

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.03.015

基于石墨烯强化 MQL 的 GH4169 合金铣削表面质量研究

李明^{1,2}, 于天彪^{1,2}, 张荣闯³, 王宛山^{1,2}

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 辽宁省大型装备智能设计与制造技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了改善 GH4169 合金铣削加工的表面质量, 基于微量润滑(MQL)技术, 将石墨烯纳米粒子添加到植物油基切削液中以强化其冷却润滑性能. 结合正交试验方案, 采用极差分析和方差分析方法, 研究了 MQL 参数(石墨烯质量分数、切削液流量、气体压强)对表面粗糙度的影响规律, 并得到了最优的参数组合. 研究表明, 石墨烯质量分数对 GH4169 合金铣削加工表面粗糙度的影响是最显著的, 其次是气体压强, 最后是切削液流量; 同时, 最优的表面粗糙度为 0.406 μm, 最优参数组合为石墨烯质量分数 0.1%, 切削液流量 60 mL/h, 气体压强 0.6 MPa; 适当的 MQL 参数可以显著地改善切削区的冷却润滑状态, 从而改善表面质量, 降低表面粗糙度.

关键词: 石墨烯纳米粒子; MQL; GH4169 合金; 铣削加工; 表面质量; 参数优化
中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)03-0387-06

Study on the Milling Surface Quality of GH4169 Alloy Based on Graphene-Enhanced MQL Method

LI Ming^{1,2}, YU Tian-biao^{1,2}, ZHANG Rong-chuang³, WANG Wan-shan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Intelligent Design and Manufacturing Technology for Large Equipment, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: LI Ming, E-mail: limingeducn@163.com)

Abstract: In order to improve the surface quality of GH4169 alloy during the milling process, the graphene nanoparticle was added to the vegetable-oil-based cutting fluid to enhance the cooling and lubrication performances based on MQL(minimum quantity lubrication). The effects of the graphene nanoparticle concentration, cutting fluid flow rate and gas pressure on the surface roughness were studied by the range analysis and variance analysis based on the orthogonal experimental scheme. Besides, the optimal parameter combination was obtained. The results showed that the effect of the graphene nanoparticle concentration on the surface roughness is the most significant, followed by the cutting fluid flow rate, and finally the gas pressure. Meanwhile, the optimal surface roughness is 0.406 μm, and the optimal parameter combination is graphene nanoparticle concentration 0.1%, cutting fluid flow rate 60 mL/h, and gas pressure 0.6 MPa. It could be concluded that appropriate MQL parameters can significantly improve the cooling and lubrication state in the cutting zone during the MQL milling of GH4169 alloy, thereby improving the surface quality and reducing the surface roughness.

Key words: graphene nanoparticle; MQL(minimum quantity lubrication); GH4169 alloy; milling machining; surface quality; parameter optimization

收稿日期: 2019-06-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0701200); 国家自然科学基金-辽宁省联合基金重点资助项目(U1508206); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N182303034, N170307009); 沈阳市科技创新平台项目(18006001).
作者简介: 李明(1988-), 男, 河北衡水人, 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; 王宛山(1946-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

GH4169 镍基高温合金具有良好的抗疲劳、抗蠕变、抗氧化以及耐腐蚀性能,广泛应用于航空航天、船舶制造、核能以及石油化工等领域^[1]. 然而,此高温合金具有高强度、高硬度以及差的导热能力,是一种非常典型的难切削材料. 在铣削加工过程中,很容易引起较大的切削力和较高的切削温度,恶化铣削加工表面质量,增加表面粗糙度.

微量润滑(MQL)作为一种绿色高效的冷却润滑技术,广泛用于改善难加工材料的加工性能. 该技术不仅可以减少切削液的使用量,还可以提高切削液穿透切削区的能力^[2]. 同时,植物油基切削液具有良好的生物降解性、低环境影响和无毒性,因此,具有非常广泛的应用前景^[3].

许多学者对植物油基切削液在加工领域的应用进行了深入的研究. Wang 等^[4]和 Li 等^[5]将 7 种植物油基切削液(玉米油、花生油、菜籽油、大豆油、蓖麻油、棕榈油、葵花油)应用到 GH4169 镍基高温合金 MQL 磨削加工中,并与石蜡油和浇注式冷却润滑条件进行对比,结果发现植物油基切削液在改善切削区润滑状态方面展现出优异的性能. Agrawal 等^[6]将芦荟油基切削液应用到 M2 钢的 MQL 车削加工中,与传统切削液相比,表面粗糙度降低了 6.7%.

