

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.03.013

微半球陀螺敏感结构热成型规律研究

林志辉,周斌,张天,邢海峰,张嵘

(清华大学精密仪器系,北京 100084)

摘要:针对近年来受到广泛关注的微半球热成型工艺,研究了表面张力、黏性力、惯性力、重力及压差对成型的影响,得出了黏性力在成型过程中起主导作用,表面张力、惯性力及重力对成型的影响可以忽略,压差的变化不影响成型的形状,只影响成型的速度的结论,并通过仿真及实验验证了该结论。

关键词:微半球陀螺;谐振子;热成型;黏性力

中图分类号:1911

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)03-0077-05

Research on Thermoforming of mHRG Resonator

LIN Zhi-hui, ZHOU Bin, ZHANG Tian, XING Hai-feng, ZHANG Rong

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The influence of surface tension, viscosity, inertial force, gravity and pressure difference on thermoforming of mHRG resonator is studied, which has received much attention in recent years. The influence of viscosity is found to be dominant in thermoforming, while the influence of surface tension, inertial force and gravity are negligible. The change of pressure difference will merely influence the speed of thermoforming, and will not affect the shape of resonator. Both simulation and experiment are carried out to prove the conclusion.

Key words: Micro hemisphere gyroscope; Oscillator; Thermoforming; Viscous force

0 引言

半球谐振陀螺是一种哥氏振动陀螺,以轴对称物体中弹性波的 Bryan 效应为工作原理,具有精度高、能耗小、机械部件结构简单、断电稳定性好、工作温度范围大、抗电离辐射能力强、对线性过载不敏感、使用寿命长等诸多优点^[1],是目前精度最高的哥氏振动陀螺。为满足未来微型定位导航授时计划对高精度自主导航微终端的迫切需求,微型半球陀螺技术方案已成为微陀螺实现高精度的最可行技术途径之一,引起惯性技术领域研究人员的广泛重视,成为当前国内外微惯性仪表的研究热点之一。

微半球陀螺的核心技术是其中的微半球壳体高精度成型工艺。传统的半球陀螺采用机械磨削的方式进行加工,需要反复进行研磨和化学腐蚀^[2],加工难度较大,并不适用于微半球壳体的批量加工。

近年来,国内外有不少单位开始关注三维热成型工艺。三维热成型工艺的优点是表面粗糙度极低、设备简单、加工成本低廉,有着较好的发展潜力。根据有无模具可以将热成型工艺分为模具法和自由成型法。采用模具法的目前有密歇根大学和国防科技大学^[3-6],该方法加工的谐振子形状主要取决于模具的形状;采用自由成型法的目前有加州大学欧文分校和东南大学^[7-10],该方法加工的谐振子形状取决于初始条件和工艺参数控制,在设计阶

收稿日期:2017-02-13;修订日期:2017-04-14

基金项目:总装预研基金(9140A09011514JW01123)

作者简介:林志辉(1983-),男,博士生,主要从事 MEMS 陀螺仪方面的研究。E-mail:linzhihui1995@163.com

段只能通过计算机仿真进行预测。

目前,采用 Polyflow 和 Comsol 等有限元分析软件进行热成型仿真可以获得较为满意的结果^[11-13]。但是,成型过程中表面张力、黏性力、惯性力以及重力对成型的影响还不是十分清楚。

本文分析了微半球结构热成型过程中表面张力、黏性力以及重力等对成型结构几何参数的影响,得出了黏性力在热成型过程中起主导作用时,最终成型形状只与初始条件和成型温度有关,与成型过程无关的结论,并通过仿真及实验验证了该结论。

1 玻璃热成型过程的数学模型

1.1 工艺流程

自由成型法的热成型工艺流程如图 1 所示,首先在硅衬底上刻蚀出环形的凹槽,然后将玻璃片与硅衬底键合,使环形凹槽形成密闭气室。将键合后的硅-玻璃片送入真空加热炉中,在一定的温度和压力下,依靠玻璃的软化和气室中气体的膨胀实现微半球成型。

