DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0811-08

展开式战斗部能量吸收铰链结构*

赵宇哲,宁建国,许香照,马天宝
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 基于展开式战斗部动力学展开原理及理论模型,设计一种具有能量吸收特性的限位铰链,并对不同辅助装药量下展开式战斗部的展开过程进行数值模拟,对比分析了普通铰链和能量吸收铰链的展开过程,重点研究了限位角度时的受力与能量吸收情况,结果表明能量吸收铰链可以更好地降低碰撞力及提高吸能效果。对两种铰链装配的展开式战斗部结构进行了静爆实验,结果显示普通铰链发生不同程度的破坏,而能量吸收铰链结构完整,证明能量吸收铰链达到限位角度时能有效保证战斗部及铰链的完整性,进而验证了能量吸收铰链设计的合理性以及数值模拟的可靠性。

关键词: 固体力学;吸能缓冲特性;非线性计算;限位铰链;展开式战斗部;静爆实验
中图分类号: O342;TG410.3 **国标学科代码**: 1301565 **文献标志码**: A

随着现代科技的发展,可变形战斗部演变为一种新型高效毁伤战斗部[1]。展开式战斗部则是其中破片利用率较高的一种,它通过机械展开动作使战斗部结构发生变形[2],从而实现对目标的定向杀伤。20 世纪 70 年代出现这个概念[3],而典型的展开式战斗部结构[4]如图 1 所示。4 个主装药部分由具有角度限制功能的铰链固连,预置破片排列在各主装药部分表面上。依据动力学展开原理[5],当导弹确定攻击目标方位后,远离目标一侧铰链的小聚能装药起爆,切开所在起爆位置的铰链,同时起爆辅助装药推动主装药部分以剩下 3 对铰链为轴展开,从而使破片全部指向目标方向[6],进而大幅提高破片利用率。

展开式战斗部的关键技术为,在有效的时间内使破片完全朝向目标。随着空中目标速度不断提高,要求战斗部在极短的时间内完成展开动作,而不同的展开角度将最终影响目标方向的破片密度,分析得知当展开角度为 90°时破片利用率最高[7]。限位铰链作为其中关键的组成元件,不仅需要保证 4 个主装药部分在展开过程中绕铰链轴转动的同向同步性,更重要的是使它具备角度限制功能来控制主装药展开角度为 90°,为主装药起爆预留充足的起爆时间。初期实验测试表明,普通铰链虽然可以保证战斗部结构在展开过程中的完整性,但在限位时发生严重的破坏(见图 2),这样将导致主装药起爆预留时间短,增加主装药的起爆难度。

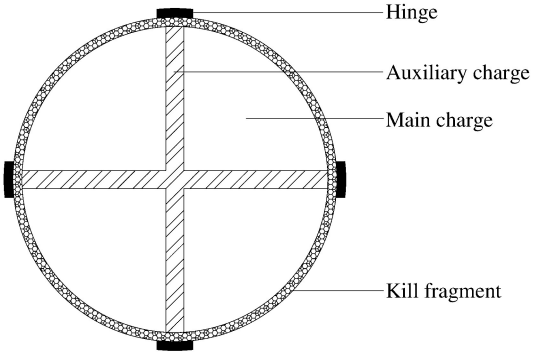

图 1 展开式战斗部
Fig. 1 Evolvable warhead



图 2 损坏铰链结构
Fig. 2 Failure hinge structure

* **收稿日期**: 2015-04-27; **修回日期**: 2015-07-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(11390363,11372046)
第一作者: 赵宇哲(1986—),男,博士研究生; **通信作者**: 马天宝,madabal@bit.edu.cn。

能量吸收铰链对展开式战斗部的重要作用逐渐显现。目前，关于能量吸收方面的研究主要集中在材料与结构两方面：材料包括薄壁的管材、泡沫铝、复合材料、聚氨酯泡沫等；结构主要是根据材料在冲击载荷作用下的塑性变形及吸能的特点进行结构上的改进，包括薄壁吸能结构、波纹板吸能结构等[8]。姚松等[9]、高广军等[10]对圆管、方管、多边形管、锥管等管材进行了冲击吸能的数值模拟分析，王斌等[11]对泡沫铝的压缩性能及其能量吸收进行了研究。结果表明，在轴向或者径向的正面冲击和碰撞条件下，所研究的材料和结构均能较好地降低碰撞力峰值及吸收冲击动能。

