

100MD60Y4 高速电主轴热特性影响因素实验

张丽秀^{1,2}, 公维晶^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究油气润滑系统及转速各参数对高速电主轴温度与热变形的影响, 为提高数控机床加工精度提供理论依据. 方法 采用单一因素实验法, 基于恒温水冷控制系统和油气润滑系统实验平台进行电主轴热变形实验; 实验分析进气压力、供油时间间隔、单次供油量及转速四个参数对电主轴各位置温度及轴头位置热变形的影响. 结果 适当的进气压力及润滑油量可以使主轴各部分温升与轴头位置热变形量相对较小, 转速对于电主轴的温升及热变形影响较为显著, 且转轴 Z 方向(轴向)热变形量最大, 转速为 16 000 r/min 时, 变形量可达到 83.562 μm . 结论 电主轴油气润滑系统中的进气压力、供油时间间隔、单次供油量以及转速对电主轴各位置温度及转轴 X、Y、Z 三个方向热变形量均有影响.

关键词 电主轴; 热变形; 油气润滑系统; 单一因素实验法

中图分类号 TH502.15

文献标志码 A

Thermal Characteristic Factors Experiment on 100MD60Y4 High Speed Motorized Spindle

ZHANG Lixiu^{1,2}, GONG Weijing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The influence of oil and gas lubrication system and speed parameters on the temperature and thermal deformation of high speed motorized spindle is studied, in order to improve the machining accuracy of NC machine tools. Based on the single factor experiment method, the experiment of the thermal deformation of the spindle was carried out on the basis of the constant temperature water cooling control system and the oil gas lubrication system, the effects of four parameters, including inlet pressure, fuel supply time interval, single oil supply and speed on the temperature and the thermal deformation of the spindle position were analyzed. The intake pressure and proper amount of lubricating oil can make the spindle temperature rise and deformation of a relatively small

收稿日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375317); 辽宁省自然科学基金项目(2015020122); 国家(地方)联合工程实验室开放基金项目(SJSC-2015-6)

作者简介: 张丽秀(1970—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事机电一体化等方面研究.

head position for the spindle speed, temperature rise and thermal deformation is Obviously, and the maximum thermal deformation of the Z direction (axial). When the speed is 16 000 r/min, the deformation can reach 83. 562 μm . The inlet pressure, the interval of oil supply, the amount of oil supply and the rotational speed of the main oil and gas lubrication system of the electric spindle have influence on the temperature and the position of the spindle X, Y, Z three directions.

Key words: motorized spindle; thermal deformation; the oil-gas cooling lubrication system; the single factor experiment method

作为高速数控机床的核心部件,电主轴的性能极大的影响着机床的加工精度^[1-2]. 其中,主轴热变形是决定电主轴性能最为重要的指标之一. 主轴热变形主要是由于电主轴在高速运转时,内外热源共同作用,使得电主轴内部产生大量的热量,形成非均匀的温度场,从而发生位移的变化^[3-5]. 因此,对电主轴热变形影响因素进行实验研究,找到对主轴热变形影响最大的参量并加以控制,是提高数控机床加工精度的有效方法.

近年来,国内外学者对主轴热变形的研究做了很多努力, WANG Baomin^[6] 等对电主轴热误差进行了动态建模,并对测温点进行了优化; DU Zhengchun^[7] 等对机床电主轴的热行为进行了分析,并对热误差进行补偿; JIAN L^[8] 等对高速运行的机床主轴进行热特性研究并进行实验分析; 陈小安等^[9-10] 对 120MD60Y6 型号的电主轴进行温升实验,在确定热源和热边界后,对电主轴整体进行热-力学行为分析. 在对电主轴温升影响因素进行分析中, JIANG S^[11] 等测试并比较了不同工况下混合陶瓷球轴承与钢质球轴承油气润滑时的温升情况,考虑了载荷、转速、供油量以及气体流速等及供油参数和运行参数对钢质轴承温升的影响. 李松生^[12] 等通过改变供油量、转速、轴向载荷等参数进行试验研究,结果表明转速和供油量是影响轴承温升的主要因素.

以上研究多是对电主轴热变形进行整体分析,没有考虑过各参数对主轴热变形的影响情况,或是考虑水冷系统参数和油气

润滑系统参数对电主轴温升的影响,而没考虑其对电主轴的热变形的影响情况. 基于此,笔者以 100MD60Y4 型号电主轴为研究对象,基于恒温水冷控制系统和油气润滑系统实验平台,实验分析进气压力、供油时间间隔、单次供油量和转速四个参数对电主轴各部分温度和电主轴转轴热变形的影响,结果表明适当的进气压力和润滑油量可以使电主轴各位置温度及转轴热变形相对较小. 因此,合理控制进气压力和润滑油的供油时间间隔及单次供油量可以提高数控机床加工精度.

1 实验系统

1.1 100MD60Y4 电主轴

电主轴主要结构包括电动机(转子和定子)、转轴、前后轴承及前后端盖等. 本实验以如图 1 所示的 100MD60Y6 型电主轴为研究对象,该电主轴为磨削用电主轴,广泛应用于内圆磨削、外圆磨削、拉刀磨削.

