

H13 淬硬钢切削力仿真及参数化研究

陈桂涛^{1*} 熊欢² 王帅东¹ 王一洋¹

1. 中北大学机械工程学院, 山西 太原 030051

2. 中国兵器装备集团西南技术工程研究所, 重庆 400039

[摘要]采用 Abaqus 有限元分析软件, 对 CBN 刀具切削 H13 淬硬钢的加工过程进行了仿真, 分析了切削过程中工件的等效应力分布变化及切削力的特性。设计单因素对照试验, 分析了切削力与各工艺参数(切削速度、背吃刀量、刀具前角、刀具后角)之间的联系; 利用正交试验, 研究了工艺参数对切削力影响的主次关系。结果表明, 在一定参数范围内, 使用较高的切削速度和较深的背吃刀量会导致切削力增大, 适量增大刀具的前、后角有利于降低加工过程中的切削力; 各因素对切削力影响的显著程度为: 背吃刀量>切削速度>刀具前角>刀具后角。

[关键词]H13 钢; 有限元分析; 工艺参数; 切削力

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15327

中图分类号: TG506

文献标识码: A

Simulation and Parameterization Study on Cutting Force of H13 Quenched Steel

CHEN Guitao^{1*}, XIONG Huan², WANG Shuaidong¹, WANG Yiyang¹

1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, China South Industries Group Corporation, Chongqing, 400039, China

Abstract: Using Abaqus finite element analysis software, the machining process of CBN cutting H13 quenched steel was simulated, and the changes in equivalent stress distribution of the workpiece and the characteristics of cutting force during the cutting process were analyzed. A single factor controlled experiment was designed to analyze the relationship between cutting force and various process parameters (cutting speed, back cutting amount, tool rake angle, tool rake angle); The primary and secondary relationship between process parameters and cutting force was studied using orthogonal experiments. The results indicate that within a certain parameter range, using higher cutting speeds and deeper back cutting amounts will lead to an increase in cutting force. Increasing the front and back angles of the tool appropriately is beneficial for reducing cutting force during the machining process; The significant degree of influence of various factors on cutting force is: back cutting amount>cutting speed>tool rake angle>tool rake angle.

Keywords: H13 steel; finite element analysis; process parameters; cutting force

AISI-H13 钢(4Cr5MoSiV1 钢)是一种空冷硬化热作模具钢, 因其高温环境下展现出的抗疲劳性、高强度和良好的韧性等优点, 被广泛应用于模具制造、航空航天等工业领域^[1-3]。淬火处理后的 H13 钢硬度显著提高, 在高速切削过程中产生的切削力较大, 严重影响加工精度及稳定性, 容易加速刀具磨损。

国内外学者借助有限元技术对 H13 钢的切削加工进行了大量研究: Umer^[4]利用有限元模拟和高速正交切削试验对淬硬态 H13 钢在陶瓷刀具和 PCBN 刀具下的可加工性进行分析, 结果表明: 相同工况下, 使用陶瓷刀具加工 H13 钢时切削力更低, 但 PCBN 刀具的表面光洁度优于陶瓷刀具。谢卿阳^[5]通过 ABAQUS 建立了 H13 钢高速切削有限元模型, 揭示了带状切屑和锯齿状切屑的形成过程, 研究表明: 刀具前角从 -8° 增大到 16° , 切屑形态从锯齿状转变成带状切屑。张庆^[6]建立了 H13 钢硬态铣削表面层的残余应力解析模型, 并通过实验进行了验证。

综上所述, 国内外学者针对 H13 钢的切屑形貌、残余

应力等内容进行了研究, 但少有研究涉及切削用量及刀具参数交互作用对切削力的影响。本文以硬度 45HRC 的 H13 淬硬钢为研究对象, 旨在借助有限元模型, 研究高速切削加工过程中, 切削力与切削速度、背吃刀量及刀具前、后角之间的联系, 并分析各因素对切削力影响的主次。

