

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.11.008

## FeCoNiCr系高熵合金铣削力仿真与实验研究

温雪龙, 张文波, 巩亚东, 李俊鹏  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 通过对高熵合金进行三维槽铣和侧铣的铣削力仿真分析,研究了不同加工参数对铣削力的影响规律. 针对FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub>, FeCoNiCrAl<sub>0.5</sub>, FeCoNiCrMo<sub>0.1</sub>三种铸态高熵合金设计正交与单因素铣削实验,通过测量实验中的铣削力,探讨了不同加工方式、铣削参数、刀具和不同元素成分及含量对铣削力的影响规律. 仿真及实验结果表明:随着铣削速度的增加,铣削深度和进给速度的减小,槽铣和侧铣的铣削力都减小,相同加工参数下槽铣的铣削切向力和法向力分别比侧铣高404.30%和761.06%. Al元素含量高的高熵合金铣削力大. HMX涂层刀具的铣削力小于SGS涂层刀具,铣削力平均降低10.6%. 实验结果为高熵合金的高效加工提供了理论参考.

**关键词:** 高熵合金; FeCoNiCr系; 铣削加工; 仿真; 铣削力

中图分类号: TH 161 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1579-08

## Simulation and Experimental Study on Milling Force of FeCoNiCr High Entropy Alloy

WEN Xue-long, ZHANG Wen-bo, GONG Ya-dong, LI Jun-peng

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WEN Xue-long, E-mail: wenxl@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** The effect of different machining parameters on the milling force of high-entropy alloy (HEA) was studied through the simulation analysis of 3D slot milling and side milling. The orthogonal and single-factor milling experiments of FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub>, FeCoNiCrAl<sub>0.5</sub>, and FeCoNiCrMo<sub>0.1</sub> as-cast HEAs were designed. By measuring the milling force in the experiments, the effects of different machining methods, milling parameters, tools, and elements of HEAs on the milling force were explored. The results showed that with the increase of milling speed and the decrease of depth and feed speed, the milling force of slot milling and side milling decreases, and the tangential force and normal force of slot milling are 404.30% and 761.06% higher than that of side milling under the same machining parameters, respectively. High-entropy alloys with high Al content have higher milling forces. The milling force of HMX tool is smaller than that of SGS tool, with an average reduction of 10.6% in the milling force. The experimental results provide a theoretical reference for the efficient machining of HEAs.

**Key words:** high-entropy alloy; FeCoNiCr system; milling; simulation; milling forces

高熵合金通常由5种或更多种元素组成,表现出高强度、耐腐蚀等特性,在耐磨涂层、海洋工程材料、特种装备和超导材料等领域有很大的应用前景. 在高熵合金的加工过程中,不同的加工方式、加工参数都会对铣削力产生影响. 加工参数过大会导致磨损加剧、铣削力增大而影响加工

质量,过小又影响加工效率. 合适的加工方式和参数可以降低铣削力、提高铣削效果、促进高熵合金在各领域中的应用.

针对高熵合金的加工,在锻造、冷拉拔等非机械加工方面有较多研究. Sun等<sup>[1]</sup>研究了具有单相面心立方晶体结构的铸态和锻造CrMnFeCoNi

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275412).

作者简介: 温雪龙(1985-),男,辽宁沈阳人,东北大学副教授; 巩亚东(1958-),男,辽宁本溪人,东北大学教授,博士生导师.

高熵合金的高温拉伸性能,发现锻造高熵合金在每个温度范围内都实现了出色的强度,特别是在 650 °C 时,锻造高熵合金的极限抗拉强度和屈服强度分别提高了 40% 和 158%. Xiang 等<sup>[2]</sup>研究了热处理对 TiZrNbTa 组织及力学性能的影响,发现随着热处理温度的升高,屈服强度趋于先增大后降低的趋势,当热处理温度达到 600 °C 时, TiZrNbTa 具有最高的屈服强度,为(1 583±55) MPa,塑性应变为(20.5±1.8)%. Kaushik 等<sup>[3]</sup>发现高熵合金的强度随变形量的增大而增大. Lee 等<sup>[4]</sup>研究了热处理对 FeCoNiCrAlTi 时效硬化现象的影响. Malatji 等<sup>[5]</sup>发现热处理可令高熵合金组织分布更加均匀.

