

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.01.006

铣削硬质合金时的材料脆延转变特性试验研究

史卫奇, 赵威, 李浩, 蒋涛, 李亮

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 硬质合金是一种难加工材料, 具有很高的硬度、强度、耐磨性和耐腐蚀性。为了实现硬质合金材料的高效精密切削加工, 本文以聚晶金刚石 (Polycrystalline diamond, PCD) 刀具铣削 WC-15Co 硬质合金为研究对象, 基于 Bifano 切削厚度模型计算出 WC-15Co 的临界切削厚度, 进而与切削参数对应的最大切削厚度比较, 初步确定了被加工材料脆性域切削与延性域切削共存的跨域铣削参数范围。在此基础上, 通过高速铣削试验, 分析了每齿进给量、径向切削深度和切削速度等切削参数对试件已加工表面质量和切削力等的影响, 并探讨了其作用机理。结果表明: 在跨域铣削参数下, 即当切削速度为 300 m/min 时, 控制每齿进给量在 $11 \mu\text{m}/\text{z}$ 以内, 径向切削深度小于 1 mm, 可以获得延性域切削表面, 此时表面粗糙度小于 $0.2 \mu\text{m}$, 表面无明显脆性破坏缺陷, 材料去除率最高可达到 $157 \text{mm}^3/\text{min}$, 显著高于纯延性域切削时的 $43 \text{mm}^3/\text{min}$ 。

关键词: 硬质合金; 跨域铣削; 脆延转变; 临界切厚; 表面粗糙度

中图分类号: TG506

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)01-0065-06

Experimental Study on Material Brittle-Ductile Transition Characteristics During Milling of Cemented Carbide

SHI Weiqi, ZHAO Wei, LI Hao, JIANG Tao, LI Liang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Cemented carbide is a kind of hard to process material with high hardness, strength, wear resistance and corrosion resistance. In order to achieve efficient and precise cutting of hard alloy materials, this paper takes polycrystalline diamond (PCD) tool milling of WC-15Co hard alloy as the research object. Based on the Bifano cutting thickness model, the critical cutting thickness of WC-15Co is calculated, and then compared with the maximum cutting thickness corresponding to the cutting parameters. The range of cross-domain milling parameters for the coexistence of brittle-domain cutting and ductile-domain cutting of the processed material is preliminarily determined. On this basis, through high-speed milling experiments, the effects of cutting parameters such as feed rate per tooth, radial cutting depth, and cutting speed on the machined surface quality and cutting force of the specimen are analyzed, and the mechanisms are explored. The results show that under the cross-domain milling parameters, that is, when the cutting speed is 300 m/min, the cutting rate per tooth is controlled within $11 \mu\text{m}/\text{z}$ and the radial cutting depth is less than 1 mm. The cutting surface in the ductile-domain can be obtained, the surface roughness is less than $0.2 \mu\text{m}$, and there is no obvious brittle damage defect on the surface. The highest material removal rate can reach $157 \text{mm}^3/\text{min}$, significantly higher than that of the $43 \text{mm}^3/\text{min}$ during the pure ductile-domain cutting.

基金项目: 国家自然科学基金(51975289)。

收稿日期: 2023-10-12; **修订日期:** 2023-12-01

通信作者: 赵威, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: nuaazw@nuaa.edu.cn。

引用格式: 史卫奇, 赵威, 李浩, 等. 铣削硬质合金时的材料脆延转变特性试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(1): 65-70. SHI Weiqi, ZHAO Wei, LI Hao, et al. Experimental study on material brittle-ductile transition characteristics during milling of cemented carbide[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(1): 65-70.

Key words: cemented carbide; cross-domain milling; brittle-ductile transition; critical cutting thickness; surface roughness

硬质合金材料主要由高硬度和高熔点的碳化物(如 WC、TiC、TaC)粉末和金属粘结剂(如 Co、Ni、Mo 等)经高压成形和高温烧结而成,因而具有高硬度、耐磨、强度较好、耐热和耐腐蚀等优良性能,广泛应用于航天航空、机械制造、石油钻井、岩凿盾构和半导体电路等领域^[1-2]。然而硬质合金是硬脆性材料,在切削加工时切削区材料承受的应力很容易超过强度极限从而发生脆性破坏,即脆性域切削,虽然采用较小的切削参数可以通过材料的脆/延转变^[3]而获得延性域切削加工表面,但加工效率较低。因此,硬质合金的高效精密加工一直是机加工领域亟需解决的难题之一。

