

# 渗碳辅助磨削强化表面创成机制研究

徐春伟, 张贺, 修世超\*, 洪远, 孙聪\*

(东北大学, 沈阳 110819)

**摘要:** **目的** 探究渗碳辅助磨削表面材料动态强化去除机制。**方法** 以 20CrMnTi 为研究对象, 首先进行渗碳辅助磨削的探索性试验, 分析磨削微渗碳的可行性。其次, 基于磨粒与工件材料间的相互作用, 提出一种动态表面创成模型, 分析增碳表面的渗碳效果。最后, 结合磨削渗碳强化试验验证增碳表面性形协同提升效果。**结果** 磨削接触区的微渗碳效应增大了表面的碳含量, 使得表面在冷却阶段更易析出强化相。该方法可有效提高加工表面的硬度 (最大提升了 60%)。微渗碳效应使得表面材料硬化, 同时抑制了脊状突起的形成, 使切屑更易形成, 从而提高表面精度 (粗糙度  $Ra$  降低了  $0.3 \mu\text{m}$ )。**结论** 针对低碳钢表面的高性能制备, 提出了一种新的渗碳辅助磨削强化方法, 该方法可实现表面材料的微渗碳。在强参数磨削热作用下表面材料会发生奥氏体-马氏体转变, 显著提高了硬度。同时, 微渗碳作用可削弱表面材料的塑性及犁削作用, 提高表面加工质量。

**关键词:** 渗碳辅助磨削; 表面创成; 微渗碳效应; 高性能表面制备

**中图分类号:** TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)12-0065-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.12.005

## Strengthening Surface Generation Mechanism of Carburization-assisted Grinding

XU Chun-wei, ZHANG He, XIU Shi-chao\*, HONG Yuan, SUN Cong\*

(Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**ABSTRACT:** The grinding surface with high machining quality and superior physical properties is in urgent demand, but most existing manufacturing methods have limitations in manufacturing cost and efficiency. Therefore, a carburization-assisted grinding method is proposed. It is an advanced surface modification technology, which can significantly improve surface properties, such as wear resistance, hardness, and roughness. Based on experiment and theoretical analysis, the dynamic strengthening and removal mechanism of surface materials in carburization-assisted grinding were explored.

Using 20CrMnTi as the research object, exploratory experiments were conducted on carburization-assisted grinding to analyze the feasibility of grinding micro carburization. The workpiece surface required carbon coating as the external diffusion source. This coating was a carbon paste product after dehydration, containing three ingredients: carbon source, branched-chain starch, and polyvinyl alcohol solution. After the pre-processing of the grinding surface, carburization-assisted grinding tests were conducted on the experimental platform, and a temperature acquisition system (TOPRIE TP700) was utilized, which was

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-08-08

Received: 2023-04-18; Revised: 2023-08-08

基金项目: 国家自然科学基金 (52175383, 52105433)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52175383, 52105433)

引文格式: 徐春伟, 张贺, 修世超, 等. 渗碳辅助磨削强化表面创成机制研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 65-73.

XU Chun-wei, ZHANG He, XIU Shi-chao, et al. Strengthening Surface Generation Mechanism of Carburization-assisted Grinding[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 65-73.

\*通信作者 (Corresponding author)

suitable for synchronous measurement of the temperature. The sizeable grinding depth and the low feeding rate were selected for the test condition without any cooling system, (the maximum grinding depth of up to 250  $\mu\text{m}$  and the slowest feeding rate of only 0.01 m/s), which could make the austenitizing transformation more thorough. The specimens were observed with a scanning electron microscope (SEM), and the carbon concentrations at different locations were detected with an energy dispersive spectrometer (EDS). Experimental results showed that the micro carburization effect in the contact zone increased the surface carbon content, making it easier for the surface to precipitate strengthening phases during the cooling stage.

Based on the interaction between abrasive particles and materials, a dynamic surface generation mechanism was proposed to analyze the carburization effect of the carburized surface. In the grinding contact area, the morphology of grits and interstices could affect the material flow. The plowing and cutting stage existed at the same time, and the formation of grooves, ridges, and chips on the grinding surface was dynamic. The micro carburization in the contact area increased the carbon concentration of the grinding surface. For mild steel, this effect could significantly increase the hardness and reduce the plasticity of the surface. As a result, the extent and height of the ridge were reduced, and the plowing effect was diminished. The carbon coating was broken to produce carbonaceous particles, and the rotating wheel squeezed these particles into the interstice to occupy the material flow space, so chips were more easily produced.

Finally, combined with a carburization-assisted grinding experiment, the properties and morphology's enhancement effect on the carburization surface were verified. The hardness of the grinding surface was measured with a Vickers hardness tester HTV-5S. The roughness  $R_a$  could be calculated based on the values of the surface profile at the cross-sections with a laser confocal microscope LEXT OLS4100. This method could effectively improve the hardness of the machined surface (maximum enhancement rate 60%), and surface accuracy ( $R_a$  reduced by 0.3  $\mu\text{m}$ ).

In summary, a new carburization-assisted grinding method is proposed to address the surface generation and strengthening issues of low-carbon steel, which can achieve micro carburization of surface materials. Under intense grinding heat, the surface material undergoes austenite-martensitic transformation, which can significantly improve hardness. Meanwhile, micro carburization weakens the plasticity of surface materials, which can also improve surface accuracy.

