

文章编号:1006-9941(2026)02-0165-15

微型无人机用3D打印聚丙烯射流毁伤威力研究

张舒童¹,赵爽¹,郭冬炆¹,赵东志²,程春³

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161046; 3. 宁波大学 冲击与安全教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 聚丙烯(Polypropylene, PP)作为低密度高分子材料,其形成的射流具备可观毁伤威力,而微型无人机凭借成本低、适应性强、响应速度快等优势,可大幅提升作战效能,其搭载的战斗部需兼顾轻量化与毁伤效能双重需求。本研究探究了3D打印聚丙烯作为药型罩材料在微型无人机战斗部毁伤领域中的应用潜力,基于选区激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术制备微型薄壁聚丙烯药型罩,开展力学性能试验获取了3D打印PP材料的力学性能,并拟合了Johnson-Cook本构模型相关参数,结果表明该材料具有优异的延展性及应变率敏感性,动态屈服强度随应变率升高显著提升。结合PER理论与粘塑性理论分析了高分子聚合物射流成型过程,揭示其头部膨胀特性;通过静破甲试验及数值模拟,验证了3D打印PP射流在3~5 CD(CD为聚能装药的口径)下的毁伤威力。试验结果表明:4 CD下效果最佳,侵彻深度为17.10 mm,扩孔效应显著。数值模拟结果显示,其侵彻深度为16.04 mm、开孔直径为7.986 mm,与实验数据高度吻合。进一步分析四种高分子聚合物射流及紫铜射流在5种不同维度上的性能,研究表明,所设计的3D打印聚丙烯药型罩可匹配微型无人机的搭载需求,为高效毁伤微型战斗部设计提供了理论依据及新思路。

关键词: 微型无人机;激光选区烧结技术;聚丙烯药型罩;微型聚能装药;毁伤威力

中图分类号: TJ55; TJ410.3

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025271

0 引言

微型无人机的概念起源于美国国防预先研究计划局(DARPA)的“Micro air vehicles”计划,以尺寸小于15 cm为核心判定依据^[1-2];而若以质量划分,200~2000 g区间的无人机同样归属于微型无人机范畴^[3-5]。近年来多次局部冲突,微型无人机依托其独特的性能优势,展现出卓越效能。2024年,Lars Celandier等^[6]以俄乌战争为典型案例,着重阐释了微型无人机在情报、监视与侦察中的革新方向,同时深入探讨了其应用价值及适配场景。

受制于自身尺寸与质量的先天约束,微型无人机

对搭载战斗部的要求极为苛刻:既需轻量化的优势以降低平台的负载,又应兼具可靠的杀伤效能以实现战术打击的目的。基于此,以高分子聚合物作为药型罩及壳体材料的微型聚能装药,凭借其低密度、高适配度的特点,将成为微型无人机战斗部的优先选择^[7-9]。有关聚合物药型罩在聚能装药中的应用可追溯至2005年,美国的Haney等^[10]提出,在常规的金属药型罩与炸药之间增设一层聚合物药型罩;当金属射流形成时,聚合体会流入空腔并发生燃烧分解,进而产生气体。若金属药型罩采用铝、钛、镁等材料,则会与聚合物产物发生剧烈反应,生成含能毁伤元,从而显著提升毁伤效能,这一想法的提出促进了推进了聚合物材料在聚能装药领域的发展。2008年,Hirsch等^[11]采用高压缩性热塑性聚合物加工成型药型罩,并通过系列化实验对聚合物射流的毁伤效能开展系统性研究。结果显示,该射流在侵彻孔洞底部会产生明显的扩张效应,这一现象与聚合物材料的高压缩特性密切相关。而何种聚合物最适合作为药型罩的制备材料,尚未深入分析。伊建亚等^[12]通过在聚能药型罩中添加Cu粉来提高纯

收稿日期:2025-12-26;修回日期:2026-02-11

网络出版日期:2026-02-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(12202285);沈阳市科技人才专项项目(RC230925);辽宁省教育厅项目(LG212410144045)

作者简介:张舒童(2001-),男,硕士研究生,主要从事爆炸毁伤与弹药技术相关研究。e-mail:1308748425@qq.com

通信联系人:赵爽(1989-),男,副教授,主要从事爆炸毁伤与弹药技术相关研究。e-mail:zslg@sylu.edu.cn

引用本文:张舒童,赵爽,郭冬炆,等.微型无人机用3D打印聚丙烯射流毁伤威力研究[J].含能材料,2026,34(2):165-179.

ZHANG Shu-tong, ZHAO Shuang, GUO Dong-yang, et al. Research on the Lethality of 3D-Printed Polypropylene Jets for Micro UAVs[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2026, 34(2):165-179.

聚四氟乙烯(PTFE)材料的强度用以提升聚合物膨胀射流的穿透性能。试验结果表明随着聚合物材料的致密化,射流获得了更大的损伤能力。李延等^[13]对不同密度PTFE/Ti/W药型罩形成活性射流凝聚性的影响开展研究,结果表明随药型罩密度的增大,材料声速提升,聚合物射流的凝聚性更强。吉庆^[14]采用熔融沉积成型技术制备聚乳酸(PLA)和铜粉填充聚乳酸(PLA-Cu)两种药型罩,探究了其射流成型过程及其毁伤特性,为药型罩的制备提供了一种新的技术手段。

综上,大量学者为推动聚合物药型罩技术的发展付出了诸多努力,并取得了一系列研究成果。然而,相较于传统金属射流,聚合物射流的成型特性及侵彻机理仍未明确,且高分子聚合物与传统药型罩材料在力学性能上存在较大差异,导致其形成射流的侵彻深度远低于传统金属射流。为推动高分子聚合物战斗部更好地走向工程化应用,亟需开展其与微型无人机匹配性研究。因此,本文设计并制备了一种口径为10 mm、壁厚为0.5 mm的微型薄壁锥形药型罩,同时采用高分子低密度聚丙烯作为药型罩选材;在制备环节,考虑到本文所研究的结构属于典型的小型精密件,若采用传统机械加工工艺,试件在精加工环节中易受切削力、装夹力及残余应力释放共同作用,引发薄壁件失圆、颤振乃至塑性变形,且多道工序装夹易累积误差、增加成本,小批量生产时效率低下且复杂程度较高。而“选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)”是一种基于粉末床的激光增材制造技术,其运用数字化建模与参数化设计的技术路径,在模型构建完成后,无需人员进行二次操作^[15-17],同时在打印过程中未烧结粉末可对零件形成天然柔性全域支撑,有效抑制应力集中引发的变形,可尽量减少传统加工中的试件变形问题,并在简化了传统加工工艺繁琐步骤的同时提升了生产效率。

本文采用SLS工艺,实现低密度PP药型罩与壳体的一体化成型,同时保障了结构的完整性与加工效率。通过力学性能实验构建材料本构模型,建立聚合物射流成型与侵彻过程的数值仿真模型;利用静破甲实验对数值模型进行可靠性验证后,系统评估3D打印聚丙烯药型罩的射流形成特性与侵彻效能,为微型聚能装药及聚合物药型罩的工程化研发与实际应用提供理论参考与设计支撑。

1 实验部分

1.1 原料及装置

本文选用BASF Forward-AM公司所生产的Ultra-sint®PP 1400 Black粉末,与市面上常见的白色聚丙烯相比,该粉末利用聚烯烃的特性进行粉末床熔融技术,将其制成用于增材制造的3D打印粉末原材料,它在延续了传统聚丙烯高耐化学性及可回收性的同时具有独特各向同性、卓越的塑性及高延展率,因此可在高应变冲击下的保持较为优异的性能。为制备3D打印聚丙烯药型罩及相关的力学性能测试试样,通过HUAKE P3265 3D打印设备添加Ultrasint®PP 1400 Black粉末进行激光选区烧结工艺进行制备,该设备配备有55 W的CO₂激光器,扫描系统具有高精度的三维动态聚焦振镜,成型腔尺寸为320 mm×320 mm×650 mm,铺粉方式为双杠上送粉、双向铺粉。通过自主研发的HUST 3DP软件直接读取stl文件在线式切片随后发送至主机端,经由逐层加工最终完成相应试样及药型罩的加工。3D打印设备的详细参数见表1。

SLS技术成型原理如图1所示,它以离散堆砌制造原理,沿着Z轴层切片出零件的三维实体模型文件,再根据零件的切片信息,以3D模型的切分层次作为照射的轨迹,利用激光的热作用,生成保存实体零件截面

表1 3D打印设备参数

Table 1 Parameters of 3D printing equipment

processing temperature / °C	laser power / W	scanning speed / mm·s ⁻¹	hatching distance / mm
167	18	4000	0.3

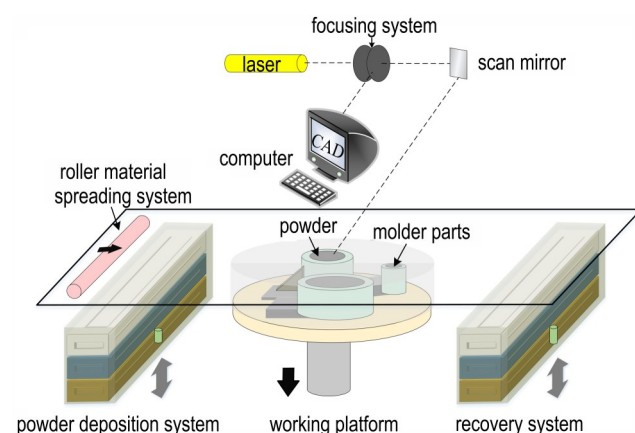
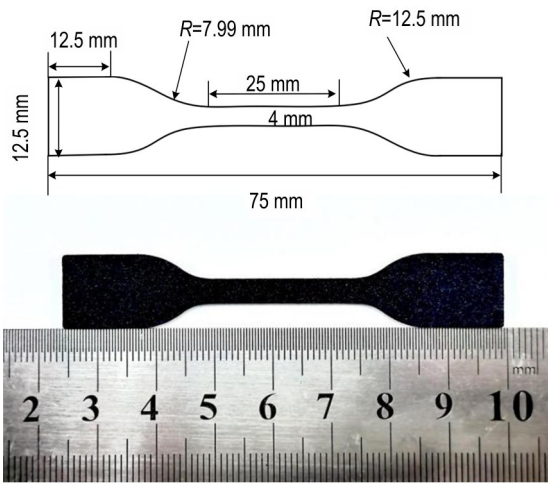


