

螺旋锥齿轮超声研磨的试验研究^{*}

杨建军^{1,†} 邓效忠² 魏冰阳²

(1 西北工业大学机电学院 西安 710072)

(2 河南科技大学机电工程学院 洛阳 471003)

摘要 介绍了螺旋锥齿轮超声研磨加工的方法, 利用声学 and 超声空化的相关理论分析了超声研齿的材料去除方式, 在齿面接触区具有旋转超声加工的特点, 在非接触区, 超声空化对齿面产生空蚀或者直接激励磨粒撞击和滑擦齿面, 引起材料的去除。进行了超声研齿和普通研齿的对比试验, 结果表明超声研齿的材料去除率可达到普通研磨的3倍, 齿面粗糙度低至 Ra0.2 μ m, 水平截距 c1.2 μ m。齿面研磨后的 SEM 照片证实, 齿面质量明显提高。

关键词 螺旋锥齿轮, 空化, 超声, 材料去除率

Ultrasonic lapping on spiral bevels and hypoid gears

YANG Jian-Jun¹ DENG Xiao-Zhong² WEI Bing-Yang²

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003)

Abstract A method of ultrasonic lapping of spiral bevels and hypoid gears is introduced, based on the theory of ultrasonics and acoustic cavitation. In contact area, the principle of RUM (rotary ultrasonic machining) is available. In non-contact area, acoustic cavitation plays the main role in the process of material removal. Experiments show that the material removal rate of the ultrasonic lapping is three times higher than that of the conventional lapping with roughness Ra0.2 μ m, section height c 1.2 μ m. SEM photos of gear tooth after ultrasonic lapping display a better tooth surface quality.

Key words Spiral bevels and hypoid gears, Acoustic cavitation, Ultrasonics, MRR

1 引言

随着齿轮传动向高精度、高速度、低噪音和小型化方向发展, 对齿轮材料与制造技术提出

了更高的要求。对于在汽车和航空领域具有广泛应用的螺旋锥齿轮来说, 其意义显得尤为重要。传统的螺旋锥齿轮硬齿面精加工工艺仅限于磨齿和研齿, 磨齿加工精度高, 但效率低, 因

2006-04-21 收稿; 2007-07-23 定稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No.50475060)

作者简介: 杨建军 (1971-), 男, 博士研究生, 研究方向: 现代机械设计理论与方法。

邓效忠 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。魏冰阳 (1966-), 男, 博士, 副教授。

[†] 通讯联系人 E-mail: hohooyang@126.com

此在大批量生产中广泛采用研齿。传统的研齿方法的材料去除率低,对轮齿误差的矫正能力有限,而且对接触不到的部位,如齿根面,无能为力。鉴于此,魏冰阳博士提出了超声振动研齿的方法,首先将超声振动引入到螺旋锥齿轮的研齿加工中,并对超声研齿的声弹性机理进行了分析^[1],建立了振动研磨的运动模型^[2]。本文在此基础上,对超声研齿的材料去除方式进行分析,并进行相关的实验研究。

2 超声研齿的加工方法

传统的超声研磨是将含有磨粒的研磨液输入到加工工具和工件表面之间,工具以超声频率进行振动,激励磨粒冲击工件或者在研磨液中产生空化效应进行间接加工。如果加工工具在作超声振动的同时附加了旋转运动,就构成了旋转超声加工(RUM)^[3]。旋转超声能使超声加工效率大幅度提高。螺旋锥齿轮的超声研磨即是普通研齿与旋转超声加工相结合的一种新型的特种复合加工方法。

超声研齿的具体方法是,由超声波发生器发出一定功率的超声波,通过变幅放大装置作用在小轮上,使小轮沿轴向作高频的纵向振动,激励磨粒切削。此外,研齿时,齿面之间需要一定的正压力,即在大轮上施加一制动扭矩,保证两啮合轮齿良好的接触与一定的接触面积。

螺旋锥齿轮的两轮在对研时,小轮为主动轮。由于负载的作用,小轮的凹面与大轮的凸面形成点接触,两接触齿面将发生接触变形,根据 Hertz 接触理论,将形成一椭圆接触区域^[4]。图 1 所示的弹性接触区为小轮凹面与大轮凸面接触时,两齿面在载荷作用下的接触变形区域的投影,非接触区是由于超声的作用而产生齿面非接触研磨的区域。因此在两齿轮对研的过程中,各种研磨因素并存,相互作用,具有复合研磨加工的特性,大大提高了齿面的研磨效率。

