

精密与超精密加工

# 静电雾化机理及微量润滑铣削 7075 铝合金表面质量评价

吴喜峰<sup>1</sup>, 许文昊<sup>1</sup>, 马浩<sup>1</sup>, 周宗明<sup>2</sup>,  
刘波<sup>3</sup>, 崔歆<sup>1</sup>, 李长河<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;  
2. 汉能(青岛)润滑科技有限公司, 山东 青岛 266100;  
3. 四川明日宇航工业有限责任公司, 四川 什邡 618400)

**摘要:** 目的 针对传统气动雾化微量润滑雾化性能差、环境气雾浓度高以及参数化可控性差的技术难题, 设计了静电雾化微量润滑铣削供给系统。研究了铣刀工件约束界面的气流场并进行了静电雾化微量润滑 (Electrostatic Minimum Quantity Lubrication, EMQL) 机理分析与 7075 铝合金铣削表面质量评价。方法 通过分析铣刀工件约束界面气流场的分布情况, 对气流场中的涡流场速度分布情况进行了理论建模, 基于圆周涡流与进入涡流的动力学特征建立了喷嘴最佳射流位姿模型。研究了 EMQL 的荷电与雾化机理, 在此基础上, 进行了不同润滑条件下的铣削 7075 铝合金实验, 包括干切削、浇注式、EMQL。测量了不同润滑条件下的铣削力、铣削表面粗糙度 ( $R_a$ 、 $R_{sm}$ ), 此外, 对 2 种参数条件下 EMQL 获得的加工表面轮廓进行了自相关分析。最后, 分析了荷电润滑剂在切削区的微观作用机制。结果 在实验铣削参数条件下, 进入涡流的诱导半径为 0.007 m, 最佳位姿参数设定如下: 射流点到工件表面的距离  $l_z=9.7$  mm, 射流点到铣刀边缘的距离  $l_y=11.5$  mm, 喷嘴与工件水平方向的夹角  $\gamma \approx 40^\circ$ 。与干切加工相比, EMQL 获得的铣削力降低了 15%、18.6%; 此外, 与干切削相比, 30 kV 条件下的 EMQL 获得的  $R_a$ 、 $R_{sm}$  分别降低了 15.5%、25%, 并且相比于 20 kV 的电压, 30 kV 的 EMQL 铣削表面轮廓自相关分析曲线显示出更优异的表面质量; 浇注式润滑获得了最佳的表面质量 ( $R_a=0.221 \mu\text{m}$ 、 $R_{sm}=0.037 \mu\text{m}$ )。结论 荷电液滴能够提升摩擦界面毛细管的渗透性能, 并且毛细渗透长度可以在提升电压的条件下增加, 在高电压条件下的 EMQL 相比于低电压条件下的 EMQL 展现出更好的铣削性能。

**关键词:** 铣削; 静电雾化微量润滑; 7075 铝合金; 气流场; 喷嘴位姿; 表面质量

**中图分类号:** TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)06-0337-14

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.06.030

收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-12-25

Received: 2022-11-15; Revised: 2022-12-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2010500); 国家自然科学基金 (51975305, 52105457); 山东省自然科学基金 (ZR2020KE027, ZR2021QE116)

Fund: National Key Research and Development Plan (2020YFB2010500); National Natural Science Foundation of China (51975305, 52105457); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020KE027, ZR2021QE116)

作者简介: 吴喜峰 (1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为洁净精密制造。

Biography: WU Xi-feng (1995-), Male, Postgraduate, Research focus: sustainable precision manufacturing.

通讯作者: 李长河 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能与洁净精密制造。

Corresponding author: LI Chang-he (1966-), Male, Doctor, Professor, Research focus: intelligent and sustainable precision manufacturing.

引文格式: 吴喜峰, 许文昊, 马浩, 等. 静电雾化机理及微量润滑铣削 7075 铝合金表面质量评价[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 337-350.

WU Xi-feng, XU Wen-hao, MA Hao, et al. Mechanism of Electrostatic Atomization and Surface Quality Evaluation of 7075 Aluminum Alloy under Electrostatic Minimum Quantity Lubrication Milling[J]. Surface Technology, 2023, 52(6): 337-350.

# Mechanism of Electrostatic Atomization and Surface Quality Evaluation of 7075 Aluminum Alloy under Electrostatic Minimum Quantity Lubrication Milling

WU Xi-feng<sup>1</sup>, XU Wen-hao<sup>1</sup>, MA Hao<sup>1</sup>, ZHOU Zong-ming<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>3</sup>, CUI Xin<sup>1</sup>, LI Chang-he<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266520, China; 2. Hanergy (Qingdao) Lubrication Technology Co., Ltd., Shandong Qingdao 266100, China; 3. Sichuan Future Aerospace Industry Co., Ltd., Sichuan Shifang 618400, China)

**ABSTRACT:** In order to solve the technical problems of poor atomization performance, high environmental aerosol concentration and poor parameterization controllability of traditional pneumatic atomization minimum quantity lubrication milling, an electrostatic atomization minimum quantity lubrication milling supply system has been designed. The work aims to study the airflow field at the constrained interface of tool-workpiece, analyze the mechanism of electrostatic minimum quantity lubrication (EMQL) and evaluate the milling surface quality of 7075 aluminum alloy. The airflow field distribution at the constrained interface of the tool-workpiece was analyzed to theoretically model the velocity distribution of the vortex in the airflow field. The optimal jet position of the nozzle was established based on the kinetic characteristics of the circumferential vortex and the incoming vortex. Then, the charging and atomization mechanism of EMQL were studied. On this basis, milling experiments were carried out to 7075 aluminum alloy under different lubrication conditions, including dry, flood and EMQL. Milling force and milling surface roughness ( $R_a$ ,  $R_{sm}$ ) under the different lubrication conditions were measured. In addition, autocorrelation analysis of the machined surface profiles obtained by EMQL under both parameter conditions was performed. Finally, the mechanism of the charged lubricant in the cutting zone was analyzed. Under the experimental milling parameters, when the induced radius  $r_y$  was 0.007 m, the optimal position parameters were set to  $l_z=9.7$  mm (distance from the jet point to the workpiece surface),  $l_y=11.5$  mm (distance from the jet point to the edge of the milling tool) and  $\gamma \approx 40^\circ$  (included angle between the nozzle and the workpiece in the horizontal direction). Compared with dry milling, EMQL could reduce milling force by 15% and 18.6%. In addition, compared with dry milling, the  $R_a$  and  $R_{sm}$  obtained by EMQL under the condition of 30 kV decreased by 15.5% and 25% respectively. Compared with that at 20 kV, the autocorrelation analysis curve of the surface profile of EMQL milling at 30 kV showed better surface quality. The best surface quality ( $R_a=0.221$   $\mu\text{m}$ ,  $R_{sm}=0.037$   $\mu\text{m}$ ) was obtained under flood lubrication. The charged droplets can enhance the capillary penetration performance at friction interface and the capillary penetration length can be increased under the condition of increasing voltage. EMQL under high voltage shows better milling performance than that under low voltage.

**KEY WORDS:** milling; electrostatic atomization minimum quantity lubrication; 7075 aluminum alloy; airflow field; nozzle position; surface quality

铣削是基础性机械加工形式之一,具有较高的加工质量和材料去除效率<sup>[1-2]</sup>。在加工过程中,刀具和工件、刀具和切屑界面的摩擦及其切屑的剪切变形均会产生大量的铣削热,热量的堆积会严重影响刀具寿命和加工表面质量。因此,大量的冷却液通常用来给加工过程提供一定的冷却与润滑,以保证刀具的服役性能和加工精度<sup>[3]</sup>。传统金属切削液是以矿物油或化学合成油为基油而制成的水溶性乳化液,由于该类切削液不可降解且不可再生,在使用与排放的过程中不可避免地会造成资源消耗与生态污染。此外,一系列改善此类切削液性能的添加剂在使用过程中的挥发以及产生的化学反应,会对工人健康造成严重威胁。随着环保意识的增强及环保法律的完善,此类切削液的使用与处理成本急剧增加,这会间接降低产品的市

场竞争力。

鉴于上述严重的资源消耗与环境污染问题,基于生物润滑剂的微量润滑(MQL)作为清洁切削技术的典型代表目前正在被积极探索<sup>[4]</sup>。少量的生物润滑剂(10~300 mL/h)被雾化成微尺寸液滴,在高压气体的驱动下被输送至切削区。高速液滴分布在切削区及其周围起到冷却与润滑的作用,高压气体会起到清洁作用并可加速切削区的对流换热<sup>[5-6]</sup>。相比于湿切,MQL在可持续性方面具有明显优势,相比于干切,MQL又能改善切削界面的润滑和冷却情况<sup>[7]</sup>。Khan等<sup>[8]</sup>评估了MQL技术的有效性,并断言它可以在保证环境友好性的同时提高加工性能。施壮等<sup>[9]</sup>评估了MQL磨削镍基合金GH4169的性能,结果表明,生物润滑剂的黏度与饱和脂肪酸含量对其界面成膜能

力起着至关重要的作用。

为进一步改善传统气动雾化 MQL 的雾化质量,降低切削加工过程中的环境油雾,同时提升液滴的浸润与渗透能力,研究学者们提出了静电微量润滑 (EMQL) [10-13]。张晓阳等 [14] 探索了电场参数对 EMQL 磨削 GH4169 的影响,研究表明,随电压的增加,表面粗糙度  $Ra$  呈现先减小后增大的趋势。贾东洲等 [15-16] 进一步探索了 EMQL 磨削 GH4169 的有效性,结果表明,相比于浇注式与 MQL,雾化与浸润性能更优异的 EMQL 获得的加工表面质量最佳。他们认为荷电液滴在微通道的迁移活性增加,从而增加了液滴的渗透长度。Xu 等 [17-20] 在他们的系列实验中验证了 EMQL 铣削 AISI 304 的有效性,从降低铣削力、改善表面质量和抑制油雾方面来看,EMQL 比 MQL 和浇注式润滑更具发展潜力。林铁宇等 [21] 探究了 EMQL 铣削铝合金的能耗,他们认为 EMQL 对传统润滑具有较好的替代性。尽管如此,当前 EMQL 依然处于工艺探索阶段,缺乏多种加工参数与加工材料的实验验证,尤其是关于 EMQL 铣削铝合金的研究十分匮乏。

