

对称曲面仿形抛光机构关键控制方法

牛秦华,淮文博,王旭辉,南倩

(西安理工大学 国家级工程训练实验示范教学中心,陕西 西安 710048)

摘要:针对对称曲面结构体面复杂、型面信息读取困难、抛光力难以精准控制等问题,设计一种对称结构仿形抛光装置。该装置可通过调整施加在活塞模块上的载荷来控制抛光力,采用倒“Y”形的“活塞-连杆-滚轮-导轨”结构实现对称结构仿形抛光;建立切除量数学模型;分析施加载荷、抛光砂带线速度与材料切除量的变化规律;提出采用速度驻留模式来控制进给速度及抛光力。抛光试验结果表明,该装置能获得合格的抛光质量,所设计机构及所建模型是可靠的。

关键词:对称曲面;仿形抛光装置;材料切除;表面粗糙度

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0041-03

Pivotal Control Method of Copying Polishing Mechanism for Symmetrical Structure

NIU Qinhu, HUAI Wenbo, WANG Xuhui, NAN Qian

(National Experimental Demonstration Teaching Center for Engineering Training,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A copying and polishing device for symmetrical structure was designed to solve the defects of complex symmetrical surface whose information is difficult to read and polishing force hard to control accurately. To achieve the copying polishing of symmetrical structure, polishing force was controlled by adjusting the load applied to the piston module and the “iston-connecting rod-idler wheel-guide raid” structure inverted in the shape of Y was adopted. The mathematical model of the material removal was established. The change rule of applied load, linear velocity of polishing abrasive belt and material removal were analyzed. The velocity resident mode to control feed speed and polishing force was put forward. The polishing experiment results indicate that the device can achieve qualified polishing quality, and the mechanism and model prove reliable.

Keywords: symmetric curve surface; copying and polishing device; material removal; surface roughness

0 引言

型面复杂的对称体产品被广泛应用于模具、工具、能源、交通、航空航天、航海等领域^[1]。合格的表面完整性则有利于提高其机械强度、抗腐蚀性、抗疲劳性,延长产品使用寿命^[2]。因此,对型面复杂的对称体表面完整性要求很高^[3],而表面抛光作为最后一道工序对其有重要的影响。如何控制各工艺参数是实现工件表面残留高度快速均匀地被切除、提高工件表面质量的关键^[4]。

对称曲面结构体面曲率变化大,型面信息读取和抛光力精准控制难度大,一般需采用多轴联动抛光机床,需编写复杂的抛光轨迹程序^[5]。人工抛光效率低下、表面质量及一致性不稳定,而且环境恶劣,对人体危害大,还需要工人具有熟练的技术和丰富的经验^[6]。机械抛光对于结构形状复杂,或有拐角、空洞的工件干涉大,无法进行正常抛光^[7]。化学抛光中抛光液的配制及其污染是很大的问题,而且其抛光表面质量及一致性较差^[8]。化学机械抛光中材料切除率的影响因素是相互协调的,不易于通过

单一因素的改变来控制材料切除量^[9]。磁研磨抛光效率低,磨料制作成本高、寿命低^[10]。超声波抛光得到的工件表面质量及精度较差,很难加工曲面复杂的对称工件^[11]。化学气相沉积速率较低,参加沉积的反应源和反应后的余气易燃易爆或有毒,需采用环境保护措施^[12]。抛光机器人柔性好,但刚度弱、精度差,且示教调试过程复杂、成本高^[13]。

本文针对型面复杂的对称体类零件表面抛光,设计了一种仿形抛光装置;分析了仿形抛光装置的工作原理;建立了材料切除量数学模型;提出了抛光力控制方法;最后通过抛光试验证明了该装置的可靠性。

1 仿形抛光装置工作原理

对称结构仿形抛光装置的结构组成如图1所示。该机构由套筒模块、活塞模块、支架轨、连杆、抛光箱体、滚轮组、抛光砂带、抛光轮、砂带传动模块、抛光电机、轴承、引导箱体、引导轮、电源和内部电路组成。工作时,装置通过套筒模块上的法兰盘固定在至少可实现三轴运动的驱动

基金项目:国家级大学生创新创业训练项目(251051906)