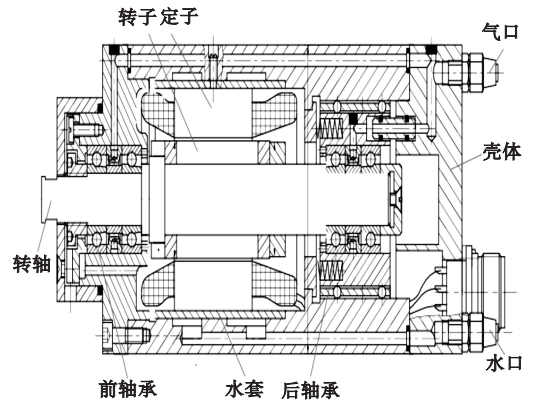


图 1 100MD60Y6 型电主轴基本结构图

Fig. 1 The basic structure of 100MD60Y6 electric spindle

滑系统实验平台. 根据实际工况,在一定冷却水道、通水通油管径等条件下,可能影响主轴热特性的因素包括进气压力 P 、供油时间间隔 t 、单次供油量 v 和转速 n . 采用单一因素实验法,针对上述影响因素分别进行 5 组实验,试验参数及水平如表 1 所示.

表 1 试验参数及水平

Table 1 Test parameters and levels

| 组别 | P/MPa | t/min | $v/(\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$ | $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ |
|----|----------------|----------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 0.20 | 1.5 | 10 | 8 000 |
| 2 | 0.24 | 2.0 | 12.1 | 10 000 |
| 3 | 0.28 | 2.5 | 14.2 | 12 000 |
| 4 | 0.32 | 3.0 | 16.3 | 14 000 |
| 5 | 0.36 | 3.5 | 18.4 | 16 000 |

2 实验结果与分析

2.1 进气压力对主轴温度及热变形的影响

在进气压力对主轴温度及热变形的影响分析中,机床状态为空载,测试时间为 60 min,开机前机床冷却至室温(15℃左右),电主轴转速 n 为 12 000 r/min,供油时间间隔 t 为 3 min,单次供油量 v 为 16.3 mm³/min,进气压力 P 为 0.20 MPa、0.24 MPa、0.28 MPa、0.32 MPa、0.36 MPa,共进行 5 组实验. 主轴各位置温度变化情况如图 5 所示. 电主轴转轴 X、Y、Z 方向上热变形可表示为 L_x, L_y, L_z ,其变化情况如图 6 所示.

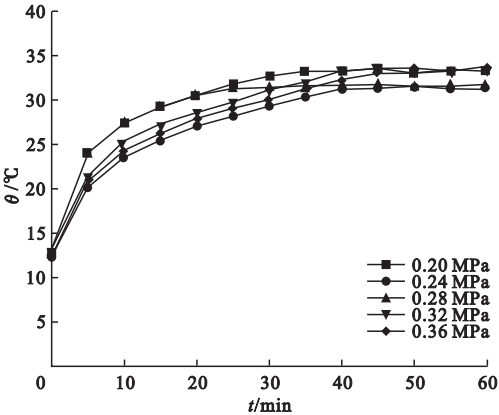
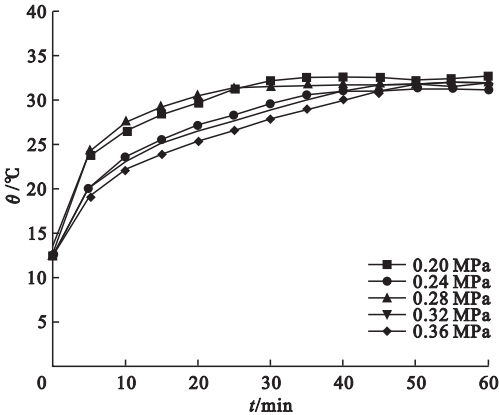
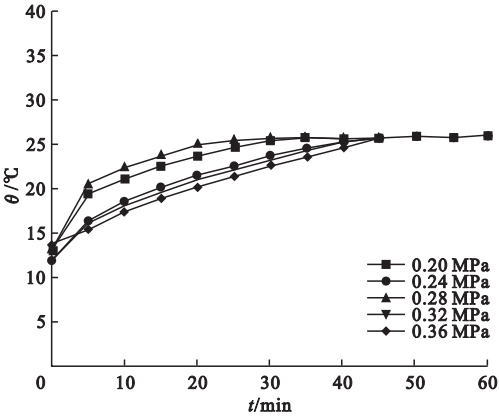
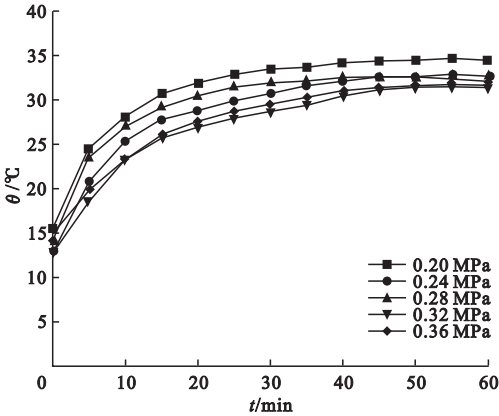


