

大口径光学元件精密加工温差分析及控制方法

焦翔^{1,2} 朱健强¹ 樊全堂¹ 李养帅^{1,2}

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对大口径光学元件精密加工时上下表面存在温差的问题,以环形抛光系统为例,对抛光盘和工件温度特性进行了研究。在 1.6 m 环形抛光机上对工件温度进行了测定,结果表明即使在低速抛光情况下工件上下表面也会产生较大的温差。提出了合理搭配工艺参数和对工件非加工面绝热两种温差控制方法。通过采用控制变量法和工件绝热抛光法进行测温实验验证了方案的可行性,为高精度面形加工奠定了基础。

关键词 光学制造;温差控制;大口径光学元件;环形抛光;精密加工;绝热

中图分类号 TG356.28 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1116001

Temperature Difference Analysis and Control Methods in Precision Finishing of Large-Aperture Optical Component

Jiao Xiang^{1,2} Zhu Jianqiang¹ Fan Quantang¹ Li Yangshuai^{1,2}

(¹Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the problem that the large-aperture optical component exists difference in temperature between the top and the bottom surfaces in precision finishing, the temperature property of the polishing pad and the workpiece, taking the annular lapping system for example, have been investigated. Significant temperature difference between the top and the bottom surfaces of the optical component is measured even at low rotating speed polishing applying the 1.6 m annular polishing machine. Two effective methods are proposed, one is adjusting the technological parameters, the other is adiabatic polishing. The feasibility of the methods is confirmed by the temperature measurement experiments using control variable and adiabatic polishing. The proposed methods lay the foundation of precision finishing.

Key words optical fabrication; temperature difference control; large-aperture optical component; annular lapping; precision finishing; adiabatic

OCIS codes 120.6780; 140.3390; 240.5450

1 引言

高精度光学平面在现代光学与光电子学领域有重要应用^[1],温度是光学精密加工中重要的影响因素,尤其是大口径光学元件对温度极为敏感。加工过程中温差引起的工件变形通常远远超过要求的面形,严重影响加工精度^[2-3];检测时需长时间恒温,影响加工效率;不同材料的工件由于热膨胀系数不

同,同样的加工工艺得不到同样的面形,给加工带来很大不便。环形抛光技术是获得高精度平面与低粗糙度表面的重要方法,但仍会引起工件温差。采用浴法抛光(BFP)^[4-5]或通过改善环形抛光机结构与材料及加入温控系统等可改善温差。但浴法抛光有很大的局限性,对于易潮解材料或上表面不能被污染的工件不适用。而通过优化机床结构等不能从根

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-06-04

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)

作者简介: 焦翔(1987-),男,博士研究生,主要从事光学元件抛光工艺方面的研究。E-mail: ziyoudeyunduo@126.com

导师简介: 朱健强(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn

本上解决加工中的温差问题,因为只要有摩擦就有热量产生。目前温控系统一般只是控制抛光液的温度与流量,这只是影响系统温度的一个方面,单纯控制一方面不能获得很好的效果,温度还依赖很多其他因素。对于与光学加工环形抛光类似的化学机械抛光(CMP)的温度特性, Kim 等^[6-8]进行了研究,得到了关于工件温度分布、温度影响因素、温度对材料去除率的影响等一些结果。腾霖等^[9]对古典抛光中柏油盘表面温度进行了测量,得到每加一次抛光液后盘面温度上升、下降、再上升;盘面温度随压力和转速升高而升高的结论。温差引起工件变形是熟知的现象,但对大口径光学元件精密加工中常用的间歇注液环形抛光系统温差的定量分析及其控制却少有文献报道。除了浴法抛光方式外,采用其他方法同样可有效改善工件温差。本文对间歇注液式环形抛光系统的抛光盘和工件温度特性进行了研究,提出了有效的温控措施,通过实验验证了方案的可行性。

2 环形抛光中的温差问题及影响因素

2.1 环形抛光中的温差

环形抛光系统在工作时虽然温升较小,但对大口径工件精密加工不容忽视。图 1 是环形抛光系统整体散热图,校正板、工件与抛光盘摩擦产生的热量通过对流换热、抛光液蒸发引起的传质传热、抛光液升温吸热与系统与环境的辐射换热 4 种途径带走。图 2^[6-7]为环形抛光系统摩擦区传热示意图,摩擦产生的热量由校正板与工件传热、抛光盘传热及抛光液流动带走。由于系统的转动,摩擦产生的热量会以抛光盘为载体释放到空气中,盘面整体存在温

