

文章编号:1006-9941(2026)01-0037-08

聚焦离散杆对结构毁伤增益试验与仿真

杨月,梁争峰,程淑杰

(西安近代化学研究所,陕西西安710065)

摘要: 为研究聚焦离散杆战斗部的毁伤效果,设计了受聚焦离散杆穿孔的典型圆筒结构靶标,通过Abaqus™有限元仿真及静力学试验,模拟聚焦离散杆战斗部对结构的毁伤效能,并进行了实验验证。结果表明:在拉伸载荷下,聚焦离散杆穿孔圆筒结构极限载荷为无穿孔圆筒的19.22%,传统破片穿孔圆筒为91.08%,聚焦离散杆穿孔圆筒结构极限载荷较传统破片穿孔圆筒减少71.86%。在压缩载荷下,圆筒结构出现屈曲与断裂耦合失效,孔周应力集中减弱,聚焦离散杆穿孔圆筒结构极限载荷为无穿孔圆筒的68.76%,传统破片穿孔圆筒为93.84%,聚焦离散杆穿孔圆筒结构极限载荷较破片穿孔靶标减少25.08%。这一差异充分体现了不同载荷模式下毁伤效应的区别。数值仿真结果与试验数据在载荷响应量级和破坏趋势上表现出良好的一致性,最大相对误差控制在15%以内,验证了研究方法的可靠性。

关键词: 聚焦离散杆;破片;结构毁伤增益;应力集中;战斗部

中图分类号: TJ55;TJ410.1

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025152

0 引言

传统聚焦破片战斗部依靠密集穿孔实施毁伤,虽覆盖面广,但单个破片质量轻、穿孔尺寸小,对承力结构的破坏范围有限,难以引发结构性整体失效。为克服上述局限,聚焦离散杆战斗部应运而生。该战斗部采用大质量离散杆条作为毁伤元,其核心毁伤机制在于通过高速撞击穿孔引发目标的应力集中与扩孔效应,从而对目标结构进行程度不同的切割破坏^[1]。传统聚焦破片战斗部虽能形成密集穿孔,但聚焦离散杆战斗部凭借其动能优势与应力集中效应,可在结构的穿孔区域引发连锁结构失效,进而导致结构整体断裂^[2],以达到毁伤的目的。

围绕聚焦离散杆战斗部的设计与毁伤特性,国内外学者已开展一系列研究。结构设计上,研究者通过

优化毁伤元形态与空间分布提升毁伤效率,例如采用多层、多段杆条结构,利用聚焦技术实现毁伤元的定向聚集,在预定范围内形成高密度毁伤区,增强对目标的侵彻与切割^[3]。技术原理和实现方法上,魏继锋等^[3]系统梳理了可控与非可控离散杆的设计特点;阮喜军等^[4]聚焦于战斗部完整性、运动控制和毁伤效应等关键问题,为后续优化研究奠定了理论基础。毁伤机理研究方面,学者们从现象观察逐步到定量描述。早期研究多通过特定构型战斗部对典型目标的毁伤效果进行验证,如桂毓林^[5]设计了旋转式离散杆战斗部,验证其对结构的侵彻效果;高淑萍等^[6]则结合破片与离散杆的混合战斗部,对目标的主要承力结构进行了等效毁伤模拟。此外,值得注意的是,潘庆军等^[7]通过建立离散杆战斗部对结构的毁伤评估模型,创新性地引入临界切口长度作为结构失效判据,进一步量化了离散杆对承力构件的破坏效能,从理论上验证了离散杆对飞行器承力构件的有效切割。然而,现有研究多集中于杆条飞散特性或单一靶标毁伤分析,对聚焦离散杆战斗部与传统聚焦破片战斗部在结构毁伤效能的定量对比仍缺乏系统研究。

聚焦离散杆战斗部与传统聚焦破片战斗部对目标的毁伤过程涉及复杂的高速动态响应,具有显著的随

收稿日期:2025-07-10;修回日期:2025-08-31

网络出版日期:2025-11-27

基金项目:国家自然科学基金(12402462)

作者简介:杨月(2001-),女,研究生,主要从事杀伤战斗部研究。

e-mail:1805720750@qq.com

通信联系人:梁争峰(1972-),男,研究员,主要从事爆炸力学及毁伤技术研究。e-mail:20421zf@sohu.com

引用本文:杨月,梁争峰,程淑杰.聚焦离散杆对结构毁伤增益试验与仿真[J].含能材料,2026,34(1):37-44.

YANG Yue, LIANG Zheng-feng, CHENG Shu-jie. Experimental and Simulation Study on Damage Enhancement of Focused Discrete Rods to Structures[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2026, 34(1):37-44.

