

民机襟翼交联机构吸能元件的吸能特性

高煜翔¹, 陆建国¹, 方俊伟¹, 周晓宸², 席博伟³

(1. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 200135;

2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072;

3. 中国航空工业集团有限公司 庆安集团有限公司 航空设备研究所, 西安 710077)

摘 要: 采用有限元分析与冲击试验相结合的方式对膨胀管与波纹管的吸能特性进行探究:通过数值仿真分析对吸能元件的试验过程进行初步掌握,同时根据冲击试验结果对试验设计的不合理之处进行修正;然后开展两种吸能元件的动态冲击试验,探究其吸能特性,最终比较分析有限元仿真分析与落锤冲击试验的试验结果,选择效果理想的吸能元件应用到襟翼交联机构上。结果表明:无论是从吸能行程、吸能稳定性还是吸能结构的设计考虑,波纹管都是最适合应用到交联机构中的吸能元件,该吸能元件比吸能大,吸能过程平缓稳定,吸收能量之后只有塑性形变但结构不发生破坏,同时吸能行程短,吸能结构简单,便于安装拆卸。

关 键 词: 吸能元件; 襟翼交联机构; 数值仿真分析; 落锤冲击试验; 膨胀管; 波纹管

中图分类号: V214.1

文献标志码: A

Energy absorption characteristics of energy-absorbing elements of civil aircraft flap crosslinking mechanism

GAO Yuxiang¹, LU Jianguo¹, FANG Junwei¹,
ZHOU Xiaochen², XI Bowei³

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute,

Commercial Aircraft Corporation of China, Limited, Shanghai 200135, China;

2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Aviation Equipment Research Institute, Qing'an Group Company, Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Limited, Xi'an 710077, China)

Abstract: The energy absorption characteristics of expansion tube and bellows were explored by combining finite element analysis and impact test: the test process of energy-absorbing element was preliminarily mastered through numerical simulation analysis, and the irrationality of test design was corrected according to the impact test results; then the dynamic impact test of two kinds of energy-absorbing elements was carried out to explore their energy absorption characteristics. Finally, the test results of finite element simulation analysis and dropping-hammer impact test were compared and analyzed to select the energy-absorbing element with ideal effect to be applied to the flap crosslinking mechanism. The results showed that the bellows were the most suitable energy absorbing element for interconnecting strut, irrespective of considering the energy absorbing stroke, energy absorbing stability or the design of energy absorbing structure. The

收稿日期: 2021-06-23

作者简介: 高煜翔(1996—),男,硕士,主要从事机翼内外襟翼方面的研究。

引用格式: 高煜翔,陆建国,方俊伟,等. 民机襟翼交联机构吸能元件的吸能特性[J]. 航空动力学报,2022,37(8):1771-1779. GAO Yuxiang, LU Jianguo, FANG Junwei, et al. Energy absorption characteristics of energy-absorbing elements of civil aircraft flap crosslinking mechanism[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1771-1779.

specific energy absorption of bellows was large. The energy absorption process was gentle and stable. There was only plastic deformation after absorbing energy and the structure was not damaged. Besides, the energy absorption stroke of bellows was short and the energy absorption structure was simple, making it convenient for installation and disassembly.

Key words: energy-absorbing element; flap crosslinking mechanism; numerical simulation analysis; dropping-hammer impact test; expansion tube; bellows

飞机的襟翼交联机构在飞机的增升装置中扮演着非常重要的角色,一旦出现故障,会给飞机的飞行带来恶劣的影响,严重危害飞机的飞行安全。目前,欧美等发达国家在大型民机襟翼交联机构设计技术方面取得了一些成果:如在空客 A320、A340 以及 A380 系列飞机的襟翼驱动系统中,襟翼翼面间采用了交联作动器,其结构示意图如图 1 所示。但是目前国内在该方面的研究刚刚起步,相关的文献资料也非常有限,因此非常有必要对襟翼交联机构开展更加深入与详细的研究。

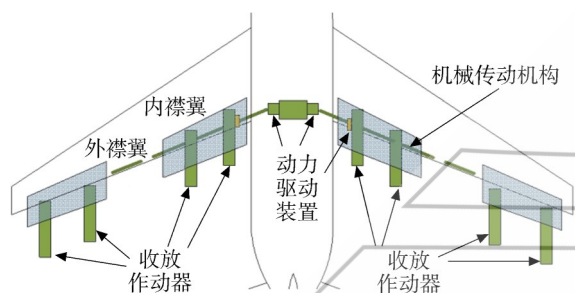


图 1 交联机构安装示意图

Fig.1 Installation diagram of interconnecting strut

襟翼交联机构在正常工作时,如果襟翼间相对位移超过交联系统的自由行程,作为制动结构的内外襟翼交联机构会受到一个峰值较大的冲击载荷,因此非常有必要在内外襟翼交联机构中增加动能吸收和耗散环节,以降低过渡过程的瞬态冲击载荷,保证襟翼系统的结构安全。

