

# 纳米晶粒硬质合金平面磨削表面粗糙度研究

詹友基<sup>1,2</sup>, 江宋然<sup>1</sup>, 许永超<sup>1</sup>, 左振<sup>1</sup>, 周家骐<sup>1</sup>

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 先进制造生产力促进中心, 福建 福州 350118)

**摘要:** 采用树脂结合剂金刚石砂轮对纳米晶粒硬质合金进行平面磨削试验, 结合单因素和正交实验研究不同磨削要素即磨削深度 $a_p$ 、工件进给速度 $v_w$ 、砂轮线速度 $v_s$ 对磨削纳米晶粒硬质合金表面粗糙度的影响。结果表明, 磨削深度 $a_p$ 和工件进给速度 $v_w$ 增加, 表面粗糙度增加; 砂轮线速度 $v_s$ 增加, 表面粗糙度减小。磨削3要素对纳米晶粒硬质合金表面粗糙度影响程度的大小依次是工件进给速度、砂轮线速度、磨削深度。因此, 为了获得好的表面质量可以采取小进给、小切深、高砂轮线速度的组合方式进行磨削; 同时建立了磨削纳米晶粒硬质合金的表面粗糙度数学模型并验证了模型的可靠性。

**关键词:** 纳米晶粒硬质合金; 磨削; 表面粗糙度

中图分类号: TG58

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)06-0511-07

## Research on surface roughness of nano-grain cemented carbide surface grinding

ZHAN Youji<sup>1,2</sup>, JIANG Songran<sup>1</sup>, XU Yongchao<sup>1</sup>, ZUO Zhen<sup>1</sup>, ZHOU Jiaqi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Productivity Promotion Center, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The surface grinding test of nano-grained cemented carbide was conducted with resin bond diamond grinding wheels, combined with single factor test and orthogonal experiment to study the effects of the grinding elements, namely grinding depth  $a_p$ , workpiece feed speed  $v_w$ , grinding wheel linear speed  $v_s$ , on the surface roughness of nano-grain cemented carbide. Test results show that once the grinding depth  $a_p$  and workpiece feed speed  $v_w$  increase, the surface roughness increases; once the grinding wheel linear speed  $v_s$  increases, the surface roughness decreases. The influence of the three elements on the surface roughness of nano-grained cemented carbide can be determined from large to small in the order of the workpiece feed speed, the linear speed of the grinding wheel, and the grinding depth. Therefore, in order to obtain a good surface quality, a combination of small feed, small depth of cut, and high grinding wheel linear speed can be used for grinding; at the same time, a mathematical model of surface roughness for grinding nano-grained cemented carbide was established and its reliability was verified.

**Keywords:** nano-grain cemented carbide; grinding; surface roughness

纳米晶粒硬质合金(WC晶粒度 $\leq 0.2\ \mu\text{m}$ )是具有高硬度、高耐磨性的新型材料,这种材料可以广泛应用于高硬材料(HRC58以上)的精加工及不锈钢、铝合金等材料的加工。现代加工技术的

发展对硬质合金的切削性能和使用寿命提出了更高要求<sup>[1-2]</sup>,而表面粗糙度等加工质量是评价纳米晶粒硬质合金切削性能和使用寿命的重要指标<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51775113)

第一作者简介: 詹友基(1972—),男,福建闽清人,教授,博士,研究方向:硬脆材料加工,可持续设计与制造。

通常硬质合金采用磨削的方式加工<sup>[4]</sup>。宋鹏涛等人<sup>[5]</sup>研究了磨削 3 要素不同陶瓷结合剂金刚石砂轮磨削硬质合金 YT15 的表面粗糙度变化规律,对影响硬质合金表面加工质量的原因进行了分析并提出改善方法。原一高等人<sup>[6]</sup>研究了磨削参数对树脂结合剂金刚石磨削 HIP 技术烧结的超细晶粒硬质合金的表面粗糙度影响。邹吉才等人<sup>[7]</sup>采用 ELID 磨削加工方法磨削普通硬质合金和纳米晶粒硬质合金,实验结果表明普通硬质合金的磨削力小于纳米晶粒硬质合金,表面质量也比纳米硬质合金差。

