

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20230214002

纳米微囊砂轮磨削工件表面自润滑层的形成

关集俱¹ 徐正亚¹ 杨兰玉¹ 夏雨² 许雪峰²

(1. 常熟理工学院机械工程学院 苏州 215500;

2. 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室 杭州 310014)

摘要: 在磨削时磨削液难以有效渗入磨削区域起冷却润滑作用。提出利用润滑剂油酸(OA)填充碳纳米管(CNTs)制备CNTs@OA纳米微囊,并以其为填充剂制备树脂砂轮,磨削时随着纳米微囊的破裂,油酸可释放到磨削区形成自润滑层起润滑作用,从而提高砂轮的磨削性能。首先,制备纳米微囊并对其进行表征,分析微囊在砂轮中的存在形式,考察微囊的填充对其力学性能的影响;其次,研究砂轮磨削GCr15钢时纳米微囊的含量和磨削速度对磨削力、磨削温度、磨削比和表面粗糙度的影响,分析磨削过程中纳米微囊释放润滑剂油酸并产生自润滑作用的机制。结果表明,纳米微囊具有较好的热稳定性,能够抵抗树脂砂轮的固化温度并保护其中的油酸,当微囊的填充量小于16%时,砂轮的力学性能可以满足使用需求。与普通砂轮比,纳米微囊砂轮磨削时的磨削力可减小40%,磨削温度降低45%,工件表面粗糙度减少15%,磨削比可提高30%。磨削过程中,砂轮中的纳米微囊可将其空腔中的润滑剂油酸不断被释放到磨削界面上形成自润滑层,使砂轮具有了较好的自润滑作用,从而提高了其磨削性能。研究成果可为解决磨削过程的润滑问题提供一种可行的技术路线。

关键词: 碳纳米管;油酸;纳米微囊;砂轮;自润滑;磨削性能

中图分类号: TH162

Formation of Self-lubricating Layer on Workpiece Surface Ground by Nano-encapsulated Grinding Wheel

GUAN Jiju¹ XU Zhengya¹ YANG Lanyu¹ XIA Yu² XU Xuefeng²

(1. College of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Soochow 215500, China;

2. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Among the many machining methods available, grinding is one of the most important and is primarily used for the final processing of different machine parts. The grinding wheel rotates at a high speed, which creates an airflow barrier around the grinding area, preventing the grinding fluid from effectively cooling and lubricating the area during grinding. This leads to grinding burns and other surface quality problems of the workpiece and affects machining efficiency. To address this problem, this study proposes filling the cavity of carbon nanotubes (CNTs) with an oleic acid (OA) lubricant, which is used as a filler in resin-bonded grinding wheels. Using this nano-capsule as a filler could help improve the strength of the grinding wheel owing to the high strength and thermal stability of the CNTs. The most important benefit of this method is the release of oleic acid into the grinding area when the nano-capsules rupture, and the self-lubricating layer formed can directly lubricate the grinding area, thereby improving the performance of the grinding wheel. First, nano-capsules are prepared by widely used wet chemical methods and then characterized by Thermogravimetric Analysis (TG), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Transmission Electron Microscopy (TEM)

基金项目: 国家自然科学基金(51805345, 52275468)。

Fund: National Natural Science Foundation of China (51805345, 52275468).

收稿日期: 2023-02-14; 修改日期: 2023-05-25; 接受日期: 2023-09-06; 上线日期: 2023-12-15。

Received February 14, 2023; Revised May 25, 2023; Accepted in revised form September 9, 2023; Available online December 15, 2023.

引用格式: 关集俱, 徐正亚, 杨兰玉, 等. 纳米微囊砂轮磨削工件表面自润滑层的形成[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 254-266.

Citation format: GUAN Jiju, XU Zhengya, YANG Lanyu, et al. Formation of self-lubricating layer on workpiece surface ground by nano-encapsulated grinding wheel [J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 254-266.

to evaluate the material stability, surface functional groups, and morphology. In addition, we evaluate the presence of nano-capsules in the grinding wheel and the effect of the nano-capsule filling on the tensile strength and hardness of the grinding wheel. Finally, the effects of the nano-capsule content and grinding speed on the grinding force, grinding temperature, grinding ratio, and workpiece surface roughness during the grinding of GCr15 steel are studied. The release of OA in the grinding wheel during the grinding process is studied using X-ray photoelectron spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM) analysis of the workpiece surface, based on which the formation mechanism of the self-lubricating film is further clarified. A mechanism for the lubrication effect of the self-lubricating film is also proposed. The nano-capsules were successfully prepared by wet chemical methods; they were found to have a filling rate of approximately 20% and were thermally stable. During the curing process, the nano-capsules could resist the curing temperature of the resin and effectively protect the oleic acid. According to the tensile test, the nano-capsules increased the strength of the grinding wheel by approximately 25% when the filling amount was approximately 8%. Further filling of the nano-capsules reduced the tensile strength of the grinding wheel, and the hardness of the grinding wheel continued to decrease with an increase in the nano-capsule content. Moreover, the mechanical properties of the grinding wheel satisfied the requirements of its intended use when the nano-capsule filling content was less than 16%. Compared with ordinary resin grinding wheels, the grinding force of the nano-capsule filled grinding wheels can be reduced by 40%, the grinding temperature can be reduced by 45%, the surface roughness value can be reduced by 15%, and the grinding ratio can be increased by 30%. The nano-capsules embedded in the grinding wheel continuously released OA within its cavity onto the grinding interface during the surface grinding process, forming a composite self-lubricating layer. Because of this lubricating layer, the grinding wheel achieved better lubrication performance, which in turn improves the grinding performance of the wheel. The research presented in this paper provides a viable technical solution for grinding lubrication problems, which is beneficial for improving the grinding efficiency and surface quality of workpieces. The grinding wheel developed in this study has significant potential for application in green machining conditions where a large amount of grinding fluid is not allowed.

Keywords: carbon nanotubes; oleic acid; nano-capsules; grinding wheel; self-lubricating; grinding performance

0 前言

磨削通常是各类精密零件的终加工工艺。磨削时, 砂轮高速旋转在磨削区形成气流屏障, 阻挡了磨削液的有效渗入, 使得磨削区得不到有效的冷却润滑, 从而导致工件出现各种表面质量问题^[1]。为解决此问题, 目前除了采用高压喷射法、空气挡板辅助截断气流法^[2-3]等手段强化磨削区供液外, 也有学者开发自润滑型砂轮, 使砂轮在磨削过程中自主释放润滑剂, 达到增强润滑的效果。例如: 日本学者 SHAJI 等^[4]以石墨为填充剂制备了一种树脂砂轮, 磨削过程中石墨被释放到磨削区起到良好的润滑作用。李伟、滕霖等^[5-6]开发的浸渗砂轮将液体润滑剂、固体润滑剂等渗入磨具气孔中, 使其加工时在磨粒表面形成润滑膜, 但液体润滑剂易堵塞磨具气孔, 且在较高的磨削温度作用下易被融化、甩出, 影响其润滑性, 因此砂轮浸渗技术不能将润滑剂较好的保存在磨具中, 如将润滑剂直接作为填充剂与磨具一起固化, 则润滑剂可能会在固化过程中失效。

日本学者山口崇等^[7]将含有润滑剂的微型微囊(5~20 μm) 固化到砂轮内部, 如图 1 所示。该砂轮在磨削时伴随着胶囊的破损, 润滑剂可直接进入磨

削区起润滑作用, 但微米级微囊的尺寸较大, 砂轮高速旋转时微囊内的润滑剂被甩出, 导致后续磨削仍得不到充分润滑。许雪峰等^[8]提出以纳米级的 β -环糊精/液体润滑剂的分子胶囊为填料制备一种自润滑树脂砂轮, 磨削过程中胶囊破裂, 可均匀释放出润滑剂发挥作用, 但这种胶囊的填充对磨具强度影响大, 砂轮高速旋转时存在破裂风险。

