

棱镜式激光陀螺光胶表面残余应力影响

刘健宁^{1*}, 翁浚¹, 鲁政², 卞肖云¹

¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

²西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111

摘要 采用有限元分析法, 分析棱镜式激光陀螺在光胶区存在划痕条件下及在变温过程中, 光胶表面残余应力的产生和放大情况。以熔融石英材料介电张量随应力的变化为出发点, 分析应力与陀螺测量值之间的关系。分析结果表明: 光胶区划痕产生的应力将在数倍划痕宽度的区域内产生影响, 应力造成激光陀螺内振荡光频率分裂及偏振态改变, 陀螺闭锁阈值升高, 进而影响陀螺的测试精度和工作稳定性。通过陀螺变温测试实验, 检测地球自转角速度的天向分量, 利用合光光斑形貌和精度曲线稳定性验证理论研究的正确性。

关键词 激光光学; 激光陀螺; 残余应力; 应力双折射; 光胶

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001005

Influence of Residual Stress on Surface of Optical Cement in Prism Laser Gyroscope

Liu Jianning^{1*}, Weng Jun¹, Lu Zheng², Bian Xiaoyun¹

¹School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²North Jierui Opto-Electronics Technology Ltd., Xi'an, Shaanxi 710111, China

Abstract By taking the prism laser gyroscope as the research object and using the finite element analysis method, the problems of the generation and amplification of the residual stress are studied in temperature variation process under the condition of existing scratch on the surface of optical cement. Based on the change of the fused silica's dielectric tensor with stress, the relationship between the stress and gyroscope measurement value is analyzed. The analysis results show that the micro scratch on the optical cement region produces the residual stress in the area whose size is several times of the scratch width, and the frequency division and polarization change are caused. The lock-in threshold of the gyroscope increases, the test precision of the gyroscope and working stability are affected. Finally, by variable temperature experiment, the gyroscope detects the normal angular velocity component of the Earth's rotation, and the combined light spot morphology and precision curve stability are used to verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words laser optics; laser gyro; residual stress; stress birefringence; optical cement

OCIS codes 140.3370; 140.3430; 230.5480

1 引言

全反射棱镜式激光陀螺 (TRPLG) 具有锁区小、寿命长等优点。该激光陀螺在导弹制导、航空器飞行控制及航天遥感卫星姿态控制等领域具有广泛的应用^[1], 其核心器件是棱镜式环形激光

器^[2-3]。棱镜式环形激光器通过结构设计, 实现光以布儒斯特角折射以及全反射, 构成环形光路。棱镜不需要镀制反射膜, 棱镜和腔体通过光胶^[4]结合在一起, 该技术也称为光胶接触法, 依靠分子间的吸引力使两个光学零件的抛光表面紧密贴合在一起。光胶工艺对光胶表面的面形精度要求非

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605156, 61803299)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(2016JQ6073)、陕西省教育厅科学研究计划专项项目(16JK1560)

* E-mail: liujianning@xaut.edu.cn

常高,在实际应用中受光学加工工艺的限制,一般要求光胶面的相对面形误差 $N \leq 0.5$ 个光圈。当棱镜或腔体的光胶面内存在细小的疵病、划痕时,胶合过程中光胶面内封闭一定量的空气或杂质,环境温度变化时,将产生残余应力^[5]。光学零件表面疵病、划痕共分为 10 个等级,能够容纳疵病、划痕的个数与光通过区域和光胶区域的面积密切相关,国家标准在这方面作出了明确的规定。与反射镜激光陀螺相比,TRPLG 谐振腔内部的振荡光在棱镜中的传输距离较长,棱镜携带残余应力影响激光陀螺的精度和工作稳定性^[6]。因此,对于 TRPLG,通常要求通光区域为 0 级疵病、划痕;光胶区域为 1 级疵病、划痕,这对腔体和棱镜表面的加工提出了极严苛的要求。应力对激光陀螺测角速度的影响主要表现在残余应力分布不均匀,这会影响到谐振腔内顺时针和逆时针行波相移的均匀性;棱镜在应力影响下发生应力双折射效应,光路非均匀损耗增加,陀螺闭锁阈值升高;陀螺存储过程中,残余应力缓慢释放,将会改变环形激光器的限模参数,造成陀螺精度下降,甚至产生故障;根据国家军用标准 GJB 2427—1995^[7] 激光陀螺仪测试方法的要求,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及温度变化过程的实验中,残余应力随温度改变而增大,故障率明显升高。

