

小模数弧齿锥齿轮的高速干切削技术及加工试验研究

刘琪 张华 杨建军

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 传统的小模数弧齿锥齿轮铣齿加工需要使用大量切削液,不仅会造成环境污染,还增加了生产成本;新型高速干切削工艺不使用切削液,减少了环境污染,且可提高生产效率。基于斜角切削理论,将斜角切削等效平面法与弧齿锥齿轮加工理论相结合,研究了小模数弧齿锥齿轮高速干切削工艺。针对小模数弧齿锥齿轮的高速干切削工艺特点,建立斜角切削热力耦合模型,利用 Abaqus 有限元软件,仿真分析了不同工艺条件对切削力的影响。选取硬质合金作为刀具材料,讨论了小模数弧齿锥齿轮的高速干切削工艺过程,并通过加工试验验证了该工艺的可行性。研究为该工艺的实施提供了参考依据。

关键词 小模数弧齿锥齿轮 切削仿真 高速干切削 斜角切削

Research on High Speed Dry Cutting Technology and Machining Experiment of Small Module Spiral Bevel Gear

Liu Qi Zhang Hua Yang Jianjun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract Traditional small module spiral bevel gear milling needs to use a large number of cutting fluid, which will not only cause environmental pollution, but also increase production costs, the new technology of high speed dry cutting does not use cutting fluid, which reduces environmental pollution and improves production efficiency. Based on the theory of bevel cutting, combining the equivalent plane method of oblique cutting with the machining theory of spiral bevel gear, the high speed dry cutting technology of small module spiral bevel gear is studied. Aiming at the characteristics of high speed dry cutting technology of small module spiral bevel gear, the thermal mechanical coupling model of bevel cutting is established, and the influence of different process conditions on cutting force is simulated and analyzed by using Abaqus finite element software. The cemented carbide is selected as the tool material, and the high speed dry cutting technology process of small modulus spiral bevel gear is discussed. The feasibility of this technology is verified by machining test. The research provides a reference basis for the implementation of this technology.

Key words Small module spiral bevel gear Cutting simulation High speed dry cutting Bevel cutting

0 引言

高速干切削是指在不冷却液、无润滑剂的情况下,机床主轴进行的高速进给加工^[1]。高速干切削技术已被广泛应用到各种机械加工场合。该技术杜绝了切削液的使用,切削过程节能环保。高速干切削加工齿轮时切齿效率高、齿面加工精度高。但是,该工艺对机床性能、刀具材料却有着极高的要求^[2]。

国外对高速干切削工艺的研究应用较为成熟,不仅有满足该工艺的机床和刀具,而且在一些工业

发达国家,代替湿式加工齿轮也较为普遍^[3]。在干式切削中、大模数弧齿锥齿轮研究中,1998年,瑞士克林贝格-奥利康公司研制出了弧齿锥齿轮干切削铣齿机床。2003年,美国格林森公司展示了数控锥齿轮铣齿机 Phoenix II,加工效率得到提升,也改善了齿面加工精度。日本三菱公司研制出世界第一套切削速度达到 200 m/min 的干式滚切系统,并且已投入生产。国内最早在 20 世纪 90 年代开始研究高速干切削加工齿轮技术。2012 年,长沙中大创远公司推出

我国首台全数控锥齿轮干切削机床 YKA2260, 用于加工等高齿和收缩齿。天津精诚机床厂研制出全数控弧齿锥齿轮干切削机床 JCB-20。目前, 我国在中、大模数弧齿锥齿轮的高速干切削技术方面得到了一定的推广应用, 但小模数弧齿锥齿轮的铣齿加工还停留在传统湿式加工。长期以来, 由于小模数弧齿锥齿轮整体尺寸小, 为了控制生产成本, 所用的铣齿机床结构简单, 机床性能难以满足高速干切削工艺的应用。随着 AI、5G 应用时代的到来, 智能装备出现在人们生活的各个方面, 很多智能装备的终端执行机构需要精密的齿轮传动, 市场对于高端小模数弧齿锥齿轮的需求日益增加。国内的天津精诚、中山迈雷特等公司研制了工件轴和刀具轴都采用直驱马达的高端小模数数控铣齿机, 这类机床刚性好、精度高, 可以满足高速干切削的工艺要求。实施高速干切削工艺, 除了高性能的机床, 还要求性能优越的切削刀具。国内还没有专门应用于小模数弧齿锥齿轮高速干切削的硬质合金涂层刀具, 当前迫切需要对小模数高速干切削刀盘进行开发研究。如何将高速干切削技术应用到小模数弧齿锥齿轮的加工中, 成为改善该工艺的热点问题。

