

纳米 MoS_2 含量对纳米微量润滑磨削 CFRPs 的影响

赵绪峰¹, 于天彪¹, 李长河², 王宛山¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 为了研究磨削碳纤维复合材料(CFRPs)时,纳米二硫化钼(MoS_2)含量对纳米微量润滑效果的影响,制备了不同质量分数(0%, 3%, 6%, 9%, 12%)的纳米 MoS_2 和棕榈油混合液,作为纳米微量润滑油液,对碳纤维复合材料进行磨削加工.使用光学显微镜,观测分析碳纤维复合材料的表面粗糙度、表面形貌.使用测力仪对磨削力进行测量,并通过磨削力计算出磨削力比.最后对纳米(MoS_2)在纳米微量润滑磨削过程中的作用机理进行了阐述.结果表明,当纳米(MoS_2)质量分数为9%时磨削力比最低,为0.063 2,表面粗糙度 R_a 值最小,为1.86 μm ,且表面碳纤维损伤最小.

关 键 词: 碳纤维复合材料;纳米二硫化钼;纳米微量润滑磨削;磨削力;表面粗糙度;表面形貌

中图分类号: TG 580.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)08-1127-05

Effect of Nano MoS_2 Concentrations on Nano Minimum Quantity Lubrication in CFRPs Grinding

ZHAO Xu-feng¹, YU Tian-biao¹, LI Chang-he², WANG Wan-shan¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China.

Corresponding author: YU Tian-biao, E-mail: tbyu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To investigate the effect of nano MoS_2 concentration on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding carbon fiber reinforced plastics (CFRPs), the grinding experiments of CFRPs were carried out with lubricating oils of various concentrations (0%, 3%, 6%, 9%, and 12%) of nano MoS_2 in palm oil. The surface roughness and morphology of the CFRPs were studied by optical microscopy. The grinding forces were measured by dynamometer, and the grinding force ratio was calculated and analyzed. Also, the CFRPs grinding mechanism with MQL of various nano MoS_2 concentrations was explained. The results show that when the mass fraction of nano MoS_2 reaches 9%, the grinding force ratio reaches the lowest value of 0.063 2, and the quality of surface roughness with R_a of 1.86 μm and surface morphology of CFRPs are both better than those with other concentrations.

Key words: CFRPs; nano MoS_2 ; MQL grinding; grinding force; surface roughness; surface morphology

碳纤维复合材料的出现是为了弥补单一传统材料在加工后物理、化学和力学性能的不足^[1];目前,因其具有高比模量、高比强度、高阻尼,以及优良的几何稳定性和抗损伤能力,被广泛应用于

航空航天、交通运输、军工生产等领域^[2-3].但是碳纤维复合材料因为其各向异性,并且在加工时更易出现热损伤^[2-3],一直以来被业界认为是一种难加工材料.日益增长的碳纤维复合材料的应

收稿日期: 2018-07-22

基金项目: 辽宁省重点实验室项目(LZ2015038);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170307009).

作者简介: 赵绪峰(1989-),男,山东诸城人,东北大学博士研究生;于天彪(1968-),男,吉林榆树人,东北大学教授,博士生导师;李长河(1966-),男,内蒙古通辽人,青岛理工大学教授,博士生导师;王宛山(1946-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

用需求和其加工的局限性引发了学术界和工业界对碳纤维复合材料精密加工的探索.

磨削是加工碳纤维复合材料的有效方式^[4]. 高航等设计了一种磨料群可控排布杯型砂轮,以克服砂轮磨削碳纤维复合材料时出现的材料分层和砂轮堵塞现象^[5]. Sasahara 等使用内部冷却端面砂轮对碳纤维复合材料进行磨削加工,与铣削加工相比,表面粗糙度的数值下降了 50%,并且碳纤维复合材料没有出现分层现象^[6]. Wang 等使用旋转超声振动端面磨削对碳纤维复合材料进行加工,结果发现低频超声振动功率或者更高的工具旋转速度使工件表面粗糙度值更低^[7];但是在磨削加工过程中依然存在碳纤维复合材料烧伤的现象^[8].