基于 MQL 的绿色切削液减量化技术在一定程度上提高了切削液的利用率,减少了切削废液的产生。然而,在某些工况下,切削液输运到加工区域的效率还会受刀具旋转的影响。在铣削过程中,刀具的高速转动会带动空气形成影响切削液输运的气流场,这会对切削液的有效输运产生阻碍作用,降低其使用率。为此,探索铣刀周围气流场的分布规律,并找到最佳射流位姿点成为相关研究者关注的首要问题。Duan 等 [22] 对不同铣刀参数下铣削型腔时铣刀周围的流场进行了分析研究,并通过正交实验对该加工条件下最佳射流位姿进行了验证。Lacalle 等 [23] 在采用微量润滑的条件下,对高速铣削铝合金的加工区域进行了流体动力学仿真,发现铣刀周围会产生一个阻碍微量润滑切削液输运到加工区间的环形气障。适当调整喷嘴位置,切削液到达铣削区域的注入效率明显改善 [24-25]。尽管学者们对铣刀周围气流场的分布规律进行了大量研究,然而这些分析研究只是对气流场进行了初步探索,缺乏相应的数学模型对铣刀周围气流场的速度分布情况进行表述。

综上所述,研究学者已经探索了 EMQL 技术铣削 AISI304、Inconel 718、Ti-6Al-4V 材料的性能。然而,对于正处在工艺探索阶段的 EMQL 来说,有关铝合金 7075 铣削加工表面质量验证与评价的研究仍比较缺乏,这显然对该技术的进一步发展是不利的。因此,基于涡流流场对切削液输运的正向作用效果,研究了铣刀工件约束界面的气流场分布情况。并且,依据涡流场理论寻找实验喷嘴的最佳位姿参数,在此基础上对 EQML 铣削铝合金 7075 进行了实验验证。

# 1 静电喷嘴最佳射流位姿点

## 1.1 铣刀工件约束界面气流场分析

在铣削过程中,高速转动的铣刀会扰动周围空气产生复杂的气流场。合理利用气流场的特征有利于微尺寸液滴进入切削区,相反,未知气流场的分布情况则不利于最大化利用油雾。因此,首先采用 Fluent 来初步探寻铣刀周围涡流流场的分布规律 [26]。设定仿真参数如表 1 所示,气流场仿真的物理模型如图 1 所示。迭代一定次数后得到的仿真结果如图 2a—c 所示,在计算区域内,铣刀周围形成了一个封闭的环形气流场。该气流场在紧贴铣刀的区域流动速度最大,并且随着距离铣刀中心半径的增大,气流场的流动速度逐渐减小。另外,在铣刀侧面,即  $x-z$  平面上,气流场主要由气障、椭圆形的圆周涡流和半圆形的返回流组成。

表 1 仿真参数  
Tab.1 Simulation parameters

Simples	Values
Milling cutter diameter	10 mm
Milling cutter helical angle	35°
Milling spindle speed	40 r/s
Milling cutter edge length	22 mm
Workpiece size	50 mm×50 mm×40 mm
Boundary height of flow field	122 mm
Boundary radius of flow field	50 mm

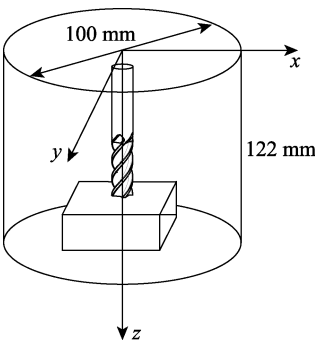


图 1 气流场仿真的物理模型  
Fig.1 Physical model of airflow field simulation

由于气障会阻碍液滴进入加工区,因此,喷嘴位姿应在气障之内。相反,圆周涡流则会起到拖液作用。为了使拖液效果明显,需要保持喷嘴位姿与进入涡流 (流线方向流入铣刀的圆周涡流) 的涡线相切。此外,当液滴被圆周涡流输运到加工区域后,大部分液滴能够起到冷却润滑的作用,但是由于返回流的存在,少量液滴会被带出。因此,喷嘴位姿应远离返回流。最后,考虑到喷嘴喷出的切削液速度要大于气流场的速度,喷嘴应始终指向加工区间。为此,在  $x-z$  平面上,

根据仿真气流场的分布规律,靶距及喷嘴仰角如图2b所示。在 $x-y$ 平面上,气流场由圆周涡流组成,铣刀进给方向沿 $y$ 轴负向,喷嘴应始终指向加工区间,为了保证喷嘴喷出切削液的速度与喷嘴处气流场圆周速度合成后的速度方向沿着径向,喷嘴转角如图2c所示。

为进一步探讨进入涡流和返回流的分布规律,在仿真流场 $y=0$ 的截面上选取距离铣刀中心14、18、22、26、30 mm的5个截线,测量断面如图2d所示。

流和返回流的位置关系及各自的厚度,仿真结果如图3a所示。在 $y=0$ 截面上,即图3b所示工件铣刀中心 $A-A$ 截面, $x$ 向速度为负代表气流方向流向铣刀, $x$ 向速度为正则相反。当位置处于70~77 mm时,气流流出铣刀,此时为返回流。当位置处于70 mm附近时,到达了进入涡流的边缘位置。当位置处于62~70 mm时,气流流入铣刀。当位置处于62 mm附近时,进入涡流的速度最大。当位置处于55 mm附近时,到达了进入涡流的中心区域。当位置处于45 mm附近

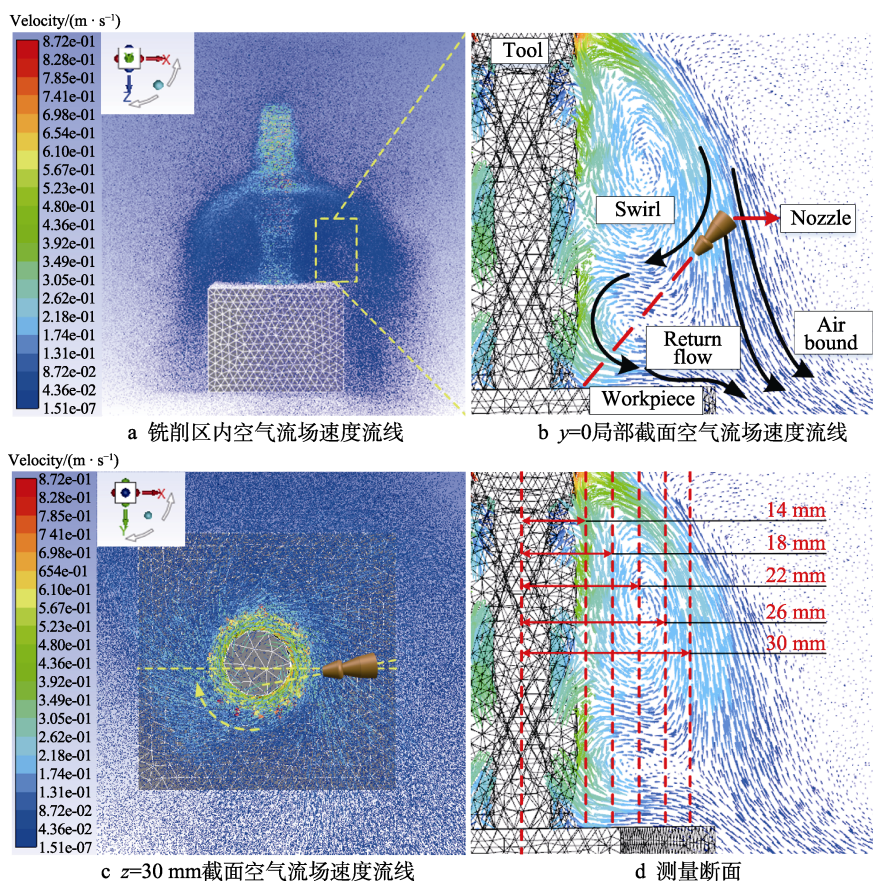


图2 铣刀-工件约束界面气流场分析

Fig.2 Analysis of airflow field at the constrained interface of tool-workpiece: a) velocity streamline of airflow field in milling area; b) enlarged view of the airflow field velocity streamline of the local section at  $y=0$ ; c) velocity streamline of airflow field in  $z=30$  mm section; d) measurement section

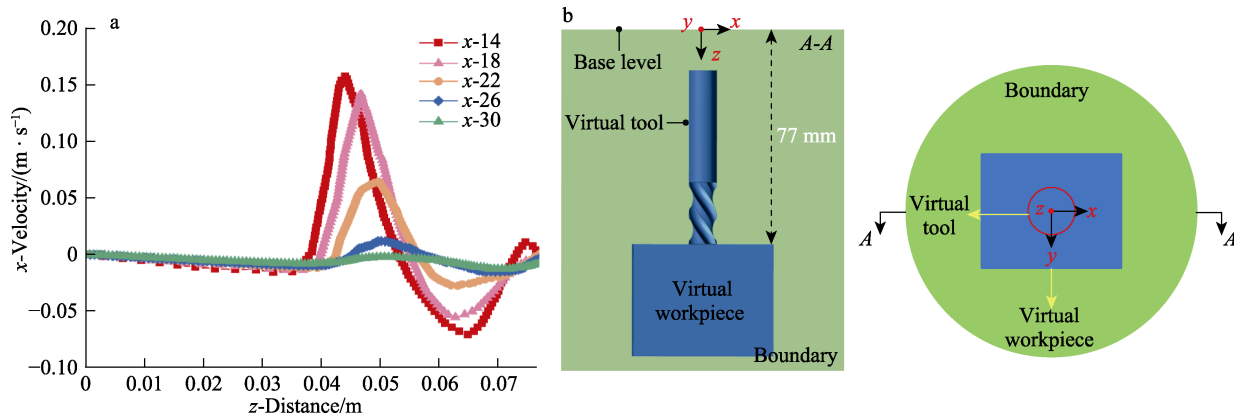


图3 测量断面速度分布 (a) 和测量区域 (b)