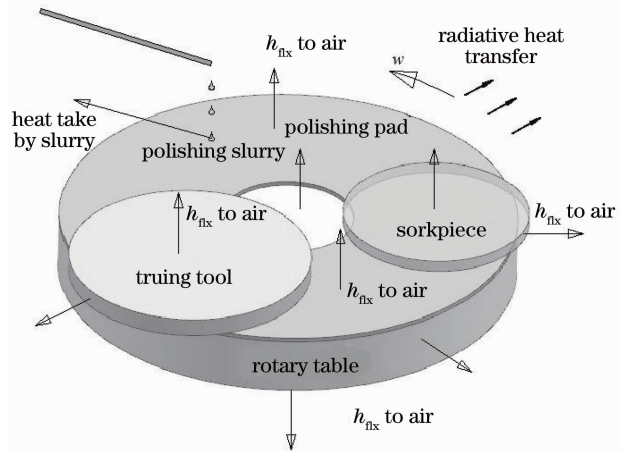


图 1 环形抛光系统散热示意图

Fig. 1 Thermal dissipation schematic representation of annular lapping system

度平均效应。

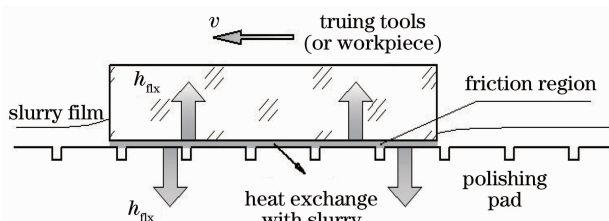


图 2 摩擦区传热示意图

Fig. 2 Schematic representation of heat transfer in friction region

由于工件上下表面热边界条件不同,加工时会产生温差,通过对 $\phi 200$ 口径光学元件环形抛光过程进行测温实验得到了验证。实验在 1.6 m 环形抛光机上进行,所用抛光材料为沥青混合料,开方形槽,转速 1.00 r/min。环境温度 20 °C,湿度 60%。抛光液为二氧化铈水基抛光液。工件为 $\phi 200$ 的 K9 玻璃,厚度 25 mm。为测量工件上下表面温差及分布,在工件一条半径上磨制了 3 个直径 2 mm 的盲孔,孔底距加工表面 0.5 mm,认为孔底温度即为被加工面温度。测温用热敏电阻(NTC)传感器,20 °C 时阻值为 100 k Ω ,使用范围是 -50 °C ~ 150 °C,实测在 18 °C ~ 28 °C 范围内,阻值变化约为 10 k Ω 。为改善系统的响应速度,选用了小直径传感器,传感器头直径约为 0.8 mm,封装类型为超薄玻璃封装。经过信号处理,分辨率可达 0.01 °C,调试后多个通道间一致性可达 0.02 °C,短期稳定性良好。

实验一在每个孔中放入一个温度传感器并与孔底紧密接触以测量加工面的温度分布,实验二将两个温度传感器分别放在一个孔的孔底与工件上表面孔口附近。将系统调到所需加工参数,温度稳定后进行长时间监测,传感器的放置与实验结果见图 3 与图 4。孔中放入传感器后填充工件材料粉末以提高测量精度。

由图 3 可知工件被加工面径向各点温差很小,并且转动中的温度波动没反映出来,其原因是: 1) 由于 200 mm 口径工件相对 1.6 m 环形抛光机很小,加工面热边界条件一致性好; 2) 由于摩擦功率小,工件的转动对温度均匀性起到了很好的效果。图 4 是工件上下表面温度,下表面为被加工面,上下表面温差达到了 0.3 °C,表明在低速抛光时,工件也会存在较大的温差。图 3 和图 4 中工件表面温度都有一定的波动,推测是环境温度波动造成的,从图 5 得到了验证。

