

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.02.008

## 组合式起落架缓冲器耐坠毁性能仿真与分析

韩雨莹<sup>1</sup>, 房兴波<sup>1</sup>, 陈虎<sup>1</sup>, 魏小辉<sup>1,2</sup>, 谢欣宏<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 南京 210016; 3. 中国飞行试验研究院, 西安 710000)

**摘要:** 提出了一种油气-泡沫铝组合式直升机缓冲装置, 基于塑性坍塌应力理论计算模型和有限元模型对单一泡沫铝冲击压溃应力-应变进行了计算和仿真分析, 计算结果和仿真分析结果进行了相互校验。通过单一泡沫铝冲击压溃试验对理论和仿真模型进行了试验验证。将泡沫铝压溃动态特性曲线融入油气-泡沫铝组合式起落架缓冲动力学模型开展耐坠毁性能仿真分析。结果表明, 本文提出的油气-泡沫铝组合式缓冲器缓冲载荷峰值降低了 38%, 缓冲效率提升了 12.7%, 有效提升了直升机起落架缓冲器的耐坠毁性能。

**关键词:** 飞行器设计; 起落架; 数值分析; 抗坠毁; 泡沫铝; 缓冲效率

中图分类号: V226

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)02-0239-06

## Crashworthiness Performance Simulation and Analysis of Oleo-Pneumatic and Foam-Aluminum Combined-Type Landing Gear Buffer

HAN Yuying<sup>1</sup>, FANG Xingbo<sup>1</sup>, CHEN Hu<sup>1</sup>, WEI Xiaohui<sup>1,2</sup>, XIE Xinhong<sup>3</sup>

(1. National Defense Key Discipline Laboratory of Advanced Design Technology for Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. China Flight Test Establishment, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** As the major energy absorption of helicopter in crash, the buffer plays an important role in the safety flight of helicopter. A combined oleo-pneumatic and foam-aluminum helicopter buffer is proposed in this paper. Based on the theoretical calculation model of plastic collapse stress and finite element model, the impact crushing stress-strain of single aluminum foam is calculated and simulated. Then the calculation and simulation results are verified. Furthermore, the theory and simulation model are verified by impact crushing test of single aluminum foam. The dynamic characteristics curve of aluminum foam collapse is integrated into the dynamic model of combined oleo-pneumatic and foam-aluminum landing gear, and the crashworthiness performance simulation analysis is carried out. The results show that the peak load of the combined oleo-pneumatic and foam-aluminum buffer is reduced by 38%, and the buffer efficiency is increased by 12.7%. The crashworthiness performance of helicopter landing gear buffer is improved effectively.

**Key words:** aircraft design; landing gear; numerical analysis; crashworthiness; aluminum foam; buffer efficiency

直升机由于其自身旋翼的存在及周围复杂气流的影响, 使得发生危险时, 驾驶员无法通过弹射

系统脱身, 因此驾驶员很难在坠机前安全脱离直升机<sup>[1]</sup>。为保证驾驶员的生命安全, 需通过一系列抗

基金项目: 国防卓越青年科学基金(2018-JCJQ-ZQ-053)。

收稿日期: 2021-03-17; 修订日期: 2021-10-19

通信作者: 魏小辉, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wei\_xiaohui@nuaa.edu.cn。

引用格式: 韩雨莹, 房兴波, 陈虎, 等. 组合式起落架缓冲器耐坠毁性能仿真与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 239-244. HAN Yuying, FANG Xingbo, CHEN Hu, et al. Crashworthiness performance simulation and analysis of oleo-pneumatic and foam-aluminum combined-type landing gear buffer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 239-244.

坠毁措施,使得直升机触地时,作用在人体的过载限制在生命耐受范围内,此时抗坠毁设计就显得至关重要<sup>[2]</sup>。

20世纪70年代,美国和一些欧盟国家为了验证飞行器的抗坠毁能力,开始进行坠撞试验,之后,美军对大量旋翼和固定翼飞机均进行了坠撞试验,并给出其可生存事故范围<sup>[3]</sup>。传统的抗坠毁设计依赖大量的物理实验,花费时间长且资金投入多;而抗坠毁数字仿真可以最大限度地规避风险、提高效率。文献[4]简化了机身模型,引入六边形蜂窝吸能装置,进行坠撞实验,并利用非线性有限元软件ABAQUS对实验进行模拟,计算结果与实验结果相吻合,进而优化吸能装置。文献[5]利用三维有限元软件LS-dyna建立了机身截面三维模型,进而确定了结构变形和地板高度加速度响应,便于更好地理解冲击坠撞过程。

