

杯形砂轮平面磨削 WC-10Co-4Cr 涂层亚表面损伤研究

沈先弟¹ 姜晨¹ 姜臻禹¹ 张逸轩¹ 王玲奇² 普桂元²

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

(2. 上海市轴承技术研究有限公司, 上海 201800)

摘要: 针对磨削 WC-10Co-4Cr 涂层产生的亚表面损伤会导致涂层性能下降的问题, 开展杯形砂轮磨削 WC-10Co-4Cr 涂层的亚表面损伤深度研究。根据磨削材料去除理论和压痕断裂力学, 得出单颗粒磨削力理论表达式; 基于杯形砂轮平面磨削特点, 建立亚表面损伤深度理论预测模型; 设计单因素平面磨削试验及单点抛光试验以验证模型准确性; 分析不同磨削参数对工件亚表面损伤深度与表面粗糙度的影响规律。研究表明, 亚表面损伤深度预测值与实测值的变化趋势一致, 最大相对误差为 15.8%; 亚表面损伤深度及表面粗糙度随磨削深度、进给速度的增加而增加, 随主轴转速的增加而减少。研究对于指导杯形砂轮磨削 WC-10Co-4Cr 涂层加工参数优化具有一定价值。

关键词: 杯形砂轮; 硬质合金涂层; 单因素试验; 单点抛光试验; 亚表面损伤深度

中图分类号: TH162 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.07.005

0 引言

在制造业领域, 磨削作为一种广泛应用的材料去除加工过程, 在提供高精度和优质表面的零件加工中扮演着不可替代的角色。然而, 磨削过程中亚表面损伤问题一直是制约加工质量和效率的关键因素。亚表面损伤会导致零件强度和耐久性的下降, 直接影响着零件的摩擦、润滑和密封性能。因此, 深入研究磨削过程中的亚表面损伤问题, 探寻影响因素, 寻求优化工艺参数的方法, 对于提高磨削加工的效率和质量具有重要意义。

碳化钨(WC)合金属于典型的硬脆材料, 具有高硬度、优越的耐磨性和化学稳定性及较大的断裂韧性。精密磨削可以获得较好的表面质量, 但依然存在缺陷, 尝试通过控制加工参数来减少缺陷。LI 等^[1] 改进了压痕断裂模型, 用于描述材料磨削过程中表面粗糙度与亚表面损伤深度之间的非线性关系。向勇等^[2] 基于压痕断裂力学对微晶玻璃研磨加工的亚表面损伤深度进行了预测, 理论值和预测值的相对误差控制在 5.56% 以内, 模型可靠性较高。闫艳燕等^[3] 通过单颗磨粒的切削轨迹及其切削弧长模型, 建立了纵扭超声辅助磨削氮化硅亚表面损伤深度模型并进行试验验证, 预测结果与试验结果的最大相对误差为 13.38%。KLOCKE 等^[4] 研究了不同 Co 含量的 WC 合金的材料性能, 结果显示, 从脆性状态到韧性状态的

过渡点会改变, 导致不同的磨削工艺布局。ZHANG 等^[5] 使用尖角砂轮进行磨削试验, 发现 WC-Co 的磨削表面主要呈现出塑性划痕的特征, 表明在磨削过程中表面的 Co 受到挤压变形, 导致 WC 颗粒脱落。常乐怡等^[6] 研究了 WC 粒度对 WC-10Co-4Cr 复合粉末表面和内部结构及其涂层的孔隙率、硬度分布和断裂韧性的影响规律, 结果表明随着 WC 粒度的减小, 涂层显微硬度提高, 断裂韧性降低。

综上所述, 基于压痕断裂力学的研究方法在亚表面损伤的预测方面表现得成熟且准确性较高; 不同成分和粒度的碳化钨材料呈现显著的性质差异, 导致加工条件和结果也会有所不同; Cr 元素能提高涂层的硬度和强度, 磨削 WC-10Co-4Cr 涂层亚表面损伤的研究鲜见。为解决这一问题, 本文根据杯形砂轮平面磨削特点, 由单颗粒磨削力建立了亚表面损伤深度理论预测模型, 设计单因素平面磨削试验及单点抛光试验以验证模型准确性, 研究不同磨削参数对 WC-10Co-4Cr 涂层亚表面损伤深度和表面粗糙度的影响, 为优化磨削工艺参数提供依据。

1 亚表面损伤模型

为建立杯形砂轮磨削脆性材料过程中亚表面损伤(Subsurface Damage, SSD)深度的理论模型, 首先必须分析静态压痕过程。在杯形砂轮磨削过程(图1)中,

收稿日期: 2023-11-06 修回日期: 2023-12-19

基金项目: 长三角科技创新共同体联合攻关专项 2022(CSJGG1302); 机械系统与振动国家重点实验室课题项目(MSV202315)

作者简介: 沈先弟, 男, 1999 年生, 安徽安庆人, 在读硕士研究生; 主要研究方向为精密加工及检测技术; E-mail: 2028902362@qq.com。

姜晨(通信作者), 男, 1978 年生, 安徽池州人, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为精密加工及检测技术、制造过程智能化、微结构仿生表面设计与制造、CAM 装备制造过程虚拟仿真技术; E-mail: jc_bati@163.com。

引用格式: 沈先弟, 姜晨, 姜臻禹, 等. 杯形砂轮平面磨削 WC-10Co-4Cr 涂层亚表面损伤研究[J]. 机械强度, 2025, 47(7): 42-48.

