

应用于螺旋锥齿轮热后精加工的珩齿技术研究

凌文锋^{1,2}, 姜虹²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 北京交通大学机电工程学院, 100044, 北京)

摘要: 分析了基于交错轴传动的珩齿原理, 导出珩磨轮与被珩齿轮在啮合点处的相对滑动速度的数学模型, 根据该数学模型可以判定珩磨轮的节锥面是由珩磨轮齿数、公法线和与珩磨轮轴线平行的平面夹角所确定. 在建立的珩磨轮齿面准均布网格点上, 采用法线投影法计算各点的极限拔模导程, 并通过比较凸齿面上最小拔模导程的最大值和凹齿面上最大拔模导程的最小值来判定是否存在拔模干涉. 针对出现的拔模干涉, 提出了拔模导程的优化方法, 以及干涉的修正方案和齿面光顺过程. 给出的珩磨轮设计的部分计算实例表明, 珩齿技术可以在工业精加工方面得到广泛应用.

关键词: 螺旋锥齿轮; 珩齿; 拔模干涉

中图分类号: TH132.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0815-05

Honing Technology in Spiral Bevel Gear Finish Machining after Heat Treatment

Ling Wenfeng^{1,2}, Jiang Hong²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical and Electromechanical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Analyzing the honing principle of spiral bevel gears based on crossing-axis transmission, the mathematical model of the relative sliding speed of the contact point between honing wheel and gear is achieved. It is determined that the pitch cone of honing wheel depends on the number of teeth in the honing wheel and the angle between the common normal of pitch cones and the plane parallel to both gear and honing wheel axes. Once the uniformly-distributed grids of gear surface are constructed, the limited lead of mould-drawing for each grid is evaluated by the normal projection to estimate the interference by comparing the maximum in the minimal leads on concave gear surface and the minimum in the maximal leads on bulgy gear surface. For the appearing interference, the optimum schemes for the model-drawing lead and interference modification are presented. The numerical example shows that the design and manufacture methods of honing wheels are able to meet the industry requirement.

Keywords: spiral bevel gear; gear honing; draft pattern interference

齿轮珩磨是目前汽车工业等大批量生产过程中应用最广泛的圆柱齿轮热后精加工方法^[1], 该方法加工效率高, 单件成本低, 并能获得较低的齿轮噪声, 但目前螺旋锥齿轮的热后精加工工艺主要是磨齿、研齿和硬齿面刮削, 除磨齿外, 后2种方法在圆柱齿轮精加工中几乎无人采用, 说明了这2种方法

的先天不足. 但是, 在螺旋锥齿轮的热后精加工中, 这2种方法却能够得到广泛应用, 因为在该领域中缺乏一种高效、低成本的精加工手段. 为此, 本文研究了螺旋锥齿轮珩磨的可行性和各项相关技术, 表明珩齿是螺旋锥齿轮热后精加工的有效手段.

1 现有热后精加工技术的比较

目前,可用于螺旋锥齿轮硬齿面精加工的主要方法有研齿、磨齿和硬齿面刮削^[2],研齿是传统的工艺方法,生产效率较高.在热处理变形不大的情况下,研齿能改变有效齿形表面的粗糙度和接触位置,并能够稍微修正齿形和齿向误差,但对于消除径向跳动、周节误差、齿形误差和其他由热处理变形引起的误差,研齿则无能为力^[2].

磨齿工艺可以获得很高的加工精度,过去仅用于精密传动和航空齿轮等特殊场合,随着 SG 砂轮和数控磨齿机的推广和磨头功率的加大,磨齿效率已经和切齿效率相当,在高档轿车中获得了广泛的应用.在中低档轿车中,由于初次设备投入过高,运行成本也不低,因此至今仍很少采用^[3].

