

剃齿过程中齿面划伤问题分析与解决

孙鹏, 韩海鹰, 逢迪, 马云双, 康英杰

一汽解放汽车有限公司 吉林长春 130011

摘要: 通过分析找出剃齿齿面划伤的根本原因, 制定出合理的解决措施, 最终达到控制的目的, 并付诸实践, 彻底解决了长期困扰公司齿面划伤的问题, 有效地提升了齿轮的齿面质量, 降低了齿轮的啮合噪声。

关键词: 齿轮; 剃齿; 剃齿刀; 齿面划伤

1 序言

齿轮噪声控制已成为现代齿轮加工中一个重要的质量控制环节, 齿轮噪声控制水平不仅代表一个齿轮制造厂的质量水平, 还直接受到有关环保法规的制约。剃齿是一种广泛采用的齿轮精加工方法, 特别在变速器齿轮加工中, 大量齿轮精加工均采用剃齿加工。剃齿不仅加工效率高、加工成本低, 还能大幅度提高齿轮精度和表面质量。同时, 剃齿能实现齿形修形, 从而降低齿轮传动噪声。由于剃齿过程具有挤压与切削并存的特点, 所以剃齿后齿面的质量很好, 对噪声控制有利。但是由于在实际生产中, 经常会遇到剃齿过程中齿面划伤的问题, 对齿面的质量影响很大, 进而严重影响齿轮啮合过程中的噪声控制, 所以对剃齿过程中齿面划伤问题的研究和解决尤为重要。

2 剃齿过程中齿面划伤问题分析

我公司剃齿加工中不定期出现不同程度的齿面划伤现象, 划伤情况如图1所示。划伤主要集中在齿轮齿面的顶部, 齿轮中部没有, 划伤痕迹的纹路走向一致, 每个划痕平行, 都是沿渐开线方向偏离一定角度, 划痕深浅有一定差异, 但是同一个齿轮同一曲率半径处相差不大。划伤时一些加工条件相似, 软材料齿轮与变位系数大的齿轮更容易出现, 同一个齿轮刀具使用时间长了容易出现, 剃齿余量大时容易出现, 切削液长时间未更换时也容易出现。



图1 齿面划伤情况

3 理论分析剃齿过程中产生齿面划伤的原因

3.1 剃齿原理

剃齿是齿轮的一种精加工方法, 其工作原理(见图2)是根据交错轴斜齿轮副作无侧隙的啮合时, 在齿面上产生相对滑动。剃齿时, 剃齿刀与工件是一对无侧隙的交错轴斜齿轮啮合。盘形剃齿刀可看作是一个圆柱齿轮, 在其侧面做出许多小容屑槽, 槽与齿侧面的交线形成切削刃(见图2a)。切削时, 被加工齿轮装在心轴上, 可以自由转动; 剃齿刀装在机床主轴上, 与工件相交呈一角度, 带动工件旋转, 两者之间作自由啮合运动(见图2b)。根据交错轴斜齿轮啮合特点, 剃齿刀和被剃齿轮在接触点的速度方向不同, 剃齿刀和被剃齿轮的齿面间有相对滑动, 剃齿刀切削刃便在齿轮齿面上切除一层金属。沿螺旋线的切线方向产生相对滑动速度, 这个相对滑动速度就是切削速度(见图2c)。