跨域铣削是指在延性域切削和脆性域切削共存的条件下去除材料,并获得延性切削表面的铣削加工方法。脆/延转变一方面是指材料去除时由脆性域去除模式向延性域去除模式的转变;另一方面是指实现脆性材料的延性域加工,即通过合理选择铣削过程中的加工参数,以控制已加工表面损伤程度,在材料延性域去除和脆性域去除双重模式下获得延性域机加工表面。

在脆硬材料加工的脆/延转变研究方面,Blake 等^[4]较早开展了精密车削脆性材料单晶锆的试验研究,成功实现了单晶锆的脆/延转变,获得延性域加工表面。Bifano 等^[5]根据压痕试验和格里菲斯断裂力学理论,提出了脆性材料的脆/延转变临界切削厚度模型,认为可以采用较小的进给量实现脆性材料的延性域加工。Chai 等^[6]进行了 4H-SiC 纳米压痕试验,并通过 Bifano 的模型计算出 4H-SiC 的理论临界切深为 91.7 nm,计算结果与试验结果表现出高度一致。Nakasuji 等^[7]从力学的观点解释了脆/延转变机制,并建立了临界切削厚度分析模型。Liu 等^[8]以 WC-9Co 硬质合金作为研究对象,结合临界切削厚度模型,发现当切削厚度小于某一临界值时,可以获得延性域加工表面,当切削厚度大于该临界值时,硬质合金的主要去除方式为脆性断裂,其表面质量相对较差。

近年来,杨启^[9]进行了介观尺度切削 WC-18Co 的仿真与试验研究,分析表面粗糙度以及刀具磨损,进而优选出最佳加工参数,进行了切削硬质合金模具的铣削试验验证,获得的表面粗糙度为 0.131 μm 。薛建勋^[10]对硬脆材料氧化锆进行了铣削试验研究,分析并计算出氧化锆陶瓷的脆/延转变临界切削厚度为 1.6 μm ;切削速度的提高有利于延性域加工表面的获得。卞荣^[11]测算了两种氧化锆陶瓷的脆/延转变临界切削厚度为 2.72 μm 和 2.42 μm ,并开展了精密切削氧化锆试

验研究,控制最大切削厚度小于临界切削厚度,获得了氧化锆的延性域加工表面,表面粗糙度稳定小于 0.08 μm 。徐伟民等^[12]在用聚晶金刚石(Polycrystalline diamond, PCD)刀具铣削 WC-15Co 时发现,每齿进给量和铣削深度的增大会导致表面粗糙度上升。吴贤^[13]使用 PCD 刀具微细铣削硬质合金发现,当切削厚度在 2 μm 以下时,表面粗糙度可以控制在 0.151 μm 以下。

综上所述,现有切削硬脆性材料的加工方法主要是控制材料在单一延性域去除模式下被切除,虽然可以获得延性域加工表面,但是切削参数数值偏小,材料去除率和加工效率偏低,因此有必要进行跨域铣削硬质合金材料的试验研究。

1 跨域铣削模型

国内外学者提出了计算临界切削厚度(简称临界切厚)的若干理论模型,其中较为经典的是 Bifano 等在 1991 年建立的模型^[5],该模型的表达式为

$$d_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (1)$$

式中: d_c 表示临界切削厚度; E 表示弹性模量; H 表示维氏硬度; K_c 表示断裂韧性。

对于硬质合金 WC-15Co,可查证 K_c 为 8.815 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, E 为 524.06 GPa, H 为 14.26 GPa^[14-15]。通过式(1)最终可求得 WC-15Co 的临界切削厚度 $d_c = 2.106 \mu\text{m}$ 。