关于铣削工艺, Gökhan 等<sup>[6]</sup>进行了固定和可变螺旋角刀具对 Ti6Al4V 外周铣削中的切削力和表面粗糙度进行单目标和多目标优化研究,发现使用具有较大螺旋角的切削工具,可以最大限度地减少切削力,并提高工件表面质量,具有大螺旋角的可变螺旋刀具在切削力和表面粗糙度方面表现最佳. Gaikhe 等<sup>[7]</sup>对螺旋球头铣刀铣削镍铬铁合金进行了工艺优化,建立铣削力模型确定最佳铣削参数. 王振宇等<sup>[8]</sup>针对圆柱直齿轮的多轴铣削精加工,提出一种无干涉刀具路径规划方法,最后通过仿真计算实例验证了所提方法的可行性和有效性. 贾东洲等<sup>[9]</sup>进行了干磨削、浇注式、微量润滑(minimum quantity lubrication, MQL)和静电雾化微量润滑(electrostatic MQL, EMQL) 4 种润滑工况的 EMQL 钛合金 Ti-6Al-4V 磨削试验,结果表明,相比于干磨削、浇注式及 MQL 工况, EMQL 工况下获得了最小切向磨削力和法向磨削力,分别为 28.53 和 77.18 N,摩擦因数分别降低了 29.39%, 9.31% 和 13.95%,比磨削能分别下降了 51.34%, 18.40% 和 30.11%. 许文昊等<sup>[10]</sup>综述了静电雾化微量润滑在车削、铣削、磨削等工况下对降低刀具磨损、提高加工表面质量的优异性能,分析得到其与传统微量润滑相比 PM 2.5/PM 10 降低 6.2%~68.3%, 刀具寿命增加 48.1%~100%, 表面粗糙度降低 12.6%~39.3%.

尽管目前在不同加工工艺对高熵合金机械性能的影响以及在新材料的铣削工艺方面有了大量研究,但针对高熵合金的铣削加工工艺优化研究还相对较少. 铣削加工是一种重要的机械加

工方式,但针对高熵合金的铣削加工工艺尚缺少系统的实验数据支持. 本研究主要从以下两方面展开:首先对铣削加工的铣削机理进行理论研究,并依据铣削机理建立了瞬时铣削厚度的几何模型和铣削力回归方程;其次进行高熵合金的三维槽铣和侧铣的铣削力仿真和铣削实验,最后验证铣削力回归方程的准确性.

## 1 铣削机理研究

### 1.1 瞬时铣削厚度几何模型

在铣削加工过程中,切削厚度会时刻变化,任意一个刀齿都会对材料进行切削. 因此需要建立一个合理的切削模型来求解铣削过程中铣削力与各种铣削参数的变化规律. 图 1 为金属铣削加工过程示意图,其中  $a_c$ (mm) 为铣削深度,  $a_f$ (mm/z) 为每齿进给量,  $v_c$ (m/min) 为铣削速度,  $v_w$ (mm/min) 为进给速度.

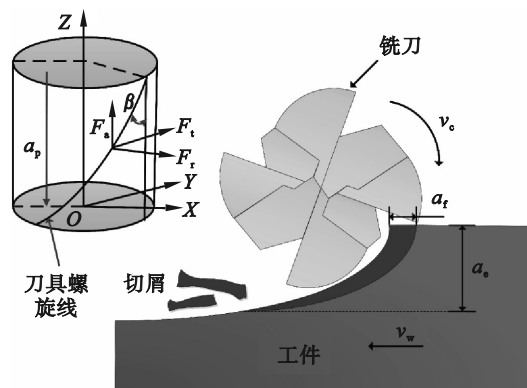


图 1 铣削过程示意图

Fig. 1 Diagram of the milling process

图 2 为瞬时铣削厚度模型,其中  $f$ (mm) 代表相邻加工轨迹的走刀长度,  $R$ (mm) 代表刀具半径,  $\varphi_s, \varphi_c$  代表  $OA, OC$  对应的刀件接触角、切出角,而  $\varphi_m$  代表  $OB$  所处角度为瞬时最大铣削厚度齿位角. 侧铣时,切削区域为第一区域和第二区域,得到侧铣的瞬时铣削厚度如式(1)所示;槽铣时,切削区都为第一区域,此时  $a_c=R, \varphi_m$  与  $\varphi_s$  相等,为 180°,得到槽铣的瞬时铣削厚度如式(2)所示.

$$h = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - f^2 \sin^2 \varphi} - f \cos \varphi, & \varphi \in (\varphi_s, \varphi_m); \\ R - \frac{R - a_c}{\sin \varphi}, & \varphi \in (\varphi_m, \varphi_c). \end{cases} \quad (1)$$

$$h = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - f^2 \sin^2 \varphi} - f \cos \varphi, & \varphi \in (\varphi_s, \varphi_m); \\ R - \sqrt{R^2 - f^2 \sin^2(2\pi - \varphi)} - f \cos(2\pi - \varphi), & \varphi \in (\varphi_m, 2\pi - \varphi_s). \end{cases} \quad (2)$$



幅度更大. 铣削深度小, 铣削厚度小, 刀具受力小, 排屑和散热好, 刀具不易生成积屑瘤而对加工性能造成影响, 因此铣削力小. 铣削深度较大时, 铣削厚度增大, 切屑增大, 挤压变严重, 铣削力增大. 而槽铣的铣削力增幅大, 是因为铣削深度增加, 槽铣更易生成积屑瘤, 影响铣削稳定性.

