

# 石墨烯纳米流体微量润滑磨削钨钢的加工性能评价\*

王 勇<sup>①</sup> 黄世瑞<sup>①</sup> 张 晶<sup>①</sup> 田 赛<sup>①</sup> 任康安<sup>①</sup> 王太勇<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>天津商业大学机械工程学院, 天津 300134; <sup>②</sup>天津大学机械工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 钨钢因其优异的性能在各种领域中得到广泛应用,但钨钢具有硬度高、难加工等特点,导致磨削时工件表面质量差。为解决这一现状,对钨钢进行了纳米流体微量润滑磨削试验,采用石墨烯纳米流体微量润滑、浇注式和干式 3 种不同条件对钨钢进行磨削试验,提出了一种正多边形磨削轨迹的组合试验方法,比较磨削速度、进给速度、磨削深度对磨削力、工件表面质量的影响。研究发现,在磨削参数相同的条件下,纳米流体微量润滑下的磨削力最小,浇注式次之,干式最大。在磨削速度  $v=15$  m/s 时,与干式和浇注式相比,纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力  $F_n$  分别降低约 25.13% 和 4.52%,切向磨削力  $F_t$  分别降低约 28.97% 和 9.92%,石墨烯纳米流体微量润滑在改善钨钢磨削方面具有显著作用。

**关键词:** 钨钢; 微量润滑; 纳米流体; 磨削

**中图分类号:** TG580 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2024.12.015

## Evaluation of machining performance of tungsten steel using graphene nanofluid minimum quantity lubrication grinding

WANG Yong<sup>①</sup>, HUANG Shirui<sup>①</sup>, ZHANG Jing<sup>①</sup>, TIAN Sai<sup>①</sup>, REN Kangan<sup>①</sup>, WANG Taiyong<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, CHN;

<sup>②</sup>College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN)

**Abstract:** Tungsten steel is widely used across various fields due to its excellent properties. However, its high hardness and difficult machinability result in poor surface quality of the workpieces. To address this issue, experiments were conducted on tungsten steel using nanofluid minimum quantity lubrication grinding. Tungsten steel grinding tests were carried out under three different conditions, namely graphene nanofluid minimum quantity lubrication, flood lubrication, and dry grinding. A novel experimental approach utilizing a combination of regular polygon grinding trajectories was proposed. The effects of grinding speed, feed rate, and grinding depth on grinding force and workpiece surface quality were compared. It is found that under the same grinding parameters, the grinding force under nanofluid minimum quantity lubrication is the smallest, the pouring type is the second, and the dry type is the largest. At the grinding speed  $v=15$  m/s, the normal grinding force  $F_n$  under the condition of nanofluid minimum quantity lubrication is reduced by about 25.13% and 4.52%, respectively, and the tangential grinding force  $F_t$  is reduced by about 28.97% and 9.92%, respectively, compared with dry and pouring. Graphene nanofluid minimum quantity lubrication has a significant effect on improving tungsten steel grinding.

**Keywords:** tungsten steel; minimum quantity lubrication; nanofluid; grinding

钨钢具有高硬度、高熔点、高耐磨性、化学性质稳定等优点,被广泛应用于模具、切削刀具、无屑金属加工工具、耐磨零件等领域<sup>[1]</sup>。钨钢硬度高且具有脆性,磨削加工过程中易产生裂纹或断裂,

造成工件表面质量差。此外,钨钢导热性能差,磨削过程中易致砂轮过热,影响砂轮寿命,因此有必要在磨削中进行润滑冷却。

微量润滑可以降低磨削力,减少砂轮磨损并改

\* 天津市“揭榜挂帅”科技计划项目(2023JB01);天津市普通高等学校本科教学改革与质量建设研究计划项目(B231006907)

善工件表面质量。Sun J 等<sup>[2]</sup>发现,在铣削钛合金时微量润滑条件与浇注式、干式条件相比,刀具寿命分别提高了 50% 和 80%。Sun H W 等<sup>[3]</sup>采用微量润滑条件铣削 GH4099 合金,结果表明,与干式铣削相比,微量润滑条件下的铣削力降低了 12.8%,铣削温度降低了 9.2%。Aslantas K 等<sup>[4]</sup>使用干式、微量润滑、乙醇和油水乳化液 4 种不同加工条件,微铣削 Inconel 718 高温合金,微量润滑条件下获得较好的表面质量以及最小的刀具磨损。Adibi H 等<sup>[5]</sup>证实了在陶瓷基复合材料磨削过程中,相对于干式磨削,微量润滑条件下的切向磨削力降低 38.88%,法向磨削力降低 31.16%,表面粗糙度降低 70.15%。郑中鹏等<sup>[6]</sup>在微量润滑条件下车削马氏体时效钢 3J33C 时,与没使用微量润滑条件相比,切削力降低 10%~25%。刘明政等<sup>[7]</sup>分析了低温微量润滑在车削、铣削、磨削中难加工金属的应用性能,发现低温微量润滑技术对抑制热力耦合损伤及提高表面质量的效果优于微量润滑。