此外,基于纳米粒子强化传热原理,许多学者为了提高切削液的冷却和润滑性能,将纳米粒子添加到切削液中. Najiha 等^[7]将 TiO₂ 纳米流体应用到铝合金的 MQL 铣削加工中. 经研究,体积分数 2.5% 的 TiO₂ 纳米流体展现出最优异的铣削特性. Wang 等^[8]将 Al₂O₃ 纳米粒子分散到棕榈油基切削液中制备成不同浓度的纳米流体,应用到 GH4169 镍基高温合金的 MQL 磨削加工中. 经对比,Al₂O₃ 纳米粒子可以显著改善磨削区的摩擦状态,同时,体积分数 2.0% 的 Al₂O₃ 纳米流体的性能最佳. 还有一些学者^[9-10]将 MoS₂ 和 CNT 等纳米粒子应用到难加工材料的加工过程中.

石墨烯作为一种稳定存在的二维材料,具有非常优异的冷却和润滑性能,具有很广泛的应用前景^[11-12]. 但是,有关石墨烯在切削液中应用的研究还很少. 因此,基于石墨烯强化 MQL 的 GH4169 合金铣削表面质量的研究是十分必要的.

本研究以 MQL 参数(石墨烯纳米粒子质量分数 w 、切削液流量 Q 、压缩气体压强 p)为控制因素,采用三因素四水平 $L_{16}(4^3)$ 正交试验方案来评估 MQL 参数对铣削加工表面质量的影响. 同

时,采用极差分析和方差分析方法,研究石墨烯纳米粒子浓度、切削液流量和气体压强对表面粗糙度的影响规律,并经过参数优化获得最优参数组合. 最后,基于验证实验,对获得的最优参数组合进行实验验证.

1 实验设计

1.1 实验材料

本研究选用少层石墨烯纳米粒子去强化植物油基切削液的冷却和润滑性能,从而改善铣削加工的表面质量. 石墨烯是一种稳定存在的二维材料,具有非常优异的冷却和润滑性能,其性能参数如表 1 所示,其结构如图 1 所示. 本研究选用植物油基切削液 Accu-Lube LB2000 为基础切削液. 本研究采用两步法,利用超声分散方式将石墨烯纳米粒子分散到基础切削液中.

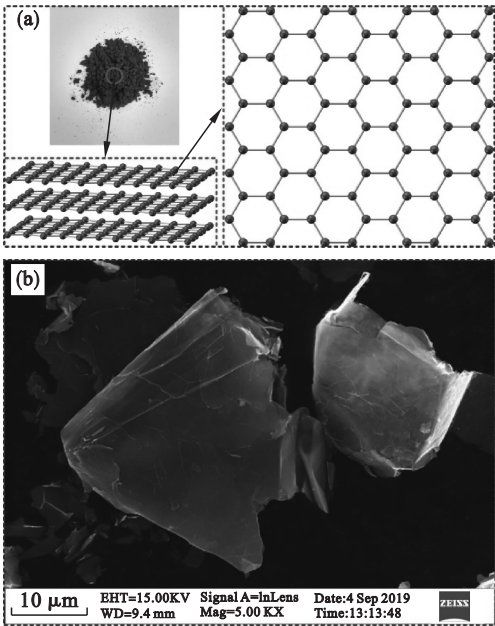


图 1 少层石墨烯的结构及 SEM 微观表征
Fig. 1 Structure and SEM microscopic characterization of the few-layer graphene
(a)—结构示意图; (b)—SEM 微观表征.

| 表 1 石墨烯性能参数 Table 1 Property parameters of the graphene | |
|--|-----------|
| 参数 | 值 |
| 层数 | 1 ~ 5 |
| 层均直径/ μm | 10 |
| 层厚度/ nm | < 5 |
| 比面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ | 360 ~ 450 |

本研究实验工件的材料是 GH4169 高温镍基合金,其化学成分(质量分数)主要包含: Ni

(52.30%) , Cr(18.90%) , Nb (5.30%) , Mo(3.08%) , Ti(1.06%) , Al(0.52%) , 以及 C, Mn, Si, Co, B, Cu, Fe 等微量的元素. GH4169 合金具有良好的抗疲劳、抗蠕变、抗氧化以及耐腐蚀性能, 广泛应用于航空航天、船舶制造、核能以及石油化工等领域, 其性能参数如表 2 所示.

