

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

姚斌,何昱超,孙维方,曹新城,陈彬强,郑清
(厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361005)

摘要:改善加工过程润滑条件是延缓刀具磨损的重要途径。将石墨烯作为 3034 水基半合成切削液的添加剂,研究石墨烯悬浮切削液的硬质合金-钢材料摩擦学性能,研究对象是由硬质合金 YG8 制备的金属球和由 45#钢制备的圆盘形试件;采用球-盘摩擦副接触方式在摩擦磨损试验机上进行试验,测定了质量分数为 0.1%~0.9% 的石墨烯悬浮切削液的平均摩擦特性和摩擦系数;采用激光共聚焦显微镜对磨痕轮廓进行提取,并得出磨损定量评价指数,并用扫描电镜和拉曼光谱仪对磨痕进行磨损机理分析;进行切削实验来分析石墨烯悬浮切削液对切削性能指标的改善情况。实验分析结果表明:石墨烯悬浮切削液能明显改善硬质合金-45#钢之间的润滑条件,摩擦系数和磨损率显著下降,采用不同质量分数石墨烯悬浮切削液的平均摩擦系数较原半合成切削液下降 12.9%~57.3%,磨损率下降 33.82%,同时切削合力较原半合成切削液下降 18.58%,加工后工件表面粗糙度下降 7.5%。

关键词:石墨烯;硬质合金;水基半合成切削液;摩擦学特性

中图分类号:TH117.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)04-142-09

Graphene as beneficial additive to water based semisynthetic cutting fluid for improving friction condition between materials of carbide and steel

YAO Bin, HE Yuchao, SUN Weifang, CAO Xincheng, CHEN Binqiang, ZHENG Qing
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Carbide with its products is extensively applied in the field of mechanical machining of metal materials. In this study, graphene was employed as a beneficial additive to semisynthetic cutting fluid 3034, and the related frictional characteristic behavior was investigated via experimental on carbide-steel friction pair. In the experiment, a ball specimen was made of the carbide material of YG8, and a disk was made of the steel material of 45#. On the basis of ball-on-disk friction pair, experiments were conducted on a tribometer machine. The mass fraction of graphene in the tested coolant ranges from 0.1% to 0.9%. Surface topologies of the specimen were investigated using a laser confocal microscope. The scanning electron microscope and Raman spectra analysis was used to analyze wear mechanism. Experimental results revealed the improvement of lubrication condition between carbide and steel is substantially improved, demonstrated by the decreasing of averaged friction coefficient by 12.9% to 57.3% as well as the decreasing of wear rate by 33.82%. The resultant cutting force was decreased by 18.58% compared with that of semisynthetic cutting fluid 3034, and the surface roughness was reduced by 7.5% of the machined workpiece.

Key words: graphene; carbide; water based semisynthetic cutting fluid; tribological behavior

硬质合金制品被誉为工业的“牙齿”,广泛应用于航空宇航制造、机械装备生产、能源和电子工业等关键工业领域^[1]。硬质合金刀具在加工塑性好的金属材料时,切屑与刀面发生显著摩擦,加剧了刀具磨损,此外还伴随着切削力上升、切削稳定性下降、加工精度劣化、工件表面质量恶化等问题^[2]。合适的润滑环境能够减少摩擦,进而减少

热量产生及切削力,是提高刀具寿命和保证尺寸精度、工件质量的可靠途径^[3]。近年来,关于切削过程润滑环境改善的研究成为学术界和工程界共同关注的热点。

Lian 等提出通过制备软涂层微纳结构自润滑刀具,在切削时产生极薄的润滑膜来改善刀具的抗黏结性并提高其抗磨损性能^[4]。Zhu 采用低

* 收稿日期:2017-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605403);广东省自然科学基金资助项目(2015A030310010);福建省自然科学基金面上资助项目(2016J01261);福建省产业技术联合创新专项资助项目(闽发改投资[2016]482号)

作者简介:姚斌(1963—),男,湖北宜都人,教授,博士,博士生导师,E-mail:yaobin@xmu.edu.cn

温干燥空气,以冷风射流的方式喷向切削工作区,以改善切削过程的散热性能和工件表面质量^[5]。Liu 等利用水蒸气作为冷却润滑剂,在刀-屑接触表面形成具有减摩抗磨作用的氧化膜,从而减弱刀具与工件间的摩擦^[6]。上述方法能够降低刀具磨损,却提高了刀具制备难度,实施过程需要额外附件,加剧了加工环境的复杂性。

水基切削液是实际切削加工中广泛用以减少摩擦和刀具磨损的介质^[7],其中半合成切削液兼备良好散热性和清洗性、合适的极压性能等特点^[8]。然而目前可用的常规水基半合成切削液仍存在着突出短板——润滑性较差。为了改善这个问题,本文研究了石墨烯添加剂对水基半合成切削液润滑效果的改善情况。

石墨烯具有高导热系数、良好的减摩性和耐腐蚀性强等性能,广泛应用于半导体、智能传感感知等尖端领域。国内外已有学者开始关注纳米石墨和氧化石墨烯片作为润滑添加剂对摩擦特性的影响。Chen 等将可溶于水的纳米石墨作为添加剂加入 QDW618 水基切削液中,并通过四球摩擦磨损试验机测试润滑性能,结果表明,将纳米石墨作为切削液添加剂后,摩擦系数变低^[9]。Chu 等研究了不同质量分数的氧化石墨烯悬浮切削液对切削力和切削温度的影响^[10]。