SHEN Xiandi, JIANG Chen, JIANG Zhenyu, et al. Study on subsurface damage of WC-10Co-4Cr coating in planar grinding of cup sand wheels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(7): 42-48.

v_s 为主轴转速, v_w 为工件进给速度, 砂轮上的磨粒可以被视为压头。图 2 为经典压痕断裂试验示意图^[7]。当压头按压试样表面, 接触载荷超过临界值时, 形成 3 个部分: ①接触点正下方的永久塑性变形区; ②源自压头正下方塑性区域边界处的横向裂纹, 该横向裂纹大致平行于试样表面传播; ③在塑性区边界处产生并垂直扩展到试样底部的中径裂纹。图 2 中, C_L 为横向裂纹长度; C_h 为横向裂纹深度; C_m 为中径裂纹深度; α 为压头半顶角; h_i 为压头进入工件的深度; b 为压头所属材料塑性区半径。

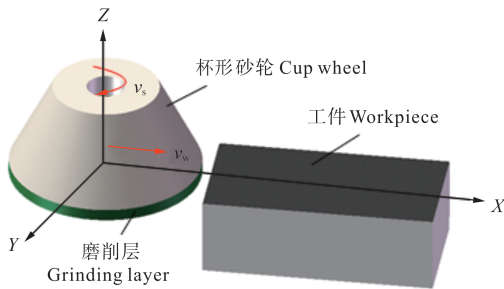


图 1 杯形砂轮磨削过程
Fig. 1 Grinding process of the cup wheel

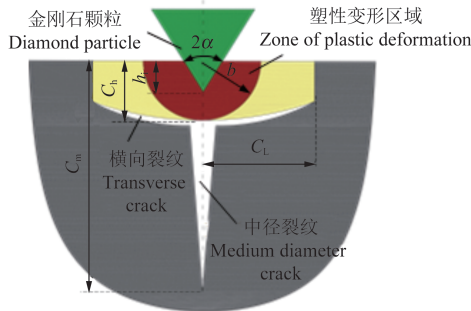


图 2 经典压痕断裂试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of classical indentation fracture test

LAMBROPOULOS 等^[8]基于压痕断裂理论和 Hill 模型, 提出了计算中径裂纹和侧向裂纹深度的理论公式, 用于描述理想孔洞扩张的过程。其中, 中径裂纹深度的理论计算式为

$$C_m = \alpha_k^{2/3} \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{2(1-m)}{3}} (\cot^{4/9} \alpha) \left[\frac{F_n(t)}{K_c} \right]^{2/3} \quad (1)$$

式中, α_k 为无量纲数, 可由 $\alpha_k = 0.027 + 0.090(m - 1/3)$ 计算; E 为材料的弹性模量; H 为材料的硬度; m 为无量纲参数, 一般取值在 $1/3 \sim 1/2$, 据分析 $m = 1/3$ 更为合适; α 为压头半顶角, 根据 MAHMOUD 等^[9]使用扫描激光显微镜测量研磨金刚石颗粒的三维形状的结果分析, 取 $\alpha = 55^\circ$ 最合适; F_n 为材料承受的单颗粒法向力; t 为时刻; K_c 为材料的断裂韧性。

横向裂纹深度的理论计算式为

$$C_h = 0.43 \times (\sin \alpha)^{\frac{1}{2}} (\cot \alpha)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{E}{H} \right)^m \left[\frac{F_n(t)}{H} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

根据试验研究发现, 杯形砂轮每次磨削后, 磨损仅局限在砂轮端面外侧的一部分, 说明磨削过程中的

磨削宽度与磨料层的宽度 b_s 存在差异。杯形砂轮端面磨粒磨削的过程如图 3 所示。其中, R 为磨粒绕砂轮中心的回转半径; Φ 为砂轮外径; b_w 为工件宽度; d_w 为磨粒在切入和切出工件期间的移动距离; \widehat{ACB} 为磨粒的实际切削轨迹。 d_w 的计算式为

$$d_w = v_w t = \Phi \arcsin \frac{b_w \cdot v_w}{\Phi v_s} \quad (3)$$

因此, 当 $d_w \geq b_s$ 时, 杯形砂轮有效磨削宽度 b_e 可以视作 b_s , 此时 b_s 上的磨料全部起切削作用; 当 $d_w < b_s$ 时, b_e 只能视作 d_w , 即

$$b_e = \begin{cases} b_s, & d_w \geq b_s \\ \frac{v_w \Phi}{v_s} \arcsin \frac{b_w}{\Phi}, & d_w < b_s \end{cases} \quad (4)$$