目前对硬质合金的磨削加工研究主要集中在

普通和超细晶粒硬质合金,对纳米晶粒硬质合金的磨削工艺还需进一步完善。本文以纳米晶粒硬质合金 GU092 为研究对象,通过单因素和正交实验,研究分析了磨削 3 要素即砂轮线速度  $v_s$ 、工件进给速度  $v_w$  和磨削深度  $a_p$  对表面粗糙度的影响规律,并找出最优磨削方案,以期为纳米晶粒硬质合金的磨削加工提供理论依据和实际指导。

## 1 磨削试验条件

试验采用 WC-CO 类纳米晶粒硬质合金 (GU092),工件尺寸为 6 mm × 9 mm × 9 mm,力学性能如表 1 所示。

表 1 GU092 的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of GU092

ISO 牌号	晶粒度 $d/\mu\text{m}$	$\omega_{\text{钴}}/\%$	硬度		密度 $\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗弯强度 $f/$ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	应用范围
			HRA	HV30			
K05-K10	0.2	9	94	2 050	14.44	4 100	适用于高硬材料(HRC58 以上)精加工及不锈钢、铝合金等高光材料的加工

试验采用精密平面磨床(ORBIT25)。选用树脂结合剂金刚石砂轮(ZZSM-1022519010304001),直径  $d_s$  为 200 mm,金刚石磨料粒度为 230/270。磨削加工方式为顺磨和逆磨,在加工过程中使用水基乳化液(嘉实多 9930)作为切削液。磨削后工件用丙酮在超声波清洗机中清洗 20 min。清洗后的工件采用粗糙度测量仪(Marsurf XR 20)测量水平和垂直方向表面粗糙度,每个测量实验做 5 次并求取平均值。对表面粗糙度的评价指标选择常用的轮廓算数平均偏差  $R_a$ 。具体磨削参数见表 2。

表 2 磨削试验参数

Tab.2 Grinding test parameters

磨削 3 要素	试验参数
砂轮线速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	15、20、25、30、35
工件进给速度 $v_w/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	16、24、32、40、48
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	5、10、15、20、25

## 2 实验结果与分析

### 2.1 磨削深度对表面粗糙度的影响

从 Malkin<sup>[8]</sup>对单颗磨粒最大未变形切屑厚度的研究中可以知道,单颗磨粒最大未变形切屑厚度与磨削 3 要素的关系式:

$$h_m = 2L \left( \frac{v_w}{v_s} \right) \left( \frac{a_p}{d_e} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式(1)中,  $L$  和  $d_e$  分别表示相邻两切屑点之间距离和砂轮的当量直径,可表示为:

$$d_e = d_w \left( 1 \pm \frac{v_w}{v_s} \right)^2 \quad (2)$$

式(2)中,“+”和“-”分别表示为逆磨和顺磨,  $d_w$  为砂轮实际半径。相邻切屑点之间的距离  $L$  表示为:

$$L = \frac{1}{Cb} \quad (3)$$

式(3)中,  $C$  和  $b$  表示单磨粒密度和平均未变形切屑宽度。

在  $v_s = 20 \text{ m/s}$ 、 $v_w = 32 \text{ mm/s}$  时,磨削深度对工件表面粗糙度的影响如图 1 所示。当磨削深度

从  $5\ \mu\text{m}$  增加到  $25\ \mu\text{m}$  时,顺磨加工方式下平行方向和垂直方向的表面粗糙度增幅分别是 10.35% 和 6.35%,逆磨加工方式下平行方向和垂直方向的表面粗糙度增幅分别是 6.65% 和 8.07%。由公式(1)和公式(2)可知,当磨削深度增加时,单颗磨粒最大未变形切屑厚度增加,材料断裂去除的比例增大,脆性断裂形成凹坑,工件表面粗糙度增大。