直升机抗坠毁吸能的主要部件为起落架、机身和座椅,起落架是抗坠毁研究中最重要的一环,正常着陆时依靠油液阻尼耗能,而意外坠毁时,能量更多地转化为塑性变形<sup>[6]</sup>。缓冲器作为起落架中最主要的吸能元件,能够将直升机的动能转换成其他能量耗散掉,进而实现缓冲吸能,研究表明,多级组合式的缓冲器可以提升抗坠毁能力<sup>[7]</sup>。

泡沫铝是一种一次性压溃元件,维护成本低,利用效率高,且具备较高比强度、比刚度等优异特性,其吸能本质是压缩变形过程中的能量耗损<sup>[8]</sup>,在压缩载荷作用下显示出典型的变形三阶段特征:线弹性阶段、平台区及致密化阶段。由于泡沫铝在压缩过程中存在高而宽的应力平台,这使其在近似恒应力下能够吸收大量能量<sup>[9]</sup>,是极具发展前景的新型缓冲材料。文献[10]提出了一种泡沫铝加钢壳组合式的抗撞装置,用于减小船舶撞击对海上风电组的损伤,并显著减小了最大碰撞力和机舱加速度。文献[11]对泡沫铝夹芯板的爆炸响应进行实验研究,得到变形破坏模式,定量分析能量吸收效率,得出其具有更高抗爆性能的结论,可广泛应用于工程防护领域。文献[12]将泡沫铝填充钢管作为汽车前纵梁结构缓冲装置,通过轴向压缩时泡沫铝和钢管之间的交互作用来吸收能量,得出泡沫铝在汽车缓冲吸能方面具备较好的应用。文献[13]对泡沫铝等材料的缓冲吸能特性进行研究,在不同温度、应变率条件下分别建立理论计算模型,并通过试验验证,系统地分析泡沫铝等材料在航天腿式着陆器里的缓冲吸能特性。综上所述,尽管泡沫铝在汽车、船舶、航天等领域被广泛应用于冲击吸能和撞击防护,但是对其在航空领域的研究较少。本文提出了一种将泡沫铝应用于抗坠毁级缓冲的缓

冲器设计方案,建立了泡沫铝与油-气组合式耐坠毁缓冲器模型,并验证其可行性。

## 1 泡沫铝压溃变形能量吸收计算

通过塑性坍塌应力的理论模型计算泡沫铝的塑性屈服强度 $\sigma_f$ 数值。泡沫铝压缩吸能过程中,在线弹性阶段后,其压缩曲线存在长而宽的应力平台,此时应变增大而应力维持不变,泡沫铝进入屈服状态,因此塑性屈服强度也为平台区应力<sup>[14]</sup>。

不同密度的泡沫铝在压缩载荷下表现出来的力学特性差异较大,因此,对于泡沫铝而言,相对密度是一项重要的结构参数。相对密度是泡沫铝、泡沫铝基体材料密度的比值,其值可以通过孔隙率计算获得,孔隙率与相对密度的关系为

$$\theta = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为孔隙率; $\rho_f$ 、 $\rho_s$ 分别为泡沫铝、泡沫铝基体材料的密度,两者比值为相对密度。基于此,可通过闭孔泡沫铝塑性坍塌应力的理论模型计算出泡沫铝的塑性屈服强度 $\sigma_f$ ,即平台区应力<sup>[15]</sup>

$$\sigma_f = \sigma_s \times \left[ c_2 \left( \varphi \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + c_2' (1 - \varphi) \left( \frac{\rho_f}{\rho_s} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\sigma_s$ 为泡沫铝基体材料的塑性屈服强度; $\varphi$ 为体积分数,即孔棱占整体比例常数,本文采用闭孔泡沫铝进行缓冲器设计,在实际情况中闭孔泡沫铝中也会存在少部分开孔泡体,因此在本算例中,假设闭孔泡沫铝中存在5%的开孔泡体,即 $\varphi = 0.05$ 。闭孔泡沫铝由于孔膜的延伸和孔胞内气流的压缩,均会增强其压缩强度,文献[15]据此得出 $c_2$ 、 $c_2'$ 对闭孔泡沫铝屈服强度影响的合理取值,即 $c_2 = 0.3$ 、 $c_2' = 0.44$ 。最终选取建立计算模型和有限元模型的泡沫铝试样相关参数如表1所示。将表1参数代入式(1,2)计算得到泡沫铝平台区应力值为 $\sigma_f = 9.12$  MPa。