**KEY WORDS:** carburization-assisted grinding; surface generation; micro carburization effect; high performance surface manufacturing

通常要求一些关键结构的零部件表面满足精度高、性能良好的需求,如齿轮表面、轴承端面等。磨削是一种能得到高质量表面的有效的精加工方法。材料的固有特性和传统磨削的局限性限制了其表面性能的进一步改善<sup>[1]</sup>,因此需提出适合当前制造背景所需的控形、控性加工技术。首先,通过改进加工方法,直接改变材料去除工艺是获得高表面质量的一种关键途径,其中多场赋能加工是机械加工方法创新的重要来源之一,如超声波辅助磨削广泛应用于脆性和硬质材料的加工。戴槟等<sup>[2]</sup>研究了超声辅助磨削对C/SiC复合材料表面的影响。超声波辅助磨削通过引入外部动能来影响动态材料去除过程,但不会改变基质材料的固有加工特性。激光辅助磨削直接作用于材料基底,可改变表面层的可加工性<sup>[3]</sup>。You等<sup>[4]</sup>提出应用高性能激光来辅助磨削脆性材料,可以软化表面材料,获得更高的去除率,并减少表面损伤。上述2种改进的磨削方法主要用于高价值材料的表面成形,由于其加工成本较高,因此并不适合于大规模生产。其次,磨削方法的改进归功于复杂的表面生成机制。磨粒与工件材料之间的运动干涉是磨削表面成形的直接原因。Nguyen和Butler<sup>[5]</sup>提出了一种通过砂轮形貌识别活性磨粒及其凸起角度的算法,并应用于磨削机理分析。此外,磨削过程的热力耦合效应也会影响

表面质量。Sun等<sup>[6]</sup>通过构建表面微观结构演变的数字孪晶模型来参数化控制强化过程,这为获得磨削硬化表面提供了理论依据。

通过改进加工方法和磨削机理,可以获得更好的表面精度,但上述方法在改善表面物理性能方面仍具有局限性。通常会将各种强化技术应用于磨削后处理,以进一步提高表面的硬度、耐磨性和耐腐蚀性。热处理是最常见的强化方法,它利用温度梯度转变表面材料的微观相,有效地提高表面硬度。由此可见,集成多种工艺的复合加工方法是提升加工质量的重要途径。

表面渗碳技术是一种常用的强化方法。该方法可以改变表面性能,使零件具有高硬度、高耐磨表面和坚韧的内部结构<sup>[7]</sup>。张烈华等<sup>[8]</sup>研究开发了一种WC-Co硬质合金的表面渗碳强化处理工艺,结果显示,采用表面渗碳处理WC-Co硬质合金齿后,可获得厚度1 mm以上的硬化层。Saleh等<sup>[9]</sup>利用激光熔化技术对钛合金进行了表面渗碳试验,获得了0.2~0.5 mm的渗碳层,表面硬度和耐磨性得到显著提高。以上研究表明,表面渗碳可以有效提高表面质量。在应用过程中,由于现有的表面渗碳技术主要为了获得较厚的渗碳层,且会消耗大量能源<sup>[7]</sup>,因此探究更高效且环

保的表面渗碳技术具有重要意义。

为了提高磨削表面的加工质量,已探索并实际应用了各种复合磨削方法。由于大多数方法在改善材料固有特性方面存在工艺繁琐、能源损失严重及对环境不友好等局限性,因此文中提出一种将磨削加工与强化结合的渗碳辅助磨削强化方法。该方法在保证加工精度的同时,可以利用接触区积聚的磨削热对表面层产生微渗碳作用,从而提高表面硬度,改善表面粗糙度。

1 渗碳辅助磨削的试验研究

先前的研究指出,在干磨削下接触区的热量足以导致材料表面发生奥氏体相变<sup>[10]</sup>,奥氏体相的产生使得表面微渗碳成为可能。尽管传统的渗碳方法旨在获得厚度超过 1 mm 的碳层<sup>[11]</sup>,但这里致力于在磨削接触区(表面下 100 μm 以内)获得微渗碳效果,并提高材料表面的加工性能。为此,进行了渗碳辅助磨削的探索性试验。

1.1 试验平台

如图 1a 所示,试验平台包括平面磨床(M7120A)和温度采集系统(TOPRIE TP700)。利用设计好的夹具对工件进行固定,将 3 个热电偶埋在底部凹槽中。如图 1b 所示,测量点处于工件表面下 3 mm 处,以减少高温的梯度误差。利用记录仪采集动态温度数据,采样周期为 0.1 s。

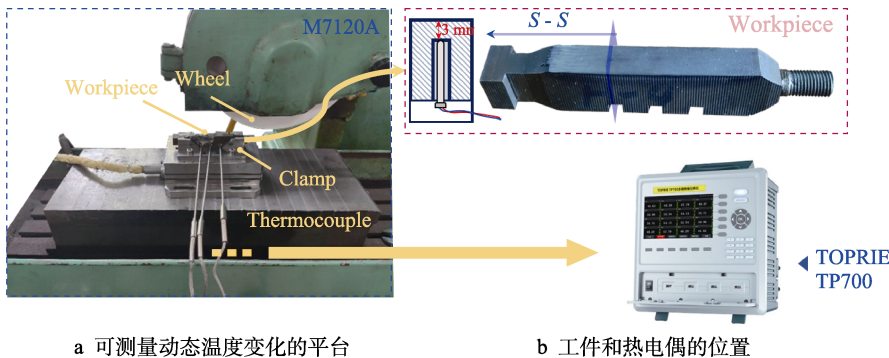


图 1 试验平台  
Fig.1 Experimental platform: a) carburization-assisted grinding experimental platform;  
b) workpiece and the location of the thermocouples

表 1 详细的试验参数  
Tab.1 Detailed experimental parameters

Workpiece material	Abrasive	Wheel's linear speed $v_s/(m \cdot s^{-1})$	Wheel's diameter $d_{eq}/mm$	Wheel granularity	Matrix of workpiece
20CrMnTi	White corundum	30	180	F60	Ferrite & Pearlite

表 2 20CrMnTi 的化学成分  
Tab.2 Chemical composition of 20CrMnTi

Element	C	Cr	Mn	Ti	Si	Ni	Cu	Fe
Mass fraction/%	0.2	1.2	1.0	0.08	0.3	0.03	0.03	Bal.