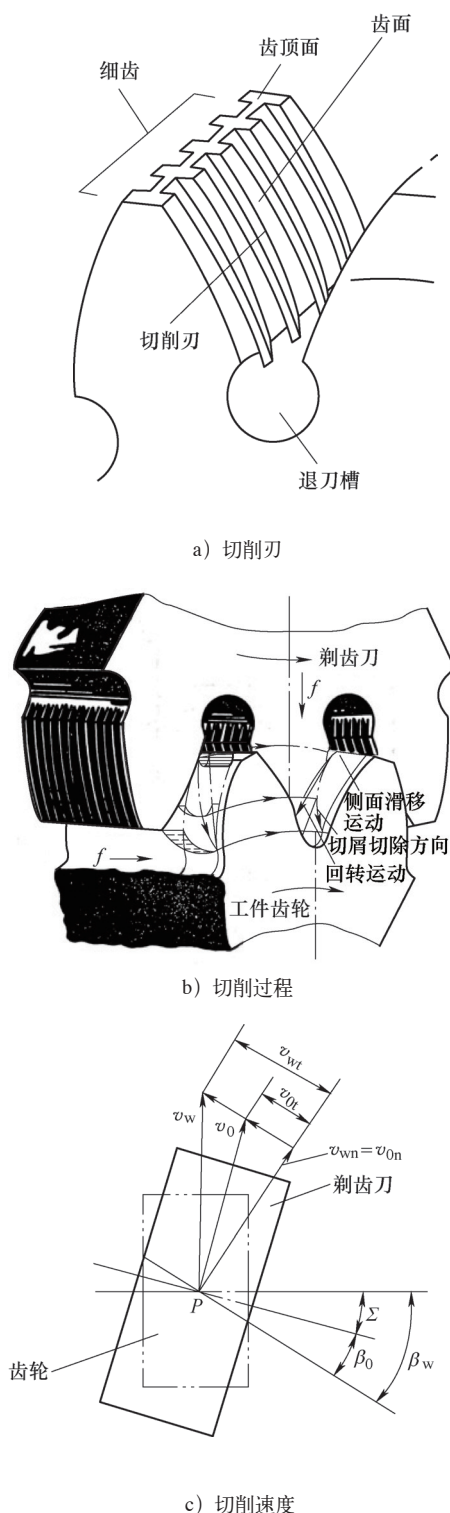


图2 剃齿工作原理

图2中剃齿刀为左旋齿, 齿轮为右旋齿, 啮合节点 P 的相对滑动速度为 $v = v_{wt} \pm v_{0t}$ (m/min), 即切削速度 v , 当剃齿刀与被剃齿轮齿的螺旋方向相同时用“+”号, 相反时用“-”号。图中 β_w 为齿轮螺旋角, β_0 为剃齿刀螺旋角, Σ 为轴交角, P 为节点。

剃齿刀切削齿轮如图3所示, 当剃齿刀和工件的齿侧面以相对速度 v 滑移时, 加上剃齿刀齿面间存在进给压力, 使剃齿刀齿侧面的小槽切削刃从工件齿面上切下很薄的切屑, 厚度为 0.005 ~ 0.010mm。

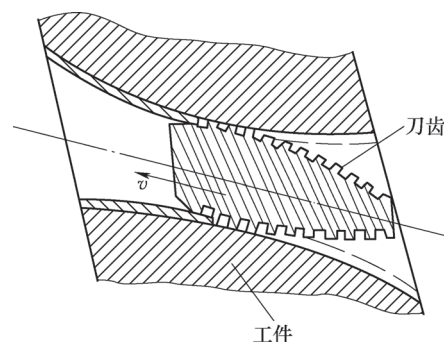


图3 剃齿刀切削齿轮

交错轴传动的斜齿轮, 在每个啮合瞬时理论上点是点接触。由于径向进给的作用, 工件齿面的接触部位将产生弹性变形, 因此普通盘形剃齿刀剃齿时的实际瞬时接触区是一个椭圆面 (见图4a)。随着工件与剃齿刀的啮合转动, 这个椭圆形接触区沿着接触线 (对于斜齿轮, 它是齿面上一条倾斜的曲线; 对于直齿轮, 它是一条平行于端面的渐开线) 移动, 剃出一条接触带 (见图5), 再通过轴向进给运动扩展到整个齿面, 切削作用就覆盖了全齿面, 也就是一个直齿轮在没有轴向进给的情况下, 啮合后被剃出的是一条沿着渐开线的接触带。由于剃齿刀是斜齿轮, 其接触点轨迹形成的接触带是倾斜于端面的曲线, 且左、右侧面上的曲线具有不同的倾斜方向。