表1 计算模型所需泡沫铝试样参数

Table 1 Mechanical parameters of foam-aluminum required during calculation model

孔隙率 $\theta/\%$	体积分数 $\varphi$	基体屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$
75	0.05	87

## 2 泡沫铝压溃过程有限元仿真

### 2.1 模型建立

建模过程中,考虑到在中、低应变率的情况下,泡沫铝的力学性能不具有应变率敏感性,且为各向同性材料,因此采用LS-DYNA中63号可压扁泡

沫材料的本构模型进行数值模拟分析<sup>[16]</sup>,将泡沫铝划分成 8 节点 Solid 164 六面体单元。下压板和支撑板设置为刚体,仿真过程中选用由 LS-Dyna 提供的一种刚性体材料模型,使用这种材料的部件所有节点将保持相对位移不变。建模所需材料的物理属性见表 2。

表 2 泡沫铝材料属性

Table 2 Mechanical properties of present foam-aluminum

孔隙率 $\theta/\%$	密度 $\rho_t/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	泡沫铝 半径/mm	泡沫铝 长度/mm	弹性模量/ MPa
75	0.675	86	400	498

泡沫铝、下压板和支撑板的单元属性均设置为 LS-Dyna Sectsld。约束支撑板的所有自由度以及下压板的 2 个平动、3 个转动自由度,保证下压板垂直下压。假定机体质量为 3 000 kg,下压板携带附加结构质量以冲击速度 10 m/s 向下压,建立的有限元模型如图 1 所示。

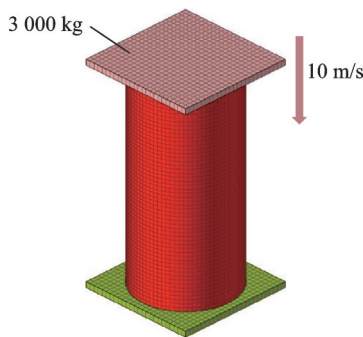


图 1 泡沫铝压溃模拟有限元模型

Fig.1 Finite element model of foam-aluminum during crushing simulation

### 2.2 压溃仿真与试验对比分析

在建模完成后,便可进行有限元压溃仿真分析,其压溃过程中泡沫铝应力云图分布如图 2 所示。由图 2 可知,在泡沫铝压溃过程中,起初试件各部位都有变形,但中间段应力较大,所以泡沫铝中间薄弱区域率先达到坍塌应力形成褶皱,随着褶皱累积叠加,最终泡沫铝被压实。在整个压缩的过

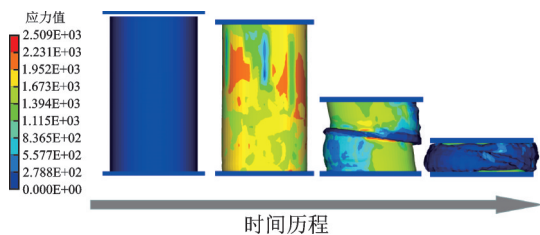


图 2 泡沫铝缓冲作用过程中的应力分布云图

Fig.2 Stress distribution nephogram of foam-aluminum during buffering process

程中,试件两端的应力基本平衡。

图 3 为单一泡沫铝压溃过程中的应力-应变曲线对比图,其中,红色实线为仿真值,黑色虚线为试验值。观察仿真曲线,到达应力峰值后,由于泡沫铝的初始瞬态效应使得其应力先减小后增大,这是因为泡沫铝在压溃过程中残留少许脆性相,出现脆性坍塌。随后进入塑性坍塌阶段并形成相当长的一段平台区,在此阶段应力几乎不随应变变化,这对冲击保护极为重要。当应变为 0.65 时,压溃应力开始急剧增大,泡沫铝进入致密化阶段,此时泡沫铝中几乎所有孔洞都被压实,产生加工硬化现象。

