

磨削参数对硬质合金刀片圆弧表面锯齿的影响

黄向明^{1†}, 刘涛¹, 曾滔², 王友伟², 汤爱民², 袁美娟², 李尧¹

(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 株洲钻石切削刀具股份有限公司, 湖南株洲 412000)

摘要:为了控制硬质合金刀片圆弧刃处的表面质量,通过分析单颗磨粒与工件的接触长度和最大未变形切屑厚度的关系,建立了其磨削力学模型.基于正交试验的方法,对该硬质合金刀具进行不同磨削参数的加工实验,并采用 VHX-600 超景深光学显微镜等观测仪器对刀具圆弧面的锯齿深度和表面粗糙度进行观测.结合圆弧刃的磨削力学模型和实验加工结果,并基于锯齿成型机理分析了不同磨削参数、刀片材料以及结构等对刀片圆弧的锯齿及粗糙度的影响规律.结果表明,提高砂轮转速、降低圆弧转动速度、减小磨削深度、控制刀片材料的质量、合理设计刀片结构可以提高刀片圆弧处的表面质量,提高刀具的耐用度.砂轮磨削圆弧转动速度为 24 m/s、圆弧转动速度为 8 °/s、磨削深度为 0.05 mm 时磨削效果较佳,可以获得较小的磨削力、锯齿深度及表面粗糙度.

关键词:硬质合金刀片;磨削力;磨削参数;圆弧面;锯齿;表面粗糙度

中图分类号:TH162

文献标志码:A

Effect of Grinding Parameters on Saw Tooth of Arc Surface of Cemented Carbide Blades

HUANG Xiangming^{1†}, LIU Tao¹, ZENG Tao², WANG Youwei², TANG Aimin², YUAN Meijuan², LI Yao¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082;

2. Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412000)

Abstract: In order to control the surface quality of arc edge of the cemented carbide blade, a grinding mechanical model was established by analyzing the relationship between the contact length of a single abrasive particle and the work-piece and the maximum thickness of undeformed chip. Based on the orthogonal experiment method, the machining experiments of the carbide tool with different grinding parameters were carried out, and the saw tooth depth and surface roughness of the tool arc surface were observed by VHX-600 ultra-deep field optical microscope and other observation instruments. Based on the grinding mechanical model and experimental machining results of the arc blade, as well as the saw tooth forming mechanism, the saw tooth and roughness of the arc blade affected by different grinding parameters, blade material and structure were analyzed. The results show that the surface quality and tool durability can be improved by increasing wheel speed, reducing arc rotation speed, reducing grinding depth, controlling the quality of blade material and designing blade structure reasonably. The grinding effect is better when the

* 收稿日期:2021-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51975203), National Natural Science Foundation of China(51975203);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30113), Natural Science Foundation of Hunan Province(2021JJ30113)

作者简介:黄向明(1971-),男,博士,湖南宁乡人,湖南大学教授

† 通信联系人, E-mail: h_xiangming@aliyun.com

grinding speed of the wheel is 24m/s, the speed of the wheel is $8^\circ/\text{s}$, and the grinding depth is 0.05mm, and meanwhile, the grinding force, serrations and surface roughness are smaller.

Key words: carbide blade; grinding force; grinding parameters; arc surface; saw tooth; surface roughness

钨钴硬质合金是由硬质相 WC 及黏结相 Co 通过粉末冶金方式得到的一种高硬度、耐磨的合金材料,在金属切削工具、钻削、复合材料加工等方面有着重要的应用^[1]. 近年来我国刀具大多来源于进口或者仿制,而高精尖的需求又使得硬质合金刀具更加精密化^[2]. 硬质合金一般采用磨削加工方式^[3]. 磨削过后的刀具表面通常会出现裂纹、振纹、钴浸出、烧伤等,刃口出现毛边、缺口等缺陷,直接影响了刀具性能^[4-7].

近年来关于硬质合金刀具的磨削工艺研究主要集中在磨削去除机理、磨削工艺参数以及材料组织对表面质量的影响等方面. 詹友基^[8]采用金刚石砂轮对五种不同显微结构、不同特性的硬质合金进行磨削实验,通过观测磨削后的表面形貌,发现硬质合金材料去除分为塑性去除和脆性去除,不同类型的硬质合金去除方式有所不同. 原一高等^[9]对超细硬质合金进行磨削,发现材料去除方式与磨削参数及硬质合金的显微结构有关. 李文忠^[10]采用超声振动对硬质合金进行磨削加工,使材料在加工时发生脆塑转化,降低了磨削力. 柳文阳等^[11]使用不同结合剂的金刚石砂轮磨削硬质合金数控刀片,发现金属结合剂砂轮磨削的刀片能获得较好的尺寸一致性、表面粗糙度值. 许鹏飞等^[12]采用 D46 和 D64 两种不同粒度的树脂结合剂金刚石砂轮磨削不同前角的切槽刀片,发现砂轮粒度主要对断屑槽处的表面粗糙度产生较大影响,前角越大,刃口越易产生缺陷. 何荣跃等^[13]发现采用合适粒度的砂轮和磨削余量磨削硬质合金刀具,能够减小刃口崩缺的状况. 熊建武等^[14]对不同硬质合金刀片研磨后的刀刃状态进行对比研究,发现研磨条件及刀片材料组织均会影响刀尖质量. Gao Peng 等^[15-16]进行了微铣刀的磨削,发现硬质合金的晶粒尺寸和组成对刃口的损伤有重要影响,WC 晶粒越小,刃口微裂纹和断裂越少,Co 含量降低,使得材料脆性增加,会出现更多的尖端微断裂和微裂纹.

