

文章编号 1004-924X(2011)07-1596-09

基于1级精度基准标准齿轮的超精密磨齿工艺

凌四营^{1*}, 王立鼎^{1,2}, 李克洪¹, 马 勇¹

(1. 大连理工大学 精密特种加工及微系统教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为建立超精密磨齿工艺的科学原理与技术框架, 以研制 ISO 1328-1:1995 中 1 级精度的基准标准齿轮为目标, 研究了超精密齿轮磨齿工艺原理与方法。首先, 依据渐开线齿轮最佳成型原理, 考虑机床关键元部件易精化及结构刚度高的特点, 选择 Y7125 型大平面砂轮磨齿机为工具机。然后, 从齿坯工艺与基准修复、机床参数的优化调整及科学的磨齿操作等方面对超精密磨齿工艺进行了探讨与研究。最后, 通过磨齿实验研制出了 m2 和 m4 一级精度的基准标准齿轮。该项工艺的研究对我国齿轮制造技术与水平的全面提升具有指导作用。

关键词: 基准标准齿轮; 超精密磨齿; 磨齿工艺

中图分类号: TG580.6; TG61 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1596

Ultra-precision gear-grinding processing based on class 1 master gear

LING Si-ying^{1*}, WANG Li-ding^{1,2}, LI Ke-hong¹, MA Yong¹

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional and Micro System Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

* Corresponding author, E-mail: luckling168@163.com

Abstract: To establish the scientific principles and technical frameworks of the ultra-precision grinding technology, the research work was performed on the processing principles and methods of the ultra-precision gear-grinding to develop the ultra-precision master gears with class 1 (ISO 1328-1:1995). Firstly, according to the optimal forming of an involute and the easy refinement and high structural rigidity of the machine, the gear grinder with flat-faced wheel Y7125 was chosen as the object machine tool. Then the ultra-precision gear-grinding processing was discussed and studied from the aspects of gear blank processing and datum renovation, optimal adjustment of grinder parameters and scientific gear-grinding operation. Finally, the medium module (m2 and m4) ultra-precision master gears with class 1 were developed by a scientific gear-grinding experiment. The research on ultra-precision gear-grinding processing plays a guiding role in the overall improvement of gear manufacturing technology

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2010-12-21.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042506); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50905026)

in China.

Key words: ultra-precision master gear; ultra-precision gear-grinding; gear-grinding processing

1 引言

基准标准齿轮的制造精度代表着超精密齿轮的技术能力。近几十年来,中国的齿轮工业持续发展,产量剧增,但总体制造质量不及美、德等发达国家^[1]。目前,国外超精密齿轮的工业小批量生产水平已达到齿轮国际标准(ISO 1328-1:1995,下同)中的2级精度,而我国仅为3级,国内外齿轮工业整体制造精度相差1~2级^[2]。

在超精密齿轮的制造方面,世界知名的精密齿轮制造商均对高精度齿轮磨床进行改造精化或制造专用的磨齿母机,并挑选技术高超的工人和技师操作这些设备磨削超精密齿轮。对于精密磨齿技术,无论哪一家公司对外都十分保密,既不接待参观者,也不申请专利,公开介绍精密磨齿技术及磨齿经验的文献基本没有。要想成为齿轮制造强国,首先要突破超精密齿轮制造质量这一难关。因此,研制具有自主知识产权的基准标准齿轮及超精密齿轮刀具,对于全面提升我国齿轮制造业的技术水平并促进共同发展有重要的现实意义。

本文根据渐开线最佳成型原理,考虑机床关键部件易精化及机构刚度高的特点,选择Y7125型大平面砂轮磨齿机为工具机,对机床刀具(砂轮)系统、机床关键部件进行了改造与精化。由于机床和刀具系统解决后,加工工艺研究不可缺少。本文根据多年积累的工艺经验和新的技术要求,对超精密磨齿工艺进行了探讨与研究,为磨削基准标准齿轮或超精密齿轮刀具提供了技术支持。

2 齿坯工艺与基准修复

按ISO1328-1:1995齿轮国际标准定制标准齿轮齿坯,齿坯工艺参考文献^[3],公差线余量为300 μm。基准标准齿轮由于精度要求较高(按“863”合同要求,m2~m4两种标准齿轮达1级精

度),因此对齿坯的工艺及精度要求也较为严格。为提高齿坯的安装精度,减小齿坯安装误差对齿轮加工和测量的影响,需要对齿坯的安装定位面相对于轴线的垂直度偏差进行修复。齿坯基准测量前对一批1:15 000的测量锥芯轴进行了径跳测试,从中选择径跳较小的芯轴($\nabla 0.5 \mu\text{m}$)作为齿坯基准修复的测量芯轴。齿坯定位面的测量与修复如图1所示。