本文在碳纤维复合材料的磨削加工中使用一种新型的添加纳米 MoS₂ 的纳米流体微量润滑液,对磨削加工后碳纤维复合材料的表面粗糙度、表面形貌,以及磨削过程中的磨削力和磨削力比进行分析,并对纳米 MoS₂ 在纳米流体微量润滑中的作用进行探讨.

1 实验材料和实验方法

本次实验所选用的碳纤维复合材料的尺寸为 5 mm × 60 mm × 30 mm. 平均尺寸为 50 nm 的 MoS₂ 以不同的质量分数(0,3%,6%,9%,12%)添加到棕榈油中作为纳米流体微量润滑油液.

选用 K-P36 精密数控平面磨床,使用陶瓷结合剂碳化硅砂轮,粒度为 80 目(180 μm). 砂轮的尺寸为 20 mm × φ76.2 mm × φ300 mm. 纳米微量润滑磨削系统加工参数如表 1 所示. 磨削方向与碳纤维的朝向呈 0°角.

加工时使用 YDM-III99 3D 测力仪对法向和切向的磨削力进行数据采集. 使用奥林巴斯光学显微镜 DXS510 观测表面形貌和表面粗糙度.

表 1 纳米微量润滑磨削系统实验参数	
Table 1 Experimental parameters for nano MQL grinding system	
磨削参数	值
砂轮速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	30
进给速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	3 000
切削深度 $a_p/\mu m$	15
纳米微量润滑流速 $/(mL \cdot h^{-1})$	50
纳米微量润滑气压/MPa	0.6
纳米微量润滑喷嘴与砂轮距离/mm	12
纳米微量润滑喷嘴角度/ $(^{\circ})$	15

2 结果与讨论

2.1 磨削力结果分析

图 1 是含不同纳米 MoS₂ 质量分数的纳米微量润滑油液在 20 个磨削过程中计算得出的法向磨削力和切向磨削力的平均值. 从图中可以看出,法向磨削力的变化趋势是先降后升再降. 平均法向磨削力的标准误差范围为 15.62 ~ 24.45 N. 当纳米 MoS₂ 质量分数为 3% 时,法向磨削力最小,为 191.04 N;当 MoS₂ 质量分数为 9% 时,法向磨削力最大,为 287.23 N. 另一方面,切向磨削力变化趋势为先降后升. 平均切向磨削力的标准误差范围为 2.12 ~ 4.68 N. 当 MoS₂ 质量分数为 0 时,切向磨削力最大,为 21.72 N;当 MoS₂ 质量分数为 3% 时,切向磨削力最小,为 17.21 N.

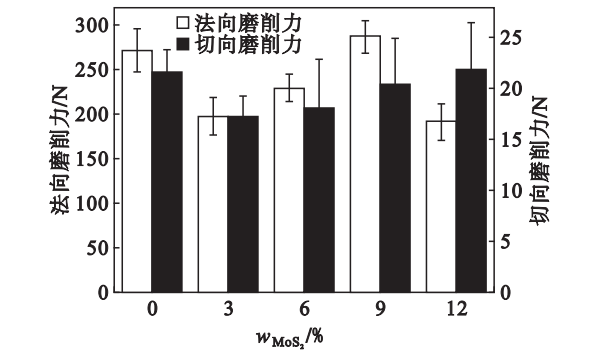


图 1 纳米 MoS₂ 质量分数与磨削力关系
Fig. 1 Relationship between mass fraction of nano MoS₂ and grinding force

图 2 是含不同纳米 MoS₂ 质量分数的纳米微量润滑磨削过程中的磨削力比. 磨削力比的计算公式^[9]为

$$G = \frac{F_t}{F_n} \tag{1}$$

式中, F_t 和 F_n 分别是平均切向磨削力和平均法向磨削力.

随着纳米 MoS₂ 在微量润滑油液中的质量分数的升高,磨削力比的变化趋势与平均法向磨削力的变化趋势相反. 标准误差的变化范围为 0.010 4 ~ 0.033 6. 当质量分数为 9% 时磨削力比最低,为 0.063;当质量分数为 12% 时磨削力比最高,为 0.107.