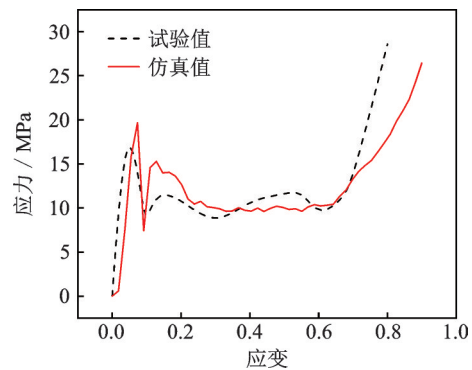


图 3 泡沫铝缓冲压溃应力-应变曲线对比图

Fig.3 Stress-strain curve comparison diagram of foam-aluminum during crushing

进一步将试验曲线与仿真曲线对比可知:在泡沫铝的压溃过程进入到塑性变形阶段,仿真值的波动幅度较小,具有较为理想的应力平台区,这是因为仿真无法模拟实际泡沫铝胞单元发泡的随机性,真实破裂首先发生在薄壁区域,压溃从低强度的孔胞逐级扩展至高强度的孔胞。试验曲线在致密化阶段的斜率较大,主要原因是建模过程忽略了泡沫铝内部的微孔洞,增大了固体体积含量,从而导致仿真的应力值偏小<sup>[17]</sup>。

将泡沫铝压溃仿真得到的平台区应力值、通过塑性坍塌应力模型计算获得的平台区应力值与试验得到的平台区应力值进行比较,如表 3 所示。

表 3 泡沫铝平台应力值结果对比

Table 3 Comparison of stress results of foam-aluminum platform

计算值/ MPa	试验值/ MPa	仿真值/ MPa	仿真与计算 偏差/%	仿真与试验 偏差/%
9.12	10.15	10	9.5	1.5

综上所述,有限元模型的仿真结果与数值计算结果较为接近,偏差为 9.5%,仿真得到的应力-应变曲线与泡沫铝压溃试验得到的曲线走向基本一

致。这证明了上述有限元建模的准确性,并为后续缓冲器的设计提供可行性参考。

### 3 组合缓冲器耐坠性分析

#### 3.1 MATLAB/Simulink 参数化模型

抗坠毁缓冲器主要由低压部段和抗坠毁部段组成,正常着陆时低压部段起缓冲作用,只有在高下沉速度着陆时,抗坠毁部段才起缓冲作用。本文抗坠毁缓冲器的低压部段为单腔油气式缓冲器,依靠油针来调节油孔大小实现缓冲,图4为组合式抗坠毁缓冲器的结构示意图。

泡沫铝作为抗坠毁部段,由于其应力-应变曲线存在“应力降”现象,即线弹性阶段应力峰值较大,结束后孔壁和孔棱的坍塌造成应力下降。该现

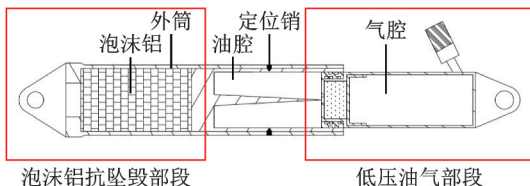


图4 油气-泡沫铝组合式缓冲器结构示意图

Fig.4 Diagram of the combined oleo-pneumatic and foam-aluminum buffer structure

象不利于缓冲压溃的稳定性,因此将泡沫铝进行预压缩处理至平台区,再进行后续起落架落震仿真试验<sup>[18]</sup>。经预压缩处理后泡沫铝的压溃载荷-位移曲线如图5所示。

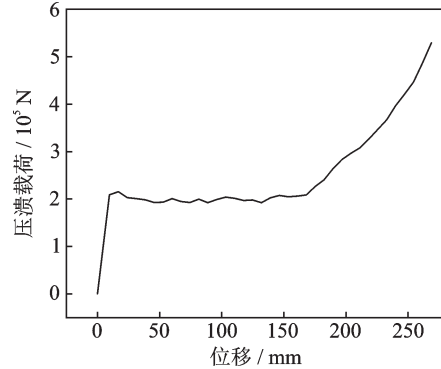


图5 经预压缩处理泡沫铝的压溃载荷-位移曲线

Fig.5 Crushing load-displacement curve of foam-aluminum treated by precompression