Fig.3 (a) Velocity distribution of measurement section and (b) measurement area

时, 气流流出铣刀, 此时到达了进入涡流的速度最大位置。随着气流远离工件,  $x$  向速度逐渐趋于 0。从上述分析可知, 返回流出现的范围为 70~77 mm, 对于进入涡流的厚度, 选取气流流出铣刀和气流流入铣刀速度最大位置处, 即当位置处于 45~62 mm 时, 可以认为进入涡流速度最大处的半径为 7 mm。

## 1.2 涡流场动力学分析

根据欧拉的连续介质思想, 涡流流场中存在无数个连续气体质点, 因为气体具有黏性、可压缩等特性, 多个连续气体质点组成具有一定形状和介观尺度的气体微团, 并以一定的流动状态存在于涡流流场中。张小帆等<sup>[27]</sup>根据毕奥-萨伐尔定理, 对涡流流场的速度分布规律进行了揭示。如图 4 所示, 在速度环量为  $\Gamma$  的涡流流场中, 与涡束  $z$  轴垂直距离为  $r$  的任意点  $P$  的切向速度  $v_1$  如式 (1) 所示<sup>[27]</sup>, 当涡束延伸至无穷远时, 由无限长涡束诱导产生的平面涡流的切向速度  $v_2$  如式 (2) 所示<sup>[27]</sup>。

$$v_1 = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_H \frac{\sin \alpha}{R_p^2} dh \quad (1)$$

$$v_2 = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (2)$$

式中:  $dh$  为涡束上任意一段微元段;  $R_p$  为  $P$  点到微元段的距离, m;  $\alpha$  为  $R_p$  与旋涡微段轴线之间的夹角 ( $^\circ$ )。

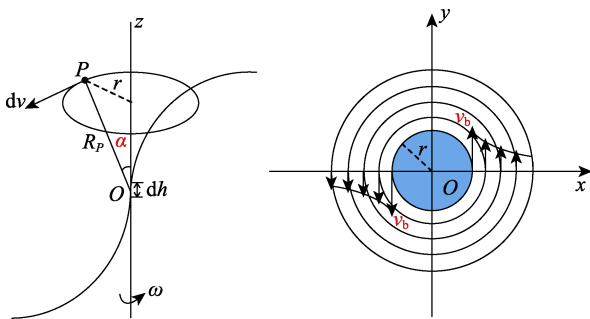


图 4 涡束诱导产生涡流机理 (a) 涡束在某点的诱导速度; (b) 涡流速度与半径的关系

Fig.4 Mechanism of eddy current induced vortex sheaf: a) induced velocity of the vortex sheaf at a certain point; b) relationship between vortex velocity and radius

在端面铣削过程中, 铣刀的高速转动会诱导铣刀表面的空气跟随铣刀旋转。由于空气具有一定的黏性, 铣刀附近的空气也会产生扰动进而形成涡流流场。涡流流场的重要参数为诱导半径及诱导速度, 其中涡束半径上的切向速度称之为诱导速度, 涡束半径称之为诱导半径。根据铣刀结构的不同, 其诱导速度及诱导半径的形式及大小也有差别。设铣刀线速度为  $v_d$ 、半径为  $r_d$ 、螺旋角为  $\eta$ 。铣刀的柄部及颈部为圆柱形, 当铣刀做旋转运动时, 铣刀带动与其表面接触的气流产生与自身转动方向一致的诱导速度  $v_c$ , 诱导速度的大小及方向与铣刀线速度的一致。而诱导半径

记为  $r_c$ , 其大小等于铣刀自身半径。将诱导速度  $v_c$  产生的涡流命名为圆周涡流。此外, 铣刀刃部为螺旋线, 当铣刀做旋转运动时, 刃部会带动与其表面接触的气流产生垂直于刃部螺旋线方向的诱导速度  $v_a$ 。为了便于分析, 将诱导速度  $v_a$  分解为  $z$  方向的诱导速度  $v_\gamma$  以及沿着铣刀边缘的诱导速度  $v_\beta$ , 其中,  $v_\beta$  也为铣刀旋转线速度。对于诱导速度  $v_\beta$  来说, 有相应的诱导半径, 记为  $r_\beta$ , 其大小等于铣刀自身半径, 此部分形成的涡流为圆周涡流。而对于诱导速度  $v_\gamma$  来说, 也有相应的诱导半径, 记为  $r_\gamma$ , 此部分形成的涡流为进入涡流。

在涡束诱导产生的涡流中, 随着半径的增大速度逐渐趋于 0, 此时压强为大气压  $p_{huan}$ 。对于诱导半径  $r_\gamma$ , 由伯努利方程可得<sup>[27]</sup>:

$$p_{bian} = p_{huan} - \frac{\rho_g}{2} \cdot v_\gamma^2 \quad (3)$$

式中:  $p_{bian}$  为铣刀边界压强;  $\rho_g$  为气体密度,  $kg/m^3$ 。

设半径为  $r_\gamma$  的涡核边界层外的压力为大气压力, 根据牛顿内摩擦定律, 有:

$$p_{huan} - p_{bian} = \mu \frac{dv_\gamma}{dr_\gamma} \quad (4)$$

$$v_\gamma = \frac{1}{-\frac{\rho_g}{2\mu} r_\gamma + C} \quad (5)$$

式中:  $C$  为常数;  $\mu$  为气体动力黏度,  $Pa \cdot s$ 。

根据有限元的仿真结果可知, 当半径  $r_d=10$  mm、转速  $n=40$  r/s、螺旋角  $\eta=35^\circ$  时, 进入涡流速度最大处的半径即诱导半径  $r_\gamma$  为 0.007 m。整理后得到了诱导半径  $r_\gamma$  与诱导速度  $v_\gamma$  的关系如式 (6) 所示。对于圆周涡流及进入涡流的数学模型, 可以选择用 Rankine 涡来进行表述<sup>[28-29]</sup>, 如式 (7) — (9) 所示。

$$r_\gamma = -\frac{1}{36033.52v_\gamma} + 0.007 \quad (6)$$

$$v = v_c \frac{r_c}{r} = v_d \frac{r_d}{r} \quad (r \geq r_d) \quad (7)$$

$$v = v_\beta \frac{r_\beta}{r} = v_d \frac{r_d}{r} \quad (r \geq r_d) \quad (8)$$

$$v = v_\gamma \frac{r}{r_\gamma} = \frac{36033.52v_\beta^2 \tan^2 \eta}{252.23v_\beta \tan \eta - 1} r \quad (0 \leq r \leq r_\gamma) \quad (9)$$

## 1.3 最佳射流位姿点

铣刀参数会影响涡流流场的速度分布情况, 从而影响喷嘴的最佳射流位置。为此, 需要进一步探明铣刀参数对涡流流场速度分布的影响规律以及对喷嘴最佳射流位置的影响。圆周涡流与进入涡流的涡流场速度分布可由式 (10) — (11) 得出, 铣刀参数对圆周涡流的影响规律如图 5 所示。在同一半径距离下, 铣刀转速与半径越大, 圆周涡流速度越大。如图 6 所示,

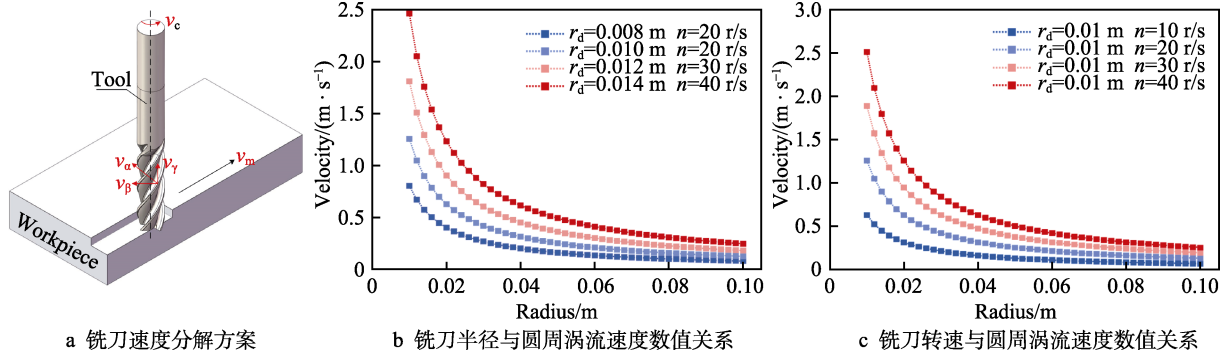


图5 铣刀参数对涡流流场的影响

Fig.5 Effect of milling tool parameters on vortex field: a) milling tool speed decomposition scheme; b) numerical relationship between milling tool radius and circumferential vortex velocity; c) numerical relationship between milling tool speed and circumferential vortex velocity