图 5 不同进气压力对电主轴各位置温度的影响

Fig. 5 Effect of different inlet pressure on the temperature of the spindle

由图 5 可知:随着进气压力的增加,主轴内部定子稳态温度由 34.5℃降低至 31.4℃,实验结果表明进气压力越大,空气

流速越大,从而可以带走大量主轴腔体的热量,对定子起到很好的冷却作用;即使进气压力增加,主轴水套外壳体稳态温度仍保持在

25.7℃左右,说明进气压力对主轴外套外壳体的稳态温度影响较小;随着进气压力的增加,主轴前、后轴承壳体外表面处稳态温度呈现先降低后增加的趋势,说明当进气压力小幅度增加时,主轴前后轴承处稳态温度都有减小的趋势,轴承处的温度被压缩空气所带

走使得温度降低;当进气压力继续加大后,前后轴承处的稳态温度出现升高的现象,由于进气压力过大,空气流速大,带走了前后轴承处的润滑油,使得前后轴承处润滑效果变差,同时空气流速过大增加了空气与轴承间的摩擦,产生的热量增多,温度升高。

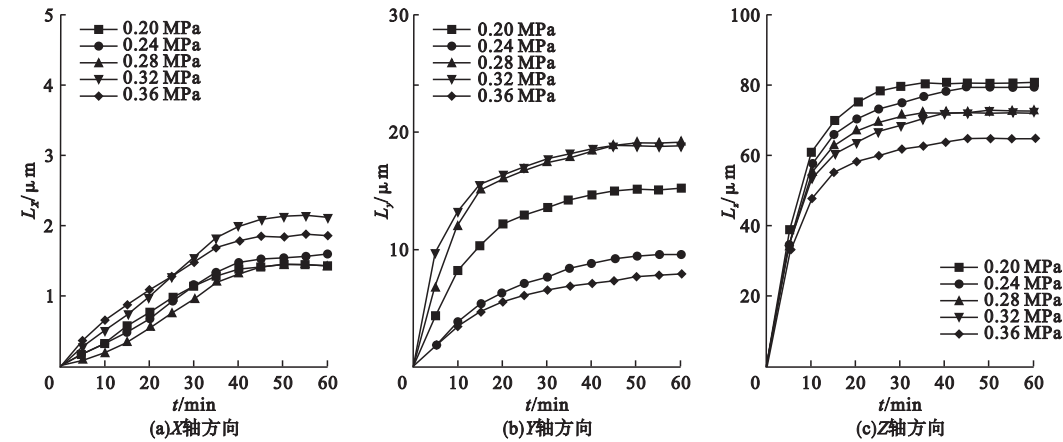


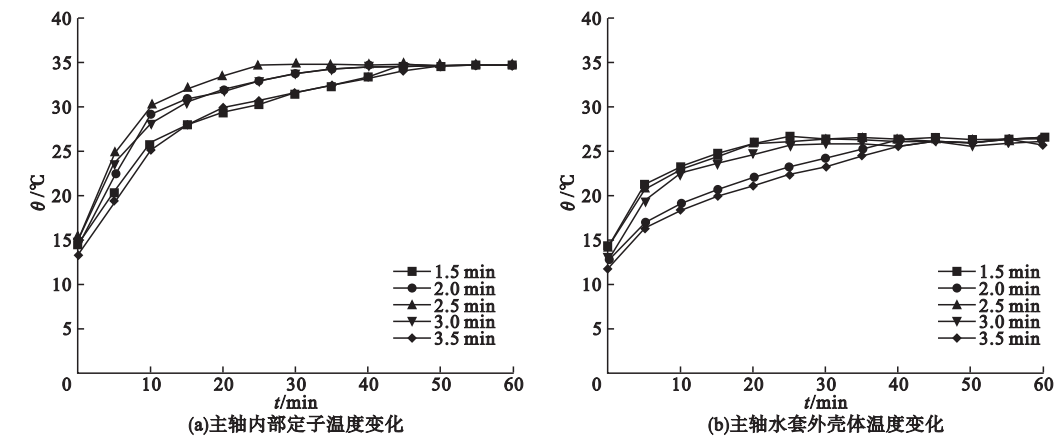
图6 不同进气压力对电主轴转轴热变形量的影响

Fig. 6 Effect of different inlet pressure on thermal deformation of spindle

由图6可知:进气压力对X轴方向热变形量影响不大,仅有1 μm 左右的变化;进气压力对Y方向热变形量大于X轴方向热变形量,可达到10 μm 左右,影响还是比较显著的;进气压力对Z轴方向热变形量影响非常显著,随着进气压力的增加,Z轴方向热变形量由80.9 μm 变为为65.3 μm ,这主要是由于进气压力较大时,可以较好的带走主轴腔体内的热量,对电主轴内部起到了良好的冷却作用,所以主轴转轴轴向(Z方向)热变形量减小。