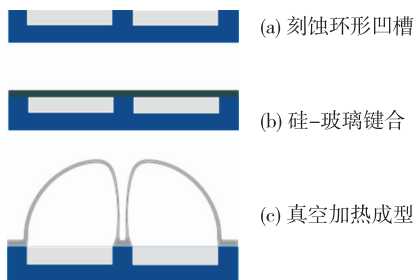


图 1 谐振子热成型工艺流程图

Fig. 1 Thermoforming process of resonator

1.2 成型过程的数学模型

一般而言,玻璃熔体是各向同性黏弹性材料,其本构关系应该用 Maxwell 模型描述。但在成型温度范围内,黏性力起主导作用,弹性力可以忽略,因此玻璃熔体可以看成是不可压缩牛顿流体^[14],其流动可以用纳维-斯托克斯方程描述。

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mu \Delta \mathbf{v} - \nabla \mathbf{p} + \mathbf{F} \quad (1)$$

式中, ρ 为玻璃熔体密度, \mathbf{v} 为流场的速度矢量, μ 为玻璃熔体的动力黏度系数, \mathbf{p} 为流场的压力分布, \mathbf{F} 为体力,在这里只有重力。

1) 黏度系数

玻璃的黏度系数 μ 与温度 T 之间的关系可以

用 Fulcher 公式表示

$$\lg \mu = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2)$$

其中, A 、 B 和 T_0 为常数。根据康宁公司公开的 Pyrex 7740 玻璃数据,可以拟合出黏度系数与温度的关系,如图 2 所示。

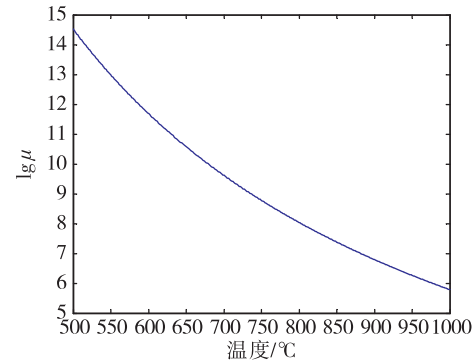


图 2 Pyrex 7740 玻璃黏度系数与温度的关系

Fig. 2 The viscosity of Pyrex 7740 glass vs temperature

从图 2 中可以看出,在 600~900°C 温度范围内,玻璃的黏度系数很大,大于 10^6 P。

2) 惯性力的影响

成型过程中,玻璃熔体的流动缓慢,半球顶部典型的长高速度为 0.2mm/s,计算流动过程的雷诺数 Re 。

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \approx \frac{2230 \times 0.0002 \times 0.01}{10^7} = 4.46 \times 10^{-10} \quad (3)$$

可以看出,雷诺数很小,惯性力的作用可以忽略。

3) 重力的影响

成型过程的弗劳德数 Fr 及雷诺数 Re 与弗劳德数 Fr 的比值分别为:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \approx \frac{0.0002^2}{9.8 \times 0.01} = 0.408 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\frac{Re}{Fr} = 1.09 \times 10^{-3} \quad (5)$$

可以看出,重力的影响很小,可以忽略。

4) 斯托克斯流动方程

考虑等温的成型过程,忽略惯性力和重力的影响之后,玻璃熔体的流动可以用斯托克斯流动方程描述

$$\mu \Delta \mathbf{v} = \nabla \mathbf{p} \quad (6)$$

式中, \mathbf{v} 为流场的速度矢量, \mathbf{p} 为流场的压力分布。

2 表面张力、黏度及压差对成型的影响

2.1 表面张力的影响

在高温区和低温区,玻璃的表面张力与温度几乎呈线性关系。文献[15]测量了典型的硼硅酸盐玻璃熔体的表面张力系数

$$\sigma = 73.6 + 0.27867T \quad (7)$$

根据杨-拉普拉斯方程,与表面张力平衡的压差为

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

在成型的初始阶段,玻璃为平面, R_1 和 R_2 为无穷大,表面张力的作用可以忽略。在成型的后期, R_1 和 R_2 的典型值为 5mm, 700℃时表面张力与 215Pa 的压差平衡。此时,表面张力对成型有一定影响,会引起成型形状的缓慢变化。但由于作用时间较短,作为近似,表面张力的作用可以忽略。