本文中，结合已有能量吸收理论，设计一种基于展开式战斗部的能量吸收铰链；建立普通铰链和能量吸收铰链分别装配战斗部的三维模型，通过数值模拟对比分析不同爆炸载荷加载下的两种铰链受力情况及能量吸收效果；最后，对装配有两种铰链的展开式战斗部实体结构进行不同爆炸载荷加载下的静爆实验研究，通过对比不同辅助装药量下两种铰链的破坏情况，验证能量吸收铰链结构设计的合理性与数值模拟的可靠性。

1 结构模型

1.1 战斗部模型

战斗部模型的基本组成分别为主装药结构、金属配重以及限位铰链。其中，破片以等质量的金属配重替代；限位铰链分为凹凸两部分，分别与相邻的主装药结构固联，利用铰链轴将两部分串联使 4 个主装药结构依次连接。由于本文中并不研究铰链切割问题，因此只装配 3 组铰链，无铰链一侧为自由端，具体示意图如图 3 所示。其动力学展开过程可以描述为：(1)辅助装药起爆驱动 4 个主装药结构围绕相邻各组限位铰链做定轴转动；(2)主装药结构 1、4 加速展开使它固连的两组限位铰链到达最佳展开角度；(3)主装药结构 1、4 构带动主装药结构 2、3 加速展开，固连于主装药结构 2、3 的一组铰链的达到最佳展开角度。

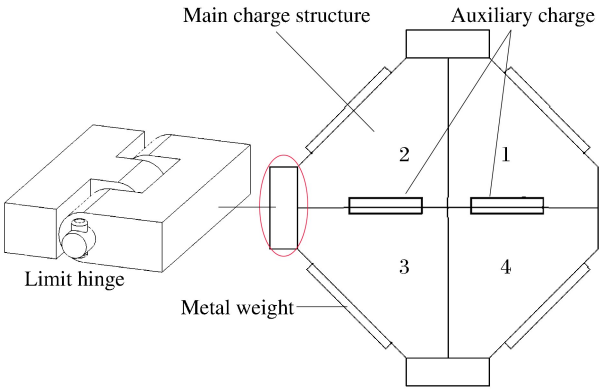

图 3 战斗部及限位铰链模型

Fig. 3 Warhead and limit hinge model

1.2 铰链结构吸能设计

图 4 为普通铰链限位时刻状态，图中铰链凹凸两部分以内嵌形式通过铰链轴串联而组成，当到达限位角度时利用铰链两部分之间的碰撞进行限位控制。此时，可以近似地认为铰链碰撞位置为刚性，主要的变形部分集中在铰链与轴连接处，即图中 A 区域。碰撞位置的近似刚性导致 A 区域受到较高应变率，根据 Jaumann 应力率模型：

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}}{\mathrm{d}t}=2G\left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}-\frac{1}{3}\mathrm{tr}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\,\boldsymbol{I}\right)-\boldsymbol{\sigma}\cdot\dot{\boldsymbol{R}}+\dot{\boldsymbol{R}}\cdot\boldsymbol{\sigma} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为应变率，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}=\frac{1}{2}(\boldsymbol{v}\nabla+\nabla\boldsymbol{v})$，$\dot{\boldsymbol{R}}$ 为旋转率，$\dot{\boldsymbol{R}}=\frac{1}{2}(\boldsymbol{v}\nabla-\nabla\boldsymbol{v})$。碰撞位置的应力率很高导致应力快速升高达到屈服应力，而此时依然较高的应变率和无法有效提高的应力，使 A 区域结构在

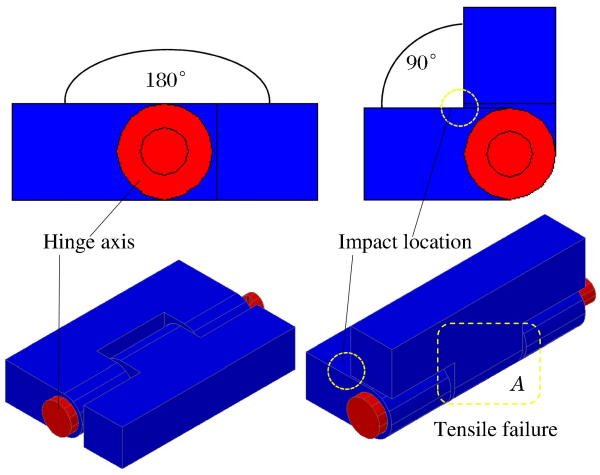

图 4 普通铰链限位

Fig. 4 Ordinary hinge limit

极短的时间内达到极限应力和失效应变，从而发生断裂；发生碰撞时，主装药结构在展开过程中具有较高的动能，能量无法有效释放也是造成铰链破坏的重要原因，所以对普通铰链进行吸能设计是保护铰链完整性的重要手段。对于一般的能量吸收装置设计，需要考虑以下几点[12-13]：(1)碰撞时动能应尽可能不可逆地转换成变形能，即以塑性变形来存储这种能量；(2)碰撞条件下，能量吸收装置的变形模式应当稳定；(3)吸收能量的过程中，应控制碰撞力和减速度；(4)为了吸收更多的总动能，应能提供足够长的变形行程，且在变形后不占据过大的空间或造成次生破坏。限位铰链碰撞变形的过程中，微小时间内的能量变化可以表示为塑性功，即：

