

# 刀片表面粗糙度对工件表面残余应力分布影响的分析

胡自化<sup>1</sup>, 王金龙<sup>1</sup>, 秦长江<sup>1</sup>, 毛美姣<sup>1</sup>, 陈小告<sup>1</sup>, 杨志平<sup>2</sup>, 李众<sup>1</sup>

(1.湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105;

2.株洲钻石切削刀具股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** **目的** 探究硬质合金刀片表面粗糙度对加工工件表面残余应力分布的影响。**方法** 首先通过 AdvantEdge FEM 软件建立斜角三维切削模型, 得出刀-屑间的摩擦模型。然后采用化学机械抛光方法对硬质合金刀片表面进行预处理, 制备不同表面粗糙度的硬质合金刀片, 通过对不同表面粗糙度的刀片进行四因素四水平的正交切削实验获得切削力, 结合切削力的实验结果及刀-屑之间的摩擦模型, 获得刀-屑间的摩擦系数, 基于 AdvantEdge FEM 对切削残余应力进行模拟仿真。最后, 结合实验对仿真模型的合理性进行验证。**结果** 采用表面粗糙度为 0.02、0.04、0.08、0.2  $\mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削 45 钢时, 工件表面的最大残余应力分别为 621.51、655.46、654.69、687.29 MPa。采用表面粗糙度为 0.02  $\mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削与采用表面粗糙度为 0.2  $\mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削相比, 工件表面的最大残余应力减小了 10.58%。**结论** 硬质合金刀片的表面粗糙度越小, 切削工件表面的残余应力越小。

**关键词:** 硬质合金刀片; 表面粗糙度; 残余应力; 化学机械抛光; 摩擦模型

**中图分类号:** TG50 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0255-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.040

## Effect of Insert Surface Roughness on Residual Stress Distribution of Workpiece Surface

HU Zi-hua<sup>1</sup>, WANG Jin-long<sup>1</sup>, QIN Chang-jiang<sup>1</sup>, MAO Mei-jiao<sup>1</sup>, CHEN Xiao-gao<sup>1</sup>,  
YANG Zhi-ping<sup>2</sup>, LI Zhong<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2.Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate effect of surface roughness of cemented carbide inserts on residual stress distribution of workpiece surface. Firstly, a three-dimensional oblique cutting model was established based upon AdvantEdge FEM software, and a tool-chip friction model was obtained. Then, surface of the cemented carbide inserts was pretreated in the method of chemical mechanical polishing (CMP), and cemented carbide inserts of different surface roughness were prepared. Cutting force was obtained by performing four factors-four levels orthogonal cutting experiments to the inserts of different surface roughness. Tool-chip friction coefficient was obtained according to experimental results of cutting force and tool-chip friction

收稿日期: 2017-08-03; 修订日期: 2017-10-30

Received: 2017-08-03; Revised: 2017-10-30

基金项目: 湖南省科技厅科技计划重点研发项目 (2016GK2014); 湖南省自然科学基金-株洲联合基金项目 (2017JJ4055); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2016B231); 湖南省教育厅科学研究项目 (17C1533)

**Fund:** Supported by the Key Program of Hunan Provincial Department of Science and Technology of China (2016GK2014), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (2017JJ4055), Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX2016B231), Scientific Research Project of the Hunan Provincial Education Department(17C1533)

作者简介: 胡自化 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高效精密数控加工技术与装备等。

**Biography:** HU Zi-hua(1967—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: high efficiency precision NC machining technology and equipment.

model. Cutting residual stress was simulated based on the AdvantEdge FEM software. Finally, rationality of the simulation model was verified by performing experiments. The maximum residual stress of the workpiece surface was 621.51, 655.46, 654.69, 687.29 MPa when the cemented carbide insert with surface roughness of 0.02, 0.04, 0.08, 0.2  $\mu\text{m}$  was used to cut 45 steel. Cemented carbide insert with surface roughness of 0.02  $\mu\text{m}$  was compared with the cemented carbide insert with surface roughness of 0.2  $\mu\text{m}$ , the maximum residual stress of the workpiece surface decreased by 10.58%. The better the surface quality of cemented carbide insert is, and the lower the surface residual stress is.

