

# 高精度石英半球裸振子微应力制造<sup>\*</sup>

訾进锋<sup>1</sup>, 宋丽君<sup>2</sup>, 李绍良<sup>3</sup>, 苏定宁<sup>3</sup>, 熊安宁<sup>1</sup>, 赵万良<sup>3</sup>, 高立民<sup>4</sup>, 陈效真<sup>5</sup>

(1. 西安中科微精光子制造科技有限公司·西安·710119;

2. 西安建筑科技大学·西安·710055;

3. 上海航天控制技术研究所·上海·201109;

4. 中国科学院西安光学精密机械研究所·西安·710119;

5. 中国航天电子技术研究院·北京·100048)

**摘要:** 半球谐振子是半球谐振陀螺的核心元件, 其质量直接决定了陀螺的性能及精度。由高纯石英材料制成的半球谐振子已得到了业界的广泛认可, 但其加工难度较高。半球裸振子是半球谐振子的未完全加工态, 其加工表面残余应力的大小决定了谐振Q值、频差 $\Delta f$ 等参数, 进而影响着谐振性能。就石英半球裸振子的微应力制造技术方法和技术特点进行了分析和讨论, 探讨了采用飞秒激光加工设备实现石英半球裸振子微应力制造的可行性。飞秒激光加工具有速度快、热变形小、非接触、微应力等优势。将其用于半球谐振子加工, 能够明显改善加工效率, 降低成本, 改善表面应力状态。采用飞秒激光加工为高精度石英半球裸振子的加工提供了全新的实现途径。

**关键词:** 半球谐振陀螺; 石英半球裸振子; 激光加工; 微应力制造; 飞秒激光

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2021)01-0081-11

## Micro-Stress Manufacturing of High Precision Quartz Hemispherical Bare-Resonator

ZI Jinfeng<sup>1</sup>, SONG Lijun<sup>2</sup>, LI Shaoliang<sup>3</sup>, SU Dingning<sup>3</sup>, XIONG Anning<sup>1</sup>,  
ZHAO Wanliang<sup>3</sup>, GAO Limin<sup>4</sup>, CHEN Xiaozhen<sup>5</sup>

(1. Xi'an Micromach Technology Co., Ltd., Xi'an 710119;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;

3. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;

4. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119;

5. China Academy of Aerospace Electronic Technology, Beijing 100048)

**Abstract:** The hemispherical resonator is the core component of the hemispherical resonant gyroscope, and its quality directly determines the performance and accuracy of the gyroscope. The hemispherical resonator made of high purity quartz material has been widely recognized in the industry, but it is difficult to process. The hemispherical bare oscillator is the incomplete machined state of the hemispherical harmonic oscillator. The residual stress on the machined surface determines the resonant Q value, frequency difference  $\Delta f$  and other parameters, and then affects the resonant performance. In this paper, the technical methods and characteristics of micro-stress manufacturing of quartz hemispherical bare oscillator are analyzed and discussed, and femtosecond laser processing equipment is used to realize micro-stress manufacturing of quartz hemispherical bare oscillator. Femtosecond laser processing has the advantages of high speed, small thermal deformation, non-contact, micro-stress and so on. The processing efficiency, cost and surface stress state of hemispherical harmonic oscillator can be obviously improved. Femtosecond laser processing provides a new way for the processing of high-precision quartz hemispherical bare vibrators.

\* 收稿日期: 2021-01-01; 修回日期: 2021-01-10

基金项目: 装备重大基础研究项目, 陕西省自然科学基础研究计划项目 (2020JM-488)

作者简介: 訾进锋 (1982—), 男, 主要研究方向为超短脉冲激光微加工。E-mail: LASER\_CTL@OPT.CN

**Keywords:** hemispherical resonant gyroscope; quartz hemispherical bare oscillator; laser processing; micro stress manufacturing; femtosecond laser

## 0 引言

石英半球裸振子的加工工艺一直是半球谐振陀螺精度提升的技术难题。由于传统刀具在处理裸振子的异性复杂结构时往往存在周期长、效率低、成本高、应力大等问题，现有石英半球裸振子的加工多采用专用刀具机床进行。一般而言，石英半球裸振子的粗加工需要1~1.5天，整体加工工时可达4~5天。因此，业界已开始探索一些高效率及微应力的石英半球裸振子加工方法。

## 1 石英半球裸振子的特点

石英半球谐振子是半球谐振陀螺的核心部件。选用高纯石英材料，经过磨—研—抛—洗—校—镀等三十余道传统机械精密加工工序，最终可制成具备极高品质因数（Q值）和低谐振频差（ $\Delta f$ ）的高精度惯性测量器件。在经电镀处理前，石英半球谐振子也被称为石英半球裸振子，简称裸振子。图1为石英半球裸振子的结构示意图。一方面，半球谐振陀螺所面临的工作环境严苛，其对表面质量和面形精度的要求极高；另一方面，石英材料具有高硬脆性、薄壁结构等特征，加工难度大。在表面处理过程中，球面内表面不规则等加

工问题都给半球裸振子的高效、高质量制造带来了挑战。

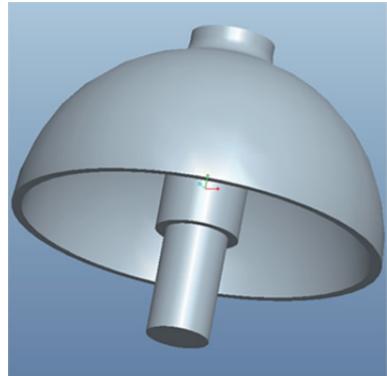


图1 石英半球裸振子的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of quartz hemispherical bare oscillator