对于径向剃齿刀, 由于齿面的修正, 所以其瞬时接触区将是一条相当于齿宽的带形面 (见图4b)。随着工件与剃齿刀的啮合转动, 即可实现齿面的精加工。

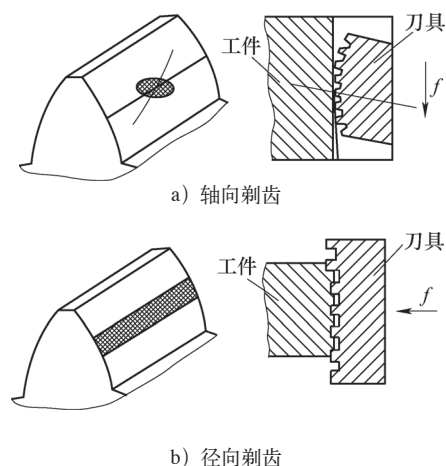


图4 剃齿刀瞬时接触区

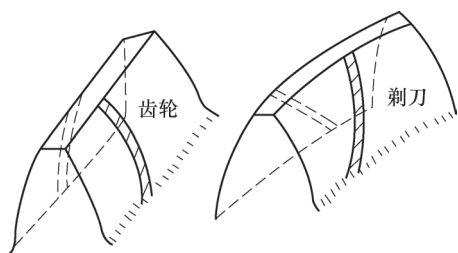


图5 剃齿时接触带

剃齿刀齿侧面的切削刃槽侧面通常是平行于刀具端面或垂直于刀具齿向，使两侧切削刃分别具有正、负前角或零前角，如图6所示。由于剃齿刀切削工件时，它的齿侧面（侧后刀面）和工件的加工表面相切，所以剃齿时的后角等于 0° ，这将产生挤压现象，因此剃齿是一个在滑移运动中产生切削与挤压的加工过程。

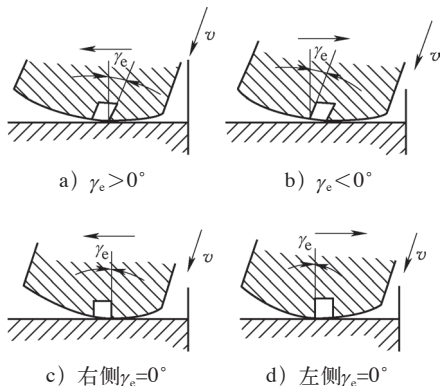


图6 剃齿刀的切削角度

3.2 齿轮啮合过程中渐开线切向滑移运动

由于剃齿的切削原理是利用交错轴齿轮啮合过程中齿向螺旋角与轴交角产生轴向滑移速度进行切削的，因此剃齿刀的梳槽方向平行于渐开线方向。剃齿过程中除切削运动外，还存在渐开线齿轮啮合必然产生的渐开线切向滑移速度，虽然此速度与切削刃平行，起不到切削作用，但是此速度却是不可忽略的，齿轮的啮合过程如图7所示。由渐开线齿轮的啮合过程可知，齿轮在啮合过程中同时存在滚动和滑动，滑移速度方向与齿面相切，与接触线垂直，速度方向在节圆处换向，也就是说节圆处的相对滑移速度为零。

3.3 齿面划伤原因分析

由齿面划伤的描述可知，齿面划伤是一些细小的细沟状划痕。由于剃齿刀的前刀面与后刀面都是光滑的，不会划伤齿面，因此齿面划伤的力不是刀具本身产生的。与齿面接触的物体中除刀具外只有