| 表 2 GH4169 合金的性能参数 Table 2 Property parameters of the GH4169 alloy | |
|---|--------|
| 参数 | 值 |
| 抗拉强度/MPa | 1 390 |
| 屈服强度/MPa | 1 100 |
| 延伸率/% | 14. 6 |
| 泊松比 | 0. 3 |
| 弹性模量/GPa | 199. 9 |
| 硬度/HV | 431 |

1.2 实验设备

本研究的一系列实验是在沈阳机床集团生产的 TH5650 立式数控加工中心上进行的. 如图 2a 所示, 此机床的加工范围为 X850 mm × Y500 mm × Z630 mm; 最大的主轴输出功率为 35 kW; 最高主轴转速为 6 000 r/min; 数控系统为 FANUC Oi – MB. 本研究利用瑞士奇石乐仪器公司生产的 Kistler 9257B 测力仪测量铣削过程的铣削力, 系统采样频率设置为 7 kHz. 此外, 利用热电偶测温系统测量铣削加工表面的铣削温度, 系统采样频率设置为 20 kHz. 本研究运用 Accu – Lube MQL 系统去改善铣削加工表面质量. 如图 2b 所示, 此系统主要是由空压机、油箱、脉冲泵、脉冲发生器以及直流电源等组成. 本研究利用日本奥林巴斯株式会社生产的 LEXT OLS4100 激光共聚焦显微镜来测量铣削加工表面的粗糙度, 主要选用轮廓算术平均偏差 R_a 来表征表面粗糙度, 如图 2c 所示. 本研究采用的铣削刀具为株洲钻石集团生产的硬质合金刀片, 如图 2d 所示. 刀片型号为 APKT11T304, 涂层为 TiAlN, 基体材料为超细硬质合金. 刀杆为两刃型, 直径为 16 mm, 其型号为 EMP01 – 016 – XP16 – AP11 – 02.

1.3 正交试验方案

本研究选择 MQL 参数(石墨烯纳米粒子质量分数 w 、切削液流量 Q 、压缩气体压强 p)为控制因素, 每个因素有 4 个水平, 正交试验的控制因素和水平如表 3 所示. 在试验中, 铣削加工参数保持固定值不变, 主要的铣削加工参数如表 4 所示. 本研究采用三因素四水平 $L_{16}(4^3)$ 正交试验方案来评估石墨烯纳米粒子对表面质量的影响, 具体

试验方案如表 5 所示. 为了减少误差影响, 每次试验重复进行 5 次.

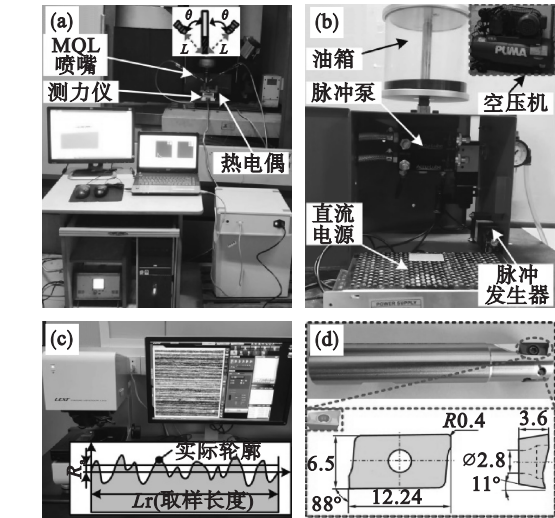


图 2 实验设备
Fig. 2 Experimental equipment
(a)—TH5650 立式数控加工中心; (b)—MQL 系统;
(c)—OLS4100 激光共聚焦显微镜;
(d)—铣削刀杆和刀片.