### 1.1 石英材料及半球谐振陀螺

作为氧化硅类（石英、硅石）的非晶型玻璃熔体，石英玻璃是典型的硬脆材料。其材料特性包括：抗压强度高、抗拉强度低、热膨胀系数小、热导系数低、抗热振性好、化学稳定性好、热变形温度高、介电损失小、光谱范围宽（紫外、红外）<sup>[1]</sup>等。石英玻璃的常用力学性能参数如表1所示。

表1 石英玻璃常用力学性能

Tab. 1 Common mechanical properties of quartz glass

密度/(g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	莫氏硬度	显微硬度	热导率/(W/m·K)
2.203	7.25×10 <sup>10</sup>	0.17	1150	50	67	5.5~6.5	8000~9000	1.38

由于高纯石英玻璃具备优良的热学、弹性模量和低阻尼机械特性，1975年，在Tim Hanley的坚持下，美国海军航空系统司令部（NAVAIR）资助其团队首次采用熔融石英材料制成了半球谐振陀螺（Hemispherical Resonator Gyro, HRG），使陀螺仪惯导器件在高精度层面上跃上了新的台阶。与传统机械陀螺相比，HRG可达到千万级的品质因子，且具有结构简单、精度高、启动时间短、漂移噪声低、频带宽、稳定性好、抗辐照、低功耗、精度成本比佳等优势，成功引起了惯性技术领域的高度关注<sup>[2]</sup>。半球谐振陀螺与光纤陀

螺（Fiber-Optic Gyro, FOG）、环式激光陀螺（Ring Laser Gyro, RLG）的性能比较如图2所示。

### 1.2 石英半球裸振子制造

作为半球谐振陀螺的核心器件，半球裸振子的制造过程复杂精密，是高精度半球谐振陀螺的关键技术之一。从设计层面而言，石英裸振子的结构设计必须满足结构质量分布的均匀性和结构质量分布的轴对称性<sup>[3]</sup>。具体而言，半球裸振子的结构设计必须处理好Q值与频差、Q值及频差与能量内阻、能量与应力应变、应力应变与结构几何误差这四个关系，再通过设计参数确保半球

裸振子的物理设计精度满足物理重心、质心、谐振中心、Q中心的四心合一。通过微应力制造加工使半球裸振子的结构几何形位精度满足裸振子外包络面球心、内包络面球心、锚杆轴心、赤道面圆心的四心合一(误差为纳米量级)和一心(内包络面与锚杆过渡曲率中心)一线(锚杆轴线)的轴对称, 并且满足数学家艾米·诺特在

1918年提出的“连续对称性和守恒定律的一一对称”(物理学中的诺特定理)。综上所述, 只有通过设计、制造、量化调整实现裸振子的八心合一和九心一线的轴对称, 才能制造出高精度的裸振子, 确保石英半球谐振陀螺的测量精度。图3描述了半球裸振子精度与加工应力之间的关系。

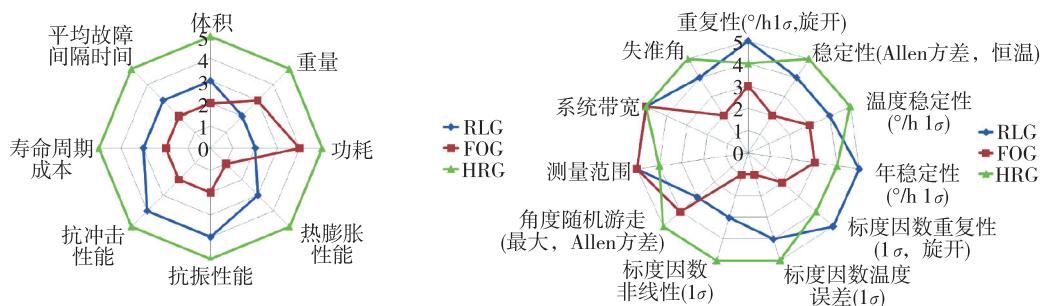


图2 半球谐振陀螺、光纤陀螺、环式激光陀螺三者之间的性能比较

Fig. 2 Performance comparison among hemispherical resonant gyroscope, fiber optic gyroscope and ring laser gyroscope

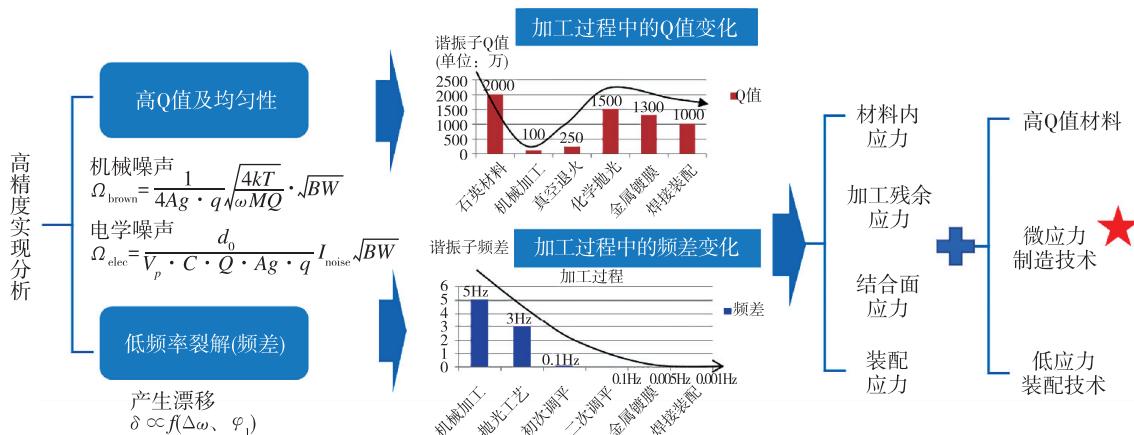


图3 半球裸振子精度与加工应力之间的关系

Fig. 3 Relationship between accuracy of hemispherical bare oscillator and machining stress