图1 SLS技术成型原理

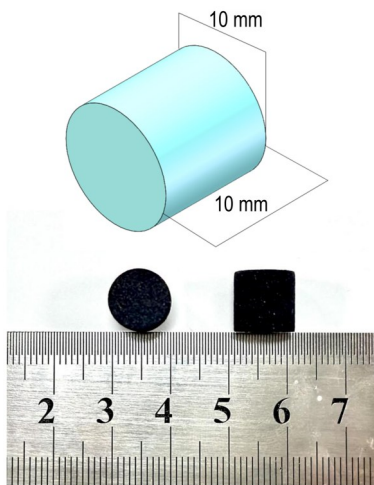
Fig.1 Molding principle of SLS technology

信息的STL文件,选择激光烧结在铺好的粉床上,再将粉料铺在烧结层上,层层粘结堆积固态粉料,最终形成三维实体成型件^[18-19]。与其他3D打印技术相比,SLS技术具有短生产周期、高材料利用率、广泛的应用领域等优势;同时得益于Ultrasint®PP 1400 Black粉末所具备的优异塑性及延展性,使SLS一体成型工艺制备的高分子材料药型罩的射流连续性较差的问题得到了有效改善。

准静态拉伸试样为3D打印的聚丙烯光滑平板件,依据《塑料拉伸性能的测定 第四部分:各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件》^[20]进行设计,拉伸试样采用哑铃状,应变率设定为 0.001 s^{-1} ,试件的设计图及实物图如图2a所示,拉伸速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,标段长度为 25 mm ,环境温度约



a. tensile specimen



b. compression specimen

图2 力学性能测试试样

Fig.2 Specimen for mechanical property testing

为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时根据GB/T 1041-2008《塑料压缩性能的测定》^[21]设计准静态压缩试件,试样采用圆柱形,高度与直径均为 10 mm ,试件的实体图及实物图如图2b所示。

1.2 材料力学性能

1.2.1 测试方法

射流的形成过程可以理解为药型罩材料在高应变速率下的动态行为,想要深入剖析新型材料药型罩射流成型的机制与性能,核心在于探究该材料在不同应变率下所展现出的力学性能^[22-23]。本研究选用拉伸实验机和压缩实验机进行准静态拉伸及压缩实验,其中两种电子万能试验机的加载速度为 $4.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,试验在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行。万能拉伸及压缩试验机如图3所示。

为进一步获取高应变率条件下3D打印聚丙烯材料的动态力学性能参数,采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)实验系统开展材料动态压缩力学性能测试。SHPB实验系统的结构示意图如图4所示,其核心组成包括气舱、撞



a. tensile testing machine



b. compression testing machine

图3 万能材料实验机

Fig.3 Universal testing machine

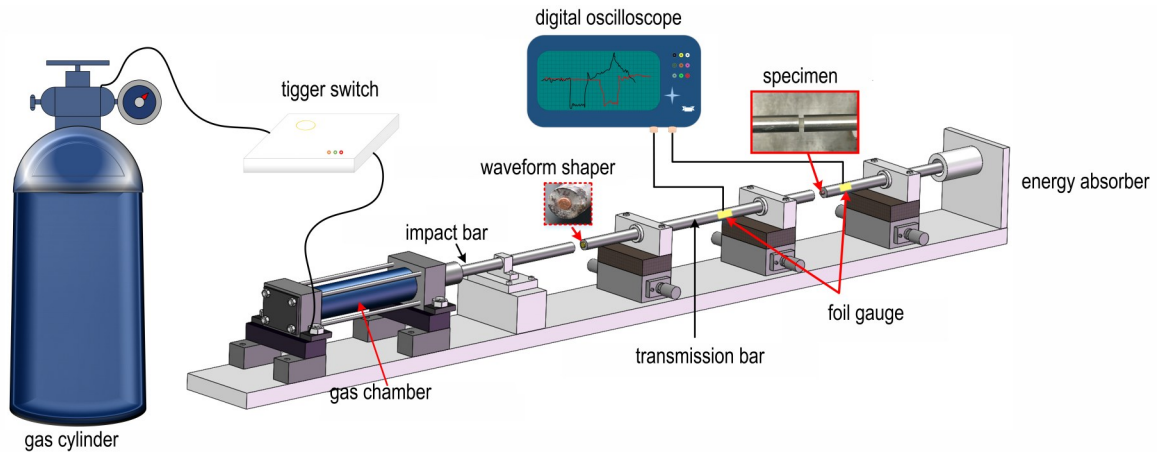


图4 分离式霍普金森压杆
Fig.4 Split Hopkinson pressure bar, SHPB

击杆、入射杆、透射杆、阻尼器及数据采集模块。此外,为消除界面摩擦与接触不良对试验结果的干扰,试验前需在入射杆和透射杆的端面均匀涂抹适量凡士林。

1.2.2 测试结果

图5a给出了3D打印聚丙烯材料拉伸试样的工程应力-应变曲线。从图5中可以发现实验用3D打印聚丙烯材料受拉伸加载作用时,依次展现出弹性阶段、屈服阶段与颈缩阶段。在弹性阶段中,应力与应变近乎呈现出线性关联,其斜率即为这一阶段材料所特有的弹性模量,约为10 MPa;由于该应力-应变曲线在弹性阶段和塑性阶段之间没有明显的分界点,故采用偏移屈服点反映其屈服强度为7.8 MPa;随载荷持续加载,当数值为12.58 MPa时,达到该材料的抗拉极限,同时进入颈缩阶段,当应力下降到11.74 MPa时为该材料的断裂强度。

图5b为3D打印聚丙烯材料的压缩真实应力-应

变曲线,当应变处于较低水平时($0 < \epsilon < 7$),材料处于线弹性阶段。在此阶段,材料在初始压缩作用下首先发生均匀压缩变形,试样在应力作用下表现为线弹性变形,应力与应变近似呈线性关系。当应变增加至一定数值时,压缩应力升至第一个峰值,随后进入持续时间较长的应力平台阶段($7 < \epsilon < 40$)。该阶段的显著特征为:应变持续增大过程中,应力仅发生微小增长;这种长而平缓的屈服平台结构,是试样具备较高能量吸收能力的关键。

图5c为3D打印的聚丙烯材料在5种不同应变率下的真实应力-应变曲线。从图中可以看到:3D打印的聚丙烯材料在动态加载条件下的响应过程与准静态压缩实验结果存在差异,该材料处于高应变率条件时,其动态压缩曲线未呈现出显著屈服点,应变软化现象也有所弱化;随着应变逐步增大,应力呈持续上升趋势,这表明该材料在此场景下的应变硬化效应更为突出。

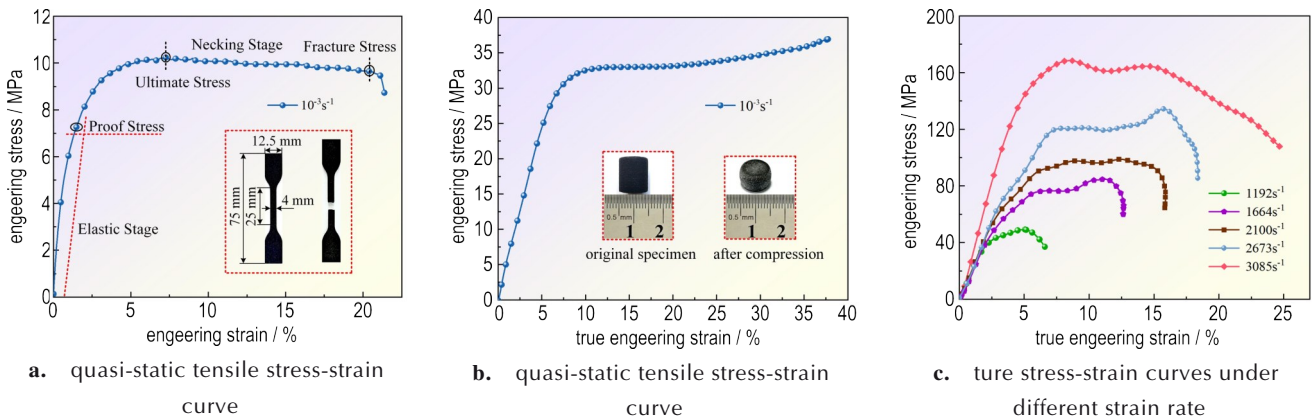


图5 力学性能测试结果
Fig.5 Mechanical property test results

对应力-应变曲线上的特征点进行取值可以得到试样的动态力学性能参数,表2为3D打印聚丙烯材料的动态压缩实验数据,其中屈服应力为 σ_y ,取线弹性阶段的峰值应力作为结果,其对应的应变为屈服应变 ε_{cy} 。

表2 动态压缩试验数据

Table 2 Dynamic compression test data

gas chamber pressure / MPa	$\dot{\varepsilon} / s^{-1}$	σ_y / MPa	$\varepsilon_{cy} / \%$
0.12	1192	50.8	5.3
0.18	1664	72.5	6.8
0.25	2100	81.4	11.2
0.32	2673	97.1	13.0
0.41	3085	126.3	16.9

Note: $\dot{\varepsilon}$ is strain rate; σ_y is yield stress; ε_{cy} is yield strain.

