

基于 3D 模型的螺纹铣削加工仿真有限元分析

曾林林, 周利平, 廖世超

(西华大学机械工程与自动化学院, 成都 610039)

摘要:螺纹铣削作为一种先进的螺纹加工方法,研究其加工过程中切削力和切削温度的变化规律对提高刀具使用寿命及被加工表面质量具有重要的现实意义。以某可转位螺纹铣刀铣削加工 45#钢为研究对象,在三维设计软件 Pro/e 中建立刀具三维实体模型,并导入金属切削工艺有限元软件 AdvantEdge 中进行铣削加工模拟仿真,得到加工过程中切削力和温度随时间的变化关系,对比分析了不同进给量的选择对切削力和切削温度的影响,分析结果为实际螺纹铣削加工及其进给量的选择提供参考。

关键词:螺纹铣削;切削力;切削温度;AdvantEdge;进给量

中图分类号:TG62;TH164

文献标志码:A

引言

螺纹加工在机械制造工艺过程中占据着相当重要的地位,而螺纹数控铣削加工技术作为近年来快速发展起来的一种先进螺纹加工方法,相对于传统的螺纹加工方式(车削螺纹、采用丝锥或板牙手工攻丝等),具有加工精度及效率极高、加工时不受螺纹结构及旋向的限制等优势,在现代机械零件制造的螺纹加工过程中应用越来越广泛^[1-2]。陈朝阳、张凡娥^[3]研究了螺纹铣削加工工艺的特点,分别在两种常用的数控系统加工中心上,实现了对三角形内螺纹的数控铣削加工;才卫国、张悦^[4]、蔺小军^[5]等人对螺纹铣削加工技术进行研究,分别阐述了利用 G02、G03 的螺旋插补功能进行铣削螺纹的加工方法和螺纹铣削刀位轨迹以及走刀步长的确定方法。

随着计算机技术的不断发展,采用有限元分析软件模拟螺纹铣削加工过程,部分代替实际切削实验,将为螺纹加工以及螺纹刀具设计节省大量的资源。陈铭、陈

明^[6]等人以刀具后角为研究对象,采用 2D 模型在 AdvantEdge 软件中实现了 PCD 螺纹铣刀铣削过程有限元仿真,并进行刀具结构设计及其刀具角度优化。由于二维铣削模拟的局限性,并不能真实的反映实际切削加工过程中刀、屑分离过程及其物理力学性能变化过程。因此,本文基于三维铣削模型及螺纹铣削加工原理,以每齿进给量(f_z)为研究变量,利用有限元分析软件 AdvantEdge 对螺纹铣削加工过程进行模拟仿真,得到不同进给量条件下,切削力和切削温度随时间的变化规律,通过分析对比得出较为合理的螺纹铣削加工进给量。

1 螺纹铣削基础

1.1 螺纹铣削加工原理

螺纹铣削是通过主轴高速旋转并做圆弧插补运动的方式进行螺纹加工的^[7]。如图 1 所示,螺纹铣刀加工工件时,刀具轴线(机床主轴)与被加工工件轴线相互平行,在数控机床上完成对刀后,螺纹铣刀随主轴进行自

收稿日期:2014-04-24

基金项目:省部共建教育部重点实验室项目(SBZDPY-11-22);四川省教育厅重点科研资助项目(2004A111)

