZHANG Q, WU Q, et al. A debris cloud model for hypervelocity impact of the spherical projectile on reactive material bumper composed of polytetrafluoroethylene and aluminum [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 130: 124-137.
- [20] REN S, WU Q, SONG G, et al. Impact resistance mechanism of reactive material bumper for spacecraft Whipple shield: Experiments and numerical simulations [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 126: 107646.
- [21] GUAN G, PANG B, WEI Z, et al. Crater distribution on the rear wall of Al-Whipple shield by hypervelocity impacts of Al-spheres [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1541-1546.
- [22] 管公顺. 航天器空间碎片防护结构超高速撞击特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- GUAN Gong-Shun. Hypervelocity impact characteristic investigation of spacecraft space debris shield configuration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [23] 刘昕, 邓勇军, 彭芸, 等. 球形弹丸超高速斜撞击薄板的碎片云和侵彻特征仿真分析 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38(6): 615-624.
- LIU Xin, DENG Yong-jun, PENG Yun. Simulation analysis of the characteristics of debris cloud and perforation caused by oblique hypervelocity impact of spherical projectile on a thin plate [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(6): 615-624.
- [24] HUANG C, CHEN J, BAI S, et al. Enhancement of energy release performance of Al-Ni composites by adding CuO [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 155271.
- [25] 迟润强. 弹丸超高速撞击薄板碎片云建模研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- CHI Run-qiang. Research and modeling of debris cloud produced by hypervelocity impact of projectile with thin plate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [26] 马坤, 李名锐, 陈春林, 等. 修正金属本构模型在超高速撞击模拟中的应用 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 091406.
- MA Kun, LI Ming-rui, CHEN Chun-lin, et al. The application of a modified constitutive model of metals in the simulation of hypervelocity impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 091406.
- [27] 朱昱. 基于 Johnson-Cook 模型的 Q355B 钢动态本构关系研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- ZHU Yu. Research on Dynamic Constitutive Relationship of Q355B Steel Based on Johnson-Cook Model [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [28] REN S, ZHANG Q, WU Q, et al. Influence of impact-induced reaction characteristics of reactive composites on hypervelocity impact resistance [J]. *Materials & Design*, 2020, 192: 108722.
- [29] 武强, 张庆明, 孙浩勇, 等. 超高速撞击下 PTFE/Al 含能材料薄板的载荷特性分析 [J]. 航天器环境工程, 2017, 34(1): 1-7.
- WU Qiang, ZHANG Qing-ming, SUN Hao-yong, et al. The

loading characteristics of PTFE/Al energetic materials under hypervelocity impact [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(1):1-7.

[30] HE Z, TANG E, OU X, et al. Energy release of Al/PTFE materi-

als enhanced by aluminum honeycomb framework subjected to high speed impact under vacuum environment [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 14528-14539.

Investigation on Damage Characteristics of Multilayer Thin Steel Target Penetrated by Hypervelocity Spherical Reactive Materials Projectile

CAO Jin¹, CHEN Chun-lin¹, MA Kun¹, GAO Peng-fei¹, TIAN Hong-Chang¹, FENG Na^{1,2}, QIAN Bing-wen¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: By using penetration experiment and numerical simulation methods, the damage characteristics of the multilayer thin steel target penetrated by reactive materials (RMs) under hypervelocity impact condition was investigated. The two-stage light gas-gun was used to study the damage mode of PTFE/Al based RM and Al-based all-metal RM to multilayer thin steel target, the influence of material type and penetration velocity on damage effect is presented. The results show that, compared with inert metal, both of RMs have lateral damage enhancement effect on multilayer thin steel target, which the broken hole size of the second layer can reach more than 4 times of the bullet diameter (BD). The AUTODYN numerical simulation software was used to prove the efficiency of the RM parameters and then the damage effect numerical simulation of RMs were carried out. The results show that the damage characteristics of PTFE/Al-based RM and Al-based all-metal RM to multilayer thin steel target can be described by J-C model combined with Lee-Tarver model and J-C model combined with Shock equation respectively. Additionally, the phenomenon that the increase in penetration speed can hardly improve the lateral damage enhancement effect of the PTFE/Al-based RM but can significantly improve that of the Al-based RM to the multilayer steel target, which is mainly due to the difference in energy releasing mechanisms between two kinds of RMs.

Key words: PTFE/Al-based reactive material; Al-based all-metal reactive material; hypervelocity impact; multilayer steel target; damage efficiency

CLC number: TJ5; TJ04; O385

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023131

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 11772269)

(责编:姜梅)