试验结果表明,随着应变率从 $1192 s^{-1}$ 增至 $2297 s^{-1}$,3D打印聚丙烯试样的动态屈服强度随应变率增加呈线性增长,从50.8 MPa提升到了126.3 MPa,这表明在线弹性阶段,3D打印聚丙烯试样具有一定的应变率强化效应。

由前文分析得出,3D打印聚丙烯材料在高应变率下的力学性能与准静态压缩实验中所呈现出的力学性能截然不同,并且展现出类似于金属材料的应变率强化特性。在聚能射流成型过程中,药型罩材料会处于“高应变率、大塑性变形”等极端条件下,而Johnson-Cook^[24]模型则是一种能够描述材料在大变形、高应变速率和高温下的本构模型,它能够预测不同材料的流变应力,且结构相对简单、材料参数计算便捷,故被广泛应用于冲击动力学的数值模拟中。其基本形式如公式(1)所示^[25]:

$$\sigma_e = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) \quad (2)$$

式中, A 为参考温度和应变率下屈服强度,MPa; B 为应变增强系数,MPa; C 为应变率敏感系数、 n 表示应变增强指数,二者均为无量纲拟合参数; T 、 T_{room} 和分别是材料的绝对温度、室温和熔化温度,℃。

首先取参考温度=20℃,参考应变率为准静态实验中使用的 $0.001 s^{-1}$,不考虑温度软化效应,即应变率,温度 $T = T_{room}$ 此时式(1)可简化为:

$$\sigma_e = A + B(\varepsilon)^n \quad (3)$$

将式(3)左右同时取自然对数,得:

$$\ln(\sigma_e - A) = \ln B + n \ln \varepsilon \quad (4)$$

同时在式(4)两侧除以 $(A + B\varepsilon^n)$,得:

$$\frac{\sigma_e}{A + B\varepsilon^n} = 1 + C \ln \dot{\varepsilon} \quad (5)$$

当等效塑性应变为0(即 $\varepsilon = 0$)时,获得材料的真实屈服应力 A 。将 A 带入式(4),准静态条件下应力-应变曲线可通过线性拟合得到一条斜率为 n ,截距为的直线,如图6所示。最终求解得到 $A=34.96 MPa$, $B=58.27 MPa$, $n=0.815692$ 。

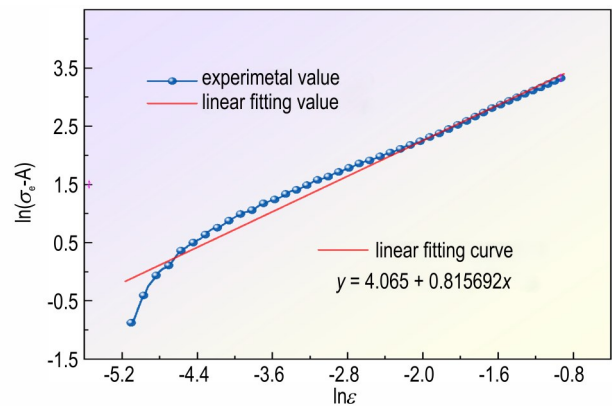


图6 本构参数拟合曲线

Fig.6 Constitutive Parameter Fitting Curve

2 静破甲试验及数值模拟

2.1 微型战斗部设计

微型无人机具有体积小、质量轻便、隐蔽性优异及机动性能突出等特征,为满足微型无人机的战斗部搭载要求,应在保证毁伤威力的同时尽可能缩小杀伤战斗部的体积。因此本文将战斗部的总体尺寸设计为微小型,药型罩及壳体的材料选用高分子低密度的3D打印聚丙烯材料,其密度仅为 $1.043 g \cdot cm^{-3}$,药型罩的质量为1.06 g;鉴于锥形药型罩射流性能优异,破甲威力强等优势,故将微型战斗部的药型罩设计为锥角 60° 、壁厚0.5 mm,直径10 mm的锥形结构;装药为JH-14炸药,通过压制成型获得,平均装药密度为 $1.695 g \cdot cm^{-3}$,装药高度为10 mm,装药质量在1.06 g左右,由微型电雷管起爆;微型战斗部的装配总体及示意图如图7所示;装药及药型罩的参数详见表3。

2.2 静破甲试验

为检验3D打印聚丙烯射流对铝靶的毁伤效果,设计了微型战斗部对铝靶的侵彻试验。试验选用 $300 mm \times 300 mm \times 50 mm$ 的2A12铝合金靶,靶板上放置提前加工好的固定高度的炸高筒,超轻高效杀

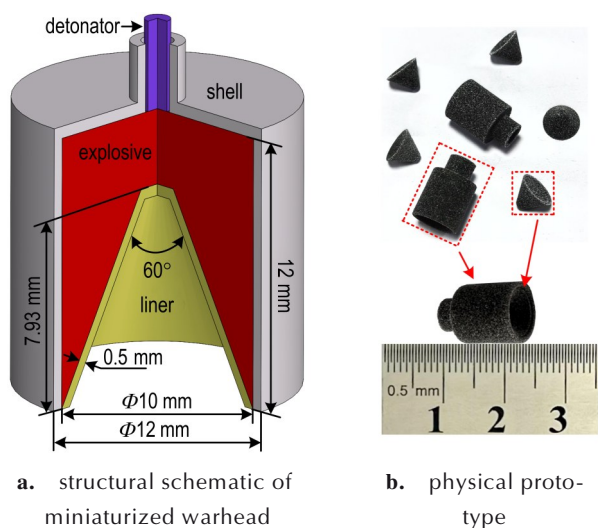


图7 微型战斗部示意图

Fig.7 Schematic diagram of the miniature warhead

表3 微型战斗部详细参数

Table 3 Detailed parameters of the schematic diagram of the miniaturized warhead

part	materials	H / mm	m / g
charge	JH-14	10	1.217
liner	3D-Printed PP	6.93	0.115
shell	3D-Printed PP	12	0.793

Note: H is part height; m is part mass.

伤载荷放置在炸高筒中,攻击方向竖直向下,试验中通过控制炸高筒的规格来实现3D打印聚丙烯射流在3CD、4CD、5CD三种不同炸高条件下(CD为聚能装药口径10mm)对铝合金靶的毁伤性能。试验现场布置如图8所示。

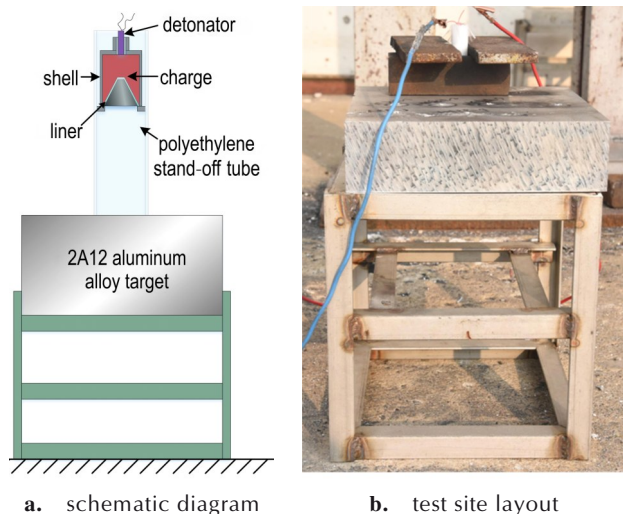


图8 静破甲试验现场

Fig.8 Static armor-piercing test site

2.3 数值模拟

2.3.1 数值模型建立

利用有限元模拟软件,分析3D打印微型聚丙烯药型罩的射流成型过程及对半无限厚2A12铝合金靶板的侵彻过程。根据图7的聚能装药结构,建立理想工况下微型战斗部的数值模型,同时为节约计算时间,在数值模拟中将其设置为1/4轴对称模型,并省去壳体及雷管。有限元模型如图9所示;空气域的长度为90mm。

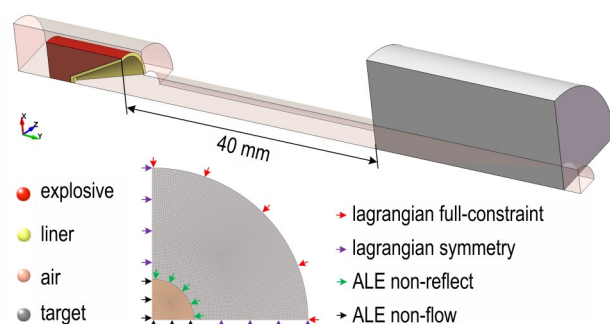


图9 数值模拟模型

Fig.9 Numerical simulation model

药型罩在爆轰载荷的作用下经常会涉及到材料的大变形问题,ALE方法在处理固体大变形方面,则有着极大的优点。通常的拉格朗日有限元方法,可以用加高网格密度或采用高阶单元的方法处理网格畸变(Mesh Distortion)。但这种做法只能减轻网格畸变而无法有效阻止。ALE方法可采用网格舒缓法(Mesh Smoothing)降低畸变处的网格密度而有效防止网格畸变,从而保证有限元计算的进行。为此,本文在有限元软件中采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE)算法,开展3D打印聚丙烯药型罩微型射流成型及侵彻的数值模拟研究。此外,在模拟聚能装药的起爆过程中,当应力波或爆轰产物到达边界时,会形成应力波固壁反射,这一因素将对数值模拟的结果产生较大影响,故选择在空气域外侧设置无反射边界条件“BOUNDARY_NON_REFLECTING”,用以假设所有的物质可以无障碍流出,且应力波可以在边界无反射传播出去。