目前针对磨削加工刀片圆弧曲面时的磨削力、锯齿的成因及控制研究较少. 在切削时,如果刀片圆弧上存在锯齿,则会影响切削力、切屑的变形等,从

而对加工表面产生一定的影响. 本文通过建立硬质合金刀片曲面磨削时的磨削力模型,采用正交试验研究磨削工艺参数对硬质合金刀片曲面的锯齿深度及粗糙度的影响规律,分析锯齿的成形机理,从而为控制磨削硬质合金刀片圆弧处的质量提供参考依据.

1 磨削力模型的建立

1.1 硬质合金刀片圆弧磨削接触长度

假设硬质合金刀片毛坯和成品刀片圆弧及回转中心同心,并且围绕圆弧圆心转动. 以刀片圆心为坐标原点,以硬质合金刀片的主圆弧对称中心为 y 轴建立如图 1 所示坐标系. 图中 r_1 为磨削后的刀片圆弧半径, r_2 为磨削前(毛坯)半径,左侧 AG 为砂轮与刀片的初始接触长度 L ,磨削刀片时,砂轮表面上某一个磨粒切削刃沿刀片表面的切削轨迹为曲线 AB ,而下一个连续磨粒切削刃的切削轨迹为曲线 CD ,假设连续切削磨粒间距为 λ_{st} .

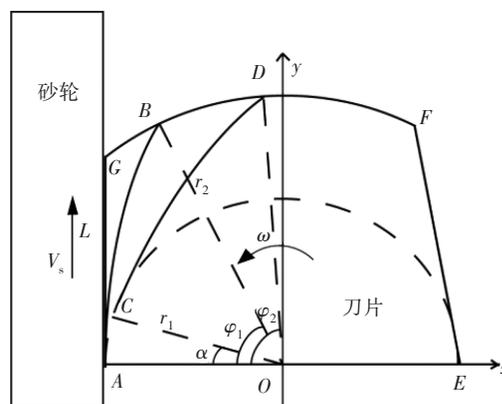


图1 磨削示意图

Fig.1 Grinding diagram

根据砂轮和刀片的运动关系,当磨粒从 A 运动到 B 时,

$$L = \sqrt{r_2^2 - r_1^2} \quad (1)$$

所需时间 t_s 为

$$t_s = \frac{L}{v_s} \quad (2)$$

曲线 AB 的运动方程为^[17]:

$$\begin{cases} x = -r_1 \cos \varphi \\ y = r_1 \sin \varphi + \frac{v_s \varphi}{\omega} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} dx = r_1 \sin \varphi d\varphi \\ dy = \left(r_1 \cos \varphi + \frac{v_s}{\omega} \right) d\varphi \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dl_c &= \sqrt{dx^2 + dy^2} \\ &= \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{v_s}{\omega} \right)^2 + \frac{2r_1 v_s \cos \varphi}{\omega}} d\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

由于 φ 角很小, 取 $\cos \varphi \approx 1$, 由此得到砂轮与工件的接触长度如式(6):

$$l_c = \left(\frac{r_1 \omega}{v_s} + 1 \right) \sqrt{r_2^2 - r_1^2} \quad (6)$$

1.2 最大未变形切屑厚度

由图 1 可知, 最大未变形切屑厚度为点 B 到曲线 CD 的最短距离, 曲线 CD 的运动方程为:

$$\begin{cases} x = -r_1 \cos(\alpha + \omega t) \\ y = r_1 \sin(\alpha + \omega t) + v_s t \end{cases} \quad (7)$$

则最大未变形切屑厚度为:

$$\begin{aligned} h_{\max} &= \sqrt{(y_B - y)^2 + (x_B - x)^2} \\ &= \sqrt{\left[y_B - r_1 \sin(\alpha + \omega t) - v_s t \right]^2 + \left[x_B + r_1 \cos(\alpha + \omega t) \right]^2} \end{aligned} \quad (8)$$

由于时间极短, 所以:

$$h_{\max} \approx \sqrt{\left(y_B - r_1 \sin \alpha - v_s t \right)^2 + \left(x_B + r_1 \cos \alpha \right)^2} \quad (9)$$

当 t 取最大值时, h_{\max} 较小, 则用曲线 BD 的值近似等于最大未变形切屑厚度.