$$\Delta E=\sigma_{\alpha\beta}(t+\Delta t)\varepsilon_{\alpha\beta}(t+\Delta t)-\sigma_{\alpha\beta}(t)\varepsilon_{\alpha\beta}(t) \tag{2}$$

式中：ΔE 为微小时间 Δt 中吸收的能量，$\sigma_{\alpha\beta}(t+\Delta t)$ 为微小时间 Δt 之后的应力状态，$\varepsilon_{\alpha\beta}(t+\Delta t)$ 为 Δt 之后的应变状态，$\sigma_{\alpha\beta}(t)$ 为 t 时刻的应力状态，$\varepsilon_{\alpha\beta}(t)$ 为 t 时刻的应变状态。在每个时间尺度无穷小的情况下，忽略能量增量表达式中出现的二阶增量，可以将式(2)表示为：

$$\mathrm{d}E=\mathrm{d}\sigma_{\alpha\beta}(t)\varepsilon_{\alpha\beta}(t)+\sigma_{\alpha\beta}(t)\,\mathrm{d}\varepsilon_{\alpha\beta}(t) \tag{3}$$

在体积内积分，可以得到总的能量吸收率：

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\int_{\Omega}(\dot{\sigma}_{\alpha\beta}\varepsilon_{\alpha\beta}+\sigma_{\alpha\beta}\dot{\varepsilon}_{\alpha\beta})\,\mathrm{d}V \tag{4}$$

提高总吸能率即提高积分号中的部分，普通铰链在完全展开限位时刻，碰撞部分的变形很小，导致能量吸收很少。根据悬臂梁结构在冲击载荷作用下易弯曲变形的特性以及预变形设计，结合铰链的结构特点，设计吸能凸台，使铰链预先接触，在它到达限位角度时，相对薄弱的凸台已经有应力和塑性应变，能量吸收率将会远高于普通铰链，从而有效降低应变率，保护了 A 区域。

通过对先前战斗部展开实验数据分析，针对战斗部限位时铰链碰撞过程进行等效数值模拟计算，综合计算结果见表 1，确定能量吸收铰链相关参数。图 5 中，仰角 $\alpha=10°$，预变形内弧面为由窄到宽的梯形设计，以减小碰撞初期碰撞力载荷，使能量吸收过程相对平稳；有效压缩行程随控制碰撞角度变化，当碰撞角度为 102.5°时，即有压缩角度为 7.5°时，有效变形行程 $s=4$ mm。凸台作为主要的吸能部件，当铰链到达 90°时凸台内部已有应力和塑性应变，能量吸收率会大幅提高。

表 1　凸台吸能效率

Table 1　Boss energy absorption efficiency

α/(°)	η/%		
	$s=2$ mm	$s=3$ mm	$s=4$ mm
5	18.6	29.4	36.8
10	21.8	33.2	41.2

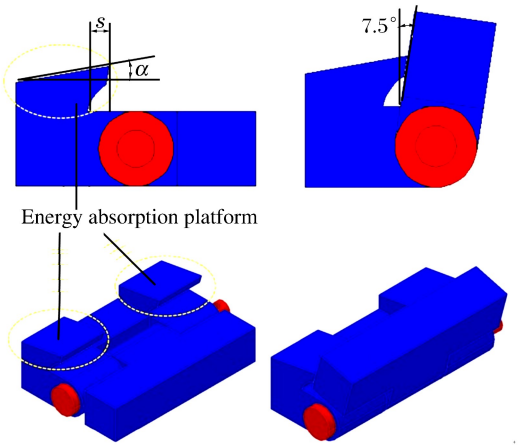

图 5　能量吸收铰链限位

Fig. 5　Energy absorption hinge limit

2　数值模拟

2.1　结构及材料模型

图 6 为分别装配两种铰链结构的展开式战斗部三维模型。利用非线性计算软件进行计算，金属部分均采用拉格朗日单元，炸药和空气采用拉格朗日-欧拉多物质单元描述，空气域边界为无反射边界[7]。