渗碳辅助磨削在上述平台上进行,相关试验参数如表 1 所示<sup>[12]</sup>。试验材料为 20CrMnTi,材料各元素成分如表 2 所示<sup>[13]</sup>。该材料广泛适用于制备齿轮的低碳合金钢,具有优异的渗碳性能<sup>[14]</sup>。这里设计了 3 个渗碳辅助磨削试验方案,在表 3 中标记为○(A1~A3),同时设计了无渗碳过程的磨削试验方案,在表 3 中标记为×(B1~B3)。

1.2 磨削表面预处理

在渗碳辅助磨削中,工件表面需要碳层作为外部扩散碳源。该碳层是由碳源、支链淀粉和聚乙烯醇溶液混合后脱水得到的碳糊产物。碳源为石墨、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和 CaCO<sub>3</sub>粉末的混合物,其质量比为 47.5 : 47.5 : 5。粉末的粒度至少为 200 目,以确保涂层的致密性。将碳糊状物均匀地涂抹在加工表面上,厚度约为 3 mm。待碳涂层自然干燥后,将其放进马弗炉中干燥。严格控制加热温度和加热时间,防止涂层开裂。试验分别在 50、100、150 ℃下干燥 3 次,每次最少持续时间为 30 min。如图 2 所示,得到碳层的厚度约为 2 mm,表面无明显裂纹。

1.3 磨削接触区的微渗碳效应

经预处理后,在试验平台上进行渗碳辅助磨削试验。在未冷却条件下,选择较大的磨削深度和较小的进给速度(最大磨削深度可达到 250 μm,最小进给速度仅为 0.01 m/s)。强磨削参数可使奥氏体化转变

表 3 试验方案  
Tab.3 Experiment scheme

Item	Grinding depth $a_p/\mu\text{m}$	Feeding speed $v_w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	carburization- assisted
A1	150	0.01	○
B1	150	0.01	×
A2	150	0.015	○
B2	150	0.015	×
A3	200	0.01	○
B3	200	0.01	×

更彻底,并充分展示了接触区的微渗碳效果。这种条件不适用于多次磨削,且碳层在磨削过程中是一次性的,因此渗碳辅助磨削试验在单程磨削条件下进行。

在磨削过程中,大量热积聚在接触区,导致工件表面发生奥氏体相变。奥氏体相的产生是微渗碳的先决条件,因为活性碳原子更有可能在奥氏体相的面心立方结构中扩散。当砂轮切入表面时,碳层首先接触磨粒,并被分解成细颗粒,如图 3 所示。

采用顺磨方式,使得碳质颗粒随着砂轮旋转进入接触区。在高压和低氧的密封接触区域中,碳质颗粒被分解成活性碳原子,并与表面的奥氏体相反应。表面碳浓度增加,活性碳原子沿着浓度梯度向内部扩散,因此在磨削接触区域存在微渗碳。

磨削热是影响微渗碳过程的一个重要因素。干磨削过程的温度高达  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远超过金属材料奥氏体

相变的临界温度<sup>[15]</sup>。通过测量接触区附近(在表面以下  $3\text{ mm}$ )的温度,评估磨削参数和碳层对磨削热的影响。如图 4 所示,磨削温度的动态变化可分为 2 个阶段:快速升温和缓慢降温。随着磨削深度的增加,材料去除变得更加剧烈,温度显著上升。进给速度的变化对磨削温度的影响为非线性。在合适的进给速度下,磨削热生成得很快,温度迅速升高。基于传热机制,磨削热的累积会减弱,温度会降低,且添加碳层对磨削温度无显著影响。

磨削温度的可变性在金相观察中更为直观。如图 5 所示,通过扫描电子显微镜(SEM)观察样品,并通过能量色散光谱仪(EDS)检测不同位置的碳浓度。每个位置拍摄 2 张不同区域的金相照片,如 A1-I 和 A1-II。

表面较平坦的暗相是在冷却过程中由奥氏体相转变的铁素体<sup>[16]</sup>。在较小的进给速度和磨削深度下,温度梯度平坦,冷却速度较慢。生成的铁素体均匀,可以观察到原始奥氏体晶粒的边界(图 5B1-II 中用绿色虚线标记)。高亮度相是快速冷却状态下由奥氏体形成的珠光体、贝氏体和马氏体的混合物。由于进给速度对磨削温度的影响并不显著,因此方案 A1、A2 中的微观结构形态大致相同。可以观察到大量铁素体相,且沉淀相主要由珠光体和贝氏体组成<sup>[17]</sup>。