尽管如此,目前石墨烯润滑研究主要针对某些特定材料构成的摩擦副,试样材料为青铜织构、GCr15、合金铸铁等^[11-12]。面向实际机械加工中的硬质合金刀具加工润滑环境改善的研究并不多见。目前装备制造中,优质碳素工具钢(塑性钢材料)常用于制造装备结构件,其加工刀具中硬质合金刀具被普遍使用。“硬质合金-塑性钢材料”摩擦副在现代装备领域的出现场合多、使用比重大,研究石墨烯作为添加剂对该摩擦副的润滑改善特性意义显著。

1 石墨烯悬浮切削液的配制

本节将介绍石墨烯悬浮切削液的配制,配制该改进切削液的前提是石墨烯的制备。选用石墨烯水溶液(购自无锡市惠诚石墨烯技术应用有限公司,溶液中石墨烯质量分数为1%,分散剂为二甲基甲酰胺)作为切削液添加剂,因为其具有良好的分散性,能有效地分布于切削液中。

水基切削液选用3034半合成水基切削液(购自厦门戴纬润滑油有限公司),并将原液进一步稀释到5%,从而得到石墨烯水溶液与3034半合成切削液混合而成的质量分数为0.1%~0.9%

的石墨烯悬浮切削液,所有配制完毕的石墨烯悬浮切削液都经过10 min 搅拌和1 h 超声振荡处理,目的是使石墨烯微团均匀分散。图1所示为放置了7天的石墨烯悬浮切削液,1‰表示质量分数为0.1%的石墨烯悬浮切削液,3034表示3034半合成切削液。从图中可以看出放置了7天后石墨烯悬浮切削液仍可以均匀分散。

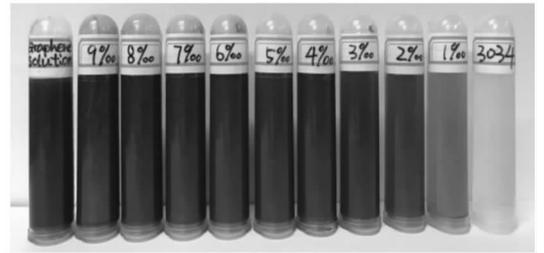


图1 石墨烯悬浮切削液

Fig. 1 Graphene colloidal suspensions

2 摩擦磨损试验与摩擦系数测定

本节通过球盘摩擦试验研究“YG8-45#”摩擦系数最小值及其对应最佳石墨烯质量分数。

2.1 试验设备与方案

摩擦磨损试验是在 CETR UMT-2M 摩擦磨损试验机(如图2所示)上进行,试验接触形式采用“球-盘接触”(如图3所示),上试样固定不动,下试样在主轴驱动下做连续旋转运动。具体试验条件为:试验载荷20 N,下试样旋转速度600 r/min,试验时间30 min,每组试验重复3次。

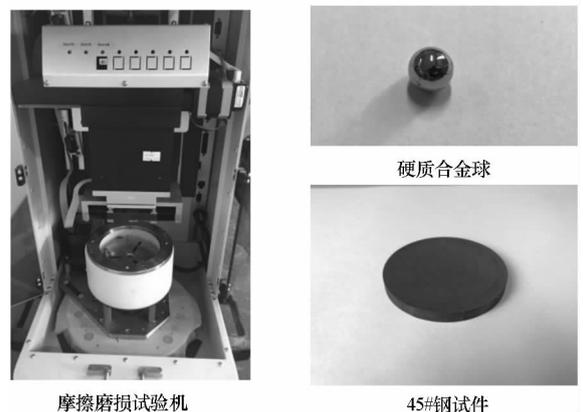


图2 摩擦磨损试验机与试验材料

Fig. 2 UMT-2M tribometer and experiment material

试验摩擦副的上试样为硬质合金球(牌号:YG8,直径:9.525 mm),固定在特制夹具中。下试样为钢盘(牌号:45#钢,φ50 mm×5 mm),表面经过抛光处理。所有试样在试验前用酒精超声清洗4次,每次480 s,待其干燥后使用。

润滑介质采用3034半合成切削液和质量分

数为 0.1% ~ 0.9% 的石墨烯悬浮切削液。试验在相同试样表面粗糙度、相同载荷力和相同主轴转速下,对比不同质量分数的石墨烯悬浮切削液对 YG8 硬质合金和 45#钢作为摩擦副的摩擦学性能的影响。

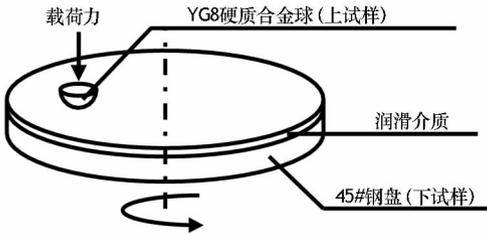


图 3 摩擦磨损试验球-盘摩擦接触形式
Fig. 3 Ball-on-disk contract form of friction-wear experiment