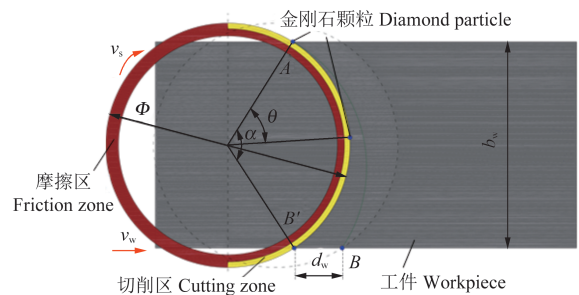


图 3 单颗粒平面磨削模型

Fig. 3 Single-particle planar grinding model

实际磨削过程中, 只有前半部分参与磨削, 后半部分只参与摩擦, 则砂轮工件之间的有效接触面积 S_{ww} , 即有效磨削面积为

$$S_{ww} = \frac{1}{2} \pi \left[\left(\frac{\Phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\Phi}{2} - b_e \right)^2 \right] \quad (5)$$

砂轮加工时, 磨削过程中的有效磨粒数量 N_d 可以由磨粒表面密度 C 与有效接触面积 S_{ww} 的乘积表示, C 的值可以通过 XU 等^[10]推导出的几何关系获得。在杯形砂轮的磨削过程中, N_d 与磨削深度 a_p 密切相关。随着 a_p 的提高, N_d 也增加; 然而当 a_p 达到一定值时, N_d 将保持相对稳定。为描述这一关系, 引入了一个深度因子 $a_p^{1/3}$ 。磨粒表面密度 C 的计算式为

$$C = \frac{4a_p^{1/3}}{d_g^2 (4\pi/3v)^{2/3}} \quad (6)$$

式中, d_g 为金刚石颗粒的等效球形直径, 可由 $d_g = 15.2M^{-1}$ 计算, 其中 M 为分级筛中使用的网目尺寸, 在本研究中使用的是 230 目的砂轮; v 为金刚石在砂轮中的体积分数, 本研究使用的砂轮浓度为 100, 即 $v = 0.25$ 。

根据压痕断裂力学以及张承龙等^[11-12]的研究, 当磨削过程采用脆性断裂方式去除材料时, 由图 2 可知, 单颗粒磨粒的材料去除体积 V 取决于横向裂纹的长度 C_L 。由于 C_L 远小于单颗粒划过的弧长 L , 因此可以近似看作一个长方体。 C_L 可由文献[13]中的 $C_L = C_m/7$ 计算得出。

根据已有文献[14], 磨屑长度可以表示为动态接触长度。但杯形砂轮平面磨削与该文献的外圆加工

形式有所不同,因此将磨屑长度计算式修正为

$$L = \frac{(\alpha - \theta)d_e}{2} \quad (7)$$

式中, d_e 为砂轮当量直径, $d_e = \Phi(1 + v_w/v_s)^2$ 。

根据 KALISZER^[15]对磨削过程的连续性分析,在整个磨削过程中,材料的去除体积 V_{mr} 可以被视为所有 N_d 的累积效果,则有

$$V_{mr} = 2C_L C_h (L_1 + L_2 + \dots + L_{N_d}) = 2\varepsilon N_d C_L C_h L_s \quad (8)$$

式中, ε 为平均路径系数, ε 与 N_d 成正比; L_s 为最大路径,此时 θ 为 0。

另外,从砂轮的角度分析可以得出,有效时间 t 内的材料去除总体积 V'_{mr} 又可以表示为 a_p 、 b_w 以及 d_w 的乘积:

$$V'_{mr} = a_p v_w t b_w \quad (9)$$

从磨粒和工件的角度分析所得的材料去除体积,在理论上它们是一种等量关系^[16],故有以下关系:

$$a_p v_w t b_w = 2\varepsilon N_d C_L C_h L_s \quad (10)$$

可以计算出单颗粒法向磨削力 F_n ,如式(11)。由于法向力方向是垂直工件向外,所以所有磨粒产生的力之和就是砂轮磨削时的法向磨削力 F_{ns} 。

$$F_n = \left(\frac{a_p v_w b_w}{\varepsilon K_\alpha S_{ww} v_s d_e} \right)^{\frac{6}{7}} \quad (11)$$

式中, K_α 为系列常数,由材料本身性质决定,可由式(1)~式(7)计算得出。

杯形砂轮磨削平面时始终与工件保持相同距离,故无须考虑砂轮旋转角度与最大未变形厚度的问题。磨削硬脆材料时,中径裂纹是造成亚表面损伤的主要原因,常用于表征 SSD。

BIFANO 等^[17]指出,磨料渗入深度 h_i 大于脆性材料的临界未变形切屑厚度 h_c 时,磨削过程就会出现脆性断裂。 h_c 可以通过材料的弹性模量 E 、硬度 H 和断裂韧性 K_c 来定量描述,其计算式为

$$h_c = 0.15 \frac{E}{H} \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (12)$$