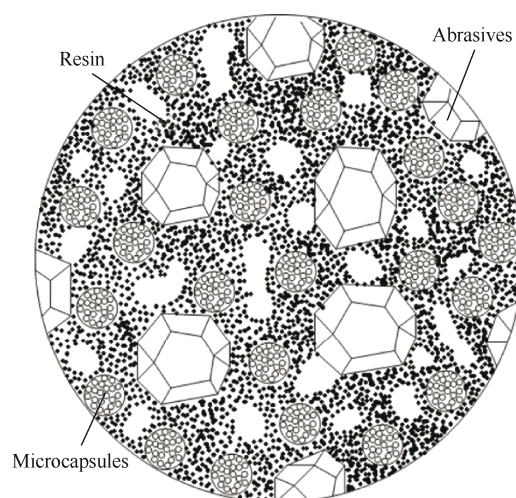


图 1 内部固结微型微囊的磨具

Fig. 1 Abrasive tool with internally consolidated microcapsules

为了解决上述浸渗砂轮和微囊砂轮存在的问题,本文提出将各种润滑剂填充进碳纳米管(CNTs)的空腔内制备纳米微囊,并以微囊为填料研制一种具有自润滑性能的纳米微囊砂轮。这种纳米微囊砂轮的优点在于:一方面,磨削过程中纳米微囊可更均匀释放出润滑剂发挥润滑作用,另一方面,纳米微囊可以增强砂轮的强度使其达到更高的磨削速度。CNTs是片状石墨卷曲而成的纳米管,其两端为半球形的富勒烯“端盖”,内部则是中空结构^[9]。CNTs具有较好的导热性能、力学性能和润滑性能,可在摩擦区域发挥类似“微轴承”的润滑作用^[10-11]。CNTs内腔的直径为10~50 nm,在合适条件下,其他客体分子可以被填入CNTs内腔中,从而形成一种纳米微囊,以改善CNTs本身的摩擦性能、电磁性能等^[12]。本文以所制备的CNTs@OA纳米微囊为树脂砂轮的填料,研究这种砂轮磨削GCr15时的自润滑性能,分析了磨削时纳米微囊释放OA的并产生自润滑作用的机制,为这种新型砂轮在磨削各种精密零部件加工中的应用奠定了理论基础。

1 试验部分

1.1 砂轮制备及性能

多壁碳纳米管由上海阿拉丁公司提供,纯度 $\geq 95.5\%$ 、空腔内径约15 nm,油酸(分子式 $C_{18}H_{34}O_2$,分析纯)购自国药集团化学试剂公司。市售CNTs的长径比大,且端口封闭,不利于填充,需先对CNTs进行酸化、短化处理^[13]。酸处理时,将50 g的CNTs

投入1.5 mL的40%的浓硝酸中,将混合物装入三口烧瓶后,在80℃下加热回流8 h,同时施加磁力搅拌,转速为500 r/min;对混合物进行真空抽滤,所得滤饼在85℃下烘干后球磨10 h,得预处理CNTs。制备纳米微囊时,先将20 g的油酸溶解到1.0 mL的酒精中,再投入40 g预处理的CNTs,将二者充分混合后装在球形瓶中抽真空至-0.2 MPa,在70℃的温度下将混合物超声振动5 h,超声结束后再对混合物进行抽滤,抽滤时用酒精反复清洗滤饼以清洗尚未被填充的油酸分子。最后,将滤饼置于烘箱中,在80℃温度下烘干8 h,并经过超微球磨粉碎后制得CNTs@OA纳米微囊。利用FEI TECNAI G20透射电镜(TEM)观测样品结构,观测时加速电压200 kV,利用STA449热分析仪对CNTs和纳米微囊进行热重分析,温升范围20~800℃,温升速率20℃/min。

制备微囊砂轮时,先将质量分数为15%的酚醛树脂粉、0~20%的普通CNTs或微囊、85%~65%的220#白刚玉按比例机械搅拌均匀(填料质量分数按2%递增,配方见表1)后放入球磨机中球磨6 h,搅拌时添加适量糠醇作为润湿剂;再将原料分别装入八字型腔模具和环形模具中,在60 MPa下冷压10 min,取下试样放入烘箱中固化12 h,固化温度160℃,温升速率10℃/h,自然冷却;最后制得D175 mm $\times$ d80 mm $\times$ H27 mm的环形砂轮试样用于磨削试验,如图2a, ϕ 80 mm $\times$ 20 mm的8字块试样用于力学性能测试,如图2b。测试内容如下。

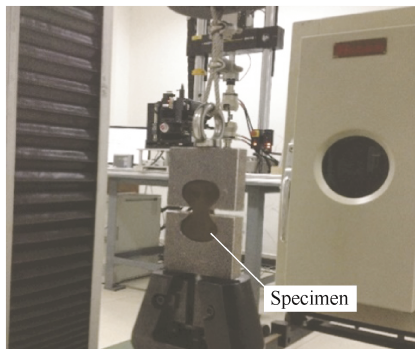
表1 自润滑砂轮的配方(wt.%)

Table 1 Formula of self-lubricating wheels (wt.%)

No.	Resin	Abrasives	Ordinary CNTs	CNTs@OA nano-capsules
A0	15	85	—	—
B2, B4, B6, ..., B16, B18, B20	15	83, 81, 79, ..., 69, 67, 65	2, 4, 6, ..., 16, 18, 20	—
C2, C4, C6, ..., C16, C18, C20	15	83, 81, 79, ..., 69, 67, 65	—	2, 4, 6, ..., 16, 18, 20



(a) Grinding wheel



(b) Tensile strength test



(c) Hardness performance test

图2 所制备的砂轮及性能测试

Fig. 2 Prepared grinding wheel and performance test

(1) 强度。在 RG 4100 型万能材料试验机上, 根据 GB/T 1040—1992《塑料拉伸性能试验方法》进行拉伸强度测试, 拉伸速率为 0.5 mm/min, 试验机自动加载拉力并记录拉伸强度。

(2) 硬度。利用 HR-150A 型洛氏硬度计, 根据 GB/T 2490—2018《固结磨具 硬度检验》测定磨具硬度; 测定时, 硬度计压头直径 3.175 mm, 预载荷为 98 N, 主载荷为 588 N; 测定时, 在正反两面的圆心至外圆 1/2 处测 4 处, 取每次的平均值。

1.2 磨削试验方案

磨削试验在可变频调速的 M7140 型精密平面磨床上进行。磨削试验前, 砂轮须进行精确动平衡。再用金刚石笔进行 5 次修整, 修整时主轴转速

2 000 r/min, 单程修整量 0.02 mm, 修整后, 砂轮磨削平稳无颤振。首先开展预磨削, 使砂轮磨削性能达到稳定状态, 此时砂轮实际磨削宽度为 27 mm。而后再进行正式磨削测试, 断续磨削的试验条件见表 2。试验方案如下: 首先, 将砂轮转速固定在 2 000 r/min, 利用 CNTs、微囊质量分数均为 2%~20% 的砂轮进行磨削, 对比普通树脂砂轮, 研究填料含量的变化对砂轮磨削力、磨削温度、表面质量、磨削比等磨削性能的影响; 其次, 利用 CNTs、微囊质量分数为 14% 的砂轮进行磨削, 使砂轮转速在 500~3 000 r/min 变化, 对比普通树脂砂轮, 测试磨削速度对砂轮磨削性能的影响; 每组试验进行三次平行试验。

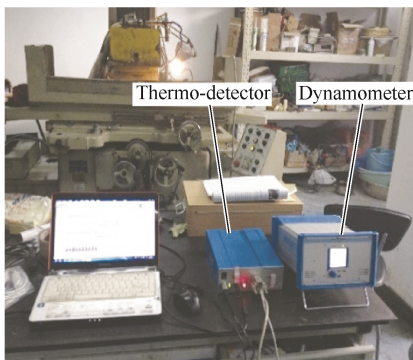
表 2 每次磨削试验的条件

Table 2 Conditions of each grinding test

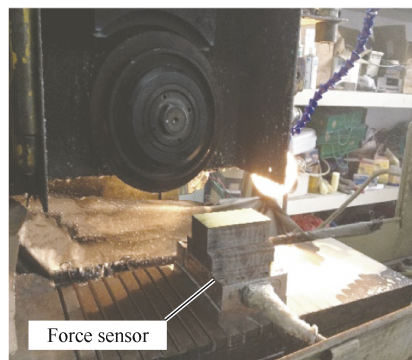
Machine tool	Workpiece	Cooling conditions	Wheel rotation speed $n/(r/min)$	Workpiece speed $v/(m/s)$	Wheel feed $a_p/\mu m$	Grinding depth $a/\mu m$
M7140 grinder with parallel accuracy of 0.005/500 mm	GCr15 steel (HRC60-62), 100 mm×50 mm×50 mm	Water with a flow rate of 2.5 L/min	500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000	0.2	10	300

