

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.012

高速干式滚齿切削热力耦合与工艺参数分析^{*}

许少宁^{1,2}, 沈洪堉³

(1. 浙江省机械工业情报研究所, 浙江 杭州 310009; 2. 浙江省机械工程学会, 浙江 杭州 310009;
3. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了方便优化高速干式切削工艺, 对高速干式滚齿机切削进行热力耦合和工艺参数影响分析。首先结合高速干式滚齿加工的技术特点, 对干式滚齿中切削力和切削温度场进行了理论建模。在此基础上, 对滚刀单个刀齿的切削温度场进行有限元仿真分析, 以获得滚刀前刀面的切削温度分布情况, 实现仿真研究滚齿切削的可能性。然后以最高切削温度为研究目标, 分析进给量、滚刀转速等工艺参数对滚齿加工过程的影响。最后在滚齿机上展开了干式滚齿切削实验。结果表明: 随着滚刀转速的提升机床切削温度快速升高后慢慢降低并趋于稳定, 且高转速有利于节约能耗; 研究结果可对切削工艺的优化策略提供指导, 为滚齿机的设计制造提供理论基础。

关键词: 高速干式滚齿; 热力耦合; 有限元仿真; 工艺参数

中图分类号: TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)07-0836-07

Research on thermal-force coupling and processing parameter of high-speed dry hobbing

XU Shao-ning^{1,2}, SHEN Hong-yao

(1. Zhejiang Information Institute of Machinery Industry, Hangzhou 310009, China;

2. Zhejiang Mechanical Engineering Society, Hangzhou 310009, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to optimize the processing of the high-speed dry hobbing machining, the thermal-force coupling and the influences of processing parameters were analyzed. At first, theoretical modeling of cutting force and cutting temperature of dry hobbing machining was established based on the technical features of high-speed dry hobbing. On the basis, FEM simulation analysis of cutting temperature of each hobbing cutter teeth was proposed to obtain the temperature distribution of the rake face of hobbing cutter. It lays the basis of simulation study of hobbing machining. Then, the influences of feed rate and speed of hobbing cutter on hobbing machining was analyzed with the goal of highest cutting temperature. Finally, experiments of high-speed dry hobbing machining were proposed. The results show that the cutting temperature rises rapidly and then tends to reduce and stabilize slowly as the rise of the rotation speed of hobbing cutter. The high speed can save energy consumption. The research provides the guidance for the optimizing strategy of the processing of high-speed dry hobbing machining, and it lays the a theoretical basis for the design and manufacture of the hobbing machine.

Key words: high-speed dry hobbing machining; thermal-force coupling; FEM simulation; processing parameters

0 引言

滚齿加工具有效率高、适应性好等技术特点, 是目前齿轮加工行业应用最为广泛的加工技术之一, 约占

整个齿轮加工量的 45%。传统的湿式滚齿加工通常需要使用冷却液来冷却刀具和工件, 切削速度一般不高, 且易造成环境污染。高速干式滚齿加工是在高速干式切削基础上发展起来的一种先进的齿轮加工方

收稿日期: 2016-05-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAF05B00)

作者简介: 许少宁(1957-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事先进制造技术、机械情报信息方面的研究. E-mail: zhejiang@cmes.org

法,它是指在不使用冷却液和润滑油剂的情况下,采用较高的切削速度进行滚齿加工的方法。相对于湿式加工方式,高速干式滚齿加工能够提高生产效率、降低加工能耗、简化工艺流程、提高加工精度和表面完整性、延长刀具寿命、保护环境及工人身体健康等^[1-2]。

我国在高速干式滚齿方面研究起步较晚。黄强等^[3]从机床、刀具和工艺3个方面对高速干式滚齿加工的关键技术及其解决方案进行了分析和综述,认为干态高速滚齿的顺利进行需要在切削理论上进行全面突破,在刀具、机床和工艺技术上进行综合改进。周鹏举等^[4-5]推导了高速干式滚齿的切削温度场及平均切削温度计算公式,并探讨高速干式滚齿的切削机理。郭茜^[6]建立了高速干式滚齿的切削力模。刘海江等^[7]以最高生产率为目标函数,建立了多种因素限制的滚刀结构参数及切削用量优化的数学模型,并进行干式滚刀刀具结构的优化设计。尹洋等^[8]论述了零传动干式滚齿机关键部件设计原则,提出了干式滚刀选用原则。