机性和不可复现性。为量化研究其毁伤效果,本研究建立了简化模型,通过静力学加载方式实现可重复的静态过程模拟。以典型圆筒结构为研究对象,通过有限元软件 Abaqus™ 对比分析了聚焦离散杆战斗部与传统聚焦破片战斗部造成的损伤靶标剩余强度退化,最后通过静力学试验定量表征毁伤效能差异,为战斗部优化设计提供数据支撑。

1 仿真模型与研究方案

1.1 计算模型及方案选取

以典型圆筒结构为研究对象,穿孔会导致目标结构的截面面积减小,并在穿孔周围产生显著的应力集中现象,表现为孔边应力急剧增加,远高于无孔时的应力水平^[8]。研究表明^[9],聚焦离散杆战斗部在结构上形成的矩形穿孔其应力集中效应显著高于传统聚焦破片战斗部的圆形穿孔,且矩形穿孔有效降低结构的承载面积,加剧了结构局部塑性发展,导致结构极限载荷下降。因此,以结构极限载荷作为定量表征毁伤效能差异的指标,结构极限载荷越小,则战斗部对目标的毁伤能力越强。通过该指标的测量分析,可以客观比较不同类型战斗部对目标结构的毁伤能力差异,支撑战斗部优化设计和毁伤评估工作。

研究基于同质量、同装填比条件下的静爆试验结果,在圆筒结构中部设置 80 mm 宽的轴向毁伤带,模拟聚焦离散杆战斗部与传统聚焦破片战斗部的毁伤特征:传统聚焦破片战斗部,在毁伤带内随机分布 13 个 $\Phi 10$ mm 的圆形穿孔;聚焦离散杆战斗部,布置 7 个 $55\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的矩形穿孔。圆筒结构模型示意图如图 1a~c 所示,设计三种圆筒结构,分别为含聚焦离散杆战斗部穿孔的圆筒结构(简称聚焦离散杆穿孔圆筒)、含传统聚焦破片穿孔的圆筒结构(简称传统破片穿孔圆筒)以及无穿孔的圆筒结构(简称无穿孔圆筒)。研究以此预制穿孔的圆筒结构作为等效靶标,模拟聚焦离散杆战斗部对结构的局部侵彻效应,表征穿孔对圆筒结构局部强度的影响,量化分析毁伤增益。基于 Abaqus/Explicit,研究建立了 2A12-T4 铝合金圆筒结

构的显式动力学模型^[10],圆筒几何构型为:基准段直径 340 mm、高度 600 mm、等厚度 3 mm;在距两端 100 mm 范围内外贴 5 mm 厚加强环(总外厚 8 mm)作为夹持端。仿真模拟中,通过直接测量带孔圆筒结构固支端支反力,依据静力平衡原理^[11],将固支端最大支反力等效作为结构极限载荷,即可定量表征两种战斗部产生的穿孔对目标结构承载能力的削弱程度。



图1 圆筒结构模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cylindrical structure model

1.2 结构参数

在 Johnson-Cook 失效理论^[12]基础上,利用 2A12-T4 铝合金力学性能参数^[13](表 1),对拉伸和压缩 2 种基础载荷进行研究。受损靶板在拉伸、压缩等加载下的力学行为采用修正的 J-C 失效准则^[14]来描述,见式(2):

表 1 2A12-T4 铝合金模型参数^[13]

Table 1 Model parameters of 2A12-T4 aluminum alloy^[13]

parameter	E / GPa	μ	ρ / $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\dot{\epsilon}$ / s^{-1}	A / MPa	σ_u / MPa	ϵ_u	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
value	71.7	0.33	2770	1.11×10^{-3}	400	635	0.1255	0.116	0.211	-2.172	0.012	-0.0126	13.04

Note: E is elastic modulus, μ is poisson's ratio, ρ is density, $\dot{\epsilon}$ is reference strain rate, A is reference strain rate, σ_u is true stress, ϵ_u is true strain.

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \varepsilon_{eq}^*) [1 + D_5 (1 - \exp(D_6 T^*))] \quad (1)$$

式中, ε_f 为断裂发生时的等效塑性应变, 为无量纲量; σ^* 为应力三轴度, 为无量纲量; ε_{eq}^* 为量纲应变率, s^{-1} ; T^* 为量纲温度, K, 本研究模型均采用常温。

2 数值仿真

2.1 圆筒拉伸加载

研究采用一端固定、一端施加位移载荷的方式, 对聚焦离散杆穿孔圆筒、传统破片穿孔圆筒及无穿孔圆筒进行拉伸直至断裂, 得到应力分布云图如图 2 所示。由图 2a~b 可以看出, 聚焦离散杆穿孔圆筒、传统破片穿

