

压扭超材料填充柱壳撞击固壁的动态力学行为研究

胡建星¹ 刘兴华² 王永滨² 张朝³ 贾娇^{3,*}

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(2 北京空间机电研究所, 北京 100094)

(3 北京航空航天大学飞行学院, 北京 100191)

摘要 航天器着陆时的冲击防护是保证航天器安全着陆的关键技术, 针对航天器腿式着陆器对缓冲装置的需求, 文章提出了一种新型能量吸收结构——将压扭双螺旋超材料填充于圆柱壳内部, 并基于ABAQUS软件建立了该吸能结构的有限元计算模型, 模拟了其撞击固壁时的动态力学行为, 开展了系统的参数化研究分析。模拟和分析结果表明: 1) 由于耦合作用, 填充了压扭双螺旋超材料的圆柱壳吸能盒的能量吸收能力逐渐会大于压扭双螺旋超材料和圆柱壳能量吸收的线性叠加; 2) 圆柱壳吸能盒壁厚和压扭双螺旋超材料连杆个数是影响其动态力学特性和能量吸收的关键参数。上述结论可为内充压扭超材料圆柱壳式吸能盒在航天器着陆器中的应用提供一定技术参考。

关键词 压扭双螺旋超材料 动态性能 比吸能 冲击防护 航天器软着陆

中图分类号: V415.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-8518(2023)05-0020-09

DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2023.05.003

Study on Dynamic Characteristics of Cylindrical Shell Filled with Compression Torsion Double Helix Metamaterial

HU Jianxing¹ LIU Xinghua² WANG Yongbin² ZHANG Zhao³ JIA Jiao^{3,*}

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

(3 School of Flight, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Spacecraft landing impact protection is the key technology to ensure the safe landing of spacecraft. Aiming at the demand of buffer device in legged lander of spacecraft, a new energy absorption structure is proposed in this paper. The new energy-absorbing structure is filling with a compression-torsion double-helix metamaterial inside a cylindrical shell. Based on ABAQUS platform, a finite element model is established to investigate the dynamic mechanical behavior of the new energy-absorbing structure impacting onto a solid wall, and then parametric studies are performed. These

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 中国航天科技集团航天进入减速与着陆技术实验室开放基金 (EDL19092138)

引用格式: 胡建星, 刘兴华, 王永滨, 等. 压扭超材料填充柱壳撞击固壁的动态力学行为研究[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(5): 20-28.

HU Jianxing, LIU Xinghua, WANG Yongbin, et al. Study on Dynamic Characteristics of Cylindrical Shell Filled with Compression Torsion Double Helix Metamaterial[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(5): 20-28. (in Chinese)

results indicate that due to the coupling effect, the energy absorption of the new energy-absorbing structure will gradually be greater than the linear superposition of the energy absorption of the compression-torsion double-helix metamaterial and the cylindrical shell. And the wall thickness of cylindrical shell and the number of compression-torsion double helix metamaterial links are the key parameters affecting its dynamic mechanical characteristics and energy absorption. These results can provide technical reference for the application of the cylindrical shell buffer device filled with compression-torsion metamaterial in the impact protection of spacecraft soft landing.

Keywords compression-torsion double helix metamaterial; dynamic behavior; specific energy absorption; impact protection; spacecraft soft landing

0 引言

深空探测是人类探索宇宙奥秘、开发天体资源、拓展空间疆域、实施技术创新的重要领域^[1-4]。随着“嫦娥五号”返回器携带月壤降落在内蒙古四子王旗境内,中国探月工程三期已经完美收官。未来载人月球探测以及月球永久基地的建设,需要将大量人员物资常态化地运送至月球。着陆时的冲击防护是航天器在月面实现软着陆,将人员和物资安全送抵月球的关键技术。软着陆航天器多采用腿式着陆器,腿式着陆器是通过在着陆腿内安装缓冲装置,通过缓冲装置的塑性变形来耗散软着陆时的冲击能量^[5-6]。