2.3.2 材料模型及参数

为了能较好的模拟起爆过程中所产生的压力等物理量的变化过程,采用“MAT_NULL”及“EOS_LINEAR_POLYNOMIAL”对空气进行描述。靶板的材料为2A12铝合金,由于射流的成型过程涉及到材料在高温、高压及高应变率下的力学行为,因此利用GRU-

NEISEN 状态方程及 JOHNSON-COOK 强度模型共同描述高分子聚合物药型罩及靶板材料性能,具体参数列于表 5。

对于 JH-14, 使用 JonesWilkinseLee (JWL) 方程来描述其爆轰过程;

$$P_a = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_2 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_1 V} + \frac{\omega E_a}{V} \quad (6)$$

式中, P_a 为压力, Pa; V 为比容, 为无量纲常数; E_a 为比

表 5 JH-14 高能炸药材料参数^[26]

Table 5 Parameters of JH-14 high-energy explosives

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	P_{CJ} / GPa	$E_{CJ} / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω
1.695	71.7	30.4	8.5×10^6	618.4	6.9	4.3	0.87	0.38

2.3.3 数值模型有效性验证

为验证数值模型的有效性,需确定空气域及靶板的最佳网格尺寸。考虑到射流头部速度与射流长度对聚能射流侵彻能力起决定性作用,故选取这两个参数开展网格收敛性分析。图 10 表明网格尺寸对射流头部速度和射流长度具有显著调控作用,当网格精度较低时,误差较为明显;随着网格尺寸的缩小,这两个参数均呈现出明显的收敛趋势;且网格持续细化时,射流头部速度与射流长度均随之增大。这种情况表明,网格尺寸将会直接影响计算的精度。在网格尺寸为 0.1 mm 时,射流的头部速度与射流长度分别为 $6.992 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 41.57 mm , 进一步将网格尺寸降低至 0.2 mm 及 0.3 mm, 其数值分别为 $6.986 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $6.977 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 40.92 mm 及 40.15 mm , 误差均未超过 3%。因此,确保计算的精确度,选取 0.1 mm 为 ALE 网格的最优尺寸。

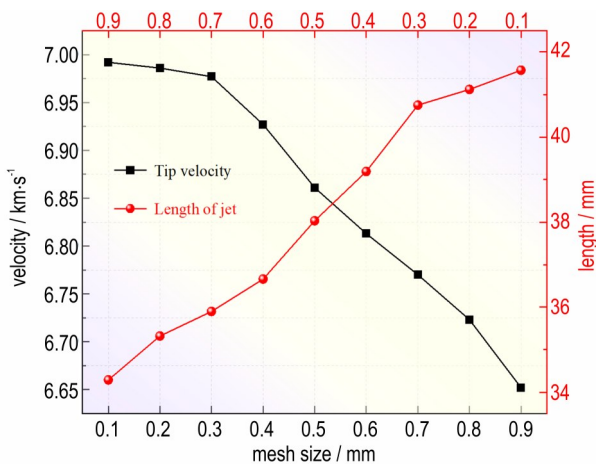


图 10 Ale 网格尺寸对射流头部速度及射流长度影响
Fig. 10 Influence of ALE grid size on jet head velocity and jet length

内能, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为材料常数。炸药参数列于表 5。

表 4 2A12 铝合金材料主要参数

Table 4 Main parameters of 2A12 aluminum alloy materials

materials	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E / GPa	A / MPa	B / MPa	n
2A12	2.77	71.7	400	424	0.7
3D-Printed PP	1.043	2.98	34.96	58.27	0.815692

进一步,将侵彻体积和侵彻深度作为度量 Lagrange 网格收敛的标准,并将其与网格尺寸作图,具体如图 11 所示。侵彻体积和侵彻深度均随着网格尺寸的减小而呈现收敛趋势,当网格尺寸为 0.1 mm 时,侵彻体积为 2.31 mm^3 ,侵彻深度达到 16.04 mm 。故为确保计算的精确度,选取 0.1 mm 为 Lagrange 网格的最优尺寸。

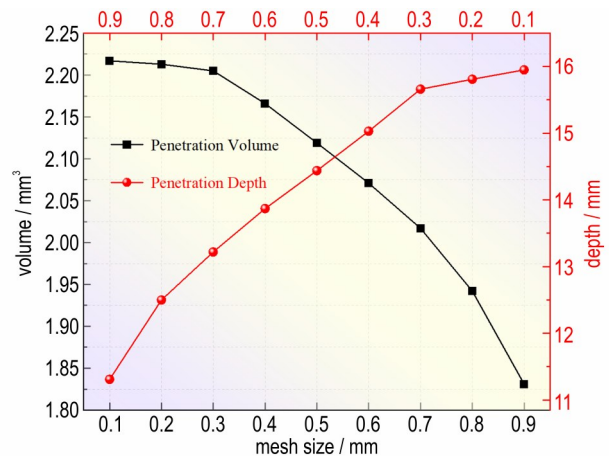


图 11 Lagrange 网格尺寸对侵彻体积及侵彻深度影响
Fig. 11 Influence of Lagrange mesh size on penetration volume and penetration depth

3 高分子聚合物射流成型机理及毁伤威力研究

3.1 高分子聚合物射流成型特性

由经典定常不可压缩理想射流成型理论可知:在药型罩压溃过程中,无论采用何种材料,药型罩均会被爆轰压力瞬间压溃,这使得该理论在压溃阶段仍适用于高分子聚合物药型罩。然而经过实际观测发现,高

分子聚合物射流与金属射流的形貌差异明显,而这种差异本质上由药型罩材料的固有性能决定。与传统金属射流相比,高分子聚合物射流具有不可忽视的粘性,且流动特性也存在明显差别。

针对已有的定常不可压缩射流成型理论,苏联科学家 Godunov^[27]等在1975年,通过纳入材料粘塑性行为及应变率相关性完成改进,该改进模型即后续的“粘塑性理论”。该理论忽略冲击波效应与临界马赫数的影响,转而聚焦材料粘塑性对射流形成的影响,且其准则判定射流为凝聚态,无径向分散或扩展现象。Godunov指出,反向射流的形成及射流径向扩散的诱因是:反向射流表面粘性水平分离力低于两平面流体对称碰撞力;对于这种力的不平衡效应,需通过雷诺数进行量化表征。后续苏联通过实验验证,将雷诺数大于2确立为粘塑性理论下凝聚射流形成的核心准则。雷诺数的表达式^[28]:

$$R_e = \frac{tU \sin 2\beta}{\nu(1 - \sin\beta)} \quad (7)$$

式中, t 为药型罩壁厚, m ; U 为无粘性流动速度, $m \cdot s^{-1}$, 2β 为碰撞角, β 为压合角, $(^\circ)$; ν 为动力粘度系数, $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

由该式可分析得出:当 μ 增大时,雷诺数 R_e 则会降低,而高分子聚合物材料的动力粘度系数会比金属材料大很多,且高分子聚合物材料的初始密度也远低于金属材料,故存在:

$$R_{ep} < R_{em} \quad (8)$$

R_{ep} 为高分子聚合物药型罩的雷诺数, R_{em} 为金属药型罩的雷诺数。

其中:

$$V^* = V \left(1 - \frac{2}{R_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

V^* 为动力粘度系数相关的流动速度,进一步可得:

$$V_p^* < V_m^* \quad (10)$$

具体而言,在药型罩压溃初始阶段及汇聚过程中,动力粘度系数的引入直接导致高分子聚合物流体速度低于金属流体。考虑到金属射流汇聚的条件为 $R_e > 2$,而 $R_{ep} < R_{em}$,因此,仅考虑粘度影响时,高分子聚合物药型罩形成的射流比金属射流更易分散,无法形成凝聚射流。而药型罩微元汇聚至高压区后,压力增大必然产生径向速度并引发侧向膨胀,此时药型罩材料的可压缩性不可忽略。

而声速代表了介质可压缩性能的大小,可压缩性

越大,声速将越小,其中高分子聚合物材料的声速与金属材料相比要小很多,即高分子聚合物材料的可压缩性能要强于金属,利用可压缩流体伯努利方程^[29]可得:

$$\frac{p}{\rho} + e + \frac{u^2}{2} = const \quad (11)$$

式中, u 为单位质量的流体内能,上式揭示了对于一维等熵可压缩流动,沿流线各截面单位质量流体的压强势能、动能及内能之和守恒。

考虑一条远离壁面的流线 l ,设其进口截面处密度, $kg \cdot m^{-3}$;横截面积为 A_0, m^2 ;速度为, $m \cdot s^{-1}$;出口截面处相应参数为 ρ_1, A_1, u_1, \dots 。均满足可压缩流体的质量守恒关系:

$$\rho u A = const \quad (12)$$

进而可知:

$$\rho_0 u_0 A_0 = \rho_1 u_1 A_1 \quad (13)$$

故:

$$\frac{u_0^2}{2} + e_0 + \frac{p_0}{\rho_0} = \rho_1 u_1 A_1 \quad (14)$$

而在 $p_0 = p_1 = 0$ 这一条件下,高分子聚合物的大动态粘度将导致明显的粘性耗散 e ,该粘度本质上是分子间相互摩擦形成的阻力,使得流体在出流过程中必须克服粘滞阻力而消耗功,即:

$$e_0 > e_1 \quad (15)$$

则由式(14)可得:

$$u_0 < u_1 \quad (16)$$

进而根据式(13)可得:

$$\rho_0 A_0 > \rho_1 A_1 \quad (17)$$

鉴于高分子聚合物材料具备显著的可压缩性,其密度在压缩过程中并非保持不变,故存在的关系。

根据流体动力学原理,在压强不变的条件下,流动速度提升时,压力(或密度)相应降低;在压力保持恒定的情况下,密度随之减小,即 $\rho_0 > \rho_1$ 。

故有 $A_0 < A_1$ 。

因此,当材料粘滞特性和压缩行为被纳入分析时,该类聚合物形成的射流会呈现扩散形态,但其扩散幅度仍缺乏明确判定。

3.2 高分子聚合物射流头部膨胀特性验证

在炸药爆轰过程中,冲击波将以球面波的形式向药型罩进行传递,在冲击波的作用下,药型罩由中心向轴线方向压溃,进而形成聚能射流;在压溃过程中高分子聚合物材料在药型罩上的流动过程如图12a所示,由薄壁锥形罩上的3个观测点 P_1, P_2, P_3 进行观察,其