磨削过程中, 采用 Kistler 9129A 型测力仪测量磨削法向力 (F_n)、切向力 (F_t), 以此两向力作为切削力评价指标, 如图 3a。磨削过程中采用热电偶测量磨削温度, 将标准 K 型热电偶埋设到预加

工的测温孔内, 该孔离上表面约 1.5 mm, 以测试不同砂轮的磨削温度。利用千分表测量砂轮的磨损量, 如图 3c, 利用 TR-200 粗糙度仪测试工件表面粗糙度。



(a) Grinding equipment



(b) Grinding area



(c) Wear measurement of grinding wheel

图 3 磨削加工过程

Fig. 3 Grinding process of nano-capsule grinding wheel

研究纳米微囊砂轮的自润滑机理, 将 100 mm×45 mm×0.8 mm 的 GCr15 钢片固定在钢件上, 利用不同砂轮将其表面磨除 0.3 mm。再将钢片取下, 在丙酮中超声清洗 20 min, 利用 AXISUltra DLD 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 探测磨削表面元素的结合能, 测试时电子通能 80 eV, 污染碳 C_{1s} 的结合能 284.8 eV 作内标。

2 结果与讨论

2.1 CNTs@OA 纳米微囊的表征

图 4 为 CNTs 和纳米微囊的 TEM 图, 可见 CNTs 的管状结构。图 4b 的观测区内, 有一段液态物质填充进 CNTs 管内, 这应是油酸, 证明了 CNTs@OA

微囊的形成。液态物质能进入 CNTs 管内的主要驱动力是毛细作用,前提是液态物质在 CNTs 管内要有足够润湿力,使固-液界面发生浸润作用。由 Laplace 方程推导的固-液界面的接触角与表面张力的关系及气-液界面压力差公式如 (1)、(2) [14]:

$$\cos \theta = (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) / \gamma \quad (1)$$

$$\Delta P = 2\gamma \cos \theta / r \quad (2)$$

式中, θ 、 γ_{SV} 、 γ_{SL} 、 γ 和 r 分别为液-固界面接触角、

固-气界面表面张力、固-液界面表面张力、液体表面张力和曲率半径。固体表面能否被液体润湿主要取决于 θ , 当 $\theta > 90^\circ$ 时不能发生浸润作用。只有当液态物质的 $\theta < 90^\circ$ 、表面张力低于 200 mN/m 时, 浸润现象才发生, 这种填充过程才能在合适条件下进行。油酸的表面张力约 35 mN/m , 在被溶解到酒精中后, 进一步降低了其表面张力, 使得油酸更容易被填充进 CNTs 管内。在接续的烘干制备过程中无水乙醇挥发, 油酸则留在了 CNTs 管内。

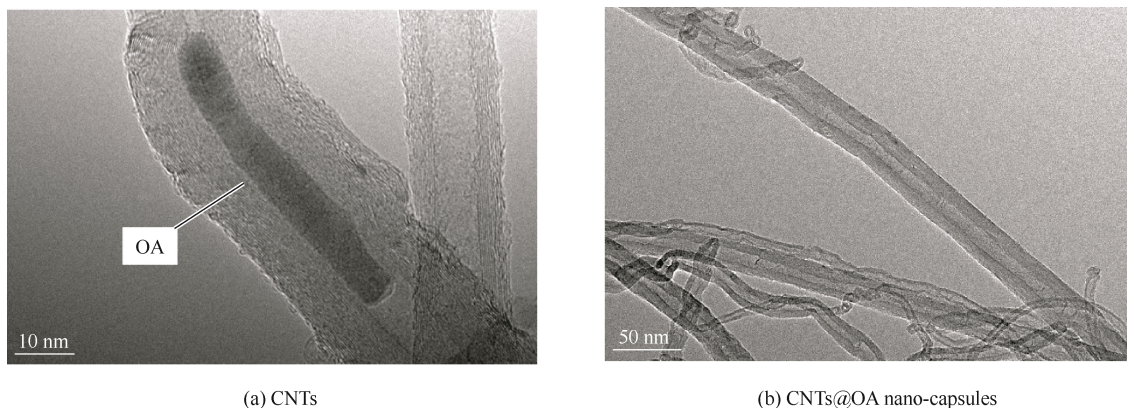


图 4 CNTs 和纳米微囊的 TEM 影像

Fig. 4 TEM images of CNTs and nano-capsules

酸处理 CNTs、油酸和纳米微囊的热重 (TG)、差热 (DSC) 分析结果如图 5 所示。图 5a 中, 纳米微囊在 200°C 左右有一次失重过程, 而酸处理 CNTs 则没有类似过程, 这证明受热后纳米微囊中油酸的逸出。纳米微囊中油酸的填充率 (η) 可以根据相变潜热式 (3) 计算 [15]:

$$\eta = H_f / H_p \times 100\% \quad (3)$$

式中, H_f 为纳米微囊中油酸的相变潜热, H_p 为相同质量油酸的相变潜热 (J/g)。图 5b 中, 油酸和纳米微囊在低温区有相变吸热过程, 其相变潜热值可由 DSC 曲线与基线围成区域的面积来计算。经过作图计算, 可求得纳米微囊中油酸的相变潜热约为 36.3 J/g , 而同质量油酸的相变潜热约为 179.2 J/g , 因此算得油填充率约为 20.2%。

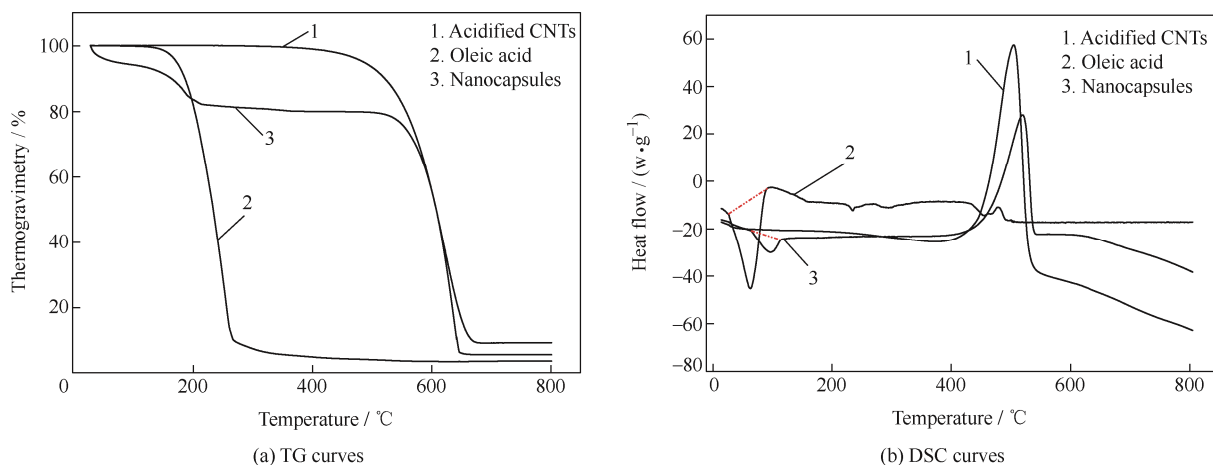


图 5 酸处理 CNTs、油酸和纳米微囊的 TG 与 DSC 曲线

Fig. 5 TG and DSC curves of acid-treated CNTs, oleic acid and nano-capsules.