炸药模型采用高爆燃烧模型和 JWL 状态方程描述，参数分别为：$\rho=1.85$ g/cm^3，$p_{CJ}=29$ GPa，$D=0.750$ km/s，$A=522$ GPa，$B=7$ GPa，$R_1=4.4$，$R_2=0.87$，$\omega=0.32$。空气采用空模型和线性多项式。壳体与铰链均采用 LY12 铝合金，分别采用刚性和动塑性模型描述，具体参数分别为：$\rho=2.71$ g/cm^3，$E=73$ GPa，$\sigma=325$ MPa，$\gamma=0.34$。

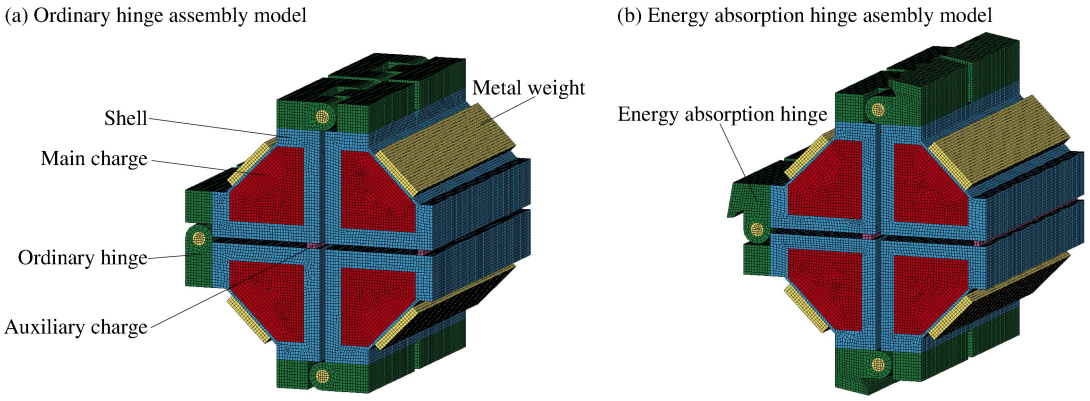

图 6 铰链装配三维模型

Fig. 6 3D model of hinge assembly

2.2 结果与分析

图 7 为两种铰链装配下战斗部最终展开时刻应力分布云图，普通铰链在碰撞位置接触部分应力最高，而能量吸收铰链高应力区域均匀分布于凸台中，使受力更加分散，有效保护铰链。

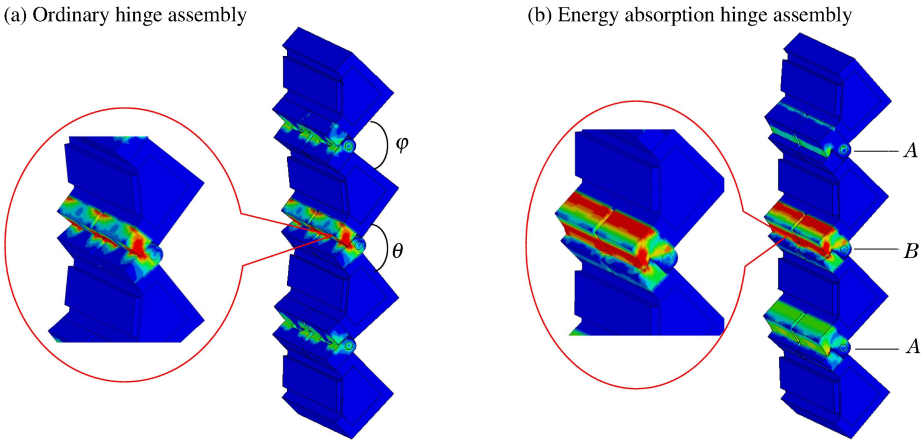

图 7 应力分布云图

Fig. 7 Stress distribution

能否降低碰撞力是吸能装置重要的衡量指标，不同辅助药量下 A、B 两组铰链碰撞力峰值见表 2。吸能铰链的碰撞力峰值明显比普通铰链的低，并随着装药量增加降低幅度增大。B 组铰链碰撞力峰值明显高于 A 组铰链，所以 B 组铰链更容易发生破坏。相同装药量所产生的化学能相同，忽略爆轰产物及摩擦消耗的能量，大部分能量转化为主装药部分展开的动能，铰链在限位碰撞过程中将部分动能不可逆地转化为塑性变形能即铰链所吸收的能量，变形越大则能量吸收越多，从而满足限位时结构完整性的要求。各组铰链在不同辅助药量下吸能见表 2，由于数值模拟中对铰链轴无相对位移约束，无法反映碰撞过程中材料达到屈服极限发生断裂情况，所以数据为铰链完整情况下提取。可以看出，能量吸收铰链明显提升了吸能效果，并且随着装药量的增加能量吸收率提高更明显。

