

基于优化半球陀螺谐振子性能的工艺技术

杨 勇,胡晓东,谭文跃,方 针,冉 宇,余 波

(中国电子科技集团公司第26研究所,重庆 400060)

摘 要:半球谐振子是半球谐振陀螺的关键组成部件,而其性能参数是制造高精度半球谐振陀螺的关键,针对谐振子加工后表面的复杂结构、多种缺陷层和球壳质量不平衡,讨论化学处理工艺和离子束调平技术对谐振子主要性能参数品质因数和频差的优化。实验结果表明该工艺技术效果显著。

关键词:半球谐振陀螺(HRG);半球谐振子;品质因数;频差

中图分类号:V241

文献标识码:A

Technology Based on Optimized HRG Resonator Performance

YANG Yong, HU Xiaodong, TAN Wenyue, FANG Zhen, RAN Yu, YU Bo

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

Abstract: The hemispherical resonator is the crucial part of hemispherical resonator gyroscope (HRG), and its performance parameters are the key factors of fabricating the hemispherical resonator gyroscope with high accuracy. Aiming at the complex structure, multi-layers defective and mass-unbalance of the shell, the optimization of two main parameters of hemispherical resonator, the Q -factor and the frequency diversity, by using the chemical treatment technique and the ion-beam balancing technology is discussed in this paper. The experimental results show that the techniques have significant effectiveness.

Key words: hemispherical resonator gyroscopes (HRG); hemispherical resonator; Q -factor; frequency diversity

0 引言

近年来,随着航天技术的深入发展,空间与航天领域已成为事关国家安全和利益的战略“制高点”^[1],越来越受到世界各国的高度重视,而高性能陀螺仪的惯性姿态控制单元是航天技术发展的关键器件之一。半球谐振陀螺已成为一种新型的惯性姿态测量单元的器件,具有高精度、高可靠性、长寿命等更适合于空间应用的特点,已在卫星和宇宙飞船中得到广泛的应用^[2-4],引起世界各国惯性导航界的高度重视。

半球谐振陀螺是由高品质的熔融石英玻璃材料加工而成的一种全新的全固态惯导传感器^[5],主要由半球谐振子、激励罩和读出基座3部分组成,其中谐振子是半球谐振陀螺的核心部件,其性能在多个方面影响半球谐振陀螺产品的最终性能,如频率稳定性、启动时间、功耗及系统漂移、随机漂移等特性。因此,石英谐振子性能参数的优化是非常必要的,且

也直接决定整个陀螺的性能。

1 加工工艺缺陷

半球谐振子的加工是在高硬度、高脆性的石英玻璃材料上,采用一次成型方式,经过多次、反复的研磨加工处理,最终加工成带双端轴柄的半球谐振子。在制造石英谐振子时,要经过切割及粗细研磨等工序,其中包含了机械、物理及化学作用。由于材料的脆性和局部机械载荷的影响,用金刚石砂轮切割玻璃毛坯时会损坏玻璃表面,在宏观上表现为裂缝或缺口,同时在施加冷却液时,由于毛细管效应,冷却液渗透到已产生的裂缝中,使裂缝变大,一般为0.20~0.25 mm,石英玻璃的破坏层可达1 mm。磨削是为使毛坯达到所要求的形状,而在制造谐振子表面时,磨削需要分几个阶段来完成,在每阶段采用逐步减小金刚石粉或研墨粉的粒度,减小表面凹凸层和缺陷层。由于缺陷表面具有非均匀性,且具有内应力特点的变形缺陷底层位于细微凹凸不平面

收稿日期:2013-09-12

基金项目:总装预研基金资助项目(51309010701,51311050102);国家“八六三”基金资助项目(2012AA121501);民用航天基金资助项目

作者简介:杨勇(1981-),男,湖北人,工程师,主要从事惯性振动陀螺的研究。E-mail: yongkee123@sohu.com.