吸能元件^[1-3]作为襟翼交联机构的重要部件,用以在襟翼故障时吸收脱离翼面的冲击动能,降低冲击载荷。通过研究交联系统吸能元件的吸能效率合理应用,可以对襟翼交联机构的设计提出指导性建议,有助于提高襟翼系统的可靠性。吸能元件的主要设计要求有:具有较强的吸能能力,能够降低碰撞的初始峰值载荷,较短的吸能行程。而金属薄壁管由于其优异的能量吸收特性,被广泛应用各工程领域^[4-6]。金属薄壁管目前被广泛采用的吸能方式主要有三种:第一种是通过构件轴

向压溃变形吸收能量^[7-9];第二种是通过构件扩径塑性变形吸收能量^[10-12];第三种是通过构件撕裂变形吸收能量^[6,13-14]。

结合襟翼交联机构的结构设计、空间设计和吸能元件的设计要求,选择膨胀管^[15-16]与波纹管两种结构形式的吸能元件进行探究,最终得到合适的吸能元件。膨胀管具有吸能行程长、缓冲力平稳、体积小、结构简单易加工等优点^[17-18];波纹管是由多个波纹及端部直边段组成的圆形挠性元件,其吸能过程平稳且有较好的可控性,具有良好的抗弯曲、抗拉伸、抗压缩能力^[19]。

1 有限元数值模拟仿真

缓冲吸能过程是一个非常典型的冲击问题,不仅涉及到材料的非线性力学行为,同时还包含了相当复杂的接触现象,使用 Abaqus 软件对试验进行模拟,并使用 Abaqus/Explicit 求解器对模型求解,用以对试验现象进行初步掌握,发现试验设计不合理之处,继而对落锤冲击试验的相关参数进行修正。

1.1 有限元模型的建立

建立膨胀管的有限元模型,并根据实际做适当简化(如图 2):底座和落锤均视为刚体,使用有限元建模中的节点约束替代圆柱凸台对管件的约束作用,并将落锤撞击点准确定位为冲头中心。

膨胀管材料使用铝合金 7050-T7451,采用

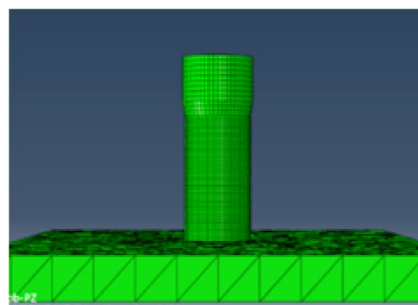


图 2 膨胀管有限元模型

Fig.2 Finite element model of expansion tube

Johnson-Cook 硬化准则和 Johnson-Cook 破坏准则,以破坏能量为标准考虑损伤演化,并考虑 7050-T7451 应变率带来的效应。冲头的材料采用 20CrMo 钢,采用 Johnson-Cook 本构模型,且不考虑材料的损伤破坏。

膨胀管件和钢制冲头之间不使用润滑剂,动摩擦因数设为 0.17。同时根据设计要求,交联机构吸能元件的冲击能量设置为 160 J,且碰撞初速度为 2.787 m/s。

波纹管试验的有限元模型(图 3)建立思路基本和膨胀管试验一致。

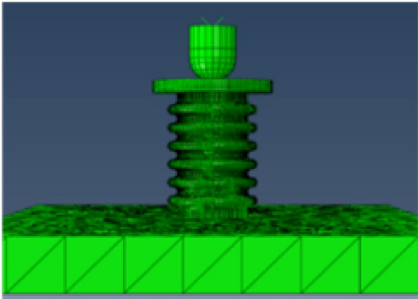


图 3 波纹管有限元模型

Fig.3 Finite element model of bellows

1.2 有限元仿真结果及分析

膨胀管模型的有限元数值模拟仿真是一个连续的冲击过程,图 4 所示为节选出来的膨胀管有限元仿真动态过程图,展示了膨胀管的变形:可以观察到随着冲头向下,膨胀管管壁被迫扩张,材料超过屈服强度,发生塑性变形,同时冲头和管件内壁产生强烈的摩擦,随着管壁逐渐扩张,落锤的冲击能量被转化为铝合金的塑性应变能,同时通过摩擦转化为内能消耗。

波纹管模型的仿真过程与膨胀管类似,图 5

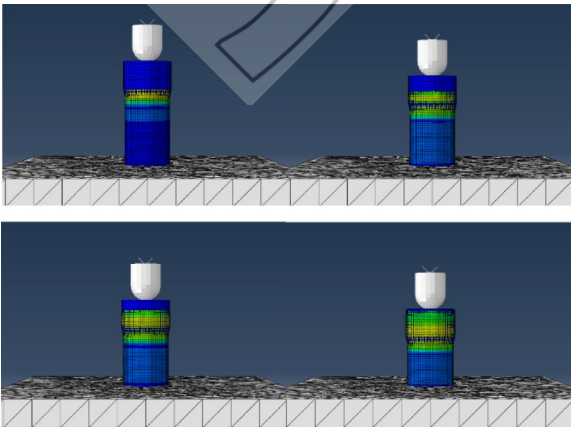


图 4 膨胀管仿真过程

Fig.4 Simulation process of expansion tube

所示为节选的波纹管有限元仿真动态过程图。可以观察到:随着冲头向下,波纹管的相邻波纹间距开始减小,管壁局部发生弯折,此部分材料超过屈服强度,发生塑性变形,随着波纹间距进一步减小,塑性区域在管件中均匀扩大,冲击能量转化为塑性应变能,落锤停止下落。同时可以看到,与膨胀管局部区域塑性屈服相比,波纹管塑性屈服区域广泛分布于整个管件。