中ab段、bc段的长度相等,观测点 P_3 代表药型罩最顶端的材料,在成型过程中最先压溃,故形成射流的头部; P_2 较 P_1 拥有更高的速度且比 P_1 压溃的更快,故形成射流的中部。

基于数值模拟得到了3D打印聚丙烯药型罩射流成型过程各阶段的速度,并依此绘制出如图14所示的散点图,从图中可知,射流在侵彻靶板前可大致分为两个阶段:0~13 μs ,当爆轰波传播至药型罩表面后,其驱动的爆轰产物迅速撞击药型罩表面并施加巨大压力,在此过程中,炸药释放的大量化学能通过爆轰波传递至药型罩。当药型罩沿轴线完成汇聚碰撞后,

系统能量重新分配,其中药型罩内部少量材料被抛射形成对侵彻果起关键作用的高速射流,剩余部分则形成低速杆体^[30]。14~41 μs 及42~68 μs ,射流在速度梯度作用下以高应变率持续拉伸;该速度梯度源于炸药与药型罩的质量比沿轴线自上而下逐渐减小,进而导致药型罩所受压力从顶部至底部逐步降低,最终射流呈现处头部速度高、尾部速度低的分布特征,且此阶段射流纵横比进一步增大,为后续侵彻提供了有利条件。在68 μs 时射流头部速度达到最大值7173 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在此之后3D打印聚丙烯射流接触到靶板并进入侵彻阶段。

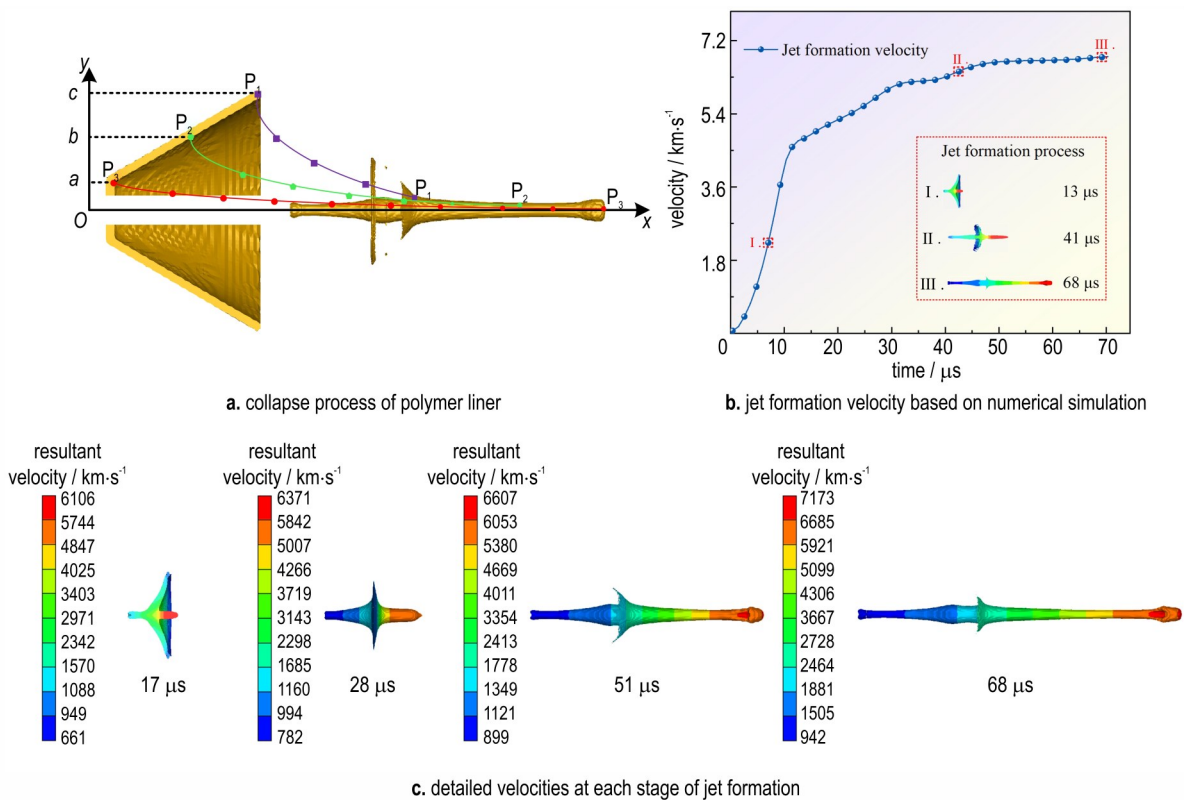


图12 3D打印聚丙烯射流拉伸过程速度分布

Fig.12 Velocity distribution diagram of 3D-Printed polypropylene jet stretching process

为更直观的分析高分子聚合物射流的头部膨胀特性,在结构相同的前提下选取聚碳酸酯(PC)、尼龙(Nylon)、聚四氟乙烯(PTFE)3种典型高分子聚合物材料与传统金属紫铜材料的射流进行分析对比。从上述有关“粘塑性理论”的讨论可知:当高分子聚合物射流经过高压区后,会引发侧向膨胀,这将会导致高分子聚合物射流获得更大的径向膨胀速度,进而使得射流直径增大。结合密度分布特征(图13)可见,4种高分子聚合物射流的头部均呈现饱满的径向扩张形态,伴随显著膨胀现象,且其头部密度显著低于材料初始密度;

与之形成鲜明对比的是最右侧的紫铜射流,其头部形态细长规整,径向尺寸均匀一致,且密度云图中头部与射流主体的密度均与紫铜初始密度接近,未出现明显衰减。

图14为不同材料射流膨胀直径的曲线图,由图可知在射流的成型阶段,四种高分子聚合物射流的初始膨胀速率近乎一致且显著高于紫铜射流,在40 μs 左右,紫铜射流的直径不再发生变化;而其余四种高分子聚合物射流的头部直径则发生不同程度的膨胀,其中PTFE、Nylon及3D打印PP射流的膨胀速率较快,PTFE

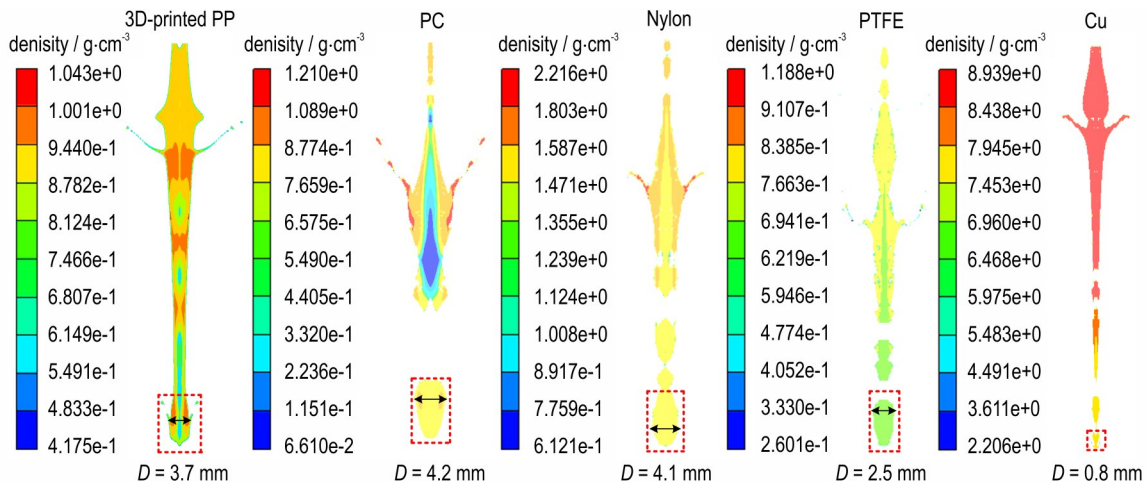


图 13 五种不同材料射流密度分布图

Fig.13 Density distribution diagram of jets of 5 different materials

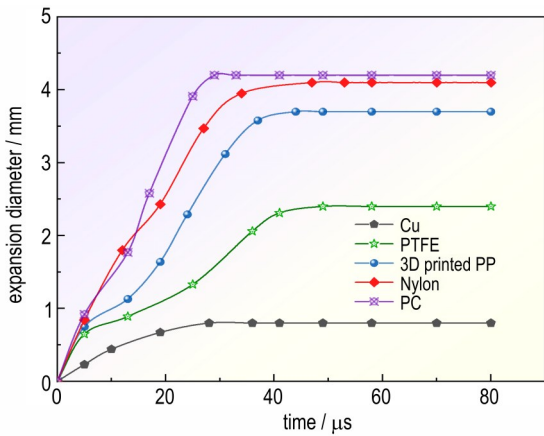


图 14 五种不同材料射流头部直径变化

Fig.14 Variation of jet head diameter for 5 different materials

射流的膨胀速率较慢,明确了高分子聚合物材料具有独特的头部膨胀特性。

3.3 3D 打印聚丙烯射流毁伤威力研究

3.3.1 铝靶毁伤特征

3D 打印的微型聚丙烯射流对于半无限厚靶板的

破坏情况基于 3 CD、4 CD、5 CD 三种不同炸高条件下进行分析。为了进一步了解微型聚能射流的毁伤效果,分别对半无限厚靶板穿孔的状态及开孔形貌进行了观测:从图 15 可以看出三个靶板正面均出现圆形孔洞,且伴有多处炸药爆炸冲击的痕迹,经测量后得出射流对靶板正面的开孔直径分别为 7.85、7.5 mm 及 7.42 mm。进一步将靶板切开可观察到,聚能射流形成的孔壁粗糙且伴有微观裂纹,靶板内部被严重破坏,周边区域的材料因受应力波及射流侧向力作用,也发生一定程度的塑性流动与变形。射流所造成的穿孔直径先增大后减小最后再次增大,最终的侵彻深度分别为 11.7、17.1 mm 及 13.4 mm。由此可印证 4 CD 为 3D 打印聚丙烯射流的最优炸高。

