

# 人工软骨仿生材料缓震吸能性能的实验与数值研究

刘一然<sup>1</sup> 刘志鹏<sup>1</sup> 季长程<sup>2</sup> 袁定新<sup>2</sup> 姜林<sup>1</sup>

(1 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

(2 上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

**文 摘** 为了研究 7075/T651 铝合金(火箭箭体材料)的冲击防护方式,本文通过实验与数值模拟结合的方法研究了两种不同密度的新型泡沫材料-人工软骨仿生材料(ACF 材料)的缓震吸能性能。进行了不同速率下的材料压缩试验,获得了材料在不同应变率下的力学特性,通过低速冲击实验研究了 ACF 材料对铝合金的防护性能,基于低速冲击的数值模型,分析了冲击应力、模型能量变化以及铝合金板的位移。实验和数值模拟的研究表明,ACF 材料的力学特性存在应变率效应且与密度有关,该泡沫材料可以大幅度降低被防护物所受冲击应力,有良好的缓震吸能效果,又因其密度小、柔性好的特点,可作为优良的箭体防护材料。

**关键词** 人工软骨仿生材料,应变率,缓震吸能,低速冲击,数值模拟

中图分类号:O347

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.003

## Experimental and Numerical Study on Cushioning and Energy Absorption Properties of Artificial Cartilage Biomimetic Material

LIU Yiran<sup>1</sup> LIU Zhipeng<sup>1</sup> JI Changcheng<sup>2</sup> YUAN Dingxin<sup>2</sup> JIANG Lin<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

(2 Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co. Ltd., Shanghai 200245)

**Abstract** In order to study the impact protection mode of 7075/T651 aluminum alloy (rocket body material), the cushioning and energy absorption properties of artificial cartilage Biomimetic material (ACF material), two new foam materials with different densities, were studied by combining experiment and numerical simulation. The material compression tests at different rates were carried out to obtain the mechanical properties of the material at different strain rates. The protective performance of ACF material against aluminum alloy was studied through low-speed impact experiments. The impact stress, model energy change and displacement of aluminum alloy were analyzed based on the numerical model of low-speed impact. The experimental and numerical simulation studies show that the mechanical properties of ACF material have strain rate effect and are related to density. The foam material significantly reduce the impact stress on the protected object and has good cushioning and energy absorption. In addition, it can be used as an excellent arrow body protection material because of its low density and good flexibility.

**Key words** Artificial cartilage biomimetic material, Strain rate, Cushioning and energy absorption, Low-velocity impact, Numerical simulation

### 0 引言

路基运输的火箭在穿越山区时,可能遇到落石等异物撞击的意外情况,当动量过大时会对箭体造成损害,使火箭出现凹坑甚至外壁被穿透,造成不可估量的损失,为保证火箭运输过程中的安全性,可采

用泡沫材料对箭体进行防护。泡沫材料有质量轻、较高的比弹性模量和良好的缓震吸能性能的特点,广泛用于军民各领域重要设备的防护,当受到冲击时,泡沫气孔被压缩,材料通过自身的变形吸收能量从而进行防护<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2022-06-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52176114);江苏省研究生实践创新计划(SJCX21\_0122)

第一作者简介:刘一然,1997年出生,硕士,主要从事冲击动力学研究。E-mail: 2947450788@qq.com

通信作者:姜林,1990年出生,副教授,主要从事铝热剂燃烧、硝化棉热自燃及阻化技术。E-mail: ljiang@njjust.edu.cn

由于泡沫材料优越的抗冲击性能,很多学者通过理论、实验或数值模拟的方法研究了泡沫材料在各种冲击载荷下的力学行为。J. V. MANE对刚性聚氨酯泡沫在不同应变率下的冲击响应进行了实验研究,表明泡沫的力学性能发生了显著变化,能量吸收特性也随应变率的变化而改变<sup>[3]</sup>。G. SUBHASH通过实验研究了聚合物泡沫力学特性的应变率和密度敏感性,低密度泡沫以脆性方式断裂,而高密度泡沫的破坏由剪切主导<sup>[4]</sup>。K. Y. JEONG对聚氨酯泡沫的应变率效应进行研究并建立一个新的本构模型,提高了对不同应变率下的聚氨酯泡沫力学特性的拟合程度<sup>[5]</sup>。林玉亮以聚氨酯泡沫为研究对象,进行了不同应变率下的冲击压缩试验,给出了以屈服极限、密度、应变为参数的动态本构模型,与材料的动态压缩曲线一致性较高<sup>[6]</sup>。此外很多学者还采用数值模拟的方法研究了泡沫材料受压缩或冲击的过程及其吸能特性,及其在汽车防护、导弹防护、包装工程领域的具体应用<sup>[7-12]</sup>。

