

纳米碳球切削液的润滑性能及机理研究

孙浩¹ 蓝启鑫² 姚斌^{2*} 芦晶晶¹ 张金辉² 潘志榕² 赵珂馨²

1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨, 150060

2. 厦门大学航空航天学院, 厦门, 361005

摘要: 探究了纳米碳球切削液应用于难加工航空齿轮钢(15Cr14Co12Mo5Ni2W)切削中纳米碳球粒子对切削液的润滑增强作用。首先构建了金属切削的切削力模型, 分析了切削润滑与切削力的关系; 进一步, 联合摩擦磨损试验和铣削试验, 从摩擦因数、磨损量、摩擦表面质量和切削力等方面分析了纳米碳球切削液的润滑性能表现。相比于基础切削液, 纳米碳球切削液(纳米碳球质量分数为 0.02%)作用下的难加工齿轮钢切削力减小了 10% 以上, 表面粗糙度减小了 15% 以上。试验观测结果显示, 摩擦接触面上的纳米碳球粒子更容易吸附在表面自由能大的微尖峰区域, 并形成一层纳米碳球吸附膜; 纳米碳球粒子可以在摩擦界面发挥“微轴承”减摩作用。

关键词: 纳米碳球; 切削液; 润滑机理; 铣削; 难加工齿轮钢

中图分类号: TB34; TH140

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Lubricating Performances and Mechanism of Nano-carbon Balls Cutting Fluids

SUN Hao¹ LAN Qixin² YAO Bin^{2*} LU Jingjing¹ ZHANG Jinhui²

PAN Zhirong² ZHAO Kexin²

1. AECC Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin, 150060

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361005

Abstract: Nano-carbon balls cutting fluid was applied to the cutting processes of difficult-to-machine aerospace gear steels(15Cr14Co12Mo5Ni2W), and the lubrication enhancement effects of nano-carbon particles on the cutting fluid were investigated. Firstly, a cutting force model for metal cutting was established to analyze the relationship between cutting lubrication and cutting forces. Furthermore, through combined friction-wear tests and milling experiments, the lubrication performance of nano-carbon balls cutting fluid was evaluated in terms of friction coefficient, wear volume, friction surface quality, and cutting forces. Compared with the base cutting fluid, when the mass fraction of nano-carbon is reached 0.02%, the milling forces for the gear steels are decreased by over 10%, and surface roughness is reduced by more than 15%. Experimental observations reveal that nano-carbon particles on the friction contact surfaces preferentially are adsorbed onto micro-peak regions with higher surface free energy, forming a nano-carbon adsorption film. Lubrication mechanism analysis indicates that this adsorption film may exert a friction-reducing “micro-bearing” effects.

Key words: nano-carbon ball; cutting fluid; lubrication mechanism; milling; difficult-to-cut gear steel

0 引言

难加工金属材料的切削存在切削力大、切削温度高、刀具磨损/破损严重等问题, 使得切削质量较难控制。切削润滑是该类材料切削加工的技术瓶颈之一。研究高性能切削液的润滑特性与机理, 对提升难加工金属材料的切削润滑技术具有重要意义。

目前, 纳米切削液得到了越来越多研究者的关注, 他们探究了各种纳米粒子作为切削液添加剂所能起到的减摩润滑作用。CETIN 等^[1]研究

发现, 在 304 奥氏体不锈钢切削中, 纳米银添加剂使工件粗糙度减小了 15% 左右; SHARMA 等^[2]的研究工作证实, 随着氧化铝/石墨烯混合纳米颗粒浓度的增大, 切削刀具磨损减少, 摩擦因数减小; HEGAB 等^[3]研究指出, 多壁碳纳米管(MWCNTs)和纳米氧化铝(Al_2O_3)两种纳米切削液能够使刀具磨损显著减少。碳纳米颗粒具有多种同素异构体, 不同异构体具有不同的三维结构和属性, 它们都被运用到润滑研究中。关集俱等^[4]研究表明, 相比于普通乳化液, 多壁碳纳米管/油酸复合物纳米流体使 GCr15 钢的车削力减

小了 15%，工件表面粗糙度减小了 16%，刀具耐用度提高了 22%；姚斌等^[5]研究发现，石墨烯悬浮切削液能明显减小硬质合金与 45 钢之间的摩擦因数。碳 60(C60)独特的球形结构使其具有很好的抗压性，显微硬度高达 18 GPa，热稳定性好，并且 C60 晶体的硬度随压力增大而增大。LI 等^[6]使用分子动力学模拟方法探究了碳基纳米颗粒流体的摩擦学性能，分析了 C60 独特的减摩机理；YAO 等^[7]使用四球式摩擦试验机研究了洋葱状富勒烯的摩擦性能，并发现洋葱状富勒烯作为润滑油添加剂具有良好的减摩性能；PAN 等^[8]将碳纳米水基切削液和微量润滑用于钛合金铣削加工中，使最大铣削力减小了 16% 以上。

在纳米切削液润滑作用机理研究上，HE-GAB 等^[9]指出，纳米颗粒能够到达刀具-切屑摩擦界面，并形成一层可以起到减摩和抗磨作用的薄膜。武路鹏^[10]则通过对磨损表面进行分析，指出润滑油中的纳米石墨烯在摩擦磨合阶段会发生层间滑移，在成膜阶段，则会沉积在摩擦表面起到修补表面的作用；GAJRANI 等^[11]观测了刀具和切屑表面的形貌并指出，刀具表面的微结构能够促进纳米切削液的渗透；EWEN 等^[12]使用非平衡分子动力学模拟方法研究了碳纳米颗粒添加剂的摩擦与减摩机制，摩擦力减小 25% 时的模拟结果与试验观察结果一致；关集俱等^[13]发现，多壁碳纳米管能够在摩擦润滑膜中滚动，发挥“微轴承”的作用；王德祥等^[14]将纳米流体用于镍基合金磨削中发现，三维球形氧化铝颗粒起到了“类轴承”和机械抛光作用；张宇等^[15]则指出，氧化铝抛光划痕增大了润滑油的浸润面积，切向磨削力较没有纳米粒子工况减小 6.6%。现有纳米切削液减摩润滑作用机制研究主要从切削液的整体作用效果出发，如石墨烯润滑理论、滚动摩擦理论等。为了更具体地理解纳米粒子的作用机理，在微观上分析纳米切削液的渗透特性和纳米粒子在摩擦面上的分布具有重要意义。