将预压缩处理后的泡沫铝载荷-位移曲线导入 Simulink,建立起落架的缓冲器模型。缓冲器在充液状态下低压部段的设计参数见表4。泡沫铝高压抗坠毁部段的设计参数见表5。

表4 低压部段缓冲器参数

Table 4 Parameters of low pressure section buffer

结构行程/ mm	初始气体 体积/mL	初始气体 压力/MPa	活塞杆 内径/mm	活塞杆 外径/mm	外筒内径/ mm	节流孔面积/ mm <sup>2</sup>	缩流 系数	多变 指数
400	2 600	1.9	88	92	105	100.62	0.8	1.3

表5 泡沫铝抗坠毁部段缓冲器参数

Table 5 Parameters of foam-aluminum crashworthiness section buffer

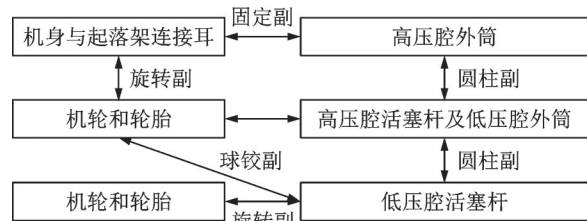
结构行程/mm	泡沫铝半径/mm	泡沫铝孔隙率/%
400	86	75

#### 3.2 起落架建模

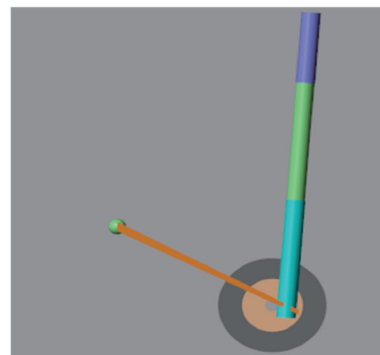
直升机抗坠毁起落架采用摇臂式构型,起落架虚拟样机主要由高压腔外筒、高压腔活塞杆、低压腔活塞杆、低压腔外筒、机轮、轮胎和主摇臂组成,各组件之间的连接如图6(a)所示。利用各组件运动副关系在 Simulink 软件中建立起落架仿真模型,所建立的起落架虚拟样机如图6(b)所示。

#### 3.3 抗坠毁结果分析

以坠撞速度为 10 m/s 的下沉速度进行起落架落震仿真试验,得到低压部段和高压部段压缩量和缓冲力曲线如图7所示,高、低压部段缓冲器及起落架功量图如图8所示。通过观察油气-泡沫铝组合缓冲器的高、低压部段缓冲力曲线,可以发现两者随时间变化基本一致,这说明两段缓冲器在工作



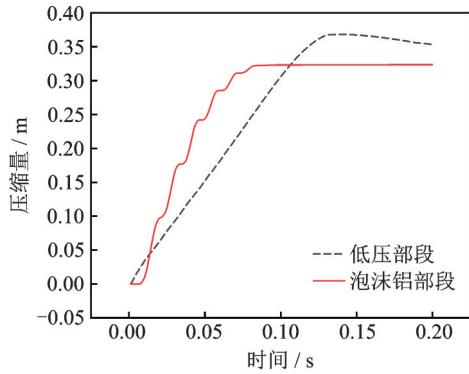
(a) The kinematic pair relation of each part of landing gear



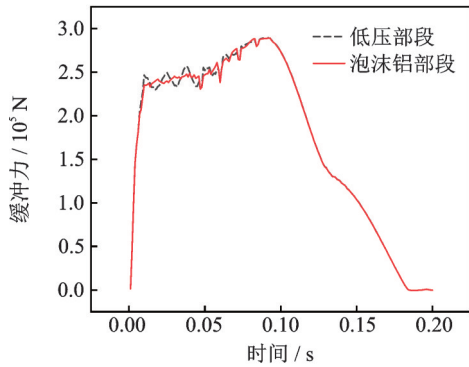
(b) The virtual prototype in Simulink

图6 Simulink中起落架各部件运动副关系及建立的虚拟样机

Fig.6 Kinematic pair relation of each part of landing gear and virtual prototype in Simulink