本文通过实验与数值模拟结合的方式研究了两种不同密度的人工软骨仿生材料(ACF材料)的缓震吸能特性,通过材料压缩试验获得了它们在不同应变率下的力学特性,拟合了中应变率下的力学特性,为数值模拟的材料模型提供输入,基于ABAQUS/Explicit建立低速冲击的数值模型,分析了冲击应力和能量的变化以及铝合金板损伤状况,将数值模拟获得的应力与落球冲击实验结果进行对比,验证了数值模拟的有效性,经过与常用缓震抗冲击材料丁腈橡胶进行对比,表明ACF材料拥有良好的缓震吸能性能,且密度小,柔性好,可用于火箭箭体防护的候选材料。

## 1 实验

### 1.1 人工软骨仿生材料

人工软骨仿生材料(简称ACF材料)是根据人类软骨的功能与构造而设计的一类三维超微结构的新型高分子材料,主要成分为聚氨酯<sup>[13]</sup>。当ACF材料受到冲击时,微观状态下分子侧链发生变形,宏观上是气孔挤压,通过这种方式冲击动能转化为内能,从而达到缓震吸能的效果,减缓被防护物受到的冲击应力。ACF材料已广泛应用于人体保护、运输物流、机械减震、航空宇航等多领域,所以本文提出采用人工软骨仿生材料来保护箭体的方案并进行相关测试评估其可行性。

实验采用ACF18、ACF28两种人工软骨仿生泡沫进行研究,密度分别为0.19、0.32 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 材料压缩试验

为了获得不同应变率下ACF材料的应力-应变

关系和力学特性,按照《GB8813—88硬质泡沫塑料压缩试验方法》,将两种ACF材料进行多次压缩试验,所用仪器为深圳SUNS公司的UTM5105-G万能试验机。每个ACF材料的标准试样尺寸为50 mm×50 mm×10 mm,压缩速率设置为5、100、200 mm/min,即应变率0.008、0.167、0.333 s<sup>-1</sup>。

图1是不同应变率下两种ACF材料的应力-应变曲线,可以看出和其他泡沫材料如聚氨酯泡沫、铝泡沫一样,ACF材料的应力-应变曲线存在显著的三个阶段:弹性阶段、平台阶段和致密化阶段。当应变在0.1以下时是弹性阶段,该阶段曲线的斜率表征了ACF材料的弹性模量,这个阶段主要是由于气泡孔壁的挤压引起的弹性变形;在平台阶段气泡孔壁开始坍塌,从而形成一个应力平台(该阶段的应力并不随着应变的增加而显著增加,其特征是一条大致平行于应变轴的线);平台阶段过后,压力的进一步增加会导致气泡孔壁塌陷形成致密化,这一阶段应力迅速增加,而应变没有明显增加<sup>[3]</sup>。

