

基于 Deform-3D 的 42CrMo 钢铣削仿真分析

景旭文^{1,2}, 王楚辉^{1,2}, 周宏根^{1,2}, 顾向阳³, 孔晓风³

¹江苏科技大学; ²江苏省船海机械先进制造及工艺重点实验室;

³河南柴油机重工有限责任公司

摘要: 应用 Deform-3D 软件建立 Johnson-Cook 材料模型, 采用有限元方法对 42CrMo 钢进行铣削仿真分析, 研究了不同切削参数对切削仿真结果的影响, 利用仿真切屑与实际切屑进行对比, 验证了仿真结果的可靠性。通过仿真分析得到了在不同切削速度、切削深度下的切削力变化规律, 为 42CrMo 钢切削过程的研究和切削参数选择提供理论参考。

关键词: 42CrMo ; 铣削; 材料模型; 有限元仿真

中图分类号: TG54; TH164; TP391.9

文献标志码: A

Milling Simulation Analysis of 42CrMo Steel Based on Deform-3D

Jing Xuwen, Wang Chuhui, Zhou Honggen, Gu Xiangyang, Kong Xiaofeng

Abstract: The finite element simulation of 42CrMo steel is carried out by using Deform-3D software and the Johnson-Cook material model is established. The influence of different cutting parameters on the cutting simulation results is analyzed. The reliability of the simulation results is also verified by comparing the simulation chip with the actual chip. Through the simulation analysis, the change rule of the cutting force under different cutting speed and cutting depth is obtained, providing a theoretical reference for the study of the cutting process and cutting parameters of 42CrMo steel.

Keywords: 42CrMo; milling; material model; finite element simulation

1 引言

42CrMo 钢以优越的材料性能广泛应用于较高强度和韧性要求的零件, 但 42CrMo 钢的高强度和硬度对切削加工有较高的要求。针对该类材料的加工性能进行研究, 优化其加工参数对提高加工效率和加工质量, 延长工件使用寿命, 促进产业发展有重大意义^[1]。

传统的切削过程研究依靠单纯的试验手段, 耗时费力, 且切削过程中的切削力、温度很难准确获得。利用有限元仿真技术研究切削加工过程所获得的仿真数据全面, 试验重复性高, 因此该方法对切削过程研究有着积极的作用。Sheikh-Ahmad J. 等^[2]研究了在切削加工中切削速度和进给量与切屑形成之间的参数关系; Chengyong Wang 等^[3]研究对比了不同切削仿真条件下的切屑形态。这些研究为切削加工参数选择和切削预测模型建立提供了理论依据。

本文应用 Deform-3D 软件建立切削模型并对切削 42CrMo 钢进行仿真分析, 得到不同切削参数下的切削力变化规律; 通过仿真来预测切屑形态, 并与

实际切屑对比, 以验证金属切削有限元仿真的可靠性, 根据仿真结果建立的切削模型为切削有限元仿真和实际加工提供合理的切削参数。

2 Deform-3D 切削有限元模型建立

金属切削过程是切削力、热耦合、切屑形成的过程。采用 Deform-3D 软件对切削加工过程进行有限元仿真分析和模拟切屑形成, 为切削加工机理的研究提供理论依据。

2.1 几何模型建立

Deform-3D 软件自带刀具模型, 但因构件库为国外标准需要进行角度转换。工件模型可以根据设置的参数自动生成并与刀具匹配, 刀具模型也可以自建。将 UG 中建立的刀具三维模型以 .stl 格式导出, 再导入到 Deform-3D 中。

刀具的设计参数对切削效果影响很大。本文设计的刀具几何参数包括: 前角和刃倾角 5°, 后角 5°, 主偏角 90°, 副偏角 30°, 刀尖圆弧半径 0.2mm。图 1 为刀具模型, 图 2 为铣削仿真模型。