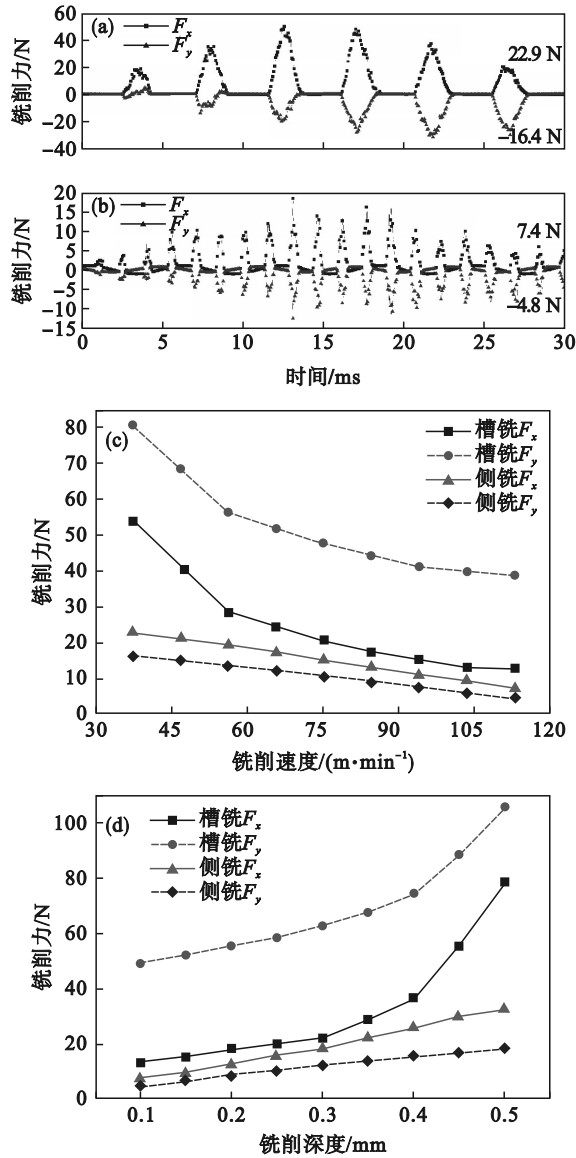


图 4 铣削力随铣削参数的变化规律

Fig. 4 Change of the milling force with milling parameters

- (a) — 瞬时铣削力 ( $v_c=37.7$  m/min);
- (b) — 瞬时铣削力 ( $v_c=113.1$  m/min);
- (c) — 铣削速度和铣削力; (d) — 铣削深度和铣削力.

### 3 高熵合金铣削力实验研究

#### 3.1 实验材料与设备

实验材料选用铸态 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub>,

FeCoNiCrAl<sub>0.5</sub>, FeCoNiAlMo<sub>0.1</sub> 三种高熵合金, 材料原子质量比如表 2 所示.

表 2 原子质量比  
Table 2 Atomic mass ratio %

元素	FeCoNiCrAl <sub>0.1</sub>	FeCoNiCrAl <sub>0.5</sub>	FeCoNiAlMo <sub>0.1</sub>
Fe	24.47	23.36	23.75
Co	25.85	24.64	25.05
Ni	25.72	24.56	24.96
Cr	22.79	21.75	22.11
Al	1.18	5.65	—
Mo	—	—	4.08

铣削实验采用大连三垒 SVW80C-3D 加工中心进行, 在工作台上加装 Kistler 测力仪进行铣削力检测, 实验系统的安装示意图和实验设备如图 5 所示.