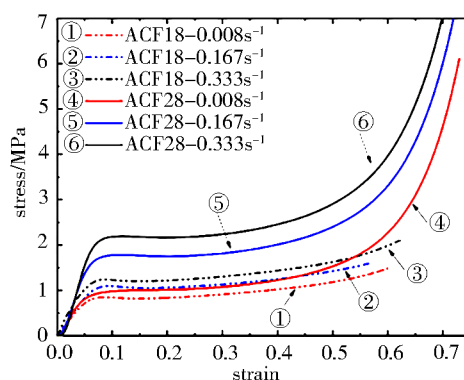


图1 ACF材料应力-应变曲线

Fig. 1 ACF material stress-strain curves

将应力-应变曲线的弹性阶段进行线性拟合,得到两种ACF材料在不同应变率下的弹性模量,同时取平台阶段开始的应力为平台应力,结果如表1所示。

对于同种ACF材料,随着应变率提高,其弹性模量和平台应力也增大,说明ACF材料存在应变率效

表1 ACF材料力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the ACF material

材料	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	加载速率 /mm·min <sup>-1</sup>	应变率 /s <sup>-1</sup>	弹性模量 /MPa	平台应力 /MPa
ACF18	0.19	5	0.008	15.09	0.83
		100	0.167	16.29	1.06
		200	0.333	21.11	1.21
ACF28	0.32	5	0.008	20.08	0.98
		100	0.167	32.54	1.77
		200	0.333	40.81	2.18

应,且密度更大的ACF28应变率效应更明显。同应变率下,ACF28比ACF18的弹性模量和平台应力高,表明ACF28有更好的抵抗变形的能力,有更高的刚度,但ACF18材料更易发生变形,所以在低动量冲击时能更好地吸收能量,降低被防护物所受的冲击应力。

### 1.3 落球冲击试验

通过落球低速冲击实验测试ACF材料的冲击防护性能,将质量2 086 g、直径80 mm的钢制落球固定在冲击实验机上高度750 mm的位置(经自由落体的速度公式计算冲击时速度约为3.8 m/s),动能约15 J,尺寸为300 mm×200 mm×3 mm的7075/T651铝合金板放置在冲击实验机底部,不同于以往的低速冲击实验中使用力或加速度传感器进行测量,本实验使用BF120-3CB型90°三轴应变片来测量铝合金板受冲击中心区域的应变,便于判断铝合金板受冲击时的应力应变状态。实验前确保接线良好,将一片应变片粘贴在板中心区域,翻转后放置在落球实验

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \mu} \pm \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2} \right] \quad (2)$$

可得等效应力:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2]} \quad (3)$$

需要注意的是,铝合金板发生了塑性变形以后式(2)、式(3)不再适用。

实验共进行4组:无防护、20 mm丁腈橡胶、20 mmACF18、20 mmACF28。每组多次实验,重复性好,结果较为一致。

## 2 数值模拟

本文通过ABAQUS建立了低速冲击实验的三维模型,应用显示动力学模块ABAQUS/Explicit进行数值模拟。该数值模型由7075/T651铝合金板、钢球、防护材料(ACF18、ACF28、橡胶)组成。

铝合金板、钢球和防护材料在ABAQUS中建好模型,尺寸均与冲击实验相同,其中铝合金板300 mm×200 mm×3 mm;钢球直径80 mm;防护材料300 mm×200 mm×20 mm。钢和铝合金材料属性如表2所示。

钢球被定义为刚体,放置在目标上方0.1 mm处。对各部件进行装配,防护材料和铝合金板紧密

表2 金属材料属性

Tab. 2 Properties of metal materials

材料	密度/kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量/GPa	泊松比
钢	7.78	206.00	0.30
7075/T651 铝合金	2.8	71.00	0.33

机底部的卡槽上。箭体防护时将防护材料紧紧贴合箭体,而不进行粘结,所以此处也采取同样方法,将相同尺寸且厚度为20 mm的防护材料紧贴于板上,转动四周旋钮,使卡槽紧紧固定铝合金板和防护材料,使之恰好贴合,没有空隙且不挤压,便可开始实验。

电阻应变片由敏感栅构成,当铝合金表面发生变形时,敏感栅也随之变形从而其电阻发生变化,再由动态应变仪和数据采集器记录这种变化并将其转变为应变,然后确定板表面的应力状态。90°三轴应变片可测量0°、45°和90°三个方向的线应变值 $\varepsilon_0, \varepsilon_{45}, \varepsilon_{90}$ 。主应变计算公式为:

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{matrix} \right\} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2} \quad (1)$$

当板未发生塑性变形时,即变形在线弹性范围内时主应力计算公式为:

贴合,之间不设置粘结层。落球与防护材料、铝合金板之间的接触均采用表面与表面接触。无防护冲击时,落球表面为主面,铝合金板上表面为从面;有防护材料时建立两对接触关系:落球表面(主)-防护材料表面(从)、铝合金板表面(主)-防护材料表面(从)。定义摩擦因数0.2,采用运动学接触算法进行建模。对整个模型施加竖直向下的重力,并对板和防护材料的长边进行铰接约束。设置落球的速度为3 800 mm/s,方向竖直向下(z方向),约束落球的转动和x、y方向自由度。铝合金板全局种子尺寸3 mm,中央受冲击区域(80 mm×80 mm)划分了尺寸为1 mm的网格,同时为了避免沙漏现象,厚度方向设置6层单元,共划分了110 880个单元;防护材料种子尺寸2 mm,共划分1.5×10<sup>5</sup>个单元。整个模型采用C3D8R单元模拟,选择增强型沙漏控制的方法来避免沙漏化现象,使结果更加准确。整个模型见图2,求解时间设置为0.01 s。

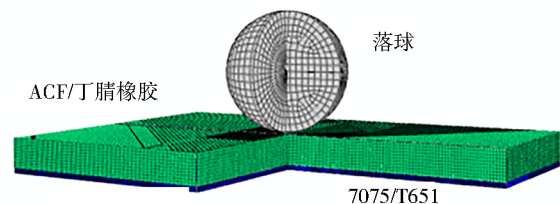


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

## 2.1 缓冲材料模型

ABAQUS 提供了多种可模拟泡沫材料的模型,比如超弹性泡沫模型、低密度泡沫模型、可压碎泡沫模型。超弹性泡沫模型忽略了材料的应变率效应,而可压碎泡沫模型的数据较难获取,所以本文采用低密度泡沫模型来模拟 ACF 泡沫材料,此模型适用于模拟受冲击的,有应变率效应且变形恢复能力强的泡沫。由压缩试验可知 ACF 材料存在一定的应变率效应,为了得到更准确的模拟结果,应尽可能获得落球冲击时的应变率对应的力学特性,而落球冲击防护材料时速度约为 3.8 m/s,防护材料厚度 20 mm,则其应变率为  $180 \text{ s}^{-1}$ 。由 NAGE 等人<sup>[14]</sup>提出一个可以估计泡沫材料在动态载荷下响应的本构模型,采用动态放大因子  $DIF$ ,通过将参考曲线与放大因子  $DIF$  相乘来绘制其他应力曲线,如(4)式所示。

$$DIF = 1 + (a + b\varepsilon) \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad (4)$$

$$\sigma = f(\varepsilon) \cdot DIF \quad (5)$$

式中, $\sigma$ 是所求应变率 $\dot{\varepsilon}$ 时的压缩应力, $f(\varepsilon)$ 是在参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下的应力-应变曲线, $a$ 、 $b$ 是需要拟合的两个应变率参数。

根据压缩试验结果,选择参考应变率  $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,分别对 ACF18 和 ACF28 在应变率为  $0.333 \text{ s}^{-1}$  的压缩曲线进行拟合,如图 3 所示,其中实线为试验曲线,虚线为拟合曲线,当  $a=0.12$ ,  $b=0.01$  时 ACF18 的弹性阶段和平台阶段拟合效果较好;同理,当  $a=0.3$ ,  $b=0.01$  时对 ACF28 曲线的拟合效果较好。将  $\dot{\varepsilon} = 180 \text{ s}^{-1}$  代入(5)式后分别得到 ACF18 和 ACF28 在应变率为  $180 \text{ s}^{-1}$  时的应力-应变曲线,将这些数据输入到低密度泡沫模型单轴压缩试验数据中,并定义材料密度 ACF18:  $0.19 \text{ g/cm}^3$ , ACF28:  $0.32 \text{ g/cm}^3$ 。

