

# 超声振动研磨、抛光法去除激光陀螺腔体深小孔孔壁缺陷技术研究

崔晓旭, 李敏, 李大琪\*

中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

**摘要:** 通过对激光陀螺腔体深小孔钻削过程的材料去除机理分析和试验验证, 给出了孔壁缺陷的评价方法。研究了某型激光陀螺腔体深小孔钻削过程所产生的孔壁缺陷层深度, 并进一步研究了深小孔去除缺陷的工艺, 通过超声振动研磨和复合抛光技术, 实现了腔体内表面的精密加工。

**关键词:** 超声振动; 缺陷层; 研磨; 抛光

**中图分类号:** V241.62+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 02-73-6

激光陀螺是激光捷联惯性导航系统的核心部件, 其原理基于Sagnac效应<sup>[1,2]</sup>, 具有启动快、可靠性高、寿命长等优点。作为新一代惯性传感器, 它在航空、航天领域获得了越来越广泛的应用<sup>[3]</sup>。

激光陀螺谐振腔(以下简称腔体)是激光产生和传输的载体, 它的材料是零膨胀系数的微晶玻璃, 不仅在形状结构尺寸精度上有严格的要求, 而且对其内腔表面的粗糙度、缺陷层也要严格控制。它的加工工艺对激光陀螺的精度、可靠性和稳定性起很大作用。

本文通过对不同加工参数下微晶玻璃材料缺陷层分析研究, 确定去除激光陀螺深小孔孔壁表面缺陷量化指标以及激光陀螺深小孔振动研磨、抛光工艺方案。

## 1 激光陀螺腔体深小孔孔壁表面缺陷分析

如图1所示, 激光陀螺腔体材料是具有硬、脆性特点的微晶玻璃。其材料的莫氏硬度是5.8, 弹性模量是88GPa, 泊松比是0.215。从这些指标可以看出, 激光陀螺腔体加工属于硬、脆难加工领域, 其加工过程往往伴随着材料的脆性断裂, 而去除这种材料的脆性断裂所形成的缺陷层已成为

改善激光陀螺长期工作可靠性的关键。特别是改善激光陀螺的关键结构——深小孔的孔壁表面质量更为重要。



图1 激光陀螺腔体加工所用材料

Fig.1 Material of the ring laser gyro(RLG)

### 1.1 激光陀螺腔体深小孔孔壁缺陷的定义

硬脆材料(如陶瓷、玻璃)深小孔, 特别是高精度深小孔加工是国内外都在研究解决的课题, 而旋转超声钻削是加工深小孔的有效方法<sup>[4]</sup>, 激光陀螺腔体深小孔亦采用了超声钻削技术加工。

收稿日期:2013-11-20; 录用日期:2013-12-13

基金项目:航空科学基金(2010ZE18006)

\*通讯作者. Tel.: 029-88366260 E-mail: 13909255689@139.com

**引用格式:** CUI Xiaoxu, LI Min, LI Daqi. Study on eliminating disfigurement of small-deep holes of the ring laser gyro by grinding with ultrasonic vibration and polishing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(02): 73-78. 崔晓旭, 李敏, 李大琪. 超声振动研磨、抛光法去除激光陀螺腔体深小孔孔壁缺陷技术研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(02): 73-78.

有关旋转超声钻削先进陶瓷去除机理的研究结果表明,在旋转超声钻削先进陶瓷过程中,工件材料主要基于两种去除机理:脆性断裂和塑性去除两种方式<sup>[5]</sup>。对于激光陀螺腔体深小孔孔壁缺陷而言,塑性去除所形成的孔壁表面缺陷远比脆性断裂所形成的孔壁表面缺陷小。因此,本文研究的内容主要是针对材料在脆性断裂过程中所形成的深小孔孔壁表面缺陷的去除技术。为了有效去除深小孔孔壁缺陷,首先应研究材料脆性断裂所形成的缺陷层结构和深度。