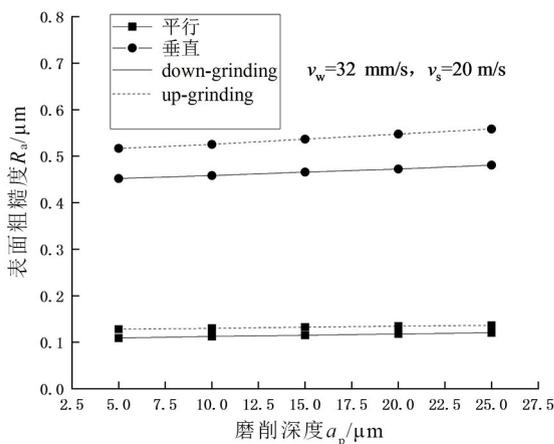


图1 磨削深度对表面粗糙度的影响

Fig.1 Effects of grinding depth on surface roughness

## 2.2 工件进给速度对表面粗糙度的影响

在  $a_p = 15\ \mu\text{m}$ ,  $v_s = 30\ \text{m/s}$  时,工件进给速度对表面粗糙度的影响如图2所示。当工件进给速度从  $16\ \text{mm/s}$  增加到  $48\ \text{mm/s}$  时,顺磨平行方向和垂直方向的表面粗糙度的增幅分别是 30.47% 和 19.79%,逆磨平行方向和垂直方向的表面粗糙度的增幅分别是 30.65% 和 14.02%。由公式(1)可知,工件进给速度增加时,单颗磨粒最大未变形切屑厚度增加;由公式(2)可知,工件进给速度增加时,当量直径减小,反映到公式(1)上是单颗磨粒最大未变形切屑厚度增加。材料脆性去除比例增大,工件表面的划痕变深、变宽,所以工件表面粗糙度增大。

## 2.3 砂轮线速度对表面粗糙度影响

在  $a_p = 10\ \mu\text{m}$ ,  $v_w = 24\ \text{mm/s}$  时,砂轮线速度对表面粗糙度的影响如图3所示。当砂轮线速度由  $15\ \text{m/s}$  增加至  $35\ \text{m/s}$  时,顺磨平行方向和垂直方向表面粗糙度的增幅分别是 29.36% 和 15.77%,逆磨平行方向和垂直方向的表面粗糙度的降幅分别是 24.44% 和 15.14%。由公式(1)可

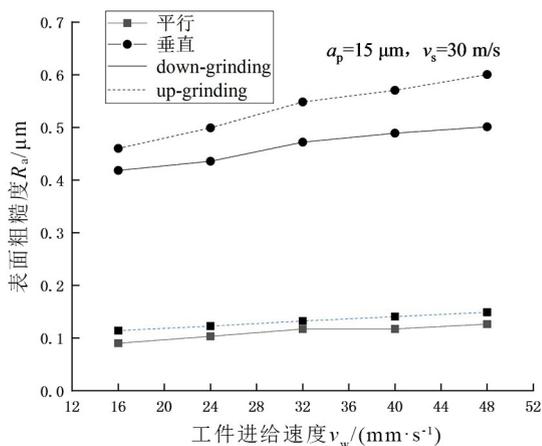


图2 工作台进给速度对表面粗糙度的影响

Fig.2 Effects of table feed speed on surface roughness

知,砂轮线速度增加,单颗磨粒最大未变形切屑厚度减小;由公式(2)可知,砂轮线速度增加,当量直径增加,反映到公式(1)上是单颗磨粒最大未变形切屑厚度减小。材料塑性去除增加而脆性去除减少,摩擦耕犁作用减弱,工件表面沟槽较浅,两侧隆起较低,故工件表面粗糙度减小。

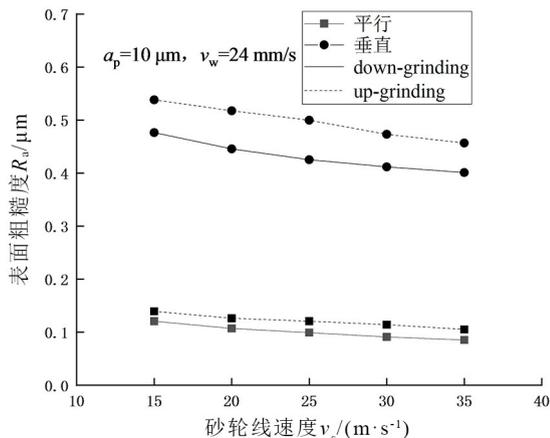


图3 砂轮线速度对表面粗糙度的影响

Fig.3 Effects of grinding wheel linear speed on surface roughness

## 2.4 磨削用量对表面粗糙度的影响

### 2.4.1 建立表面粗糙度数学模型

通常表面粗糙度经验公式表达为<sup>[9-11]</sup>:

$$R_a = \varepsilon \cdot v_s r_1 \cdot a_p r_2 \cdot v_w r_3 \quad (4)$$

对公式(4)两边取对数,得:

$$\lg R_a = \lg \varepsilon + r_1 \lg v_s + r_2 \lg a_p + r_3 \lg v_w \quad (5)$$

$$\text{令 } \lg R_a = y, \lg \varepsilon = \varepsilon, \lg v_s = x_1, \lg v_w = x_2, \lg a_p =$$