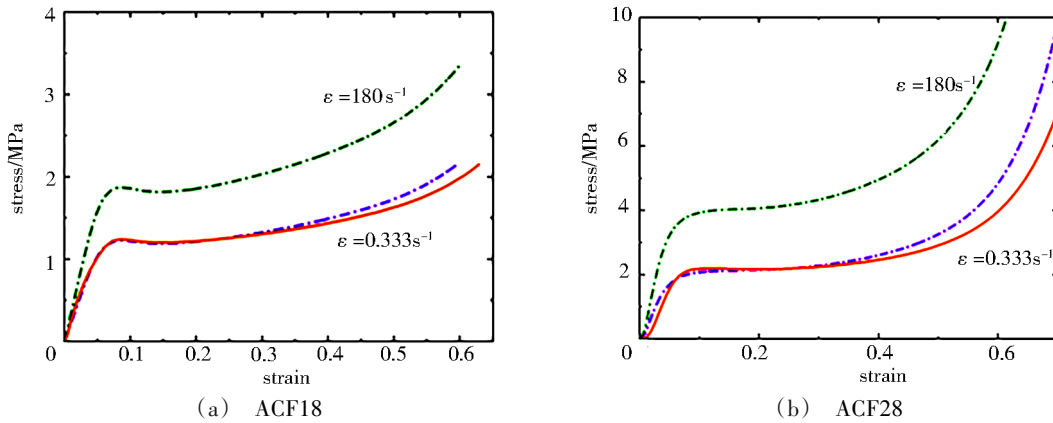


图3 ACF材料应力-应变曲线

Fig. 3 ACF material stress-strain curves

本实验中所选用的丁腈橡胶密度  $1.33 \text{ g/cm}^3$ 。丁腈橡胶是超弹性材料,Mooney-Rivlin 模型应用广泛,可以用于模拟中、小变形及具有应变率效应的橡胶,此模型中一般只需要定义  $C_{10}$  和  $C_{01}$  两个 Rivlin 系数。樊智敏等人<sup>[15]</sup>根据拟合关系式,通过弹性模量和橡胶材料硬度求解得到的其值:  $C_{10}=2.79$ ,  $C_{01}=0.698$ ,  $D_1=0$ , 本文采用此数据。

## 2.2 铝合金材料模型

由于低速冲击实验均在室温下进行,所以本文中 7075/T651 铝合金的塑性采用不考虑材料温度软化效应 J-C 数学模型<sup>[16]</sup>:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (6)$$

式中, $\sigma$ 为等效应力; $\varepsilon$ 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$  是无量纲的塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $A$ 为屈服应力, $B$ 和  $n$ 是有关应变硬化效应的参数, $C$ 是应变率参数。本实验中所用数据  $A=473 \text{ MPa}$ ,  $B=210 \text{ MPa}$ ,  $n=0.3813$ ,  $C=0.033$ <sup>[17]</sup>。

## 3 结果及分析

### 3.1 应力分析

从图 4 可看出实验时主应变峰值达到  $7.84 \times 10^{-3}$ ,经(2)式计算发现主应力已超过其屈服极限 (473 MPa),同时也在数值模拟中发现等效应力达 645.2 MPa,故不能用该式计算应力,采用主应变表征冲击时的瞬态状况,通过对比模拟时的主应变曲线,发现峰值应变较为接近,数值模拟中最大主应变为  $8.287 \times 10^{-3}$ ,误差为 5.3%。

图 5 分别对比了实验和模拟中各类材料防护时铝合金板受冲击的应力-时间曲线,表 3 里列出了各曲线的峰值应力,从变化趋势和峰值来看,模拟与实验基本一致。图 6 为冲击点位移曲线,无防护时位移峰值为 5.58 mm,冲击时间 4.5 ms 左右,远小于有防护材料时的结果,ACF18、ACF28、丁腈橡胶防护时位移峰值分别为 3.16、3.64、4.06 mm,可知材料缓震吸能性能越好时冲击时间越长。