用硬齿面刮削方法加工弧齿锥齿轮是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一种新型的加工方法,这种工艺方法主要是解决奥利康制齿轮无法磨齿的问题,由于生产效率较高,加工成本增加也不算很大,因此得到了部分的应用.但是,该工艺方法的一次性投资费用很可观,且硬齿面刮削技术还存在一个齿面质量不稳定的问题,加工参数比较理想时齿面接触疲劳寿命高于磨齿齿面,加工条件不理想时可能会出现细微的网状裂纹,使疲劳寿命大幅度下降^[4].

2 珩磨轮的设计方法^[5]

圆柱齿轮的珩齿原理,是利用珩磨轮与被加工齿轮在做交错轴传动中,沿全齿面的相对滑动速度来去除部分齿面材料的,螺旋锥齿轮也可以与珩磨轮做成一对准双曲线齿轮,做交错轴传动,从而避免节线处的相对滑动速度为 0、在珩齿过程中产生齿形畸变等问题.因此,从理论上讲,螺旋锥齿轮的珩齿加工是可以实现的.

珩磨工序在进行全齿面加工的同时还要保证珩磨过程不产生压力角偏差,这就要求珩磨时的节线位于齿面有效齿高的中部,使被加工齿轮齿顶和齿根部的滑动速度基本对称.被加工齿面与珩磨轮之间的滑动速度在齿高中部是沿齿长方向的,而在齿面的其他部位则既有沿齿长方向的滑动速度,也有沿齿廓方向的滑动速度.因此,珩磨后就可得到压力角不变而沿齿廓方向的鼓形量略微增大的齿面.

对于主被动齿轮的齿数差比较悬殊的齿轮副,通常都有比较大的齿高变位系数,大齿轮的节线靠近齿顶,小齿轮的节线靠近齿根,齿顶高和齿根高对

于大、小齿轮都很不对称.因此,为了保证珩磨质量,对于大、小齿轮都必须重新构造一个不同于齿轮啮合节锥面的珩磨节锥面.具体做法是在被加工齿轮的大端和小端的工作齿高中点,分别计算其半径和该点沿轴线方向到交错点的距离,这 2 个点连线的延长线与齿轮轴线的交点就是珩磨节锥面的顶点,该顶点越过交错点的距离用 S_{GH} 表示,连线与齿轮轴线的夹角就是珩磨节锥面的锥角,用 γ_{GH} 表示.

由于被加工齿轮和珩磨轮是一对双曲线齿轮,它们的节锥面仅在一点相切,该点应位于齿宽中部,即上述大、小端工作齿高中点连线的中点,称为被加工齿轮的节点 P . 齿轮珩磨节锥面在 P 点处的法线 $\mathbf{n}$ 与齿轮轴线的交点到 P 点的距离 l_G ,是由上述珩磨节锥面的设计过程惟一确定的,而 P 点在珩齿坐标系(见图 1)中的位置决定于齿轮珩磨节锥面与珩磨轮的节锥面在 P 点处的 $\mathbf{n}$ 与 yz 平面的夹角 θ ,则公法线为

$$\mathbf{n} = \{-\cos\gamma_{GH}\sin\theta, -\sin\gamma_{GH}, -\cos\gamma_{GH}\cos\theta\} \quad (1)$$

齿轮上 P 的径矢

$$\mathbf{r}_{GH} = \{-A_{GH}\sin\gamma_{GH}\sin\theta, A_{GH}\cos\gamma_{GH} - S_{GH}, -A_{GH}\sin\gamma_{GH}\cos\theta\} \quad (2)$$

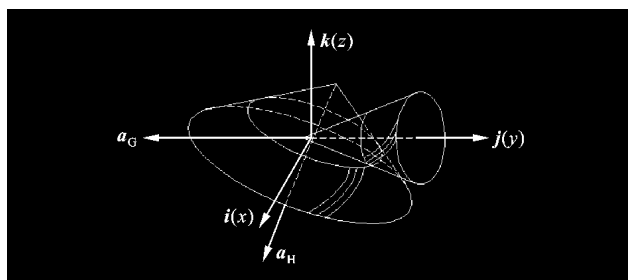
式中: A_{GH} 为被珩齿齿轮上珩磨节锥中点的锥矩. 设齿轮的角速度为 1, 该点的速度向量为