则最大未变形切屑厚度为:

$$h_{\max} = r_2 \frac{\omega \lambda_{st}}{v_s} \quad (10)$$

$$\lambda_{st} = \frac{\bar{\lambda}_s^2}{b} \quad (11)$$

式中: $\bar{\lambda}_s$ 为砂轮磨刃平均间距; b 为磨削条痕的平均宽度.

1.3 磨削力模型的建立

为方便计算, 假设在体积分数为 V_g 的砂轮中均匀分布直径为 d_g 的球状颗粒, 则单位体积所具有的磨粒数为^[18-19]:

$$N = \frac{6V_g}{\pi d_g^3} \quad (12)$$

通过引入切屑几何参数, 得到单颗磨粒与工件材料的干涉图如图 2 所示, 其中 l_i 是磨削弧上任意一点到磨粒切入点的距离, l_c 为磨削区域接触区弧长, h_{\max} 为最大未变形切屑厚度, h 为待切削材料层厚度.

$$h \approx \frac{h_{\max} l_i}{l_c} \quad (13)$$

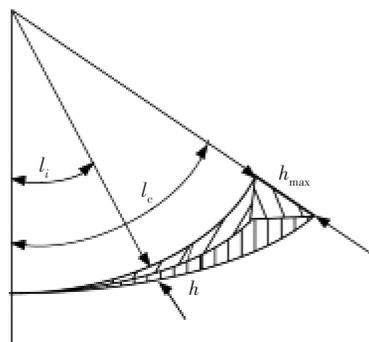


图 2 单颗磨粒与工件材料的干涉

Fig.2 Interference of a single abrasive particle with workpiece material

本研究中磨削圆弧时的圆弧转动速度 ($8^\circ/s$ 、 $10^\circ/s$ 、 $12^\circ/s$) 较小, 致使最大未变形切屑厚度较小, 所以磨削主要以塑性去除为主. 当砂轮以一定深度磨削时, 磨削力可以分为切屑变形力和摩擦力两部分. 因此磨削过程中砂轮与刀片单位磨削宽度上的磨削力为^[20]:

$$\begin{cases} F_n = \eta \xi N H \tan^2 \theta h_{\max}^3 l_c + 2N \bar{\delta} \bar{p} h_{\max}^3 l_c \\ F_t = \frac{\pi}{4} \eta \xi N H \tan^2 \theta h_{\max}^3 l_c + 2\mu N \bar{\delta} \bar{p} h_{\max}^3 l_c \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\bar{\delta}$ 为刀片与磨粒真实接触面积; \bar{p} 为磨粒磨损平面与刀片表面的平均接触压强, 该值和材料的硬度有关; μ 为摩擦因数; H 为材料硬度; 2θ 为磨粒顶锥角; ξ 为压头几何因子, 对于维氏压头, $\xi = 2$, η 为 0~1 间的常数.

2 试验

2.1 试验设备

试验使用的机床为德国万特有限公司生产的数控磨床 WAC 735 QUATTRO, 如图 3 所示. 刀片圆弧处的锯齿采用超景深显微镜 VHX-600 和场发射扫描电镜及能谱一体机 LEO1520+INCA 进行观测, 表面粗糙度使用白光干涉仪 NEW VIEW 7100 进行检测.

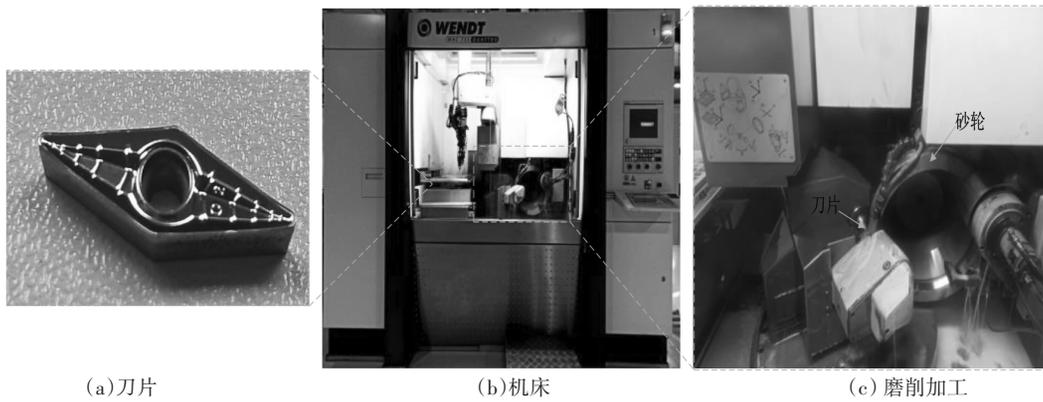


图3 刀片的磨削加工
Fig.3 Grinding of blades

2.2 试验砂轮

磨削实验采用树脂结合剂金刚石砂轮,浓度100%,粒度为D35(对应国内M22/36),砂轮直径400 mm,层厚6 mm,层宽6 mm.

2.3 试验刀片

试件为超细硬质合金刀片,成分WC-10% Co,晶粒度0.8 μm,密度14.49 g·cm⁻³,硬度15 182 MPa,断裂韧性14.84 MPa·m^{1/2},刀片前角25°.刀片的金相图(铁氰化钾和20%氢氧化钾1:1混合液腐蚀5 min)如图4所示,图中颜色较深的区域为WC,其余为Co.