表 2 不同药量下铰链的碰撞力峰值和能量吸收

Table 2 Impact peak value and energy absorption of hinge with different charges

m/g	P_{oA}/kN	P_{eA}/kN	P_{oB}/kN	P_{eB}/kN	E_{oA}/J	E_{eA}/J	E_{oB}/J	E_{eB}/J
15	175	129	226	156	11 355	12 508	15 688	16 076
20	209	169	320	182	14 466	19 964	34 432	40 469
26	268	176	401	200	21 962	29 907	50 381	58 509

图 8 为不同辅助药量下各主装药部分之间展开角度，随着装药量的增加，主装药达到限位角度的时间大幅提前，θ 最终展开角度增幅较明显。普通铰链装配结构两个角度都超过了 90°，最大甚至达到 110°，实际工况下 *B* 组铰链将发生严重破坏。能量吸收铰链装配结构的最终展开角度基本维持在 90°左右，满足最佳展开角度限位要求，理论上可以保证铰链的完整性，为主装药提供更好的起爆条件，以完成对目标的高效毁伤。

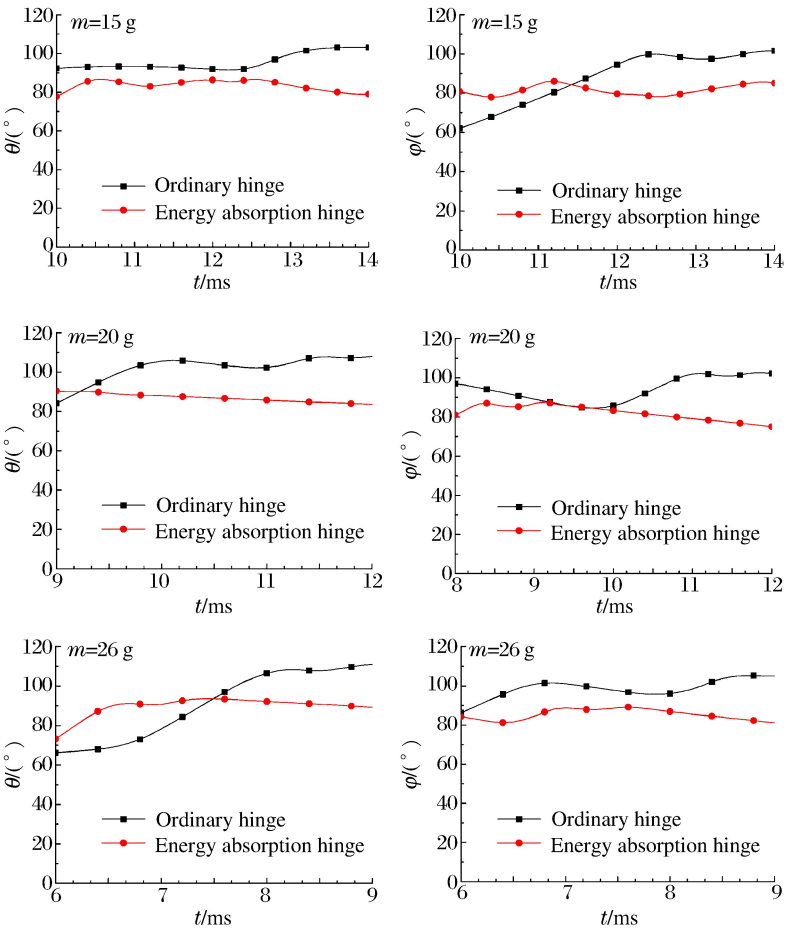

图 8 不同装药量下主装药结构展开角度

Fig. 8 Evolving angles of main charge structure with different auxiliary charges

3 静爆实验

3.1 实　验

展开式战斗部以及两种限位铰链结构均按照三维模型 1∶1 比例尺寸加工装配，选用黑索金为辅助装药，8 号雷管引爆，通过高速摄影设备记录主装药部分的展开时间以及展开过程，图 9 为展开式战斗部及普通铰链装配示意图。不同药量下两种铰链装配的战斗部静爆展开实验的具体数据，见表 3。

表 3 实验数据

Table 3 Experiment data

实验	铰链结构	m/g	t_s/ms	t_e/ms	铰链状态
1	普通	15	12.0	12.8	部分断裂
2	普通	20	9.2	9.9	完全断裂
3	能量吸收	15	12.3	13.0	完整
4	能量吸收	20	9.0	9.5	完整

