纳米流体静电雾化和同轴静电雾化润滑的加工性能对比分析与综合评价

苏 宇[1*] 丁佳庆[1] 杨庆香[2] 徐文杰[1] 黄俊辉[1]
1.江苏科技大学机械工程学院,镇江,212100
2.合肥万力轮胎有限公司,合肥,230000

摘要:研究了水基和油基纳米流体静电雾化润滑及不同外/内流量比的纳米流体同轴静电雾化润滑的荷电与雾化特性及润湿性能,对比分析了这些条件下的铝合金铣削性能,并结合熵权-逼近理想解排序法对铣削性能进行了综合评价。结果表明,纳米流体同轴静电雾化润滑的铣削性能均优于纳米流体静电雾化润滑,其中外/内流量比为2∶1的纳米流体同轴静电雾化润滑表现出最佳的铣削性能。这归因于其优异的荷电性能与雾化效果、良好的润湿性能及该外/内流量比下纳米流体复合雾滴优异的冷却润滑能力。相比于纳米流体静电雾化润滑和其他外/内流量比的纳米流体同轴静电雾化润滑,外/内流量比为2∶1的纳米流体同轴静电雾化润滑的铣削力和刀具磨损分别减小了3.52%~12.47%和18.33%~57.41%。

关键词:纳米流体;静电雾化润滑;同轴静电雾化润滑;荷电性能;润湿性能;铝合金铣削;熵权-逼近理想解排序法

中图分类号:TB383.1;TG501.5

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.008 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Comparative Analysis and Comprehensive Evaluation of Processing Performance for Nanofluid Electrostatic Atomization and Coaxial Electrostatic Atomization Lubrication

SU Yu[1*] DING Jiaqing[1] YANG Qingxiang[2] XU Wenjie[1] HUANG Junhui[1]
1.College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212100
2.Hefei Wanli Tire Co., Ltd., Hefei, 230000

Abstract: The charge and atomization performance as well as wetting property of water-based and oil-based nanofluid electrostatic atomization lubrication and nanofluid coaxial electrostatic atomization lubrication with different external-internal flow ratios were studied herein. The milling performance of aluminum alloy under these conditions was compared and analyzed, and the milling performance was comprehensively evaluated by the entropy weight-TOPSIS method. The results show that the milling performance of nanofluid coaxial electrostatic atomization lubrication is better than that of nanofluid electrostatic atomization lubrication. The nanofluid coaxial electrostatic atomization lubrication with an external-internal flow ratio of 2∶1 shows the best milling performance. This is attributed to its superior charge performance, atomization effect, and excellent wetting property, as well as the outstanding cooling and lubrication capabilities of nanofluid composite droplets under this external-to-internal flow ratio. Compared with nanofluid electrostatic atomization lubrication and nanofluid coaxial electrostatic atomization lubrication with other external-internal flow ratios, the milling force and tool wear decreased by 3.52%-12.47% and 18.33%-57.41%, respectively, under the 2∶1 external-to-internal flow ratio of nanofluid coaxial electrostatic atomization lubrication.

Key words: nanofluid; electrostatic atomization lubrication; coaxial electrostatic atomization lubrication; charge performance; wetting property; aluminum alloy milling; entropy weight-technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

0 引言

在金属切削加工过程中,由于刀具-工件间的挤压和摩擦导致加工区域积聚大量的热量,进而引发刀具磨损加快、工件热变形、热损伤等问题[1]。传统浇注式冷却方式虽能提供冷却和润滑以改善上述问题,但受接触区高压和主运动"气障层"[2]的影响,实际有效发挥作用的切削液仅有

收稿日期:2025-09-05
基金项目:国家自然科学基金(52175411)

5%～30%[3]。此外，这种冷却方法在使用与排放中存在着诸多弊端，如资源浪费、危害环境、损害人体健康等[4]。微量润滑（minimum quantity lubrication，MQL）通过压缩气体将少量润滑剂雾化，并以高速率喷射至加工区域来实现冷却润滑，它作为一种典型的绿色冷却润滑技术受到各国学者的积极探索。随着绿色制造技术的发展，衍生出多种MQL增强技术以提升其冷却润滑效果，如低温MQL[5]、油膜液滴MQL[6]、纳米流体MQL[7]等。然而，这些增强技术在使用过程中均由于压缩空气作用而在工作环境中产生较高浓度的油雾，对操作人员的健康造成损伤。