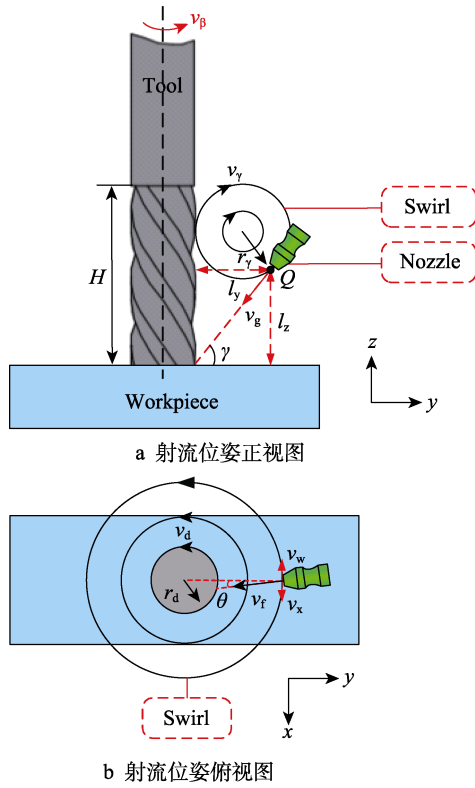


图6 涡流流场与最佳射流位姿点的位置关系

Fig.6 Position relationship between the vortex field and the optimal jet position:

a) front view of jet position; b) top view of jet position

喷嘴最佳几何参数可由进入涡流诱导半径及其圆周涡流诱导速度求出,基于几何关系建立如式(12)~(13)的数学模型。

$$v = \frac{2\pi n r_d^2}{r} \quad (r \geq r_d) \quad (10)$$

$$v = \frac{36033.52(2\pi n r_d)^2 \tan^2 \eta}{504.47\pi n r_d \tan \eta - 1} r \quad (0 \leq r \leq \frac{-1}{36033.52(2\pi n r_d) \tan \eta} + 0.007) \quad (11)$$

$$\begin{cases} l_z = \frac{r_\gamma}{\tan\left[\frac{1}{2}(90^\circ - \gamma)\right]} - r_\gamma \cos \gamma \\ l_z = H - r_\gamma - r_\gamma \cos \gamma \\ l_y = r_\gamma + r_\gamma \sin \gamma \\ l_y = \frac{2}{\frac{1}{r_\gamma} + \frac{r_\gamma}{(H - r_\gamma)^2}} \\ l_z = H - \frac{1}{\frac{1}{r_\gamma} + \frac{2r_\gamma}{H^2} - \frac{2}{H}} \\ \gamma = \arctan\left(\frac{l_z}{l_y}\right) \\ \theta = \arcsin\left[\frac{\pi n r_d^2 [(H - r_\gamma)^2 + r_\gamma^2]^2}{2v_\gamma \cdot r_\gamma^2 (H - r_\gamma)^3}\right] \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} l_y = \frac{2}{\frac{1}{r_\gamma} + \frac{r_\gamma}{(H - r_\gamma)^2}} \\ l_z = H - \frac{1}{\frac{1}{r_\gamma} + \frac{2r_\gamma}{H^2} - \frac{2}{H}} \\ \gamma = \arctan\left(\frac{l_z}{l_y}\right) \\ \theta = \arcsin\left[\frac{\pi n r_d^2 [(H - r_\gamma)^2 + r_\gamma^2]^2}{2v_\gamma \cdot r_\gamma^2 (H - r_\gamma)^3}\right] \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $H$  为铣刀切削刃部分高度, mm;  $l_y$  为射流点到铣刀边缘的距离, mm;  $l_z$  为射流点到工件表面的距离, mm;  $\theta$  为喷嘴与铣刀轴线的夹角, ( $^\circ$ )。

## 2 静电雾化微量润滑原理

EMQL 改善了传统气动雾化 MQL 雾化性能不足与气雾浓度过高的问题,然而,由于传统 EMQL 使用的设备集成度较低,参数化可控操作较为复杂。创新性地开发了集成式的多能场参数控制装置,多能场驱动静电雾化微量润滑运输装置的设计原理和内部设计如图 7a 和图 7b 所示,该装置通过设计内部高压静电发生电路、微量泵控制系统、气压控制系统以及人机操作界面,实现气压、流量、电压的参数化控制。该装置配备的喷嘴含有电极针,如图 7c 所示,电极针与高压静电发生电路连接以实现荷电切削液的功能。

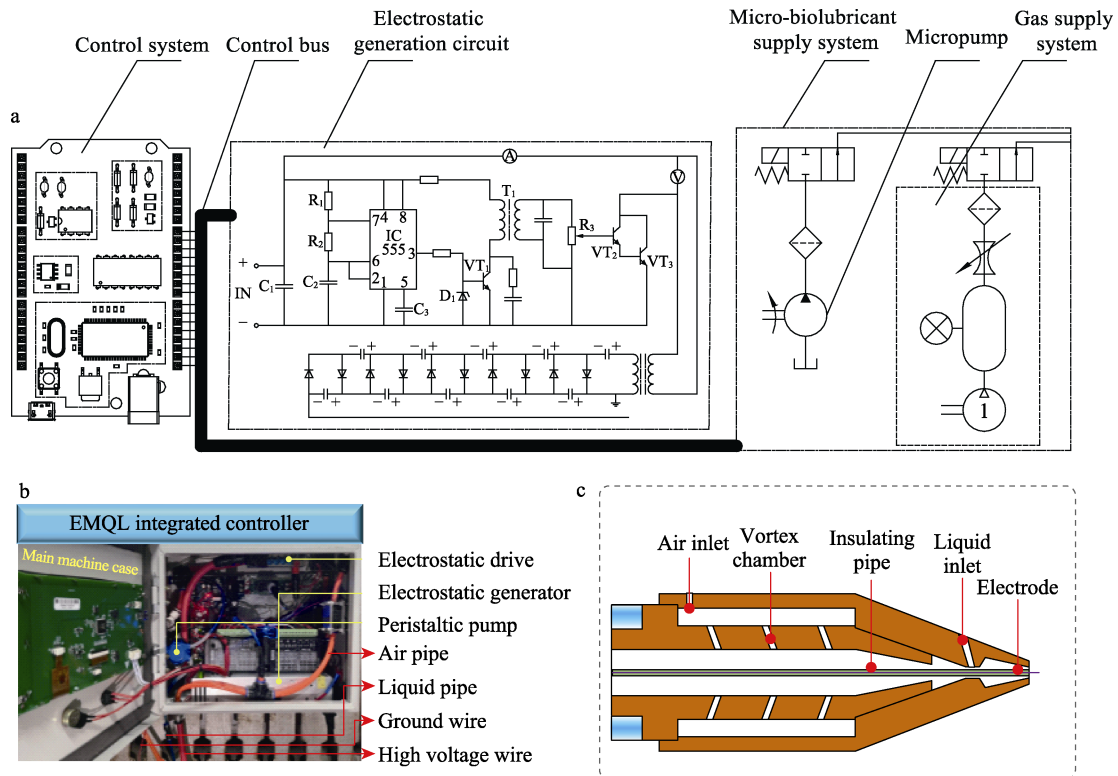


图 7 装置设计原理 (a)、静电雾化微量润滑装置内部视图 (b) 和荷电喷嘴结构 (c)  
Fig.7 (a) Design principle of the device, (b) internal view of electrostatic atomization minimum quantity lubrication device and (c) structure of charged nozzle

相比于传统气动雾化 MQL, EMQL 雾化能够产生荷电液滴。当高压电极施加的电压超过一定阈值后, 会在周围产生电晕放电并形成电晕区。对于负高压电极, 电晕区含有大量的负离子与电子。高压气体雾化的液滴在通过含有高浓度离子的电晕区时与负电荷相碰撞, 液滴表面附着负电荷使液滴荷电。静电雾化微量润滑液滴赋能机制如图 8 所示。在高压电场条件下, 非极性液滴会被位移极化从而在液滴的表面及其内部产生诱导电荷, 这 2 种荷电方式同时存在, 当然, 这种位移极化电荷较弱。荷电液滴表面张力  $\sigma'$  如式 (14) 所示, 荷电液滴在表面同性电荷库伦

斥力的作用下, 削弱了其表面张力, 从而增加了液滴发生二次雾化以及多次雾化的可能性。Maruda 等<sup>[30]</sup>通过实验验证了不同雾化质量对切削区成膜性能的影响, 结果表明, 平均粒径越小的微液滴越有利于渗透进入切削区, 从而增强切削液的成膜能力。另外, 微米级的荷电液滴较非荷电液滴的吸附能力有所改善, 吸附力的增强会显著抑制液滴的飞移飘散, 并降低荷电微液滴与壁面碰撞造成的飞溅与回弹行为发生的可能性。

$$\sigma' = \sigma - \frac{Q^2}{64\pi^2 \epsilon R_d^3} \quad (14)$$

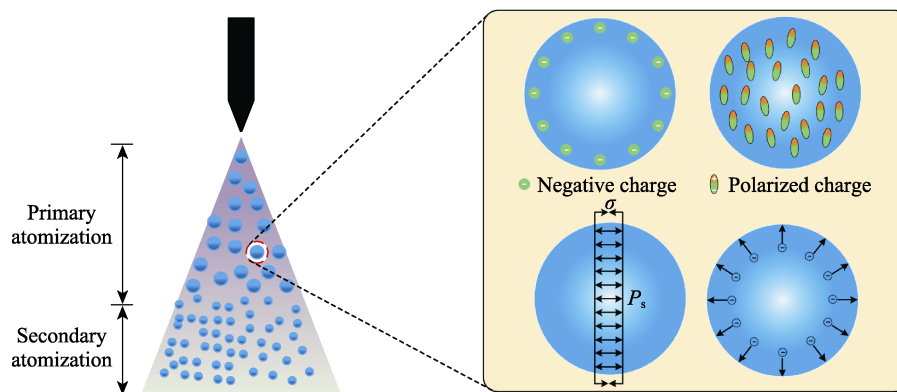


图 8 静电雾化微量润滑液滴赋能机制  
Fig.8 Empowering mechanism of electrostatic atomization minimum quantity lubrication droplet

式中:  $Q$  为液滴表面荷电量;  $\sigma$  为液滴表面张力, N/m;  $R_d$  为液滴半径, m;  $\varepsilon$  为液滴的相对介电常数, F/m。

