

一种基于 Al/Cu 多层金属和应力波界面传递理论的高过载 MEMS 陀螺仪封装方法



郝博宇^{1,2}, 曹慧亮^{1,2}, 王宇¹

1. 中北大学, 山西 太原 030051

2. 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051

摘要:高过载陀螺作为惯性制导中必不可少的一环,在航空、航天、武器领域具有广阔的应用场景。本文提出并设计了一种基于 Al/Cu 多层金属和应力波界面传递理论的高过载陀螺仪封装方法,对解决目前精确制导武器发射过程中惯性测量装置在高过载环境下失效从而无法实现精准打击的问题具有重要意义。该封装从外到内主要由陶瓷、多层金属、玻璃基底、敏感结构组成。运用解析法与有限元数值仿真相结合的方法,分析了材料属性对应力波透射幅值的影响,得到应力波透射效率最低的微机电系统(MEMS)陀螺芯片封装形式。分析得到所设计封装对应力波的衰减作用达到 80.5%。此外,还对陀螺芯片和加上 Al/Cu 多层金属防护的陀螺芯片进行 30000g@10ms 的过载仿真,得到防护前后过载过程中陀螺结构的最大应力分别为 271.15MPa 和 56.40MPa,相比减少了 78.9%。最后,通过霍普金森杆(Hopkinson)和马歇尔锤(Machete)冲击防护试验得到吸能装置的衰减作用为 73.3%,陀螺抗冲击能力提升两倍以上,与仿真、计算得到的应力波衰减作用相吻合,证明所设计防护封装对陀螺结构具有一定的保护作用,可以在经历高过载后保证陀螺正常工作,对高动能武器发射过载下的惯性器件防护具有参考意义。

关键词:高过载; MEMS; 陀螺仪; 应力波; 封装; 防护

中图分类号:V216

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.011

惯性技术是实现精确打击的关键,以陀螺仪、加速度计组成的惯性测量装置、惯性导航和惯性制导为主要研究领域^[1-6]。微机电系统(MEMS)环形波动陀螺仪具有体积小、成本低、可批量生产、可靠性高等特点,既能满足高精度要求,又能应对过载需求,在目前被广泛选择作为角速率传感器用于精确制导武器中^[7]。而目前动能武器炮弹发射过程中产生过载高达 40000g,国内能够承受数万过载以上的角速度传感器技术尚不成熟,很难承受高过载环境的冲击^[8-9]。MEMS 环形波动陀螺仪的内部机械结构在高过载冲击下极易受到影响,可能会导致严重的形变甚至结构断裂,进而使得整个系统无法正常工作,甚至完全失效。因此为 MEMS 惯性器件提供有效的外部缓冲和保护措施,以增

强其稳定性和可靠性,显得尤为关键^[10-13]。

目前微机电陀螺仪在高过载环境下面临两大挑战:首先,它们在高过载条件下难以保持正常运作,往往在过载作用后会迅速失效;其次,即使在过载后仍能运作,其性能也会显著下降,导致其关键参数和性能指标无法维持与过载前相同的水平。

火炮发射过载对 MEMS 环形波动陀螺仪的破坏主要为惯性力和应力波,目前针对高过载环境下微机电陀螺抗冲击优化防护方法,国内外已经有多家公司及科研院所提出了自己的设计方案,美国加州大学伯克利分校研究发现,冲击应力引起 MEMS 器件分层和黏结失效,提出了一种采用新型材料的线性谐振陀螺结构,但并未针对 MEMS 陀螺

收稿日期: 2024-09-30; 退修日期: 2024-12-03; 录用日期: 2025-01-22

基金项目: 航空科学基金(201908U0002)

引用格式: Hao Boyu, Cao Huiliang, Wang Yu. A high overload MEMS gyroscope packaging method based on Al/Cu multilayer metal and stress wave interface transfer theory[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 91-99. 郝博宇, 曹慧亮, 王宇. 一种基于 Al/Cu 多层金属和应力波界面传递理论的高过载 MEMS 陀螺仪封装方法[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 91-99.

进行研究。参考文献[14]在应力集中的部位设计圆弧开槽结构,用以释放应力。通过综合优化后,石英微机电陀螺的抗高冲击能力可达到10000g,并保持了较好的性能,参考文献[15]通过在封装结构中增加多级缓冲机构以减缓高 g 值对传感器的破坏,仿真结果显示该陀螺可以承受三个方向5000g的加速度冲击。参考文献[16]提出的微惯性测量单元集成抗冲击组件方案,通过多块黏弹性阻尼减震器实现了三轴5000g抗冲击能力。参考文献[17]在微机电陀螺结构上添加了质量块的静电力限位机构,可抗11000g过载作用。这些抗冲击设计在不同程度上提升了陀螺的抗冲击能力,但是这些抗冲击防护并不适用于高动能武器发射过载下的惯性器件防护。

本文提出并设计了一种基于Al/Cu多层金属和应力波界面传递理论的高过载MEMS陀螺仪封装方法。通过计算得到所设计封装对应力波的衰减作用达到80.5%。此外,还对陀螺芯片和加上Al/Cu多层金属防护的陀螺芯片进行高过载仿真,得到防护前后过载过程中陀螺结构的最大应力相比减少了78.9%,最后进行了冲击防护试验,得到的衰减作用为73.3%,很大程度上改善了过载后陀螺失效、性能退化的问题。

