

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.003

金属材料铣削力及振幅预测模型

张超锋¹, 张鹏飞¹, 唐利科², 刘油松²

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 无锡车联天下信息技术有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要:为了实现对加工过程中铣削力动态变化的预测,课题组构建了金属材料铣削力及振幅的预测模型。首先通过仿真与试验相结合的方法,探究不同材料在不同主轴转速和轴向切深下的铣削力特性;在确认仿真模型准确的基础上进行铣削力的正交仿真,采用回归分析的方法构建平均铣削力及振幅的预测模型。结果表明:不同材料的平均铣削力受主轴转速和轴向切深的影响不同,但铣削力的振幅大小与主轴转速和轴向切深均呈正相关。课题组所提出的铣削力及振幅预测模型可以为铣削参数的合理选择提供参考。

关键词:金属切削;铣削力;铣削力振幅;正交试验设计;回归分析法

中图分类号: TG54; TG501.3; TH142 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2023)03-0016-08

Prediction Model for Milling Force and Amplitude of Metal Materials

ZHANG Chaofeng¹, ZHANG Pengfei¹, TANG Like², LIU Yousong²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Wuxi Autolink Information Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: In order to predict the dynamic changes in milling force during the machining process, a prediction model for milling force and amplitude of metal materials was constructed. Firstly, the milling force characteristics of different materials under different spindle speeds and axial cutting depths were investigated by combining simulation and experiment. On the basis of confirming the accuracy of the simulation model, the orthogonal simulation of the milling force was carried out, and the prediction model of the average milling force and amplitude was constructed by using the regression analysis method. The results show that the average milling force of different materials is affected differently by spindle speed and axial cutting depth, but the amplitude of milling force is positively correlated with spindle speed and axial cutting depth. The proposed milling force and amplitude prediction model can provide reference for the reasonable selection of milling parameters.

Keywords: metal cutting; milling force; milling force amplitude; orthogonal experimental design; regression analysis method

铣削由于其加工效率高、加工质量好等特点,被广泛应用于航空航天、汽车制造和船舶工业等加工领域^[1]。然而,小型企业和科研院所需要在设备较少的情况下,对不同材料的工件进行加工,而利用单一设备对不同材料进行加工时,需要确定加工的最佳工艺参数范围,在保证加工精度的前提下提高加工效率。因此,针对不同材料铣削特性的研究有着重要的意义。

在恒定加工工况下,铣削力不仅对刀具寿命、加工精度和加工表面质量有着重要的影响^[2-3],还是夹具设计、加工功率计算等设计和计算过程中的重要参数。国内外学者对铣削力进行了大量的研究,以提高铣削加工质量和加工效率。有学者通过试验的方法研究了不同工艺参数下铝合金、钛合金等金属的铣削力变化规律,并总结出铣削力经验模型^[4-5]。然而,大量的试

收稿日期:2022-09-26;修回日期:2023-01-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51408263)。

第一作者简介:张超锋(1979),男,无锡江阴人,博士,教授,主要研究方向为机械结构/装备多物理场分析、设计和制造。E-mail: zcf830703@163.com

验研究耗费巨大,且效率低下。因此,部分学者采用有限元仿真的手段去研究金属材料的切削力,通过构建无氧铜、铝青铜和 304 不锈钢等材料的二维正交切削模型进行研究,并试验验证^[6-9];结果表明这些模型能够有效预测切削加工过程中的切削力及温度的变化,但二维模型仅能得到瞬时切削力的大小,无法展现出铣削过程中铣削力周期性的变化。

铣削力振幅作为铣削力的重要特性,是影响加工过程中稳定性的重要因素。铣削力振幅对刀具及加工表面的质量会产生很大的影响,甚至会导致刀具严重磨损^[10-12]。因此,铣削力振幅的有效预测对于提高加工质量和减少刀具磨损有着重要意义。课题组通过试验和仿真相结合的方法,选用了 3 种常用的金属材料 and 2 种工艺参数,研究不同材料属性和工艺参数下的铣削力特性,并建立预测模型。

1 研究方法

1.1 研究计划

研究计划分为 3 组,依次为 6061 铝合金(AL)、45#钢(S45)和 304 不锈钢(SS304)铣削试验。铣削方式采用干式顺铣,试验过程中保持每齿进给量为 0.025 mm。采用 4 种主轴转速和 4 种轴向切深。采用单因素试验法,测量每组试验过程中的铣削力。实际的切削过程中容易产生不规则的切屑形态,导致较难获得准确的切屑应力。因此,为了获得切屑应力及铣削力的演化规律,通过仿真和试验相结合的方法展开研究。研究计划如表 1 所示。