2.2 网格划分

仿真件的网格划分质量对仿真结果有着重要影响。网格划分的疏密既要考虑仿真的精度, 又要考虑模拟的时间, 因此需要结合实际情况确定合适的

网格尺寸。

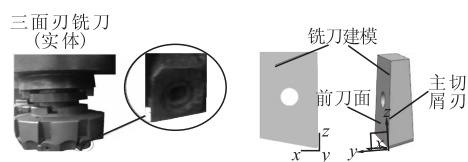


图1 刀具模型

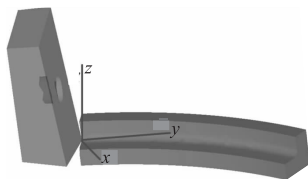


图2 铣削仿真模型

Deform-3D 带有自适应网格划分功能,网格疏密可根据切削情况而自动划分。通常情况下,网格最小单元尺寸为工件进给的 1/3,同时调控网格的最大、最小单元尺寸比例,控制网格划分标准,保证仿真精度,提高仿真效率。图 3 为刀具和工件网格模型。其中,刀具采用相对划分方式划分了 25000 个网格;工件以绝对方式划分,网格最小单元尺寸为工件进给的 30%,控制网格的最大、最小单元尺寸比例为 7。

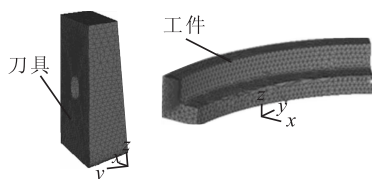


图3 刀具和工件网格模型

2.3 边界条件与接触摩擦设置

(1) 边界条件

Deform-3D 软件在进行塑性成形加工模拟时采用的是准静态迭代热力耦合法^[4]。金属切削是力和热相伴相生的过程,Deform-3D 中将温度场与速度场分别进行求解运算,模拟仿真时对加工对象进行以下设置:

①工件定位 在 Deform-3D 软件中模拟切削仿真时,工件固定不动,刀具相对工件运动,即将工件的非工作面约束限制,其节点的速度设为 0。

②热转换 切削过程中工件主要以热辐射和对流方式向周围环境传递热量^[5]。通常情况下,刀具热辐射系数设为 0,工件热辐射系数设为 0.075。对流传热参数设置如下:环境温度设为室温 20℃,空气热传系数为 8W/(m·℃)。

(2) 接触摩擦

金属切削过程是工件发生弹塑性变形的过程。

以工件为研究目标时,通常将刀具设为刚体、工件设为柔体进行接触设置。在 Deform-3D 软件中,常用的摩擦模型为剪切摩擦模型和库伦摩擦模型。在大量研究中,库伦摩擦常应用于滑动摩擦研究中;在研究工件材料的临界剪切应力时常用粘结摩擦。通常情况下,在切屑与刀具接触部分,一半为滑移区,一半为粘结区,而总摩擦力的 80% 以上表现为粘结摩擦力。因此本文采用剪切摩擦模型分析刀具与切屑的接触问题,且摩擦系数设为 0.6。

2.4 切屑分离准则

金属的切削过程是一个动态的材料去除过程,也是切屑的形成过程,合适的切屑分离准则能够良好地反映出切屑的物理性质。目前,常用的切屑分离准则主要有物理分离准则和几何分离准则。几何分离准则主要通过变形体的几何尺寸变化来判断是否分离;而物理分离准则通过某些材料的物理参数是否达到了临界值来判断是否分离。本文采用的是物理分离准则:当刀具与切屑接触点的压应力或者拉应力值超过 0.1MPa 时,判定单元节点分离^[6]。

2.5 建立材料模型

金属切削的本质是工件材料在外力的作用下产生弹性变形→塑性变形→断裂的过程,因此可以将切削变形问题归为热—弹塑性非线性问题来研究^[7]。材料的本构方程描述了材料的物理性能在一定条件下的变化关系,反映了物质在不同环境下的变化形式,因此材料本构方程直接决定了有限元仿真的结果。