2.2 纳米微囊砂轮的力学性能与砂轮组织结构分析

图 6 为不同质量分数的 CNTs 或纳米微囊对砂

轮抗拉强度和硬度的影响。图 6a 中, 随着填充量的增加, 砂轮的抗拉强度有先增大、后减小的趋势,

这是由于 CNTs 粒子的表面活性较高, 其表面存在的大量不饱和残键和活性基团与酚醛树脂高分子链发生物理或化学交联^[16], 增强了材料结合处界面的黏结力, 持续添加 CNTs 可能会导致其团聚问题, 从而减小了这种交联作用, 降低了砂轮的强度。使砂轮强度最高的 CNTs 填充量约 6%, 当填充量约 10% 时, 纳米微囊砂轮的强度与普通砂轮相当。微囊的填充对砂轮强度和硬度的增强效果

更为显著, 这是由于微囊的长径比较小, 与树脂的结合作用更加紧密。由图 6b 可见, 砂轮的硬度随填料质量分数的升高而降低, 纳米微囊的填充量为 16% 时, 抗拉强度约为 8.2 MPa, 硬度为 52 HRE。根据 GB/T 2490—2018, 当填充剂质量分数小于 16% 时, 仍满足实际使用条件。可见, 使用 CNTs@OA 纳米微囊较好地解决了填充剂影响砂轮强度的问题。

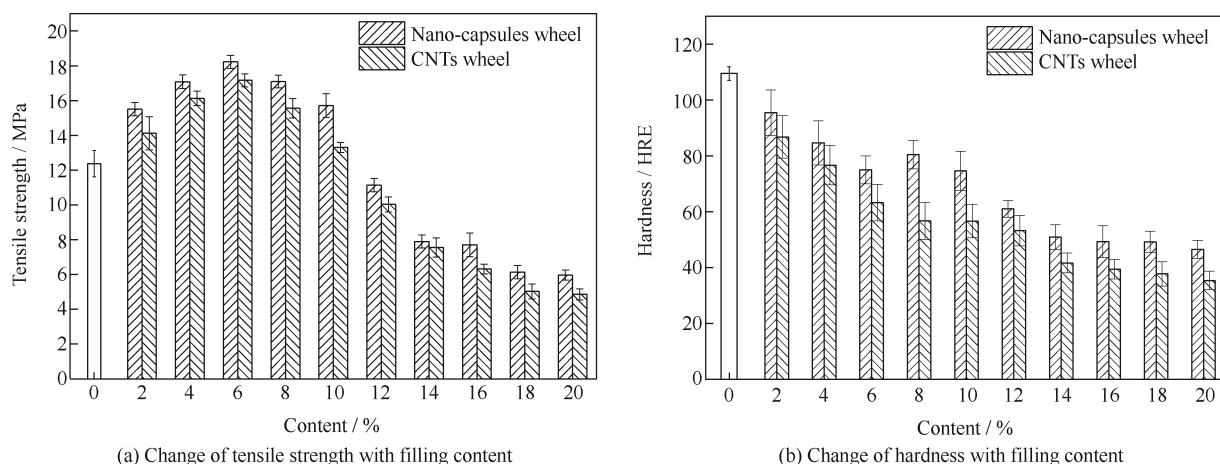


图 6 CNTs 和纳米微囊的填充的质量分数对砂轮拉伸强度和硬度的影响

Fig. 6 Effect of mass fraction of CNTs and nano-capsules on tensile strength and hardness of grinding wheels

酚醛树脂的固化反应过程较为复杂, 纳米微囊可能在树脂的固化过程中被破坏。因此, 这需要微囊在固化过程中具有一定的热稳定性, 且与树脂具有一定的相容性。由图 5a 中纳米微囊的热失重曲线可见, 纳米微囊在 200 °C 以上时才发生明显的失重, 此温度足以抵抗砂轮的固化温度。图 7a 为结合剂、纳米微囊和磨具固化组织的红外光谱, 其中纳米微囊光谱的峰值 1 628、2 583、2 924、3 424 cm^{-1} 分别

代表 CNTs 骨架振动、C—H 伸缩振动、C—H 变形振动和 O—H 键伸缩振动吸收峰。这其中前三个峰在固化组织的光谱中都是存在的, 表明微囊中 CNTs 的骨架结构并未在固化过程中被破坏, 可对其中的油酸客体形成充分保护。图 7b 为砂轮组织的 SEM 图, 可见纳米微囊以团状颗粒形式分布于砂轮组织中, 磨削时随着微囊的破裂, T304 可实时释放到磨削区域, 这较好地解决了润滑剂均匀释放的问题。

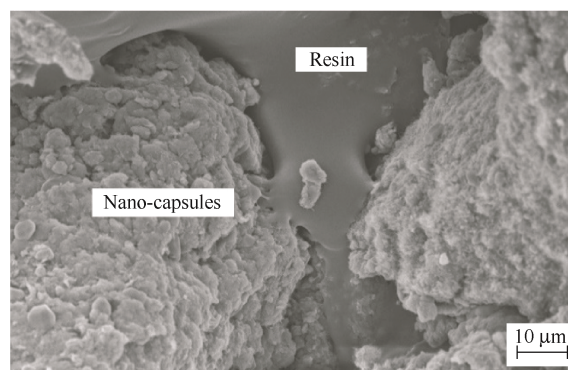
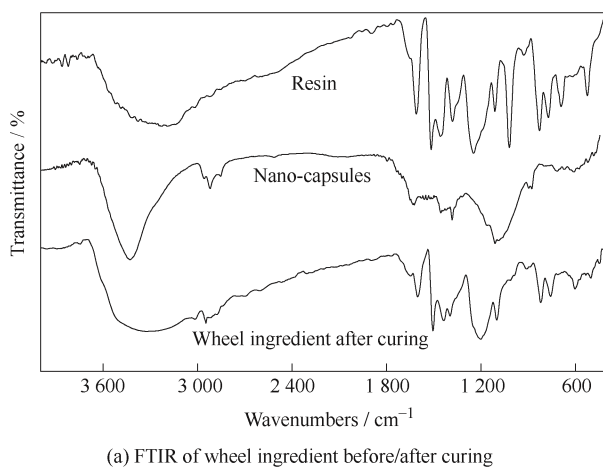


图 7 磨具组织的 FTIR 和 SEM 分析

Fig. 7 FTIR and SEM analysis of the wheel organization

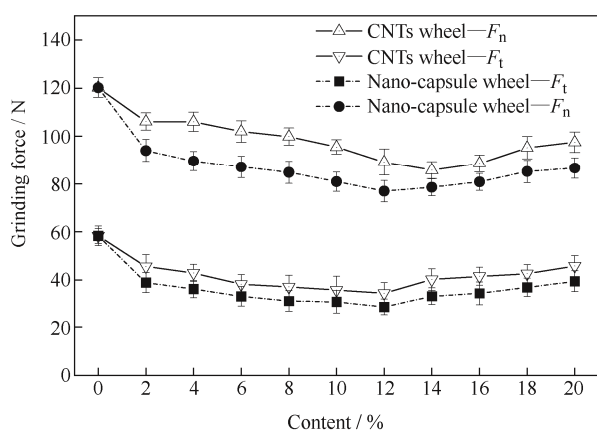
2.3 填充量和砂轮转速对磨削力的影响

图 8a 为砂轮内纳米粒子填充量对法向磨削力

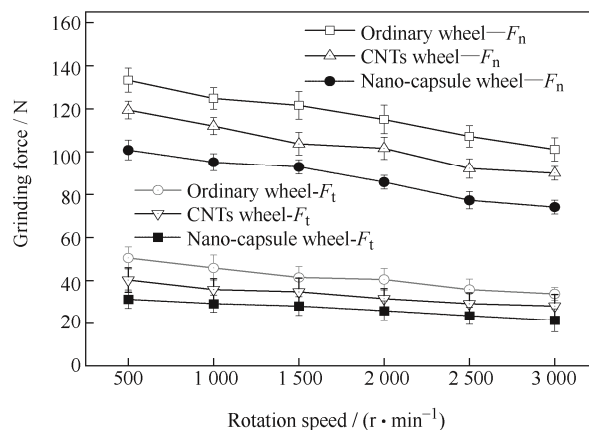
F_n 和切向磨削力 F_t 的影响。首先, 可见填充 CNTs 或纳米微囊的砂轮的两向磨削力均小于普通砂轮

的。其次,随着填充量的增加,CNTs 砂轮加工时的两向磨削力均有先减小、后增大的趋势,这是由于磨削过程中随着砂轮的磨损,其中的 CNTs 的结构被破坏,所形成的碳沉积膜可起到一定的减摩作用^[17],而添加过多的 CNTs 导致磨具组织变软,摩擦系数增大、磨削力增加。纳米微囊砂轮磨削时,两向磨削力也随填充量的增加而不断减小,当填充量超过 12% 左右时,磨削力也有缓慢上升趋势,且在各种含量下,纳米微囊砂轮的磨削力均小于 CNTs 砂轮的,这是由于砂轮中的纳米微囊在磨削