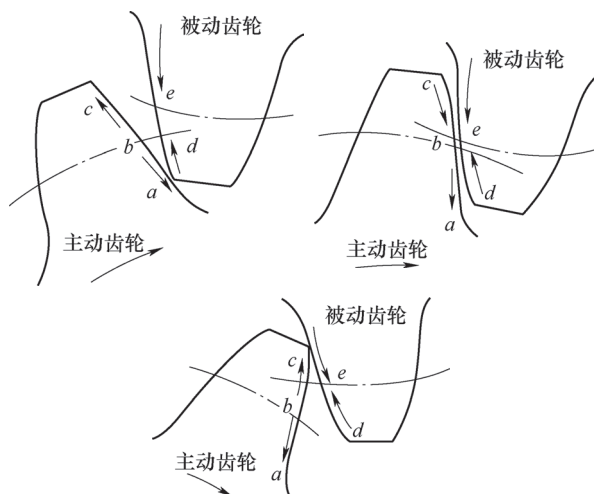


图7 齿轮的啮合过程

切屑，但是切屑是如何划伤齿轮的齿面呢？根据剃齿原理可知，剃齿过程中的切削运动方向垂直于刀具齿面梳齿槽，剃齿是一个在滑移运动中产生切削与挤压的加工过程（见图8），剃齿切屑被刮下后，被剃刀切削槽的前刀面推向槽内，正常情况下无法划伤齿面，假设在切削热的作用下，切屑粘结在刀具上，将有可能划伤齿面，但由剃齿原理可知，即使有刀具粘屑也不应划伤齿面，因为后刀面与工件是挤压的，而且切削过程中前刀面是整体前移刮削的，不应产生划伤问题。若以上因素均不考虑，假设粘屑随前刀刃切削方向移动划伤齿面，那么划伤痕迹的方向应该是沿着齿向的方向，但是划伤痕迹方向与齿向垂线有一定角度。从这个角度讲，粘屑不会随着切削运动划伤齿面，但是在剃齿过程中除了对剃齿有用的齿向滑移运动外，还有一个齿轮啮合过程中产生的渐开线切向滑移运动，此运动在切削刃光滑时无任何作用，但是如果切削刃上粘有切屑，将像一把刀一样划伤齿面，且划伤方向应该沿渐开线方向。同时由于与齿向方向的切削运动矢量合成，因此使得此划伤方向偏离了一定角度，划伤

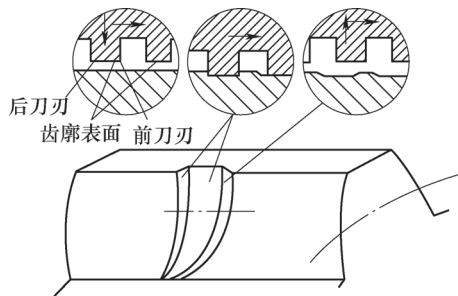


图8 剃齿刀切削

方向与前文所描述的齿面划痕方向一致。也就是说齿面划伤的原因是齿面粘屑划伤齿面。产生齿面划伤的剃齿刀如图9所示,是一把已经磨损严重且出现剃齿划伤的刀具,在其表面可以看到许多粘连在切削刃上的细丝状切屑,这些切屑冷作硬化后会划伤齿面。

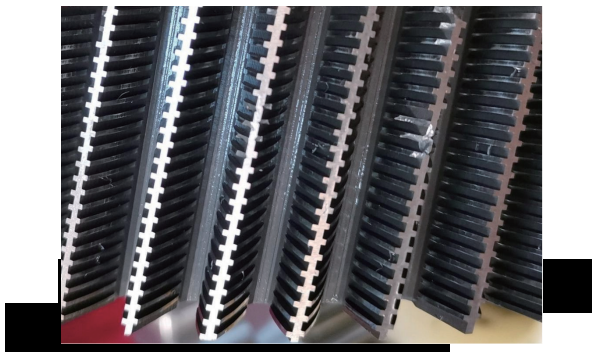


图9 产生齿面划伤的剃齿刀表面粘屑情况

从以上分析可知,齿面划伤的原因是粘屑。粘屑的主要影响因素是被剃齿轮的材质与切削热,也就是影响切削热的因素将会影响剃齿齿面划伤情况,影响切削热的主要因素有以下几点。

- 1) 刀具前刀刃不锋利,将会导致挤压增大、切削热增加。
- 2) 切削速度,切削热与切削速度呈正相关关系,速度越快切削热越多。
- 3) 切削液效果差将无法很好地带走切削热,使齿面与刀具温度上升。
- 4) 刀具排屑槽设计不合理,使切屑不能及时排出,切削液无法到达,冷却效果差,将导致切削热不能及时散出。

