

模具液流悬浮抛光动态参数研究^{*}

侯海鹏, 洪滔, 计时鸣^{*}, 王超荣

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要:为解决模具复杂型腔及异形孔自动化抛光问题,首先建立了模具液流悬浮抛光系统,开发了液流动压力监测平台,实现了抛光工具位置及转速控制;之后结合液流动压理论,分析了模具材料去除模型,获得了流场与压力分布规律;接着通过试验研究了转速和间隙对液流动压力的影响规律;最后优选了 6 000 r/min 转速和 60 μm 间隙对模具工件进行了抛光效果试验。研究结果表明该参数下模具抛光效果显著,取得了 Ra30 nm 的工件表面。

关键词:模具;液流悬浮;抛光;精密加工

中图分类号:TH161⁺.21;TG76

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)04-0411-03

Study on dynamic parameters of hydrodynamic suspension polishing for metal mould

HOU Hai-peng, HONG-Tao, JI Shi-ming, WANG Chao-rong

(The MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In order to solve the problem of automatic polishing for complex cavity and abnormality bores of mould, the system of hydrodynamic suspension polishing for metal mould was established. In order to control the position and speed, a suitable monitoring software of fluid pressure was built. And then the relationship of fluid speed and pressure distributions was established, the material removal model was researched based on hydrodynamic theory. In addition, the influence of polishing tool rotate speed and clearance on fluid pressure was obtained. The polishing effect experiment with rotate speed 6 000 r/min and polishing clearance 60 μm was done. The results indicate that a better polishing effect using the parameters, and the surface of Ra30 nm can be obtained for work piece.

Key words: mould; hydrodynamic suspension; polishing; precision machining

0 引 言

模具已经成为现代制造业中的一个重要基石,其高效的零件生产以及对复杂零件的高适应性,是传统机加工无法比拟的。通过模具制造零件已经在机械、电子等多个领域得到了广泛的应用。但模具本身的加工难度及成本也往往超过了常规加工。模具加工特别是对于复杂型腔、异型面及清角的加工,有着更高的难度,但目前仍主要以人工打磨的方式对模具表面进行光整加工^[1-4]。

液流悬浮抛光是一种利用液流动压原理及弹性发射理论的非接触式细微游离磨粒的加工方法,细微磨粒

以一定的能量连续撞击工件表面,使工件表面产生微量材料去除,从而获得模具光滑表面。液流悬浮抛光作为一种柔性加工技术,对机床刚度要求低、热变形小,目前该技术已应用到了玻璃等光学材料的光整加工^[5-8]。

本研究通过构建模具液流悬浮抛光系统,重点对抛光中动态参数进行了研究,包括抛光工具转速、加工间隙及液流动压力的理论分析及实验研究。通过分析材料去除模型,结合液流动压理论,深入分析速度及压力分布。实验研究了速度及间隙对液流动压力的影响及一定条件下的抛光效果。本研究为模具液流悬浮抛光优化设计提供了重要依据。

收稿日期:2010-10-11

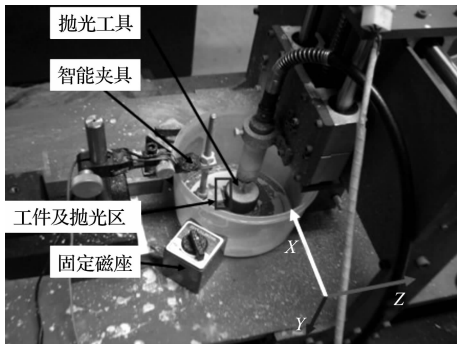
基金项目:浙江省科技厅资助项目(2008C21113)

作者简介:侯海鹏(1983-),男,河南新乡人,主要从事精密加工与机电测控方面的研究. E-mail: haipenghou@163.com

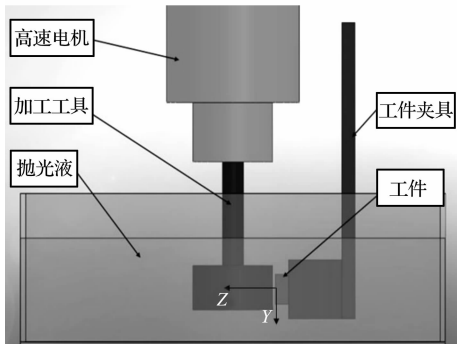
通信联系人:计时鸣,男,教授,博士生导师. E-mail: jishiming@zjut.edu.cn.