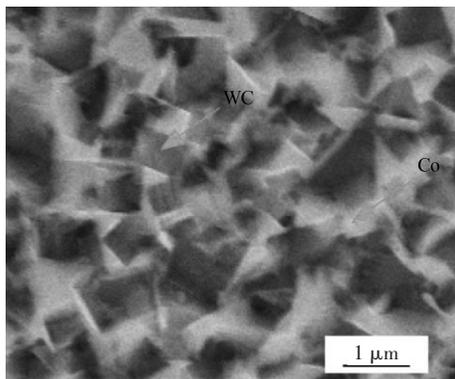


图4 硬质合金金相图

Fig.4 Cemented carbide metallographic diagram

2.4 试验方案

采用树脂结合剂金刚石砂轮磨削硬质合金刀片圆弧,研究不同的砂轮转速、圆弧转动速度、磨削深度磨削时,刀片圆弧处锯齿情况及表面粗糙度.刀片采用先磨削4条直线刃再磨削圆弧刃的加工形式,刀片每磨削完成1片,则对砂轮进行一次修整,冷却液采用硬质合金磨削油.表1列出了本次试验的磨削试验参数.

对表1进行正交试验设计,每组试验参数磨削30个刀片,测量每个刀片圆弧上锯齿深度的最大值和圆弧面上的表面粗糙度R_a.具体的锯齿深度检测如图5所示,测量采用靠近刃口处,在垂直于磨削方向划线,长度为0.1 mm记为一个数据,最后取30个数据的平均值代表该参数下的锯齿深度值和表面粗糙度.

表1 磨削试验参数
Tab.1 Grinding schematic parameters

水平	砂轮线速度/(m·s ⁻¹)	圆弧转动速度/(°·s ⁻¹)	磨削深度/mm
1	16	8	0.2
2	20	10	0.1
3	24	12	0.05

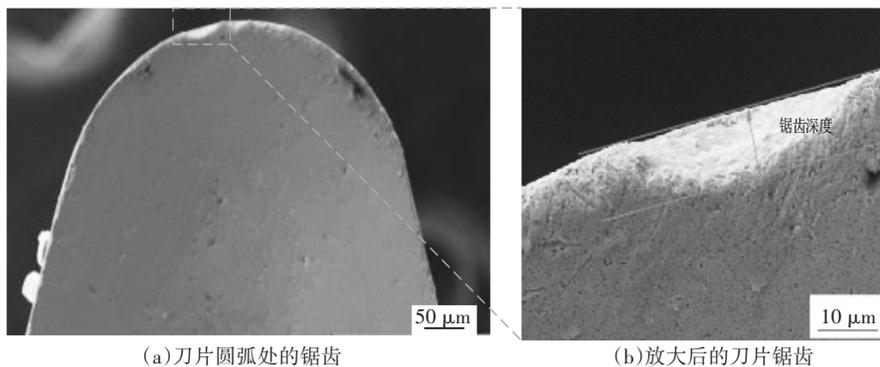


图5 锯齿检测示意图

Fig.5 Saw-tooth detection diagram

3 结果及分析

3.1 磨削参数对圆弧锯齿及表面粗糙度的影响

正交试验结果如表 2 所示. 从表中试验结果来看, 第 7 组试验锯齿深度及表面粗糙度最小, 第 1 组试验锯齿深度及表面粗糙度结果最大. 表 3 极差 R 值的大小不同, 表明影响硬质合金刀片锯齿深度大小的因素顺序为: 磨削深度 > 圆弧转动速度 > 砂轮速

度. 影响硬质合金圆弧表面粗糙度的因素中, 磨削厚度的影响最大, 砂轮磨削圆弧转速和圆弧转动速度对表面粗糙度的影响相近. 根据表 3 极差分析结果做出正交效应曲线图 6. 从图 6 中可以看出, 随着磨削参数的变化, 圆弧锯齿深度与表面粗糙度的变化趋势基本一致, 即提高砂轮转速能够使刀片圆弧锯齿深度及表面粗糙度均减小; 降低刀片圆弧转动速度及磨削深度均会降低锯齿深度及表面粗糙度.