与此同时,对于侧刃立铣削(图1),可建立最大切削厚度(简称最大切厚)为

$$h_{\max} = r - \sqrt{r^2 + f_z^2 - 2f_z \sqrt{2ra_c - a_c^2}} \quad (2)$$

式中: h_{\max} 为最大切厚; r 为刀具的半径; a_c 为径向切削深度; f_z 为每齿进给量。

综合式(1, 2),将计算的临界切厚与最大切厚进行对比,当临界切厚大于最大切厚时可以认为材料为延性去除,反之则为脆性去除。

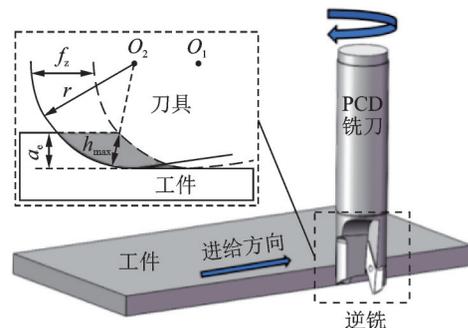


图1 铣削示意图

Fig.1 Milling schematic diagram

对于跨域铣削,其核心思想主要是认为脆性材料的延性域加工并没有必要在整个切削过程中材料都要以塑性变形的方式去除,只要接近已加工表面的那一部分材料是通过塑性去除,即可获得延性域切削表面。因此,通过该方法一方面可保证切削区材料靠近

已加工表面层处于延性域切削区;另一方面,则在保证较大切厚处因脆性破坏产生的裂纹没有扩展到已加工表面层的前提下,尽可能增大每齿进给量或切削深度,由于这些裂纹将会在后续刀齿切削时被去除,仍可以得到光滑表面,如图2所示。

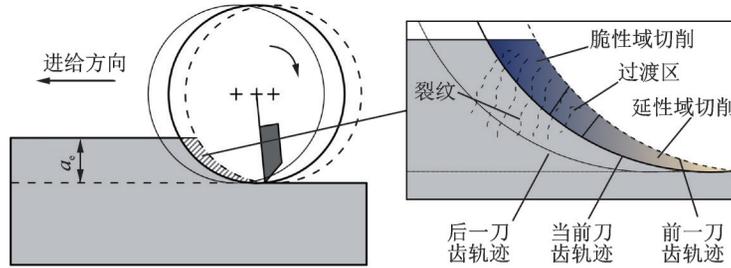


图2 跨域铣削示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross-domain milling

2 硬质合金跨域铣削试验

试验材料为 WC-15Co 硬质合金,尺寸为 20 mm×15 mm×1.2 mm,如图3(a)所示。切削刀具为 PCD 双刃机夹立铣刀,如图3(b)所示,直径为 16 mm,前角 0°,后角 15°,螺旋角 0°,刃口半径为 $(10\pm 2)\mu\text{m}$ 。



(a) WC-15Co workpiece (b) PCD milling cutter

图3 硬质合金工件及PCD铣刀

Fig.3 Carbide workpiece and PCD milling cutter

在干切条件下,采用侧铣(逆铣)方式,跨域铣削试验采用单因素试验,切削参数见表1,轴向切深为 1.2 mm,即试件的厚度。由式(2)计算得到切削参数对应的最大切厚 h_{max} 范围为 1.898~6.444 μm 。由式(1)计算出 WC-15Co 临界切厚为 2.106 μm ,在

切削厚度区间 $[0, h_{\text{max}}]$ 之内,满足跨域铣削硬质合金的要求。试验后,使用超声波清洗仪去除表面杂质,使用三维形貌仪测量表面粗糙度 S_a ;采用 HIT-ACHI 扫描电子显微镜观察表面形貌;采用 Kistler 测力仪测量切削力。

表1 跨域铣削试验参数

Table 1 Cross-domain milling test parameters

| 切削速度 $v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 每齿进给量 $f_z/(\mu\text{m}\cdot\text{z}^{-1})$ | 径向切削深度 a_c/mm | 最大切厚 $h_{\text{max}}/\mu\text{m}$ |
|---|---|------------------------|------------------------------------|
| 300 | 5、7、9、11、13、15、17 | 0.6 | 1.90、2.65、3.42、4.17、4.93、5.68、6.44 |
| 300 | 11 | 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 | 2.44、3.43、4.17、4.79、5.32 |
| 75、150、300、400、500 | 11 | 0.6 | 4.17 |