2.2 表面粗糙度分析

图 3 是含不同纳米 MoS₂ 质量分数的纳米微量润滑油液时碳纤维磨削表面的粗糙度 R_a . 随着纳米 MoS₂ 质量分数的变化, R_a 的变化趋势与磨

削力比的变化趋势相同, R_a 的标准误差范围在 0.47 ~ 0.73. 当纳米 MoS_2 质量分数为 3% 时表面粗糙度最差, 为 3.23 μm ; 当纳米 MoS_2 质量分数为 9% 时表面粗糙度最佳, 为 1.86 μm . 这种情况也出现在文献[9]中, Zhang 等^[9]指出当磨削力比最小时, 表面粗糙度达到最低值.

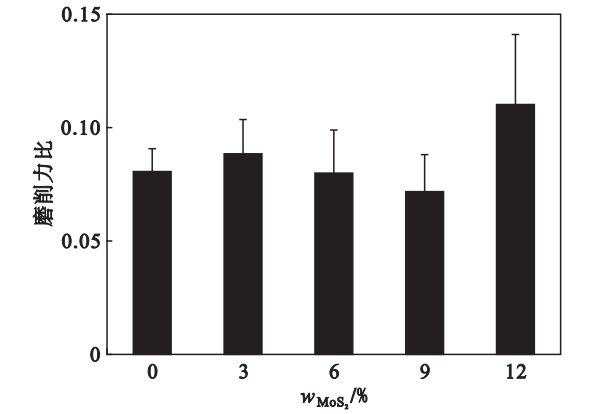


图 2 纳米 MoS_2 质量分数与磨削力比关系
Fig. 2 Relationship between mass fraction of nano MoS_2 and grinding force ratio

2.3 表面形貌分析

本次实验的磨削方向与碳纤维朝向平行. 从图 4 中可以看出, 工件表面并没有烧伤、毛刺、分层、纤维拔出现象. 从图4a中可以看出被剪断的

碳纤维随机分布在工件表面, 并有少量粉碎的碳纤维残留在工件表面; 从图 4b 中可以看出碳纤维出现了严重的剪断现象并伴有大量粉碎碳纤维残留在工件表面; 从图 4c 中可以看出碳纤维的剪断现象比图 4b 少, 粉碎碳纤维残留现象有所减轻; 从图 4d 中可以看出碳纤维剪断现象比图 4c 更少且程度减轻, 工件有大量保存完整的碳纤维; 与图 4d 相比, 从图 4e 中可以看出, 碳纤维的剪断现象明显加重.

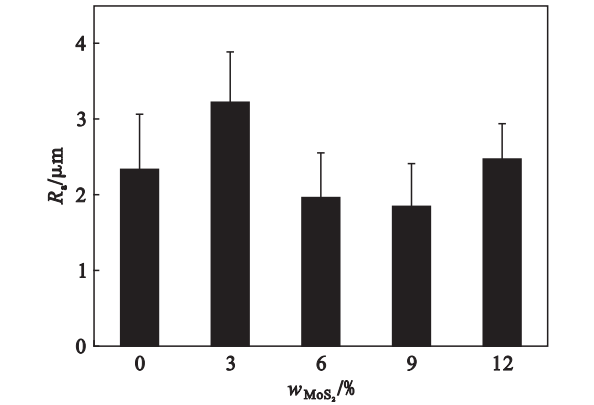


图 3 纳米 MoS_2 质量分数与碳纤维复合材料表面粗糙度 R_a 关系
Fig. 3 Relationship between mass fraction of nano MoS_2 and surface roughness R_a