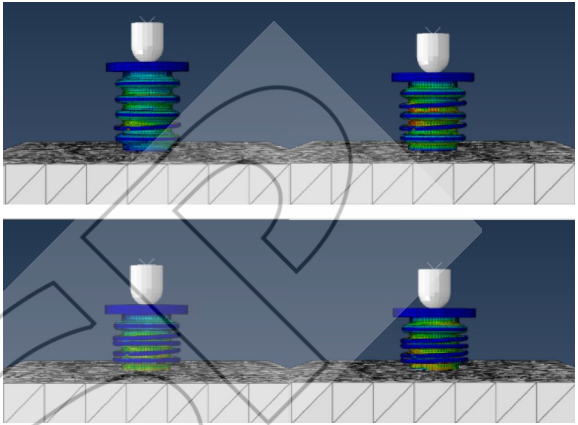


图 5 波纹管仿真过程

Fig.5 Simulation process of bellows

Abaqus 软件可以获得该有限元仿真过程中的“载荷-时间”曲线以及“位移-时间”曲线,然后通过函数结合得到“载荷-位移”曲线,经过滤波等方法处理过后的曲线如图 6 所示。可以看出,从载荷方面考虑,两类吸能元件的吸能过程均没有出现初始峰值载荷,波纹管相比于膨胀管能够更快地到达平台载荷(波纹管压缩 3 mm 左右到达平台载荷,膨胀管压缩 12 mm 左右到达平台载荷),且波纹管平台载荷大于膨胀管平台载荷(波纹管的平台载荷为 16 kN,膨胀管的平台载荷为 8 kN);从吸能行程考虑,波纹管的吸能行程为 12 mm 左右,膨胀管的吸能行程为 25 mm 左右。因此,从峰值载荷、平台载荷和吸能行程几个角度来看,波纹管相比膨胀管有巨大优势。

膨胀管管件质量为 1.34×10^{-5} kg,波纹管管件由于有折叠部分,总长度更长,厚度更厚,因此质量达到了 2.83×10^{-5} kg。但是吸能元件在实际运用时需要相应的冲头(图 7)配对。膨胀管的冲头由于需要持续挤入管件中,因而长度较长,而波纹管的冲头可以做得较为短小,因此波纹管的冲头质量远远小于膨胀管的。同时由于冲头采用密度远大于铝合金的材料,所以波纹管的吸能套装质量小于膨胀管。

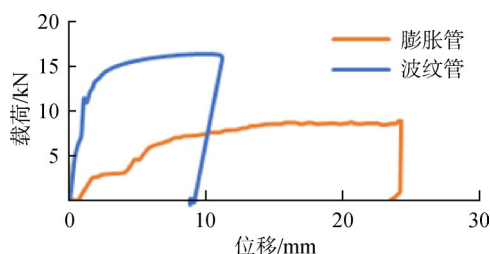


图6 膨胀管与波纹管的载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of expansion tube and bellows

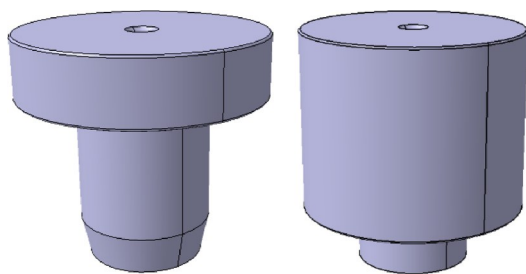


图7 膨胀管冲头与波纹管冲头

Fig.7 Punches of expansion tube and bellows

仿真结果表明,波纹管吸能装置的质量小于膨胀管吸能装置的质量,同时又有更优秀的平台载荷和吸能行程,因此波纹管为更合适的吸能元件。除此之外,通过膨胀管与波纹管的有限元仿真,对吸能元件管件的材料选择、结构特性以及压缩吸能特性有了更深层次的理解,对整个落锤冲击试验的过程也有了清晰的认识,同时也给后续的落锤冲击试验提供了很多方面的指导。

2 动态冲击试验

2.1 准静态压缩试验

动态冲击试验具有较大的破坏性且属于不可逆过程,试验件一旦受到冲击便不能再使用,因此在进行动态冲击试验之前,有必要预先对膨胀管和波纹管进行准静态轴向压缩试验并记录压缩过程,这样不仅可以对两种吸能元件的吸能特性以及压缩变形过程有初步的了解,还能有效减少试验成本,甚至还能避免不正确的操作方式对试验机造成损坏。

以膨胀管为例,准静态压缩过程如图8所示,试验后的吸能元件如图9所示,准静态压缩试验的曲线如图10所示。准静态压缩试验表明,膨胀管与波纹管的变形过程顺滑稳定,故两种吸能元件的材料选择、结构设计以及加工工艺都是符合要求的,可为后续动态冲击试验应用。