为进一步提高微量润滑的磨削效果,近几年,学者们通过在润滑油中添加纳米颗粒,更好地改善了加工工件的表面质量,降低砂轮磨损,提高冷却润滑效果。隋孟华等<sup>[8]</sup>在干式、微量润滑和纳米流体微量润滑条件下进行磨削硬质合金试验,试验结果显示,对比干式磨削条件下的磨削温度 227.2 °C,微量润滑和纳米流体微量润滑条件下磨削区温度分别降低了 20.42% 和 39.48%。Zhang Q 等<sup>[9]</sup>采用碳纳米管纳米流体磨削 SiC/SiC 陶瓷基复合材料,与干式磨削相比,在磨削深度为 0.2、0.4 和 0.6 mm 时,磨削区温度分别降低了 79.3%、86.1% 和 83.5%。Zhang G Q 等<sup>[10]</sup>研究了 SiC 纳米流体对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC 陶瓷刀具车削性能的影响,研究发现,采用 SiC 纳米流体微量润滑条件的车刀在 300 m/min 车削速度下磨损减少 55.1%、表面粗糙度降低 19.2%。王晓铭等<sup>[11]</sup>采用 MWCNTs 纳米流体微量润滑磨削单晶镍基高温合金 DD5,与浇注式相比,磨削力降低 12%,磨削温度降低 9%,表面粗糙度值降低 6%。柏秀芳等<sup>[12]</sup>研究了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 不同配比混合纳米流体微量润滑铣削 45 号钢的切削性能,试验表明,当 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的质量比为 3:1 时,得到最小铣削力 256.2 N、最小表面粗糙度值 1.23 μm 和最小接触角 4.444°,此配比条件下工件表面质量最好。Makhesana M A 等<sup>[13]</sup>在干式、微量润滑和纳米流体微量润滑环境下进行车削试验,结果表明,与干式相比,在微量润

滑、MoS<sub>2</sub> 纳米流体微量润滑和石墨烯纳米流体微量润滑的切削区温度分别降低了 18%、35% 和 25%。邓佳伟等<sup>[14]</sup>采用石墨烯纳米流体微量润滑车削 GH4169 镍基高温合金,研究表明,纳米流体微量润滑与干式、微量润滑相比,切削温度分别降低了 24.7% 和 14%,切削力分别降低 21.9% 和 13%,刀具磨损分别降低 15.9% 和 12%。Azami A 等<sup>[15]</sup>采用菜籽油作为基础油、CuO 纳米流体微量润滑磨削 AISI D2 钢,结果表明,在菜籽油中加入质量分数为 2% 的 CuO 纳米颗粒时,与微量润滑相比,表面粗糙度显著降低 77%。总之,纳米流体微量润滑技术可有效提高磨削性能。

在以往的研究中,尽管有学者采用常规润滑方式对钨钢磨削进行了研究,但是采用石墨烯纳米流体微量润滑磨削钨钢未见报道,因此,本试验采用金刚石砂轮,通过石墨烯纳米颗粒微量润滑,选择菜籽油作为基础油,研究磨削参数对钨钢磨削力和工件表面质量的影响。

## 1 试验设计

### 1.1 试验设备与材料

磨削试验在立式加工中心(汉川 715D)上进行,通过在该机床上安装转接刀柄,将磨削砂轮刀盘安装在机床主轴上。磨削试验装置如图 1g 所示,砂轮选用金玉燕 SDC 600#树脂金刚石砂轮。纳米流体通过微量润滑系统(桐乡晨海机电有限公司,型号 CH2000)喷射到磨削区,如图 1e 所示,该系统主要由油箱、脉冲泵、脉冲发生器、油水过滤器和油气混合喷嘴组成。微量润滑系统的入口气压为 0.8 MPa,液体流速为 40 mL/h。磨削力通过多通道电荷放大器(奇石乐 5070-A 型)获得测力计(奇