| 表 3 正交试验的控制因素和水平 | | | | |
|---|------|-----|------|-----|
| Table 3 Control factors and levels of the orthogonal experiment | | | | |
| 控制因素 | 水平 | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $w/\%$ | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| $Q/(\text{mL}\cdot\text{h}^{-1})$ | 30 | 60 | 90 | 120 |
| p/MPa | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |

| 表 4 主要的铣削加工参数 Table 4 Main milling parameters | |
|--|-------|
| 参数 | 值 |
| 铣削方式 | 顺铣 |
| 主轴转速 $N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 1 991 |
| 进给速度 $f_z(\text{mm}/z)$ | 0. 05 |
| 径向切深 a_e/mm | 0. 4 |
| 轴向切深 a_p/mm | 0. 6 |
| MQL 喷嘴角度 $\theta/(\text{°})$ | 45 |
| MQL 喷嘴距离 L/mm | 30 |

2 实验结果与讨论

正交试验结果如表 5 和图 3 所示. 通过极差分析和方差分析获得了各参数对表面粗糙度的影响规律, 如表 6 和表 7 所示. 在表 7 中, DF 为自由度, Seq. SS 为偏差平方和, Adj. MS 为均方差,

F 值和 P 值结合 F 分布表和 P 分布表进行使用. 同时,通过参数优化获得了最优的参数组合,如图 4 所示. 此外,进行了验证实验,证明了所获得的最优参数组合是合理可信的,如图 5 所示.

| 表 5 试验方案与结果 Table 5 Experiment arrangements and results | | | | |
|--|----------|--------------------------------------|------------|------------------------|
| 试验编号 | MQL 参数 | | | R_a μm |
| | w % | Q $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$ | p MPa | |
| 1 | 0.05 | 30 | 0.4 | 0.619 |
| 2 | 0.05 | 60 | 0.5 | 0.527 |
| 3 | 0.05 | 90 | 0.6 | 0.531 |
| 4 | 0.05 | 120 | 0.7 | 0.613 |
| 5 | 0.10 | 30 | 0.5 | 0.461 |
| 6 | 0.10 | 60 | 0.4 | 0.485 |
| 7 | 0.10 | 90 | 0.7 | 0.457 |
| 8 | 0.10 | 120 | 0.6 | 0.476 |
| 9 | 0.15 | 30 | 0.6 | 0.469 |
| 10 | 0.15 | 60 | 0.7 | 0.465 |
| 11 | 0.15 | 90 | 0.4 | 0.525 |
| 12 | 0.15 | 120 | 0.5 | 0.517 |
| 13 | 0.20 | 30 | 0.7 | 0.498 |
| 14 | 0.20 | 60 | 0.6 | 0.462 |
| 15 | 0.20 | 90 | 0.5 | 0.536 |
| 16 | 0.20 | 120 | 0.4 | 0.627 |

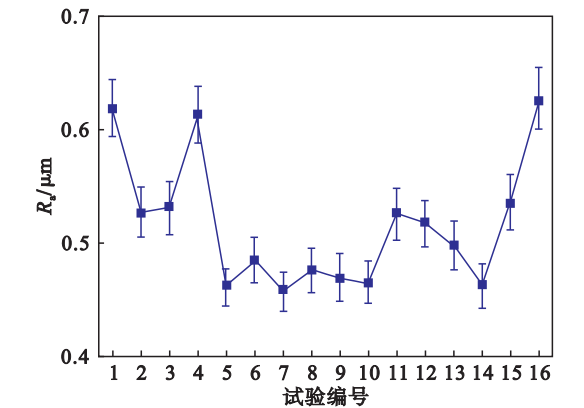


图 3 试验结果
Fig. 3 Experiment results

| 表 6 极差分析表 Table 6 Range analysis table | | | |
|---|--------|-------|-------|
| 水平 | MQL 参数 | | |
| | w | Q | p |
| 1 | 0.573 | 0.512 | 0.564 |
| 2 | 0.470 | 0.485 | 0.510 |
| 3 | 0.494 | 0.512 | 0.485 |
| 4 | 0.531 | 0.558 | 0.508 |
| 极差 | 0.103 | 0.073 | 0.080 |
| 排序 | 1 | 3 | 2 |

| 表 7 方差分析表 Table 7 Variance analysis table | | | | | | |
|--|----|---------|---------|-------|-------|--------|
| 参数 | DF | Seq. SS | Adj. MS | F 值 | P 值 | 贡献率 |
| w | 3 | 0.024 1 | 0.008 0 | 33.55 | 0.000 | 47.98% |
| Q | 3 | 0.011 2 | 0.003 7 | 15.53 | 0.003 | 22.21% |
| p | 3 | 0.013 5 | 0.004 5 | 18.84 | 0.002 | 26.95% |
| 误差 | 6 | 0.001 4 | 0.000 2 | | | |
| 总和 | 15 | 0.050 3 | | | | |