对于杯形砂轮磨削平面的加工方式,磨粒的渗入深度 h_i 主要由砂轮磨削深度 a_p 决定。因此可以分为 3 种情况^[18],如图 4 所示。当 $a_p < h_c$ 时,材料去除采用韧性方式,此时没有亚表面损伤;当 $a_p \approx h_c$ 时,材料去除方式为混合模式,既有韧性去除方式又有脆性去除方式;当 $a_p \gg h_c$ 时,可忽略韧性去除方式,全部为脆性去除方式。由于亚表面损伤位于已加工表面之下,所以可将其表示为式(13)。在本文中,由式(12)计算为第 3 种情形,结合式(11)可计算出亚表面损伤深度 D_{SSD} 。

$$D_{SSD} = \begin{cases} 0, & a_p < h_c \\ C_m - h_i, & a_p \approx h_c \\ C_m - C_h, & a_p \gg h_c \end{cases} \quad (13)$$

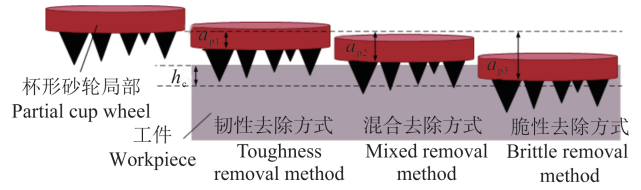


图 4 材料去除方式与磨削深度关系

Fig. 4 Relation between the material removal method and the grinding depth

2 试验设计

2.1 试验装置

在 DMC650V 型三轴数控加工中心上开展平面磨削试验,主轴旋转精度为 0.002 mm,如图 5 所示。试验过程中采用 9257B 型三向测力仪实时采集磨削力信号,计算机通过数据采集卡输入接收磨削力,随后使用 Dynoware 软件对其进行过滤、消除零点漂移。在课题组自行研制的磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 五轴抛光试验台 (图 6) 上开展单点抛光试验,重复定位精度小于 10 μm 。磁流变抛光可以将需要精密成像仪器检测的裂纹深度转化为普通金相显微镜便可观察的横向裂纹,该方法不仅提高了观察亚表面裂纹的能力,还降低了检测成本。



图 5 平面磨削装置
Fig. 5 Planar grinding device



图 6 MCF 五轴抛光试验台
Fig. 6 MCF five-axis polishing test bench

2.2 试验方案

本文平面工件尺寸为 20 mm \times 30 mm \times 60 mm,涂层厚 0.4 mm,涂层材料为 WC-10Co-4Cr,基体材料为 9Cr18。WC-10Co-4Cr 材料的基本性能^[19]如表 1 所示。试验使用 230#树脂基金刚砂砂轮,具体参数由生产商给出,外径为 50 mm,内径为 36 mm,浓度为 100%。工件固定,由杯形砂轮进行横向磨削,每组磨削前使用金刚石修整笔进行反复修整。

表 1 WC-10Co-4Cr 涂层材料的相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of WC-10Co-4Cr coating material

参数 Parameter	值 Value
弹性模量 Elasticity modulus E/GPa	310
维氏硬度 Vickers hardness H/HV	1 200
断裂韧性 Fracture toughness $K_c/(\text{MPa}\cdot\text{m})^{1/2}$	4.26

平面磨削试验的主要磨削参数为砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 、砂轮横向进给速度 v_w 。设计单因素试验,研究不同磨削参数对亚表面损伤深度和表面粗糙度的影响规律。设计试验参数磨削深度由小到大,进给速度由慢到快,主轴转速为 1 000~3 000 r/min,具体平面磨削试验方案如表 2 所示。为确保试验数据的可靠性,每组磨削重复 3 次并取平均值。由于工件相比砂轮尺寸较小,两者接触加工时间过短,每次磨削都会循环 10 次。

表 2 平面磨削试验方案

Tab. 2 Test scheme of the planar grinding

序号 No.	磨削深度 Grinding depth $a_p/\mu\text{m}$	进给速度 Feed speed $v_w/(\text{mm/s})$	砂轮线速度 Linear speed of the grinding wheel $v_s/(\text{m/s})$
S ₁	5		
S ₂	10	3	7.86
S ₃	15		
S ₄		1	
S ₅	10	2	7.86
S ₆		5	
S ₇			2.62
S ₈	15	2	5.24
S ₉			7.86

单点抛光试验中,根据前期实验室磁性复合流体抛光液的试验研究成果^[20],进行抛光液的配制。考虑到涂层硬度高,故将抛光液中原成分氧化铝磨粒等量换成 1 μm 金刚石磨粒,具体试验方案如表 3 所示。为保证试验数据的可靠性,每个工件在不同位置共抛光 3 次并取平均值;抛光完成后在超声波浴中用乙醇清洗研磨样品 15 min,使用 M230-HD228S 型金相显微镜观察抛光单点表面形貌,使用 Taylor Hobson 轮廓仪测量该点轮廓并得到亚表面损伤深度数值。

表 3 单点抛光试验方案

Tab. 3 Test scheme of the single-point polishing

参数 Parameter	数值 Value
转速 Rotational speed/(r/min)	400
抛光间隙 Polishing gap/mm	0.7
抛光时间 Polishing time/min	20