在大磨削深度下,冷却过程的温度梯度明显增大,在方案 3 中可以观察到大量的贝氏体和马氏体相,铁素体相显著减少。同时,当选择较深的截面进行观察时,



图 2 磨削表面预处理示意图

Fig.2 Diagram of pre-processing in grinding surface

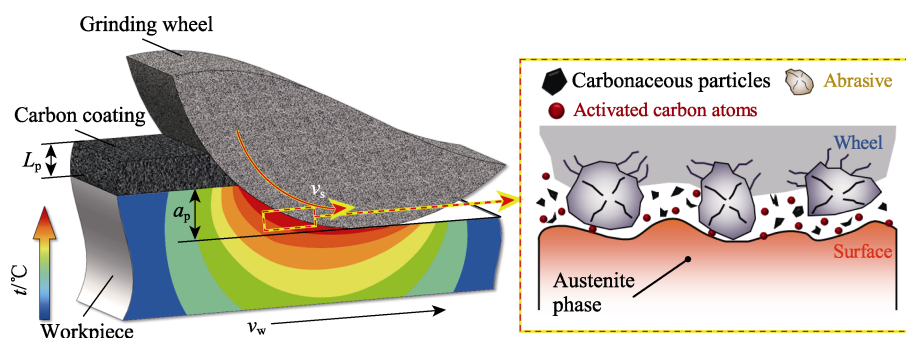


图 3 渗碳辅助磨削示意图

Fig.3 Diagram of carburization-assisted grinding



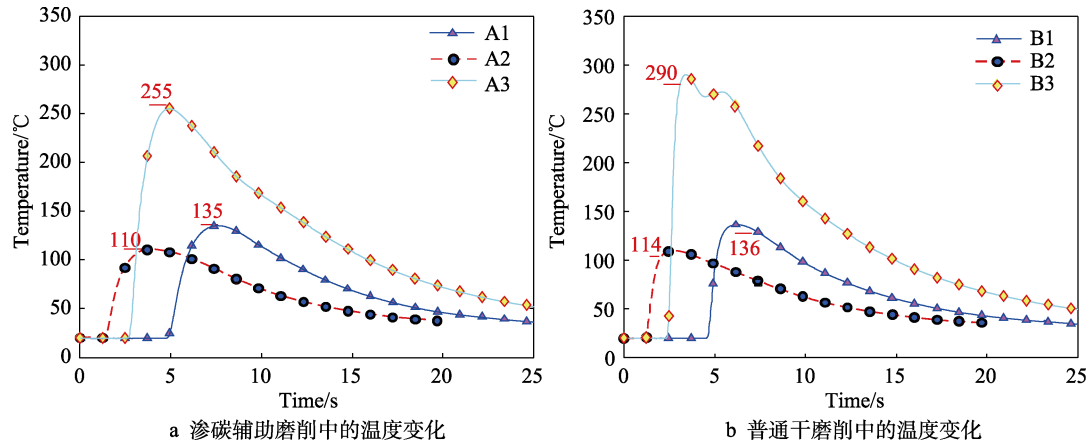


图 4 试验测量的动态磨削温度  
Fig.4 Experimentally measured dynamic grinding temperature: a) measurement temperature of carburization-assisted grinding; b) measurement temperature of general dry grinding

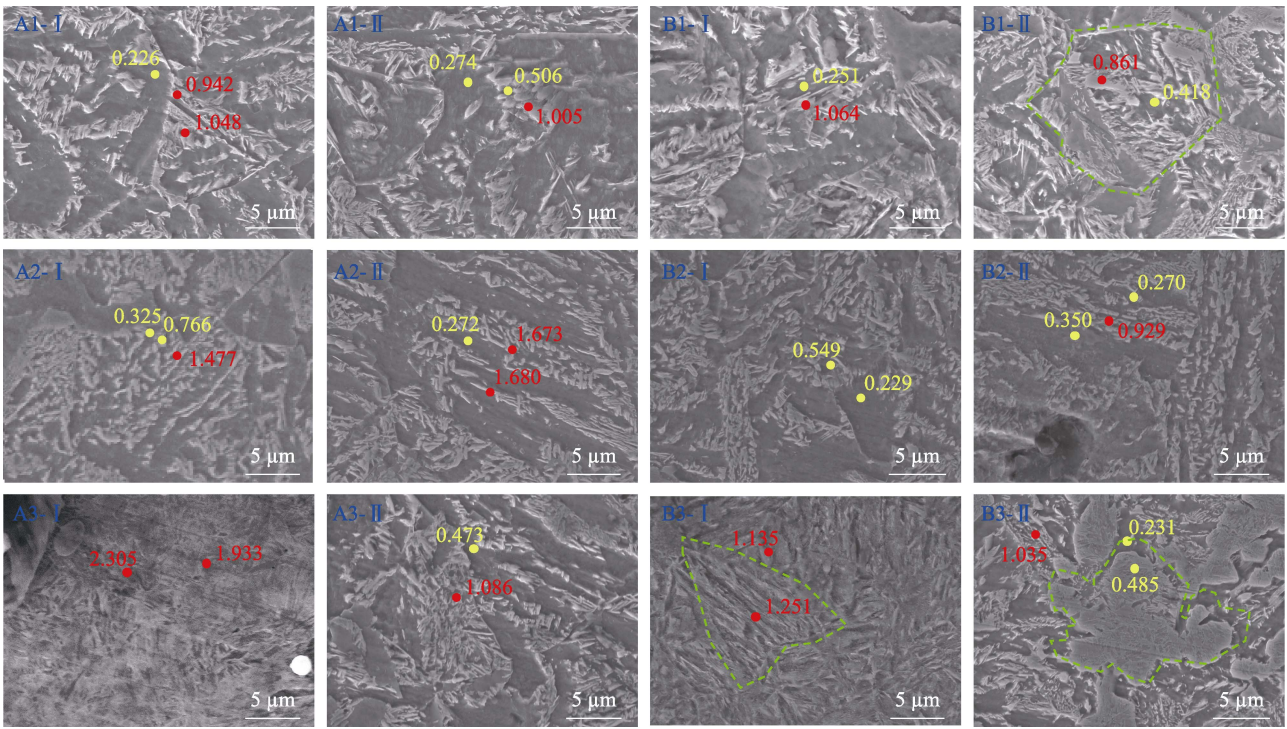


图 5 扫描电子显微镜下的金相组织  
Fig.5 Metallographic structure under scanning electron microscope

方案 3 中仍存在残余奥氏体相 (图 5B3-II 中用绿色虚线标记)。这表明磨削温度较高, 深层材料发生了奥氏体相变。由于深层材料的冷却速度较慢, 奥氏体不能完全转变为马氏体, 因此保留了部分残余的奥氏体相。