### 1.1.1 材料脆性断裂形式分析

根据压痕断裂力学,材料脆性断裂所形成裂纹断裂形式包括径向裂纹 $C_r$ 和横向裂纹 $C_L$ ,径向裂纹 $C_r$ 和横向裂纹 $C_L$ 的长度分别为:

$$C_r = k_1 \cdot F_g^{1/2} / (H_w^{1/4} \cdot k_c^{1/3}) \quad (1)$$

$$C_L = k_2 \cdot (F_g / k_c)^{3/4} \quad (2)$$

一般认为,横向裂纹的深度与成比例关系,所以

$$h_i = k_3 \cdot (F_g / H_w)^{1/2} \quad (3)$$

其中, $F_g$ 是单颗磨粒对工件的压载( $N$ ), $H_w$ 是工件材料的硬度( $G$ ), $K_c$ 是断裂强度( $MPa \cdot m^{1/2}$ )。  $k_1, k_2, k_3$ 是比例常数。

### 1.1.2 腔体深小孔钻削过程材料去除机理

旋转超声钻削过程中,工件材料的去除是工具表面上的众多磨粒同时参与压印以及划擦综合作用的结果。所以,在考察旋转超声钻削过程中工件材料的脆性断裂去除方式时,还应考虑相邻金刚石磨粒压印作用的相互影响。如图2所示,当相邻金刚石磨粒之间的距离小于一定距离(临界距离)时,相邻压痕产生的横向裂纹发生干涉作用。即当相邻金刚石磨粒之间的距离小于临界距离时,由磨粒压印引起的平行于工件表面发展的横向裂纹,还来不及向工件表面或内部延展,就与相邻金刚石磨粒压印产生的平行于工件表面的横向裂纹相遇,相邻磨粒之间的工作材料将以层剥落的形式被去除<sup>[6]</sup>。如图3所示,磨粒在被切削

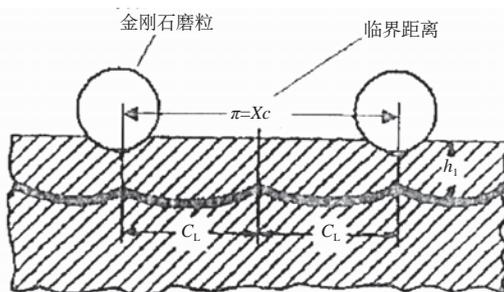


图2 相邻横向裂纹相遇的临界距离

Fig.2 Critical distance when the border upon transverse crack encounter

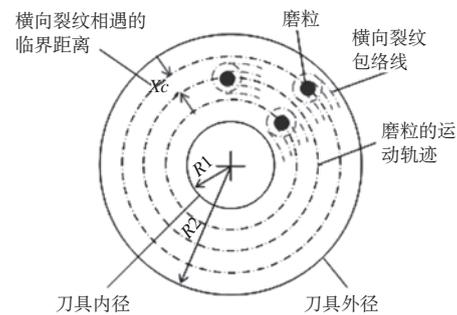


图3 旋转钻削中横向裂纹圆的包络线

Fig.3 Trochoid of circular transverse crack with rotary drilling

工件表面形成的横向裂纹位置随着工具的旋转而变化,因此,磨粒切削过程所形成的横向裂纹包络圆在一个切削周期内将形成横向裂纹包络线,当金刚石工具表面相邻磨粒的距离小于横向裂纹相遇的临界距离 $X_c$ 时,单颗磨粒产生的横向裂纹圆包络线相互叠加,那么旋转超声钻削工具旋转一周,由于相邻磨粒旋转运动导致横向裂纹圆包络线的叠加作用下,工件被切削表面形成一个深度为 $h_i$ 的环形沟槽,工件被切削表面的材料以层剥落的形式被去除。

### 1.1.3 腔体深小孔钻削过程材料去除机理验证

为证明材料横向断裂是材料去除的主要方式,本文对旋转超声钻削后的表面进行了显微观察和分析。如图4所示,旋转超声钻削后,表面呈现出明显形状相似的沟槽,同时这些沟槽与材料脆性断裂形成的裂纹、崩片形貌相似。因此,硬脆材料旋转超声钻削表面材料的去除方式是以材料横向断裂为主的层剥落的形式被去除。将这种表面进一步用化学腐蚀的方法进行处理(化学腐蚀深度0.01mm),如图5所示,这些沟槽进一步显性化,这与上述研究的结论是相互印证的。