由图 5 可知环境温度有较大的波动。图 5 结果

中测环境温度的传感器安置在抛光盘上方 0.6 m 处,其他位置温度会稍有不同,但由于工件上下面温

差引起的热变形最大,故选用抛光盘上方较高位置作为环境温度测量点。

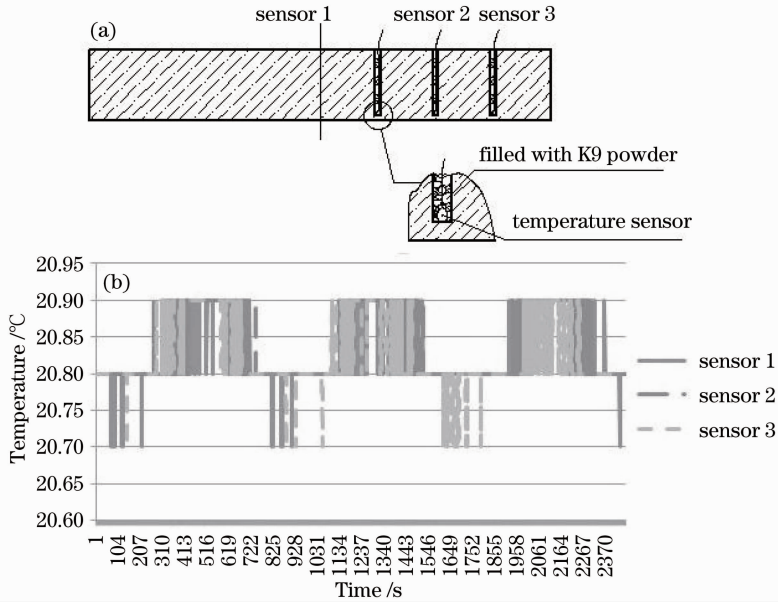


图 3 实验一传感器放置与实验结果。(a) 工件下表面传感器放置;(b) 测温结果

Fig. 3 Sensors location and experimental result in experiment one. (a) Sensors location at the bottom surface of workpiece; (b) experimental result

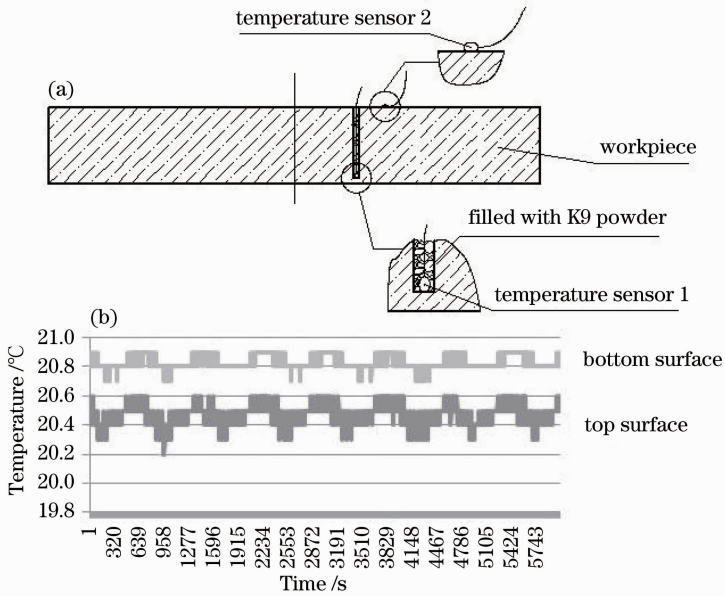


图 4 实验二传感器放置与实验结果。(a) 工件下表面传感器放置;(b) 测温结果

Fig. 4 Sensors location and experimental result in experiment two. (a) Sensors location at the bottom surface of workpiece; (b) experimental result

在较大的工作间内,环境温度的波动是不能避免的,只能设法改善,如对温控设备的进口气口位置与方向、温度传感器位置等进行优化。此实验中温度的波动不影响对工件温差的分析。环境温度的波动会反应在工件上,影响加工精度与稳定性,精密加工时要引起注意。

2.2 温差对工件面形的影响

厚度方向的温差引起球面变形,设工件直径或最大长度为 D ,厚度为 d ,热膨胀系数为 α , Δt 为下表面温度减去上表面温度,则球面变形矢高为^[2]

$$\Delta h = D^2 \alpha \Delta t / (8d), \quad (1)$$

式中 Δh 为正时对应凸球面, Δh 为负时对应凹球面。

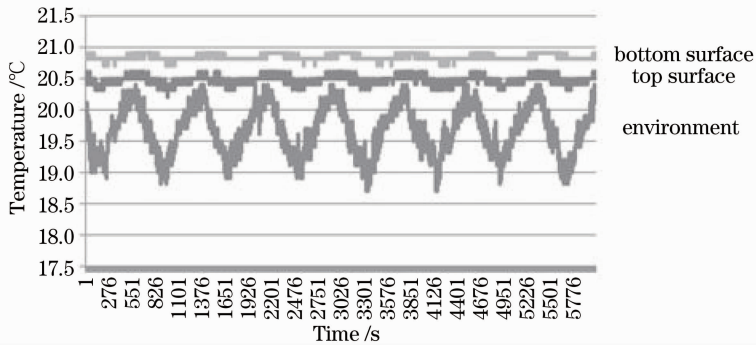


图 5 工件上下表面温度与环境温度关系

Fig. 5 Relationship of temperature of the top and bottom surfaces of the workpiece with the environment temperature