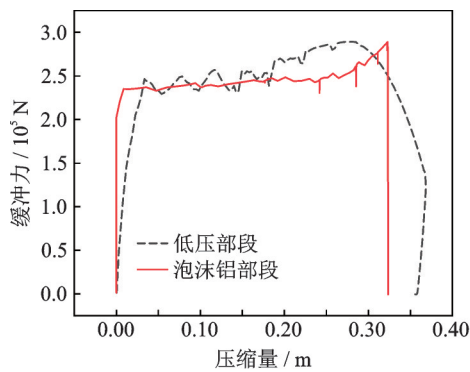
(a) Compression curves of low and high pressure sections



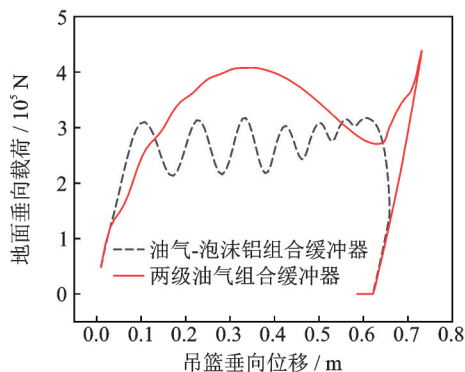
(b) Buffer force curves of low and high pressure sections

图 7 低压部段和高压部段压缩量及缓冲力曲线

Fig.7 Compression and buffer force curves of low and high pressure sections



(a) Power diagram of low and high pressure section of oleo-pneumatic and foam-aluminum buffer



(b) Power diagram of two stage oleo-pneumatic and combined oleo-pneumatic and foam-aluminum buffer

图 8 高低压部段缓冲器及起落架功量图

Fig.8 High and low pressure section buffer power diagram and landing gear power diagram

状态下配合较好。由图 8 可知:高压部段的缓冲力在压缩前期基本不变,可实现平稳吸能缓冲,这与泡沫铝载荷-位移曲线的平台区对应,体现了泡沫铝作为缓冲器的优异性能;油气-泡沫铝组合缓冲器的起落架功量图较为波动,这是由于泡沫铝没有阻尼受到冲击所呈现的必然趋势。同时,油气-泡沫铝组合缓冲器也有效降低了地面垂向载荷的峰值,因此泡沫铝是一种应用于抗坠毁级缓冲方案的优良缓冲材料。

表 6 为两种缓冲器起落架抗坠毁分析结果的汇总。与传统两级油气式起落架相比,油气-泡沫铝起落架的地面垂向载荷峰值为 317.21 kN,减少了 38%。在 10 m/s 的冲击速度下,油气-泡沫铝组合式缓冲器的高压部段的压缩量相对较少。这是因为在坠毁过程中,其高压部段压溃发生的较晚,初始坠毁时高压部段参与较少,这保障了安全的使用行程,也节省了缓冲器的内部空间。油气-泡沫铝组合式起落架的缓冲效率明显高于两级油气式起落架,效率提升了 12.7%,可见油气-泡沫铝组合式缓冲器具备更优异的抗坠毁性能。

表 6 起落架抗坠毁性能

Table 6 Crashworthiness performance of landing gear

抗坠毁分析	油气-泡沫铝缓冲器	两级油气缓冲器	相对偏差/%
地面垂向载荷/kN	317.21	438.47	-38
低压部段压缩量/mm	368.21	342.19	7
高压部段压缩量/mm	323.48	364.05	-12.5
低压部段缓冲力/kN	289.20	400.93	-39
高压部段缓冲力/kN	288.97	400.54	-38.6
低压部段缓冲器效率/%	84.26	75.45	11.7
高压部段缓冲器效率/%	84.86	76.18	11.4
起落架缓冲效率/%	82.81	73.48	12.7

## 4 结 论

本文提出了一种油气-泡沫铝组合式耐坠毁缓冲器,开展了设计、仿真和试验研究,主要结论如下:

(1) 基于塑性坍塌应力理论计算模型,进行了单一泡沫铝平台区应力的理论计算,在线弹性阶段后,泡沫铝存在稳定的应力平台,该阶段应力值为 9.12 MPa,与试验结果的相对百分比误差为 11.2%。