**KEY WORDS:** cemented carbide insert; surface roughness; residual stress; chemical mechanical polishing; friction model

工件加工表面的残余应力状态对工件的使用性能（几何精度稳定性、疲劳强度和抗腐蚀性能等）具有重要影响<sup>[1-3]</sup>。目前，影响切削工件表面残余应力分布的因素主要有材料、切削参数、刀具参数等<sup>[4-5]</sup>。Liu 等<sup>[6]</sup>基于 AdvantEdge 仿真软件，提出了一种刀-屑摩擦系数的估计方法，并结合切削实验，获得了不同摩擦系数对残余应力的影响规律。詹斌等<sup>[7]</sup>基于 Abaqus 仿真软件，建立了直角二维切削模型，研究了切削参数对表面残余应力大小的影响和分布规律。孙雅洲等<sup>[8]</sup>依据热-弹塑性有限元理论建立了切削加工模型，并分析了不同切削参数、刀具参数和工艺顺序对切削工件表面残余应力的影响规律。周勇<sup>[9]</sup>研究了不同切削参数对已加工表面残余应力的影响规律，结果表明低转速下的切削力对已加工表面残余应力的影响严重，高转速下的切削热对已加工表面残余应力的影响严重。Ma 等<sup>[10]</sup>考虑了切削过程中的热载荷和机械载荷对表面残余应力大小与表面应力层深度的影响，通过研究切削参数对热载荷和机械载荷的影响，进而分析了残余应力，并建立了预测模型。Frédéric 等<sup>[11]</sup>建立了三维切削模型，考虑了热载荷和机械载荷对残余应力的影响，分析了多次走刀表面的残余应力分布，揭示了外表面残余应力的不均匀性。Aitor 等<sup>[12]</sup>采用二维正交切削有限元模型，分析了材料本构模型参数对残余应力影响的权重大小。Varun 等<sup>[13]</sup>通过超声辅助车削，结合有限元和试验的方法，研究了切削参数和超声功率百分强度对残余应力的影响，并建立了残余应力预测模型。Zhang 等<sup>[14]</sup>基于 Abaqus 仿真软件，获得了机械应力和热应力对残余应力影响的权重。

目前，对已加工工件表面残余应力的研究只涉及到切削参数、刀具角度、切削环境和工艺顺序等因素，但改变硬质合金刀片表面粗糙度对已加工工件表面残余应力影响的研究鲜为报道。为此，本文通过化学机械抛光方法，对硬质合金刀片的表面进行预处理，研究硬质合金刀片表面粗糙度对已加工工件表面残余应力的影响规律。

## 1 切削力

金属切削过程中，刀-屑接触区域处于高温高压

状态，导致切屑底部与前刀面发生粘结现象。因此，刀具的前刀面与切屑接触常分为粘结区和滑动区二个区域，如图 1 所示。粘结区的摩擦为内摩擦，滑动区的摩擦为外摩擦。对刀-屑之间的摩擦系数做相应处理，取其平均摩擦系数作为研究对象。

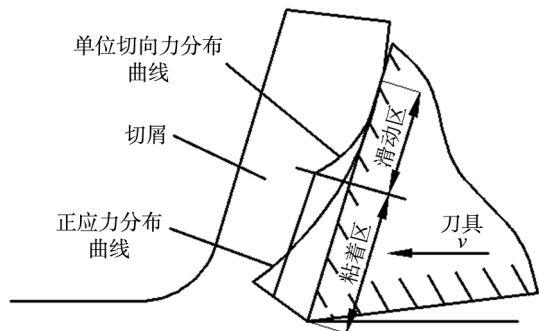


图1 刀-屑摩擦示意图

Fig.1 Schematic diagram of tool-chip friction

斜角切削时，刀具受  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  三个方向的力。在  $yz$  平面内， $F_y$  和  $F_z$  的合力为  $F_{yz}$ ，在  $xy$  平面内，主切削力  $F_x$  和合力  $F_{yz}$  的关系如图 2 所示。其中， $\gamma$  为刀具前角， $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  通过有限元软件 AdvantEdge FEM 仿真获得， $F_n$  为前刀面的正压力， $F_t$  为摩擦力。 $F_n$ 、 $F_t$  和  $F_x$ 、 $F_{yz}$  之间的转换关系如式（1—2）所示。