下。细微凹凸不平的表面被磨削掉的玻璃和磨料微粒填满,磨料的尺寸和硬度决定凹凸层的粗糙度,而材料破坏层(缺陷层)的深度比表面粗糙度大。由此看来,在加工完后,谐振子表面出现复杂结构和一定深度的缺陷层,如图 1 所示。这种复杂的结构和缺陷层将会造成半球谐振子的品质因数 Q 值下降。

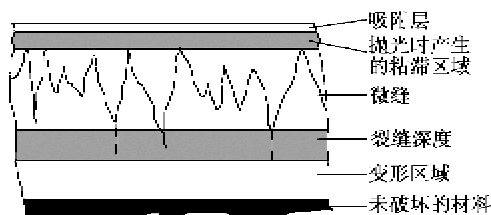
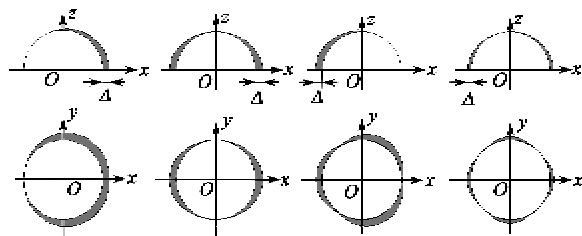


图 1 石英玻璃表面层结构

在加工过程中,虽然采取了许多先进的加工技术,提高了石英玻璃零件的加工精度,其表面物理尺寸精度达到了微米级,表面光洁度达到 10^{-8} 量级,但还是产生了以上各层的不同深度缺陷层,从振动力学的角度分析,加工的精度还达不到制作高精度陀螺的要求,如机械加工后的半球谐振子振动的分裂频差约为 0.5 Hz,而制作惯导级陀螺所要求的分裂频差应小于 0.01 Hz。由此可见,仅通过机械加工的方式尚不能完全满足制作高精度陀螺的需要。

半球谐振子机械加工完成后,其球壳的缺陷的一般分为四类缺陷,其分布图形如图 2 所示。



(a) 第1类缺陷 (b) 第2类缺陷 (c) 第3类缺陷 (d) 第4类缺陷
图 2 半球谐振子缺陷的分布

2 工艺技术研究

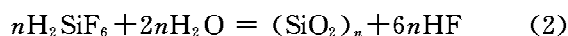
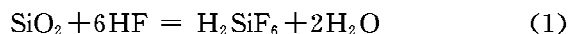
为减弱表面缺陷的影响,减小甚至消除谐振子复杂表面和一定深度的缺陷层,为后工序谐振子镀膜后保障膜层的高均匀性和可靠性,优化谐振子品质因数和频差,借助逐步化学处理工艺和离子束调平技术。

2.1 化学处理工艺

2.1.1 化学腐蚀液配方

加工完后的半球谐振子表面缺陷层(破坏层)和粗糙度是非均匀性结构的,而去掉破坏层的最有效方法就是化学腐蚀^[6-10],对熔融石英玻璃的性能,氢

氟酸是理想的腐蚀剂:



硅酸聚合物($n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)是六面氟化硅的水解产品。

由于缺陷层的非均匀性,纯氢氟酸溶液对消除复杂表面缺陷层作用不大,且表面吸附硅酸盐聚合物妨碍腐蚀液进入新的表面;由于表面粗糙度大,改刻蚀不均。因此需添加部分化学试剂(如正磷酸、硫酸等)与表面活性物混合配方进行化学处理。

2.1.2 化学腐蚀

在去掉表面缺陷层的过程中,化学腐蚀速度受结构的非均匀性影响。由于腐蚀材料的速度太快会导致材料的局部刻蚀,从而增大破坏层深度。但低速腐蚀不能满足工艺条件,因此,在保证腐蚀材料的最佳速度、化学成分稳定及给定温度下,不断旋转夹持谐振子的工件,以保持谐振子球壳表面腐蚀均匀;当腐蚀速度恒定时,表明表面缺陷层已完全消除且石英玻璃本身开始溶解。