柱壳吸能盒是一种较好的冲击缓冲装置,在轴压下具有稳定的渐进变形模式,其主要通过塑形变形耗散冲击能量,具有低成本、易加工、易安装的优点,被广泛用作冲击防护结构。目前圆柱壳在轴向载荷作用下的力学性能和能量吸收已有较成熟的预测模型。早期 Alexander 和 Alfred 基于圆柱壳轴压时的最终变形模式,建立了金属圆柱壳的塑性铰模型,对圆柱壳轴向压缩时的平均载荷进行了预测^[7-8];随后 Johnson 和 Jones 对 Alexander 模型作了改进,考虑了瞬时几何构型,并考虑了冲击载荷作用时的应变率效应^[9-10]。进入 21 世纪后,关于圆柱壳吸能特性的研究又有了一些新进展,例如:Guillow 等发现圆形铝管轴向压缩出现了轴对称变形、非对称变形和混合变形 3 种模式,管的直径与厚度之比和长度与厚度之比对变形模式有重要影响^[11];Jandaghi 等在圆柱壳上引入了梯度壁厚,使圆柱壳的吸能特性得到显著提升^[12];朱文波等发现圆柱壳的平均压溃载荷和比吸能随冲击速度的增加而增加^[13];Alavi 等研究发现多单元结构的薄壁管比标准截面的薄壁管具有更高的比吸能^[14];Zarei 等以吸能盒填充的泡沫铝密度作为设计变量,对吸能盒进行了优化设计,吸能效果得到明显改善^[15];熊锋研究了泡沫铝填充吸能盒的多角度冲击抗撞性能^[16];周冠将双箭头结构填充吸能盒,讨论分析了结构参数对吸能盒耐撞性能的影响^[17];王陶以三维内凹六边形结构为填充材料,优化了填充吸能盒在轴向载荷作用下的力学性能,提高了吸能盒的耐撞性^[18]。上述研究表明,在吸能盒内部填充吸能材料可以显著提高吸能盒的能量吸收效率。

近年来,仿生概念为超材料设计提供了新思路,许骏课题组设计了一种受 DNA 结构启发的新型压扭双螺旋超材料,探究了其力学行为^[19-20]和机械逻辑开关性能^[21],研究结果表明:压扭双螺旋超材料具有低频域和超宽带隙的独特特征,意味着其在应力波调控和结构冲击防护领域具有较好的发展潜能。此外,压扭超材料在受到轴向载荷时呈现扭转运动,摩擦阻尼显著增加,能量吸收性能大幅提升^[22-24]。为了探究航天器着陆缓冲时具有广泛适应性、同时兼顾效益和成本的冲击防护新技术,本文借鉴传统轻质吸能材料填充吸能盒的思想,将仿生的压扭双螺旋超材料填充于圆柱壳吸能盒结构,研究压扭超材料填充圆柱壳吸能盒撞击固壁的动态力学行为和能量耦合吸收特性。

1 模型建立与仿真分析

1.1 模型建立

本文中压扭双螺旋超材料共由 9 根杆组成(2 根螺旋杆和 7 根直连杆)。其中, 2 根螺旋杆绕同一个中心轴反向平行盘旋 360°, 7 根等间距分布的连杆在端部与螺旋杆相连, 整体构形如同 DNA 的双螺旋结构, 具体形式见图 1。该材料单胞的几何尺寸如表 1 所示。

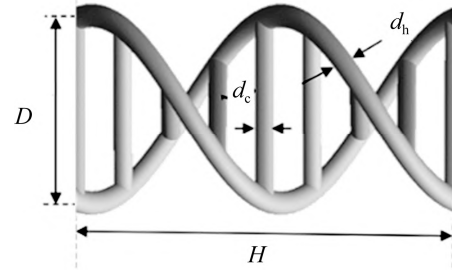


图 1 压扭双螺旋超材料结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of compression-torsion double helix metamaterial

表 1 压扭双螺旋超材料的几何尺寸

Tab.1 Geometric dimensions of compression-torsion double helix metamaterial

高度 H/mm	螺旋直径 D/mm	连杆直径 d_c/mm	螺旋杆直径 d_h/mm
100	48	5.6	5.6

为了和压扭双螺旋超材料尺寸相匹配, 建立了如图 2 (a) 所示的压扭双螺旋超材料填充圆柱壳撞击固壁的有限元模型。该模型中, 圆柱壳内壁直径和高分别为 60 mm 和 100 mm, 采用绑定约束 (Tie Constraint) 将质量块 (即集中质量 M)、圆柱壳结构及压扭双螺旋超材料的一端相连接; 对质量块、圆柱壳和压扭双螺旋超材料赋予撞击固壁的初速度为 3 m/s; 为了使撞击时结构充分变形利于结果分析, 质量块设定为 80 kg, 采用离散刚体建模。对压扭双螺旋超材料和圆柱壳结构分别采用显式实体单元和壳单元进行离散, 通过网格收敛性分析最终确定实体单元和壳单元尺寸分别为 1.3 mm 和 2 mm。模型中接触算法均采用面面接触, 圆柱壳和压扭双螺旋超材料的基材料均选用铝合金, 采用理想弹塑性材料本构模型, 具体材料参数为: 密度 2 700 kg/m³, 弹性模量 68.2 GPa, 泊松比 0.33, 屈服应力 80 MPa^[25]。

为了比较压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构的耐撞性, 本文还分别建立了圆柱壳和压扭双螺旋超材料撞击固壁的仿真模型, 见图 2 (b) 和图 2 (c)。

