

金属振动陀螺谐振子性能参数的分析与研究

杨柳, 杨勇, 余波, 谭文跃, 方 针

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘 要:金属谐振子哥氏振动陀螺温度灵敏度高的原因是谐振子的品质因数(Q 值)低。现代冶金技术可提供在温度变化时高稳定性和高 Q 值的合金,为实现高精度金属振动陀螺(CVG)打下了基础。通过从大量的合金材料中筛选符合金属振动陀螺要求的特殊材料进行研究与分析,并探讨了不同热处理工艺对材料性能、金属陀螺谐振子性能参数等的影响。实验结果表明,马氏体时效钢 3J33 对金属振动陀螺谐振子的性能参数优化有较好的效果。

关键词:金属振动陀螺;金属谐振子;品质因数;马氏体时效钢;热处理

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.04.032

Analysis and Research on Performance Parameter of Metallic Gyroscope Resonator

YANG Liu, YANG Yong, YU Bo, TAN Wenye, FANG Zhen

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope(CVG) has high temperature sensitivity due to the low Q -factor of the resonator. Modern metallurgical technology can provide alloys with high stability and high Q at temperature change, which lays a foundation for realizing high precision metallic resonator Coriolis vibration gyroscope(CVG). In this paper, the special materials that meet the requirements of metallic resonator Coriolis vibrating gyroscope are selected from a large number of alloy materials and studied and analyzed, and the effects of different heat treatment processes on the material properties and resonator performance parameters of metallic vibrating gyroscope are investigated. The experimental results show that the Maraging steel 3J33 has a good effect on the optimization of the performance parameters of the metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope.

Key words: metallic gyroscope; metallic resonator; Q -factor; Maraging steel; heat treatment

0 引言

金属振动陀螺不同于传统的机械转子式陀螺和基于萨格纳克效应的光学陀螺,它是一种全固态哥氏振动陀螺,主要优势在于其成本低,体积小,功耗低,性能稳定,响应快速,抗振动冲击,无转动部件且可瞬时启动,因而在制导武器、汽车、导航、机器人等领域具有广泛的应用前景。

陀螺仪的技术状态和水平是制约惯性系统发展的核心^[1],为提高金属振动陀螺的性能,众多学者开展了相关理论的建模与分析^[2]、低成本化^[3]、工艺、谐振子材料机理等的研究,结果表明,金属振动陀螺的性能与谐振子所选材料的属性有关。近年来,随着金属振动陀螺的不断深入研究,已取得了长足的发展与进步^[4]。

本文概述了金属振动陀螺的工作原理、谐振子的设计、制作到成型装配要求。基于金属振动陀螺性能参数要求。重点研究谐振子的材料特性及制作过程中的热处理工艺,分析了它们对金属谐振子性能参数的影响。

1 金属陀螺结构说明

金属振动陀螺主要由基座、谐振子和外罩 3 部分组成(见图 1)。基座与外罩焊接,将谐振子密封在真空中。薄壁金属圆柱体的谐振子作为陀螺传感器使用,谐振子的底部均匀分布 8 个圆孔,压电片粘接在谐振子底部的 8 个圆孔之间,作为 8 个等间距电极,用来激励和测试谐振子的振动,并提取用于振动幅度稳定、相位跟踪误差、频率差异等的控制信号。而谐振子底部的圆孔是用来对压电片定位的。谐振子由标准螺钉固定在基座上。



2 谐振子性能参数的损耗

由于设备和加工工艺的误差,实际的谐振子和理想的对称形状总存在一些偏差,易导致谐振子在运动过程中能量损耗^[5],对陀螺的噪声和稳定性等

性能产生影响。其中谐振子的性能参数损耗为

$$1/Q_{\Sigma} = 1/Q_{in} + 1/Q_{env} + 1/Q_{fix} + 1/Q_{ot} \quad (1)$$

式中： $1/Q_{in}$ 为由制作谐振子和确定品质因数(Q)值极限的材料属性引起的内部损耗； $1/Q_{env}$ 为由外部环境影响引起的损耗； $1/Q_{fix}$ 为由谐振子圆周不对称和底部固定差异引起的损耗； $1/Q_{ot}$ 为其他方面的损耗。

为减小谐振子的损耗， $1/Q_{env}$ 、 $1/Q_{fix}$ 、 $1/Q_{ot}$ 可以采取相应的措施减小甚至消除。而内部损耗 $1/Q_{in}$ 与所选材料的属性有关，主要由谐振子材料的选择及其热处理决定。为提高金属谐振子陀螺的整体性能，希望选用Q值较高，性能参数稳定性较好，线膨胀系数较低，同时在受热环境中参数变化线性度高的材料。当然，某单一材质的材料基本达不到这种要求，需选用符合要求的低阻尼合金材料，减小金属谐振子材料的内在损耗。