针对上述问题，学者们提出了电驱动雾化润滑技术，主要包括静电雾化润滑（electrostatic atomization lubrication，EAL）和同轴静电雾化润滑（coaxial electrostatic atomization lubrication，CEAL）两类。EAL是少量润滑介质在高压静电场中荷电，并在库仑力的作用下克服表面张力，破裂成荷电液滴群[8]。文献[9-10]探讨了液体荷电方式，并深入分析了液体荷电后的表面张力和静电雾化机理。文献[11]构建了静电雾化试验装置，并在不同电压、流量、喷嘴角度与距离下研究了石墨油基和水基纳米流体的静电雾化形态，获得了稳定雾化的参数范围。文献[12]通过瞬态换热试验研究了水基纳米流体静电雾化的冷却能力，发现电压、流量及纳米流体体积分数的增大均可提高水基纳米流体静电雾化的临界热流密度。文献[13]发现在钛合金铣削中，纳米流体静电雾化润滑（nanofluid electrostatic atomization lubrication，NFEAL）因有效输送雾滴和纳米流体的优异性能不仅产生了较MQL明显低的环境油雾浓度，而且抑制刀具磨损效果优于EAL。CEAL是使用静电场将作为外/内流体的润滑剂/水雾化成带电复合液滴[14]。文献[15]在EAL和CEAL条件下研究钛合金铣削特性与环境性能，发现CEAL相比EAL在降低刀具磨损和环境油雾浓度方面表现更为优越。他们还发现纳米流体同轴静电雾化润滑（NFCEAL）可获得更好的加工效果，并通过摩擦与铣削试验确定了NFCEAL的最佳外流体、内流体分别为LB2000植物性润滑油和体积分数为0.3%的石墨水基纳米流体[16-18]。

NFEAL和NFCEAL在实际加工中的应用主要取决于其对加工性能的改善效果。然而，目前缺乏对NFEAL和NFCEAL加工性能的对比与评价研究，进而影响它们的恰当应用。本文探究了水基和油基NFEAL及不同外/内流量比NFCEAL的荷电与雾化特性及润湿性能，并通过铝合金铣削试验对比分析了它们的铣削力、铣削温度及刀具磨损。在此基础上，采用熵权-逼近理想解排序法（TOPSIS）综合评估了它们的铣削性能。

1　试验方案

1.1　纳米流体的制备

NFEAL采用体积分数0.3%石墨水基和油基纳米流体。NFCEAL以LB2000润滑油与0.3%石墨水基纳米流体为外流体和内流体。以去离子水和LB2000为基液，以35 nm粒径的纳米石墨为纳米颗粒，采用两步法制备上述水基和油基纳米流体。为确保良好的分散稳定性，在制备石墨水基纳米流体时加入十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）作为分散剂。利用FA2004B型电子天平依次称量纳米石墨、分散剂和基液，再使用SN-MS-1D型磁力搅拌器和KQ-100DE型超声清洗机将纳米石墨分散至基液中。石墨水基和油基纳米流体制备时，所用的超声振动时间分别为2 h和1 h，该时间经静止沉淀试验优化得到[18]。

1.2　荷电与雾化特性及润湿性测试

对于NFEAL和NFCEAL，使用的流体总流量均为21 mL/h。在NFCEAL中，流体总流量包括外/内流量，所用的外/内流量组合具体为14/7、10.5/10.5、7/14、5.25/15.75（流量单位为mL/h），对应的外/内流量比值分别为2∶1、1∶1、1∶2、1∶3。这4组外/内流量比的NFCEAL表示为NFCEAL（2∶1）、NFCEAL（1∶1）、NFCEAL（1∶2）、NFCEAL（1∶3）。通过上述流量下的雾化试验，确定NFEAL和NFCEAL形成稳定雾化状态的公共电压U为−7.5 kV，后续试验电压统一设为该值。

荷电性能影响NFEAL和NFCEAL的雾化效果，进而影响其效能的发挥。雾化电流是NFEAL和NFCEAL中荷电雾滴传输的电流，可从整体上反映流体NFEAL和NFCEAL的荷电性能。在图1所示的荷电试验平台上，采用与金属板相连的Hest122型皮安表采集和测量NFEAL和NFCEAL的雾化电流。每组雾化电流试验进行3次，取平均值作为最终电流值。根据NFEAL和NFCEAL的雾化原理，搭建图2所示的雾滴粒径测量平台。流体在通电喷嘴与环形接地电极间的电场作用下形成雾滴，并喷至载玻片。为防止雾滴聚集，采集雾滴时载玻片匀速移动。利用奥林巴斯显微镜（型号DSX500）拍摄载玻片上的雾滴图像，并使用图像处理软件对图片进行灰度和二值化处理，识别、测量雾滴直径。每组雾化

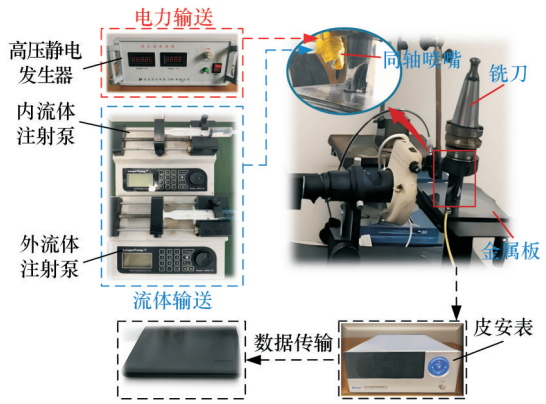
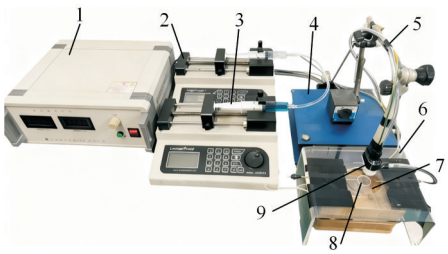