在石英半球裸振子的制造过程中, 应力对于半球裸振子的制造精度影响极大。石英半球裸振子具有典型的硬脆薄壁异形结构, 制造加工难度大。在传统的加工过程中, 石英半球裸振子的制造加工工艺包括铣磨(粗加工)、精磨(精加工)、研抛(超精加工修形)、精准调校(修形)和检测等机械加工流程, 最终可得到合格的产品。完整的成形及精加工过程包含3个阶段近40道工序<sup>[4]</sup>, 如图4所示。

传统机械制造工序流程复杂、周期长、成本高、效率低, 尤其是在多梯度变外力作用下, 石英构件表面和亚表面会产生大量微裂纹、微划痕等机械损伤, 形成表面和亚表面的弱化变形层, 如图5所示。根据实验数据记载, 传统机械加工光学玻璃的表面粗糙度大于50nm, 同时其也将产生近100μm的亚表面裂纹。变形层会破坏结构件的应力平衡, 形成残余应力、增加内阻, 降低裸振子的储能和能量的各向同性。

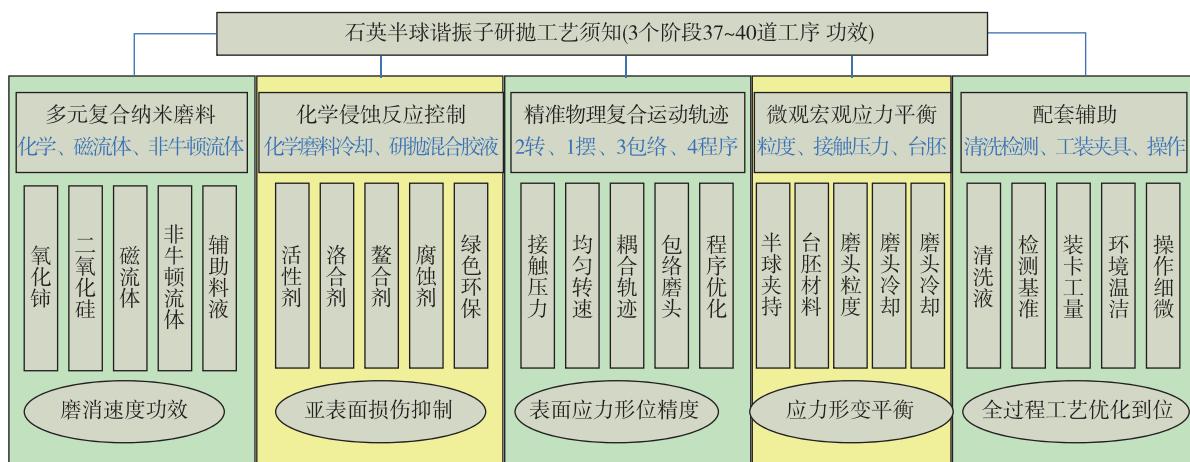


图 4 传统机械制造加工工序

Fig. 4 Traditional mechanical manufacturing process

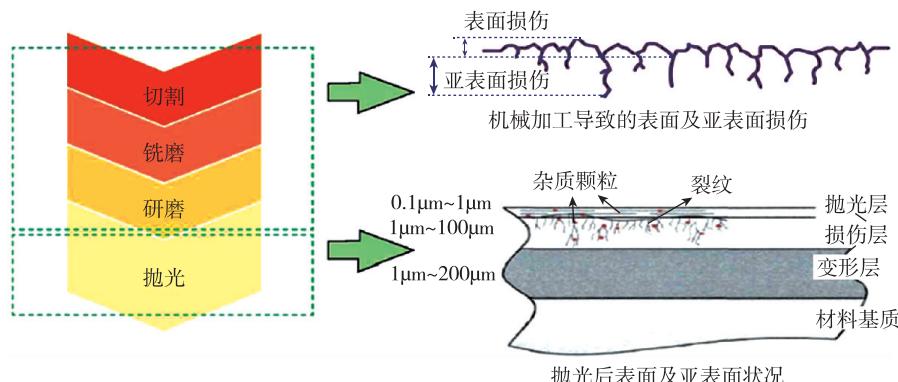


图 5 传统机械加工表面和亚表面状况

Fig. 5 Traditional machined surface and subsurface conditions

精密抛光技术是精化构件表面质量状态的重要手段，提高构件表面性能是提高构件寿命、可靠性、构件性能稳定性关键。由气囊抛光的柔性抛光头可自动适应工件的曲面形状，通过调节气囊内部压力控制抛光效率。磨料射流抛光利用磨粒对工件表面的高速碰撞与剪切作用，通过控制喷射压力、角度及时间等参数抛光工件表面。上述两种抛光方法

通过气压、磁场、流场等均能够实现“研抛磨”的柔度变化可控，但采用小抛光工具适应工件曲面曲率变化、通过驻留函数优化面形精度的工艺更为复杂。离子束抛光技术可实现半球谐振子表面原子量级的材料去除，且无亚表面损伤，但该技术的抛光效率低、成本高。对典型的复杂表面抛光技术进行比较，获得的结果如表 2 所示。

表 2 异形复杂曲面抛光技术比较

Tab. 2 Comparison of polishing technology for special-shaped complex curved surface

抛光技术	加工面形精度 P-V 值/ $\mu\text{m}$	加工表面 粗糙度 Ra/nm	亚表面损伤	加工效率	加工成本	设备
计算机控制小研磨盘抛光 (CCOS)	0.04	<5.3	有	低	中	复杂
气囊抛光 (BTP)	0.19	0.64	有	中	高	复杂
磁流变抛光 (MRF)	0.25	0.5	少	中	高	复杂
磨粒流变抛光 (AFM)	<0.23	<2	有	低	中	较复杂
离子束抛光 (IBF)	0.01	<0.2	无	极低	高	复杂
力流变抛光 (FRP)	<0.78	<5	少	高	低	简单