研究 TRPLG 残余应力的关键是对应力的分析与求解^[8-9]。本文利用有限元分析法求解棱镜与腔体光胶面残余应力在变温状态下的放大情况。具体假设棱镜与腔体光胶面存在划痕,计算由此产生的残余应力在 $25\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化条件下,棱镜与腔体接触面的相对位移以及热-结构耦合应力场的分布情况。理论分析以应力作用下材料介电张量发生改变为出发点,采用光学应力双折射理论计算残余应力造成谐振腔内振荡光束频率分裂的程度。结合有限元分析结果,研究变温过程应力以及由应力造成的频率分裂的变化情况。在应力双折射作用下,激光频率分裂得到的寻常光(o 光)、非寻常光(e 光)与环形腔内沿顺时针方向和逆时针方向正常传输的光束重新耦合,使得陀螺闭锁阈值升高,激光陀螺的测量值受陀螺闭锁阈值的影响,产生了误差。变温实验中利用陀螺检测地球自转角速度的天向分量,当测试曲线随温度变化出现缓慢上升时,可判断这是由光胶区残余应力释放造成的。同时,陀螺的合光光斑形貌在与应力相关的故障出现时呈现扭曲、边缘模糊等现象。

2 棱镜式环形激光器

TRPLG 结构简图如图 1 所示,其谐振腔腔体的主要材料是微晶玻璃,棱镜材料是熔融石英。三块棱镜分别在腔体的对应位置,棱镜和腔体通过光胶结合在一起,中央圆孔用于安装抖动轮。梯形棱镜光路设计图如图 2 所示,光以布儒斯特角 φ_B 入射棱镜,在棱镜内传输一段距离后发生全反射,随后折射出棱镜,整个过程实现光束 60° 转角。由于布儒斯特角的作用,光在谐振腔内以线偏振状态振荡。

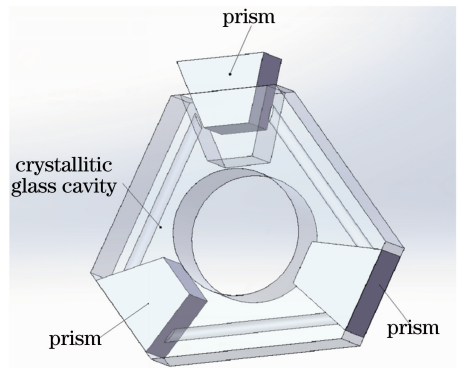


图 1 三角形棱镜式环形腔

Fig. 1 Triangular prism ring cavity

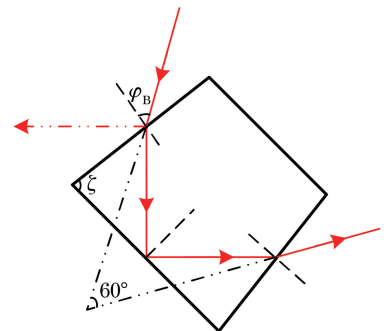


图 2 梯形棱镜光路图

Fig. 2 Diagram of light path of ladder prism

棱镜取代镀膜反射镜组成光路,可以避免由反射镜面背向散射引起的闭锁效应,降低陀螺的闭锁阈值。因为光在棱镜中的传输距离较长,受应力、外磁场等作用的影响,谐振腔内振荡光存在频率分裂的风险,同时线偏振状态存在轻微变化,振荡光具有一定的椭圆偏振度。在此影响下,受光学法拉第效应的作用,谐振腔内的光束对外界磁场敏感,造成棱镜中的损耗增加。棱镜的吸收损耗是这种陀螺闭锁阈值的主要来源之一^[10],应力分布与吸收损耗密切相关,而光胶面间的应力不容易被检测,且其危害不明确,这是研究的重点。