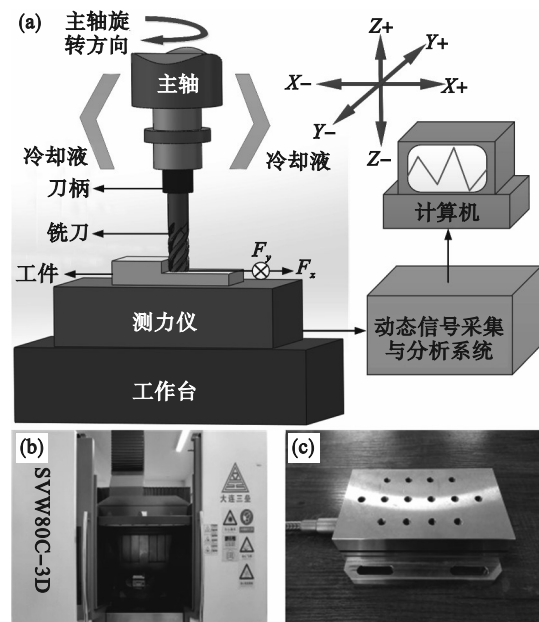


图 5 实验设备

Fig. 5 Experimental equipment

- (a) — 实验系统简图; (b) — SVW80C-3D 加工中心;
- (c) — Kistler 测力仪.

实验刀具选用 HMX 涂层和瑞士通用公证行 (Societe Generale de Surveillance S. A., SGS) 刀具, 刀具参数如表 3 所示, 铣刀如图 6 所示.

图 7 为不同铣削方式的实验平台, 由上至下依次为工件、测力仪和工作台. 两种铣削方法单次切削长度为 4 mm.

#### 3.2 实验设计

采用 HMX 刀具对 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 进行槽铣,

采用 HMX 和 SGS 刀具对 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 进行侧铣,研究不同铣削方式、加工参数和涂层刀具对铣削力的影响规律,实验参数如表 4,表 5 所示.利用 HMX 涂层刀具侧铣 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub>, FeCoNiCrAl<sub>0.5</sub> 和 FeCoNiAlMo<sub>0.1</sub>,研究添加不同元素成分及含量对高熵合金铣削力的影响规律,实验参数如表 6 所示.

表 3 铣刀参数

Table 3 Cutter parameters mm				
型号	涂层	刃长 $H$	刃径 $D$	总长 $L$
HMX	超晶纳米涂层	20	6	50
SGS	Ti-NAMITE-X	25	6	58

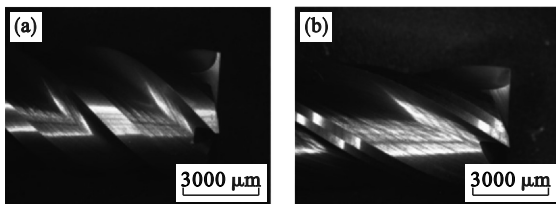


图 6 实验刀具

Fig. 6 Experimental tool

(a)—HMX 涂层刀具; (b)—SGS 涂层刀具.

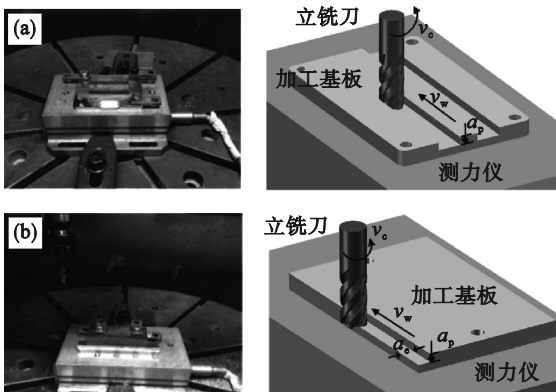


图 7 工作平台

Fig. 7 Work platform

(a)—槽铣实验平台; (b)—侧铣实验平台.

表 4 槽铣正交参数

Table 4 Slot milling orthogonal parameters					
参数	水平				
$v_c/(m \cdot min^{-1})$	37.7	56.5	75.4	94.2	113.1
$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	30	60	90	120	150
$a_p/mm$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8

表 5 侧铣正交参数

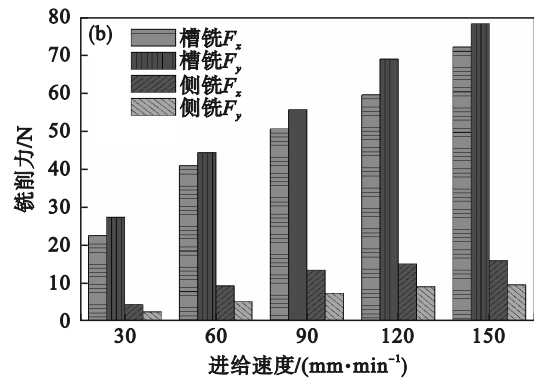
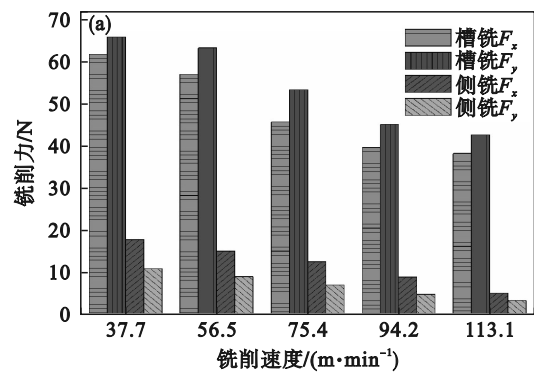
Table 5 Side milling orthogonal parameters					
参数	水平				
$v_c/(m \cdot min^{-1})$	37.7	56.5	75.4	94.2	113.1
$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	30	60	90	120	150
$a_p/mm$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8

