

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.05.013

# 光学球罩真空吸附装夹结构设计

李震, 王伟明, 李庆忠\*

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:**为了改善光学球罩表面加工过程中效率低、装夹繁琐等问题,课题组设计了一种针对光学球罩的真空吸附装夹结构。选用“2转动+1摆动+微量进给”的加工工艺对光学球罩的内外表面进行磨削和抛光,并设计了中空的转台结构;分析球罩装夹时所需要的真空负压并验证在此真空负压下球罩在加工过程中不会出现滑移;运用Workbench软件仿真球罩-装夹头模型在加工过程中的变形量。仿真结果表明:在相同参数下内装夹头模型的变形量大于外装夹头;作为装夹头材料,45钢抗变形效果优于铝合金;模型的变形量随磨削力的增大而增大;真空负压及砂轮尺寸对变形量影响较小。该研究有助于提高球罩表面加工的质量和效率。

**关键词:**光学球罩;装夹结构;真空吸附;装夹稳定性;Workbench软件

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)05-0089-07

## Design of Vacuum Adsorption Clamping Structure for Optical Dome

LI Zhen, WANG Weiming, LI Qingzhong\*

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** To improve the low efficiency and cumbersome clamping process in the surface processing of optical domes, a vacuum adsorption clamping structure for optical domes was designed. The "two rotations + one swing + micro-feed" processing technology was used to grind and polish the inner and outer surfaces of the optical dome, and a hollow turntable structure was designed. The vacuum negative pressure required for clamping the dome was analyzed and verified, and it was confirmed that the dome would not slip during the processing under this vacuum negative pressure. Workbench software was used to simulate the deformation of the dome-clamping chuck model during the processing. The simulation results show that the deformation of the inner clamping chuck model is larger than that of the outer clamping chuck model under the same parameters. As a chuck material, the deformation resistance of 45 steel is better than that of aluminum alloy. The deformation of the model increases with the increase of grinding pressure, while the vacuum negative pressure and the size of the grinding wheel have less effect on the model deformation. This research is helpful to improve the quality and efficiency of dome surface processing.

**Keywords:** optical dome; clamping structure; vacuum adsorption; clamping stability; Workbench

以镁铝尖晶石、氟化镁及蓝宝石等硬脆材料制成的光学球罩因具有硬度高、透光性高以及耐高温、耐腐蚀等特点,在光电系统以及航天航空等领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。这些由硬脆材料制成的光学球罩属于薄壁球壳类零件,在加工过程中易出现崩边、破碎等缺陷。因此,需要引入一些特殊的方法对其进行加工,如化学机械抛光、气囊抛光、磁流变抛光和激光抛光

等<sup>[2-6]</sup>。受限于球罩的结构和刚度,加工时需要设计特殊的工装结构对其进行固定。在实际加工中,不同的装夹方式以及装夹过程不仅会影响加工效率,还会使光学球罩在加工前产生不同程度的变形,影响装夹的稳定性和加工质量<sup>[7]</sup>。

传统的机械卡盘式夹具属于通用夹具,具有标准化高、适用性广和生产成本低的优点,但缺点是加工精

收稿日期:2023-02-14;修回日期:2023-06-15

第一作者简介:李震(1997),男,江苏台东人,硕士研究生,主要研究方向为精密超精密加工技术。通信作者:李庆忠(1965),男,江苏无锡人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为摩擦学及表面工程、精密超精密加工技术。E-mail:lqz@qq.com

度不高、难以装夹形状复杂的工件且装夹效率较低<sup>[8]</sup>。使用卡盘式夹具因夹持的接触面较小,工件易造成较大的应力集中,使其发生较大变形。当待加工零件为脆性材料时,在加工过程中易发生破碎,良品率降低。

胶粘法适用于形状复杂及薄板类工件的装夹。运用胶粘法固定零件,需选用合适的胶粘剂进行人工粘结,在解胶过程需要使用相关化学试剂并加热到一定温度,易对待加工零件造成影响。另外,使用胶粘法时光学元件中心线与机床转轴中心对准相对困难,在批量生产及自动化生产中大大降低了生产效率<sup>[9]</sup>。因此胶粘法在工业大批量生产中应用较少,主要应用于单件或小批量生产。

