# 梯形齿环状结构缓冲防护性能研究

许鑫<sup>1</sup>,齐明思<sup>2</sup>,孙亮<sup>2</sup>,赵奇<sup>2</sup>,刘守君<sup>2</sup>

(1. 太原工业学院, 太原 030008; 2. 中北大学, 太原 030051)

摘要:目的 在高冲击、高过载的环境下,研究高过载测试电子记录器的环阻尼缓冲防护结构的缓冲防 护性能。方法 从结构和材料上对高过载测试电子记录器中的环阻尼缓冲防护结构进行改进,采用具 有梯形齿环状缓冲防护结构,在钢壳内侧壁和内胆盖外侧壁、内胆外侧壁之间装有泡沫铝-聚氨酯或 泡沫铜-聚氨酯等复合材料,以更好地起到缓冲防护作用。接着对复合材料结构试样进行Ansys 仿真 实验,研究泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的抗高过载、高冲击性能。结果 灌封质量分数为25%的聚氨 酯时的泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的抗高过载性能较好,灌封质量分数为4.9%聚氨酯时的泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的抗冲击性能最好。结论 梯形齿环状结构较三角齿螺纹结构有更好的稳定性。 关键词:泡沫铝-聚氨酯; Ansys; 缓冲防护

中图分类号: TB485.1; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)09-0069-04

### **Cushioning Performance of Trapezoidal Toothed Ring Structure**

XU Xin<sup>1</sup>, QI Ming-si<sup>2</sup>, SUN Liang<sup>2</sup>, ZHAO Qi<sup>2</sup>, LIU Shou-jun<sup>2</sup>
(1. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;
2. North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT**: The aim of this work was to study the cushioning performance of the damping ring cushioning protective structure of the high overload test electronic recorder in the environment with high impact and high overload. The damping ring cushioning protective structure of the high overload test electronic recorder was improved both in the structure and the material. A trapezoidal toothed ring cushioning protective structure was used, and composite materials such as aluminum foam–polyurethane or copper foam–polyurethane were filled between the steel shell inner wall, the tank cover outer wall and the tank outer wall for better cushioning. Then, Ansys simulation experiment was conducted for the composite material structure specimen, to study the high overload and high impact resistance of the aluminum foam–polyurethane content of 25% granted the composite material structure with relatively high resistance against high overload, while filling of aluminum foam–polyurethane with a polyurethane content of 4.9% resulted in the composite material structure with the best impact resistance. In conclusion, trapezoidal toothed ring structure had higher stability than the triangle thread structure. **KEY WORDS**: aluminum foam–polyurethane; Ansys; cushioning

近年来,在航空航天等工程实际中,高冲击过载 带来的严重破坏性日益受到人们的关注,复杂的动力 学环境对设备的安全可靠性产生巨大威胁。现在许 多高精密电子元器件需要在高过载作用环境中使用, 而高过载冲击会对内部电路造成损坏,从而导致该元 器件失效<sup>11</sup>。抗高冲击、高过载的缓冲防护材料一般 要保证轻质、力学性能、物理性能、耐空间环境<sup>[2]</sup>等要求。铝网双层缓冲防护结构、多次冲击防护结构和填充式Whipple防护结构<sup>[3]</sup>是应用最广泛的3种先进防护结构,国外载人航天器所采用的众多防护结构大都由这3种变化而来。

为了研究抗高冲击高过载的缓冲防护结构,现以

收稿日期: 2014-10-13

作者简介:许鑫(1980—),男,黑龙江牡丹江人,硕士,太原工业学院讲师,主要研究方向为现代制造技术。

图1所示的电子记录器为例<sup>(4)</sup>,该记录器将钢壳内侧 壁、内胆盖外侧壁,以及内胆外侧壁均做成螺纹结构, 并且在钢壳内侧壁与内胆盖外侧壁、内胆外侧壁之间 灌封有灌封材料。由于吸能结构的制造成本等原因, 所以不能一味依靠增加吸能结构的厚度等传统方法 来提高其碰撞安全性。由此,为了可靠地完成高冲 击、高过载环境下的工作,该设计对现有的高过载测 试电子记录器从结构和材料上分别进行了改进。结 合泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的特性对缓冲防护技 术进行研究,采用 Ansys 动态仿真软件进行仿真分析, 并进行一系列冲击实验,以得到一种较佳的抗高冲 击、高过载缓冲防护结构,从而使系统有更好的缓冲 性能和稳定性。

## 1 总体方案

#### 1.1 原设计的改进

## 1.1.1 结构上的改进

针对图1所述的高过载测试电子记录器结构,将 其钢壳内侧壁、内胆盖外侧壁,以及内胆外侧壁处的 螺纹结构改为环状结构,且采用梯形齿。改进后的结 构增加了被保护结构抗轴向移动的能力,使得系统稳 定性更强。与此同时梯形齿的环状结构较原来的普 通三角螺纹,具有更高的牙根强度、工艺性好、对中性 好、制造成本低等优点。原螺纹结构见图2,改进后的 螺纹结构见图3。