目前, 半球裸振子抛光主要采用磁流变技术与力流变抛光技术。在外加磁场作用下, 磁流变液的黏度随着磁场强度的增强而迅速增大, 并附着在抛光轮表面且形成类固体状态的缎带, 通过与工件表面相对运动而产生的剪切力对材料进行微量去除。磁流变抛光是一种柔性抛光方法。该方法的去除函数稳定, 面形误差收敛快, 亚表面损伤层小。但是, 由于磁流变抛光轮的小型化设计尚存在困难, 因此其在半球裸振子抛光应用中还面临着诸多难题。

力流变抛光技术是一种利用非牛顿流体在剪切应力作用下的流变特性实现表面抛光的超精密加工方法。其优势在于抛光工艺的实现不需要外部辅助场, 对抛光工具形状、材质等的要求较低, 甚至可以在无抛光工具条件下, 通过流体动压和黏性剪切应力实现复杂曲面的柔性、高效抛光, 且抛光液的制备成本低、绿色环保。力流变抛光通过控制抛光液流场及界面黏性剪切应力实现复杂曲面的抛光, 通过控制工件表面的流变场流体黏度、相对运动速度等要素, 实现材料确定性去除。该抛光方法在解决半球裸振子高效、高表面质量的抛光问题层面, 具备巨大的开发潜力。

目前, 国内半球裸振子抛光技术尚不成熟, 存在精度低、表面质量差、效率低的问题。开展高精度半球裸振子加工技术攻关对于促进我国高性能半球谐振陀螺的研制进度, 满足空天领域高精度、长寿命、高可靠性惯性导航系统的迫切需求而言具有重要的战略意义。

### 1.3 石英半球裸振子能量与应力关系

品质因数( $Q$ 值)是半球谐振陀螺的机械力学性能指标之一, 反映了谐振子在振动过程中机械能量损耗的大小。机械品质因数的定义为储存在机械振动系统中的振子内总能量与一个振动周期内振子消耗的能量之比, 如下式所示

$$Q = \frac{2\pi E_{\text{Total}}}{\Delta E} \quad (1)$$

$E_{\text{Total}}$  为振子储存的总能量,  $\Delta E$  为一个振动周

期内振子消耗的能量。在实际检测计算过程中, 通常通过振动频率、振幅或自由衰减时长表征及反映  $Q$  值。

$Q$  值是物理及工程中的无量纲参数, 是表示振子阻尼性质的物理量, 也可表示振子的共振频率相对带宽的大小,  $Q$  值高则振子能量损失速率慢, 振动可持续时间长。 $Q$  值高的谐振子在谐振频率附近振幅更大, 谐振频率范围小, 稳定性好。这是由于有损耗的周期系统, 能量随时间的变化一定是呈指数衰减的。损耗越小,  $Q$  值越高, 频差  $\Delta f$  也就越小。

半球谐振陀螺的  $Q$  值为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{材料}}} + \frac{1}{Q_{\text{结构}}} + \frac{1}{Q_{\text{制造}}} + \frac{1}{Q_{\text{支撑}}} + \frac{1}{Q_{\text{环境}}} + \frac{1}{Q_{\text{其他}}} \quad (2)$$

由式(2)可见, 当结构设计和材料选择确定后, 其制造过程的损耗是影响整个半球裸振子  $Q$  值的关键因素。

半球谐振子频差  $\Delta f$  是两个简并模态振动频率之差, 是衡量半球谐振子质量、刚度各向同性的指标。频差会造成陀螺的零偏和漂移, 是制约陀螺性能的关键因素, 因而低频差是高精度半球谐振子制造的重要指标。频差越小, 陀螺的漂移也越小。极小频差的分辨受限于谐振子的振动  $Q$  值, 频差的检测分辨率与  $Q$  值的关系如下式所示

$$\lim \Delta f = -\frac{\omega_0}{2kQ} \quad (3)$$

式中,  $k$  为常数,  $\omega_0$  为谐振频率。

除由材料本身结构各向异性引发的内应力外, 制造残余应力分布不均衡决定了半球裸振子内阻和能量传递的各向异性(耗损)。如何确保半球裸振子的制造精度和性能( $Q$  值、频差  $\Delta f$ )是保证石英半球谐振陀螺性能精度的基础。裸振子的  $Q$  值、频差  $\Delta f$  与制造关系如表 3 所示, 微应力制造是裸振子制造的核心。因此, 裸振子的制造必须在明确四个关系的基础上解决好八心合一和九心一线轴对称加工难题。

表 3  $Q$  值、频差  $\Delta f$  与制造关系

Tab. 3 The relationship between  $Q$  value, frequency difference  $\Delta f$  and manufacturing

品质因数 $Q$	频差 $\Delta f$	内热阻	残余应力	表面缺陷	几何精度	性能
高 ( $>10^{7\sim 11}$ )	低 ( $<10^{-3\sim -4}$ )	小	$<70\%$	$<5\text{nm}$	优于 $\text{nm}$	高
低 ( $<10^{7\sim 11}$ )	高 ( $>10^{-3\sim -4}$ )	大	$>70\%$	$>1\mu\text{m}$	劣于 $\text{nm}$	低

## 2 飞秒激光微应力制造

从惯性仪表精度稳定性角度出发,裸振子的最大应力应不大于石英材料的微屈服强度。当结构中的拉/压力值不大于微屈服强度(70%左右)时,该拉/压力值被称为微应力。其临界值是材料局部产生微蠕变的极限应力,是衡量结构精度稳定性的重要指标<sup>[5]</sup>。