孔圆筒在拉伸载荷作用下, 孔洞周围均出现明显的应力集中, 导致局部应力急剧升高, 圆筒结构迅速达到强度极限并产生裂纹, 最终裂纹扩展致使圆筒结构完全断裂。

在沿轴向拉伸加载下, 如图 2c 所示, 无穿孔圆筒沿轴向伸长变形, 直至横截面出现裂纹; 传统破片穿孔圆筒由于筒壁中心存在圆形穿孔, 导致该处横截面积减小, 穿孔边缘产生应力集中, 随着拉伸位移增大, 裂纹首先在圆孔周边萌生并扩展, 最终导致靶板发生断裂失效; 聚焦离散杆穿孔圆筒的筒壁中心存在杆条状穿孔, 其穿孔面积大于传统破片穿孔, 进一步削弱了横截面积, 且杆条状穿孔的尖角处应力集中更为显著, 因此在拉伸过程中, 裂纹优先从尖角处起始^[15], 并沿穿孔方向扩展, 直至圆筒结构完全断裂。

拉伸加载条件下, 圆筒结构的力学响应因穿孔类型的不同而不同, 其载荷和位移曲线如图 3 所示。当拉伸位移为 1.15 mm 时, 聚焦离散杆穿孔圆筒的载荷已达到最大为 174.63 kN, 而传统破片穿孔圆筒极限载荷为 779.88 kN。无穿孔圆筒极限载荷则为 882.95 kN。这一结果表明, 聚焦离散杆战斗部穿孔对圆筒结构的削弱作用更为显著。

由表 2 的结构极限载荷模拟结果可以看出, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒的结构极限载荷的 19.78%, 而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷为无损伤靶板的结构极限载荷的 88.33%。

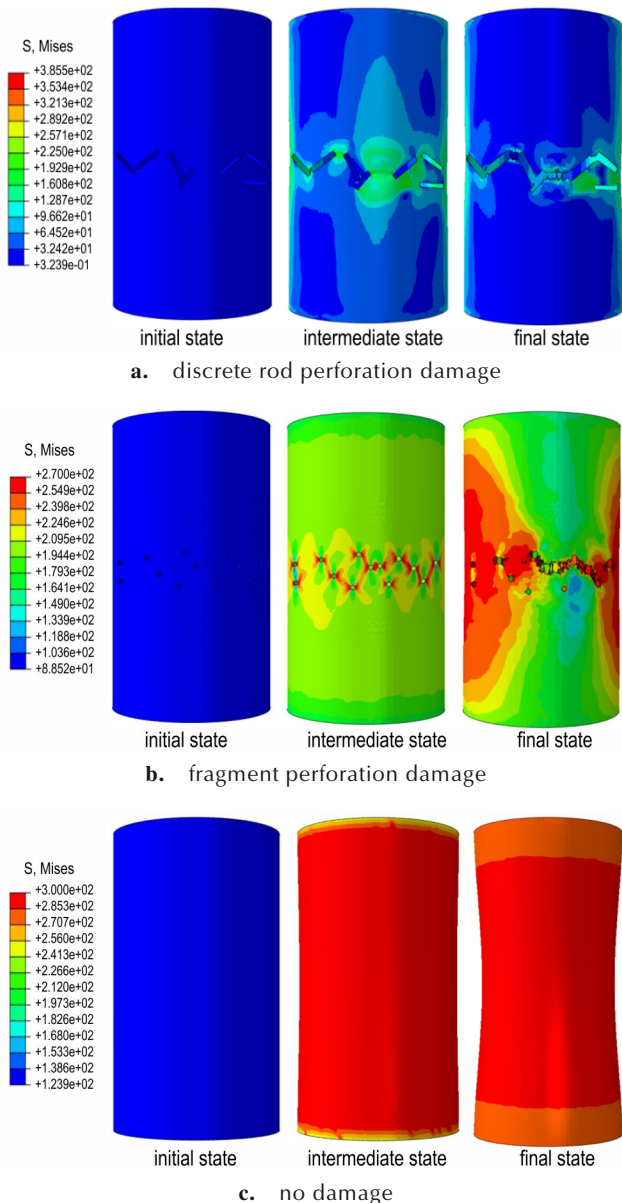


图 2 圆筒拉伸加载应力云图

Fig.2 Stress contour of the cylinder under tensile load

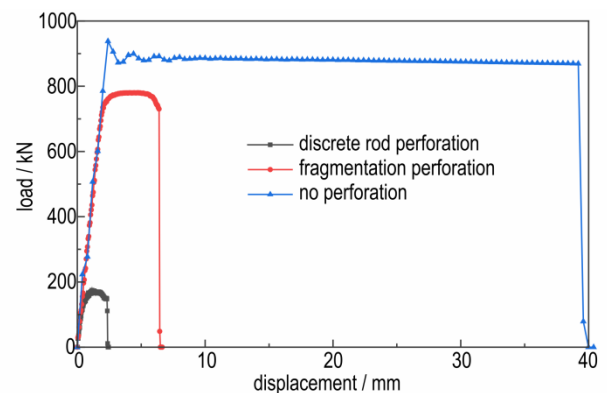


图 3 拉伸加载位移-载荷曲线

Fig.3 Displacement-counter force curve under tensile loading

表 2 拉伸工况数值仿真结果

Table 2 Numerical simulation results under tensile loading

equivalent target type	ultimate load / kN	maximum displacement / mm
focused discrete rod	174.63	1.15
focused fragment	779.88	4.70
no perforation	882.95	19.19