过程中被破坏并释放出油酸,油酸在磨削区形成自润滑膜,并与 CNTs 的摩擦产物共同形成一种自润滑层,进一步减小了磨削力。砂轮中纳米微囊的最佳含量约为 14%。与普通砂轮比,填充纳米微囊可降低法向磨削力约 30%、切削磨削力约 38%。磨削时砂轮转速的变化对两向磨削力的影响如图 8b 所示,可见各种砂轮的磨削力都随砂轮转速的增大而减小;填充量相同时,CNTs 砂轮磨削时的磨削力比普通砂轮小,纳米微囊砂轮的两向磨削力为最小。



(a) Effect of content on grinding force



(b) Effect of rotation speed on grinding force

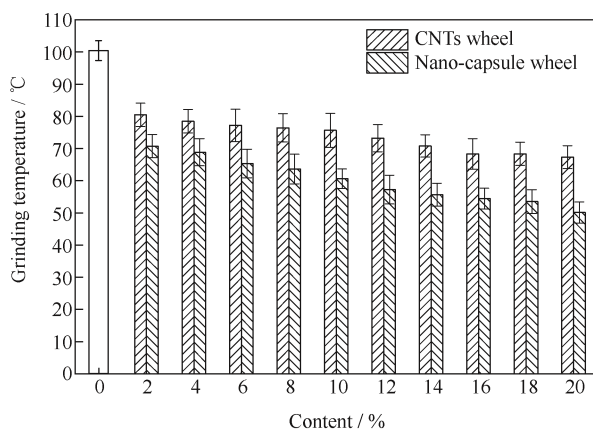
图 8 填充剂含量和磨削速度对磨削力的影响

Fig. 8 Influence of filler content and grinding speed on grinding force

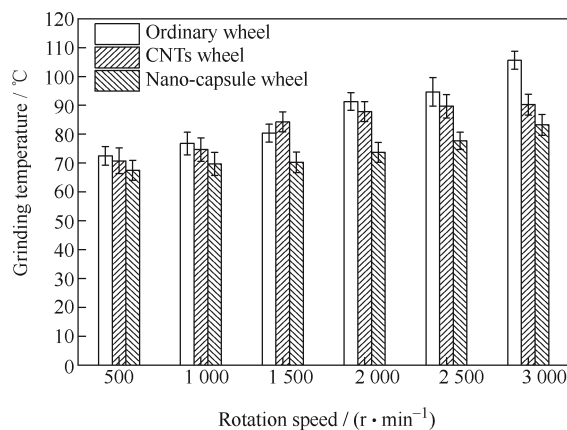
2.4 填充量和砂轮转速对磨削温度的影响

图 9a 为砂轮内填料含量对磨削温度的影响,可见在砂轮转速保持不变时,填充 CNTs 或纳米微囊的砂轮的磨削温度也小于普通砂轮。随添加含量的增大,CNTs 砂轮的磨削温度呈不断减小趋势,这是由于磨削过程中 CNTs 的摩擦产物形成的碳沉积膜起到一定的减摩作用,降低了磨削温度。含量持续

增加时,纳米微囊砂轮的磨削温度也逐渐减小,而后逐渐平稳。在相同填充量下,纳米微囊砂轮的磨削温度要小于 CNTs 砂轮的,这是由于磨削时纳米微囊可将其空腔中的油酸释放到磨削区并形成自润滑层,减缓了磨粒与工件表面的滑擦,从而降低了磨削温度。与普通砂轮比,纳米微囊砂轮可降低磨削温度 45% 左右。



(a) Effect of content on grinding temperature



(b) Effect of rotation speed on grinding temperature

图 9 填料含量和磨削速度对磨削温度的影响

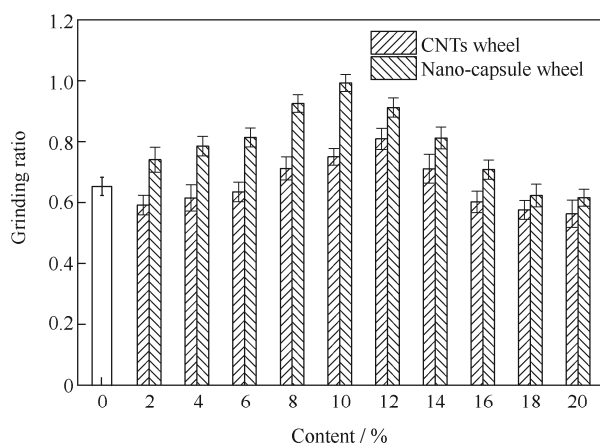
Fig. 9 Influence of filler content and grinding speed on grinding temperature

图 9b 为砂轮转速对磨削温度的影响, 可见磨削温度均随转速的提高而有一定升高, 这是由于速度增加导致单位时间内进行磨削作用的磨粒增加, 加快了磨粒对工件的切削与摩擦作用, 导致磨削温度升高^[18]; 在填充量相同的情况下, CNTs 砂轮的磨削温度比普通树脂砂轮小, 而纳米微囊砂轮磨削温度为最小, 表明纳米微囊砂轮降低磨削温度的效果更为显著。另外, 由图 9 可见最高磨削温度约为 110 °C, 而油酸的分解温度约为 200 °C, 因而在本文的试验条件下, 微囊砂轮所形成自润滑层仍能较好的发挥作用。

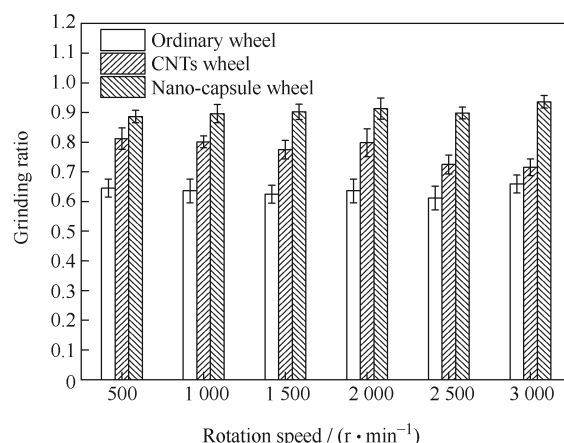
2.5 填充量和磨削速度对磨削比的影响

磨削比为一次磨削过程中被磨除金属与砂轮磨损的体积比, GCr15 硬度高, 且树脂结合剂对磨粒的保持性较差, 因此试验中纳米微囊砂轮的磨削比虽较小, 但也属正常范围。图 10a 为填料含量变化对磨削比的影响趋势图, 可见随着填料含量的上升,

CNTs 砂轮和纳米微囊砂轮的磨削比均呈现先增大后减小的趋势, 磨削比最高值的含量分别为 10% 和 12%。这是由于填充量较少时, 纳米粒子的自润滑作用可提高磨削比; 而当纳米粒子填充量较高时, 砂轮的硬度降低, 砂轮组织也变得松软, 导致磨削比降低。在相同的试验条件下, 纳米微囊砂轮的磨削比比普通砂轮高 35% 左右, 比 CNTs 砂轮高 25%。图 10b 为砂轮转速对磨削比的影响, 可见在不同转速下, 纳米微囊砂轮的磨削比也为最高。磨削过程中, 纳米微囊砂轮中的油酸可直接被释放到磨削区, 其在磨粒—工件界面间形成的自润滑膜可起到润滑作用。同时, 磨削时 CNTs 的外壳被分解, 其摩擦产物也能起到润滑作用, 这进一步减轻了磨粒—工件间的摩擦, 提高了纳米微囊砂轮的磨削比。另外, 纳米微囊砂轮磨削时自润滑膜的生成也减小了砂轮表面的粘屑, 延缓砂轮的钝化, 这使得砂轮中的磨粒能始终保持锐利的切削作用, 也提高了其磨削比。