为消除测量芯轴顶针孔加工偏心对测量结果的影响,将齿坯相对芯轴转180°后再次测量^[4],取两组数据的平均值作为齿坯基准的最终测量结果。经过测量与基准修复,可将齿坯定位面相对于轴线的垂直度控制在1 μm以下,大大提高了齿坯的定位精度,减小了对齿坯齿廓倾斜偏差、螺旋线倾斜偏差、齿距累积总偏差及齿圈径向跳动的影响。



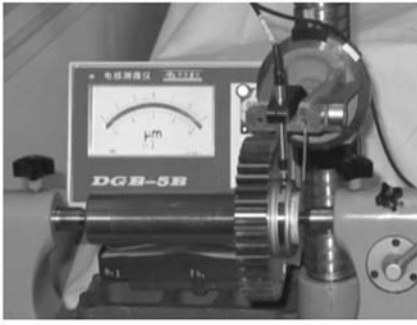
(a) 芯轴测量

(a) Measurement of testing mandrel



(b) 齿坯定位面的测量

(b) Measurement of locating surface for gear blank



(c) 齿坯找正圆的径向跳动测量

(c) Run-out measurement of adjusting ring for gear blank



(d) 齿坯定位面的修研

(d) Re grinding of locating surface for gear blank

图 1 齿坯定位面的测量与修复

Fig. 1 Measurement and renovation on locating surfaces for gear blanks

3 机床参数的优化调整

根据被磨齿轮的参数来选择或调整机床参数。

3.1 渐开线凸轮和斜挡板倾角的选择

根据被磨标准齿轮基圆 d_j 的大小和实验室现有的渐开线凸轮基圆 d_{jcam} 的大小来确定斜挡板倾角 α_h 和头架安装角 α_y 的大小,它们之间满足:

$$\cos \alpha_y = \frac{d_j \cos \alpha_h}{d_{jcam}} \quad (1)$$

3.2 头架安装角的选择与调整

同一倾角的斜挡板有两种类型:正斜挡板和反斜挡板。一般基圆直径较大的凸轮用正斜挡板,反之用反斜挡板,目的是为了使渐开线凸轮与挡板的接触区域大约处在挡板的中间位置。如果头架安装角过小,砂轮工作区有效宽度 B 小,砂轮磨损严重;如果头架安装角过大,增加了砂轮背

缘切伤旁齿的风险^[5],机床使用说明书上推荐头架的安装角为 $10 \sim 22^\circ$ 。根据课题组多年的磨齿工艺经验,推荐精密磨齿头架安装角为 $10 \sim 16^\circ$,最佳安装角为 $10 \sim 13^\circ$ 。这样既可通过增加砂轮外缘宽度来加强砂轮刚度,减小砂轮弹性变形对磨齿的影响,又不至于使砂轮过度磨损。

由于机床调节头架安装角 α_y 的分度刻度精度较低(分辨率为 $5'$),难免产生调整误差。此时,可根据被磨齿轮的平均齿廓倾斜偏差精调头架安装角。为了便于测量,建立头架测试点垂直于头角导轨方向上的位移 Δ (μm) 与被磨齿轮平均齿廓倾斜偏差 $\overline{f_{H\alpha}}$ 之间的函数关系如下:

$$\Delta \approx -\frac{640 \overline{f_{H\alpha}}}{\rho_m \tan \alpha_y} \quad (2)$$

式中, ρ_m 为渐开线展长的测量长度,单位为 mm。

3.3 头架运动行程的调整

头架运动行程 L 即为渐开线凸轮的展成长度。由于头架一个行程中要完成齿轮的磨齿与分度两个过程,假设分度过程占磨齿过程展成长度的 $3/4$,则头架行程 L 的最小调整量满足:

$$L \geq 1.75 d_{jcam} \varphi_{ei} \quad (3)$$

式中, φ_{ei} 为被磨齿轮的有效展开角,可通过查文件[6]附表 3 获得。

通过调整机床展成运动中曲柄的长度,可改变头架运动行程 L 的大小。

3.4 导轨及渐开线凸轮工作段的选择

导轨工作段通过头架尾座后的手轮进行调整,为了保证导轨工作段的精度,尽量从导轨的低端开始使用。为了防止头架与尾座发生碰撞,头架与尾座之间的最小距离不少于 5 mm。