第一作者简介:牛秦华(1999—),女,陕西宝鸡人,本科,研究方向为复杂曲面抛光技术。

设备上,在活塞模块处外接液压系统调整载荷,然后由驱动设备移动装置,使装置的中心位置与待抛光对称体的对称面共面,并使引导轮和抛光砂带与待抛光表面顺滑接触。

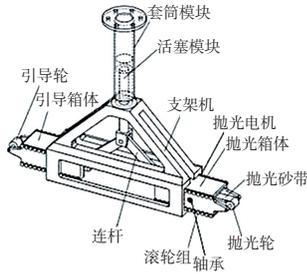


图1 对称结构仿形抛光装置示意图

本装置的仿形原理是引导轮所接触的型面信息通过“活塞-连杆-滚轮-导轨”对称结构传递给抛光砂带,从而引导砂带的抛光轨迹。

2 仿形抛光关键技术

2.1 切除量数学模型

要实现均匀抛光必须精准控制材料的切除量,这需要对其进行科学、定量的建模和分析,以增强抛光过程确定性^[14]。随着材料切除量增大,磨具能有效去除材料表面残留高度,表面粗糙度 R_a 随之下降^[15]。Preston模型是最具有代表性的抛光材料切除模型^[14],如式(1)所示^[16-17]。

$$\frac{dW}{dt} = K_p NV \quad (1)$$

式中: dW/dt 为材料的切除量; K_p 为Preston系数,与加工条件和材料性能有关; N 为抛光面上的压力; V 为抛光砂带与工件相对速度。

2.2 切除量变化规律

图2为抛光工作状态示意图。为了便于分析和计算,标记工件内表面下端点为 O 位置,以 O 点为坐标原点,以抛光轮所受重力方向的反方向为 y 轴正方向,以与之垂直且指向工件内表面方向为 x 轴正方向,建立坐标系。

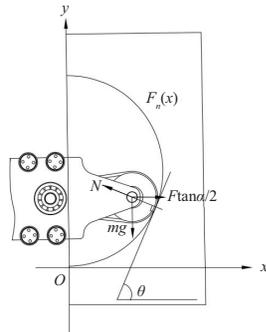


图2 抛光工作状态示意图

对抛光轮进行力学分析,连杆质量忽略不计。 m 为抛

光轮的质量; θ 为接触点切线与 x 轴正方向夹角; N 为抛光砂带受抛光表面的压力,可近似看作抛光轮受抛光表面的压力。抛光砂带与抛光区域是微面接触,可认为 N 是均匀的^[4]。设 F 为施加给活塞模块的竖直向下的力, α 为左、右连杆与竖直方向所夹角, F_1 和 F_2 分别为沿左、右连杆的分力。

已知被抛光内表面母线方程为 $F_n(x)$,对 $F_n(x)$ 求导即可得接触点斜率 K 。

$$F'_n(x) = K \quad (2)$$

通过式(3)可求得夹角 θ 。

$$\theta = \arctan K \quad (3)$$

F_1 和 F_2 可由式(4)求得。

$$F_1 = F_2 = \frac{F}{2\cos\alpha} \quad (4)$$

抛光磨具水平方向的力平衡可由式(5)求得 N 。

$$N\sin\theta = \frac{F\tan\alpha}{2} \quad (5)$$

为保证被抛光体表面抛光精度一致性,需保证在不同 y 坐标下切除量 dW/dt 为定值。

将式(2)-式(5)代入式(1)得到材料切除量

$$\frac{dW}{dt} = \frac{K_p F \tan\alpha V}{2\sin[\arctan F'_n(x)]} \quad (6)$$

若被抛光体工件 x 为定值,即对称平面,则 K 趋近于无穷大,可知 dW/dt 只与 F 、 α 和 V 有关。

2.3 进给速度及抛光力控制方法

控制抛光进给速度有两种模式:位置驻留模式和速度驻留模式^[18]。采用位置驻留模式时,抛光砂带离散地对工件上不同高度的点进行逐层抛光,此时机床需要频繁的启动、停止,工作效率低且容易损伤表面。采用速度驻留模式时,即本机构所采用的移动抛光方式,直接控制抛光磨具沿着 y 方向的进给速度,抛光过程不仅连续而且效率高、质量好^[15],所以本文采用速度驻留模式。

设电机角速度为 ω ,主动轮半径为 R ,从动轮半径为 R_1 ,砂带传动轮半径为 R'_1 ,从动轴角速度为 ω_1 ,则有电机角速度 ω 和抛光砂带与工件相对速度 V 的关系:

$$\omega = \frac{VR_1}{R'_1 R} \quad (7)$$

直流电机转速控制规律如式(8)所示。

$$n = U - \left(Ir + L \frac{di}{dt} \right) / K\varphi \quad (8)$$

式中: n 为电机转速; U 是电枢电压; I 是电枢电流; r 是回路电阻; K 是感应电动势常数; φ 是励磁通量。在正常工作中,自变量只有 U 。

已知电机角速度与周期的表达式:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (9)$$

转速与周期关系式:

$$n = \frac{60}{T} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得

$$n = \frac{30\omega}{\pi} \quad (11)$$

联立式(6)-式(8)、式(11)可得 U 的表达式:

$$U = \frac{60R_1 \sin[\arctan F'_n(x)] dW}{\pi K_p F \tan \alpha R'_1 R dt} + \frac{L di}{K \varphi} \quad (12)$$