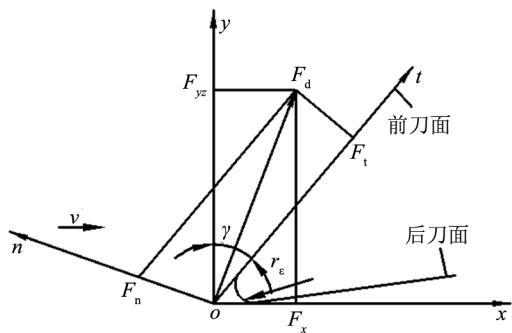


图2  $xy$  平面内刀具前刀面受力情况

Fig.2 Force condition of rake face on  $xy$  plane

$$F_{yz} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \gamma & \cos \gamma \\ -\cos \gamma & \sin \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_{yz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.1 实验

1.1.1 刀片的准备

采用株洲钻石刀具公司提供的 YG8 硬质合金刀片，刀片经过初磨处理，如图 3 所示，其表面粗糙度为 0.2 μm。分别以抛光液的磨粒大小、抛光速度、抛光压力和抛光时间作为工艺参数，抛光工艺参数如表 1 所示。因选取刀片的初始表面粗糙度相近，所以相同抛光工艺之后的刀片表面粗糙度也基本相同。分别以粗抛、粗抛+半精抛、粗抛+半精抛+精抛三组抛光工艺抛制刀片，并测得抛光后刀片的表面粗糙度分别为 0.08、0.04、0.02 μm。



图 3 YG8 硬质合金刀片  
Fig.3 YG8 carbide insert

表 1 抛光工艺参数  
Tab.1 Polishing process parameters

工序	磨料	抛光速度/(r·min <sup>-1</sup> )	抛光压力/kPa	抛光时间/min	磨粒	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 体积分数/%
粗抛	碳化硅（500）	50	177.8	50	25	10
半精抛	碳化硅（3000）	40	138.5	45	25	10
精抛	金刚石（w1）	35	118.5	30	7.23	10

抛光硬质合金刀片制备完成后，使用超景深显微镜对表面粗糙度为 0.2、0.02 μm 的硬质合金刀片的表面形貌进行观察，结果如图 4—5 所示。由图可见，表面粗糙度为 0.2 μm 的硬质合金刀片表面质量差，有明显纵横交错的磨削沟痕、部分凹坑及不均匀颗粒引起的凸起。表面粗糙度为 0.02 μm 的硬质合金刀片表面质量良好，无明显沟痕、凹坑与磨料磨痕。

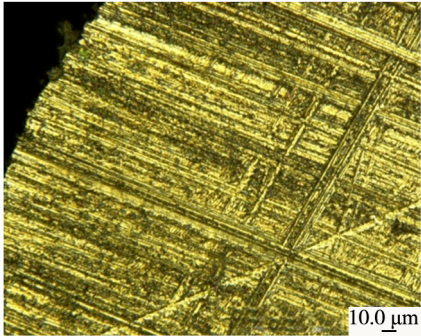


图 4 表面粗糙度为 0.2 μm 的刀片表面形貌  
Fig. 4 Surface morphology of insert with surface roughness of 0.2 μm

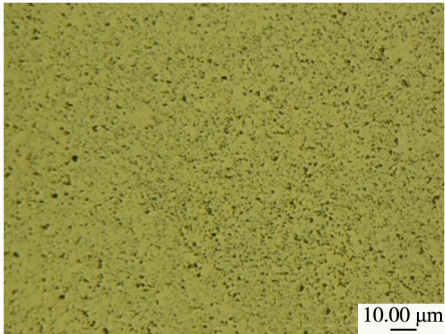


图 5 表面粗糙度为 0.02 μm 的刀片表面形貌  
Fig. 5 Surface morphology of insert with surface roughness of 0.02 μm