当前,国内外针对高速干式滚齿的研究主要聚焦在高速切削加工机理、高速机床设计、高速刀具设计及优化等方面,对高速干式滚齿加工过程优化控制方面研究较少。

本研究首先对高速干式滚齿切削过程中的切削力和温度场进行了理论建模,并利用ANSYS对滚刀单个刀齿的切削温度场进行有限元仿真分析,以获得滚刀前刀面的切削温度分布情况,并以最高切削温度为研究目标函数,研究进给量、滚刀转速对滚齿加工过程的影响。最后,在滚齿机上展开高速干式切削实验验证。

1 高速干式滚齿切削热力建模

1.1 高速干式滚齿切削力建模

本研究对滚刀单一刀刃做受力分析。根据齿轮范成法原理,可得滚齿过程切削形态如图1所示。

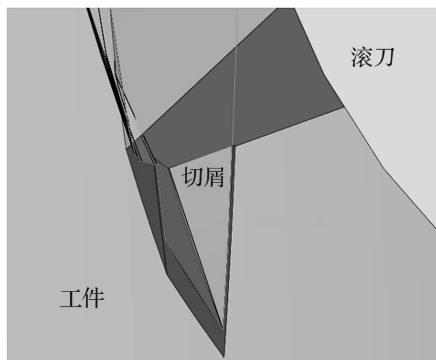


图1 滚齿切削过程图

滚刀水平旋转过 α 角度,红色为待切除齿坯材料。此时,滚刀顶刃及两侧刃分别对工件产生切削作用,切削层截面如图2所示。

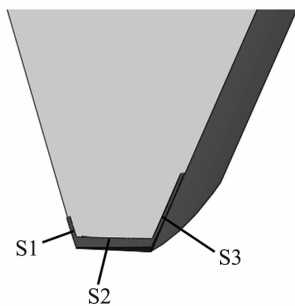


图2 刀齿正面切削示意图

由于范成法滚齿过程为一个齿廓的渐进成形,因此滚齿过程切削层随滚刀刀齿的不同而变动,图2中的截面面积 S_1 、 S_2 、 S_3 仅为相应刀齿的一个瞬态面积。

在滚齿切削过程每个滚刀刀齿的3个切削刃一般都同时有切削运动,3个切削刃分别为一个主切削刃和两个侧切削刃,因此在分析滚齿切削力过程中将切屑截面分成3部分的面积以分别计算相应的切削力,每个切削刃的切削情况可根据传统切削力模型计算。如图2所示,3个切削刃分别对应各自的切削面积 S_1 、 S_2 、 S_3 ,因为切削过程的材料参数相同,在不考虑切屑惯性力 F_m 的前提下,可得出3个切削刃的切削力的大小,3个切削刃在滚齿过程中产生的切削力主要区别在于各自切削面积的不同。刀齿各切削刃的切削力表达式为:

$$F_{Ci} = \frac{F_{Si}}{\cos(\varphi + \beta - \gamma_0)} \cos(\beta - \gamma_0) \quad (1)$$

其中, $F_{Si} = \tau S_i, i = 1, 2, 3$ 。那么切削力合力为:

$$F_C = \frac{\tau S_1 + \tau S_2 + \tau S_3}{\cos(\varphi + \beta - \gamma_0)} \cos(\beta - \gamma_0) \quad (2)$$

式中: τ —屈服剪切应力, φ —剪切角, β_0 —摩擦角, γ_0 —刀具前角。

1.2 高速干式滚齿切削温度场建模

滚刀在滚齿切削过程中需要克服齿坯件金属塑性变形和弹性变形所需要的变形功,同时也要克服切屑与刀具前刀面摩擦、后刀面与工件摩擦做需要的摩擦功,切削过程所消耗的切削功都将转化为切削热。这些热量在传递给切屑、刀具、工件后,使得切屑、刀具、工件的温度上升,形成相应的温度场。

1.2.1 热源强度计算

首先计算前刀面产生的热量中传入切屑与传入刀

具的部分。设其中传入切屑的比例为 R_2 , 可由以下式计算:

$$R_2 = \left(\frac{F_f v_c \bar{A}}{a_w \lambda_t} - \theta_s + \theta_0 \right) / \left(\frac{F_f v_c \bar{A}}{a_w \lambda_t} + \frac{0.752 F_f}{a_w c_2 \rho_2} \sqrt{\frac{v}{a_2 l_f \xi}} \right) \quad (3)$$