真空夹持技术具有高效率、无污染和易操作等优点,并且对于球罩类的薄壁零件有较强的支撑保护作用,能避免加工过程中零件的损坏<sup>[10]</sup>。因此基于真空夹持技术的优点,课题组设计了一套应用真空夹持技术的转台以提高球罩类零件的加工效率。课题组还结合有限元仿真技术对装夹模型的磨削力、真空负压和加工位置等进行了研究,分析各因素对模型变形量的影响。

## 1 真空吸附转台的设计

### 1.1 球罩加工形式

针对球罩内外表面的磨削及抛光,采用“2转动+1摆动+微量进给”的加工工艺,球罩内外表面的加工示意图如图1所示。加工过程中有4种运动形式:

- 1) 抛光头由电机带动绕自身轴线以  $n_1$  的转速转动;
- 2) 球罩装夹在转台上绕自身轴线以  $n_2$  的转速转动;
- 3) 球罩绕摆动中心以  $\omega$  的角速度摆动,摆动中心为球罩的球心,摆动幅度为  $\pm 60^\circ$ ;
- 4) 抛光头由伺服电机控制丝杆沿轴线方向微量进给。

采用这种加工方式是为了提高球罩工件的加工精度,在加工过程中需保证球罩和抛光头的中心轴的交点与摆动中心重合,因此在加工过程中需要控制结构的变形量<sup>[11]</sup>。

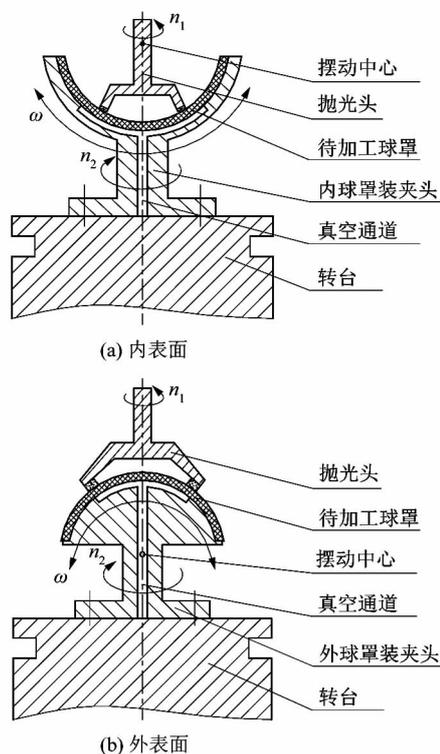


图1 机构加工示意图

Figure 1 Schematic diagram of mechanism processing

### 1.2 真空吸附转台设计要求

真空吸附转台技术要求为:

- 1) 转台主轴可以  $360^\circ$  连续旋转,最大转速为  $300 \text{ r/min}$ ;
- 2) 转台的最大负载质量为  $10 \text{ kg}$ ,转台可在  $\pm 60^\circ$  之间摆动,轴系组件在摆动过程中能保证回转精度;
- 3) 转台上可以安装不同尺寸的内、外装夹头,在加工过程中保证装夹的稳定性,不会出现滑移。真空装夹头如图2所示。

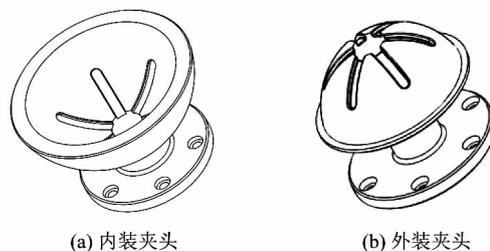


图2 真空装夹头

Figure 2 Vacuum chuck

### 1.3 直驱式真空吸附转台设计

直驱式真空吸附转台结构如图3所示。转台、连接轴和转轴相互连接构成了转台的主轴。定子安装在壳体上,力矩电机(选用高性能无框力矩电机进行直驱,去掉中间传动环节,精度更高、结构更紧凑。)的定子和转子之间产生足够的扭矩,使得电机带动转子转动,转子又带动转轴旋转,即主轴旋转,达到了转台转动的目的。在转台上安装装夹头,用于装夹待加工球罩。装夹头、转台、连接轴和转轴采用中空的设计,使中空部分作为真空通道。与转台底部螺栓连接的气动旋转接头连接真空管,加工时设定适当的真空度可将球罩吸附在装夹头上,配合抛光头完成内外球面的磨削及抛光工作。