在高应变率加载的条件下,材料的宏观和微观响应受应变、应变率、温度和材料的微观组织等因素的影响^[8]。利用有限元方法模拟切削过程中的材料行为,本质就是对描述材料应力—应变关系模型的求解。目前常用的金属切削本构方程有:Zener-Holloman 本构模型^[9]、Bodner-Partom 本构关系模型、幂函数形式的本构方程、插值本构方程和 Johnson-Cook(J-C)本构方程。其中,J-C 模型以其形式简单、适用于各种晶体结构而得到了广泛应用。以下着重介绍 J-C 本构方程。

J-C 本构方程为

$$\bar{\sigma} = [A + B(\varepsilon)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中, A 为材料的屈服应力; B 为应变硬化常数; C 为材料应变速率强化项系数; n 反映应变硬化效应; m 反映热软化效应; T 为变形温度; T_0 为室温,一般取 20℃; T_{melt} 为材料熔点温度。

式(1)从形式上分为应变效应、应变率效应和温度效应三部分。方程中应变、应变率和温度对应力的影响相互耦合,对于大量金属材料的变形描述都很吻合,可用于各种晶体结构。

在仿真过程中,材料本构行为必须真实反映加工材料应力—应变—应变率—温度间的关系。由于在不同的温度下,材料的一些物理性能会发生变化,这就要求建立一定的函数关系来保证材料参数的适用性。需了解材料的物理性能以及随温度的变化情况才能建立准确的材料模型。表1、表2分别为42CrMo钢的相关力学参数和热性能参数,可根据表中参数建立相关的参数模型。

表1 42CrMo 材料物理力学性能

抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	密度 (g/cm ³)	熔点 (°C)	硬度 (HRC)	比热容 (J/kg·K)
1080	930	7.85	1560	58	460

表2 42CrMo 材料热性能参数随温度的变化情况

温度(°C)	20	300	400	500	600	700	800	900
导热率 (W/m·K)	44	29.3	28.0	26.7	25.5	18.6	12.7	9.5
泊松比	0.29	0.313	0.316	0.325	0.341	0.345	0.35	0.355
线膨胀系数 (°C ⁻¹)	1.1e ⁻⁵	1.29e ⁻⁵	1.35e ⁻⁵	1.39e ⁻⁵	1.41e ⁻⁵	1.45e ⁻⁵	1.51e ⁻⁵	1.55e ⁻⁵
杨氏模量 (GPa)	212	185	175	165	155	145	135	125

3 仿真切屑对比验证

传统意义上通常将切屑分为带状切屑、节状切屑、粒状切屑和崩碎切屑四类。在切屑过程中,影响切屑形成的因素多且复杂。影响因素主要有工件参数、刀具几何参数及切削参数。在模拟切削有限元仿真中,还要考虑有限元建模的本构参数和切屑分离准则。在金属切削加工过程中,金属切屑的形态往往是切削效果好坏的一个直观反映。在金属切屑的研究领域,切屑形态的预测是热点也是难点。应用有限元技术模拟切屑形成是优化切削参数和完善加工仿真的重要途径,也是更好地实现几何仿真和提高虚拟切削加工环境真实感的必要手段。

应用 Deform - 3D 软件对 42CrMo 钢进行铣削有限元仿真时,根据相关加工工艺,设定铣削参数为:铣削速度 $v = 150\text{r}/\text{min}$,进给量 $f = 0.32\text{mm}/\text{r}$,刀具直径 $D = 100\text{mm}$,切宽 $a_e = 75\% D$,切削深度 $a_p = 2.25\text{mm}$, $a_p = 0.75\text{mm}$ 。刀具材料 WC 硬质合金,被切削材料 42CrMo 钢,采用 J - C 本构模型建立应力模型。表3为42CrMo的J - C本构模型系数。

表3 42CrMo 的 J-C 本构模型系数

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	T _m
930	568	0.008	0.211	1	1520