(a) Effect of content on grinding ratio



(b) Effect of rotation speed on grinding ratio

图 10 填充剂含量和磨削速度对磨削比的影响

Fig. 10 Influence of filler content and grinding speed on grinding ratio

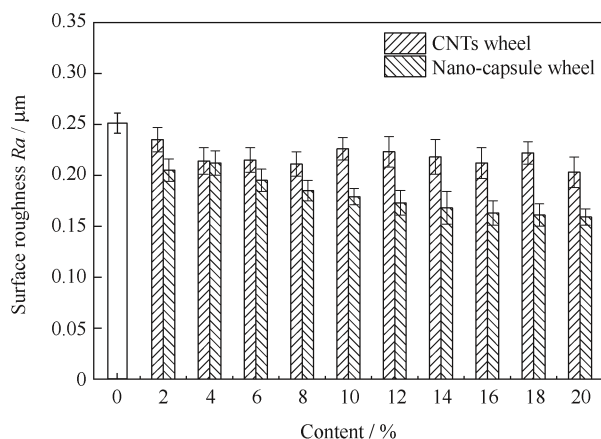
2.6 填充量和磨削速度对工件表面粗糙度的影响

图 11a 为不同砂轮磨削后工件表面粗糙度随纳米粒子填充量的变化。由图可见, 与普通砂轮相比, CNTs 砂轮、纳米微囊砂轮所磨削工件的表面粗糙度值分别降低 10%、15% 左右。纳米微囊砂轮所磨削工件表面粗糙度有随着微囊填充量增加而减小的趋势。磨削时, 工件表面粗糙度受机床精度、砂轮修整、磨粒脱落、加工条件等影响。普通砂轮磨削时的磨削温度高、磨削力大, 磨粒

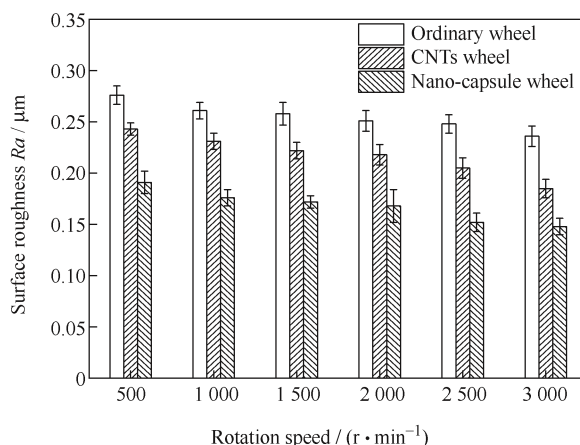
脱落后磨粒磨损作用较强, 导致所工件表面粗糙度较差。纳米微囊砂轮磨削时, 所释放的油酸可直接、有效地提供润滑, 使得磨粒磨损效应减轻, 从而提高工件表面质量。另外, 普通砂轮组织中的气孔较大, 磨削过程中磨屑填充孔隙后会对工件造成划伤。纳米微囊砂轮磨削时, 所形成的自润滑膜可以有效减缓磨屑对工件的滑擦作用, 从而降低工件的表面粗糙度。图 11b 砂轮转速对工件表面粗糙度的影响, 可见随着砂轮转速的增大, 表

面粗糙度有不断减小的趋势,这是由于砂轮为多刃刀具,转速越快,单位时间内参与切削的刀刃

越多,各刀刃所切的厚度就越低,所得到的表面粗糙度就变小^[19]。



(a) Effect of content on surface roughness



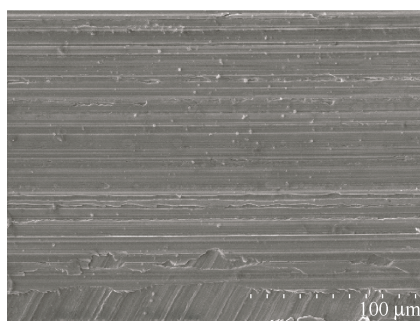
(b) Effect of rotation speed on surface roughness

图 11 填料含量和磨削速度对工件表面粗糙度的影响

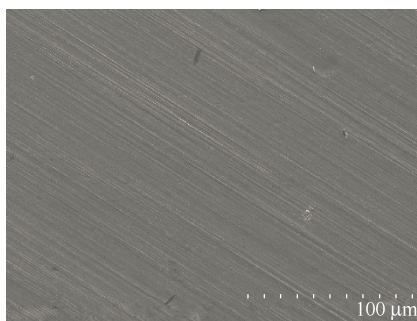
Fig. 11 Influence of filler content and grinding speed on surface roughness of workpiece

图 12 为不同砂轮磨削后工件表面的 SEM 影像。可以看出,普通砂轮所磨削工件表面较为粗糙,且分布有较多沉积物颗粒,这应是酚醛树脂所形成的转移

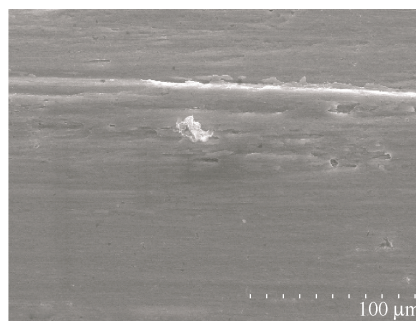
膜。CNTs 砂轮所磨削工件表面几乎没有沉积物,且较为平整、光滑,纳米微囊砂轮磨削时工件表面最为平整。这进一步证明了磨削时自润滑层的作用。



(a) Ground by ordinary wheel



(b) Ground by CNTs wheel



(c) Ground by nano-capsule wheel

图 12 不同砂轮所磨削工件表面的 SEM 形貌

Fig. 12 SEM morphology of workpiece surface grinded by ordinary wheel, CNTs wheel and nano-capsule wheel

2.7 纳米微囊砂轮的自润滑机理

为了验证纳米微囊砂轮在磨削过程中释放油酸并在工件表面形成自润滑层的过程,对普通砂轮、CNTs 砂轮以及纳米微囊砂轮所磨削工件表面进行了 XPS 能谱分析。图 13、14 所示便为 GCr15 钢表面和各种砂轮磨削工件表面 C_{1s} 和 O_{1s} 的 XPS 能谱。各元素能谱曲线的分峰采用 XPSPEAK 41 软件,分峰所得拟合峰和可能归属的基团已标示在图中,元素的相对原子浓度则在表 3 中列出。GCr15 钢表面的 C_{1s} 和 O_{1s} 能谱峰形较为单一,主要归属于污染碳和铁氧化物中的种类^[20]。

在普通砂轮所磨削工件表面, C_{1s} 和 O_{1s} 能谱上有新的拟合峰形出现。图 13b 中, C_{1s} 能谱中归属于 C—N、C—O 的两个拟合峰较为明显^[21]; 在图 14b 中,代表 C—O 的拟合峰所占的相对峰面积较大,证明磨削过程中砂轮里的树脂结合剂脱落,所形成的树脂分子片段通过吸附、沉积等作用残留在工件表面,因而 XPS 分析可检测出其成分。表 3 中,与纯 GCr15 相比,普通砂轮磨削工件表面 C_{1s} 的原子浓度增加而 O_{1s} 的减少,这表明部分树脂分子片段可能会通过化学反应作用与金属表面键合,导致 O_{1s} 元素的减少。