3 应力影响分析

介质在外力作用下会发生弹性形变,从而引起介质的折射率椭球发生变化,此效应称为应力双折

射效应。全反射棱镜的材料是熔融石英,熔融石英属于各向同性介质。在折射率椭球主轴坐标系中,受应力的影响,熔融石英的弹光系数张量可表示为^[11]

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12}) \end{bmatrix},$$

其中: p_{11} 、 p_{12} 为弹光系数矩阵元素。各向同性介质在三个主轴坐标系方向上的折射率相等(设折射率为 n)。因此,各向同性介质的折射率椭球主轴坐标系可以任意选择,且可以选择主轴坐标系方向为应力产生后的三个主应变方向。假设各向同性介质的剪切应变为0,则熔融石英的折射率椭球可表示为

主折射率差与主应力差成正比。

环形谐振腔内振荡光束通过存在应力双折射的棱镜,在入射点处,三个主应变方向为产生应变后介质折射率的主轴方向。假设光沿着其中一个主应变 z 方向传播,则只需考虑另外两个主轴方向的光对应的主折射率差。假设棱镜内部存在应力, L 为环形谐振腔的光学腔长, ν 为谐振腔振荡频率, σ 为应力分布函数,光在棱镜中的传输距离为 l ,激光频率分裂量 $\Delta\nu$ 与折射率差成正比,即

$$x^2 \left(\frac{1}{n^2} + \sum_{i=1}^3 p_{1i} s_i \right) + y^2 \left(\frac{1}{n^2} + \sum_{i=1}^3 p_{2i} s_i \right) + z^2 \left(\frac{1}{n^2} + \sum_{i=1}^3 p_{3i} s_i \right) = 1, \quad (1)$$

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{L} \sigma = \frac{\nu}{L} (n_x - n_y) l =$$

$$\frac{\nu}{L} (C_2 - C_1) [\sigma_x(x, y) - \sigma_y(x, y)] l. \quad (5)$$

式中: s_i ($i=1, 2, 3$)为沿主轴方向 x 、 y 、 z 的三个拉伸应变; p_{1i} 、 p_{2i} 、 p_{3i} ($i=1, 2, 3$)为对应的弹光系数矩阵元素。

环形谐振腔内振荡光束频率分裂容易造成谐振腔光路的非均匀损耗,且 e 光的能量散射耦合入正常运转的光束中,这些因素导致陀螺闭锁阈值升高。

按照环形激光器半经典 Lamb 理论,以反向行波的强度和相位的自治方程组为出发点,可将激光陀螺的闭锁阈值表示为^[12]

$$\frac{1}{n_x^2} - \frac{1}{n_y^2} = (p_{11} - p_{12})(s_1 - s_2). \quad (2)$$

由于 n_x 和 n_y 与主折射率 n 相差很小,则有 $n_y^2 - n_x^2 \approx 2n(n_y - n_x)$, $n_x^2 n_y^2 \approx n^4$ 。 x 、 y 方向上的折射率差 Δn (主折射率差)可表示为

$$\Delta n = n_x - n_y = \frac{1}{2} n^3 (p_{11} - p_{12})(s_1 - s_2). \quad (3)$$

$$\Omega_{\text{Lock}}^2 = \frac{7}{8} A_0^2 + B_0^2 + \frac{|A_0|}{4} (32B_0^2 + A_0^2) / \sqrt{32B_0^2 + A_0^2 + |A_0|}, \quad (6)$$