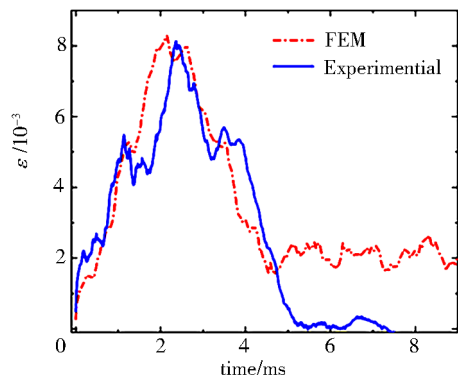
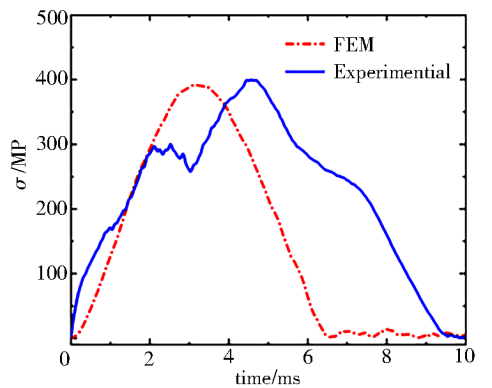
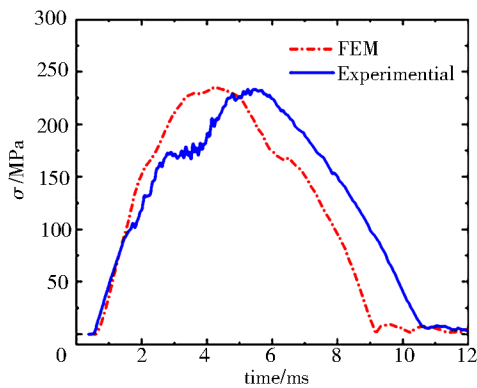


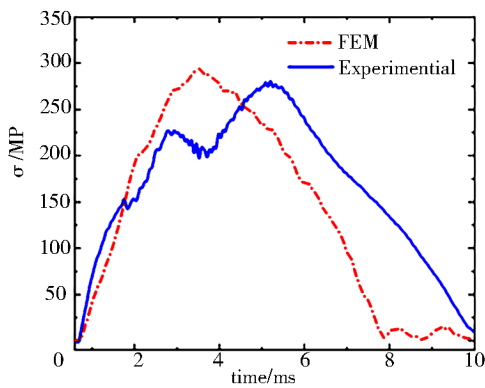
图4 实验和模拟无防护时的主应变-时间曲线  
Fig. 4 Principal strain-time curves of experiments and simulations without protection



(a) Nitrile rubber



(b) ACF18



(c) ACF28

图5 实验和模拟各防护类型的应力-时间曲线  
Fig. 5 Stress-time curves under various protection types of experiment and simulation

表3 实验和模拟各应力曲线峰值及误差

Tab. 3 Experiment and simulate the stress peak and error under various protection types

类型	实验值/MPa	模拟值/MPa	误差/%
无防护	>473	645.20	
20 mm 橡胶	399.63	392.02	1.90
20 mm ACF18	233.27	235.86	1.09
20 mm ACF28	280.15	294.04	4.72

橡胶防护时应力和位移较大,表明其减震缓冲能力较 ACF 材料差,且由于其密度和硬度较大,所以不适合于箭体的防护。ACF18 防护时应力、位移均小于 AF28, ACF18 密度小,硬度低,当发生碰撞时更容易变形,从而吸收能量,起到了减震吸能的效果。

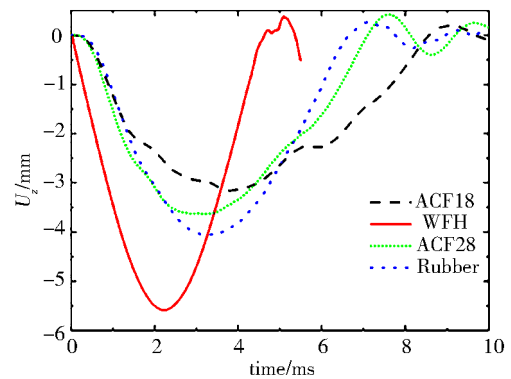


图6 铝合金板(上方)中心z方向位移

Fig. 6 Displacement of aluminum alloy plate (above) center in z direction

从实验的应变/应力-时间曲线可见,落球与防护材料或铝合金板接触后应变/应力迅速上升,而在峰值附近曲线出现了较明显的振荡,尤其是在无防护状态时,而在数值模拟中振荡较小,且冲击持续时间较小。出现上述现象的主要原因是实验时铝合金板两侧被卡槽夹持,而垂直方向并没有很好地完全约束,当较大质量的落球接触时会使约束松动,铝合金板会产生位移、弯曲,短时间内两者相互碰撞造成振荡,使接触应力出现很大波动,同时增大了冲击时间。