对大口径和膨胀系数大的工件进行精密抛光,热变形是必须考虑的因素,如对于直径 300 mm,厚度 40 mm 的 K9 工件,上下表面温差 0.1 °C 时,热变形为 0.27 μm,对于 0.6328 μm 波长,约为 0.43λ,而对于精密加工,很多情况下要求面形不超过 0.1λ,远小于热变形。如要求抛光过程中热变形不超过 0.1λ,对不同尺寸工件,工件上下表面温差上限列于表 1。

差,忽略抛光盘与工件接触热阻,取 K9 热膨胀系数为 $8.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,导热系数为 1.114 W/(m·°C),工件上表面与空气的自由对流换热系数为 5 W/(m²·°C),根据热阻原理计算了与工件温差上限对应的盘面和环境的温差,列于表中。表中 workpiece 指工件上下表面温差,pad 指盘面与环境之间温差,单位都为 °C。

由表 1 数据可知,大而薄的工件比小而厚的工件对温差更敏感,工件越大越薄对盘面的温度要求越高。加工大口径光学元件温度是必须考虑的因素。

控制工件温差的实质是控制盘面与环境之间的温

表 1 不同尺寸 K9 工件热变形对应的上下表面温差及盘面-环境温差

Table 1 Deformation temperature for varisized K9 workpieces and the temperature difference between the polishing pad surface and environment

Diameter /m		0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
0.02	Workpiece /°C	0.122	0.054	0.030	0.02	0.014	0.010	0.008
	Pad /°C	1.481	0.658	0.370	0.237	0.165	0.121	0.093
0.03	Workpiece /°C	0.183	0.081	0.046	0.029	0.020	0.015	0.011
	Pad /°C	1.542	0.685	0.385	0.247	0.171	0.126	0.096
0.04	Workpiece /°C	0.244	0.108	0.061	0.039	0.027	0.020	0.015
	Pak /°C	1.603	0.712	0.401	0.256	0.178	0.131	0.100
0.05	Workpiece /°C	0.305	0.136	0.076	0.049	0.034	0.025	0.019
	Pad /°C	1.664	0.740	0.416	0.266	0.185	0.136	0.104
0.06	Workpiece /°C	0.366	0.163	0.091	0.059	0.041	0.030	0.023
	Pad /°C	1.725	0.767	0.431	0.276	0.192	0.141	0.108
0.07	Workpiece /°C	0.427	0.190	0.107	0.068	0.047	0.035	0.027
	Pad /°C	1.786	0.794	0.446	0.286	0.198	0.146	0.112
0.08	Workpiece /°C	0.488	0.217	0.122	0.078	0.054	0.040	0.030
	Pad /°C	1.847	0.821	0.462	0.295	0.205	0.151	0.115

2.3 工件温差的影响因素分析

工件温差的影响因素很多,凡是影响盘面温度的都会影响工件,如工件、校正板以及抛光盘的材料和尺寸;抛光液是否含有添加剂^[10];抛光液温度、注液方式和注液量;工件是否加载;系统转速、盘面开槽方式、环境温湿度等几乎所有工艺参数都能影响系统温度,但总起来可归为两类:1)影响摩擦生热功率;2)影响传质传热功率。环形抛光系统存在两个

热源:摩擦生热热源和传质散热热源,称其为热源是因为在系统温度等于环境温度时仍存在热流。两个热源共同决定了系统与环境的温度关系,同时决定了工件的温差。其他传热过程如抛光液与盘面的换热、系统表面与空气的对流换热、辐射换热等认为是补偿了两个热源之间的功率差异而使系统温度达到稳定。凡是影响两个热源的因素都会影响系统温度。如在抛光液中添加润滑剂与抛光盘硬度^[11]大

小会影响摩擦系数,从而直接影响摩擦生热功率;而环境温湿度影响蒸发散热量,对盘面温度及工件温差有很大的影响。

3 改善工件温差的方法

3.1 浴法抛光

将抛光盘与工件整体浸没在抛光液中即为浴法抛光。浴法抛光的出现是为了获得更好的平面度与更低粗糙度^[4],但同时获得了更好的温度稳定性与均匀性。文献[5]研究了浴法抛光中抛光液的温度变化,结果表明抛光液温度比环境温度稳定得多。摩擦产生的热量迅速散失到抛光液中使盘面及工件的温度均匀性更好^[12]。但浴法抛光使操作难度增大,成本增高,另外浴法抛光有很大的局限性,如对易潮解材料、工件上表面已加工好或镀好膜等,该方法会造成工件的损坏或污染。