$$\mathbf{v}_{GH} = \mathbf{a}_G \times \mathbf{r}_{GH} \quad (3)$$

齿轮上 P 处的螺旋角为 Ψ_{GH} , 则在珩磨过程中该点的相对滑动速度向量为

$$\mathbf{v}_s = (\cos\Psi_{GH}\sin\gamma_{GH}\sin\theta - \sin\Psi_{GH}\cos\theta)\mathbf{i} - \cos\Psi_{GH}\gamma_{GH}\mathbf{j} + (\cos\Psi_{GH}\sin\gamma_{GH}\cos\theta - \sin\Psi_{GH}\sin\theta)\mathbf{k} \quad (4)$$

$\mathbf{n}$ 与珩磨轮的轴线也是相交的, 交点到 P 点的距离根据下述原理来确定: 当珩磨轮与被加工齿轮间的转速比等于珩磨轮与被加工齿轮的齿数比的倒数时, P 点处的相对滑动速度恰好沿着齿长方向. 由于



$\mathbf{a}_H$: 珩磨轮的轴线向量; $\mathbf{a}_G$: 被珩齿齿轮的轴线向量

图 1 珩齿原理示意图

被加工齿轮上的珩磨节锥面与原节锥面并不重合,因此珩磨节锥面上的螺旋角以及珩磨节锥面上的齿线方向均与原节锥面上的方向不同,需要重新计算.具体计算过程为:首先求得 v_{GH} 和 v_S , 然后给出一个 l_H 的初始值. n 与珩磨轮轴线向量的交点为

$$T_H = r_{GH} + n l_H \quad (5)$$

过上述交点作 x 轴的垂线,就得到了珩磨轮的轴线向量

$$a_H = \frac{\{0, T_{H,y}, T_{H,z}\}}{(T_{H,y}^2 + T_{H,z}^2)^{1/2}} \quad (6)$$

于是可得珩磨轮上 P 点的速度向量为

$$v_H = \frac{n_a}{n_H} a_H \{-l_H n_x, r_{GH,y}, r_{GH,z}\} \quad (7)$$

如果齿面间的相对速度 $v_R = v_{GH} - v_H$ 与 v_S 平行,说明 l_H 的值是正确的,否则可以通过迭代算法修正 l_H ,使 v_R 与 v_S 共线.

由设计过程可知,珩磨轮的节锥面是由 2 个参数确定的:①节锥面的公法线与 yz 平面的夹角 θ ;②珩磨轮的齿数 z_H . θ 角越大,珩磨轮的偏置距及珩磨轮与被加工齿轮间的相对滑动速度就越大,加工效率也越高.珩磨轮的齿数越多,珩磨轮的耐用度也越高,因此这 2 个参数的倒数构成了优化目标函数的一个组成部分.

在实际珩磨轮设计中,还需要考虑 2 个限定条件:首先是被加工齿轮齿面上的有效工作区域都必须在啮合界限线之内,该条件可以通过用迭代法求解啮合方程时,考察其收敛情况来判断;其次是对于被加工齿面有效工作区中的任何一点,珩磨轮上的对应啮合点不许在珩磨轮的齿顶线之内.以上这 2 个条件构成了珩磨轮设计中的限定条件.珩磨轮的齿顶回转面和齿根回转面都不是圆锥面,而是分别由被加工齿轮的齿根圆锥面和齿顶圆锥面包络出来的类似于单叶回转双曲面的回转曲面,该回转曲面是在不断地用金刚石修正轮修正珩磨轮时,被金刚石修正轮的根锥和面锥包络出来的,其回转曲面可通过对应圆锥面上的一系列创成点来逐点求得.根据回转曲面的性质,回转曲面上任何一点必须满足其法线矢量、到轴线上固定点的径矢及轴线向量共面的条件(见图 2),并得到一个仅包含极角和一个未知数的三角方程,即

$$a_H \{E_H - R \sin \theta, R / \tan \theta - s, -R \cos \theta\} \cdot \{\cos \gamma \sin \theta, \sin \gamma, \cos \gamma \cos \theta\} = 0 \quad (8)$$

式中: R 为创成圆锥面上一点的半径; s 为创成圆锥顶点越过交错点的距离; E_H 为珩磨轮的偏置距; γ

为圆锥面的锥角.