1 模具液流悬浮抛光系统

模具液流悬浮抛光系统主要由 3 位数控定位系统、抛光参数监控系统及液流悬浮加工工具系统组成,如图 1 所示。3 位定位系统采用多功能数控雕刻机的坐标系统,加工间隙方向(X 轴)控制采用了精密研磨机滚轴丝杠,及最大支持 256 细分高精度步进电机驱动器,使加工间隙可控进给达到了 $0.2 \mu\text{m}$,整个三位定位系统由上位机 CNC 软件 Mach3 集中控制,方便进行抛光轨迹规划。



(a) 模具液流悬浮抛光试验系统



(b) 模具液流悬浮抛光系统示意图

图 1 模具液流悬浮抛光系统

液流动压力信号来自自主研发的监测力夹具,并和转速信号同时接入高速数据采集系统,信号采集采用美国国家仪器公司 NI-USB6211 采集卡,并用 LabVIEW 开发了监测软件,如图 2 所示。

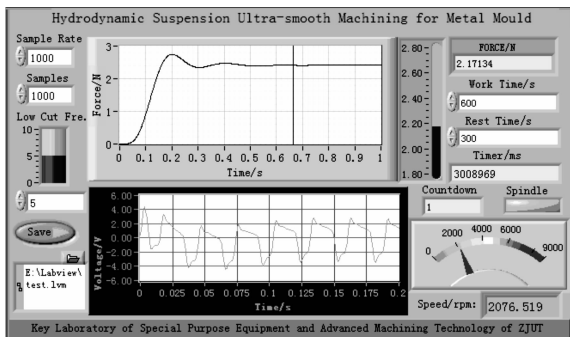


图 2 模具液流悬浮抛光动态监控系统

2 材料去除分析

根据弹性发射抛光原理和动压理论,液流悬浮抛光是以高速旋转的弹性工具带动抛光液,对工件表面进行不断地机械冲击和弹性发射的作用效应。抛光过程中,大量连续的磨粒对工件表面的冲击能量来自于高速旋转的抛光工件,可以说抛光工具与工件是一种软接触。

根据 Preston 提出的材料去除原理,接触区某一点材料去除率可以表示为:

$$W(x, y) = K \cdot P(x, y) \cdot V(x, y) \quad (1)$$

式中: K —和加工条件相关的系数,包括抛光液粘度、密度(忽略温度影响)和被加工材料属性的影响, P —改点表面压强, V —抛光工具和工件间的相对速度。

考虑到液流悬浮实际抛光中与工件发生摩擦的是抛光液在靠近被泡表面的液流层,根据非接触润滑理论,速度项与接触液流层的速度梯度有关。设抛光工件表面为 A ,抛光表面中心位置为坐标原点。则抛光表面的材料去除率为:

$$M = K \cdot \iint_A p(x, y) \frac{\partial u_f}{\partial z} dx dy + c \quad (2)$$

式中: μ_f —流体在 x 方向的速度, p —流体在抛光区形成的液流动压力。

由上式可知,加工中液流动压力及接触层的剪切速度梯度对材料的去除有着重要的作用。由于实际的材料去除还与抛光表面初始质量有关,则该去除率只表示材料表面质量稳定后的关系。

假设抛光区域内加工液为连续不可压缩牛顿流体,且加工间隙方向(Z 向)压力恒定,不考虑粘压效应。根据 Navier-Stokes 方程,沿 X 方向可以简化为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_f}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial^2 u_f}{\partial z^2} \quad (3)$$