本文中通过分析高速干切削加工弧齿锥齿轮的工艺特点, 并对该工艺过程进行仿真, 通过干切试验, 证明了将高速干切削工艺运用在小模数弧齿锥齿轮加工上的可行性。

1 斜角切削理论

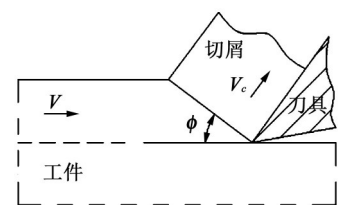
1.1 弧齿锥齿轮加工理论

弧齿锥齿轮常用的加工方法有成形法与展成法两大类^[4]。第一类加工方法常用于大轮加工中, 即大轮齿形与铣刀盘切削刃形状一样, 铣刀盘转动加工, 而大轮轮坯固定在夹具上保持不动。第二类加工方法中, 铣刀盘与被加工轮坯相对运动, 严格按照滚比进行切齿加工。无论是成形法加工还是展成法加工, 都不能简单认为是直角切削, 因为铣齿加工是刃倾角不断变化的过程, 所以, 斜角切削更贴近实际加工^[5]。所谓斜角切削, 指的是切削刃位置与切削速度方向呈一定角度。以往研究的直角切削, 则是切削刃与切削速度方向垂直。直角切削可以简化模型成二维切削, 而斜角切削由于刃倾角不为 0° , 则变成三维切削, 斜角切削属于直线刃斜角切削过程。二维切削无论是理论研究还是有限元仿真都已经较为成熟, 而相对复杂的三维切削则已知的研究较少。但在实际应用中, 三维切削占据了绝大多数, 也符合小模数弧齿锥齿轮高速干切削加工过程。

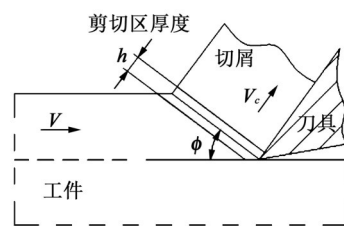
1.2 斜角切削几何关系

斜角切削类似于直角切削, 可看成直角切削的累积。切削力作为高速干切过程重要的物理量, 与刀具寿命、加工质量、机床振动等都有重要联系, 说明切削力的研究具有重要意义。要推导高速切削环境下切削力的计算过程, 就必须开展关于剪切区模型的研究。最早, Merchant^[6]建立了单平面剪切区模型, 如图 1(a)所示。当时认为剪切区没有厚度, 后来证明实际加工中剪切区是存在的; 单平面剪切区模型为后来的平行边界剪切区模型、扇形剪切区模型、非等分剪切区模型研究奠定了基础。后来, Oxley 等^[7]提出了带有剪切区厚度的平行边界剪切区模型, 如图 1(b)所示。Shaw 等^[8]认为厚度 h 约为 0.025 mm (取合理平均值)。Zorev^[9]提出了剪切区形状是扇形剪切区模型, 如图 1(c)所示。本文中采用 Astakhov 等^[10]提出的非等分剪切区模型, 该文献在平行边界剪切模型基础上认为剪切区分为两个区域厚度, 如图 1(d)所示, 较宽区域 ($0 \leq y \leq k_h$) 和较窄区域 ($k_h \leq y \leq h$), 与实际高速干切削加工较为符合。

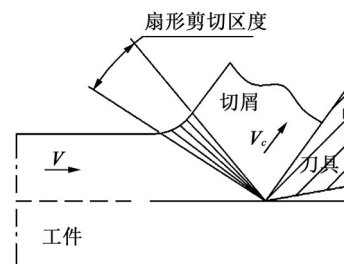
图 1 中, V 为切削速度; V_c 为切屑速度; ϕ 为法向剪切角; α 为刀具法向前角; t_h 为未变形切削厚度; t_c 为切削厚度; h 为剪切区厚度; k_h 为剪切区较宽厚度。