### 3 实验条件与方法

工件材料选用铝合金 7075, 其尺寸为 50 mm×50 mm×40 mm, 化学成分和性能参数如表 2 和表 3 所示。铣刀选用 SWT 的四齿高速钢立铣刀, 尺寸为 10 mm×10 mm×22 mm×72 mm。如图 9a 所示, 微量润滑工况下的切削液供给采用集成式静电雾化供给装置, 静电雾化微量润滑的基础油选用棉籽油, 棉籽油的脂肪酸含量如表 4 所示, 饱和度较高的棉籽油有利于切削区成膜的稳定性。浇注式切削液则采用全合成切削油, 浇注流量设定为 60 L/min。如图 9b 所示, 采用 BOHI(VMC850L)数控加工中心对铝合金 7075 进行端面铣削加工, 铣削参数如下: 铣刀转速为

2 400 r/min, 径向切深为 0.2 mm, 轴向切深为 8 mm, 进给速度为 100 mm/min。如图 9c 所示, 在加工过程中, 采用 YDM-III 99 型压电式测力仪采集铣削力。铣削完成后, 选用 TIME 3220 表面轮廓仪作为分析设备, 对铣削后的工件表面进行  $R_a$  值、 $R_{sm}$  值的测量。

实验研究目的是探讨静电微量润滑输运系统的铣削性能。分别采用干式、浇注式、静电微量润滑输运系统对铝合金 7075 进行端面铣削对比实验。为了进一步探讨射流参数对铣削性能的影响, 实验设立了 2 种射流参数 (20 kV/0.2 MPa、30 kV/0.2 MPa), 从铣削力、工件表面粗糙度值 ( $R_a$  值、 $R_{sm}$  值) 方面来评价微量润滑输运系统的铣削性能。其中, 浇注式和微量润滑输运系统的喷嘴位姿参数通过实验参数计算所得, 即  $l_z=9.7$  mm,  $l_y=11.5$  mm,  $\gamma\approx40^\circ$ , 由于 EMQL 喷嘴出口液滴瞬时速度较大, 在该工况条件下可以忽略  $\theta$  的偏移。此外, 4 种工况均保持参数一致性。

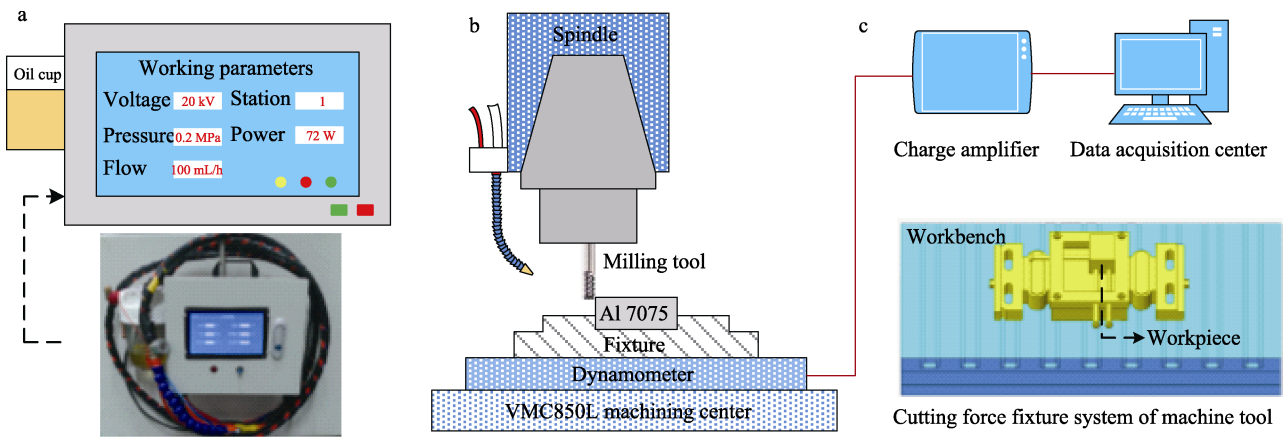


图 9 静电雾化微量润滑供给装置 (a)、铣削实验装置 (b)、工件夹装及测力仪 (c)  
Fig.9 (a) EMQL supply device, (b) milling experimental device and (c) workpiece clamp and dynamometer

表 2 7075 铝合金化学成分  
Tab.2 Chemical composition of 7075 aluminum alloy

								wt.%
Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Cr	Fe	Al
0.4	1.2-2.0	2.1-2.9	5.1-6.1	≤0.3	≤0.2	0.18-0.28	0.5	Bal.

表 3 7075 铝合金性能参数  
Tab.3 Performance parameters of 7075 aluminum alloy

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Hardness (HB)	Density/(g·cm <sup>-3</sup> )
524	455	71	150	2.81

表 4 棉籽油的脂肪酸含量  
Tab.4 Fatty acid content of cottonseed oil

						wt.%
Palmiticacid	Stearicacid	Linoleicacid	Linolenicacid	Myristicacid	Octadecylicacid	Others
21.4-26.4	2.1-3.3	44.9-55.0	0.4	0.6-1.0	18.0-30.7	0.3-1.8

## 4 结果与讨论

### 4.1 铣削力

铣削力是铝合金铣削加工的重要指标, 它不仅能够反映加工过程的铣削状态, 还能体现不同润滑方式的润滑特性。在铣削过程中不同润滑工况下的三向铣削力如图 10 所示。由于在铣削过程中刀具与工件是不连续接触的, 铣削力发生了显著变化。铣削力可以分解为  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$ , 其中,  $F_x$  是切削方向上的力, 是金属铣削过程中切削力的主要载体,  $F_y$  是在进给方向上铣刀和工件的相互作用力,  $F_z$  是工件在轴线方向上受到的切削力。在各向铣削力相同数据段选取  $i$  个峰值  $F_{\max i}$ , 以平均值、铣削合力作为评判标准, 计算公式如式 (15) — (16) 所示。由图 11 可知, 干切条件下铣削力最大, 这是由于切削界面缺少冷却与润滑介质, 导致刀具与工件发生剧烈摩擦, 过高的铣削力不利于获得优异的铣削工件表面质量, 而且严重的热量堆积还会造成刀具的快速磨损从而降低其使用寿命。与干切相比, 浇注式润滑与 EMQL 润滑条件下的铣削合力分别降低了 34.3%、15%、18.6%。这表明, 润滑与冷却介质的加入改善了铣刀与工件界面

的接触状态, 这有利于降低铣削力。

采用 EMQL 输运系统的 2 种工况得到的铣削力相较于干式铣削来说均有了明显的降低, 20 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别降低了 13.8%、20.4%、18.8%。令人惊喜的是, 30k V/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别降低了 16.9%、26.5%、25%。上述结果表明, 高电压条件下的 EMQL 更有利于降低铣削力。在高电压条件下, EMQL 雾化的液滴粒径更小且分布更加均匀, 另外, 荷电液滴优异的吸附性能降低了刀具工件间的摩擦磨损, 荷电电压的提升会改善液滴的铺展与浸润性能, 这会进一步改善切屑与刀具的磨损情况。然而, 与浇注式铣削相比, EMQL 的铣削力则有所提升。20 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别提高了 24.1%、12.8%、15.4%, 合力提高了 22.7%。30 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  分别提高了 21.3%、5.6%、8.3%, 合力提高了 19.3%。

$$\bar{F}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^N F_{\max i}}{N} \quad (15)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (16)$$

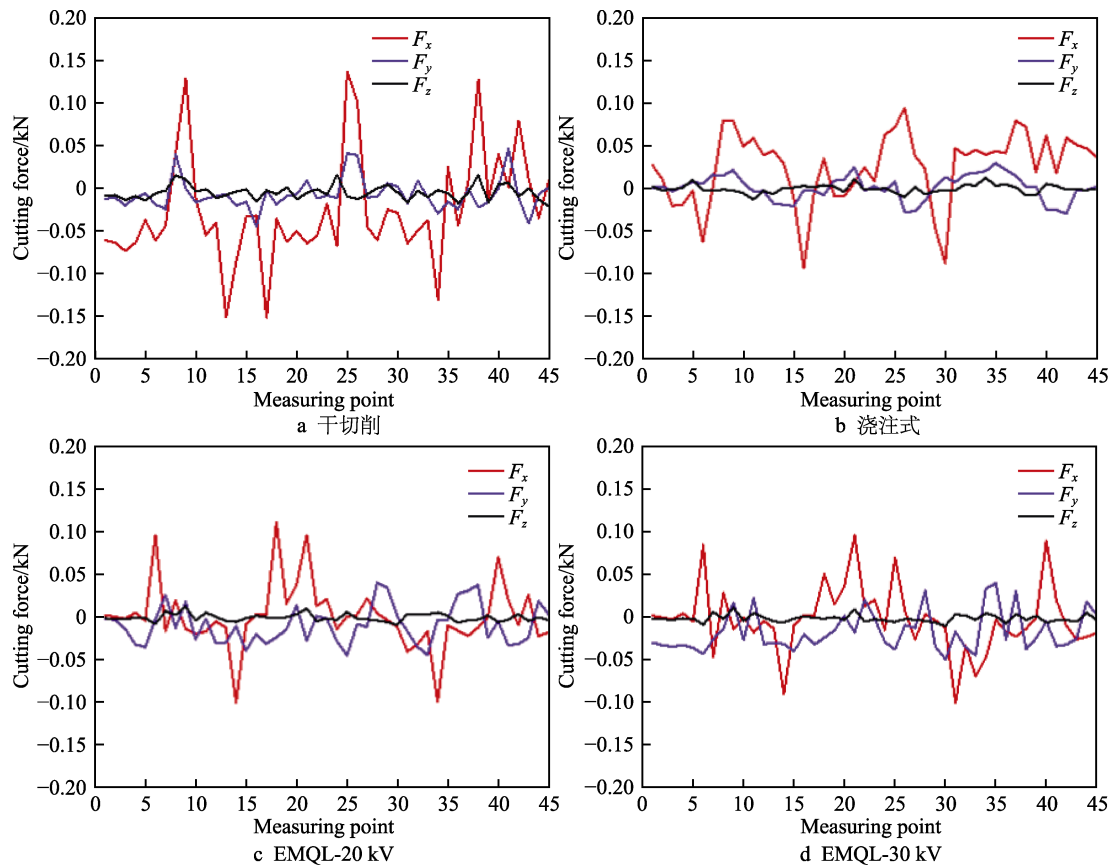


图 10 在铣削过程中不同润滑工况下的三向铣削力

Fig.10 XYZ-direction milling force during milling under different lubrication conditions: a) dry; b) flood; c) EMQL-20 kV; d) EMQL-30 kV