1.1.2 切削力仿真实验

刀具的最大单元网格尺寸为 0.3 mm，最小单元网格尺寸为 0.03 mm。刀片装夹之后的主偏角  $K_r=95^\circ$ ，前角  $\gamma_0=-6^\circ$ ，后角  $\alpha_0=6^\circ$ ，刃倾角  $\lambda_s=-6^\circ$ 。在 AdvantEdge FEM 三维切削 Nose Turning 仿真界面中，刀具角度使用美国标准。其中，Side Rake Angle、Back Rake Angle 和 Lead Angle 分别指侧前角  $\gamma_f$ 、背前角  $\gamma_p$  和前角  $\gamma_0$ ，转换关系如下：

$$\tan \gamma_f = \tan \gamma_0 \sin k_\gamma - \tan \lambda_s \cos k_\gamma \tag{3}$$

$$\tan \gamma_p = \tan \gamma_0 \cos k_\gamma + \tan \lambda_s \sin k_\gamma \tag{4}$$

依据式（3—4）计算得到： $\gamma_f=-6.496^\circ$ ， $\gamma_p=-5.458^\circ$ 。另外，余偏角  $\Psi_\gamma$  和主偏角  $K_r$  互余，所以余偏角  $\Psi_\gamma=-5^\circ$ 。刀尖圆角半径取 0.04 mm，工件尺寸为 2 mm×2 mm×5 mm，工件网格的最大单元尺寸为 1 mm，网格最小单元尺寸为 0.15 mm，工件材料选取自带材料 ISO 683-1(87)C45，建立如图 6 所示的切削模型。

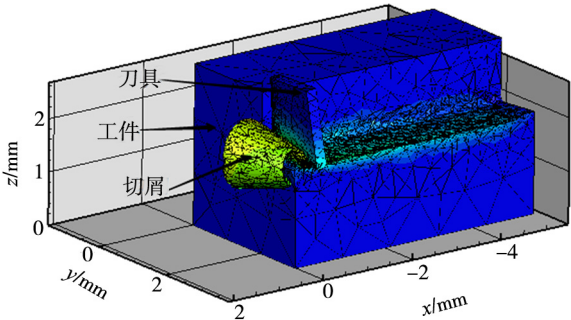


图 6 切削模型  
Fig.6 Cutting model

刀具在切削过程中,为避免出现积屑瘤,拟将仿真时的切削速度确定为 90~270 m/min。因实际加工过程中,精加工对工件表面残余应力的影响较大,所以将仿真进给量确定为 0.1~0.32 mm/r。参考文献[15]中干切削普通碳钢时的摩擦系数,将摩擦系数确定为 0.1~0.9。设计了四因素四水平  $L_{16}(4^4)$  的正交仿真实验,得到三个方向的切削力  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$ ,实验方案如表 2 所示。

表 2 切削力正交仿真实验方案  
Tab.2 Orthogonal simulation experimental scheme of cutting force

序号	进给量/ (mm·r <sup>-1</sup> )	切削深度/ mm	切削速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	摩擦 系数
1	0.08	0.5	100	0.2
2	0.08	1	150	0.4
3	0.08	1.5	200	0.6
4	0.08	2	250	0.8
5	0.16	0.5	150	0.6
6	0.16	1	100	0.8
7	0.16	1.5	250	0.2
8	0.16	2	200	0.4
9	0.24	0.5	200	0.8
10	0.24	1	250	0.6
11	0.24	1.5	100	0.4
12	0.24	2	150	0.2
13	0.32	0.5	250	0.4
14	0.32	1	200	0.2
15	0.32	1.5	150	0.8
16	0.32	2	100	0.6

### 1.1.3 切削力实验

实验材料选用未经热处理的普通碳钢 C45 钢。采用沈阳普通车床 CA6140,刀杆为 MWLNR2020-K08 型,刀片装夹后的主偏角为 95°,前角和后角分别为 -6°和 6°,刀杆如图 7 所示。测量设备为重庆迪佳科技有限公司 DJ-CL-1 型切削力实验仪器。