记在 y 方向进给速度为 V' , 则机构抛光接触点的 y 坐标为

$$y = \int_0^l V' dt \quad (13)$$

如图2所示,被抛光内表面母线方程用 $F_n(x)$ 表示, l 为被抛光半圆弧内表面的半径,则:

$$F_n(x) = \sqrt{l^2 - x^2} \quad (x \geq 0) \quad (14)$$

把机构抛光接触点的 y 坐标代入 $F_n(x)$ 中,得

$$x = \sqrt{l^2 - \left(\int_0^l V' dt\right)^2} \quad (x \geq 0) \quad (15)$$

联立式(11)-式(13)后代入 x 值,可建立 V' 与 U 的函数表达式:

$$U = \frac{60R_1 \sin \left[\arctan F'_n \cdot \sqrt{l^2 - \left(\int_0^l V' dt\right)^2} \right] dW}{\pi K_p F \tan \alpha R'_1 R dt} + \frac{L di}{K \varphi} \quad (16)$$

因 V' 为设定值,从而可通过调节 U 的大小控制抛光力。

3 抛光试验

3.1 试验方法

为检验该抛光及控制方法的可靠性,开展抛光试验。通过法兰盘将抛光装置固定在驱动设备工作台上,工作台带动抛光设备实现精确位移,使抛光装置的抛光轮和抛光表面柔性接触;依据抛光曲面曲率变化,通过调压阀调整活塞上方载荷大小,从而获得均匀的抛光力。本实验选取粒度为400目的砂带对同一TC4材质对称曲面结构体的不同加工区域进行抛光^[19],采用触针式表面粗糙度测量仪进行测量。首先进行粗抛光,对试样的每个局部加工表面进行预处理;而后对各个加工表面进行半精抛光;最后对该表面进行精抛光(3次)。所采取的抛光工艺参数如表1所示。

表1 TC4材料的各项抛光工艺参数

抛光工艺参数	粗抛光	半精抛光	精抛光(3次)
$N/(kg \cdot m/s^2)$	50	50	50
t/\min	2	2	2(3次)
$n/(r/\min)$	8 400	9 200	9 800
$V/(m/s)$	18	21	24
$V'/(mm/s)$	0.8	0.6	0.4
$(dW/dt)/(mm/s)$	0.07	0.05	0.03

3.2 结果分析与结论

经检测,抛光前TC4钛合金对称曲面体试样待加工表面平均粗糙度值 $R_a = 1.31 \mu m$,如图3(a)所示;粗抛、半

精抛、精抛(3次)后平均表面粗糙度值分别 $1.2 \mu m$ 、 $0.7 \mu m$ 、 $0.34 \mu m$,精抛后表面粗糙度明显降低,如图3(b)所示。

试验结果表明,该装置能获得合格的抛光表面质量,本文设计机构及控制方法是可靠的。

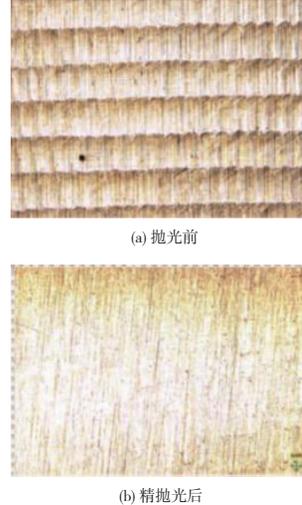


图3 抛光前后内表面对比

4 结语

1) 针对对称曲面结构体面法矢及曲率变化大、型面信息读取和抛光力精准控制难度大的问题,设计了一种“活塞-连杆-滚轮-导轨”倒“Y”形结构的对称结构仿形抛光装置。

2) 建立了抛光材料去除量数学模型,分析了所施加载荷、抛光砂带线速度与材料去除量的变化规律。

3) 提出了采用速度驻留模式来控制进给速度及抛光力的方法。

4) 试验结果表明,该装置能获得合格的抛光表面质量,本文设计的机构及控制方法是可靠的。

参考文献:

- [1] 李敏,袁巨龙,吴喆,等. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J]. 机械工程学报,2015,51(5):178-191.
- [2] 贾孝伟,冯益华,石鹏辉,等. 表面完整性及其测量方法的研究[J]. 齐鲁工业大学学报(自然科学版),2016,30(2):67-71.
- [3] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报,2010,46(15):161-177.
- [4] 李琴. 基于材料去除机理的曲面零件机械抛光工艺研究[D]. 广东:华南理工大学,2015.
- [5] 吴庭筠. 面向复杂型面抛光的数控编程技术研究及系统开发[D]. 广州:广州大学,2019.
- [6] 黄摇吴. 枪闸表面机器人砂带抛光离线编程技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [7] 刘健. 大圆弧曲面机械抛光工艺方案[J]. 中国新技术新产品,2018(24):86-88.
- [8] 李凤仙,王晓燕,曾聪,等. 6063铝合金的碱性化学抛光[J]. 轻合金加工技术,2018,46(5):51-56.

(下转第57页)

3 结语

本文采用正交试验法,在高频往复干滑动条件下研究了法向载荷、工作温度、往复频率和表面渗氮对 M42 高速钢的摩擦磨损性能的影响,得出了如下结论:

1) 通过极差分析发现:往复频率是影响摩擦系数主要因素,表面有渗氮层对磨损量的影响最显著,摩擦系数和磨损量与工作温度和往复频率呈负相关,与法向载荷呈正相关。

2) 在高频往复干滑动条件下,M42 高速钢常规热处理基体的磨损机制是黏着磨损和疲劳磨损,对 M42 高速钢表层进行渗氮处理后,磨损机制以疲劳磨损为主,磨损过程中有氧化现象。

参考文献:

- [1] 刘宇,李丽声,高德生,等. 钴对 M42 型超硬高速钢组织和性能的影响[J]. 钢铁,1989,24(1):36-40,35.
- [2] 赵顺利,樊俊飞,周灿栋,等. 喷射成形 M42 高速钢初生碳化物的细化[J]. 宝钢技术,2013(3):53-57,68.
- [3] 马超,赵顺利,樊俊飞,等. 热处理对喷射成形 M42 高速钢显

微组织及硬度的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(12):156-158.

- [4] GODEC M, VEČKO PIRTOVŠEK T, ŠETINA BATIČ B, et al. Surface and bulk carbide transformations in high-speed steel[J]. Scientific Reports,2015,5:16202.
- [5] 马凯,杨伏良,黄珂,等. 淬火方式对 M42 高速钢组织和性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2014,19(2):241-247.
- [6] 李飞舟,沈立,郭便. EM42 与 GCr15 干摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(16):37-39.
- [7] 凌晓红. 粉末高速钢 S690 与 M35、M42 钢组织性能对比[J]. 工具技术,2015,49(3):68-70.
- [8] 何庆生. 线性分置式斯特林制冷机国产化应用研究[J]. 低温与超导,2014,42(2):21-25.
- [9] VEPRÍK A, ZECHTZER S, PUNDAK N. Split stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared imagers[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. Proc SPIE 7660, Infrared Technology and Applications XXXVI, Orlando, Florida, USA; 2010,7660:76602K.

收稿日期:2020-04-23

(上接第 43 页)

- [9] 孙发青,李庆忠. 雾化施液抛光中化学作用和机械作用的试验研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(6):17-19,24.
- [10] 高国富,王岩. 磁力研磨加工技术研究进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(6):813-817.
- [11] 万宏强,韩佩瑛,葛帅,等. 工件表面超声振动抛光方法发展概况[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2018,38(2):94-100.
- [12] 牛燕辉. 化学气相沉积技术的研究与应用进展[J]. 科技风,2020(13):161.
- [13] 韩光超,孙明,孙海鸥,等. 基于 CAM 的机器人抛光轨迹规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008(5):60-62.
- [14] 樊成,赵继,张雷,等. 移动抛光自由曲面材料去除的理论建模与试验研究[J]. 机械工程学报,2014,50(5):173-181.
- [15] 张露,吴晓君,张凤勇. 弹性球头磨具曲面抛光参数对抛光效果的影响研究[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(3):

40-45.

- [16] 张伟,李洪玉,金海. 气囊抛光去除函数的数值仿真与试验研究[J]. 机械工程学报,2009,45(2):308-312.
- [17] YANG M Y, LEE H C. Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens Die [J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,116(2/3):298-304.
- [18] SONG C, DAI Y F, PENG X Q. Model and algorithm based on accurate realization of dwell time in magnetorheological finishing[J]. Applied Optics,2010,49(19):3676-3683.
- [19] 淮文博,唐虹,李虹. 砂布轮抛光工艺参数对 TC4 表面粗糙度影响规律的研究与分析[J]. 西安理工大学学报,2017,33(2):226-232.

收稿日期:2020-05-25