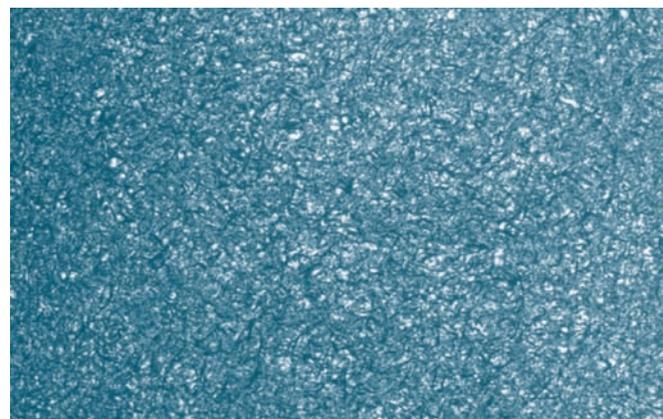


图4 旋转超声钻削表面显微图片

Fig.4 Micrograph of a surface with rotary ultrasonic drilling

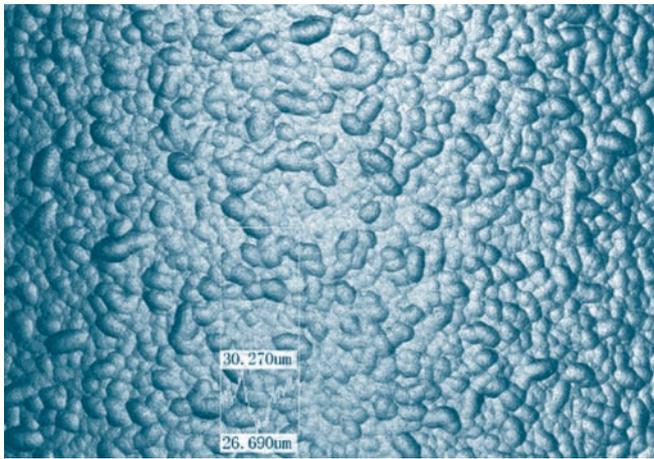


图5 旋转超声钻削表面化学腐蚀后显微图片

Fig.5 Micrograph of a surface drilled with rotary ultrasonic and eroded with chemistry method

1.1.4 激光陀螺深小孔孔壁表面缺陷评价方法

本文针对材料脆性断裂所形成的孔壁表面缺陷给出了两种评价方法。方式1是针对材料的主要去除方式，即材料横向断裂进行的三维显微分析评价法；方式2是针对材料径向断裂进行的显微对比分析评价法。

材料横向断裂的表面损伤分析方法是将被观测的孔壁表面剖开后，采用化学腐蚀的方法将被观测表面进行轻微腐蚀，再利用共聚焦显微镜进行显微观察分析，如图6所示。图6显示了材料横向断裂所引起的孔壁表面损伤形貌，也可以从中分析出表面损伤(沟槽或凹坑)的深度量值。

显微对比分析评价法是先将被观测表面进行无损抛

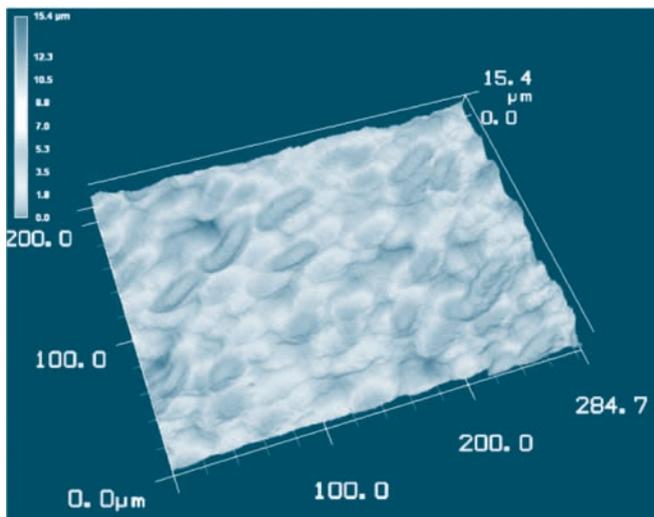


图6 某深小孔孔壁表面化学腐蚀后三维微观形貌

Fig.6 Micrograph of three-dimensional that a deep-hole surface eroded with chemistry method