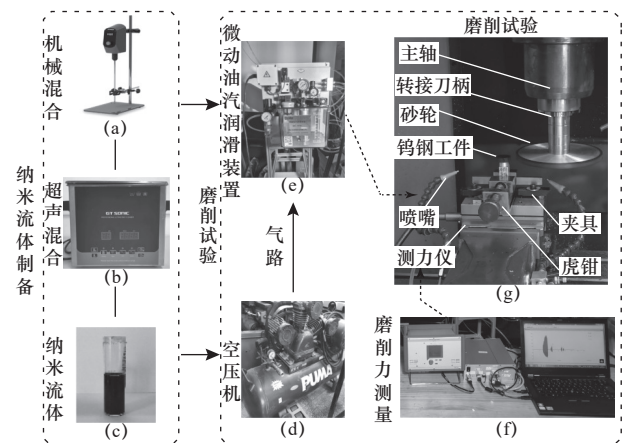


图 1 钨钢磨削试验

石乐 9257B) 所产生的电荷, 然后通过 DynoWare 软件处理数据获得磨削力。钨钢毛坯通过线切割机床切割成厚度为 4 mm、外径为 30 mm 的正十二边形, 并进行去毛刺和抛光处理。磨削试验后的工件表面形貌采用台式扫描电镜 (荷兰 Phenom XL) 和光学轮廓仪 (布鲁克 Alicona Infinite Focus G5) 进行测量。

### 1.2 纳米流体制备

由于天然植物油具有较低的热稳定性和氧化稳定性, 因此不适合直接作为磨削润滑油。为了改善热性能和摩擦性能, 将石墨烯作为纳米颗粒混合到菜籽油中, 由于纳米颗粒的稳定性和粘附性, 在储存过程中, 纳米颗粒之间相互粘附。为了使纳米流体更均匀和稳定, 通常采用两步法分散纳米颗粒。首先, 采用平均厚度 1 nm、纯度 99.9% 的石墨烯纳米颗粒与菜籽油进行预混合, 将质量分数为 1% 二丁基羟基甲苯 (BHT) 和质量分数为 3% 液体石油磺酸钡添加到菜籽油中, 提高菜籽油的抗氧化性、稳定性和润湿性, 并降低表面张力。其次, 采用数字机械搅拌器 (上海力辰仪器科技有限公司, IC-ES-60, 如图 1a 所示) 以 600 r/min 的速度搅拌预混合溶液 30 min。最后, 为了让液体中的石墨烯纳米颗粒更加均匀分布, 采用超声波均质机 (GT Sonic-D3, 广东固特超声股份有限公司), 如图 1b 所示, 在 40 kHz 频率下以最大功率 100 W 运行 30 min, 形成石墨烯纳米流体。

### 1.3 试验方案

传统的磨削试验需要制备多个工件, 每次磨削中工件需定位、装夹、对刀, 导致试验效率低。因此, 提出一种正多边形磨削轨迹的组合试验方法, 采用正十二边形工件, 通过一次装夹完成十二次磨削试验。图 2 所示为正十二边形工件的磨削示意图。本试验采用单因素分析方法, 在不同冷却条件下对比磨削速度  $v$ 、进给速度  $f$  和磨削深度  $a_p$  对钨钢磨

削性能的影响。磨削试验重复 3 次, 取其数据平均值进行分析。试验参数见表 1。

表 1 磨削试验参数表

参数	数值
磨削速度 / (m/s)	15, 20, 25, 30, 35
进给速度 / (mm/min)	1 000, 1 500, 2 000, 2 500
磨削深度 / $\mu\text{m}$	4, 8, 12, 16, 20
冷却条件	(1) 干式磨削; (2) 浇注式磨削, 喷射速度为 60 L/h; (3) 纳米流体微量润滑 (石墨烯纳米颗粒的质量分数 0.5%), 喷射速度 50 mL/h。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 磨削力

磨削力由 3 个分力组成, 包括法向磨削力  $F_n$ 、切向磨削力  $F_t$  和轴向磨削力  $F_a$ 。在磨削试验中, 由于沿着砂轮刀盘轴方向基本无磨削抗力, 轴向磨削力  $F_a$  与法向磨削力  $F_n$ 、切向磨削力  $F_t$  这两者相比太小, 故仅讨论  $F_n$  和  $F_t$ 。

