

微织构 PCBN 超硬刀具切削气门座圈的温度研究

杨海东, 韩争光, 唐火红, 吴雨松, 王旭

合肥工业大学

摘要: 合理的微织构可以减小切屑与刀具前刀面的摩擦,降低切削力和切削温度。使用微织构超硬 PCBN 刀具车削粉末冶金气门座圈,研究切削速度和织构参数对切削温度的影响。通过正交试验,在干切削条件下测量切削温度,结果表明:凹坑密度 w 对切削温度的影响最为显著,其次是切削速度 v 和凹坑深度 h ,凹坑直径 d 对切削温度的影响最小;最优织构参数组合为凹坑直径 $d = 180\mu\text{m}$,凹坑深度 $h = 20\mu\text{m}$,凹坑密度 $w = 15\%$,切削速度 $v = 70\text{m}/\text{min}$ 。

关键词: 微织构;PCBN 超硬刀具;气门座圈;切削温度

中图分类号: TG501.4;TG703;TH161 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.05.007

Research on Cutting Temperature of Micro-textured Super-hard PCBN Tool for Cutting Valve Seat

Yang Haidong, Han Zhengguang, Tang Huohong, Wu Yusong, Wang Xu

Abstract: Reasonable micro-texture can reduce the friction between chips and rake face of cutting tool, cutting force and temperature. Micro-textured super-hard PCBN tool is used to turn powder metallurgy valve seat, and the effects of cutting speed and texture parameters on cutting temperature are studied. The cutting temperatures are measured under dry cutting conditions by an orthogonal test method. The results show that the effect of pit density w on cutting temperature is the most significant, followed by cutting speed v , pit depth h , and pit diameter d ; The optimal combination of texture parameters are $d = 180\mu\text{m}$, $h = 20\mu\text{m}$, $w = 15\%$ and $v = 70\text{m}/\text{min}$.

Keywords: micro-texture; super-hard PCBN tool; valve seat ring; cutting temperature

1 引言

温度是影响金属切削性能的主要因素之一,温度升高可能加剧刀具磨损,最终影响加工材料的切削性能^[1,2]。为降低切削温度,使用切削液进行冷却和润滑,但切削液的使用对环境有不利影响,因此提出低温冷却和最小润滑量等新技术,其中表面织

构技术被证明在降低金属切削过程中切削温度方面大有前景^[3-5]。

刘欣^[6]在 WC-10Ni₃Al 刀具表面引入合理的微织构切削 Ti6Al4V 钛合金,研究发现微织构刀具能够有效降低切削温度,有助于切削热量更快消散;郑峰^[7]利用皮秒激光器制备出微凹槽织构刀具及微凹腔织构刀具,并在粗加工和精加工两种不同工况条件下进行铝合金材料的切削试验。结果表明,在精加工和粗加工条件下,微织构刀具能显著降低切

收稿日期: 2019年10月

- [6] Park K H, Beal A, Kim D. Tool wear in drilling of CFRP/Ti stacks using carbide and poly crystalline diamond tools[J]. *Wear*, 2011, 271(11-12): 28-35.
- [7] 俣部淳一郎. 精密加工振动切削: 基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [8] Xu J, Zhou L, Chen M, et al. Experimental study on mechanical drilling of carbon/epoxy composite-Ti6Al4V stacks[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34(7): 715-725.
- [9] Pecat O, Brinksmeier E. Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 1-7.
- [10] Cong W L, Pei Z J, Treadwell C. Preliminary study on rota-

ry ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(6): 1594-1602.

- [11] 李祥林. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1985.
- [12] 杨兆军, 王立江. 振动钻孔的国内外研究状况[J]. *吉林工业大学学报*, 1994, 24(2): 119-121.
- [13] 王贵成, 李海林, 王树林, 等. 低频振动攻丝丝锥动态角位移的研究[J]. *中国机械工程*, 2003(18): 70-72.
- 第一作者: 黄志平, 工程师, 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 621900 四川省绵阳市
- First Author: Huang Zhiping, Engineer, Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

削温度,精工条件下效果更好;Feng Y. 等^[8]在陶瓷刀具前刀面加工横向和纵向织构,对45钢进行切削试验。结果表明,随切削速度提高,切削温度升高。但与传统刀具相比,微织构刀具的切削温度有所降低,在纵向织构工具中观察到切削温度最大降低10.1%~12.3%。