15Cr14Co12Mo5Ni2W 齿轮钢具有高强度、高韧性和高表面硬度的特性，可在 450 °C 的环境下长期稳定工作^[16]。该材料虽然具有较好的服役性能，但其切削性能较差，切削加工效率较低^[17-18]。目前，15Cr14Co12Mo5Ni2W 钢的使用量越来越大，急需寻求提高该类材料切削加工质量和效率的新方法。在 15Cr14Co12Mo5Ni2WA 齿轮钢的切削加工技术研究方面，叶君等^[18]从切削刀具和切削工艺参数的角度探究提高材料切削质量和效率的方法；黄景山等^[19]分析了切削液在

切削接触区的作用机理，验证了切削液中纳米粒子的减摩作用；陈凯^[20]指出该材料在磨削时存在较严重的砂轮黏附和磨损，并评价了材料的磨削加工性。

针对上述纳米切削液及难加工齿轮钢切削技术研究现状，本文开展了纳米碳球切削液作用于 15Cr14Co12Mo5Ni2W 的摩擦磨损试验和切削试验，分析了不同纳米碳球质量分数对切削液性能的影响，并对纳米碳球切削液的润滑机理进行了研究，揭示了纳米碳球粒子在切削摩擦接触区的分布规律。

1 金属切削变形分析

金属切削存在三个主要变形区，变形区内的材料变形作用构成了切削的本质。在第 I 变形区，切削层材料内沿滑移线发生剪切变形和纤维化，并随之产生加工硬化；在第 II 变形区（刀-屑接触区），切屑在塑性变形后，沿着前刀面流出的过程中会与前刀面发生剧烈摩擦；在第 III 变形区（刀-工接触区），反弹的被切工件表面与后刀面发生剧烈摩擦。

平行面剪切模型^[21]描述了第 I 变形区，如图 1 所示。其中， v 为切削速度， v_c 为切屑流动速度， φ 为主剪切面与切削速度方向的夹角（剪切角）。

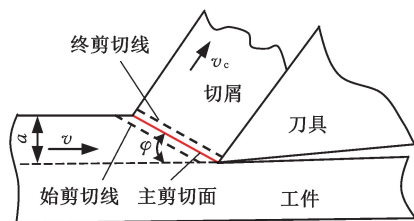


图 1 平行面剪切模型^[21]

Fig.1 Parallel-plane shear model^[21]

根据塑性变形材料的速度场不可压缩假设，将斜角切削看作是二维切削状态的累积，在等效平面（切削速度和切屑速度矢量构成的平面）内分析切削速度 v 、剪切速度 v_s 和切屑速度 v_c 的内在关系^[22-23]，可得到切屑速度和切削速度之间的关系如下：

$$v_c = v \frac{\cos \lambda_s \sin \varphi_n}{\cos \eta_c \cos(\varphi_n - \gamma_n)} \quad (1)$$

剪切速度可定义为切向剪切速度变化量，表示为

$$v_s = \frac{v \cos \lambda_s \cos \gamma_n}{\cos \eta_s \cos(\varphi_n - \gamma_n)} \quad (2)$$

式中： λ_s 为刃倾角； φ_n 为法向剪切角； η_c 为切屑流角； γ_n 为法前角； η_s 为剪切流角。

将工件材料看作黏塑性材料，综合考虑应力

硬化和热软化作用,Johnson-Cook 材料模型可以较准确地描述剪切面的材料变形^[24-25]。模型方程可表示为

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}}[A + B(\frac{\gamma}{\sqrt{3}})^n](1 + C \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0})[1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (3)$$

式中: τ 为剪切应力; γ 为剪切应变; $\dot{\gamma}_0$ 为参考剪切应变率; T 为工件的瞬时绝对温度; T_r 为初始温度; T_m 为材料的熔化温度; A 为屈服强度; B 为硬化模量; C 为应变率敏感系数; n 为硬化指数; m 为热软化指数。

进一步,将主剪切面上的剪应力假定为均匀分布,剪切力 F_s 可表示为

$$F_s = \tau_s A_s = \frac{\tau_s ab}{\cos \lambda_s \sin \varphi_n} \quad (4)$$

式中: τ_s 为主剪切面上的剪应力; A_s 为主剪切面的面积; a 为切屑厚度; b 为切屑宽度。

法向剪切角 φ_n 可根据 Merchant 公式计算:

$$\varphi_n = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} + \frac{\gamma_n}{2} \quad (5)$$

式中: β 为切削摩擦角。

由式(5)可以发现,第 I 变形区的变形与第 II 变形区的变形紧密相关,摩擦角的变化会直接影响到剪切角。当摩擦角增大时,剪切角减小,切削变形增大,因此,在切削加工中使用具有良好润滑性能的切削液,以最大程度地减少切削接触面上的摩擦,对减小切削力具有重要作用。

2 摩擦磨损试验设置

本文使用摩擦磨损试验机(型号:HENGXU MMUD-5B)和两种摩擦副开展不同纳米碳球质量分数、不同压力、不同速度下的摩擦磨损试验,探究切削液的润滑性能。

2.1 试验材料

纳米碳球切削液使用添加剂和水基切削液制备。添加剂的主要碳纳米粒子为球形分子 C60,纯度为 99.8%,质量分数为 0.1%。切削液原液为巴索水基金属切削液,牌号为 Vasco 7000。纳米碳球切削液的制备分两步完成。

