

文章编号 1004-924X(2009)02-0321-06

精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法

王立鼎^{1,2}, 凌四营¹, 马 勇¹, 王晓东^{1,2}, 姜志峰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 高精度齿轮研究组, 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:研究了精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工方法。分析比较了锥形砂轮磨齿、蝶形砂轮磨齿、大平面砂轮磨齿、蜗杆砂轮磨齿和成形砂轮磨齿的工作原理及当前国内外精密、超精密圆柱渐开线齿轮的加工现状。探讨了 ISO1328:1997 标准中 2 级以上精度超精密齿轮的加工。最后,指出大平面砂轮磨齿机 Y7125 有着结构简单、传动链刚度高、磨齿精度高等优点,具有较大的改装空间。通过一系列的研究工作,有可能将其改装精化成磨削超精密圆柱渐开线齿轮的加工母机,实现 2 级到 1 级精度超精密齿轮的加工。1 级精度超精密齿轮的研制成功,可提高齿轮的传递基准,从而可提高齿轮制造的技术水平。

关键词:圆柱渐开线齿轮;超精密齿轮;磨齿原理;精密加工

中图分类号:TH132.413 **文献标识码:**A

Processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gear

WANG Li-ding^{1,2}, LING Si-ying¹, MA Yong¹, WANG Xiao-dong^{1,2}, LOU Zhi-feng¹

- (1. High precision Gear Research Group, 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)

Abstract: In order to enhance technological level of gear manufacturing comprehensively, the processing methods of precision and ultra-precision cylindrical involute gears were researched. The work principles of several gear-grindings and machining statuses of ultra-precision cylindrical involute gears were analyzed and compared. Then, machining of ultra-precision gear above quality 2 (ISO1328:1997) was probed. Finally, the gear grinder Y7125 with big plan wheel provided with the advantages of streamline structure, high rigidity of transmission chain, high accuracy of gear-grinding and much room to modify was pointed. Research results show that the grinder Y7125 is probably to be a master grinder of ultra-precision cylindrical involute gear to produce ultra-precision gear from quality 2 to quality 1. The development of ultra-precision with quality 1 can enhance the gear normal and technological level of gear manufacturing.

Key words: cylindrical involute gear; ultra-precision gear; principle of gear-grinding; precision machining

收稿日期:2008-05-22;修订日期:2008-07-10.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042506)

1 引言

齿轮是机械零件中重要的基础件,尤其是圆柱渐开线齿轮在常规机械、地面交通、船舶、航空航天机械、兵器及精密机床与仪器等领域应用广泛,每年需求量达数亿件之多。随着科学技术的发展,人们对齿轮精度的要求也日益提高。

所谓超精密齿轮是指轮齿制造精度达到 ISO1328:1997 齿轮标准(下同)中的 3 级精度以上的齿轮。超精密齿轮一类用于国防,另一类用作齿轮精度传递基准及检定齿轮测量仪器。近几十年来,中国的齿轮工业持续快速发展,产量剧增,而总体制造质量不及美、德等国^[1]。中国要想成为齿轮制造强国,就必须走自主创新之路。因此,研制高精度的标准齿轮,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。

2 精密渐开线齿轮的加工方法

渐开线齿轮的加工工艺根据齿轮的成形方法可分为成形法、展成法;根据加工方法可分为滚齿、铣齿、插齿、梳齿、刨齿、剃齿、珩齿、磨齿、挤齿等。常见齿轮加工方法的工作精度及获得的表面质量如表 1 所示。

表 1 常见齿轮加工方法的加工精度与表面质量

Tab. 1 Work accuracies and surface qualities of common gear-processing methods

齿轮加工方法	工作精度 (ISO1328)	最高精度 (ISO1328)	表面质量 $Ra(\mu\text{m})$
滚齿	7~5	4	3.2~1.6
插齿	8~6	5	6.3~3.2
剃齿	7~6	5	3.2~1.6
珩齿	7~6	6	0.8~0.2
磨齿	6~4	3级以上	0.8~0.2

通过表 1 可以看出,磨齿法是精密齿轮最有效的加工方法。磨齿法根据所用砂轮的类型不同,又分为锥形砂轮磨齿、碟形砂轮磨齿、大平面砂轮磨齿、蜗杆砂轮磨齿和成形砂轮磨齿等^[2]。