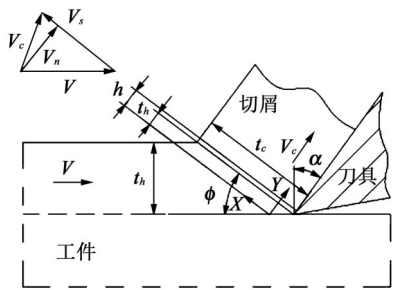
(a) 单平面



(b) 平行边界



(c) 扇形剪切区



(d) 非等分剪切区

图1 剪切区模型

Fig. 1 Shear zone model

1.3 剪切区应力、应变、应变率

图2所示为斜角切削模型。图2中， λ 为刃倾角； η_c 为流屑角； η_s 为剪切流动角； V_s 为剪切速度。将 V 、 V_c 、 V_s 组成速度三角形的平面，有利于三维切削的问题简化。

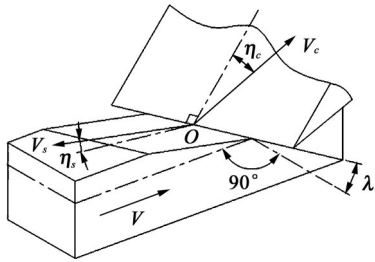


图2 斜角切削模型

Fig. 2 Bevel cutting model

剪切应变最大值 $\dot{\gamma}_m$ 计算公式为

$$\dot{\gamma}_m = \frac{2V \cos \lambda \cos \alpha}{h \cos \eta_s \cos (\phi - \alpha)} \quad (1)$$

斜角切削常用的两种分析方法为法平面法和等效平面法。本文中采用等效平面法分析，通过切削速度 V 和切屑速度 V_c 确定一个平面。

剪切应变计算式为

$$\gamma = \begin{cases} \frac{\dot{\gamma}_m \cos \eta_c}{2k_h V \cos \lambda \sin \phi} y^2 & y \in [0, k_h] \\ \frac{\dot{\gamma}_m \cos \eta_c (-y^2 + 2ky - h^2)}{2(1-k)hV \cos \lambda \sin \phi} & y \in [k_h, h] \end{cases} \quad (2)$$

设定主剪切平面上的剪切应力均匀分布，可得剪切力 F_s 为

$$F_s = \tau A_{sh} = \frac{\tau b t_h}{\cos \lambda \sin \phi} \quad (3)$$

式中， τ 为剪切应力； b 为切削宽度。

随着切削速度的增大，切屑惯性力也会随之增大。当低速切削时，可不考虑切屑惯性力，但在切削速度较大时(大于90 m/min)，需要考虑切屑的惯性力作用在主剪切平面上的切削力影响。垂直在主剪切平面上的法向力 F_{no} 为

$$F_{no} = \frac{\cos \eta_s [\tan (\phi - \alpha) + \tan \beta \cos \eta_c]}{1 - \tan \beta \cos \eta_c \tan (\phi - \alpha)} F_s \quad (4)$$

根据斜角切削理论，剪切力 F_s 和切屑法向力 F_{no} 的切削合力为 F ，切削力 F_c 、进给力 F_r 、背抗力 F_a 则是合力 F 在单位向量 X 、 Y 、 Z 方向的分力，可表示为

$$\begin{bmatrix} F_c \\ F_r \\ F_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_s \cos \phi \cos \lambda + \sin \eta_s \sin \lambda & \sin \phi \cos \lambda \\ -\cos \eta_s \cos \phi & \cos \phi \\ \cos \eta_s \cos \phi \cos \lambda - \sin \eta_s \sin \lambda & \sin \phi \sin \lambda \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_s \\ F_{no} \end{bmatrix} \quad (5)$$

法向剪切角 ϕ 、剪切流动角 η_s 、剪切区应变率 $\dot{\gamma}$ 、不等分系数 k 、平均摩擦角 β 、等效平面角 η_c 、垂直在主剪切平面上的法向力 F_{no} 的具体推导过程见文献[11]。