磨齿过程中改变渐开线凸轮使用工作段在一定程度上可提高被磨齿轮的齿廓精度^[7]。凸轮使用工作段可通过分度头上的手轮或马刀下面的螺母进行调整。同理,为了保证渐开线凸轮工作段的精度,尽量从凸轮渐开线面的起始端开始使用。渐开线凸轮面形精度在两端处较低,为此留出至少 5 mm 的余量。

3.5 砂轮立柱转角的调整

砂轮立柱转角即为被磨齿轮的基圆螺旋角 β_j 。对于标准直齿圆柱齿轮而言, $\beta_j = 0$; 对于螺旋齿轮而言, β_j 满足:

$$\beta_j = \arctan(\tan \beta \cos \alpha_t) \quad (4)$$

式中, α_t 为齿坯端面压力角, β 为螺旋角。

由于机床调节立柱转角 β_1 的分度刻度精度较低(分辨率为 $1'$),很难一次调整到位,因此可根据被磨齿轮的螺旋线倾斜偏差 $f_{H\beta}$ 精调砂轮立柱转角。为了便于测量,建立头架测试点的切向位移 δ 与被磨齿轮平均齿廓倾斜偏差 $\overline{f_{H\beta}}$ 之间的函数关系如下:

$$\delta = -\frac{635 \overline{f_{H\beta}}}{b}, \quad (5)$$

式中, b 为齿宽,单位为 mm。

3.6 分度盘及分度挂轮的选择与调整

分度盘的槽数 Z 应为被磨齿轮齿数 z 的整数倍,首选槽数与被磨齿轮齿数相等的分度盘,这样可以使分度盘的齿槽磨损均匀。交换齿轮 A, B, C 和 D 的齿数满足:

$$\frac{A \times C}{B \times D} = \frac{24}{z}, \quad (6)$$

式中, A, B, C 和 D 分别为对应分度挂轮的齿数。

机床的展成运动与分度运动共用一个电机。电机输出的运动首先经过四级塔轮变速,一路经锥齿轮、软轴、分度蜗杆蜗轮机构、马氏机构及分度挂轮驱动分度盘做间歇分度运动;另一路经过蜗杆蜗轮机构、曲柄摇杆机构和由摇杆滑块机构加一凸轮副外推得到的五杆机构(简称五杆机构)驱动渐开线凸轮做往复摆动,进而实现磨齿的展成运动。机床的分度精度最终由分度盘的精度保证,因此在定位爪卡入分度盘的齿槽后,分度挂轮不能卡死,彼此之间要留有间隙。此间隙可通过松开 D 轮的锁紧螺母进行手动调整。

3.7 分度盘径向位置的调整

分度盘做成径向可调式,并加工出找正圆以便补偿被磨齿轮的齿距累积总偏差。首先在分度盘齿距测量工作台上测量找正圆的径向跳动量及分度盘的齿距偏差,然后在齿距最大值滞后 90° 方向上径向调偏分度盘,用“正弦消减法”补偿分度盘的齿距累积总偏差^[8]。

3.8 加工芯轴的调整

加工芯轴改造成径向可调式,并使用 $0 \sim 3 \mu\text{m}$ 微量过盈配合的密珠轴套定位工件,可调式芯轴结构如图 2 所示。

加工芯轴径向跳动可精调至 $0.5 \mu\text{m}$ 以下,端面偏摆可调至 $1 \mu\text{m}$ 以下(高点做标记,与齿坯安装定位面的低点相对应),大大提高了齿坯的安装精度。

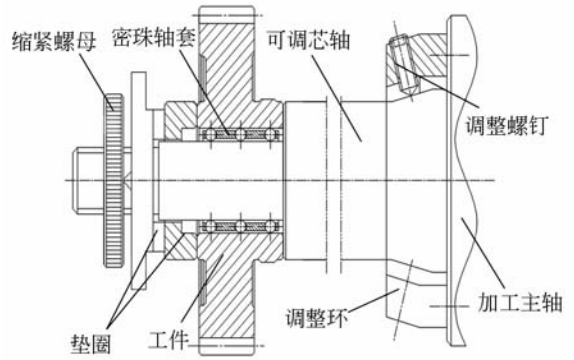


图2 径向可调式加工芯轴

Fig. 2 Radial adjustable processing spindle

3.9 分度时刻的调整

分度过程不得干涉渐开线的加工过程,一般头架运动到最高点时对应于分度的中间时刻。由于考虑到定位爪卡入分度盘带来的冲击,分度时刻可稍微提前一些,但要保证定位爪离开分度盘的时刻在磨完渐开线的最高点之后。加大分度行程的展长可使分度盘的分度精度趋于稳定。