用逐步化学法去除破坏层是分阶段进行的,每一阶段完成后,分析质量可确定谐振子质量的减少,缺陷材料的去除厚度为

$$h = m/s \quad (3)$$

式中: m 为在这一化学腐蚀中谐振子质量的减少; s 为谐振子面积。

在每一阶段腐蚀中,若记录化学腐蚀的时间,就可确定缺陷层的溶解速度,谐振子的品质因数和表面粗糙度等参数。

2.2 离子束调平技术

2.2.1 离子束调平原理

在化学处理工艺中去掉缺陷层,提高谐振子的 Q 值,但表面粗糙度增加导致频差增大,且实际的谐振子与理想的谐振子总存在一些偏差,即存在着谐振子的球面质量不平衡,陀螺漂移为

$$\delta = \dots - k_1 \Delta\omega \cos 4(\theta - \varphi_1) + \dots \quad (4)$$

式中: δ 为陀螺随机漂移; k_1 为系数; $\Delta\omega$ 为谐振子频差; θ 为驻波的当前角位置; φ_1 为频差轴定向角。

从式(4)可知,谐振子的频差直接影响陀螺随机漂移。为满足谐振子频差要求和提高陀螺精度,需在质量缺陷机理分析的基础上,对谐振子进行质量调平,使其尽量达到理想的状态。

谐振子质量的调平工艺有很多种,其主要工艺有机械去掉质量法、激光工艺调平法、化学工艺和离

子束调平法。为去掉谐振子表面多余的质量,补偿球壳表面非均匀性谐振子,一般采用离子束刻蚀技术对其调平。之所以选择离子束调平技术,是因为从球壳表面去除不平衡质量而对球壳深层材料的结构产生极小的影响。用其他方法去除微量的熔融石英将使谐振子的声学特性变差。同时在成本和精度上,离子束调平也比传统的技术有优势。

谐振子产生的质量缺陷对振动模式的影响,可依据傅里叶函数进行展开处理,质量缺陷 ρ 可用傅里叶函数 $\rho(\varphi)$ ^[11-12]表示,即

$$\rho(\varphi) = \rho_0 + \rho_1 \cos(\varphi - \varphi_1) + \rho_2 \cos(\varphi - \varphi_2) + \rho_3 \cos(\varphi - \varphi_3) + \rho_4 \cos(\varphi - \varphi_4) + \dots \quad (5)$$

式中: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 分别为第1,2,3,4类缺陷的幅度大小; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 分别为第1,2,3,4类缺陷的方位角位置。

半球谐振子外壳参数决定了缺陷值幅度 ρ_0 和方位角位置 φ 。谐振子质量调平的目的是消除谐振子的质量沿其边缘分布的不均匀性的圆周角的一次、二次、三次和四次谐波引起的不平衡。

2.2.2 质量调平工艺方法

根据非理想对称球壳谐振子的质量缺陷可知,对于球壳第 n 阶振型,第 $2n, n, n+1$ 和 $n-1$ 阶谐波都影响波形的椭圆度^[12]。其中第4类缺陷谐波零和 $2n$ 的差值,就是第4类缺陷 ρ_4 ,其造成的影响与半球谐振子二阶模式振动效应类似,其主要表现是造成半球谐振子振动时的振动频率分裂,即通常所说的频差。其他3类缺陷可导致谐振子质量中心的运动,部分能量传到中心轴上或散射了,影响谐振子波形的定向与性能参数。

谐振子的质量平衡分为2个步骤:

1) 确定缺陷不平衡质量(ρ_1, ρ_4)的大小和4类缺陷谐波的位置(φ_1, φ_4)。

2) 根据调平算法用离子束去掉不平衡的质量。

由于离子束刻蚀调平时采用连续方式进行调平,调平工作过程分为静态调平和动态调平,静态调平是第4类缺陷调平,动态调平是第1,2,3类缺陷调平。在每一次调平时,静态调平先于动态调平进行,此后两者调平轮换进行,因而每一次调平过程的准确性对下一次调平都有相互的影响。