5) 剃齿循环过程中背吃刀量大将导致切削热增加,背吃刀量主要影响因素有:①剃齿循环过程中径向进给的选取。②剃齿前的齿坯精度。③被剃齿轮齿形修形量要求。④剃齿前余量均匀性。

根据剃齿划伤的描述及上述分析可知,划伤的位置主要在齿轮的齿顶,划伤的主要原因是切削热,剃齿过程中齿轮顶部的切削是刀具齿根处完成的,由于刀具齿根处的冷却效果与排屑效果最差,所以此处切削热难以散去,产生粘屑,从而划伤齿面。另外,齿轮粘屑划伤的主要运动是齿轮啮合渐开线相对滑移,根据齿轮啮合相对切向滑移原理,齿轮在啮合过程中,节圆处的渐开线切向速度为零,此处将不会产生划伤,而齿顶与齿根处的渐开线切向滑移速度最快(此处速度不是切削速度,不

影响切削热产生),划伤相对严重。

齿顶划伤严重的另一个原因是剃齿过程中齿顶的切削速度最快,产生的切削热最多,所以齿顶出现划伤,齿顶切削速度最快的原因分析如下。

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(见图2c)。剃齿刀在啮合节点的圆周速度 v_0 可以分解成垂直于刀齿方向的速度 $v_{0n} = v_0 \cos \beta_0$ 和沿刀齿方向的速度 $v_{0t} = v_0 \sin \beta_0$ 。同理,齿轮在啮合节点的圆周速度 v_w 也可分解为 $v_{wn} = v_w \cos \beta_w$ 和 $v_{wt} = v_w \sin \beta_w$ 。由于剃齿刀和齿轮在啮合节点的法向分速度应相等,所以 $v_{0n} = v_{wn}$,即 $v_0 \cos \beta_0 = v_w \cos \beta_w$ 。

剃齿刀和齿轮在啮合节点的齿面滑动速度 v 为沿齿向分速度的向量差,此 v 即为剃齿刀的切削速度,其计算式为

$$v = v_{wt} \pm v_{0t} = \frac{\pi d_0 n_0}{1000 \cos \beta_w} \sin \Sigma \quad (1)$$

式中, d_0 是剃齿刀外径(mm); n_0 是剃齿刀转速(r/min); Σ 是轴交角($^\circ$)($\Sigma = \beta_0 \pm \beta_w$,剃齿刀与工件螺旋方向相同时用“+”;相反时用“-”)。

加工斜齿齿轮时,由于工作台的纵向进给是沿工件轴向进行的,所以工件将产生附加转动。因进给量 f 很小,对滑动速度的影响可忽略不计,所以通常 v_0 为131~145m/min, v 为35~45m/min。