光后，进行显微观察分析，并确定观测的特征点。再将被观测表面进行化学腐蚀，将裂纹显形(由于应力释放后，裂纹处于闭合状态。因此，必须采用化学腐蚀后才能将裂纹看清)，通过观察并将腐蚀后的特征点找到，这时可以对比分析腐蚀前后被观测部位的裂纹情况。图7(a)、图7(b)清晰显示了经化学腐蚀后裂纹的微观形貌，同时也可以从中分析出裂纹的深度量值。

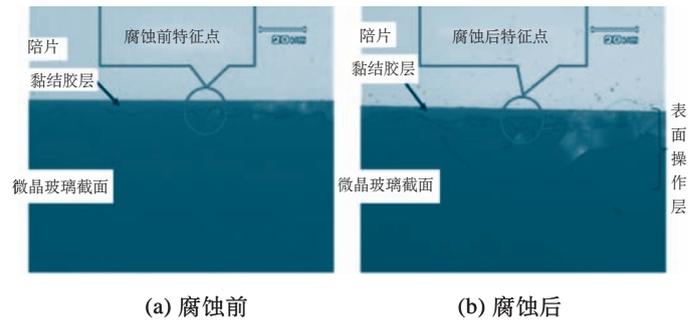


图7 化学腐蚀前后裂纹对比分析

Fig.7 Contextual analysis of the surface eroded with chemistry method

1.1.5 表面损伤深度与加工参数关系

采用3因素2水平的DOE试验，研究材料横向断裂所引起的表面损伤深度与加工参数关系，试验数据如表1所示。

表1 DOE试验数据表

Table 1 Datasheet of the DOE experimentation

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
标准序	运行序	中心点	区组	转速	进给	刀具金刚石粒径	横向断裂深度最大值
1	2	1	1	-1	-1	-1	10.2
3	3	1	1	-1	1	-1	13.8
7	4	1	1	-1	1	1	15.4
8	5	1	1	1	1	1	12.7
9	6	0	1	0	0	0	11.3
10	7	0	1	0	0	0	11.5
5	8	1	1	-1	-1	1	14.1
2	9	1	1	1	-1	-1	6.5
6	10	1	1	1	-1	1	10.9

图8反应了材料横向断裂所引起的表面损伤深度与转速成反比例关系、与进给成正比例关系、与金刚石粒径成正比例关系。即转速越大材料横向断裂损伤深度越小，进给越大材料横向断裂损伤深度越大，金刚石粒径越大材料横向断裂损伤深度越大。

按照同样的试验方法，也可以得出材料径向断裂所引起的表面损伤深度与加工参数的关系。材料横向断裂损伤深度和径向断裂引起的表面损伤深度与加工参数的相互影响关系相同。即材料径向断裂所引起的表面损伤深度与转速成反比例关系、与进给成正比例关系、与金刚石粒径成正比例关系。即转速越大材料径向断裂损伤深度越小、进给越大材料径向断裂损伤深度越大，金刚石粒径越大材

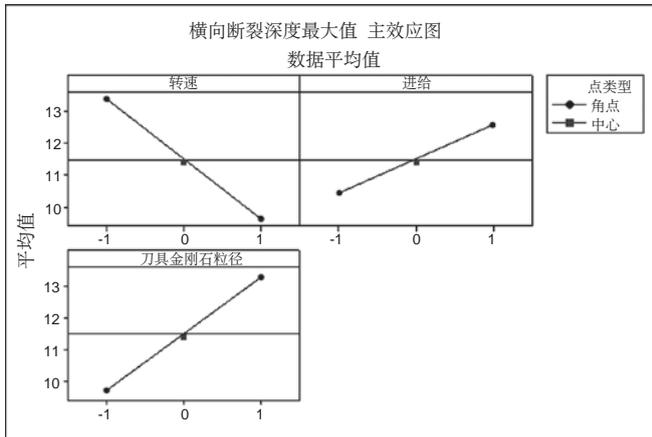


图8 表面损伤与切削参数关系模型

Fig.8 Relation model between surface's damnification and cutting's parameter

料径向断裂损伤深度越大。

通过大量的试验数据分析,确定了在目前激光陀螺深小孔旋转超声钻削加工参数的条件下,所引起的最大表面损伤深度为 $22\mu\text{m}$ 。因此,在后续深小孔研磨抛光技术研究过程中,为了彻底去除深小孔孔壁表面损伤,深小孔孔壁研磨抛光深度应不小于 $22\mu\text{m}$ 。