3 试验结果分析

3.1 SSD 深度模型验证

由于采用的是循环磨削,采集到的磨削力会分为不连续的 10 段。第一段是全程磨削,故取第一段的磨削力数据进行分析。在 12.5 Hz 下进行低通快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT) 滤波处理,图 7 所示为 S₁ 组的磨削力曲线。选取稳定阶段的法向磨削力 F_z 作为 F_{ns} ,任取两组数据,可得出 $N_d = -0.000\ 04\epsilon +$

0.031 7。表 4 所示为预测值与试验值的对比结果,以相对误差和绝对误差来描述磨削力模型的准确性。

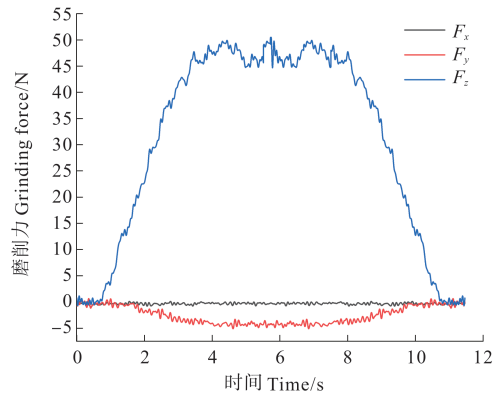


图 7 磨削力曲线

Fig. 7 Grinding force curves

表 4 法向磨削力预测值与试验值对比

Tab. 4 Comparison between predicted and test values of the normal grinding force

序号 No.	预测值 Predicted value F_{ns}/N	试验值 Test value/N	绝对误差 Absolute error/N	相对误差 Relative error/%
S ₁	48.417	47.6	0.817	1.72
S ₂	91.258	86.3	4.958	5.75
S ₃	132.328	125.4	6.928	5.53
S ₄	29.785	27.3	2.485	9.10
S ₅	60.197	56.1	4.097	7.30
S ₆	155.420	144.8	10.615	7.33
S ₇	274.846	258.8	16.046	6.20
S ₈	132.328	124.5	7.828	6.29
S ₉	87.147	81.7	5.447	6.67

由表 4 可知,最大相对误差为 9.10%,大多数情况下具有较好的预测性能。可见,模型能有效预测磨削力的变化,有助于提高 SSD 预测模型的准确性和可靠性。

图 8 为试件经过 MCF 单点抛光法在显微镜 400 倍率下的显微图。由图 8(a)~图 8(c)可以看出,随着抛光深度的增加,损伤面积明显减小。在图 8(d)中,大面积损伤已经基本去除,说明损伤主要集中在相对较浅的亚表面上。当抛光深度达到图 8(f)所示数值时,仍然存在一些微小的缺陷无法被彻底去除。结合材料的组成与制备方法可知,这些微小的缺陷是涂层制造过程中产生的气孔^[21],该气孔主要由涂层喷涂工艺决定,此时可认为亚表面损伤已经完全去除。

图 9 为实测值和 SSD 深度模型预测值的对比图。由图 9 可知,SSD 预测值与实际检测值的变化趋势有较好的一致性,模型最大相对误差为 15.8%。这说明该亚表面损伤计算方法具有一定的准确性与实用价值。预测值相较于实测值整体偏大,与磨削力预测情况类似,主要原因可能是实际参与磨削的颗粒数量比计算值少。对磨粒密度 C 进行计算修整或采用显微镜直接