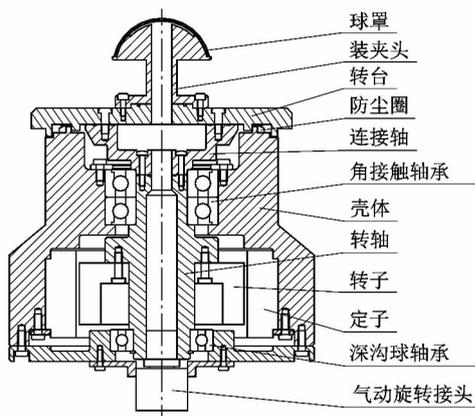


图3 直驱式真空吸附转台结构  
Figure 3 Structure of direct-drive vacuum adsorption turntable

## 2 球罩真空吸附力理论计算

### 2.1 真空吸附力计算

在实际加工中需考虑装夹对球罩的变形以及吸附可靠性的影响,因此需要建立合理的力学模型确定吸附力的大小。

在工件与装夹头的真空通道形成的密封容积内,通过真空发生器抽出一定量的气体,产生真空负压 $\Delta p$ ,进而产生的等效吸附力为<sup>[12]</sup>:

$$F = \frac{kC\Delta pA}{N} \quad (1)$$

式中: $k$ 为有效真空吸取力系数,单吸口取0.9; $\Delta p$ 为真空表压值,MPa; $A$ 为吸口的有效工作面积, $\text{mm}^2$ ; $N$

为吸附时的安全系数,水平装夹时 $N \geq 4$ ,竖直装夹时 $N \geq 8$ ; $C$ 为换算系数,当 $\Delta p, A$ 和 $F$ 单位分别为MPa,  $\text{mm}^2$ 和N时, $C$ 取值为1。

球罩吸附在装夹头上绕球心摆动,当摆动到水平位置时取 $N = 4$ ,吸口的有效工作面积 $A = 1\ 600\ \text{mm}^2$ ,根据式(1),真空负压的设定范围为:

$$\Delta p \geq \frac{F}{360} \quad (2)$$

当球罩材质为蓝宝石时,球罩质量为0.183 kg,则重力 $G = 1.793\ 4\ \text{N}$ 。在初设真空负压 $\Delta p$ 时, $F$ 可等效为2倍球罩重力 $G$ ,因此 $F = 2 \times 1.793\ 4 = 3.586\ 8\ \text{N}$ 。将 $F$ 值代入式(2),可知 $\Delta p \geq 0.010\ \text{MPa}$ ,初步设定真空负压为0.010 MPa。

### 2.2 球罩受力状态分析

在球罩磨削和抛光过程中,若球罩在装夹过程中发生滑移,不仅会影响加工的质量,严重还会造成球罩破碎。为保证球罩与装夹头能紧密吸附并在加工过程中不会发生滑移,球罩与装夹头接触部分产生的摩擦力 $F_f$ 必须大于安全系数 $Q$ 与磨削力 $F_t$ 的乘积。而摩擦力的大小与工件接触支承力 $F_m$ 有直接关系,球罩所获得的支承力越大,则摩擦力越大。球罩的径向磨削力 $F_t$ 与摩擦力 $F_f$ 之间的关系为:

$$F_f = \mu F_m \geq Q F_t \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为装夹头与球罩之间的摩擦因数; $F_m$ 为球罩所受的支承力; $Q$ 为安全系数,取值为2。