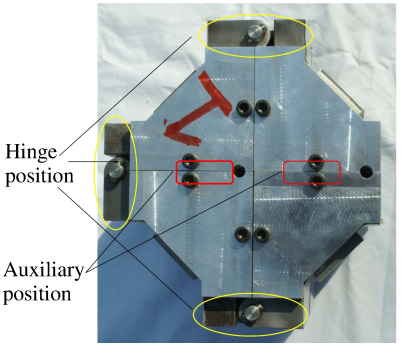

图 9 实验结构

Fig. 9 Experiment structure

考虑战斗部结构自身重力因素以及铰链在展开过程中的摩擦力因素影响，表中实验展开时间比数值模拟的计算展开时间长。随着辅助药量的增加，这些因素的影响基本可以忽略，同时依据引战配合计算，展开时间基本需在 10 ms 以内[14]。普通铰链在限位过程中均发生了严重的破坏，而能量吸收铰链则有效保证了铰链结构的完整性，使战斗部到达最佳展开姿态时，破片在一定范围内稳定朝向目标，提高主装药起爆后的破片利用率，达到高效毁伤效果。

3.2 结果对比

图 10 为装药量 15g 时两种铰链装配战斗部结构回收后的铰链部分状态对比。*B* 组普通铰链出现了明显的断裂情形，模拟结果显示出展开角度过大，但整体结构相对保存完整；而能量吸收铰链则没有破坏，模拟结果也显示战斗部结构在这个药量下还有展开余量，说明还可以继续增加载荷强度。