1.2 试验材料

试验材料为 6061 铝合金、45#钢和 304 不锈钢,3 种工件规格均为 40 mm × 60 mm × 80 mm 的方料,材料的部分力学性能如表 2 所示。试验采用整体式硬质合金立铣刀,刀具直径为 12 mm,4 刃,螺旋角为 30°。

1.3 试验过程

铣削加工设备如图 1 所示。利用夹具将工件固定在测力仪上,铣削力的数据通过切削力采集系统导入计算机中。铣削试验在 VMC600 立式加工中心上进行,该加工中心最大主轴转速为 8 000 r/min,主轴电机功率为 7.5 kW,定位精度为 0.01 mm。检测设备采用 Kistler 9272 型测力仪,测量范围为 -5 ~ 5 kN,灵敏

表 1 研究计划表

Table 1 Research schedule

组别	试验对象	主轴转速	轴向切深	试验	仿真
		$n/(r \cdot \min^{-1})$	a_p/mm		
1	6061 铝合金	500	1.0	✓	✓
	6061 铝合金	1 000	1.0	✓	✓
	6061 铝合金	1 500	1.0		✓
	6061 铝合金	2 000	1.0	✓	✓
	6061 铝合金	1 000	0.5	✓	✓
	6061 铝合金	1 000	1.0	✓	✓
	6061 铝合金	1 000	1.5		✓
	6061 铝合金	1 000	2.0	✓	✓
2	45#钢	500	1.0	✓	✓
	45#钢	1 000	1.0	✓	✓
	45#钢	1 500	1.0		✓
	45#钢	2 000	1.0	✓	✓
	45#钢	1 000	0.5	✓	✓
	45#钢	1 000	1.0	✓	✓
	45#钢	1 000	1.5		✓
	45#钢	1 000	2.0	✓	✓
3	304 不锈钢	500	1.0	✓	✓
	304 不锈钢	1 000	1.0	✓	✓
	304 不锈钢	1 500	1.0		✓
	304 不锈钢	2 000	1.0	✓	✓
	304 不锈钢	1 000	0.5	✓	✓
	304 不锈钢	1 000	1.0	✓	✓
	304 不锈钢	1 000	1.5		✓
	304 不锈钢	1 000	2.0	✓	✓

表 2 6061 铝合金、45#钢和 304 不锈钢的物理参数

Table 2 Mechanical properties of 6061 aluminum alloy, 45 steel and 304 stainless steel

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	布氏 硬度	泊松比 ν
6061 铝合金	2 700	69	287	40	0.33
45#钢	7 850	206	600	241	0.30
304 不锈钢	7 900	195	615	187	0.28

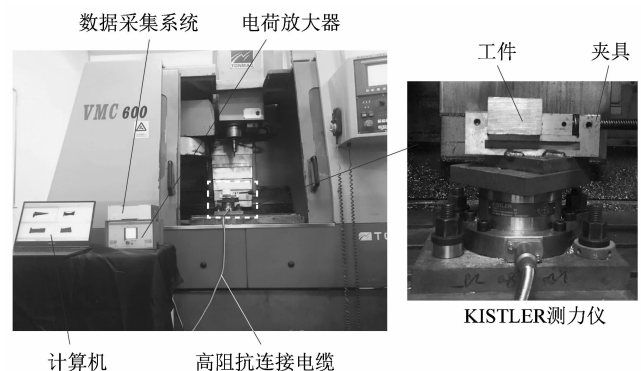


图 1 铣削加工设备

Figure 1 Milling equipment

度为 -7.8 pC/N 。测力仪通过连接电缆与 5070 型电荷放大器相连,经过 5697A 型数据采集仪读入计算机。温度测量设备选用 FluckTi450IR Fusion 红外线热成像仪。

1.4 建立有限元模型

铣削仿真模型如图 2 所示。在加工过程中,只有铣刀底部参与切削加工。因此,为了提高计算效率,在仿真中忽略铣刀整体长度,仅对刀尖的一部分进行建模。在相互作用模块将铣刀约束为刚体,选择铣刀上表面中心点作为刚体参考点。

采用 ABAQUS/Explicit 求解器对不同材料和工艺参数的铣削力进行分析,对建立好三维模型的铣刀和工件进行网格划分,对刀具和工件接触位置的网格进行细化处理。当工件网格数达 2×10^5 时,能在减少计算时长的情况下,保证仿真的精度。为了与试验保持一致,将工件模型底面和未加工外侧表面完全固定。在铣刀参考点上施加边界条件,只允许铣刀在 X 方向上移动,在 Z 方向上转动。