图1 荷电试验平台

Fig.1 Charging test platform



1. 高压静电发生器；2. 内流体注射泵；3. 外流体注射泵；4. 铁架台；5. 支架；6. 绝缘接地台；7. 载玻片；8. 环形接地电极；9. 同轴喷嘴

图2 雾滴粒径测量平台

Fig.2 Droplet size measurement platform

试验进行4次，求取雾滴直径平均值用于分析。

润湿性能反映液体在固体表面上的扩展能力，亦为冷却润滑性能的重要影响因素，通常以液滴表面张力和润湿角来表征。为此，本文构建了测量荷电液滴表面张力和润湿角的润湿试验平台，如图3所示。流体经通电喷嘴充电后，在出口处形成荷电液滴。当液滴增大至不能被其表面张力所抗衡时，会脱离喷嘴滴落至烧杯中。利用FA2004B型电子天平称量滴落的40滴液滴的质量，并取平均值作为单个液滴质量。在此基础上，通过液滴表面张力与重力平衡关系[19]，计算得到荷电液滴的表面张力。每组表面张力试验进行3次，取平均值作为最终表面张力值。液滴由喷嘴滴落至绝缘层后，经通电电极针电晕荷电，利用视频显微镜拍摄并记录其润湿过程，利用量角法测量其润湿角。每组润湿试验进行两次，以润湿角平均值作为最终值。

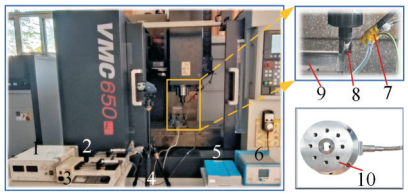


图3 润湿试验平台

Fig.3 Wetting test platform

1.3 铣削加工试验

在VMC650E数控铣床上进行NFEAL和NFCEAL铣削试验，试验平台如图4所示。工件材料为铝合金6061，尺寸为101 mm×100 mm×80 mm。铣刀采用R390-11T308M-KMH13A型号的硬质合金刀片。具体铣削试验条件见表1。铣削方式为顺铣。在表1试验条件下，对比分析NFEAL和NFCEAL的切削力、切削温度以及刀具后刀面磨损，评估它们的加工性能。采用Kistler 9272型四分量压电测力仪测量铣削力，并通过公式$F=(F_x^2+F_y^2+F_z^2)^{1/2}$计算铣削合力，其中，$F_x$、$F_y$和$F_z$分别为$x$、$y$和$z$三个方向铣削力峰值的平均值。利用高精度红外热像仪（型号FLIR A615）采集记录加工区域的铣削温度。以采集到的温度峰值的均值作为铣削温度。每组铣削力和铣削温度试验进行3次，取平均值作为最终结果。使用奥林巴斯显微镜（型号DSX500）对硬质合金刀具后刀面磨损进行观测。



1. 高压静电发生器 2. 内流体注射泵 3. 外流体注射泵
4. 红外热像仪 5. 数据采集器 6. 电荷放大器
7. 同轴喷嘴 8. 铣刀 9. 工件 10. 测力仪

图4 铣削试验平台

Fig.4 Milling test platform

表1 铣削试验条件

Tab.1 Milling test conditions

试验参数	数值	试验参数	数值
喷嘴角度	35°	每齿进给量f_z	0.05 mm
喷射距离	20 mm	轴向切深a_p	1 mm
铣削速度v_c	275 m/min	径向切深a_e	0.5 mm

2 结果与讨论

2.1 荷电与雾化性能

图5所示为NFEAL和NFCEAL的雾化电流与雾滴直径，可见，在NFEAL条件下，石墨水基NFEAL（graphite water-based NFEAL，GWNFEAL）的雾化电流明显高于石墨油基NFEAL（graphite oil-based NFEAL，GONFEAL）的雾化电流。这是因为石墨水基纳米流体的电导率要远高于石墨油基纳米流体，具有更多的自由离子及更高的离子迁移率，可快速荷电。在NFCEAL条

件下，随着内流体流量的增大，外/内流量比减小，雾化电流呈现先增大后减小的趋势。因高荷电能力，作为内流体的石墨水基纳米流体为NFCEAL形成的驱动流体[15]。NFCEAL的荷电性能主要取决于内流体。内流体流量增大使得参与荷电的内流体增多，雾化电流增大。然而，内流体流量的进一步增加加快了其流速，缩短了荷电时间，造成荷电不充分，雾化电流下降。当外/内流量比为1∶1时，荷电效率与流速之间达到平衡，此时雾化电流达到峰值。虽然NFCEAL中内流体流量低于NFEAL流量，但其荷电性能仍显著优于NFEAL。这归因于内流体（石墨水基纳米流体）的高荷电能力和充足的荷电时间。NFCEAL(1∶1)的荷电性能最佳，其次为NFCEAL(2∶1)，而GONFEAL荷电性能最差。