(2) 基于有限元仿真模型,对泡沫铝动态压溃过程进行了有限元分析,仿真结果与理论计算结果较为接近,得到的应力-应变曲线也与试验曲线走向基本一致,证明了有限元建模的准确性。仿真得到的平台区应力为 10 MPa,与试验结果的相对百分比误差仅为 1.5%。

(3) 基于 MATLAB/Simulink 环境,建立了油

气-泡沫铝组合式耐坠毁起落架的仿真分析模型,以 10 m/s 的下沉速度进行了起落架落震仿真试验。与传统两级油气式起落架相比,油气-泡沫铝组合式缓冲器降低了地面载荷,缓冲效率提升了 12.7%。

#### 参考文献:

- [1] 周华志. 直升机抗坠毁吸能结构设计、分析与优化 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.  
ZHOU Huazhi. Design, analysis and optimization of helicopter crash resistant energy absorbing structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [2] 戈嗣诚, 黄礼耀. 直升机抗坠毁座椅用智能气囊缓冲器初步研究 [J]. 洪都科技, 2002, 3: 12-17.  
GE Sicheng, HUANG Liyao. Preliminary study on intelligent airbag buffer for helicopter crash seat [J]. Hongdu Science and Technology, 2002, 3: 12-17.
- [3] KINDERVATER C M, KOHLGRUBER D, JOHNSON A. Composite vehicle structural crashworthiness—A status of design methodology and numerical simulation techniques [J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 4(2): 213-230.
- [4] MENG F X, ZHOU Q, YANG J L. Improvement of crashworthiness behaviour for simplified structural models of aircraft fuselage [J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(1): 83-97.
- [5] ADAMS A, LANKARANI H M. A modern aerospace modeling approach for evaluation of aircraft fuselage crashworthiness [J]. International Journal of Crashworthiness, 2003, 8(4): 401-413.
- [6] 邓宏钟, 李季, 廖良才. 直升机抗坠毁仿真软件现状研究 [J]. 计算机仿真, 2005(4): 36-39, 49.  
DENG Hongzhong, LI Ji, LIAO Liangcai. Research on the status of helicopter crash resistance simulation software [J]. Computer Simulation, 2005 (4): 36-39, 49.
- [7] 李兵. 直升机起落架的研究与有限元仿真 [D]. 石河子: 石河子大学, 2013.  
LI Bing. Research and finite element simulation of helicopter landing gear [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [8] 吕丁. 基于泡沫铝的缓冲吸能结构设计研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
LYU DING. Design of buffer energy absorption structure based on aluminum foam [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [9] 曾繁波. 泡沫铝填充管的吸能特性研究及其在轿车前纵梁结构中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
ZENG Fanbo. Study on energy absorbing characteristics of aluminum foam filled tube and its application in car front longeron structure [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [10] LIU Chunguang, HAO Ertong, ZHANG Shibo. Optimization and application of a crashworthy device for the monopile offshore wind turbine against ship impact [J]. Applied Ocean Research, 2015, 51: 129-137.
- [11] MA Xiaomin, LI Xin, LI Shiqiang, et al. Blast response of gradient honeycomb sandwich panels with basalt fiber metal laminates as skins [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 144: 1-9.
- [12] SEITZBERGER M, RAMMERSTORFER F G, GRADINGER R, et al. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam [J]. International Journal of Solids & Structures, 2000, 37(30): 4125-4147.
- [13] 罗昌杰. 腿式着陆缓冲器的理论模型及优化设计研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
LUO Changjie. Study on theoretical model and optimization design of leg landing buffer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [14] ASHBY M F, EVANS A G, FLECK N A, et al. Metal foams: A design guide [M]. Applied Mechanics Reviews, 2002, 23(6): 119-119.
- [15] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 175-282.
- [16] HANSEN A G, HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, et al. H. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams [J]. Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(2): 359-406.
- [17] VEYHL C, BELOVA I V, MURCH G E, et al. Finite element analysis of the mechanical properties of cellular aluminium based on micro-computed tomography [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13/14): 4550-4555.
- [18] 郭伟国, 李玉龙, 黄福增. 不同应变率下泡沫铝的形变和力学性能 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 289-292.  
GUO Weiguo, LI Yulong, HUANG Fuzeng. Deformation and mechanical properties of aluminum foams at different strain rates [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 289-292.