2.2 试验现象与结果讨论

对每次试验时稳定状态的摩擦系数序列计算平均值,得到干摩擦、3034 半合成切削液和不同质量分数石墨烯悬浮切削液润滑环境下 YG8 硬质合金球和 45#钢盘对磨时的平均摩擦系数,如图 4 所示。其中,3034 表示 3034 半合成切削液,0.1% 表示质量分数为 0.1% 的石墨烯悬浮切削液。

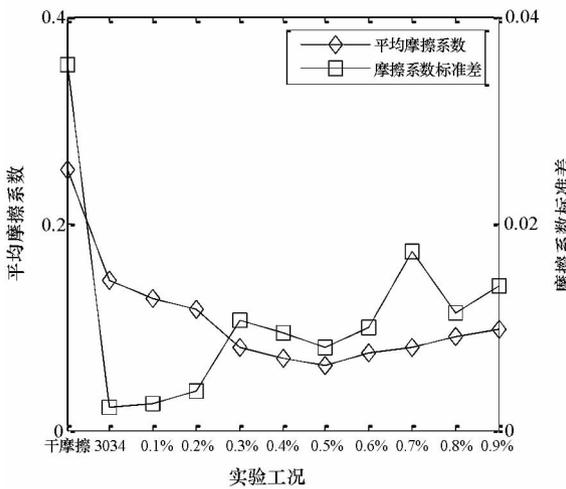


图 4 平均摩擦系数与标准差

Fig. 4 Average friction coefficient and standard deviation

当石墨烯质量分数为 0.5% 时,摩擦副间的平均摩擦系数最小,为“YG8 - 45#”材料间最佳石墨烯质量分数。表明质量分数太低的石墨烯悬浮切削液中石墨烯含量较少,3034 半合成水基切削液起主导作用,不能完全发挥石墨烯的润滑性能,而质量分数太高的石墨烯悬浮切削液中石墨烯含量较多,石墨烯会堆积在摩擦副表面,阻断润滑油膜的形成^[13-14],增加摩擦副之间的磨损,润滑减磨性能反而下降。

从图 4 可以看出,润滑环境为 3034 半合成水基切削液时的标准差最小,说明此时的摩擦系数最稳定,波动较小。干摩擦状态下的摩擦系数标准差最大,摩擦磨损状态极不稳定。而使用质量分数为 0.1% ~ 0.9% 石墨烯悬浮切削液后的摩擦系数标准差均大于使用 3034 半合成水基切削液,说明石墨烯作为水基半合成切削液添加剂可以显著降低摩擦系数,同时也使“YG8 - 45#”之间的摩擦磨损情况变得不平稳,摩擦系数趋势略有波动。

图 5 为 3034 半合成切削液与质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液摩擦系数概率密度分布函数对比。从图 5 中可以看出,质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液的摩擦系数分布在 0.05 ~ 0.07 之间。3034 半合成切削液的摩擦系数集中在 0.14 ~ 0.15 之间,使用了石墨烯作为水基半合成切削液的添加剂会导致摩擦系数波动,但是整体均小于润滑环境为 3034 半合成切削液时的摩擦系数。

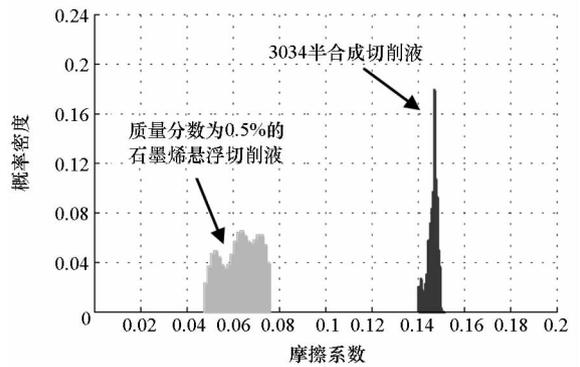


图 5 3034 半合成切削液与质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液摩擦系数概率密度分布函数对比

Fig. 5 Friction coefficient probability density distribution function under semisynthetic cutting fluid 3034 and 0.5% graphene colloidal suspensions

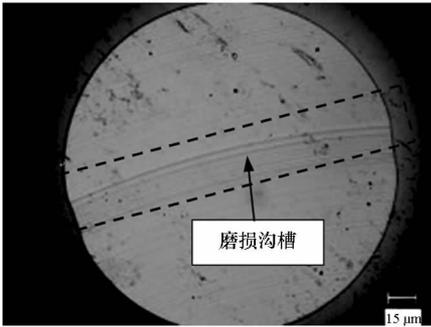
因此本试验发现在悬浮液方案中, YG8 硬质合金和 45#钢作为摩擦副时的最佳石墨烯悬浮切削液质量分数为 0.5%, 此质量分数下的石墨烯悬浮切削液能够减少 57.36% 的平均摩擦系数, 并且摩擦磨损状态较为稳定。