图 3 所示为磨削速度、磨削深度和进给速度对磨削力的影响。如图 3a 所示, 在磨削速度  $v=15$  m/s 时, 与干式和浇注式相比, 纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力  $F_n$  分别降低约 25.13% 和 4.52%, 切向磨削力  $F_t$  分别降低约 28.97% 和 9.92%。这是由于在磨削区域提供了润滑油, 减少了工件与砂轮之间的摩擦, 从而降低了磨削力。此外, 在润滑油中添加了石墨烯纳米颗粒, 该坚固的颗粒很容易进入磨削区域形成润滑膜, 从而进一步降低了砂轮磨粒在磨削过程中的摩擦阻力。当磨削速度从 15 m/s 逐步增加到 35 m/s 时, 纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力从 37.81 N 下降到 18.62 N, 切向磨削力从 13.07 N 下降到 5.92 N, 这是因为高速磨削时, 单个磨粒在磨削区的停留时间减小, 更多的磨粒参与磨削, 提高了工件材料的滑动摩擦作用, 从而降低了磨削力。

由图 3b 可知, 磨削深度  $a_p=4$   $\mu\text{m}$  时, 与干式和浇注式相比, 纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力  $F_n$  分别降低约 45.79% 和 11.02%, 切向磨削力  $F_t$  分别降低约 26.27% 和 8.29%。当磨削深度从 4  $\mu\text{m}$  逐步增加到 20  $\mu\text{m}$ , 纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力从 16.79 N 上升到 45.75 N, 切向磨削力从 5.53 N 上升到 19.85 N, 这是磨粒进入材料的深度增