表 2 正交试验结果

Tab.2 Orthogonal experimental results

实验次数	砂轮速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	圆弧转动速度 /($^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度 /mm	锯齿深度/ μm	表面粗糙度 R_a / μm
1	16	8	0.2	11.336	0.225
2	16	10	0.1	8.546	0.19
3	16	12	0.05	8.386	0.173
4	20	8	0.1	7.706	0.155
5	20	10	0.05	9.12	0.184
6	20	12	0.2	11.331	0.212
7	24	8	0.05	7.1	0.151
8	24	10	0.20	10.086	0.194
9	24	12	0.1	10.386	0.193

表 3 锯齿(表面粗糙度)极差分析结果

Tab.3 Saw tooth (surface roughness) range analysis results

因素水平	砂轮速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	圆弧转动速度 /($^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$)	磨削深度 /mm
K1	9.423(0.196)	8.714(0.177)	10.918(0.21)
K2	9.386(0.184)	9.251(0.189)	8.879(0.179)
K3	9.191(0.179)	10.034(0.193)	8.202(0.169)
R	0.232(0.017)	1.320(0.016)	1.555(0.041)

此外, 结合实际情况及磨削力模型进一步分析图 6. 在图 6(a)中, 提高砂轮速度时, 单位时间内经过刀片圆弧表面的磨粒数增多, 砂轮与刀片的接触长度 l_c 减小, 磨粒的切屑厚度 h 减小, 磨削力减小, 从而使得锯齿深度及表面粗糙度减小. 因此, 砂轮速度在 16 m/s 时的锯齿深度及粗糙度比较大, 24 m/s 时的锯齿深度及表面粗糙度比较小. 在图 6(b)、图 6(c)中, 当圆弧转动速度或者磨削深度增大时, 砂轮与刀片的接触面积增加, 单位时间内砂轮磨削硬质合金刀片的材料去除体积增多, ω 增大或者 r_2 增大均会使得砂轮与刀片的接触长度 l_c 增大, 磨粒的切屑厚度 h 增大, 磨削力增大, 从而使得锯齿深度及表面粗糙度减小. 因此, 圆弧转动速度在 $12^{\circ}/\text{s}$ 或者磨削深度为 0.2 mm 时的锯齿深度及表面粗糙度比较大, 圆弧转动速

度在 $8^{\circ}/\text{s}$ 或者磨削深度在 0.05 mm 时的锯齿深度及表面粗糙度比较小. 图 7 为砂轮速度 20 m/s, 圆弧转动速度 10 m/s, 磨削深度 0.2 mm 下磨削表面形貌. 从图中可以看出: 磨削表面以塑性沟壑为主, 两侧隆起较深, 划痕明显, 说明材料是以塑性去除为主. 同时可以从图中看出: 划痕两侧存在少量的脆性剥落, 说明材料也存在少量的脆性去除. 为了获得小锯齿深度和表面粗糙度, 根据表 3 极差分析做出图 6. 从图中选取每种磨削参数下取得最小锯齿深度和表面粗糙度时的磨削参数. 通过极差分析可获得最优磨削参数方案是: 砂轮速度 24 m/s, 圆弧转动速度 $8^{\circ}/\text{s}$, 磨削深度 0.05 mm, 可以有效减小刀片圆弧锯齿及表面粗糙度.

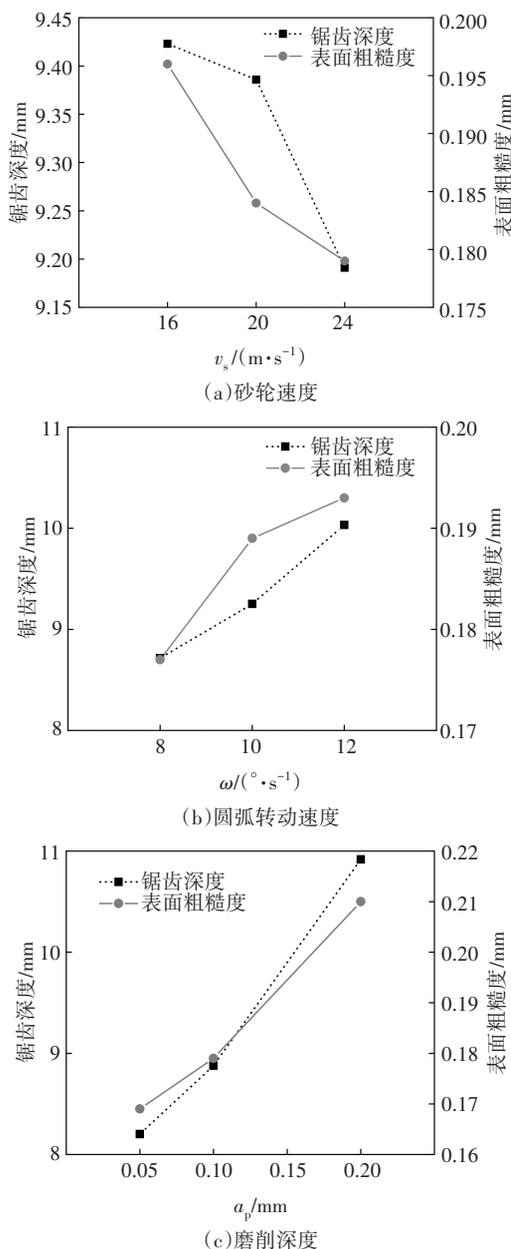


图 6 磨削参数对锯齿及表面粗糙度的影响
Fig.6 The influence of grinding parameters on the tooth and surface roughness