1) 添加剂与切削液原液混合。针对目标质量分数取定量的添加剂溶于切削液原液中,电磁搅拌 20 min,超声分散 60 min,使添加剂与切削液原液充分混合。

2) 切削液乳化。根据 1:19 的体积比将第一步得到的混合溶液加入蒸馏水中,电磁搅拌 10 min,然后超声波分散 20 min,使切削液充分乳化。

制备得到纳米碳球切削液后,使用动态光散

射纳米粒度仪(型号:HORIBA SZ-100)测量纳米碳球质量分数为 0.02%的切削液的纳米粒子粒径分布,静置 1 d 和 10 d 后的纳米粒径分布测量结果如表 1 所示。从检测结果可知,切削液在静置 10 d 后,0~0.90 nm 和 0~1.02 nm 范围内的纳米粒子数量有所减少,但所有纳米粒子的粒径依然分布在 0~1.15 nm 范围内。这说明长时间的静置不会使溶液中的纳米粒子发生严重的团聚。

表 1 纳米碳球切削液的颗粒粒径分布占比

Tab.1 The particle size distribution of nano-carbon balls cutting fluid %

| 静置天数/d | 粒径范围 d/nm | | |
|--------|-----------|--------|--------|
| | 0~0.90 | 0~1.02 | 0~1.15 |
| 1 | 24.26 | 77.19 | 100.00 |
| 10 | 15.46 | 63.19 | 100.00 |

2.2 减摩对比试验

减摩对比试验使用销盘摩擦副探究纳米碳球切削液在不同摩擦试验压力和摩擦副滑动速度下的性能表现。其中,试验销为前述高强度航空齿轮钢,硬度为 35HRC~38HRC,销直径为 4 mm,下摩擦盘为钨钢硬质合金(材料牌号:YG6)。滑动速度-摩擦因数试验的试验压力为 80 N,压力-摩擦因数试验的摩擦副滑动速度为 502 mm/s。

2.3 磨损对比试验

磨损对比试验使用球盘摩擦副研究纳米碳球切削液的降磨性能。其中摩擦球为轴承钢材料(材料牌号:GCr15),硬度为 56HRC,钢球直径为 6.35 mm;下摩擦盘为硬质合金钢材料 YG6。试验中摩擦磨损试验机的摩擦速度为 502 mm/s(主轴转速:400 r/min),试验压力为 80 N,试验时间为 30 min。每个纳米碳球质量分数重复 3 次以上的耐磨试验。试验后,使用超声波清洗机 and 酒精溶液清洗摩擦球,然后在光学显微镜下测量钢球磨斑大小。

2.4 摩擦副表面质量对比试验

摩擦表面质量对比试验的摩擦副为销盘摩擦副,材料与减摩对比试验相同。试验压力为 80 N,摩擦速度为 502 mm/s,每组的试验时间为 15 min。试验后,使用形状测量激光显微镜观察摩擦磨损试验后的销摩擦表面,计算摩擦表面的粗糙度。

3 难加工齿轮钢铣削试验设置

铣削试验平台如图 2 所示,由数控加工中心、切削力测量系统、切削液供给系统和刀具图像采集系统组成。平台可实现铣削力信号采集和切削刀具切削刃图像的采集。试验以侧面顺铣的方式

逐层连续铣削齿轮钢工件,获取铣削过程中的切削力数据、切削表面质量数据和刀具磨损数据。试验用刀具为硬质合金整体立铣刀,刃数为 4,直径为 8.0 mm。试验工件为前述高强度航空齿轮钢,材料性能参数如表 2 所示。试验的切削工艺参数和切削液的纳米碳球质量分数如表 3 所示。

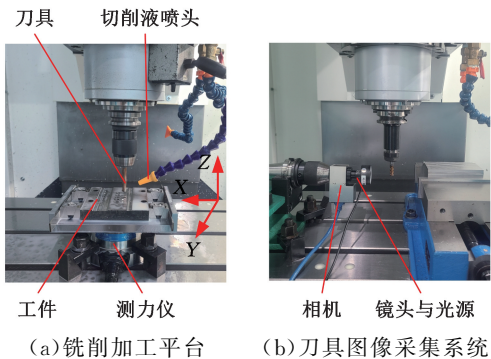


图 2 铣削试验平台
Fig.2 Milling test platform

表 2 15Cr14Co12Mo5Ni2W 齿轮钢的性能参数
Tab.2 The performance parameters of 15Cr14Co12Mo5Ni2W

| 性能参数 | 数值 |
|--|-------------------------|
| 质量热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹) | 452 |
| 热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹) | 15 |
| 线膨胀系数/(μm · mm ⁻¹ · K ⁻¹) | 6.08 × 10 ⁻³ |
| 抗拉强度/MPa | 1200 |
| 硬度 | 35HRC~38HRC |

表 3 铣削试验的工艺参数

Tab.3 The process parameters of the milling test

| 参数 | 数值 |
|---------------------------------------|-------------|
| 主轴转速 n_m /(r · min ⁻¹) | 1000 |
| 进给速度 f_m /(mm · min ⁻¹) | 150 |
| 径向切深 a_e /mm | 0.2,0.5,0.8 |
| 轴向切深 a_p /mm | 5.0 |
| 纳米碳球质量分数 w /% | 0,0.02 |

