

精密加工

# 精密磨齿砂轮误差分析\*

刘铁军<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>3</sup>

(1.中国科学院研究生部, 北京 100039; 2.长春奥普光电技术股份有限公司, 长春 130033;  
3.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

[摘要] 在磨削齿轮过程中, 由于砂轮精度难以测定, 对其误差分析应从齿轮检测图分析入手, 推导出砂轮的具体状态, 从而为精密磨削齿轮提供修整方向, 并最终为生产高精密齿轮提供理论依据。

[关键词] 磨齿; 误差; 精度

[中图分类号] TH132.41

[文献标识码] A

[文章编号] 1003-5451(2009)01-0009-04

## Analyses on Error of Grinding

LIU Tie-jun, DING Ya-lin

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033

3. Changchun UP Optotech Co., Ltd, Changchun 130033)

[Abstract] The grinding accuracy was hard to measure in grinding gear process. It can be examine the diagram from the gear analysis commence. The grinding state was deduced and the modifying direction of gear was given. The theoretical basis was presented for producing high and precise gear.

[Keywords] grinding; error; accuracy

## 1 引言

理论上, 磨齿可以达到的精度等级为 6~3 级, 但由于砂轮误差、齿坯误差、机床误差和其他误差的存在, 实际可达到的精度等级约为 6~4 级。在影响精度等级的误差中, 机床误差和其他误差为不可消除误差, 上述两种误差的大小主要取决于现代科技的发展; 而齿坯误差会随着加工工艺的完善和补偿技术的发展日趋减小。与之不同的是砂轮误差影响

齿轮精度等级的因素较多, 较为复杂, 本文将从各个相关方面分析由砂轮引起的误差, 从而证明通过人为的适当调整可促进磨削齿轮精度等级的提高。

## 2 理论分析

蜗杆式砂轮磨齿机磨削齿轮时, 工作原理(如图 1 所示)是砂轮相当于渐开线的蜗杆, 工件沿自己的轴线进给, 工件与砂轮按照传动比各自围绕自己的轴线回转<sup>[2]</sup>。以磨削高精度渐开线齿轮为例, 分析如下:

\* 国家自然科学基金资助项目(No.60574089)

中科院长春光机所三期创新工程资助项目  
(057X22C050)

由图 1, 即可得到下式:

$$R_0 = \frac{V_P}{w} \cos \alpha \quad (1)$$

微分上式并取增量得:

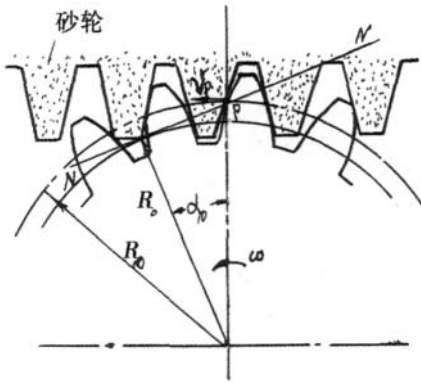


图 1 磨齿示意图

$$\Delta R_0 = \frac{\cos \alpha}{w} \Delta V_P - \frac{V_P}{w} \sin \alpha \Delta \alpha - \frac{V_P}{w^2} \cos \alpha \Delta w \quad (2)$$

式中:  $\Delta V_P$ ——砂轮沿本身轴线位移线速度误差;  
 $\Delta \alpha$ ——砂轮齿形误差;  
 $\Delta w$ ——齿轮旋转角度误差。

由公式(2)可知,  $\Delta \alpha$ 、 $\Delta V_P$ 、 $\Delta w$  是影响基圆半径  $R_0$  误差的主要因素, 也是磨削时影响齿轮齿形误差的主要内因。 $\Delta w$  为机床传动误差和齿坯安装偏心所造成的误差, 本文不做分析。本文主要分析的是砂轮齿形角误差  $\Delta \alpha$  引起的齿形误差及砂轮沿本身轴线位移线速度误差  $\Delta V_P$  引起的齿形角误差。

### 2.1 砂轮齿形角误差对齿形精度的影响

公式(2)中第二项表示砂轮齿形角误差引起的基圆半径变化, 理想状态下  $\Delta V_P$ 、 $\Delta w$  不存在, 齿形误差由下式计算:

$$\Delta f_0 = -\pi \varepsilon m \Delta \alpha \sin \alpha^{[2]} \quad (3)$$

式中:  $\Delta f_0$ ——齿形误差,  
 $\varepsilon$ ——刀具与砂轮的重合度。

$$\Delta t_0 = \Delta t \cos \alpha \quad (4)$$

式中:  $\Delta t_0$ ——基节误差,  
 $\Delta t$ ——周节误差。

从(3)、(4)公式, 可以看出: 周节误差的变化会引起齿轮啮合长度的变化, 同时, 当  $\alpha$  变化时会引起基节误差和齿形误差的变化, 从而导致齿轮工作