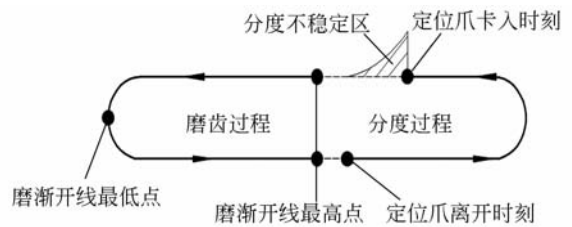


图3 磨齿与分度时刻示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gear-grinding and gear-indexing time

分度时刻的调整:将头架滑到最高位置,松开蛇皮管下端与机床的连接,抽出软轴相对于蛇皮管转动,使分度凸轮转过最高点(顶起定位爪)后,软轴再转半圈。这样就能获得图 3 所示的分度时刻。

3.10 砂轮修整方向的调整

如果砂轮修整方向,即砂轮修整器导轨方向与砂轮的回转轴线不垂直,大平面砂轮就会产生锥形误差,影响被磨齿轮的齿廓精度和螺旋线精度^[9-10]。利用测量工装测出砂轮修整方向与回转轴线的垂直度偏差,以此为依据准确调整砂轮修整器的导轨方位。工程中可以根据被磨齿轮螺旋线偏差曲线凹凸度的大小推算砂轮修整器导轨的调整量^[10]。

3.11 砂轮静平衡

由于砂轮直径较大而厚度较小,因此只对砂轮进行静平衡即可满足超精密磨齿的需求。

新砂轮使用时要经过一次静平衡(粗)—机床上修整—再次静平衡(精)三步后才能用于精密磨齿。精静平衡后,砂轮难免有残余的微量转动扭矩,标记该力的方向,安装时对应砂轮轴径跳最低点进行补偿,可使砂轮运转更加平稳。有条件的话,可以对砂轮和法兰盘进行动平衡。

3.12 提高机床动态精度的调整

机床电机转子的动平衡可进一步减小机床的振动。此外,传动皮带的松紧度^[11]、砂轮电机座与砂轮架之间隔振片的数量与类型^[12]、地基螺栓的松紧等因素都会影响到机床的动态性能。借助于动态信号分析仪,对机床关键部位进行振动量化测试,可进一步提高机床的动态精度。

4 磨齿操作

4.1 开车预热

机床不同,砂轮主轴轴承预紧力不一定相同,其砂轮主轴的轴向热伸长规律也不一样。根据机床各自的轴热伸长规律,合理选择不同磨齿工况下的预热时间,可提高磨齿效率与磨齿质量。

4.2 E 值的调整与对刀

定义头架滑到最低位置时,齿轮轴线与大平面砂轮工作面之间的距离为 E 值,如图 4 所示。为了保证能磨出完整的渐开线,此位置应对应齿轮渐开线的最低点。当被磨齿轮的齿根圆半径大于基圆半径时, E 值为一正值,其表达式为:

$$E = \sqrt{r_f^2 - r_b^2} = \frac{m}{2} \sqrt{(z - 2h_f^*)^2 - (z \cos \alpha)^2}, \quad (3)$$

式中, r_f 为齿轮根圆半径; m 为齿轮的模数; z 为齿数; h_f^* 为齿根高系数; α 为被磨齿轮分度圆压力角。

当齿根圆的半径小于或等于基圆半径时, E 值应取 0。对于标准齿轮,齿数小于 41 齿时, $E=0$ 。

调整 E 值时,头架滑到最低点,使用定心规(如图 4 所示)或线坠将砂轮工作面对齐磨齿芯轴的轴线,然后转动退刀手轮,使砂轮后退相应的 E 值。

对刀前,通过机床左侧的手轮调整砂轮纵向

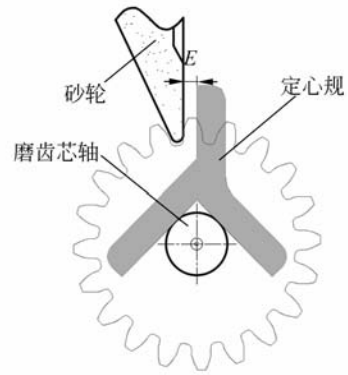


图 4 用定心规调整 E 值

Fig. 4 Adjustment of E by centering gauge

的位置。调整时应尽量使磨削的最深位置对准齿轮的测量截面。对刀时必须保证砂轮工作面与被磨齿坯的渐开线部分接触。一般在齿坯齿根圆与分度圆之间的区域对刀,此时砂轮可不必全部落入齿槽,头架从最低位置往上运动约 0.2 倍的渐开线凸轮廓展成长度。对刀时刻既可在开车预热前进行,也可在开车预热后进行。开车预热前的对刀完成后必须进行退刀操作,退刀量要略大于砂轮轴热平衡的伸长量。开车预热后的对刀也要进行适量的退刀操作。