1.4 齿轮副参数计算

针对小模数弧齿锥齿轮几何模型进行切削仿真，运用成形法铣削加工轮坯，如图3所示。小模数弧齿锥齿轮切削过程复杂，轮坯及刀盘参数计算量大，不利于切削仿真的进行，而且铣刀盘的刀条对轮坯每个齿切削时都是重复性的，1个切齿完成后，旋转1个齿的角度进行下一个齿槽的加工。所以，为了达到更贴合实际铣削轮坯效果，对该模型进行简化仿真分析。



图3 轮坯铣齿几何模型

Fig. 3 Geometric model of gear milling

本文中以齿数30、模数1.75 mm的小模数弧齿锥齿轮为例，计算齿轮副几何参数和加工参数，为干切试验提供理论参数。滚检试验发现接触区域不合理时，可以调整机床参数和各项参数。表1、表2所示分别为小模数弧齿锥齿轮副的几何参数和加工参数。

表1 几何参数

Tab. 1 Geometric parameters

参数	大轮	小轮
齿数	30	30
旋向	右	左
模数/mm	1.75	
轴交角/(°)	90	
压力角/(°)	20	

续表

参数	大轮	小轮
中点螺旋角/(°)	35	
齿顶高系数	0.85	
顶隙系数	0.188	
齿高变位系数	0	0
切向变位系数	0	0
面锥角/(°)	47.183	47.183
节锥角/(°)	45	45
根锥角/(°)	42.826	42.816
顶圆直径/mm	54.207	54.207
冠顶距/mm	25.24	25.24
外锥距/mm	37.123	37.123

表 2 加工参数

Tab. 2 Processing parameters

参数	大轮	小轮
切齿刀盘直径/mm	50.8	50.8
刀盘错刀距/mm	0.81	0.81
刀齿刀号/(°)	7.5	
机床安装角/(°)	42.9	
径向刀位/mm	26.34	26.34
角向刀位/mm	52.18	-52.18
切削滚比	1.414 2	1.414 2
垂直轮位/mm	0	0
水平轮位修正值/mm	0	0
床位修正量/mm	-0.6	-0.6

通过三维斜角切削模型分析和齿轮副参数计算,为有限元模型建立及干切试验的进行提供理论依据,并确定刀盘和机床各项参数。

2 有限元模型建立

2.1 摩擦模型的建立

刀具切削工件的过程中会发生摩擦,摩擦区域分为粘接区域和滑移区域。预控摩擦状态,无论对刀具寿命还是降低切削力都有一定研究意义。剪切应力的计算公式为

$$\tau \begin{cases} \mu \sigma_n & \mu \sigma_n \leq \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \mu \sigma_n \geq \tau_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\tau_{\max}$ 为最大剪切应力; μ 为摩擦因数; σ_n 为接触正应力。

高速干式切削环境下加工轮坯,剪切区会产生较高的切削速度、应变速度及切削温度,这些因素都将影响刀具加工轮坯时的切削力,进而影响齿轮齿面精度。

2.2 工件与刀具材料物理特性

表 3 所示为刀具和工件材料的主要物理参数。

表 3 刀具和工件材料的主要物理参数

Tab. 3 Main physical parameters of the tool and workpiece material

参数	刀具	工件
材料	YT15	45 钢
密度/(kg/m ³)	11 500	7 890
弹性模量/GPa	530	209
泊松比	0.3	0.269
比热/(kJ/(kg·°C))	480	480
传导率/(W/mK)	50	50
膨胀系数	6.5×10 ⁻⁶	1.309×10 ⁻⁵
非弹性热份额/%	0.9	0.9

2.3 切削材料的本构模型

根据高速干切削环境特点,对金属材料的应力、应变、应变率的分析,有利于了解不同材料的切削能力,进而得知刀具磨损程度及使用寿命。相关研究表明,随着切削速度的提高,产生大量切削热的同时,应力、应变、应变率变化明显^[12]。削过程中,金属材料物理特性会随高速干切削环境变化。Johnson-Cook 材料本构模型能够准确描述应力、应变、应变率对切削性能的影响,模型表达式为