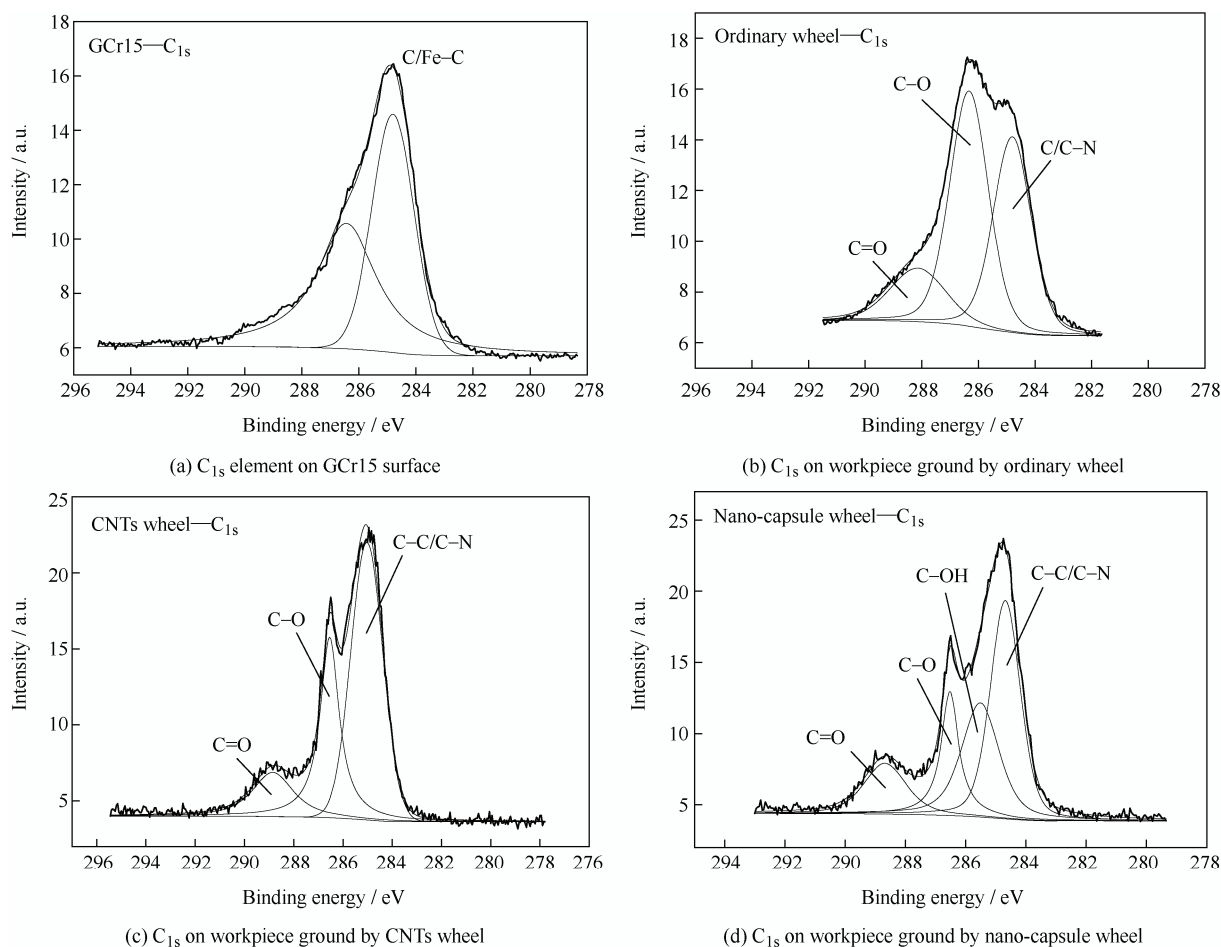
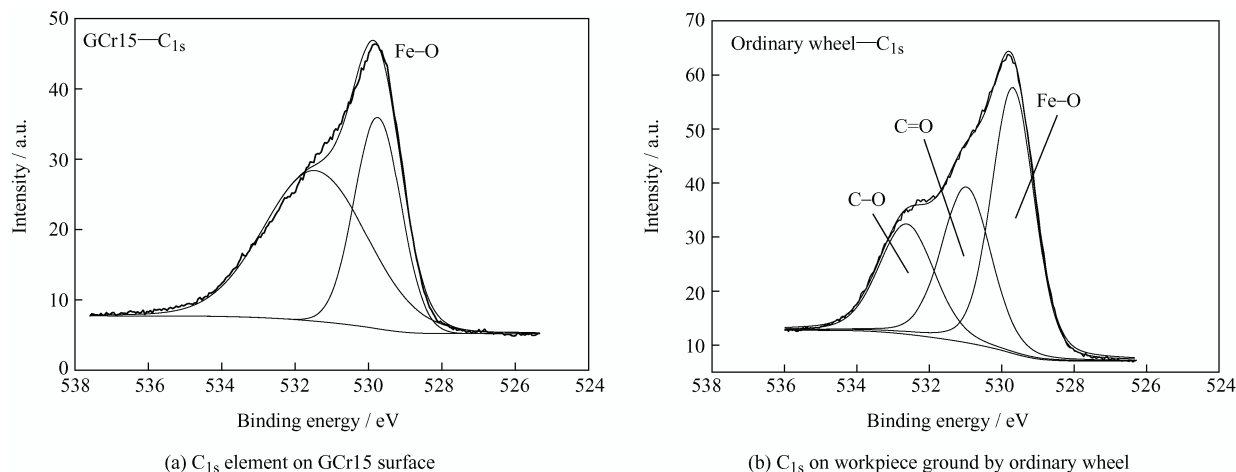
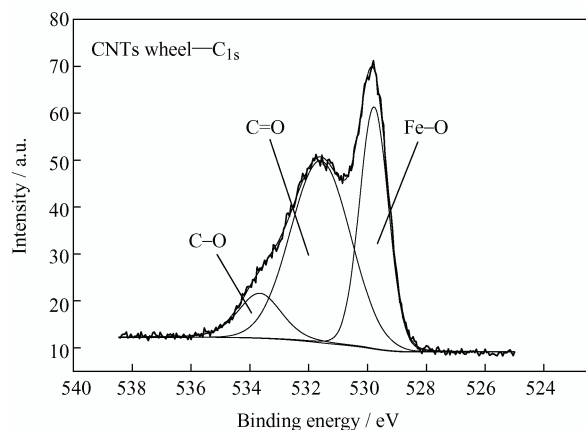
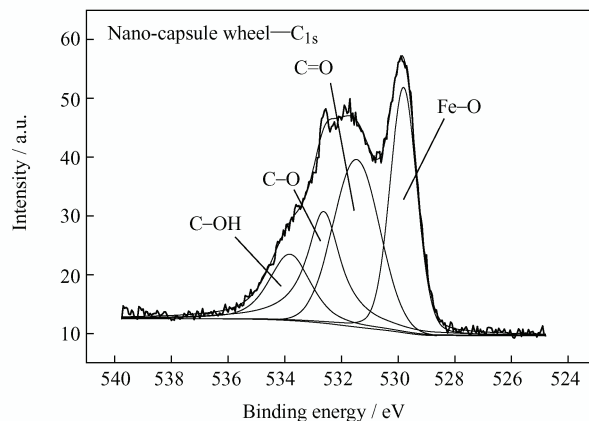
图 13 GCr15 钢及不同砂轮磨削工件表面上 C_{1s} 的 XPS 能谱Fig. 13 XPS energy spectrum of C_{1s} on GCr15 steel and surface ground by ordinary wheel, CNTs wheel and nano-capsule wheel

图 13c 中, CNTs 砂轮所磨削工件表面上 C_{1s} 谱中, 归属 C—N 基团的拟合峰所占比例减小, 归属 C/C—C 基团的拟合峰所占比例增大; 图 14c 中, 归属 C—O 基团的拟合峰强度减弱, 表明树脂片段在工件上的吸附、沉积减少, 这应是 CNTs 参与磨削所导致的。由表 3 可算得: 与纯 GCr15 表面相比, CNTs 砂轮所磨削试样表面 C_{1s} 的原子浓度高出 16%; 而与普通砂轮所磨削工件表面相比, C_{1s} 浓度却低了

11.8%。这是由于砂轮中的 CNTs 也可以吸附到工件表面, 并形成润滑层后参与磨削, 从而减少了树脂分子的粘附。磨削过程中, CNTs 分子在磨削力的作用下被破坏, 所形成的分子片段也能通过物理、化学作用吸附在工件表面形成润滑层并起到减摩作用。然而, CNTs 分子中只有极性较弱的羟基, 其分子片段在工件表面的吸附性能较差, 不能形成充分的润滑层, 导致 CNTs 砂轮的自润滑效果不甚显著。



(c) C_{1s} on workpiece ground by CNTs wheel(d) C_{1s} on workpiece ground by nano-capsule wheel图 14 GCr15 钢及不同砂轮磨削工件表面上 O_{1s} 的 XPS 能谱Fig. 14 XPS energy spectrum of O_{1s} on GCr15 steel and surface ground by ordinary wheel, CNTs wheel and nano-capsule wheel表 3 GCr15 钢表面及各种磨具磨削工件表面上
主要元素的相对原子浓度Table 3 Relative concentrations of main elements on
GCr15 steel and the surface of workpiece ground by
different wheels

Different surface	Relative concentrations / %			
	C	O	Fe	N
GCr15 steel	30.41	45.05	24.54	—
Workpieces ground by ordinary wheel	39.47	40.87	17.3	2.36
Workpieces ground by CNTs wheel	35.29	38.22	24.36	2.13
Workpieces ground by nano-capsule wheel	37.76	42.81	17.45	1.98