在拉伸加载时,相较于传统破片穿孔圆筒,聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了68.55%。可见,聚焦离散杆战斗部对圆筒结构的毁伤效能明显优于传统聚焦破片战斗部。这种显著差异主要源于聚焦离散杆穿孔战斗部对圆筒局部结构造成的集中破坏效应,使得圆筒结构在较小位移条件下就快速丧失了承载能力。

2.1 圆筒压缩加载

研究同样对三种圆筒结构进行轴向压缩直至失稳或破坏的模拟,结果应力分布云图如图4所示。由图4a~b可以看到,含穿孔损伤的圆筒结构在压缩载荷作用下,孔洞周围均出现明显的应力集中,导致局部应

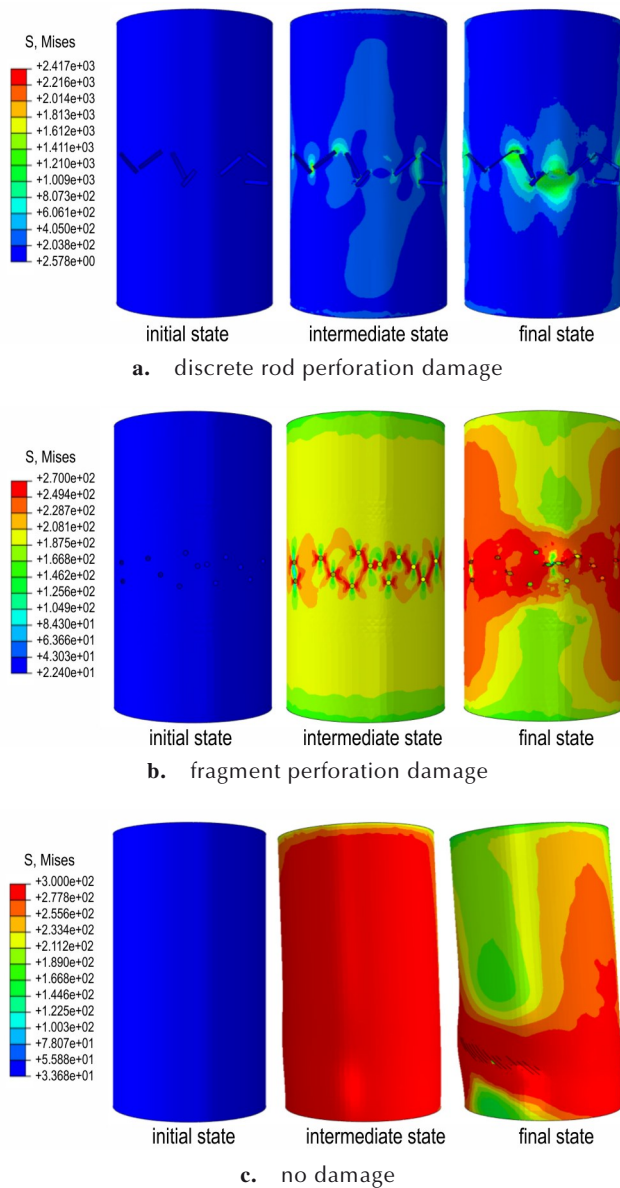


图4 压缩加载应力云图

Fig.4 Stress contour under compressed loading

力急剧升高,材料迅速发生塑性屈服或屈曲变形^[16];随着位移增大,损伤区域进一步扩展,最终引发结构整体失稳或断裂^[17]。

在轴向压缩载荷作用下,三类圆筒结构表现出不同的失效模式:如图4c所示,无穿孔圆筒首先发生弹性屈曲并产生可恢复变形,随着载荷增加逐渐发展为塑性屈曲,最终因渐进式失稳而丧失承载能力。传统破片穿孔圆筒由于截面削弱和孔边应力集中,在屈曲变形的同时于孔周出现局部断裂^[18],呈现整体屈曲与局部断裂耦合的失效特征。而聚焦离散杆穿孔圆筒因更大的截面削弱、更高的尖角应力集中系数以及非对称载荷传递,表现出更早的屈曲变形,裂纹优先从尖角处萌生并快速扩展,最终导致结构断裂失效。

在压缩加载条件下,圆筒结构的力学响应因穿孔类型不同而呈现显著差异。根据极限载荷和位移曲线图5,当拉伸位移为1.85 mm时,聚焦离散杆穿孔圆筒极限载荷已达到最大为519.51 kN,而传统破片穿孔圆筒极限载荷为759.30 kN,较前者高出四倍多。无穿孔圆筒极限载荷则为902.90 kN。这一结果表明,聚焦离散杆战斗部穿孔对圆筒结构的削弱作用更为显著。