4 试验结果与分析

4.1 摩擦磨损试验结果分析

4.1.1 减摩特性分析

减摩对比试验中纳米碳球切削液作用下的摩擦因数与摩擦副滑动速度的关系如图 3 所示。从试验结果可以发现,在相同滑动速度下,摩擦因数随纳米碳球质量分数的增大而减小,但减小幅度越来越小。相比于质量分数为 0.03%,0.04% 的摩擦因数平均仅减小了 2.9%。这说明在摩擦接触区,单位体积内的纳米碳球粒子质量分数增大,有利于提高切削液的减摩性能。

试验结果还显示切削液的减摩效果随滑动速度变化发生了变化,600~1200 mm/s 范围内的摩擦因数减小幅度大于 0~600 mm/s 和 1200~

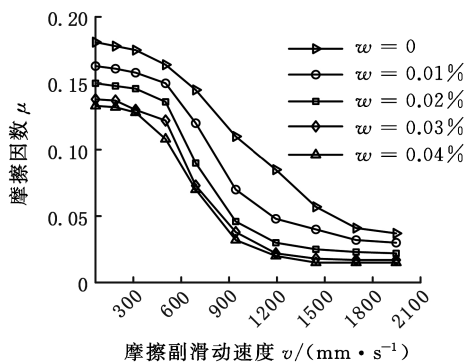


图 3 不同摩擦速度下的摩擦因数曲线

Fig.3 Friction coefficient at different friction speeds

2100 mm/s 两个速度范围摩擦因数减小幅度。由图 3 可以发现,速度与摩擦因数的关系曲线呈现出 Stribeck 曲线^[26-27]的特征。这表明随着摩擦速度的增大,摩擦接触面上的润滑状态发生了变化。当 $v \leq 600$ mm/s 时,摩擦因数变化较小,但数值较大($\mu > 0.1$),可以判断此时摩擦副处于边界润滑状态,接触面上有少量润滑液,上下摩擦面上的微凸体能充分接触。当 600 mm/s $< v < 1600$ mm/s 时,摩擦因数先快速减小然后趋于平缓,摩擦副处于混合润滑状态,摩擦副间的油膜覆盖范围变大,厚度增加,微凸体接触减少。当 $v \geq 1600$ 时,摩擦因数趋于平稳($\mu < 0.01$),摩擦副处于流体动压润滑的状态,此时摩擦接触面完全被润滑膜隔开。

减摩对比试验中摩擦因数与试验压力的对应关系如图 4 所示。

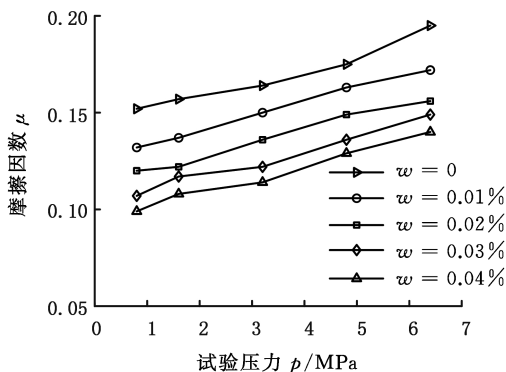


图 4 不同试验压力下的摩擦因数曲线

Fig.4 Friction coefficient under different test pressures

由图 4 可以看出,在切削液作用下,销盘摩擦副之间的摩擦因数随接触压力的增大而增大。相比于基础切削液,质量分数分别为 0.01%、0.02%、0.03%、0.04% 的纳米碳球切削液摩擦因数分别平均减小了 10.8%、20.0%、25.4% 和 30.0%。相比于基础切削液,质量分数为 0.02% 的纳米碳球切削液在最低(0.8 MPa)和最高(6.4 MPa)试验压力下的摩擦因数分别减小了 21.1%

和20.0%。这显示试验压力增大不会减弱纳米碳球粒子的减摩作用,也说明纳米碳球粒子在试验最高压力下还能保持良好的分散性,不会发生严重团聚。

4.1.2 降磨特性分析

磨损对比试验探究的是切削液对摩擦副磨损速率的影响。第一次减摩对比试验中不同纳米碳球质量分数切削液作用下的钢球磨斑显微图见图5。在显微镜下可以观测到一个明显的圆形磨斑,磨斑上有方向一致的磨痕。三次试验的摩擦球平均半径如表4所示。

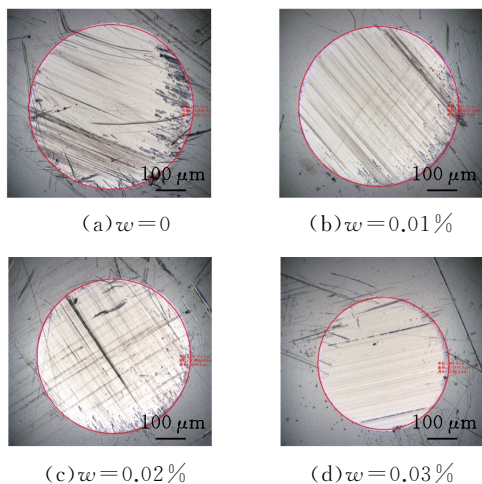


图5 磨损对比试验中的摩擦球磨斑图像

Fig.5 The wear scar images in the wear test

表4 不同纳米碳球质量分数下的摩擦球磨斑半径

Tab.4 The wear scar radius under different mass fractions of nano-carbon balls

| 纳米碳球质量分数 $w/\%$ | 磨斑平均半径 $r/\mu\text{m}$ | 相比 $w=0$ 的半径减幅 $\psi/\%$ |
|-----------------|------------------------|--------------------------|
| 0 | 301.2 | 0 |
| 0.01 | 282.7 | 6.1 |
| 0.02 | 270.5 | 10.2 |
| 0.03 | 264.0 | 12.3 |

