

子孔径范成法铣磨半球及超半球光学整流罩

叶斯哲 王朋 张昊 回长顺

Sub-aperture generating method for grinding hemispherical and hyper-hemispherical optical dome

YE Sizhe, WANG Peng, ZHANG Hao, HUI Changshun

引用本文:

叶斯哲, 王朋, 张昊, 等. 子孔径范成法铣磨半球及超半球光学整流罩[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1362–1370. DOI: 10.5768/JAO202344.0605002

YE Sizhe, WANG Peng, ZHANG Hao, et al. Sub-aperture generating method for grinding hemispherical and hyper-hemispherical optical dome[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1362–1370. DOI: 10.5768/JAO202344.0605002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0605002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

KDP光学零件超精密车削加工误差的频谱特性与控制

Spectral characteristics and control of machining errors of KDP optical elements in ultra-precision turning

应用光学. 2017, 38(2): 159–164 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201002>

二次曲面共形整流罩像差影响因素分析

Analysis of influence factors on aberrations introduced by quadric conformal domes

应用光学. 2019, 40(6): 965–972 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601006>

微磨削斜面光纤透镜平面度试验研究

Experimental investigation on flatness of oblique optical fiber lens in micro-grinding

应用光学. 2017, 38(1): 94–98 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0105004>

基于超表面材料的扇出衍射光学元件

Metasurface fan-out diffractive optical elements

应用光学. 2019, 40(2): 306–310 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205001>

衍射光学元件检测及数据处理

Detection and data processing of diffractive optical element

应用光学. 2018, 39(3): 355–358 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0302002>

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1362-09

子孔径范成法铣磨半球及超半球光学整流罩

叶斯哲^{1,2}, 王 朋³, 张 昊³, 回长顺³

(1. 中国科学院海西研究院 厦门稀土材料研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市稀土光电功能材料重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘 要: 为攻克高陡度球面光学零件成型技术, 以半球及超半球红外光学整流罩为研究对象, 提出了一种子孔径铣磨加工方法。对传统范成法铣磨成型理论进行拓展, 将球面离散为一系列子孔径环带, 砂轮沿环带“步进”运动, 拼接成型得到完整的球面。分析了成型球面与三轴机床位置坐标之间的转换关系, 对加工运动轨迹进行仿真, 开展半径误差补偿验证实验及变速进给参数优化实验, 提出变半径铣磨法解决超半球加工材料过切问题。对长径比分别为 0.5 (半球) 和 0.55 (超半球) 的热压硫化锌、镁铝尖晶石整流罩开展成型工艺试验, 加工表面各点矢高差 $< 4 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 $Ra < 1.5 \mu\text{m}$ 。实验结果表明: 该方法为高陡度球面加工提供了有效的解决方案。

关键词: 光学加工; 铣磨; 范成法; 超半球

中图分类号: TN205; TG580.6

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0605002

Sub-aperture generating method for grinding hemispherical and hyper-hemispherical optical dome

YE Sizhe^{1,2}, WANG Peng³, ZHANG Hao³, HUI Changshun³

(1. Xiamen Institute of Rare Earth Materials, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Xiamen Key Laboratory of Rare Earth Photoelectric Functional Materials, Xiamen 361021, China; 3. Tianjin Institute of Jinhang Technical Physics, Tianjin 300380, China)

Abstract: In order to overcome the molding technology of high-steep spherical optical parts, a sub-aperture grinding method was proposed, taking the hemispherical and hyper-hemispherical infrared optical domes as the research object. The traditional generating method grinding forming theory is expanded, the spherical surface is discretized into a series of sub-aperture rings, the grinding wheel "steps" along the ring, and a complete spherical surface is obtained by splicing and forming. In this paper, the transformation relationship between the forming spherical surface and the position coordinates of the three-axis machine tool was analyzed, the machining motion trajectory was simulated, and the radius error compensation verification experiment and the variable feed parameter optimization experiment were conducted. A method of variable radius grinding was proposed to solve the problem of over-cutting of hyper-hemisphere machining materials. The forming process test was carried out on the hot-pressed zinc sulfide and magnesium-aluminum spinel spherical dome with the aspect ratios of 0.5 (hemisphere) and 0.55 (hyper-hemisphere) respectively, the sag height difference of each point on the processing surface $< 4 \mu\text{m}$, and the surface roughness $Ra < 1.5 \mu\text{m}$. The results show that the method is feasible and can provide an effective solution for deep high gradient spherical processing.

Key words: optical processing; grinding; generating method; hyper-hemisphere

引言

整流罩是导弹的关键部件之一, 导弹在高速飞

行过程中, 整流罩承受高的气动加热温度和大的气动压力, 还受到风沙、雨水的侵袭, 要求整流罩

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 福建省中国科学院 STS 计划配套项目 (2023T3002; 2023T3085); 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建省光子技术重点实验室开放课题 (JYG2205); 厦门稀土材料研究所自主部署项目 (2023CX06)

作者简介: 叶斯哲 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学加工及光机系统设计。E-mail: yesizhe@fjirsm.ac.cn

具有良好的光、机、热学性能^[1]。随着导弹速度、射程的提高,高速飞行时减阻问题就显得十分重要,要求整流罩除了具有上述性能以外,还要具有更好的气动外形。在高速导引头、多模复合导引头等需求牵引下,高陡度光学整流罩越来越受到青睐^[2]。半球甚至超半球光学整流罩在口径一定的情况下,可以实现对更大的视场进行搜索^[3],增大导弹打击范围,因此,加强对此类光学整流罩制造工艺的研究具有重要意义。