作者简介:曾林林(1989-),男,四川内江人,硕士生,主要从事金属切削原理及刀具应用方面的研究,(E-mail)zeng_lin_lin@163.com

周利平(1964-),男,四川达州人,教授,主要从事制造过程的数值仿真技术、数控加工技术方面的研究,(E-mail)zhoulp523@163.com

转,同时绕工件轴线作公转和轴向移动,其中铣刀每公转一圈沿工件轴线移动一个螺距 P ,最终通过铣刀的成形牙型切削工件形成螺纹。

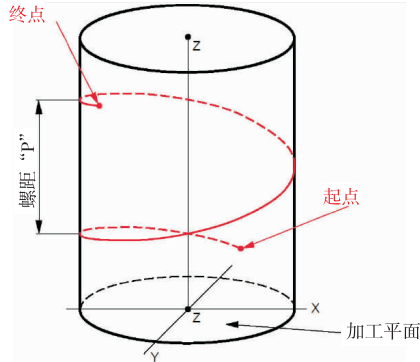


图1 螺纹铣削加工示意图

1.2 螺纹铣刀的结构

可转位螺纹铣刀相对于整体式螺纹铣刀,具有刀片不需重磨(生产成本低),不同牙型标准的刀片在同一刀杆上的互换性加工(加工效率高)等优势,因而在实际生产过程中应用广泛。以色列 VARGUS(瓦格斯)公司是世界上著名的硬质合金螺纹加工刀具解决方案供应商,本文以其 MiTM 系列中 ISO 牙型标准的某一型号可转位螺纹铣刀为研究对象,对其进行了必要的结构简化设计与修改,得到如图2所示螺纹铣刀结构。从图2可以看出,该螺纹铣刀是靠刀片本身的前角以及刀片装夹在刀杆上横向的一个偏心距离 d 来形成刀具的角度,因此,在刀具的设计过程中,可以通过适当地改变刀片前角以及调整偏心距离来改变最后刀具的前、后角。本文在三维 CAD/CAM 软件 Pro/e 中分别建立了螺纹铣刀片、铣刀杆、定位螺钉等零件实体模型,并最终建立螺纹铣刀装配体模型,如图3所示。

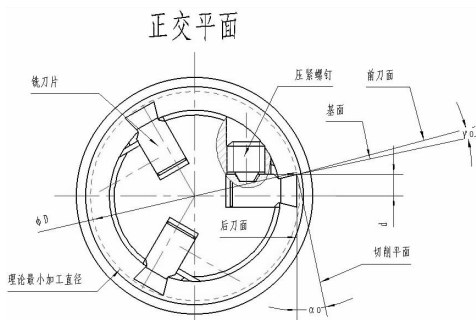


图2 螺纹铣刀结构

1.3 刀具材料及其几何角度确定

在实际加工过程中,可用作螺纹铣刀刀片材料的有

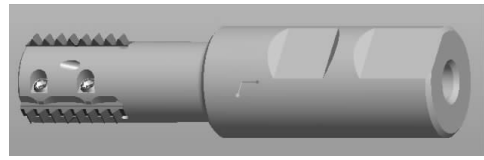


图3 螺纹铣刀装配模型

高速钢、硬质合金、金刚石等,但考虑到加工成本和效率以及相关涂层技术,企业生产中常用硬质合金作为刀片材料,并进行 TiN 和 TiAlN 涂层等,刀杆材料常采用高强度合金钢(如 42CrMo 等)。结合企业生产实际,本文选择 YT 类硬质合金作为刀片材料,其力学性能^[8]见表1。螺纹铣刀刀具几何角度中前角(γ_0)、后角(α_0)及其成型螺纹牙形角等对切削加工影响最大,本文在参考《机械加工工艺手册》^[9]中硬质合金刀具铣削合金钢刀具角度推荐范围的基础上,并考虑到成型铣刀刀具前角不宜取太大的原则,设置铣刀前角 $\gamma_0 = 3^\circ$,后角 $\alpha_0 = 12^\circ$,而牙形角的确定则按照 ISO 通用螺纹牙型标准,取为 60° 。

表1 YT类刀具材料性能

弹性模量 GPa	硬度	密度 kg/m^3	抗弯强度 MPa	抗压强度 MPa	热膨胀系数 $10^{-6}/^\circ\text{C}$	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
635	HRA90.5	1270	1200	4600	6.5	33.5

1.4 工件材料及切削用量的选择

由于 45#钢具有较高的强度和良好的切削加工性能,同时经过适当的热处理后便可获得不同的塑性、韧性以及耐磨性等特点,因而被广泛地应用于轴类零件和模具加工行业中。因此,本次螺纹铣削加工研究的工件材料选择 45#钢调质处理,其力学性能^[10]见表2。通过查阅《机械加工工艺手册》^[9]得到硬质合金刀具铣削加工合金钢工件时的铣削用量推荐值,并结合 ISO 标准螺纹牙型的特点,设置了五组每齿进给量 $f_z = 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 \text{ mm}/z$ 作为研究变量,以及铣削速度 $v = 1 \text{ m}/\text{s}$ 、背吃刀量 $a_p = 1 \text{ mm}$ 和铣削宽度(径向切宽) $a_c = 0.919 \text{ mm}$ 。

表2 45#钢材料力学性能

弹性模量 GPa	泊松比 μ	硬度	密度 kg/m^3	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	热膨胀系数 $10^{-6}/^\circ\text{C}$	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$
210	0.269	HRC30	7850	600	360	11.59	50.6