1 高过载MEMS陀螺结构设计及模态分析

本文研究的高过载MEMS陀螺主要采用了环形固体波动陀螺的结构,该结构主要由中央锚点以及8个均匀分布在圆形锚点圆周上的U形悬臂梁组成,并通过倒角法加强了悬臂梁的应力集中部分,保证了结构在高冲击下的可靠性。该高过载MEMS环形固体波动陀螺的敏感结构图和模态分析图如图1、图2所示。一阶(z 轴冲击敏感模态)、二阶(y 轴冲击敏感模态)、三阶(x 轴冲击敏感模态)的谐振频率分别为15.244kHz、16.042kHz和16.044kHz,四阶(驱动模态)和五阶(检测模态)的谐振频率分别为20.744kHz和20.750kHz,六阶模态为干扰模态,其谐振频率为25.881kHz,工作模式与其他模式的分频大于4kHz,有助于减少来自干扰模态的影响。

2 应力波透射理论

当物质受到外界载荷的作用时,最先受到载荷作用的质点会发生位移,导致与周围质点之间产生变形和应力。这种变形和应力会向物质内部传播,使得更多的质点发生位移。这种由外界载荷引起的质点从近到远的运动现象,就叫作应力波。根据物质的本构关系,应力波有两种类型,

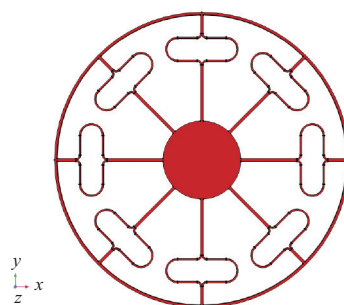


图1 环形MEMS陀螺结构

Fig.1 Ring-shaped MEMS gyro structure

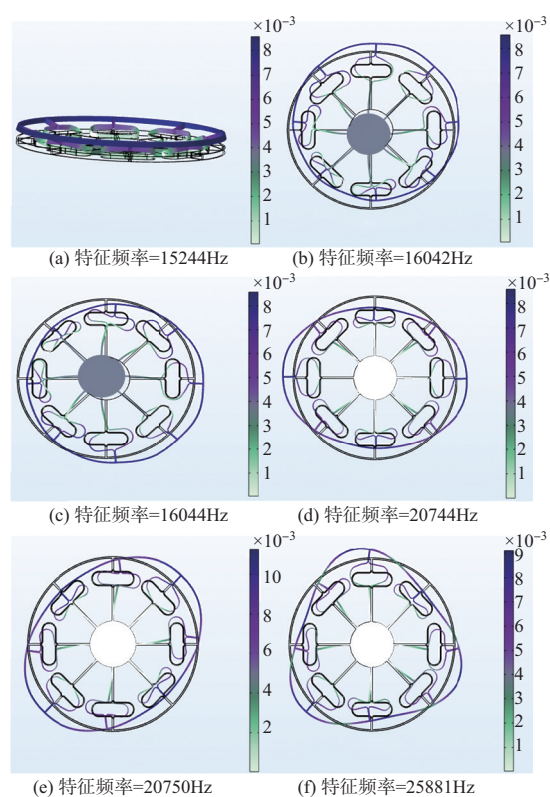


图2 环形MEMS陀螺模态分析图

Fig.2 Ring MEMS gyro modal analysis diagram

一种是弹性波,它的应力和应变满足胡克(Hooke)定律;另一种是非弹性波,它的应力和应变不满足胡克定律。如果从原子尺度来看这一现象,应力波就像是相邻原子之间连续的碰撞过程。介质中的波根据其传播方式有两种:一种是纵波,它的传播方向和介质运动方向一致或相反;另一种是横波,它的传播方向和介质运动方向垂直。这两种波有不同的传播特性。纵波还可以按照传播方向分为两种:一种是压缩波,它的传播方向和介质运动方向一致;另一种是拉伸波,它的传播方向和介质运动方向相反。

当弹性分层介质遇到应力波时,由于介质的波阻抗有差异,应力波会被部分透过和部分反弹,导致应力波的减弱和散射。图3为应力波在异质界面的传播示意图。

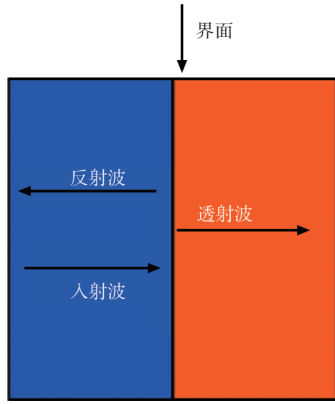


图3 应力波在异质界面的传播示意图

Fig.3 Diagram of stress wave propagation at a heterogeneous interface

当入射弹性波扰动 $\Delta\sigma_i$ 到达异质界面时,会同时对两种介质产生扰动,即分别向两种介质中传播反射扰动 $\Delta\sigma_r$ 和透射扰动 $\Delta\sigma_t$ 。这时只要这两种介质在界面处始终保持接触(既能承压又能承拉且不分离),则根据连续条件和牛顿第三定律可以得到,界面上两侧经反射-透射后的质点速度和应力应相等,即

$$\Delta v_i + \Delta v_r = \Delta v_t \quad (1)$$

$$A_1 (\Delta\sigma_i + \Delta\sigma_r) = A_2 \Delta\sigma_t \quad (2)$$

式中, $\Delta v_i, \Delta v_r, \Delta v_t$ 为入射波经过反射透射后的速度变化, A_1 和 A_2 分别为两侧介质的截面面积。