### 2.1 裸振子残余应力

裸振子的残余应力主要是使构件材料的晶粒范围和原子范围保持平衡的微观应力,是由减材制造在改变形貌过程中、在构件表面及亚表面产生的不规则缺陷进而形成的局部应力所导致的,是构件平衡结构组织、外力、温度、湿度、电磁等多场耦合下作用的力。裸振子Q值降低和频差 $\Delta f$ 增大的根本原因是谐振子的制造精度低和残余应力分布不均。特别地,对于高频谱(kHz)谐振交变的玻璃振子结构而言,拉伸压缩的长时间交替重复极大地影响了裸振子的精度稳定性和寿命。因此,半球裸振子微应力制造尤为重要。相关几何形位尺度在微纳米量级(即在原子或分子尺度下)时,器件的工作原理将发生根本改变,其所呈现的各种场效应和互感、互溶、互阻等尺度效应被统称为微观效应。微观效应会对微应力制造产生重要影响,其影响具体包括以下因素:由动态力矩引发的微观效应,例如,由与重力加速度参数g或 $g^2$ 相关的力矩引发的力不平衡效应;由静态力矩引发的微观效应,例如,由固有摩擦力矩、材料形貌变化引发的力不平衡效应;由气动力矩引发的微观效应,例如,由流体流动、非金属材料挥发所产生力不平衡。当采用超精密磨削等应力手段对裸振子进行加工时,加工过程会在表面产生明显的残余应力。若不考虑这些残余应力的影响,就会对裸振子的各种性能产生实质性影响<sup>[6]</sup>。

### 2.2 无残余应力的实现

裸振子的减材制造残余应力主要取决于材料和减材过程的多维边界参数,包括环境、速度、去除量、去除方法、去除接触力等。为防止制造残余应力与构件内部应力的叠加大于构件材料的屈服强度,继而引发构件的变形和开裂,就要在减材制造全过程中尽力持续创造和保持残余应力的三维平衡状态。三维平衡状态通常采取冷却减

材界面、减小减材进给力、减少减材量、提升减材速度、改善减材模式、科学合理预置构件残余应力,以及在构件制造过程中和制造后进行时效处理(自然时效、退火热时效、超声振动时效等)等方法实现。

目前,传统精密和超精密制造(如表4所示)已经达到制造极限。在精密和超精密制造过程集成后,相关几何形位尺度在微、纳米量级或原子和分子尺度时,随着界面微观效应(各种场效应和互感、互溶、互阻等尺度效应)的产生,材料去除机理将发生根本性的改变。要实现裸振子高精度、低成本、高效率、无应力的终极制造目标,必须寻求新的制造方法,而所采用的精密和超精密制造技术必须是微观尺度下的微应力制造技术。

表4 精密和超精密制造的特点

Tab. 4 Characteristics of precision and ultra-precision manufacturing

制造方法	尺寸精度	表面精度
精密制造	0.1~1μm	Ra≥30nm
超精密制造	0.01~0.1μm	Ra≤20nm
原子大小	≤10nm	

### 2.3 飞秒激光无接触制造

鉴于石英半球裸振子制造对高精度、高质量的要求,以及传统机械加工方式效率低、接触应力易对材料亚表面造成损伤的固有质量极限弊端,有必要采取更加精密、更为领先的非接触加工制造技术,以实现高精度、无应力的石英半球裸振子制造。

非接触加工是抑制加工件表面机械损伤和残余应力的有效措施。目前,典型的非接触精密减材加工工艺主要有离子束抛光和飞秒激光减材两种。离子束抛光是在真空条件下,使用离子枪将被充电的高能离子射向工件,利用高能离子冲击工件表面的原子或分子,使原子或分子逸出表面,以实现材料原子量级加工精度的减材制造。但是,离子束加工减材效率低,表面质量受离子束入射角、入射能量的影响较大,且价格昂贵(进口设备的价格在1000万元以上,且设备对列入美国实体清单的单位是禁运的)。离子束抛光法更适合在光学加工中为达到更高精度或在最终加工目标阶段应用。相较于离子束加工,激光加工具有快速、高效、可控、图形化设计和适用于微应力难加工

材料构件(黏弹、硬脆、深小密阵盲孔和薄异构件)等优点, 已经得到了广泛而成熟的应用。

激光加工目前有热加工和光化学加工(又称冷加工)两种方式, 脉宽在10ps以上的激光脉冲对材料的损伤机理为热损伤, 满足傅里叶传热学的经典关系, 即损伤阈值与脉宽的 $1/2$ 次方成正比; 脉宽在10ps以下的激光脉冲对材料的损伤属于非热损伤, 其关系不再满足经典傅里叶传热学理论。飞秒脉冲激光加工属于一种典型的冷加工方式, 已在我国航空航天、汽车、医疗等领域中得到了重要应用, 使得一些关键零部件的加工制造技术瓶颈得到了突破<sup>[7-13]</sup>。这是由于飞秒激光加工具有极短的脉冲宽度(通常为几十到几百飞秒量级)和极高的峰值能量(可达 $10^{22}\text{W/cm}^2$ ), 并且在加工过程中表现出了强烈的非线性效应<sup>[14]</sup>。这种超高的峰值能量基本可以达到任何材料的损伤阈值, 因而几乎可对任何材料进行加工; 与此同时, 由于脉冲宽度极短, 飞秒激光不会产生明显的热效应。此外, 飞秒激光还可以穿透透明材料的表面, 在其内部进行聚焦, 因此其具有在材

料内部实现三维加工的能力。由此可见, 飞秒激光加工非常适合对石英半球裸振子这类硬脆而复杂的结构件进行加工。

图6展示了飞秒激光玻璃加工能量变化的过程及现象。其中,  $T_e$ 为电子弛豫时间,  $T_\eta$ 为声子弛豫时间。如图6所示, 飞秒激光具有自聚焦超短脉冲、自相位调制超高电场和脉冲展宽超高频谱等特性, 通过与玻璃构件的非线性吸收(多光子电离、隧道电离和雪崩电离)、能量传递转化(电子激化相干、耦合弛豫过程、声子动力学过程)和热平衡过程实现仅聚焦点的能量转化(能量密度达 $10^{14}\sim 10^{15}\text{W/cm}^2$ 、场强达 $10^{10}\text{V/cm}$ , 超过氢原子库仑场强)。瞬间电子温度高于材料气化温度, 形成超高温、超高压状态等离子体, 使构件表层电子吸收的光子能量被瞬间激活, 从而引发界面的多样物理效应(多光子吸收、雪崩和碰撞电离蒸发、局域化破坏玻璃基质), 以实现非热熔减材纳米级的超精细、空间三维精密减材制造。飞秒激光超短脉冲加工的特性使其被应用于石英超薄异形裸振子无应力制造成为可能。