3 试验结果及分析

3.1 切削力分析

切削参数对切削力的影响如图4所示。其中, F_x 表示进给分力, F_y 表示径向分力, F_z 表示轴向分力。由图4(a, b)可知,切削力随每齿进给量和径向切削深度的增大而增大。这主要是由于随着每齿进给量和径向切削深度的增大,单位时间内每齿的切削厚度变大,刀具与材料之间的挤压和摩擦也相应增加,相应的铣削力不断增大。轴向分力 F_z 较小的原因侧铣加工使用侧切削刃去除材料,刀具的底部刀尖圆弧实际不参与切削,且刀具螺旋角为 0°。

通过图4(c)可以发现,随着切削速度的增大,切削力呈现出先减小再增大的趋势。切削速度对切削力的影响主要有以下两方面:一方面,铣削速度的提高造成刀/工、刀/屑间的摩擦和挤压作用也相应增加,从而导致切削力的增大;另一方面,刀/工、刀/屑间的摩擦和挤压作用亦会产生大量的切削热,切削区域温度增大,形成局部热软化,且硬质合金在高温下很容易发生氧化,形成 WO_3 、 CoWO_4 和 Co_3O_4 ,导致材料的硬度减小,进而造成切削力的降低^[16]。切削力的最终的变化趋势则是上述两种原因综合作用的结果。在干切削条件下,当切削速度小于 300 m/min 时,随着切削速度的提高,后一种作用占优势,因此切削力呈下降趋势;当切削

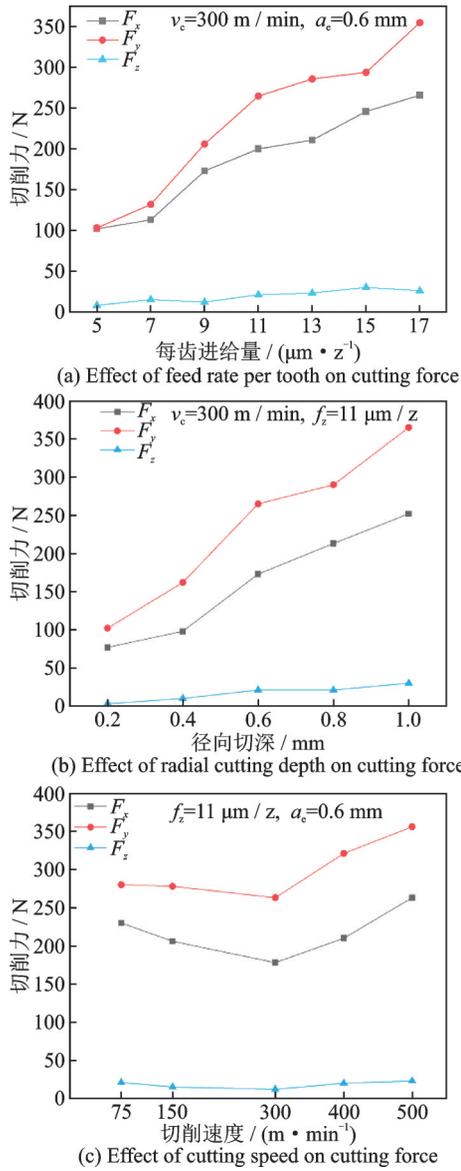


图4 切削参数对切削力的影响

Fig.4 Effect of cutting parameters on cutting force

速度大于 300 m/min 时,随着切削速度的提高,前一种作用占主导作用,导致切削力随切削速度的增大而增加。

3.2 已加工表面质量分析

图5为切削参数对表面粗糙度的影响测试结果。由图5(a)可以看出,每齿进给量对表面粗糙度的影响较为显著。当每齿进给量为 $5 \mu\text{m/z}$ 时,最大切厚仅为 $1.89 \mu\text{m}$,此时为纯延性切削,虽然此时的表面粗糙度均处于 $0.15 \mu\text{m}$ 以下,但材料去除率只有 $43 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。当每齿进给量逐渐增大时,表面粗糙度缓慢上升,然而每齿进给量从 $11 \mu\text{m/z}$ 上升至 $13 \mu\text{m/z}$ 时,粗糙度上升的幅度较大,这是因为每齿进给量在 $13 \mu\text{m/z}$ 时,裂纹已经扩展到已加工表面,形成较多的表面加工缺陷。图5(b)表明随径向切削深度的增大,表面粗糙度也在增大,但增速较缓,这说明影响裂纹向下扩展深度