本文在超硬刀具前刀面加工微织构,切削粉末冶金材料。利用正交试验法研究微织构参数对切削温度的影响,分析最优微织构参数组合。

2 微织构刀具设计与制备

微织构参数包括凹坑深度 h ,凹坑直径 d ,凹坑密度 w (每个因素有4个水平)与切削速度 v ,同时设计4因素4水平正交试验,见表1。

表1 正交试验方案设计

组号	切削速度 v (m/min)	凹坑直径 d (μm)	凹坑深度 h (μm)	凹坑密度 w (%)
1	70	80	20	10
2	70	130	50	15
3	70	180	120	20
4	70	230	90	25
5	90	80	50	20
6	90	130	20	25
7	90	180	90	10
8	90	230	120	15
9	110	80	120	25
10	110	130	90	20
11	110	180	20	15
12	110	230	50	10
13	130	80	90	15
14	130	130	120	10
15	130	180	50	25
16	130	230	20	20

按照表1所示正交试验设计方案采用YLP-F10型光纤激光打标机在型号为BN100的PCBN刀具前刀面上加工出圆形凹坑阵列构型的微织构。用超声波清洗机清洗织构刀具并自然晾干,使用KEYENCE基恩士VK-X120激光系统测量已加工表面的三维形貌,检测已加工织构的凹坑直径和凹坑深度是否符合试验方案要求。图1为加工完毕的织构刀具和微织构三维形貌图。参数测量合格的织构刀具采用ZT-90专用工具磨床进行刀具角度刃磨,刃磨角度见表2。

表2 PCBN刀具实际工作角度

圆弧半径 (mm)	前角 ($^{\circ}$)	后角 ($^{\circ}$)	刃倾角 ($^{\circ}$)	主偏角 ($^{\circ}$)	副偏角 ($^{\circ}$)
0.8	0	7	0	60	60

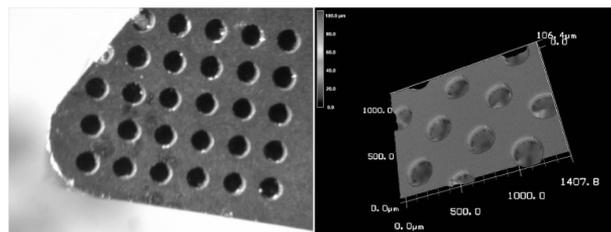


图1 微织构刀具及其三维形貌

3 切削试验及结果分析

在CA6140车床上使用PCBN微织构刀具对粉末冶金气门座圈进行车削试验。气门座圈为内径34mm、外径35.7mm、长8.45mm的圆环,切削用量:切削深度 $a_p=0.3\text{mm}$,进给量 $f=0.1\text{mm/r}$ 。切削速度分别为70m/min,90m/min,110m/min,130m/min。刀具实际切削角度见表2。机床配备3G3RX-A4075型高级通用型变频器,可使机床实现无极变速,以满足试验切削速度要求。使用FLIR-The RMOVISION A20红外热像仪测量切削温度。

3.1 切削热的产生与传出

切削消耗的能量可近似认为全部转化为切削热。切削热的来源主要有3个方面:切屑变形功、前刀面和切屑的摩擦功、后刀面和切削表面的摩擦功(见图2),对于正常磨损的刀具,后刀面与切削表面的摩擦功可忽略不计。其中切屑变形功是切削热的第一热源,从图中可以看出,这部分热量分别进入切屑和工件;前刀面和切屑的摩擦功是第二热源,这部分热量则进入了刀具和切屑中,因此降低前刀面和切屑的摩擦可有效降低切削温度。

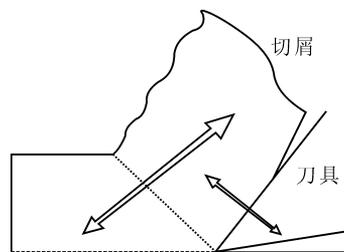


图2 切削热的产生和传导

切削热被工件、刀具、切屑和周围的介质导出,周围介质传出的热量一般在1%以下,分析计算时不予考虑。假设单位切削面积和单位时间的塑性变形产生的剪切热记为 q_s ,刀-屑界面单位时间、单位面积的摩擦热记为 q_γ ,传入工件、刀具和切屑的热量分别记为 q_w , q_t 和 q_c ,三部分热量可分别表示为

$$q_w = (1 - R_1) q_s \quad (1)$$

$$q_c = R_1 q_s + R_2 q_\gamma \quad (2)$$

$$q_i = (1 - R_2)q_\gamma \quad (3)$$

式中, R_1 为剪切热进入切屑的百分数; R_2 为摩擦热进入切屑的百分数。

3.2 织构参数及切削速度对切削温度的影响

采用红外热像仪法获得前刀面上刀-屑接触区切削温度, 温度测量设备为 FLIR-The RMOVISION A20 红外热像仪, 织构刀具的切削温度测量试验结果见表 3。