$x_3$ , 则公式(5)可转化成线性方程:  $y = \varepsilon + r_1x_1 + r_2x_2 + r_3x_3$ , 满足回归分析中自变量和因变量之间

存在的关系, 可进行非线性回归分析, 回归分析的结果如表 3 所示。

表 3 回归分析表  
Tab.3 Regression analysis table

加工方式	测量方向	参数	估计值	标准误差	95%置信区间	
					下限	上限
顺磨	平行方向	$\varepsilon$	0.082	0.016	0.047	0.117
		$r_1$	0.020	0.032	- 0.050	0.090
		$r_2$	0.206	0.033	0.135	0.278
		$r_3$	- 0.133	0.042	- 0.225	- 0.041
	垂直方向	$\varepsilon$	0.382	0.054	0.263	0.500
		$r_1$	0.006	0.023	- 0.045	0.057
$r_2$		0.183	0.024	0.131	0.235	
逆磨	平行方向	$r_3$	- 0.093	0.016	0.047	0.117
		$\varepsilon$	0.102	0.011	0.079	0.126
		$r_1$	0.020	0.018	- 0.019	0.058
	垂直方向	$r_2$	0.171	0.018	0.132	0.210
		$r_3$	- 0.124	0.023	- 0.174	- 0.074
		$\varepsilon$	0.374	0.045	0.275	0.473
垂直方向	$r_1$	0.021	0.020	- 0.023	0.065	
	$r_2$	0.154	0.020	0.110	0.199	
	$r_3$	- 0.119	0.026	- 0.176	- 0.061	

表 3 中, 估计值为经验公式中回归常数项数值; 标准误差为实际值与估计值之间相对偏离程度, 主要用来衡量回归方程的代表性, 标准误差越小, 则估计值与实际值的近似误差越小。由表 3 可得顺磨加工和逆磨加工方式下平行方向和垂直方向的表面粗糙度公式为:

顺磨平行方向粗糙度

$$R_a = 0.082a_p - 0.020v_w - 0.206v_s - 0.133 \quad (6)$$

顺磨垂直方向粗糙度

$$R_a = 0.382a_p - 0.006v_w - 0.183v_s - 0.093 \quad (7)$$

逆磨水平方向粗糙度

$$R_a = 0.102a_p - 0.020v_w - 0.171v_s - 0.124 \quad (8)$$

逆磨垂直方向粗糙度

$$R_a = 0.374a_p - 0.021v_w - 0.154v_s - 0.119 \quad (9)$$

由式(6)~式(9)可知, 对表面粗糙度的影响

由大到小分别是工件进给速度、砂轮线速度、磨削深度。无论是顺磨加工还是逆磨加工, 表面粗糙度都随着磨削深度和工件进给速度的增加而增加, 随着砂轮线速度的增加而减小。因此在本试验范围内要达到表面粗糙度最小的最优方案, 其参数是  $a_p = 10 \mu\text{m}$ ,  $v_w = 16 \text{ mm/s}$ ,  $v_s = 30 \text{ m/s}$ 。实验得到顺磨加工条件下工件表面粗糙度平行方向和垂直方向分别为  $0.0736 \mu\text{m}$  和  $0.3902 \mu\text{m}$ , 逆磨加工条件下工件表面粗糙度平行方向和垂直方向分别是  $0.0935 \mu\text{m}$  和  $0.4031 \mu\text{m}$ 。

#### 2.4.2 数学模型的验证

为了验证粗糙度模型的精度, 将顺磨加工和逆磨加工方式所得实际值和模型预测的预测值进行对比, 所得误差值结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 顺磨加工粗糙度实际值与模型预测值对比表