在确定谐振子的四阶缺陷后,首先根据第4类缺陷开展静态调平。通过离子束去掉半球谐振子外壳上4个点的多余质量,使频差降低到一定程度,然

后测试第1,2,3类缺陷的大小和方位,开展动态调平,其具体操作流程如图3所示。

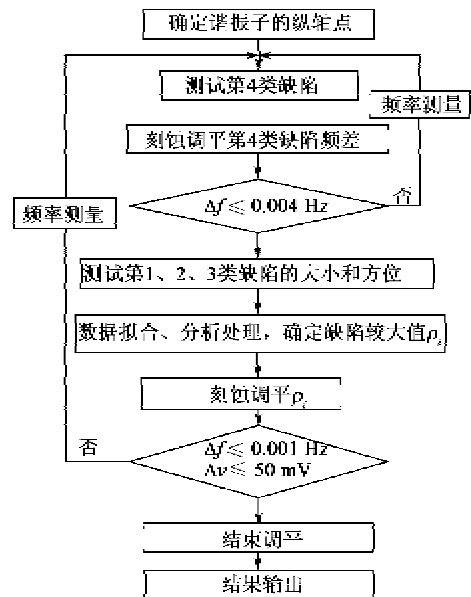


图3 谐振子质量调平流程原理图

目前在实际调平工艺中,精确的动态调平还处于研究阶段,无法精确开展哪一类缺陷的刻蚀调平,在调平过程中,谐振子圆周分成20个区域,每区域 18° 。在每区域测试其缺陷的大小,拟现阶段某一谐振子的调平为例,测试数据如表1所示。通过peakfit软件对数据拟合和分析确定第1,2,3类缺陷的大小和方位,根据拟合曲线(见图4)知,第1类缺陷的电压幅度最大831.815 mV,其方位角为 -3.46766 rad,然后刻蚀调平第1类缺陷,减小谐振子能量的损耗。动态调平后,因圆周部分质量的除去,谐振子的频差可能会变大,因此动态调平和静态调平轮换进行,直到谐振子频差小于0.001 Hz,电压幅度小于50 mV。

表1 谐振子动态调平测试数据表

角度/ $^\circ$	电压/mV	角度/ $^\circ$	电压/mV
0	-199.2	180	580.7
18	-719.5	198	537.7
36	-541.9	216	714.3
54	-691.9	234	1105.9
72	-691.8	252	1079.1
90	-473.9	270	582.6
108	156.3	288	-135.3
126	537.2	306	-818.9
144	758.5	324	-605.9
162	752.2	342	-805.7

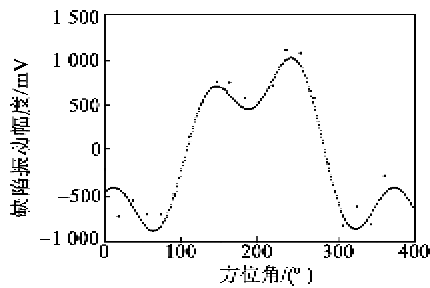


图4 谐振子第1、2、3类缺陷拟合缺陷图

3 实验结果及分析

在精密机械加工后,仔细清洗谐振子表面污垢,测出谐振子的初始品质因数 Q 。以现阶段某一振子实验为例,采用逐步化学处理工艺,试验结果如表2所示。

表2 化学腐蚀情况下谐振子 Q 值、 R_s 和 Δf 的变化

次数	腐蚀深度/ μm	$Q/10^6$	$R_s/\mu\text{m}$	$\Delta f/\text{Hz}$
0	0	2	0.21	0.45
1	0.8	5.6	0.27	0.025
2	0.2	6.6	0.31	0.04
3	0.7	8.7	0.36	0.0581