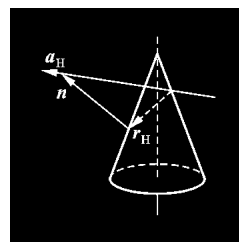


图2 珩磨轮齿顶与齿根回转面的形成原理

采用珩磨轮节锥面、齿顶和齿根回转面的设计方法和优化目标函数,以及罚函数和限制条件,就可以通过优化来确定珩磨轮的设计参数.

3 珩磨轮的制造方法

螺旋锥齿轮珩齿技术应用的关键是珩磨轮的制造方法,珩磨轮通常是由磨料和环氧树脂均匀混合后在模具中浇铸凝固而成的,因此必须保证拨模时没有拨模干涉.

拨模干涉检验是通过分别计算珩磨轮凸面和凹面的最小和最大拔模导程来实现的.将齿面均匀地划分成适当密度的网格,在各网格节点计算与珩磨轮轴线同轴的圆柱面与齿面交线的局部导程,并记录整个凸齿面上最小拔模导程的最大值和整个凹齿面上最大拔模导程的最小值.齿面上网格的形成方法为:首先求得齿面最外端和最内端的半径,将半径差分成若干等份,对应于不同的半径分别作若干个与珩磨轮轴线同轴的圆柱面;然后求得每一个圆柱面与齿面交线上沿轴线方向离交错点最近和最远的距离;将每条交线沿轴线方向的距离差等分后,即可求得沿该交线的网格节点,遍历全部交线,便得到了整张齿面上的网格节点.

每一个节点上的极限拔模导程的计算方法为:对应于每一个齿面节点可以构成一个局部笛卡尔坐标系,坐标轴分别通过齿面节点的半径方向、与同心圆柱面相切的切线方向和珩磨轮的轴线方向,将齿面节点的法线方向投影到圆柱面的切平面上,并将其切向和轴向分量之比乘上圆柱面的周长,即得到该齿面节点的极限拔模导程.对于凸齿面,所得导程是齿面节点的最大拔模导程,对于凹齿面则是最小拔模导程.如果凸齿面上最小拔模导程的最大值大于凹齿面上最大拔模导程的最小值,说明存在拔模干涉问题,否则就不存在拔模干涉.

当出现拨模干涉时,必须对珩磨轮的大端齿面进行适当的加厚修正,以保证能够顺利拨模.拔模干

涉修正的原理是首先确定一个设计拔模导程,然后沿每一条上述同轴圆柱面与齿面的交线检查其是否满足沿设计导程的拔模条件,若不满足则通过修正型值点使其满足拔模条件.在具体实施过程中,可将凸齿面上最小拔模导程的最大值和凹齿面上最大拔模导程的最小值的平均值作为设计拔模导程,并从珩磨轮的小端逐点向上作理论拔模轨迹螺旋线,逐点检验在其上方的齿面是否包含螺旋线,如果不包含,就将齿面型值点进行旋转,修正到螺旋线上.沿螺旋线修正结束后,还需要对齿面进行一次径向光顺,光顺的原则是只增加珩磨轮的实体,不减少实体材料.

珩磨轮的金属模有2种制造方法:①传统的螺旋伞齿轮铣齿技术,采用锥形刀盘在具有刀倾机构的铣齿机或FREE-FORM形铣齿机上展成加工;②采用类似模具加工的方法,用球头铣刀在五轴联动数控加工中心上逐点加工成形.这2种方法各有优缺点:展成加工法的切齿效率很高,但只能得到近似齿面,而且加工前的准备周期也很长,定购刀具就需要2~3个月的时间;点位法虽然加工效率较低,但准备时间很短,因为使用的刀具都是标准刀具,可以提前购置.因此,无论从成本控制还是从响应速度来考虑,采用点位加工是合理的.