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (7)$$

式中, σ 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为塑性应变率; $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ 为初始塑性应变率(通常取 1.0 s⁻¹); T 为转变温度; T_m 为工件的熔点; T_r 为室内温度; A 为屈服应力; B 为硬化模量; C 为应变率敏感系数; n 为应变硬化系数; m 为温度软化系数。

45 钢的 Johnson-Cook 模型设定参数如表 4 所示。

表 4 45 钢材料的 Johnson-Cook 本构模型参数

Tab. 4 Johnson-Cook constitutive model parameters of

45 steel material

A/MPa	B/MPa	n	C	m
507	320	0.28	0.28	1.06

2.4 切屑分离准则

切屑分离准则一般有两种方法:几何分离准则和物理分离准则。几何分离准则较物理分离准则确定几何标准更简单,但是,其只考虑了几何模型却忽略了材料的物理特性。物理分离准则充分考虑了材料的物理特性,对材料的应力及切削力等某些物理量与设定的临界值作比较,切屑的分离更接近实际情况。综上考虑,本文中选用物理分离准则。

Johnson-Cook 本构模型剪切失效损伤演化模型描述了切削材料的损伤过程,当 $\omega > 1$ 时,材料失效,发生断裂。失效参数的表达式为

$$\omega = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}_j^{p_l}}{\bar{\varepsilon}_f^{p_l}} \right) \quad (8)$$

式中, $\Delta \bar{\varepsilon}_j^{p_l}$ 为等效塑性应变率增量; $\bar{\varepsilon}_f^{p_l}$ 为临界等效塑性应变; 网格点数 $j=1, 2, \dots, n$ 。

临界等效塑性应变的计算公式为

$$\bar{\varepsilon}_f^{p_l} = \left[d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q}) \right] \left[1 + d_4 \ln \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (9)$$

式中, $\frac{p}{q}$ 为压应力与偏应力之比; $d_1 \sim d_5$ 为失效参数, 如表 5 所示。

表 5 Johnson-Cook 剪切失效参数

Tab. 5 Johnson-Cook shear failure parameters

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.10	0.76	1.57	0.005	-0.84

本节中通过有限元法论述了切削仿真中的切齿理论, 包括几何模型建立、材料本构、刀具与切屑摩擦模型、切屑分离准则等, 为接下来的有限元分析提供理论依据。

3 有限元模型分析

3.1 切齿仿真模型的简化处理

由于刀具要切削工件材料, 所以, 刀具材料的硬度要远大于工件材料硬度。刀具的前刀面进入切削区域进行切削时, 工件发生塑性变形, 达到工件材料的屈服强度时, 便会发生滑移变形。虽然刀具也会发生弹性变形, 但是其变形较小, 可忽略不计, 所以假设刀具为刚体。小模数弧齿锥齿轮切削过程较为复杂, 为了简化模拟切削过程, 本文中采用如图 4 所示的斜角切削模型, 用 Abaqus 有限元分析软件建立工件与刀具切削网格模型^[13]。

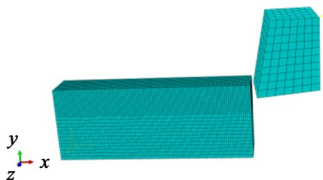


图 4 斜角切削网格模型

Fig. 4 Grid model of bevel cutting

工件材料为调质 45 钢, 刀具材料为硬质合金 YT15。切削之前还需对工件的底边和左侧边界进行限制, 这样更贴切实际加工。刀具采用四边形自由网格, 工件采用四边形网格, 然后对工件的切削区域进行网格细化。切削层的网格进行细化划分, 远

离切削的网格进行粗化划分, 这样的网格容易计算且节约大量计算时间。切屑成 C 形更有利于断屑、排屑, 也不易对操作人员造成人身危险。

3.2 进给量对切削力的影响

干切环境下, 确定切削速度为 300 m/min, 刃倾角为 5° , 进给量分别取 0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm 进行干切仿真, 分析不同进给量对切削力的影响。结果如图 5 所示。