那么前刀面传递给切屑的发热量为:

$$Q_f = R_2 \frac{\mu}{\mu \sin \gamma_0 + \cos \gamma_0} F_c v_c \quad (4)$$

式中: F_f —前刀面摩擦力, v_c —切屑流速, v —切削速度, $\bar{A}$ —与热源面积长宽比有关的面积因子, a_w —切屑宽度, λ_t — t 时刻刀具材料的导热系数, θ_s —剪切面对切屑的平均升温, θ_0 —刀具初始温度, c_2 —刀具材料比热容, ρ_2 —刀具材料密度, l_f —前刀面与切屑的接触长度, ξ —切削变形系数。

前刀面摩擦力, 切屑流速以及切削变形系数计算公式为:

$$F_f = \frac{\mu}{\mu \sin \gamma_0 + \cos \gamma_0} F_c; v_c = \frac{v \sin \varphi}{\cos(\varphi - \gamma_0)};$$

$$\xi = \frac{\cos(\varphi - \gamma_0)}{\sin(\varphi)}.$$

剪切面对切屑的平均升温 θ_s 为:

$$\theta_s = \frac{R_1 F_c \cos(\varphi + \beta - \gamma_0) \cos(\gamma_0)}{a_c a_w c_1 \rho_1 \cos(\beta - \gamma_0) \cos(\varphi - \gamma_0)} + \theta_0 \quad (5)$$

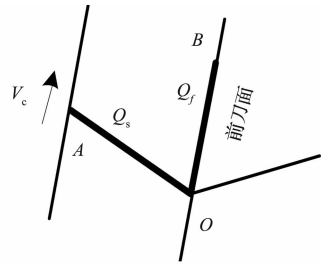
式中: a_c —切屑厚度, c_1 —切屑材料比热容, ρ_1 —切屑材料密度, R_1 —剪切面产生热量传入切屑的比例计算公式为:

$$R_1 = \frac{1}{1 + 1.33 \sqrt{\frac{a_1 \varepsilon}{v a_c}}} \quad \varepsilon = \frac{\cos(\gamma_0)}{\sin(\varphi) \cos(\varphi - \gamma_0)}.$$

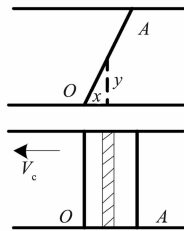
1.2.2 断续切削温度场

在滚齿持续稳定切削工作情况下, 滚齿过程剪切面与前刀面对工件、切屑、滚刀进行不间断的加热作用, 并达到一个平衡状态, 各部分的温度将保持在一个相对稳定的水平。本研究利用剪切面与前刀面作为热源面, 对切屑与前刀面的贴合部位进行温度场的计算, 得到滚刀上的温度分布情况。

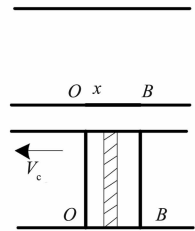
由于在干切削过程中无冷却液作用, 切削过程中切屑、刀具与周围空气的热交换系数小, 因此将刀具切屑的空气接触面定义为绝热边界, 用镜像热源法将热源面延伸成无限长、有限宽的数个热源面。此时切削温度场初始热源面的模型如图 3 所示, 其中热源位置集中于剪切面和前刀面, 热源宽度为切屑宽度, 定义为 a_w , 热源面长度为剪切面长度和切屑刀具接触长度, 分别定义为 L_s 与 L_f 。



(a) 切削热源位置



(b) 剪切面热源



(c) 前刀面热源

图 3 切削温度场初始热源面的模型

剪切面的热流强度为 Q_s , 取该热源面上一段足够窄的热源带当做线热源, 其宽度为 dL_s , 因此线热源强度为 $q_s = Q_s \cdot dL_s$, 可得到该线热源对于 O 点的温度影响为:

$$d\theta_s = \sum_{k=0}^n \frac{Q_s dL_s}{4\pi\lambda} \int_{kT}^{kT+mT} \frac{d\tau}{\tau} e^{-\frac{(x+v\tau)^2+y^2}{4a\tau}} \quad (6)$$