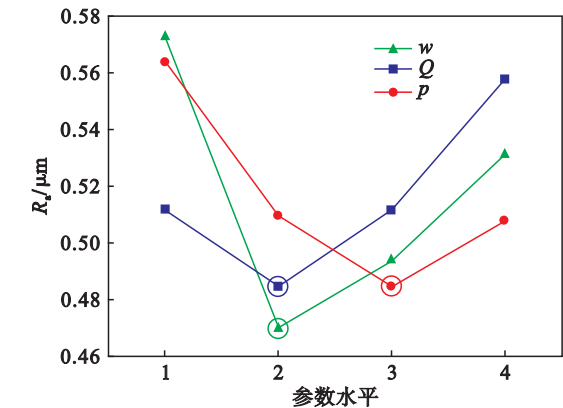


图 4 MQL 参数的影响图
Fig. 4 Effect diagram of the MQL parameters

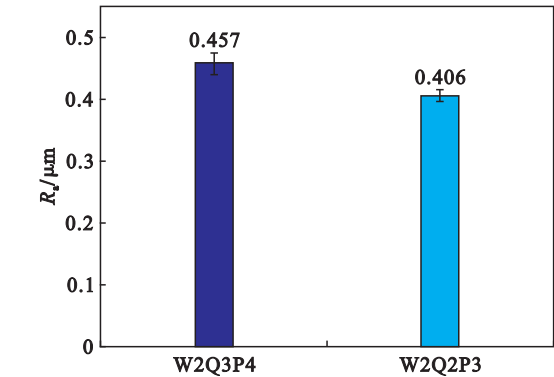


图 5 验证实验的结果
Fig. 5 Results of the verification experiment

2.1 MQL 参数对表面粗糙度的影响

通过正交试验获得了 MQL 参数(石墨烯纳米粒子质量分数 w 、切削液流量 Q 、压缩气体压强 p)对表面粗糙度的影响规律,如图 4 所示,并对其相应影响机理进行了分析讨论.

2.1.1 石墨烯质量分数对表面粗糙度的影响

如图 4 所示,当石墨烯纳米粒子质量分数从 0.05% 增加到 0.2% 时,表面粗糙度先变小后变大. 当石墨烯纳米粒子质量分数为 0.1% 时,表面粗糙度的值最小,这主要是因为适量的石墨烯纳米粒子可以很好地强化植物油基切削液在切削区形成的润滑油膜的冷却润滑性能,改善切削区的冷却润滑状态,降低工件表面粗糙度. 当石墨烯纳米粒子浓度太小时,石墨烯纳米粒子的强化效应

不明显,对切削液的冷却润滑状态影响较小,不足以改善工件的表面质量.而当石墨烯纳米粒子浓度太大时,过多的石墨烯纳米粒子可以轻易地堵塞切削区,阻碍切削区润滑油膜的形成,使切削区润滑不足,减弱了石墨烯纳米粒子的强化效应.

从 F 分布表可得, $F_{0.01}(3,6) = 9.779\ 5$, $F_{0.05}(3,6) = 4.76$. 由方差分析可得, $F(w) > F_{0.01}(3,6)$. 这说明石墨烯纳米粒子浓度对铣削加工表面粗糙度有非常显著的影响.此外,从表 7 还可得到,石墨烯纳米粒子浓度对铣削加工表面粗糙度的影响贡献率为 47.98%.

2.1.2 切削液流量 Q 对表面粗糙度的影响

如图 4 所示,当切削液流量从 30 mL/h 增加到 120 mL/h 时,表面粗糙度同样是先减小后增大.当切削液流量为 60 mL/h 时,表面粗糙度达到最小值,这主要是由于适量的切削液可以很好地在切削区形成润滑油膜,改善切削区的冷却润滑状态,降低工件表面粗糙度.当切削液流量太小时,进入切削区的切削液过少,很难形成完整的润滑油膜,引起切削区冷却润滑不充足,恶化了工件表面质量,使表面粗糙度增加.当切削液流量过大时,过多的切削液会大大降低切削液的射流速度,降低切削液射流穿透刀具周围气障层的能力,造成切削区冷却润滑不足,恶化工件表面质量,使工件表面粗糙度增加.