### 3.2 能量分析

冲击过程中能量遵循守恒定律,忽略摩擦耗散、热效应、气体压缩效应等损伤耗散,系统的总能量可以简化为落球动能和铝合金+缓冲材料(后称为模型)内能的总和。图7进一步对比了数值模拟时无防护(虚线表示)和 ACF18 防护下模型内能的变化,在冲击过程中,落球的动能逐渐减小和被吸收,转化为模型的内能,落球到最低位置时动能为0,此时内能达到最大,随后落球反弹,部分内能转变为小球动

能。可看出无防护冲击时模型产生了塑性变形耗散的能量,说明铝合金板发生了塑性变形,冲击结束时的内能基本为铝合金板塑性变形的能量;而在ACF18材料防护时ALLPD为0,没有塑性变形发生,铝合金板内能(ALLIE-7075/T651)在冲击结束时降为0,模型的内能主要是可恢复的应变能,说明ACF18在受冲击时发生了变形储存了这些能量,约为3.1 J。

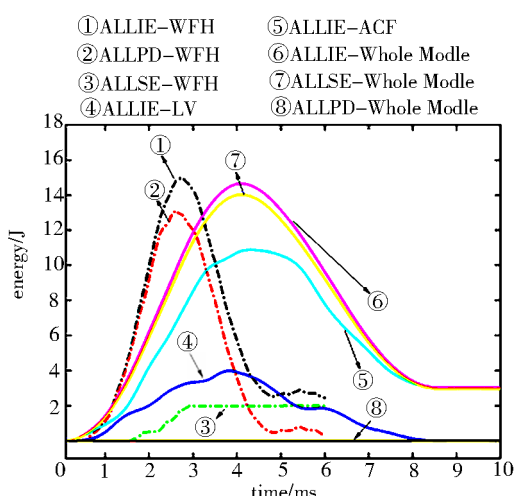


图7 无防护/ACF18材料防护时冲击能量曲线

Fig. 7 Model internal energy curve without protection / ACF18 material protection

ALLIE-塑性变形耗散的能量;ALLSE-可恢复的应变能;  
ALLPD-塑性变形耗散的能量

#### 4 结论

本文通过材料压缩试验获得了人工软骨仿生材料(ACF材料)不同应变率下的力学特性,以7075/T651铝合金板为防护对象进行了落球低速冲击实验,基于ABAQUS/Explicit分析了冲击应力和能量的变化,与落球冲击实验结果进行对比,结论如下。

(1) ACF材料的应力-应变曲线与其他泡沫材料类似,存在3个阶段,即弹性阶段、平台阶段、致密化阶段;且ACF材料的力学特性存在应变率效应,随着应变率的提高,其弹性模量、平台应力也增大。

(2) 实验和模拟结果均表明,无防护的铝合金板所受冲击应力超过其屈服极限,冲击区域发生了塑性变形,而经ACF材料防护后铝合金板所受应力较低,位移较小,不会发生塑性变形。证明ACF18材料缓冲吸能效果很好,优于橡胶且密度远低于橡胶,是更好的抗冲击材料。

(3) ACF18应变率效应不如ACF28明显,其密度、硬度和弹性模量较低,这导致ACF18在承受低速冲击时更容易发生压缩变形,将冲击动能转换为材料的应变能,从而更好地吸收冲击能量,所以铝合金

板受冲击的峰值应力也小。鉴于ACF18良好的缓震吸能性能及轻量、柔性好的特点,用作箭体防护可行性较高。

#### 参考文献

[1] 胡时胜,刘剑飞,冯建平. 硬质聚氨酯泡沫塑料动力学性能的研究[J]. 爆炸与冲击, 1996(04):373-376.

HU Shisheng, LIU Jianfei, FENG Jianping. Study on dynamic mechanical properties of rigid polyurethane foam [J]. Explosion and Shock Waves, 1996 (04): 373-376.

[2] 夏艳丽. 基于剪切增稠胶的柔性防护复合材料的制备及低速抗冲击性能研究[D]. 无锡:江南大学, 2018.