对 $d\theta_s$ 在 L_s 上积分, 得 θ_s 的表达式为:

$$\theta_s = \sum_{k=0}^n \frac{Q_s}{4\pi\lambda} \int_0^{L_s} \int_{kT}^{kT+mT} \frac{d\tau}{\tau} e^{-\frac{(x+v\tau)^2+y^2}{4a\tau}} dL_s \quad (7)$$

式中: n —热源持续周期数, $n = t/T$ 。

热源周期如图 4 所示。

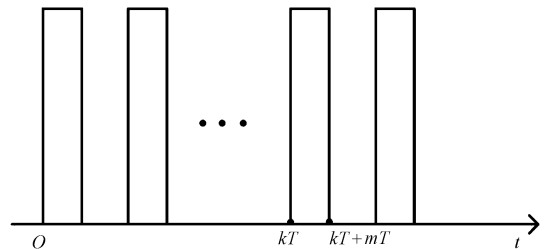


图 4 热源周期

同理, 可以得到前刀面对于 O 、 B 点温度分布情况的影响状况为:

$$\theta_{fo} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_f}{4\pi\lambda} \int_0^{L_f} \int_{kT}^{kT+mT} \frac{d\tau}{\tau} e^{-\frac{(x+v\tau)^2}{4a\tau}} dL_f \quad (8)$$

$$\theta_{fb} = \sum_{k=0}^n \frac{Q_f}{4\pi\lambda} \int_0^{L_f} \int_{kT}^{kT+mT} \frac{d\tau}{\tau} e^{-\frac{(x+v\tau-L_f)^2}{4a\tau}} dL_f \quad (9)$$

式中: $Q_s = F_s v_s R_1 / a_w L_s$, $Q_f = F_f v_c R_2 / a_w L_f$

2 热力耦合有限元分析

取滚刀各刀齿中切削面积最大的刀齿为研究对象,建立有限元模型并对其进行温度场分析。其中参数化模拟仿真与有限元模块的数据传递关系如图 5 所示。

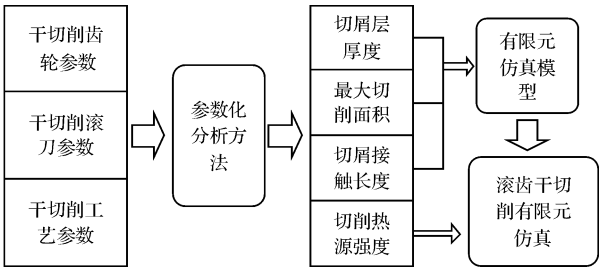


图 5 参数化模拟数据传递

本研究利用参数化分析的方法,将干式滚齿加工齿轮、滚刀及工艺相关参数为驱动变量,在得到加工该齿轮过程的具体滚削过程参数数据后,以这些数据有有限元建模与边界条件的创建条件,从而实现干式滚齿过程的有限元仿真。

滚齿过程中各刀齿的切削状态不一样,这里选取具有最大切削面积的刀齿进行滚刀的温度场仿真。模型具有恒定的热流输入,定义滚刀的导热系数、比热容和密度等材料参数,采用自由网格划分方式对模型进行网格划分,如图 6(a),施加载荷以后,得到仿真结果,如图 6(b~c)所示。

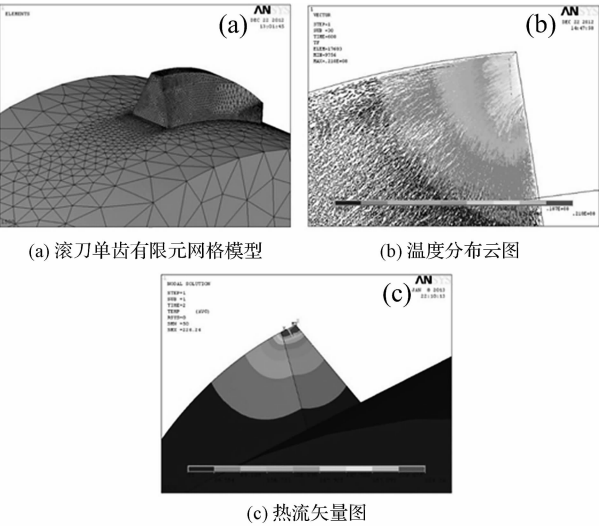


图 6 滚齿过程温度场仿真

根据温度分布云图及热流矢量图,干式滚齿切削温度场分布特征为:

(1)最高值主要集中于滚刀刀齿顶部,对滚刀根部的影响已经减小,故在此忽略其对周边刀齿的影响;

(2)刀齿顶部温度梯度基本保持与滚刀轴线水平,即在刀齿 3 个切削刃中,以顶刃为主要切削刃,其对温度影响相对较大;

(3)滚刀前刀面热流量最大值发生于切屑与前刀面的分离处,此处温度梯度最大。

根据刀齿温度场分布情况,可以对单个刀齿采取单独研究的方法。按照以上有限元仿真步骤,对不同工艺参数下的模型进行有限元仿真,以分析不同工艺参数对温度场的影响。

3 高速干式滚齿切削参数工艺分析

本研究主要研究目标为在保证滚齿质量的前提下,更大的提高生产效率、缩小经济成本。而干切削由于不使用切削液,容易导致切削过程切削温度升高、刀具磨损严重等特点,其中切削温度的提高尤为明显。因此,根据滚齿温度表达式,以干式滚齿最高切削温度为衡量指标,分析滚齿工艺参数对切削形态等间接变量的影响,进而研究滚齿工艺对于干切温度的关系,实现干切温度的优化配置,从而得到干式滚齿最优化加工工艺,流程如图 7 所示。

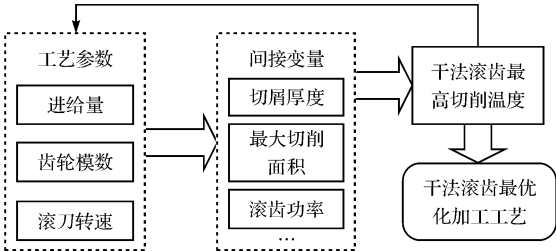
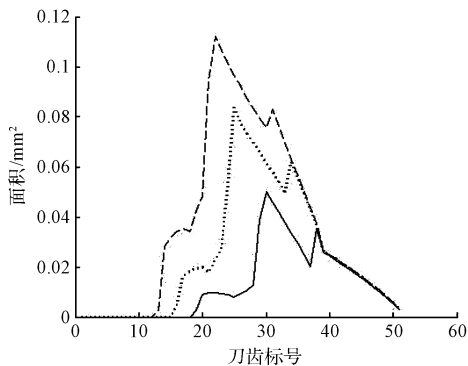


图 7 目标函数控制与工艺优化流程

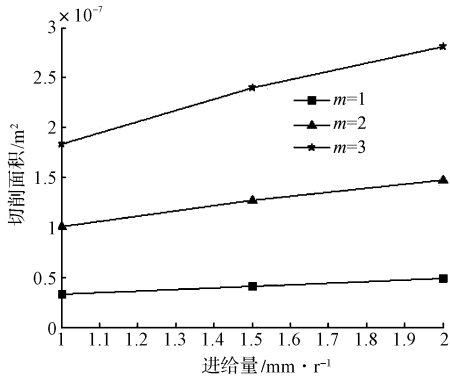
3.1 高速干式滚齿切削力建模进给量对干式滚齿切削过程的影响

进给量即齿坯转动一周时滚刀在齿坯轴向的推进距离,是滚齿过程重要工艺参数。进给量的大小将直接影响切削温度推导过程的切削面积、切屑厚度等影响因素,所以在研究干式滚齿切削过程中,滚齿进给量的研究具有非常重要的意义。

不同进给量下各滚刀刀齿切削过程总切削面积的变化情况以及最大切削面积随着进给量的变化情况如图 8 所示。从图 8 中看出,各刀齿间的切削面积各不相同,不同进给量时同一刀齿的切削面积也不同;随着进给量增加,各刀齿切削面积都具有相应的增加量,变化趋势相同;不同的进给量具有最大切削面积的刀齿号也不同,最大切削面积刀齿数左移;进给量增加,切削面积增大,但模数较小时,切削面积增大趋势较缓。