2.1 锥形砂轮磨齿

锥形砂轮磨齿工作原理如图 1 所示,是按照齿轮和齿条啮合原理。用锥面砂轮磨削渐开线齿

面的。砂轮相当于假想齿条的一个齿,在磨削过程中,齿条的节线和被磨齿轮的节圆作纯滚动。锥形砂轮磨齿的分度运动用分度盘或分度蜗轮副、分度交换齿轮进行单齿分度,磨完一齿后分过一个齿角,再磨下一齿,这样直到磨完全齿。轴向进给运动由砂轮的往复运动来实现,其往复冲程长度由被磨齿轮的齿宽决定。

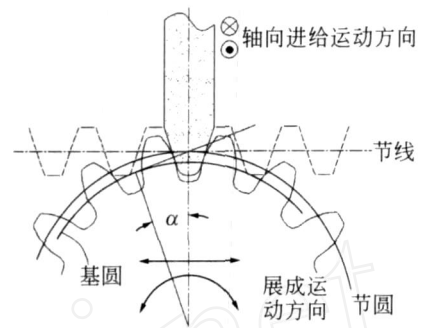


图 1 锥形砂轮磨齿工作原理

Fig. 1 Work principle of gear grinding with tapered wheel

锥形砂轮磨齿是一种展成磨齿法,磨齿的工作精度一般在 7~5 级。德国的 NILES 公司生产的 ZSTZ 系列的数控锥砂轮磨齿机和 HOFLER 齿轮机床公司生产的 NOVA 系列的数控锥砂轮磨齿机工作精度较高,可达到 4 级精度。

2.2 碟形砂轮磨齿

碟形砂轮磨齿工作原理如图 2 所示,它是采用一对碟形砂轮来磨齿的,源于瑞士 MAGG 公司的齿轮磨床。

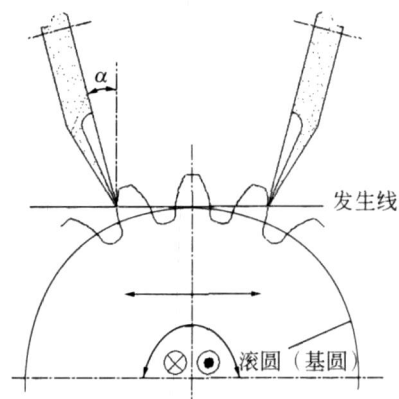


图 2 碟形砂轮磨齿工作原理

Fig. 2 Work principle of gear grinding with dish wheel

该类小规格机床的展成运动常采用钢带-滚

圆盘作纯滚动来实现。处在钢带平面上的两砂轮的工作棱边相当于渐开线发生线上的两点,当钢带和滚圆盘相对滚动时,两棱边同时分别形成齿两侧的渐开线齿形。机床的分度运动是用分度盘进行单齿分度的,即在齿轮经过轴向走刀磨完第一个齿后,工件分过一齿,再开始磨下一个齿,这样逐齿磨削,直到磨完全齿。大规格碟形砂轮磨齿机的展成运动常采用分度蜗轮副及分度交换齿轮进行分度。

国内秦川机床厂生产的 Y7032A 和 Y7P032A,上海机床厂生产的 Y7063A 蝶形砂轮磨齿机磨齿精度达到了 4 级。瑞士 MAAG 公司生产的双碟砂轮磨齿机 SD-36-X,采用 CNC 拓扑修形系统和 CBN 砂轮磨削,磨齿精度可达 4~3 级。

2.3 大平面砂轮磨齿

大平面砂轮磨齿工作原理如图 3 所示,它是利用齿条与齿轮啮合的原理,用大平面砂轮的工作面作为“假想齿条”的一个齿面,用展成法加工齿轮的。其中展成运动的实现又分两类:一类是采用钢带-滚圆盘纯滚动形成展成运动,例如 Gleason 集团研制的 SRS405 数控大平面砂轮剃齿刀磨齿机及国产的 Y7432 磨齿机等;一类是采用渐开线凸轮-档块形成展成运动,例如美国的 National Tool 型、前苏联的 589 系列的磨齿机及国产的 Y7125 和 Y7431 磨齿机等。

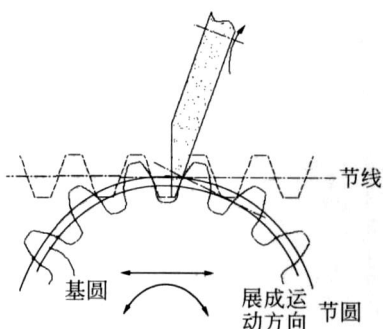


图 3 大平面砂轮磨齿工作原理

Fig. 3 Work principle of gear-grinding with big plan wheel

我国秦川机床厂研制的大平面砂轮磨齿机磨齿精度可达 4 级,德国 CarlFlarth 公司生产的 SRS 系列大平面磨齿机磨齿精度可达 3 级,其中 Gleason 集团研制 SRS405 剃齿刀磨齿机的磨齿