2 有限元仿真分析

2.1 AdvantEdge 软件简介

AdvantEdge FEM 是由美国 Third Wave Systems 公司开发研制的一款专门用于优化金属切削加工工艺参数的 CAE 软件。采用有限单元法对切削加工过程中的切削变形、刀具受力、温度变化等切削影响因素进行仿真,它集设计、优化加工工艺于一体,允许用户在脱机状态下设置能够减小切削力、切削温度和局部变形的加工参数和刀具形态,减少连网测试的需求,节约经济成本和生产时间。

2.2 模型建立

考虑到仿真分析的效率以及软件条件的限制,本文对铣刀结构做了适当的简化处理(只取铣刀两个螺纹牙型及刀齿进行加工仿真)。将所建立的铣刀装配模型保存为 . STL 格式文件后导入 AdvantEdge 软件中(保存时注意偏差控制中的弦高和角度控制均设置为 0.02,以保证刀具文件足够的模型精度)^[11],AdvantEdge 软件能够自动识别所导入刀具文件的表面面片模型,并建立起相应的三维实体刀具模型,导入后得到的铣刀模型如图 4 所示,并设置刀具材料为 Carbide - Grade - K。采用标准建模方式建立了加工工件模型如图 5 所示,并选择工件材料为 45#钢(美国标准钢号为 1045)。

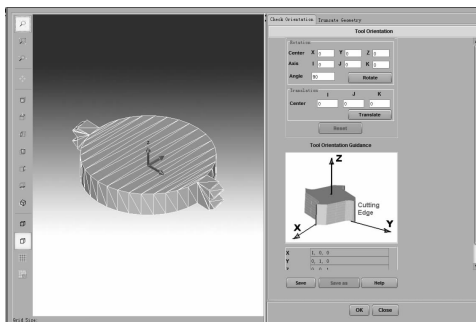


图 4 刀具模型建立

2.3 网格划分

网格划分的好坏将直接影响到仿真结果的精确程度,为了得到最优网格,本次研究采用自适应网格划分和网格重划分技术。由于刀具模型是从外部导入,其网格划分由软件按照默认方式进行划分,最大和最小单元尺寸分别为 1.0 mm 和 0.1 mm。工件网格划分参数的设置如图 6 所示:最大单元尺寸 1.5 mm,最小单元尺寸 0.15 mm,网格划分等级为 0.42。自适应网格重划分后,

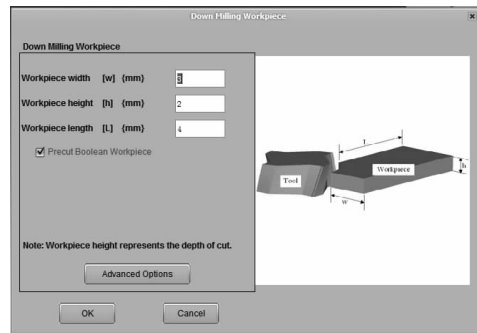


图 5 工件模型建立

刀具与工件接触区域的网格最小值为 0.0394 mm。

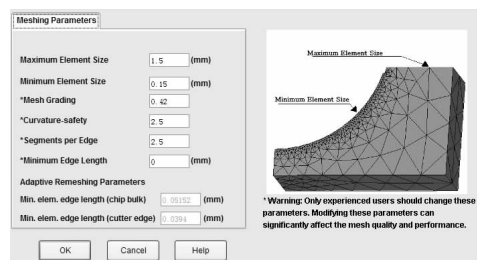


图 6 工件网格划分

2.4 参数设置及仿真分析

选择仿真模型为 Standard 模式,并设置初始环境温度为 20 °C,其余切削参数的设置按照 1.4 节中确定数据进行。参数设置完成并检查无误后在模拟器中分组进行数值分析,其仿真加工过程如图 7 所示。计算完成后,经过相应的后处理,便可观察到切削力、切削温度等变化情况。

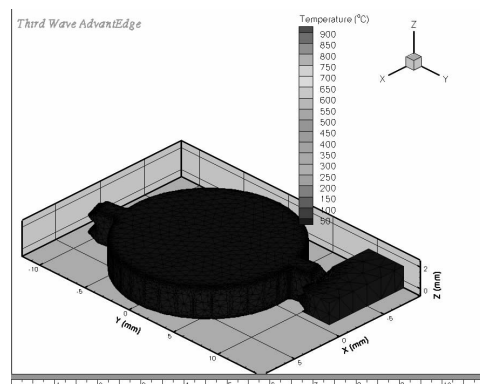


图 7 仿真加工过程

3 仿真结果及分析

图 8 为螺纹铣削加工的二维仿真分析。由于二维铣削只能从侧面反映切削过程(类似于车削加工),只能通过设置轴向切宽(DOC)^[6],采用螺纹等效切除面积法

来近似地表示螺纹切削牙型,因而并不能真实地表现螺纹切削过程,所产生的切削力和温度及其引起的变化过程也不准确。因此,本文采用三维铣削模型模拟螺纹铣削加工,得到切削力和切削温度的变化情况。