2.2 黏度系数及压差的影响

根据以上讨论,玻璃熔体的流动可以用斯托克斯流动方程描述

$$\mu \Delta v = \nabla p \quad (9)$$

由于玻璃片较薄,内部的压力梯度可以认为与内外压差 P 成正比,方程可以改写成如下形式

$$\mu \Delta \frac{dr}{dt} = P \nabla p_1 \quad (10)$$

式中, p_1 为单位内外压差下玻璃片内部的压力分布。由于内外压差、黏度系数均与空间位置无关,方程可以进一步写成以下形式:

$$\Delta \frac{dr}{d \int \frac{P}{\mu} dt} = \Delta \frac{dr}{dt'} = \nabla p_1 \quad (11)$$

$$t' = \int \frac{P}{\mu} dt \quad (12)$$

式(11)和式(12)表明,只要对时间进行变换,不同压差和黏度变化规律下的成型过程满足相同的方程,即成型过程中压差和黏度的变化只影响成型的速度,不影响成型的形状。

3 仿真验证

3.1 表面张力的影响

为了验证上述结论,使用有限元仿真软件 Polyflow 进行仿真,在内外压差为 1 个大气压的条

件下,分别对表面张力为 0 和表面张力为 0.306N/m 的情况进行仿真。仿真结果如图 3 所示,对比两种情况下的第 10s、15s 和 20s 的形状,可以看出形状几乎完全一样,表面张力对成型几乎没有影响。

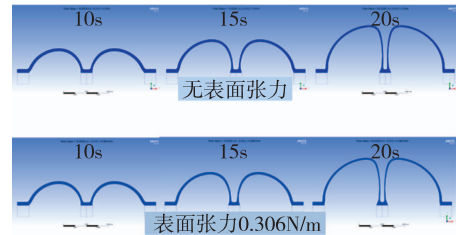


图 3 有无表面张力的对比

Fig. 3 Comparison between with and without surface tension

3.2 黏度系数的影响

在内外压差为 1 个大气压的条件下,分别对黏度为 10^{10} P 和 10^7 P 进行仿真,仿真结果如图 4 所示。对比黏度为 10^{10} P 时第 300s、3000s 与黏度为 10^7 P 时第 0.3s、3s 时的形状,可以看出形状几乎完全一样,黏度大小的不同对最终形状没有影响,影响的只是成型的速度。

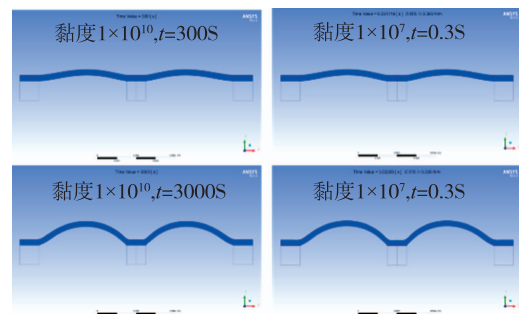
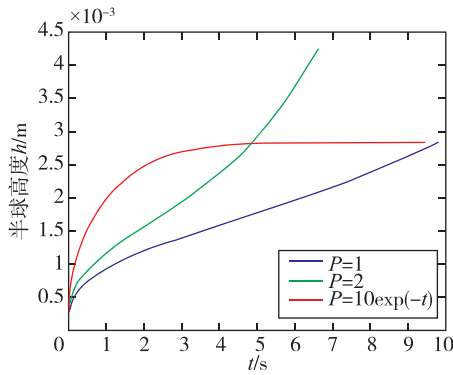


图 4 不同黏度成型过程的对比

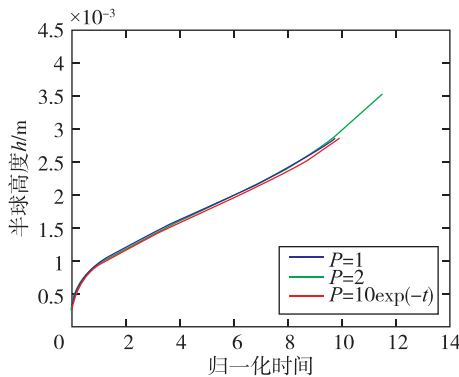
Fig. 4 Comparison between various viscosity