试验结果显示,磨斑半径随纳米碳球质量分数的增大而减小,这说明纳米碳球粒子可使摩擦副之间的切削作用力减小,微凸体之间的挤压、切削和耕犁作用变轻,从而使摩擦副的磨损速率减小。根据前述减摩对比试验,磨损对比试验参数下,摩擦副润滑状态以边界润滑为主,上下接触面上的微凸体会发生相互挤压和滑擦作用。试验结果说明,纳米碳球可以在边界润滑状态下较好地发挥降磨作用。另外,磨斑半径的减小趋势与摩擦因数减小趋势相同,说明切削液的减摩和降磨特性具有相关性。

对上述试验结果作如下原因分析:①摩擦接触面上润滑膜中的纳米碳球粒子减少了微凸体的

直接接触,从而使微凸体之间的挤压、切削和耕犁作用减弱;②纳米碳球的存在使摩擦接触面上的润滑膜吸附性增强,加强了对摩擦副表面的保护作用。

4.1.3 摩擦表面质量分析

表面质量对比试验中,在摩擦表面选取多块典型区域测量表面粗糙度,对应的表面粗糙度平均值如表5所示,其中, S_a 表示轮廓的算术平均偏差, S_z 表示轮廓的最大高度。可以发现,纳米碳球质量分数越大,表面的粗糙度值越小;粗糙度的递减幅度越来越小。相比于 $w=0.03\%$, $w=0.04\%$ 纳米碳球切削液作用下的摩擦面粗糙度几乎没有减小。

表5 表面质量对比试验中的摩擦表面粗糙度

Tab.5 The frictional surface roughness in the surface quality comparison test

| 纳米碳球质量分数 $w/\%$ | $S_a/\mu\text{m}$ | $S_z/\mu\text{m}$ | S_a 值相比 $w=0$ 的减幅 $\psi/\%$ |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| 0 | 0.1110 | 0.9092 | 0 |
| 0.005 | 0.0757 | 0.8115 | 31.8 |
| 0.010 | 0.0670 | 0.8640 | 39.6 |
| 0.020 | 0.0653 | 0.7620 | 41.1 |
| 0.030 | 0.0654 | 0.7490 | 41.1 |
| 0.040 | 0.0646 | 0.7427 | 41.8 |

在激光显微镜下观察对比试验销摩擦面的形貌特征,结果如图6所示。可以发现低质量分数 ($w=0, w=0.005\%$) 纳米碳球切削液作用下的摩擦表面有少量烧灼斑点,如图中椭圆形区域所示。

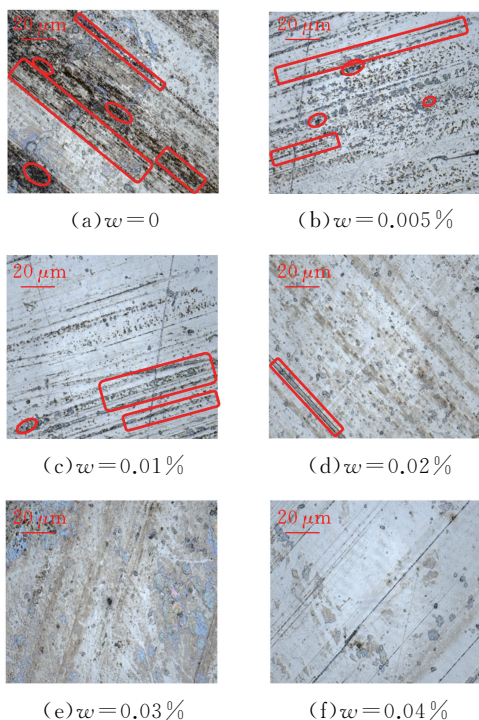


图6 摩擦表面的显微形貌

Fig.6 Micro morphology of friction surface

这说明试验过程中,接触面上的局部温度较高,导致钢球表面产生烧伤。同时,低质量分数纳米碳球切削液作用下的摩擦表面有很多因材料剥落而形成的坑点,表面的沟壑比较深,如图中的方形区域。这说明摩擦副之间的摩擦力较大,发生了比较严重的挤压、耕犁和切削的现象。随着纳米碳球质量分数的提高,摩擦面上的摩擦划痕越来越浅,表面越来越光滑,表面纹理也更加规整。摩擦表面的粗糙度测量值变化规律也验证了上述观点。这也说明纳米碳球质量分数达到一定边界值后,再提高质量分数对提高磨斑表面质量作用较小。从机理上分析,这主要是因为纳米碳球质量分数增大使单位体积内的纳米粒子数增多,从而增加了纳米粒子发生相互碰撞和团聚的概率,发生团聚的纳米粒子失去润滑作用。

4.2 铣削试验结果分析

当 $f_m = 150 \text{ mm/min}$, $n_m = 1000 \text{ r/min}$ 时,不同径向切深下的试验铣削力如图 7 所示,其中 F_x 和 F_y 分别表示水平和垂直方向的切削力。由试验结果可知,两个方向的铣削力都随径向切深的增大而增大;取各次试验的平均值,纳米碳球质量分数为 0.02% 切削液相对于基础切削液,水平和垂直方向的切削力分别减小了 11.2% 和 13.8%。

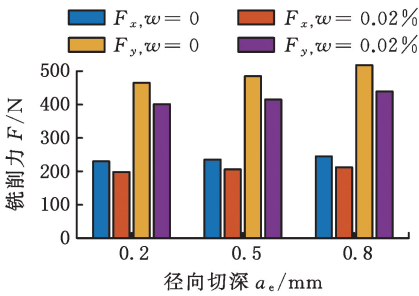


图 7 不同径向切深下的铣削力

Fig.7 Milling force under different radial cutting depth

当径向切深 $a_e = 0.5 \text{ mm}$ 时,不同进给速度下的试验铣削力如图 8 所示。由试验结果可知,两个方向的铣削力受进给速度的影响较大;质量