3.2 添加润滑剂

添加润滑剂可降低摩擦系数,在化学机械抛光和高速抛光中会用到,在高速抛光时不至于使温度过高。但对于光学元件的最终抛光,通常不会使用润滑剂。其原因是:1)精密加工不会将转速调得过高,这会引起抛光液的大量流失,精密加工难点不是材料去除率,而是面形和表面缺陷的控制;2)润滑剂可能对元件和抛光材料有影响。

3.3 合理搭配工艺参数

为改善工件上下表面温差,容易控制的工艺参数包括抛光液温度、是否添加润滑剂、注液量多少、工件加载量、转速和环境温湿度等。其中调节转速简单有效。

对直径 650 mm 的大口径光学元件环形抛光过程进行测温实验,分析各参数对抛光温度的影响。实验在 1.6 m 环形抛光机上进行,所用具体参数见表 2。同时对此环形抛光系统进行有限元分析^[13]增加结论的可靠性。图 6 是有限元网格划分及边界条件,为简化计算,将摩擦生热和传质传热简化为热流密度直接加载到了盘面上,只计算了盘面温度。得到盘面温度后结合环境温度很容易确定工件温差。盘面温度与环境温度越接近,工件上下表面温差越小。图 6 中, W_{pa} 为传质传热与空气对流换热之和, W_{fcp} 与 W_{fwp} 分别为与校正板工件摩擦传给盘面的摩擦热流,对应的区域以抛光盘转速 ω 绕抛光盘轴线顺时针旋转。 h_b 与 h_t 分别为转台下表面与侧面与空气的对流换热系数, t 为系统表面温度, t_a 为环境温度。对于间歇注液式抛光系统,通过抛光液流失带走的热量相对蒸发散热可忽略。分别计算了 0.75、1.00、1.25 r/min 三种转速下盘面温度。环境温度(t_a)21 °C、相对湿度(RH)60%。

表 2 实验用参数

Table 2 Parameters for experiments

	Outside diameter /mm	Inside diameter /mm	Thickness /mm	Material	Density /(kg/m^3)	Heat conductivity / $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})]$	Specific heat / $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{C})]$
Polishing pad	1600	460	10	Pitch	1800	0.699	1670
Rotary table	1600	—	200	Moorstone	3070	3.49	920
Truing tool	850	—	65	Moorstone	3070	3.49	920
Workpiece	650	—	40	Glass	2500	0.76	837

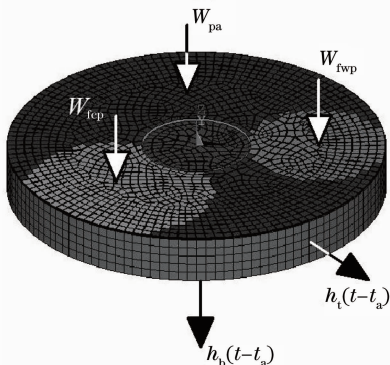


图 6 有限元模型及边界条件

Fig. 6 Finite-element model and boundary conditions

校正板和工件与抛光盘的摩擦系数均为 0.4;上表面及侧面与空气的对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$,下表面与空气的对流换热系数为 $2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$;工件中心与校正板中心对抛光盘中心的张角为 131° ;抛光液蒸发能力作为水考虑,蒸发散热量计算参考文献[14]。

图 7 是 0.75、1.00、1.25 r/min 三种转速下的有限元计算结果,图中单位为 $^\circ\text{C}$ 。结果表明转速越高,盘面温度越高。图 8 是环带中心处工件后方紧靠工件边缘的温度与转速的关系,图中两条曲线分别代表实验结果与有限元结果。有限元结果与实验结果存在一定的差异:1)因为有限元计算存在一定