当两种介质的接触面面积相等,则式(1)、式(2)可以写为

$$v_i - v_r = v_t \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_i + \Delta\sigma_r = \Delta\sigma_t \quad (4)$$

根据波动微分方程可以得到

$$\sigma = \rho_0 C_0 v_0 \quad (5)$$

式中, ρ_0 为材料密度, C_0 为材料波速, v_0 为质点速度, C_0 为材料的固有属性,仅由材料自身的弹性模量和密度决定。

$$C_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \quad (6)$$

将式(5)代入式(3)中得到

$$\frac{\sigma_i - \sigma_r}{\rho_1 C_1} = \frac{\sigma_t}{\rho_2 C_2} \quad (7)$$

联合式(2)和式(7)可以得到与 σ_t 和 σ_r 的表达式

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{2A_1\rho_1C_1}{A_1\rho_1C_1 + A_2\rho_2C_2} \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{2A_2\rho_2C_2}{A_1\rho_1C_1 + A_2\rho_2C_2} \quad (9)$$

由于在高过载过程中会产生应力波,这些应力波会向后传播最终作用在传感器上,可以将这一过程简化地看作一个一维应力波的传播过程。应力波从入到传感器封装内,由于应力波在传播过程会经过多层金属结构,针对应力波在多层金属之间的传播,式(8)可以写为

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{(A_2\rho_2C_2)^n (A_1\rho_1C_1)^n}{(A_1\rho_1C_1 + A_2\rho_2C_2)^{n+m}} \quad (10)$$

从式(10)可知,通过合理优化介质的弹性模量、密度等参数可大大减小透射应力,在此基础上,采用多层叠层材料(本文拟采用多层金属-陶瓷界面波阻隔叠层)产生差异机械阻抗梯度布置(弹性模量和密度乘积逐层减小),上一层的透射波即作为这一层的入射波,可对应力波进行逐层阻隔,最大限度减小应力波对陀螺结构的影响^[18-19]。

3 MEMS封装设计及仿真

3.1 MEMS封装设计

封装壳在确保传感器在高过载下生存方面起着重要的作用。根据应力波传播理论设计出如图4所示的封装,封装由陶瓷管壳、多层金属部分、玻璃基底和敏感结构4部分组成。

应力波传播模型如图5所示。图中 ρ_a 和 C_a 为对应陶瓷管壳的材料密度和波速, ρ_b 和 C_b 为对应多层金属的材料密度和波速, ρ_c 和 C_c 为对应玻璃基底的材料密度和波速, ρ_d 和 C_d 为对应敏感结构的材料密度和波速。应力波从陶瓷管壳入射,形成入射纵波A,入射纵波A在陶瓷管壳和多层金属键合界面处发生第一次反射和透射,形成反射纵波A和透射纵波A,然后透射纵波A作为入射纵波B在多层金属和玻璃基底键合的界面发生反射和透射,形成反射纵波B和透射纵波B,最后透射纵波B作为入射纵波C在玻璃基底和敏感结构键合的界面发生反射和透射,形成反射纵波C和透射纵波C,透射纵波C即为陀螺敏感结构最终所受冲击应力波。

封装整体尺寸为 $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 8\text{mm}$,封装材料参数见表1,在高过载过程中垂直于工作轴向的方向也会有少量的应力波输入,根据应力波透射理论可以得到封装在垂直于敏感结构面内方向的透射系数和材料属性的关系。本文采用的 Al/Cu 多层金属结构由 10 层 Al 和 9 层铜组成,示意图如图6所示,其中铝层的厚度为 $100\mu\text{m}$,铜层的厚

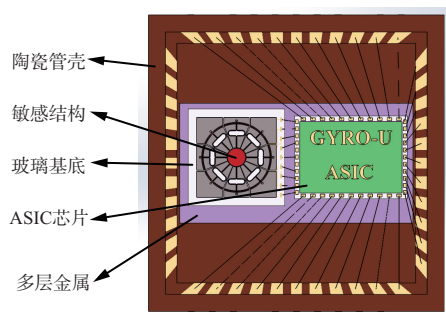


图4 MEMS整体封装示意图
Fig.4 Diagram of MEMS overall package

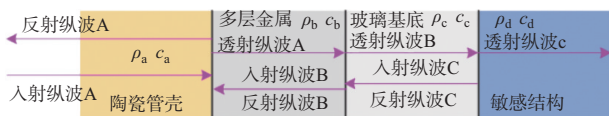


图5 应力波在所设计封装结构中的传播示意图
Fig.5 Diagram of stress wave propagation in the designed package structure

