

变速器齿轮的剃齿加工

我公司是生产重型变速器的专业厂家，在长期的生产中形成了客车用变速器采用磨齿工艺、货车用变速器采用剃齿工艺的制造技术。随着市场竞争越来越激烈，公司提出了“客货并举、降本增效”的战略方针，为此，工程技术人员对磨齿工艺进行了技术改进，对滚剃工艺进行了应用推广。再加上近年来公司热处理条件的明显改善，为滚剃工艺的实施创造了条件。

滚剃工艺方案

二轴一档齿轮在变速器中主要在起步和爬坡时发挥其功能，其运转齿的齿形齿向精度对变速器的噪声影响不是决定性的因素。根据这种情况，考虑对客车用变速器中的该零件进行磨齿改剃齿的工艺改进，能提高生产效率，降低生产成本。

滚剃工艺方案为：锻坯→等温正火→粗、精车→插齿→滚齿→剃齿→渗碳降温/直接淬火/回火、应力喷丸→磨削孔及端面加工→啮合噪声检验→清洗→终检→入库。

滚剃工艺中的剃齿加工

剃齿是精加工齿轮的一种方法。由于剃削生产率高、齿轮质量好、剃齿刀具使用寿命长以及所用机床结构简单、调整方便，所以在成批生产的汽车、拖拉机和机床等齿轮加工中，剃齿工艺得到了广泛应用。

1. 剃齿的加工方式

按剃削的进给方向，剃齿加工方式有轴向剃齿、

对角剃齿、切向剃齿、径向进给剃齿四种方式。根据我公司产品特点、生产批量和剃齿机的状况，在产品加工中均采用轴向剃齿和径向剃齿两种方式。本文中，二轴一档齿轮的剃齿加工采用轴向剃齿法进行加工。

2. 机床与工装

(1) 剃齿机 采用前西德ZSA320剃齿机，可加工直齿和斜齿圆柱齿轮，并能加工鼓形齿和小锥度齿轮，可进行轴向、对角和切向三种剃齿，精度等级5级，表面粗糙度值 $R_a=0.63\mu\text{m}$ 。

(2) 剃齿刀 选择盘形剃齿刀，精度A级，采用W6Mo5Cr4V2钢自制的标准型剃齿刀经修形加工后使用，基本参数为直径244mm、宽度25mm、齿数46、螺旋角 2.5° 、轴交角 10° 。

(3) 剃齿夹具 采用浮动式夹具，该夹具以产品内圆面为基准，以减小工件的装夹误差。

(4) 刀具与工件装夹 剃齿刀装夹后其轴向圆跳动和径向圆跳动都 $\leq 0.01\text{mm}$ 。在产品装夹时要求机床前后顶尖的径向圆跳动 $\leq 0.005\text{mm}$ ，两顶尖中心连线（顶尖间距在150mm内）对工作台移动方向的偏移 $\leq 0.01\text{mm}$ ，机床主轴的端面 and 径向跳动 $\leq 0.005\text{mm}$ ，垫圈两端面的平行度 $\leq 0.005\text{mm}$ 。同时保证剃齿心轴与齿轮内孔有良好的配合，有最小的配合间隙。

3. 剃齿剃削参数控制

(1) 齿轮要求的技术参数 剃齿要求控制的参数值通过分析热前、热后各参数的变化规律确定。该齿

轮剃齿参数的控制值见附表。因剃齿为热前工序，考虑热前修正问题，所以齿形、齿向根据冷热变形情况具体确定，附表中齿形、齿向公差值仅供参考。

剃齿控制的参数表

齿数/个	50
法向模数/mm	4.75
法向压力角(°)	24
螺旋角(°)	7.5
公法线值/mm	110.74~110.71
径向综合公差值/mm	≤0.04
一齿径向综合公差值/mm	≤0.015
齿形公差值/mm	≤0.02
齿向公差值/mm	≤0.015

(2) 切削速度 盘形剃齿刀工作时，齿高上各点的切削速度是变化的。一般所说的切削速度是指啮合节点处的滑动速度。合金钢材料的剃齿刀切削速度为105m/min，最后计算工件转速 n_w 为141r/min。