的偏差; 2) 因为实际边界条件极为复杂, 模拟中不可能和实验情况完全一致。实验结果中转速对温度

的影响规律与有限元分析一致, 这种影响规律应重点关注。

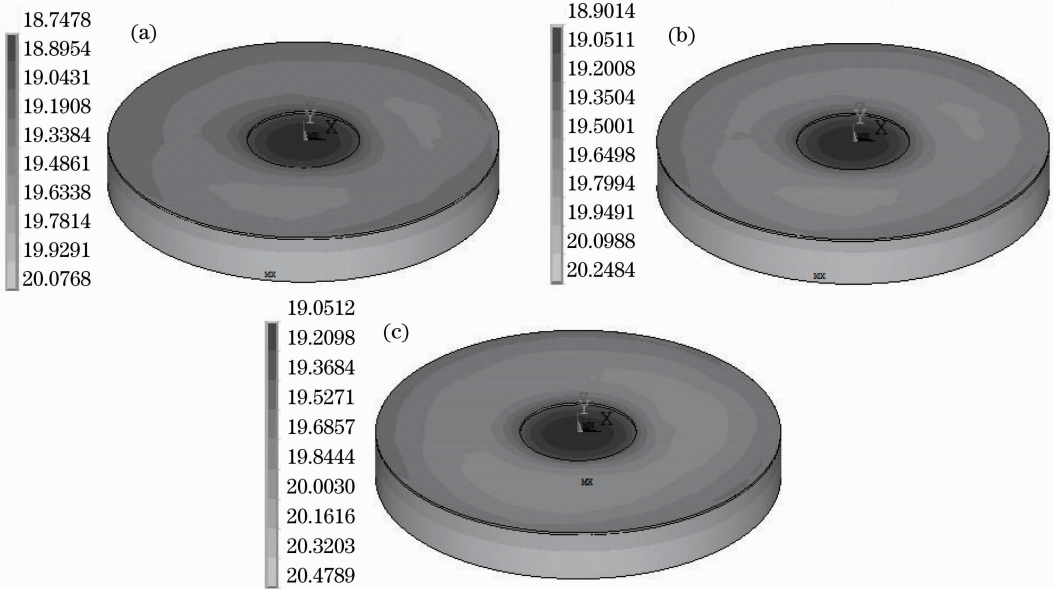


图 7 环境 21 °C 计算结果。(a) 转速 0.75 r/min; (b) 转速 1.00 r/min; (c) 转速 1.25 r/min

Fig. 7 Computed result in environment 21 °C. (a) Rotate speed 0.75 r/min; (b) rotate speed 1.00 r/min; (c) rotate speed 1.25 r/min

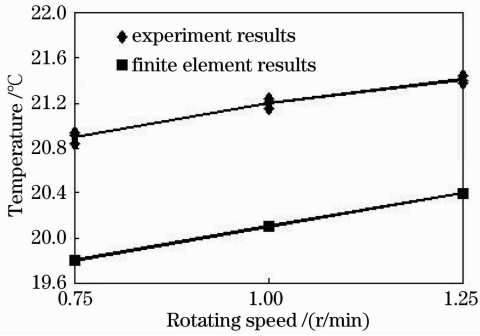


图 8 盘面温度与转速的关系, 实验结果和有限元结果, 环境 21 °C、RH 60%

Fig. 8 Relationship between temperature and rotate speed, results of finite element and experiment, environment 21 °C and RH 60%

根据图 8 所示实验结果, 通过调节转速可以使盘面温度等于环境温度, 从而使工件上下表面温差达到最小。实验中最佳转速在 0.84 r/min 左右, 此时工件热变形最小。

即使转速、环境温度等参数不变, 也会出现面形突然变化的情况, 原因是湿度发生了变化。同样, 在单纯改变环境温度时, 也会改变系统与环境温度差, 而不是系统温度与环境温度保持一致。环带中心处工件后方紧靠工件边缘的温度与环境温湿度的关系见图 9 与图 10。图 9 是实际温度, 图 10 是盘面与环境的温差。实验结果与计算结果存在偏差是不能避

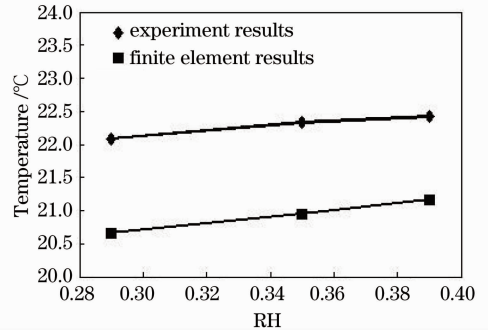


图 9 盘面温度与环境相对湿度的关系, 实验结果和有限元结果, 环境 23.5 °C、转速 1.00 r/min

Fig. 9 Relationship between temperature and relative humidity, results of finite element and experiment, environment 23.5 °C and rotate speed 1.00 r/min

