表面滚磨光整技术在风电齿轮箱加工中的应用

■ 大连华锐重工集团股份有限公司 （辽宁 116035） 李维杰

■ 大连海事大学 （辽宁 116035） 于冬艳

摘要：本文以某兆瓦级风电齿轮箱为例，通过对齿轮轴进行光整加工试验，探讨表面滚磨精研技术在提高零件表面质量和抗疲劳强度等方面的应用，为该技术在风电领域的开发应用提供一定的参考。

齿轮失效的形式很多，国内外的观察结果都较为一致，即发生最多的仍为齿面的微点蚀，主要发生在低速级传动齿面上，一般认为与齿轮箱的工作状态有关（如速度及载荷变化等），此外，齿面的粗糙度对微点蚀的产生有直接影响。研究表明，较低的表面粗糙度值对抑制齿面微点蚀的产生、延长齿轮箱的运行寿命有着十分明显的影响。

磨齿是最常用的齿轮精加工方法，精度可达六级，齿面粗糙度值R_a=0.4～0.8μm。将六级精度的齿轮经过光整加工，接触疲劳强度提高1倍以上，寿命提高1.5倍以上，减小了齿轮的冲击振动和噪声。因此，研究和推广先进的光整加工技术，对改变我国齿轮制造业大却不强的现状、提高齿轮精度和质量具有重要意义。

1. 齿面微点蚀的发生机理

微点蚀又称灰斑现象，是齿轮常见的失效形式，是在油膜相对于重载很薄的润滑条件下，运转的齿轮副工作齿面的损伤，多出现在齿轮的分度圆以下靠近齿根的部位。齿面点蚀区域如图1所示。

微点蚀的产生机理是齿面啮合时，两齿面的微观波峰接

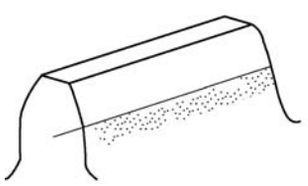


图1 齿面点蚀区域

的技术数值，从而为确保产品质量创造有利条件。

（3）实际使用时，不需要调整机床的任何部位，只是将工作台微调一个很小的距离就有望使问题得到很好的解决，因此该检具在现场具有较强的实用性。

参考文献：

[1] 张耀宸. 机械加工工艺设计手册[M]. 北京：航空工业出版社，1987.

[2] 李新勇，赵志平. 机械制造检测技术手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[3] 上海柴油机厂工艺设备研究所. 金属切削机床夹具设计手册[M]. 北京：机械工业出版社，1984.

MW（收稿日期：20151023）

专家点评

本文介绍了对称加工中易出现的问题，并设计了专用的同轴度检测器具。对称加工在加工较长孔的时候虽然比较容易，但是如果主轴中心与工作台回转中心位置度稍有误差的话，那么工件转位后所加工孔的同轴度误差将成倍增加，所以还是尽量不用这种方法，如果条件所限不得不用，那也需选用精度较高的设备，仔细校正主轴中心与工作台回转中心的位置度误差方可，并在加工过程中随时检测其误差情况。

触，在较高的接触、剪切应力和相对摩擦作用下，齿面局部温度升高，润滑油膜或化学反应膜破裂，进而产生复杂的弹塑性变形，导致齿面产生微小裂纹和材料转移。点蚀出现后，齿轮箱往往产生强烈的振动和噪声，在工作载荷压力下，微点蚀面积会不断扩展，发展成破坏性点蚀，最后导致表层小片状剥落。

传统的工艺概念认为，零件的质量体现在尺寸精度、强度等方面，对零件的微观质量不太重视。以风电齿轮为例，磨齿后的齿面粗糙度值R_a=0.5～0.8μm，经滚磨光整后齿面的粗糙度值可达R_a=0.1μm，是原来的1/5，齿面的抗点蚀安全系数提高了5倍。由此不难看出，在热处理技术要求和润滑条件不变的情况下，降低齿面粗糙度值对于提高齿轮的抗微点蚀能力具有重要的意义。

2. 表面滚磨光整技术介绍

表面滚磨光整的原理是将零件整体置于料箱中并以一定方向进行旋转，设备的振动电动机带动槽内研磨介质和特殊抛光混合物滚动，两者充分混合并研磨，零件受到磨料不同程度的滚压、刻划和滑擦的微量磨削作用，改善表面质量，提高抗疲劳强度、耐磨性及抗腐蚀性。在目前的齿轮加工工艺中，表面滚磨光整技术是被证明的、能提高轮齿表面抗微点蚀能力的最有效手段。表面滚磨光整过程如图2所示。

在其他专业领域中，表面滚磨光整技术被称作ISF，从20世纪80年代就开始应用于汽车工业和航空航天领域中，到21世纪初才开始应用于风电齿轮箱，核心设

图2　表面滚磨光整中的齿轮轴

备是基于ISF原理制造的振动光饰机，它能在光饰齿面的同时增加齿面硬度，是风电齿轮表面处理的理想机种，如图3所示。

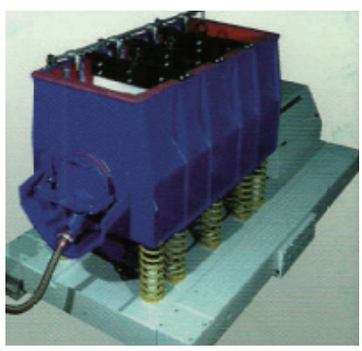
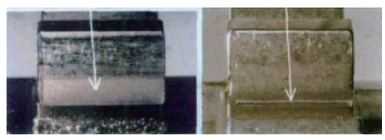