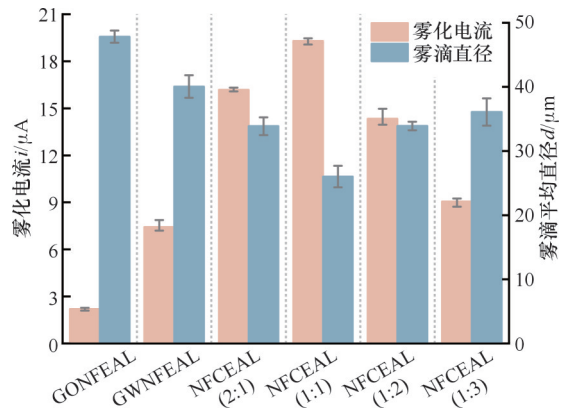


图5　雾化电流与雾滴直径

Fig.5　Atomizing current and droplet size

在NFEAL和NFCEAL中，除流体黏度和表面张力外，雾滴粒径主要受流体在静电雾化和同轴静电雾化中的荷电性能的影响。荷电性能的提高可改善雾化效果，使雾滴粒径减小。正由于此，NFCEAL产生了较NFEAL更小的雾滴直径，并且其雾滴直径随着外/内流量比的减小呈现先减小后增大的趋势。图5中数据表明，NFCEAL(1∶1)的雾滴直径最小，其次为NFCEAL(2∶1)，而GONFEAL的雾滴直径最大。这与反映流体荷电性能的雾化电流结果对雾化效果的影响是一致的。由于高的流体荷电性能和石墨水基纳米流体的低黏度，GWNFEAL的雾滴直径小于GONFEAL。另外，需要说明的是图中NFCEAL的雾滴直径为所形成的纳米流体复合雾滴的外径，其内径可根据外/内流量比计算得到。

2.2　润湿性能

图6所示为纳米流体液滴和纳米流体复合液滴在不同电压下的表面张力F_s和U=−7.5 kV下的润湿角。由图6a可以看出，随着施加于电极针的电压U的升高，液滴表面张力均呈现下降趋势。这是因为经电极针电晕荷电后，液滴表面带有同种电荷，因电荷间库仑斥力作用减小了液滴表面张力。当电压从0增加至−7.5 kV时，石墨油基纳米流体液滴和石墨水基纳米流体液滴的表面张力最大降幅分别为14.6%和18.7%，而纳米流体复合液滴(2∶1)、(1∶1)、(1∶2)、(1∶3)的表面张力最大降幅分别为42%、41.8%、38.5%和35.5%。显然，荷电后，纳米流体复合液滴的表面张力降幅明显高于纳米流体液滴，其原因在于纳米流体复合液滴的荷电性能更强（图5），增强的库仑斥力进一步削弱了分子间作用力，促进了液滴的扩展和变形。尽管石墨水基纳米流体的荷电能力优于石墨油基纳米流体，但它未荷电时的表面张力(40.2 mN/m)高于石墨油基纳米流体(30.5 mN/m)，进而导致它在−7.5 kV下的表面张力仍高于石墨油基纳米流体。由于更好的荷电性能，−7.5 kV下纳米流体复合液滴的表面张力低于纳米流体液滴，并且随外/内流量比的减小呈现先减小后增大的趋势。−7.5 kV下液滴润湿角实测结果如图6b所示。石墨油基纳米流体荷电后的表

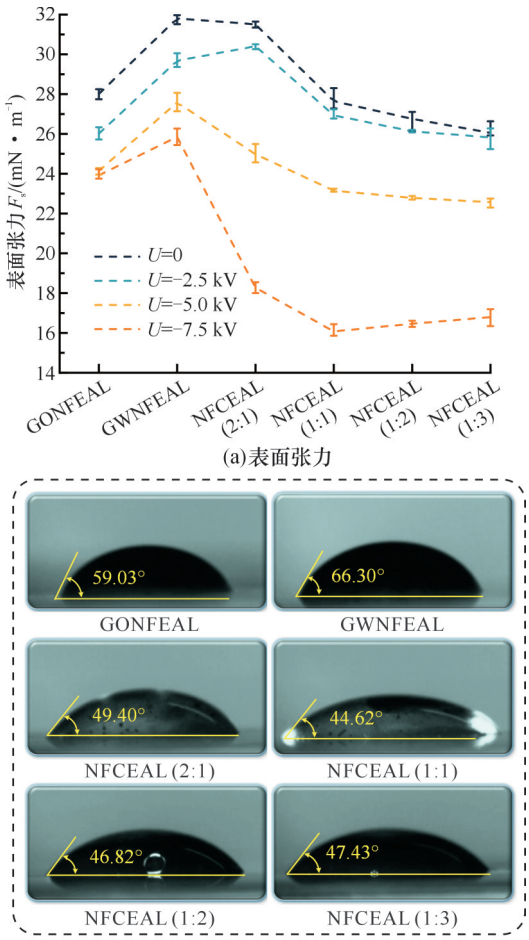


图6　荷电液滴润湿性

Fig.6　Charged droplets' wettability

面张力低于石墨水基纳米流体，促进了其液滴在固体表面的扩展，使得石墨油基纳米流体液滴的润湿角小于石墨水基纳米流体液滴，展现更好的润湿性能。因纳米流体复合液滴显示了较纳米流体液滴更强的荷电性能和更小的表面张力，其润湿角小于纳米流体液滴，润湿性能更佳。此外，纳米流体复合液滴润湿角随外/内流量比的变化趋势与其表面张力一致。−7.5 kV下荷电液滴表面张力和润湿角从小到大排序均为：纳米流体复合液滴(1∶1)、纳米流体复合液滴(1∶2)、纳米流体复合液滴(1∶3)、纳米流体复合液滴(2∶1)、石墨油基纳米流体液滴、石墨水基纳米流体液滴。纳米流体复合液滴(1∶1)表现出最小的表面张力和润湿角。这是由于其荷电性能最强(图5)，液滴表面的库仑斥力显著削弱了分子间作用力，降低了表面张力，改善了润湿性。