1.钢壳 2.钢壳盖 3.传感器安装体 4.传感器 5.内胆 6.内胆盖 7.内胆 加固梁 8.电池 9.电源模块 10.出线孔 11.缓冲毛毡 12.周边毛毡 13.灌封材料

#### 图1 环阻尼缓冲防护结构高过载测试电子记录器

Fig.1 High overload test electronic recorder with damping ring cushioning protective structure

#### 1.1.2 材料上的改进

将钢壳内侧壁与内胆盖外侧壁、内胆外侧壁之间 的灌封材料改为泡沫铝-聚氨酯复合结构材料,比原



图2 原设计电子记录器螺纹结构

Fig.2 Schematic diagram of the electronic recorder thread structure of the original design



图3 改进后电子记录器环形结构

Fig.3 Schematic diagram of the electronic recorder thread structure after improvement

先的聚氨酯单体缓冲性能更好。

#### 1.2 仿真及冲击实验方案

仿真实验方案:通过改变聚氨酯在泡沫铝基体中的 组分和位置,对材料进行Ansys仿真实验,找到屈服强 度和压缩应变量值最高时的相对含量<sup>60</sup>。同时分别建立 改进前后的缓冲防护结构模型,进行仿真对比分析。

冲击实验方案:分别在泡沫铝中填充不同含量的 聚氨酯,通过冲击实验机进行冲击实验,得出冲击韧 性,找到材料中抗冲击性能最好的一种结构,进而得 出实验结论。

## 2 仿真实验

#### 2.1 结构模型的建立

利用 SolidWorks 软件三维实体建模,分别建立三 角形螺纹结构模型和梯形齿环状结构模型。三角形 螺纹螺距为 20 mm,圈数为 10,起始角度为 135°,大 径 d 为 70 mm,小径 d,为 60 mm,结构高为 200 mm。形 齿环状结构螺距为 25 mm,圈数为 8,牙型角 α 为 60°,大径 d 为 70 mm,小径 d,为 60 mm,齿根高为 20 mm,结构高为 200 mm。其模型分别见图 4—5。

#### 2.2 分析方法

建立含有不同组分聚氨酯的泡沫铝-聚氨酯复合



图4 三角形螺纹结构模型 图5 梯形齿环状结构模型 Fig.4 Triangular thread struc- Fig.5 Trapezoidal toothed ring ture model structure model

材料结构模型。此外,将利用SolidWorks软件创建的 三角螺纹结构模型和梯形齿环状结构模型分别导入 Ansys中,分别沿z轴方向施加8000g的冲击加速度。 用Ansys对其进行应力分析,计算后,在后处理里查看 加载结果。对比实验结果,进行相关分析,并得出实 验结论。

## 2.3 泡沫铝-聚氨酯材料仿真分析

在泡沫铝中分别添加质量分数为0%,5%,9%, 13%,25%,32%,48%,100%的聚氨酯,在z轴加载 8000g的冲击加速度,并分别做出位移等值线图和应 力图。记录相关实验数据,见表1。发现填充25%聚 氨酯时的泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的位移量最 大,缓冲性能最好,其仿真结果见图6—7。



质量分数/%	位移/nm	应力/MPa
0	48.3	0.151 227
5	1320	0.443 215
9	192	0.724 984
13	192	0.821 940
25	1390	1.21
32	1210	1.16
48	192	1.07
100	1150	1.58

#### 2.4 改进后梯形齿环状结构仿真分析

将由SolidWorks建成的梯形齿环状结构模型导入 Ansys中进行仿真分析,定义其材料,文中采用普通碳 钢,密度为7.85 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为200 GPa,泊松比为 0.31。在对梯形齿环状结构模型划分网格后,在z轴 方向加载8000 g后的仿真结果见图8—9。

由图8和图9可知,最大变形发生在图8中结构上



图 6 填充质量分数为 25%聚氨酯后位移等值线 Fig.6 Displacement isoline graph after filling 25% of polyurethane



Fig.7 Stress graph after filling 25% of polyurethane



图8 加载后的位移等值线

Fig.8 Displacement isoline graph after loading





下两端,变形量为241 μm,最小形变是结构中间,即图 8中深色处,变形量为0。最大应力发生在梯形齿环状 结构中间梯形齿边缘小部分处,最大应力为681 MPa。 最小应力发生在上下两端的部分,最小应力为0。 通过查阅相关资料,得知三角螺纹结构在同等实 验条件下,最大变形量为8.86 μm,最小变形量为0, 最大应力为2.8 MPa,最小应力为0。对比发现,相对 三角形螺纹结构模型,改进后的梯形齿环状结构变形 量变大,缓冲效果更好,刚性增大,使得系统稳定性更 强。与此同时梯形齿的环状结构较原来的普通三角 螺纹结构,具有更高的牙根强度、工艺性好、对中性 好、制造成本低等优点。