以上分析的是盘形剃齿刀啮合节点处的切削速度。由于啮合时接触点是变化的,所以切削刃沿齿高各点的切削速度也不相同,其变化如图10所示。

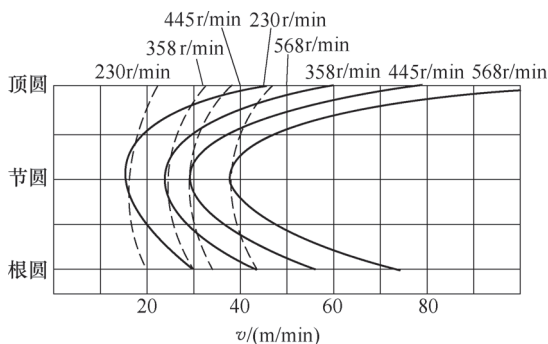


图10 剃齿刀切削速度的变化

通过分析我们知道,齿顶的切削速度是最快的,产生切削热也是最多的,加上与齿轮齿顶啮合的是刀具的齿根,排屑与冷却效果最差,因此齿顶

最容易产生划伤。

4 试验验证理论分析的正确性

4.1 试验验证

通过理论分析出可能影响齿面划伤的因素，逐个将其作为单一变量，其他条件恒定，验证这些因素是否为划伤的影响因素，从而得出影响关系。

(1) 不同硬度的材料 使用同一台剃齿机，相同参数，相同剃齿刀，对不同硬度的材料进行剃齿，剃齿效果见表1。由表1可知，材料的硬度对剃齿齿面划伤有影响，剃齿材料过软，容易导致粘刀，出现齿面划伤；材料过硬，刀具容易钝化，产生切削热，进而产生划伤。由于刀具磨损使齿形产生变化较大，因此剃齿坯材料硬度要适中。

表1 不同硬度材料剃齿效果

剃齿方式	毛坯材料	毛坯硬度HBW	开始出现齿面划伤时的生产数量/件
轴向剃齿	FAS3420H	150~161	1652
		165~172	2056
		190~199	1985

(2) 不同钝化程度的剃齿刀 试验采用1把已经加工过2000件以上零件的剃齿刀，且已经严重用钝，一把新磨完成的剃齿刀，使用同一台剃齿机，相同切削参数，剃削相同零件。检测划伤情况，发现用钝的刀具加工的零件出现划伤情况，而新磨刀具没有出现划伤情况。

(3) 不同切削参数 采用已经加工了1500件零件的相同剃齿刀，使用不同切削参数进行剃齿，并检验其划伤情况，试验效果见表2。从表2中可以看出，切削速度与切削过程中的背吃刀量都影响齿面划伤。

表2 不同切削参数剃齿效果

切削速度/(r/min)	循环次数/次 (影响背吃刀量)	剃齿余量 (公法线)/mm	划伤情况
180	5	0.15	轻微划伤
180	3	0.15	严重划伤
240	5	0.15	严重划伤
240	5	0.10	轻微划伤
100	5	0.08	无划伤

(4) 不同切削液 使用相同的剃齿条件，改变

切削液，验证切削液对齿面划伤的影响，试验效果见表3。由表3可知，切削液的冷却润滑效果对齿面划伤影响非常大，油品变质、脏、有气泡等都将直接影响冷却润滑的效果，导致剃齿刀粘屑，并划伤齿面。

表3 不同切削液剃齿效果

切削速度/(r/min)	循环次数/次 (影响背吃刀量)	剃齿余量 (公法线)/mm	切削液	划伤情况
120	5	0.08	使用2月以上	轻微划伤
			混入液压油，被污染	严重划伤
			新更换，未使用添加剂	加工1536件后开始出现划伤
			新更换，使用添加剂（增加润滑，消泡）	加工2347件后开始出现划伤

4.2 试验结论

通过控制单一变量的方法进行试验，结果显示每一个变量的变化引起划伤的变化规律与理论分析完全契合，证明理论分析的正确性，为齿面划伤的解决奠定了理论与试验基础，也为解决齿面划伤问题提供了依据。同时，我们发现所有影响剃齿切削热的因素都将影响剃齿齿面的划伤，剃齿齿面划伤是多重因素综合影响导致的结果。

5 解决剃齿齿面划伤问题

通过以上分析和验证可知，剃齿齿面划伤的根本原因是切削热导致粘屑划伤齿面，影响切削热与切屑黏性的因素都影响齿面划伤，齿面划伤是多个因素综合影响的结果，因此要解决齿面划伤问题，需要从多方面因素考虑。综上所述，我们需要针对每一个影响因素制定解决措施与标准，主要从以下几个方面着手。

(1) 被剃齿轮材料选择 剃齿前工件材料要求密度均匀，不含杂质，不应存在局部缺陷或韧性过大，材料硬度要求在170~197HBW。

(2) 切削液的选择与控制 切削液的冷却效果直接影响齿面质量，切削液的纯净度、抗泡能力、浓度及润滑性等都将影响其冷却效果与润滑效果。因此，要保证切削液不被污染，特别是杜绝混油现象的产生，可以在切削液中增加适当的添加剂，提