的主要因素是每齿进给量。因此,控制每齿进给量在 $11 \mu\text{m/z}$ 以内,即使增大径向切削深度至 1 mm ,也可以控制表面粗糙度在 $0.2 \mu\text{m}$ 以下,此时的材料去除率最大可达 $157 \text{ mm}^3/\text{min}$ 。

通过图5(c)发现,随着切削速度的增加,加工表面的粗糙度先减小再趋于平缓,主要原因是干切条件下,当切削速度增加到一定程度,刀具切削工件产生切削热,导致切削区域温度增加,促进工件材料软化,使加工过程更容易,减小了表面粗糙度值。当切削速度超过 300 m/min 时,切削速度的提高对于表面粗糙度的影响趋于平缓,这是因为切削速度的增大不仅提高了切削力,还导致了刀具的磨损加剧^[17],在与增加材料塑性的共同作用下,最终使表面粗糙度变化趋于平缓。

图6为4组加工参数下的表面SEM图片,由图6(a)可以发现,即使最大切厚 $2.66 \mu\text{m}$ ($a_e=$

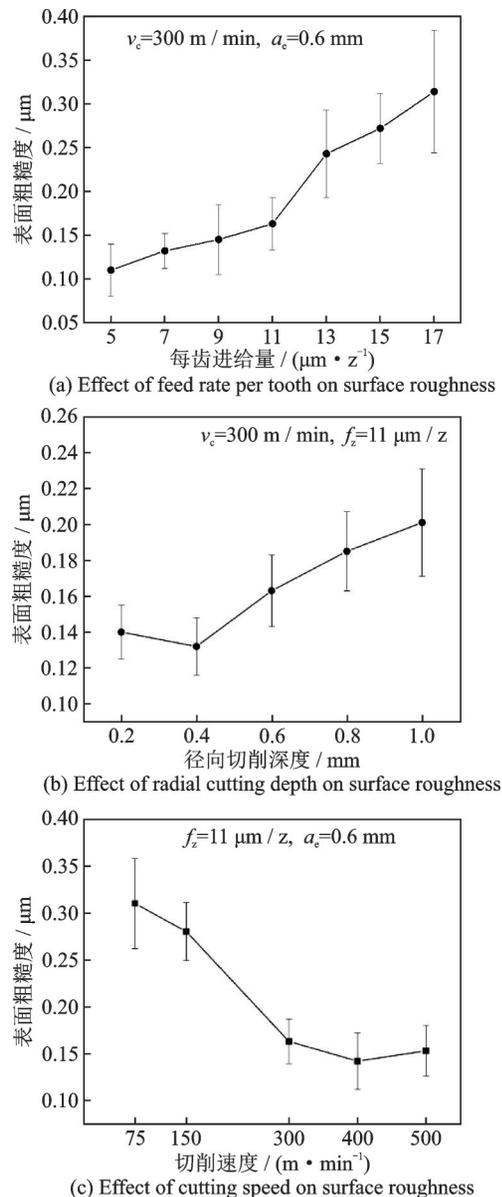


图5 加工参数对表面粗糙度的影响

Fig.5 Effect of processing parameters on surface roughness

0.6 mm, $f_z=9 \mu\text{m}/z$) 已经超过了临界切厚,但是表面的粗糙度仅为 $0.14 \mu\text{m}$,依然处于较低的水平,表面主要存在一些粘结剂的涂覆以及一些小孔洞,这些孔洞主要是因为成型剂与硬质合金粉末不能完全地吸附所产生,一般对硬质合金的性能不会产生影响^[18]。因此,可以认为在此加工参数下裂纹并未扩展到已加工表面。