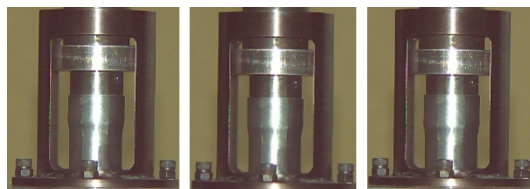


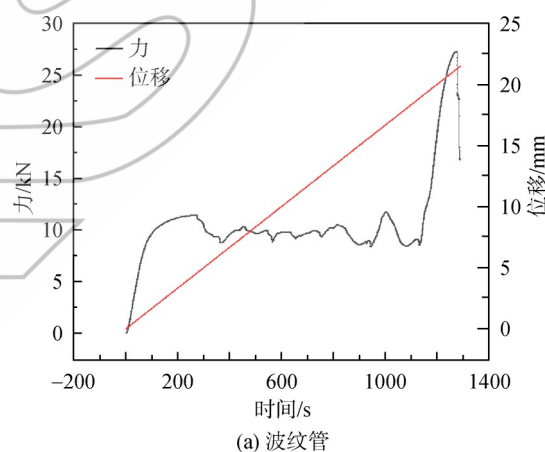
图8 高速摄像机下的膨胀管准静态压缩试验

Fig.8 Quasi-static compression test of expansion tube with high speed camera

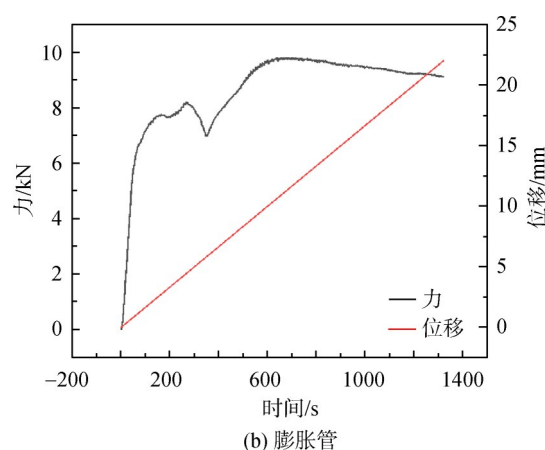


图9 准静态压缩试验后的吸能元件

Fig.9 Energy absorbing element after quasi-static compression test



(a) 波纹管



(b) 膨胀管

图10 准静态压缩试验曲线

Fig.10 Quasi-static compression test curves

2.2 冲击试验

波纹管与膨胀管的模型如图 11 所示。其中波纹管材料有两种:标准为 AMS4050H 的铝合金 7050-T7451 与标准为 GB/T3191-1998 的铝合金 2A12-T4,膨胀管材料为标准为 AMS4050H 的铝合金 7050-T7451。同时膨胀管上部制作出扩张倒口,方便和冲头进行配对,保证冲头对管件的压缩始终为轴向的。

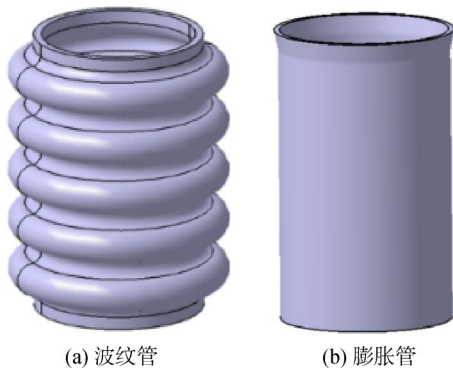


图 11 波纹管与膨胀管
Fig.11 Bellows and expansion tube

本次冲击试验使用的试验仪器为 JSL-3000 落锤式示波冲击试验机,如图 12 所示。该试验机的工作原理是自由落体:即由举升系统将固定落锤提升到一定的高度,然后释放落锤,使其在重力的作用下自由下落,对固定好的试验件进行高速冲击,冲击能量则由落锤质量和提升高度共同控制;同时,该试验机的传感器会将冲击试验过程中的载荷、位移等数据传输给电脑,生成“载荷-位移”曲线和“位移-时间”曲线。



图 12 落锤式示波冲击试验机
Fig.12 Dropping-hammer oscillometric impact testing machine

根据能量守恒定律有如下关系式:

$$W = mgh = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

其中 W 为落锤的总能量, m 为落锤的质量, h 为落锤提升的高度, g 为重力加速度, v 为落锤的冲击速度。

所以冲击速度与下落高度的关系为

$$v = \sqrt{2gh} \tag{2}$$

波纹管与膨胀管的装配示意图如图 13 所示。使用螺栓螺母将圆柱凸台与底座连接,然后将吸能元件套在圆柱凸台外侧,固定在底座上,同时在管件外部放置一个导轨,导轨为圆筒状,底部通过四个螺栓和底座固定,导轨内径和冲头外径配合,约束冲头只能沿轴向对管件进行压缩。通过这种方式可以限制落锤与吸能元件水平方向的运动,从而保证吸能元件在整个冲击试验过程中始终受轴向冲击。