由此可知,熔融石英在应力的作用下变为了双折射介质,主折射率差与主应变差成正比。由于主应变和主应力成正比,所以(3)式可表示为

$$\text{式中: } A_0 = \zeta_R \left[\cos\kappa - \frac{2L(\rho - \tau)}{c(\beta - \theta)} \sin\kappa \right]; B_0 =$$

$\frac{\zeta_R^2 L(\beta + \theta)}{2c\alpha(\beta - \theta)} \left[\frac{L}{c} \cdot \frac{(\rho - \tau)}{(\beta - \theta)} \sin 2\kappa + \sin^2 \kappa \right]; \zeta_R = 2cR/L$; Ω_{Lock} 为陀螺的闭锁阈值; α 为环形腔单程增益损耗; β 为环形腔振荡频率的自饱和系数; θ 为互饱和系数; ρ 为频率自排斥系数; τ 为频率互排斥系数; R 为环形腔包围面积的半径; c 为光速; κ 为顺时针和

$\Delta n = (C_1 - C_2) [\sigma_x(x, y) - \sigma_y(x, y)]$, (4)
式中: C_1 、 C_2 为材料的光学系数; $\sigma_x(x, y)$ 、 $\sigma_y(x, y)$ 分别为 x 、 y 方向上的主应力。在此条件下,原属于各项同性介质的熔融石英成为一种双折射介质,其

逆时针方向上背向散射光的相位差。

在行波状态下, 环形谐振腔内运转的反向行波相位差变化率的表达式可简化为

$$\dot{\phi} = \Omega_{in} - A_0 \sin \phi - B_0 \sin 2\phi \quad (7)$$

式中: Ω_{in} 为外界输入角速度; ϕ 为反向行波间的相位差。

测量的拍频 $\Delta\nu$ 与平均拍频之间的关系满足 $\Delta\nu = \overline{\dot{\phi}} / (2\pi)$, 也可表示为

$$\frac{1}{\Delta\nu} = 2\pi \frac{1}{\dot{\phi}} = \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{\dot{\phi}} \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式, 可得

$$\frac{1}{\Delta\nu} = \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{\Omega_{in} - A_0 \sin \phi - B_0 \sin 2\phi} \quad (9)$$

将(9)式的被积函数展开为幂级数, 再进行积分, 得到

$$\frac{1}{\Delta\nu} = \frac{2\pi}{\Omega_{in}} \left[\left(1 - \frac{A_0^2 + B_0^2}{\Omega_{in}^2} \right)^{-1/2} + \frac{3A_0^2 B_0^2}{4\Omega_{in}^4} + \frac{15}{32\Omega_{in}^6} (3A_0^4 B_0^2 + 4A_0^2 B_0^4) + \dots \right] \quad (10)$$

忽略高阶项, 当 A_0^2/Ω_{in}^2 和 B_0^2/Ω_{in}^2 较小时, 可近似得到

$$\Omega_{Lock}^2 = A_0^2 + B_0^2, \quad (11)$$

$$|\Omega_{in}| > \Omega_{Lock}, \quad (12)$$

$$\Delta\nu \approx (\Omega_{in}^2 - \Omega_{Lock}^2)^{1/2} / (2\pi). \quad (13)$$

根据(13)式, 激光陀螺的测量值只与外界输入角速度和陀螺的闭锁阈值相关。当外界输入角速度较小且可与陀螺的闭锁阈值相比拟时, 陀螺闭锁阈值的波动会显著影响陀螺的测量精度。

此外, 光束通过存在应力的棱镜时, 原振荡线偏振光会产生一定的椭圆偏振度。熔融石英的偏振光磁旋系数较大, 外磁场易对椭圆偏振光产生干扰, 使反向行波对产生电磁非互易。这种非互易损耗会影

响陀螺的工作稳定性。

总之, 应力引起腔内振荡光频率分裂, 且使得光偏振态发生变化, 这会影响 TRPLG 的测试精度和工作稳定性。应力造成的负面影响与应力的大小密切相关。因此, 在变温测试实验中, 与应力有关的故障发生率明显上升。为了评估应力产生的风险, 采用有限元分析法定量地计算热-结构耦合应力。