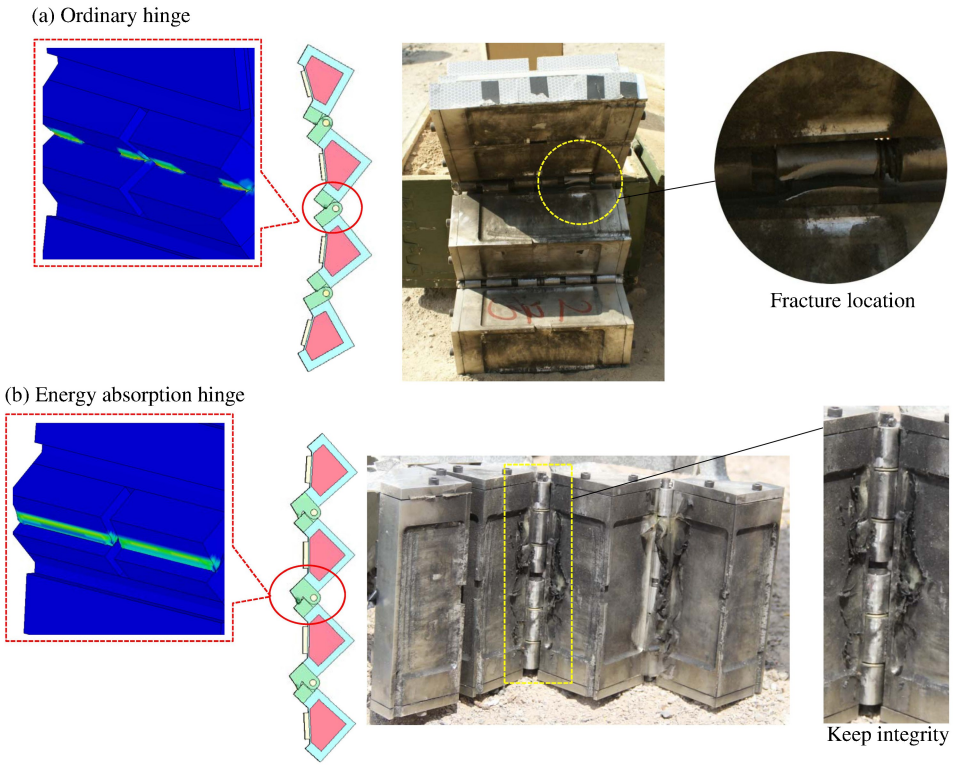

图 10 15 g 装药量下铰链状态的数值模拟与实验结果对比

Fig. 10 Simulation and experimental results of status of hinges with 15 g charge

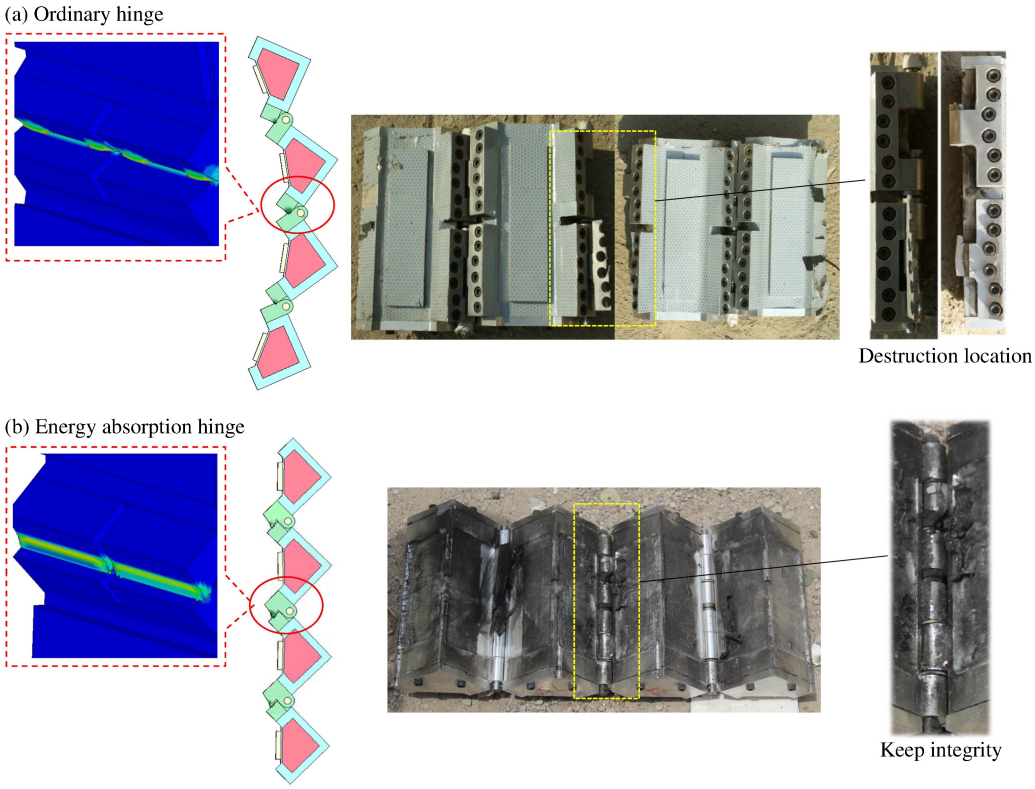

图 11 20 g 装药量下铰链状态的数值模拟与实验结果对比

Fig. 11 Simulation and experimental results of status of hinges with 20 g charge

图 11 为装药量 20 g 时两种铰链装配战斗部结构回收后的铰链部分状态对比。普通铰链彻底断裂，模拟结果显示展开角度完全超出了限位 90°，实验结果与模拟结果发生破坏的位置相同。同时，模拟结果和实验结果均可以反映：普通铰链在发生限位时主装药部分将依靠惯性继续展开，并使 B 组铰链轴最终断裂；而能量吸收铰链则保证了结构的完整性，数值模拟结果也表明最终展开角度为 90°，塑性变形集中在凸台处。

综合实验结果与数值模拟结果，能量吸收铰链不仅可以满足展开式战斗部主装药部分展开时间的要求，而且能保证战斗部在最佳姿态时铰链结构及战斗部整体结构的完整性，在一定时间范围内确保主装药部分在最佳展开角度的稳定性，降低后续主装药的起爆难度。这为进一步优化引战配合设计提供参考。

4　结　论

对展开式战斗部中铰链结构进行限位动作时出现的断裂现象，从受力与能量吸收两方面进行分析，对普通铰链进行了吸能优化，设计了一种能量吸收铰链结构。通过数值模拟分析以及战斗部静爆实验，研究了不同辅助装药量下两种铰链的限位效果与结构完整性，得出以下结论。

(1)能量吸收铰链设计合理可靠，保证了展开式战斗部在达到限位角度时结构的完整性，再优化参数可以进一步提高展开速度，最大限度满足引战配合对于展开时间的需求。

(2)展开式战斗部及铰链结构的三维模型计算方法清晰反映了，能量吸收铰链限位过程中塑性变形集中在吸能凸台部分，A、B 两组铰链能量吸收率分别提高了 36%和 17%，碰撞力峰值分别降低了 34%和 50%，充分体现了能量吸收铰链降低碰撞力峰值与提高能量吸收的特性。

(3)静爆实验证明了，展开式战斗部在不同辅助装药量下到达限位角度时，能量吸收铰链在提高展开速度的前提下有效保护了战斗部结构限位时的完整性，验证了数值模拟计算方法的可靠性与铰链设计方案的合理性。

参考文献：

[1] 龚柏林，卢芳云，李翔宇. 可变形战斗部弹体变形型面的理论模型[J]. 爆炸与冲击，2010，30(1)：65-69.
Gong Bailin，Lu Fangyun，Li Xiangyu. A theoretical model for forecasting deformation shapes of deformable warheads[J]. Explosion and Shock Waves，2010，30(1)：65-69.