表 6 侧铣单因素参数( $a_p=3 mm$ )

Table 6 Side milling single factor parameters ( $a_p=3 mm$ )							
$v_c/(m \cdot min^{-1})$	$v_w/(mm \cdot min^{-1})$	$a_p/mm$					
37.7	45.2	52.8					
60.3	67.9	75.4					
82.9	90.5	98.0					
		105.6					
		30	45	60	75		
67.9	90	105	120	0.25			
		135	150	165			
				0.05	0.1	0.15	0.2
67.9	90			0.25	0.3	0.35	0.4
				0.45		0.5	

### 3.3 不同铣削方式对铣削力的影响

图 8 为不同铣削方式下铣削力随铣削参数的变化,由图可得,相同铣削参数下槽铣的切向力和法向力显然比侧铣大.原因在于,槽铣加工先逆铣,后顺铣,侧铣一直为顺铣.逆铣加工时,铣削厚度逐渐增大,刀具刚接触工件时振动较大,侧铣的铣削厚度变化规律是从大到小,铣削更平稳,铣削力小.除此之外,槽铣对刀具的磨损较大,排屑能力差,生成积屑瘤的概率大,铣削力受到的影响大.而侧铣不易生成积屑瘤,切屑排除及时,铣削力明显低于槽铣.



### 3.4 不同加工参数对铣削力的影响

图 9 是根据 HMX 涂层铣刀侧铣 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 正交实验得出的铣削力随加工参数变化曲线.由图可知,铣削速度越大,铣削力越小.以低铣削速

度加工,铣削厚度大,工件和刀具的冲击大,因此铣削力大.随着铣削速度增大,单位时间材料被铣削的次数增多,铣削厚度变小,铣削力减小.因此,较高的铣削速度可以得到较好的铣削效果.

随着进给速度的增加,铣削力增大.当进给速度变大,铣削深度变大,工件发生的挤压变得严重,因此铣削力变大.进给速度变大增大积屑瘤生成的概率,降低铣削稳定性,同时影响排屑排热.所以,较小的进给速度可以保证高熵合金的铣削效果.

随着铣削深度的增大,铣削力逐渐增大.高熵合金的塑性变形能力强,铣削深度增大会加重工件塑性变形程度,降低排屑能力,加重粘刀现象,影响加工稳定性.铣削深度增大使单位时间内材料去除体积增大,铣削刃的接触弧长变长,铣削接触面积增大,摩擦热增多,刀件挤压变严

重,加工的稳定性降低,导致铣削力增大.因此,较小的铣削深度更适合铣削高熵合金.

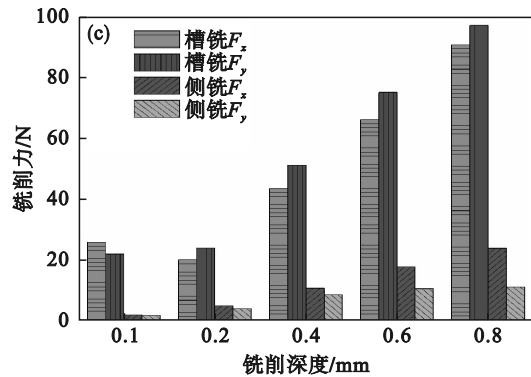


图 8 铣削力随不同加工方式的变化规律

Fig. 8 Changing law of the milling force with different machining methods

(a)—铣削速度对铣削力的影响;(b)—进给速度对铣削力的影响;(c)—铣削深度对铣削力的影响.