4 应力有限元分析

应力数值分析采取有限元分析法。有限元分析法是利用数学近似对真实的物理系统进行模拟, 通过有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。本文涉及热-结构-应力多物理场耦合问题, 分析过程涉及温度、光胶区微位移和残余应力三种物理量。

所建立的分析模型如图 3 所示, 具体包括三部分: 微晶玻璃、熔融石英、划痕区包裹的空气条带。其中, 微晶玻璃和熔融石英设计为 $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的长方体条块, 它们的接触面是光胶区。在光胶区域, 设计一个横截面高为 0.5 mm 的正三角柱体划痕, 其划痕长为 8 mm , 且不贯通。划痕区域内设有压强为 1 atm ($1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$) 的空气。三种材料按照实体建模紧密贴合在一起。表 1 列出模型中三种材料的材料参数。

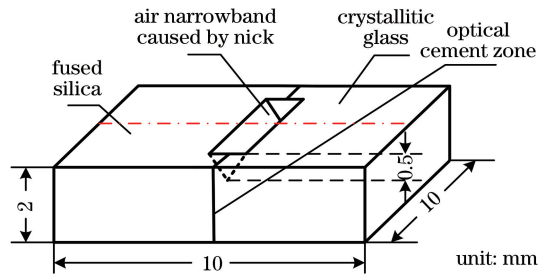


图 3 有限元分析模型结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of finite element analysis model

表 1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters

Material	n_0 (25 °C)	Elasticity modulus E /GPa	Poisson's ratio N	Shear modulus G /GPa	$C_1/$ ($10^{-12} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	$C_2/$ ($10^{-12} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	$C_3/$ ($10^{-12} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
Fused silica	1.5352	92.31	0.31	41.18	-1.32	4.20	-3.85
Crystallitic Glass	1.4570	73.04	0.28	31.37	0.65	1.91	1.53
Air	1.0003						

图 4 为有限元分析模型的网格划分图, 模型表面中间位置为划痕形成的空气窄带, 其横截面如图 4 右下方所示。采用 ANSYS 瞬态分析模块, 按照

国家军用标准设置激光陀螺变温实验中的温度边界条件, 即温度由 25 °C 降至 -40 °C , 降温速度为 1 °C/min 。分析过程中, 模型光胶面相对于四周存

在一定的热弛豫。约 60 min 后,模型各处温度完全降低至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,且温度分布均匀。模型光胶区位移量等值线分布图如图 5 所示;模型应力分布图如图 6 所示。图 7、图 8 分别为在图 3 模型中,点划线标记出的位置因应力放大而产生的位移和应力分布曲线。