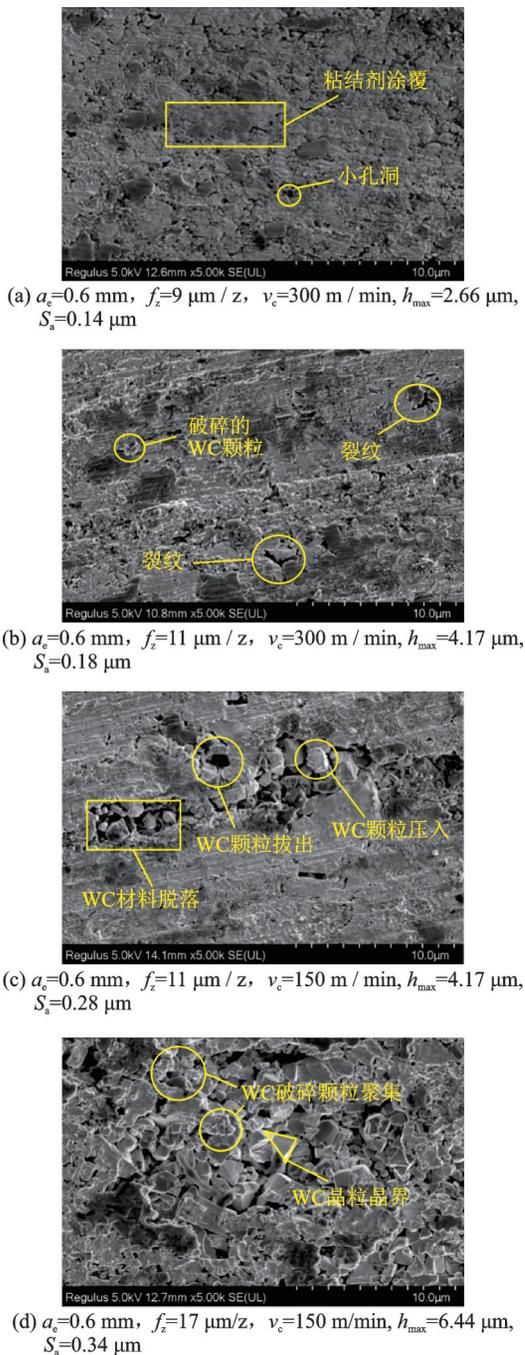


图 6 4种加工参数下的表面 SEM 图片

Fig.6 Surface SEM images under four processing parameters

由图 6 (b) 可以发现,当最大切厚增大到 $4.17 \mu\text{m}$ ($a_c=0.6 \text{ mm}$, $f_z=11 \mu\text{m}/z$) 时,此时虽然表面粗糙度为 $0.18 \mu\text{m}$,但加工表面已经出现了些许

微裂纹,并且可以观察到破碎的 WC 小颗粒。然而如图 6 (c) 所示,当切削速度从 300 m/min 降低到 150 m/min 时,尽管最大切厚保持 $4.17 \mu\text{m}$ 不变,此时的表面粗糙度已经增大到 $0.28 \mu\text{m}$,并且在表面可以清楚观察到大面积的 WC 材料的脱落,以及 WC 颗粒的拔出与压入。这主要是因为切削速度的降低使得刀具在加工的过程中需要更大的切削力,当切削力较大时很容易使 WC 材料中的晶粒整个拔出,随后这些脱落或者破碎 WC 颗粒会被刀具重新压入已加工表面形成凸起。

由图 6 (d) 可以看出,当最大切厚增到 $6.44 \mu\text{m}$ ($a_c=0.6 \text{ mm}$, $f_z=17 \mu\text{m}/z$) 时,表面粗糙度已经增大到了 $0.34 \mu\text{m}$,可以发现已加工表面粘结剂的涂覆相对较少,存在大量的 WC 破碎颗粒的聚集,还能观察到 WC 晶粒的晶界,此时可以认为是延晶断裂的材料去除方式导致的表面脆性破坏。

4 结 论

本文通过单因素试验分析了每齿进给量、切削速度和径向切削深度 3 种加工参数对 WC-15Co 材料的切削力和表面质量的影响,结论如下:

(1) WC-15Co 硬质合金的临界切厚为 $2.106 \mu\text{m}$ 。若保持切削速度为 300 m/min ,并控制每齿进给量在 $11 \mu\text{m}$ 以内,即使增大径向切削深度至 1 mm ,仍然可以得到表面粗糙度小于 $0.2 \mu\text{m}$ 的加工表面,此时的铣削方式为脆性域与延性域共存的跨域铣削。

(2) 随着每齿进给量和径向切削深度的增大,切削力逐渐增大;随着切削速度的增大,由于热软化效应和挤压摩擦效应交互作用,切削力呈现出先减小再增大的趋势。

(3) 表面粗糙度会随着每齿进给量和径向切削深度的增大而增大,但是径向切削深度对表面粗糙度的影响较每齿进给量弱。

(4) 随着切削速度的增大,表面粗糙度先减小再保持平稳。切削速度为 300 m/min 时可以得到较好的表面粗糙度和较低的切削力。

(5) 硬质合金材料的延性切削去除的主要表现形式为塑性流动以及刀具对工件产生的微切削。随着每齿进给量的增大,硬质合金的脆性去除主要表现为裂纹扩展、晶粒脱落和晶粒破碎。