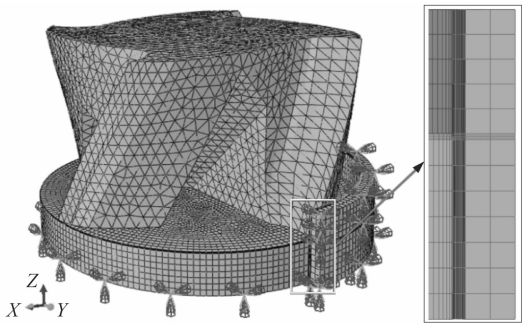


图 2 铣削有限元模型

Figure 2 Milling finite element model

课题组采用 Johnson-Cook 本构模型模拟铣削过

程,本构模型函数如下:

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

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效应力, ε 为有效塑性应变, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, m 为温度软化系数, h 为硬化指数, T 为工件温度, T_r 为室温, T_m 为工件熔化温度。

3 种材料的本构模型参数如表 3 所示。

表 3 6061 铝合金、45#钢和 304 不锈钢的 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 3 Johnson-Cook constitutive model parameters of 6061 aluminum alloy, 45 steel and 304 stainless steel

材料	屈服强度 A/MPa	硬化系数 B/MPa	硬化 指数 h	应变率 系数 C	温度软化 系数 m
6061 铝合金	266	126	0.258 3	0.082 72	1.250
45#钢	553	600	0.234 0	0.013 40	1.030
304 不锈钢	240	695	0.795 0	0.014 10	0.945

本构模型只能描述铣削过程中的应力流动,还需要用失效准则模型模拟工件-切屑分离,课题组采用 Johnson-Cook 剪切失效准则作为材料失效准则,公式如下:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \right) \quad (2)$$

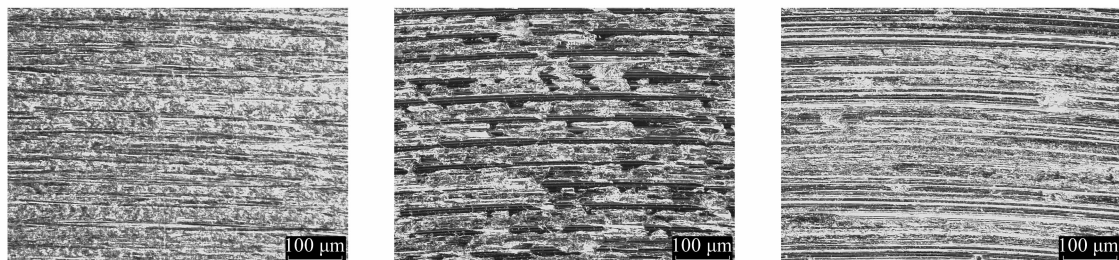
式中: ω 为材料失效参数,当模型中 $\omega > 1$ 时,材料失效,移除失效单元; $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ 表示等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 表示失效等效塑性应变。

2 结果与讨论

2.1 切削形貌

2.1.1 表面形貌

当主轴转速为 1 000 r/min,轴向切深为 1.0 mm 时,3 种材料的铣削表面形貌如图 3 所示。



(a) 6061 铝合金

(b) 45#钢

(c) 304 不锈钢

图 3 加工表面形貌

Figure 3 Processed surface morphology

由图3可以看出,3个工件表面都有清晰的刀尖划痕,划痕是加工过程中刀具沿进给方向旋转和移动共同作用产生的痕迹,在划痕之间还有残留金属所形成的棱脊,这是铣削加工表面的固有缺陷。304不锈钢的铣削表面微观形貌还存在凸起的晶粒,这是由于碎屑在脱离加工表面后在刀具作用下重新被压入基体材料造成的。

2.1.2 切屑形态

图4和图5所示为3种材料铣削仿真和试验获得的

的典型切屑形态图,切屑的形态都呈弧形,且试验和仿真的切屑形态具有一致性。

从6061铝合金的切屑可以看出,铝合金切屑卷曲半径较其余二者小,形成螺旋形的切屑;45#钢的切屑形态近似于扇形;而304不锈钢的切屑形态呈现出半圆形。这是因为铝合金的硬度较小,更容易形成较长的螺旋形切屑,而且切屑的底面都是光滑的,但自由面较为粗糙。在相同工艺参数下,随着硬度的增加,切屑的卷曲程度和整体变形都在减小。