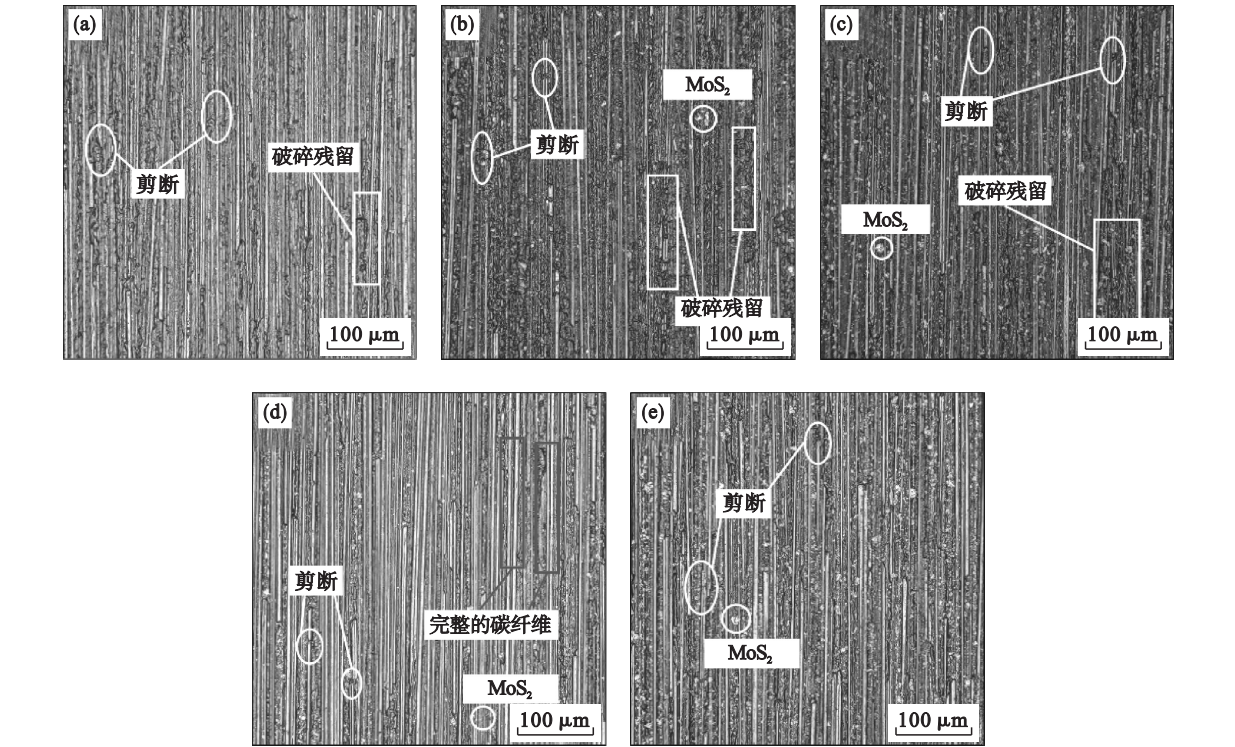


图 4 含不同质量分数纳米 MoS_2 的纳米微量润滑磨削过程中碳纤维复合材料的表面形貌
Fig. 4 Surface morphologies of CFRPs ground with lubricating oil containing different mass fractions of nano MoS_2
(a)—0; (b)—3%; (c)—6%; (d)—9%; (e)—12% .

2.4 纳米 MoS_2 在纳米微量润滑中的作用

在磨削过程中,每一次材料去除行为可以看成是单颗磨粒单方向切割工件的行为,如图 5 所示.当纳米 MoS_2 质量分数达到 3% 时,润滑油膜的形成被抑制,少量纳米 MoS_2 在切削刃的前端积聚,这种现象在文献[1]中有过描述,如图 5b

所示.在这种情况下,与纳米 MoS_2 质量分数为 0 时的磨削相比,碳纤维复合材料的表面形貌较差,磨削力比升高,表面粗糙度较差;此外,磨粒与碳纤维复合材料的接触状态从滑动摩擦转变为滚动摩擦,法向和切向磨削力相应减小,如图 2、图 5a 和图 5b 所示.