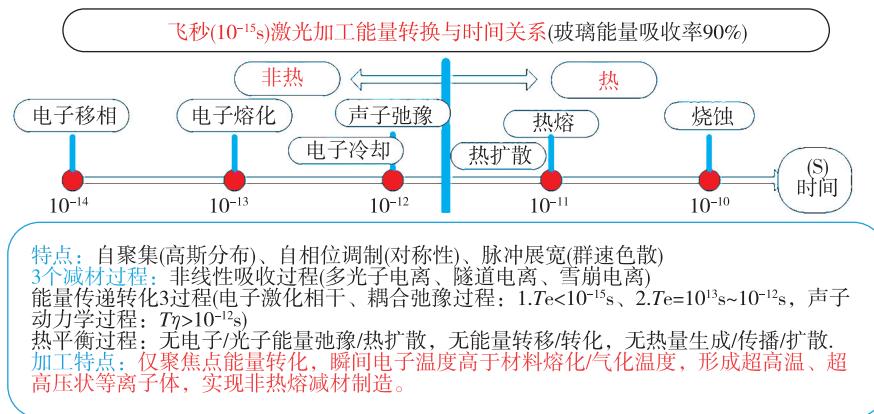


图6 飞秒激光玻璃加工能量变化过程及现象

Fig. 6 Process and phenomenon of energy change in femtosecond laser glass processing

构件表层热能传递是通过电子-晶格散射实现的, 能量从电子转移至晶格(转移时间通常为1~100ps), 以实现热能传递, 其传递速度取决于材料表层的电子-声子耦合强度。因此, 声子是热效应最主要的因素。虽然飞秒脉冲的瞬态作用能量很高, 但其远远小于电子-声子耦合时的能量。激光曝光热效应的激发需要 $10^{-12}\text{s}$ , 而飞秒激光器的脉冲曝光时间为 $10^{-15}\text{s}$ , 远低于这一限定。虽然电子能量很高, 但表层材料晶格温度很低, 所以材

料晶格基本可保持原状。因此, 相对于传统的激光加工, 飞秒激光加工技术可避免由熔融再分解等热效应引起的细微相变和由结构变化造成的热融层, 可有效提高加工精度和分辨率<sup>[15]</sup>。

此外, 利用飞秒激光加工石英玻璃和宽能隙晶体等透明固体材料时, 从价带到导带, 电子是通过多光子吸收等非线性过程引发的。传统的线性单光子吸收, 要求能量超过材料的带隙, 从而通过吸收单个光子使电子从价带被激发到导带。

因此，光子能量小于带隙的光子不能直接激发电子。但是，当入射光子密度极高时，电子可以通过同时吸收多个光子而被激发。因此，飞秒激光脉冲与透明材料之间的相互作用只发生在峰值强度足够引起多光子吸收的焦点附近，这为在透明材料内部实现加工提供了基础。

飞秒激光脉冲强度在空间中呈高斯分布，多光子吸收系数与激光强度的  $n$  次方成正比，因此材料吸收的能量空间分布相比于光斑直径更窄。当激光阈值强度高于吸收反应时，可通过调节激光强度进一步提高加工分辨率。对于  $n$  光子吸收，

有效聚焦光斑的直径为

$$\omega = \frac{0.61\lambda}{N_A \sqrt{n}} \quad (4)$$

式中， $\lambda$  为入射激光波长， $N_A$  为聚焦镜数值孔径。

可见，超短脉冲飞秒激光加工是高纯石英半球裸振子非接触微应力精密制造的理想可行方案。激光波长越小，焦点处光斑尺寸越小，加工精度越高<sup>[16]</sup>。纳秒、皮秒、飞秒多光源多波段光路复合优化更是提升激光加工效率、降低成本、确保裸振子精度质量的有效措施，如图 7 所示。

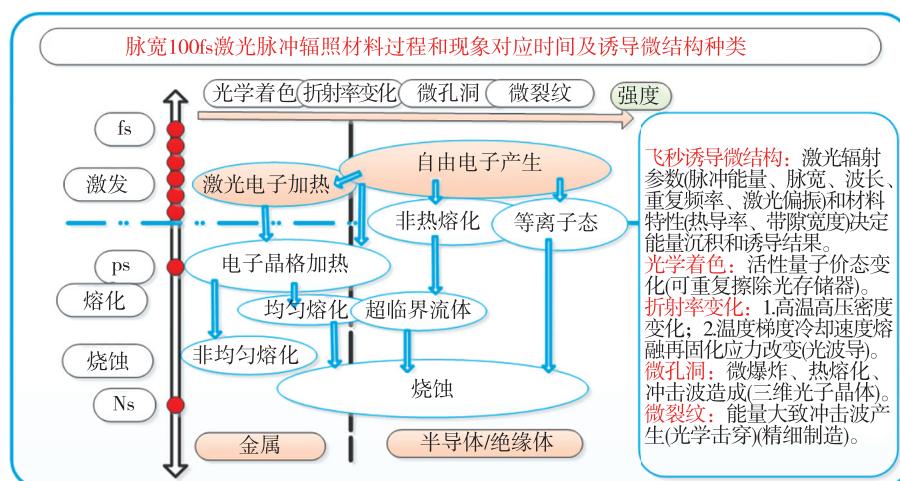


图 7 飞秒脉宽激光加工过程现象及诱导种类

Fig. 7 Phenomena and types of femtosecond pulse width laser processing

如果采用高稳定性光参量（脉宽、重复频率、脉冲能量等）控制技术、高质量超短脉冲激光波前整形技术，通过超短脉冲激光与石英材料作用过程的数字化工艺的仿真优化，抑制激光诱导电子熔融层，则有望实现高精度零应力半球谐振子超短脉冲激光加工工艺的创新。