3.3.2 3D 打印聚丙烯射流侵彻过程

图 16 给出了 3D 打印聚丙烯射流在 4 CD 下对半无限厚 2A12 铝合金靶板的侵彻过程,在数值模拟过程中,射流沿着弹道轴线产生侵彻通道。68 μs 时,射

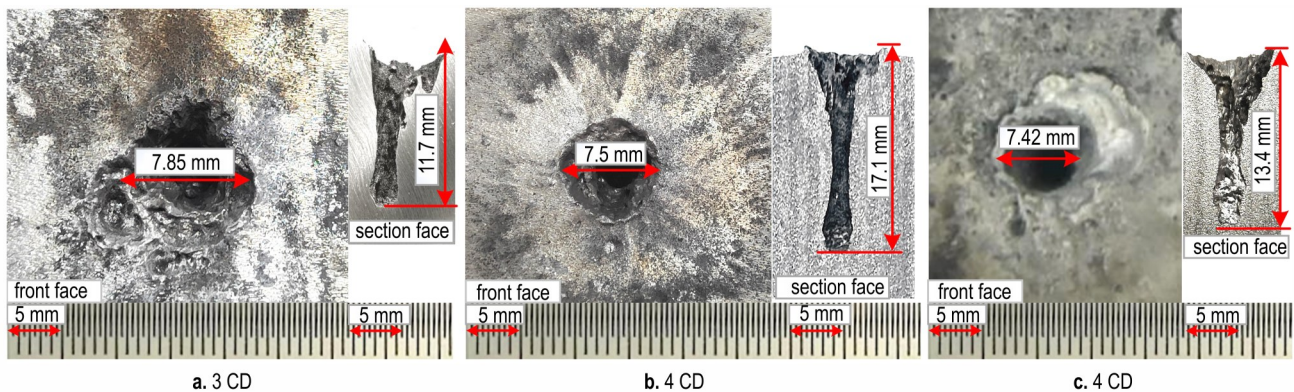


图 15 不同炸高条件下铝靶的毁伤形貌

Fig.15 Damage morphology of Aluminum targets under different standoff distance conditions

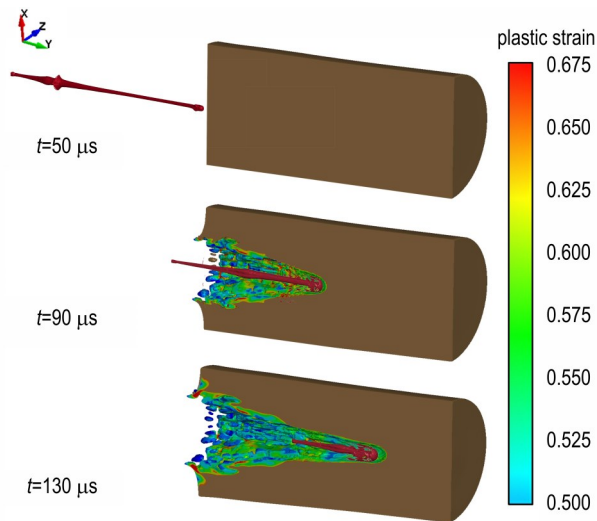


图 16 射流侵彻过程中靶板的塑性应变变化
Fig.16 Plastic Strain Variation of Target Plate During Jet Penetration Process

流即将触碰至靶板,此时射流头部速度达到最大值;98 μs时,射流超高速撞击靶材产生显著的压力和温度,导致靶材径向位移并产生空腔,进而形成侵彻通道。随着侵彻的进行,射流在侵彻路径周围形成明显的塑性应变区,材料因高应变率加载发生塑性流动,部分区域开始出现破碎迹象,塑性应变分布从射流前端向周围梯度递减^[31]。128 μs时,随着侵彻的进行,侵彻深度进一步增大,靶板的塑性应变区持续扩展,破碎范围增大;高塑性应变区域集中于射流前端及侵彻通道周边,表明这些区域材料发生了剧烈的不可逆变形,已接近或达到塑性破坏极限。随着射流速度的减小,空腔的深度逐渐增加。当射流速度下降到截断点时,尽管具有动能,但它失去了穿透目标的能力,导致穿透过程的终止。

图 17 为最优炸高下(4 CD)数值模拟结果与静破

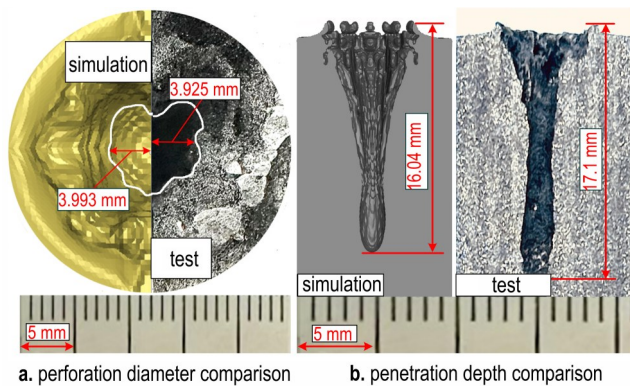


图 17 数值模拟与静破甲试验结果对比
Fig.17 Comparison of numerical simulation and static armor-piercing test

甲试验结果的对比,由该图可知,3D打印聚丙烯射流侵彻靶板的开孔直径、破坏形貌及侵彻深度与试验结果基本一致,数值模拟得到的射流开孔直径为7.986 mm、侵彻深度为16.04 mm;破甲试验得到的射流开孔直径为7.85 mm,侵彻深度为17.1 mm。试验与数值模拟结果均表明:3D打印聚丙烯射流在侵彻过程中对于靶板有明显的扩孔效应。

4 3D打印聚丙烯药型罩的适用性分析

图 18 为不同材料的射流成型直至拉伸断裂前的最终长度。另外,依据数值模拟得到,3D打印聚丙烯射流、聚四氟乙烯、铜射流、尼龙和聚碳酸酯射流分别在68 μs,60 μs,58 μs,51 μs和39 μs左右破碎。在微型聚能射流拉伸断裂前, $L_{PP} > L_{PTFE} > L_{Copper} > L_{Nylon} > L_{PC}$,这一现象表明在这几种高分子材料药型罩及紫铜药型罩中,3D打印聚丙烯的延展性最好,聚碳酸酯的延展性最差。

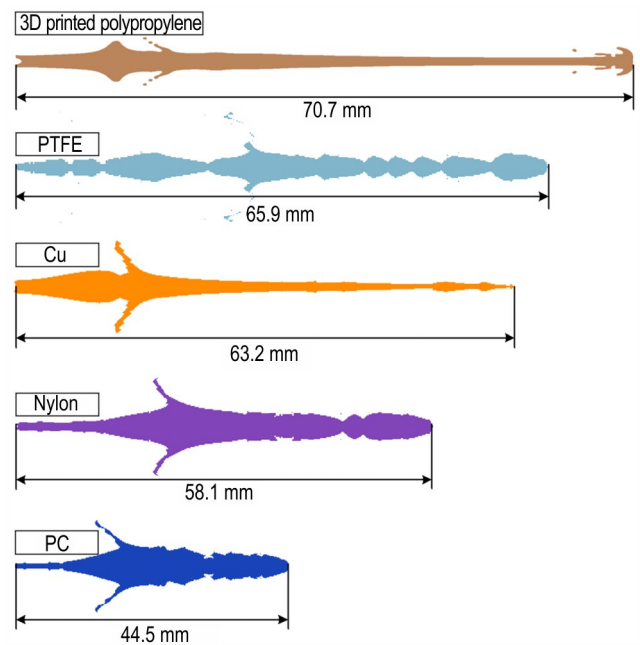


图 18 5种不同材料射流拉伸断裂前长度对比
Fig.18 Tensile-fracture length comparison for 5 distinct jets

表 6 为基于 PER 准定常理论计算获得的五种不同材料微型聚能射流的头部速度。计算结果表明,3D打印聚丙烯射流的头部速度最高,为7173 m·s⁻¹,紫铜射流的头部速度最低,为6360 m·s⁻¹;进一步将理论计算结果与数值模拟所得到的射流头部速度进行对比,可以发现各不同材料射流之间的误差均控制在10%以内,这一结果进一步验证了所建立的数值模拟模型的

表 6 不同材料射流头部速度对比

Table 6 Comparison of jet head velocities for different materials

materials	simulation / $m \cdot s^{-1}$	theory / $m \cdot s^{-1}$	error / %
Polypropylene	7173	6612.47	7.81
Nylon	6721	6197.59	7.78
Pc	6948	6318.72	9.05
PTFE	6606	6146	6.96
Cu	6360	5868.56	7.72