2.3 铣削性能

力、温度和刀具磨损是评价加工性能的重要指标。图7所示为NFEAL和NFCEAL条件下的铣削力与温度。冷却作用可降低温度，但同时减少加工材料的热软化效应，进而导致力增大和相应的温度增加。而润滑作用可减少加工界面的摩擦，进而降低力和温度。可见，降低力和温度的效果取决于冷却润滑综合作用。GWNFEAL向加工区供给相对高流量(21 mL/h)的具有高冷却性能的石墨水基纳米流体，获得了最低的铣削温度，而其优异的冷却作用也导致加工材料热软化效应显著降低，进而使该条件下的铣削力达到最大。因高黏度和纳米石墨的层间滑移效应，石墨油基纳米流体具有优异的润滑能力。虽然GONFEAL使用高润滑性能的石墨油基纳米流体，并且其流量高于NFCEAL中LB2000润滑油流量，但其荷电、雾化及润湿性能远不及

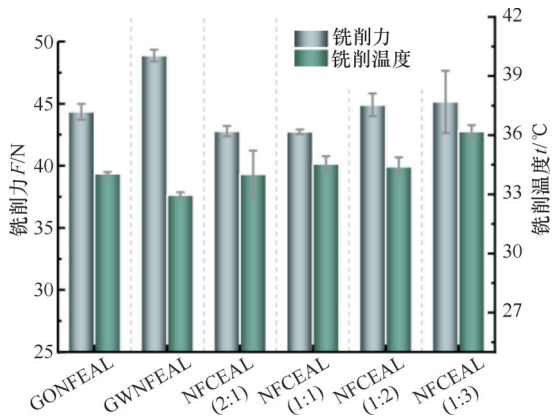


图7 NFEAL和NFCEAL条件下的铣削力与温度

Fig.7 Milling force and temperature under NFEAL and NFCEAL conditions

NFCEAL，形成的雾滴并不能有效渗透加工区，导致其并未获得最小的铣削力。NFCEAL中，许多细小的纳米流体复合液滴进入加工界面并快速铺展成润滑膜。水基纳米流体液滴吸收界面摩擦热而蒸发，进而强化润滑膜。纳米石墨协同润滑膜减少界面摩擦。在合适外/内流量比(2∶1和1∶1)所带来的冷却润滑作用下，NFCEAL显示了较GONFEAL更小的铣削力。NFCEAL的优异荷电、雾化及润湿性能可使纳米流体复合液滴快速进入并覆盖加工区，并且水基纳米流体液滴的冷却作用强化了润滑膜，这些导致了润滑膜厚度增加。而增厚的润滑膜限制了热量的散发与传递，使热量滞留于加工区，削弱冷却效果，因此，NFCEAL条件下的铣削温度整体上高于GONFEAL。

图8所示为NFEAL和NFCEAL条件下硬质合金刀具后刀面磨损形貌及大小。GONFEAL时铝合金明显黏附于刀具后刀面(图8a)，形成了积屑瘤，这表明石墨油基纳米流体的低荷电能力导致的雾化效果降低限制了其冷却润滑作用的发挥。而在GWNFEAL和NFCEAL条件下刀具后刀面未见明显的铝合金黏附(图8b～图8f)。铝合金典型黏附所导致的黏结磨损使得GONFEAL产生了最大的后刀面磨损。由于提升的荷电、雾化及润湿性能及纳米流体复合液滴的优异冷却润滑能力，NFCEAL条件下刀具后刀面磨损较NFEAL低34.35%～46.33%。NFCEAL(2∶1)获得了最小的后刀面磨损，其次为NFCEAL(1∶1)。与NFEAL和其他外/内流量比的NFCEAL相比，NFCEAL(2∶1)的后刀面平均磨损减小了18.33%～57.41%。

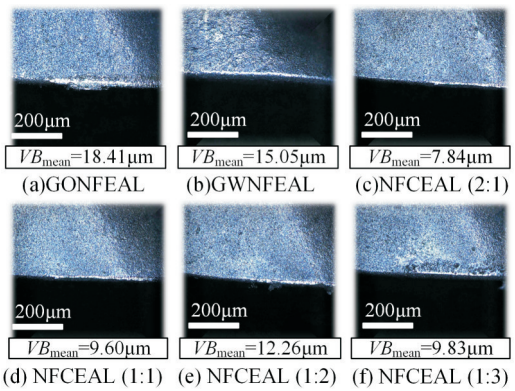


图8 NFEAL和NFCEAL条件下的刀具后刀面磨损

Fig.8 Tool flank wear under NFEAL and NFCEAL conditions

2.4 基于熵权-TOPSIS的铣削性能综合评价

铣削性能涉及多个指标，需要对其进行综合

评价。TOPSIS是一种多目标决策方法，其核心在于通过衡量评价对象与正理想解和负理想解的相对距离进行排序，可提供科学的优劣判定依据。正理想解代表属性值最优的理想状态，负理想解则对应最差状态。各评价对象的优劣由其接近正理想解且远离负理想解的程度决定，从而确定最优评价对象。本文以铣削力、温度、后刀面平均磨损为评价指标，利用熵权-TOPSIS法对NFEAL和NFCEAL条件下的铝合金铣削性能进行综合评价。熵权-TOPSIS评价方法的计算步骤如下[20-21]。