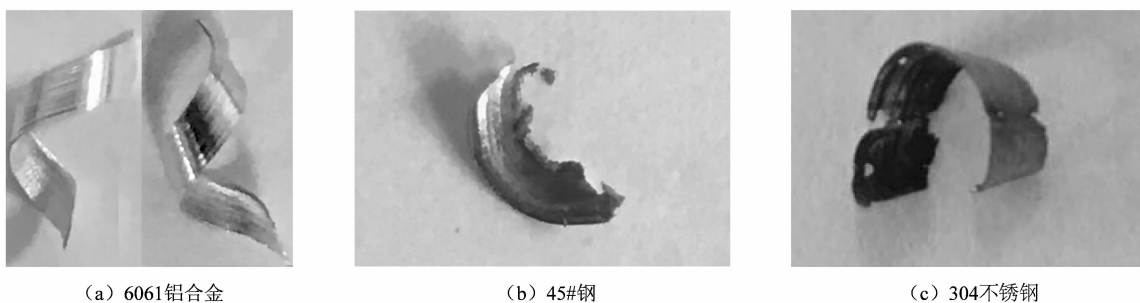


图4 试验切屑

Figure 4 Test chips

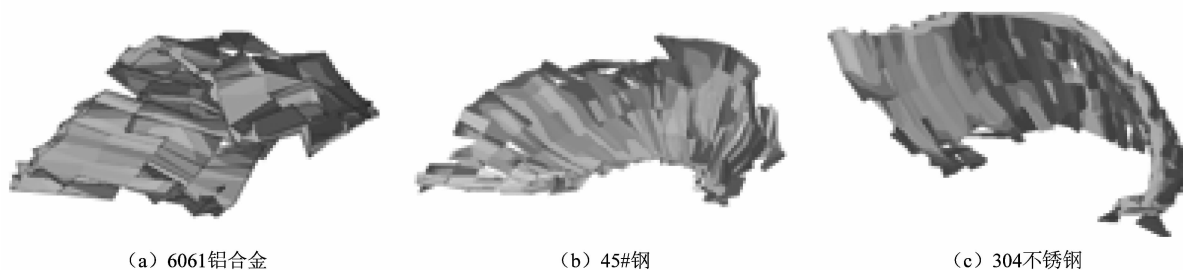


图5 仿真切屑

Figure 5 Simulated chips

2.2 铣削温度场

铣削温度场随主轴转速和轴向切深的变化如图6所示。由图6可以看出,随着主轴转速和轴向切深的增大,3种材料的最高铣削温度都在增大。这是由于当主轴转速和轴向切深增大时,单位时间内材料的去除率也在增大,从而使得铣削产生的切削热随之增加。

6061铝合金、45#钢和304不锈钢的最高温度随主轴转速变化的增长率分别为52.9%、76.0%和94.4%,随轴向切深变化的增长率分别为28.4%、42.2%和39.3%。铣削最高温度随轴向切深的变化

范围较小,这是因为轴向切深的增大会产生更大的切屑,带走更多的热量。在相同加工工艺下,304不锈钢的最大铣削温度和增长率均高于6061铝合金和45#钢。这是因为304不锈钢的硬度较高,导热性能较差,且在铣削过程中更易出现加工硬化现象所导致的。

2.3 铣削力

试验和仿真的铣削力对比如图7所示,可以看出试验和仿真结果具有较好的一致性。切削层厚度的反复变化导致3种材料的铣削力波形出现了周期性变化。

在不同主轴转速下,铣削力的振幅随主轴转速的

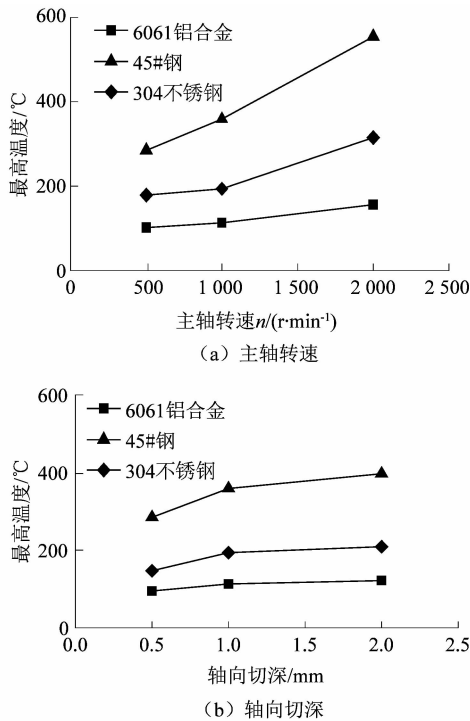


图6 主轴转速和轴向切深对最高温度的影响

Figure 6 Effect of spindle speeds and axial cutting depths on maximum temperature

增大而增大。在不同轴向切深下,工件的平均铣削力随切深的增大而显著增大。工件的剪切应力随着工件硬度的提高而减小,使刀具受到了更大的切削抗力,从而导致了铣削力增大。因此,在相同工艺条件下,45#钢的铣削力大于6061铝合金的铣削力。由于304不锈钢在加工过程中出现严重的加工硬化现象,使得304不锈钢的铣削力远大于45#钢和6061铝合金。