表 1 砂轮齿形角误差与齿形精度对比表

砂轮	规格				$\varepsilon$	$\Delta f_0$	占齿形误差百分比
	m	z	$\alpha$	$f_1$			
齿轮	0.5	160	20°	1	1.920	0.00093	23.26%
	0.6	150			1.917	0.00111	27.82%
	0.8	100			1.905	0.00148	37%
	1.0	80			1.894	0.00184	46.05%

平稳性的破坏。

以砂轮齿形角误差  $\Delta \alpha = 3'$  为例, 磨削精度等级 4 级的齿轮所引起的齿形角误差见表 1:

由表 1 可得出, 砂轮齿形角误差对齿轮齿形精度的影响是非常重要的, 当其他条件不变时, 齿形误差随着模数的增大而增大, 随着齿数的增加而减小。由此可见, 若要磨削高精度齿轮就必须严格控制砂轮的齿形角误差。

### 2.2 砂轮沿本身轴线位移线速度误差 $\Delta V_P$ 对齿形角精度的影响

砂轮沿本身轴线位移线速度误差  $\Delta V_P$  包括砂轮的安装误差、砂轮的齿距误差和砂轮齿距累积误差。

#### 2.2.1 砂轮的齿距误差

砂轮安装时的不平衡即砂轮的齿距误差是影响砂轮精度的主要因素。砂轮的不平衡会引起径向跳动和轴向窜动, 导致砂轮主轴的摆振, 这种摆振使齿面粗糙度值增大, 砂轮表面磨损不均匀和齿面出现啃斑。所以由该项引起的齿形误差, 可以通过下列公式(5)计算:

$$\Delta f_i = \Delta t_1 \sin \alpha + \Delta t_2 \cos \alpha \quad (5)$$

式中:  $\Delta f_i$  由  $\Delta t_1$  为径向跳动和  $\Delta t_2$  为轴向窜动引起的齿形误差。

高精度齿轮在工作中为保持其精度, 就必须有好的齿面光洁度, 而在相同条件下, 平衡好的砂轮能提高齿面的光洁度<sup>[3]</sup>。因该误差是非周期固有误差, 不可忽略。所以要加工高精度的齿轮, 必须严格平衡砂轮并使砂轮锋利, 尽可能的通过人为控制, 使误差最小。

#### 2.2.2 砂轮的齿距误差 $\Delta t_{Ti}$ 和砂轮齿距累积误差 $\Delta t_{\Sigma}$

在不考虑砂轮的螺纹升角影响的前提下, 相邻齿距误差可通过式(6)计算:

$$\Delta t_{T1} = \varepsilon \cos \alpha \Delta t_{\pi} \quad (6)$$

式中:  $\Delta$ ——砂轮齿距误差。

砂轮的齿距累积差引起的齿轮齿形误差变化, 可通过式(7)计算:

$$\Delta f_{\Sigma} = \frac{\Delta t_{\Sigma}}{Z} \cos \alpha \times \varepsilon \quad (7)$$

式中:  $\Delta t_{\Sigma}$ ——砂轮的齿距累积误差;

$Z$ ——齿轮齿数。

值得说明的是砂轮若为单头, 砂轮螺旋线经修整器一次修整后的齿距误差、齿距累积误差很小, 反映在齿轮的相邻差不大。但砂轮若为双头, 砂轮有两条螺旋曲线, 修整器不能一次修整完成, 造成齿距、齿距累积误差的不一致, 因此在磨削加工中, 不仅掺杂了机械误差, 而且加入了修整器的误差。所以在加工齿轮中, 为了避免不必要的误差产生, 应尽量选择单头砂轮。

通过上面的分析, 可以看出砂轮影响齿轮误差最主要的方面分别为砂轮的安转误差、砂轮的齿距误差和砂轮齿距累积误差。因此, 齿轮精加工中砂轮的精度对齿轮精度的提高具有重要的作用。所以, 制造高精度齿轮的前提是对砂轮进行精密修整。砂轮误差主要由砂轮修整机构造成, 它直接反映在被加工齿轮的齿形、齿向、相邻差等方面。事实上, 砂轮为不确定精度, 所以只能通过对所加工齿轮的精度测量, 推导出砂轮的状态, 指导砂轮修整机对砂轮进行修整。图 2 为砂轮修整机构误差、砂轮的误差和齿轮的误差传递关系图。

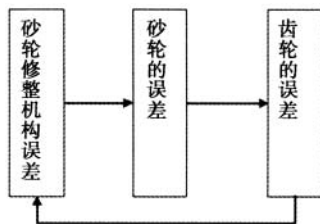


图 2 误差传递图

从图 2 中可以看出, 砂轮误差对齿轮误差具有直接重要的影响。

### 3 实验过程和结果

#### 3.1 实验过程与分析

实验设备: 蜗杆式砂轮磨齿机, 其参数如表 2 所示。

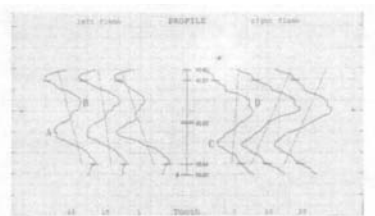
表 2 蜗杆式砂轮磨齿机基本参数范围

基本参数	范围
砂轮直径	Φ300mm
磨削工件最大直径	Φ200mm
磨削齿轮的模数	0.4~3

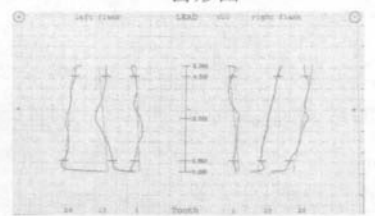
拟做齿轮: 材料 40Cr  $m=1, z=40, D=5$  级, 齿形 $=6\mu\text{m}$ , 齿向 $=5\mu\text{m}$ , 周节累计差 $=14\mu\text{m}$ 。