1 切削仿真分析方法

有限元分析采用基于等效塑性应变的 Johnson-Cook 损伤模型作为切屑分离准则, 来描述 H13 钢在切削加工过程中的剪切失效行为^[7]。通过设定位移破坏、线性软化、最大退化的损伤演化条件来模拟加工中连续切屑的形成。其中, 材料的失效应变 ε_f 由公式(1)计算。

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(-d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] [1 + d_5 \theta] \quad (1)$$

式中, $d_1 \sim d_5$ 为失效参数(见表 1)。 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别表示材料的等效塑性应变率, 参考应变率。 p 为压力, q 为 von Mises 应力。 θ 是一个与温度相关的无量纲参数, 其定义

参照公式(2)。

$$\theta = \begin{cases} 0 & T < T_0 \\ (T - T_0) / (T_m - T_0) & T_0 < T < T_m \\ 1 & T > T_m \end{cases} \quad (2)$$

式中, T 为材料实际温度; T_0 为参考温度, 取 20°C ; T_m 为熔点, H13 钢的熔点为 1480°C 。

表 1 H13 钢的 Johnson-Cook 失效参数^[8]

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
-0.8	1.2	-0.5	0.0002	0.61

在切削过加工过程中, 材料会受到高应变率、大变形及高温等因素的作用, 进而对其流动应力产生显著影响^[9]。鉴于此, 本构模型选用了 Johnson-Cook 塑性模型, 该模型能够精准刻画切削过程中材料所呈现出的热粘塑性流动行为。Johnson-Cook 本构模型中关于流动应力 σ 的典型表达式如下:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中, ε 为材料的等效塑性应变。A 为初始屈服应力, B 为加工硬化系数, C 为应变率敏感系数, m 为热软化系数, n 为硬化指数。表 2 为 H13 钢的 Johnson-Cook 塑性参数。

表 2 H13 钢的 Johnson-Cook 塑性参数^[10]

A (MPa)	B (MPa)	C	m	n
908.54	321.39	0.028	1.18	0.278

在模拟切削的相关研究中, 通常将刀具设定为刚体。对于刀具表面与切削层网格节点之间的相互作用形式, 法向行为方面采用“罚”接触方式, 切向行为选用“硬”接触方式。并且, 仿真过程中所运用的摩擦模型是由 Zorev 提出的修正库伦摩擦模型^[11](见公式(4)), 该模型能够更为精准地描述刀具与切削层在切削过程中的摩擦特性及相互作用关系。

$$\begin{cases} \sigma_f = \mu \sigma_n, & \mu \sigma_n < \tau_{\max} \text{ (滑动摩擦)} \\ \sigma_f = \tau_{\max}, & \mu \sigma_n \geq \tau_{\max} \text{ (粘滞摩擦)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ_f , σ_n 分别为刀具前刀面的摩擦应力, 法向应力; $\tau_{\max}$ 为工件材料的等效剪切应力; μ 表示摩擦系数, 取 0.3。

2 切削有限元模型及结果分析

建立 H13 钢的切削有限元模型(见图 1), 背吃刀量 $a_p=0.4\text{mm}$ 。H13 钢工件尺寸设为 $10\text{mm} \times 4\text{mm}$, 切削层高 $h=1.2\text{mm}$ 。选用 CBN 刀具(材料参数见表 3)进行切削加工, 设定刀具前角 $\gamma=7^\circ$, 刀具后角 $\alpha=8^\circ$, 切削刃半径 $r=50\mu\text{m}$, RP 为刀具的参考点。

全自由度约束工件的左表面、底面及右表面的非切削区域, 通过刀具沿 x 轴负方向的运动进行切割, 给定速度 $v_c=150\text{m/min}$ 。刀具、工件均选用平面应变网格单元,

选用 0.02mm 的正四边形网格结构对切削层进行网格细分, 非切削层最大网格尺寸设定为 0.2mm 。采用几何非线性的动力-显示分析步骤进行数值计算, 切削过程中的应力分布云图和切削力时域曲线分别如图 2、图 3 所示。