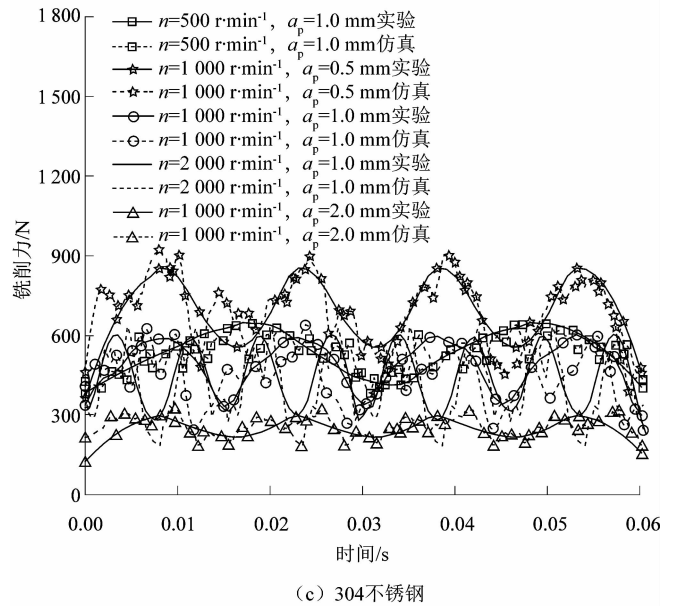
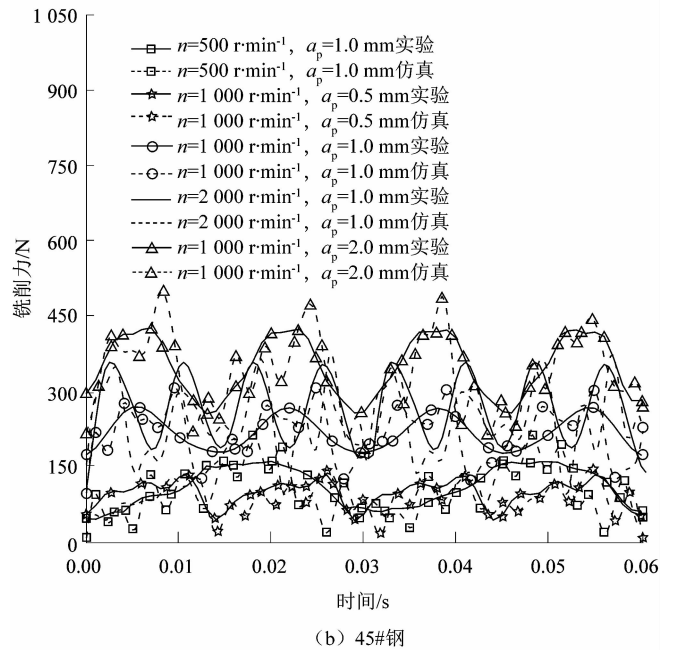
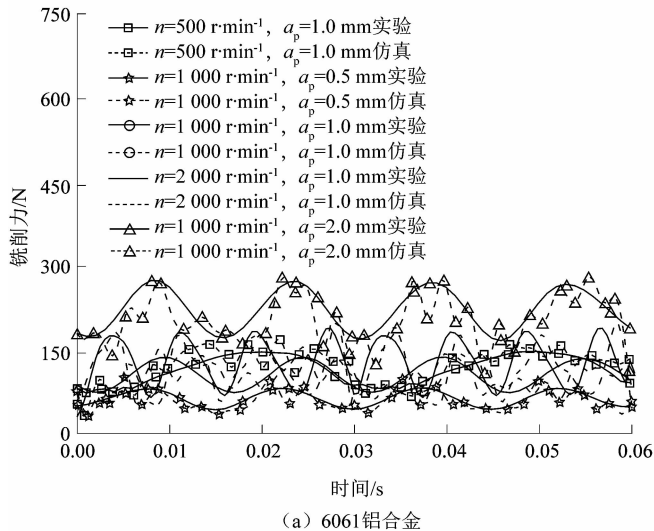


图7 3种材料铣削力试验与仿真结果对比

Figure 7 Comparisons of simulated and experimental milling forces for three materials

2.4 工艺参数对平均铣削力的影响

2.4.1 主轴转速对平均铣削力的影响

3种材料在不同主轴转速下的平均铣削力如图8所示。图中可以看出试验数据点和仿真数据点很接近,表明试验和仿真具有较好的一致性;304不锈钢的平均铣削力明显大于45#钢和6061铝合金。