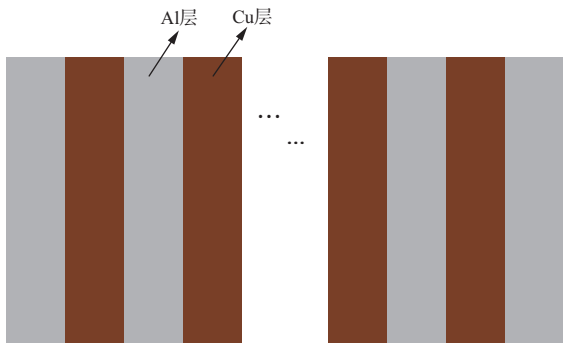


图6 Al/Cu多层金属排布示意图
Fig.6 Diagram of Al/Cu MEMS overall package

表1 MEMS封装材料参数

Table 1 MEMS packaging material parameter

材料	密度/ (kg/m ³)	弹性 模量/GPa	波速/(m/s)	波阻抗/ (MPa/(m/s))
硅	2329	170	8543.57	19.89
Al	2700	70	5055.25	13.64
Cu	8900	120	3644.35	32.43
玻璃基底	2500	70	5640.76	14.10

度为200 μm 。根据式(10)可以得出最后Al层透射出的应力波为第一层Al入射应力波幅值的0.19485倍,即多层金属对应力波的衰减作用约为80.5%。且在陶瓷管壳内陀螺芯片和多层金属周围仅有空气,因此,平行于敏感结构面内模态的应力波无限接近自由端面透射,透射系数约等于零。

3.2 结构优化仿真

以冲击动力学为基础,利用有限元软件对陀螺结构进行瞬态动力分析,可以确定在随时间变化的冲击载荷作用下陀螺结构的位移响应及应力。首先对防护吸能装置进行建模,此处防护吸能装置分为方形和圆形两种,图7为多层金属防护吸能装置仿真结构示意图。然后对防护吸能装置的形状和尺寸进行优化和比较,对于圆形防护吸能装置来说主要参数变化为铜层厚度、半径,对方形防护吸能装置主要参数变化为边长、铜层厚度。

对吸能装置的边长、铜层厚度参数优化结果分别如图8和图9所示,本次仿真使用的过载为30000g@10ms,过载过程最大应力取5ms时陀螺结构的最大应力。其中图8的仿真采用方形垫片,防护吸能装置的铝层厚度为100 μm ,防护吸能装置的铜层厚度为100~200 μm ,铜层厚度越大,过载过程中结构所受最大应力越大。其中在图9的仿真中,防护吸能装置的铝层厚度为100 μm ,防护吸能装置的铜层厚度为100 μm ,从结果可以明显看出方形垫片性能优于圆形垫片,最终选择方形垫片作为多层金属垫片。

然后依据此参数对陀螺芯片(陀螺结构和玻璃基底)进行载荷曲线如图10所示的冲击仿真,再用相同的载荷对加上圆形防护吸能装置的陀螺结构进行冲击仿真,得到的陀螺结构最大应力曲线如图11所示。

从图11中可以看到,5ms时,没有加Al/Cu多层金属吸能装置的陀螺结构在过载过程中受到的最大应力达到最大值271.15MPa。键合了Al/Cu多层金属吸能装置的陀螺结构在过载过程中受到的最大应力达到最大值56.4MPa,可以看出陀螺结构所受应力情况衰减了80%,与上述设计计算部分所得到的衰减效果相吻合。