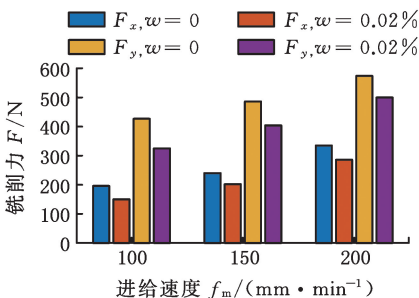


图 8 不同进给速度下的铣削力

Fig.8 Milling force at different feed rates

分数为 0.02% 的切削液相对于基础切削液,水平和垂直方向的切削力分别平均减小了 18.0% 和 17.4%。

试验还使用粗糙度轮廓仪测量了不同工艺参数下的表面粗糙度,测量结果如表 6 所示。试验结果显示,纳米碳球切削液对铣削加工也能起到减小切削表面粗糙度的作用。三种径向切深下,相比于基础切削液,纳米碳球切削液作用下的粗糙度分别减小了 21.9%, 18.7%, 17.1%。

表 6 不同径向切深下的铣削表面粗糙度

Tab.6 Milling surface roughness under different radial

| 纳米碳球质量分数 $w/\%$ | 径向切深 a_e/mm | | |
|-----------------|----------------------|-------|-------|
| | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
| 0 | 0.935 | 1.059 | 1.128 |
| 0.02 | 0.730 | 0.861 | 0.935 |

在一定切削工艺参数 ($n_m = 1500 \text{ r/min}$, $f_m = 250 \text{ mm/min}$, $a_e = 0.8 \text{ mm}$, $a_p = 5.0 \text{ mm}$) 下,刀具磨损试验以顺铣的方式逐层铣削方形工件(工件大小: $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$),两种质量分数 ($w=0$, $w=0.02\%$) 切削液作用下的刀具侧刃后刀面如图 9 所示,其中, B_m 指后刀面平均磨损量。由试验结果可知,在相同切削长度下,纳米碳球切削液 ($w=0.02\%$) 作用下刀刃上的微小崩刃较少,刀刃总体比较平整。基础切削液作用下刀刃上的微小崩刃较多,并随着切削的进行个别缺口快速扩大,形成较大的刀刃缺口。从磨损值上看,随着切削长度的增加,两种切削液作用下的后刀面磨损量相差越来越大。当累积切削长度 $l_m = 45 \text{ m}$ 时,相比于基础切削液,纳米碳球切削液作用下的 B_m 值减小了 16.6%; 当 $l_m = 250 \text{ m}$ 时, B_m 值则减小了有 17.9%。试验结果说明纳米碳

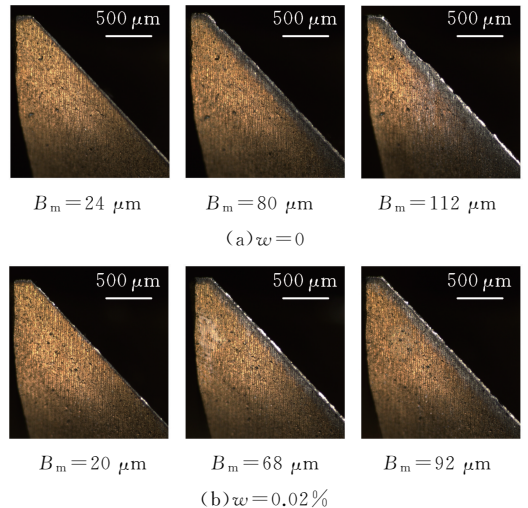


图 9 铣削试验立铣刀后刀面图像

Fig.9 Images of the flank face in the milling test

球切削液有助于减小切削力,减缓刀具磨损,延长刀具使用寿命。

试验铣削力、粗糙度减小和刀具磨损减少说明纳米碳球切削液能够在立铣刀侧铣加工中发挥润滑作用,减小刀-屑和刀-工接触区的摩擦力。由式(5)可知,摩擦角 β 减小,会使剪切角 φ_n 增大,变形减小,从而导致切削力减小。这也说明纳米碳球粒子可以通过吸附、渗透等方式进入到切削接触区,减轻刀具与切屑和工件之间的挤压、耕犁和切削作用,降低接触面上的温度。

4.3 纳米碳球切削液的润滑机理分析

摩擦磨损试验和切削试验表明,纳米碳球切削液比基础切削液具有更好的减摩润滑性能,说明纳米碳球粒子在摩擦区发挥了增强润滑作用。当溶于切削液中的纳米碳球粒子随切削液一起进入到摩擦区时,纳米碳球将成为润滑膜的一部分。从润滑膜的角度分析,切削液中的纳米粒子会在摩擦表面沉积形成一层低剪切强度的薄膜^[28-29],有助于减小摩擦副之间的摩擦力。

从接触面微观接触的角度看,摩擦接触面的微观表面由连续的尖峰和低谷构成,受摩擦作用,局部区域的材料微单元会受到强烈的挤压、撕裂而产生弹塑性变形,使表面积增大。此时微凸体的表面自由能中包含了弹性能,表面张力在数值上不再等于表面自由能。对于摩擦接触面,凹凸不平表面的自由能会随不同区域的形态而改变。显然,表面尖峰会因变形、摩擦作用等原因,所具有的表面自由能更大,从而更容易吸附纳米粒子,表面平坦和低谷区域的分子受摩擦体固相约束更大,变形更小,表面自由能更小。因此,尖峰区域更容易被一层纳米吸附膜覆盖,而平坦区域或波谷附近的纳米粒子密度较低,主要由切削液填充。

在摩擦副相互运动时,只有突起尖峰之间发生相互挤压和滑擦作用,低谷处不发生摩擦接触,在切削液渗透到的区域,低谷会被切削液填充,因此,可以判断纳米碳球粒子主要在产生相互接触的尖峰区域发挥“微轴承”的减摩作用。使用扫描电子显微镜观察纳米碳球切削液作用下的刀具切削接触面微观形貌,测量表面不同微区域的材料成分,试验观测到的微观形貌和测量点如图10所示。其中方框区域表示凸起的尖峰点位置,圆框区域表示低谷或平坦点位置。