3 试样磨损形貌

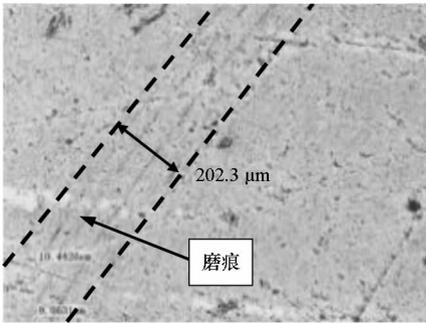
为了更好地测定摩擦磨损性能,利用激光共聚焦显微镜 (Keyence VK-X100) 对 45#钢盘和 YG8 硬质合金球摩擦磨损试验后的磨痕轮廓进行提取,得出磨损评价,并用扫描电镜和拉曼光谱仪对磨痕进行磨损机理分析。

3.1 磨损形貌测定

图6、图7为在3034切削液和质量分数为0.5%的石墨烯悬浮切削液润滑条件下的磨痕宏观形貌。从图中可得,在3034半合成切削液润滑条件下的球的磨痕中间有一条明显的沟槽(图中箭头所指处),而石墨烯悬浮切削液润滑条件下的球的磨痕表面较为平整,但表面仍然存在微小点坑。下试样表面的磨痕比较轻微,磨痕宽度在3034半合成切削液和石墨烯悬浮切削液润滑条件下分别为202.3 μm和165.8 μm,表明石墨烯作为切削液添加剂能减少磨损,改善润滑性能。



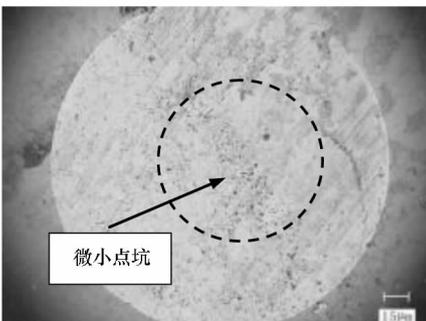
(a) 上试样的磨损
(a) Wear of upper sample



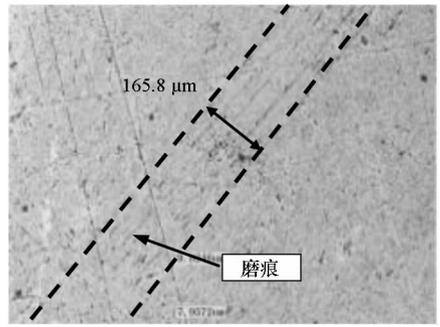
(b) 下试样的磨损
(b) Wear of lower sample

图6 使用润滑条件为3034半合成切削液时的磨痕形貌

Fig.6 Optical morphologies of wear tracks under semisynthetic cutting fluid 3034



(a) 上试样的磨损
(a) Wear of upper sample



(b) 下试样的磨损
(b) Wear of lower sample

图7 使用润滑条件为质量分数为0.5%石墨烯悬浮切削液时的磨痕形貌

Fig.7 Optical morphologies of wear tracks under 0.5% graphene colloidal suspensions

为了更加全面地分析磨损的情况,接下来提取出磨痕的二维轮廓。如图8、图9所示,磨痕深度由1.379 5 μm下降到了1.067 4 μm,下降了22.6%。

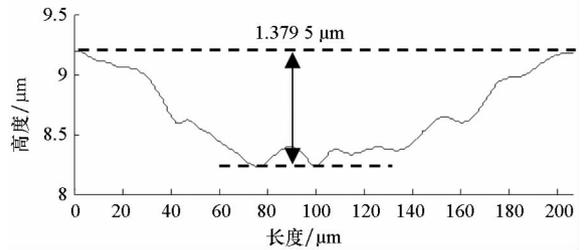


图8 润滑条件为3034切削液时下试样摩擦沟槽截面图

Fig.8 Outlines of the wear tracks of lower sample under semisynthetic cutting fluid 3034

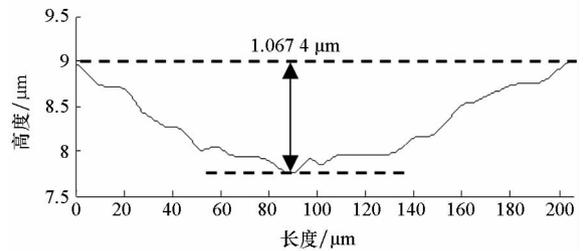


图9 润滑条件为0.5%石墨烯悬浮切削液时下试样摩擦沟槽截面图

Fig.9 Outlines of the wear tracks of lower sample under 0.5% graphene colloidal suspensions

3.2 磨损评价

为了更好地定量评价试样的摩擦磨损行为,采用磨损率 ϕ 来表征磨损情况,如式(1)所示。

$$\phi = \frac{V}{F_n \times S} = \frac{A \times L}{F_n \times S} \quad (1)$$

式中: V 为磨损总体积; F_n 为载荷力; S 为磨损总距离; L 为磨痕周长; A 为磨损面积,可由式(2)