由式(3)可得:

$$\mu \geq \frac{Q F_t}{F_m} \quad (4)$$

为了方便分析,通常把磨削力分解成3个相互垂直的分力:工件的切向磨削力 $F_t$ 、法向力 $F_n$ 和轴向磨削力 $F_a$ 。轴向磨削力 $F_a$ 较小,可以忽略不计<sup>[13]</sup>。磨削力计算的经验公式为:

$$F_t' = 171.285 v_s^{-0.703} v_w^{0.503} a_p^{0.555} \quad (5)$$

$$F_n' = 447.93 v_s^{-0.605} v_w^{0.503} a_p^{0.697} \quad (6)$$

式中: $F_t'$ 为单位宽度切向磨削力,N; $F_n'$ 为单位宽度径向磨削力,N; $v_s$ 为砂轮线速度,m/s; $v_w$ 为工件进给速度,m/s; $a_p$ 为磨削深度,mm。

从式(5)和(6)可知: $F_t'$ 和 $F_n'$ 与 $v_w$ 和 $a_p$ 成正比,与 $v_s$ 成反比。因此,在设计时应选取较小砂轮线速度

和较大工件进给速度计算磨削力。与精磨和抛光相比,粗磨过程中的进给量大、材料去除率高,因此磨削力更大,引起的变形量更大。

在粗磨时抛光头的转速  $n_1$  为 2 500 ~ 3 000 r/min, 工件进给速度  $v_w$  为 100 ~ 200 mm/min, 磨削深度  $a_p$  为 0.3 ~ 0.8 mm。当  $v_s$  为 5.24 m/s、 $v_w$  为 0.0033 m/s 和  $a_p$  为 0.8 mm 时,磨削力最大。

由式(5)和(6)可得:  $F_t' = 2.67$  N,  $F_n' = 7.95$  N。

砂轮宽度  $b = 5$  mm, 可得:  $F_t = 13.35$  N,  $F_n = 39.75$  N。

球罩装夹受力分析如图 4 所示,  $R$  为球罩的外径, 真空负压在球罩微元段垂直方向上的力为:

$$dF_p = \Delta p R d\alpha \cos \alpha. \quad (7)$$

可得真空负压在整个球罩垂直方向上的力为:

$$F_p = 2 \int_0^{\frac{\pi}{18}} \Delta p R d\alpha \cos \alpha. \quad (8)$$

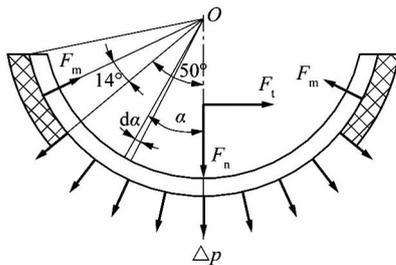


图 4 球罩装夹受力分析

Figure 4 Stress analysis of clamping dome

当  $R = 50$  mm、 $\Delta p = 0.01$  MPa 时,由式(8)可知吸附力产生的轴向力  $F_p = 766$  N。装夹头表面吸附通道面积约为装夹头接触面积的 1/8,实际的真空吸附力产生的轴向力  $F_p' = F_p/8 = 75.8$  N。装夹头在只受真空吸附力时,对球罩的支撑力为:

$$F_m = F_p' / \cos 64^\circ = 172.91 \text{ N}. \quad (9)$$

由式(4)和(9)可知:

$$\mu \geq \frac{QF_t}{F_m} = 0.154. \quad (10)$$

在仅考虑真空吸附力的情况下,当待加工球罩与装夹头之间的摩擦因数大于 0.154 的时候,加工过程中球罩不会发生滑移。金属材料与硬脆材料之间的摩擦因数为 0.5 ~ 0.7,因此当真空负压为 0.01 MPa 时,在加工过程中不会发生滑移而影响加工精度。