图 13d 和 14d 中, 在纳米微囊砂轮所磨削的工件表面上, C_{1s} 和 O_{1s} 能谱中 288.8 eV 和 533.8 eV 左右的峰形应分别归属于 $C=O$ 基团中碳、氧的种类^[22], 而羧基只在油酸分子结构中存在, 这充分证明磨削过程中油酸被释放并吸附到工件表面。油酸吸附到工件表面后, 易在金属表面发生摩擦化学吸附, 提高了 C、O 元素的浓度, 而降低了 Fe 元素的相对浓度, 见表 3。图 15 给出了纳米微囊砂轮磨削时在磨削区域润滑作用的模型。在磨削过程中, 纳米微囊砂轮组织中的微囊释放出油酸, 油酸与 CNTs 分解片段共同作用于磨削界面, 形成的一种复合型自润滑层在磨削时主要具有减摩、抗磨和抛光效应: 首先, 自润滑层在磨粒与工件之间起润滑、减摩作用, 减轻了砂轮与工件间的摩擦, 降低了磨削力和磨削温度; 其次, 自润滑层减少了磨粒一切屑之间的粘附作用, 使得砂轮磨削时的粘附、堵塞和磨损减轻, 磨粒始终

保持在有效切削状态, 这提高了磨削比和磨削效率; 最后, 自润滑层减缓了磨屑对工件的滑擦作用, 提高了工件加工精度和表面质量。

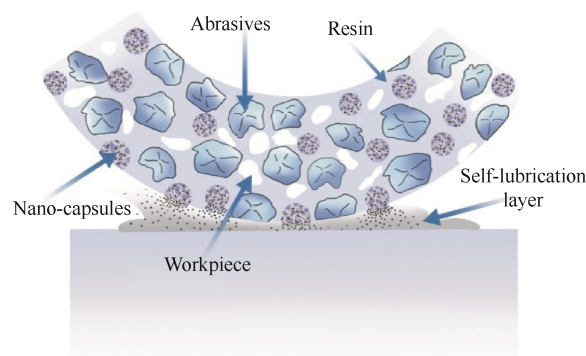


图 15 工件表面所形成的自润滑模型

Fig. 15 Self-lubrication model on workpiece

3 结论

(1) 制备了一种具有较高热稳定性的 CNTs@OA 纳米微囊, 以纳米微囊为填充剂制备树脂砂轮, 在提高砂轮的机械强度的同时, 还使砂轮具有自润滑性能, 所研制的自润滑在精密磨削加工领域有着广泛的应用潜能。

(2) 填充纳米微囊后, 树脂砂轮在磨削时的磨削力、磨削温度显著降低, 所磨削的工件表面粗糙度降低, 砂轮的磨削比也得到提高。

(3) 磨削过程中, 纳米微囊可将其中的油酸直接释放在工件表面, 所形成的自润滑层在磨削区域起到了减摩、抗磨、抛光等作用。所研发的纳米微囊砂轮可应用于微量润滑磨削等不宜大量使用磨削液的情况。

参 考 文 献

- [1] 乔治, 梁志强, 赵文祥, 等. 齿轮钢 30CrMnTi 磨削强化试验[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 26-32.
QIAO Zhi, LIANG Zhiqiang, ZHAO Wenxiang, et al. Grinding hardening of 30CrMnTi gear steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 26-32. (in Chinese)
- [2] 冯宝富, 蔡光起, 潘贤君, 等. 高速磨削冷却液的注入新方法[J]. 机床与液压, 2002, 2: 173-175.
FENG Baofu, CAI Guangqi, PAN Xianjun, et al. Colant supplying methods in high-speed grinding[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2002, 2: 173-175. (in Chinese)
- [3] 仇健, 巩亚东, 李晓飞, 等. 超高速点磨削工艺磨削液的注入方式研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(12): 94-97.
QIU Jian, GONG Yadong, LI Xiaofei, et al. Fluid injection method in super high speed point grinding[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(12): 94-97. (in Chinese)
- [4] SHAJI S, RADHAKRISHNAN V. An investigation on solid lubricant moulded grinding wheels[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 965-972.
- [5] 李伟, 袁哲俊. 化学渗浸砂轮在钛合金打磨加工中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(2): 84-88.
LI Wei, YUAN Zhejun. Application of chemical infiltration grinding wheel in grinding of titanium alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994, 26(2): 84-88. (in Chinese)
- [6] 滕霖, 史兴宽, 任敬心. 增效浸渗砂轮的增效机理及其效果[J]. 西北工业大学学报, 1997, 15(1): 7-11.
TENG Lin, SHI Xinkuan, REN Jingxin. Synergistic mechanism and effect of the efficiency of the leaching wheel[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1997, 15(1): 7-11. (in Chinese)
- [7] 株式会社迪思科. 电沉积砂轮及其制造方法: 中国, 200610004514X[P]. 2006-01-14.
DISCO Corporation. Electro deposition grinding wheel and its manufacturing method: China, 200610004514X[P]. 2006-01-14. (in Chinese)
- [8] XU X F, HUANG S Q, GUAN J J, et al. Grinding performance and self-lubrication mechanism of phenolic resin-bonded grinding wheel filled with inclusion complex of β -cyclodextrin and dialkyl pentasulfide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221(7): 163-171.
- [9] SMALLEY R J, ANTONIA R A, DJENIDI L. Self-preservation of rough-wall turbulent boundary layers[J]. European Journal of Mechanics—B / Fluids, 2001, 20(5): 591-602.
- [10] CLANCY T C, GATES T S. Modeling of interfacial modification effects on thermal conductivity of carbon nanotube composites [J]. Polymer, 2006, 47: 5990-5996.
- [11] 姜鹏, 姚可夫. 碳纳米管作为润滑油添加剂的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(5): 394-397.
JIANG Peng, YAO Kefu. Investigation on tribological properties of lubricating oil with carbon nanotubes additive[J]. Tribology, 2005, 25(5): 394-397. (in Chinese)
- [12] SHI L, HE Y R, HU Y W, et al. Controllable natural convection in a rectangular enclosure filled with Fe₃O₄@CNT nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 399-409.
- [13] 李霞, 赵东林, 侯景伟, 等. 碳纳米管填充金属 Ag 纳米线及其机理研究[J]. 材料工程, 2006(3): 11-13.
LI Xia, ZHAO Donglin, HOU Jingwei, et al. Filling carbon nanotubes with metallic silver nano wires and its formation mechanism[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(3): 11-13. (in Chinese)
- [14] DUJARDIN E, EBBESEN T W, HIURA H, et al. Capillarity and wetting of carbon nanotubes[J]. Science, 1994, 265(5180): 1850-1852.
- [15] SINHA-RAY S, SAHU R P, YARIN A L. Nano-encapsulated smart tunable phase change materials[J]. Soft Matter, 2011, 7(19): 8823-8827.
- [16] ZHANG X, FENG S, YU X, et al. Polyelectrolyte Multilayer as matrix for electrochemical-deposition of gold clusters: toward super-hydrophobic surface[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126: 3064-3065.
- [17] CHEN W X, LI F, HAN G, et al. Tribological behavior of carbon-nanotube-filled PTFE[J]. Tribology Letters, 2003, 15(3): 275-278.
- [18] 金滩, 蔡光起. 超高速磨削的热传递机制探讨[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1999, 4: 384-387.
JIN Tan, CAI Guangqi. Approach to heat transfer mechanism in ultra-high speed grinding[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 1999, 4: 384-387. (in Chinese)
- [19] 关宏博, 陈磊, 张修铭, 等. 预应力干磨削加工 40Cr 工件表面微结构损伤[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 117-122.
GUAN Hongbo, CHEN Lei, ZHANG Xiuming, et al. Surface micro-structure damage of 40Cr samples in pre-stressed dry grinding process[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 117-122. (in Chinese)

- [20] RICHARD M, MOGNE T, PERRET-LIAUDET A, et al. Detergency of stainless steel surface soiled with human brain homogenate: an XPS[J]. Applied Surface Science, 2005, 240: 204-213.
- [21] YE J X, BURRIS D L, XIE T. A Review of transfer films and their role in ultra-low-wear sliding of polymers[J]. Lubricants, 2016, 4(1): 1-15.
- [22] MAJZNER M, KAJDAS C. Reactions of carboxylic acids under boundary friction conditions[J]. Tribologia, 2003, 34: 63-80.

作者简介: 关集俱, 男, 1985 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为精密加工与摩擦学。

E-mail: daweiijju@163.com.