免的, 原因如前所述, 所以此处重点关注各参数对抛光温度的影响规律, 即关注两曲线斜率, 由图 9 和图 10 可见斜率较吻合。将改变转速、环境湿度和环境温度进行有限元分析 (FEM) 与测温实验的结果总结于表 3, 表中有限元计算温升与实验温升是指改变条件后引起的盘面温升的变化量。t₀ 指环境温度, n 代表转速。

由表 3 数据可见, 转速越高、环境湿度越大, 盘面温度越高; 环境温度升高, 盘面温度相对环境温度有所下降。根据抛光材料、检测室温度等, 抛光一般存在最佳工作温度, 所以工作温度选定后, 转速、环

境湿度等各加工参数合理搭配才能使工件温差达到量面形。最小,环境温湿度稳定才能稳定高效的加工出高质

表 3 改变条件引起的温度变化

Table 3 Temperature rise while changing conditions

Conditions	Temperature rise of FEM / °C	Temperature rise of experiment / °C
$t_a = 21.0\text{ }^\circ\text{C}$, RH $\sim 60\%$, n rise from 0.75 r/min to 1.25 r/min	0.55	0.5~0.6
$t_a = 23.5\text{ }^\circ\text{C}$, $n = 0.75\text{ r/min}$, RH rise from 29% to 39%	0.52	0.33
$n = 1.00\text{ r/min}$, RH $\sim 35\%$, t_a rise from 21.0 °C to 23.5 °C	-0.43	-0.30

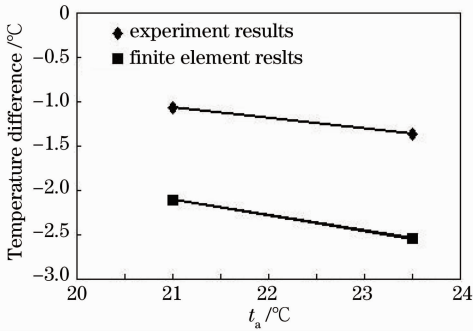


图 10 盘面-环境温差与环境温度的关系,实验结果和有限元结果,环境 0.35 °C、转速 1.00 r/min

Fig. 10 Relationship between temperature difference and environment temperature, results of finite element and experiment, environment 0.35 °C and rotate speed 1.00 r/min

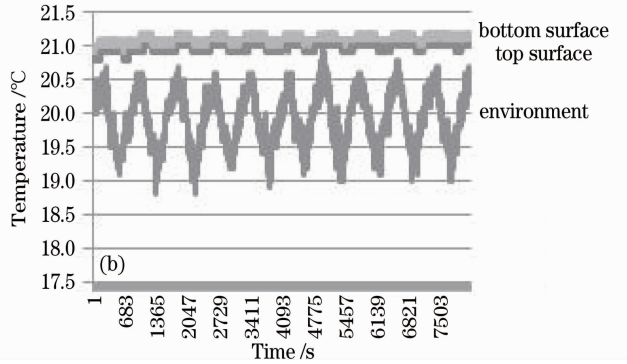
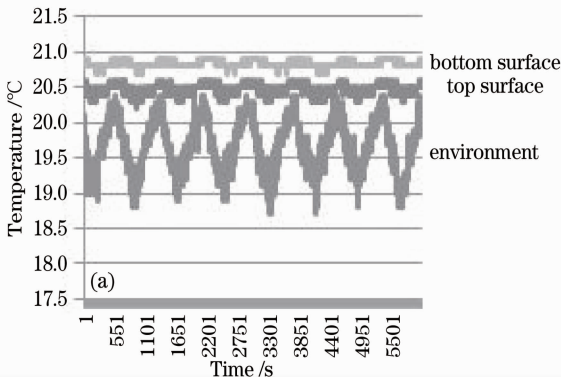


图 11 工件(a)绝热前与(b)绝热后加工温度对比

Fig. 11 Temperature comparison (a) before and (b) after thermal insulation of the workpiece

4 结 论

抛光时工件存在温差,对大口径光学元件精密加工必须考虑,其中工件越大越薄对温度越敏感。温差影响因素很多,其中如转速、环境温湿度等参数影响显著并方便调控,合理搭配各种工艺参数可有效改善系统温差。