得出。

$$A = \frac{1}{n} \sum \int_a^b h(x) dx \quad (2)$$

式中： a 和 b 为磨损轮廓边界； n 为截面数（本文所选截面数为 4）； $h(x)$ 为磨损轮廓表达式。

四条测试路径对应的截面磨损轮廓如图 10 所示。

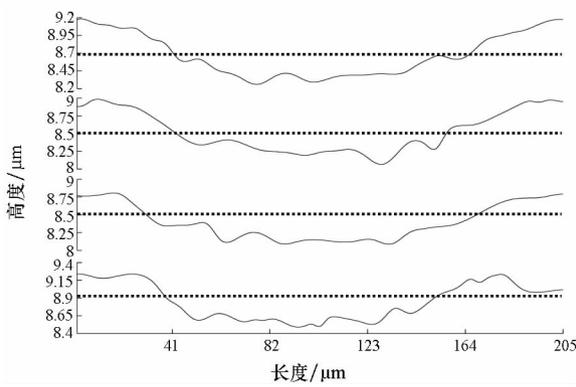


图 10 四条测试路径对应的截面磨损轮廓
Fig. 10 Wear outlines of four experiment paths

表 1 所示为 3034 半合成切削液和质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液润滑条件下的下试样磨损评价。可以看出，干摩擦状态下的磨损率为 127.692×10^{-4} ，摩擦磨损情况恶劣，极易造成刀具磨损甚至破损；3034 半合成切削液润滑状态下的磨损率为 4.191×10^{-4} ，较干摩擦状态有极大改善；最佳石墨烯悬浮切削液质量分数 0.5% 状态下的磨损率最小，为 2.773×10^{-4} ，较 3034 半合成切削液状态下有 33.82% 的改善，能够显著改善 3034 半合成水基切削液的润滑性能，减少硬质合金 - 钢材料之间的磨损。

表 1 磨损评价
Tab. 1 Wear evaluation

润滑条件	干摩擦	3034 半合成切削液	质量分数为 0.5% 石墨烯悬浮切削液
磨损面积/ μm^2	4596.825	150.897	99.863
磨损率 ($\times 10^{-4}$)	127.692	4.191	2.773
磨损率对比/%		相比干摩擦下降 96.71%	相比干摩擦下降 97.83%； 相比 3034 半合成切削液下降 33.82%

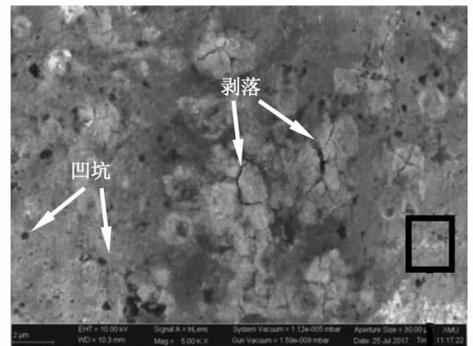
3.3 磨痕形貌分析

图 11、图 12 为在 3034 切削液和质量分数为

0.5% 的石墨烯悬浮切削液润滑条件下的下试样磨痕扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图。

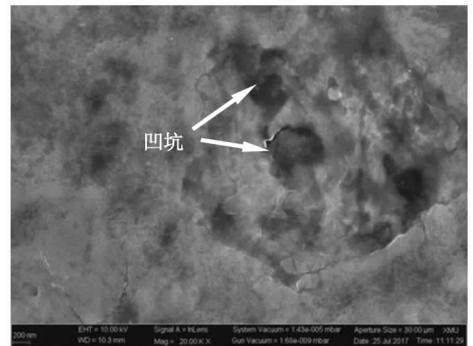
从图 11(a)、图 11(b)可以看出，润滑条件为 3034 半合成切削液时的磨痕表面出现了明显的犁沟磨损，并伴随着大面积的凹坑和剥落现象，属于黏着磨损和磨粒磨损，摩擦副之间的磨损情况较为严重。

而在润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液时(如图 12 所示)，磨痕表面相对平整，只有少量划伤和凹坑，没有出现大面积的结块剥落现象，表面形貌损伤较少，说明石墨烯作为切削液添加剂可以显著改善摩擦副之间的磨损情况。



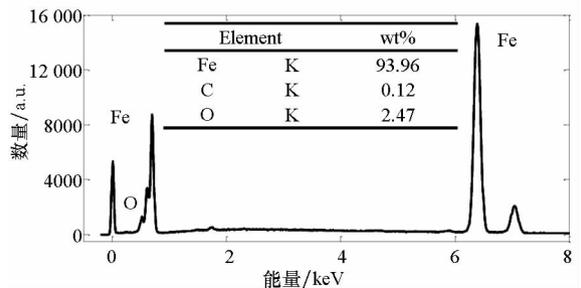
(a) 5000 倍 SEM 图

(a) SEM with 5000 × magnification



(b) 20 000 倍 SEM 图

(b) SEM with 20 000 × magnification

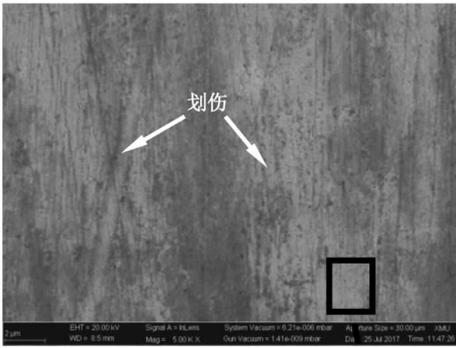


(c) EDS 能谱图

(c) Corresponding EDS analysis

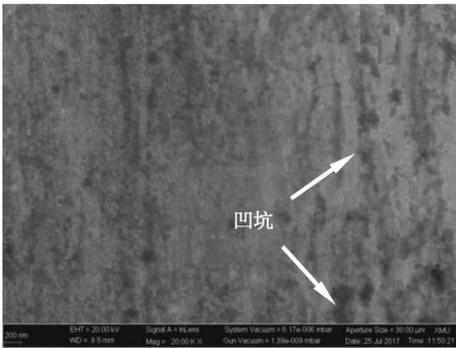
图 11 润滑条件为 3034 半合成切削液时下试样磨痕 SEM 图

Fig. 11 SEM images of 45# steel disk worn surface under semisynthetic cutting fluid 3034