观测每单位面积的磨粒数,可有效减小模型误差。试验环境乳化液的喷射也会影响磨削力的采集,可通过

调整喷射角度和压力或使用更高精度的采集卡来减小模型误差。

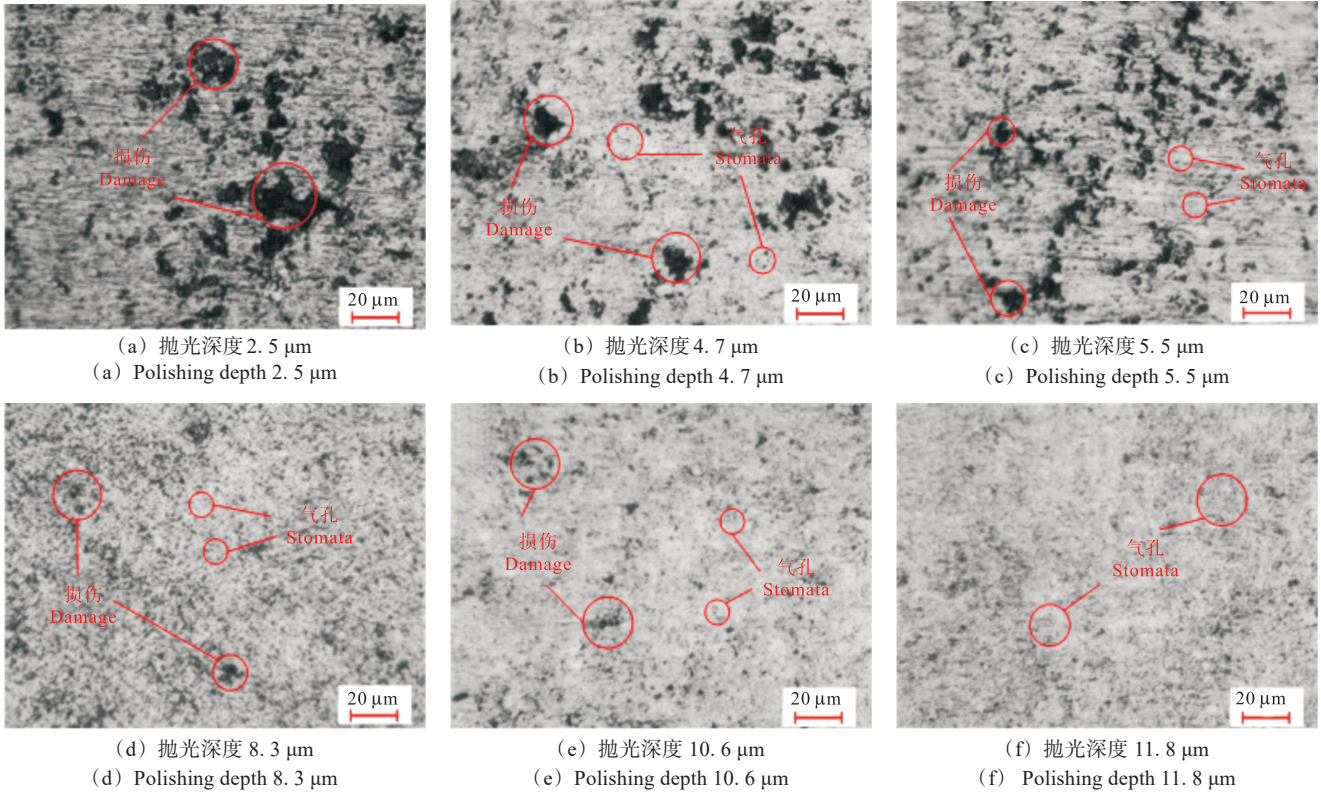


图8 MCF单点抛光亚表面损伤显微图

Fig. 8 Micrograph of MCF single-point polishing subsurface damage

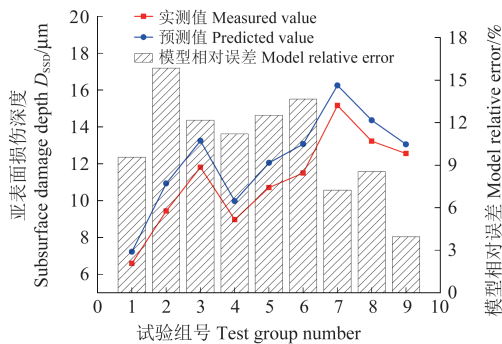


图9 亚表面损伤预测值与试验值对比

Fig. 9 Comparison between predicted and test values of the subsurface damage

3.2 工艺参数对表面质量影响

为了对磨削加工的工件表面质量进行评价,在实际加工质量检测环节中,常将平均算术偏差 R_a 作为衡量工件表面粗糙度的指标。使用Taylor Hobson表面粗糙度轮廓仪对磨削加工工件的 R_a 进行检测,进行多次测量取平均值,具体结果如表5所示。其中 S_0 组所示为初始表面粗糙度。

图10所示为亚表面损伤深度与表面粗糙度-磨削深度的关系。由图10可知,随着磨削深度的增加,亚表面损伤深度与表面粗糙度也逐渐增加。这是因为增大的磨削深度直接引起了材料去除体积的增加,进而使磨粒的法向力增大,最终导致亚表面损伤深度的

增加。图11所示为亚表面损伤深度与表面粗糙度-磨削深度的关系。由图11可知,随着进给速度的增加,亚表面损伤深度与表面粗糙度也随之增加。这可以用式(7)来解释,因为进给速度的增加导致磨粒切削路径增长,单位时间内去除的体积也增多,最终导致亚表面损伤深度的增加。图12所示为亚表面损伤深度与表面粗糙度-砂轮线速度的关系。由图12可知,随着主轴转速的增加,亚表面损伤深度与表面粗糙度减小。这是因为随着主轴转速的增加,切削时间减少,材料去除体积减小,从而使材料去除所需的磨削力减小,最终降低了亚表面损伤深度。

表5 工件表面粗糙度测量结果

Tab. 5 Measurement results of workpiece surface roughness				
序号 No.	$R_{a1}/\mu\text{m}$	$R_{a2}/\mu\text{m}$	$R_{a3}/\mu\text{m}$	平均值 Mean value $R_a/\mu\text{m}$
S_0	4.109	4.066	4.503	4.226
S_1	0.015	0.016	0.016	0.016
S_2	0.019	0.022	0.023	0.021
S_3	0.030	0.032	0.030	0.031
S_4	0.014	0.015	0.016	0.015
S_5	0.018	0.017	0.019	0.018
S_6	0.032	0.030	0.032	0.032
S_7	0.085	0.081	0.084	0.083
S_8	0.027	0.030	0.028	0.029
S_9	0.017	0.016	0.018	0.017

