

计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响*

戴一帆,尚文锦,周旭升

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要 研究了计算机控制小工具抛光(CCOP)加工中三种常用的磨盘材料对去除函数特性的影响,进一步完善材料去除模型,用以指导光学零件的加工。利用自行研制的 AOCMT 光学加工机床及接触式测量系统进行实验和分析。从去除函数形状、去除效率及稳定性、表面形貌三个方面进行了研究。实验结果表明:聚氨酯材料适用于粗抛光阶段,阻尼布材料适用于精抛光阶段,沥青材料适用于最后的修形加工和表面处理。

关键词 CCOP;去除函数;聚氨酯;阻尼布;沥青

中图分类号:TH161+.1;TG580.692 文献标识码:A

Effect of the Material of a Small Tool to the Removal Function in Computer Control Optical Polishing

DAI Yi-fan, SHANG Wen-Jin, ZHOU Xu-sheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The effect of the three kinds of material on the removal function is studied. The considering properties of the removal function include the removal profile, the removal rate, the stability of the removal function and the surface topography. A series of experiments have been done to the perfect properties of the removal function. The experiments were done on the AOCMT machine tool and the contact measurement system developed by ourselves. The results were presented as follows. Polyurethane is used in the step of the rough polish. Polishing cloth is used in the step of the finishing polish. Polishing pitch(55# polishing pitch by GuGolz Corporation) is used in the step of the surface treatment or the finishing polish.

Key words CCOP; the removal function; polyurethane; polishing cloth; polishing pitch

计算机控制小工具抛光技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一项新型光学加工技术。在大口径、高精度非球面(特别是离轴非球面)的加工中,这项技术有着非常重要的作用和地位,在国防军事、航天等领域有着广泛的应用前景。

计算机控制小工具抛光技术是基于 Preston 方程和 R. A. Jones 提出的利用卷积迭代法计算小工具驻留时间的模型建立起来的。通过计算机控制抛光模运动,经过一个或几个加工周期后,实现零件表面材料的去除。本文从去除函数形状、去除效率及其稳定性、表面形貌三个方面,研究了三种磨盘材料对去除函数特性的影响,用以指导光学零件的加工。

1 基本理论^[4]

Preston 假设指出,在很大的数值范围内,抛光可以描述成一个线性方程

$$\frac{dz}{dt} = KVP \quad (1)$$

式中, dz 表示表面某一点(x, y)的去除量, K 为比例常数,它由除速度和压力以外的所有因素决定; V 为表面某一点(x, y)在瞬时 t 的抛光速度, $V = V(x, y, t)$; P 为抛光压力,是关于位置坐标(x, y)和瞬时 t 的函数值, $P = P(x, y, t)$ 。

* 收稿日期 2005 - 11 - 08

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50375156)

作者简介 戴一帆(1966—),男,教授,博士。

在这个假设中, Preston 将速度和压力以外的一切因素的作用全部归为一个比例常数 K , 这样就建立了材料去除量、压力和瞬时速度的线性关系。

R. A. Jones 提出的利用卷积迭代法计算小工具驻留时间的模型将材料去除量、去除函数、驻留时间和路径规划描述为表面材料去除量是去除函数和驻留时间函数的卷积^[1], 也就是

$$\Delta Z(x, y) = R(x, y) ** D(x, y) \tag{2}$$

式中, $**$ 表示二维卷积; $\Delta Z(x, y)$ 表示 (x, y) 点处材料去除量; $R(x, y)$ 为去除函数; $D(x, y)$ 为驻留时间函数。

由此可知, 抛光模的去除函数 $R(x, y)$ 是计算机控制小工具抛光的基础, 但是由于光学抛光是一个非常复杂的受诸多因素影响的加工过程, 通过理论计算建立起来的材料去除模型往往与实际情况不符合, 通常是通过许多实验予以补充和完善。

2 实验设计与结果分析

2.1 实验装置

实验装置为自行研制的 AOCMT 光学加工机床, 采用双转子行星运动方式。该双转子机构可以按照需要调节转速比、偏心率以及抛光压力^[2-3], 如图 1 所示。

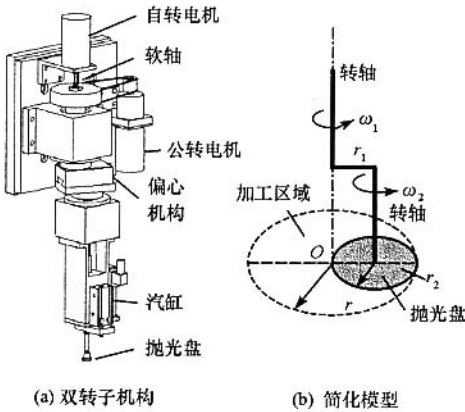
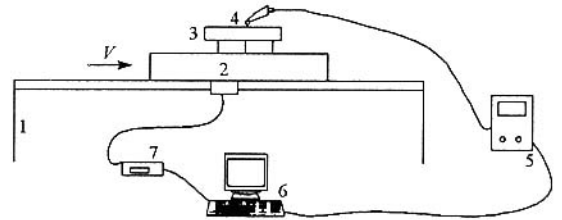