通过方差分析可以得到, $F(Q) > F_{0.01}(3,6)$. 这说明切削液流量对铣削加工表面粗糙度也有非常显著的影响.此外,从表 7 可以得到,切削液流量对铣削加工表面粗糙度的影响贡献率为 22.21%.

2.1.3 气体压强 p 对表面粗糙度的影响

如图 4 所示,当气体压强从 0.4 MPa 增加到 0.7 MPa 时,表面粗糙度先是减小后增大.当气体压强为 0.6 MPa 时,表面粗糙度达到最小值.当气体压强较小时,切削液射流穿透铣刀周围气障层的能力较差,造成进入切削区的切削液过少,很难形成完整的润滑油膜,引起切削区冷却润滑不充足,恶化工件表面质量,使表面粗糙度增加.当气体压强过大时,切削液射流由于压强过大而飞溅增加,同样阻碍切削区润滑油膜的形成,导致切削区冷却润滑不充足,恶化工件表面质量,使表面粗糙度增加.

由方差分析可知, $F(p) > F_{0.01}(3,6)$. 这说明气体压强对铣削加工表面粗糙度同样具有非常显著的影响.此外,从表 7 可以得到,气体压强对铣削加工表面粗糙度的影响贡献率为 26.95%.

综上所述,石墨烯纳米粒子质量分数(w)、切

削液流量(Q)以及气体压强(p)对工件表面粗糙度都具有非常显著的影响.其中,石墨烯纳米粒子浓度的影响是最显著的,其次是气体压强,最后是切削液流量.

2.2 参数优化

经过极差分析和方差分析,从图 4 中可以得到,在石墨烯纳米粒子浓度的 4 个水平中,当石墨烯纳米粒子质量分数为 0.1% 时,取得最小的表面粗糙度;在切削液流量的 4 个水平中,当切削液流量为 60 mL/h 时,取得最小的表面粗糙度;在气体压强的 4 个水平中,当气体压强为 0.6 MPa 时,取得最小的表面粗糙度.所以,对于获得最小工件表面粗糙度的最优参数组合为 W2Q2P3.

从表 5 正交试验方案中可以得出,获得的最优参数组合 W2Q2P3 不在正交试验方案中.因此,需要进行验证实验以验证所获得的最优参数组合是合理可信的.

2.3 验证实验

通过参数优化获得的最优参数组合为 W2Q2P3.为了验证此最优参数组合是合理可信的,本研究进行了验证实验.如图 5 所示,在最优参数组合 W2Q2P3 下,验证实验获得的表面粗糙度为 0.406 μm .这与正交试验方案中最优的第 7 组参数组合 W2Q3P4 获得的表面粗糙度 0.457 μm 相对比降低了 11.16%.因此,经过参数优化,GH4169 合金的铣削加工表面粗糙度得到了显著的降低.

3 结 论

1) 石墨烯纳米粒子质量分数 w 、切削液流量 Q 以及气体压强 p 都对铣削加工表面粗糙度具有非常显著的影响.其中,石墨烯纳米粒子质量分数 w 的影响是最显著的,其次是气体压强 p ,最后是切削液流量 Q .

2) 石墨烯强化 MQL 条件下,GH4169 合金铣削加工最优的 MQL 参数组合为:石墨烯纳米粒子质量分数 0.1%,切削液流量 60 mL/h,气体压强 0.6 MPa.最优的铣削加工表面粗糙度为 0.406 μm .

3) 石墨烯强化 MQL 条件下,优化的 MQL 参数可以显著地强化植物油基切削液在切削区形成的润滑油膜的冷却和润滑性能,以改善切削区的冷却润滑状态,从而改善铣削加工表面质量,降低表面粗糙度.

参考文献:

[1] Guo S M, Li C H, Zhang Y B, et al. Analysis of volume ratio of castor/soybean oil mixture on minimum quantity lubrication grinding performance and microstructure evaluation by fractal dimension [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 111 : 494 – 505.

[2] Vazquez E, Gomar J, Ciurana J, et al. Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87 : 906 – 913.

[3] Lawal S A, Choudhury I A, Nukman Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 52 (1) : 1 – 12.

[4] Wang Y G, Li C H, Zhang Y B, et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication (MQL) grinding using different types of vegetable oils [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127 : 487 – 499.