表 3 织构刀具的切削温度测量试验结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
切削温度 θ (°C)	135	149	162	165	182	158	141	135
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
切削温度 θ (°C)	164	168	164	172	149	164	158	153

从表 3 可以看出, 第 5 组试验切削温度值最高, $\theta = 182^\circ\text{C}$; 第 1 组试验切削温度值最低, $\theta = 135^\circ\text{C}$ 。用正交试验的直观分析对切削温度 θ 进行分析, 结果见表 4。

表 4 切削温度的直观分析结果

因素	切削速度 v (m/min)	凹坑直径 d (μm)	凹坑深度 h (μm)	凹坑密度 w (%)
	\bar{A}_1	152.8	157.5	152.5
\bar{A}_2	154.0	159.8	165.3	149.3
\bar{A}_3	167.0	156.3	156.3	166.3
\bar{A}_4	156.0	156.3	155.8	161.3
\hat{R}	14.3	3.5	12.8	17.0
影响程度	$w > v > h > d$			

从表 4 可以看出, 切削速度 v 、凹坑直径 d 、凹坑深度 h 和凹坑密度 w 各因素对切削温度 θ 的影响依次为 $w > v > h > d$, 其中凹坑直径 d 的极差值 $\hat{R} = 3.5$, 远小于其他 3 个因素的极差值, 说明 d 对切削温度 θ 的影响最小。

(1) 切削速度对切削温度的影响

从图 3 可以看出, 随着切削速度 v 增大, 切削温度 θ 先增大后减小, 当切削速度 $v = 110\text{m/min}$ 时, 切削温度 θ 最大。原因是切削速度 v 在 $[70, 110]$ 区间时, 随着 v 的增大, 单位时间内金属切削量、剪切热和前刀面的摩擦热同时增加, 切削热来不及向切屑和刀具内部传导, 导致切削温度 θ 不断上升; 而当 $v > 110\text{m/min}$ 时, θ 随 v 的增大而减小, 原因是随着 v 增大, R_1 和 R_2 增大, 切屑带走的热量所占比例更高, 剪切角 φ 增大, 切屑塑性变形减小, 单位切削体积的切削功下降, 综合导致切削温度 θ 降低。

(2) 凹坑直径对切削温度的影响

由图 4 可知, 切削温度 θ 随凹坑直径 d 的增大, 呈整体减小的趋势。但在直观分析中, 因素 d 的极差值 $\hat{R} = 3.5$, 故 d 对 θ 的影响不大。凹坑直径与凹

坑密度共同影响切屑与前刀面的接触长度, 接触长度的减小有利于降低切削力和切削温度。单个凹坑直径对接触长度的影响有限, 整体平均接触长度由凹坑密度决定。因此凹坑直径对切削温度的影响不显著。

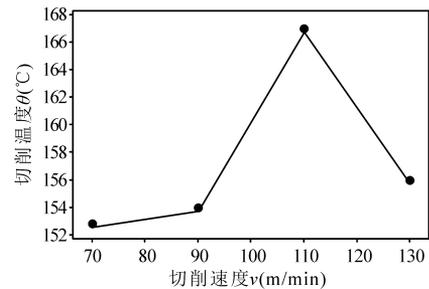


图 3 切削速度对切削温度的影响趋势

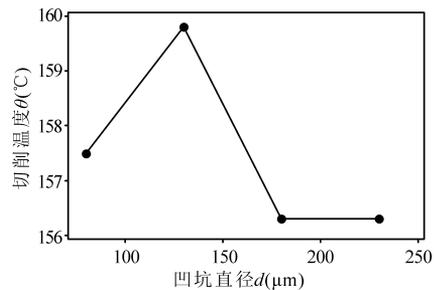


图 4 凹坑直径对切削温度的影响趋势

(3) 凹坑深度对切削温度的影响趋势

如图 5 所示, 切削温度 θ 随凹坑深度 h 的增大, 呈总体增大的趋势, 凹坑深度的增加不利于切削温度的降低。凹坑深度过小时, 不利于减小刀-屑接触长度和刀-屑摩擦热, 因而不利于切削温度的减小。但是凹坑深度的增大对刀具强度有显著影响, 过大的凹坑深度严重破坏刀具强度, 使得刀具更易崩刃, 加剧刀具磨损, 增大切削热。因此, 凹坑深度应选择合适水平, 试验条件下 $20\mu\text{m}$ 最优。