对于光学整流罩及其他光学元件,通常使用范成法铣磨成型。但受限于加工原理,范成法对被加工零件的尺寸和形状有一定限制^[4]。尺寸上只能加工最大口径为砂轮直径2倍的零件,形状上只能加工陡度较小的零件。当被加工零件表面特别陡峭时,如在加工近半球或半球时,砂轮圆弧刀口边缘区域金刚砂参与磨削,对砂轮直径、刃口圆弧半径一致性、金刚砂烧结质量要求特别严苛,不具备工程可行性。成型更大尺寸、更高陡度的球面零件,是传统范成法铣磨难以克服的问题。因此,该类零件多使用模具手工研磨加工^[5],对操作人员技能要求高,生产效率低,加工一致性差。针对范成法铣磨工艺,国内多家单位对其开展研究,高必烈等人在传统范成法基础上进行扩展和改进^[6-7],加工出大口径凹凸非球面;宣斌提出了一种利用非数控设备成形扁椭球面的范成法铣磨方法^[8];陈曦等人使用五轴联动机床范成法铣磨离轴凹面非球面^[9]。针对半球及超半球零件范成法成型,目前尚未有相关工程实例报道,因此研究一种高效、高面形一致性、高表面质量的铣磨加工方法非常必要。本文提出的子孔径范成法铣磨技术流程如图1所示。

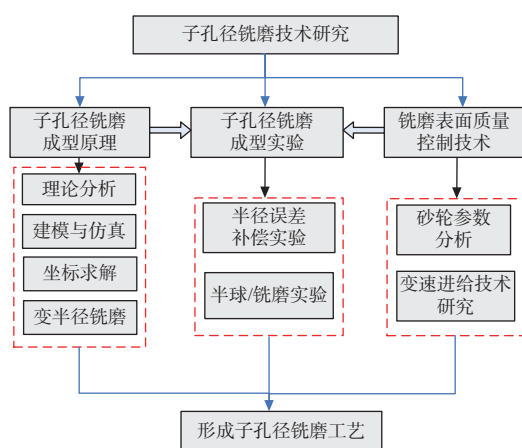


图1 子孔径铣磨技术流程

Fig. 1 Technical route of sub-aperture grinding

1 基本原理

1.1 传统范成法原理

范成法广泛应用于光学加工中平面和球面的成型工序,原理是用一个球冠(杯状砂轮端面)去斜截被加工面,在零件旋转过程中,许多个斜截圆的包络面就是所要成型的球面^[10-11],范成法铣磨原理如图2所示。金刚石砂轮刃口通过零件顶点,砂轮轴线和零件轴线相交于 O 点,并且两轴夹角为 α ,砂轮绕自身轴高速旋转,其刃口在任意瞬间的切削轨迹为一个斜截圆(如图3(a)),零件绕自身

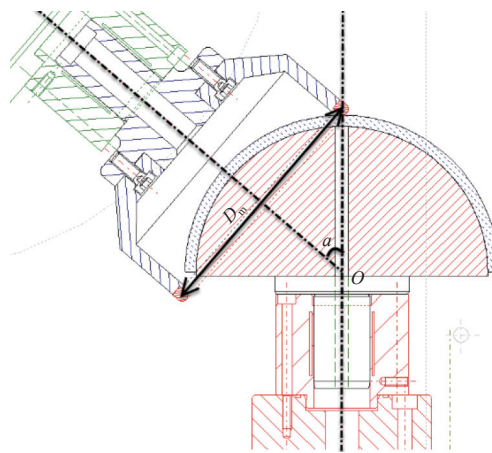
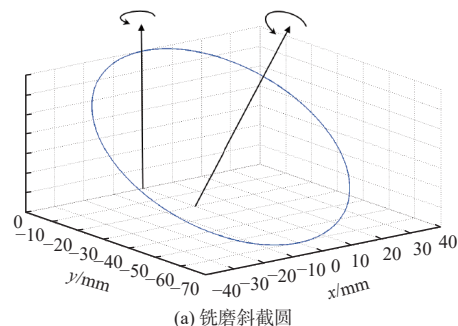
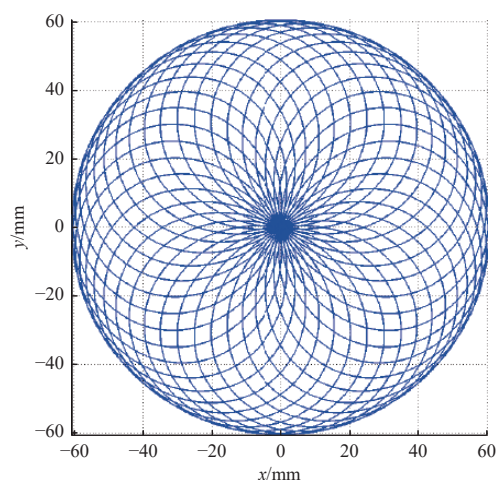