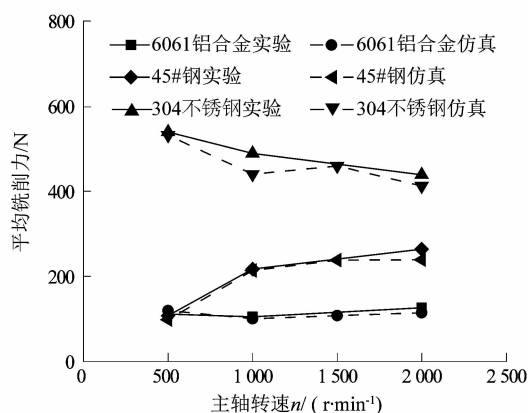


图8 主轴转速对平均铣削力的影响

Figure 8 Relationship between average milling force and spindle speed

304 不锈钢的铣削力与主轴转速呈负相关, 主轴转速由 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $2\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 平均铣削力由 539.089 N 下降至 438.693 N 。这是由 304 不锈钢的韧性大, 导热性差, 刀具和工件在低速情况下更容易出现粘结现象。随着主轴转速的增大, 粘结作用弱化, 热软化作用使得材料的强度降低, 导致铣削力减小。

随着主轴转速的增大, 6061 铝合金的平均铣削力先减小后增大。这主要是因为, 在低转速下, 切削温度对工件的热软化作用较大, 导致铣削力减小。随着主轴转速的增大, 工件应变和应变率强化作用逐渐占据主导地位, 使得平均铣削力略微增大。

45#钢的平均铣削力始终随着主轴转速的增大而增大, 由 107.810 N 增大到了 263.743 N 。这是由于铣削过程中 45#钢的塑性变形随主轴转速的增大而逐渐增大, 从而铣削力逐渐增大。

2.4.2 主轴转速对铣削力振幅的影响

3 种材料在不同主轴转速下的铣削力振幅如图 9 所示。304 不锈钢的铣削力振幅明显大于 45#钢和 6061 铝合金。3 种材料的铣削力振幅都随主轴转速增加而增大, 这是由于主轴转速增大加剧了工件对刀具冲击作用的缘故。当刀刃进入稳定切削阶段后, 铣削力急剧下降, 然后下一个刀刃进入, 再次形成铣削力峰值, 最终导致铣削力振幅的增加。当主轴转速大于 $1\,000 \text{ r/min}$ 时, 304 不锈钢和 45#钢的铣削力振幅增长加剧, 而 6061 铝合金铣削力振幅仍接近线性增长。

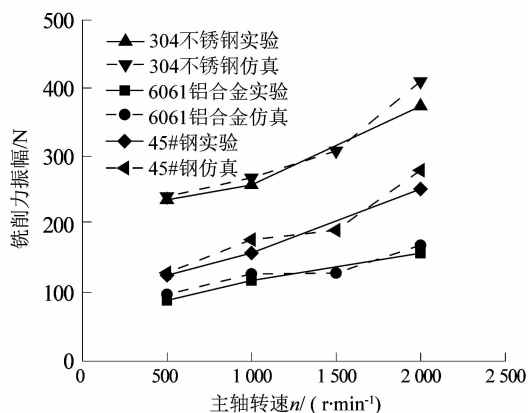


图9 主轴转速对铣削力振幅的影响

Figure 9 Relationship between milling force amplitude and spindle speed

2.4.3 轴向切深对平均铣削力的影响

3 种材料在不同轴向切深下的平均铣削力如图 10 所示。

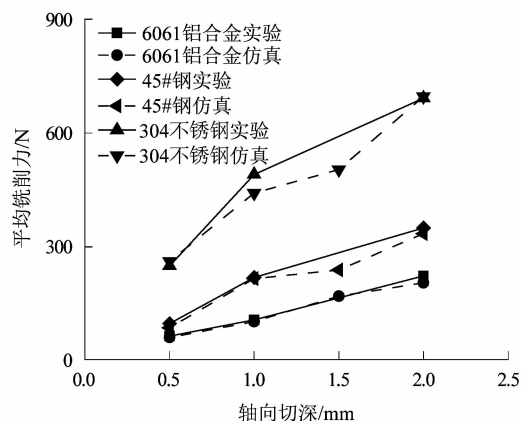


图10 轴向切深对平均铣削力的影响

Figure 10 Influence of axial cutting depth on average milling force

随轴向切深的增大, 3 种金属材料的平均铣削力整体都呈上升趋势。这是由于随着轴向切深的增加, 去除材料所需的能量随之增大, 切削抗力变大, 最终造成铣削力增大。45#钢和 6061 铝合金的平均铣削力与轴向切深近似呈线性正相关, 斜率约为 2.5 和 2.6。而 304 不锈钢的平均铣削力在轴向切深为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 时显著增大, 当轴向切深在 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 时, 平均铣削力增长速率放缓。这是由于随着轴向切深的增大, 使得铣刀和 304 不锈钢之间的接触压力和摩擦力