图 7 刀杆  
Fig.7 Cutter bar

为获得刀片表面粗糙度和切削力的关系,设计四因素四水平  $L_{16}(4^4)$  的正交切削力实验,四因素分别为切削速度  $v$ 、切削深度  $a_p$ 、进给量  $f$  和刀片表面粗糙度  $Ra$ 。普通车床的切削速度通过转速来描述,将转速转化为线速度,并依据切削力仿真实验方案中切削

参数的选取原则,确定切削速度  $v$  的范围为 90~270 m/min,进给量  $f$  的范围为 0.1~0.32 mm/r,切削力正交实验方案如表 3 所示。

表 3 切削力正交实验方案  
Tab.3 Orthogonal experimental scheme of cutting force

序号	切削速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	切削深度/ mm	进给量/ (mm·r <sup>-1</sup> )	$Ra$ / $\mu$ m
1	100	0.5	0.08	0.2
2	100	1	0.13	0.08
3	100	1.5	0.18	0.04
4	100	2	0.23	0.02
5	150	0.5	0.13	0.04
6	150	1	0.08	0.02
7	150	1.5	0.23	0.2
8	150	2	0.18	0.08
9	207	0.5	0.18	0.02
10	207	1	0.23	0.04
11	207	1.5	0.08	0.08
12	207	2	0.13	0.2
13	263	0.5	0.23	0.08
14	263	1	0.18	0.2
15	263	1.5	0.13	0.02
16	263	2	0.08	0.04

## 1.2 结果分析

### 1.2.1 切削力仿真实验结果

将表 2 中的每组数据代入 AdvantEdge FEM 有限元软件中,获得三向切削力  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$ ,然后将仿真所获得的切削力代入式(1)、式(2)中,得出摩擦力  $F_t$ ,结果如表 4 所示。

表 4 正交仿真实验结果  
Tab.4 Orthogonal experimental simulation results

序号	$F_x$ /N	$F_y$ /N	$F_z$ /N	$F_t$ /N
1	244.89	59.20	116.50	155.56
2	456.94	68.58	238.69	294.75
3	659.81	71.59	385.04	458.45
4	853.91	76.35	516.00	608.02
5	379.09	121.46	143.99	226.97
6	729.26	153.63	358.41	464.04
7	940.78	126.64	357.25	475.29
8	1345.09	152.62	609.66	765.63
9	494.67	168.40	154.16	278.77
10	901.29	211.37	342.61	494.57
11	1320.73	222.15	497.16	679.61
12	1683.61	209.61	519.83	733.41
13	623.72	184.26	145.78	298.87
14	1157.18	220.67	284.65	479.15
15	1787.19	370.01	614.43	900.12
16	1807.74	420.99	675.02	980.14



采用指数型的摩擦力模型<sup>[16]</sup>，其表现形式如下：

$$F_t = \alpha f^b a_p^c v^d \mu^e \quad (5)$$

式（5）中， $\alpha$  为工件材料和切削条件对摩擦力的影响系数； $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  分别是进给量  $f$ 、切削深度  $a_p$ 、切削速度  $v$  及摩擦系数  $\mu$  对摩擦力的影响系数。

根据表 4 中的数据，求解出模型系数，得到摩擦力模型为：

$$F_t = 1107.8986 f^{0.4049} a_p^{0.8572} v^{-0.0241} \mu^{0.1700} \quad (6)$$

将式（6）进行转化，获得摩擦系数的表达式为：

$$\mu = \left( \frac{F_t}{1107.8986 f^{0.4049} a_p^{0.8572} v^{-0.0241}} \right)^{\frac{1}{0.1700}} \quad (7)$$

$F_t$  的判定系数  $R^2$  为 0.9888，表明模型拟合度高。

$F_t$  的统计量为 491.1015。根据仿真切削力实验组数为 16，函数自变量个数为 4，将显著水平检验值  $a$  设定为 0.05。通过查阅  $F$  的分布检验临界值表，可得  $F_{0.05}(p,n-p-1)=F_{0.05}(4,11)=3.36$ ，该值远远小于  $F_t$  的统计量。故得到的线性回归统计方程是显著的，与仿真情况符合程度较好。