参考文献:

- [1] 牛勇, 陆柏贤, 黄伟, 等. 塑性成形模具用硬质合金的研究进展[J]. 模具工业, 2022, 48(9): 1-9.
NIU Yong, LU Boxian, HUANG Wei, et al. Research progress of cemented carbide for plastic forming

- die[J]. Die & Mould Industry, 2022, 48(9): 1-9.
- [2] 赖志伟, 王成勇, 郑李娟, 等. 硬质合金激光加工研究进展[J]. 硬质合金, 2022, 39(5): 335-349.
LAI Zhiwei, WANG Chengyong, DENG Lijuan, et al. Research progress of laser processing of cemented carbide[J]. Cemented Carbides, 2022, 39(5): 335-349.
- [3] LIU K, LI X P, RAHMAN M. Characteristics of ultrasonic vibration-assisted ductile mode cutting of tungsten carbide[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(7/8): 833-841.
- [4] BLAKE P, BIFANO T G, DOW T A, et al. Precision machining of ceramic material[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1988, 67(6): 1038-1044.
- [5] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1991, 113: 184-189.
- [6] CHAI P, LI S, LI Y. Modeling and experiment of the critical depth of cut at the ductile-brittle transition for a 4H-SiC single crystal[J]. Micromachines, 2019, 10(6): 382-395.
- [7] NAKASUJI T, KODERA S, HARA S, et al. Diamond turning of brittle materials for optical components[J]. Annals of the CIRP, 1990, 39(1): 89-92.
- [8] LIU K, LI X P. Ductile cutting of tungsten carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113: 348-354.
- [9] 杨启. 介观尺度切削硬质合金 YG18 的仿真与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
YANG Qi. Simulation and experimental study on the meso-scale cutting of tungsten carbide YG18[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [10] 薛建勋. 氧化锆陶瓷高速铣削基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
XUE Jianxun. Research on high-speed milling of zirconia ceramics[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [11] 卞荣. 金刚石微铣刀精密铣削氧化锆陶瓷基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
BIAN Rong. Research on precision milling of zirconia ceramics by micro diamond end mills[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] 徐伟民, 金伟, 施斐炯, 等. PCD 刀具铣削 YG15 硬质合金的试验研究[J]. 工具技术, 2021, 55(12): 43-46.
XU Weimin, JIN Wei, SHI Feijong, et al. Experimental study on milling of YG15 cemented carbide with PCD[J]. Tool Engineering, 2021, 55(12): 43-46.
- [13] 吴贤. 激光氧化辅助微细铣削硬质合金的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WU Xian. Fundamental research on laser oxidation assisted micro milling of cemented carbide[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [14] 聂洪波. 三点弯曲法测试硬质合金弹性模量[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 15(6): 606-610.
NIE Hongbo. Determination of elastic modulus of cemented carbides by three-point bend tests[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2010, 15(6): 606-610.
- [15] LAUGIER M T. Palmqvist toughness in WC-Co composites viewed as a ductile/brittle transition[J]. Journal of Materials Science Letters, 1987, 6(7): 768-770.
- [16] 罗学全, 于涛, 瞿峻, 等. 硬质合金的成分对其高温抗氧化性和高温硬度的影响[J]. 硬质合金, 2023, 40(4): 263-270.
LUO Xuequan, YU Tao, QU Jun, et al. Effects of chemical compositions on oxidation resistance and hardness of cemented carbides at high temperatures[J]. Cemented Carbides, 2023, 40(4): 263-270.
- [17] LIU K, LI X P, RAHMAN M, et al. CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide[J]. Wear, 2003, 255: 1344-1351.
- [18] 颜杰, 邵旭, 唐楷. 硬质合金鼓泡与孔洞产生的原因分析及处理方法[J]. 湖南有色金属, 2010, 26(3): 33-38.
YAN Jie, SHAO Xu, TANG Jie. The reasons of swollen bubbles and holes left in cemented carbides and solve approaches[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2010, 26(3): 33-38.

(编辑: 胥橙庭)