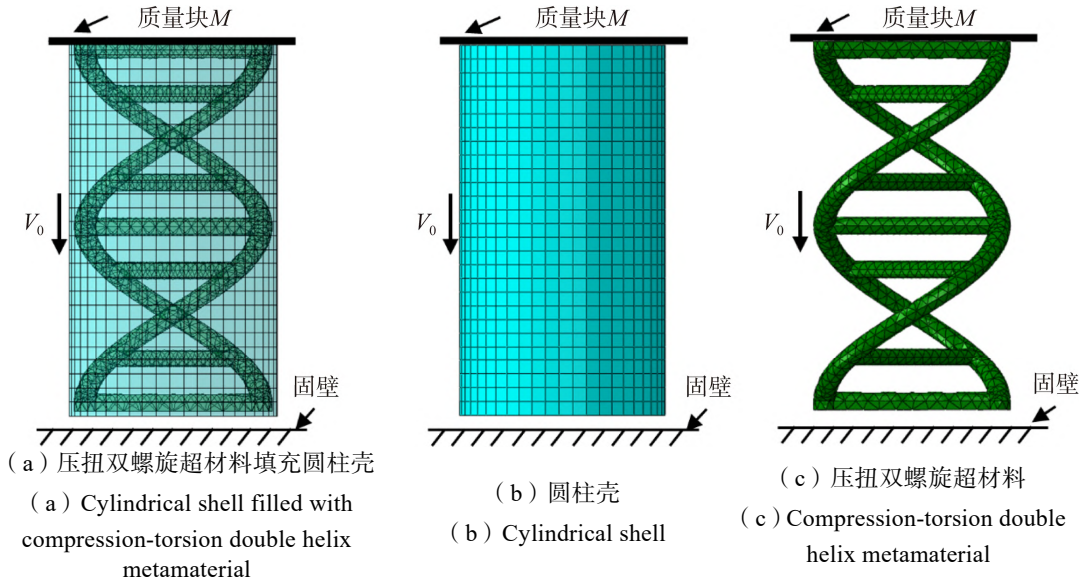


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element models

1.2 仿真分析

对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁的仿真模型进行计算, 计算得到的冲击力-位移曲线和能量吸收-位移曲线, 如图 3 所示。由图 3 (a) 可知, 压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁时, 冲击力首先达到初始峰值, 然后迅速下降, 稳定在一个平台力附近波动, 当结构变形达到密实时, 冲击力

又迅速增加, 这与圆柱壳轴向压溃模式一样。进一步分析可知, 压扭双螺旋超材料填充的圆柱壳和无填充的圆柱壳的初始峰值力和平台力分别为 (8 823 N, 4 662 N) 和 (7 566 N, 2 810 N), 提升幅度达到 16.6% 和 65.9%。由图 3 (b) 可知, 随着变形的增加, 压扭双螺旋超材料填充圆柱壳的能量吸收会逐渐大于压扭双螺旋超材料和圆柱壳能量吸收的线性叠加。这是由于圆柱壳内部的压扭双螺旋超材料和圆柱壳变形相耦合, 使得两者变形更充分, 从而耗散了更多的冲击能量。综上, 内充压扭双螺旋超材料可显著提高圆柱壳的平台力, 且由于压扭双螺旋超材料和柱壳变形模式的耦合, 使其能量吸收能力得到进一步提高。

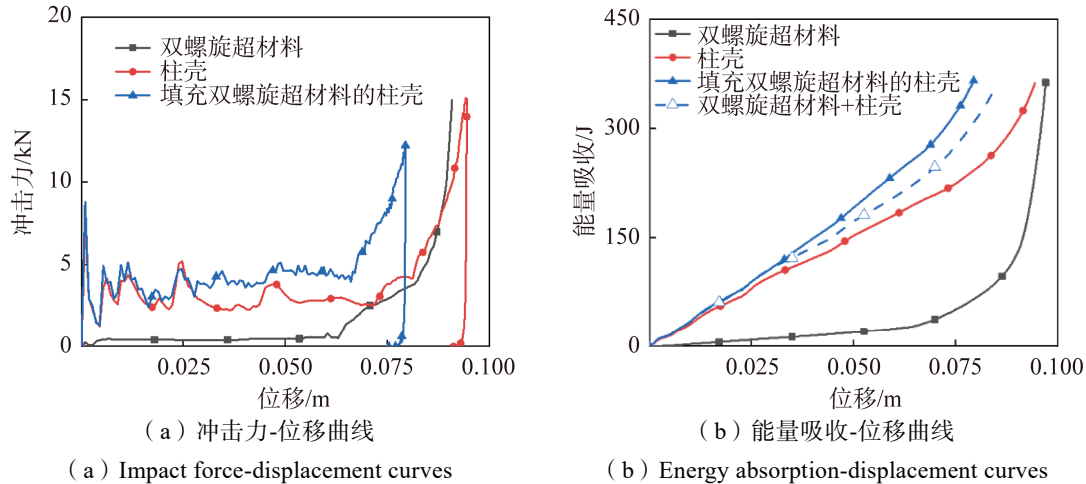


图 3 压扭双螺旋超材料填充圆柱壳撞击固壁的仿真结果

Fig.3 Results of cylindrical shell filled with compression-torsion double helix metamaterial impacted onto a solid wall