根据图 8 所描述的飞秒激光的加工原理，采用光源复合稳定技术、脉冲调制调控和工艺参数优化，确保由飞秒激光诱导所产生的孔洞、裂纹和构件的材质密度变化可控，即可实现熔石英玻璃的高效低损伤加工。

### 3 飞秒激光加工设备

石英半球裸振子飞秒激光加工设备是利用飞秒激光超短脉冲的特点，在时间和空间域上编程，控制飞秒激光进行高精度离散加工的石英半球裸

振子加工专用设备。其能够实现特定位置、特定时间内的精准能量配给，去除量和去除位置均可控，可达到精准去除、精密成型的效果，加工设备如图 9 所示。

为了确保裸振子的加工精度与效率，适应现代节能、环保、数字化制造的需要，设备同时采用了大功率（皮秒、飞秒）复合激光光源，主要基于如下关键技术：（1）超短脉冲石英减材光参量自适应控制技术。超短脉冲石英减材，主要与超短脉冲激光的光参量有关，比如激光重频、功率、脉宽、焦深及焦斑大小等。在利用超短脉冲去除石英材料的过程中，根据不同时刻的工艺需求，相应激光的光参量也要做出调节。可研究超短脉冲光参量实时监测模块，对激光的参量进行检测，并将其反馈到控制端。控制端依据光信号的偏差输出补偿信号，从而实现激光的光参量的

自适应控制; (2) 激光车铣复合三维减材轨迹优化算法技术。精确控制激光焦点三维空间快速扫描实现激光铣削工艺, 稳定控制工件高速旋转实现激光车削工艺, 通过联动控制实现半球裸振子成型工艺; (3) 3D 轮廓高精度在线检测闭环加工技术。通过在线轮廓检测、3D 图形模拟仿真、加工误差补偿算法, 实现闭环加工, 减少误差, 提高加工精度。形成了石英半球裸振子高效、低成本、高精度、微应力激光制造技术, 可完成“粗加工-半精加工-精加工”的一体化高效成型。开发了3D 复杂轮廓高精度加工专用轨迹规划软件, 并集成了高精度轮廓检测和激光光栅应力形变的实时功能, 能够实现“制造中检测、检测中制造”的

闭环加工, 以及在线智能视景和实时报告输出。目前, 采用图9所示的机床可加工的石英半球裸振子的最小外圆直径 $\leqslant 12\text{mm}$ , 裸振子的最小壁厚 $\leqslant 0.2\text{mm}$ , 裸振子的内外球面及支撑杆同轴度 $\leqslant 0.002\text{mm}$ , 裸振子内外球的圆度 $\leqslant 0.004\text{mm}$ , 裸振子表面粗糙度  $R_a \leqslant 0.6\mu\text{m}$ 。图10所示为采用图9所示专用机床加工的直径为12mm的半球裸振子。粗加工采用纳秒激光, 崩边小于 $50\mu\text{m}$ , 加工时间约为4h; 抛光前的精加工采用飞秒激光, 崩边小于 $3\mu\text{m}$ , 加工时间约为2h。以上结果证明, 飞秒激光加工石英半球裸振子的机理正确、方案具备可行性, 功效取得了显著提高( $>30\%$ ), 成本明显降低(约40%左右)。

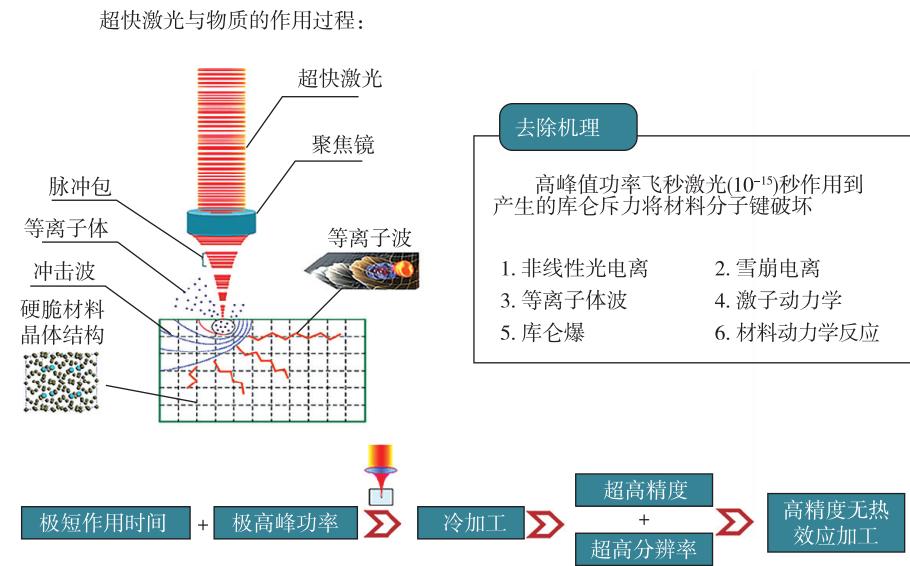


图8 飞秒激光加工原理

Fig. 8 Principle of femtosecond laser processing



图9 石英半球裸振子飞秒激光加工设备

Fig. 9 Femtosecond laser processing equipment for quartz hemispherical bare oscillator