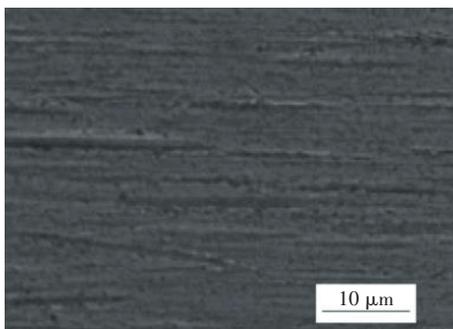


图 7 磨削后的圆弧面表面形貌
Fig.7 Surface morphology of arc surface after grinding

3.2 锯齿形成机理

在硬质合金刀片圆弧的磨削过程中,如图 8 所示,磨粒沿着具有一定角度的刃口方向移动,对工件进行了滑擦、耕犁以及切削,硬质合金中 WC 和 Co 硬度、热膨胀系数等性能参数不同导致磨粒在切削过程中产生不同的变形,磨粒对 WC 颗粒挤压导致应力过大形成断裂.图 9 所示为磨削过程中刃口处的受力分析,砂轮作用于刃口处的磨削挤压力为 F .刀片断屑槽的存在使得断屑槽和圆弧面之间的夹角为锐角,磨削力 F 相对于断屑槽内部 O 点产生扭矩,使得刃口处的材料容易向断屑槽内部扭转断裂脱落,进而导致刃口处形成锯齿及微裂纹等缺陷.因此,磨削力越大,产生的磨削锯齿缺陷越深.

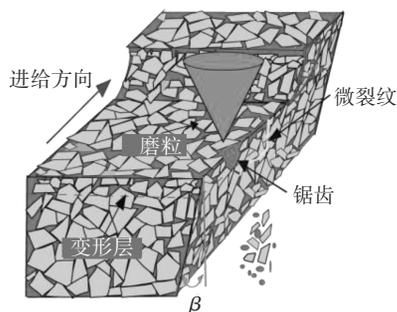


图 8 磨削过程

Fig.8 The grinding process

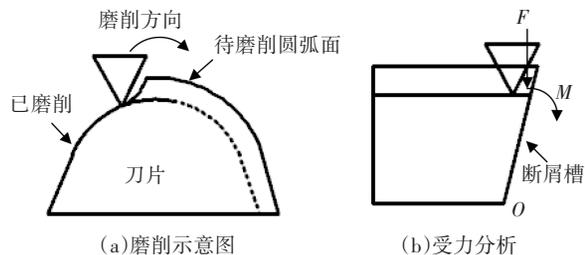


图 9 磨削过程受力分析

Fig.9 Analysis of force in grinding process

圆弧面切削主要以塑性去除为主,如图 7 所示.金刚石磨粒磨削 WC 颗粒的过程中,通过磨粒对 WC 颗粒的切削作用,WC 颗粒发生塑性变形,当达到材料的屈服应力时,WC 相产生位错和滑移,同时部分 WC 颗粒发生破碎^[21],如图 10 所示,由于 Co 相相对较软,在磨粒的作用下,Co 随 WC 晶粒一起去掉,或从 WC 晶粒间析出 Co 涂覆于磨削表面^[24],在后续磨粒的作用下,更多的 WC 和 Co 被去除,形成比较光滑的平面,如图 10(a)所示,即正常的磨削过程,其刀具刃口表面基本比较光滑,如图 5 左侧的正常区域所

示.由于硬质合金内部存在大小不同的WC颗粒,特别是存在高硬度大颗粒WC时,在磨粒切削作用下,薄的结合层在严重挤压下容易发生断裂,部分颗粒被磨粒挤压从基体中带出形成凹坑,漏出加工表面下方的WC颗粒^[22].

由于硬质合金中WC和Co硬度、热膨胀系数等不同,Co相在磨粒的作用下发生塑性变形并从材料中析出,WC颗粒缺少黏结相Co的支撑,表面强度下降,磨粒作用于WC颗粒上时,使得WC颗粒内部位错增大,当超过一定量时,将会形成微裂纹,裂纹沿着WC/Co或WC/WC及Co相传播^[23].因此在WC颗粒中出现裂纹,同时会导致WC和Co相边界出现裂纹.随着后续磨粒的挤压,裂纹进一步扩展,导致局部区域的WC晶粒大面积断裂和脱落,在宏观上呈现出锯齿,如图10(b)所示.如图10(c)所示,由于刀片刃口具有一定的倾角,砂轮作用于刃口时会对刃口形成一定的扭矩 M ,刃口外侧缺少支撑,导致WC颗粒脱离,WC颗粒沿WC/Co或WC/WC边界旋转,留下随机分布的微断裂间隙,加剧了锯齿的形成.图11为刀片刃口锯齿微观形貌的SEM图,从图中可以看出:刃口处刀片材料脱落形成锯齿,参考图11(a);一些大颗粒WC在磨粒的挤压作用下,从表面脱落形

成凹坑,参考图11(b);以及磨削过程中一部分析出的Co相涂覆在WC表面,形成涂覆层,参考图11(c);部分大颗粒WC由于受力形成的位错较大,内部产生微裂纹.