图2 范成法铣磨原理

Fig. 2 Principle of generating method grinding



(a) 铣磨斜截圆



(b) 斜截圆旋转包络面

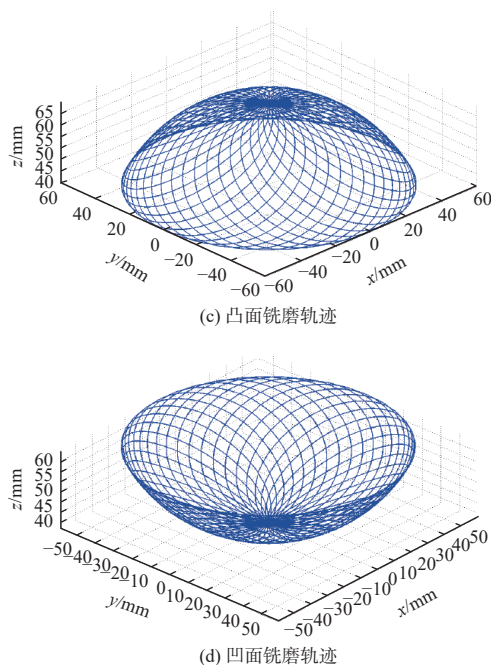


图 3 范成法铣磨轨迹模拟

Fig. 3 Simulation of grinding trajectory by generating method

轴低速转动,这种运动轨迹的包络面就形成球面,如图 3(b)、3(c)和 3(d)所示。由于范成法是用一个环线,而不是一个点去铣磨,因此范成法铣磨效率高,且成型曲率半径和面形一致性好。

1.2 子孔径范成法成型原理及仿真

数控技术和机床运动精度的提高给加工带来了灵活性,用小尺寸的杯型砂轮铣磨成型高陡度/大口径球面零件成为可能。只要满足 2 个条件:1) 砂轮端面刃口中心点始终运动在所成型球面上;2) 砂轮旋转的轴线始终穿过所成型球面的球心,则铣磨出来面型就是一个球面,如图 4 所示。由于铣磨过程中砂轮的直径 D_m 始终保持不变,因此砂轮相对于零件球心的张角恒定,即可以精确计算出任意时刻砂轮的旋转轴倾斜角 α 与砂轮刃口中心点 G 在平面内的位置关系。这就要求砂轮刃口中心点的位置在平面内能精确地移动,同时砂轮的倾斜轴可以精确地联动偏转,因此机床需具备 Y 、 Z 、 A 三轴联动功能。

将零件绕自身旋转一周定义为一个周期,砂轮在任一周期内,对零件球面上某一子孔径铣磨成型。砂轮与零件始终保持线接触,在加工过程中斜截零件球面,以砂轮斜截圆中心 (x_0, y_0, z_0) 建立空间立体坐标系。此时砂轮以 (x_0, y_0, z_0) 为圆心,以 $D_m/2$ 为半径的圆 (x_1, y_1, z_1) 可表示为

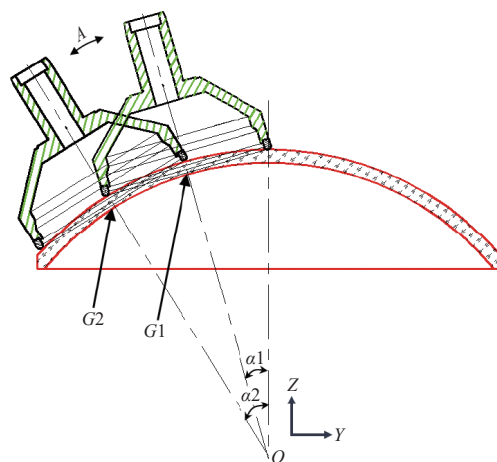


图 4 子孔径范成法铣磨示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sub-aperture generating method grinding

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + (D_m/2) \times \cos(\omega_1) \\ y_1 = y_0 + (D_m/2) \times \sin(\omega_1) \\ z_1 = \sqrt{R^2 - (D_m/2)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω_1 为砂轮转速。

当砂轮以被加工零件球心 O 为轴,转动 α 角时,根据齐次坐标变换原理,可得到此时砂轮斜截圆的表达式为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \\ y_2 = y_1 \times \cos(\alpha) - z_1 \times \sin(\alpha) \\ z_2 = z_0 + y_1 \times \sin(\alpha) + z_1 \times \cos(\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\alpha = \arcsin(D_m/(2 \times R))$; R 为被加工球面球半径。

零件以转速 ω_2 绕自身机械轴旋转,可看做砂轮斜截圆以转速 ω_2 绕 z 轴旋转,此时斜截圆包络线即为传统范成法铣磨轨迹,如图 3(b)、3(c)、3(d)所示。其表达式为

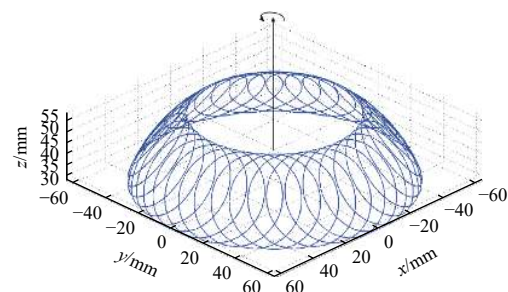
$$\begin{cases} x_3 = x_2 \times \cos(\omega_2) - y_2 \times \sin(\omega_2) \\ y_3 = x_2 \times \sin(\omega_2) + y_2 \times \cos(\omega_2) \\ z_3 = z_2 \end{cases} \quad (3)$$

此时,保持砂轮轴线与零件机械轴相交于球心 O 点,连续改变 α 角,在加工过程中砂轮直径 D_m 和砂轮刃口圆弧半径 r_0 为定量。由前文可知,只要砂轮轴线始终通过被加工球面球心,任意时刻砂轮所截球冠的矢高仍为定值,即:

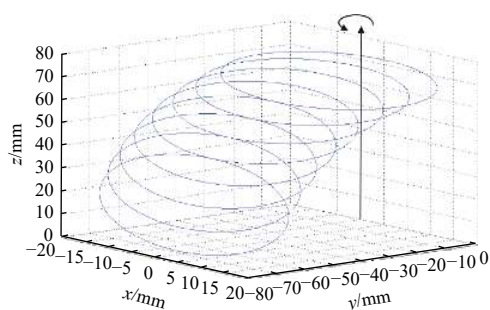
$$S_{ag} = R - \sqrt{R^2 - (D_m/2)^2} \quad (4)$$

所截子孔径球面如图 5(a) 所示。如果 α 角以一固定步长连续变化,则任意时刻砂轮所截球冠,即各子孔径内半径为定值,那么被加工球面任意点球半径也为定值,斜截圆包络线如图 5(b)、5(c)和 5(d) 所示。此时被加工球面矢高不再受砂轮所

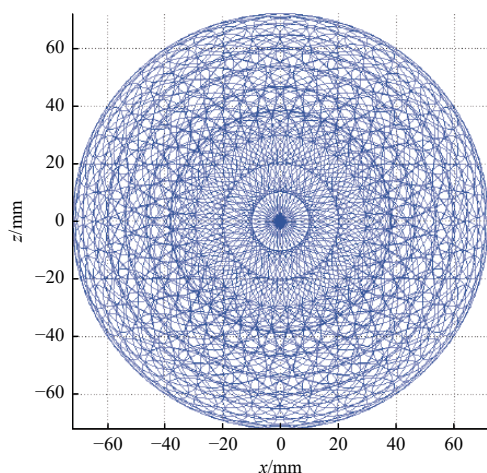
截球冠的矢高限制, 因此理论上可实现半球或超半球零件的加工。



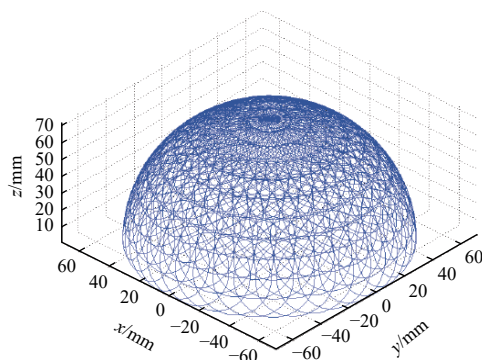
(a) 单周期子孔径铣磨斜截圆轨迹



(b) 变倾斜角斜截圆旋转包络面



(c) 子孔径铣磨轨迹俯视图



(d) 子孔径铣磨轨迹三维图

图5 子孔径范成法铣磨轨迹模拟

Fig. 5 Simulation of grinding trajectory using sub-aperture generating method

2 工艺参数分析

2.1 子孔径铣磨数控坐标求解

铣磨设备轴系示意图如图6所示。砂轮安装在上主轴, 长度为 H_1 , 零件安装于下主轴, 长度为 H_2 , 两轴均绕自身轴线作回转运动; 上主轴作为摆轴, 可绕其回转中心 O_1 摆动一定角度 α 。由上述分析可知, 加工过程中砂轮直径 D_m 和砂轮刃口圆弧半径 r_0 均为定量, 只要满足砂轮轴始终绕被加工球面球心摆动这个条件, 被加工面的任意子孔径球半径均为 R 。然而, 加工过程中砂轮绕摆轴回转中心 O_1 摆动, 不是绕被加工面球心 O 摆动。摆轴长度为定量 H_3 , 砂轮长度也为定量 H_1 , 当砂轮绕 O_1 摆动时, 被加工面是半径为 H_1+H_3 的球面而非 R , 显然此时铣磨设备轴系不能满足半径 R 成型条件。

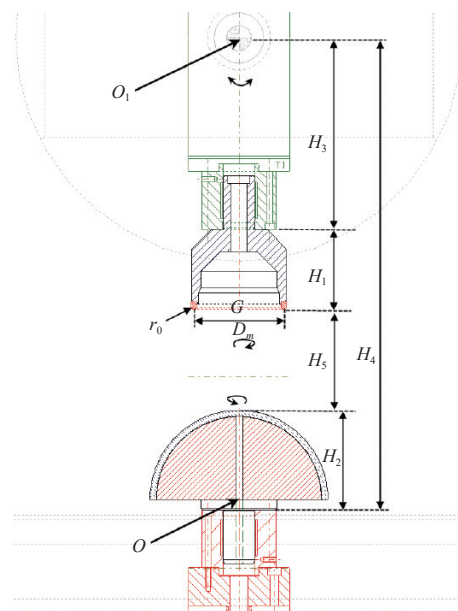


图6 铣磨机床轴系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of shaft system of grinding machine

为了实现可控球面半径的子孔径范成法铣磨, 需建立铣磨设备轴系数学坐标模型。利用数控设备多轴精确联动的特点, 通过机床水平、竖直运动补偿摆轴转动过程中砂轮与零件的位置变化, 保证砂轮轴线始终通过被加工面球心。如图7所示, 以被加工面球心 O 为原点建立直角坐标系, 以摆轴转角 α 为自变量, 计算摆轴回转中心 O_1 在水平、竖直方向的相对变化量 XO_1 、 ZO_1 。图7中 S_{ag} 为砂轮所截球冠的矢高, G 点为砂轮刃口中心, H_4 为摆轴回转中心 O_1 到下主轴在竖直方向的距离, 连