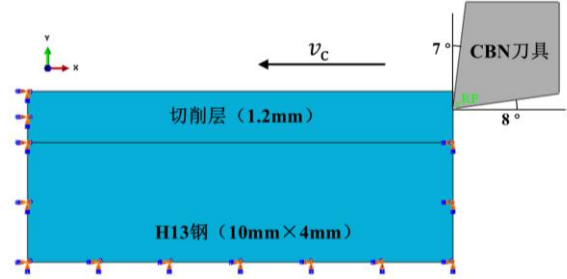


图 1 二维切削有限元模型

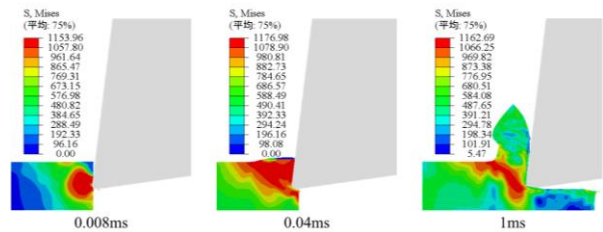


图 2 应力分布云图

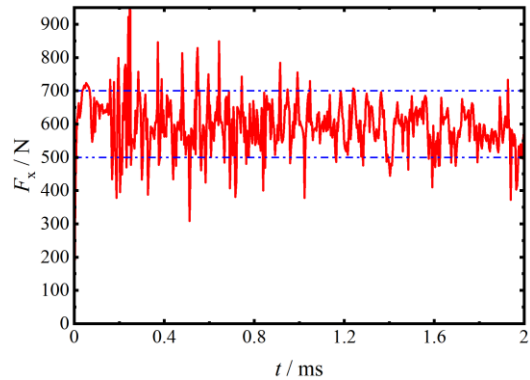


图 3 切削力时域曲线

由图 2 可知, 0.008ms 时, 刀具刚切入工件, 在工件接触点产生较大、集中的等效应力。随着刀具前进, 接触面积逐渐增大, 等效应力场向外扩展, 局部等效应力达到了 1176.98MPa , 超过 H13 钢工件的屈服极限, 切削层晶格发生剪切滑移, 塑性应变增大, 工件右端产生毛刺。切削进行到 1ms 时, 在刀具对工件第一变形区的持续的剪切与挤压作用下, 逐渐形成连续的带状切屑。

由图 3 分析可知, 刀具刚接触工件时, 主切削力 F_x 急剧上升到约 720N , 主要原因为动态仿真中骤起的速度加剧了刀具与切削层间的相互作用。刀具持续切削工件的过程中, 切屑不断从被切材料上脱离, 从而使得前刀面阻力突然减小, 与此同时刀具再次剪切新的材料单元, 所受压力又开始剧增, 以此导致切削力呈规律的波动态, 稳定波动范围约在 $500\sim 700\text{N}$ 。

表3 刀具、工件材料的物理参数^[12,13]

材料名称	密度 (kg/m ³)	杨氏模量 (GP)	泊松比	导热系数 (W/(m·K))	膨胀系数 (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	比热容 (J/(kg·K))
CBN	3800	680	0.2	120	3	526
H13 (45HRC)	7846	211	0.28	28.47	12.2	469

3 切削力特性仿真分析

3.1 试验方案设计

为了研究主切削力对切削速度、背吃刀量及刀具前后角变化的响应情况,设计了单因素对照试验分析,试验方案参照表4。其中,切削速度 v_c 的取值范围 100~250m/min,背吃刀量 a_p 在 0.2~0.8mm 之间取值,刀具前角 γ 取 3~15°,后角 α 取 6~12°。参照组为 $v_c=150$ m/min, $a_p=0.4$ mm, $\gamma=7^\circ$, $\alpha=8^\circ$ 。

在此基础上,拟定一个涵盖四因素三水平的正交试验方案(参数见表5),通过对上述工艺参数的不同水平组合进行分析,验证交互作用下各因素变量对切削力的影响程度的高低。主切削力取稳定切削状态下的平均值。