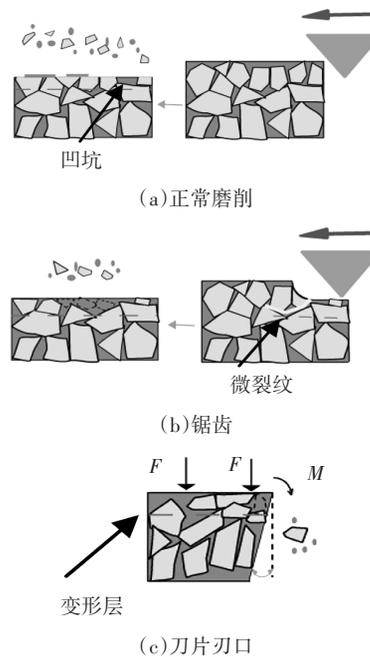
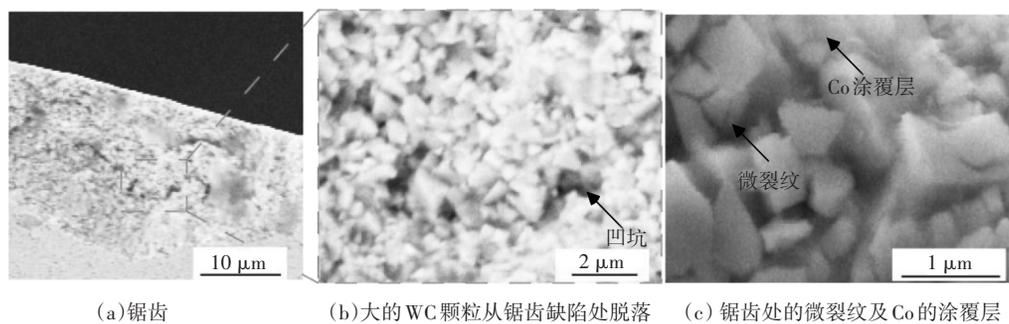


图10 锯齿形成机理示意图

Fig.10 Schematic diagram of saw-tooth formation mechanism



(a) 锯齿

(b) 大的WC颗粒从锯齿缺陷处脱落

(c) 锯齿处的微裂纹及Co的涂覆层

图11 锯齿微观形貌的SEM图

Fig.11 SEM image of saw tooth microstructure

4 结论

1) 正交试验结果表明,影响硬质合金圆弧锯齿深度大小的顺序为:磨削深度>圆弧转动速度>砂轮磨削圆弧速度.影响硬质合金圆弧表面处的表面粗糙度大小的顺序为:磨削深度>砂轮磨削圆弧速度>圆弧转动速度,其中圆弧转动速度和砂轮磨削圆弧速度的影响相差不大.

2) 随着砂轮速度的增大,刀片圆弧处的锯齿和表面粗糙度减小;随着圆弧转动速度的增大,刀片圆

弧处的锯齿和表面粗糙度增大;随着磨削深度的减小,刀片圆弧处的锯齿和表面粗糙度减小,其中获得较好的表面质量的磨削工艺参数为:砂轮速度24 m/s,圆弧转动速度 $8^\circ/s$,磨削深度0.05mm.

3) 硬质合金刀片圆弧处锯齿的形成主要与刀片材料、结构及磨削过程中作用于刀片圆弧上的应力有关.

参考文献

- [1] 陈康. 整体硬质合金立铣刀磨削工艺及砂轮补偿研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.