接摆轴回转中心 O_1 与被加工面球心 O , 则有:

$$XO_1 = OO_1 \sin(\alpha) \quad (5)$$

同理, 摆轴竖直方向的移动距离 ZO_1 为

$$ZO_1 = (1 - \cos(\alpha))OO_1 + S_{ag} + H_5 \quad (6)$$

联立上述公式, 整理得:

$$\begin{cases} XO_1 = \sin(\alpha) * (H_1 + H_3 + \sqrt{R^2 - (D_m/2)^2}) \\ ZO_1 = (1 - \cos(\alpha)) * [H_1 + H_3 + \sqrt{R^2 - (D_m/2)^2}] + \\ R - \sqrt{R^2 - (D_m/2)^2} + H_4 - H_1 - H_2 - H_3 \end{cases} \quad (7)$$

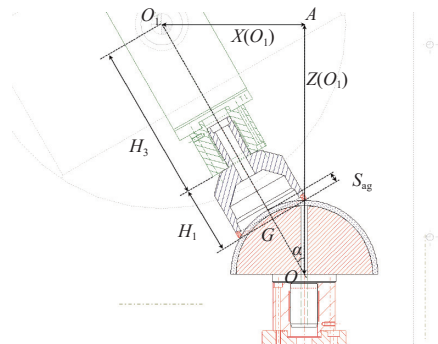


图7 子孔径铣磨轴系示意图

Fig. 7 Schematic diagram of sub-aperture grinding shaft system

由此可知, 摆轴回转中心相对于零件在水平及竖直方向的位移 XO_1 、 ZO_1 是关于摆轴摆角 α 的函数, 即使用三轴联动数控设备可完成对不同曲率半径球面的子孔径范成法铣磨成型。

确定摆轴摆角 α 。对于子孔径范成法铣磨, 砂轮轴绕被加工面球心摆动, 摆角 α 在一定范围内呈线性变化, 摆角范围由零件曲率半径 R 、零件口径 D 、砂轮直径 D_m 共同决定。当砂轮位于初始中心位置时, 砂轮与零件位置关系如图7所示。由几何位置关系可知, 此时摆角 α_1 为

$$\alpha_1 = \arcsin(D_m/(2R)) \quad (8)$$

当砂轮位于终点边缘位置时, 砂轮与零件位置关系如图8所示。同样需要满足2个条件: 1) 砂轮刃口与零件边缘接触; 2) 砂轮轴线通过被加工面球心 O 。已知零件被加工面半径 R 、口径 D , 设球面圆心角为 θ , 砂轮截面半张角为 β , 则此时的砂轮摆角 α_2 为

$$\alpha_2 = \theta - \beta \quad (9)$$

式中: $\theta = \arcsin(D/(2 \times R))$; $\beta = \arcsin(D_m/(2 \times R))$ 。

整理得:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin(D_m/(2 \times R)) \\ \alpha_2 = \arcsin(D/(2 \times R)) - \arcsin(D_m/(2 \times R)) \end{cases} \quad (10)$$

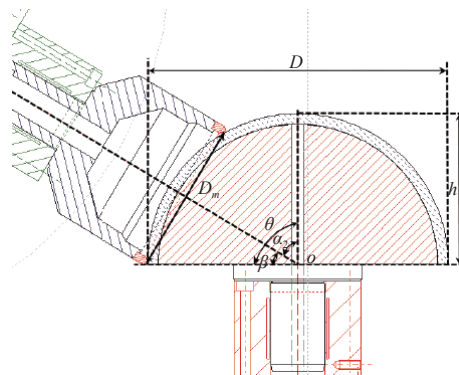


图8 砂轮位于边缘示意图

Fig. 8 Schematic diagram of grinding wheel on edge

至此确定了铣磨过程中摆角从起始中心位置到终点边缘位置的行程范围及其数学表达, 完成了子孔径铣磨数控程序数学模型的建立。

2.2 子孔径铣磨球半径误差补偿

按照上述子孔径铣磨数控程序及其生成的加工轨迹, 采用子孔径铣磨法对整流罩毛坯试加工, 其中机床、砂轮参数及被加工球面参数如表1所示。铣磨完工后使用矢高测环在位测量被加工球面径向各位置矢高, 结果表明球面各点矢高不完全一致, 具体表现为以零件顶点区域矢高为基准, 沿球面径向向外延伸, 矢高呈逐渐变大的趋势, 矢高差约 0.08 mm。因此存在球半径误差, 顶点区域球半径大, 边缘区域球半径小。

表1 子孔径铣磨加工参数

Table 1 Parameters of sub-aperture grinding

类型	铣磨参数	数值
砂轮	砂轮中径/mm	94.63
	砂轮高度/mm	61.5
	砂轮刃口半径/mm	2.55
零件	被加工球半径/mm	133
	零件高度/mm	94.7
	厚度去除量/mm	0.1
机床	摆轴中心到刀具轴高度/mm	210.113
	摆轴中心到工件轴高度/mm	688.135
	起始摆角/(°)	21.3
	终点摆角/(°)	48
	刀具转速/rpm	1200
	转台转速/rpm	10
	进给速度/mm·min ⁻¹	0.5