离子束调平进行数据分析,通过试验确定频差量与处理时间之间的关系,如表3所示。

表3 离子束调平前后谐振子频差的变化

步骤	工序名称	$\Delta t/\text{s}$	$\Delta f/\text{Hz}$
1	化学处理	-	0.0581
2	离子刻蚀(循环1)	162	0.037
3	离子刻蚀(循环2)	144	0.016 8
4	离子刻蚀(循环3)	126	0.004 1
5	离子刻蚀(循环4)	45	0.000 7

通过逐步化学处理工艺和离子束调平技术,除掉谐振子表面的缺陷层,有效改善谐振子的球壳表面,提高了谐振子的品质因数,降低了谐振子的频差,提高谐振子的整体性能,达到谐振子镀膜前的性能参数。

4 结束语

针对谐振子机械加工后的表面结构、多种缺陷层与球壳质量不平衡问题,提出了采用化学处理工艺和离子束调平技术,通过化学腐蚀液配方和化学腐蚀工艺,有效改善谐振子的表面状况,除掉谐振子表面多种缺陷层。通过离子束调平技术,在保证谐振子品质因数的同时,降低了谐振子的频差,优化谐振子的性能参数,提高了陀螺的整体性能,并通过试验验证了该工艺技术的可行性。

参考文献:

- [1] 曹秀云. 国外空间对抗装备技术的发展途径与趋势[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(1): 21-23.
CAO Xi-yun. Development approaches and trends of counterspace technology abroad[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(1): 21-25.
- [2] 吕志清. 半球谐振陀螺在宇宙飞船上的应用[J]. 压电与声光, 1999, 21(5): 349-353.
LV Zhiqing. The application of HRG in the spacecraft[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(5): 349-353.
- [3] EMILY L B, ALLAN Y L. In-flight characterization of cassina inertial reference units[C]// Hilton Herd, South Carolina: AAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007.
- [4] 陈雪, 任顺清, 赵洪波, 等. 半球谐振陀螺厚度不均匀性对陀螺精度的影响[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(3): 29-33.
CHEN Xue, REN Shunqing, ZHAO Hongbo, et al. Effect of thickness nonuniformity of resonator on the HRG accuracy[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(3): 29-33.
- [5] 王旭, 方针, 吴文启, 等. 基于二维质点振动模型的半球谐振陀螺谐振子进动分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(5): 621-626.
WANG Xu, FANG Zhen, WU Wenqi, et al. Precession analysis of HRG resonator based on two dimensional mass vibrations[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(5): 621-626.
- [6] ХИМИЧЕСКАЯ. Технология стекла и ситаллов[M]. Moscow, RUSS: Ред Павлушкин Н М М Стройиздат, 1983.
- [7] АЛЪТАХ О Л, САРҚИСОВ П Д. Шлифование и полирование стекла и стеклоизделий[M]. Moscow, RUSS: Высшая школа, 1988.
- [8] TELLIER C R. Some results on chemical etching of AT-cut quartz wafers in ammonium bifluoride solutions[J]. J Mater Sci, 1982, 17(5): 1348-1354.
- [9] ЗАХАРОВ В И, МАНАННИКОВА Л А, ЧЕРЕПУХИНА Г Н. Способ травления кристаллов кварца[J]. Патент РФ №1476980 СЗОВ 33/10, 1994.
- [10] КИБИРЕВ С Н, ФИЛИМЕНДИКОВА Т С, ЯРОШ А М. Способ изготовления кварцевых кристаллических элементов[J]. Патент РФ, №1739826 Н03Н 3/02, 1989.
- [11] 张挺, 徐思宇, 冒继明, 等. 半球陀螺谐振子的金属化镀膜工艺技术研究[J]. 压电与声光, 2006, 28(5): 538-540.
ZHANG Ting, XU Siyu, MAO Jiming, et al. Study on metallic coating technique of the hemispherical resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(5): 538-540.
- [12] 胡晓东, 罗康俊, 余波, 等. 采用离子束技术对半球谐振子进行质量调平[C]//桂林: 中国惯性技术学会论文集, 2002, 166-168.