1.2.2 切削力实验结果

通过实验方案表 3 进行切削力实验，获得三向切削力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，将三向切削力代入式（1）、式（2）中，求得刀片前刀面和切屑之间的摩擦力  $F_t$ 。再将  $F_t$  及对应参数代入式（7）中，求得摩擦系数  $\mu$ ，结果如表 5 所示。

表 5 切削力实验结果  
Tab.5 The result of cutting force experiment

序号	$F_x/N$	$F_y/N$	$F_z/N$	$F_t/N$	$\mu$
1	82.00	30.15	185.36	195.33	0.96
2	425.98	206.16	261.38	375.60	0.43
3	861.88	313.23	438.16	625.75	0.51
4	1106.23	427.73	767.60	989.54	0.99
5	196.11	143.41	123.03	208.41	0.47
6	372.93	175.81	216.31	316.20	0.52
7	710.04	325.14	513.30	678.50	0.49
8	1008.75	317.14	428.25	635.42	0.11
9	224.68	150.72	184.32	260.28	0.83
10	503.00	257.45	407.21	531.71	0.94
11	359.60	114.34	197.77	264.78	0.03
12	903.52	283.92	412.56	403.62	0.02
13	150.50	184.96	203.11	288.94	0.89
14	337.99	177.33	336.92	413.98	0.40
15	407.24	146.46	288.26	364.14	0.05
16	377.12	113.72	219.47	285.26	0.01

2 最大残余应力

2.1 实验

将表 3 中的切削参数及表 5 中对应的摩擦系数  $\mu$  代入 AdvantEdge FEM 有限元软件中，得到工件表面最大残余应力的仿真值  $\sigma_s$ 。为验证仿真模型的合理性，通过 X 射线残余应力测试仪测试已加工工件表面的最大残余应力值，得到工件表面最大残余应力的测试值  $\sigma_e$ 。残余应力测试仪型号为加拿大 Proto 公司生产的 LXR D 实验室型，测试现场如图 8 所示。

2.2 结果分析

表 6 为最大残余应力的仿真值和测试值对比。对比两种结果，最大相对误差为 11.42%，最小相对误差

为 1.01%，仿真结果和实际测量结果存在一定误差。但是，两种实验结果反映的变化规律一致，因此，建立的三维残余应力仿真预测模型具有一定的可靠性。

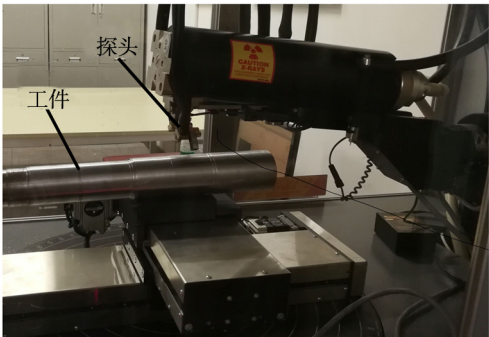


图 8 测试现场图  
Fig.8 Test site

表 6 最大残余应力的仿真值和测试值对比  
Tab.6 Comparison of simulation and experimental results of maximum residual stress

序号	切削速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	切削深度/mm	进给量/( $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$ )	$Ra/\mu\text{m}$	$\mu$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\sigma_e/\text{MPa}$	$e_i/\%$
1	100	0.5	0.08	0.2	0.96	572.29	593.54	3.58
2	100	1	0.13	0.08	0.43	865.37	827.26	4.61
3	100	1.5	0.18	0.04	0.51	612.32	637.59	3.96
4	100	2	0.23	0.02	0.99	901.04	860.47	4.71
5	150	0.5	0.13	0.04	0.47	543.22	522.51	3.96
6	150	1	0.08	0.02	0.52	682.44	645.90	5.66
7	150	1.5	0.23	0.2	0.49	1047.88	988.80	5.97
8	150	2	0.18	0.08	0.11	1031.72	996.71	3.51
9	207	0.5	0.18	0.02	0.83	495.84	526.38	5.80
10	207	1	0.23	0.04	0.94	1007.53	1017.83	1.01
11	207	1.5	0.08	0.08	0.03	565.83	540.87	4.61
12	207	2	0.13	0.2	0.02	512.34	543.39	5.71
13	263	0.5	0.23	0.08	0.89	227.67	257.01	11.42
14	263	1	0.18	0.2	0.40	588.95	623.42	5.52
15	263	1.5	0.13	0.02	0.05	461.63	453.29	1.84
16	263	2	0.08	0.04	0.01	465.09	449.07	3.57