通过能量色散光谱仪 (EDS) 对试样进行检测, 以测试微渗碳的效果。如图 5 所示, 增强相 (珠光体、贝氏体和马氏体相的混合物) 和基体 (铁素体相) 的碳含量分别用红点和黄点标记。由于散布着一些渗碳体, 增强相的碳含量明显高于基体的碳含量。比较了不同相的平均碳含量, 结果如图 6 所示。可以看出, 在渗碳辅助磨削中, 基体和增强相的碳含量都显著增大, 这证明了磨削微渗碳的可行性。同时, 在较大的

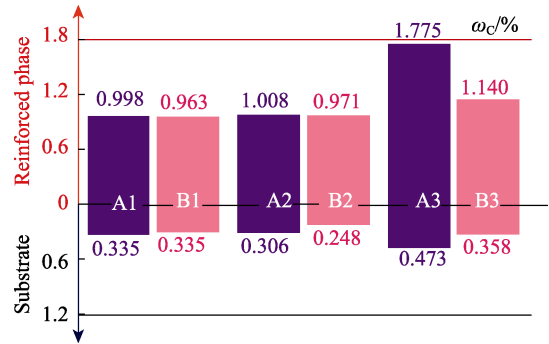


图 6 不同方案中不同阶段的平均碳含量  
Fig.6 Average carbon content of different phases in various items

磨削深度下渗碳效果更显著,表明较高的磨削温度可以促进这一过程。

## 2 磨削表面的动态生成机理

微渗碳效应可以改变磨削接触区材料表面的物理性能,从而影响表面的动态材料去除和成形过程。这里提出了一种动态表面生成机制,来分析微渗碳的效果。

### 2.1 磨粒与工件材料间的相互作用

人们普遍认为磨削过程可以分为摩擦、犁削和切削 3 个阶段<sup>[18]</sup>。其中,  $h_p$  和  $h_c$  分别表示犁削和切削的临界切削高度<sup>[19]</sup>;  $\delta$  表示瞬时未成形的切削厚度。当  $h_p < \delta$  时,表面材料开始塑性变形<sup>[20]</sup>。干涉区域中的材料可以流向磨粒的正面和侧面,形成碎屑和隆起。 $V_g$  表示干涉区域中材料的总体积,  $V_r$ 、 $V_c$  分别表示流向侧面和正面的材料的体积。其中,磨削接触区的磨粒之间存在间隙。间隙的空间尺寸与磨粒的尺寸和位置有关,且间隙限制了材料的最大流量  $V_{r,max}$ 。

当  $V_r > V_{r,max}$  时,间隙的空间不足以容纳所有材料,且多余的材料会流到磨粒的前部空隙中,所以  $V_r$  和  $V_c$  分别用式 (1) 表示。

$$\begin{cases} V_r = V_{r,max} \\ V_c = V_g - V_{r,max} \end{cases} \quad (1)$$

类似地,磨粒前端间隙限制了材料的堆积。当  $V_c = V_{c,max}$  时,磨粒的两侧和前部都无多余空间来容纳材料的连续变形。如果磨粒继续向前移动,它会在堆叠材料内部产生巨大的剪切应力,材料会断裂,形成碎屑<sup>[21]</sup>。在多磨粒磨削中,脊和碎屑的形成是动态的,并受到磨粒的干涉体积和间隙的影响。犁削和切削 2 个阶段之间无明确的界限。

### 2.2 干涉区内材料的塑性流动和堆积

根据以上分析,磨削表面在犁削和切削阶段形成。凹槽、隆起和碎屑的产生引起了表面形貌的动态变化。对干涉区附近材料的塑性流动和堆积过程进行了研究。假设磨粒为刚性球体,表面材料具有理想的塑性。

如图 7a 所示,磨粒在材料表面犁过,以对称的拱形在两侧留下与磨粒边缘相切的脊状突起,见式 (2)。

$$\begin{cases} V_{r1} = V_{r2} \\ V_{r1} = \frac{V_g}{2}(1 - \alpha_{b0}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{b0}$  为理想塑性表面的材料去除率,可以根据磨粒与工件之间的相对运动和几何对应关系来求解。

沿着表面的横截面视图如图 7b 所示。当前时刻 ( $t_1$ ) 磨粒的位置由实心黑线表示,磨粒的中心为  $C_1$ 。类似地,最后时刻  $t_0 = t_1 - \Delta t$  用虚线表示,中心位置为  $C_0$ 。磨粒上部的新月形区域(用实线和虚线包围)表示去除区域,该区域的微分量  $dS$  用红色标记。以  $C_1$  为原点,水平方向为极轴,构建极坐标系。如图 7b 中黑色箭头所示,因此  $dS$  解析方程可以表示为式 (3)。

$$dS = d\theta \cdot R_c (\rho_1 - \rho_0) \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为极角的弧度;  $R_c$  为磨粒在横截面上的半径;  $\rho_0$ 、 $\rho_1$  分别为  $t_0$ 、 $t_1$  时刻极坐标系中磨粒边界的函数,计算见式 (4)。

$$\begin{cases} \rho_1 = R_c \\ \rho_0(\theta) = \sqrt{\Delta l^2 \sin^2 \theta - \Delta l^2 + R_c^2} - \Delta l \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta l = \Delta t(v_s - v_w)$ ,  $\Delta l$  为  $C_1$  和  $C_0$  之间的距离。如图 7c 所示,  $dS$  被分解为水平方向和垂直方向,表示流向磨粒侧面和前部的材料面积,该面积可以描述为式 (5)。