精加工前,展成运动与分度运动要注油跑和。注油的部位和润滑油的种类有:导轨和挡板油杯加机床导轨油;加工主轴轴承、分度盘轴承、分度挂轮轴承、砂轮轴后轴承等部位加 40 # 机油。

4.3 砂轮进刀与磨齿加工

砂轮进刀包括径向进刀和进给进刀。砂轮一般先径向进刀至全齿高,然后再进给进刀。进给量遵循:粗磨 $2 \sim 4 \mu\text{m}$,半精磨 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,精磨 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 。根据工件的齿廓偏差选择磨削类型及磨削用量。

4.3.1 粗磨

对于初次加工或去量操作的齿面可选择粗磨。粗磨以去量为目的,因此,粗磨后齿面的粗糙度和精度不高。为了防止齿面烧伤,砂轮选择粗修即可。对于齿形精度较高的齿坯,可跳过粗磨工序,直接选择半精磨。

4.3.2 半精磨

根据前一刀齿形误差的大小确定半精磨的磨削用量,由于磨削过程中存在误差复映现象,磨削用量至少要取 $3 \sim 5$ 倍的理论校正量。齿廓偏差的理论校正量可用齿廓最大形状偏差与齿廓最大

倾斜偏差之和进行估计。通过半精磨后,齿轮的齿廓偏差基本得到校正,此时磨削较为均匀(通过磨削声音及磨削火花的均匀程度进行判断)。

4.3.3 精磨

精磨可进一步减小误差复映,并进一步校正齿廓偏差,一般精磨的磨削总量为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。如果选择每刀 $0.5\ \mu\text{m}$ 的进给量,分5次进给,进给时刻如图5所示:

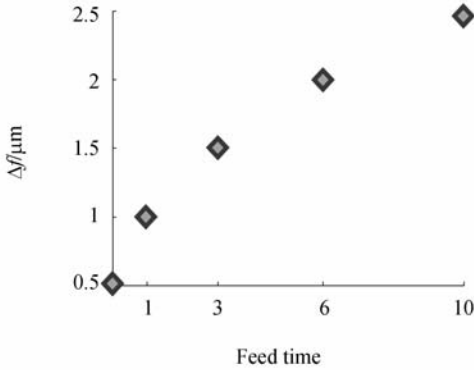


图5 精密磨齿的进刀时刻

Fig. 5 Feed time of precision grinding

4.3.4 光整加工(微火花磨)

精磨后进入光整加工阶段,此阶段可选择不进刀或 $1\ \mu\text{m}$ 以下的微量进刀,主要靠磨削系统的弹性回复力进行微量磨削。光整加工期间砂轮可进行 $3\sim 5$ 次的径向微量退刀操作,以消除由砂轮修整引起的齿面凸点。光整加工主要用于提高齿面的光洁度,磨削时间的长短视具体情况而定。一般在砂轮处于半塞实状态,光整加工 $5\sim 10$ 圈之后,且齿面未出现磨削烧伤时,可停车测量。砂轮径向退刀提高齿廓精度的原理如图6所示。

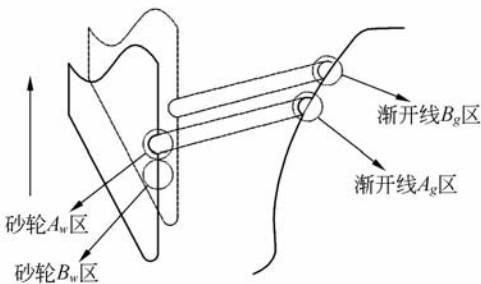


图6 砂轮径向退刀磨削示意图

Fig. 6 Schematic diagram of wheel radial retraction

砂轮 A_w 区有一凹点,对应被磨渐开线 A_g 区为一凸点。砂轮径向退刀后,非凹区 B_w 区将对应到渐开线的凸点 A_g 区,因此可以对渐开线的凸点进行二次磨削,而砂轮的凹点 A_w 不参加磨削渐开线的 B_g 区。事实上,被磨齿面上有大量的由砂轮修整不平引起的微观凸点,砂轮退刀操作可有效地减小或消除齿面上的这些凸点,进一步提高被磨齿轮的齿廓和螺旋线精度。砂轮径向退刀总量的选择以不减少测量评定区间渐开线的展成长度为依据。而对砂轮凸点引起的齿轮齿廓偏差,只能通过精修砂轮进行校正。