- CHEN K. Study on grinding process and grinding wheel compensation of solid carbide end milling cutter[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (In Chinese)
- [2] 毛智星. 基于硬质合金的刀具钝化工艺分析与研究[D]. 成都: 西华大学, 2014.
MAO Z X. Analysis and research of the technology based on carbide tool passivation[D]. Chengdu: Xihua University, 2014. (In Chinese)
- [3] 师超钰, 朱建辉, 冯兵强, 等. 硬质合金磨削加工中树脂和金刚石的影响研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(11): 138-140.
SHI C Y, ZHU J H, FENG B Q, *et al.* Experimental research on resins and diamonds influencing grinding performances for cemented carbide[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(11): 138-140. (In Chinese)
- [4] 阮日新, 罗虎, 王永强, 等. 基于环形磁场励磁的两面磁力抛光试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 31-37.
RUAN R X, LUO H, WANG Y Q, *et al.* Experimental study on double-surface magnetic abrasive polishing excited by toroidal magnetic field [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(4): 31-37. (In Chinese)
- [5] 罗文宣, 薛俊峰, 薄海青, 等. 整体硬质合金刀具磨削裂纹的原因分析及其工艺改进[J]. 工具技术, 2006, 40(6): 37-40.
LUO W X, XUE J F, BO H Q, *et al.* Reason analysis and procedure improvement for grinding crack of solid carbide cutting tool [J]. Tool Engineering, 2006, 40(6): 37-40. (In Chinese)
- [6] 陈振华, 黄瑞明, 陈鼎, 等. 应力比对WC-Co硬质合金疲劳性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 1-6.
CHEN Z H, HUANG R M, CHEN D, *et al.* Influence of different stress ratios on fatigue behavior of WC-Co cemented carbides [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(6): 1-6. (In Chinese)
- [7] 随卡卡. 整体硬质合金刀具关键工步磨削工艺实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 1-9.
SUI K K. An experimental research on the key steps of grinding processes of solid carbide cutting tools [D]. Changsha: Hunan University, 2014: 1-9. (In Chinese)
- [8] 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: 109-141.
ZHAN Y J. Mechanisms research on high speed grinding of cemented carbide with vitrified diamond wheels [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2013: 109-141. (In Chinese)
- [9] 原一高, 骆祯岚, 蔡琼霞, 等. 超细晶粒硬质合金磨削的材料去除机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(3): 14-18.
YUAN Y G, LUO Y L, CAI Q X, *et al.* Material removal mechanism in grinding of ultrafine WC-Co cemented carbides [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(3): 14-18. (In Chinese)
- [10] 李文忠. 超声振动磨削硬质合金的仿真分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2016: 43-52.
LI W Z. Simulation of ultrasonic vibration grinding of hard alloy [D]. Qingdao: Qingdao University, 2016: 43-52. (In Chinese)
- [11] 柳文阳, 谢宏, 张亚雄, 等. 不同结合剂金刚石砂轮在硬质合金刀片磨削中的性能对比[J]. 硬质合金, 2016, 33(1): 38-41.
LIU W Y, XIE H, ZHANG Y X, *et al.* Performance comparison of diamond wheels with different bond in grinding cemented carbide blade [J]. Cemented Carbide, 2016, 33(1): 38-41. (In Chinese)
- [12] 许鹏飞, 刘志林, 易为, 等. 磨削工艺对硬质合金切槽刀片刃口质量的影响[J]. 硬质合金, 2018, 35(1): 50-56.
XU P F, LIU Z L, YI W, *et al.* The effect of grinding processes on cutting edge quality of carbide groove inserts [J]. Cemented Carbide, 2018, 35(1): 50-56. (In Chinese)
- [13] 何荣跃, 宋安邦, 文立东, 等. 磨削工艺对刀具刃口质量及寿命的影响[J]. 工具技术, 2018, 52(1): 63-65.
HE R Y, SONG A B, WEN L D, *et al.* Influence of grinding process on edge quality and life of cutting tool [J]. Tool Engineering, 2018, 52(1): 63-65. (In Chinese)
- [14] 熊建武, 周进. 研磨条件和材料组织结构对硬质合金刀尖状态的影响[J]. 工具技术, 2007, 41(3): 48-50.
XIONG J W, ZHOU J. Influences of grinding condition and material texture on point appearance of cemented carbide cutting tools [J]. Tool Engineering, 2007, 41(3): 48-50. (In Chinese)
- [15] GAO P, LIANG Z Q, WANG X B, *et al.* Cutting edge damage in grinding of cemented carbides micro end Mills [J]. Ceramics International, 2017, 43(14): 11331-11338.
- [16] 程剑兵. 钨钴类超细硬质合金刀具及其切削性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 20-37.
CHENG J B. Research on cutting performance of WC-co ultrafine cemented carbide cutting tools [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 20-37. (In Chinese)
- [17] 邵国友. 平面磨削的磨削力数学模型研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(7): 139-141.
SHAO G Y. Study on mathematical model of grinding force in plane grind hardening [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(7): 139-141. (In Chinese)
- [18] 朱文博, 黎康顺, 朱欢欢, 等. 圆锥滚子球基面磨削力模型及实验研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(6): 679-687.
ZHU W B, LI K S, ZHU H H, *et al.* Grinding force model and experimental study of tapered roller ball base surfaces [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(6): 679-687. (In Chinese)
- [19] 尹国强, 巩亚东, 王超, 等. 新型点磨削砂轮磨削参数对表面质量的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 273-276.
YIN G Q, GONG Y D, WANG C, *et al.* Effects of processing parameters for novel point grinding wheels on surface quality [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(2): 273-276. (In Chinese)
- [20] 谢桂芝, 尚振涛, 盛晓敏, 等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 169-176.
XIE G Z, SHANG Z T, Sheng X M, *et al.* Grinding force modeling high-speed for deep grinding of engineering ceramics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 169-176. (In Chinese)
- [21] 伍俏平, 欧阳志勇, 阳慧, 等. 超细晶硬质合金加工机理及加工性能[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(6): 1-6.
WU Q P, OUYANG Z Y, YANG H, *et al.* Machining mechanism and machining properties of ultra-fine grained cemented carbide [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(6): 1-6. (In Chinese)
- [22] 任莹晖. 纳米结构硬质合金磨削理论和工艺实验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009: 17-20.
REN Y H. Theoretical and experimental investigations on grinding nanostructured tungsten carbides [D]. Changsha: Hunan University, 2009: 17-20. (In Chinese)
- [23] WU X, LI L, HE N, *et al.* Investigation on the surface formation mechanism in micro milling of cemented carbide [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 78: 61-67.