(3) 进给量 纵向进给量与齿面粗糙度、刀具使用寿命及生产率有关，对于表面粗糙度要求细、材料硬度高的齿轮应取较小值。纵向进给量分为工件每转纵向进给量 f (mm/r) 和工作台每分钟纵向进给量 v_f (mm/min)，二者之间关系为：

$$v_f = fn_w$$

对二轴齿轮来说， f 值可取0.1~0.2mm/r。根据多次试剃结果，确定粗、精加工工作台 v_f 分别为35mm/min和20mm/min。

径向进给量与机床、夹具的刚度及剃齿时修正剃前误差的能力有关。根据我公司长期生产情况，按经验留剃削余量0.09~0.12mm。根据相关资料，每单行程0.02~0.06mm。对中间轴齿轮最后确定的径向进给量，按0.10mm剃削余量分配每单行程分别为0.02mm、0.03mm、0.03mm和0.02mm。

(4) 行程次数 行程次数分为切削行程次数和光整行程次数，切削行程次数根据剃齿余量和径向进给量而定。当径向进给量较小时，过多的行程次数会使切削条件变坏，同时使刀具使用寿命降低。而光整行程次数同齿面粗糙度有关，光整行程次数增加，齿面粗糙度参数值降低。同时，切削及光整行程总次数均应采用双数。二轴一档齿轮剃齿加工中，切削行程的单行程次数为四次，光整行程的单行程数次数为两次。

(5) 轴交角和切削液 剃齿刀与工件的轴交角是

影响剃削性能的一项重要因素，它直接影响刀刃的切削性能、加工表面质量、剃削工件齿形精度和刀具使用寿命。轴交角范围一般为10°~20°，根据齿轮参数和剃齿刀参数可知本文所提齿轮的剃齿轴交角为10°。剃齿加工中应使用充足的、润滑性和流动性较好的切削液，以获得良好的剃齿效果。

4.剃齿精度的保证

剃齿加工过程中，刀具与工件间没有传动链，而是一种自由传动。剃齿对校正被剃齿轮的各项误差能力是不相同的，有些误差能够校正，有些误差基本上不能校正，或校正后又转换为别的误差形式出现。由于剃齿机理上的先天缺陷，剃齿后齿形一般要出现凹变，破坏正确的渐开线齿廓，因而，常对剃齿刀齿形要进行修正。根据剃齿工艺特点，合理确定剃前齿轮的精度十分重要。

(1) 剃前齿坯要求 控制工件材料的质量，如硬度要均匀，不应有硬的杂质与气孔等局部缺陷，以防止剃齿刀过早磨钝；要保持剃齿基准面和剃前切齿加工的基准面一致；剃前切齿齿面不应有加工硬痕；剃齿刀齿顶和工件齿根不发生干涉；提高剃前加工精度，减小剃齿余量；保证剃前齿轮精度达到：第一公差组（主要是影响传递运动准确的误差项目 F_w 、 F_r ）不低于剃后要求，其他误差项目可以比剃后精度低一级；视热处理变形情况进行预修整，可采用剃前切齿刀具齿形预修整或齿向（螺旋角）预修整。

(2) 剃齿要求 结合剃前预修整，剃齿刀还可根据热处理变形进行部分预修整；为保持剃齿刀修正工件误差的能力，剃齿时的重合度应≤1.5mm；剃齿刀应及时刃磨，保持刀刃锋利。剃齿刀磨钝时，工件齿面出现挤痕，齿形误差增大，接触精度下降，剃齿时噪声增大；选用合理的切削用量。剃齿速度对工件齿形和齿距精度影响显著，光整行程次数对加工齿面质量有较大影响；根据工件材质选用合适切削液并需过滤。

5.剃齿过程注意事项

在剃齿加工中，必须注意以下几点：

- 1) 不合理的切削用量将导致控制参数不稳定，产生在齿轮上的剃齿应力变化异常，最终使齿轮热变形无规律。
- 2) 机床调整后必须先进行试剃齿轮，经检验合格

后, 才进行批量生产。

3) 在剃齿过程中若发现齿面失去了剃刀花纹, 出现了挤压痕迹, 齿面无光泽, 齿形端面出现较大飞边, 有啃刀现象, 齿形误差增大, 剃齿过程发生异常声音等情况时必须及时换刀。