2.2 供油时间间隔对主轴温度及热变形的影响

在供油时间间隔对主轴温度及热变形的影响分析中,机床状态为空载,测试时间为60 min,开机前机床冷却至室温,电主轴转速 n 为12 000 r/min,进气压力 P 为0.20 MPa,单次供油量 v 为16.3 mm³/min,供油时间间隔 t 为1.5 min、2 min、2.5 min、3 min、3.5 min,共进行5组实验,主轴各位置温度变化情况如图7所示,电主轴转轴X、Y、Z方向上热变形情况如图8所示。



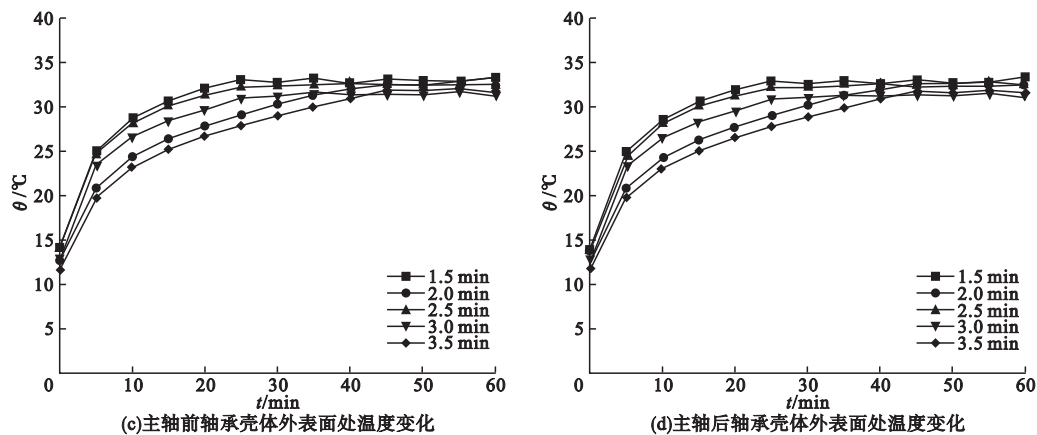


图 7 供油时间间隔对电主轴各位置温度的影响

Fig. 7 Effect of oil supply time interval on the temperature of electric spindle

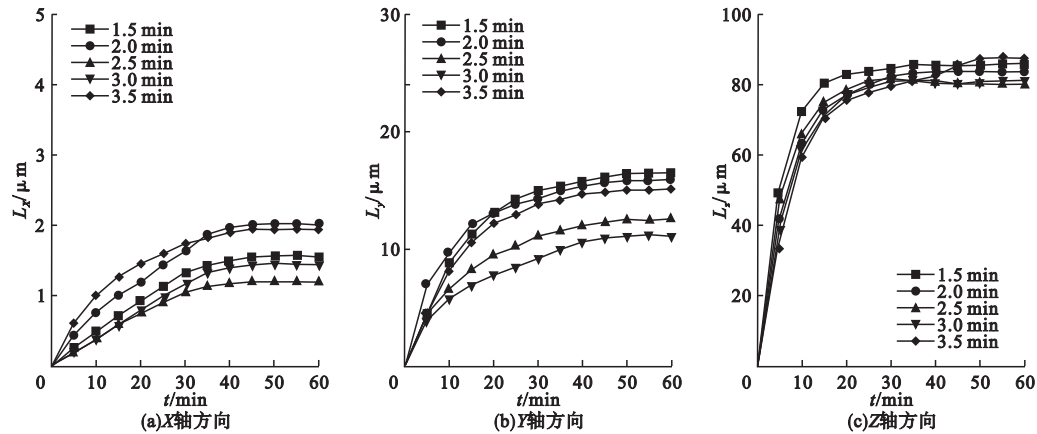


图 8 供油时间间隔对电主轴转轴热变形量的影响

Fig. 8 Effect of oil supply time interval on the thermal deformation of spindle nose

由图 7 可知: 供油时间间隔由 1.5 ~ 3.5 min 变化, 主轴内部定子稳态温度和水套外壳体稳态温度几乎不变, 保持在 34.5 ℃ 左右和 26 ℃ 左右, 说明供油时间间隔对主轴内部定子稳态温度和水套外壳体稳态温度几乎没有什么影响. 随着供油时间间隔的增加, 前后轴承处稳态温度呈现先减小后增加的趋势. 实验结果表明, 当供油时间间隔较短时, 润滑油量相对较多, 过多的润滑油附着在轴承处, 轴承处所产生的热量不能很好地散去, 使得前后轴承处温度较高. 当供油时间间隔较长时, 润滑油量相对较少, 轴承处润滑效果变差, 也会产生较多的热量, 导致前后轴承处稳态温度较高. 所以, 适当的供油时间间隔, 使润滑油在轴承表面生成一层油膜, 既起到

良好的润滑效果, 又能使热量随着空气散去.