4.4.4 砂轮修整

砂轮修整分为粗修和精修两种方式。

粗修时,金刚石的粒度可选择 $2\sim 3$ 倍砂轮的粒度。工作行程 $1\sim 2$ 次,进刀量 $0.02\sim 0.08\ \text{mm}$,空行程1次即可,修整速度为 $2\sim 5\ \text{mm/s}$ 。

精修时,金刚石的粒度可选择 $1.5\sim 2$ 倍砂轮的粒度。工作行程 $1\sim 2$ 次,进刀量 $0.005\sim 0.01\ \text{mm}$,空行程 $1\sim 2$ 次,修整速度 $0.5\sim 2\ \text{mm/s}$ 。精修砂轮对应于齿轮的精磨工序。对于同一片砂轮,选择小粒度的金刚石笔及小进刀量慢速修整,可使砂轮形成微刃,有利于提高被磨齿轮的齿廓精度。砂轮精修示意图如图7所示。

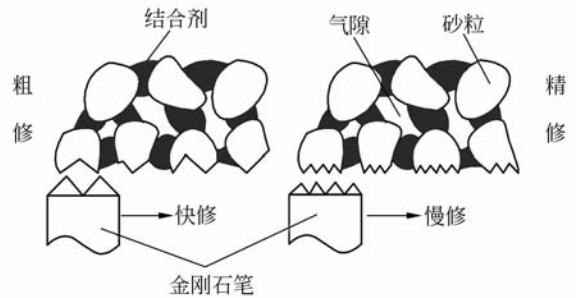


图7 砂轮精修示意图

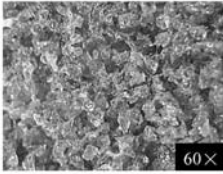
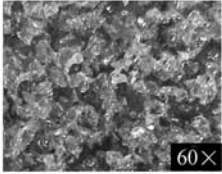
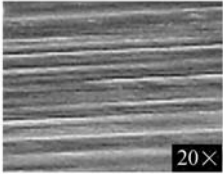
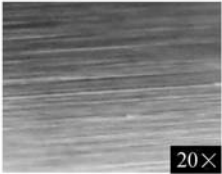
Fig. 7 Schematic diagram of precision dressing

为提高磨齿效率,齿轮的精磨、半精磨及光整加工工序可在同一台磨齿机上,用同一片砂轮,工件一次装夹来完成。

选择F80#、V结合剂单晶刚玉砂轮和FB46#金刚石笔进行半精磨与精磨实验,砂轮和工件的表面形貌如表1所示:

表 1 半精磨与精磨工序砂轮和工件的表面形貌

Tab.1 Surface topography of wheel and workpiece in semi-precision and precision processing(F 80V、BF 46)

形貌	半精磨	精磨
砂轮形貌		
齿面形貌		

金刚石笔在使用过程中由于总在一个方向上修整,会逐渐变钝,影响磨齿精度。此时,松开固定金刚石笔的紧定螺钉,将金刚石笔相对于砂轮修整器旋转某一角度(一般为 90°),可使金刚石笔变锋利。

4.4.5 停车时刻的选择

磨齿时间的长短一般根据磨齿工况及磨削进给量来判断。齿面完全磨匀、表面未出现磨削烧伤,并且砂轮处在半塞实状态下方可停车测试。齿面完全磨削均匀后,齿面上的信息可较好地反映出机床的工作状态,以便通过偏差测量调整机床参数,进一步校正齿轮的齿廓、齿距或螺旋线精度。齿面是否磨削均匀,一般通过操作者观察磨削火花和磨齿声音的大小与均匀程度来判断。

4.4.6 油煮时效

油煮时效可进一步释放磨削产生的应力,保持齿轮精度稳定性。一般油煮时效安排在最后一刀精磨前,并留出 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 的加工余量。油煮时效在电热恒干燥箱里进行,时效温度为 $120\ ^\circ\text{C}$,时间为 16 h,如图 8 所示。

4.4.7 后期处理与保存

加工过程中,工件的定位基准面和内孔难免有细微划痕致使表面粗糙度下降。在工件精度全部鉴定合格后,需要对这些基准面进行研修或抛光处理,例外需一并完成倒棱、去毛刺的工作。然后,清洁、涂防锈油、包装封存。



图 8 油煮时效

Fig. 8 Aging by oil-boiling

5 实验试件示例

使用实验室精化改造后的 Y7125 磨齿母机对标准齿轮试件 m2z60-2003 (齿坯参数: $m=2\ \text{mm}$, $z=60$, $\alpha=20^\circ$, $b=20\ \text{mm}$, $\beta=0^\circ$) 和 m4z30-4007 (齿坯参数: $m=4\ \text{mm}$, $z=30$, $\alpha=20^\circ$, $b=25\ \text{mm}$, $\beta=0^\circ$) 进行磨齿实验,并在中国计量科学研究院使用克林贝格 P65 齿轮测量中心及实验室研制的齿廓、螺旋线、齿距和径向跳动单项测试仪上进行精度测试与量值比对,测试结果如表 2 所示。