1)以评价对象的评价指标数据为基础，构建决策矩阵：

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：x_{ij}为第i个评价对象的第j个评价指标数据，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$。

2)量纲一处理。不同指标的量纲不同，需要将决策矩阵中的数据进行量纲一处理，以实现标准化。本文中的三个评价指标越小，铣削性能越好，因此它们为成本型指标，量纲一公式为

$$x'_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{2}$$

3)采用熵权法确定评价指标权重。信息熵越大，表明指标的信息量越小，该指标在综合评价中的贡献和权重也越低；反之，权重越高。通过计算指标的比重f_{ij}和熵值H_j确定权重W_j。计算公式为

$$f_{ij}=x'_{ij}/\sum_{i=1}^{m}x'_{ij} \tag{3}$$

$$H_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}f_{ij}\ln f_{ij} \tag{4}$$

$$W_j=(1-H_j)/(n-\sum_{j=1}^{n}H_j) \tag{5}$$

4)构造加权归一化决策矩阵。将归一化矩阵元素r_{ij}按各指标权重加权后，得到加权归一化决策矩阵$\boldsymbol{U}$：

$$r_{ij}=x_{ij}/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}^2} \tag{6}$$

$$U_{ij}=W_jr_{ij} \tag{7}$$

5)计算欧氏距离。首先，确定正负理想解。对于成本型指标，正理想解U_j^+取$\boldsymbol{U}$中的最小值，负理想解U_j^-取$\boldsymbol{U}$中的最大值：

$$U_j^+=\min(U_{ij}) \tag{8}$$

$$U_j^-=\max(U_{ij}) \tag{9}$$

在理想解确定的基础上，计算各评价对象与正、负理想解的欧氏距离，以衡量各评价对象相对于正理想解和负理想解的偏离程度，具体公式如下：

$$S_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(U_{ij}-U_j^+)^2}\qquad i=1,2,\cdots,m \tag{10}$$

$$S_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(U_{ij}-U_j^-)^2}\qquad i=1,2,\cdots,m \tag{11}$$

6)计算相对贴近度R。R的数值范围为[0，1]，其值越接近1表示评价对象越接近正理想解，越远离负理想解，该评价对象越优。其计算式为

$$R=S_i^-/(S_i^-+S_i^+)\qquad i=1,2,\cdots,m \tag{12}$$

通过前述的NFEAL和NFCEAL条件下铝合金铣削试验，可获得3个评价指标的数据(表2)。根据表2中的数据，构建决策矩阵。利用式(2)～式(5)可得铣削力、温度及后刀面磨损的权重分别为0.309、0.322、0.369。依据式(6)～式(12)对NFEAL和NFCEAL计算正、负理想解的欧氏距离及相对贴近度，并根据相对贴近度数值对各电驱动雾化润滑条件进行排序，结果如表3所示。NFCEAL(2∶1)的相对贴近度为1，表明其铣削性能最佳。NFCEAL的铣削性能均优于NFEAL。此外，GWNFEAL的相对贴近度大于GONFEAL。这表明相比于GONFEAL，GWNFEAL可产生更好的铣削性能，更适用于铝合金的铣削加工。

表2　评价指标数据

Tab.2　Evaluation index data

润滑条件	铣削力/N	铣削温度/℃	后刀面磨损/μm
GONFEAL	44.35	34.05	18.41
GWNFEAL	48.89	32.95	15.05
NFCEAL(2∶1)	42.80	34.01	7.84
NFCEAL(1∶1)	42.75	34.55	9.60
NFCEAL(1∶2)	44.90	34.41	12.26
NFCEAL(1∶3)	45.16	36.19	9.83

表3　熵权-TOPSIS评价结果

Tab.3　Entropy weight-TOPSIS evaluation results

润滑条件	S_i^+	S_i^-	R	排序
GONFEAL	0.1255	0.0152	0.1078	6
GWNFEAL	0.0856	0.0418	0.3280	5
NFCEAL(2∶1)	0	0.1269	1.0000	1
NFCEAL(1∶1)	0.0209	0.1062	0.8356	2
NFCEAL(1∶2)	0.0525	0.0742	0.5857	4
NFCEAL(1∶3)	0.0236	0.1023	0.8125	3

在NFEAL中，纳米流体雾滴由电场力输送至加工区，并在加工界面铺展成冷却润滑层，如图9a所示。对于GWNFEAL，水基纳米流体雾滴吸收加工热量而蒸发，而石墨纳米颗粒因其高的热导率和布朗运动强化了这一过程，并且由于其层

状结构中层间范德华作用力弱，石墨纳米颗粒在加工界面易发生剪切滑移，起到润滑作用。而对于GONFEAL，石墨纳米颗粒协同吸附于加工界面的油膜共同发挥润滑效应。尽管GONFEAL的润湿性优于GWNFEAL（图6），但GWNFEAL形成的雾滴尺寸小于GONFEAL（图5），导致更多的水基纳米流体雾滴进入加工区发挥作用，因此，GWNFEAL产生较GONFEAL更好的铣削性能。