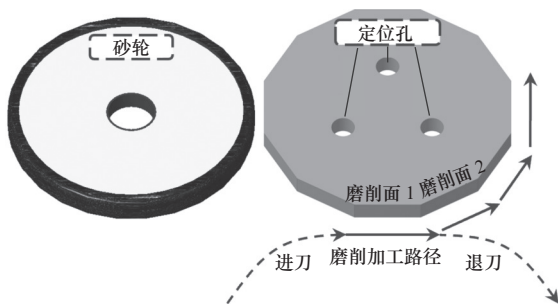


图 2 正十二边形工件磨削示意图



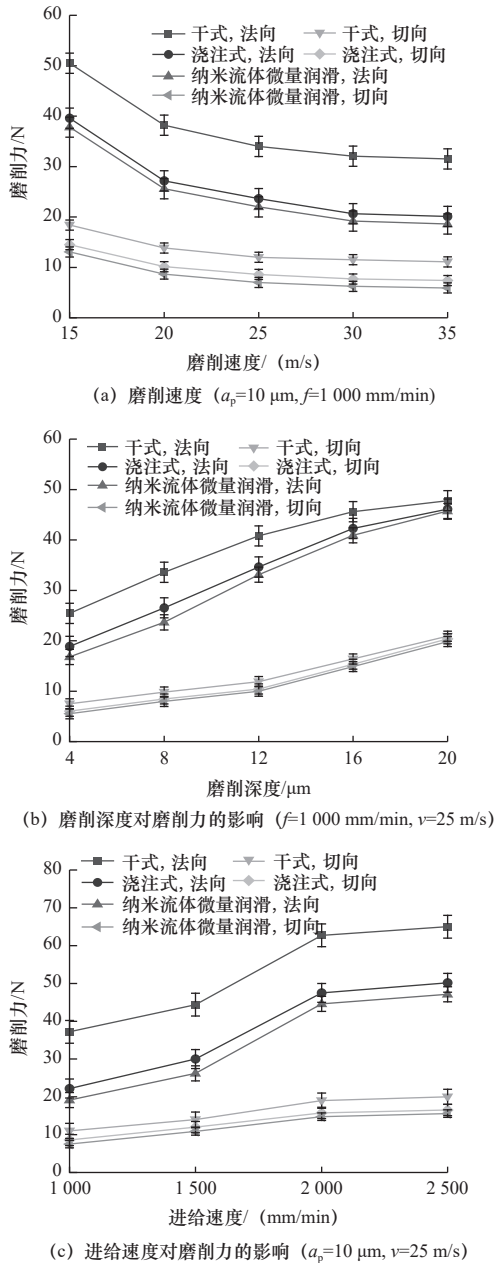


图3 磨削速度、磨削深度、进给速度对磨削力的影响

加,最大未变形厚度增大,磨粒与工件之间的接触面积增大导致的。

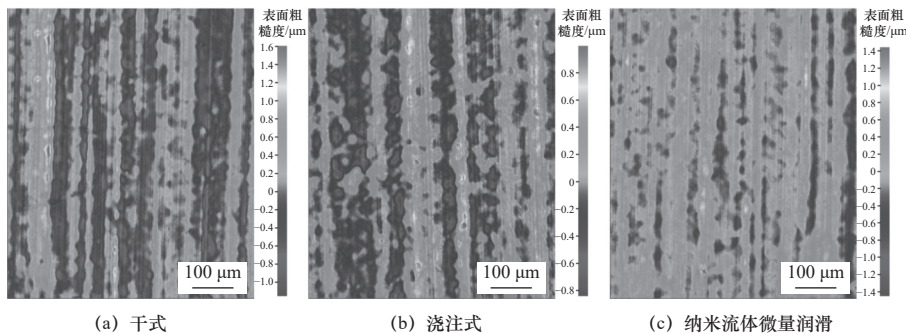


图5 不同冷却条件下钨钢磨削表面粗糙度

由图3c可知,进给速度 $f=1\ 000\ \text{mm/min}$ 时,与干式和浇注式相比,纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力 $F_n$ 分别降低约48.66%和13.96%,切向磨削力 $F_t$ 分别降低约31.81%和12.79%。当进给速度从 $1\ 000\ \text{mm/min}$ 逐步增加到 $2\ 500\ \text{mm/min}$ ,纳米流体微量润滑条件下的法向磨削力从 $19.15\ \text{N}$ 上升到 $47.13\ \text{N}$ ,切向磨削力从 $7.53\ \text{N}$ 上升到 $15.58\ \text{N}$ ,这是因为单位时间内磨削厚度增加,磨削去除材料体积增大,所以磨削力呈上升趋势。

### 2.2 表面质量

图4所示为不同冷却条件下钨钢磨削表面在扫描电镜下的微观形貌,在图4a干式条件下,在加工表面观察到脆性断裂产生的凹坑和微坑,最大凹坑长度 $10\ \mu\text{m}$ 。在图4c纳米流体微量润滑条件下,没有发现凹坑。图5所示为不同冷却条件下的钨钢磨削表面粗糙度,表面粗糙度值 $S_a$ 分别为 $0.262$ 、 $0.201$ 、 $0.194\ \mu\text{m}$ 。相比于干式和浇注式磨削,纳米流体微量润滑拥有更好的工件表面质量。

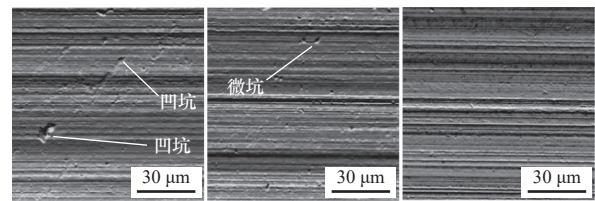


图4 不同冷却条件下钨钢磨削表面微观形貌

### 2.3 磨削机理

图6所示为纳米流体微量润滑磨削机理图。纳米流体与压缩空气通过喷嘴中雾化,由薄油膜包裹着纳米颗粒形成极小的雾滴,将其喷射到磨削区域中。由于石墨烯纳米颗粒具有隔层滑动和低剪切力等特点,使其拥有超润滑的特性,在磨削区域中起到滚珠轴承的作用。同时,石墨烯纳米颗粒可以沉积在摩擦表面上的磨损凹坑内,以补齐材料缺失。

另外，在磨削温度方面，由于砂轮的前一颗磨粒磨削后在工件表面形成了稳定的润滑膜，后一颗磨料受益于这种稳定的润滑膜，因此磨削期间处于良好的润滑状态，从而大大降低了磨削区域的温度<sup>[16]</sup>。

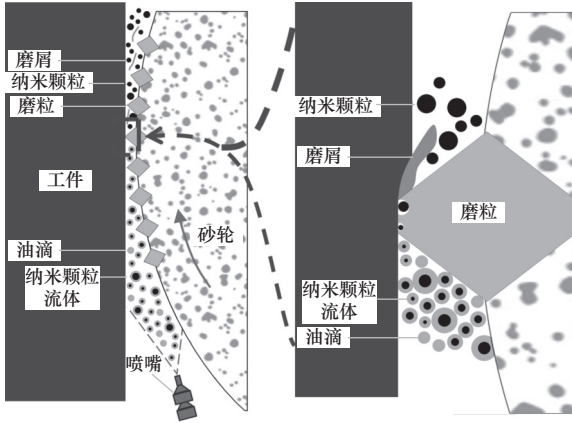


图6 纳米流体微量润滑磨削机理图

### 3 结语

通过钨钢磨削试验，分析了磨削力在不同冷却条件下磨削速度、磨削深度和进给速度变化规律，得出以下结论：

(1) 采用正十二边形磨削轨迹的组合试验方法，通过一次装夹实现了多工艺参数的磨削对比实验，从而简化了磨削试验过程。

(2) 在相同磨削参数条件下，纳米流体微量润滑显著降低了磨削力。其中，法向磨削力在纳米流体微量润滑条件下比干式和浇注式分别降低了约25.13%和4.52%，而切向磨削力分别降低了约28.97%和9.92%。