### 3 有限元仿真分析

#### 3.1 装夹吸附模型静力学的仿真分析

根据球罩与装夹头的装配关系,采用有限元软件 Workbench 建立球罩-装夹头的真空吸附模型。

某型号蓝宝石球罩模型如图 5 所示,其外径  $R$  为 50 mm,内径  $r$  为 46 mm,球罩边距离球心的高度  $h$  为 10 mm。磨削用的杯型砂轮内径为 15 mm、外径为 20 mm,其中砂轮块的厚度为 5 mm。磨削过程中的进给量和吃刀量大于抛光过程,在磨削过程中球罩及装夹头的受力也大于抛光过程,因此只需考虑磨削过程中的受力情况分析变形量及应力分布。

图 5 中  $O'$  为球罩的球心,  $O'P$  为杯型砂轮的中心轴,  $O'P$  与  $y$  轴的夹角为  $\theta$ ,将球罩及装夹头固定,磨削头绕  $O'$  摆动。当  $\theta$  为  $51.67^\circ$  时,砂轮外径与球罩内表面边缘相切,分别仿真  $\theta$  为  $0.0^\circ$ 、 $20.0^\circ$ 、 $40.0^\circ$ 、 $51.5^\circ$  和  $60.0^\circ$  时球罩及装夹头的变形和应力分布情况。

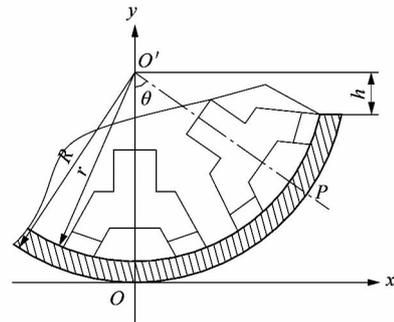


图 5 球罩模型

Figure 5 Dome model

#### 3.1.1 模型简化

在 SolidWorks 中绘制三维模型,简化一些不影响结构力学性能的倒角和圆角,并将模型导入到 Workbench 软件中。

#### 3.1.2 零件材质选择

模型的材料及属性如表 1 所示。

表 1 模型的材料及属性

Table 1 Materials and properties of model

名称	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
球罩	蓝宝石	380	0.28	3.98
装夹头	铝合金	71	0.33	2.77
	45 钢	200	0.26	7.85

### 3.1.3 接触类型选择

ANSYS Workbench 中共有 4 种接触类型,分别为绑定接触、不分离接触、无摩擦接触及粗糙接触。本模型中球罩与装夹头在加工过程中不会发生相对运动,因此选择适合线性分析的绑定接触。

### 3.1.4 网格划分

对球罩-装夹头模型进行网格划分,球罩及装夹头模型均采用四面体网格。为保证计算精度及减少计算时间,对球罩和装夹头的接触部分及球罩受力部分进行局部加密后的模型如图 6 所示。模型共划分了 919 311 个节点, 629 619 个单元, 网格平均质量 0.839 86,能满足分析的需要。



图 6 模型网格划分

Figure 6 Model grid division

### 3.1.5 约束和施加载荷

如图 7 所示,在装夹头与转台连接的地方施加固定约束;根据抛光头的尺寸和加工位置在球罩上施加磨削力,方向为沿砂轮轴线向下;在真空通道处施加 0.01 MPa 的压力,方向为垂直于平面向里。

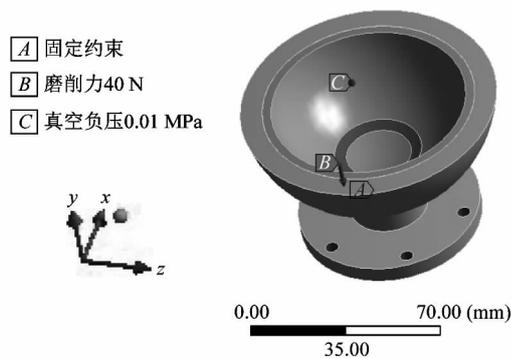


图 7 模型约束和施加载荷

Figure 7 Model constraints and applied loads

### 3.1.6 仿真结果分析

当球罩为蓝宝石、装夹头为结构钢、磨削力为

40 N和真空负压为 0.01 MPa 时,磨削头作用在 5 个不同位置时的仿真变形效果如图 8 所示。在 5 个不同位置的最大变形量分别为 0.012, 0.187, 0.384, 0.503 和 0.509  $\mu\text{m}$ ; 最大应力分别为 0.139, 0.718, 0.868, 1.149 和 1.114 MPa。