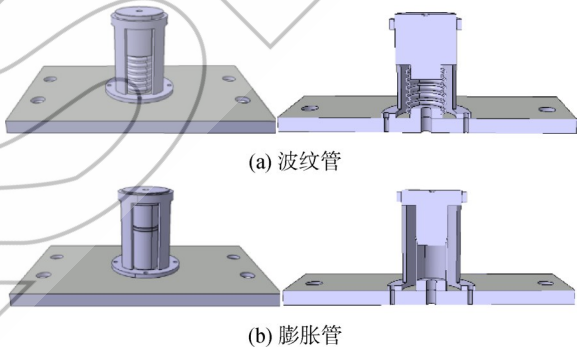


图 13 波纹管和膨胀管的试验装配示意图
Fig.13 Schematic diagram of test assembly of bellows and expansion tube

检查吸能元件的外观、结构,确保没有损伤,然后进行试验机调试,消除间隙,检查落锤系统、防二次冲击装置、测速装置、记录系统和高速摄像机系统等。

本次试验的落锤总能量 W 设计为 160 J,根据该能量值对配重块质量、悬挂高度进行匹配。同时考虑到在冲击速度匹配时落锤配重块的质量过大会加大试验难度,且管件材料为应变率不敏感材料,故通过加气加压的方式增加落锤冲击速度,减小配重块的质量。在本次试验中,落锤质量 m 为 36.7 kg,提升高度 h 为 0.45 m,重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ,可得冲击速度 v 为 2.97 m/s。试验步骤严格按照试验大纲的步骤进行试验,并记录每种工况下的冲击速度、冲击能量、冲头的接触力-时间曲线以及每次试验中冲头速度、冲头位移以

及吸收能量随时间的变化。同时,为了消除试验中可能出现的偶然性,7050-T7451 铝合金波纹管、2A12-T4 铝合金波纹管 and 7050-T7451 铝合金膨胀管各做五次试验,并除去由于试验件破损或断裂造成结果不符合预期的,最终三组试验各选取一个典型数据与曲线进行分析。

图 14 所示为高速摄像机记录的波纹管与膨胀管动态冲击试验过程,每个冲击过程节选三张照片。图 15 是动态冲击试验后的波纹管与膨胀管件照片。

2.3 试验结果及分析

图 16、图 17 和图 18 分别为 2A12-T4 波纹管、7050-T7451 波纹管和 7050-T7451 膨胀管的“位移-时间”曲线、“能量-时间”曲线以及对试验数据进行后处理之后得到的“载荷-位移”曲线。

由试验结果可以看出,三种吸能元件在吸收能量过程中的载荷-位移曲线与仿真结果基本一

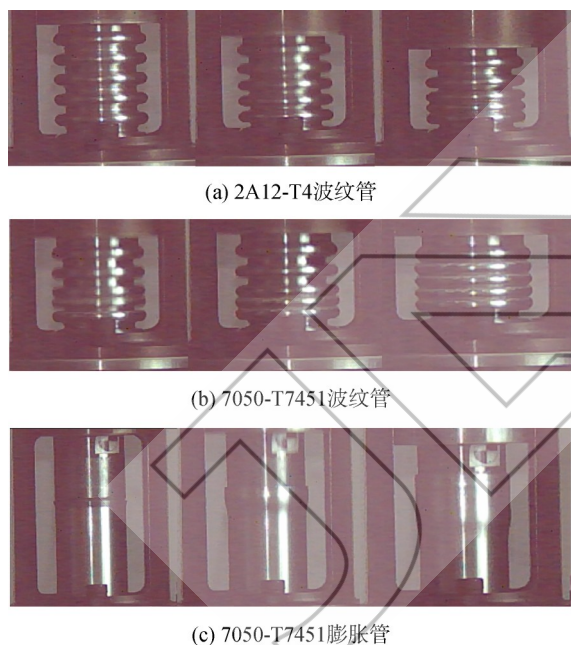
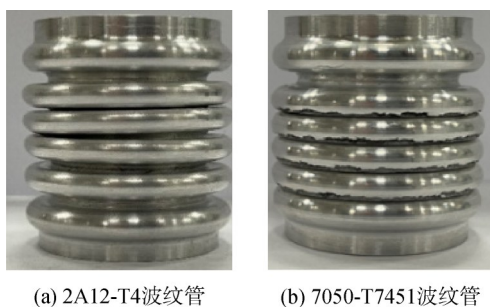


图 14 高速摄像机下的波纹管与膨胀管动态冲击过程
Fig.14 Dynamic impact process of bellows and expansion tube with high speed camera