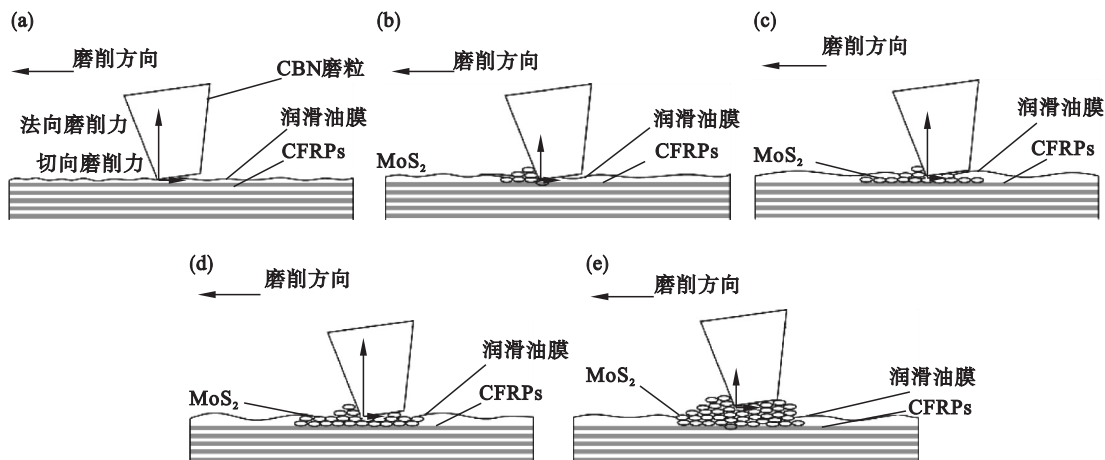


图 5 含不同质量分数纳米 MoS_2 的纳米微量润滑磨削过程中磨粒与碳纤维复合材料的接触区

Fig. 5 Contact areas of CFRPs ground with lubricating oil containing different mass fractions of nano MoS_2

(a)—0; (b)—3%; (c)—6%; (d)—9%; (e)—12%.

当纳米 MoS_2 的质量分数达到 6% 时,少部分纳米 MoS_2 在磨削过程中从磨粒的前端被推挤到磨粒与碳纤维复合材料的接触区内,促进了接触区内润滑油膜的产生^[10],如图 5c 所示.

当纳米 MoS_2 的质量分数达到 9% 时,磨削力比最低,表面形貌达到最佳,表面粗糙度值最低.这是因为有更多的纳米 MoS_2 从磨粒前端被推挤到磨粒与工件的接触区,与微量润滑油相配合形成了一个完整的润滑油膜,提升了磨粒与工件的磨削和摩擦润滑性能,如图 5d 所示.

当纳米 MoS_2 的质量分数达到 12% 时,过多的纳米 MoS_2 进入到磨粒和工件的接触区,破坏了润滑油膜;与纳米 MoS_2 质量分数为 9% 时相比,磨削力比大幅提升,工件的表面粗糙度值增加,表面形貌质量变差,如图 5e 所示.

基于以上分析可以推断,在纳米微量润滑油液中添加一定质量分数的纳米 MoS_2 颗粒可以提升碳纤维复合材料的磨削性能,但是添加过多的纳米 MoS_2 颗粒,会降低碳纤维复合材料的磨削质量.

3 结 论

1) 当纳米 MoS_2 质量分数为 9% 时,磨削力比最小,为 0.063.

2) 当纳米 MoS_2 质量分数为 9% 时,碳纤维复合材料的磨削表面粗糙度值最低, R_a 为 $1.86 \mu\text{m}$.

3) 当纳米 MoS_2 的质量分数为 9% 时,碳纤维复合材料磨削表面的纤维剪断现象最少,碳纤维完整性最高.

4) 含纳米 MoS_2 的微量润滑磨削机制表明,当纳米 MoS_2 质量分数达到 9% 时具有最佳的润滑油膜和摩擦特性.

参考文献:

- [1] Che D M, Saxena I, Han P D, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(3): 034001–034022.
- [2] Dandekar C R, Shin Y C. Modeling of machining of composite materials: a review [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 57: 102–121.
- [3] Kumar D, Singh K K. An approach towards damage free machining of CFRP and GFRP composite material: a review [J]. *Advanced Composite Materials*, 2015, 24(sup1): 49–63.
- [4] Uhlmann E, Sammler F, Richarz S, et al. Machining of carbon fibre reinforced plastics [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 24: 19–24.
- [5] 高航, 袁和平. 碳纤维复合材料构件干磨削砂轮研制及其加工性能研究 [J]. *兵工学报*, 2011, 32(2): 186–191. (Gao Hang, Yuan He-ping. Development of a wheel for dry grinding of CFRP parts and investigation on its machining performance [J]. *Defence Technology*, 2011, 32(2): 186–191.)

(下转第 1138 页)