导致球面径向各点球半径不完全一致的原因, 主要是机床定位误差、铣磨砂轮制造误差、零件装夹定位误差等多重因素的影响。另外, 子孔径范

成法铣磨加工过程中机床三轴联动, 对各轴系运动精度的要求高于传统范成法铣磨的两轴联动。为减小铣磨球半径误差, 采用轨迹位置补偿法改进加工。具体如下: 首先将被加工面各位置的测环实测矢高 h_x 与理论球半径矢高 h_1 求差, 得到相应位置矢高实际偏离量 $\Delta h_x = h_x - h_1$, 进而求得各位位置补偿后的目标矢高 $h' = h_1 - \Delta h_x$, 与测环直径 D_h 联立, 即可求得相应位置加工标称补偿半径:

$$R' = \frac{D_h^2}{8h'} + \frac{h'}{2}$$

将 R' 带入式(10), 其他参数不变, 得到补偿后的球面加工轨迹, 如图9所示。图9中蓝*为目标加工轮廓, 红x为补偿前加工轮廓, 图中实际加工矢高大于目标矢高。根据上述计算方法求得补偿半径 R' , 机床以此标称补偿轮廓(黑+)进给, 即可得到目标加工轮廓。

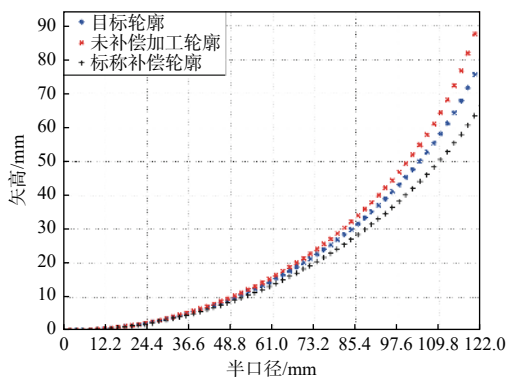


图9 球半径误差补偿铣磨示意图

Fig. 9 Schematic diagram of spherical radius error compensation grinding

子孔径铣磨法对整流罩毛坯球半径误差补偿加工过程如图10(a)所示。该补偿加工方法利用了子孔径铣磨在任一周期内仅对零件球面上某一子孔径成型的特点, 程序中任一子孔径是以补偿后的球半径进给加工, 即各子孔径球半径均不一样。补偿加工后得到零件矢高差为 0.003 mm, 如

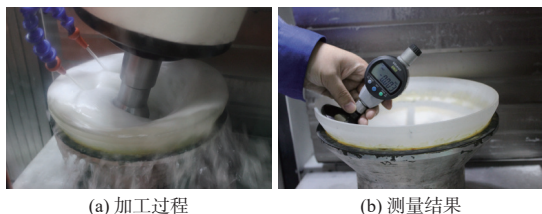


图10 球半径误差补偿加工过程及测量结果

Fig. 10 Machining process and measurement results of spherical radius error compensation

图10(b)所示, 较补偿前球半径误差大幅减小, 一定程度弥补了机床三轴联动带来的运动定位误差。

2.3 子孔径铣磨超半球方法

对于长径比(零件矢高/口径) ≤ 0.5 的球面零件, 可采用恒定球半径法加工。以目标球半径铣磨整个球面后再增加吃刀深度, 完成下一次遍历铣磨, 依次逐层铣磨, 最终达到零件表面及厚度要求。对于长径比 > 0.5 (超半球) 的球面零件, 此方法不再可行。当以目标球半径铣磨第一刀时, 便已对下一刀的非目标铣磨区(图11左侧所示红、黄、绿三条曲线所围成区域)材料产生去除, 即出现过切现象, 最终无法成型超半球。因此, 针对超半球零件成型, 提出了变半径铣磨法, 如图11右侧所示。图11中球心为 O , 目标球半径为 R , 目标轮廓矢高为 h , 以初始铣磨球半径 $R_c = \sqrt{h^2 - 2hR^2 + 2R^2}$ 开始铣磨第一刀, 再逐步减小半径直至达到目标球半径 R 。图11中蓝色虚线表示变半径铣磨过程轮廓曲线, 绿线(半球区)与红线(超半球区)共同组成目标超半球轮廓, 使用此方法成型超半球即可避免过切现象。

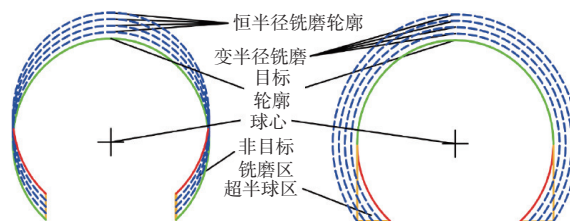


图11 变半径铣磨法加工超半球原理图

Fig. 11 Schematic diagram of machining hyper-hemisphere by variable radius grinding method

3 实验及验证

3.1 变速进给参数优化实验

子孔径铣磨与传统范成法铣磨的差异在于进给形式, 传统范成法铣磨是沿径向进给, 子孔径铣磨是绕球心进给, 因此传统铣磨加工进给参数不一定适用于子孔径铣磨, 有必要开展子孔径铣磨进给参数优化实验^[12-16]。针对进给速度, 本文设计了不同进给速度曲线, 如图12所示。图12中, 第1组为恒定进给速率, 第2组为恒定斜率进给, 第3组与第4组均为变斜率圆弧上升进给曲线, 不同的是第3组先缓后急, 而第4组则相反。利用表面轮廓仪测量加工后表面粗糙度, 分析进给速度与加工表面质量的关系, 可得到合适进给速度曲线形式。