3 谐振子性能参数的分析研究

3.1 谐振子材料的优化选择

金属谐振子 CVG 性能指标除了通过采用器件真空封装技术和电路控制补偿技术等得到提高外，有必要选用高稳定性、高Q值材料，以减小温度漂移和控制信号的不稳定性。

现代冶金技术创造了大量特殊的合金，能提供温度变化时合金参数的高稳定性，高Q值和受热过程中参数变化的高线性度。由于金属元素镍、钴、钼、钛对改善金属谐振子主要参数各具特性，成为金属谐振子材料不可或缺的元素成分。对不同金属元素不同含量的合金，其Q值、热膨胀系数等参数性能也有较大的差别，如Ni-SPAN-C合金902合金的线膨胀系数约为 $5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。45NiCrTi合金和掺杂Co和Mo的其他合金具有更低的线膨胀系数，同时在受热过程中参数线性度更好。用这种合金制成的谐振子Q值在大气压下超过10 000~20 000，真空中高2~3倍。针对谐振子金属材料性能，列出Q值较高、线膨胀系数较小的几种合金的性能参数(见表1)。表中，合金材料是纯度较高的特殊合金。

表1 几种合金的性能参数

合金材料	Q值	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Ni-SPAN-C合金	10 000~20 000	约 3×10^{-6}
NiCrTi合金	约 10 000	约 5×10^{-6}
掺杂Co和Mo的NiTi合金	$\geq 20\ 000$	约 3.9×10^{-6}
4J29(HK29合金)	$\geq 15\ 000$	约 4.7×10^{-6}
马氏体时效钢3J33	$\geq 20\ 000$	约 3.5×10^{-6}

由表1可知，从优化材料的选择，提高陀螺的稳定性和Q，马氏体时效钢3J33和掺杂Co和Mo的NiTi合金较其他几种材料性能优越。

3.2 金属谐振子的热处理优化

对金属振动陀螺在恒温和-40~+50℃内进行测试，结果显示，-40~+50℃与恒温性能相比，随机游走系数为2倍，零偏稳定性是6倍，这是因为传感器压电噪声的增加和谐振子Q值改变的缘故。

减小压电噪声可选用温度稳定性好的压电材料，而谐振子Q值的改变，主要原因是谐振子材料对热处理敏感，要想获高Q值，就必须谨慎对待热处理工艺。掺杂Co和Mo的NiTi合金和马氏体时效钢3J33的Q值相差不大，通过热处理工艺，其Q值可超过30 000。

对马氏体时效钢3J33制作的谐振子进行热处理工艺研究，通过高温固溶处理法消除材料的带状组织，分别选择不同的固溶温度(800℃、900℃、1 050℃、1 150℃)，均保温1h，以确定在不同温度下材料的带状组织是否消除(见图2)。

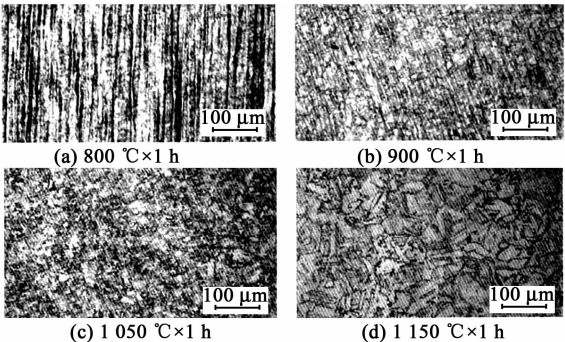


图2 不同固溶温度下金相组织

由图2可知，温度升高到900℃时，带状组织明显减少，在1 050℃，带状组织基本消除，对时效过程中金属间化合物的均匀弥散析出提供了较好的条件。而根据谐振子在真空中的Q值较常温高2~3倍。选择在950℃×1h+575℃×3h，真空度在 10^{-3} Pa的条件下进行热处理，以提高谐振子材料的力学性能稳定性。

4 结束语

选择马氏体时效钢3J33对金属振动陀螺谐振子的性能参数优化有较好的效果，其Q值超过20 000。目前金属振动陀螺研究在谐振子阶段取得较大的突破，下一步需要继续完善热处理工艺和优化材料选择，使Q值可超过30 000，线膨胀系数更低，以进一步提高金属陀螺的性能。

参考文献：

[1] 宋海凌,马溢清. 惯性技术发展及应用需求分析[J]. 现代防御技术,2012,40(2):55-59.

[2] CHIKOVANI V V,YATSENKO Y A,KOVALENKO V A,et al. Digitally controlled high accuracy metallic resonator CVG[C]//Germany;Symposium Gyro Technology,2006:40-47.

[3] CHIKOVANI V V,OKON I M,BARABASHOV A S. A set of high accuracy low cost metallic resonator CVG [C]//Monterey USA;Location and Navigation Symposium,2008:238-243.

[4] LUNIN B S,YU M. Shatalov balancing of thin-walled metal resonators for low-cost solid-state gyroscopes [C]//Saint Petersburg, Russia; Proceedings of 15th ICINS,2008: 32-33.

[5] 杨勇,方针,谭文跃,等. 低成本金属振动陀螺薄壁谐振子的调平方法[J]. 中国惯性技术学报,2013(5):672-675.