Tab.4 Comparison of actual values and model predictions of the roughness by down-grinding

试验号	$a_p /$	$v_w /$	$v_s /$	平行方向	平行方向	误差 /	垂直方向	垂直方向	误差 /
	$\mu\text{m}$	$(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	实际值/ $\mu\text{m}$	预测值/ $\mu\text{m}$	%	实际值/ $\mu\text{m}$	预测值/ $\mu\text{m}$	%
1	10	16	15	0.108 4	0.106 0	-2.21	0.491 1	0.498 9	1.59
2	10	24	20	0.107 1	0.110 9	3.55	0.517 5	0.523 2	1.10
3	10	32	25	0.115 1	0.114 2	-0.78	0.534 3	0.540 1	1.09
4	10	40	30	0.119 1	0.116 7	-2.02	0.577 1	0.553 1	-4.16
5	15	16	20	0.106 2	0.102 8	-3.20	0.496 4	0.486 9	-1.91
6	15	24	15	0.117 7	0.116 2	-1.27	0.545 3	0.538 6	-1.23
7	15	32	30	0.117 2	0.112 4	-4.10	0.548 3	0.532 2	-2.94
8	15	40	25	0.113 6	0.120 6	6.16	0.526 5	0.563 9	7.10
9	20	16	25	0.088 7	0.100 4	13.19	0.477 0	0.477 6	0.13
10	20	24	30	0.105 3	0.106 5	1.14	0.492 1	0.505 8	2.78
11	20	32	15	0.122 4	0.124 0	1.31	0.567 1	0.568 6	0.26
12	20	40	20	0.126 2	0.125 0	-0.95	0.584 7	0.576 7	-1.37
13	25	16	30	0.104 7	0.098 4	-6.02	0.485 0	0.470 2	-3.05
14	25	24	25	0.110 3	0.109 7	-0.54	0.495 7	0.515 1	3.91
15	25	32	20	0.120 5	0.119 9	-0.50	0.558 5	0.554 3	-0.75
16	25	40	15	0.131 7	0.130 4	-0.99	0.601 9	0.593 1	-1.46

表 5 逆磨加工粗糙度实际值与模型预测值对比表

Tab.5 Comparison of actual values and model predictions of the roughness by up-grinding

试验号	$a_p /$	$v_w /$	$v_s /$	平行方向	平行方向	误差 /	垂直方向	垂直方向	误差 /
	$\mu\text{m}$	$(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	实际值/ $\mu\text{m}$	预测值/ $\mu\text{m}$	%	实际值/ $\mu\text{m}$	预测值/ $\mu\text{m}$	%
1	10	16	15	0.122 6	0.122 9	0.24	0.432 5	0.436 1	0.83
2	10	24	20	0.126 3	0.127 1	0.63	0.445 6	0.448 6	0.67
3	10	32	25	0.130 2	0.129 9	-0.23	0.460 0	0.456 7	-0.72
4	10	40	30	0.134 7	0.131 9	-2.08	0.465 4	0.462 6	-0.60
5	15	16	20	0.120 1	0.119 6	-0.42	0.427 4	0.425 0	-0.56
6	15	24	15	0.133 1	0.132 8	-0.23	0.469 5	0.468 2	-0.28
7	15	32	30	0.132 5	0.128 0	-3.40	0.472 1	0.450 7	-4.53
8	15	40	25	0.128 5	0.136 0	5.84	0.453 3	0.476 7	5.16
9	20	16	25	0.118 3	0.117 0	-1.10	0.423 4	0.416 4	-1.65
10	20	24	30	0.119 1	0.122 6	2.94	0.420 2	0.433 8	3.24
11	20	32	15	0.138 4	0.140 3	1.37	0.488 2	0.492 3	0.84
12	20	40	20	0.142 7	0.140 7	-1.40	0.503 4	0.492 5	-2.17
13	25	16	30	0.115 7	0.114 9	-0.69	0.417 6	0.409 4	-1.96
14	25	24	25	0.124 7	0.125 9	0.96	0.426 8	0.445 3	4.33
15	25	32	20	0.136 3	0.136 0	-0.22	0.480 8	0.478 0	-0.58
16	25	40	15	0.148 9	0.146 4	-1.68	0.518 2	0.512 0	-1.20