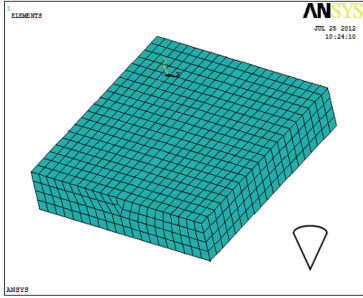


图 4 有限元模型网格划分图

Fig. 4 Diagram of mesh division of finite element model

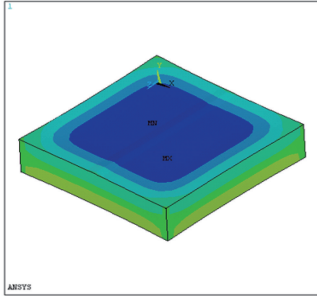


图 5 模型应力场产生的附加位移

Fig. 5 Additional displacement caused by stress field of model

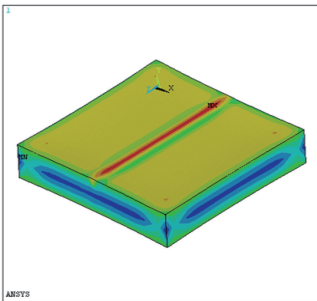


图 6 模型应力场分布

Fig. 6 Stress field distribution of model

如图 5 和图 7 所示,宽度约为 0.5 mm 的划痕导致约 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 范围内微位移分布改变,微位移最大值约为 $3.94\times 10^{-7}\text{ m}$ 。如图 6 和图 8 所示,划痕附近区域应力值显著大于周围其他区域,应力产生的压强最大值为 9 Pa 。划痕周边 $2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的狭长区域内应力产生的压强数值约为 6 Pa ,其余部分应力产生的压强数值约为 1 Pa 。此外,沿着 z 方向的划痕,在划痕区域内沿 x 方向的应力与划痕周边区域的应力是反方向的; z 方向上,

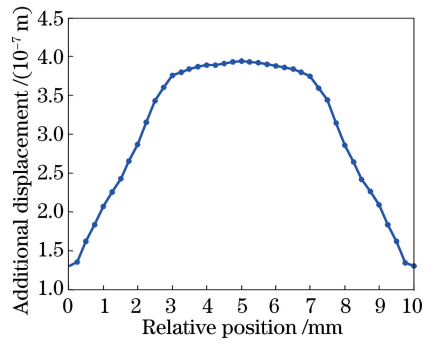


图 7 模型点划线位置附加位移

Fig. 7 Additional displacement corresponding to dash-and-dot line

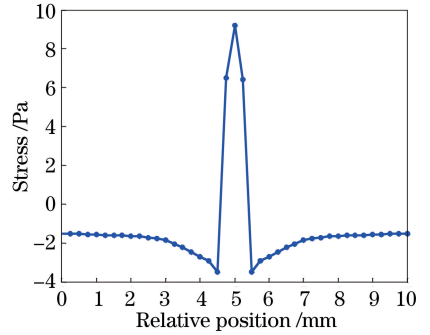


图 8 模型点划线位置应力场

Fig. 8 Stress field distribution corresponding to dash-and-dot line

划痕部分的应力与划痕周边区域的应力是反方向的,表现为一种朝向划痕区域中心的拉聚应力。

空气、微晶玻璃、熔融石英三种材料的热力学参数不同,温度变化时,它们之间的热-结构应变存在差异,从而生成应力。Oram 等^[13]基于直腔 He-Ne 激光器,在腔内插入晶体,进行腔内应力双折射激光频率分裂实验,实验实测压力灵敏度为 2.1 MHz/N 。结合实验数据与变温条件下应力分析结果,可发现划痕造成区域应力放大,可能引起 $12.6\sim 18.9\text{ MHz}$ 的频率分裂。频率分裂的具体值与应力梯度的分布和光通过棱镜的路径相关,这部分光可能直接耦合进入理想无应力条件下顺时针和逆时针传输的光束中,造成陀螺闭锁阈值升高。同时,光在存在应力的棱镜中传输一定距离,应力使得棱镜折射率产生变化,导致顺时针和逆时针传输光束相位发生偏移,这会直接影响陀螺的检测精度。

此外,在实际光胶过程中,光胶面内存在划痕,导致胶合困难,这需要通过额外施加压力完成胶合,压力最终以残余应力的形式保留在光胶区域中,影响陀螺的工作。不恰当的光胶方法也是残余应力产生的重要因素之一。例如,光胶面擦拭得极洁净,光

胶操作过程中,两光胶面接触的瞬間即完成光胶。在此情况下,光胶胶合可能从棱镜四周开始,胶合瞬间在棱镜中心位置封闭一定量的空气,从而使得中央区域胶合不充分,呈现草黄色。变温实验中,这部分“虚光胶”封闭空气将造成通光路径上的应力,严重影响陀螺的稳定工作。上述这些因素都是激光陀螺变温测试过程中与应力相关的不稳定因素。