2 参数讨论

2.1 初始冲击能量

通常要求着陆吸能器件能够承受住大小不同的冲击能量。因此, 本节将变化集中质量块的质量, 以考察压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁时的动态力学行为, 计算分析结果见图 4。由图 4 (a) 可知, 通过增大集中质量来增加冲击能量对平台力影响不大, 但结构的变形在逐渐增大, 进而可耗散更多的能量; 由图 4 (b) 可知, 能量吸收-位移曲线的斜率不随集中质量 (即冲击能量) 的增加而改变, 表明该结构拥有较稳定的耗能模式, 是一种较好的吸能结构型式。

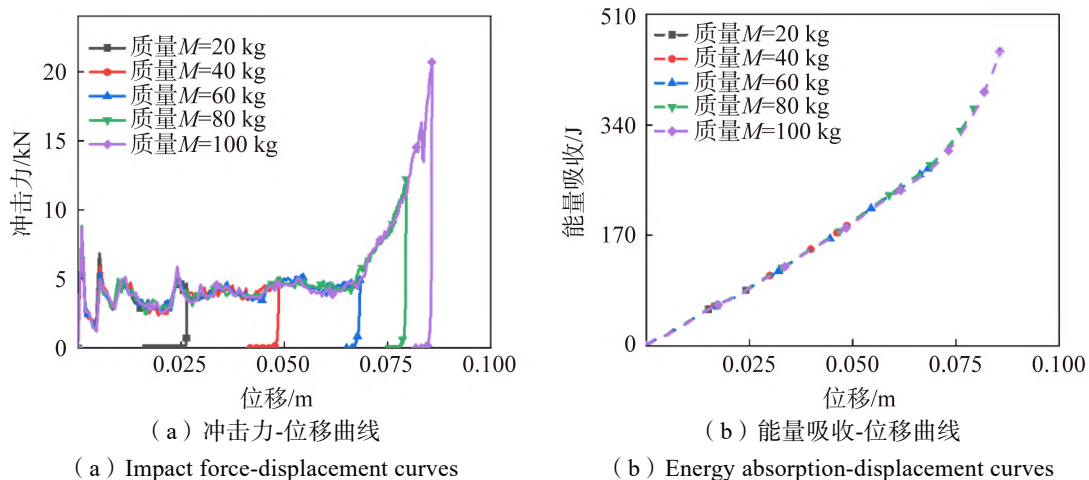


图 4 冲击能量对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁力学性能的影响

Fig.4 The influence of impact energy on mechanical properties of cylindrical shell filled with compression-torsion double helical metamaterials impacted onto a solid wall

2.2 圆柱壳壁厚

厚度是圆柱壳压溃模式和耗能的关键参数,本节重点分析了圆柱壳厚度对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁动态行为的影响。图5给出了圆柱壳厚度 T 为0.4、0.6、0.8、1 mm时对应的冲击力-位移和能量吸收-位移曲线。由图5可知,随着圆柱壳壁厚的增加,结构的初始峰值力和平台力都有显著增加,且在相同冲击能量下,结构的变形显著降低。为了定量分析圆柱壳壁厚的影响,表2列出了图5中不同圆柱壳壁厚对应的初始峰值力、平台力和最大压缩位移。由表2可知,圆柱壳壁厚从0.4 mm增加到1.0 mm,初始峰值力和平台力增加的幅度分别为102.0%和259.1%,最大压缩位移降幅达到41.2%。上述结果充分说明圆柱壳厚度是影响压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构动态力学行为和能量吸收的关键参数。