由图 8 可知: 供油时间间隔对 X 轴方向热变形量影响最小, 当供油时间间隔为 2.5 min 时, X 轴方向热变形量最小; 供油时间间隔对 Y 方向热变形量影响大于 X 轴方向热变形量; 当供油时间间隔为 1.5 min 时, Y 方向热变形量最大为 16.6 μm, 当供油时间间隔为 3 min 时, Y 方向热变形量最小为 11.2 μm; 供油时间间隔对 Z 轴方向热变形量影响非常显著, 变化量在 20 μm 左右, 并且当供油时间间隔为 3 min 时, Z 轴方向热变形量最小为 80.978 μm, 说明当供油时间间隔为 3 min 时, 润滑油对轴承处的润滑效果最好, 轴承处生热量最小, 进而转轴变形量最小.

2.3 单次供油量对主轴温度及热变形影响

在单次供油量对主轴温度及热变形的影响分析中,机床状态为空载,测试时间为60 min,开机前机床冷却至室温,电主轴转速 n 为12 000 r/min,进气压力 P 为0.20 MPa,供油

时间间隔 t 为3 min,单次供油量 v 分别为10 mm³/min、12.1 mm³/min、14.2 mm³/min、16.3 mm³/min、18.4 mm³/min,共进行5组实验.主轴温度变化情况如图9所示,主轴轴头位置X、Y、Z方向上热变形情况如图10所示.