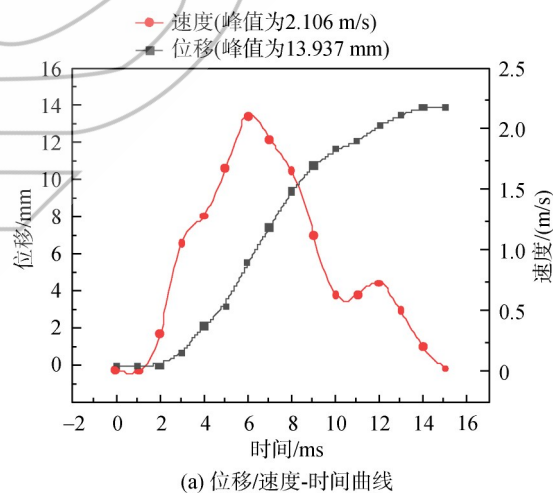


(c) 7050-T7451膨胀管

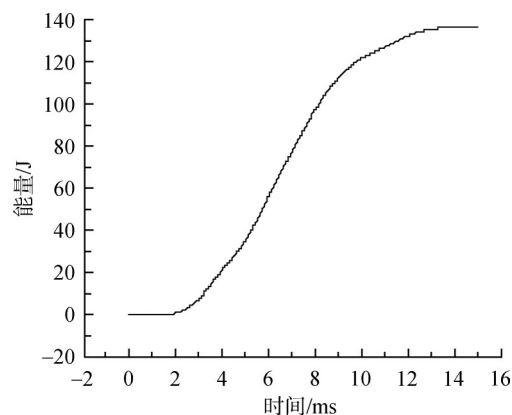
图 15 冲击试验后的波纹管与膨胀管

Fig.15 Bellows and expansion tube after impact test

致,由图 16~图 18 的曲线可以看出,2A12-T4 波纹管在吸收能量的过程中,只发生塑性形变,而 7050-T7451 波纹管的结构却遭到了破坏,因此 7050-T7451 波纹管的载荷会随着位移增大出现不稳定的波动,在每一个波纹外圆被破坏的同时,载荷会突然下降,在冲头下压到下一个波纹时载荷会恢复到最大值,然后载荷继续随着位移增大而减小,周而复始,不断循环,直至最后波纹管的



(a) 位移/速度-时间曲线



(b) 能量吸收-时间曲线

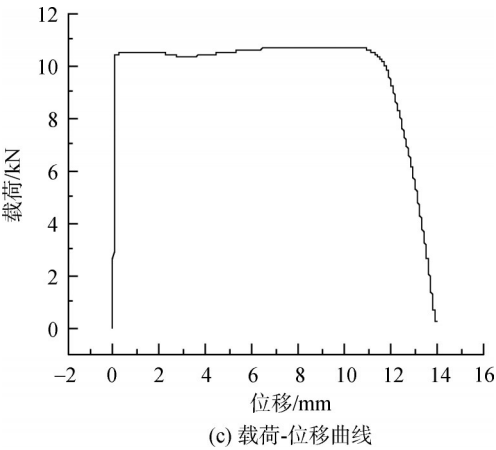


图 16 2A12-T4波纹管试验曲线
Fig.16 2A12-T4 bellows test curves

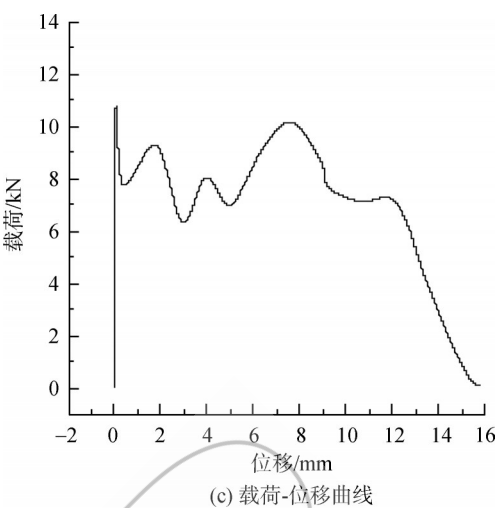
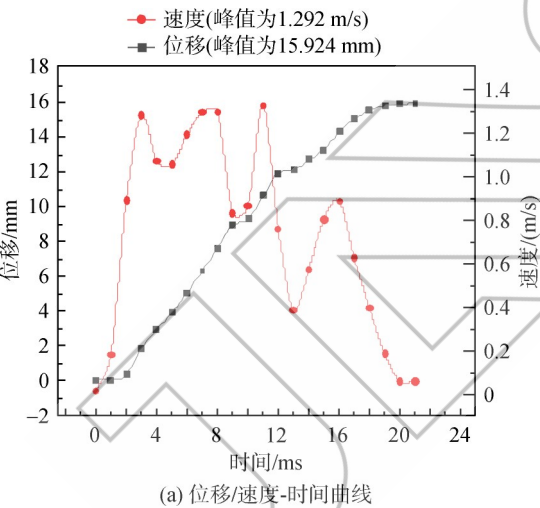
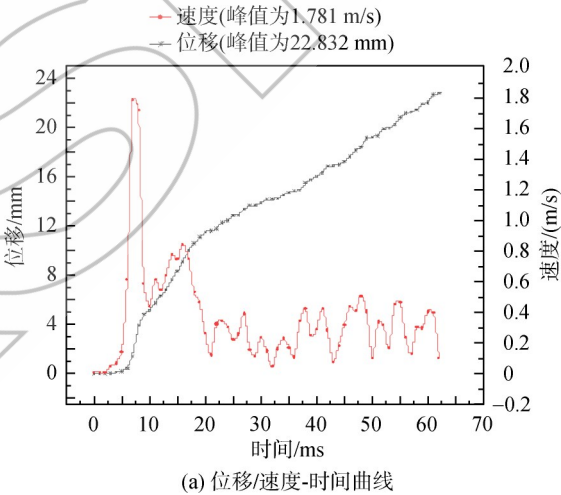