根据表3所示的结构极限载荷分析数据,聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒极限载荷的57.54%,而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷

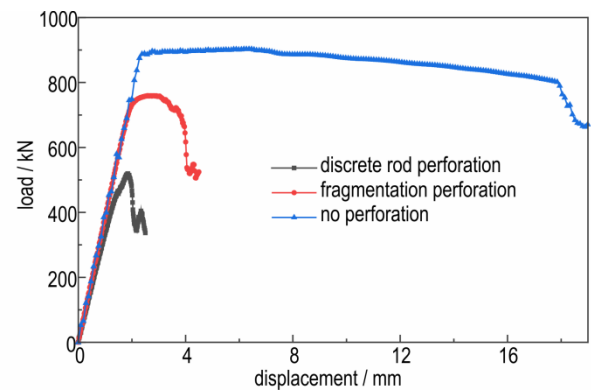


图5 压缩加载位移-支反力曲线

Fig.6 Displacement-counter force curve under compressed loading

表3 压缩工况数值仿真结果

Table 3 Numerical simulation results under compressed loading

equivalent target type	ultimate load / kN	maximum displacement / mm
focused discrete rod	519.51	1.85
focused fragment	759.30	2.79
no perforation	902.90	6.36

为无穿孔圆筒极限载荷的 84.09%。在压缩加载时,相较于传统破片穿孔圆筒,聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了 26.55%。

3 试验验证

3.1 试验方案

为了验证数值模拟计算的可靠性,本研究加工了与仿真模型相同的试件进行静力学试验,并与数值模拟计算的结果进行比较。

采用 2A12-T4 铝合金加工制造相同结构的试件,以及试验所需的连接工装夹具。试验选电液伺服万能试验机,将试验件与专用夹具装配固定,安装于万能试验机的两端,一端固支,另一端加载,依据 GB/T 228.1-2021 和 GB/T 7314-2017 分别对含不同穿孔损伤的圆筒结构进行拉伸和压缩试验,测试相应结构的极限载荷。试验机最大载荷为±2000kN,精度等级为 0.5,试件装配设计及试验机如图 6 所示。

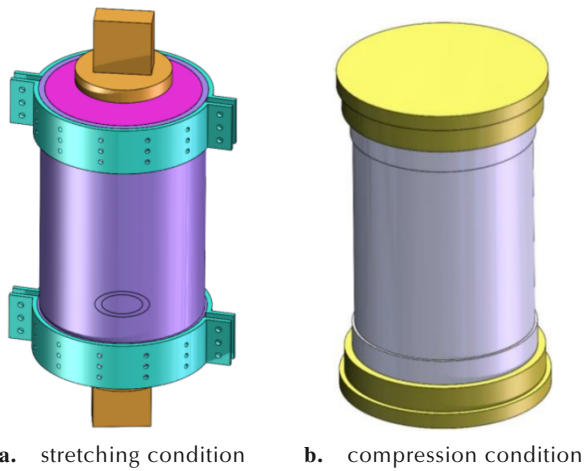


图 6 试件装配设计及试验机图
Fig.6 Schematic diagrams of the specimen assembly design and testing machine

3.2 圆筒结构静力学试验结果与分析

对含不同穿孔的圆筒结构分别施加轴向拉伸和压缩载荷,试件最终变形形貌如图 7 所示。与数值模拟的结果相似,如图 7a 所示,在拉伸载荷作用下,随着位移持续增加,试件发生均匀伸长变形,直至达到极限载荷后发生断裂失效;在压缩载荷作用下,如图 7b 所示,随着位移增加,试件首先出现明显的屈曲变形,继而发生塑性失稳,最终导致结构承载能力完全丧失^[19]。