升切削液的抗泡性与润滑性。

(3) 齿坯切削余量的控制与选择 齿坯切削余量的选择原则是在能保证齿面全部剃出的前提下选择最小的切削余量。切削余量的减小主要受剃齿前齿轮精度与齿部修形要求限制, 齿轮齿向精度、齿形精度、周节累积精度三者的综合尺寸精度相加, 再加上齿形与齿向修形公差之和就是理论最小切削余量。模数10以内的齿轮, 按一般的经验推荐, 切削余量为0.06~0.10mm, 在提高精度不允许的情况下, 只能通过降低径向进给、增加循环次数, 以及牺牲剃齿效率的方法进行弥补。

(4) 切削参数的选择 切削参数的选择将直接影响切削的效率, 同时也影响齿面划伤情况, 且两者是矛盾的, 切削速度快可以提升生产效率, 但是更容易出现划伤现象, 因此切削参数的选择需要结合理论推荐与现场试验综合给出。

(5) 刀具控制 刀具的控制主要有两个方面: 一是用钝程度控制, 刀具用钝后要及时更换, 保证刃口锋利, 否则极易出现划伤现象; 二是控制刀具设计的合理性, 主要是刀具容屑槽的设计、刀具平衡点的选取控制以及刀具材质选取等。

(6) 剃齿方法的选择 前面提到切削效率, 刀具用钝寿命与齿面划伤是矛盾的, 经常是因为切削效率过高, 刀具用钝后未及时更换而产生齿面划伤, 因此选取合适剃齿方法解决齿面划伤问题尤为重要。径向剃齿是线接触剃齿, 相对轴向剃齿的点接触剃齿效率有很大的提升, 同时由于径向剃齿的进刀方式不同, 剃齿过程中背吃刀量远小于轴向剃齿, 加上径向剃齿是线接触切削, 刀具寿命得到了大幅度提升, 很好地解决了上述矛盾。径向剃齿不仅解决齿面划伤问题, 还兼顾了刀具寿命与剃齿效率。目前, 我公司已全面使用径向剃齿工艺进行加工。

6 改进效果

我公司采用径向剃齿工艺, 通过选择合理硬度材料、优化剃齿刀容屑槽、试验得到合理的切削参数、控制切削液纯度定期换油以及使用添加剂等一些列措施后, 彻底解决了齿轮剃齿过程中齿面划伤问题。改进前后齿面对比如图11所示, 且方案已经稳定维持1年以上, 完成200万件以上达标产品, 有效保证了剃齿产品的齿面质量。

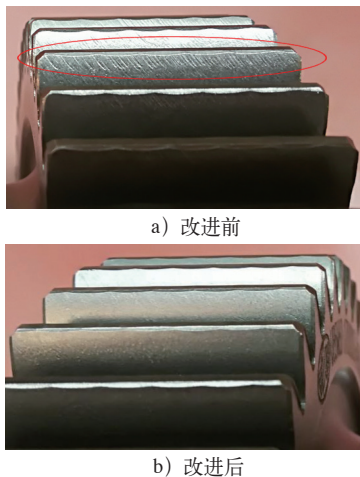


图11 改进前后齿面对比

7 结束语

通过分析剃齿齿面划伤的的根本原因, 对导致齿面划伤的众多影响因素逐一进行变量规律验证, 得出的变量变化规律与理论分析的规律相吻合, 进而证明了理论的正确性, 为解决齿面划伤问题奠定了理论与试验基础。综合考虑引起齿面划伤的众多因素, 制定出合理的解决措施, 并付诸实践, 彻底解决了齿面划伤问题, 有效地提升了齿轮的齿面质量, 降低了齿轮的啮合噪声。

参考文献:

- [1] 许洪基. 齿轮手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 王先逵. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

MW 20210408

欢迎关注微信公众号: 机工刀具世界

“机工刀具世界”定位于指导制造企业一线技术员工如何合理选择和使用数控刀具, 介绍数控刀具使用技巧。关注刀具行业最新技术进展, 为广大制造企业推荐先进、实用数控刀具产品。

扫描二维码即可关注!