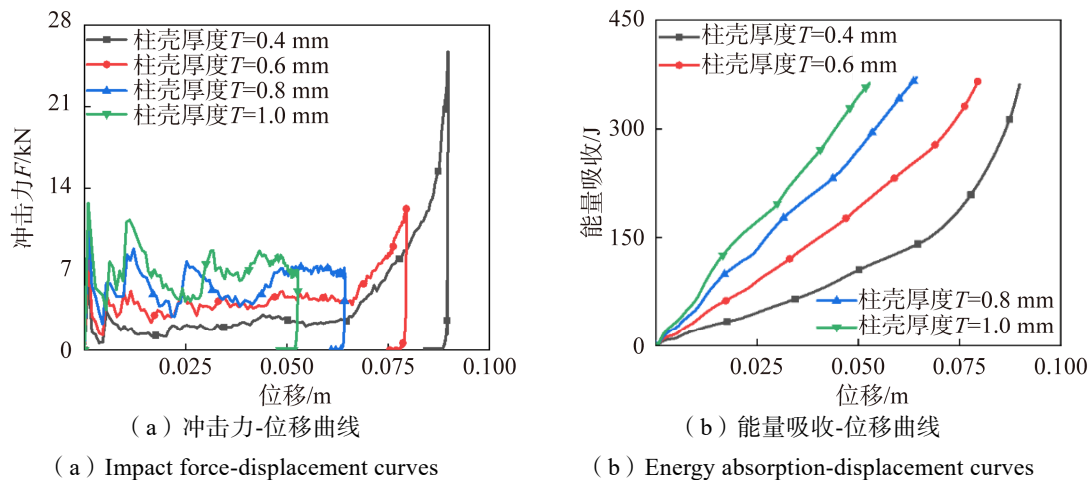


图5 柱壳厚度对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁力学性能的影响

Fig.5 The influence of cylindrical shell thickness on mechanical properties of cylindrical shell filled with compression-torsion double helical metamaterials impacted onto a solid wall

表2 圆柱壳壁厚对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁力学性能的影响

Tab.2 Effect of cylindrical shell wall thickness on mechanical properties of cylindrical shell filled with compression-torsion double helical metamaterials impacted onto a solid wall

壁厚/mm	初始峰值力/N	平台力/N	最大压缩位移/mm
0.4	6 300	2 002	88.4
0.6	8 823	4 462	77.8
0.8	11 100	5 690	63.7
1.0	12 723	7 190	52.0

2.3 压扭双螺旋超材料的连杆个数

文献[12]指出,连杆个数会显著影响压扭双螺旋超材料的力学性能。为了研究连杆个数的影响,本节设计了连杆数分别为0、1、3和7时的压扭双螺旋超材料结构(如图6所示),并将计算结果和无填充的圆柱壳进行了对比,结果如表3所示。由表3可知:1)压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁的初始峰值力会显著高于圆柱壳的值,但连杆个数对初始峰值力影响并不大,这主要是因为压扭双螺旋超材料增强了圆柱壳初始的屈曲刚度,但连杆个数对初始刚度的增加不明显。2)连杆个数对平台力和最大压缩位移有显著影响。随着连杆个数从0增至7,平台力从3 354 N增加到了4 462 N,增幅达33.1%;最大压缩位移从87.4 mm降到77.8 mm,降幅达11.1%。这主要是由于随着压缩位移的增加,压扭双螺旋超材料连杆之间的相互接触会提高结构的承载力,且连杆个数越多,承载力增加的越明显。

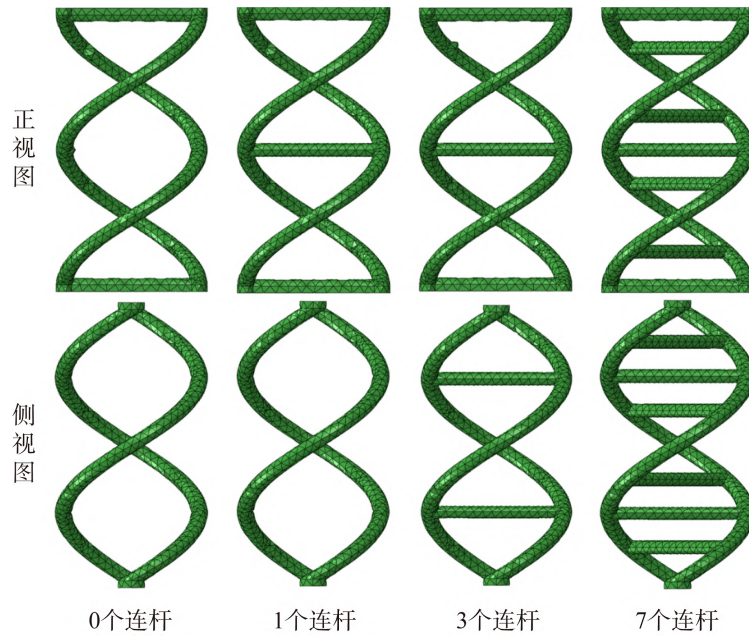


图 6 不同连杆个数的压扭双螺旋超材料

Fig.6 Compression-torsion double helical metamaterials with links

表 3 连杆个数对压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构撞击固壁力学性能的影响

Tab.3 Effect of links on mechanical properties of cylindrical shell filled with compression-torsion double helix metamaterial impacted onto a solid wall