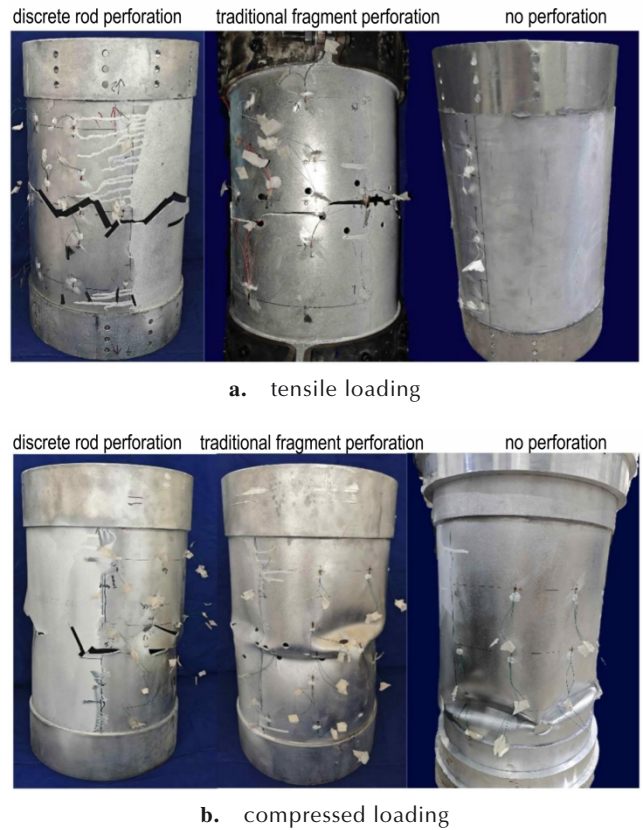


图 7 试验件加载后破坏情况

Fig.7 Failure conditions of the specimen after loading

受聚焦离散杆穿孔圆筒达到屈服极限的位移相较于传统破片穿孔圆筒在拉伸载荷下缩短了 14.28 mm。如图 8a 所示载荷-位移曲线,拉伸加载条件下,在位移达到 7.87 mm 时,聚焦离散杆穿孔圆筒载荷-位移曲线出现明显拐点,说明已达到结构屈服失效点,最大载荷为 155.79 kN;而位移达到 22.15 mm 左右时,受传统破片穿孔圆筒载荷-位移曲线才出现拐点,最大载荷为 738.43 kN。聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒极限载荷的 19.22%,而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷为无穿孔圆筒极限载荷的 91.08%,相较于传统破片穿孔圆筒,聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了 71.86%。

受聚焦离散杆穿孔圆筒达到屈服极限的位移相较于传统破片穿孔圆筒在压缩载荷下减少了 1.09 mm。同样如图 8b 所示, 在压缩加载条件下, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒极限载荷的 68.76%, 而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷为无穿孔圆筒极限载荷的 93.84%, 相较于传统破片穿孔圆筒, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了 25.08%。

极限载荷的试验结果与数值仿真结果进行对比分析如表 4, 可以发现两者在数值量级和发展趋势上均表现出良好的一致性。具体而言, 试验值与模拟值的最大相对误差为 12.09%, 这一偏差处于工程分析的合理范围内, 验证了数值模拟方法在计算极限载荷方

面的可靠性^[20]。仿真结果与试验数据之间的误差可能由多种因素共同导致, 首先, 仿真模型中的简化假设如材料本构关系、边界条件等与实际物理行为存在差异, 尤其在损伤条件下的非线性响应可能未被完全精确模拟。同时, 在试验中为确保夹持端的稳定性并防止局部失效, 试验件在两端夹持区域进行了结构加固, 而数值仿真中未对这一加固段进行建模, 进而导致支反力的计算结果与试验值产生偏差。其次, 试验测量误差(如传感器精度、环境干扰)和数值计算误差(如网格密度、收敛准则)也会影响结果一致性。此外, 聚焦离散杆战斗部穿孔损伤的较大误差表明局部应力集中的模拟可能存在不足, 而传统破片穿孔圆筒和无穿孔圆筒的较小误差则反映了模型在均匀载荷下的相对可靠性。

通过上述分析可以得出以下结论: 与传统聚焦破片战斗部相比, 聚焦离散杆战斗部对圆筒结构造成的穿孔损伤会产生更显著的应力集中效应。聚焦离散杆战斗部穿孔特有的尖锐边缘几何特征导致其应力集中系数更高, 这不仅促进了裂纹的产生和快速扩展, 还显著降低了结构的承载能力。数值计算结果与试验数据的误差控制在 15% 以内, 验证了分析的可靠性。在拉伸载荷作用下, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒极限载荷的 19.22%, 而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷为无穿孔圆筒结构极限载荷的 91.08%, 相较于传统破片穿孔圆筒, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了 71.86%。在压缩载荷条件下, 圆筒结构出现屈曲与局部断裂耦合的失效特征, 孔周应力集中效应较拉伸工况有所减弱, 这使得聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒极限载荷的 68.76%, 而传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷为无穿孔圆筒极限载荷的 93.84%, 相较于传统破片穿孔圆筒, 聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷减少了 25.08%。这一对比结果清晰地展现了不同载荷条件下两类战斗部毁伤效果的差异性。