增大,加速了积屑瘤的形成,进而引起铣削力增长速率放缓。

2.4.4 轴向切深对铣削力振幅的影响

3种材料在不同轴向切深下的铣削力振幅如图11所示。当轴向切深由0.5 mm增大到2.0 mm的过程中,3种材料的铣削力振幅均呈增长趋势。这主要是因为随着轴向切深的增大,工件对单齿的抵抗作用增大,导致铣削力振幅增大。随着轴向切深的逐渐增大,铣削过程趋于稳定,因此铣削力振幅的增长趋势在轴向切深达到1.0 mm后都有所放缓。

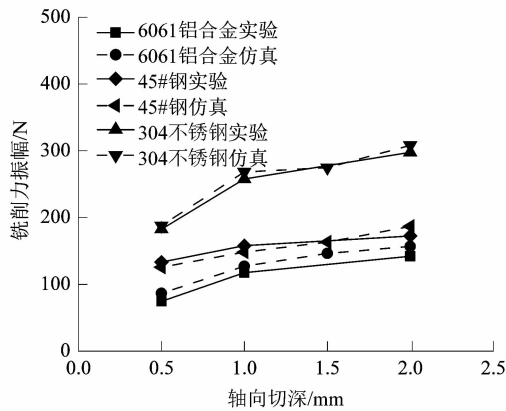


图11 轴向切深对铣削力振幅的影响

Figure 11 Influence of axial cutting depth on milling force amplitude

3 铣削力预测模型

3.1 铣削力正交仿真及预测模型的建立

在验证铣削力仿真模型合理的基础上,制定了2因素4水平正交仿真计划,为建立3种材料的铣削力预测模型提供数据,仿真结果如表4所示。

假设铣削力与主轴转速和轴向切深之间存在指数关系,则可以通过统计学的方法建立平均铣削力的正交回归预测模型。

$$F = C_F a_p^{b_1} n^{b_2} \quad (3)$$

式中: F 为平均铣削力; C_F 为常数,具体取值由加工工况决定; b_1, b_2 分别为主轴转速和轴向切深的指数。

对式(3)两侧取对数有:

$$\lg F = \lg C_F + b_1 \lg a_p + b_2 \lg n \quad (4)$$

令: $y = \lg F; b_0 = \lg C_F; x_1 = \lg a_p; x_2 = \lg n$ 。则式(4)可变化为:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (5)$$

式(5)用矩阵形式可表示为:

$$Y = X\beta$$

式中:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{16} \end{pmatrix};$$

表4 正交仿真表及仿真结果

Table 4 Orthogonal simulation table and simulation results

试验 编号	主轴转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	轴向切深 a_p/mm	平均铣削力/N			铣削力振幅/N		
			6061 铝合金 F_{AL}	45#钢 F_{S45}	304 不锈钢 F_{SS304}	6061 铝合金 ΔF_{AL}	45#钢 ΔF_{S45}	304 不锈钢 ΔF_{SS304}
1	500	0.5	52.455 0	59.122 0	402.626 2	65.529 0	106.551 3	163.119 1
2	500	1.0	119.514 5	98.227 9	531.356 6	88.298 3	125.117 5	235.912 8
3	500	1.5	132.935 7	123.999 8	654.374 0	98.466 6	158.012 9	265.228 1
4	500	2.0	158.104 7	184.363 5	816.251 0	102.483 4	169.170 6	282.204 7
5	1 000	0.5	58.510 0	84.295 3	259.777 4	74.449 9	133.377 0	182.594 7
6	1 000	1.0	100.587 1	213.831 7	440.041 2	117.306 1	157.783 0	257.868 4
7	1 000	1.5	167.437 3	237.039 2	502.188 0	146.373 7	173.288 9	274.814 3
8	1 000	2.0	202.936 6	332.728 6	695.064 7	141.917 4	172.232 5	297.666 0
9	1 500	0.5	66.823 9	117.935 9	224.522 2	100.139 4	146.546 6	235.454 2
10	1 500	1.0	107.768 1	237.962 2	459.503 1	128.332 2	181.358 6	308.003 7
11	1 500	1.5	164.956 8	359.253 4	514.480 6	143.122 1	216.606 1	343.437 0
12	1 500	2.0	212.350 8	497.020 3	683.411 4	184.568 8	243.491 3	396.822 6
13	2 000	0.5	70.682 8	134.573 6	191.806 8	138.613 9	191.644 6	310.500 3
14	2 000	1.0	114.741 6	239.115 4	412.229 3	157.708 1	251.919 5	373.521 7
15	2 000	1.5	189.125 7	307.147 7	496.040 2	179.621 4	262.594 2	401.537 9
16	2 000	2.0	221.453 3	440.399 9	670.436 0	209.590 8	290.879 7	442.414 6

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ 1 & x_{21} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{161} & x_{162} \end{pmatrix};$$