(3) 在干式条件下钨钢加工表面最大凹坑长度10 μm，而纳米流体微量润滑条件下显著改善了加工表面，未观察到凹坑。

(4) 干式、浇注式和纳米流体微量润滑条件下的表面粗糙度值Sa分别为0.262、0.201、0.194 μm，相比于干式和浇注式磨削，纳米流体微量润滑拥有更好的工件表面质量。纳米流体微量润滑在提升钨钢磨削性能和加工表面质量方面表现出优异的效果，显示出良好的应用前景。

### 参 考 文 献

[1] 谭晓恒, 姜平国. 钨钢研究进展 [J]. 江西冶金, 2019, 39(2): 20-24.  
 [2] Sun J, Wong Y S, Rahman M, et al. Effects of coolant supply methods and cutting conditions on tool life in end milling titanium alloy [J]. *Machining Science and Technology*, 2006, 10(3): 355-370.

[3] Sun H W, Zou B, Chen P, et al. Effect of MQL condition on cutting performance of high-speed machining of GH4099 with ceramic end mills [J]. *Tribology International*, 2022, 167: 107401.  
 [4] Aslantas K, Cicek A. The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of Inconel 718 superalloy [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77: 70-73.  
 [5] Adibi H, Esmaili H, Rezaei S M. Study on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding of carbon fiber-reinforced SiC matrix composites (CMCs) [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95: 3753-3767.  
 [6] 郑中鹏, 金鑫, 郭啸天, 等. 微量润滑对超精密加工固溶和时效马氏体钢的加工性能影响研究 [J]. 制造技术与机床, 2022(7): 134-140.  
 [7] 刘明政, 李长河, 曹华军, 等. 低温微量润滑加工技术研究进展与应用 [J]. 中国机械工程, 2022, 33(5): 529-550.  
 [8] 隋孟华, 张乃庆, 李长河, 等. 纳米流体微量润滑磨削硬质合金温度场模型与实验验证 [J]. 制造技术与机床, 2020(3): 85-91.  
 [9] Zhang Q, Wang B, Song C, et al. Investigation of nanofluid minimum quantity lubrication on micro-grinding quality of SiC<sub>p</sub>/SiC ceramic matrix composites [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 133: 719-732.  
 [10] Zhang G Q, Chen H, Xiao G C, et al. Effect of SiC nanofluid minimum quantity lubrication on the performance of the ceramic tool in cutting hardened steel [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84: 539-554.  
 [11] 王晓铭, 李长河, 杨敏, 等. 纳米生物润滑剂微量润滑加工物理机制研究进展 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(9): 286-322.  
 [12] 柏秀芳, 董兰, 宋宇翔, 等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 混合纳米流体微量润滑切削润滑性能评价 [J]. 制造技术与机床, 2024(10): 29-34.  
 [13] Makhesana M A, Patel K M, Krolczyk G M, et al. Influence of MoS<sub>2</sub> and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625 [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 41: 225-238.  
 [14] 邓佳伟, 王奔, 赵明, 等. 石墨烯纳米流体微量润滑车削 GH4169 镍基高温合金时刀具的磨损规律 [J]. 工具技术, 2023, 57(1): 40-43.  
 [15] Azami A, Salahshournejad Z, Shakouri E, et al. Influence of nanomimum quantity lubrication with MoS<sub>2</sub> and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 87: 209-220.  
 [16] Cui X, Li C, Ding W, et al. Minimum quantity lubrication machining of aeronautical materials using carbon group nanolubricant: from mechanisms to application [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(11): 85-112.

第一作者/通信作者: 王勇, 男, 1979年生, 博士, 副教授, 研究方向为数字化制造, 已发表论文10余篇。E-mail: wangyong@tjcu.edu.cn

(编辑 李静)

(收修改稿日期: 2024-08-27)

文章编号: 20241219  
 如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。