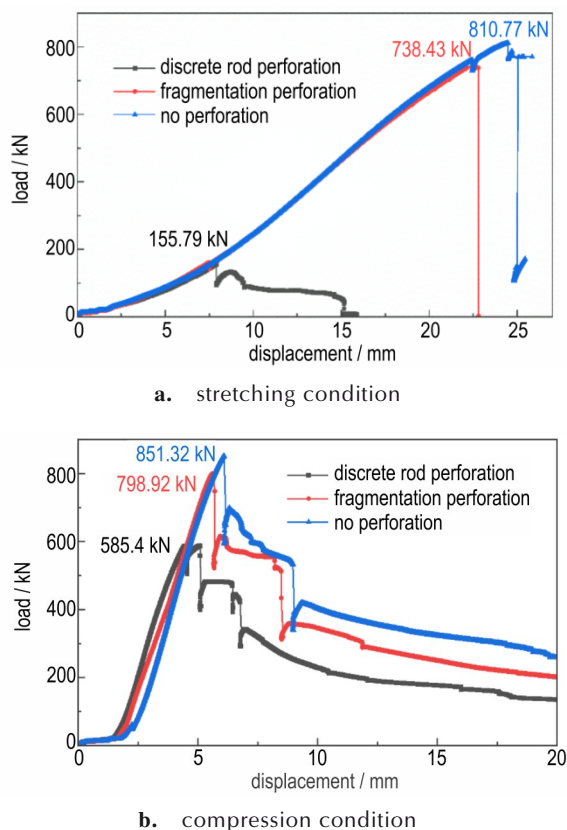


图 8 载荷-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curve

表 4 极限载荷仿真结果与试验对比

Table 4 Comparison of the ultimate load between simulation and experiments

loading type	equivalent target type	ultimate load test value / kN	ultimate load simulation value / kN	error / %
stretching	focused discrete rod	155.79	174.63	12.09
	focused fragment	738.43	779.88	5.61
	no perforation	810.77	882.95	8.90
compression	focused discrete rod	585.40	519.51	11.26
	focused fragment	798.92	759.30	4.96
	no perforation	851.32	902.90	6.06

4 结论

1) 聚焦离散杆战斗部穿孔因边缘更尖锐,其应力集中系数显著高于传统聚焦破片战斗部穿孔,数值仿真结果与试验数据在载荷响应量级和破坏趋势上表现出良好的一致性,最大相对误差控制在15%以内,验证了研究方法的可靠性;

2) 在拉伸载荷下,聚焦离散杆穿孔圆筒的结构极限载荷仅为无穿孔圆筒的19.22%,而传统破片穿孔圆筒为91.08%,相比之下,聚焦离散杆穿孔圆筒比传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷减少了71.86%。在压缩载荷下,圆筒结构出现屈曲与断裂耦合失效,孔周应力集中减弱,此时聚焦离散杆穿孔圆筒结构极限载荷为无穿孔圆筒的68.76%,而传统破片穿孔圆筒为93.84%,聚焦离散杆穿孔圆筒比传统破片穿孔圆筒的结构极限载荷减少了25.08%。该差异充分体现了不同载荷模式下毁伤效应的区别;

3) 聚焦离散杆战斗部因穿孔排布和侵彻能力可形成协同损伤,易致结构整体失效;传统聚焦破片战斗部则因随机穿孔难以协同。需指明,实际毁伤过程是复杂的高速动态响应,本文以静力学等效法研究了拉/压毁伤效应。后续需开展多轴动态冲击试验,考察复合载荷与应变率耦合作用,以验证结论的工程适用性,并全面评估战斗部毁伤效能。

参考文献:

- [1] 宋浦,余建斌,梁安定,等.杆式战斗部对柱壳装药的毁伤实验研究[J].含能材料,2004,12(4):249-251.
SONG Pu, YU Jian-bin, LIANG An-ding, et al. Experimental investigation on damage to charges covered shell by rod warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(4): 249-251.
- [2] 侯一方.组合破片式战斗部对反舰导弹毁伤效应研究[D].太原:中北大学,2023.
HOU Yi-fang. Combined fragmentation battle arm on anti-ship missile destruction effect study[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [3] 魏继锋,魏锦,王树山.离散杆战斗部技术研究[J].战术导弹技术,2015(02):101-105.
WEI Ji-feng, WEI Jin, WANG Shu-shan. Research on technology of discrete rod warhead[J]. *Tactical Missile Technology*, 2015(02): 101-105.
- [4] 阮喜军,梁争峰,程淑杰.离散杆战斗部相关技术研究进展[J].四川兵工学报,2014,35(10):52-55+59.
RUAN Xi-jun, LIANG Zheng-feng, CHENG Shu-jie. Development of the related technologies research of the discrete rod warhead[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(10): 52-55+59.
- [5] 桂毓林,黄文斌,庞勇,等.旋转式离散杆战斗部的杆条旋转角速度试验测量[C]//中国力学学会爆炸力学实验技术专业组.第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集,2006:291-295.
GUI Yu-lin, HUANG Wen-bin, PANG Yong, et al. Experimental measurement of rod rotation angular velocity in rotary discrete rod warhead[C]//Experimental Technology Professional Group of Explosion Mechanics. Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2006:291-295.
- [6] 高淑萍.破片与离散杆组合战斗部对巡航导弹毁伤效应的数值研究[D].太原:中北大学,2014.
GAO Shu-ping. Research on the damage performance of combination warhead of fragments and discrete rod to cruise missiles[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [7] 潘庆军,黄早文,杨行超.离散杆式战斗部对飞机的毁伤计算与仿真[J].兵工自动化,2006(08):38-39.
PAN Qing-jun, HUANG Zao-wen, YANG Xing-chao. Damage calculation and simulation of the discrete rod warhead to an aircraft[J]. *Advance Manufacture Technique*, 2006(08): 38-39.
- [8] YOSRI A, ZAYED A, SAAD-ELDEEN S, et al. Influence of stress concentration on fatigue life of corroded specimens under uniaxial cyclic loading[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(6): 5205-5216.
- [9] 王健磊,程斌,赵金城.钢桥塔内部通行孔选型及有限元分析[J].钢结构,2012,27(2):24-29.
WANG Jian-lei, CHENG Bin, ZHAO Jin-cheng. Access hole shape selection and finite element analysis of perforated plates in steel pylons[J]. *Steel Construction*, 2012, 27(2): 24-29.
- [10] 单燕,杨庆生,尚军军.基于ABAQUS的薄壁圆筒有限元分析[C]//北京力学会.北京力学会第二十七届学术年会论文集.北京工业大学材料与制造学部,2021:759-761.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.001793.
- [11] 邓国红,郭长文,丁军,等.理论力学[M].重庆:重庆大学出版社,201308:365.
DENG Guo-hong, GUO Chang-wen, DING Jun, et al. Theoretical mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 201308:365.
- [12] 杨玉林,赵国志,王戈冰.装甲目标毁伤评估的等效靶方法[J].火力与指挥控制,2003(06):81-84.
YANG Yu-lin, ZHAO Guo-zhi, WANG Ge-bing. Surrogates for armor targets vulnerability assessment [J]. *Fire Control & Command Control*, 2003(06):81-84.
- [13] OHNSON 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: 31-48.
- [14] 张伟,魏刚,肖新科.2A12铝合金本构关系和失效模型[J].兵工学报,2013,34(3):276-282.
ZHANG Wei, WEI Gang, XIAO Xin-ke. Constitutive relation and fracture criterion of 2A12 aluminum alloy[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(3): 276-282.
- [15] MURAKAMI Y. Theory of elasticity and stress concentration [M]. Oxford: John Wiley & Sons, 2016.
- [16] SAAD-ELDEEN S, GARBATOV Y, SOARES C G. Buckling collapse tests of deteriorated steel plates with multiple circular openings[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 523-530.
- [17] SAAD-ELDEEN S, GARBATOV Y, SOARES C G. Experimental failure assessment of high tensile stiffened plates with openings[J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110121.

- [18] ZHANG L, WEI X. Crack growth life calculation approach of surface cracked landing gear strut under eccentric compression load by bulging effect[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 173: 107652.
- [19] LIU B, GAO L, AO L, et al. Experimental and numerical analysis of ultimate compressive strength of stiffened panel with openings[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108453.
- [20] 杨梦粤, 杨胜春. GLARE层压板力学性能试验研究[J]. *材料科学*, 2020, 10(10): 824-832.
- YANG Meng-yue, YANG Sheng-chun. Experimental study on mechanical properties of GLARE composite laminates[J]. *Material Sciences*, 2020, 10(10): 824-832.

Experimental and Simulation Study on Damage Enhancement of Focused Discrete Rods to Structures

YANG Yue, LIANG Zheng-feng, CHENG Shu-jie

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To investigate the damage effects of focused discrete rod warheads, a typical cylindrical target structure perforated by the focused discrete rod was designed. Through AbaqusTM finite element simulation and statics experimental tests, the damage effectiveness of the focused discrete rod warhead on the structure was simulated and experimentally validated. The results indicate that under tensile loading, the ultimate load of the cylindrical structure perforated by the focused discrete rod is 19.22% of that of the unperforated cylinder, while the traditional fragment-perforated cylinder reaches 91.08%. Consequently, the ultimate load of the focused discrete rod-perforated cylinder is reduced by 71.86% compared to the traditional fragment-perforated cylinder. Under compressive load conditions, the cylindrical structure shows coupled buckling and fracture failure, with reduced stress concentration around the perforation. The ultimate load of the focused discrete rod-perforated cylinder is 68.76% of that of the unperforated cylinder, whereas the traditional fragment-perforated target cylinder reaches 93.84%. The structural ultimate load of the focused discrete rod-perforated cylinder is decreased by 25.08% compared to the fragment-perforated target, highlighting the differences in damage effects under various loading modes. The numerical simulation results and experimental data show good consistency in load response magnitude and failure trends, with the maximum relative error controlled within 15%, validating the reliability of the research method.

Key words: focused discrete rod; fragmentation; structural damage enhancement; stress concentration; warhead

CLC number: TJ55; TJ410.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025152

Grant support: National Natural Science Foundation of China(No.12402462)

(责编: 姜梅)