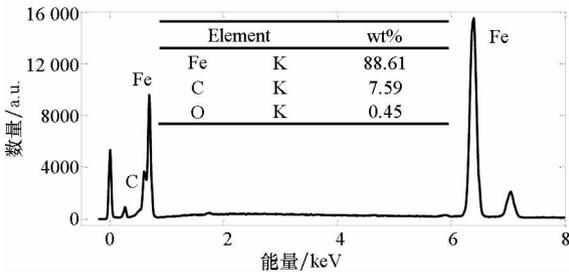
(a) 5000 倍 SEM 图

(a) SEM with 5000 × magnification



(b) 20 000 倍 SEM 图

(b) SEM with 20 000 × magnification



(c) EDS 能谱图

(c) Corresponding EDS analysis

图 12 润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液时下试样磨痕 SEM 图

Fig. 12 SEM images of 45# steel disk worn surface under 0.5% graphene colloidal

图 11 (c) 和图 12 (c) 为对图 11 (a) 和图 12(a) 中磨痕表面框选区域进行能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 分析的能谱图。可以看出,在润滑条件为 3034 半合成切削液下磨痕表面的氧元素质量分数为 2.47%,而在润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液下磨痕表面的氧元素质量分数仅为 0.45%,表明在 3034 半合成切削液润滑条件下磨痕表面发生了更为剧烈的氧化现象,而石墨烯悬浮切削液可以在一定程度上减缓氧化现象的发生。

通过 EDS 能谱图可以看出润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液下磨痕表面的碳元素的质量分数为 7.59%,高于润滑条件为 3034 半合成切削液下的碳元素的质量分数 0.12%。这表明了石墨烯可能附着于摩擦副的表面上。为了进一步证明此观点,采用 IDSpec ARCTIC 显微共焦拉曼光谱仪对磨痕表面进行成分分析。

对摩擦磨损试验后的下试样的磨痕表面做拉曼光谱测试,以分析其减摩机制。如图 13 所示,在 3034 半合成切削液作为润滑介质条件下,在 685 cm^{-1} 处出现 Fe_3O_4 的拉曼特征峰,同时通过 EDS 分析得出其氧元素的质量分数较高,进一步证明了样品表面存在一定的氧化现象。同时对比润滑条件为石墨烯悬浮切削液后的拉曼光谱图,发现在 671 cm^{-1} 附近也出现 Fe_3O_4 的拉曼特征峰,但强度较 3034 半合成切削液作为润滑介质条件下降许多,同时 EDS 分析中显示其氧元素的质量分数仅有 0.45%,表明添加石墨烯作为切削液添加剂可以抑制氧化现象发生。

如图 13 与图 14 所示,在质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液作为润滑条件下的下试样磨痕在 1350 cm^{-1} 与 1588 cm^{-1} 附近出现了标准的石墨烯 D 峰和 G 峰。D 峰代表碳原子晶格缺陷程度,G 峰代表碳原子 SP^2 杂化的面内伸缩振动。同时在 1620 cm^{-1} 出现 D'带,部分属于 G 带,则说明在磨痕表面已经存在石墨烯结构。因此可以推断在摩擦磨损试验过程中,石墨烯附着于摩擦副表面,形成石墨烯保护层,改善了接触面间的摩擦环境,从而起到减摩的作用。

同时通过对润滑条件为石墨烯悬浮切削液的拉曼光谱图进行去卷积处理和洛伦兹拟合,得到磨痕表面残留石墨烯的质量分数约为 68%。

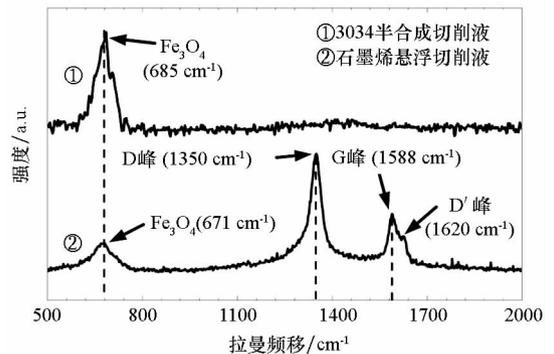


图 13 下试样磨痕拉曼光谱图

Fig. 13 Raman spectra of 45# steel disk worn surface

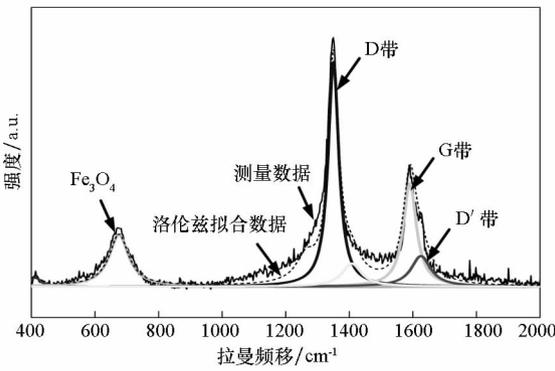


图 14 润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液下拉曼光谱洛伦兹拟合图

Fig. 14 Raman analysis with Lorenz fitting under 0.5% graphene colloidal suspensions