### 3 结语

结合Ansys动态仿真实验结论可以看出,除了聚氨 酯模型之外,灌封质量分数为25%的聚氨酯时复合结 构位移最大,表示其可以通过最大的变形吸收更多的 冲击,且其应力最接近材料的屈服强度,结构不至于因 变形而失效,因此灌封质量分数为25%的聚氨酯时的 泡沫铝-聚氨酯复合材料结构的抗高过载性能较好。

## 参考文献:

- 邓琼,李玉龙,索涛,等.火工品高过载动态力学性能测试 方法研究[J].火工品,2007(1):28—31.
   DENG Qiong, LI Yu-long, SUO Tao, et al. Test Research on Dynamic Mechanical Behavior of Initiating Explosive Device under High Acceleration[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007 (1):28—31.
- [2] COUR-PALAIS B G, CREW J L. A Multi-shock Concept for Spacecraft Shielding[J]. Impact Engineering, 1990 (10) : 134-140.
- [3] WHIPPLEF L. Meteorites and Space Travel[J]. Astronomical Journal, 1947, 52:137—142.
- [4] 刘俊,石云波,马游春. 高过载测试中结构防护模型研究
  [J]. 测试技术学报,2006,19(3):249—253.
  LIU Jun, SHI Yun-bo, MA You-chun. The Research on the Structural Protection in the High Overload Measurement[J].

Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 19(3): 249-253.

 [5] 孙志杰,龚元明,贺成红,等. SHPB横向冲击法研究 AF/ZF 混杂纤维复合材料吸能特性[J]. 复合材料学报,2005,22
 (3):21-24.

SUN Zhi-jie, GONG Yuan-ming, HE Cheng-hong, et al. Energy Absorption Characteristics of AF/ZF Hybrid Composite under SHPD Transverse Impact[J]. Journal of Composite Materials, 2005, 22(3):21-24.

[6] 齐明思,张晋宁,杨卫,等.泡沫铝-聚氨酯复合结构的缓冲 性能研究[J].包装工程,2010,31(19):6—9.

QI Ming-si, ZHANG Jin-ning, YANG Wei, et al. Research on Shock Cushioning Performance of Foamed Aluminium-polyurethane Composite Structure[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19):6-9.

- [7] HE Ming-qiang, GAO Zi-zheng, XIA Kun-bo.Experimental Study on Hypervelocity Impact Characteristics of Density-grade Thin-plate[J].Physics, 2013, 62(3):24202-24213.
- [8] 吕德龙. 新材料与新技术在新产品开发中的应用[J]. 中国 军转民,2012(10):39—43.
  LYU De-long. Application of New Materials and New Technology in the Development of New Products[J]. Defense Conversion In China,2012(10):39—43.
- [9] 周敏,李大纲. 新型功能性聚氨酯复合包装板材弯曲和压缩性能的研究[J]. 包装工程,2004,25(3):9—10.
  ZHOU Min, LI Da-gang. The Study on Bending and Compressing Properties of a New Type of Functional Polyurethane Compound Sandwich Board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3):9—10.
- [10] 齐明思,刘守君,赵奇,等. 缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程,2013,34(23):5—8.
  QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research on Landing Process of Cushioning Airbag[J]. Packaging Engineering,2013,34(23):5—8.
- [11] 刘俊,石云波,马游春. 高过载测试中缓冲材料的试验分析
  [J]. 中北大学学报,2005,26(5):381—384.
  LIU Jun, SHI Yun-bo, MA You-chun. Experimental Analysis of Cushion Material in the Over Loading Test[J]. Journal of North University of China,2005,26(5):381—384.
- [12] 齐明思,刘守君,赵奇.基于Ansys/LS-DYNA的缓冲气囊着 陆过程仿真研究[J]. 包装工程,2014,35(11):13—17.
  QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi. Simulation Research of the Cushioning Airbag during the Landing Process Based on Ansys/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 13—17.
- [13] 刘鑫,张志勇. 基于气囊缓冲的载人空降乘员防护装置优化设计[J]. 机械工程学报,2012,48(21):168—173.
  LIU Xin, ZHANG Zhi-yong. Optimal Design of Passenger's Protection Devices in Manned Airdrop Based on Airbag Cushion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (21): 168—173.
- [14] 张峰,刘亚青,齐明思.泡沫铝-聚氨酯复合材料的厚度对其 缓冲性能的影响[J].包装工程,2011,32(9):24—26.
  ZHANG Feng, LIU Ya-qing, QI Ming-si. Influence of Aluminum Foam-polyurethane Composite Thickness on Its Cushioning Performance[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 24—26.
- [15] 谭军,韩旭,刘鑫.载人防护缓冲气囊座椅的优化设计[J].
   振动与冲击,2011,30(2):222—225.
   TAN Jun, HAN Xu, LIU Xin. Optimal Design of Airbag Chair

Formanned Airdrop Protection[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2):222–225.