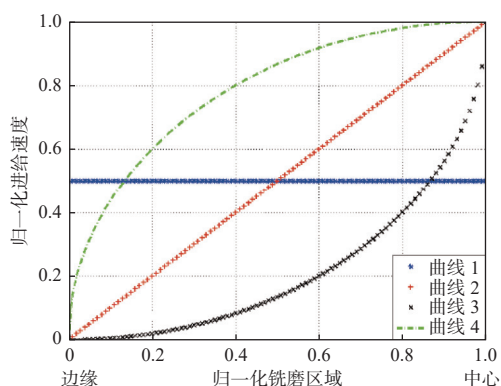


图12 变进给速度试验曲线

Fig. 12 Variable feed rate test curve

针对上述4种进给速率进行铣磨试验,采用单因素试验法,除进给速率不同外,其余参数均相同,试验参数及结果如表2所示。从表2可以看出,以零件中心与边缘表面粗糙度差异作为评判依据,第1组边缘表面粗糙度达到 $18.5\text{ }\mu\text{m}$,与中心差异较大,也明显大于后三组,且肉眼观察试件表面磨削刀纹明显;后三组中心与边缘差异均不大,以第3组整体表面粗糙度最小;对于加工时间,以第4组加工时间最短,第1组和第2组次之,两者相差不多,第3组加工时间最长。基于以上测试结果,在进给策略选择上,针对粗成型或批量高效生产需求,可选择第4组进给曲线。针对精加工、追求表面质量的情况,可选择第3组进给曲线形式。

表2 改变进给速度铣磨试验结果

Table 2 Variable feed speed grinding test results

进给速率曲线	砂轮参数	零件转速/rpm	铣磨深度/mm	加工时间/s	边缘表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	中心表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1				60	18.5	6.9
2	80#金属基烧结金	1200	10	65	8.8	9.2
3	刚石砂轮			83	7.4	7.9
4				42	9.2	9.8

3.2 成型验证实验

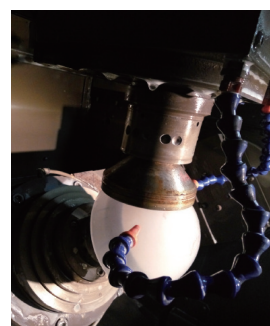
在国产 MKB300 铣磨机和德国 LOH GI-3P 铣磨机上分别开展铣磨成型实验。其中 MKB300 铣磨机摆轴位于砂轮刀具轴上,受限于其最大摆角,只能开展半球铣磨实验。GI-3P 铣磨机为摇篮式机床,摆轴位于零件轴上,其最大摆角满足超半球实验。实验件选择长径比为 0.5 的热压硫化锌半球整流罩以及长径比为 0.55 的镁铝尖晶石超半球整流罩。

铣磨实验中选用砂轮粒度为 120#、浓度为 100% 的金属结合剂金刚石砂轮,铣磨参数:砂轮转速

2 000 /rpm, 零件转速 10 /rpm, 铣磨深度 0.05 mm, 进给速率选择前文所述进给速率曲线 4 进行。实验过程如图 13(a)、13(b)所示;完工热压硫化锌球面各点矢高差小于 0.004 mm, 尖晶石材料的矢高差小于 0.003 mm, 如图 13(c)、13(d)所示;二者完工样件如图 13(e)、13(f)所示。使用 Talysurf PGI-2540 轮廓仪对零件顶点处(采样 20 mm, 轮廓误差 $0.3\text{ }\mu\text{m}$)测量表面粗糙度,结果如图 13(g)、13(h)所示,其中热压 ZnS 粗糙度 $R_a=1.36\text{ }\mu\text{m}$, 尖晶石粗糙度 $R_a=1.49\text{ }\mu\text{m}$, 均满足技术指标要求。上述加工测量结果与传统范成法铣磨加工球面精度相当,铣磨后的零件满足后续精磨抛光表面质量及半径一致性要求。



(a) ZnS半球整流罩加工过程



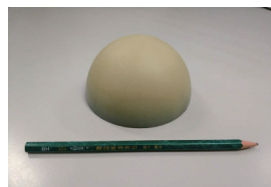
(b) 尖晶石超半球整流罩加工过程



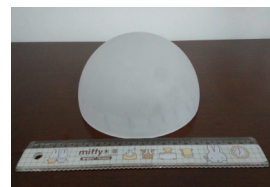
(c) ZnS半球整流罩矢高差测量



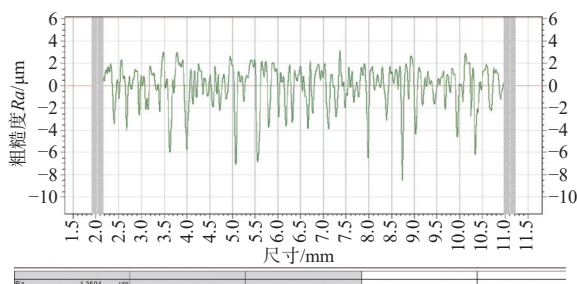
(d) 尖晶石超半球整流罩矢高差测量



(e) ZnS半球整流罩实物



(f) 尖晶石超半球整流罩实物



(g) ZnS半球表面粗糙度测量结果

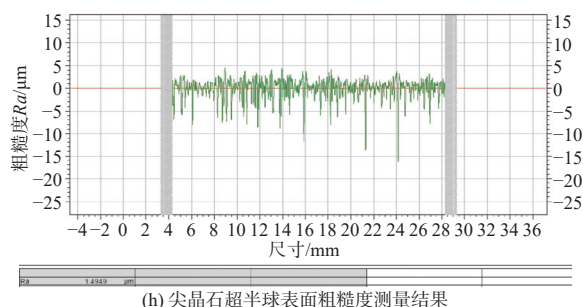


图13 子孔径铣磨半球及超半球实验及结果

Fig. 13 Experiment and results of sub-aperture grinding hemisphere and hyper-hemisphere