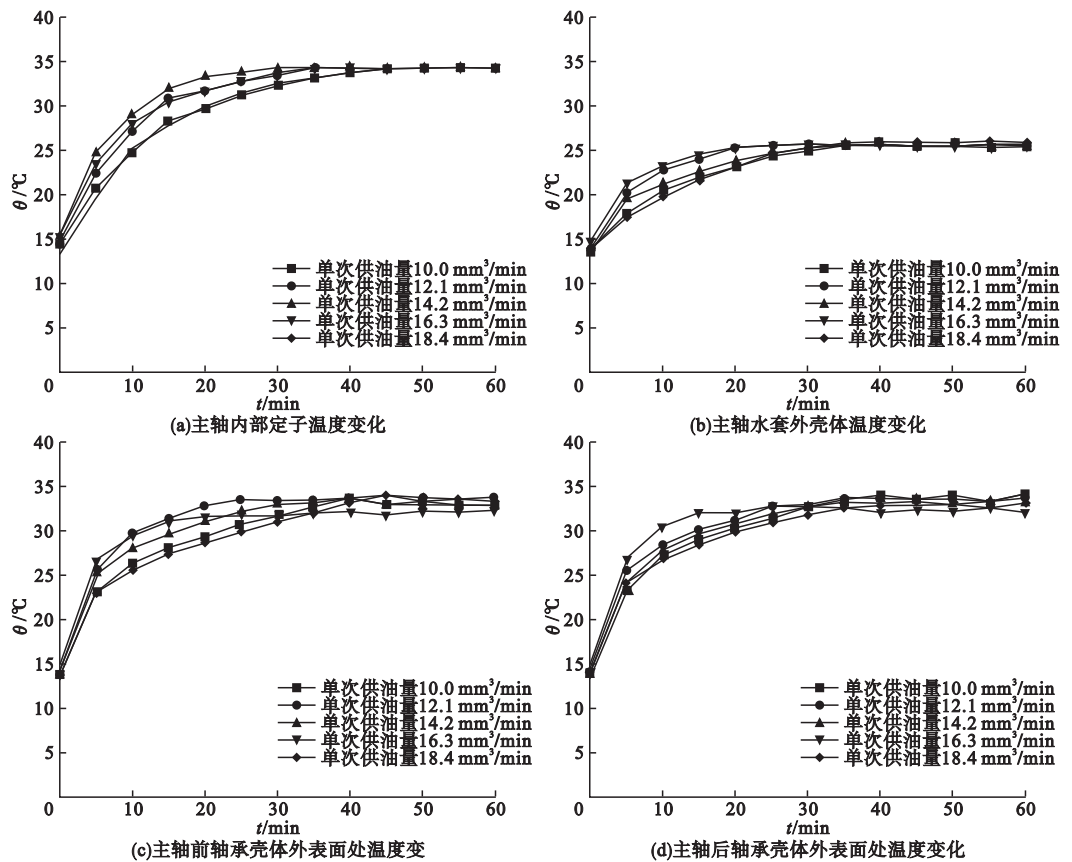


图9 单次供油量对电主轴各位置温度的影响

Fig. 9 Effect of single oil supply on the temperature of the spindle

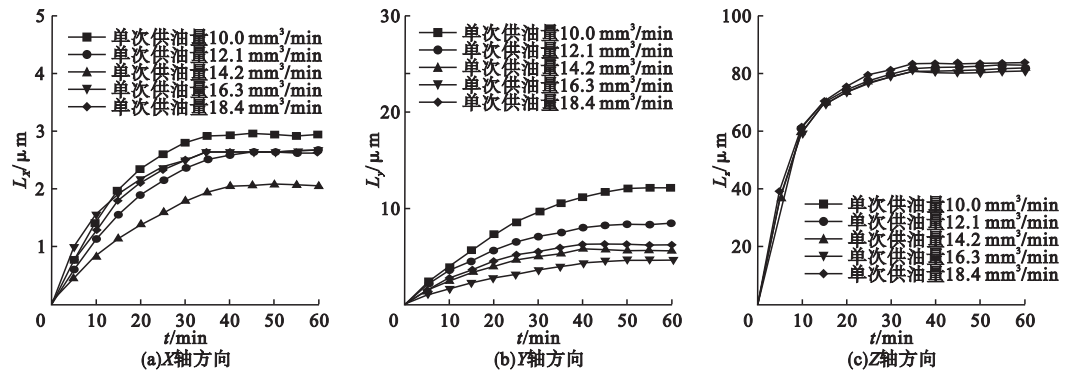


图10 单次供油量对电主轴转轴热变形量的影响

Fig. 10 Effect of single fuel supply on the thermal deformation of the spindle head

由图9可知:单次供油量由10~18.4 mm³/min变化,主轴内部定子稳态温度和水套外壳体稳态温度几乎不变保持在34.3℃左右和25.5℃左右,说明单次供油

量对主轴内部定子温度和水套外壳体稳态温度几乎没有什么影响;单次供油量对主轴前后轴承处的稳态温度影响非常显著,当单次供油量为 10 mm³/min、12.1 mm³/min、14.2 mm³/min 时,由于润滑油量相对较少,轴承处润滑效果变差,产生了较多热量,导致前后轴承处稳态温度较高.当单次供油量为 18.4 mm³/min 时,润滑油量过多,使得轴承处包裹了过多的油,轴承产生的热量不能很好地散去,导致前后轴承处稳态温度较高.当单次供油量为 16.3 mm³/min 时,润滑油刚好在轴承表面生成一层油膜,既起到良好的润滑效果,又能使热量随着空气散去,所以相比于其他供油量其前后轴承处的稳态温度为最低.

由图 10 可知:当单次供油量为 14.2 mm³/min 时,X 轴方向热变形量最小为 2 μm,当单次供油量为 10 mm³/min 时,Y 方向热变形量最大为 12.1 μm,当单次供油量

为 16.3 mm³/min 时,Y 方向热变形量最小为 6.2 μm;当单次供油量为 16.3 mm³/min 时,Z 方向热变形量最小为 80.978 μm,单次供油量为 18.4 mm³/min 时,Z 轴方向热变形量最大为 83.7 μm.实验结果表明,随着单次供油量的增加,主轴轴头位置三个方向热变形量均呈现先减小后增加趋势,说明润滑油单次供油量的多少对电主轴转轴热变形有影响.

2.4 转速大小对主轴温度及热变形影响

在转速对主轴温度及热变形的影响分析中,机床状态为空载,开机前机床冷却至室温,测试时间为 60 min,进气压力 P 为 0.20 MPa,供油时间间隔 t 为 3 min,单次供油量 v 为 16.3 mm³/min,转速 n 为 8 000 r/min、10 000 r/min、12 000 r/min、14 000 r/min、16 000 r/min 共进行 5 组实验,主轴各位置温度变化情况如图 11 所示,主轴转轴 X、Y、Z 方向上热变形情况如图 12 所示.