采用以上本构方程和切削参数进行铣削仿真,得到如图4所示的仿真切屑。

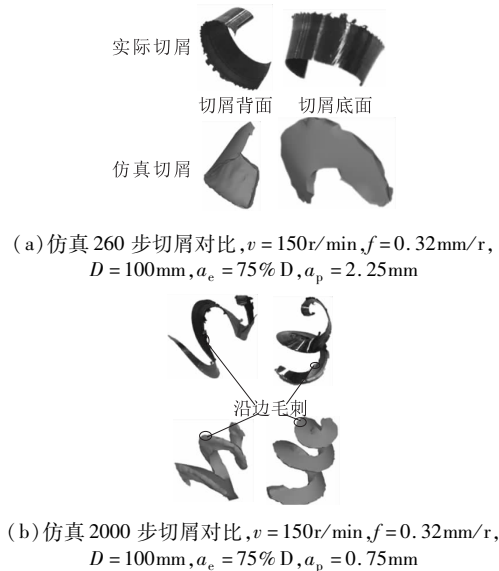


图4 仿真切屑与实际切屑对比

由图4可知:切屑背面粗糙呈毛茸状,跟切削刃接触的底面较光滑;当切屑较长呈螺旋状卷曲时,在切屑的边沿形成锯齿状毛刺,这些特征与实际形成的切屑比较吻合。仿真切屑与实际切屑的对比表明,本文建立的切削模型的仿真效果与实际切削情况吻合,证明了切削模型参数的有效性,对研究42CrMo钢的切削性能有着积极促进作用。

4 切削工艺仿真分析

根据上述方法完成切削仿真建模,进行切削仿真分析,研究不同切削参数下的切削效果。

4.1 切削深度对切削力的影响分析

切削加工过程中切削力主要产生于工件变形时产生的变形抗力,以及切屑排出时与刀具间的摩擦力,其构成了总切削力^[12]。

根据企业的连杆加工工艺,设定铣削参数为:铣削速度 $v = 150\text{r}/\text{min}$,进给量 $f = 0.32\text{mm}/\text{r}$,刀具直径 $D = 100\text{mm}$,切宽 $a_e = 75\% D$,切削深度 $a_p = 2.25\text{mm}$ 。

经仿真分析得到图5所示的铣削温度和主切削力(沿Y方向)随时间变化趋势。由图可知,刀具在切入和切出工件时处于不稳定状态,造成切削温度和切削力波动较大。在数据应用时一般将刀具切入和切出工件时的首尾数据去除。在去除切削温度的

首尾数据后,切削温度值大致在 500℃ 上下波动,符合中低速金属切削的温度范围。在去除主切削力的首尾数据后,主切削力在 1600N 上下波动,切削力偏大,将对刀具损伤和切削质量有严重影响。为改进切削质量,需对切削参数进行优化。对原给定的参数进行分析发现,刀具的切削深度($a_p = 2.25\text{mm}$)偏大,故拟定对切削深度进行单变量优化(见表 4)。

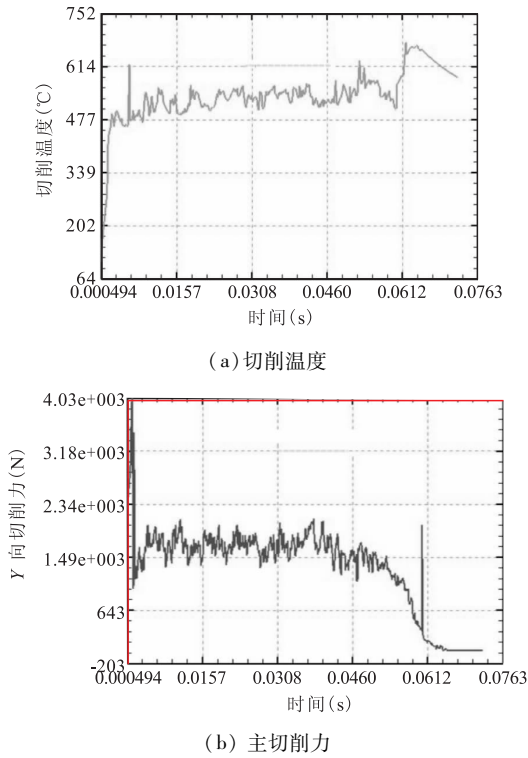


图 5 切削温度及主切削力随时间的变化
($v = 150\text{r/min}, f = 0.32\text{mm/r}, a_p = 2.25\text{mm}$)