表4 单因素对照试验方案

变量	v_c (m/min)	a_p (mm)	γ (°)	α (°)
取值	150[100, 250]	0.4[0.2, 0.8]	7[3, 15]	8[6, 12]

表5 正交试验方案

	v_c (m/min)	a_p (mm)	γ (°)	α (°)
水平1	150	0.4	7	8
水平2	200	0.6	11	10
水平3	250	0.8	15	12

3.2 工艺参数对切削力的影响规律

在 $v_c=150$ m/min, $a_p=0.4$ mm, $\gamma=7^\circ$, $\alpha=8^\circ$ 工况下,参照表4依次改变切工艺参数的取值进行有限元计算,根据仿真结果绘制切削力与切削用量、刀具几何参数的关系曲线(分别见图4、图5)。

通过图4可以看出,当切削速度 v_c 从 100 m/min 提升至 250 m/min 的过程中,主切削力 F_x 随之缓慢增大,增涨值为 63.02N,这是由于 H13 钢的导热系数较低,高速切削条件下,材料的热软化效应持续时间变短导致。当背吃刀量 a_p 从 0.2mm 逐步增加至 0.8mm,前刀面与切削层的有效接触面积增大,单位时间内材料去除量增多,大幅提高了刀具所承受的切削压力和摩擦阻力,主切削力 F_x 显著提升,由 379.08 上升至 1152.07N,增大约 2.04 倍。

图5表示,在一定范围内增大刀具前角和后角,有利于降低切削加工中的主切削力 F_x 。具体表现为,刀具前角 γ 从 3° 增大到 15° 过程中,前刀面受到切屑的正压力减小,主切削力 F_x 由 649.04N 下降到 545.77N,减小了 15.91%。当刀具后角 α 由 6° 增大到 12°,后刀面与已加工表面之间间隙增大,降低了摩擦阻力,切削力相对降

低了 31.99N。

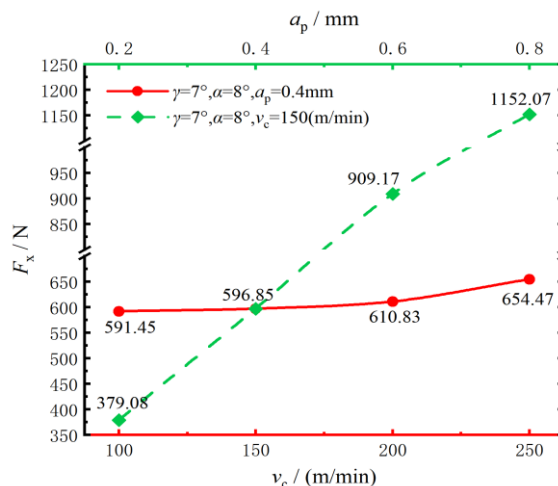


图4 切削用量参数与切削力关系曲线

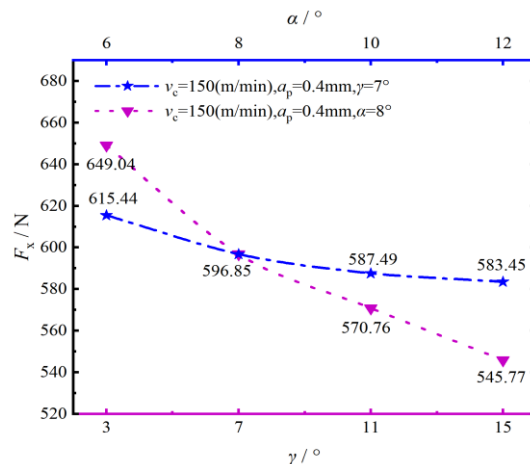


图5 刀具几何参数与切削力关系曲线

3.3 工艺参数对切削力的影响程度

参照 L9 (3⁴) 正交表安排有限元计算,统计各组仿真稳定切削状态下的主切削力响应值 F_x 见表6。

表6 正交试验参数与结果

组	v_c (m/min)	a_p (mm)	γ (°)	α (°)	F_x (N)
1	150	0.4	7	8	596.85
2	150	0.6	15	10	815.33
3	150	0.8	11	12	1106.87
4	200	0.4	15	12	564.2
5	200	0.6	11	8	881.52
6	200	0.8	7	10	1186.01
7	250	0.4	11	10	624.11
8	250	0.6	7	12	960.74
9	250	0.8	15	8	1188.82