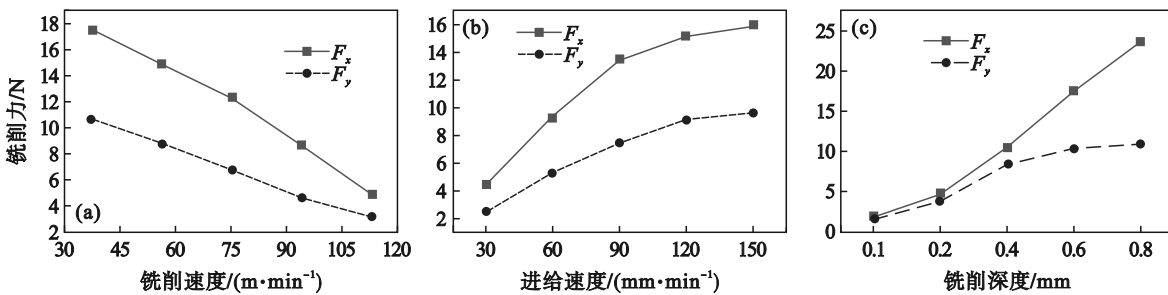


图 9 铣削力随不同铣削参数的变化规律

Fig. 9 Law of the milling force with different milling parameters

(a)—铣削速度对铣削力的影响;(b)—进给速度对铣削力的影响;(c)—铣削深度对铣削力的影响.

### 3.5 不同刀具类型对铣削力的影响

根据 HMX 涂层刀具与 SGS 涂层刀具侧铣 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 正交实验结果,得到不同涂层刀具对铣削力的影响规律如图 10 所示.从图 10 可以看到,加工参数对两种涂层刀具加工高熵合金的铣削力的影响规律基本相同,但同一铣削参数

下,HMX 涂层刀具的铣削力要小于 SGS 涂层刀具,这是由于高熵合金加工时易发生热量集中,HMX 刀具的耐磨性能与导热性能比 SGS 涂层刀具更优良,SGS 涂层刀具加工时容易导致工件局部温度高,切屑容易发生变形,造成二次划伤,降低加工稳定性,因此铣削力大.

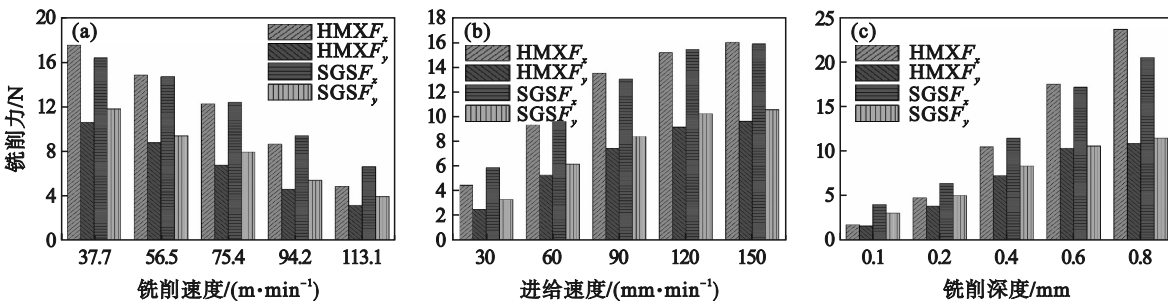


图 10 不同涂层刀具的铣削力对比

Fig. 10 Comparison of the milling forces of different coating tools

(a)—不同涂层刀具下铣削速度对铣削力的影响;(b)—不同涂层刀具下进给速度对铣削力的影响;(c)—不同涂层刀具下铣削深度对铣削力的影响.

3.6 不同元素及含量对铣削力的影响

图 11 为不同元素高熵合金铣削力变化图,加工添加不同元素种类的高熵合金,随着铣削速度的变大,铣削力变小,随着进给速度变大,铣削力变大.其中 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 的铣削力略高于

FeCoNiCrMo<sub>0.1</sub>,这是因为材料的硬度、塑性受 Al 元素的影响程度较大,Mo 对塑性的影响可以忽略.FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 的 Al 含量很低,硬度较小,但塑性较强,加工时造成的塑性变形大,因此铣削力大.

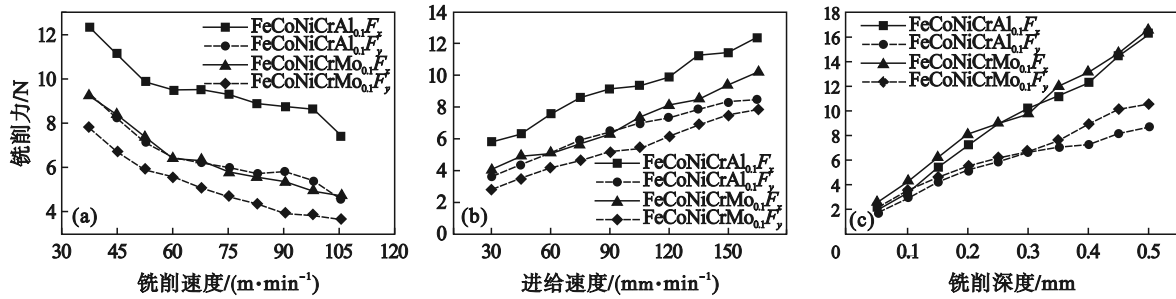


图 11 不同元素下铣削力

Fig. 11 Milling forces under different elements

(a) — 不同元素下铣削速度对铣削力的影响; (b) — 不同元素下进给速度对铣削力的影响; (c) — 不同元素下铣削深度对铣削力的影响.