图 9 为各工艺参数对工件表面最大残余应力的影响规律,图中的最大残余应力为相应工艺参数下最大残余应力的平均值。由图 9a 可知,当切削速度为 150 m/min 时,工件表面的最大残余应力值最大;当切削速度 > 150 m/min 时,随着切削速度的增加,工件表面的最大残余应力值减小。图 9b 显示随着进给量的增加,工件表面的最大残余应力值不断增加。在图 9c 中,当切削深度为 1 mm 时,工件表面的最大

残余应力值最大;当切削深度 > 1 mm 时,工件表面的最大残余应力出现了波动。从图 9d 中可以看出,随着硬质合金刀片表面粗糙度的减小,工件表面的最大残余应力值不断减小。其中,采用表面粗糙度为 0.02  $\mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削时,工件表面的最大残余应力为 621.51 MPa,与采用表面粗糙度为 0.2  $\mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削时相比,最大残余应力减小了 10.58%。

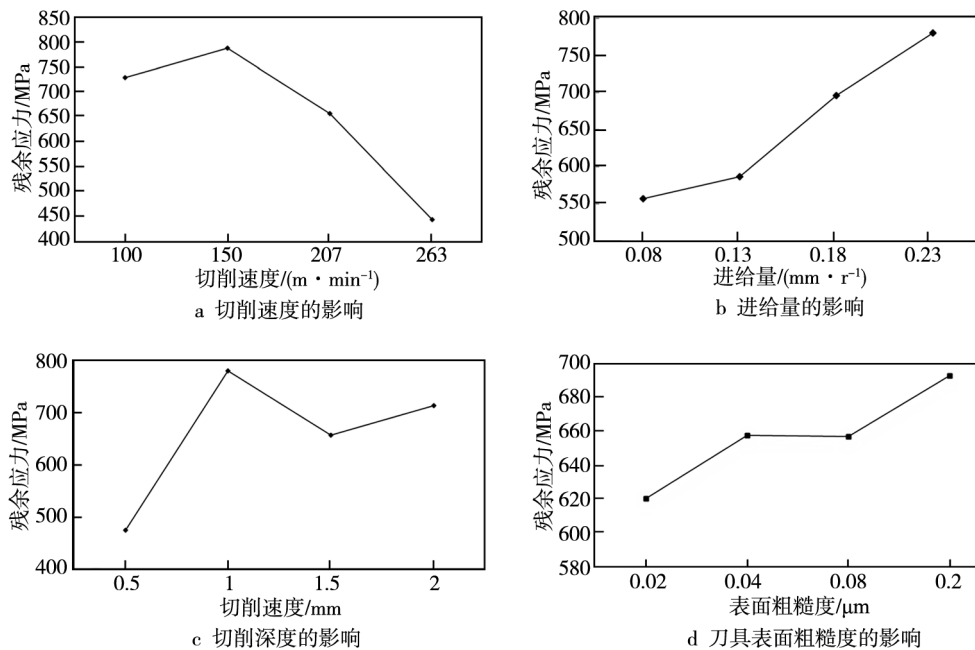


图 9 各工艺参数对工件表面最大残余应力的影响

Fig.9 Effects of cutting speed (a), feed rate (b), cutting depth (c) and tool surface quality (d) on maximum residual stress of workpiece surface

### 3 结论

1) 结合仿真和实验方法, 建立了切削力和摩擦系数之间的经验模型。

2) 通过仿真和实验揭示了不同切削参数对残余应力分布的影响规律: 随着切削速度的增加, 工件表面的最大残余应力先增大后减小, 当切削速度为 150 m/min 时, 工件表面的最大残余应力值最大。随着进给量的增加, 工件表面的最大残余应力一直增加。当切削深度为 1 mm 时, 工件表面的最大残余应力值最大, 随后工件表面的最大残余应力出现了波动。硬质合金刀片的表面粗糙度越好, 工件表面的最大残余应力值越小。其中, 采用表面粗糙度为  $0.02\ \mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削与采用表面粗糙度为  $0.2\ \mu\text{m}$  的硬质合金刀片切削相比, 最大残余应力减小了 10.58%。