式中: μ —流体动力粘度。

对式(3)积分,并取边界条件: $z=0$ 时, $\mu_f=0$; $z=h$ 时, $\mu_f=U$,则:

$$u_f = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (z-h) + \frac{U}{h} z \quad (4)$$

式中: U —抛光工具线速度, h —抛光工具与工件表面间的距离,设抛光工具半径为 R ,最小间隙($x=0$ 处)为 h_0 ,则有 $h(x) = h_0 + x^2/(2R)$ 。

由 Reynolds 方程可知抛光区液流动压表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5)$$

忽略重力及惯性力的影响,动压力沿工件厚度方

向(Y向)无变化,则:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6\mu U \frac{h - h_m}{h^3} \left(\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ 时, } h = h_m \right) \quad (6)$$

通过求解式(6)可以得到液流动压沿 X 方向的分布,如图 3 所示^[9-10]。

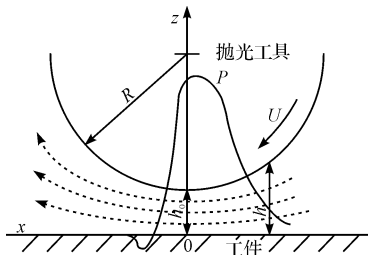


图3 抛光区液流动压力分布

3 试验及结果分析

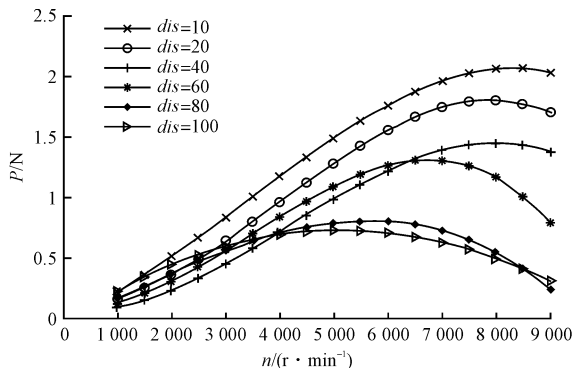
在模具液流悬浮抛光过程中,工件表面不断受到细微磨粒的冲击,使抛光表面材料得以微量去除,进而改变了模具表面的粗糙度。材料的去除效率直接影响了模具表面质量,而当抛光液及抛光工具给定时,加工间隙与抛光工具转速则是影响液流动压力及抛光效果的动态因素。本研究在一定的加工环境下,通过控制转速及间隙,对动压力及被抛表面粗糙度进行了试验研究,为获得理想加工工艺参数提供依据。

试验中液流悬浮抛光加工工具选择圆柱橡胶抛光头,直径为40 mm;选择水作为抛光基液,抛光微粒为直径300 nm的 $\alpha - Al_2O_3$ 粉末,质量分数为3%,并加少量分散剂和悬浮剂;试验工件为10 mm × 10 mm × 15 mm Cr₁₂MoV 模具钢,其洛氏硬度为60HRC。