XIA Yanli. Preparation of flexible protective composite materials based on shear thickening fluid and study on their low-velocity impact resistance [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.

[3] MANE JV, CHANDRA S, SHARMA S, et al. Mechanical property evaluation of polyurethane foam under quasi-static and dynamic strain rates- an experimental study[J]. Procedia Engineering, 2017, 173(Complete): 726-731.

[4] SUBHASH G, LIU Qunli, GAO Xinlin. Quasistatic and high strain rate uniaxial compressive response of polymeric structural foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(7): 1113-1126.

[5] JEONG K Y, CHEON S S, MUNSHI M B. A constitutive model for polyurethane foam with strain rate sensitivity [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2012,26(7): 2033-2038.

[6] 林玉亮,卢芳云,王晓燕,等. 低密度聚氨酯泡沫压缩行为实验研究[J]. 高压物理学报, 2006(01): 88-92.

LIN Yuliang, LU Fangyun, WANG Xiaoyan, et al. Experimental study on compressive behavior of low density polyurethane foam [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006 (01): 88-92.

[7] 杨辛,夏勇,周青. 汽车低速碰撞下保险杠缓冲泡沫塑料件的损伤软化[C]// 中国汽车安全技术国际学术会议暨中国汽车工程学会汽车安全技术年会. 中国汽车工程学会, 2006.

YANG Xin, XIA Yong, ZHOU Qing. Damage softening of bumper cushion foam plastics under low-speed vehicle collisions [C]// International Conference on Automotive Safety Technology of China & Annual Meeting of Automotive Safety Technology of China Society of Automotive Engineers, China Society of Automotive Engineers, 2006.

[8] 雷鹏,付志强,张蕾,等. 基于Abaqus低密度泡沫模型型的EPE冲击仿真模拟[J]. 塑料科技, 2019,47(9):6.

LEI Peng, FU Zhiqiang, ZHANG Lei, et al. Impact simulation of EPE based on abaqus low density foam model [J]. Plastics Science and Technology, 2019,47(9): 6.

[9] 何玲. 聚氨酯材料冲击接触实验与数值研究[J]. 聚氨酯工业, 2012, 27(6): 3.

HE Ling. The polyurethane material impact contact testing and numerical value research[J]. Polyurethane Industry, 2012, 27(6):3.

[10] 申展, 陈东, 罗俊杰. 聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19):4.

SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Junjie. Simulation and analysis of dropping impact acceleration of polyethylene foam buffer system [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19):4.

[11] 陈马旭, 乐贵高. 带泡沫缓冲的导弹跌落仿真[J]. 兵工自动化, 2014(3): 34-35.

CHEN Maxu, LE Guigao. Simulation of missile drop with foam cushions [J]. Ordnance Industry Automation, 2014 (3) : 34-35.

[12] 鲁林, 李晓峰. 冲击环境作用下聚氨酯材料的应变率分布及吸能特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 213-219.

LU Lin, LI Xiaofeng . Research on strain rate distribution and energy absorption of polyurethane materials under shock environment [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1):213-219.

[13] 陈润峰, 石庚辰, 张力, 等. 人工软骨仿生材料在引信缓冲中的应用[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(6):8.

CHEN Runfeng, SHI Genchen, ZHANG Li, et al. Application of artificial cartilage biomimetic material in fuze buffer [J]. Journal of detection and control, 2020, 42 (6):8.

[14] NAGY A, KO W L, LINDHOLM U S. Mechanical behavior of foamed materials under dynamic compression [J]. Journal of Cellular Plastics, 1974.

[15] 樊智敏, 李龙, 王启林. 深海高压环境下O形密封圈密封性能分析[J]. 机电工程, 2019, 36(02):131-135.

FAN Zhimin, LI Long, WANG Qilin. Sealing performance analysis of O-ring seals in deep sea and high pressure environment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(02): 131-135.

[16] 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.

[17] 谢灿军, 童明波, 刘富, 等. 7075-T6铝合金动态力学实验及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(18):110-114, 125.

XIE Canjun, TONG Mingbo, LIU Fu, et al. Dynamic tests and constitutive model for 7075-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(18):110-114, 125.