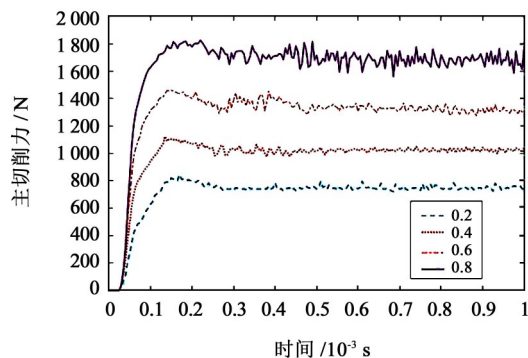


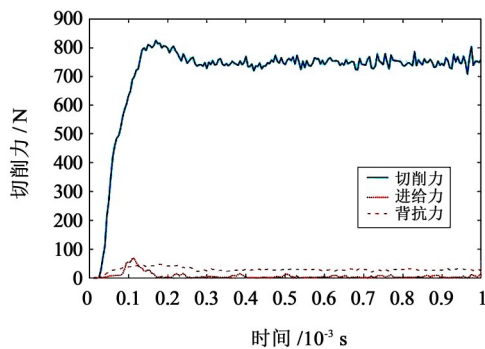
图 5 不同进给量对切削力影响(干切)

Fig. 5 Influence of different feed rate on cutting force (dry cutting)

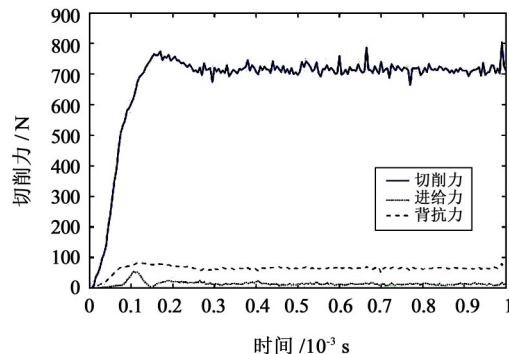
由图 5 所示可以看出, 主切削力随着进给量的增大而增大, 增大幅值较为明显。

3.3 切削力随刃倾角变化分析

干切环境下, 切削速度 300 m/min, 进给量 0.2 mm, 刃倾角大小分别取 0° 、 5° 、 10° 、 20° 时, 分析刃倾角变化对切削力的影响。结果如图 6 所示。



(a) 刃倾角 5°



(b) 刃倾角 10°

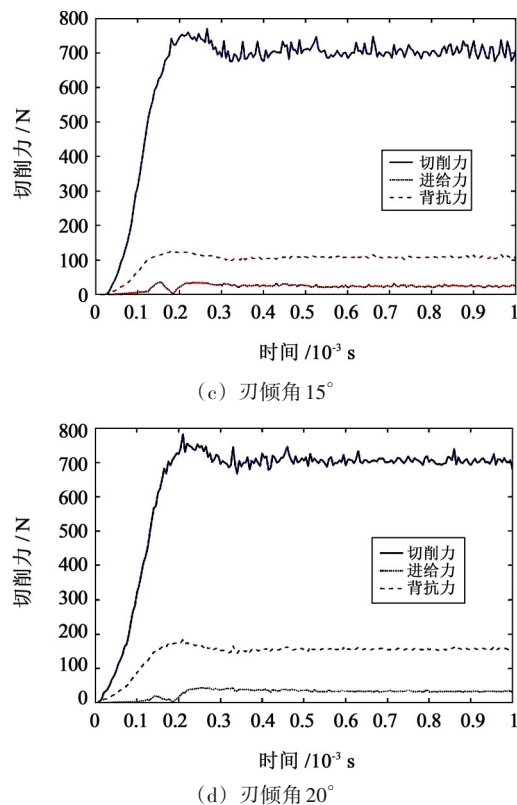


图 6 不同刃倾角对切削力影响(干切)
Fig. 6 Influence of different tool cutting edge inclination angle on cutting force (dry cutting)

由图6所示可以看出,随着刃倾角增大,主切削力和进给力增幅变化不明显,但背抗力逐渐增大。依据仿真结果,刃倾角 λ 变化对切削力 F_c 、进给力 F_f 、背抗力 F_a 的影响,验证了式(5)结论的正确性。