尖峰点和低谷点的平均碳元素含量如表7所示。从观测结果可知,微观尖峰点上的碳元素质量分数比低谷和平坦点质量分数高出23.41%,碳原子数量百分数比低谷和平坦点高出21.42%。

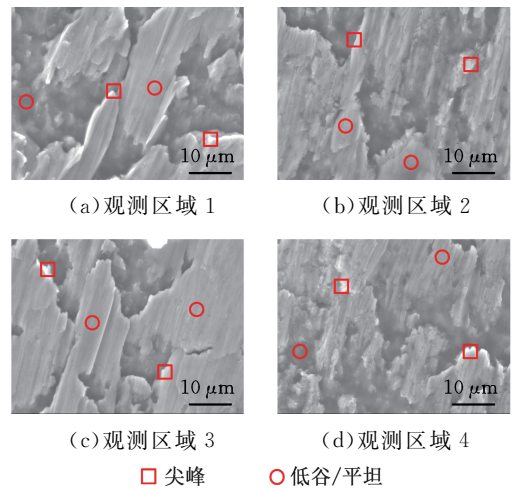


图10 刀具摩擦接触面上的微观形貌

Fig.10 The microscopic morphology on the frictional contact surface of the cutting tool

表7 摩擦接触面两种观测点上的碳元素含量

Tab.6 The carbon element content of observation points on the frictional contact surface %

| 观测点类型 | 碳元素质量分数 | 碳原子数量百分数 |
|-------|---------|----------|
| 尖峰 | 39.69 | 83.93 |
| 低谷/平坦 | 16.28 | 62.51 |

这说明碳原子确实在摩擦接触面上的尖峰点附近发生了聚集,形成了一层具有减摩作用的润滑膜。

5 结论

本文通过高强度航空齿轮钢(15Cr14Co12-Mo5Ni2W)的摩擦磨损试验和切削试验探究了纳米碳球切削液的润滑性能,分析了纳米碳球粒子在摩擦接触面上的作用机理。研究结论如下:

1) 切削液中纳米碳球粒子的存在减少了微凸体的直接接触,使微凸体之间的挤压、切削和耕犁作用减弱。相比于基础切削液,质量分数为0.02%的纳米碳球切削液作用下的摩擦因数减小幅度大于20%,摩擦副磨损量减小幅度大于10%。试验还发现,纳米碳球质量分数的增大会增加纳米粒子发生相互碰撞和团聚的概率,从而减小润滑性能的提高幅度。相比于质量分数为0.03%的纳米碳球切削液,0.04%的纳米碳球切削液摩擦因数平均仅减小了2.9%。

2) 相比于基础切削液,质量分数为0.02%的纳米碳球切削液作用下的高强度齿轮钢铣削力减小了10%以上,表面粗糙度减小了15%以上。铣削试验还表明,纳米碳球切削液还有助于减缓刀具磨损,延长刀具的使用寿命。

3) 纳米碳球粒子可以随切削液一起渗透到摩擦接触面上,且更容易吸附在表面自由能大的微尖峰区域,沉积形成一层低剪切强度的薄膜。试

验结果表明,凸起尖峰处的纳米碳球粒子含量比低谷和平坦区域高 20% 以上。摩擦副运动时,尖峰区域的纳米碳球粒子可以起到“微轴承”的作用。

参考文献:

- [1] CETIN M H, KESEN A, KORKMAZ S, et al. Performance Evaluation of the Nano-silver Added Vegetable-oil-based Cutting Fluid in Drilling Process [J]. *Surface Topography-Metrology and Properties*, 2020, 8(2):025029.
- [2] SHARMA A K, TIWARI A K, DIXIT A R, et al. Novel Uses of Alumina/Graphene Hybrid Nanoparticle Additives for Improved Tribological Properties of Lubricant in Turning Operation[J]. *Tribology International*, 2018, 119:99-111.
- [3] HEGAB H, UMER U, SOLIMAN M, et al. Effects of Nano-cutting Fluids on Tool Performance and Chip Morphology during Machining Inconel 718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9/12):3449-3458.
- [4] 关集俱, 高超, 徐正亚, 等. 多壁碳纳米管/油酸复合物纳米流体车削 GCr15 钢的性能研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(18):2205-2214.
- GUAN Jiju, GAO Chao, XU Zhengya, et al. Study on Turning Performance of GCr15 Steels with Nanofluids Prepared by Composites of MWCNTs and Oleic Acid[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(18):2205-2214.
- [5] 姚斌, 何显超, 孙维方, 等. 石墨烯作为水基半合成切削液添加剂的硬质合金-钢材料摩擦学特性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4):142-150.
- YAO Bin, HE Yuchao, SUN Weifang, et al. Graphene as Beneficial Additive to Water Based Semi-synthetic Cutting Fluid for Improving Friction Condition between Materials of Carbide and Steel[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4):142-150.
- [6] LI X W, XU X W, ZHOU Y, et al. Insights into Friction Dependence of Carbon Nanoparticles as Oil-Based Lubricant Additive at Amorphous Carbon Interface[J]. *Carbon*, 2019, 150:465-474.
- [7] YAO Y L, WANG X M, GUO J J, et al. Tribological Property of Onion-like Fullerenes as Lubricant Additive[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(15):2524-2527.
- [8] PAN Z R, YAO B, CHEN B Q, et al. Cutting Force Model of Milling Titanium Alloy with C60 Nanofluid Minimum Quantity Lubrication[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 105:295-306.
- [9] HEGAB H, UMER U, ESAWI A, et al. Tribological Mechanisms of Nano-cutting Fluid Minimum Quantity Lubrication: a Comparative Performance Analysis Model[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(9/10):3133-3139.
- [10] 武路鹏. 含纳米石墨烯润滑油的流变及摩擦学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WU Lupeng. Research on Rheological and Tribological Performance of Graphene-based Lubricants [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [11] GAJRANI K K, SUVIN P S, KAILAS S V, et al. Machining of Hard Materials Using Textured Tool with Minimum Quantity Nano-green Cutting Fluid [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35:410-421.
- [12] EWEN J P, GATTINONI C, THAKKAR F M, et al. Nonequilibrium Molecular Dynamics Investigation of the Reduction in Friction and Wear by Carbon Nanoparticles between Iron Surfaces [J]. *Tribology Letters*, 2016, 63(3):38.
- [13] 关集俱, 刘德利, 王勇, 等. MWCNTs 复合物纳米流体的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(3):289-298.
- GUAN Jiju, LIU Deli, WANG Yong, et al. Tribological Properties of Nanofluid Prepared by Composite of Multi-walled Carbon Nanotube and Oleic Acid[J]. *Tribology*, 2020, 40(3):289-298.
- [14] 王德祥, 张宇, 江京亮, 等. 离子液基和棕榈油基纳米流体在镍基高温合金微量润滑磨削界面的摩擦学机理研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 60(19):159-171.
- WANG Dexiang, ZHANG Yu, JIANG Jingliang, et al. Tribological Mechanism on The Grinding Interface of Nickel-base Superalloy under Minimum Quantity Lubrication with Ionic Liquid and Palm Oil Based Nanofluids [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 60(19):159-171.
- [15] 张宇, 王德祥, 郭峰, 等. 球形纳米颗粒在镍基合金纳米流体微量润滑磨削界面摩擦学机制的分子动力学研究[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(3):445-456.
- ZHANG Yu, WANG Dexiang, GUO Feng, et al. Molecular Dynamics Study on Tribological Mechanism of Spherical Nanoparticles on Nickel-based Alloy Grinding Interfaces under Nanofluid MQL [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 35(3):445-456.
- [16] YU F, CHEN X P, XU H F, et al. Current Status