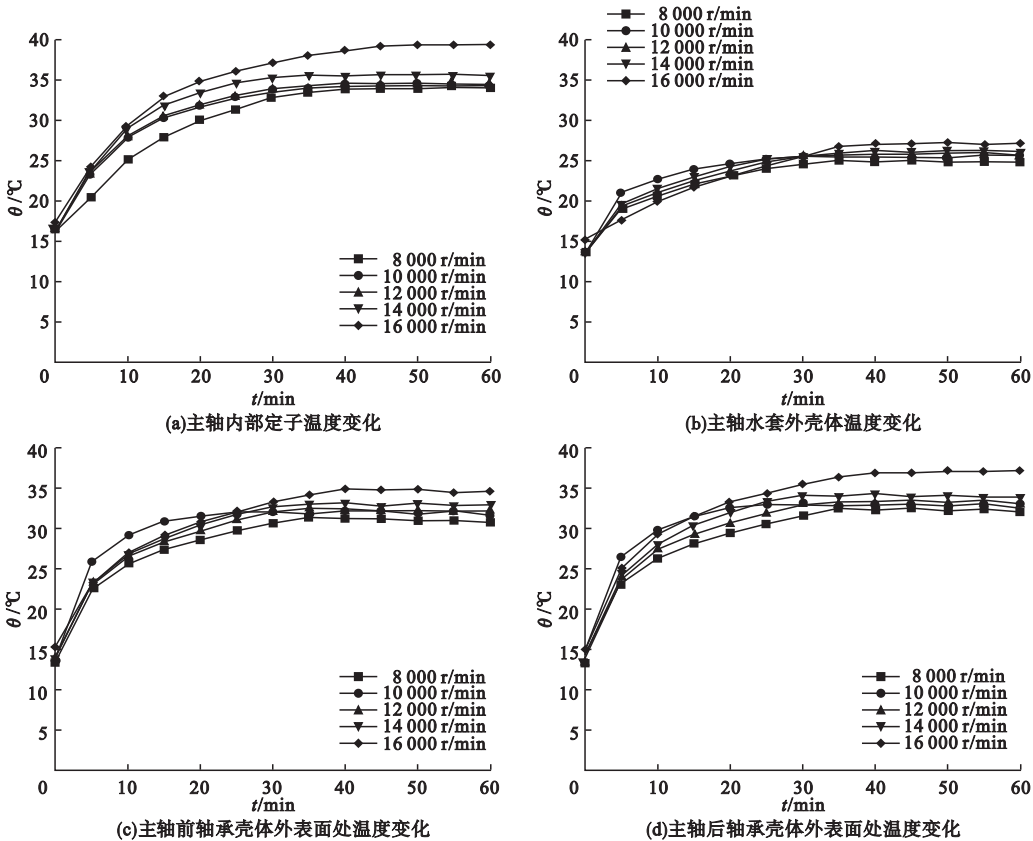


图 11 转速对电主轴各位置温度的影响

Fig. 11 Effect of rotation speed on the temperature of electric spindle

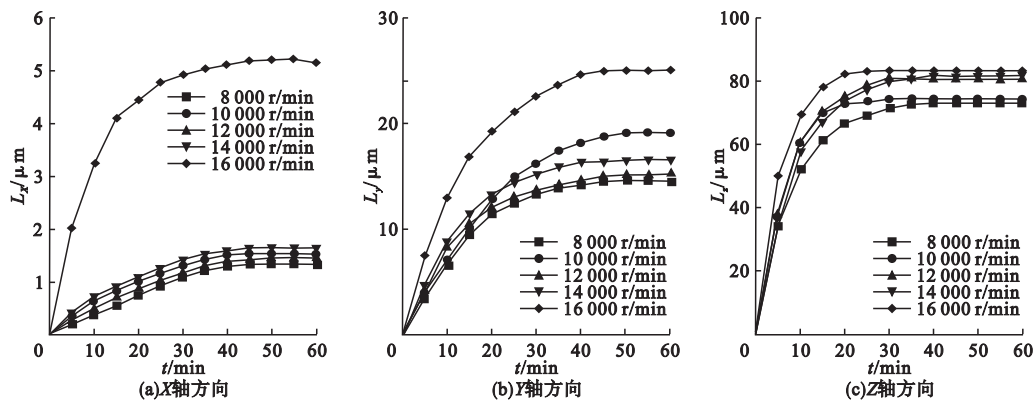


图 12 转速大小对电主轴转轴热变形量的影响

Fig. 12 Effect of rotating speed on thermal deformation of spindle nose

由图 11 可知:随着转速的增加,当电主轴温度趋于稳定时,主轴内部定子稳态温度由 34 ℃增加至 39.4 ℃,主轴水套外壳体稳态温度由 24.75 ℃增加至 27.14 ℃,前轴承壳体表面稳态温度由 30.89 ℃升高至 34.65 ℃,后轴承壳体表面稳态温度由 32.3 ℃升高至 37.3 ℃. 实验结果表明,转速对于电主轴各位置温度影响最大,不同转速下,电主轴各位置温升变化趋势是一致的,转速为 16 000 r/min 时,电主轴各位置温升要明显高于其他转速时的温升.

由图 12 可知:当转速为 8 000 r/min、10 000 r/min、12 000 r/min、14 000 r/min 时,X 轴方向热变形量变化很小,当转速为 16 000 r/min,X 轴方向热变形量明显大于其他转速;转速对 Y 方向热变形量影响大于 X 轴方向,转速为 8 000 r/min 时,Y 方向热变形量为 14.6 μm ,当转速为 16 000 r/min 时,Y 方向热变形量增长至 25.1 μm ;Z 方向热变形量要明显大于 X、Y 方向热变形量,即 73.226 μm 、74.526 μm 、80.978 μm 、81.856 μm 、83.562 μm . 实验结果表明,转速对电主轴转轴 X、Y、Z 轴方向热变形的影响非常显著.

3 结 论

(1)电主轴油气润滑系统中的进气压力、供油时间间隔、单次供油量以及转速对电

主轴各位置稳态温度及转轴 X、Y、Z 三个方向热变形均有影响.

(2)进气压力、润滑油量实验结果表明,适当的进气压力和润滑油量可以使电主轴各位置稳态温度及转轴 X、Y、Z 三个方向热变形相对较小,因此,应合理控制进气压力和润滑油的供油时间间隔及单次供油量.

(3)电主轴转轴 Z 方向(轴向)热变形量最大,转速为 16 000 r/min 时,变形量可达到 83.562 μm ,Y 方向热变形量大于 X 轴方向热变形量.