工况	初始峰值力/N	平台力/N	最大压缩位移/mm
圆柱壳	7 566	2 810	94.5
0 个连杆	8 996	3 354	87.4
1 个连杆	8 778	3 489	86.1
3 个连杆	8 516	4 603	83.4
7 个连杆	8 823	4 462	77.8

2.4 实心/空心双螺旋超材料的比较

综上所述,压扭双螺旋超材料填充圆柱壳后会显著提高柱壳的承载力及能量吸收能力。从比吸能角度考虑,虽然压扭双螺旋超材料的实心杆件对提高整个结构的承载力和总的能量吸收有明显效果,但由于杆件不能像薄壳一样充分变形,反而会降低整个结构的比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA)。本节将压扭双螺旋超材料的实心杆件均替换成空心杆件,保持空心杆件厚度和圆柱壳厚度一致,均为 0.6 mm,然后变换连杆数分别为 0、1、3、7,计算空心压扭双螺旋超材料填充柱壳时的冲击力与比吸能,并与实心状态的结果进行了对比,对比分析结果如图 7、图 8 所示。

由图 7 可知,相同冲击能量下,由空心压扭双螺旋超材料填充的柱壳,其压缩位移较实心填充情形会略有增加,但两者的初始峰值力和平台力却相当。这表明空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳具有更好的能量吸收能力。如图 8 所示,相比实心压扭双螺旋超材料,空心压扭双螺旋超材料具有更小的质量,因此其 SEA 得到了显著改善。尽管空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳的比吸能明显高于实心压扭双螺旋超材料填充的圆柱壳,但依然低于圆柱壳的比吸能。这是由于填充的空心压扭双螺旋超材料发生的变形模式主要是管的径向压缩和弯曲变形,没有圆柱壳轴向压缩变形对材料变形的利用程度大。

为了进一步分析壁厚对能量吸收的影响,选择 0 个连杆空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳为模型,固定圆柱壳壁厚 $T=0.6\text{ mm}$,分析不同空心压扭双螺旋超材料壁厚 T_1 对结构比吸能的影响,计算结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着 T/T_1 比值的增大,0 个连杆空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳的比吸能逐

渐增大,当 $T/T_1=1.5$ 时,空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳的比吸能为圆柱壳的 91.7%,总的能量吸收是圆柱壳的 1.2 倍。这表明空心压扭双螺旋超材料壁厚和圆柱壳壁厚的匹配程度对结构比吸能有影响。