合理性及计算结果的可靠性。

图 19 给出了不同材料的微型射流侵彻结束时对于 2A12 铝合金靶板开孔直径及侵彻深度, 在射流高速侵彻铝靶的过程中, 由于应力波的传播速度快于射流前进速度, 应力波会提前抵达靶面, 进而造成射流撞

击区域的铝靶材料发生强化现象。5 种不同材料射流侵彻铝靶的入孔孔径分别为 7.986, 7.25, 4.38, 3.52 mm 及 1.57 mm, 其中 3D 打印聚丙烯射流对铝靶的影响区域最大, 其次是 PC 射流、Nylon 射流和 PTFE 射流, 铜射流影响区域最小, 这说明聚合物射流对铝靶的径向扩孔效应要强于金属射流。

当聚合物射流与金属射流撞击靶板时, 均会出现高温、高压及高应变的极端状态。由于射流运动速度极高, 冲击波会传入靶板, 而其仅能驻留冲击界面而无法传递至后继射流, 导致射流径向飞散并产生扩孔。结合聚合物射流成型时的膨胀特性, 在应力波与径向飞散的共同作用下, 其扩孔孔径将会大于金属射流。故在五种不同材料的射流对于铝靶的侵彻过程中, 铜射流的开孔直径最小。

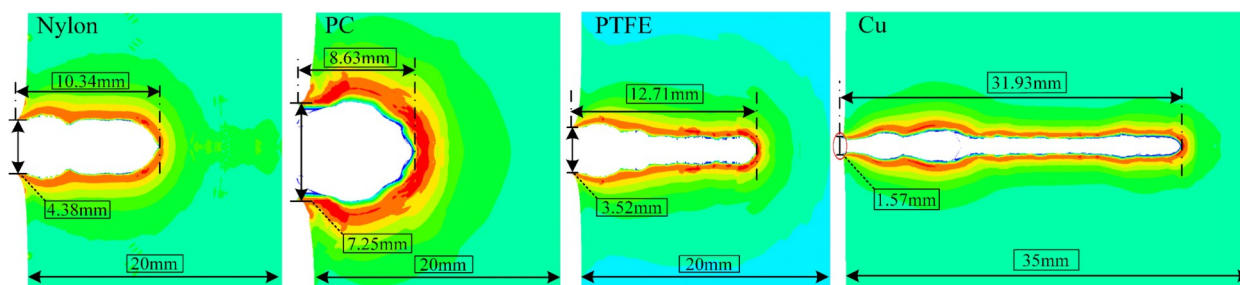


图 19 5 种不同材料射流对于半无限厚铝靶的侵彻能力

Fig.19 Penetration capability of 5 different material jets on semi-infinite aluminum target

图 20 描述了 4 种高分子聚合物射流及紫铜射流分别在“射流拉伸断裂前长度”、“射流头部速度”、“开孔直径”、“侵彻深度”及“侵彻效率”等 5 种不同维度下的性能强弱。从图 20 中可以看出: 在同等装药质量、相同结构的药型罩这一条件下, 紫铜射流在“侵彻深

度”这一方面远超其余四种高分子聚合物材料射流, 这主要得益于紫铜优异的延展性, 其射流形成时可通过塑性变形维持连续的细长形态; 但其动态断裂韧性较差, 这一特性导致其在拉伸变形过程种极易产生颈缩或断裂现象, 而本文所采用的 3D 打印聚丙烯粉末基于其独特的制备技术, 进而具备了传统高分子聚合物所欠缺的优异延展性, 故该材料在“射流拉伸断裂前长度”这一维度下的性能, 显著优于其余四种材料。

在“射流头部速度”这一方面, 紫铜的密度远高于其余四种高分子聚合物材料, 根据能量守恒与动量传递原理, 在在爆轰加载条件下, 相同能量用于加速不同密度的材料时, 密度越大的材料, 速度提升越困难; 同时根据图 18, 紫铜射流的直径远小于其余四种聚合物射流的直径, 说明直径较大的射流质量分布更分散, 更能够在相同能量下获得较高的速度。故在这一维度上, 3D 打印聚丙烯射流的头部速度最高。

而射流的本质则是高速运动的连续介质, 它的侵彻效率可由单位质量下的侵彻深度、破坏范围或能量转化率来衡量, 本次试验从侵彻深度这一角度来分析

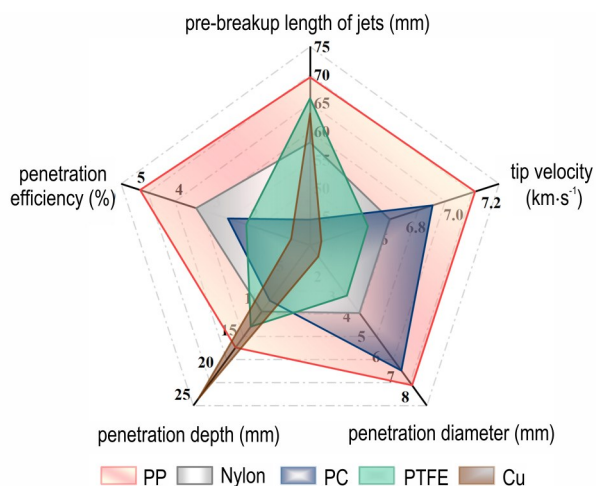


图 20 5 种不同材料射流的综合性能对比

Fig.20 Comprehensive performance comparison of 5 different material jets

3D打印聚丙烯射流及其余三种聚合物射流相对于紫铜射流的侵彻效率:在载荷结构尺寸相同的情况下,他们的体积相同,故紫铜药型罩与聚丙烯药型罩的质量关系可转化为密度关系。

由此可得:

$$m_{pp}:m_{Cu} = \rho_{pp}:\rho_{Cu} = 1.043:8.9 \quad (18)$$

图21为紫铜射流对于半无限厚2A12铝合金靶板的侵彻结果,由图可知,紫铜射流的侵彻深度为36.7 mm,3D打印聚丙烯射流的侵彻深度为17.1 mm,则有:

$$L_{pp}:L_{Cu} = 17.1:36.7 \quad (19)$$

故单位质量下3D打印聚丙烯射流相较于紫铜射流的侵彻效率可由下式计算:

$$\frac{L_{pp}}{m_{pp}}:\frac{L_{Cu}}{m_{Cu}} = \frac{17.1}{1.043}:\frac{36.7}{8.9} = 3.975:1 \quad (20)$$

式中, m 为药型罩质量, g ; ρ 为药型罩密度, $g \cdot cm^{-3}$; L 为侵彻深度, mm 。依据上述公式,进而可计算得到其余三种高分子聚合物射流在单位质量下相对于紫铜射流的侵彻效率。

最终结果表明在结构相同的条件下,3D打印聚丙烯射流的侵彻效率约为紫铜射流的4倍。

综合对比四种高分子材料射流及紫铜射流的性能表现,3D打印聚丙烯射流展现出显著优势,其在拉伸断裂前射流长度、接触靶板前头部速度、侵彻口径及同

质量条件下侵彻效率四个关键指标上均居首位,充分论证了3D打印聚丙烯(PP)材料作为微型无人机载荷中药型罩材料的优选性。

5 结论

本文提出了一种基于3D打印技术制备微型无人机用聚合物战斗部的方法。采用静破甲试验与数值模拟技术相结合的方式,验证了该战斗部能够形成成型效果良好,侵彻性能优异的聚能射流,研究得到了以下3个主要结论:

(1)基于经典“定常不可压缩理想射流成型理论”并结合“粘塑性理论”,针对高分子聚合物材料的力学特性,分析其射流的成型过程,研究表明该类射流普遍存在一定程度的头部膨胀特性;为验证该结论的可靠性,通过有限元软件对本文研究的3D打印PP射流及其余三种高分子聚合物射流的成型过程进行数值模拟,结果显示射流头部呈现显著膨胀特征。

(2)基于有限元软件探究不同炸高条件下3D打印PP射流对半无限厚铝靶的毁伤效果。结果表明,4 CD条件下威力最佳,侵彻深度及开孔直径分别为16.04 mm及7.986 mm,与静破甲试验结果(侵彻深度17.1 mm、开孔直径7.85 mm)高度吻合,充分验证了试验的准确性。对试验数据加以分析,发现3D打印聚丙烯射流对靶板有显著的扩孔效应。

(3)多维度对比同结构3D打印PP射流、紫铜射流及3种典型高分子聚合物射流的性能,结果表明前者在延展性、头部速度及对半无限厚铝靶的开孔直径等四项关键指标上表现最优,单位质量侵彻效率达紫铜射流的4倍,为微型无人机载荷药型罩的材料选型提供了优选方案。

参考文献:

- [1] CAI G W, DIAS J, SENEVIRATUNE L, et al. A survey of small-scale unmanned aerial vehicles: Recent advances and future development trends [J]. *Unmanned Systems*, 2014, 2(2): 175-199.
- [2] PS R, JEYAN M L. Mini unmanned aerial systems (UAV) -A review of the parameters for classification of a mini UAV [J]. *International Journal of Aviation, Aeronautics and Aerospace*, 2020, 7(3): 1-21.
- [3] HASSANALIAN M, ABDELKEFI A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2017, 91: 99-131.
- [4] ELMESEIRY N, ALSHAER N, ISMAIL T, et al. A detailed survey and future directions of unmanned aerial vehicles (UAVs) with potential applications [J]. *Aero space*, 2021, 8(12): 363.