计算各因素在不同水平下的平均值,并进行极差分析,结果如表7所示。极差的值越大,数据越离散,则表示对

应因素对试验指标的影响程度越高。因此可得结论,所涉及因素对主切削力的影响的显著程度从高到低依次为:背吃刀量 a_p 、切削速度 v_c 、刀具前角 γ 、刀具后角 α 。因此,在 H13 钢的切削加工中,可优先考虑减小背吃刀量来降低加工过程中的主切削力,其次考虑降低切削速度和增大刀具前角。

表 7 极差分析

	v_c	a_p	γ	α
水平 1 均值	839.68	595.05	914.53	889.06
水平 2 均值	877.24	885.86	870.83	875.15
水平 3 均值	924.56	1160.57	856.12	877.27
极差 R	84.87	565.51	58.41	13.91
主次顺序	$a_p > v_c > \gamma > \alpha$			

4 结束语

为了研究 H13 钢切削加工时的切削力特性,本文建立了基于 Johnson-Cook 剪切失效准则的 CBN 刀具切割 H13 钢的有限元模型。通过对照试验得出:在一定参数范围内,主切削力与切削用量成正相关关系,与刀具几何参数成负相关;通过正交试验判断背吃刀量为影响切削力的最主要因素。为金属加工中切削力的预测提供一种思路,同时在工艺参数的合理选择方面具有一定参考价值。

基金项目:山西省研究生科研创新项目(2023KY599)。

[参考文献]

- [1]张旭,何文超,李东辉,等.热作模具钢热疲劳机理及性能改善的研究现状[J].金属热处理,2020,45(9):10-20.
- [2]饶楚楚,张新星.深冷处理对 4Cr5MoSiV1 热作模具钢磨损性能的影响[J].锻压技术,2022,47(8):235-240.
- [3]胡连新,周健,刘建雄,等.淬火冷速对 H13 模具钢组织

及力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(9):123-128.

[4]Umer U. High Speed Turning of H-13 Tool Steel Using Ceramics and PCBN[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2012, 21(9):1857-1861.

[5]谢卿阳. 4Cr5MoSiV1 淬硬钢高速切削的实验研究和有限元分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.

[6]张庆. H13 钢硬态铣削三维表面形貌及残余应力建模[D]. 济南:山东大学,2021.

[7]贾祯杰. 基于 ABAQUS 下钛合金切削仿真技术分析[J]. 机械管理开发, 2023, 38(11):30-34.

[8]李斌训. H13 钢硬态切削显微组织演变及力学性能评定[D]. 济南:山东大学,2020.

[9]夏天,高志玉,赵斐,等.金属材料塑性本构模型建立研究进展[J].塑性工程学报,2024,31(9):23-35.

[10]Ding H, Shen N, Shin Y C. Experimental Evaluation and Modeling Analysis of Micromilling of Hardened H13 Tool Steels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011(133):41.

[11]万蕾. 基于有限元方法的金属切削过程研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2016.

[12]晋宇. 仿生微织构 CBN 刀具车削钛合金研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2024.

[13]Liu J, Ji X, Guo Z, et al. Characteristics and cutting performance of the CVD coatings on the TiCN-based cermets in turning hardened AISI H13 steel[J]. Progress in Artificial Intelligence, 2020, 9(2):65.

作者简介:陈桂涛(1998—),男,硕士研究生,研究方向为振动与力学仿真分析。