根据表 4 所示的参数优化进行仿真分析,得到不同切削深度时主切削力随时间变化情况,如图 6 所示。

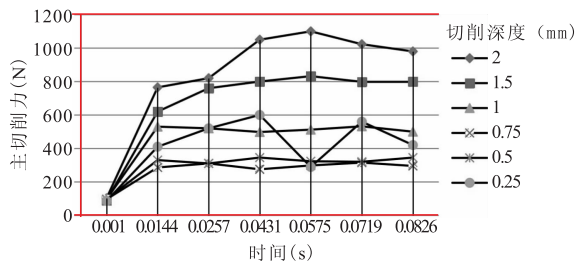


图 6 不同切削深度时主切削力随时间的变化

从图 6 可知,当切削深度大于 2.0mm 时,切削力最高可达 1100N,此切削力比较大,且不稳定,不可取;当切削深度为 1.5mm 时,主切削力达到了 850N,此切削力也较大,对刀具磨损较大,不可取;当切削深度设为 1.0mm 时,主切削力为 550N,且较为稳定;当切削深度为 0.5mm 时,其相对于切削深

度为 0.75mm 时的主切削力有所升高;当切削深度为 0.25mm 时,切削力变得不稳定,且变化值较大,不适合粗铣加工;当切削深度设为 0.75mm 时,主切削力在 310N 上下波动,切削力大小合适,且较为平稳。

在切削过程中,刀具在压力作用下切入工件,从而使刀—件接触面积增大,产生较大的摩擦力与挤压力,使总的切削力增大;当切削持续进行,在剪切力作用下形成切屑,切屑的产生使切削力趋于稳定。在有限元仿真过程中,切屑的形成伴随着网格的破坏和重组,导致切削力在一定范围内波动^[13]。由图 6 可知,在一定范围内切削力随着切削深度的增大而增大;而当切削深度过小时,切削力又会出现较大波动,很不稳定,甚至出现切削力反弹而增大的现象。在实际加工中,为了保证加工质量和降低切削力,要选择适合的切削深度。

4.2 切削速度对切削力的影响

根据上述分析结果对铣削参数进行单变量优化设计,研究不同切削速度对切削力的影响。切削参数优化设计方案见表 5。

表 4 切削参数优化设计

序号	切削要素				
	v (r/min)	f (mm/r)	D (mm)	a_e (mm)	a_p (mm)
1	150	0.32	100	75	2.00
2	150	0.32	100	75	1.50
3	150	0.32	100	75	1.00
4	150	0.32	100	75	0.75
5	150	0.32	100	75	0.50
6	150	0.32	100	75	0.25

表 5 切削参数优化设计

序号	切削要素				
	a_p (mm)	f (mm/r)	D (mm)	a_e (mm)	v (r/min)
1	0.75	0.32	100	75	150
2	0.75	0.32	100	75	200
3	0.75	0.32	100	75	300
4	0.75	0.32	100	75	400
5	0.75	0.32	100	75	500
6	0.75	0.32	100	75	600

根据表 5 的切削参数设计方案进行仿真分析,得到不同切削深度时主切削力随时间变化情况,如图 7 所示。

从图 7 可知,主切削力随着切削速度的增大而逐渐减小。这是因为在切削过程中切削温度随着切削速度的增大而升高,导致工件表面硬度下降,进而使刀具与工件的摩擦系数下降,最终导致切削力降低。但是,随着切削速度的继续提高,主切削力的下降就不再明显,变化值较小。因此,在保证加工质量