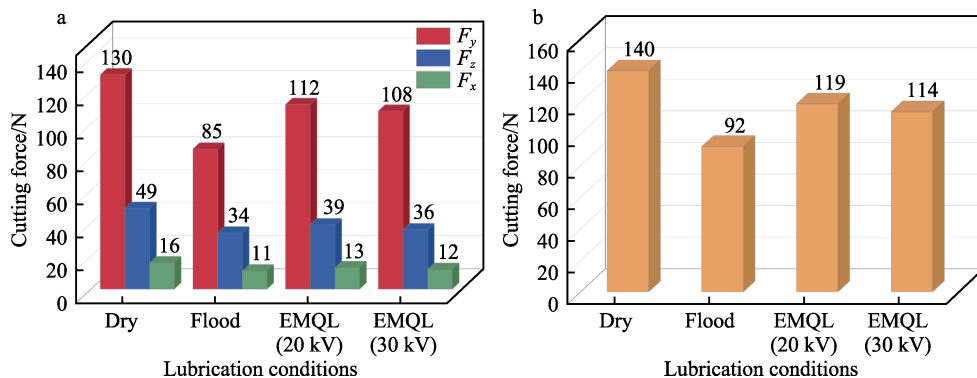


图 11 三向铣削平均力 (a) 和铣削合力 (b)

Fig.11 (a) Average milling force of XYZ-direction and (b) combined milling force

## 4.2 工件表面粗糙度

工件表面粗糙度是评价铣削表面质量的重要参数之一,它对工件的疲劳强度、耐腐蚀性等有着至关重要的影响,较低的表面粗糙度能够显著提高工件的配合性能<sup>[31-35]</sup>。4种工况下工件表面轮廓高度如图12所示,本实验测得了不同润滑条件下的工件轮廓高度,并采用轮廓算术平均偏差 $R_a$ 值、轮廓单元的平均宽度 $R_{sm}$ 值来表征工件表面质量。4种工况下工件表面 $R_a$ 、 $R_{sm}$ 如图13所示,可知,浇注式润滑条件下工件表面 $R_a$ 值( $0.221\mu\text{m}$ )和 $R_{sm}$ 值( $0.037\mu\text{m}$ )

均小于其他润滑工况下的,这意味着浇注式获得的表面质量最佳。相比于干切,20 kV/0.2 MPa条件下的EMQL获得的 $R_a$ 、 $R_{sm}$ 分别降低了13.2%、16.1%。30 kV/0.2 MPa条件下的EMQL获得的 $R_a$ 、 $R_{sm}$ 分别降低了15.5%、25%。与干式加工相比,EMQL条件下产生荷电的生物润滑剂沉积铺展在切削区及其周围,起到一定的冷却润滑作用,由于生物润滑剂棉籽油独特的分子结构,含有大量极性基团的脂肪酸出色的吸附性能和一定的黏度减少了刀具与工件界面的摩擦,另外,荷电液滴的铺展性能较非荷电液滴的有一定程度的提升,这有利于切削区的冷却。电晕区的离

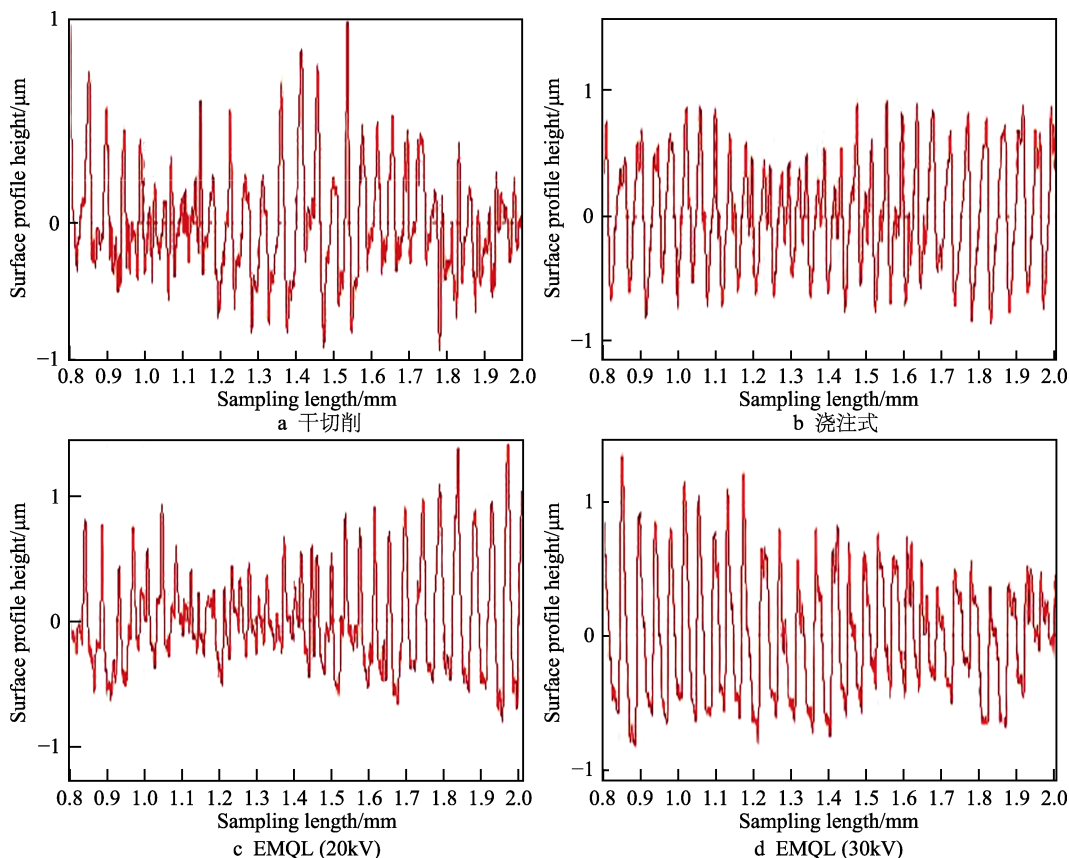


图 12 4种工况下工件表面轮廓高度

Fig.12 Surface profile height of workpiece under four working conditions: a) dry; b) flood; c) EMQL(20 kV); d) EMQL(30 kV)

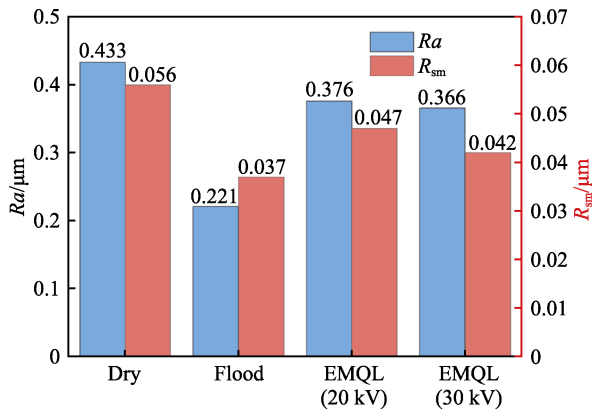


图 13 4 种工况下工件表面  $R_a$ 、 $R_{sm}$   
Fig.13  $R_a$  and  $R_{sm}$  of workpiece surface under four working conditions

子在电场力与气动力的作用下会被输送至切削区, 研究表明, 离子风会加速自然对流换热效率。相比于传统浇注式润滑, EMQL 由于较小的切削液用量没有表现出更优异的加工性能。

考虑到实验存在误差, 在 EMQL 加工表面的  $R_a$  值、 $R_{sm}$  值上能够显著判断表面质量的好坏, 较难判断铣削性能的优异性, 并且 TIME 3220 表面轮廓仪测得的粗糙表面轮廓主要视为一般随机过程的数学模型, 使用传统的横向、纵向粗糙度参数很难概括工件表面全部的整体轮廓趋势, 为此还需进一步判断 20 kV/0.2 MPa 微量润滑输运系统与 30 kV/0.2 MPa 微量润滑输运系统的铣削性能。

将自相关函数运用在工件表面质量的微观分析中, 其意义在于衡量同一个轮廓波形相差位移  $\tau$  时的相似程度, 具体公式如式 (17) 所示, 其数字化估计公式如式 (18) 所示。自相关函数  $R_x(\tau)$  能够表述工件表面轮廓的相似程度, 不同类型轮廓自相关函数的变化趋势是不同的。随机轮廓的自相关函数随着  $\tau$  的增大会逐渐减小并接近于 0, 而周期性变化轮廓的自相关函数也呈周期性变化, 无论  $\tau$  取多大, 自相关函数曲线始终会保持稳定振荡状态。因此, 可以依据自

相关函数的曲线变化规律来判断轮廓是否有周期性规律, 从而对工件的表面质量进行评价。

$$R_x(\tau) = \frac{1}{L} \int_0^L x(t)x(t+\tau)dt \quad (17)$$

$$ACF(rh_c) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=0}^{N-r-1} Y_n Y_{n+r} \quad (r=0,1,2,3,\dots,m; m < n) \quad (18)$$

式中:  $x(t)$ 、 $x(t+\tau)$  分别代表当横向位移为  $t$  和  $t+\tau$  时表面轮廓与中线的距离, mm;  $r$  为横向位移数;  $m$  为最大横向位移数;  $N$  为采样容量;  $h_c$  为采样间隔, mm;  $Y_n$  和  $Y_{n+r}$  分别为第  $n$  处轮廓和第  $n+r$  处轮廓的高度值, mm。