5 实验验证

选择无划痕光胶区与存在划痕、疵病的TRPLG进行对比实验。在洁净厂房环境温度(25℃)下,偏光计检测不到明显的残余应力。实验方法如下:按照国家军用标准规定的激光陀螺变温测试方法,将陀螺置入温箱,温箱从25℃至-40℃按照1℃/min的变温速率降温,同时激光陀螺检测地球自转角速度的天向分量,测试过程采取百秒计数方式,即每100s输出一个测试点。

图9(a)为光胶面完好的陀螺测试结果,陀螺百秒测试输出精度曲线保持稳定,零偏稳定性优于0.01(°)/h。图9(b)为通过CCD检测获得的变温测试中激光陀螺合光光斑。合光光斑是精度测试曲线的来源,激光陀螺通过记录单位时间内合光光斑在双光窗光电探测器表面的移动数量,实现角速度检测。按照应用要求,合光光斑中央干涉暗条纹间距应保持为双光窗光电探测器间距的4倍。在实际实验过程中,无划痕影响的激光陀螺干涉光斑保持稳定。外光阑系统衍射导致干涉光斑的长尾迹,但不影响激光陀螺的实际工作。图10(a)为光胶区存在划痕、疵病影响的谐振腔变温测试结果。图10(a)中,测试曲线存在波动,测试进行到3600s,即第36个点,测试曲线逐渐上升。此时检测陀螺的合光光斑出现光斑模糊、畸变,如图10(b)所示。该陀螺出现测试零偏上升故障时,与常温下测试合光光斑对比,故障光斑中央暗条纹倾斜、间距减小。故障原因是应力在低温下导致产生应力双折射效应。对于此类故障,需要重新研磨光胶面去除划痕、疵病,同时需重新进行光胶装配,并控制装配过程中的残余应力。通过返修程序,可以解决陀螺变温测试实验中零偏曲线缓慢漂移的故障。实际中,随着激光陀螺环形谐振腔批量化生产,变温实验过程中,零偏测试曲线随温度出现上下漂移变化,此类故障谐振腔大部分都存在变温过程中应力产生和放大的问题。按照针对性控制残余应力的返修方法,故障可以得到解决,进一步验证了理论分析的正确性。

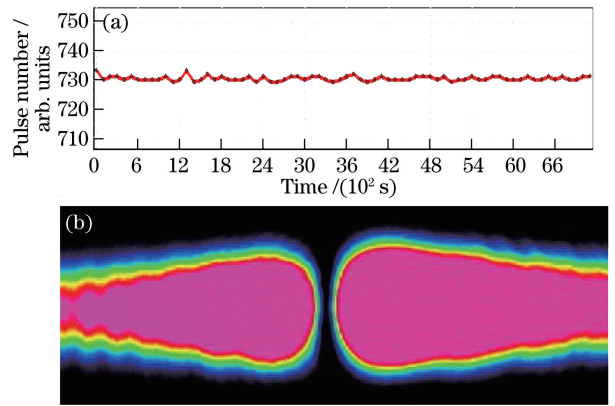


图9 正常陀螺变温测试精度和合光光斑。

(a)精度曲线;(b)合光光斑

Fig. 9 Precision and combined facula of TRPLG in normalgyro temperature change test.

(a) Precision curve; (b) combined facula

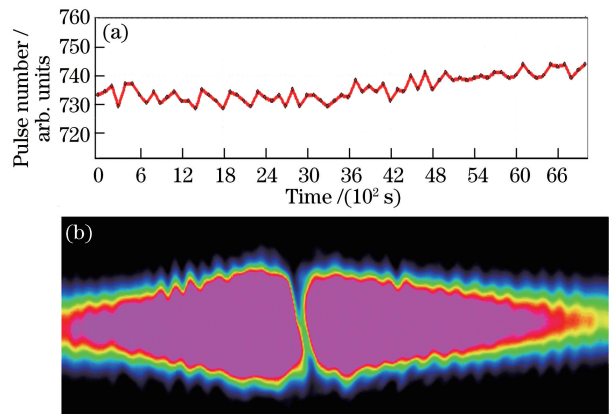


图10 应力异常陀螺变温测试精度和合光光斑。

(a)精度曲线;(b)合光光斑

Fig. 10 Precision and combined facula of TRPLG in abnormal gyro temperature change test.