在NFCEAL中，LB2000植物性润滑油（外流体）和石墨水基纳米流体（内流体）经喷嘴荷电后在高压静电场作用下雾化成纳米流体复合雾滴，纳米流体复合雾滴亦由电场力输送，到达加工界面后铺展成含水基纳米流体的油膜层（图9b）。水基纳米流体受热蒸发，强化油膜层，并且石墨纳米颗粒还会进入油膜层，与其共同提供润滑作用。与NFEAL相比，NFCEAL形成的雾滴尺寸、表面张力和润湿角小（图5和图6），更多纳米流体复合液滴能够进入加工区，并在加工界面渗透深度更大，提供更有效的冷却润滑，因此，NFCEAL显示了较NFEAL更优的铣削性能。不同外/内流量比的NFCEAL的雾化效果和润湿性能不同。另外，在总流量相同的情况下，外/内流量比的变化会改变向加工区提供的主要起润滑作用的外流体（LB2000植物性润滑油）的用量和主要起冷却作用的内流体（石墨水基纳米流体）的用量。这些使得NFCEAL在不同的外/内流量比下显示不同的冷却润滑性能和铣削性能。由于优异的雾化效果、良好的润湿性能及该外/内流量比下纳米流体复合雾滴的优异冷却润滑能力，

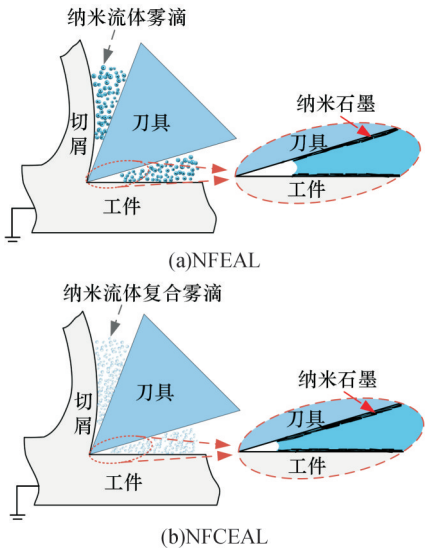


图9 NFEAL和NFCEAL在加工中的冷却润滑机制

Fig.9 Cooling and lubrication mechanisms of NFEAL and NFCEAL during processing

NFCEAL(2∶1)获得了最好的铣削性能。

3 结论

1）因足够的荷电时间和石墨水基纳米流体的高荷电能力，NFCEAL显示了优于NFEAL的荷电性能，进而具有更好的雾化与润湿性能。荷电性能由大到小的排序为NFCEAL(1∶1)、NFCEAL(2∶1)、NFCEAL(1∶2)、NFCEAL(1∶3)、GWNFEAL、GONFEAL；雾滴粒径由小到大的排序为NFCEAL(1∶1)、NFCEAL(2∶1)、NFCEAL(1∶2)、NFCEAL(1∶3)、GWNFEAL、GONFEAL；荷电液滴表面张力和润湿角由小到大的排序均为NFCEAL(1∶1)、NFCEAL(1∶2)、NFCEAL(1∶3)、NFCEAL(2∶1)、GONFEAL、GWNFEAL。

2）GWNFEAL因优异的冷却作用产生了最低的铣削温度和最大的铣削力，而由于低荷电性能降低了雾化效果，GONFEAL并未产生最小的铣削力，并且铝合金还典型黏附于该条件下的刀具后刀面，进而使得该条件下的后刀面磨损最大。相比于NFEAL，NFCEAL因荷电、雾化及润湿性能的改善和纳米流体复合液滴的优异冷却润滑能力产生了明显减小的后刀面磨损，特别在外/内流量比为2∶1和1∶1时。此外，在合适外/内流量比(2∶1和1∶1)所带来的冷却润滑作用下，NFCEAL还产生了低于GONFEAL的铣削力。

3）熵权-TOPSIS综合评价结果表明，NFCEAL的铣削性能均优于NFEAL。NFCEAL(2∶1)的铣削性能最佳，其次为NFCEAL(1∶1)。GWNFEAL较GONFEAL更适合用于铝合金的铣削。

4）本文着重对NFEAL和NFCEAL的铣削性能进行了对比分析和综合评价。在后续的研究工作中，将进一步针对不同的加工方式（如车削、钻削等）探究NFEAL和NFCEAL的加工性能，以确定其适用性。

参考文献：

[1] 卢守相，郭塞，张建秋，等. 高性能难加工材料可磨削性研究进展[J]. 表面技术，2022，51(3)：12-42.
LU Shouxiang，GUO Sai，ZHANG Jianqiu，et al. Grindability of High Performance Difficult-to-machine Materials[J]. Surface Technology，2022，51(3)：12-42.

[2] 李修近. 高速湿式铣削加工切削区混合流体场研究[D]. 湛江：广东海洋大学，2016.
LI Xiujin. Research on Mixed Fluid Field of Cutting Zone in High Speed Inner Cooling Milling [D]. Zhanjiang：Guangdong Ocean University，2016.