图 1 双转子机构及其简化模型

Fig.1 Simple model of two-spool mechanism



1. 气浮导轨 2. 滑块 3. 工件 4. 测头
5. 电感测微仪 6. 计算机 7. 磁栅

图 2 检测设备

Fig.2 Measuring system

2.2 检测设备

检测设备为西德电感测微仪, 分辨率为 $0.01\mu\text{m}$, 精度可以达到 $0.2\mu\text{m}$, 使用旁向测头接触式测量。测量装置如图 2 所示。试验用气浮导轨固定使用段长度为 100mm , 直线度可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 。使用计算机等距离采数, 采数间距由光栅设置, 本次试验的采数间距为 $100\mu\text{m}$ 。

2.3 抛光实验

采用行星运动方式, 被抛光材料为 K9 玻璃, 经精密精磨抛光机研磨过, 平面度小于 $0.5\mu\text{m}$; 抛光盘直径为 $\phi 25\text{mm}$; 抛光盘衬底材料为铸铁, 抛光液采用日本 H-3 抛光粉配制成的水溶液, 固液比约为 $1:8$; 抛光压力由一个电气阀控制, 可以保持抛光盘和被抛光面的压力恒定, 平均压强为 0.3MPa ; 自转速度为 70r/min 。三种磨盘材料分别为聚氨酯、阻尼布、沥青 (GuGolz 公司生产的 55 # polishing pitch)。

根据 Preston 假设理论, 建立去除函数的理论方程^[5]

$$R(r) = \frac{KPr_2\omega_1}{2\pi} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} [g^2(1+n)^2 + n^2e^2 - 2gne(1+n)\cos\theta]^{\frac{1}{2}} d\theta, \quad r \in [0, r_1 + r_2] \tag{3}$$

其中, r_1 为公转半径, r_2 为磨盘半径; ω_1 为磨盘公转角速度, ω_2 为磨盘自转角速度, 令 $e = \frac{r_1}{r_2}$, $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, $g = \frac{r}{r_2}$, θ_0 的取值如下:

当 $r_1 \leq r_2$ 且 $r \leq r_2 - r_1$, 即 $e \leq 1$ 且 $g \leq 1 - e$ 时, $\theta_0 = \pi$;

当 $r_1 > r_2$ 且 $r < r_1 - r_2$, 即 $e > 1$ 且 $g < e - 1$ 时, $\theta_0 = 0$;

其它情况时, $\theta_0 = \arccos\left(\frac{e^2 + g^2 - 1}{2ge}\right)$ 。

通过理论仿真计算,得到在行星运动方式下的优化的结构参数:自转与公转的转速比 $n = -0.68$ (负号表示自转与公转的方向相反),行星运动的偏心率 $e = 0.8$ 。该组参数既有较好的去除函数形状,又有较高的去除效率,因此实验中均采用此结构参数^[5],所有的实验结果均与该去除函数比较。

2.4 实验结果分析

2.4.1 磨盘材料对去除函数形状的影响

分别以三种材料为磨盘在 K9 玻璃上做定点抛光,抛光时间 $t = 10\text{min}$ 。对测量所得去除函数作归一化处理,得去除函数形状如图 3 所示。

由上述三种磨盘材料进行抛光的实验数据曲线可以看出:

沥青盘抛光所得的去除函数与理论曲线最为吻合。

阻尼布抛光所得的去除函数与理论曲线在中心处较为吻合,但在边缘有较大的差别。

聚氨酯盘抛光所得去除函数和理论曲线完全不同,其去除函数较为接近理想的高斯分布函数。

产生这种现象的主要原因是聚氨酯的硬度大。在加工中其起到了低通滤波器的作用,抑制了理论曲线中某些变化较为剧烈的点。比较三种材料的硬度(聚氨酯 > 阻尼布 > 沥青),我们也可以解释图 3 中三条曲线与理论曲线的近似程度(聚氨酯 < 阻尼布 < 沥青)。