3.4 切削力随切速变化分析

干切环境下,切削速度 300 m/min,进给量 0.2 mm,刃倾角 5°时,分析切削速度逐渐增大对切削力的影响。结果如图 7 所示。

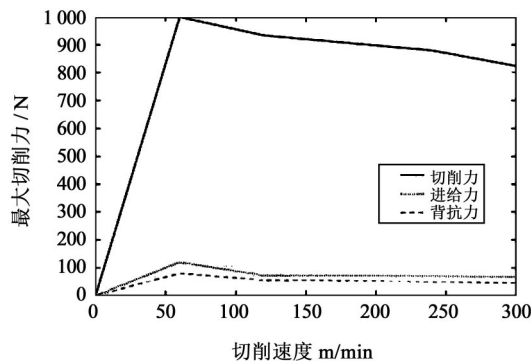


图 7 不同切速对切削力影响(干切)
Fig. 7 Influence of cutting speed on cutting force (dry cutting)

由图 7 所示可以看出,随着切速增大,切削力、进给力及背抗力均呈下降趋势。通过有限元软件的金属切削仿真,分析了影响切削力的主要因素,可以为小模数锥齿轮干切工艺选取不同参数及优化提供理论依据。

4 干切试验

本文中采用双重双面法进行干切试验,即大轮与小轮的凹面和凸面均采用双面铣刀同时一刀切出齿槽,该方法具有很高的铣齿效率。根据表 1 所示几何参数,准备干切试验所用轮坯和切削夹具,再依据表 2 所示加工参数进行干切试验。将上述主要参数输入数控机床系统中,轮坯按要求安装到铣齿机夹具上,对刀进行干切。加工过程如图 8 所示。



图 8 干式切齿过程
Fig. 8 Dry cutting process

干切加工的齿轮副是否满足啮合传动标准,需要对该齿轮进行滚检试验。一般取齿轮工作面(大轮凸面,小轮凹面)涂抹均匀厚度的(大约 0.006 35 mm)红丹粉,然后在专门滚检机进行滚检试验,滚检时大小轮必须符合安装距要求。观察齿面红丹粉啮合情况,可以较为直观看到大小轮接触区的啮合情况。为了验证该齿轮副啮合是否正确,需要在专门小模数滚检机进行滚动检查。齿轮滚检试验如图 9 所示。



图 9 齿轮滚动检查
Fig. 9 Gear rolling inspection

观察图 9 所示齿面红丹粉接触形状,接触区处于齿面中部,接触印痕呈椭圆形,啮合传动较为理想。下一步工作则是在格里森 Gleason 650 测量机上对齿轮精度进行测量,如图 10、图 11 所示。

图 11 所示为齿轮干切后的齿面偏差和齿距误差检查报告。按照 DIN 3965/86 标准,显示齿轮凸面累积偏差 46 μm ,精度为 8 级;单齿偏差 9 μm ,精度为 6 级;相邻齿偏差 7.1 μm ,精度为 5 级。凹面累积偏差 32.9 μm ,精度为 7 级;单齿偏差 6 μm ,精度为 5 级;相邻齿偏差 7.8 μm ,精度为 5 级。试验结果表明了干切理论与小模数弧齿锥齿轮铣齿加工有机结合的可行性。