实验过程(如图 3、图 4 所示)

砂轮存在误差, 所加工的齿轮:



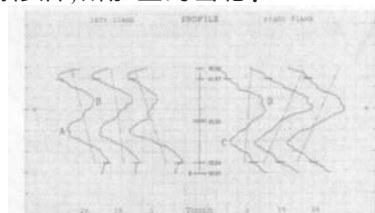
齿形图



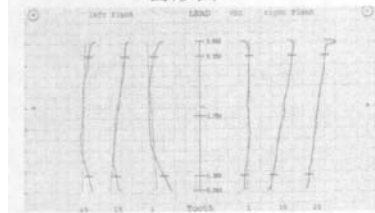
齿向图

图 3 砂轮存在误差时的齿形图

砂轮精修后, 所加工的齿轮:



齿形图



齿向图

图 4 砂轮精修后齿形、齿向图

分析(1)组齿形图:齿形曲线底部的倾斜角度明显大于顶部的倾斜角度,说明砂轮的压力角存在误差,同时也说明砂轮修整机构存在压力角误差。图中 A、D 点在齿面上表现为凹陷部位,而 B、C 点在齿面上表现为凸起部位,这些缺陷主要由砂轮不平衡摆振和砂轮齿距误差所引起的共同合成误差。对比(1)(2)组齿形图可看出,在相同条件下,平衡好、锋利的砂轮能提高齿面的光洁度,从而提高齿轮的精度。

3.2 实验结果与讨论

当齿轮齿形不好时,会导致瞬时传动比为不定值,也就意味着转动不恒速,不均匀传动,其配对齿轮在转动过程中产生角加速度,传动时会引起冲击

表 4 参考磨齿机砂轮误差与磨齿精度对比表

砂轮各项误差			齿轮精度指标		结果
砂轮安装后端面跳动	砂轮安装后径向跳动	砂轮节距变化	齿形精度(要求 5 级)	齿向精度(要求 5 级)	精度对比
1.8μm	3.6μm	4.4μm	6μm	5μm	25%

正如表 4 所示,齿轮误差是各个单项指标的综合体现<sup>[5]</sup>,即砂轮的各项单项误差将最终体现在加工后的齿轮误差上。如:砂轮安装后的摆振会引起齿轮相邻差和周节累计差;砂轮的磨损会引起齿轮的齿形偏差和相邻差等误差。同时,实验也证明人为的正确参与可以尽量减小齿轮的部分单项误差的产生。在齿轮加工中,磨削齿轮虽也不能避免误差的产生,但是通过误差分析、人为的调整则可以降低相关误差发生的可能性。所以,磨削齿轮仍是生产高精密齿轮首选的一种加工方式。

4 结论

本文在要求磨削高精度齿轮的前提下,对砂轮所产生的齿轮误差进行了分析研究。在理论与实践相结合的条件下,对砂轮存在多个影响齿轮精度的因素进行实测。检测间接表明,通过人为的正确修

载荷的发生,啮合齿面的压力增大,瞬时温度升高,润滑油易失效,摩擦加剧,易发生胶合现象<sup>[4]</sup>;齿向不好时,会在齿宽方向上有载荷不均,在啮合齿轮中,发生啮合歪曲,对齿轮轴有分量冲击载荷,特别是对齿距的累计误差影响最大。表 3 为砂轮修整前后实验数据对比可以看出,对齿轮的部分单项误差,通过人为的正确参与,可以减小误差的产生,避免上述不良现象的发生。

表 3 实验过程数据对比表

	齿形/μm	齿向/μm	周节累计差/μm	精度等级
(1)组数据	12.5	7	16.2	7
(2)组数据	6	4	12	5

正与调整,磨齿是获得高精密齿轮的首选加工方式。随着现代工业的进步,高精密齿轮的普遍运用是工业发展的必然趋势,而齿轮误差的消除将是齿轮发展永恒的课题。

参考文献:

[1]刘品,李哲.机械精度设计与检测基础[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.  
[2]商向东.齿轮加工精度[M].北京:机械工业出版社,2000.  
[3]吴炎明,陶晓杰.齿轮数控加工技术的研究[M].合肥:合肥工业大学,2005.  
[4]田克华.互换性与测量技术基础[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996.  
[5]毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1982.

(收稿日期 2008-10-10)