## 2 超声振动研磨技术

超声振动研磨原理如图9所示,即在普通旋转研磨的基础上施加几万赫兹的上下往复高频超声振动。与传统研磨原理相比,超声振动研磨过程中工具与工件的接触时间短,产生的切削热少,切削力较小,从而提高了排削效果,提高了工件和工具的冷却效果(主要体现为研磨抛光温度变化小),减小了切削力增加引起的二次表面损伤。

### 2.1 超声振动研磨工具研究

针对激光陀螺深小孔的超声振动研磨工具,研制了金刚石粒径为1000#的微细金刚石固着磨料的研磨工具,如图10所示。这种微细金刚石固着磨料工具对于深小孔的研磨是一种非常有效的工具。

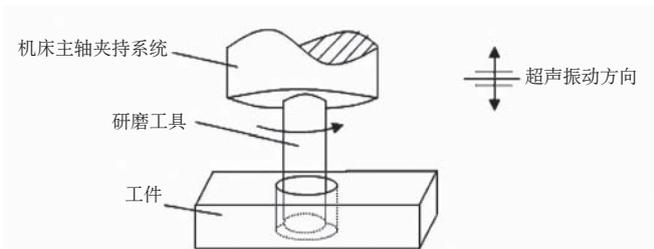


图9 超声振动研磨原理示意图

Fig.9 Sketch map of lapping elements with ultrasonic and libration

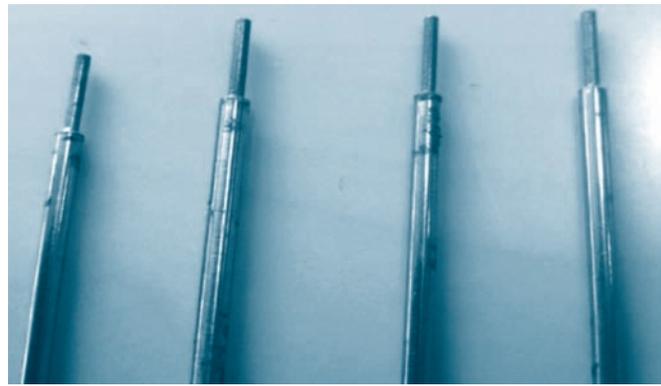


图10 粒度为1000#的金刚石固着磨料研磨工具样件

Fig.10 Molds of 1,000 granular with diamond sessile grind

### 2.2 超声振动研磨工艺参数优化

超声振动研磨的加工效率和工具寿命是影响激光陀螺深小孔超声振动研磨工程化应用的关键因素之一。因此,本文针对超声振动研磨加工效率和工具寿命与加工参数的关系进行了详细研究。

试验将加工参数(转速、进给、冷却压力)分成三组,分别是加工参数1、加工参数2和加工参数3。其中,研磨工具进给路径采用螺旋进给方式,这种工具进给方式对能够获得较好的加工表面,并分别在施加超声振动和不施加超声振动的条件下进行试验。

如图11所示,纵坐标表示在研磨去除量相等的条件下每个孔研磨所用的时间。可以看出,施加超声振动的研磨效率高,在施加超声振动的条件下,加工参数对加工效率的影响较小。如图12所示,纵坐标表示刀具的寿命(单位:m),可以看出,施加超声振动的刀具寿命长,在加工参数1