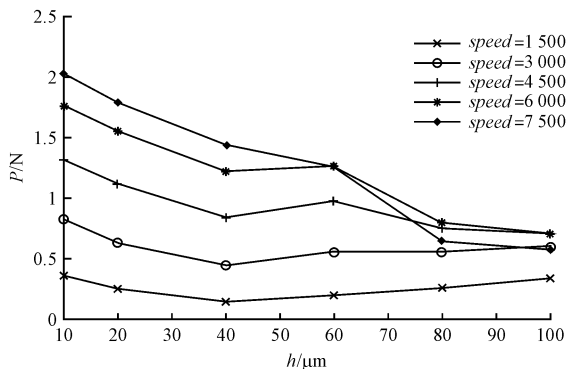
3.1 转速和间隙对液流动压力的影响

通过调整 Z 轴,可获得不同的加工间隙 h_0 ,并调整主轴转速,获得不同间隙及转速下的液流动压力值,并由上位机检测软件自动保存数据,其结果如图 4 所示。

从图中可以看出,加工间隙一定时,液流动压力随着转速的增加而增加,但总会趋于平缓,进而到达一个极值点,再增大速度压力反而有下降趋势。该下降趋势主要是由于液流不连续造成的。而不同的加工间隙所能达到的最大压力也不尽相同,间隙在 40 μm 以内时基本都出现在 8 000 r/min 左右。而当间隙大于 60 μm 时,压力增大趋于平缓,且最大压力时的转速值也随着间隙的增大而变小。当转速一定时,压力随间隙的增大而减小,并当转速小于 3 000 r/min 时,压力变化平缓。当间隙在 40 μm 与 60 μm 之间时,有部分增大趋势,这也说明了液流不连续性与间隙有关。



(a) 液流动压力与抛光工具转速的关系



(b) 液流动压力与抛光间隙的关系

图4 检测结果

3.2 模具液流悬浮抛光效果

为获得一组合适的理想参数,进行抛光效果的研究,将速度和间隙对液流动压力进行综合分析,获得液流动压力等高线如图 5 所示。

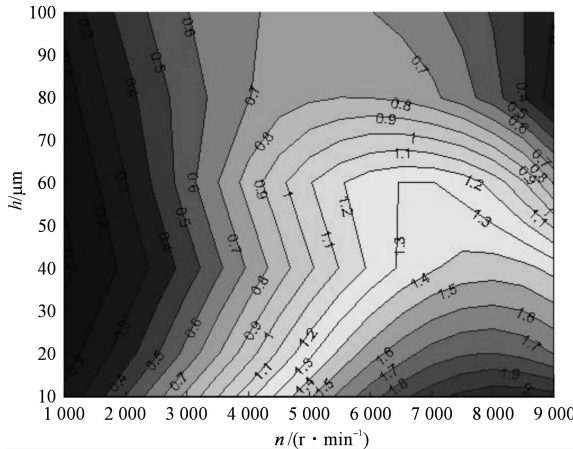


图5 液流动压等高线示意图

从图中可见当转速低于 3 000 r/min 或间隙大于 80 μm 时,动压力基本小于 0.5 N,这将使抛光作用不明显。而当转速在 6 000 r/min 且间隙小于 30 μm 时,液流动压力大于 1.5 N,但当电机高速旋转时,一方面液流容易不连续而偏离理论分析,使问题复杂化;另一方面电机高速时,由于离心力的作用,橡胶抛光工具容

(下转第 435 页)

以提高螺栓的刚度,还能得到更大的预紧力,另外增加螺栓数量、改变螺栓位置也可以得到更大的预紧力,从而增加结合面的接触刚度;将立柱内部原有的“#”字形筋板改成“X”形筋板,能有效提高立柱的扭曲刚度和弯曲刚度;加宽磨头底部的尺寸,增大磨头与立柱之间的导轨和滑块的规格,可以有效改进磨头的扭摆;给床身侧面增加筋板能提高床身的局部刚度等等,这些措施都能有效地改善机床整机的动态性能。

4 结束语

本研究通过对 SL500/HZ 超精密平面磨床进行试验模态分析,得到了机床的各阶模态参数,进而找出了机床结构的薄弱环节,提出改进方案,为提高机床的动态性能提供了结构改进的依据。由此可知,试验模态分析技术是研究机床动态特性的重要手段,通过试验模态分析可以得到机床结构的模态参数,从而对机床的整个动态特性有一个比较全面的了解。

参考文献 (References):

[1] 李圣怡,戴一帆.超精密加工机床新进展[J].机械工程学报,2003,39(8):7-12.