图 12 为不同含量的 Al 元素下铣削力的变化曲线,Al 元素含量多的高熵合金,铣削力大且增加幅度大,随着 Al 元素成分的增加,材料塑性降

低,硬度增大,加工时工件受到的挤压力变大,铣削力变大.

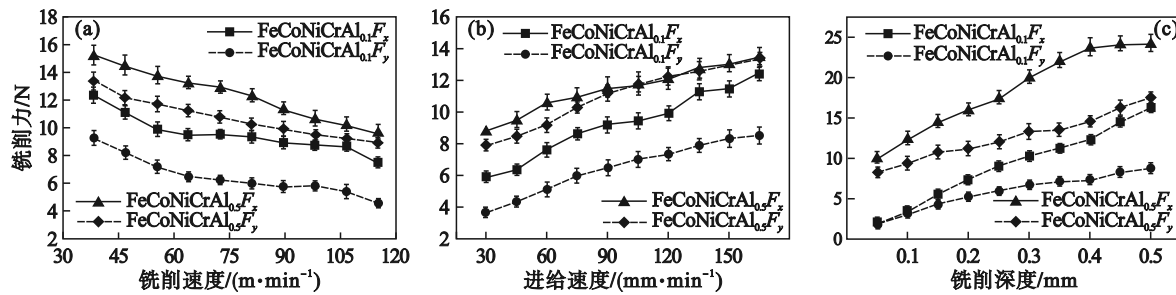


图 12 不同 Al 含量下铣削力

Fig. 12 Milling forces with different Al contents

(a) — 不同 Al 含量下铣削速度对铣削力的影响; (b) — 不同 Al 含量下进给速度对铣削力的影响; (c) — 不同 Al 含量下铣削深度对铣削力的影响.

3.7 仿真、理论与实验结果对比

利用 HMX 涂层铣刀侧铣 FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 得到的正交 25 组数据进行矩阵运算和统计分析,得到铣削力回归方程相关系数,进而得到

FeCoNiCrAl<sub>0.1</sub> 铣削力回归方程模型.针对铣削力回归方程进行显著性检验,取  $\alpha=0.01$ ,得到该参数下  $F$  分布为  $F_{0.01}(p, n-p-1) = F_{0.01}(3, 21) = 4.87$ ,分析如表 7 所示.

表 7 显著性检验  
Table 7 Significance test

参数	数据点	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$R^2/\%$	$F$
Al 系 $F_x$ 优化前	25	8.695 9	1.178 5	0.616 8	-0.985 2	98.92	641.42
Al 系 $F_x$ 优化后	22	7.872 2	1.228 5	0.697 6	-0.925 9	99.13	758.09
Al 系 $F_y$ 优化前	25	7.228 6	0.870 4	0.706 9	-0.945 8	99.07	742.11
Al 系 $F_y$ 优化后	23	7.313 0	0.868 2	0.696 8	-0.952 8	99.36	980.36

从表 7 可得,回归方程优化后的拟合效果更好,可以准确预测高熵合金铣削力.

由图 13 可得,在同一工艺条件下,仿真模拟计算误差在 5 N 以内,而理论计算误差在 3 N 以内.

但总体对比,仿真和理论结果的偏差不大,可较

准确地预测铣削力.

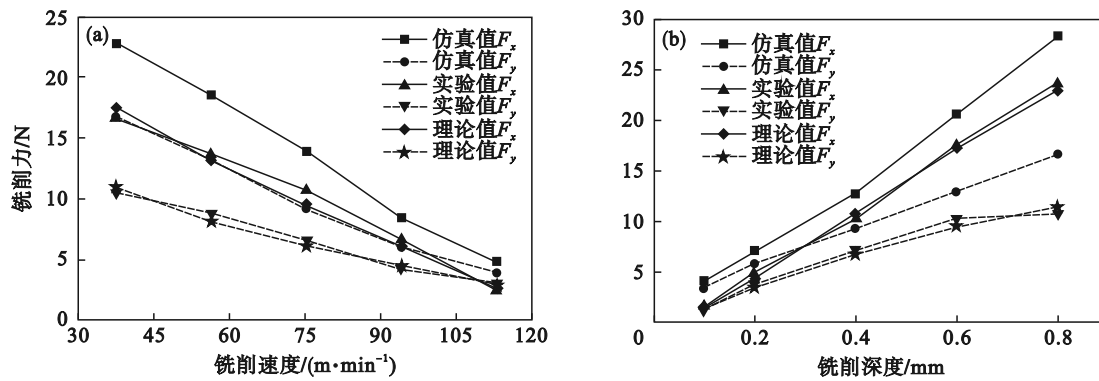


图 13 仿真、理论模型验证

Fig. 13 Simulated and theoretical model verification

(a)一切向力、法向力随铣削速度变化; (b)一切向力、法向力随铣削深度变化.