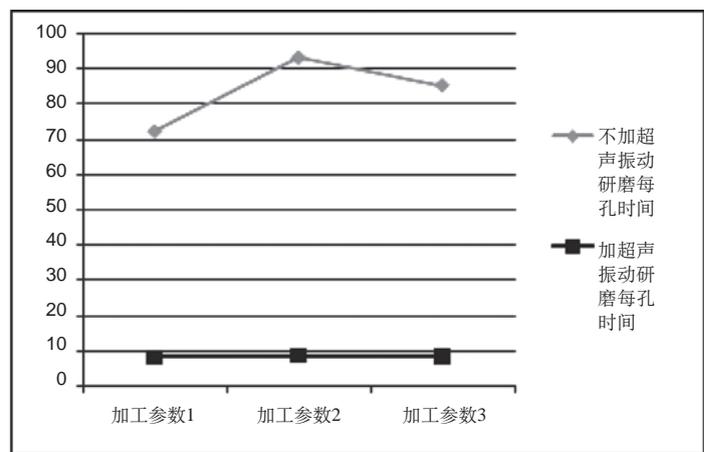


图11 研磨加工效率与加工参数关系

Fig.11 Relation between grind efficiency and cutting parameter

条件下刀具寿命最长。因此，确定出超声振动研磨较优的工艺参数是工艺参数1。

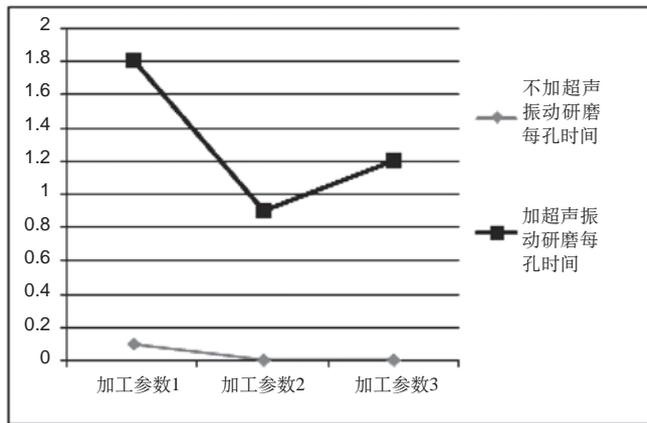


图12 研磨加工刀具寿命与加工参数关系

Fig.12 Relation between cutlery's life and cutting parameter

### 3 激光陀螺腔体深小孔抛光技术

本文研究了一种复合模具抛光方法，不仅适用于深小孔抛光，也可以应用于Φ10、Φ12等一般尺寸的内孔抛光。同时，这两种抛光方法是基于模具的弹性变形，模具与孔壁不存在刚性接触作用。因此，抛光过程再次产生的表面损伤非常小(属于亚表面损伤范围)。对于激光陀螺腔体深小孔而言，这种抛光方法形成的新孔壁表面可以满足激光陀螺的使用需求。