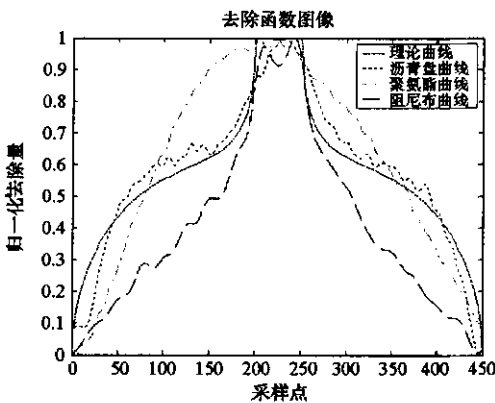


图 3 去除函数特性曲线

Fig.3 The removal profile

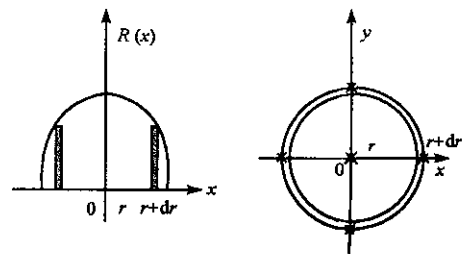


图 4 体积计算微元

Fig.4 Volume differential

2.4.2 磨盘材料对去除效率及其稳定性的影响

去除效率为体积效率,单位时间去除的材料体积越大,就认为去除效率越高。

设不作移动的抛光模抛光一个周期 T 所去除材料的总体积为 V ,由于去除函数的旋转对称性,因此可以取如图 4 所示的体积微元。

设环形面积为 S_h ,那么

$$S_h = \pi(r + dr)^2 - \pi r^2 \quad (4)$$

运用微元法由式(3)(4)可得

$$V = \int_0^{(1+e)r_2} 2\pi R(r) r dr \quad (5)$$

定义平均体积去除效率为 η ,则有

$$\eta = \frac{V}{T} = \frac{2\pi}{T} \int_0^{(1+e)r_2} R(r) r dr \quad (6)$$

实验设计以 10min 为一个采样点,研究三种磨盘材料对去除率-时间关系曲线的影响。如图 5 所示,由三种磨盘材料实验数据曲线可以看出:

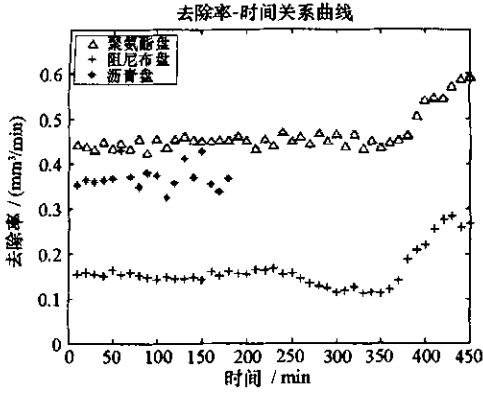


图5 去除率—时间曲线
Fig.5 Removal rate-time

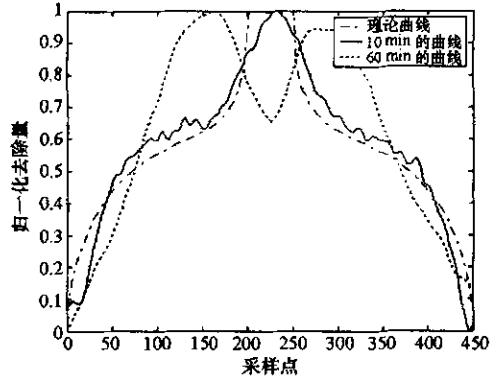


图6 沥青盘去除函数的畸变
Fig.6 Change chart of pitch removal profile

阻尼布盘的去除率最低,在前 250min 内其具有良好的稳定性,平均值为 $0.152 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。在 260 – 370min,由于盘的磨损,其去除率进一步降低,平均值为 $0.114 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。在 380min 以后,去除率逐渐增大。这是因为随着材料的磨损,材料层变薄,而基底材料是铸铁,增加了材料的硬度,从而使去除率进一步增大。

聚氨酯盘的去除率最高,在前 390min 内,其具有良好的稳定性,平均值为 $0.445 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。在 400min 以后,去除率逐渐增大。其成因类似于阻尼布材料。而聚氨酯盘没有出现因磨损而使去除率衰减的现象,可能与我们选取的聚氨酯材料的厚度和其较好的弹性有关。

沥青盘的去除量居中,在前 50min 内,去除率的平均值为 $0.361 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。这是因为尽管其硬度低,但其与面形吻合好,两种作用的综合结果使沥青的去除效率比阻尼布的高,但是其去除函数的稳定性较差。第 60min 时,其去除函数的形状发生了畸变,如图 6 所示。这是因为沥青材料的流动性好,热塑性强。在加工过程中,由摩擦导致加工表面温度升高,软化了沥青材料,加剧了盘的磨损。同时由于盘中心处磨料的堆积作用,磨料大量嵌入沥青盘的中心地带,改变了沥青盘中心的材质,使中心材质硬化。图 7 显示了沥青盘中心处的堆积效应。