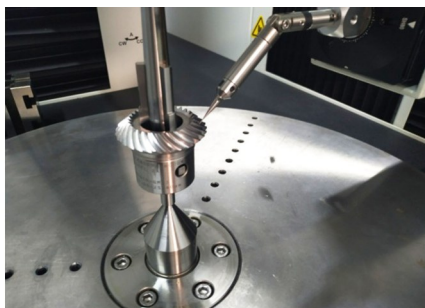


图 10 齿轮测量

Fig. 10 Gear measuring

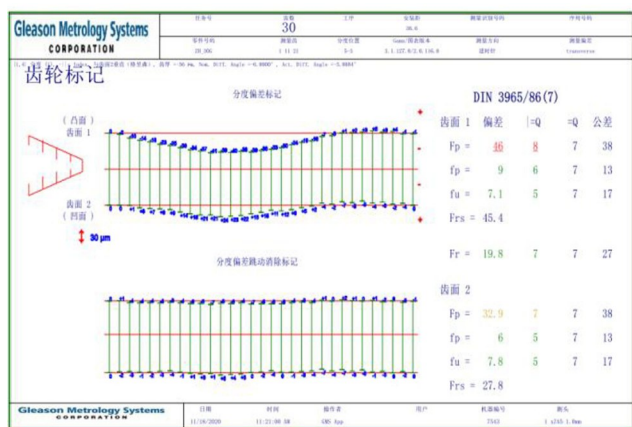


图 11 齿轮测量结果

Fig. 11 Gear measuring results

5 结论

高速干切削工艺用于小模数弧齿锥齿轮的铣齿加工, 既可以提高加工效率、齿轮精度, 也能够降低投入、减少环境污染, 属于典型的绿色制造。

提出了普遍适应于复杂的弧齿锥齿轮铣齿加工的斜角切削理论, 并将高速干切削作为新的工艺方法加工小模数弧齿锥齿轮。基于斜角切削理论, 建立了剪切区应力、应变、剪切速度、切屑速度等方程, 求解切削力。利用有限元软件 Abaqus, 建立摩擦模型、材料本构模型、切屑分离准则等, 分析了进给量、刃倾角、切削速度变化对切削力的影响。将仿真结果与已有文献数据做对比, 结果基本相似, 验证了斜角切削理论加工小模数弧齿锥齿轮的准确性。通过干切加工一对小模数弧齿锥齿轮并进行齿形检测, 表明高速干切削技术应用于小模数弧齿锥齿轮加工具有可行性。

参 考 文 献

- [1] 胡明哲. 干式切削加工技术的发展及应用[J]. 机床与液压, 2019, 47(13): 179-185.
HU Mingzhe. Development and application of dry cutting technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(13): 179-185.
- [2] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994: 613-635.
- [3] 谢耀东, 张俊杰, 王志勇, 等. 干切技术在螺旋锥齿轮加工上的应用[J]. 汽车齿轮, 2011(1): 29-34.
XIE Yaodong, ZHANG Junjie, Wang Zhiyong, et al. Application of dry cutting technology in spiral bevel gear processing [J]. Automobile Gear, 2011(1): 29-34.
- [4] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989: 108-116.
ZENG Tao. Design and machining of spiral bevel gears [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1989: 108-116.
- [5] 张华, 韩益南, 李天兴, 等. 等高齿弧齿锥齿轮的三维精确建模与加工试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 27-31.
ZHANG Hua, HAN Yi'nan, LI Tianxing, et al. Three dimensional accurate modeling and machining test of equal height spiral bevel gear [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 27-31.
- [6] MERCHANT M E. Basic mechanics of the metal cutting process [J]. Journal of Applied Mechanics, 1944, 168-175.
- [7] OXLEY P L B, WELSH M J M. Calculating the shear angle in orthogonal metal cutting from fundamental stress, strain, strain rate properties of the work material [C]. Proceedings of the 4th International Machine Tool Design and Research Conference. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1963: 73-86.
- [8] SHAW M C, COOKSON J O. Metal cutting principles [J]. Tribology International, 1985, 18(1): 55-55.
- [9] ZOREV. Inter-relationship between shear process occurring along the tool face and shear plane in metal cutting, International Research in Production Engineering, 1963, 6(71): 42-49.
- [10] ASTAKHOV V P, OSMAN M O M, HAYAJNEH M T. Reevaluation of the basic mechanics of orthogonal metal cutting: velocity diagram, virtual work equation and upper-bound theorem [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(3): 393-418.
- [11] 李炳林, 王学林, 胡于进, 等. 斜角切削的热力建模与仿真分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(20): 2402-2408.
LI Binglin, WANG Xuelin, HU Yujin, et al. Thermal modeling and simulation analysis of oblique cutting [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(20): 2402-2408.
- [12] 赫连旭阳. 基于 ABAQUS 的金属切削过程有限元仿真研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017: 11-33.
HE Lianxuyang. Finite element simulation research of metal cutting process based on ABAQUS [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2017: 11-33.
- [13] LI Q, LIAO C J, WANG R. The research on milling forces of dry cutting spiral bevel gears [J]. Materials Science Forum, 2011, 697-698: 213-217.

收稿日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51205109)

作者简介: 刘琪(1991—), 男, 河南商丘人, 在读硕士研究生; 主要研究方向为小模数弧齿锥齿轮的高速干切削研究。