4 切削实验

为了验证石墨烯悬浮切削液在实际切削过程中对切削性能指标的改善,本节将介绍切削实验条件的设置,并探究不同润滑条件下切削力和工件表面质量的变化。

4.1 切削实验设置及条件

切削实验在 CA6236 普通车床(沈阳机床厂)上进行,采用图 15 所示的实验方案,切削过程中采用 Kistler 9272 测力仪对切削力进行采集,采样频率为 200 Hz。并在切削实验后采用 Mahr MarSurf PS1 便携式测量仪对加工后的工件表面粗糙度进行测量。

切削实验采用 YG8 硬质合金刀片对 45#钢工件进行切削加工,润滑条件设置为以下三种:①干切削;②使用 3034 半合成切削液;③使用质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液。切削实验的具体参数见表 2。

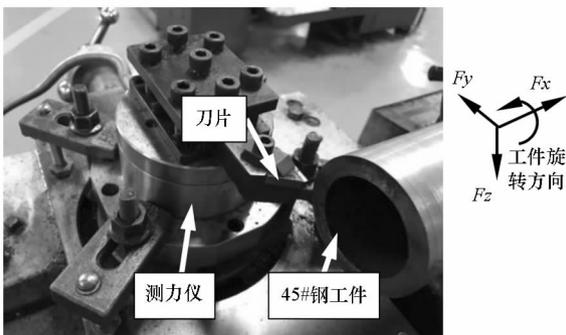


图 15 切削实验方案

Fig. 15 Cutting experimental scheme

4.2 切削力

图 16 所示为三种润滑条件下的切削力情况。

表 2 切削实验具体参数

Tab.2 Summary of machining conditions

工件	45#钢圆棒(直径:66 mm)
刀片	厂商:株洲钻石切削刀具股份有限公司 刀片型号:31303C YG8 可转位刀片 几何参数:前角 20°,后角 8°
切削速度	30 m/min
切削深度	0.1 mm
润滑条件	1# 干切削 2# 使用 3034 半合成切削液 3# 使用质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液

从图中可得,在相同切削参数下,润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液较润滑条件为干切削和 3034 半合成切削液相比:轴向力分别降低 33.68% 和 30.9%,径向力分别降低 29.01% 和 17.85%,主切削力分别降低 25.25% 和 18.55%,切削合力分别降低 26.63% 和 18.58%。

并且从图 16 中可以看出,质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液润滑条件下的切削力的标准差最小,3034 半合成切削液润滑条件下次之,干摩擦时最大,表明石墨烯悬浮切削液可以使切削加工过程更稳定,切削力波动减小。因为石墨烯悬浮切削液可以在切削区形成良好的润滑环境,降低摩擦系数,减少刀具前刀面与切屑、后刀面与工件之间的摩擦,使得切削力降低。

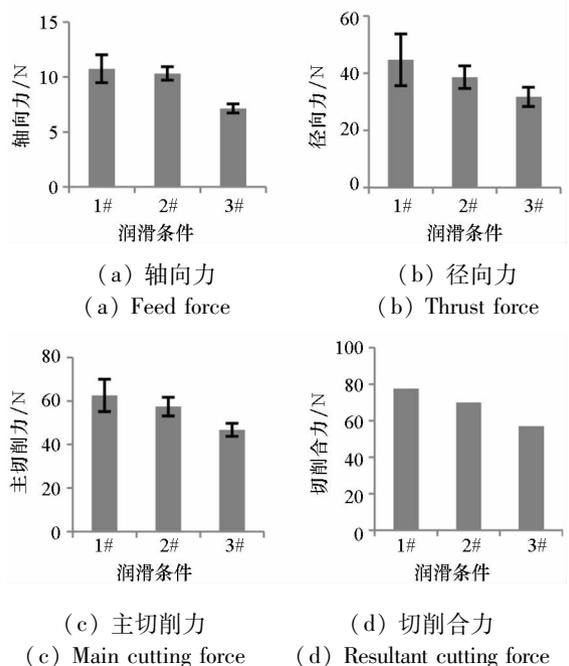


图 16 不同润滑条件下的切削力

Fig. 16 Cutting force under different cutting condition

4.3 工件表面粗糙度

切削实验后将加工后工件表面用酒精超声清洗 30 min,并用 Mahr MarSurf PS1 便携式测量仪对加工后工件进行表面粗糙度值测量,测量结果如图 17 所示。表明在相同切削参数下,润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液较润滑条件为干切削和 3034 半合成切削液相比表面粗糙度值分别下降 15.64% 和 7.5%。