(a) 进给量对切削面积的影响



(b) 最大切削面积变化情况

图 8 切削面积变化

不同进给量下各滚刀刀齿所切除的切屑体积的变化情况如图 9 所示。

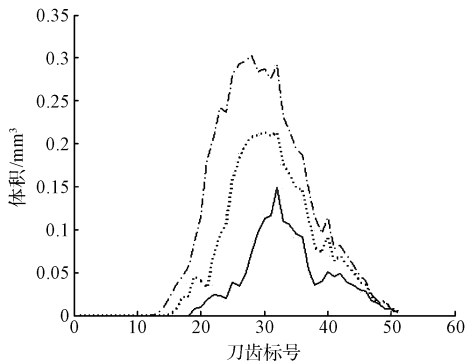


图 9 切屑体积变化情况

滚刀每个刀齿都可以有 3 个刀刃进行切削,由于切削状态不一,所以切屑体积除了在总体上符合先增后递减的趋势外,在个别刀齿上存在体积的无规律变化。

滚齿过程中最大切削面积处切削厚度随进给量的变化情况如图 10 所示。

从两个图中切屑体积及厚度的变化情况可推导出:

- (1) 进给量增加,切屑体积增加,不同刀齿变化规律不同;
- (2) 进给量增加,发生最大切削体积的刀齿号不

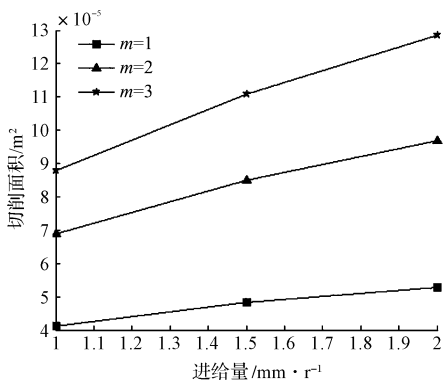


图 10 切屑厚度变化情况

同,所对应的刀齿号具有左移趋势;

(3) 进给量增加,切屑厚度的变化趋势符合最大切削面积的变化情况。

进给量给滚齿过程带来的切削面积、材料切除量的变化也将直接的带来切削热流密度、切削温度的变化。不同进给量下滚齿过程的最高切削温度随进给量的变化情况如图 11 所示。

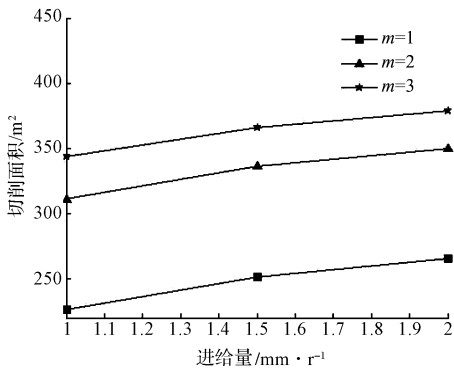


图 11 切削温度与进给量关系

从图中的变化趋势得到:

(1) 切削温度随进给量增加而提高。原因为进给量增加到来的切削面积等参数的增加,切削温度的变化趋势与与切削面积、切削厚度趋势一样;

(2) 当进给量增加一倍时,切削温度增加值有限,因此在考虑切削效率时,可以在切削条件的允许下尽量增大进给量。

进给量变化给切削面积、厚度,切屑体积等带来的变化情况,可以用于推测滚齿过程最危险刀齿标号的位置以及用于推算进给量对于滚齿切削温度的变化情况。根据以上的进给量对于滚齿过程相关切削变量的影响情况,可以为相关的滚齿工艺设计提供参考依据。

3.2 滚刀转速对干式滚齿切削过程影响

在滚齿过程中,在以滚刀转速为单一变量时,滚刀

与齿坯间的相互转动位置与转动过程轨迹将恒定不变,所以滚刀转速将不对切削面积、厚度、各刀齿切削状态以及切屑体积等相关参数产生影响。同时根据切削力学的分析过程,在不考虑切屑惯性力的情况下,切削力也将不随滚刀转速的改变而变动。具体的影响情况如图 12 所示。