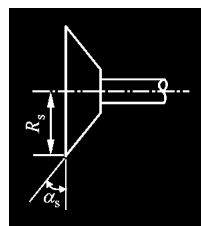
4 金刚石修正轮的制造方法

通常,金刚石修正轮是采用电镀的方法在钢质轮芯上镀覆一层金刚石微粒来获得的.为了提高金刚石修正轮的精度,钢质轮芯在热处理后必须进行精加工,其热后精加工只能采用磨齿方法实现,否则难以保证精度.在镀复金刚石层之后,由于齿面上可能存在一些局部凸起点,也需要用金刚石砂轮对齿面进行修整.如果采用传统的磨齿方法,对于每一副齿轮都要分别定购2个SG锥形砂轮和2个金刚石锥形砂轮,因成本太高,所以难以实施.

为了解决金刚石修正轮的磨齿问题,本文提出了一种新的通用螺旋锥齿轮磨齿方法——单角锥形砂轮点位磨齿法,其特点是同一个砂轮可用于磨削模数在一定范围内的不同型号的齿轮副,从而大幅度地缩短了准备周期,降低了成本.

通常的点位加工方法都是采用指状工具来完成的,但指状砂轮刚度低、磨损快,难以满足加工精度的要求.考虑到螺旋锥齿轮的齿面沿齿长方向的曲率几乎为常数的特点,提出了采用一种一侧为平面、一侧为锥面、类似于单角铣刀的砂轮来磨削齿面的

新方法(见图3).



α_s :单角砂轮的轮缘楔角; R_s :砂轮外缘半径

图3 单角锥形砂轮示意图

单角砂轮上的平面用于磨削凸齿面,不存在任何曲率干涉问题,单角砂轮的轮缘楔角在 $38^\circ \sim 45^\circ$ 之间,主要决定于被加工齿轮副的双侧压力角之和,以不干涉对侧齿面为准,而砂轮的允许最大半径则由曲率干涉条件来限定.设加工凹齿面所采用的刀盘齿形角为 ϕ_v ,刀尖半径为 R_v ,刀尖处的曲率半径最小,其值为

$$\rho_o = R_v / \cos \phi_v \quad (9)$$

对于单角锥形砂轮,锥面上的最大曲率半径在外缘处,其值为

$$\rho_s = R_s / \sin \alpha_s \quad (10)$$

由此可得砂轮的最大允许半径为

$$R_{s,\max} = R_v \sin \alpha_s / \cos \phi_v \quad (11)$$

确定砂轮无干涉最大半径方法的原理为:当采用传统展成方法加工时,被加工齿面是刀盘刃锥面的包络面,刃锥面不会对其产生曲率干涉,单角锥形砂轮完全位于刃锥面的实体之内,可以通过砂轮的锥面在刃锥面内的滚滑和跟随刃锥面的牵连,展成运动的双参数包络来形成被加工齿面,而包络过程中的每一个瞬时单角锥形砂轮的实体都位于刃锥面的实体之内,因此不可能产生曲率干涉.

按式(9)~式(11)确定的砂轮半径,可以实现无干涉的加工,但要保证无干涉的加工,关键是要确定在点位加工中,对于齿面上的每一个被加工点,砂轮与其实现相切接触后剩余的2个自由度,即砂轮母线在切平面上绕被加工点的法线向量的转动自由度和切触点到砂轮外缘的距离.将砂轮锥面母线与刃锥面的母线重合,可消除砂轮在切平面上绕被加工点法线回转的自由度,再将母线上砂轮的外缘与刃锥面的刀顶圆重合,就消除了砂轮母线沿刃锥面母线滑动的自由度,即可确定砂轮的刀位(见图4).