表 2 标准齿轮试件测试结果

Tab.2 Measurement results of master gears (μm)

m2z60-2003	0 级	1 级	*	**	等级
齿廓形状偏差 f_{te}	0.8	1.1	0.9	1.0	1
齿廓倾斜偏差 $\pm f_{H\alpha}$	0.7	0.9	0.4	0.2	0
★齿廓总偏差 F_α	1.0	1.5	0.9	1.0	0
★齿距偏差 f_{pt}	0.9	1.3	0.9	0.9	0
★齿距累积总偏差 F_p	3.3	4.6	2.2	2.0	0
螺旋线形状偏差 f_{β}	0.9	1.3	0.5	0.6	0
螺旋线倾斜偏差 $\pm f_{H\beta}$	0.9	1.3	0.8	0.9	0
★螺旋线总偏差 F_β	1.3	1.9	0.7	1.2	0
齿圈径跳偏差 F_r	2.5	3.5	2.8	2.5	0
m4z30-4007	0 级	1 级	*	**	等级
齿廓形状偏差 f_{te}	1.3	1.8	1.3	1.4	1
齿廓倾斜偏差 $\pm f_{H\alpha}$	1.1	1.5	1.0	0.6	0
★齿廓总偏差 F_α	1.7	2.4	1.5	1.5	0
★齿距偏差 f_{pt}	1.1	1.6	0.6	0.8	0
★齿距累积总偏差 F_p	3.4	4.9	3.0	3.6	1
螺旋线形状偏差 f_{β}	1.1	1.5	0.5	0.6	0
螺旋线倾斜偏差 $\pm f_{H\beta}$	1.1	1.5	0.7	0.9	0
★螺旋线总偏差 F_β	1.5	2.1	0.7	1.0	0
齿圈径跳偏差 F_r	3.0	4.0	2.3	2.3	0

注:★——ISO 1328-1:1995 齿轮国际标准规定的必检项目;

* ——中国计量科学研究院测试结果;

** ——大连理工大学高精度齿轮研究室测试结果。

由表2可知:大连理工大学高精度齿轮研究室研制的m2和m4中模数基准标准齿轮全面达到齿轮国际标准ISO 1328-1:1995中的1级精度,其中大部分指标达到0级精度。