### 参考文献:

- [1] 刘海涛, 卢泽生, 孙雅洲. 切削加工表面残余应力研究的现状与进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(1): 17-19.  
LIU Hai-tao, LU Ze-sheng, SUN Ya-zhou. Status and Development of Residual Stress on the Surface in the Cutting[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(1): 17-19.
- [2] 桂寿平, 黄培彦, 何秋. 港口起重机疲劳破坏成因与修复措施探讨[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2001, 22(2): 29-32.  
GUI Shou-ping, HUANG Pei-yan, HE Qiu. A Study on the Cause and Remedy Measure of Fatigue Destruction in Portal Crane[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2001, 22(2): 29-32.
- [3] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 120-126.  
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 120-126.
- [4] LIANG S Y, SU J C. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 65-68.
- [5] MOUSSA N B, SIDHOM H, BRAHAM C. Numerical and Experimental Analysis of Residual Stress and Plastic Strain Distributions in Machined Stainless Steel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64(1): 82-92.
- [6] LIU M Z, XIONG L S, LI B. An Approach of Tool-chip Friction Coefficient Estimate for the Simulation of Machining Residual Stress[J]. Advanced Materials Research, 2012, 510: 827-834.
- [7] 詹斌, 陈文琳, 刘宁. 切削加工残余应力的有限元分析[J]. 工具技术, 2008, 42(2): 23-27.  
ZHAN Bin, CHEN Wen-lin, LIU Ning. Finite Element Analysis for Residual Stress after Machining[J]. Tool Technology, 2008, 42(2): 23-27.
- [8] 孙雅洲, 刘海涛, 卢泽生. 基于热耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 187-193.  
SUN Ya-zhou, LIU Hai-tao, LU Ze-sheng. Finite Element Simulation and Experimental Research of Residual Stresses in the Cutting Based on the Coupled Thermo-mechanical Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 187-193.
- [9] 周勇. 薄壁件切削加工残余应力的模拟及实验分析[J]. 工具技术, 2016, 50(5): 45-49.  
ZHOU Yong. Simulation and Experimental Analysis of Residual Stresses of Thin-walled Part in Milling Machining[J]. Tool Engineering, 2016, 50(5): 45-49.
- [10] MA Y, FENG P F, ZHANG J F, et al. Prediction of Surface Residual Stress after End Milling Based on Cutting Force and Temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 235: 41-48.
- [11] FRÉDÉRIC V, JOL R, HÉDI H, et al. 3D Modeling of Residual Stresses Induced in Finish Turning of an AISI304L Stainless Steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53: 77-90.
- [12] KORTABARRIA A, ARMENTIA I, ARRAZOLA P. Sensitivity Analysis of Material Input Data Influence on Machining Induced Residual Stress Prediction in Inconel 718[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 63: 47-57.
- [13] VARUN S, PULAK M P. Optimization of Machining and Vibration Parameters for Residual Stresses Minimization in Ultrasonic Assisted Turning of 4340 Hardened Steel[J]. Ultrasonics, 2016, 70: 172-182.
- [14] ZHANG X P, WU S F, LIU C R. Hook Shaped Residual Stress: The Effect of Tool Ploughing, and the Analysis of the Mechanical and Thermal Effects [C]// Proceedings of the 2012 ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference. Indiana: [s.n.], 2012: 277-286.
- [15] MARANHÃO C, DAVIM J P. The Role of Flow Stress and Friction Coefficient in FEM Analysis of Machining: A Review[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2012, 30(2): 184-188.
- [16] 毕煌圣, 熊良山, 黄若峰, 等. 基于有限元结果和车削实验的刀屑平均摩擦因数估计方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(8): 1006-1009.  
BI Huang-sheng, XIONG Liang-shan, HUANG Ruofeng, et al. An Approach to Estimate Tool-chip Average Friction Coefficient Based on FEM Simulation Results and Turning Experiments[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(8): 1006-1009.