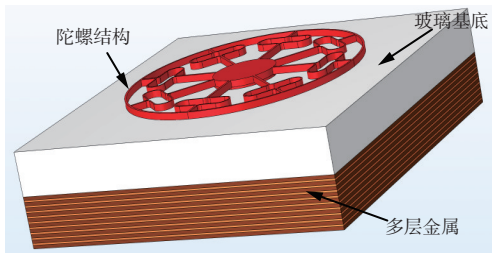


图7 方形多层金属仿真结构示意图
Fig.7 Square multi-layer metal simulation structure diagram

4 高过载试验验证

4.1 分离式霍普金森杆冲击试验

采用分离式霍普金森杆(Hopkinson)测试了Al/Cu多层

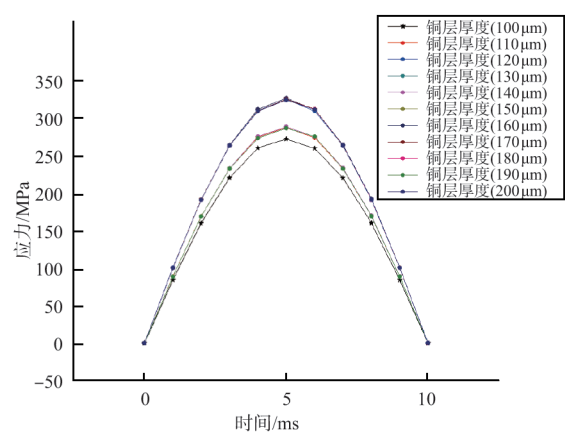


图 8 Al/Cu 多层金属铜层厚度优化结果

Fig.8 Optimization results of thickness of Al/Cu multilayer metal copper layer

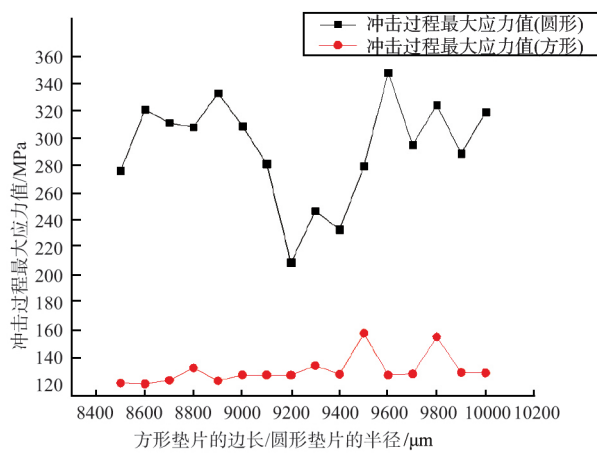


图 9 方形吸能装置边长优化结果

Fig.9 Optimization result of side length of square energy absorption device

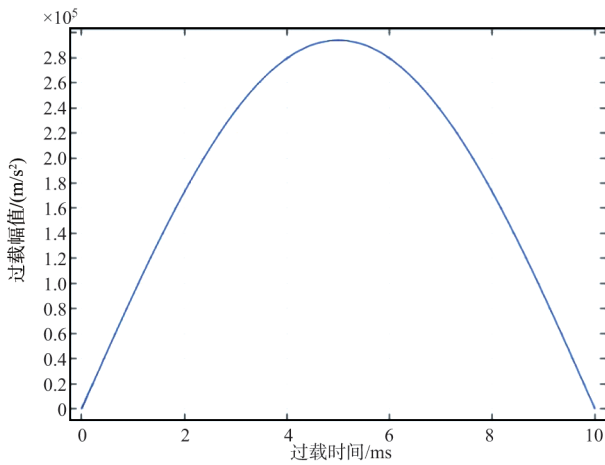


图 10 30000g@10ms的载荷曲线

Fig.10 The load curve of 30000g@10ms

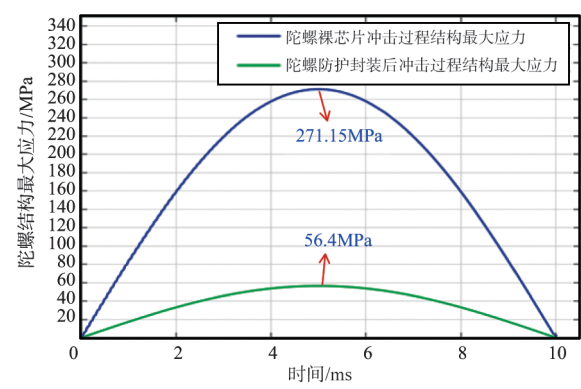


图 11 冲击过程陀螺结构最大应力曲线

Fig.11 Maximum stress curve of gyro structure during impact

金属对应力波的衰减能力。测试系统如图 12 所示。在这种方法中,将 Al/Cu 多层金属夹在入射杆和透射杆之间,通过输入和输出杆上的应变传感器对 Al/Cu 多层金属的应力波进行监测,将采集到的数据进行分析可以得到如图 13 所示的入射杆和透射杆的应力波传输曲线。

试验结果表明,应力波明显衰减(入射杆和透射杆应力波信号的振幅分别为-4.31V 和-1.15V),衰减效果约为 73.3%。



图 12 分离式霍普金森杆测试系统

Fig.12 Separated Hopkinson rod test system

4.2 马歇尔锤冲击试验

对所防护 MEMS 陀螺采用马歇尔锤进行冲击试验,图 14 是 MEMS 陀螺整体封装照片。

先将标准传感器固定在马歇尔锤的锤头上进行冲击测试,安装示意图如图 15 所示。将标准传感器的输出通过外接电荷放大器后与示波器相连,标准传感器输出信号经电荷放大器后可得传感器灵敏度为 0.055mV/g。经过对标准