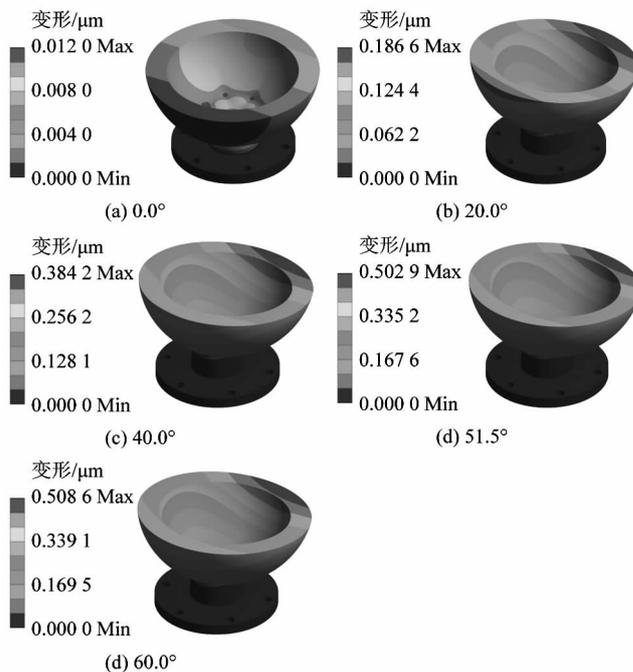


图 8 不同加工位置时球罩的变形量

Figure 8 Deformation of dome at different processing positions

### 3.2 内、外装夹头变形量的对比

选取砂轮的内径为 15 mm、外径为 20 mm,球罩和装夹头材料分别为蓝宝石和 45 钢,当真空负压为 0.01 MPa、磨削力为 40 N 时,仿真内、外装夹头在不同加工位置下的变形量,如图 9 所示。

由图可知,内、外装夹模型在其他条件相同时,2 者的最大变形量变化趋势相似,即都随着加工角度的增大而增加;但外装夹模型的变形量明显小于内装夹模型。因此,在不同加工参数选择中只需保证内球罩装夹模型的变形量满足要求即可。

### 3.3 装夹材料对变形量的影响

铝合金具有密度低、加工性能好、强度高和耐腐蚀等优点;45 钢属于优质中碳钢,具有很高的强度、抗变形能力及较好的加工性能。为探究哪种装夹头材料更适合,分别仿真这 2 种材料的装夹头在不同加工位置

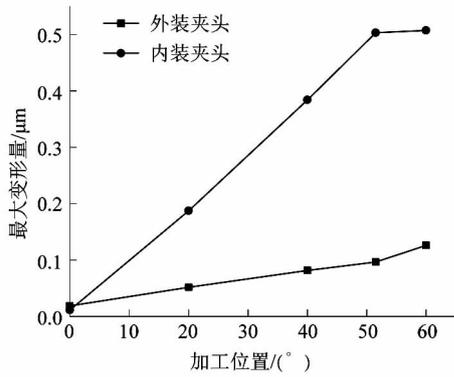


图 9 内、外装夹头在不同加工位置下的最大变形量  
Figure 9 Maximum deformation of inner and outer chucks at different processing positions

下的变形情况。当磨削力为 40 N、真空负压为 0.01 MPa 时,2 种材料的装夹头变形如图 10 所示。

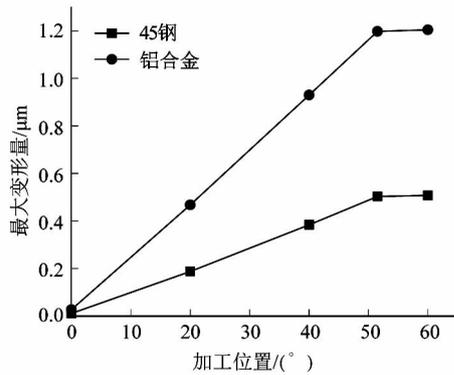


图 10 不同装夹材料下模型的最大变形量  
Figure 10 Maximum deformation of model under different chuck materials