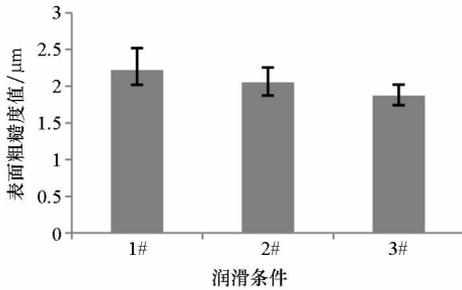


图 17 不同润滑条件下工件表面粗糙度值

Fig. 17 Surface roughness under different cutting condition

因此石墨烯作为 3034 半合成切削液的添加剂可以降低切削力和加工后工件的表面粗糙度值,提高加工质量。

5 结论

本文研究的石墨烯悬浮切削液相比于 3034 半合成切削液具有更加优异的摩擦特性,主要归功于石墨烯添加剂所产生的润滑性能改进。主要研究结论如下:

1) 将石墨烯作为 3034 半合成水基切削液添加剂能够改善其润滑性能,随着石墨烯质量分数变化,其摩擦系数出现了 12.9% ~ 57.3% 之间不同程度的减少,并且在 45#钢和 YG8 硬质合金材料作为摩擦副时悬浮切削液的石墨烯最佳质量分数为 0.5%。

2) 磨损率是定量衡量材料之间磨损行为的有效方法。对下试样(45#钢盘)磨痕轮廓进行提取,利用磨损率公式进行磨损评价。评价结果表明,质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液相比干摩擦和 3034 半合成切削液润滑环境下的磨损率有 97.83% 和 33.82% 的减少,能够显著改善摩擦学性能。

3) 通过 EDS 分析和拉曼光谱测试发现,使用石墨烯悬浮切削液作为润滑介质后,石墨烯吸附于摩擦副表面,形成石墨烯保护层,抑制氧化现象的发生,改善接触面间的摩擦环境,从而起到减摩

的作用。

4) 在不同润滑条件下,进行 YG8 硬质合金刀片对 45#钢工件的切削实验。实验结果表明,在相同切削参数下,润滑条件为质量分数为 0.5% 的石墨烯悬浮切削液较润滑条件为干切削和 3034 半合成切削液相比能够降低切削力,改善加工后工件表面质量。

参考文献 (References)

- [1] Fan Y H, Zheng M L, Li Z, et al. Cutting performance of cemented carbide tool in high-efficiency turning Ti6Al4V [J]. Key Engineering Materials, 2012, 522: 231-235.
 - [2] Mgwatu M I. Integrated approach for optimizing machining parameters, tool wear and surface quality in multi-pass turning operations [J]. Advances in Production Engineering & Management, 2013, 8(4): 209-218.
 - [3] Paul P S, Varadarajan A S, Mohanasundaram S. Effect of magnetorheological fluid on tool wear during hard turning with minimal fluid application [J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2014, 15(1): 124-132.
 - [4] Lian Y S, Deng J X, Yan G Y, et al. Preparation of tungsten disulfide (WS₂) soft-coated nano-textured self-lubricating tool and its cutting performance [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9/10/11/12): 2033-2042.
 - [5] Zhu H P. The application of low-temperature cold air-minimal quantity lubrication technology to cold heading die [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(8): 44-47.
 - [6] Liu J Y, Han R D, Sun Y F. Research on experiments and action mechanism with water vapor as coolant and lubricant in Green cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(6): 687-694.
 - [7] Smith P J, Chu B, Singh E, et al. Graphene oxide colloidal suspensions mitigate carbon diffusion during diamond turning of steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 17: 41-47.
 - [8] Xiong H, Jiang G, Chen G. Development of environmentally friendly high performance semi-synthetic cutting fluid [J]. Lubrication Engineering, 2016.
 - [9] Chen Q, Wang X, Wang Z, et al. Preparation of water-soluble nanographite and its application in water-based cutting fluid [J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 1-8.
 - [10] Chu B, Singh E, Johnson S. Graphene oxide colloidal suspensions as cutting fluids for micromachining—part 1: fabrication and performance evaluation [J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2015, 3(4): 041002.
 - [11] 赵磊,蔡振兵,张祖川,等. 石墨烯作为润滑油添加剂在青铜织构表面的摩擦磨损行为 [J]. 材料研究学报, 2016(1): 57-62.
- ZHAO Lei, CAI Zhenbing, ZHANG Zuchuan, et al. Tribological properties of graphene as effective lubricant additive in oil on textured bronze surface [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2016(1): 57-62. (in Chinese)

- [12] 乔玉林, 赵海朝, 臧艳, 等. 多层石墨烯水分散体系的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 523 - 530.
QIAO Yulin, ZHAO Haichao, ZANG Yan, et al. Friction and wear properties of water-dispersing system of multilayer graphene[J]. Tribology, 2014, 34(5): 523 - 530. (in Chinese)
- [13] 张伟, 朱宏伟. 石墨烯改性润滑油[J]. 自然杂志, 2016, 38(2): 94 - 96.
ZHANG Wei, ZHU Hongwei. Graphene enhanced lubricant oil[J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(2): 94 - 96. (in Chinese)
- [14] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93 - 112.
PU Jibin, WANG Liping, XUE Qunji. Progress of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials[J]. Tribology, 2014, 34(1): 93 - 112. (in Chinese)