3.1 进给量 (f_z) 对切削力的影响分析

每齿进给量分别取 $f_z = 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3$ mm/z,切削速度 $v = 1$ m/s,背吃刀量 $a_p = 1$ mm,铣削宽度 $a_c = 0.919$ mm 时,得到 X (进给抗力)、 Y (主切削力)、 Z (轴向力)三个方向的切削力变化情况如图 9 所示。

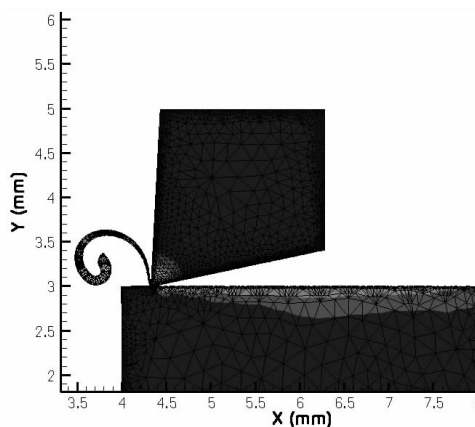


图 8 二维铣削加工过程

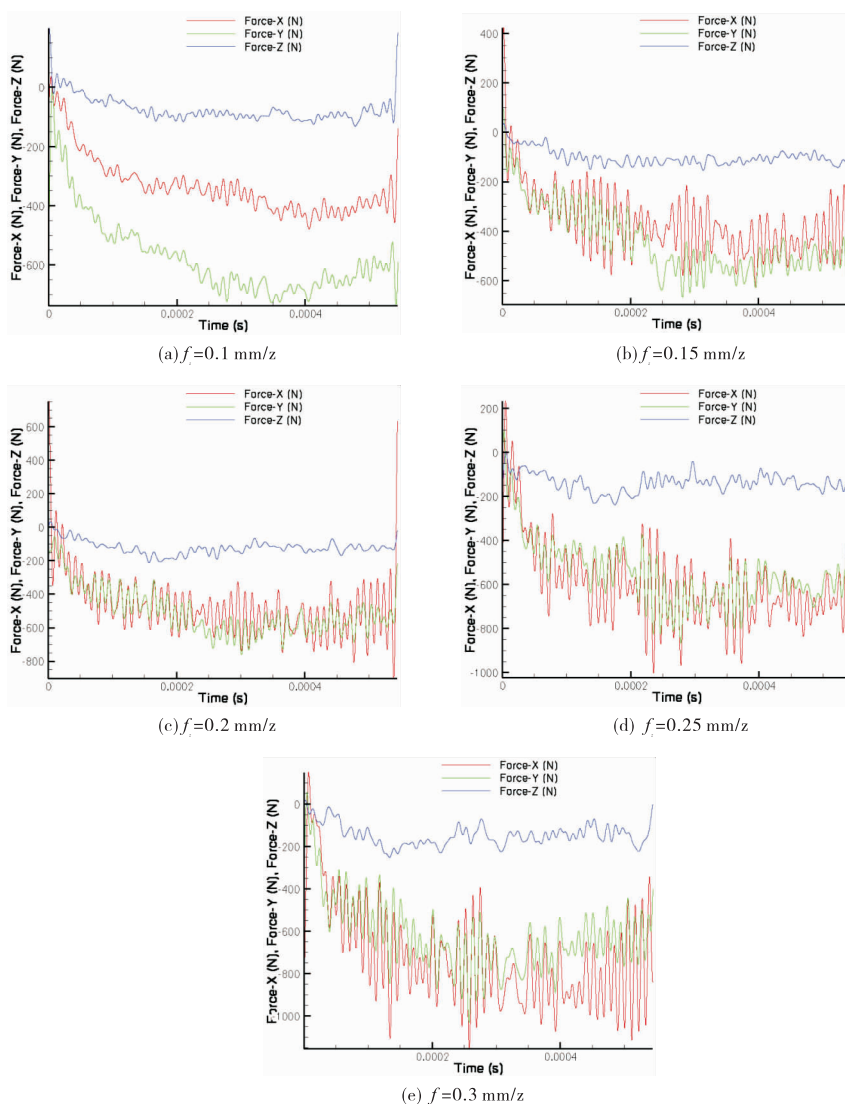


图 9 不同进给量时的切削力

从图 9 可以看出,随着刀具逐渐切入工件过程中, $X、Y、Z$ 三个方向上的切削力从零迅速增大到最大值,此后一直保持在一定范围内波动,真实地反映了切削加工

从非稳态进入稳态的全过程。 X 方向力随着进给量的增大,其最大值从 400 N 不断增加到 800 N 左右,同时其波动程度和范围也越来越剧烈;而 Y 方向力进入稳态切削

以后,其瞬时切削力保持在 500 N ~ 700 N 范围内波动; Z 方向力随进给量的增加,均一直维持在 100 N 左右,变化幅度不大。由此说明,每齿进给量的变化对主切削力和进给抗力的瞬时切削力峰值和浮动范围影响较大,而对轴向力的影响相对较小。由于 f_z 增大时变形系数 ξ 会有所下降,而在进给量较小时,切削力增大并不明显,参考刀具耐用度的三因素公式^[12],为了降低切削力同时提

高刀具寿命,应选择较小的每齿进给量(如 $f_z = 0.15$ mm/z 或 0.2 mm/z)。

3.2 进给量 (f_z) 对切削温度的影响分析

每齿进给量分别取 $f_z = 0.1$ 、0.15、0.2、0.25、0.3 mm/z,切削速度 $v = 1$ m/s,背吃刀量 $a_p = 1$ mm,铣削宽度 $a_c = 0.919$ mm 时,得到切削温度的变化情况如图 10 所示。