的情况下,选择适当的切削速度对提升经济效益很有必要。

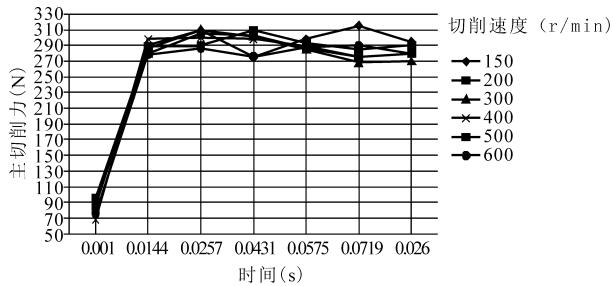


图7 不同切削速度时主切削力随时间的变化

图8为铣削速度 $v = 150\text{r/min}$, 进给量 $f = 0.32\text{mm/r}$ 、刀具直径 $D = 100\text{mm}$ 、切宽 $a_e = 75\% D$ 、切削深度 $a_p = 0.75\text{mm}$ 时主切削力随时间变化图及应力云图。

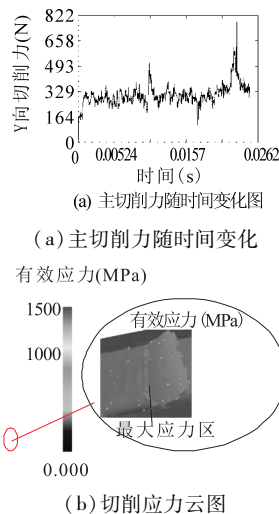


图8 主切削力随时间变化及应力云图

($v = 150\text{r/min}$, $f = 0.32\text{mm/r}$, $a_e = 75\% D$, $a_p = 0.75\text{mm}$)

从图8a可知,主切削力去掉刀具切入/切出工件时的首尾数据后,大致在310N上下波动,且较为平稳;从图8b可知,最大切削应力集中在切屑与工件的断裂处,满足切屑分离准则。

5 结语

金属切削加工是切削力、热耦合和切屑形成的过程。本文应用 Deform - 3D 软件完成对 42CrMo 钢的铣削仿真建模,并采用 J - C 材料模型仿真分析了切削深度和切削速度对切削力的影响规律。

仿真结果表明:切削深度对切削力的影响很大,合适的切削深度对金属切削的加工质量有重要影响;适当提高切削速度,有助于降低切削力、保证加工质量和提升经济效益。通过将仿真切屑与实际切屑的几何表征进行对比可知,切削仿真得到的切屑

与实际切屑的几何表征比较吻合,表明仿真模型及结果的可靠,为 42CrMo 钢的切削加工的参数选择提供了理论参考,同时也为研究其它金属材料的切削过程提供了一种有效途径。

参考文献

- [1]艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [2]Sheikh-Ahmad J, Bailey J A. Flow instability in the orthogonal machining of CP titanium[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997(119):307-313.
- [3]Chengyong Wang, Feng Ding, Dewen Tang, et al. Modeling and simulation of the high-speed milling of SKD11 (62 HRC) hardened steel based on split Hopkinson pressure bar technology[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016.
- [4]王国胜,侯波,于忠奇,等. 基于 BCJ 本构模型的高速切削过程数值模拟[J]. 机械设计与研究, 2011(3):91-93.
- [5]蔡旺. 叶片精锻过程三维热力耦合有限元模拟[D]. 西安:西北工业大学, 2002:56-59.
- [6]施春宇. 切削加工过程与残余应力仿真研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.
- [7]Scientific forming Technologies Corporation. Deform 3D - V5.0, User's Manual [M]. 2003:90-92.
- [8]刘战强,吴继华,史振宇,等. 金属切削变形本构方程的研究[J]. 工具技术, 2008, (3):3-9.
- [9]Zener C, Hollomon. Effect of strain rate on plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1):22-32.
- [10]G R Johnson, T J Holmquist. Evaluation of cylinder - impact test data for constitutive model constants[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(8):3901-3910.
- [11]G R Johnson, W H Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1988, 21(1):31-48.
- [12]肖智清. 机械制造基础(第2版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [13]朱红波,孙立强. 基于 Deform - 3D 的 42CrMo 钢切削力有限元仿真[J]. 工具技术, 2015, (08):32-35.

第一作者:景旭文,博士,教授,江苏科技大学,212000 江苏省镇江市

First Author: Xu Jingwen, Doctor, Professor, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China