复合抛光模具设计原理是在不锈钢基体上黏结一种耐磨橡胶材料，如图13所示。

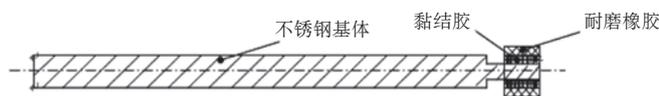


图13 复合抛光模具设计原理图

Fig.13 Design schematics of complex polishing mold

复合模具抛光技术原理如图14所示，在被抛光孔内注入抛光散粒磨料，通过数控机床夹持不锈钢基体，为复合

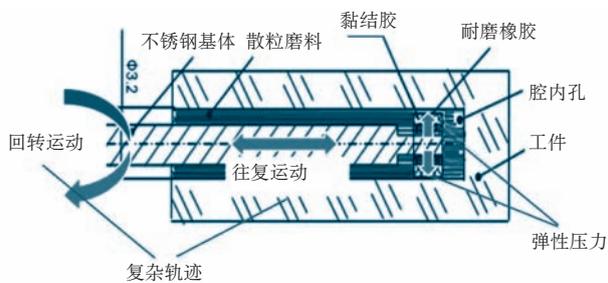


图14 复合模具抛光原理示意图

Fig.14 Sketch map of complex polishing mold

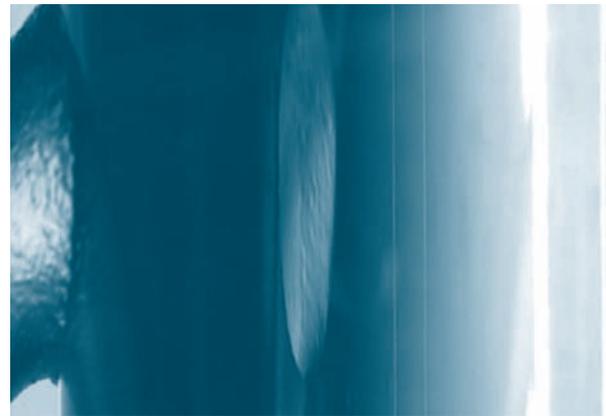


图15 某型激光陀螺腔体Φ8孔的抛光效果

Fig.15 Effect of a Φ8 hole polished in a RLG

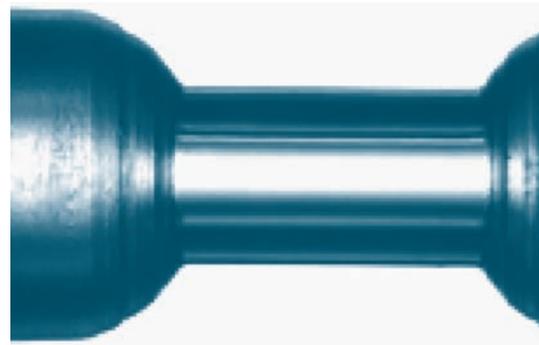


图16 某型激光陀螺腔体椭圆孔的抛光效果

Fig.16 Effect of a elliptic hole polished in a RLG

模具提供回转运动和往复运动，依靠复合抛光模具上的耐磨橡胶与被抛光孔内壁摩擦达到抛光效果(通过调节耐磨橡胶的直径尺寸可抛光不同尺寸的内孔)。

通过采用复合模具抛光技术，某型激光陀螺腔体椭圆光阑孔(短轴1.4×长轴1.7)抛光效果如图15所示，Φ8孔抛光效果如图16所示。抛光的孔壁表面粗糙度达到Ra0.01以内，满足了激光陀螺腔体的结构设计指标要求。

### 4 结论

激光陀螺腔体深小孔钻削过程材料去除机理是以材料横向断裂为主的层剥落形式被去除。

采用3D显微分析评价法和显微对比分析评价法可以客观的评价出激光陀螺腔体深小孔钻削过程由材料横向断裂和径向断裂所形成的表面缺陷。

复合模具抛光技术是实现激光陀螺腔体深小孔抛光的有效手段，并通过控制抛光余量达到去除腔体深小孔孔壁缺陷的目的。

## 参考文献

- [1] POST E J. Sagnac Effect[J]. Review of Modern Physics, 1967,39(2):475-493.
- [2] Chow W W, Gea-Banacloche, Pedrotti L M, et al. The Ring Laser Gyro[J]. Reviews of Modern Physics, 1985,57(1):61-104.
- [3] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001,1 (4):332-339.
- [4] 轧刚,秦华伟,许永娃,张裕生.旋转超声波加工的试验研究.新工艺新技术新设备,2000,6:56-59  
ZHA Gang, QING Huawei, XU Yongwa, ZHANG Yusheng. Experimental study of rotary ultrasonic machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000,6:56-59. (in Chinese)
- [5] I. Ken-ichi, S. Hitoshi, N. Tetsuhiro, U. Michio. A study on combined vibration drilling by ultrasonic and low-frequency vibrations for hard and brittle materials[J]. Precision Engineering, 1998,22:196-205
- [6] 曾伟民.旋转超声钻削先进陶瓷的基础研究[D].泉州:华侨大学,2006.

ZENG Weimin. Basic research of rotary ultrasonic drilling for advanced ceramics[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2006. (in Chinese)

## 作者简介

崔晓旭(1980-) 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 激光陀螺光学零件精密制造技术研究。

Tel: 15389448969

E-mail: cuixiaoxu5005@163.com

李敏(1979-) 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 激光陀螺光学零件化学抛光工艺技术研究。

Tel: 13379528787

E-mail: guangxb@facri.com

李大琪(1968-) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 激光陀螺光学零件精密制造技术研究。

Tel: 13909255689

E-mail: 13909255689@139.com

## Study on Eliminating Disfigurement of Small-deep Holes of the Ring Laser Gyro by Grinding with Ultrasonic Vibration and Polishing

CUI Xiaoxu, LI Min, LI Daqi\*

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

**Abstract:** Based on the analysis of the mechanism about wiping material during drilling small-deep holes for the ring laser gyro(RLG) and the corresponding experimental demonstration, the evaluation method of the disfigurement of such deep holes was presented. The depth of the disfigurement layer was investigated, and the craft how to eliminate such disfigurement was also studied. The precise machining of the inner faces of the cavity was achieved by grinding with ultrasonic vibration and combined surface polishing.

**Key Words:** ultrasonic vibration; disfigurement; grinding; polishing

Received: 2013-11-20; Accepted: 2013-12-13

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2010ZE18006)

\* Corresponding author. Tel. 13909255689 E-mail: 13909255689@139.com