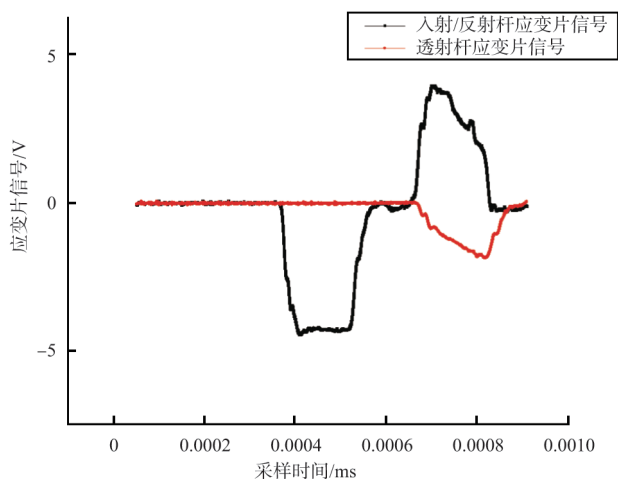


图13 入射杆和透射杆的应力波传输曲线

Fig.13 Stress wave transmission curves of incident rod and transmitted rod

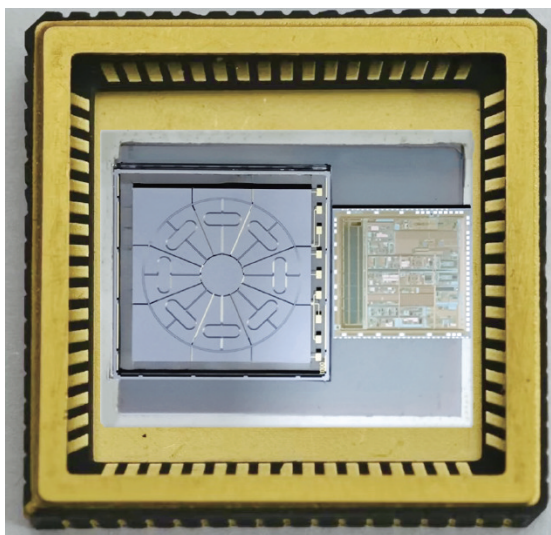


图14 MEMS整体封装实物图

Fig.14 MEMS overall package physical picture

传感器的冲击测试得到理想的过载环境后,再将陀螺结构和标准传感器固定在马歇特锤锤头,进行冲击试验,试验后对数据进行读取分析,对结构进行观测。

(1) MEMS陀螺抗高过载防护前抗冲击能力测试

在实验室环境下,利用马歇特锤对未经防护的MEMS陀螺样品进行冲击试验,冲击前后谐振频率见表2,由示波器幅值可以得出此次冲击的幅值大小为16727g,对冲击前后的陀螺输出进行采样,并根据转台标定的标度因数值得到零偏值分别为冲击前0.201(°/s)和冲击后-0.460(°/s),变化量为0.601(°/s),性能发生严重跃变,且冲击前后谐振频率的

变化率为3.5%,试验结果表明未经防护前陀螺不具备抗16727g冲击能力。如图16,图17所示。



图15 马歇特锤安装图

Fig.15 Machet hammer installation drawing

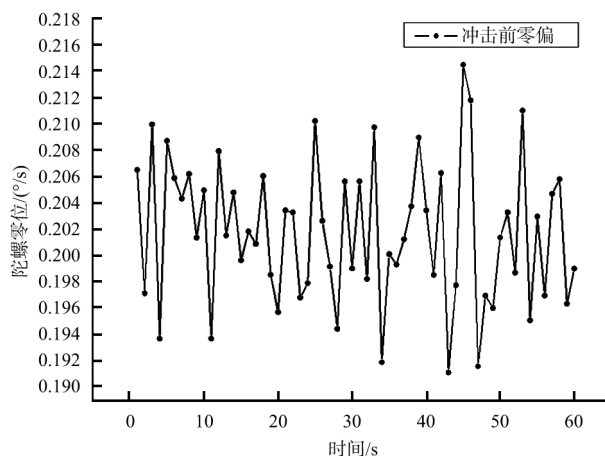


图16 未加防护装置冲击前零偏

Fig.16 Zero bias before impact without protective device

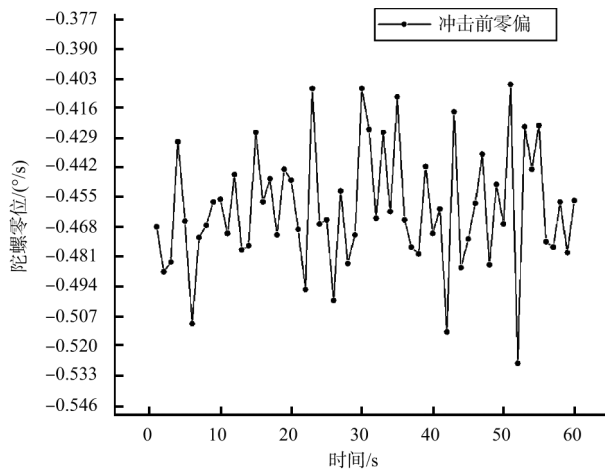


图17 未加防护装置冲击后零偏

Fig.17 Zero deviation after impact without protective device

表2 MEMS陀螺防护前冲击前后谐振频率

Table 2 MEMS gyro protects front shock front and rear resonant frequencies

过载试验前频率/Hz	过载试验后频率/Hz	变化率/%
20744.91	21470.97	3.5

(2) MEMS陀螺抗高过载防护后抗冲击能力测试

在实验室环境下,利用马歇尔锤对经过防护的MEMS陀螺样品进行冲击试验,冲击前后谐振频率见表3,由示波器幅值可以得出此次冲击的幅值大小为37818g,对冲击前后的陀螺输出进行采样,并根据转台标定的标度因数值得到零偏值分别为冲击前0.203(°/s)和冲击后0.200(°/s),变化量为0.003(°/s),且冲击前后谐振频率的变化率仅为0.011%,试验证明经过防护后陀螺具备抗37818g冲击能力。如图18和图19所示。