4 结论

本文基于范成法成型理论,提出了一种高陡度球面光学零件的子孔径数控铣磨加工方法。采用轨迹位置补偿法解决了铣磨球半径误差问题,针对超半球零件,提出变半径铣磨法避免过切现象。在工艺上,开展半径误差补偿验证实验及变速进给铣磨参数优化实验,通过加工长径比分别为0.5和0.55的半球及超半球红外晶体整流罩,测量了加工表面各点矢高差 $<4\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度 $Ra<1.5\text{ }\mu\text{m}$,满足后续加工要求,验证了本文提出的子孔径铣磨成型方法的有效性。

综上所述,除了几何参数引起的加工误差外,零件加工残余误差还与硬脆材料磨削的砂轮磨损、球罩薄壁件的变形、零件的装夹定位、机床主轴跳动、砂轮粒度浓度、结合剂材料等因素相关,后续还需继续开展相关研究。本文提出的子孔径范成法铣磨还可以扩展到非球面光学元件的加工中,适用于面上各点切线半径单调变化的非球面,而非单调变化的非球面因过切问题此方法不适用。

参考文献:

- [1] 孟庆超,段萌,张运强,等. 红外空空导弹整流罩技术的新进展[J]. 航空兵器, 2008(2): 24-27.
MENG Qingchao, DUAN Meng, ZHANG Yunqiang, et al. New development on dome of infrared air-to-air missile[J]. Aero Weaponry, 2008(2): 24-27.
- [2] SHARMA G K, DIMRI G P, NEGIANDR U S. Technique for the fabrication of an optical dome[J]. Journal of Optics, 1994, 23(3): 109-112.
- [3] BENDER M J, GUYER R C, FENTON T E. Design and test of an airborne IR countermeasures hyper-hemisphere[J]. SPIE, 2007, 6665: 666502.
- [4] 中国科学院光电技术研究所光学车间技术组. 范成法精磨铣磨工艺试验[J]. 光学工程, 1978(1): 5-7.
Optical Workshop Technical Group, Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences. Test of fine milling technology by generating method[J]. Opto-Electronic Engineering, 1978(1): 5-7.
- [5] 徐岩,李彩双,孙强,等. 半球蓝宝石整流罩制造技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 636-638.
XU Yan, LI Caishuang, SUN Qiang, et al. Study on manufacturing technology for hemisphere sapphire dome[J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 636-638.
- [6] 潘君骅,王建国. 用铣磨法加工二次非球面的数学原理[J]. 光学学报, 1984, 4(3): 252-256.
PAN Junhua, WANG Jianguo. Mathematical principle for generating second order aspherical surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 1984, 4(3): 252-256.
- [7] 高必烈. 用改进和拓展后的范成法铣磨凸凹非球面的原理和精度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 23-26.
GAO Bilie. The principle and precision analysis of milling convex and concave aspheric surface with improved and expanded forming method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 23-26.
- [8] 宣斌. 利用非数控设备成形扁椭球面[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1248-1253.
XUAN Bin. Generation method of oblate spheroid with non-CNC machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1248-1253.
- [9] 陈曦,戴卓成,郭培基,等. 五轴加工中心范成铣磨离轴非球面研究[J]. 光学技术, 2022, 48(1): 55-59.
CHEN Xi, DAI Zhuocheng, GUO Peiji, et al. Study on generating method for off-axis aspherical mirror grinding based on five-axis machining center[J]. Optical Technique, 2022, 48(1): 55-59.
- [10] 杨力. 球面范成法成形一般原理及范成表面形状精度分析[J]. 光学学报, 1981, 1(3): 249-257.
YANG Li. General principle of the precise spherical generation and the accuracy analysis of the resulting surface shape[J]. Acta Optica Sinica, 1981, 1(3): 249-257.
- [11] 魏臣隽,胡德金,杨学华,等. 回转球面精密磨削系统及其误差模型[J]. 制造技术与机床, 2009(1): 105-108.
WEI Chenjun, HU Dejin, YANG Xuehua, et al. Spherical precision grinding system and error modeling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(1): 105-

- 108.
- [12] 王亚霁, 孙玉利, 墨洪磊, 等. 单晶硅透镜铣磨工艺参数优化研究[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(7): 90-94.
- WANG Yaji, SUN Yuli, MO Honglei, et al. Study on the optimization of grinding process parameters of monocrystalline silicon lens[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(7): 90-94.
- [13] 陈晓磊, 刘建梅, 崔砚, 等. 航天高精度球形零件铣磨试验研究[J]. *工具技术*, 2021, 55(6): 52-56.
- CHEN Xiaolei, LIU Jianmei, CUI Yan, et al. Experimental study of mill-grinding high-precision spheroidal workpiece in aerospace[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55(6): 52-56.
- [14] 徐乐, 张春雷, 代雷, 等. 高精度非回转对称非球面加工方法研究[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 364-370.
- XU Le, ZHANG Chunlei, DAI Lei, et al. Research on manufacturing method of non-rotationally symmetrical aspheric surface with high accuracy[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 364-370.
- [15] 冯伟. 金刚石工具高效加工蓝宝石球罩基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- FENG Wei. Fundamental research on high efficiency machining of sapphire dome with diamond tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [16] 孟晓辉, 王永刚, 李文卿, 等. $\Phi 420$ mm高次非球面透镜的加工与检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 3068-3075.
- MENG Xiaohui, WANG Yonggang, LI Wenqing, et al. Fabricating and testing of $\Phi 420$ mm high-order aspheric lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3068-3075.