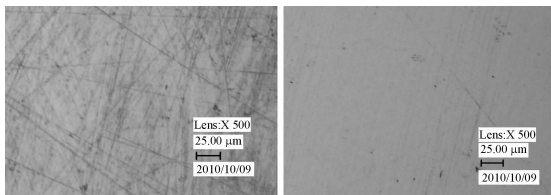
- [2] MOTTERSHEAD J E, FRISWELL M I. Model updating in structural dynamics; a survey [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 167(2):347-375.
- [3] 杨托,翁泽宇,卢波,等. MGK7350 数控高精度卧轴圆台平面磨床的试验模态分析[J]. 机床与液压, 2009(1):12-13.
- [4] EWINS D J. Recent Advances in Modal Testing [C]. 6th International Conference on Recent Advance in Structural Dynamics. London: [s. n.], 1997.
- [5] 温熙森,陈循,徐永成,等. 机械系统建模与动态分析 [M]. 北京:科学出版社,2004.
- [6] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
- [7] SCHMITZ T L. Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis [J]. *Annals of the CIRP*, 2000, 49(1):303-308.
- [8] 林循泓. 振动模态参数识别及其应用 [M]. 南京:东南大学出版社,1994.
- [9] 沈晓庆. 数控机床直线滚动导轨动态特性研究 [D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [10] Spectral Dynamics, Inc. The STAR Reference Manual [M]. Spectral Dynamics, Inc., 2007.
- [11] Spectral Dynamics, Inc. STAR System Users Guide [M]. Spectral Dynamics, Inc., 2007.
- [12] 廖伯瑜,周新民,尹志宏. 现代机械动力学及其工程应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:柴福莉]

(上接第 413 页)

易与工具表面发生碰撞,从而破坏工具表面。

综合分析,选用转速 6 000 r/min 和间隙 60 μm ,液流动压力在 1.3 N 左右。该区域等高线较为稀疏,即动压力有较好的加工稳定性。选择该参数对工件进行抛光 2.5 h,结果如图 6 所示。抛光效果明显,获得了 Ra 为 30 nm 的模具工件表面质量。



(a) 抛光前工件表面(Ra:80 nm) (b) 抛光后工件表面(Ra:30 nm)

图 6 模具液流悬浮抛光效果

4 结束语

本研究结合液流悬浮抛光原理,建立了模具液流悬浮抛光系统,包括定位平台和动态参数检测系统;并根据材料去除机理分析,构建了材料去除模型,重点研究了模型中液流动压力及转速;结合液流动压理论,分析了模型条件下的转速和压力分布情况。

本研究通过试验研究了抛光工具转速、加工间隙对液流动压的影响,通过液流动压力等高线示图,深入

分析了转速和间隙对液流动压的综合作用。结合实际试验,优选了 6 000 r/min 转速和 60 μm 的加工间隙,对模具工件进行了抛光效果的试验,获得了 Ra30 nm 的表面质量,肯定了模具液流悬浮抛光方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 计时鸣,金明生,张宪,等.应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J].机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [2] 殷海龙.浅谈模具加工设备的现状及发展趋势[J].机械研究与应用,2010,3(3):7-8.
- [3] 马忠臣,李强,杨秀琳.现代模具工业发展述评[J].模具技术,2006,3(3):23-24.
- [4] 计时鸣,张利,金明生,等.气囊抛光技术及其现状[J].机电工程,2010,27(5):1-12.
- [5] MORI Y. Creation of perfect surfaces [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275(1):39-50.
- [6] 李长河,修世超,蔡光起.微细游离磨粒借助流体动压力实现的超精密加工技术[J].机械设计与制造,2005,12(12):105-107.
- [7] 于兆勤,杨忠高,黄志刚,等.超光滑表面加工技术的发展及应用[J].机床与液压,2007,35(6):217-220.
- [8] 管力明,于保华,林剑.模具型腔表面复合精密光整加工参数优化[J].机电工程,2007,24(2):35-37.
- [9] LEE S K. Effects of minimizing hydrodynamic pressure in ultra-precision mirror grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(10):1031-1036.
- [10] ZHANG Bo, NAKAJIMA A. Hydrodynamic fluid pressure in grinding zone during grinding with metal-bonded diamond wheels [J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(3):603-608.

[编辑:柴福莉]