[2] 李记刚，余文力. 定向战斗部的研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹，2005(5)：25-29.
Li Jigang，Yu Wenli. The research status and trend of development of aimed warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal，2005(5)：25-29.

[3] Abernathy D D. Variable geometry warhead：United States of America，3960085[P]. 1976-06-01.

[4] 刘俞平，冯成良，王绍慧. 定向战斗部研究现状与发展趋势[J]. 飞航导弹，2010(10)：88-93.

[5] 马征，宁建国，马天宝. 展开型定向战斗部展开过程的理论计算与数值模拟[J]. 弹箭与制导学报，2007，27(1)：111-114.
Ma Zheng，Ning Jianguo，Ma Tianbao. Dynamic analysis and numerical simulation for spread process of a evolvable aimed warhead[J]. Journal of Projectiles，Rockets，Missile and Guidance，2007，27(1)：111-114.

[6] 刘俞平，冯成良，王绍慧. 定向战斗部研究现状与发展趋势[J]. 飞航导弹，2010(10)：88-93.
Liu Yuping，Feng Chengliang，Wang Shaohui. The research status and trend of development of aimed warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal，2010(10)：88-93.

[7] 耿荻，马天宝，宁建国，等. 基于 Lagrange 和 ALE 算法的展开型定向战斗部数值模拟[C]// 塑性力学新进展：2011 年全国塑性力学会议论文集. 北京：清华大学出版社，2011：209-215.

[8] 黄春曼，李慧敏. 车辆碰撞及吸能材料机构研究进展综述[J]. 装备制造技术，2012(1)：112-115.
Huang Chunman，Li Huimin. Study on material and structure for energy absorption of vehicle[J]. Equipment Manufacturing Technology，2012(1)：112-115.

[9] 姚松，田红旗. 车辆吸能部件的薄壁结构碰撞研究[J]. 中国铁道科学，2001，22(2)：55-60.

Yao Song, Tian Hongqi. Crash research on thin-shelled structure as vehicle energy-absorption components[J]. China Railway Science, 2001,22(2):55-60.

[10] 高广军,姚松. 车辆薄壁结构碰撞吸能特性研究[J]. 铁道机车车辆,2002(2):8-10.
Gao Guangjun, Yao Song. Research on energy absorption attribute in collision of thin-shell structure between trains[J]. Railway Locomotive and Car, 2002(2):8-10.

[11] 王斌,何德坪,舒光冀. 泡沫 AL 合金的压缩性能及其能量吸收[J]. 金属学报,2000,36(10):1037-1040.
Wang Bin, He Deping, Shu Guangji. Compressive property and evergy-absorption of foamed AL alloy[J]. Acta Metallurgicasinica, 2000,36(10):1037-1040.

[12] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展,1986,16(1):28-38.
Yu Tongxi. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic elements[J]. Advances in Mechanics, 1986,16(1):28-38.

[13] 余同希,卢国兴. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京:化学工业出版社,2005:14-18.

[14] 耿荻,马天宝,赵慧. 展开型定向战斗部引信延迟时间计算方法研究[J]. 北京理工大学学报,2011,31(增刊 1):137-141.
Geng Di, Ma Tianbao, Zhao Hui. Study on calculation method for fuze delay time of a evolvable aimed warhead [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011,31(suppl 1):137-141.

Energy absorption hinge of evolvable warhead

Zhao Yuzhe, Ning Jianguo, Xu Xiangzhao, Ma Tianbao
(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The limit hinge is one of key technologies in the design of evolvable warheads, and its damage efficiency is determined by keeping its integrity in the deploying process of the warhead. In this paper, a novel hinge with energy absorption properties was designed based on dynamic principles and theoretical models of evolvable warheads, and the evolving process of the evolvable warhead with charges of varying sizes was numerically simulated, and the different performances of the ordinary hinge and the energy absorption hinge compared and examined, with a particular focus on the status of force and energy absorption undergone by the warhead when the limit angel was reached. The results show that the energy absorption hinge can reduce the impact force and improve energy absorption. The results of the experiment carried out on the evolvable warhead structure equipped with the two kinds of hinges show that the traditional hinge suffers damage in varying degrees, while our novel hinge with energy absorption keeps the structural integrity, proving that the energy absorption hinge will ensure the integrity of the warhead and the hinge when reaching the limit angel, and verifying the rationality of the energy absorption hinge design plan and the reliability of the numerical simulation.

Key words: solid mechanics; energy absorption and buffer property; nonlinear calculation; nenergy absorption hinge; evolvable warhead; static explosion experiment

(责任编辑 丁 峰)