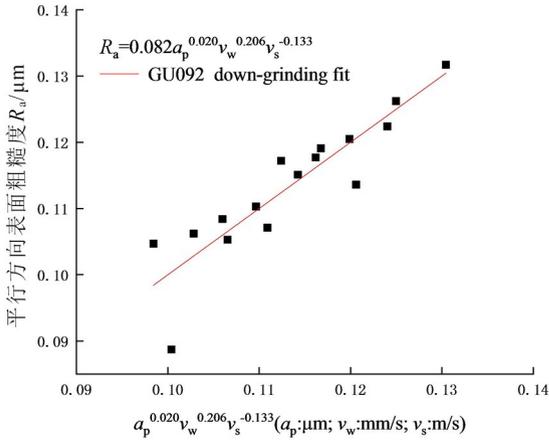


图 4 平行方向表面粗糙度三元回归图(顺磨)

Fig.4 Three-dimensional regression graph of surface roughness in parallel direction( down-grinding)

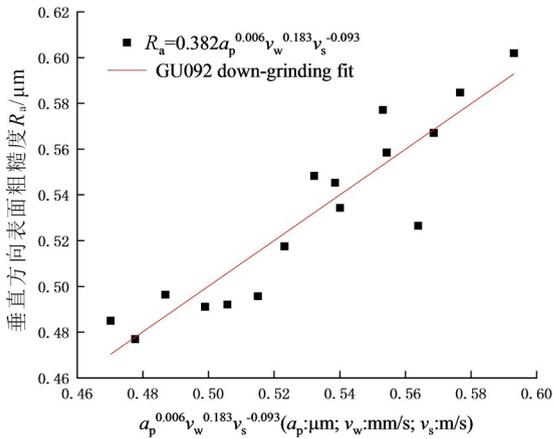


图 5 垂直方向表面粗糙度三元回归图(顺磨)

Fig.5 Three-dimensional regression graph of surface roughness in vertical direction( down-grinding)

由非线性回归分析得到顺磨加工平行方向与垂直方向粗糙度模型的  $F$  检验值分别是 2 094.82、3 956.61, 逆磨加工平行方向与垂直方向粗糙度模型的  $F$  检验值分别是 6 975.07、5 339.11, 查  $F$  分布表得  $F_{0.01}(3, 11) = 6.22$ , 可知实验结果  $F$  检验值均大于 6.22, 说明建立的非线性回归模型非常显著。由表 4 可知, 顺磨水平方向误差在 0.54% ~ 13.19%, 垂直方向误差在 0.13% ~ 4.16%; 逆磨水平方向误差在 0.22% ~ 5.84%, 垂直方向误差在 0.28% ~ 5.16%, 说明回归数学模型具有较高的精度, 可以对磨削纳米晶粒硬质合金的表面粗糙度进行预测。

树脂结合剂金刚石砂轮磨削纳米晶粒硬质合

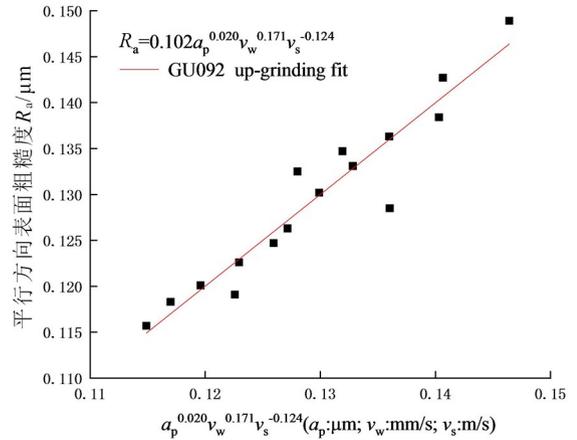


图 6 平行方向表面粗糙度三元回归图(逆磨)

Fig.6 Three-dimensional regression graph of surface roughness in parallel direction( up-grinding)