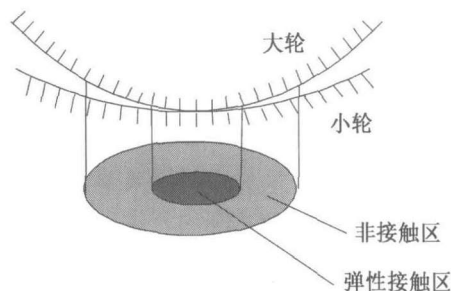


图 1 轮齿接触示意图

2.1 弹性接触区材料去除分析

小轮在沿轴向超声振动的激励下,两齿面周期性地接触和分离,研磨颗粒在齿面压力和超声能激励下,以很高的速度和加速度对两齿面进行挤压和撞击,同时沿齿面切向伴随剧烈的划擦和微切削作用^[5],使齿面材料产生剥落或塑性流动,如图 2 所示。由于螺旋锥齿轮齿线的倾斜,在齿面弹性接触区,不仅有两轮啮合引起的沿齿面切向的相对运动,而且有超声引起的切向振动,因此磨粒沿齿面切向的划擦和微切削作用将十分显著。大多数研齿机的研齿转速在 1,000~4,000rpm 之间,齿面间的相对滑动速度由于齿轮的大小与螺旋角的不同会有所差别,但通常不小于 1.0m/s^[6],在齿面的相对滑动中,新的研磨颗粒不断进入到弹性接触区的位置,参与研磨,因此此时的研磨方式实际上是超声旋转研磨。

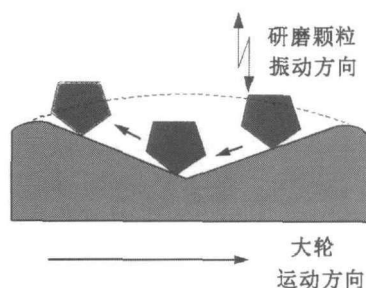


图 2 弹性接触区研磨方式

2.2 非接触区材料去除分析

在图 2 所示的非接触区,超声能量通过小轮齿面折射到研磨液中,悬浮在研磨液中的磨粒在超声能量激励下,随着声流对齿面产生冲

击，研磨颗粒的加速度可达上千个 G (重力加速度)^[7]，冲击频率也达到每秒上万次，当研磨液中的声强超过该液体的“空化阈”时^[8]，将发生空化效应。根据理论估算及对声化学的实际研究^[9]表明：当空化泡内集中了足够的能量而达到崩溃时，会在泡内产生出一个极短暂的高温升，形成局部的热点，空化泡内的温度可达 5000K，压力可达 10⁸Pa 以上，这种巨大的压力将激励空化泡周围的研磨颗粒以极高的速度和加速度冲击齿面，在齿面上造成撞击和滑擦^[7]。同时空化泡崩裂时，研磨液中会产生高速的微射流和冲击波^[11]，直接冲击齿面，造成齿面空蚀，促进齿面材料的去除。