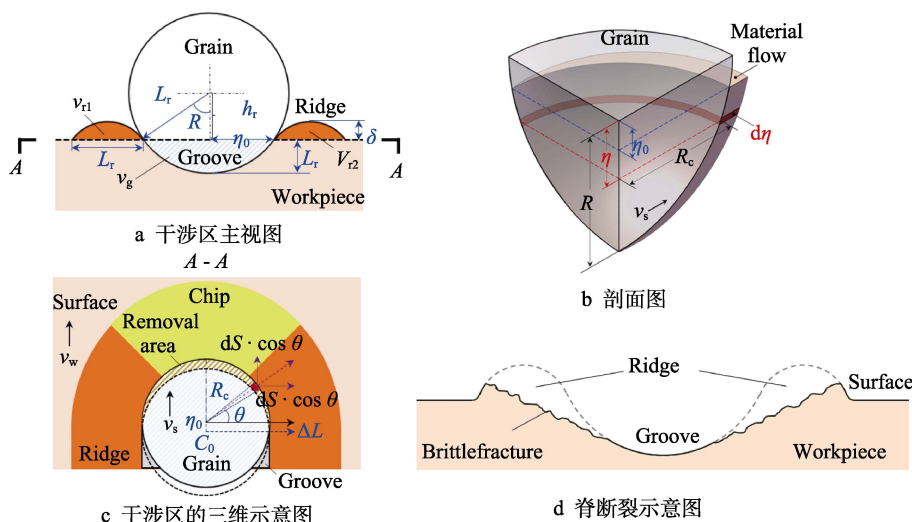


图 7 干涉区域内材料的塑性流动和堆积

Fig.7 Plastic flow and stacking of materials in interference region: a) main view of the interfering area; b) cross-sectional view; c) three-dimensional schematic of the interfering area; d) diagram of the ridge break

$$\begin{cases} S_c = \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot dS = \\ \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot R_c (R_c + \Delta l \sin \theta - \sqrt{\Delta l^2 \sin^2 \theta - \Delta l^2 + R_c^2}) d\theta \\ S_r = \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot dS = \\ \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot R_c (R_c + \Delta l \sin \theta - \sqrt{\Delta l^2 \sin^2 \theta - \Delta l^2 + R_c^2}) d\theta \end{cases} \quad (5)$$

如图 7c 所示, 塑性流动区域在三维空间中沿垂直方向切片。每个切片层的厚度为  $d\eta$ 。其中,  $\eta_0$  表示从磨粒中心到磨削表面的垂直距离, 满足:  $\eta_0 = R - \delta$ 。在三维坐标系中,  $R_c$  成为一个动态变量, 可以表示为  $R_c = \sqrt{R^2 - \eta^2}$ 。材料流动的体积可以表述为式 (6)。

$$\begin{cases} V_{r1} + V_{r2} = \int_{\eta_0}^R S_r d\eta = \int_{R-\delta}^R \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cdot \sqrt{R^2 - \eta^2} (\sqrt{R^2 - \eta^2} + \\ \Delta l \sin \theta - \sqrt{\Delta l^2 \sin^2 \theta - \Delta l^2 + R^2 - \eta^2}) d\theta \cdot d\eta \\ V_c = \int_{\eta_0}^R S_c d\eta = \int_{R-\delta}^R \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \sqrt{R^2 - \eta^2} (\sqrt{R^2 - \eta^2} + \\ \Delta l \sin \theta - \sqrt{\Delta l^2 \sin^2 \theta - \Delta l^2 + R^2 - \eta^2}) d\theta \cdot d\eta \end{cases} \quad (6)$$

由于材料去除率是磨粒半径  $R$ 、压入深度  $\delta$ 、磨削速度  $v_s$  和进给速度  $v_w$  的函数, 每个磨粒的材料去除率  $\alpha_{b0}$  都可在磨削过程中求解。

### 2.3 磨削表面生成

对于实际的加工过程, 磨削表面通常具有一定的硬脆性。当脊部过高时, 表面材料会沿着剪切面断裂, 导致凹槽边缘变宽, 脊部基本消失。研究表明, 磨粒很难压入硬质材料表面, 脊状突起易发生断裂<sup>[22]</sup>。当表面硬度等于磨粒硬度时, 磨粒完全无法压入表面, 或者出现脆性断裂, 与表面重合, 不会产生隆起。需要引入相对硬度, 以适应实际的磨削过程, 见式 (7)。

$$\begin{cases} L_r = 2 \frac{HV_g - HV_s}{HV_g} \sqrt{\delta(2R + \delta)(1 - \alpha_{b0})} \\ h_r = \delta \frac{HV_g - HV_s}{HV_g} \sqrt{1 - \alpha_{b0}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $HV_g$  和  $HV_s$  分别为磨粒和材料表面的维氏硬度。

随着磨粒逐渐被压入表面, 材料会经历几个阶段, 如弹性变形、材料流动、塑性堆积和切屑断裂。在磨削接触区, 磨粒和间隙的形态会影响材料的流动, 接触区的微渗碳增大了磨削表面的碳浓度。对于低碳钢, 这种效应可以显著提高表面硬度和塑性, 因此突起的范围和高度减小, 犁削效应减弱。此外, 碳涂层被破坏, 产生了碳质颗粒, 砂轮将这些颗粒挤压到空隙中, 占据材料流动空间, 因此  $V_{r,max}$  和  $V_{a,max}$  迅速减小, 更容易产生切屑。

### 3 渗碳辅助磨削的加工表面硬度与粗糙度表征分析

通过对比渗碳辅助磨削后的加工表面与普通磨削表面的加工质量, 探究了渗碳辅助磨削的作用。已知 20CrMnTi 的初始硬度为 306HV<sup>[23]</sup>。首先, 使用维氏硬度计 HTV-5S 测量磨削表面的硬度。如图 8a 所示, 在磨削表面等距离选择 5 个点测量其硬度。