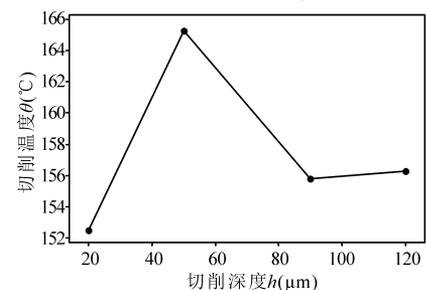


图 5 凹坑深度对切削温度的影响趋势

(4) 凹坑密度对切削温度的影响趋势

如图 6 所示, 随着凹坑密度 w 的增大, 切削温度 θ 呈先减小后增大的趋势, 凹坑密度 w 的极差值 \hat{R} 在 4 个因素中最大, 对切削温度影响显著。凹坑密度 $w < 20\%$, 切削温度随凹坑密度增大而减小。

增大凹坑密度一方面可以减小刀-屑接触长度^[9]和前刀面的摩擦热;另一方面可以增大刀具前刀面与空气的接触面积,加快散热,降低切削温度。当凹坑密度大于20%时,切削温度随凹坑密度的增大而增大。虽然凹坑密度的增大减小了刀-屑接触面积和前刀面的摩擦热,但是凹坑密度的增大使刀具结构强度受到严重破坏,应力集中的可能性大幅增大,单位切削力增大,导致产生的切削热增大,使切削温度增加。

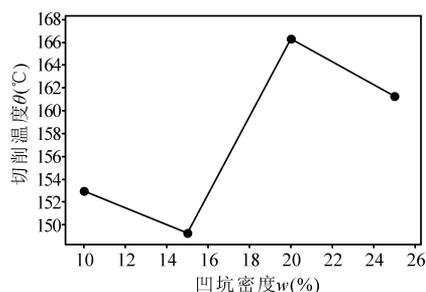


图6 凹坑密度对切削温度的影响趋势

综上所述,要获得最佳的切削温度 θ 应选择较低的切削速度 v 、较大的凹坑直径 d 、较小的凹坑深度 h 和较小的凹坑密度 w ,在试验条件下的最优组合为 $w = 15\%$, $h = 20\mu\text{m}$, $d = 180\mu\text{m}$, $v = 70\text{m}/\text{min}$ 。

4 结语

使用前刀面加工具有圆形凹坑阵列微织构的PCBN超硬刀具车削粉末冶金气门座圈。以切削温度为试验指标,研究织构参数和切削速度对切削温度的影响,通过分析获得合理的微织构参数。主要结论如下:

(1) 试验各因素对切削温度的影响显著性依次为凹坑密度 $w >$ 切削速度 $v >$ 凹坑深度 $h >$ 凹坑直径 d ,最优的织构参数组合是 $w = 15\%$, $h = 20\mu\text{m}$, $d = 180\mu\text{m}$, $v = 70\text{m}/\text{min}$ 。

(2) 随着切削速度 v 的增大,切削温度 θ 先增大后减小,但应优先选择较小的切削速度。

(3) 直观分析中凹坑直径 d 的极差值 $\hat{R} = 3.5$,远小于其他3个因素,在试验条件下 d 对 θ 的影响

很小;切削温度 θ 随着凹坑深度 h 的增大,呈增大趋势;随着凹坑密度 w 的增大,切削温度 θ 先减小后增大,原因在于微织构可减小刀-屑接触长度和前刀面的摩擦热,但是随着凹坑密度的增大,刀具结构强度受到影响,导致单位切削力增加,切削温度升高。

试验发现部分刀具出现崩刃现象,原因可能是织构与主切削刃的距离过近,对刀具切削刃强度造成破坏,后续研究会将织构到主切削刃的距离作为织构参数;另一方面后续研究将会更多地考虑采用固体润滑剂,以更加充分发挥微织构的作用。

参考文献

- [1] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1993:99.
- [2] 张维纪. 金属切削原理及刀具[M]. 杭州:浙江大学出版社,1991:42.
- [3] 冯新敏,裴泽,胡景姝,等. 微织构刀具研究现状[J]. 制造技术与机床,2018(7):29-35.
- [4] 段冉,邓建新,孙婕,等. 微织构刀具及其切削加工[J]. 制造技术与机床,2018(9):23-29.
- [5] Priya Ranjan, S S Hiremath. Role of textured tool in improving machining performance: a review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43:47-73.
- [6] 刘欣. 表面微织构 WC-10Ni₃Al 刀具切削 Ti6Al4V 的磨损特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- [7] 郑峰. 激光微织构对高速钢刀具切削温升的影响研究[D]. 江苏:江苏大学,2018.
- [8] Feng Y, Zhang J, Wang L, et al. Fabrication techniques and cutting performance of micro-textured self-lubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of Al₂O₃-TiC [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2017, 68:121-129.
- [9] 邓建新. 微织构刀具及其切削加工[M]. 北京:科学出版社,2018.
第一作者:杨海东,博士,副教授,合肥工业大学机械工程学院,230009 合肥市
First Author: Yang Haidong, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China