在确定刀位时,可允许砂轮沿公共母线向刃锥面的大端滑动,只要被加工点在砂轮母线的有效区域内,就可以完成待加工点的加工,并且不会产生曲率干涉.但是,砂轮沿公共母线向刃锥面的大端滑动

时,将导致砂轮表面的有效工作面积缩小,耐用度降低.因此,采用模拟刃锥面单参数包络运动的砂轮锥面双包络加工方法是比较可取的.

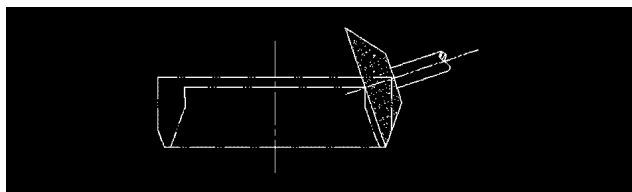


图4 锥形砂轮与刃锥面的位置约束

5 计算实例

根据珩磨轮的设计方法,一对半展成的双曲线齿轮副的轴间角为 90° ,主被动轮结构参数见表1.对被动轮的珩磨轮进行设计的结果表明,该珩磨轮能保证齿面有效工作区完全位于啮合界限之内.拔模干涉检验表明,用于加工主、被动齿轮的珩磨轮的凸齿面上最小拔模导程的最大值均小于凹齿面上最大拔模导程的最小值,说明不存在拔模干涉,无须修形.

表1 珩磨轮设计实例

参数	主动轮	被动轮	珩磨轮
齿数	13	46	39
分度锥角/ $^\circ$	19.37	69.17	67.88
面锥角/ $^\circ$	23.57	71.18	68.17
根锥角/ $^\circ$	17.47	64.58	61.58
螺旋角/ $^\circ$	50.50	28.13	40.67
齿面宽/mm	39.024	33.020	35.886
S_{GH}/mm	16.179	-0.533	-1.063
面锥顶点越过交错点距离/mm	10.820	-2.006	0.714
根锥顶点越过交错点距离/mm	17.195	0.381	2.798
A_{GH}/mm	108.432	98.755	99.566

6 结论

齿轮珩磨技术是目前大批量制造高质量低噪声圆柱齿轮中最常使用的热处理后的精加工技术,可有效地降低齿轮噪声,改善啮合品质.本文将珩齿技术引入螺旋锥齿轮的热后精加工中,并通过对所有相关的关键技术问题的深入分析,给出了相应的解决方案,为将珩齿技术引入螺旋锥齿轮的精加工工序奠定了理论基础.

参考文献:

- [1] 李健建. 圆柱齿轮热后精加工技术现况与发展[J]. 江苏机械制造与自动化, 2000(2):15-17.
Li Jianjian. Current situation development of finishing technology of heat-treated cylindrical gears[J]. Jiangsu Machine Building Automation, 2000(2):15-17.
- [2] 智永红. 弧齿锥齿轮硬齿面加工工艺[J]. 山西机械, 2001(4):40-41.
Zhi Yonghong. Manufacturing process of hard surface of pyramidal gear wheel[J]. Shanxi Machinery, 2001(4):40-41.
- [3] 庄中. 格里森弧齿锥齿轮磨齿技术的发展[J]. 汽车工艺与材料, 2004(9):11-18.
Zhuang Zhong. Development of Gleason spiral gear grinding technology[J]. Automobile Technology and Material, 2004(9):11-18.
- [4] 孙进平. 弧齿锥齿轮硬齿面加工的现状与发展[J]. 机械工艺师, 1997(6):31-32.
Sun Jinping. State-of-the-art and development of machining of hardened bevel gear with cured teeth[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 1997(6):31-32.
- [5] Wang Xiaochun. Advanced theories of hypoid gears [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994:79-88.

(编辑 管咏梅)

本刊在线稿件处理系统正式开通运行,实行在线投稿、在线审稿、在线查询和全文免费阅读.

<http://www.jdxb.cn>