从图中可以看出由 45 钢制成的装夹头的最大变形量约为铝合金的 40%,因此,45 钢的抗变形能力优于铝合金,装夹头的材料选用变形量更小的 45 钢。

### 3.4 磨削力对变形量的影响

为探究真空装夹模型在不同磨削位置时磨削力对变形量的影响,分别仿真装夹在 0.0°,20.0°,40.0°,51.5°和 60.0°加工位置时,磨削力从 10 N 增大到 50 N 下的该模型最大变形量,得到如图 11 所示的变化趋势。

由图 11 可知,装夹模型的最大变形量与加工位置和磨削力呈正比,即加工角度和磨削力越大,装夹结构的最大变形量越大。当加工位置在 50°附近时,最大

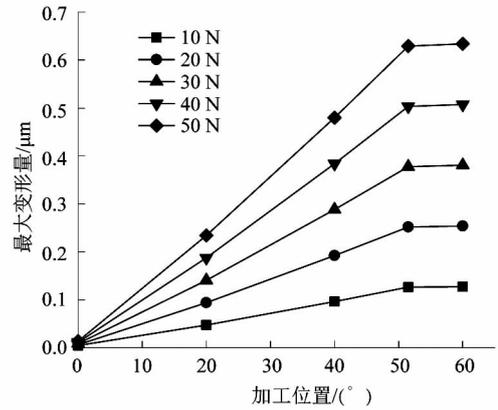


图 11 不同磨削力下模型的最大变形量  
Figure 11 Maximum deformation of model under different grinding forces

变形量达到拐点,之后缓慢变化。

### 3.5 真空负压对变形量的影响

为研究真空负压的变化对装夹结构的影响,分别仿真磨削力为 40 N、真空负压在 0.003 ~ 0.018 MPa 下不同加工位置处的最大变形量。由图 12 可知,在不同真空负压下,加工位置对最大变形量的影响较大,而真空负压对其影响很小。

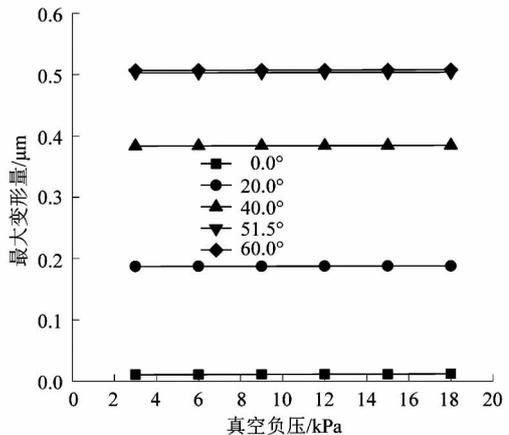


图 12 不同真空负压下模型的最大变形量  
Figure 12 Maximum deformation of model under different vacuum pressure

### 3.6 磨削头尺寸对变形量的影响

为分析砂轮尺寸在加工中对装夹模型造成的影响,选用 3 个不同尺寸的杯型砂轮 1,2 和 3 在不同加工位置下进行仿真分析。砂轮 1,2 和 3 的外径分别为 15,20 和 25 mm,内径分别为 10,15 和 20 mm。当磨削