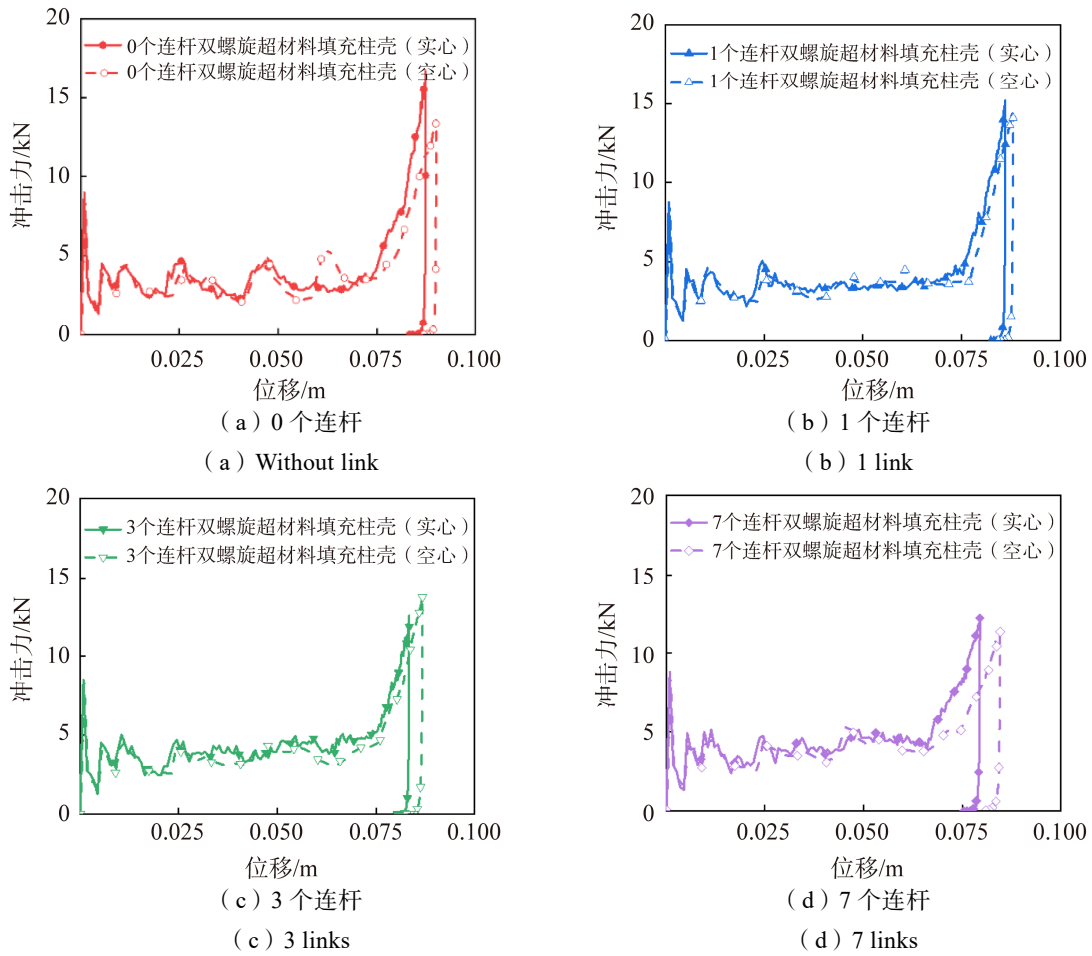


图7 连杆数不同的实心 and 空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳动态性能比较

Fig.7 Comparison of dynamic behavior of cylindrical shells filled with solid or hollow compression-torsion double helix metamaterials with different number of links

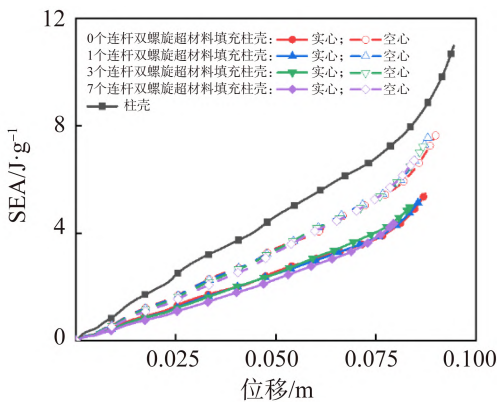


图8 实心 and 空心压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构的比吸能

Fig.8 Specific energy absorption (SEA) of cylindrical shells filled with solid and hollow compression-torsion double helix metamaterials

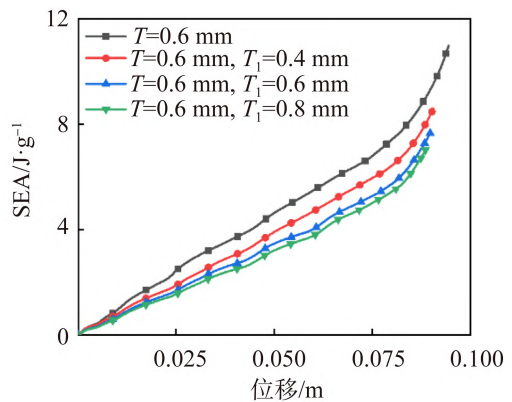


图9 0个连杆填充不同壁厚的空心压扭双螺旋超材料圆柱壳的比吸能

Fig.9 Effect of wall thickness on SEA of cylindrical shells filled with hollow compression-torsion double helix metamaterials with 0 link

3 结束语

本文研究了压扭双螺旋超材料填充圆柱壳吸能盒撞击固壁时的动态力学行为和能量吸收特性, 得出以下结论: 1) 内充压扭双螺旋超材料圆柱壳吸能盒的平台力和能量吸收能力显著高于无填充的圆柱壳吸能盒, 且耗能模式稳定, 是一种较好的吸能缓冲结构; 2) 圆柱壳厚度和内充压扭双螺旋超材料的连杆个数是影响压扭双螺旋超材料填充圆柱壳结构动态力学行为和能量吸收的关键参数, 通过调整连杆个数和空心压扭双螺旋超材料的壁厚, 可使其比吸能逐渐接近圆柱壳的比吸能。本文的研究结果可为内充压扭超材料柱壳缓冲装置在航天器软着陆的冲击防护应用提供重要科学支撑。

参考文献(References)