通过测温实验发现,环形抛光机盘面温度对转速和环境温湿度很敏感,在一定范围内,盘面温度随

3.4 对工件非加工面绝热

加工大口径光学元件对温度的要求很严格,为放宽对工艺参数及环境条件的要求,经过理论分析,提出对工件绝热抛光的方法:对工件上表面和侧面绝热可明显降低工件温差。原因是对工件绝热后工件内部大部分区域不存在热流,这时摩擦产生的热量完全通过抛光盘带走而不会进入工件内部。对 $\phi 200$ 的 K9 工件进行绝热抛光实验验证绝热的效果。图 11 是实验结果,图 11(a)为未对工件绝热实测温度,工件上下表面温差为 0.3 °C,图 11(b)为对工件侧面和上表面进行绝热后的结果,上下表面温差降为 0.1 °C。其他实验参数同 1.1 节所述。通过对工件绝热减小工件温差,以消除热变形和热应力等,将使加工精度大大提高。

转速与环境湿度线性上升;环境温度升高时,盘面相对环境温度下降。通过有限元模拟得出了同样结论。在转速与环境温湿度搭配合理的情况下,工件下方盘面的平均温度等于环境温度,使工件温差达到最小,如实验中转速为 0.84 r/min、环境温度为 21.0 °C 和相对湿度为 60% 条件下,工件下方盘面的平均温度等于环境温度,使工件变形最小。

加工大尺寸工件对转速与环境温湿度有严格要

求。但通过理论分析及实验得出,通过给工件非加工面绝热可大大减小工件温差,从而放宽对各种影响因素的要求。

参 考 文 献

- 1 Gao Honggang, Cao Jianlin, Zhu Yong, *et al.*. The development and application of ultra-smooth surfaces[J]. *Physics*, 2000, 29(10): 610—614.
高宏刚,曹健林,朱 镛,等. 超光滑表面及其制造技术的发展[J]. *物理*, 2000, 29(10): 610—614.
- 2 Cooke F, Brown N, Prochnow E. Annular lapping of precision optical flatware[J]. *Opt Eng*, 1976, 15(5): 407—415.
- 3 A D Malyarenko. Influence of the temperature of the processing medium on the figuring accuracy and the throughput of the polishing of optical surfaces[J]. *J Opt Technol*, 2000, 67(1): 72—75.
- 4 Ralph W Dietz, Jean M Bennett. Bowl feed technique for producing supersmooth optical surfaces[J]. *Appl Opt*, 1966, 5(5): 881—882.
- 5 Zhenxiang Shen, Bin Ma, Zhanshan Wang, *et al.*. Fabrication of flat and supersmooth surfaces with bowl-feed polishing process [C]. *SPIE*, 2007, 6722: 67220U.
- 6 H J Kim, H Y Kim, H D Jeong, *et al.*. Friction and thermal phenomena in chemical mechanical polishing [J]. *J Materials Processing Technology*, 2002, 130—131: 334—338.
- 7 Len Borucki, Leslie Charns, Ara Philipossian. Analysis of frictional heating of grooved and flat CMP polishing pads[J]. *J Electrochemical Society*, 2004, 151(12): G809—G813.
- 8 C J Evans, E Paul, D Dornfeld, *et al.*. Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, 52(2): 611—633.
- 9 Teng Lin, Zhang Guangliang, Ren Jingxin. Optical pitch polishing surface temperature distribution regulation [J]. *Aviation Engineering & Maintenance*, 1994, 2: 14—16.
腾 霖,张广良,任敬心. 柏油盘光学抛光表面温度分布规律[J]. *航空制造工程*, 1994, 2: 14—16.
- 10 Ioan D Marinescu, Eckart Uhlmann, Toshiro K Doi. Handbook of Lapping and Polishing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006. 370—396.
- 11 Ren Jingxin, Teng Lin, Shi Xingkuan, *et al.*. Applied forces influence on optical glass surface quality[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1997, 33(2): 1—4.
任敬心,腾 霖,史兴宽,等. 抛光力对光学玻璃表面抛光质量的影响[J]. *航空精密制造技术*, 1997, 33(2): 1—4.
- 12 Gao Honggang, Chen Bin, Cao Jianlin. Fabricating technology for supersmooth surfaces[J]. *Optics And Precision Engineering*, 1995, 3(4): 7—14.
高宏刚,陈 斌,曹健林. 超光滑光学表面加工技术[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(4): 7—14.
- 13 Kong Xiangqian. Finite Element Method Used in Heat Transfer Theory (The Third Edition)[M]. Beijing: China Science Press, 1998.
孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 14 Chen Huiquan, Mao Limin. Calculation and verification of an universal water surface evaporation coefficient formula [J]. *Advances in Water Science*, 1995, 6(2): 116—120.
陈惠泉,毛利民. 水面蒸发系数全国通用公式的验证[J]. *水科学进展*, 1995, 6(2): 116—120.

栏目编辑: 韩 峰