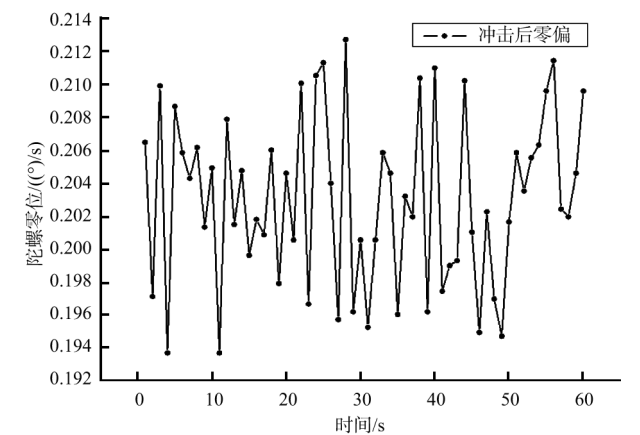


图18 加入防护装置冲击前零偏
Fig.18 Zero bias before impact with protective device

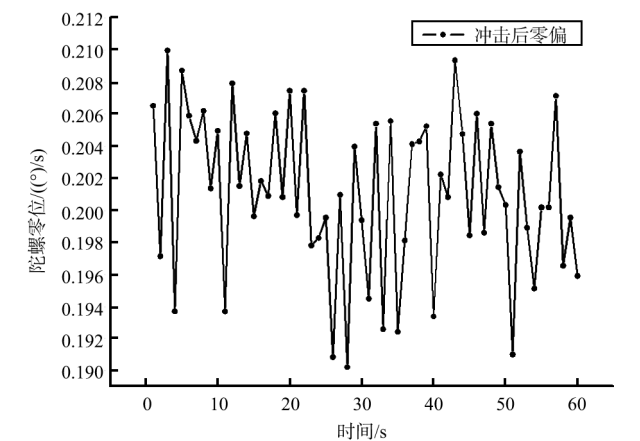


图19 加入防护装置冲击后零偏
Fig.19 Zero deviation after the impact of the protective device

表3 MEMS陀螺防护后冲击前后谐振频率

Table 3 MEMS gyro protects post-shock front and rear resonant frequencies

过载试验前频率/Hz	过载试验后频率/Hz	变化率/%
20745.80	20748.08	0.011

综上所述,防护前MEMS陀螺抗冲击能力小于16727g,经过防护后MEMS陀螺抗冲击能力大于37818g,综合能力提升两倍以上,加强了MEMS陀螺高过载环境下的生存能力。

5 结束语

针对目前精确制导武器发射过程中惯性测量装置高过载环境下失效从而无法实现精准打击的问题,本文提出并设计了一种基于Al/Cu多层金属和应力波界面传递理论的高过载MEMS陀螺仪封装方法。该封装从外到内主要由陶瓷、多层金属、玻璃基底、敏感结构组成。运用解析法与有限元数值仿真相结合的方法,分析了材料属性对应力波透射幅值的影响,得到应力波透射效率最低的MEMS陀螺芯片封装形式。分析得到所设计封装对应力波的衰减作用达到80.5%。此外,还对陀螺芯片和加上Al/Cu多层金属防护的陀螺芯片进行30000g@10ms的过载仿真,得到防护前后过载过程中陀螺结构的最大应力分别为271.15MPa和56.4MPa,相比减少了78.9%。最后,通过霍普金森杆和马歇尔锤冲击防护试验得到吸能装置的衰减作用为73.3%,陀螺抗冲击能力提升两倍以上。与仿真、计算得到的应力波衰减作用相吻合,证明所设计防护封装对陀螺结构具有一定的保护作用。

AST

参考文献

[1] Maini A K. Handbook of defence electronics and optronics[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2018.

[2] Morrissey J. Architects of empire: the military strategic studies complex and the scripting of US national security[J]. Antipode, 2011,43(2): 435-470.

[3] 雷明兵,刘伟鹏,宋振华,等. 防空导弹惯性技术综述及展望[J]. 导航与控制, 2020, 19(Z1): 88-95.

Lei Mingbing, Liu Weipeng, Song Zhenhua, et al. Overview and prospect of inertial technology of air defense missile [J]. Navigation and Control, 2020,19(Z1):88-95.(in Chinese)

[4] 王军锋. 航空惯性技术的现状及发展[J]. 航空科学技术,1998 (2):18-19.