力为 40 N、真空负压为 0.01 MPa 时,仿真结果如图 13 所示。

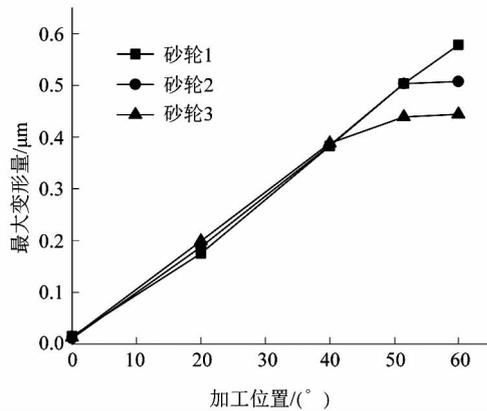


图 13 不同尺寸砂轮加工下模型的最大变形量

Figure 13 Maximum deformation of model under different size grinding wheels

由图 13 可知,在  $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$  的加工位置,3 个不同尺寸的砂轮加工造成的最大变形曲线几乎重合;但砂轮 3 在  $40^{\circ}$  附近和另 2 条曲线分离,砂轮 2 在  $50^{\circ}$  附近又和砂轮 1 分离。这是因为当摆动角度变大时,随着砂轮尺寸的增大,砂轮与球罩的接触面积变小,导致曲线不重合。因此可以得出结论:砂轮的尺寸对装夹结构最大变形量的影响较小。

#### 4 结论

课题组针对光学球罩加工复杂、装夹困难的问题,提出一种“2 转动 + 1 摆动 + 微量进给”的加工方法并设计出真空吸附的装夹结构。通过理论计算分析表明:球罩装夹时将真空负压设定为 0.01 MPa,光学球罩在粗磨状态下不会发生滑移而影响装夹的稳定性。

利用 Workbench 有限元软件对装夹模型在不同加工位置下的状态进行仿真,并对可能影响模型最大变形量的各因素进行讨论分析,仿真结果表明:在相同参数下,内装夹头的最大变形量大于外装夹头;45 钢作为装夹头材料抗变形效果优于铝合金;磨削力与最大变形量呈正比,最大变形量随着磨削力的增大而增大;

真空负压及砂轮尺寸的大小对最大变形量的影响很小。

课题组的研究可为后续不同装夹头结构的设计提供一定的参照。因为模型边界条件及载荷施加的仿真效果与实际值可能存在一定的偏差,后续需根据实测数据对模型进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] 张荣实. 红外窗口/整流罩技术新进展[J]. 红外与激光工程, 2007,36(增刊 2):114-119.
- [2] 胡扬轩,邓朝晖,万林林,等. 用于蓝宝石材料加工的新型超精密抛光技术及复合抛光技术研究进展[J]. 材料导报,2018,32(9):1452-1458.
- [3] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, DOUBROVSKI V, et al. Automated optical fabrication: first results from the new “Precessions” 1.2m CNC polishing machine [J]. Optomechanical Technologies for Astronomy, 2006,6273:91-98.
- [4] 张杰,陈明君,李旦,等. 复杂结构薄壁件小直径永磁球头磁流变抛光技术[J]. 航空精密制造技术,2017,53(4):16-19.
- [5] 范娜,陈传东,张忠义. 硬脆基底材料超精密抛光技术研究进展[J]. 稀土,2022,43(2):20-31.
- [6] GOLINI D, JACOBS S D, KORDONSKI W I, et al. Precision optics fabrication using magnetorheological finishing [J]. International Society for Optical Engineering, 2017,1:251-274.
- [7] 何泽地,田东宁,杨金川,等. 薄壁球壳真空吸附装夹变形力学分析与控制[J]. 兵工学报,2017,38(7):1409-1415.
- [8] 何守通,祁昌翔. “胶粘法”在工件装夹中的应用[J]. 内燃机与配件,2019(6):73-74.
- [9] 陈华男,李显凌,孙振. 光学加工中真空夹具设计及分析[J]. 真空,2013,50(4):78-82.
- [10] JU K, DUANC Z, KONG J X, et al. Clamping deformation of thin circular workpiece with complex boundary in vacuum fixture system [J]. Thin-Walled Structures, 2022,171:108777. 1-108777. 17.
- [11] 石小鹏. 人工髋关节球头抛光工艺研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2021:15-18.
- [12] 吉布森. 薄壳计算与理论[M]. 北京:国防工业出版社,1989:101-109.
- [13] 龚肖新,卢强. SMG 系列球面磨床磨削受力分析及动态模拟[J]. 机床与液压,2015(16):55-57.