图3　槽式振动光饰机

3. 国内外对ISF技术的试验验证

有关光整加工对齿面抗点蚀能力的影响，德国波鸿大学试验室曾进行过研究，在表面粗糙度不同、润滑等其余条件一致的情况下，光整加工不仅能大幅提高齿面粗糙度质量，而且还能显著提高齿面的抗点蚀能力。在1 547MPa的载荷下，加载16h、耐久循环80h后，未经光饰的齿轮出现了点蚀现象，而经光饰的齿轮未发生点蚀现象，仅出现浅的灰色痕迹，如图4所示。



(a)　　(b)

图4　齿面形貌对比图

大连理工大学的周锦进等对机车齿轮光整加工前后的使用寿命和噪声指标进行了试验验证，磨齿加工后的齿轮（齿面硬度60～62HRC），平均寿命只有12～15h，噪声指标是81dB，而光饰后的齿轮全部通过了100h的疲劳强度试验，并且没有任何磨损迹象，噪声指标是77dB，光整后平均降低了7.5 dB，最高的降低了10dB。从国内外的试验结果来看，光整加工后的齿轮，齿面的抗点蚀能力大幅提高，齿轮的使用寿命大幅提高，噪声指标大幅下降。

4. 表面滚磨光整试验过程

选择某兆瓦级风电齿轮箱的高速齿轮轴进行表面滚磨光整加工试验。工件材料为18CrNiMo7，渗碳淬火热处理，磨齿后齿面硬度在59～63HRC，有效硬化层深度为1.2～1.5mm，试验过程如表1所示。

5. 试验测量结果对比

采用时代集团TR200粗糙度仪，对光整加工前后齿面的粗糙度进行测量，具体数据如表2所示。

样件经过光整加工后，表面粗糙度变化较大，R_a值是光整前

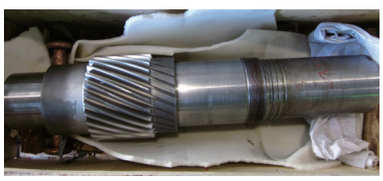
表1　光整试验过程

样件名称	齿轮轴	试验地点	廊坊市北方天宇机电技术有限公司
样件材质	18CrNiMo7	样件参数	总长764mm，齿顶圆直径179.5mm
试验设备	BJG－W1300Z	测试设备	TR200粗糙度仪，数码相机
试验参数	磨料：3号磨料　磨液：钢磨液　光整时间：90min		

表2　光整加工前后齿面粗糙度对照表　（单位：μm）

位置	状态	齿面粗糙度值R_a测量数据			平均值
齿面1	光整前	2.213	2.309	2.186	2.236
	光整后	0.796	0.640	0.771	0.736
齿面2	光整前	2.366	2.459	2.404	2.410
	光整后	0.618	0.780	0.727	0.708
齿面3	光整前	1.998	2.221	2.067	2.095
	光整后	0.539	0.734	0.755	0.676

的1/3，粗糙度等级提高了1.5个等级。试验前后照片对比如图5所示。



（a）试验前

（b）试验后

图5　试验前后对比

样件光整加工前后经手感触摸、拍照对比，未光整的样件齿轮边缘有明显毛刺、锐边，并有割手的感觉，样件表面有锈蚀、暗淡无光。经光整加工后，样件被加工表面毛刺、锈蚀全部去除，锐边钝化、棱边倒圆整齐，手感柔滑，光亮夺目。

6. 试验结果分析

光整加工可以降低零件表面粗糙度值，提高零件表面质量。对样件进行表面残余应力检测，试验前为－386MPa、－383MPa，试验后为－595MPa、－572MPa，由此可以判定，经过光整加工后，样件的表面压应力明显提高。表面压应力的提高可以增强零件的疲劳强度，延长使用寿命。

7. 结语

通过试验验证，齿面光整加工技术能有效降低齿面粗糙度值，增加齿面压应力，提高齿面抗点蚀的能力，全面改善齿轮的表面质量。目前，齿面光整加工设备及技术在国外已经成熟，知名风电设备厂商如Winergy、Renk、Rexroth和Hansen等公司均采用该技术作为风电齿轮精加工的正常工艺，而在国内应用尚不普遍。齿面光整加工操作方便、成本较低、效果好，在风力发电设备领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 赵玉良，徐鸿钧，姜永涛. 风电齿轮的微点蚀研究[J]. 新能源及工艺，2010（4）：41～44.

[2] 王茂胜. 风电齿轮箱寿命影响因素分析[J]. 宁夏机械，2010，32（2）：34～36.

[3] 周锦进，方建成，徐文骥. 光整加工技术的研究与发展[J]. 制造技术与机床，2004（3）：7～11.

[4] WINKELMANN L，El-SAEED O，BELL M. The effect of superfinishing on gear micropitting[J]. Gear technology，2009（2）：60～65.

[5] 周锦进，李洪友，王晓明. 齿轮表面质量对其使用性能和寿命影响的研究[J]. 机械科学与技术，2004，23（4）：468～470.

MW（收稿日期：20151009）

专家点评

研究和应用先进的光整加工技术，对提高齿轮精度和质量具有重要意义。该文以风电齿轮箱为例，探讨了表面滚磨精研技术在齿面光整加工中的试验与应用。金属加工行业要与时俱进，推广先进的制造工艺和加工方法，这篇文章值得我们学习。

2015年1～10月机械工业产品价格同比下降1.2%

2015年1～10月机械工业产品价格同比继续下降。1～10月机械工业产品累计价格同比下降1.2%，降幅与1～9月持平，机械工业累计价格已连续46个月同比下降。10月当月机械产品价格同比下降1.5%，降幅比9月加深0.11个百分点；10月当月价格环比下降0.2%。与全国工业相比，机械工业价格运行比较平稳。近几年，机械工业价格同比降幅均低于全国工业降幅。2015年1～10月，机械工业累计价格同比降幅比全国工业低3.9个百分点。