- Wang Junfeng. Current situation and development of aviation inertia technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 1998(2): 18-19.(in Chinese)
- [5] 马超杰,林志丹.现代军用导航技术[J].航空科学技术,2005(4):17-19.
Ma Chaojie, Lin Zhidan. Modern military navigation technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2005(4): 17-19. (in Chinese)
- [6] 曲东才.捷联惯导系统发展及其军事应用[J].航空科学技术, 2004(6):27-30.
Qu Dongcai. Development of strapdown inertial navigation system and its military application [J]. Aeronautical Science & Technology, 2004(6):27-30.(in Chinese)
- [7] 刘玉,曹慧亮,张英杰,等. MEMS 硅基环形波动陀螺抗高过载能力测试[J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 18-22.
Liu Yu, Cao Huiliang, Zhang Yingjie, et al. Test of resistance to high overload of MEMS silicon based ring wave gyro [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(2): 18-22.(in Chinese)
- [8] 李军,严萍,袁伟群.电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J].高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun. Development and current status of electromagnetic railgun launching technology [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)
- [9] 李阳,秦涛,朱捷,等.电磁轨道炮发展趋势及其关键控制技术[J].现代防御技术, 2019, 47(4):19-23.
Li Yang, Qin Tao, Zhu Jie, et al. Development trend of electromagnetic railgun and its key control technology [J]. Modern Defense Technology, 2019, 47(4): 19-23. (in Chinese)
- [10] 郭天琪.高过载三轴轮环形 MEMS 陀螺设计与实现[D].太原:中北大学, 2023.
Guo Tianqi. Design and implementation of high-overload triaxial wheel ring MEMS gyroscope [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.(in Chinese)
- [11] 曹慧亮,郭天琪,申冲.抗过载环形 MEMS 固体波动陀螺设计加工与测试[J].仪器仪表学报,2022,43(5):1-7.
Cao Huiliang, Guo Tianqi, Shen Chong. Design, machining and testing of overload resistant ring MEMS solid wave gyro [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 1-7. (in Chinese)
- [12] 邢博文.硅微机械陀螺仪高过载动态响应研究[D].南京:东南大学, 2019.
Xing Bowen. Research on dynamic response of silicon micromechanical gyroscope under high overload [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.(in Chinese)
- [13] Myers D R, Cheng K B, Jamshidi B, et al. Silicon carbide resonant tuning fork for microsensing applications in high-temperature and high G-shock environments [J]. Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS, 2009: 8(2): 021116.
- [14] 林日乐,李文蕴,赵建华,等.石英微机械陀螺抗高冲击能力的优化研究[J].压电与声光, 2013, 35(1): 56-58.
Lin Rile, Li Wenyun, Zhao Jianhua, et al. Optimization of high impact resistance of quartz micromechanical gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(1): 56-58. (in Chinese)
- [15] 陈艳,孟丽娜.石英微机电陀螺封装抗高g值过载有限元分析[J].仪表技术与传感器,2009(Z1):50-52.
Chen Yan, Meng Lina. Finite element analysis of quartz mems gyro package against high g value overload [J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(Z1):50-52.(in Chinese)
- [16] 汪守利,刘海涛,滕纲,等. MEMS 惯组抗高g值充饥设计方法[J].中国惯性技术学报, 2014(3):404-408.
Wang Shouli, Liu Haitao, Teng Gang, et al. Design method of MEMS Inertial Unit against high G-value hunger [J]. Chinese Journal of Inertia Technology, 2014(3): 404-408.(in Chinese)
- [17] Zhou Jian, Jiang Tao, Jiao Jiwei, et al. Design and fabrication of a micromachined gyroscope with high shock resistance [J]. Microsyst Technol, 2014,20(1):137-144.
- [18] 王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社, 2005.
Wang Lili. Stress wave foundation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.(in Chinese)
- [19] 郭伟国.应力波基础简明教程[M].西安:西北工业大学出版社,2007.
Guo Weiguo. A brief course on stress wave fundamentals[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. (in Chinese)

A High Overload MEMS Gyroscope Packaging Method Based on Al/Cu Multilayer Metal and Stress Wave Interface Transfer Theory

Hao Boyu^{1,2}, Cao Huiliang^{1,2}, Wang Yu¹

1. North University of China, Taiyuan 030051, China

2. Key Laboratory of Electronic Testing Technology for National Defense, Taiyuan 030051, China

Abstract: As an indispensable part of inertial guidance, high overload gyroscope has a broad application scenario in the fields of aerospace and weapons. In this paper, a high overload gyroscope packaging method based on Al/Cu multilayer metal and stress wave interface transfer theory is proposed and designed, which is of great significance to solving the problem that inertial measurement devices fail under high overload environment during the launch of precision guided weapons. The package is mainly composed of ceramic, multilayer metal, glass substrate and sensitive structure from the outside to the inside. The effect of material properties on stress wave transmission amplitude was analyzed by means of analytical method and finite element numerical simulation, and the packaging form of MEMS gyro chip with the lowest stress wave transmission efficiency was obtained. The analysis shows that the attenuation effect of the designed package on stress wave reaches 80.5%. In addition, 30000g@10ms overload simulation is carried out on the gyro chip and the gyro chip with Al/Cu multi-layer metal protection. It is obtained that the maximum stress of the gyro structure during overload process before and after protection is 271.15MPa and 56.40MPa respectively, which is reduced by 78.9% compared with that of the gyro chip. Finally, through the impact protection test of Hopkinson rod and Machete hammer, the attenuation effect of energy absorption device is 73.3%, and the impact resistance of gyroscope is increased by more than two times, which is consistent with the stress wave attenuation effect obtained by simulation and calculation. It is proved that the designed protective package has a certain protection effect on the gyroscope structure. It can ensure the normal operation of gyro after experiencing high overload, and has a reference significance for the protection of inertial devices under the overload of high kinetic energy weapons.

Key Words: high overload; MEMS; gyroscope; stress wave; package; protection

Received: 2024-09-30; **Revised:** 2024-12-03; **Accepted:** 2025-01-22

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(201908U0002)