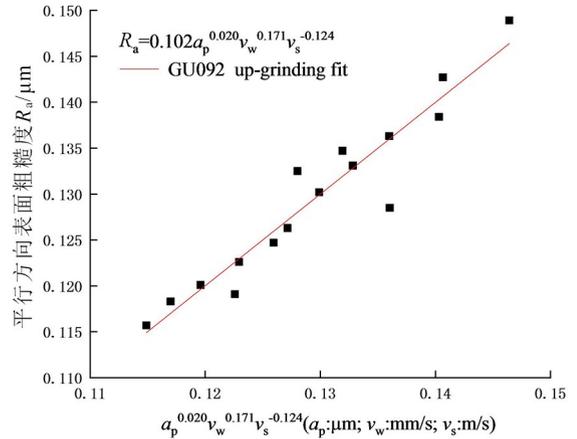


图 7 垂直方向表面粗糙度三元回归图(逆磨)

Fig.7 Three-dimensional regression graph of surface roughness in vertical direction( up-grinding)

金的垂直方向的表面粗糙度在 0.460 1 ~ 0.601 9  $\mu\text{m}$ , 文献[14]中磨削普通硬质合金 YG8 垂直方向的粗糙度范围在 0.6 ~ 0.9  $\mu\text{m}$ ; 文献[15]中磨削超细晶粒硬质合金 GU10UF、GU15UF、GU25UF 垂直方向的粗糙度范围分别在 0.492 3 ~ 0.662 09  $\mu\text{m}$ 、0.521 8 ~ 0.641 4  $\mu\text{m}$ 、0.521 0 ~ 0.668 3  $\mu\text{m}$ , 说明磨削纳米晶粒硬质合金更容易获得较好的表面质量。

## 4 结论

1) 树脂结合剂金刚石砂轮磨削纳米晶粒硬质合金的表面粗糙度随磨削深度和工件进给速度的增加而增加, 随砂轮线速度的增加而减小。对

表面粗糙度影响程度的大小依次是工件进给速度、砂轮线速度、磨削深度。因此在生产中以小进给、小切深、高砂轮线速度的组合方式进行磨削有利于提高工件表面质量。

2)对比普通硬质合金和超细晶粒硬质合金磨削,纳米晶粒硬质合金磨削更容易获得较好的

表面质量。

3)对正交试验数据进行了三元非线性回归分析,建立了树脂结合剂金刚石砂轮磨削纳米晶粒硬质合金 GU092 的表面粗糙度回归数学模型,并对模型进行验证,结果表明所建立的模型是可行的。

## 参考文献:

- [1] 杨军,黄向明,蒋福星,等. 纳米硬质合金高速深磨工艺试验研究[J]. 现代制造工程, 2015(10): 12-17, 21.
- [2] 詹友基. 陶瓷结合剂金刚石砂轮高速磨削硬质合金的机理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2013.
- [3] 邱健,詹友基,贾敏忠. 陶瓷结合剂金刚石砂轮磨削超细晶粒硬质合金的表面粗糙度研究[J]. 工具技术, 2014, 48(9): 20-24.
- [4] 任莹晖,张璧,周志雄. 纳米结构硬质合金磨削的表面形貌和材料去除机理研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(8): 896-901.
- [5] 宋鹏涛,刘泓,康露,等. 磨削参数对陶瓷结合剂金刚石砂轮磨削硬质合金表面粗糙度的影响[J]. 工具技术, 2012, 46(2): 29-31.
- [6] 原一高,张肖肖,丁健俊,等. 磨削参数对超细硬质合金磨削表面粗糙度的影响[J]. 工具技术, 2012, 46(5): 41-44.
- [7] 邹吉才,张飞虎. 纳米硬质合金的 ELID 磨削[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(12): 57-58.
- [8] ROWE W. Grinding technology-theory and applications of machining with abrasives[J]. Tribology International, 1990, 23(6): 443.
- [9] 高超,王生,王会,等. 砂带磨削表面粗糙度理论预测及灵敏度分析[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 295-305.
- [10] CHEN J, HUANG H, XU X. An experimental study on the grinding of alumina with a monolayer brazed diamond wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(1/2): 16-23.
- [11] ABDULLAH A, PAK A, FARAH M, et al. Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(2/3): 165-168.
- [12] 张大将,王颖达,陈世隐,等. 钎焊金刚石砂轮磨削 YG8 硬质合金的试验研究[J]. 超硬材料工程, 2017, 29(3): 19-23.
- [13] 田笑. 超细晶粒硬质合金磨削实验研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2020.

(责任编辑:陈雯)