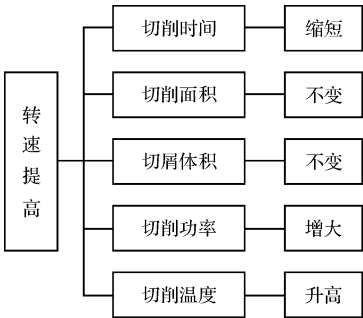


图 12 转速的影响结果

不同模数情况下滚刀转速对最大切削温度的影响如图 13 所示。

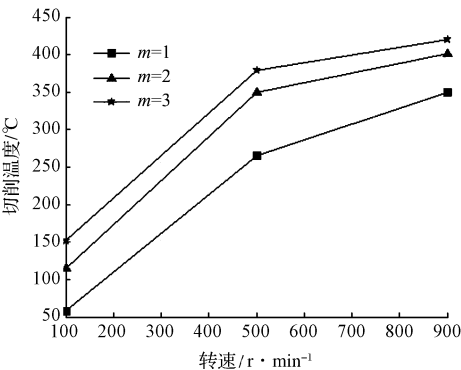


图 13 不同模数下转速与温度关系

不同进给量下滚刀转速对最大切削温度的影响如图 14 所示。

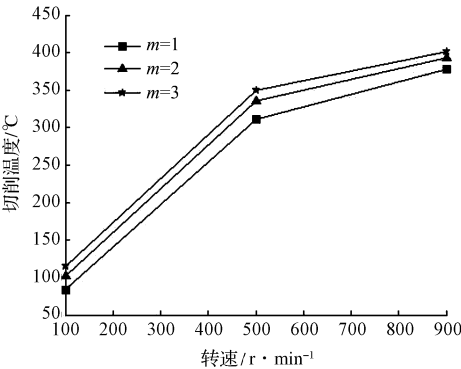


图 14 不同进给量下转速与温度关系

根据温度的变化趋势可见,在低转速阶段,转速对温度的变化影响较大;高转速时,温度变化逐渐减缓。结合图 11 进给量对温度的影响,在同等情况下,进给量对温度的改变量较小,因此在提高滚齿效率时应优

先考虑进给量的增加。

4 高速干式滚齿切削试验

滚刀结构的复杂性给滚齿过程切削力、刀具切削温度等的测量带来了极大的难度。滚齿瞬时功率是机床工作状态的反应,同时根据金属切削理论及能量守恒定理,滚齿瞬时功率也能够对干切削过程滚刀受力情况以及滚刀刀齿温度变化趋势进行直观的反应。因此本文进行干式滚齿过程瞬时切削功率的测量实验,利用滚刀瞬时功率的测量结果,将瞬时功率与滚齿过程切削状态相结合,分析滚齿切削状态的最佳描述方案;根据瞬时功率的变化趋势分析干式滚齿过程机床工作状态,提出以瞬时功率为衡量指标的机床高效控制方案。

实验采用 YBN3132 型半自动滚齿机,滚刀采用高速钢齿滚滚刀,参数为:模数 1mm、直径 50mm、圆周刀齿数 14。实验数据采集使用电压、电流传感器实现主机床电机转动功率的测量,测量数据使用 USB 连接的便携式数据采集设备 NI 9215。

实验设备如图 15 所示。

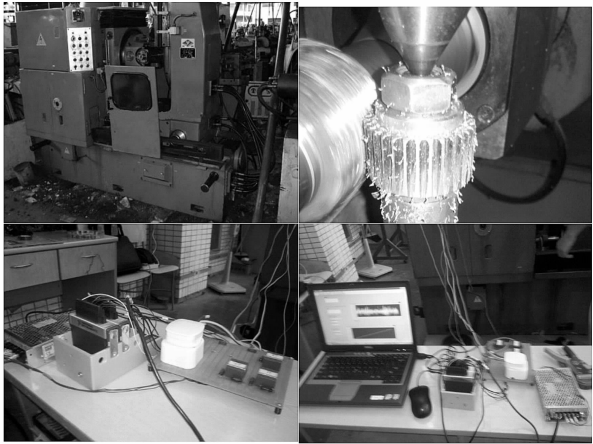


图 15 实验设备

根据实验条件,选用适当的实验材料,以机床转速、切削进给量为实验控制变量,具体的实验参数变量如表 1 所示。

表 1 实验参数表

水平数	1(轴向进给)/ $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$	2(滚刀转速)/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
1	0.46	50
2	0.96	125
3	1.5	200

利用正交实验设计方法,设计实验数据方案如表 2 所示。

表 2 实验方案

因子序号	1(轴向进给)/ mm · r ⁻¹	2(滚刀转速)/ r · min ⁻¹
组别		
1	0.46	50
2	0.96	50
3	1.5	50
4	0.46	125
5	0.96	125
6	1.5	125
7	0.46	200
8	0.96	200
9	1.5	200

根据 YBN3132 型半自动滚齿机的电气原理图,本研究在主电机供电线路上测定实验需要的电压与电流参数。根据主电机线路上测定的电流电压值,本研究利用 Labview 对数据输入端进行功率数据处理,记录相关的切削过程功率参数。