6 结 论

本文选择Y7125型大平面砂轮磨齿机为工具机,以研制1级精度基准标准齿轮为主要目标,

从齿坯工艺与基准修复、机床参数的优化调整及科学的磨齿操作等方面对超精密磨齿工艺理论与方法进行了探讨与研究,并通过科学的磨齿实验研制出了ISO 1328-1:1995中的m2和m4中模数1级精度的基准标准齿轮。超精密齿轮磨齿工艺技术为磨削基准标准齿轮与超精密齿轮刀具提供了技术基础。1级精度基准标准齿轮的研制提高了我国齿轮实体标准的传递精度,对于我国齿轮制造技术与水平的全面提升有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 俞仁楠. 小模数齿轮行业分析[C]. 2007年(诸暨)年会论文集. 中国齿轮专业协会年会,浙江诸暨:CGMA, 2007-10: 34-38.
YU R N. Analysis of fine_gear industry[C]. *Years proceedings of CGMA2007. Years of CGMA, Zhejiang Zhuji:CGMA*, 2007-10:34-38. (in Chinese)
- [2] 王立鼎,凌四营,马勇,等. 精密、超精密齿轮的加工方法[J]. 光学精密工程,2009,17(2):321-325.
WANG L D, LING S Y, MA Y, *et al.*. Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(02):321-325. (in Chinese)
- [3] 王立鼎,卢占山. 模数2基准标准齿轮的研制[J]. 光学精密工程,1982,(04):28-34.
WANG L D, LU ZH SH. Development of normal master gear with modulus 2[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1982,(4):28-34. (in Chinese)
- [4] 刘兵,马勇,凌四营,等. 精密检齿芯轴的误差分离方法[J]. 工具技术,2010,44(03):92-95.
LIU B, MA Y, LING S Y, *et al.*. Error separation method of precise gear-measuring mandrel [J]. *Tool Engineering*, 2010, 44(03):92-95. (in Chinese)
- [5] 秦乘常,庞仙德. 怎样磨剃齿刀[M]. 北京:机械工业出版社,1977:11-12.
QIN B CH, PANG X D. *How to Grind Gear Shaving Cutter* [M]. Beijing: China Machine Press, 1977: 11-12. (in Chinese)
- [6] 磨齿工作原理编写组. 磨齿工作原理[M]. 北京:机械工业出版社,1977:170-173.
Editor Group of Gear Grinding Principle. *Gear Grinding Principle* [M]. Beijing: China Machine Press, 1977: 170-173. (in Chinese)
- [7] WANG L D, LING S Y, MA Y, *et al.*. Effects of comprehensive eccentricity of involute cam on gear profile deviations[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(3):392-398.
- [8] 王立鼎. 在用分度盘分度的磨齿机上被磨齿轮周节精度的研究[J]. 精密制造与自动化,1981,3:35-41.
WANG L D. Study of gear pitch accuracy on gear grinder with indexing plate[J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 1981, 3:35-41. (in Chinese)
- [9] 凌四营,王立鼎,马勇,等. 大平面砂轮磨削面锥形误差对齿轮齿廓偏差的影响[J]. 制造技术与机床,2010(08):116-120.
LING S Y, WANG L D, MA Y, *et al.*. Effect of cone-shaped error of flat-faced wheel's grinding face on gear profile deviation[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010(8):116-120. (in Chinese)
- [10] 凌四营,王立鼎,马勇,等. 控制大平面砂轮磨削面锥形误差提高齿轮螺旋线精度[J]. 光学精密工程,2010,18(3):630-636.
LING S Y, WANG L D, MA Y, *et al.*. Improving gear helix accuracy by controlling cone-shaped error of flat-faced wheel's grinding face [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):630-636. (in Chinese)
- [11] 凌四营,王立鼎,马勇,等. 皮带松紧度对Y7125磨齿机振动影响的实验研究[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(5):525-528.
LING S Y, WANG L D, MA Y, *et al.*. Experimental study on the influence of belt tightness on grinder Y7125's vibration [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(5):

525-528. (in Chinese)

- [12] 王庆男, 马勇, 凌四营. 隔振片数量对 Y7125 型磨齿机振动影响的实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(5):34-38.

WANG Q N, MA Y, LING S Y. Experimental study on the influence of number of damping sheets on grinder Y7125's vibration [J]. *Noise and Vibration Control*, 2010, 30(5):34-38. (in Chinese)

作者简介:



凌四营(1978—),男,山东日照人,博士后,2002年于山东交通学院获得学士学位,2007年山东理工大学获得硕士学位,2011年于大连理工大学获得博士学位,主要从事高精度标准齿轮及齿轮刀具制造技术的研究。E-mail:luckling168@163.com



李克洪(1979—),男,辽宁大连人,助理工程师,1995年于大连理工大学获得学士学位,主要从事高精度标准齿轮制造技术的研究。E-mail:likehongxin@sina.com



马勇(1955—),男,辽宁大连人,副教授,1982年于大连工学院获工学学士学位,1987年于阜新矿业学院获工学硕士学位,主要从事精密加工与精密测试技术、超精密标准齿轮研制等方面的研究。E-mail:yongma@dlut.edu.cn

导师简介:



王立鼎(1934—),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师,中国科学院院士,1960年于吉林工业大学获得学士学位,主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计 & 微纳米机械的研究。E-mail:wangld@dlut.edu.cn

● 下期预告

振动模态对压电发电机陶瓷片粘贴位置的影响

刘树林,许小勇,翟宇毅,刘彦峰,李余珍
(上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200072)

为了研究一阶、二阶模态下,压电单晶悬臂梁振动发电机陶瓷片最佳贴片位置,利用欧拉伯努利梁模型,讨论了一阶与二阶模态下陶瓷片最适宜的贴片位置,并通过电机开路电压、短路电流及 LED 照明试验,得到了最佳贴片位置。在一阶模态时,陶瓷片贴于悬臂梁根部的电机能够获得最大的发电量,通过对 4 种不同贴片位置电机的发电试验分析,陶瓷片贴于根部的电机开路电压及短路电流分别是其他电机的 4 倍以上,其驱动的 LED 功率为其他电机的 10 倍以上。而对于二阶振型,陶瓷片贴于悬臂梁中间位置的电机发电量最大,贴于根部位置的电机次之,6 种不同贴片位置电机的发电试验表明,前者开路电压、短路电流分别为后者的 1.2 倍和 1.9 倍以上,两者驱动的 LED 功率相差 1.4 倍以上。试验结果与计算结果均表明:一、二阶模态时悬臂梁最佳贴附位置分别是根部和中间位置,需根据不同振型选择陶瓷片最佳粘贴位置。