20 kV 和 30 kV 的 EMQL 条件下表面轮廓的自相关函数曲线如图 14 所示。可以观察到, 随着  $\tau$  的增大自相关曲线逐渐衰减, 这表明在 2 种工况下工件表面轮廓具有一定的随机性。当  $\tau=0$  时, 2 种工况的自相关函数曲线取得最大值  $R_x(0)$ 。20 kV 和 30 kV 下的  $R_x(0)$  分别为 0.308 7  $\mu\text{m}$  和 0.446 1  $\mu\text{m}$ , 从自相关曲线方面可以认为 30 kV 的 EMQL 在纵向方向上的扩散度较大, 这与  $R_a$  反映的结果有所差异, 这表明仅从  $R_a$  上不能够准确反映铣削界面的微观形貌。另外, 2 种润滑工况的自相关曲线均存在不同程度的振荡现象。观察自相关曲线发现, 除了整体的周期性振荡外, 还存在局部连续振荡。2 种润滑条件下局部振荡的频率几乎相同, 然而局部振荡的振幅却出现较大差异。在 20 kV 的 EMQL 条件下局部振荡振幅较大, 且整体振荡频率与幅度均较大, 反观 30 kV 的 EMQL 条件下的局部振荡振幅较小, 且整体振荡频率与幅度均较小。这表明 30 kV 的 EMQL 条件下的铣削表面轮廓线具有更小范围的周期特性, 这表征了更完整、更规则的轮廓, 同样也代表着更好的加工精度和工件表面质量。综上所述, 相比于 20 kV 的 EMQL, 30 kV 的 EMQL 能够获得更好的加工表面质量。

### 4.3 荷电生物润滑剂润滑机制

本文的 EMQL 输运系统是在静电喷嘴最佳射流位姿理论基础上建立的, 这种润滑方式相比于传统

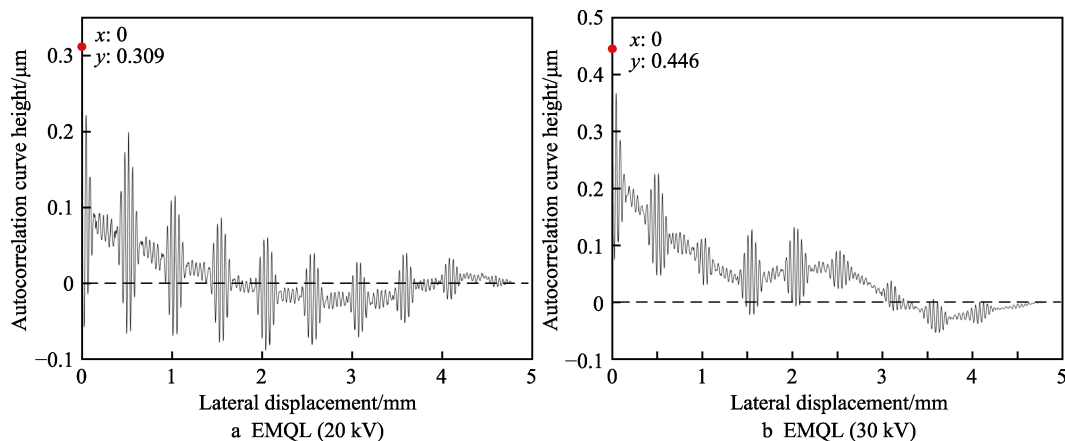


图 14 不同电压的 EMQL 条件下工件表面轮廓自相关函数曲线

Fig.14 Autocorrelation curves of workpiece surface profiles under EMQL at different voltages

MQML 是一种有益的实践探索, 它的主要优势体现在以下 2 个方面: 荷电喷嘴通过直接接触以及产生电晕电场的方式使液滴荷电, 相比于传统气动雾化 MQML, EMQL 雾化的液滴在降低平均粒径以及改善粒径尺寸分布方面具有更明显的优势, 另外, 荷电液滴的浸润性能较不荷电时有所提升; 在最佳射流位姿参数条件下, 能够合理利用铣削周围气流场分布、最大化油雾利用率, 进而提升油雾加工的润滑和冷却效率。

在立铣过程中, 刀具与工件的接触状态是断续的, 通常为了便于分析铣削过程的微观接触行为, 学者们提出将其进行时间离散, 如图 15a 所示。刀具切削去除材料的过程如图 15b 所示, 其中  $OA$  阶段为塑性接触区, 刀具与切屑接触得极为紧密,  $AB$  段为弹性接触区, 该区间也被称为滑动区<sup>[4]</sup>。由于刀具与工件和成形切屑之间发生了剧烈摩擦, 滑动接触区会产生大量的毛细管, 这些毛细管在改善刀具与切屑界面

摩擦行为方面起到桥梁作用。将滑动接触区的毛细管简化成图 15c, 根据 Xu 等<sup>[18]</sup>对毛细浸润理论的探索 (式 (18)), 荷电液滴表面张力的下降会提升其毛细驱动力, 进而促进切削液对毛细管的填充。然而, 荷电液滴与金属接触后的电子转移行为需要得到进一步的研究揭示。当增加荷电电压时, 雾化质量的提升以及荷电效率的改善均会提升液滴的微观作用性能, 这也会导致 30 kV 条件下的 EMQL 能够起到更优异的润滑冷却效果。

$$F = F_{\text{cap}} + F_p - F_{\text{visc}} = 2\pi r_c \sigma \cos \theta + p r_c^2 2P_{\text{atm}} - 8\pi \eta z h v = d(m_s v) / dt \quad (19)$$

式中:  $F_{\text{cap}}$  是毛细管驱动力;  $F_p$  是大气压力;  $F_{\text{visc}}$  是黏性阻力;  $r_c$  是毛细管半径 (假设为  $0.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ );  $z$  是切削液的动态黏度;  $v$  是流体穿透的瞬时速度;  $m_s$  是切削液渗透质量。

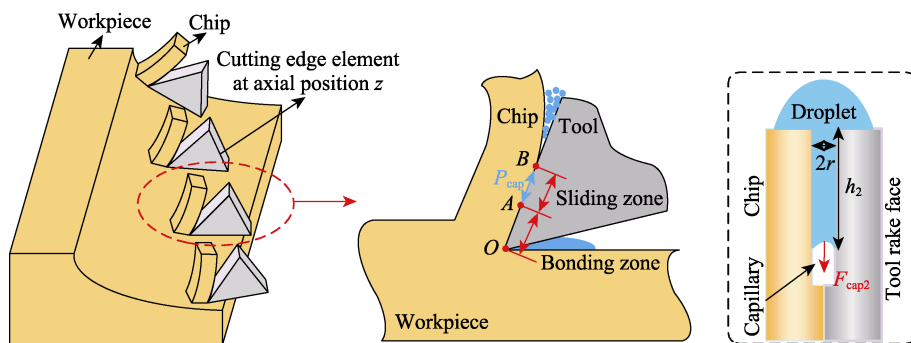


图 15 铣削过程中荷电液滴微观作用机理

Fig.15 Micro action mechanism of charged droplets in milling process: a) material removal mechanism; b) penetration mechanism of milling fluid; c) capillary infiltration mechanism

## 5 结论

对静电雾化微量润滑铣削 7075 铝合金的加工性能进行了实验评价, 构建了基于铣刀工件约束界面气流场及其涡流场动力学理论模型寻找喷嘴最佳射流位姿参数的方案, 主要得出以下结论。

1) 铣刀工件约束界面气流场主要由气障、进入涡流和返回流组成, 其中合理利用进入涡流可以提升油雾的有效利用率。

2) 当铣刀参数半径  $r_d=10 \text{ mm}$ 、刃长  $H=22 \text{ mm}$ 、转速  $n=40 \text{ r/s}$ 、螺旋角  $\eta=35^\circ$  时, 进入涡流速度最大处的半径即诱导半径  $r_y$  为  $0.007 \text{ m}$ , 该诱导半径可由气流场速度分析得出; 此时, 该铣削参数下的最佳位姿参数可以设定为  $l_z=9.7 \text{ mm}$ ,  $l_y=11.5 \text{ mm}$ ,  $\gamma \approx 40^\circ$ 。

3) 静电雾化微量润滑的荷电机理主要是由电晕场致自由电荷荷电以及高电场强度条件下的极化荷电组成, 荷电液滴表面张力的降低使其更容易发生雾化。

4) 相比于干切加工, 20 kV 和 30 kV 条件下的静电微量润滑铣削 7075 铝合金的铣削力分别降低了

15%、18.6%; 此外, 静电微量润滑还可以改善铣削工件的表面质量, 具体表现如下: 相比于干切, 20 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $R_a$ 、 $R_{sm}$  分别降低了 13.2%、16.1%, 30 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 获得的  $R_a$ 、 $R_{sm}$  分别降低了 15.5%、25%; 然而, 相比于大流量的浇注式, EMQL 的铣削性能还有待通过改变场参数进一步提升。

5) 相比于 20 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL, 30 kV/0.2 MPa 条件下的 EMQL 在提升铣削性能方面更具优势, 通过对比铣削工件表面轮廓自相关函数曲线可以认为, 增加荷电电压更有利于提升 EMQL 的加工性能, 荷电润滑剂的润滑机制可以进一步解释该结果, 荷电后的切削液由于表面张力的降低, 其毛细驱动力有所增加, 这将有利于荷电液滴对刀具切屑滑动界面毛细管的填充, 进而改善界面摩擦状态。

尽管本文丰富了 EMQL 铣削 7075 铝合金的研究, 初步验证了高电压条件下 EMQL 取代浇注式润滑的趋势, 然而由于某些条件的限制, 本文在铣削过程性能指标的表征及多参数的探究方面依然存在不足。未来, 应对高电压 EMQL 铣削铝合金的润滑、传热性能进行全面分析。