[3] MIHIĆ S D，CIOC S，MARINESCU I D，et al. Detailed Study of Fluid Flow and Heat Transfer in the Abrasive Grinding Contact Using Computational Fluid Dynamics

Methods[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(4): 041002.

[4] 杨简彰，王成勇，袁尧辉，等. 微量润滑复合增效技术及其应用研究进展[J]. 中国机械工程，2022，33(5)：506-528.
YANG Jianzhang, WANG Chengyong, YUAN Yaohui, et al. State-of-the-art on MQL Synergistic Technologies and Their Applications[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 506-528.

[5] 张高峰，李景焘，王志刚，等. 低温冷风纳米粒子微量润滑磨削轴承钢试验研究[J]. 中国机械工程，2019，30(19)：2342-2348.
ZHANG Gaofeng, LI Jingtao, WANG Zhigang, et al. Experimental Study on Nano-CMQL Grinding of Bearing Steels[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(19): 2342-2348.

[6] AN Q, CAI C, ZOU F, et al. Tool Wear and Machined Surface Characteristics in Side Milling Ti_6Al_4V under Dry and Supercritical CO_2 with MQL Conditions[J]. Tribology International, 2020, 151: 106511.

[7] ZHANG Y, LI H, LI C, et al. Nano-enhanced Biolubricant in Sustainable Manufacturing: from Processability to Mechanisms[J]. Friction, 2022, 10(6): 803-841.

[8] 许浩洁，王军锋，田加猛，等. 不同雾化模式下乙醇静电喷雾冷却换热特性[J]. 工程热物理学报，2021，42(10)：2559-2565.
XU Haojie, WANG Junfeng, TIAN Jiameng, et al. Effects of Spray Mode on Electrospray Cooling Heat Transfer of Ethanol [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(10): 2559-2565.

[9] 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 Dongzhou, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Grinding Performance and Surface Morphology Evaluation of Titanium Alloy Using Electric Traction Bio Micro Lubricant[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 198-211.

[10] 许文昊，李长河，张彦彬，等. 静电雾化微量润滑研究进展与应用[J]. 机械工程学报，2023，59(7)：110-138.
XU Wenhao, LI Changhe, ZHANG Yanbin, et al. Research Progress and Application of Electrostatic Atomization Minimum Quantity Lubrication[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 110-138.

[11] SU Y, TANG Z, WAN R. An Investigation on the Electrostatic Atomization Mode of Nanofluid Using Cutting Tool as Electrode[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(11): 168781401773528.

[12] SU Y, JIANG H, LIU Z. An Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of Electrostatic Spraying Used in Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(5): 1285-1294.

[13] SU Y, LU Q, YU T, et al. Machining and Environmental Effects of Electrostatic Atomization Lubrication in Milling Operation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2773-2782.

[14] 苏宇，吴事凯，姜海. 外流体基液类型对纳米流体同轴静电雾化切削的影响研究[J]. 中国机械工程，2023，34(7)：796-802.
SU Yu, WU Shikai, JIANG Hai. Study on Influences of Base Fluid Type of External Fluid on Nanofluid Coaxial Electrostatic Atomization Cutting [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(7): 796-802.

[15] SU Y, JIANG H, LIU Z. A Study on Environment-friendly Machining of Titanium Alloy Via Composite Electrostatic Spraying [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(5): 1305-1317.

[16] SU Y, CHU Z, GONG L, et al. Assessment of Lubrication Property and Machining Performance of Nanofluid Composite Electrostatic Spraying (NCES) Using Different Types of Vegetable Oils as Base Fluids of External Fluid[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36: 94.

[17] SU Y, LIU J, YOU J, et al. Application of Nanofluid Composite Electrostatic Spraying in Machining of Aluminum Alloy: Effects of External/Internal Fluids[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2025, 12(2): 441-457.

[18] 吴事凯. 纳米颗粒含量与外内流量比对同轴静电雾化切削性能的影响[D]. 镇江：江苏科技大学，2023.
WU Shikai. The Effect of Nanoparticle Content and Flow Rate Ratio on Coaxial Electrostatic Atomization Cutting Performance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.

[19] 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 Jianbin, LYU Tao, HUANG Shuiquan, et al. Experimental Investigation on Grinding Performance Based on EMQL Technology [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(23): 2783-2791.

[20] JEBARAJ M, PRADEEP KUMAR M, YUVARAJ N, et al. Experimental Study of the Influence of the Process Parameters in the Milling of Al6082-T6 Alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(12): 1411-1427.

[21] SEN B, ABOU ILTAF HUSSAIN S, MIA M, et al. Selection of an Ideal MQL-assisted Milling Condition: an NSGA-Ⅱ-coupled TOPSIS Approach for Improving Machinability of Inconel 690[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5): 1811-1829.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：苏　宇*（通信作者），男，1979年生，教授。研究方向为清洁加工理论与技术。E-mail：suyuliu@sohu.com。

本文引用格式：

苏宇，丁佳庆，杨庆香，等. 纳米流体静电雾化和同轴静电雾化润滑的加工性能对比分析与综合评价[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2458-2465.

SU Yu, DING Jiaqing, YANG Qingxiang, et al. Comparative Analysis and Comprehensive Evaluation of Processing Performance for Nanofluid Electrostatic Atomization and Coaxial Electrostatic Atomization Lubrication[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2458-2465.