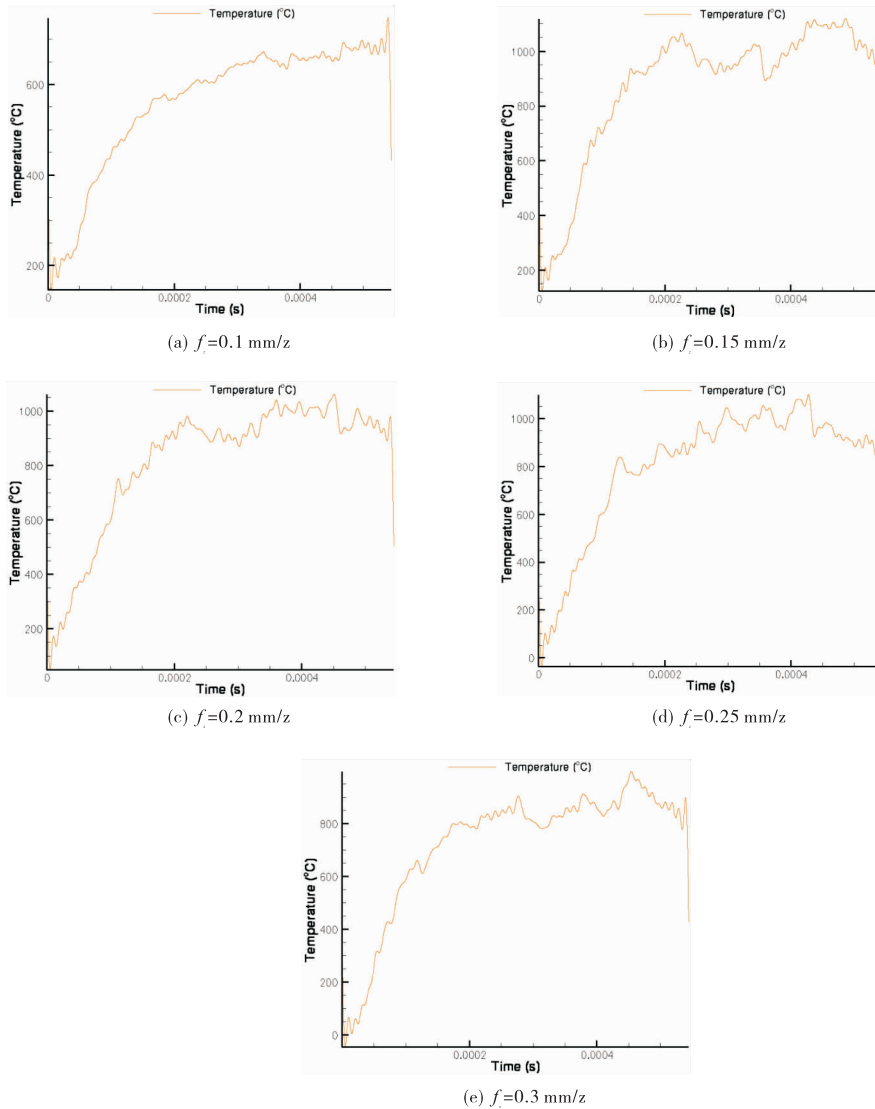


图 10 不同进给量时的切削温度

从图 10 可以看出,螺纹铣削加工过程中切削温度均从 20 °C 迅速增大到 900 °C 左右,之后便在 700 °C ~ 1000 °C 之间波动。随着每齿进给量的增大,切削温度的最大值先逐渐升高随后又缓慢下降,在 $f_z = 0.2$ mm/z 时达到最大值 1000 °C。产生上述现象的原因是:进给量增大时,单位时间内的金属切除量增多,产生的切削热增多和切削温度上升;而当进给量增大到一定

值时,由于单位切削力和切削功率的减小,切除单位体积金属产生的热量便开始减小,从而导致切削温度有所下降。因此,仅从切削温度影响铣削加工方面出发,为进一步降低温度提高刀具使用寿命^[12],可以选择较小或者较大的进给量,但考虑到螺纹加工精度及被加工表面质量,应选择较小的每齿进给量(如 $f_z = 0.15$ mm/z)。

4 结束语

机械零件加工过程中螺纹加工的质量,对最终螺纹的定位精度和强度具有重要影响,而螺纹铣削作为一种高性能的螺纹加工方法,有逐步取代挤压成型等螺纹传统加工方式的趋势。本文针对螺纹铣刀铣削加工45#钢进行研究,采用金属切削有限元软件 AdvantEdge 进行三维铣削加工仿真,模拟了螺纹铣削加工过程中切削力和切削温度的变化情况,对比分析了不同进给量的选择对加工性能的影响,分析结果为实际螺纹铣削加工提供一定的指导。

参考文献:

- [1] Lee S W, Andreas N. Simulation-aided design of thread milling cutter[C]//Konrad W. Proc. of 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, Zurich, June 1-6, 2012:120-125.
- [2] 陈世平,唐其林.螺纹数控铣削加工及其编程[J].机床与液压,2005(5):46-47.
- [3] 陈朝阳,张凡娥.螺纹的数控铣削加工[J].制造业信息化,2005,34(9):117-118.
- [4] 才卫国,张悦,高利民.单刃螺纹铣刀加工螺纹[J].煤矿机械,2007,31(4):108-110.
- [5] 蔺小军,单晨伟,史耀耀.螺纹数控铣削加工技术研究[J].制造业自动化,2007,32(1):54-56.
- [6] 陈铭.PCD螺纹铣刀的研制及生产应用[D].上海:上海交通大学,2011.
- [7] 刘斌,崔元萍,李军格,等.内螺纹数控铣削原理及应用[J].工具技术,2011,45(4):62-64.
- [8] 姜增辉,吴月颖,王琳琳.硬质合金刀具干切削TC4钛合金耐用度的研究[J].制造技术与机床,2013(9):109-112.
- [9] 孟少农.机械加工工艺手册[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [10] 康小健.高速铣削45钢铣削力及表面质量研究[D].湘潭:湖南科技大学,2012.
- [11] 王从军,郭丽华,黄树槐.CAD文件的STL格式转换[J].计算机辅助设计与制造,2001(1):36-37.
- [12] 周泽华.金属切削原理[M].上海:上海科学技术出版社,1984.

Finite Element Simulation Analysis of Thread Milling Based on 3D Model

ZENG Linlin, ZHOU Liping, LIAO Shichao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Thread milling is an advanced thread machining method, it has important practical significance for improving the tool life and the quality of machined surface to study the change rule of cutting force and cutting temperature in the machining process. Firstly, the 3D solid model of an indexable thread milling cutter is established in 3D design software Pro/e, the cutter is used to mill 45# steel. Secondly, the AdvantEdge which is a metal cutting process finite element software is used to simulate the thread milling process, and the relationships of cutting force and cutting temperature changing with time are obtained. Then, the effect of different feed rate on cutting force and cutting temperature is comparatively analyzed. The analysis results provide a reference for the actual thread milling and the selection of feed rate.

Key words: thread milling; cutting force; cutting temperature; AdvantEdge; feed rate