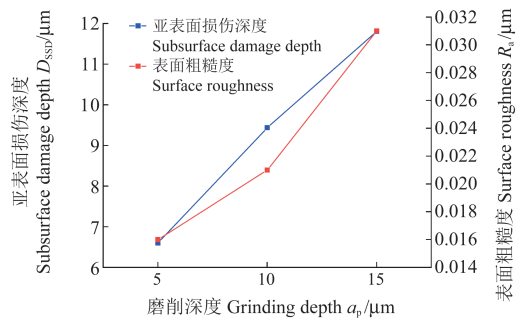


图 10 亚表面损伤深度与表面粗糙度-磨削深度的关系

Fig. 10 Relation between the subsurface damage depth and surface roughness-grinding depth

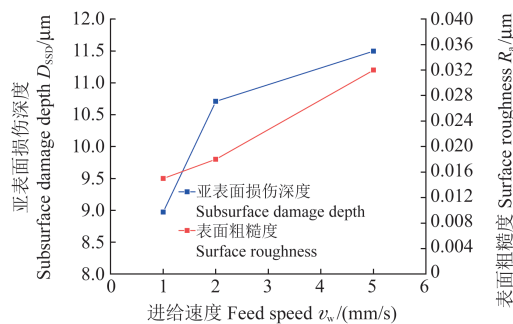


图 11 亚表面损伤深度与表面粗糙度-砂轮横向进给速度的关系

Fig. 11 Relation between the subsurface damage depth and surface roughness-transverse feed speed of the grinding wheel

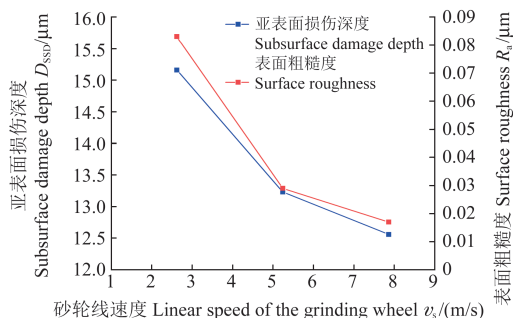


图 12 亚表面损伤深度与表面粗糙度-砂轮线速度的关系

Fig. 12 Relation between the subsurface damage depth and surface roughness-linear speed of the grinding wheel

在实际加工过程中,通过模型可以预测涂层在磨削过程中可能遭受的损伤程度。在保证一定加工效率的情况下,可以通过适当减小磨削深度和进给速度、增大主轴转速来减少亚表面损伤情况,有助于提高涂层性能和寿命。

4 结论

通过对杯形砂轮磨削硬质合金 WC-10Co-4Cr 平面涂层过程中亚表面损伤深度的研究,由单颗粒磨削材料去除理论和压痕断裂力学建立了亚表面损伤预测模型,经过单因素试验和单点抛光试验的验证,得出以下结论:

1) 基于材料去除理论的磨削力模型在描述磨削力变化规律方面表现出了较高的准确性,最大相对误差为 9.10%。这为理解和控制磨削力提供了可靠的基础。

2) 亚表面损伤模型能够较好地预测磨削过程中的亚表面损伤深度,其最大相对误差为 15.8%。这为磨削工艺的优化和质量控制提供了有效的工具。

3) 不同工艺参数对亚表面损伤深度与表面粗糙度有显著影响。亚表面损伤深度与表面粗糙度随磨削深度、进给速度的增加而增大,随主轴转速的增加而减小。这为工程实践中的工艺参数选择提供一定指导。

未来的研究可以进一步优化亚表面损伤模型,以更准确地预测亚表面损伤的形成机制,在实际加工过程中有助于制定合适的磨削策略,改进磨削工艺,减小涂层损伤,提高涂层的性能,延长涂层的寿命。

参考文献 (References)

- [1] LI S Y, WANG Z, WU Y L. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1/2/3): 34-41.
- [2] 向勇,任杰,白满社,等. 微晶玻璃研磨加工亚表面损伤深度预测方法及测量[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 214-221. XIANG Yong, REN Jie, BAI Manshe, et al. Prediction method and measurement of the depth of subsurface damage of glass-ceramic by lapping process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 214-221. (In Chinese)
- [3] 闫艳燕,马千里,张亚飞,等. 纵扭超声辅助磨削氮化硅亚表面损伤及其试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 55-66. YAN Yanyan, MA Qianli, ZHANG Yafei, et al. Experimental subsurface damage and experiment of silicon nitride by longitudinal torsion ultrasonic assisted grinding [J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 55-66. (In Chinese)
- [4] KLOCKE F, WIRTZ C, MUELLER S, et al. Analysis of the material behavior of cemented carbides (WC-Co) in grinding by single grain cutting tests [J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 209-213.
- [5] ZHANG Q L, SUET T, ZHAO Q L, et al. Surface damage mechanism of WC/Co and RB-SiC/Si composites under high spindle speed grinding (HSSG) [J]. Materials & Design, 2016 (92): 378-386.
- [6] 常乐怡,马琴琴,王文焱,等. WC 粒度对 WC-10Co-4Cr 复合粉末特性及其涂层性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(4): 136-145. CHANG Leyi, MA Douqin, WANG Wenyan, et al. Effect of WC particle size on properties of WC-10Co-4Cr composite powder and coating properties [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(4): 136-145. (In Chinese)
- [7] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1980, 63(9/10): 574-581.
- [8] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing [J]. Ceramics Transactions, 1999, 102: 113-128.
- [9] MAHMOUD T, TAMAKI J, YAN J. Three-dimensional shape modeling of diamond abrasive grains measured by scanning laser