3.3 内外压差的影响

为验证 2.2 节的结论,分别对内外压差 $P = 1$ 、 $P = 2$ 和 $P = 10 e^{-t}$ (单位为 1 个大气压)的情况进行仿真,得到成型高度随时间变化的曲线,如图 5(a) 所示。对 3 条曲线的横坐标 t 进行变换,即分别令 $t' = t$ 、 $t' = 2t$ 和 $t' = 10 - 10 e^{-t}$,得到成型高度随归一化时间 t' 变化的曲线,如图 5(b) 所示。可以看出,3 条曲线基本重合,说明了压差的变化不影响成型的形状,只影响成型的速度。



(a)



(b)

图5 不同压差变化规律下成型高度比较

Fig. 5 Comparison between various pressure difference

4 实验验证

4.1 实验条件

为进一步验证以上结论,在真空加热炉中进行微半球陀螺敏感结构的热成型实验。

实验装置采用的真空加热炉上安装有照明窗,光源的光线透过照明窗照射在工件上,在加热炉另一侧有观察窗,窗前安装的滤光片及高分辨率相机可对成型过程进行拍照记录。

热成型前的微半球陀螺敏感结构中硅片版图如图6所示。刻蚀完成的硅片上面通过键合工艺将玻璃片与硅片结合在一起,凹槽内部密封的气体压力常温下为1个大气压。敏感结构的参数如下:中央支撑柱直径为1mm,内部凹槽外径9mm,槽深0.2mm,玻璃片厚度0.25mm。实验过程中,真空加热炉设置炉内成型温度为700℃,炉内成型压力为10kPa。

4.2 实验结果

图7所示为通过相机拍摄的微半球陀螺敏感结

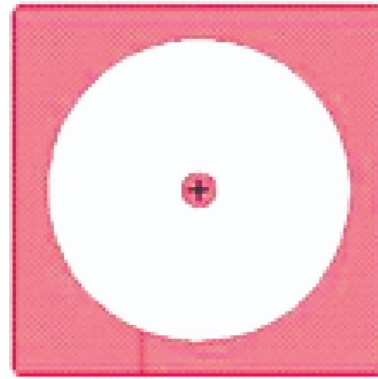


图6 热成型前微半球陀螺敏感结构版图

Fig. 6 Micro hemisphere gyro sensing element layout before thermoforming

构热成型过程照片。为与实际工艺条件进行对比,在内外压差为1个大气压、黏度为 10^7 P的条件下进行热成型工艺仿真,得到成型过程中微半球谐振子形状,并将仿真得到的形状与成型过程的照片放在同一张图上进行比较(仿真的轮廓用红色虚线进行了强调)。可以看出,尽管仿真的条件与实验的条件并不完全一致,但在成型的各个阶段,仿真得到的形状却与实际形状基本重合。该结果表明,仿真过程中忽略的表面张力、重力等影响因素并不会影响热成型过程玻璃球壳的几何形状,为后续微半球结构高精度加工的工艺参数控制提供了很好的理论依据。