- [1] 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13-18.
YE Peijian, PENG Jing. Deep Space Exploration and Its Prospect in China[J]. Strategic Study of CAE, 2006, 8(10): 13-18. (in Chinese)
- [2] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 月球探测计划研究进展[J]. 地球物理学进展, 2012(6): 2296-2307.
ZHENG Wei, XU Houze, ZHONG Min, et al. Progress in International Lunar Exploration Programs[J]. Progress in Geophysics, 2012(6): 2296-2307. (in Chinese)
- [3] NOVARA M, KASSING D. The Leda Mission: Exploration Opportunities Prompted by a Return to the Moon[J]. Advance in Space Research, 1997, 19(10): 1629-1635.
- [4] PARKINSON R C. The Use of System Models in the EuroMoon Spacecraft Design[J]. Acta Astronautica, 1999, 44(7): 437-443.
- [5] 李萌. 腿式着陆缓冲装置吸能特性及软着陆过程动力学仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Meng. Research On Energy Absorbers of Legged-type Lander and Dynamic Simulation on its Soft Landing Process[D]: Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 李萌, 刘荣强, 郭宏伟, 等. 腿式着陆器用不同拓扑结构金属蜂窝吸能特性优化设计[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 7-14.
LI Meng, LIU Rongqiang, GUO Hongwei, et al. Crashworthiness Optimization of Different Topological Metal Honeycombs Used in Legged-typed Lander[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(21): 7-14. (in Chinese)
- [7] ALEXANDER J M. An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960(1): 10-15.
- [8] ALFRED P. The Large-Scale Crumpling of Thin Cylindrical Columns[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960(1): 1-9.
- [9] JOHNSON W, REID S. Metallic Energy Dissipating Systems[J]. Applied Mechanics Reviews, 1978, 31(3): 277-288.
- [10] JONES W A. Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4(4): 243-270.
- [11] GUILLOW S R, LU G, GRZEBIETA R H. Quasi-static Axial Compression of Thin-walled Circular Aluminium Tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2103-2123.
- [12] JANDAGHI SHAHI V, MARZBANRAD J. Analytical and Experimental Studies on Quasi-Static Axial Crush Behavior of Thin-Walled Tailor-Made Aluminum Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 24-37.
- [13] 朱文波, 杨黎明, 余同希. 薄壁圆管轴向冲击下的动态特性研究[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2014, 27(2): 5.
ZHU Wenbo, YANG Liming, YU Tongxi. Study on Dynamic Properties of Thin-walled Circular Tubes under Axial Compression[J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2014, 27(2): 5. (in Chinese)
- [14] ALAVI NIA A, PARSAPOUR M. Comparative Analysis of Energy Absorption Capacity of Simple and Multi-cell Thin-walled Tubes with Triangular, Square, Hexagonal and Octagonal Sections[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 74: 155-165.
- [15] ZAREI H R, KROEGER M. Optimization of the Foam-Filled Aluminum Tubes for Crush Box Application[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(2): 214-221.
- [16] 熊锋. 车身结构轻量化与抗撞性多目标协同优化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
XIONG Feng. Research on Lightweight and Crashworthiness Multi-objective Collaborative Optimization Design Method for Automobile Body Structure[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

- [17] 周冠. 新型负泊松比结构关键技术研究及其在车身设计中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
ZHOU Guan. Study on Key Techniques of NPR Structure and Its Application in Vehicle Body Design[D]. Changsha: Hunan University. (in Chinese)
- [18] 王陶. 负泊松比结构力学特性研究及其在商用车耐撞性优化设计中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
WANG Tao. Mechanical Research of an Auxetic Cellular Structure and its Application in Commercial Vehicle Crashworthiness Optimization Design[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] ZHENG B, LIU Y, LIU J, et al. Novel Mechanical Behaviors of DNA-Inspired Helical Structures with Chirality[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 161/162: 105025.
- [20] HU J, YU T X, YIN S, et al. Low-Speed Impact Mitigation of Recoverable DNA-Inspired Double Helical Metamaterials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 161/162: 105050.
- [21] ZHENG B, XU J. Mechanical Logic Switches Based on DNA-Inspired Acoustic Metamaterials with Ultrabroad Low-Frequency Band Gaps[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2017, 50(46): 465601.
- [22] MENG L, SHI J X, YANG C, et al. An Emerging Class of Hyperbolic Lattice Exhibiting Tunable Elastic Properties and Impact Absorption through Chiral Twisting[J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 40: 100869.
- [23] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M. Three-Dimensional Mechanical Metamaterials with a Twist[J]. Science, 2017, 358: 1072-1074.
- [24] FERNANDEZ-CORBATON I, ROCKSTUHL C, ZIEMKE P, et al. New Twists of 3D Chiral Metamaterials[J]. Advanced Materials, 2019, 31: 1-7.
- [25] ZHANG W, YIN S, YU T X, et al. Crushing Resistance and Energy Absorption of Pomelo Peel Inspired Hierarchical Honeycomb[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 163-172.

作者简介

胡建星, 男, 1990年生, 中国科学院力学研究所, 特别研究助理/博士后。主要研究方向为冲击动力学。E-mail: hujianxing@imech.ac.cn。

通讯作者

贾娇, 女, 1984年生, 2018年获北京航空航天大学固体力学专业博士学位, 助理研究员。主要研究方向为结构优化、冲击动力学。E-mail: jiajiao@buaa.edu.cn。

(编辑: 夏淑密)