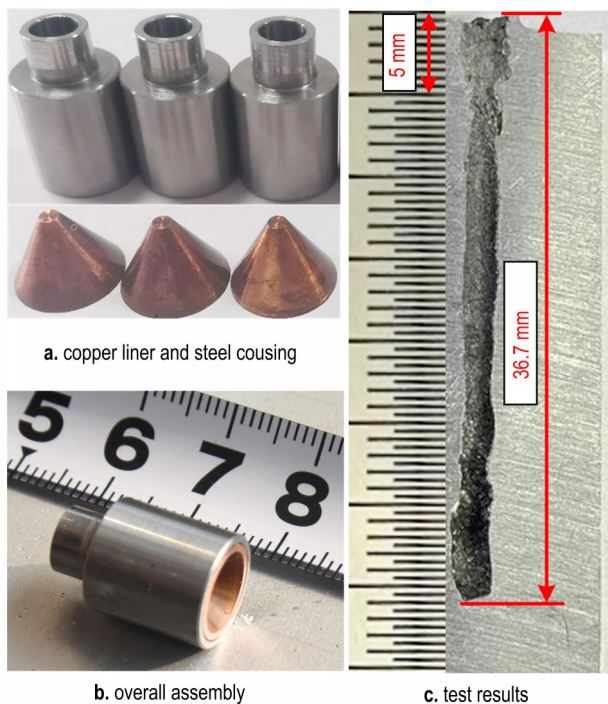


图21 紫铜射流对铝合金靶板的侵彻结果
Fig.21 Penetration results of copper jet on aluminum alloy target plate

- [5] 龚静,冯笛恩,夏林,等.微型无人机发展现状及未来趋势[J].飞行力学,2023,41(5):12-22.
GONG Jing, FENG Di-en, XIA Lin. Development status and future trend of micro UAV[J]. *Flight Dynamics*, 2023, 41(5): 12-22.
- [6] CELANDER L. How Drones Fight: How Small Drones are Revolutionizing Warfare[M]. UK, Casemate, 2024: 103-115.
- [7] 王海峰.高性能协同作战无人机的发展与思考[J].航空学报,2024,45(17):8-25+3.
WANG Hai-feng. Development and considerations of high-performance cooperative combat UAVs[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2024, 45(17): 8-25+3.
- [8] 张雪朋,吉庆,伊建亚,等.聚能战斗部动态侵彻毁伤效应数值模拟[J].兵器装备工程学报,2022,43(8):68-73.
ZHANG Xue-peng, JI Qing, YI Jian-ya, et al. Numerical simulation of dynamic penetration damage effect of shaped charge warhead [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 68-73.
- [9] 胡腾江,赵玉龙,张国栋,等.内置MEMS安保机构的微型聚能毁伤弹药[J].兵器装备工程学报,2024,45(12):1-9.
HU Teng-jiang, ZHAO Yu-long, ZHANG Guo-dong, et al. A micro shaped ammunition with built-in MEMS safety-arming device [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(12): 1-9.
- [10] HANEY J, WESSON D. Shaped Charge[P]. US, Patent Application, 2005: 0056459A.
- [11] HIRSCH E, SADWIN L. SDSC-A structure destroying shaped charge[C]//24th International Symposium on Ballistics, 2008.
- [12] YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Experimental study on damage characteristics of copper-reinforced polytetrafluoroethylene shaped-charge warhead liner[J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 2068.
- [13] 李延,王伟,张雷雷,等.聚四氟乙烯基药型罩射流成型凝聚性研究[J].兵工学报,2019,40(12):2433-2439.
LI Yan, WANG Wei, ZHANG Lei-lei, et al. Research on jet coherency of PTFE based energetic liner[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(12): 2433-2439.
- [14] 吉庆.3D打印PLA-Cu复合材料药型罩性能研究[D].中北大学,2023.
JI Qing. Performance study of 3D-printed PLA-Cu composite liners[D]. North University of China, 2023.
- [15] LY M, SPINELLI S, HAYS S, et al. 3D printing of ceramic biomaterials[J]. *Engineered Regeneration*, 2022, 3(1): 42-52.
- [16] CHEN J Y, LIU X J, TIAN Y J, et al. 3D-printed anisotropic polymer materials for functional applications[J]. *Advanced materials*. 2022, 34(5): e2102877
- [17] HESSELVIG J, NYGAARD R T, BUDZIK M K, et al. Efficient continuum-based modelling and analysis of polymer SLS: Insights into particle sintering and densification in straight and corner scanning passes [J]. *Additive Manufacturing*, 2025, 109: 2214-8604.
- [18] PHAM D T, DIMOV S, LACAN F, et al. Selective laser sintering: Applications and technological capabilities[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 1999, 213: 435-449.
- [19] KRYTH J P, WANG X, LAOUI T, et al. Lasers and materials in selective laser sintering[J]. *Assembly Automation*, 2003, 23(4): 357-371.
- [20] GB/T 1040.4-2006.塑料拉伸性能的测定第四部分:各向同性和正交各向异性纤维增强复合材料的试验条件[S].北京:中国标准出版社,2006.
National Standard of the People's Republic of China. (2006). GB/T 1040.4-2006, Plastics—Determination of tensile properties—Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fiber-reinforced plastic composites[S]. China Standards Press.
- [21] GB/T 1041-2008.塑料压缩性能的测定[S].北京:中国标准出版社,2008.
National Standard of the People's Republic of China. (2008). GB/T 1041-2008, Plastics—Determination of compressive properties[S]. China Standards Press.
- [22] ELSHENAWY T, LI Q M, ELBEIH A, et al. Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes design[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(1): 12-26.
- [23] ZHANG K B, LI W B, ZHENG Y, et al. The dynamic response of a high-density polyethylene slow-release structure under launching overload [J]. *Defence Technology*, 2023, 26: 143-156.
- [24] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 21-48.
- [25] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 21: 541-548.
- [26] 杨训杰,陈龙,柴云飞,等.外壳结构参数对微小型EFP成形的影响[J].一重技术,2025,(04):71-74.
YANG Xun-jie, CHEN Long, CHAI Yun-fei, et al. Influence of shell structure parameters on formation of micro-miniature EFP[J]. *CFHI Technology*, 2025, (04): 71-74.
- [27] GODUNOV S K, DERIBAS A A, MALI V I, et al. Influence of material viscosity on the jet formation process during collisions of metal plates[J]. *Combust Explos Shock Waves*, 1975, 11, 1-13.
- [28] 许世昌.双层含能药型罩射流成型机理及侵彻性能研究[D].南京:南京理工大学,2015.
XU Shi-chang. Study on Jet Formation Mechanism and Penetration Performance of Double-Layer Energetic Liner [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [29] 汪庆桃,王崇旭.炸药在有限泄压条件下燃烧压力发展模型[J/OL].国防科技大学学报,1-9[2025-11-04].
WANG Qing-tao, WANG Chong-xu. Combustion Pressure Development Model of Explosives Under Finite Pressure Relief Conditions [J/OL]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2025: 1-9.
- [30] 苏成海,李宗谕,郑元枫,等.活性药型罩聚能装药侵彻爆燃试验及耦合作用机理分析[J].兵工学报,2023,44(2):334-344.
SU Cheng-hai, LI Zong-yu, ZHENG Yuan-feng, et al. Penetration-deflagration experiment and coupling mechanism of reactive liner shaped charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(2): 334-344.
- [31] GU Y C, WANG J X, LI H, et al. Comparative study on the forming characteristics and penetration effects of shaped charge jet in water and air[J]. *J. Appl. Phys*, 2023, 133(11): 115901.

Research on the Lethality of 3D-Printed Polypropylene Jets for Micro UAVs

ZHANG Shu-tong¹, ZHAO Shuang¹, GUO Dong-yang¹, ZHAO Dong-zhi², CHENG Chun³

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 100159, China; 2. North Hua'an Industrial Group Co., Ltd., Qiqihar 161046, China; 3. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Polypropylene (PP) as a low-density polymer material, forms jets with considerable lethality. Micro UAVs with advantages such as low cost, strong adaptability, and rapid response, can significantly enhance combat effectiveness, requiring their warheads to balance lightweighting and destructive performance dual demands. This study explores the application potential of 3D-printed polypropylene as a shaped charge material in the damage field of micro UAV warheads. Micro thin-walled polypropylene shaped charges were prepared using Selective Laser Sintering (SLS) technology, and mechanical property tests were conducted to obtain the mechanical properties of 3D printed PP materials. The Johnson-Cook constitutive model parameters were fitted, and the results indicate that the material features excellent ductility and strain rate sensitivity, with dynamic yield strength significantly increasing as the strain rate rises. The polymer jet formation process was analyzed by combining PER theory and viscoplastic theory, revealing its head expansion characteristics. Static shaped charge penetration tests and numerical simulation were adopted to verify the damage lethality of 3D-printed PP jets at 3–5 CD (CD represents the caliber of the shaped charge). The experimental results show that the effect is optimal at 4 CD, with a penetration depth of 17.10 mm and significant hole expansion. The numerical simulation results indicate a penetration depth of 16.04 mm and an open hole diameter of 7.986 mm, which are highly consistent with the experimental data. The performance of four polymer jets and a copper jet was further analyzed across five distinct dimensions. The research demonstrates that the designed 3D-printed polypropylene shaped charge liner can satisfy the carriage requirements of miniature UAVs, providing a theoretical basis and novel insights for the design of high-lethality micro warhead destruction.

Key words: micro UAVs; selective laser sintering; polypropylene liner; miniature shaped charge; damage lethality

CLC number: TJ55; TJ410.3

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025271

Grant support: Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 12202285); Shenyang Science and Technology Talent Special Project (RC230925); Project of Liaoning Provincial Department of Education (LG212410144045)

(责编:高毅)