- micro-scope [J]. *Key Engineering Materials*, 2003 (238/239) : 131-136.
- [10] XU H H K, JAHANMIR S, IVES L K. Effect of grinding on strength of tetragonal zirconia and zirconia-toughened alumina [J]. *Machining Science and Technology*, 1997, 1(1):49-66.
- [11] 张承龙,冯平法,吴志军,等. 旋转超声钻削的切削力数学模型及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15):149-155. ZHANG Chenglong, FENG Pingfa, WU Zhijun, et al. Mathematical modeling and experimental research for cutting force in rotary ultrasonic drilling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(15):149-155. (In Chinese)
- [12] WANG C, CHEN J, FANG Q, et al. Study on brittle material removal in the grinding process utilizing theoretical analysis and numerical simulation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9/10/11/12):2603-2614.
- [13] ARIF M, RAHMAN M, WONG Y S. Analytical model to determine the critical feed per edge for ductile-brittle transition in milling process of brittle materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(3):170-181.
- [14] CHEN X, ROWE W B, ALLANSON D R, et al. A grinding power model for selection of dressing and grinding conditions [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, 121(4):632-637.
- [15] KALISZER H. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1991, 31(3):435-436.
- [16] 全俊奎. 单颗粒磨削过程磨削力及亚表面损伤的理论与仿真研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018:10-14.
- QUAN Junkui. Study on grinding force and subsurface damage in single abrasive particle grinding process by theoretical analysis and simulation [D]. Changsha: Hunan University, 2018: 10-14. (In Chinese)
- [17] 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(2):184-189.
- [18] GU X S, ZHAO Q L, WANG H, et al. Fundamental study on damage-free machining of sapphire: revealing damage mechanisms via combining elastic stress fields and crystallographic structure [J]. *Ceramics International*, 2019, 45 (16) : 20684-20696.
- [19] DEMIDOVA N V, WU X J, LIU R. A fracture toughness model for brittle coating on ductile substrate under indentation loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 82:17-28.
- [20] 高睿,姜晨,严广和,等. 光学玻璃亚表面损伤深度预测及实验研究[J]. *光学仪器*, 2019, 41(5):53-58. GAO Rui, JIANG Chen, YAN Guanghe, et al. Prediction model and experimental study of subsurface damage of optical glass [J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(5):53-58. (In Chinese)
- [21] 吴威. 机器人辅助气囊抛光难加工材料的去除特性研究[D]. 厦门:厦门理工学院, 2023:50-53. WU Wei. Study on removal characteristics of difficult machining materials with bonnet polishing by robot-assisted [D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2023:50-53. (In Chinese)

Study on subsurface damage of WC-10Co-4Cr coating in planar grinding of cup sand wheels

SHEN Xiandi¹ JIANG Chen¹ JIANG Zhenyu¹ ZHANG Yixuan¹ WANG Lingqi² PU Guiyuan²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2. Shanghai Bearing Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: The subsurface damage depth of grinding WC-10Co-4Cr coating with a cup wheel was investigated in an effort to address the issue that the subsurface damage will cause the coating's performance to deteriorate. The theoretical formula of single particle grinding force was obtained based on the principles of indentation fracture mechanics and grinding material removal theory. A theoretical subsurface damage depth prediction model was developed based on the cup wheel's surface grinding properties. The design of the single factor surface grinding test and the single point polishing test was to confirm the model's accuracy. Analysis was done on how various grinding parameters affected the workpiece's surface roughness and depth of subsurface damage. The maximum relative error is 15.8%, and the predicted subsurface damage depth agrees with the measured value, according to the results. Surface roughness and subsurface damage depth rise with feed speed and grinding depth, but fall with spindle speed. The study has some theoretical significance for directing the process parameter optimization of cup wheel grinding of WC-10Co-4Cr coatings.

Key words: Cup wheel; Hard alloy coating; Single factor test; Single point polishing test; Subsurface damage depth

Corresponding author: JIANG Chen, E-mail: jc_bati@163.com

Fund: Yangtze River Delta Science and Technology Innovation Community Joint Research Project 2022 (CSJGG1302); State Key Laboratory of Mechanical Systems and Vibration Project (MSV202315)

Received: 2023-11-06 Revised: 2023-12-19