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{pmatrix}.$$

将平均铣削力 F 代入式中,通过最小二乘法拟合,得到 3 种材料的铣削力的预测模型:

$$F_{AL} = 35.064 a_p^{0.8510} n^{0.1650}; \quad (6)$$

$$F_{S45} = 1.5594 a_p^{0.8975} n^{0.6754}; \quad (7)$$

$$F_{SS304} = 2595.288 a_p^{0.7050} n^{-0.2560}. \quad (8)$$

同理,建立的铣削力振幅的预测模型:

$$\Delta F_{AL} = 4.789 a_p^{0.3820} n^{0.4580}; \quad (9)$$

$$\Delta F_{S45} = 10.425 a_p^{0.3010} n^{0.4020}; \quad (10)$$

$$\Delta F_{SS304} = 24.258 a_p^{0.3410} n^{0.3480}. \quad (11)$$

通过预测模型可以知:铝合金和 45#钢的铣削力随着主轴转速增大而增大,304 不锈钢的铣削力随主轴转速的增大而减小;3 种工件的铣削力都与轴向切深呈正相关;而主轴转速和轴向切深的增大都会导致铣削力振幅的增大,与试验结果相近。

3.2 预测模型显著性检验

预测模型输出项显著性检验结果如表 5 所示,从预测模型输出项可以得知 R^2 值大于 0.9,表明模型的显著性水平高。所有预测模型的检验项 P 值均小于 0.01,表明预测模型显著,能够对铣削力进行分析和预测。

表 5 预测模型输出项

Table 5 Forecast model output item

统计值	R^2 值	F 检验值	阈值 f	P 值
F_{AL}	0.972 6	230.713 1	7.01E-11	0.001 331
F_{S45}	0.955 3	138.777 3	1.70E-09	0.003 718
F_{SS304}	0.936 4	95.680 0	1.67E-08	0.002 405
ΔF_{AL}	0.946 1	114.127 9	5.68E-09	0.001 274
ΔF_{S45}	0.912 4	67.730 3	1.33E-07	0.001 520
ΔF_{SS304}	0.903 3	60.716 2	2.54E-07	0.001 600

4 结论

课题组研究了不同材料属性和工艺参数下的铣削力特性,探究主轴转速和轴向切深对铣削力特性的影

响。主要结论如下:

1) 利用回归分析的方法建立了金属材料铣削力及振幅的预测模型,为工艺参数优化提供理论依据。

2) 主轴转速与 6061 铝合金和 45#钢的平均铣削力呈正相关,而温度软化效应导致 304 不锈钢的平均铣削力与主轴转速呈负相关;轴向切深与 3 种材料的平均铣削力都呈正相关。

3) 3 种金属材料的铣削力振幅与主轴转速和轴向切深均呈正相关,且主轴转速对铣削力振幅的影响较轴向切深的大。

4) 在铣削 304 不锈钢时,可适当增大主轴转速,提高加工效率,而在铣削 45#钢和 6061 铝合金时,应当选取较低转速和较小切深对其进行加工,可以避免刀具过度磨损的情况发生。

参考文献:

- [1] 吴春桥,张胜文,全永海,等. 铣削加工过程动力学建模仿真技术研究进展[J]. 机床与液压,2011,39(19):121.
- [2] 刘婷,徐宗伟,曹克雄,等. 微铣削切削力特性及表面质量的实验研究[J]. 纳米技术与精密工程,2015,13(4):262.
- [3] 赵显日. 刀具磨损对微铣削力变化影响的理论与试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(7):21.
- [4] 赵仁瀚,李蓓智,杨建国. 高速铣削航空铝合金的工艺参数优化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(7):152-155.
- [5] 辛红敏,董脉鸣,杨程,等. 钛合金 TC4 盘铣开槽加工铣削力研究[J]. 宇航材料工艺,2021,51(6):24-32.
- [6] DENGUIR L A, OUTEIRO J C, FROMENTIN G, et al. A physical-based constitutive model for surface integrity prediction in machining of OFHC copper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017,248:143-160.
- [7] 邓文君,夏伟,周照耀,等. 正交切削高强耐磨铝青铜的有限元分析[J]. 机械工程学报,2004,40(3):71-75.
- [8] 陈文康,丁亮亮,张锐,等. 基于黏结-滑移摩擦模型的 304 不锈钢切削力仿真研究[J]. 润滑与密封,2022,47(8):100-106.
- [9] 李香飞,张晓光,吴鸿雁. 机器学习模型在切削力预测中应用研究[J]. 机电工程技术,2022,51(5):123-127.
- [10] ZHANG S, LI J F, SUN J, et al. Tool wear and cutting forces variation in high-speed end-milling Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010,46(1/4):69-78.
- [11] 张俊,王拓,张星,等. 超精密面铣刀的铣削力波动特性及其影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(4):547.
- [12] 魏俊立,李曦,黄伟建. 螺旋立铣刀切削力建模分析及加工优化研究[J]. 机械设计与制造,2022(4):121.