在滚齿切削过程中,功率是各滚齿工艺参数到切削热、切削温度关系传递过程的中间量。功率的提高则将促使切削过程产生更多的切削热、同时也将促使切削温度升高。因此通过分析干式滚齿的功率情况来对参数化工艺分析进行验证。不同转速下的切削功率关系如图 16 所示。

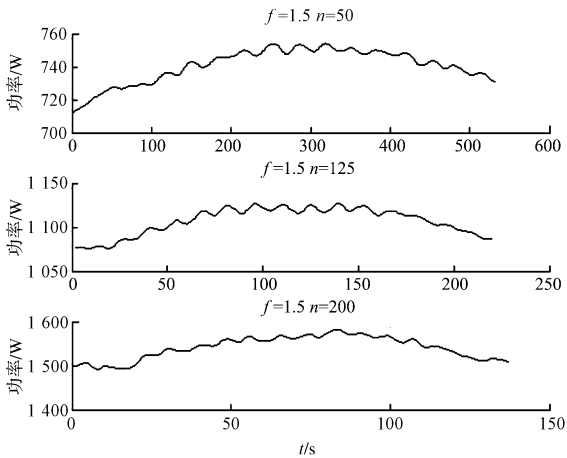


图 16 转速与功率关系

由图 16 可知,刚开始随着滚刀转速的提高,切削功率先是快速增长然后趋于稳定,再随着转速的提高切削功率会降低,说明机床切削温度随着转速的增长最终趋于稳定。

滚削同样齿轮工件的总消耗功变化情况如图 17 所示。由图可知说明随着转速的提高滚齿机总消耗功

率在降低。实验结果表明,转速的提高将促使切削功率增加,但是总功耗上反而高转速有利于节约能耗。

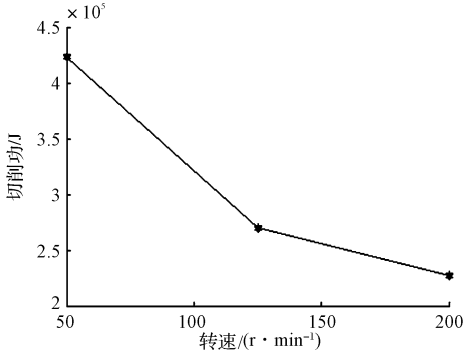


图 17 转速与切削功率

5 结束语

本研究结合高速干式滚齿加工的特点,首先对加工过程中的断续切削力和切削温度场进行了理论建模,得到切削力和温度场的计算公式。然后进行滚齿切削滚刀单个刀齿的切削温度场有限元仿真分析,从而获得滚刀前刀面的切削温度分布情况,为滚齿切削仿真研究提供基础,丰富了滚齿干式切削的研究手段。接着以最高切削温度为目标,对同等情况下进给量、滚刀转速对滚齿加工过程的影响进行研究,可帮助生产者对所需工艺进行调整。最后,在滚齿机上展开干式滚齿切削实验,得出干式滚齿切削更适合高速切削的结论。

参考文献(References):

[1] 周 忆. 超高速铣削加工技术研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2004.
[2] 赵正书. 干式切削及其在齿轮加工中的应用[J]. 机械工艺师,2000(9):62-63.
[3] 黄 强,罗 辑,唐其林. 高速干式滚齿加工及其关键技术[J]. 机床与液压,2007,35(5):29-32.
[4] 周鹏举. 高速干式滚齿切削温度理论及实验研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2007.
[5] 周鹏举,林 超,陆大成,钟小平. 高速干式滚齿切削温度理论及实验研究[J]. 机械传动,2010,34(12):10-14.
[6] 郭 茜. 高速干式滚齿切削力理论及实验研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2006.
[7] 刘海江,童荣辉. 干式滚齿刀具的参数化设计及优化[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008,36(5):651-654.
[8] 尹 洋,张根保,曹东锋,张新玉. 零传动干式滚齿机关键部件结构设计与研究[J]. 机床与液压,2008,36(4):229-231.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

许少宁,沈洪森. 高速干式滚齿切削热力耦合与工艺参数分析[J]. 机电工程,2016,33(7):836-842.
XU Shao-ning^{1,2}, SHEN Hong-yao. Research on thermal-force coupling and processing parameter of high-speed dry hobbing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):836-842.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>