参考文献

[1] 吴玉厚,张丽秀. 高速数控机床电主轴控制技术[M]. 北京:科学出版社,2013.
(WU Yuhou,ZHANG Lixiu. High-speed CNC machine tool spindle control technology[M]. Beijing:Science Press,2013.)
[2] 苏宇峰,袁文信,苏六帅,等. 高速电主轴系统的热瞬态分析[J]. 机床与液压,2013,41 (13):26-28.
(SU Yufeng,YUAN Wenxin,SU Liushuai, et al. Thermal transient analysis of high speed motorized spindle system[J]. Machine tool & hydraulics,2013,41 (13):26-28.)
[3] 沈浩,赵越超,聂海强,等. HMC80 卧式加工中心电主轴热态特性分析[J]. 机械设计与制造,2011(6):7-9.
(SHEN Hao,ZHAO Yuechao,NIE Haiqiang, et al. Thermal characteristics analysis for spindle of HMC80 horizontal machining center [J]. Machinery design & manufacture, 2011 (6):7-9.)

- [4] 吴玉厚,于文达,张丽秀,等. 150MD24Y20 高速电主轴热特性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(4):703-707.
(WU Yuhou, YU Wenda, ZHANG Lixiu, et al. Thermal characteristics analysis on 150MD24Y20 high speed motorized spindle [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(4): 703-707.)
- [5] 周宝成,芮执元,雷春丽. 高速电主轴温度场分析研究[J]. 机械制造,2012,50(578):12-14.
(ZHOU Baocheng, RUI Zhiyuan, LEI Chunli. Analysis of temperature field of high speed motorized spindle [J]. Machinery, 2012, 50(578): 12-14.)
- [6] WANG Baomin, MEI Xuesong, WU Zaixin, et al. Dynamic modeling for thermal error in motorized spindles[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 78(5): 1141-1146.
- [7] DU Zhengchun, YAO Siyu, YANG Jianguo. Thermal behavior analysis and thermal error compensation for motorized spindle of machine tools[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2015, 16(7): 1571-1581.
- [8] JIAN L, DONGHYEON K, CHOONMAN L. A study on the thermal characteristics and experiments of high-speed spindle for machine tools [J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2015, 16(2): 293-299.
- [9] 陈小安,刘俊峰,合烨,等. 高速电主轴热态性能及其影响[J]. 机械工程学报,2013,49(11):135-142.
(CHEN Xiaohan, LIU Junfeng, HE Ye, et al. Thermal properties of high speed motorized spindle and their effects [J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(11): 135-142.)
- [10] 毕江涛,陈小安,李云松. 高速高性能电主轴热态性能分析[J]. 机械传动,2011,35(12):84-87.
(BI Jiangtao, CHEN Xiaohan, LI Yunsong. Thermal performance analysis of high-speed high-performance motorized spindle [J]. Journal of mechanical transmission, 2011, 35(12): 84-87.)
- [11] JIANG S, MAO Hebing. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication [J]. Journal of tribology, 2011, 133(2): 655-664.
- [12] 李松生,周鹏,黄晓,等. 基于油气润滑的超高速电主轴轴承润滑性能的试验研究[J]. 润滑与密封,2011,36(10):25-40.
(LI Songsheng, ZHOU Peng, HUANG Xiao, et al. Experimental study of the lubricating performances for electric spindle bearings running in ultra high speed lubricated by oil-air [J]. Lubrication engineering, 2011, 36(10): 25-40.)
- [13] 张丽秀,李超群,李金鹏. 高速主轴温升影响因素实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(6):75-77.
(ZHANG Lixiu, LI Chaoqun, LI Jinpeng. The experimental research on the influence factors of high speed spindle temperature rise [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2016(6): 75-77.)
- [14] 李旦豪,周文广. 高速电主轴的油气润滑[J]. 哈尔滨轴承,2014(2):26-27.
(LI Danhao, ZHOU Wenguang. Oil lubrication of high-speed motorized spindle [J]. Journal of Harbin bearing, 2014(2): 26-27.)
- [15] 高岭,姜美娜,鞠修勇. HDBS 系列高速卧式加工中心电主轴油气润滑系统[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(11):82-83.
(GAO Ling, JIANG Meina, JU Xiuyong. Application of oil-air lubrication in the design of motorized spindle for machining center [J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2011(11): 82-83.)
- [16] UHLMANN E, HU J. Thermal modeling of a high speed motor spindle [J]. Procedia CIRP, 2012(1): 313-318.
- [17] CREUGHTON E, HONEGGER A, TULSIAN A, et al. Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2010, 50(4): 386-393.
- [18] YU Shenbo, XIAO Fengyi. Thermal deformation analysis of high-speed motorized spindle [J]. Springer-verlagberlin heidelberg, 2012, 139: 511-517.
- [19] WANG Guanglin, WANG Huifeng, LIU Jun, et al. Study on steady-state temperature field and thermal deformation for permanent magnet synchronous motorized spindle [J]. Advanced materials research, 2011(305): 340-343.
- [20] MA Chi, YANG Jun, ZHAO Liang, et al. Simulation and experimental study on the thermally induced deformations of high-speed spindle system [J]. Applied thermal engineering, 2015(86): 251-268.