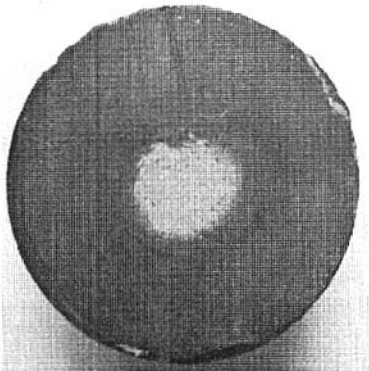


图7 沥青盘的堆积和磨损
Fig.7 The stack and the wearing of polishing pitch

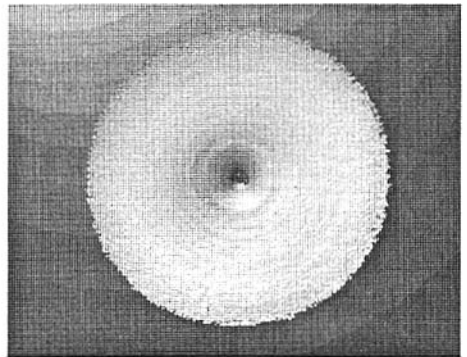


图8 聚氨酯 3D 形貌
Fig.8 The 3D pattern of polyurethane

2.4.3 磨盘材料对表面形貌的影响

在大量实验的基础上,观察三种磨盘材料在玻璃表面形成的纹理。宏观上看,被抛光表面都很光亮,但是在灯下观察,可以看到很多纹理,而且不同材料的纹理也不同。

观察阻尼布盘定点抛光 10min 后的圆形区域,可以看到很多菊花瓣状的纹理。纹理的弯曲方向与加工时公转轴的转向一致,纹理的轮廓与自转盘的轮廓一致。实验表明,这种纹理是由自转和公转合成运动的周期性造成的,随着转速比的提高,瓣状带变细,变得更加稠密,使得纹理的明显程度减弱。

观察聚氨酯盘定点抛光 10min 后的圆形区域,可以看到很多环状的纹理。图 8 是采用波面干涉仪

对聚氨酯盘定点抛光 10min 后的效果图。实验表明,这种纹理是由加工初期聚氨酯的表面较为粗糙引起的。随着聚氨酯盘的磨损,这种纹理的明显程度减弱。

在对沥青材料的大量实验中,发现沥青对表面的纹理有很强的弱化作用。其加工所得的表面光滑,无明显纹理。这可能与沥青材料的流动性、热塑性好有关。

3 结论

(1) 聚氨酯材料具有较高的去除效率,其去除函数接近理想的高斯分布函数,具有良好的稳定性,但其与面形的吻合程度差,加工后表面有纹理。因此,聚氨酯材料适用于粗抛光阶段。

(2) 阻尼布材料具有良好的稳定性,但其去除率低且加工后表面有纹理。因此,阻尼布材料适用于精抛光阶段。

(3) 沥青材料具有较高的去除效率,加工后表面质量好,但稳定性差。因此,沥青材料适用于最后的修形加工。

参考文献:

- [1] 王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001.
- [2] 王贵林. SiC 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002.
- [3] Li S Y, Wang G L, Dai Y F, et al. The Determination for Polishing Tool's Dimension in Aspheric Optics Machining[A]. ICPN '2002[C]. National University of Defense Technology Press, 2002 (in Chinese).
- [4] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001: 48-50.
- [5] 李爱民. 计算机控制小工具研抛的去除特性及工艺研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003.

(上接第 96 页)

5 结论

针对国家探月需求,提出了主动自适应悬架机器人的概念,设计了一种概念样机,对其主动配置理论与方法进行了初步研究,主动自适应悬架机器人结合了自适应悬架系统和主动悬架系统二者的优点,克服了主动悬架机器人控制复杂、可靠性降低的不足,具有良好的牵引特性、行驶平顺性和抗倾覆特性,其综合移动性能得到提高。

参考文献:

- [1] Matijevic J, Shirley D. The Mission and Operation of the Mars Path Finder Micro Rover[A]. IFAC 13th Triennial World Congress[C], 1996: 1-6.
- [2] Hayati S, Volpe R, Backes P, et al. The Rocky 7 Rover: A Mars Science Craft Prototype[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], 1997: 2485-2464.
- [3] Volpe R, Balamam J, Ohm T, et al. Rocky 7: A Next Generation Mars Rover Prototype[J]. Advanced Robotics, 1997, 11(4): 341-358.
- [4] Koshiyama A, Yamafuji K. Design and Control of an All-direction Steering Type Mobile Robo[J]. The International Journal of Robotics Research, 1993, 12(5): 411-419.
- [5] Yoji K, Koji K, Kazuaki N, et al. Low Power Mobility System for Micro Planetary Rover 'Micro5' [A]. In: Michael Perryed. ISAIRAS '99: Fifth International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space[C], ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1999.
- [6] Rollins E, Luntz J, Foessel A, et al. Nomad: A Demonstration of the Trans Forming Chassis[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], 1998: 611-617.