精度可更高^[3]。

2.4 蜗杆砂轮磨齿

蜗杆砂轮磨齿工作原理用蜗杆形砂轮磨削渐开线圆柱齿轮,其基本原理类似于滚齿加工(如图 4 所示)。砂轮与工件啮合旋转,工件作连续分度并展成渐开线齿形,工件轴向进给加工出齿宽。在磨削斜齿轮时,由差动装置使工件获得附加运动,以加工出相应螺旋角的齿轮。

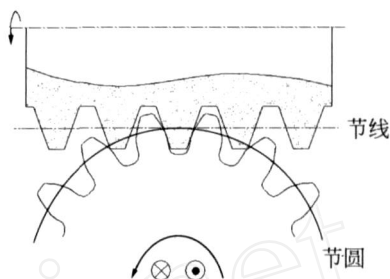


图 4 蜗杆砂轮磨齿工作原理

Fig. 4 Work principle of gear-grinding with worm wheel

蜗杆砂轮磨齿也是一种展成磨齿法。国外生产蜗杆砂轮磨齿机磨齿精度最高的是瑞士 Reishauer 公司。Reishauer 公司开发的 RZ300E 及 RZ301S,磨齿加工精度可达 3 级;研制的 RZ400 连续展成蜗杆砂轮磨齿机具有开放灵活的柔性修整系统,砂轮架左边为修整位置,右边为磨削位置,可直接目视察看砂轮修整情形,砂轮修整更换方便快捷。用它磨削一个模数 4,齿数 27、齿宽 50 mm 的直齿圆柱齿轮,磨削时间仅为 0.82 min^[5]。

2.5 成形砂轮磨齿

成形砂轮磨齿是靠成形砂轮来磨削渐开线齿形或其他齿形的,工作原理如图 5 所示。

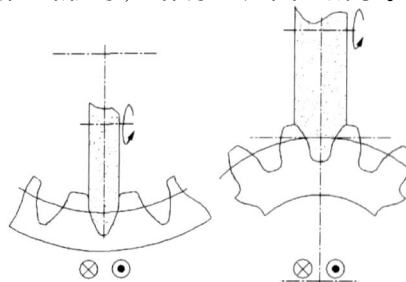


图 5 成形砂轮磨齿工作原理

Fig. 5 Work principle of gear-grinding with form wheel

成形砂轮磨齿无展成运动,磨齿的精度主要取决于砂轮的修整精度与砂轮的定位精度。当磨削直齿轮时,砂轮的轴向截面形状即为工件的端面齿形;当磨削斜齿轮时,砂轮的轴向截面形状为砂轮与工件理论齿面的空间接触线在砂轮轴向平面的投影。成形砂轮磨齿采用单齿分度,工件轴向进给来实现全齿宽的磨削。当磨斜齿轮时,在工件轴向进给的同时,还应作附加的旋转运动,以获得相应的螺旋角。

近几年来,随着 CNC 数控技术、砂轮拓扑修形技术的应用及高效 CBN 砂轮的使用,成形砂轮磨齿精度比以往有了较大的提高。例如英国霍洛伊德(Holroyd)公司研制的 GTG2 齿轮磨削中心^[8-10]、德国 Kapp 公司研制的 VUS55P 数控成型砂轮磨齿机^[11]、意大利 Samputenslli 公司生产的 S375 G 数控成型磨床等都属于成形砂轮磨齿机,最高磨齿精度据称可达 2 级^[4,12]。

各种常见磨齿方法的一般磨齿精度与磨齿效率列于表 2。

表 2 各种磨齿方法的一般磨齿精度与磨齿效率

Tab.2 Comparison of work accuracies and processing efficiencies of several gear-grinding methods

齿轮磨削方法	工作精度(ISO1328)	磨削效率
锥形砂轮磨齿	7~4	中
蝶形砂轮磨齿	5~3	较低
大平面砂轮磨齿	5~3	低
蜗杆砂轮磨齿	6~4	较高
成形砂轮磨齿	7~3	高

3 超精密齿轮加工的探讨

齿轮的磨削加工可获得较高的磨齿精度,但任何一种磨齿的商品设备出厂的磨齿精度都很难到达 2 级或 2 级以上精度。这里通过分析比较常见的磨齿工作原理、磨齿中的关键技术、及机床关键部件精化的难易程度,探讨 2 级精度以上齿轮的超精密加工的可能性。