## 参考文献:

- [1] JING Lu, NIU Qiu-lin, DANG Jia-qiang, et al. Milling Performance Evaluation and Cooling/Lubrication Mechanism of Al-50wt% Si Alloy Based on Various Environmentally Sustainable Manufacturing Strategies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(2): 1023-1040.
- [2] LIN Sen, PENG Fang-yu, WEN Jie, et al. An Investigation of Workpiece Temperature Variation in End Milling Considering Flank Rubbing Effect[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 73: 71-86.
- [3] LIU Nian-cong, ZOU Xing, YUAN Jia, et al. Performance Evaluation of Castor Oil-Ethanol Blended Coolant under Minimum Quantity Lubrication Turning of Difficult-to-Machine Materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 1-10.
- [4] 高腾, 李长河, 张彦彬, 等. 纳米增强生物润滑剂 CFRP 材料去除力学行为与磨削力预测模型[J]. 机械工程学报, 2022.
- GAO Teng, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Mechanical Behavior of Material Removal and Predictive Force Model for CFRP Grinding Using Nano Reinforced Biological Lubricant[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022.
- [5] 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.
- LIU Ming-zheng, LI Chang-he, CAO Hua-jun, et al. Research Progresses and Applications of CMQL Machining Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 529-550.
- [6] ZHANG Yan-bin, LI Hao-nan, LI Chang-he, et al. Nano-Enhanced Biolubricant in Sustainable Manufacturing: from Processability to Mechanisms[J]. Friction, 2022, 10(6): 803-841.
- [7] 黄水泉, 李中亚, 姚伟强, 等. 荷电植物润滑油的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 371-378.
- HUANG Shui-quan, LI Zhong-ya, YAO Wei-qiang, et al. Tribological Performance of Charged Vegetable Lubricants[J]. Tribology, 2014, 34(4): 371-378.
- [8] KHAN M M A, MITHU M A H, DHAR N R. Effects of Minimum Quantity Lubrication on Turning AISI 9310 Alloy Steel Using Vegetable Oil-Based Cutting Fluid[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (15/16): 5573-5583.
- [9] 施壮, 郭树明, 刘红军, 等. 生物润滑剂微量润滑磨削 GH4169 镍基合金性能实验评价[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 71-84.
- SHI Zhuang, GUO Shu-ming, LIU Hong-jun, et al. Experimental Evaluation of Minimum Quantity Lubrication of Biological Lubricant on Grinding Properties of GH4169 Nickel-Base Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 71-84.
- [10] XU Wen-hao, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Electrostatic Atomization Minimum Quantity Lubrication Machining: From Mechanism to Application[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(4): 042003.
- [11] 吕涛, 黄水泉, 胡晓冬, 等. 静电微量润滑气雾特性及其切削加工性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 129-138.
- LYU Tao, HUANG Shui-quan, HU Xiao-dong, et al. Study on Aerosol Characteristics of Electrostatic Minimum Quantity Lubrication and Its Turning Performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 129-138.
- [12] 袁松梅, 朱光远, 王莉. 绿色切削微量润滑技术润滑剂特性研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 131-140.
- YUAN Song-mei, ZHU Guang-yuan, WANG Li. Recent Progress on Lubricant Characteristics of Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technology in Green Cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(17): 131-140.
- [13] 孔魁, 胡志强, 姚伟强, 等. 静电喷雾润滑液滴的粒径分布特性研究[J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1472-1476.
- KONG Kui, HU Zhi-qiang, YAO Wei-qiang, et al. Sizes Distribution Characteristics of Cutting Fluid Roplets for Electrostatic Atomization Minimum Quantity Lubrication[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1472-1476.
- [14] 张晓阳, 李长河, 张彦彬, 等. 电场参数对雾化特性及微量润滑磨削性能影响的实验研究[J]. 制造技术与机床, 2018(10): 105-111.
- ZHANG Xiao-yang, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Experimental Study of Effect of Electric Field Parameters on Atomization Characteristics and Grinding Performance of Minimal Quantity Lubrication[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(10): 105-111.
- [15] 贾东洲, 张乃庆, 刘波, 等. 静电雾化微量润滑粒径分布特性与磨削表面质量评价[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(3): 89-95.
- JIA Dong-zhou, ZHANG Nai-qing, LIU Bo, et al. Particle Size Distribution Characteristics of Electrostatic Minimum Quantity Lubrication and Grinding Surface Quality Evaluation[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(3): 89-95.
- [16] 贾东洲, 李长河, 张彦彬, 等. 钛合金生物润滑剂电牵引磨削性能及表面形貌评价[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 198-211.
- JIA Dong-zhou, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Evaluation of Grinding Performance and Surface Morphology of Titanium Alloy Biological Lubricant by Electric Traction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 198-211.
- [17] HUANG Shui-quan, WANG Zheng, YAO Wei-qiang, et al.

- Tribological Evaluation of Contact-Charged Electrostatic Spray Lubrication as a New Near-Dry Machining Technique[J]. *Tribology International*, 2015, 91: 74-84.
- [18] XU Xue-feng, FENG Bo-hua, HUANG Shui-quan, et al. Capillary Penetration Mechanism and Machining Characteristics of Lubricant Droplets in Electrostatic Minimum Quantity Lubrication (EMQL) Grinding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 571-578.
- [19] XU Xue-feng, LV Tao, LUAN Zhi-qiang, et al. Capillary Penetration Mechanism and Oil Mist Concentration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanoparticle Fluids in Electrostatic Minimum Quantity Lubrication (EMQL) Milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5/6/7/8): 1937-1951.
- [20] 林建斌, 吕涛, 黄水泉, 等. 基于静电微量润滑技术的磨削加工性能试验研究[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(23): 2783-2791.
- LIN Jian-bin, LYU Tao, HUANG Shui-quan, et al. Experimental Study on Grinding Performance Based on Electrostatic Micro-Lubrication Technology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(23): 2783-2791.
- [21] 林铁宇, 徐锦渊, 李超, 等. 基于静电微量润滑的  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  铝合金高速铣削能量消耗研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(6): 317-326.
- LIN Tie-yu, XU Jin-yang, LI Chao, et al. Energy Consumption of High-Speed Milling of  $\text{AlSi}_7\text{Mg}$  Aluminum Alloys under the Electrostatic Minimum Quantity Lubrication[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(6): 317-326.
- [22] DUAN Zhen-ya, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Milling Surface Roughness for 7050 Aluminum Alloy Cavity Influenced by Nozzle Position of Nanofluid Minimum Quantity Lubrication[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 34(6): 33-53.
- [23] LACALLE L, ANGULO C, LAMIKIZ A, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Spray Cutting Fluids in High Speed Milling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 172(1): 11-15.
- [24] BALAN A S S, KULLARWAR T, VIJAYARAGHAVAN L, et al. Computational Fluid Dynamics Analysis of MQL Spray Parameters and Its Influence on Superalloy Grinding[J]. *Machining Science and Technology*, 2017, 21(4): 603-616.
- [25] ISKANDAR Y, TENDOLKAR A, ATTIA M H, et al. Flow Visualization and Characterization for Optimized MQL Machining of Composites[J]. *CIRP Annals*, 2014, 63(1): 77-80.
- [26] 刘德伟, 刘红军, 周宗明, 等. 铝合金轮毂柔性夹具设计与分析[J]. *工具技术*, 2022, 56(10): 75-82.
- LIU De-wei, LIU Hong-jun, ZHOU Zong-ming, et al. Design and Analysis of Flexible Fixture for Aluminum Alloy Hub[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(10): 75-82.
- [27] 张小帆, 李礼夫, 刘丰林. 柴油发动机缸内进气流场的层析图像诊断法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 15-20.
- ZHANG Xiao-fan, LI Li-fu, LIU Feng-lin. Tomographic Image Diagnosis of Intake Airflow Field in Diesel Engine Cylinder[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(4): 15-20.
- [28] DUAN Zhen-ya, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Mechanical Behavior and Semiempirical Force Model of Aerospace Aluminum Alloy Milling Using Nano Biological Lubricant[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, 18(3): 4.
- [29] DORONINA O A, BAKHVALOV P A, KOZUBSKAYA T K. Numerical Study of Acoustic Radiation Dynamics of a Rankine Vortex[J]. *Acoustical Physics*, 2016, 62(4): 467-477.
- [30] MARUDA R W, KROLCHYK G M, FELDSHTEIN E, et al. A Study on Droplets Sizes, Their Distribution and Heat Exchange for Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 100: 81-92.
- [31] 洪远, 孙聪, 修世超, 等. 磨粒强化加工表面材料动态再结晶行为的研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(9): 53-69.
- HONG Yuan, SUN Cong, XIU Shi-chao, et al. Investigation on Dynamic Recrystallization Behavior of Abrasive Grinding Hardening Surface[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(9): 53-69.
- [32] 孙聪, 修世超, 李清良, 等. 关联系统动静态特征端面磨削表面创成机理[J]. *表面技术*, 2021, 50(12): 35-43.
- SUN Cong, XIU Shi-chao, LI Qing-liang, et al. Mechanism of Surface Creation for Dynamic and Static Feature End Grinding of Associated Systems[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(12): 35-43.
- [33] LIU Ming-zheng, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Analysis of Grinding Mechanics and Improved Grinding Force Model Based on Randomized Grain Geometric Characteristics[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022.
- [34] YANG Yu-ying, YANG Min, LI Chang-he, et al. Machinability of Ultrasonic Vibration-Assisted Micro-Grinding in Biological Bone Using Nanolubricant[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, 18(1): 1.
- [35] ZHANG Yan-bin, LI Wen-yi, TANG Li-zhi, et al. Abrasive Water Jet Tool Passivation: from Mechanism to Application[J]. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2023, 3(1): 2022018.

责任编辑: 蒋红晨