[5] Li B K, Li C H, Zhang Y B, et al. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29 (4) : 1084 – 1095.

[6] Agrawal S M, Patil N G. Experimental study of non edible vegetable oil as a cutting fluid in machining of M2 steel using

MQL [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 20 : 207 – 212.

[7] Najiha M S, Rahman M M, Kadirgama K. Performance of water-based TiO₂ nanofluid during the minimum quantity lubrication machining of aluminium alloy, AA6061-T6 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135 : 1623 – 1636.

[8] Wang Y G, Li C H, Zhang Y B, et al. Experimental evaluation on tribological performance of the wheel/workpiece interface in minimum quantity lubrication grinding with different concentrations of Al₂O₃ nanofluids [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142 : 3571 – 3583.

[9] Zhang Y B, Li C H, Jia D Z, et al. Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 232 : 100 – 115.

[10] Manoj K K, Ghosh A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237 : 55 – 64.

[11] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene [J]. *Nano Letters*, 2008, 8 (3) : 902 – 907.

[12] Berman D, Erdemir A, Sumant A V. Graphene: a new emerging lubricant [J]. *Materials Today*, 2014, 17 (1) : 31 – 42.

(上接第 354 页)

[3] Kochan A. Shadow delivers first hand [J]. *Industrial Robot*, 2005, 32 (1) : 15 – 16.

[4] Cotton D P J, Chappell P H, Cranny A, et al. A novel thick-film piezoelectric slip sensor for a prosthetic hand [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7 (5) : 752 – 761.

[5] Choi B, Lee S, Choi H R, et al. Development of anthropomorphic robot hand with tactile sensor: SKKU hand II [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006 : 3779.

[6] Zhang J, Liu W, Gao L, et al. Design, analysis and experiment of a tactile force sensor for underwater dextrous hand intelligent grasping [J]. *Sensors*, 2018, 18 (8) : 2427 – 2447.

[7] She Y, Li C, Cleary J, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors [J]. *Journal of Mechanisms and Robotics-Transactions of the ASME*, 2015, 7 (2) : 021007.

[8] Borst C, Fischer M, Haidacher S, et al. DLR hand II: experiments and experiences with an anthropomorphic hand [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei: IEEE, 2003 : 702 – 707.

[9] 王宁, 袁建军, 王帅, 等. 轻型机械臂无外置传感器碰撞检测功能的实现 [J]. 机电一体化, 2017, 23 (8) : 44 – 49, 60. (Wang Ning, Yuan Jian-jun, Wang Shuai, et al. Modeling for collision detecting of light robotic manipulator without external sensors [J]. *Mechatronics*, 2017, 23 (8) : 44 – 49, 60.)

[10] Indri M, Trapani S, Lazzero I. A general procedure for collision detection between an industrial robot and the environment [C] // IEEE 20th Conference on Emerging

Technologies & Factory Automation. Luxembourg: IEEE, 2015 : 1 – 8.

[11] Capurso M, Ardakani M M G, Johansson R, et al. Sensorless kinesthetic teaching of robotic manipulators assisted by observer-based force control [C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. Singapore: IEEE, 2017 : 945 – 950.

[12] Kim D E, Yoon H N, Kim K S, et al. Using current sensing method and fuzzy pid controller for slip phenomena estimation and compensation of mobile robot [C] // International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Jeju: IEEE, 2017 : 397 – 401.

[13] Asprone D, Auricchio F, Menna C, et al. 3D printing of reinforced concrete elements: technology and design approach [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 165 : 218 – 231.

[14] Zhong X K, Teoh J E M, Liu Y, et al. 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing [J]. *Virtual & Physical Prototyping*, 2015, 10 (3) : 103 – 122.

[15] 刘伊威, 金明河, 樊绍巍, 等. 五指仿人机器人灵巧手 DLR/HIT Hand II [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (11) : 10 – 17. (Liu Yi-wei, Jin Ming-he, Fan Shao-wei, et al. Five-finger dextrous robot hand DLR/HIT hand II [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45 (11) : 10 – 17.)

[16] 项超群, 张颖, 郭少飞, 等. 新型变刚度软体手臂的设计及控制 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39 (1) : 93 – 96, 107. (Xiang Chao-qun, Zhang Ying, Guo Shao-fei, et al. Design and control of a novel variable stiffness soft arm [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39 (1) : 93 – 96, 107.)