## 4 结 论

1) 随着铣削速度增大,铣削力减小;随着进给速度和铣削深度增大,铣削力增大.在相同加工参数下,侧铣加工的铣削力都小于槽铣加工,槽铣切向力和法向力分别比侧铣高 404.30% 和 761.06%.

2) HMX 涂层刀具的铣削性能优于 SGS 涂层刀具, HMX 涂层刀具的铣削力比 SGS 涂层刀具平均降低 10.6%,更适合加工高熵合金.

3) 添加 Al 元素含量高的高熵合金塑性差, BCC 相的占比大、硬度大、铣削力大.  $FeCoNiCrAl_{0.1}$  的铣削切向力和法向力分别比  $FeCoNiCrMo_{0.1}$  高 26.02% 和 12.01%;  $FeCoNiCrAl_{0.5}$  的铣削切向力和法向力分别比  $FeCoNiCrAl_{0.1}$  高 67.99% 和 96.51%.

4)  $FeCoNiCrAl_{0.1}$  的铣削切向力仿真值和理论值误差分别为 22.57% 和 15.88%, 法向力误差分别为 29.61% 和 6.08%, 铣削力的仿真和理论预测模型具有一定的准确性.

### 参考文献:

[1] Sun J, Zhao W X, Yan P, et al. High temperature tensile properties of as-cast and forged CrMnFeCoNi high entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 850: 143570.

[2] Xiang T, Zhao M, Du P, et al. Heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of TiZrNbTa high-entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 930: 167408.

[3] Kaushik L, Kim M S, Singh J, et al. Deformation mechanisms and texture evolution in high entropy alloy during cold rolling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 141: 102989.

[4] Lee C F, Shun T T. Age heat treatment of  $Al_{0.5}CoCrFe_{1.5}NiTi_{0.5}$  high-entropy alloy[J]. *Metals*, 2021, 11(1): 1416-1427.

[5] Malatji N, Lengopeng T, Pityana S, et al. Effect of heat treatment on the microstructure, microhardness, and wear characteristics of AlCrFeCuNi high-entropy alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(7): 2021-2029.

[6] Gökhan S, Motorcu A R, Nohutçu S. Single and multi-objective optimization for cutting force and surface roughness in peripheral milling of  $Ti_6Al_4V$  using fixed and variable helix angle tools [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 80: 529-545.

[7] Gaikhe V, Sahu J, Pawade R. Optimization of cutting parameters for cutting force minimization in helical ball end milling of inconel 718 by using genetic algorithm [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77: 477-480.

[8] 王振宇, 张荣闯, 于天彪. 圆柱直齿轮铣削加工无干涉刀具路径规划[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 988-995.  
(Wang Zhen-yu, Zhang Rong-chuang, Yu Tian-biao. Interference-free tool path generation for milling of spur gears [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(7): 988-995.)

[9] 贾东洲, 李长河, 张彦彬, 等. 钛合金生物润滑剂电牵引磨削性能及表面形貌评价[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 198-211.  
(Jia Dong-zhou, Li Chang-he, Zhang Yan-bin, et al. Grinding performance and surface morphology evaluation of titanium alloy using electric traction bio micro lubricant [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(5): 198-211.)

[10] 许文昊, 李长河, 张彦彬, 等. 静电雾化微量润滑研究进展与应用[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 110-138.  
(Xu Wen-hao, Li Chang-he, Zhang Yan-bin, et al. Research progress and application of electrostatic atomization minimum quantity lubrication [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(7): 110-138.)

[11] Zhou R H. Analytical model of milling forces prediction in five-axis milling process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(9): 3045-3054.

[12] 邓云飞, 张永, 吴华鹏, 等. 6061-T651 铝合金动态力学性能及 J-C 本构模型的修正[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 74-81.  
(Deng Yun-fei, Zhang Yong, Wu Hua-peng, et al. Dynamic mechanical properties and modification of J-C constitutive model of 6061-T651 aluminum alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 74-81.)