用 5 次测量值的平均值来表示最终的表面硬度。如图 8b 所示。从统计结果来看, 渗碳辅助磨削强化技术极大地提高了表面硬度。经渗碳辅助磨削后表面硬度比普通磨削有所提高。相较于普通磨削工艺, 可将表面硬度提高 60%。值得注意的是, 这种表面硬化效应对磨削深度较大的工件更显著。这是由于奥氏体化阶段越长, 渗碳越明显。实验测得的温度数据也表明, 随着磨削深度的增大, 工件表面处于高温区的时间相应增加。

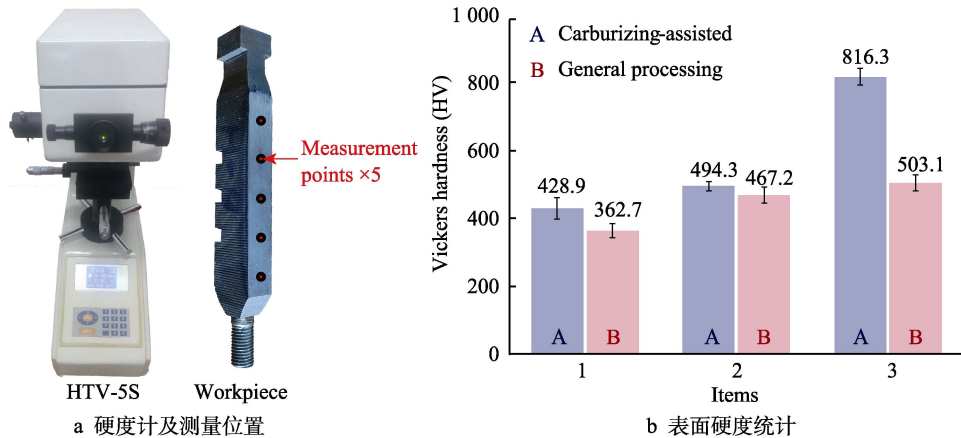


图 8 加工表面的维氏硬度统计

Fig.8 Vickers hardness measurement of machining surface: a) Vickers hardness tester and measuring position; b) statistics results of surface hardness



为了进一步探索,使用激光共聚焦显微镜 LEXT OLS4100 观察磨削表面的三维形态,并测量其表面粗糙度,测量结果如图 9 所示。

在垂直于进给方向随机选择 5 个横截面。粗糙度  $Ra$  可以基于横截面的表面轮廓值来计算。用 5 个横

截面结果的平均值来表示磨削表面的粗糙度,在不同磨削参数下的统计结果如图 9 所示。分析结果可知,经渗碳辅助磨削后机加工表面的粗糙度  $Ra$  降低了约  $0.3\ \mu\text{m}$ 。以上结果表明,接触区的微渗碳效应不仅提高了表面硬度,而且降低了加工表面的粗糙度。

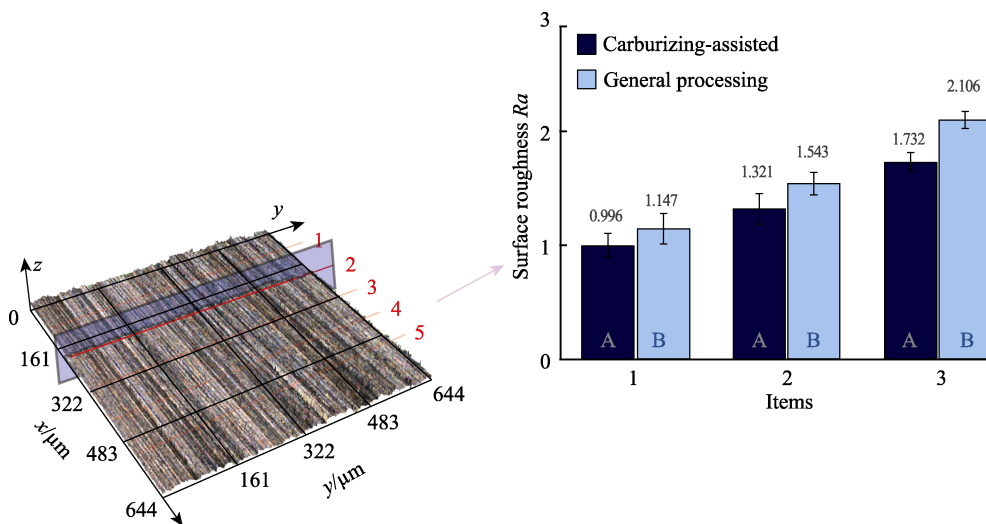


图 9 加工表面的粗糙度统计  
Fig.9 Measurement results of surface roughness

## 4 结论

1) 针对低碳钢表面的高精度高性能需求,提出了一种新的渗碳辅助磨削方法。确定了机械加工表面碳层的制备方法。通过探索性试验发现,在强参数磨削热作用下表面材料会发生奥氏体-马氏体转变。同时,碳质颗粒会在接触区域释放活性碳原子,从而实现表面材料的微渗碳。

2) 在渗碳辅助磨削的基础上,分析了磨削表面的生成机理。指出在磨粒和表面相互作用下,犁削和切削会动态交替进行。同时,这种动态过程还受到材料的流动方向和间隙分布的影响。从磨削表面生成机理的角度指出渗碳辅助磨削产生的影响:微渗碳作用可显著提高硬度,削弱表面材料的塑性,提高表面加工质量。

3) 通过测量渗碳辅助强化磨削表面的硬度和粗糙度,分析该方法的实际效果。结果表明,该方法有效地提高了加工表面的硬度(最大提升了 60%),降低了表面粗糙度(粗糙度  $Ra$  降低了约  $0.3\ \mu\text{m}$ )。通过调整磨削参数(磨削深度或进给速度),这种增益效应可能更显著。