图10 裸振子样本

Fig. 10 Bare oscillator machined samples

飞秒激光加工具有速度快、热变形小、非接触、微应力等优势，将其用于石英半球裸振子加工能够明显改善加工效率、降低成本和提升表面应力状态。如图11所示，飞秒激光加工表面质量均匀，亚表层无微裂纹、微孔隙等缺陷，但其仍存在厚度约为 $10\mu\text{m}$ 的电子熔融层。因此，石英半球裸振子在经过激光粗、精加工后，仍需要进行精密研抛，去除电子熔融层，以进一步提升几何形位精度及表面质量。

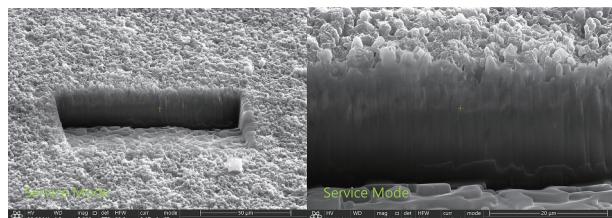


图11 飞秒激光加工表面及亚表面形貌  
Fig. 11 Surface and subsurface topography  
machined by femtosecond laser

## 4 结 论

石英半球谐振陀螺技术优势明显，应用前景广阔，但裸振子高效、低成本、微应力、高精度的制造是目前制约我国石英半球谐振陀螺技术快速发展和应用的瓶颈和难题。本文结合石英半球裸振子的精度要求、性能特点及制造技术现状，对影响其Q值、频差 $\Delta f$ 的关键因素进行了分析，并从微应力制造角度探讨了裸振子制造工艺条件，提出了超短脉冲激光无接触制造新方法，结合双光源多波段光路耦合、3D轮廓高精度在线检测闭环加工、三维减材轨迹优化算法等关键技术，开发了高精度石英半球谐振子激光加工专用设备，并完成了不同尺寸半球谐振子的粗、精加工，加工效率显著提高，制造成本相比传统加工方法降低了约40%左右。高精度半球谐振子超短脉冲激光加工新工艺的提出，对提升半球谐振陀螺制造的精度、效率，降低生产成本，形成批量化生产制造能力，满足航空、航天、航海等多领域工程应用的迫切需求，提供了新思路。

## 参考文献 (References)

- [1] 王玉芬, 刘连成. 石英玻璃 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 贾智学, 付丽萍, 任佳婧. 半球谐振陀螺技术发展趋势 [J]. 导航与控制, 2018, 17 (3): 83-87.
- [3] JIA Z X, FU L P, REN J J. Development trend of hemispherical resonant gyro [J]. Navigation and Control, 2018, 17 (3): 83-87 (in Chinese).
- [4] 徐志强, 刘建梅, 王振, 等. 石英半球谐振子精密加工技术探讨 [J]. 导航与控制, 2019, 18 (2): 69-76.
- [5] XU Z Q, LIU J M, WANG Z, et al. Discussion on precision machining technology of quartz hemispherical harmonic oscillator [J]. Navigation and Control, 2019, 18 (2): 69-76 (in Chinese).
- [6] 马志奎, 赵宏宝, 赵万良, 等. 石英半球谐振子精密成型技术 [J]. 导航与控制, 2019, 18 (2): 77-83.
- [7] MA Z K, ZHAO H B, ZHAO W L, et al. Precision forming technology of quartz hemispherical harmonic oscillator [J]. Navigation and Control, 2019, 18 (2): 77-83 (in Chinese).
- [8] 徐春广, 李培禄. 无应力制造技术 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (8): 113-132.
- [9] XU C G, LI P L. Stress-free manufacturing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (8): 113-132 (in Chinese).
- [10] 李子昂. 半球陀螺谐振子的力学性能及振动特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] LI Z A. Analysis on resonator's mechanical properties and characteristics of HRG [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007 (in Chinese).
- [12] FORSMAN A C, LUNDGREN E H, DODELL A L, et al. Double-pulse format for improved laser drilling-second pulse enhances both drilling speed and hole quality [J]. Photonics Spectra, 2007, 41 (9): 72.
- [13] MIYAMOTO I. Laser materials processing in Japan [J]. Laser Technik Journal, 2008, 5 (3): 16-20.
- [14] JUHASZ T, LOESEL L H, KURTZ R M, et al. Corneal refractive surgery with femtosecond lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5 (4): 902-910.
- [15] HEISTERKAMP A, MAXWELL I Z, MAZUR E, et al. Pulse energy dependence of subcellular dissection by femtosecond laser pulses [J]. Optics Express, 2005, 13 (10): 3690-3696.
- [16] 位迪, 程萍, 陈向东, 等. 基于飞秒激光加工非金属血管支架的工艺研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (9): 091403.
- [17] WEI D, CHENG P, CHEN X D, et al. Study on femtosecond laser processing of nonmetal vascular stent [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50 (9): 091403 (in Chinese).
- [18] 王锋, 罗建军, 李明. 飞秒激光高精细加工柴油机喷油嘴倒锥孔法 [J]. 光子学报, 2014, 43 (4): 0414003.

- WANG F, LUO J J, LI M. High-precision method of machining taper holes of diesel engine nozzle with femtosecond laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43 (4): 0414003 (in Chinese).
- [13] 林金堵, 吴海珠. 精细微孔的激光加工的发展 [J]. 印制电路信息, 2014, (1): 26-29.
- LIN J D, WU H Z. The process development of laser in fine micro-hole [J]. *Printed Circuit Information*, 2014, (1): 26-29 (in Chinese).
- [14] SCHAFFER C B, BRODEUR A, MAZUR E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12 (11): 1784.
- [15] 邱建荣. 飞秒激光加工技术——基础与应用 [M]. 科学出版社, 2019.
- QIU J R. Femtosecond laser processing technology- foundation and application [M]. Science Press, 2019 (in Chinese).
- [16] 邢松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42 (4): 0403001.
- XING S L, LIU L, ZOU G S, et al. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (4): 0403001 (in Chinese).