3.1 2 级精度超精密齿轮磨齿的探讨

(1) 商品的蝶形砂轮磨齿机并不具备磨削 2 级精度超精密齿轮的能力,但通过采取以下措施,可将其磨齿精度提高到 2 级:1) 精化砂轮主轴轴系及工件主轴轴系,降低两轴系的回转误差;2) 提高滚轮和钢带的加工精度,降低展成运动的误差;

3) 研修分度盘,提高分度系统的精度;4) 采用 0° 砂轮磨齿法;5) 需要富有经验的技术人员进行磨齿操作。由于蝶形砂轮磨齿所用机床的展成系统刚度差,故磨齿精密性已没有再提高的空间。

(2) 精密数控成形砂轮磨齿机具备磨 2 级超精密齿轮的能力,原因有:1) 成形砂轮磨齿无展成运动,因此机床的结构简单、刚度高,利于实现精密磨齿;2) 先进的数控砂轮修整器应用,实现砂轮的在线拓扑修形与误差补偿,确保了砂轮的精度;3) 数控技术和光栅尺的应用,确保了砂轮较高的定位精度。由于成形砂轮磨齿是一次磨齿成形,存在误差复映现象,不能很好地消除被磨齿轮的残余误差,加上砂轮工作过程中磨损量较大,砂轮的在线修整与误差补偿存在滞后性,因此,该磨齿方法的磨齿精度也难以再提高。

(3) 精化后的大平面砂轮磨齿机具备加工 2 级精度以上超精密齿轮的能力。上世纪 80 年代,中国长春光机所成功改装 Y7431 大平面磨齿机,磨出了 2 级精度的基准标准齿轮^[13-15]。

3.2 1 级精度超精密齿轮磨齿的探讨

大平面砂轮磨齿机的展成运动有渐开线凸轮-挡块式和钢带-滚轮式两种,前种机床的结构刚度高,加上各关键部件可以再改装精化,磨齿精度仍有一定的提高空间。下面以国产大平面砂轮磨齿机 Y7125 为例,探讨其具有加工 1 级精度超精密齿轮的能力:

(1) 将原滑动工件主轴轴系改装为有微量过盈配合的密珠轴系,可将加工主轴的回转误差由原来的 $2\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右,大大降低了主轴的回转误差对齿轮加工精度的影响。为了提高齿坯的安装精度,将磨齿心轴改装成径向可调试心轴,可使磨齿心轴径向跳动量降到 $1\ \mu\text{m}$ 以下^[14]。

(2) 展成运动的关键部件——渐开线凸轮,根据渐开线的发生原理与误差的阿贝原理,通过自行设计的双基圆盘渐开线凸轮样板磨削装置与测量装置,可使其面形误差大大降低,为加工 1 级精度的齿形做好铺垫。

(3) 将机床的分度盘式分度系统改装为“多齿盘自动分度系统”。利用多齿啮合的“误差均匀化效应”和“弹性过约束原理”,使啮合分度精度大大高于多齿盘的加工分度精度。“多齿自动分度系统”已经成功地改装在 Y7431 型大平面砂轮磨齿机床上,并用此机床磨制出了齿距偏差为 1 级精

度的齿轮^[16],为自动分度系统在 Y7125 型磨齿机上的改装提供了理论与实践基础。

1 级精度超精密的齿轮加工涉及到的影响因素还有很多,除了从加工原理、机床改装精化等方面做工作外,加工环境的保证、齿坯材料与热处理工艺、砂轮的材料与修整、科学的磨齿工艺等也起着至关重要的作用。

4 结 论

齿轮的超精密磨削已经成为一种必然趋势,

其意义重大,各国为提高磨齿精度做了大量的研究技术工作。中国由齿轮大国向齿轮强国的目标迈进,必须走自主创新之路。通过对几种常见的磨齿方法与磨齿精度分析比较,探讨了 2 级以上精度超精密齿轮的加工,着重论证了国产大平面砂轮磨齿机 Y7125 精化成磨齿母机后,具备加工 1 级精度超精密齿轮的能力。1 级精度超精密齿轮的研制成功,可提高我国的齿轮的传递基准,从而可提高我国齿轮制造业的整体技术水平。

参考文献:

- [1] 俞仁楠. 小模数齿轮行业分析[C]. 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 of CGMA, Zhejiang Zhuji: CGMA*, 2007-10:34-38. (in Chinese)
- [2] 齿轮制造手册编辑委员会. 齿轮制造手册[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
Editor committee of gear manufacture manual. *Gear Manufacturing Manual* [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 遇立基. CIMT '99 展出的数控齿轮加工机床[J]. 制造技术与机床,1999(12):6-7.
YU L J. CNC gear cutting machine exhibited in CIMT1999 [J]. *Manufacturing technology & Machine tool*, 1999(12):6-7. (in Chinese)
- [4] 张雪让. 从 CIMT2003 看国外螺纹磨床的发展[J]. 精密制造与自动化,2003,4(156):7-10.
ZHANG X R. Insight of the development of threaded worm grinder from CIMT2003 [J]. *Precision Manufacturing & Automation*. 2003,4(156):7-10. (in Chinese)
- [5] 马云. 磨齿技术与装备的发展[J]. 机械工人/冷加工,2007(4):27-30.
MA Y. Development of gear grinding technology and equipment [J]. *Machinist Metal Cutting*, 2007(4):27-30. (in Chinese)
- [6] 马云. 齿轮加工机床的发展趋势[J]. 精密制造与自动化,2007(3):4-8.
MA Y. Development trend of gear machining tool [J]. *Precision Manufacturing & Automation*, 2007

- (3):4-8. (in Chinese)
- [7] http://www.reishauer.com/portal/loader.php?seite=raeder_en&navigation=3501&root=2327 [OL].
- [8] BENN S,张华坚. 顶级精度的齿轮磨削机床——GTG2 齿轮磨削中心[J]. 航空制造技术,2006(2):106-107.
BENN S,ZHANG H J. High-precision gear grinder—GTG2 gear grinding center [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006(2):106-107. (in Chinese)
- [9] BENN S,张华坚. 精密齿轮的成形磨削与拓扑修形[J]. 航空制造技术,2006(1):102-103.
BENN S,ZHANG H J. Precision gear forming grinding and topological modification [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006(1):102-103. (in Chinese)
- [10] <http://www.gtg2.com/Default.aspx?tabid=328> [OL].
- [11] <http://www.gearproductnews.com/issues/0406/gpn> [OL].
- [12] http://www.samputensili.it/nqcontent.cfm?a_id=13105 [OL].
- [13] 王立鼎,卢占山. 高精度小模数标准齿轮的磨齿[J]. 现代制造工程,1980(5):20-23.
WANG L D,LU ZH SH. Gear grinding of high-precision fine-pitch master gear [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 1980(5):20-23. (in Chinese)
- [14] 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)

[15] 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(4) :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)

作者简介:



王立鼎(1934 -),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师,中国科学院院士,主要从事超精密齿轮工艺与测试、精密机械设计及微纳米机械的研究。E-mail:wangld@dlut.edu.cn



王晓东(1967 -)男,黑龙江哈尔滨人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为微装配技术与系统和微制造装备技术。E-mail:xdwang@dlut.edu.cn



凌四营(1978 -),男,山东日照人,博士研究生,主要从事超精密齿轮研究。E-mail:lucking168@163.com



姜志峰(1978 -),男,黑龙江大庆人,博士研究生,主要从事超精密齿轮测试技术研究。E-mail:lucking 168 @ 163.com



马 勇(1956 -),男,辽宁大连人,工学硕士,副教授,硕士生导师,主要从事超精密齿轮研究。E-mail:yongma@dlut.edu.cn

下期预告

Nd:YAG 激光焊接殷钢薄板材料的工艺研究

吴东江,尹 波,周秋菊,王续跃,金洙吉

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

利用 Nd:YAG 脉冲激光作为焊接热源,对殷钢材料 Invar36 分别进行了平板单道焊接试验和对焊试验,分析了工艺参数(激光功率、焊接速度、脉冲宽度和离焦量)变化对焊缝的表面形貌、熔宽以及熔透性的影响,检测了 0.85 mm 厚度的殷钢薄板对焊接头的硬度、成分以及拉伸强度。结果表明:激光功率和脉宽是影响焊缝熔深、熔宽和热影响区面积的主要因素;扫描速度对焊缝表面的鱼鳞状条纹间距影响尤为明显;离焦量主要影响焊缝的宽度和熔透性;合理匹配工艺参数能够实现 0.85 mm 厚度薄板对焊,并且获得形貌良好的焊缝。焊缝的组织成分没有发生明显变化,拉伸强度和基体拉伸强度相当,显微硬度略低于基体硬度。