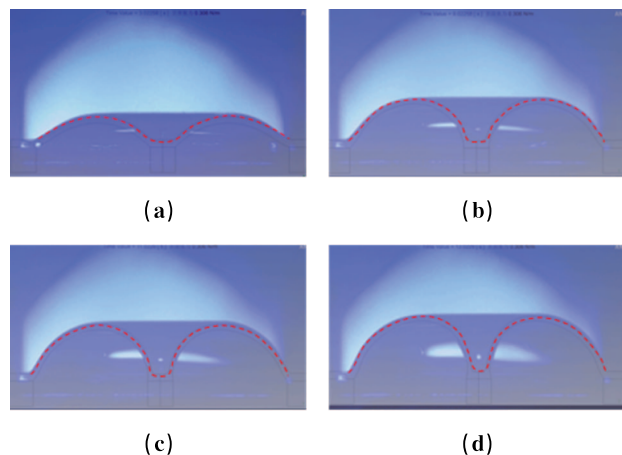


图7 仿真与实验结果对照

Fig. 7 Comparison between simulation and experiment

5 结论

本文通过对玻璃热成型过程进行数学建模、理论分析及仿真计算,证明了玻璃熔体的黏性力在抵抗内外压差中起了主导作用,惯性力和重力的作用

可以忽略。为验证该结论,利用真空加热炉对微半球陀螺敏感结构进行了热成型加工实验,微半球热成型过程中的几何形状与仿真结果吻合的很好,进一步证明了热成型过程中玻璃黏性力起主导作用的结论。

上述结论对于正确预测和控制微半球谐振子成型的几何参数具有重要意义。由于加工工艺过程中的环形气室内残留物的热分解和键合表面的气密性等原因,气室内气体压力存在不确定性,因而难以单纯依靠初始工艺参数保证成型的一致性。根据以上结论可以推断出:即使无法准确地控制气室内的气体压力,只要控制最终成型的高度,就可以保证谐振子形状的一致性,为进一步通过工艺参数控制提高微半球结构热成型加工精度及一致性奠定理论基础。

参考文献

- [1] 马特维耶夫杨亚非, 赵辉. 固体波动陀螺: 译文集 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 4-5.
- [2] 杨勇, 胡晓东, 谭文跃, 等. 基于优化半球陀螺谐振子性能的工艺技术[J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 221-224.
- [3] Cho J Y, Yan J, Gregory J A, et al. 3-dimensional blow torch-molding of fused silica microstructures [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(6):1276-1284.
- [4] Nagourney T, Cho J Y, Darvishian A, et al. Micromachined high-Q fused silica bell resonator with complex profile curvature realized using 3D micro blowtorch molding [C]//Transducers - 2015, 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. IEEE, 2015:1311-1314.
- [5] Cho J Y, Najafi K. A high-Q all-fused silica solid-state wineglass hemispherical resonator formed using micro blow torching and welding [C]//28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 2015:821-824.
- [6] Li W, Lu K, Xiao D, et al. Micro shell resonator with T-shape masses for improving out-of-plane electrostatic transduction efficiency [C]//IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016:78-80.
- [7] Senkal D, Ahamed M J, Trusov A A, et al. Achieving sub-Hz frequency symmetry in micro-glassblown wineglass resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(1):30-38.
- [8] Senkal D, Ahamed M J, Ardakani M H A, et al. Demonstration of 1 million, Q-factor on microglassblown wineglass resonators with out-of-plane electrostatic transduction [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(1):29-37.
- [9] Luo B, Shang J, Zhang Y. Hemispherical wineglass shells fabricated by a Chemical Foaming Process [C]//16th International Conference on Electronic Packaging Technology. IEEE, 2015:951-954.
- [10] Luo B, Shang J, Zhang Y. Hemispherical glass shell resonators fabricated using Chemical Foaming Process [C]//65th Electronic Components and Technology Conference. IEEE, 2015:2217-2221.
- [11] Senkal D, Ahamed M J, Shkel A M. Design and modeling of micro-glassblown inverted-wineglass structures [C]//International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2014:1-4.
- [12] Shiari B, Darvishian A, Nagourney T, et al. A comparison between experiments and fem predictions for blowtorch reflow of fused silica micro-shell resonators [C]//Transducers-2015, 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. IEEE, 2015:776-779.
- [13] Shiari B, Nagourney T, Darvishian A, et al. Numerical prediction of stress evolution during blowtorch reflow of fused silica micro-shell resonators [C]//IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016:13-16.
- [14] Fasano A. Mathematical models in the manufacturing of glass [M]. Springer-Verlag, 2011:13-17.
- [15] 李建强, 张晓瑞, 陆平. 低膨胀硼硅酸盐玻璃熔体密度和表面张力测量[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(s2):817-819.