3 试验分析

前面对螺旋锥齿轮超声研齿的材料去除方式进行了分析，下面通过试验对比分析普通研

齿与超声研齿两者的材料去除效率。

3.1 试验设备和参数

本试验根据超声振动加工和螺旋锥齿轮的相关理论，设计了换能-变幅振动系统，试验装置如图 4 所示，由主轴声学系统、测量装置、加载装置与研磨剂供给装置组成。

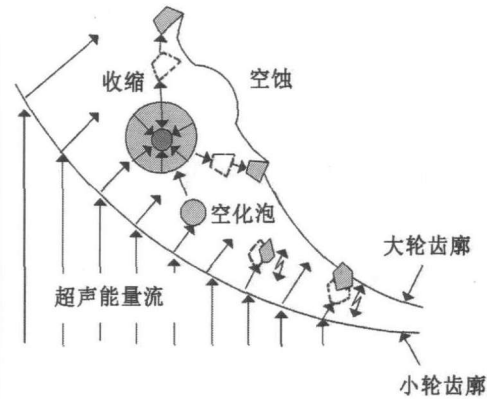


图 3 非接触区研磨方式

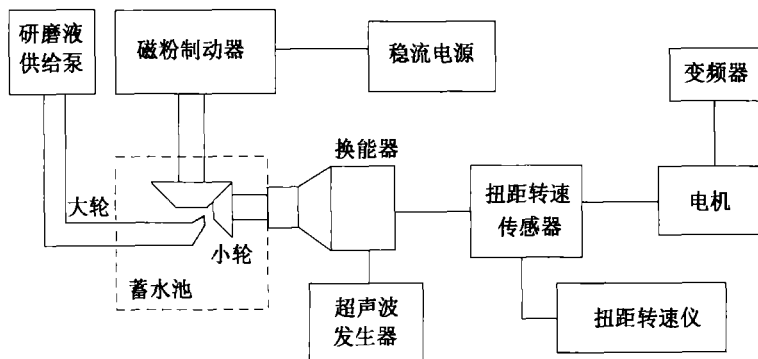


图 4 试验装置布置

主轴声学系统由超声波发生器 (陕西大通 SK-2000, 200W)、换能变幅器组成，小轮与变幅杆相连，在声学系统驱动下实施纵向振动。主轴由电机驱动实施旋转运动，电机转速由变频器控制。测量装置由扭矩—速度传感器、微机型扭矩转速仪 (ZJYW1) 组成，扭矩—速度传感器与小轮主轴相连。加载装置由磁粉离合制动器 (ZFJ-1) 和稳流电源 (WLK-3A) 组成，稳流电源控制加载力矩的大小。

选取两对钢制弧齿锥齿轮，模数 1.25mm，

齿数比 17/44，大轮齿面硬度 48HRc、小轮 50HRc。分别进行普通研齿与超声研齿试验。

研磨剂由水与 W40# 白刚玉混合而成，浓度 25%，供给量 65.3mL/s。白刚玉颗粒平均粒径：21.13mm，体积平均粒径：25.87mm。白刚玉显微硬度为 2200~2300kgf/mm²，莫氏硬度为 9.0，适合研磨淬硬钢件。

超声研齿的振动频率为 19kHz，因为被研齿轮较小，把小轮小端面振幅调整为 10μm。

其它研磨工艺参数如表 1 所示，表中载荷与转速指大轮承载扭矩与小轮旋转速度，浓度为磨料与研磨液重量百分比。为了使试验具有可比性，普通研齿与超声研齿工艺参数取完全相同的值。

分别对两对弧齿锥齿轮进行普通研齿与超声研齿试验，研磨时间 3 分钟，分别进行两次，即第一次研磨 3 分钟后，测重；两对互换后再进行第二次研磨，再测重。这样可消除两对齿轮材料性能与试验条件可能存在差异对去除率造成的影响。

3.2 试验结果

利用精度为 0.1mg 的电子天平测量大、小轮两次研磨前后的重量变化，并取其平均值，计算名义材料去除率 $MRR = \text{减重量} / \text{研磨时间}$ ，单位 mg/min。利用表面轮廓仪 Hommel Tester T20 测试粗糙度 $Ra (\mu m)$ 与轮廓支承长度率 $Rmr(c)=100\%$ 时的水平截距 $c (\mu m)$ 。小轮凹面表面质量的测试结果如表 1:

从表 1 可以看出，超声研磨的材料去除率明显高于普通研磨，在同等条件下几乎达到普通研磨的 3 倍，且表面光洁度也有明显提高。轮廓支承长度率水平截距 c 是表面耐磨性的一个

重要评定指标，一定程度上可以反映齿面的耐磨性。超声研磨的齿面水平截距 c 值明显较小，因此齿面耐磨性也将明显优于普通研磨齿面。

图 5 为放大 1,000X 倍的小轮齿面微观形态。从齿面研磨微观形态来看，超声研磨齿面磨粒压痕、滑擦与塑性流动纹理明显，且十分均匀。而普通研磨齿面没有明显的磨粒压痕，可观察到轻微的磨粒滑擦痕迹，材料撕裂损坏严重。对比图 5(a) 与 (b)，齿面质量优劣十分明显。