剃齿刀的修形

1. 剃齿刀刃磨依据

对齿轮滚剃或滚剃修磨工艺来说, 剃齿刀的刃磨修形极为重要。由于产品不同、要求不同, 其齿形修正程度也就有所不同。剃齿刀齿形修磨的主要依据有

三点:

1) 由齿轮啮合的原理可知, 剃齿刀与被加工齿轮啮合时, 由于瞬时传动比的变化, 引起了瞬时切削力的差异, 从而使被加工齿轮在节圆附近产生 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$ 不等的中凹现象, 偏离理论渐开线, 因而剃齿刀必须在其相应区域将齿形修凹 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$, 以补偿齿轮齿形中凹量。

2) 实际上对具有理论渐开线的齿轮在载荷下啮合传动时, 也不能保证传动中平稳运转和不发生噪声, 所以必须要有合理的齿形以减少载荷啮合下的干涉。

3) 由于在热处理过程中齿轮都会产生齿形、齿向的变形, 必须对热前剃齿刀修形提出要求。当然, 要准确地确定剃齿刀齿形十分困难, 因为它不仅关系到齿轮的最终齿形和齿向, 而且还将直接关系到剃齿质量的好坏, 所以往往需要经过多次反复试剃齿轮后才能获得最佳的剃齿刀修形曲线。

2. 剃齿刀齿形修形的基本方法

1) 首先用符合设计精度要求的标准渐开线剃齿刀先对被加工齿轮进行试剃, 剃削过程必须正确, 调整机床和装夹等各项操作因素必须严格执行切削规范, 并将剃好的齿轮在渐开线检查仪上测绘出齿廓的齿形曲线。

2) 根据被剃齿轮所测得的齿廓形状和曲线中凹量, 算出齿轮凹量 ρ_f 的样板角度值、剃齿刀 ρ_f 附加倾斜角的角度值, 选定剃齿刀修正对应点的角度样板及改变磨削安装角的角度值。

3) 经上述方法修磨齿形后的剃齿刀剃出的齿轮

基本上能满足齿廓形状的要求, 但还需根据实际情况多次摸清产品热处理后的变形情况, 再次对剃齿刀进行相应的修磨, 然后用经再次修形后的剃齿刀加工齿轮, 直到剃出合格的接触斑痕和渐开线形状为止。

在剃削齿轮时, 开始采用标准齿形的剃齿刀剃削出来的产品压力角偏小, 齿形修正 $0.015 \sim 0.018\text{mm}$, 根据这一齿形我们对剃齿刀齿形修正 -0.015mm , 再次对产品进行试剃, 最终使产品的齿形符合产品设计要求, 经总成装配前的配对噪声检测, 90%以上产品合格。

剃齿热前后数据的统计分析

在二轴一档齿轮滚剃工艺改进的剃齿控制中, 进行了公法线数据的测量, 一共测量了12件齿轮的热前后公法线长度值。结果表明, 齿轮剃齿加工后的公法线值, 在现有热处理条件下其热前后值有上涨的趋势, 其绝对变形量基本上集中在 0.02mm , 符合齿轮公法线长度公差 0.06mm 的要求; 且热后公法线值满足成品尺寸及公司的相关质量偏离的技术要求(成品公法线值 $W_g=110.82 \sim 110.759$, $F_w \leq 0.045\text{mm}$)。这也说明了齿轮公法线值的控制重点在剃齿工序。为了较准确地表明剃齿的效果好坏, 在加工中还测量了齿轮的热前后齿形齿向对比曲线。

结果显示, 剃齿后的齿形齿向曲线热前后走向一致, 变化较小, 变化相对稳定, 说明保证齿轮热后的齿形齿向要求, 剃齿控制是关键。

结语

通过二轴一档齿轮的滚剃工艺实例分析, 证明了滚剃工艺具有可行性, 并且剃齿控制是关键。只有将两者紧密地结合起来, 滚剃工艺推广才能得以实施, “滚剃磨”工艺改为“滚剃”工艺可以大大降低产品的磨齿加工时间, 缩短产品的制造周期, 经济效益显著。

关键词:

变速器 齿轮 滚剃工艺 剃齿

(收稿日期20130425)