(a) Precision curve; (b) combined facula

6 结 论

棱镜式激光陀螺不需镀制反射膜,由于光在棱镜中的传输距离较长,如果光胶区存在划痕、疵病等瑕疵,光胶过程中引入额外的残余应力,变温过程中易出现与应力相关的故障。按照国家军用标准针对激光陀螺测试标准的相关规定,在变温测试实验中,利用陀螺检测地球自转角速度的天向分量,如果测试精度曲线出现缓慢上升,同时干涉光斑中的暗条纹出现边缘模糊等现象,说明残余应力随着温度的变化逐渐放大并影响陀螺的正常工作。残余应力引起应力双折射效应,频率分裂产生的o光、e光与正常运转的顺时针、逆时针传输光束耦合,引起陀螺的非均匀损耗增加,闭锁阈值升高。根据理论分析,闭

锁阈值将显著影响低输入角速度状态下陀螺的测量值。

参 考 文 献

- [1] Tao Y B, Li S H, Liu S M. Analysis and improvement of frequency stabilization characteristics of a total reflection prism laser gyro [J]. IEEE Access, 2018, 6: 69185-69194.
- [2] Ren L N, Liu J N, Jiao M X. Analysis of the influence on the characteristics of the prism laser gyroscope by temperature disturbance [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0614002.
任莉娜, 刘健宁, 焦明星. 温度扰动对棱镜式激光陀螺特性的影响 [J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0614002.
- [3] Ma J J, Xie Q, Tian Z A, *et al.* Frequency tracking technology for dither mechanism of laser gyros based on phase locked loop [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101401.
马家君, 谢泉, 田泽安, 等. 基于锁相环的激光陀螺抖动机构频率跟踪技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101401.
- [4] Bakin Y V, Ziouzev G N, Lioumirski M B. Laser gyros with total reflection prisms [M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003: 1-34.
- [5] Wang X, Zhang H J, Wen Q, *et al.* A stress fiber sensor based on laser beat frequency [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801011.
王旭, 张豪杰, 温泉, 等. 一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801011.
- [6] Liu J N, Jiang J B, Lian T H, *et al.* Intensity distribution properties of output light in total reflection prisms laser gyro with cavity stresses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102003.
刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响 [J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102003.
- [7] The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRC. Methods for laser gyroscope test: GJB2427-1995 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
国防科学技术工业委员会. 激光陀螺仪测试方法: GJB2427-1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [8] Wan Y, Xia L H, Zhao X S, *et al.* Effect of planar defects on optical properties in three-dimensional colloid crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1991-1995.
万勇, 夏临华, 赵修松, 等. 面缺陷对三维胶体晶体光学性质的影响 [J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1991-1995.
- [9] Sun H J, Wei J, Zheng Z H, *et al.* Effects of laser process parameters on residual stress of pure titanium samples prepared by laser melting deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302014.
孙洪吉, 韦靖, 郑兆宏, 等. 激光工艺参数对激光熔化沉积纯钛样品残余应力的影响 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302014.
- [10] Liu J N, Jiao M X, Jiang J B, *et al.* Self-biasing phenomenon in prism laser gyro operating in double-longitudinal-mode state [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32353-32363.
- [11] Li Z C, Tang Z L, Chen P, *et al.* Study of photoelastic stress distribution and imaging method based on Stokes parameters [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512005.
李志诚, 唐志列, 陈萍, 等. 基于斯托克斯参量的光弹性应力分布及成像方法研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512005.
- [12] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M, *et al.* The ring laser gyro [J]. Reviews of Modern Physics, 1985, 57(1): 61.
- [13] Oram J, Latimer D, Spoor P, *et al.* Longitudinal mode separation tuning in 633 nm helium-neon lasers using induced cavity birefringence [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(8): 1169-1172.