- of Metallurgical Quality and Fatigue Performance of Rolling Bearing Steel and Development Direction of High-end Bearing Steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4):513-522.
- [17] YU X F, SHEN X Y, WANG S S, et al. Effect of Quenching and Tempering Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of CSS-42L Bearing Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(7):5458-5466.
- [18] 叶君, 孙浩, 王春雷, 等. 锥齿轮的冷加工方法: CN201910937909.2[P]. 2020-09-29.
YE Jun, SUN Hao, WANG Chunlei, et al. Cold Working Method of Bevel Gear: CN201910937909.2[P]. 2020-09-29.
- [19] 黄景山, 刘国亮, 孙浩, 等. C60 纳米粒子切削液对 15Cr14Co12Mo5Ni2WA 齿轮钢切削特性的影响研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(23):358-371.
HUANG Jingshan, LIU Guoliang, SUN Hao, et al. Effect of C60 Nanoparticle Cutting Fluid on Cutting Characteristics of 15Cr14Co12Mo5Ni2WA Gear Steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(23):358-371.
- [20] 陈凯. CSS-42L 合金钢的磨削加工性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
CHEN Kai. Grindability of CSS-42L Alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [21] YING S S, FU C T, ZHANG S Q, et al. Numerical and Experimental Investigations on Cutting Force of Broaching Internal Spline Holes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(3/4):2803-2814.
- [22] 李炳林. 不锈钢加工中切削力分析预测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
LI Binglin. Research on Analytical Prediction of Cutting Forces in Stainless Steel Machining [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [23] 康宁. TC4 钛合金加工的铣削力建模及加工工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
KANG Ning. Research on Milling Force Modeling and Manufacturing Process of TC4 Titanium Alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [24] ZHANG H, ZENG H H, YAN R, et al. Analytical Modeling of Cutting Forces Considering Material Softening Effect in Laser-assisted Milling of AerMet100 Steel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(1/2):247-260.
- [25] NIJIN J R, JAGADESH T. Numerical Simulation of the Influence of Tool Geometry on Energy Consumption during Micro Turning of Titanium Alloy [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E—Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, 236(4):1411-1420.
- [26] WOYDT M, WASCHER R. The History of the Stribeck Curve and Ball Bearing Steels: the Role of Adolf Martens [J]. *Wear*, 2010, 268(11/12):1542-1546.
- [27] ZHANG H D, YOSHIMI T, FUKUZAWA K, et al. Is the Trend of Stribeck Curves Followed by Nano-lubrication with Molecularly Thin Liquid Lubricant Films? [J]. *Tribology International*, 2018, 119:82-87.
- [28] KONG L H, SUN J L, BAO Y Y. Preparation, Characterization and Tribological Mechanism of Nanofluids [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(21):12599-12609.
- [29] KHANDEKAR S, SANKAR M R, AGNIHOTRI V, et al. Nano-cutting Fluid for Enhancement of Metal Cutting Performance [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(9):963-967.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 孙浩, 男, 1985 年生, 研究员级高级工程师。研究方向为航空轴类与精密齿轮制造。姚斌* (通信作者), 男, 1963 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为金属切削机理及先进刀具设计、先进制造工艺及智能制造装备技术、机床-工艺交互作用机理。E-mail: yaobin@xmu.edu.cn。

本文引用格式:

孙浩, 蓝启鑫, 姚斌, 等. 纳米碳球切削液的润滑性能及机理研究 [J]. *中国机械工程*, 2025, 36(4):715-723.
SUN Hao, LAN Qixin, YAO Bin, et al. Study on Lubricating Performances and Mechanism of Nano-carbon Balls Cutting Fluids [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(4):715-723.