图 17 7050-T7451波纹管试验曲线
Fig.17 7050-T7451 bellows test curves

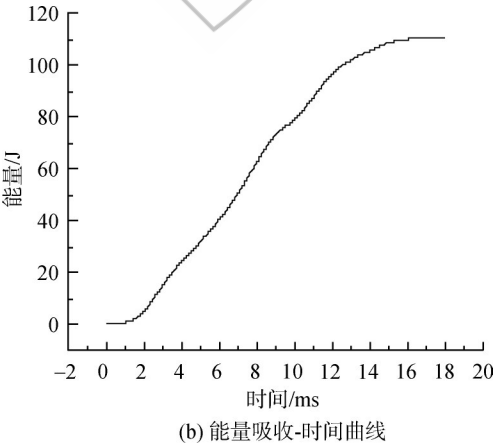
结构发生破坏;而 7050-T7451 膨胀管受到同样大的能量冲击时,吸收能量所需要的位移最大,这会
给吸能元件在交联机构中的安装、拆卸以及结构
布局造成更大影响。



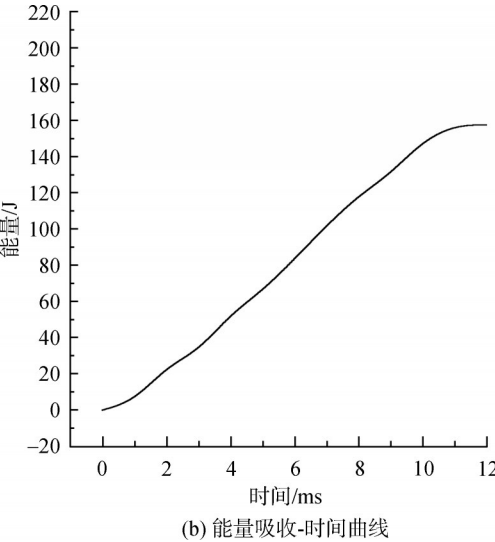
(a) 位移/速度-时间曲线



(a) 位移/速度-时间曲线



(b) 能量吸收-时间曲线



(b) 能量吸收-时间曲线

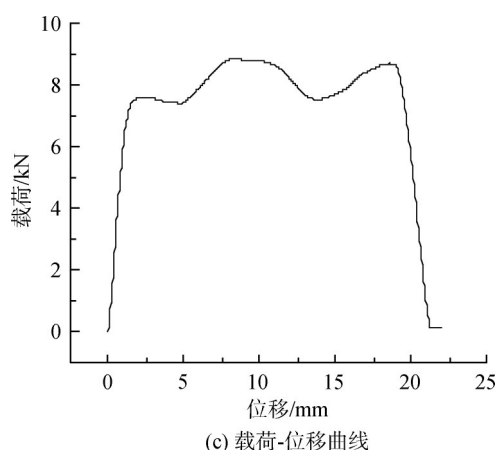


图18 7050-T7451膨胀管试验曲线

Fig.18 7050-T7451 expansion tube test curves

3 结 论

本文采用有限元模拟与动态冲击试验相结合的方法对缓冲吸能过程进行探究,通过仿真模拟对冲击试验的方法、参数等提供设计参考,然后根据冲击试验的结果来验证理论模型的可行性,相辅相成,缺一不可,并获得了如下结论:

1) 通过本次探究,对波纹管与膨胀管的吸能原理、吸能行程以及吸能能力有了一定程度的掌握,同时也为后续吸能元件的探究与应用提供了一定的参考。

2) 无论是从吸能行程、吸能稳定性还是吸能结构的设计考虑,材料为铝合金2A12-T4的波纹管都是最适合应用到交联机构中的吸能元件,该吸能元件比吸能大,吸能过程平缓稳定,吸收能量之后只有塑性形变但结构不发生破坏,同时吸能行程短,吸能结构简单,便于安装拆卸。

3) 本次对吸能元件缓冲吸能过程的研究方法具备可行性。以波纹管、膨胀管的仿真模拟为依据设计冲击试验,并且冲击试验获得的结果与仿真模拟的结果基本一致,验证了本次冲击试验设计的可行性,为吸能元件在缓冲吸能过程中的工程应用奠定了一定的基础。

同时,本次研究依然存在很多不足与改进的空间:本次试验虽然对材料不同或者结构不同的三种吸能元件各做了五组重复试验,但是最后的能量吸收曲线表明,吸能元件在整个缓冲吸能过程中吸收的能量略小于设计能量,后续拟改变初始能量设置值,在初始能量设置值160 J上下各设置几组能量值,探究造成误差的原因是试验件的

吸能能力已达到极限还是该冲击试验设计方案存在系统误差。

参考文献:

- [1] 张巍.轻质薄壁金属结构冲击吸能与数值研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2008.
ZHANG Wei.Impact energy absorption and numerical study of lightweight thin-walled metal structures[D].Dalian Liaoning:Dalian University of Technology,2008.(in Chinese)
- [2] 王志伟,姚著.蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J].机械工程学,2012,48(12):49-55.
WANG Zhiwei,YAO Zhu.Experimental study and finite element analysis of impact compression of honeycomb paperboard[J].Journal of Mechanical Engineering,2012,48(12):49-55.(in Chinese)
- [3] CHAWLA A,MUKHERJEE S,KUMAR D,et al.Prediction of crushing behaviour of honeycomb structures[J].International Journal of Crashworthiness,2003,8(3):229-235.
- [4] 邹猛,于用军,张荣荣,等.仿牛角结构薄壁管吸能特性仿真分[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(6):1863-1868.
ZOU Meng,YU Yongjun,ZHANG Rongrong,et al.Simulation analysis of energy absorption characteristics of thin-walled tubes with imitation horn structure[J].Journal of Jilin University (Engineering Edition),2015,45(6):1863-1868.(in Chinese)
- [5] 李志斌,虞吉林,郑志军,等.薄壁管及其泡沫金属填充结构耐撞性的实验研究[J].实验力学,2012,27(1):77-86.
LI Zhibin,YU Jilin,ZHENG Zhijun,et al.Experimental study on the crashworthiness of thin-walled pipe and its foamed metal filling structure[J].Experimental Mechanics,2012,27(1):77-86.(in Chinese)
- [6] 罗昌杰,刘荣强,邓宗全,等.薄壁金属管塑性变形缓冲器吸能特性的试验研究[J].振动与冲击,2010,29(4):101-106.
LUO Changjie,LIU Rongqiang,DENG Zongquan,et al.Experimental study on the energy absorption characteristics of plastic deformation buffers of thin-walled metal pipes[J].Vibration and Shock,2010,29(4):101-106.(in Chinese)
- [7] 王爱文,潘一山,李忠华,等.冲击危险巷道锚杆支护防冲原理解析[J].中国安全科学学报,2016,26(8):110-115.
WANG Aiwen,PAN Yishan,LI Zhonghua,et al.Analysis of the principle of bolt support for impact prevention in dangerous roadways[J].China Safety Science Journal,2016,26(8):110-115.(in Chinese)
- [8] 韦四江,李奎,吴怡凡,等.冲击地压巷道围岩失稳机制与控制技术研究综述[J].中国安全科学学报,2016,26(9):90-95.
WEI Sijiang,LI Kui,WU Yifan,et al.Summary of research on instability mechanism and control technology of roadway surrounding rock under rock burst[J].China Safety Science Journal,2016,26(9):90-95.(in Chinese)
- [9] 余同希,卢国兴.材料与结构的能量吸收[M].华云龙,译.

- 北京:化学工业出版社,2005:110-115.
- [10] 李志斌,虞吉林,郭刘伟.具有诱导结构的铝合金薄壁方管轴向压缩吸能性能试验研究[J].工程力学,2012,29(6):346-352.
- LI Zhibin, YU Jilin, GUO Liuwei. Experimental study on axial compression energy absorption performance of aluminum alloy thin-walled square tube with inductive structure[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6):346-352. (in Chinese)
- [11] 彭军.金属矩形管轴压失效模式与能量吸收特性研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- PENG Jun. Research on failure mode and energy absorption characteristics of metal rectangular tube under axial compression[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [12] 吴鸿超,梁增友,冯阳,等.薄壁金属管在中高速冲击下的缓冲特性研究[J].应用力学学报,2016,33(2):325-331.
- WU Hongchao, LIANG Zengyou, FENG Yang, et al. Research on the cushioning characteristics of thin-walled metal pipes under medium and high speed impact[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2):325-331. (in Chinese)
- [13] 杨巨文,唐治,何峰,等.矿用扩径式吸能构件吸能防冲特性研究[J].振动与冲击,2015,34(8):134-138,143.
- YANG Juwen, TANG Zhi, HE Feng, et al. Research on the energy-absorbing and anti-shock characteristics of mine-used expanded-diameter energy-absorbing components[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(8):134-138, 143. (in Chinese)
- [14] 余同希.方管能量耗散装置的研究[J].应用力学学报, 1985, 2(2):27-36.
- YU Tongxi. Research on square tube energy dissipation device[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1985, 2(2):27-36. (in Chinese)
- [15] 张晓龙.膨胀管式吸能器吸能特性分析及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- ZHANG Xiaolong. Analysis and application research on energy absorption characteristics of expandable tube type energy absorber[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [16] MORENO C, WILLIAMS T, BEAUMONT R, et al. Testing, simulation and evaluation of a novel hybrid energy absorber[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 93:11-27.
- [17] 马彦婷.胀管式缓冲器吸能特性及优化设计研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2014.
- MA Yanting. Research on the energy absorption characteristics and optimal design of the expandable tube buffer[D]. Qinhuangdao Hebei: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [18] SEIBI A C, BARSOUM I, MOLKI A. Experimental and numerical study of expanded aluminum and steel tubes[J]. Procedia Engineering, 2011, 10(7):3049-3055.
- [19] 张平,马建,那景新.波纹管耐撞性的理论研究[J].机械强度,2015,37(4):676-681.
- ZHANG Ping, MA Jian, NA Jingxin. Theoretical research on the crashworthiness of bellows[J]. Mechanical Strength, 2015, 37(4):676-681. (in Chinese)

(编辑:陈越)