### 参考文献:

- [1] 卢守相, 郭塞, 张建秋, 等. 高性能难加工材料可磨削性研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 12-42.  
LU Shou-xiang, GUO Sai, ZHANG Jian-qiu, et al. Grin-

- dability of High Performance Difficult-to-machine Materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 12-42.
- [2] 戴槟, 李晓舟, 许金凯, 等. 振幅对超声辅助磨削 C/SiC 复合材料表面形貌的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 263-273.  
DAI Bin, LI Xiao-zhou, XU Jin-kai, et al. Amplitude Effect on Surface Morphology by Ultrasonic-assisted Grinding of C/SiC Composite[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 263-273.
- [3] LIU Shuai, XIAO Gui-jian, LIN Ou-chuan, et al. A New One-step Approach for the Fabrication of Microgrooves on Inconel 718 Surface with Microporous Structure and Nanoparticles Having Ultrahigh Adhesion and Anisotropic Wettability: Laser Belt Processing[J]. Applied Surface Science, 2023, 607: 155108.
- [4] YOU Kai-yuan, YAN Guang-peng, LUO Xi-chun, etc. Advances in Laser Assisted Machining of Hard and Brittle Materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 677-692.
- [5] NGUYEN T A, BUTLER D L. Simulation of Surface Grinding Process, Part 2: Interaction of the Abrasive Grain with the Workpiece[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1329-1336.
- [6] SUN Cong, HONG Yuan, XIU Shi-chao, etc. Grain Refinement Mechanism of Metamorphic Layers by Abrasive Grinding Hardening[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 125-141.
- [7] WANG Yan-hui, YANG Zhi-nan, ZHANG Fu-cheng, etc. Microstructures and Mechanical Properties of Surface and Center of Carburizing 23Cr2Ni2Si1Mo Steel Subjected to



- Low-temperature Austempering[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 670: 166-177.
- [8] 张烈华, FANG Zhigang Zak, 许林. WC-Co 硬质合金表面渗碳强化工艺研究与应用[J]. *金属热处理*, 2016, 41(2): 84-87.
- ZHANG Lie-hua, FANG Zhigang Zak, XU Lin. Surface Carbonizing and Its Application on WC-Co Cemented Carbides[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(2): 84-87.
- [9] SALEH A F, ABOUD J H, BENYOUNIS K Y. Surface Carburizing of Ti-6Al-4V Alloy by Laser Melting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(3): 257-267.
- [10] HONG Yuan, SUN Cong, XIU Shi-chao, et al. Phase Evolution and Strengthening Mechanism Induced by Grinding Hardening[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(7): 5605-5622.
- [11] KHAN DANISH, GAUTHAM B P. Integrated Modeling of Carburizing-Quenching-Tempering of Steel Gears for an ICME Framework[J]. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2018, 7(1): 28-41.
- [12] SUN Cong, HONG Yuan, XIU Shi-chao, et al. Complicated Microstructure Transformation Mechanism of the Greenly Grinding Coating Layer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 761-780.
- [13] 张胜博, 向嵩, 成桃, 等. 超声滚压 20CrMnTi 纳米化表面对局部腐蚀萌生行为的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 136-143.
- ZHANG Sheng-bo, XIANG Song, CHENG Tao, et al. Influence of Surface Nanocrystallization of 20CrMnTi on Behavior of Localized Corrosion by Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(8): 136-143.
- [14] TANG Jin-chi, HU Xiong-feng, LAI Fu-qiang, et al. Evolution of Fretting Wear Behaviors and Mechanisms of 20CrMnTi Steel after Carburizing[J]. *Metals*, 2020, 10(2): 179.
- [15] SUN Cong, XIU Shi-chao, LI Qing-liang, et al. Research on the Embossment Phenomenon of Disc Grinding by Workpiece's Removal Rate[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, 19(3): 739-755.
- [16] GARCIA-MATEO C, JIMENEZ J A, LOPEZ-EZQUERRA B, etc. Analyzing the Scale of the Bainitic Ferrite Plates by XRD, SEM and TEM[J]. *Materials Characterization*, 2016, 122: 83-89.
- [17] SONG Wen-wen, PRAHL Ulrich, MA Yan, et al. Multiphase-Field Simulation of Cementite Precipitation during Isothermal Lower Bainitic Transformation[J]. *Steel Research International*, 2018, 89(8): 1800028.
- [18] LIANG W, ELIYAHU D, ILCHENKO V S, et al. High Spectral Purity Kerr Frequency Comb Radio Frequency Photonic Oscillator[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 7957.
- [19] GORANA V K, JAIN V K, LAL G K. Forces Prediction during Material Deformation in Abrasive Flow Machining[J]. *Wear*, 2006, 260(1): 128-139.
- [20] YANG Min, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Maximum Undeformed Equivalent Chip Thickness for Ductile-brittle Transition of Zirconia Ceramics under Different Lubrication Conditions[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 122: 55-65.
- [21] GAO Teng, LI Chang-he, YANG Min, et al. Mechanics Analysis and Predictive Force Models for the Single-diamond Grain Grinding of Carbon Fiber Reinforced Polymers Using CNT Nano-lubricant[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 290: 116976.
- [22] LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin, WU Yong-bo, et al. Experimental Study on Brittle-Ductile Transition in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of Monocrystal Sapphire Using Single Diamond Abrasive Grain[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 71: 41-51.
- [23] LIU li-gang, LI Qiang, LIU Xiao-hei, et al. Stress Field Simulation of Carburized Specimens with Different Carbon Content during Quenching Process[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(4): 1251-1255.

责任编辑: 彭颀