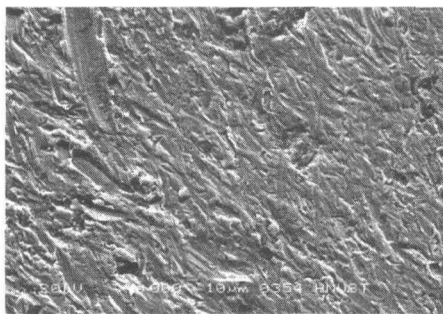
超声研齿中，超声空化和超声能量的作用，以及两齿面间极大的相对滑动速度，明显不同于普通研齿，使齿面材料的去除率显著增高。同时两齿面以超声频率做相对的往复运动，使研磨的轨迹具有周期性，研磨纹理的分布比较均匀，同时加大了研磨区域，使齿面的光滑平整度优于普通研磨齿面。

4 结论

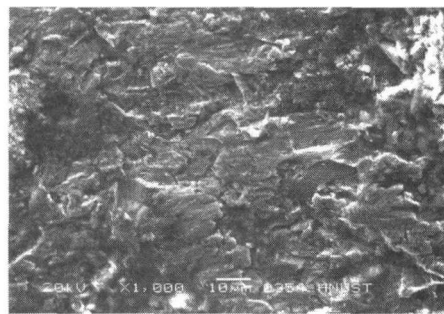
螺旋锥齿轮超声研磨加工将超声能量和超声空化所释放的能量作用到齿面上，不仅包含

表 1 普通研齿与超声研齿对比试验

| 研磨方式 | 载荷 (Nm) | 转速 (rpm.) | 浓度 (%) | MRR. (mg/min) | 粗糙度 $Ra (\mu m)$ | 水平截距 $c (\mu m)$ |
|------|---------|-----------|--------|---------------|------------------|------------------|
| 普通 | 0.12 | 600 | 25 | 29.210 | 0.33 | 3.2 |
| 超声 | | | | 87.257 | 0.20 | 1.2 |



(a) 超声研磨



(b) 普通研磨

图 5 齿面研磨后的 SEM 照片 1,000X

有普通研齿的成分,而且具有旋转、斜角超声的特点,材料去除是多种因素的综合作用。

试验证实,超声研齿的材料去除率明显较高,同等条件下为普通研齿的3倍。超声研齿的齿面质量明显改善,微观压痕、微切削与塑性流动纹理均匀,具有较好的表面完整性,齿面粗糙度 $Ra = 0.2\mu\text{m}$,水平截距 $c = 1.2\mu\text{m}$ 。因此超声研齿能大大提高齿面质量与生产效率,具有良好的发展前景。

参 考 文 献

- [1] 魏冰阳,方宗德,周彦伟等.螺旋锥齿轮超声振动研磨的声弹性机理.中国机械工程,2004,15(6):484-488.
- [2] 魏冰阳,方宗德,周彦伟.螺旋锥齿轮振动研磨的运动模型研究与分析.机械科学与技术,2004,23(3):4-6.
- [3] 轧刚,秦华伟,许永娃等.旋转超声波加工的试验研究.航空制造技术,2000,(6):56-59.
- [4] Litvin F L, Zhang Y. Local Synthesis and Tooth Contact Analysis of Face-Milled Spiral Bevel Gears[A]. NASA CR4342, Chicago: NASA Lewis Research Center, 1991.
- [5] Hocheng H, Yuo K L. Fundamental study of ultrasonic polishing of mold steel. Machine Tools & Manufacture, 2002, 42:7-13.
- [6] 魏冰阳.螺旋锥齿轮研磨加工的理论及实验研究[博士论文].西安:西北工业大学,2005.
- [7] Ichida Y, Sato R, Morimoto Y, et al. Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive machining. Wear, 2005, 258:107-114.
- [8] 王萍辉.超声空化的影响因素.河北理工学院学报,2003,25(4):154-161.
- [9] 冯若,饶锦钟,关立勋.超声手册.南京:南京大学出版社,1999.
- [10] Werner Lauterborn, Claus-Dieter Ohl. Cavitation bubble dynamics. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4:65-75.