

# 生物润滑剂微量润滑磨削 GH4169 镍基合金性能实验评价

施壮<sup>1</sup>, 郭树明<sup>1</sup>, 刘红军<sup>2</sup>, 李长河<sup>1</sup>, 张彦彬<sup>1</sup>,  
杨敏<sup>1</sup>, 陈云<sup>3</sup>, 刘波<sup>4</sup>, 周宗明<sup>5</sup>, 聂晓霖<sup>6</sup>

(1.青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;  
2.机械工业信息研究院, 北京 100037; 3.成都工具研究所有限公司, 成都 610500;  
4.四川明日宇航工业有限责任公司, 四川 什邡 618400; 5.汉能(青岛)润滑科技有限公司,  
山东 青岛 266200; 6.南京科润工业介质股份有限公司, 南京 211106)

**摘要:** **目的** 改善蓖麻油的综合润滑性能, 尝试与黏度较小、流动性好的其他植物油混合, 探究混合植物油同纯蓖麻油磨削 GH4169 镍基合金时的润滑性能差异。**方法** 先进行 1:1 混合植物油的探索性实验, 以比磨削能、比磨削力、表面粗糙度、磨削温度为筛选参数, 对筛选出的 3 个较优组同纯蓖麻油做对比, 得出最优组, 从脂肪酸角度分析润滑性能改善原因, 并测量油膜接触角, 进行验证。由于脂肪酸种类及含量的差异造成了润滑性能的不同, 通过调节最优组的不同体积配比, 改变其油液的脂肪酸含量占比, 对相同的评价参数做进一步实验探究, 分析脂肪酸含量占比变化对润滑性能的影响程度, 最后根据表面微观形貌进行验证性分析。**结果** 探索性实验得到的 3 个较优组分别为棕榈油、大豆油、玉米油同蓖麻油的混合组, 发现随着这 3 组的不饱和脂肪酸含量依次提高, 微液滴的接触角逐步减小。蓖麻油/大豆油在 3 组中的磨削温度最低, 为 100.7 °C; 表面微观形貌最优; 接触角最合适, 为 70°; 不饱和脂肪酸含量占比(质量分数)最合适, 为 66.5%。经过不同体积配比, 进一步发现, 随着不饱和脂肪酸占比逐步增大, 润滑性能的评价参数在整体趋势上均阶段性地先减小、后增大, 但在相邻的每种配比之间, 各参数并不随不饱和脂肪酸占比的逐步增大而出现明显规律性。**结论** 油液中的脂肪酸种类、含量占比对润滑性能的改善起着不可或缺的作用。硬脂酸促进皂化反应, 提高成膜能力, 不饱和脂肪酸 C=C 双键结构能够降低油膜密度, 提高油液流动性。蓖麻油同其他植物油混合后, 均不同程度地提高了不饱和脂肪酸比例, 提高了油膜流动性, 因此合适的饱和脂肪酸占比可以兼顾液滴成膜能力和流动性。通过调小不饱和脂肪酸含量占比的变化幅度, 发现饱和脂肪酸占比可以阶段性对润滑性能的改善程度进行调控, 但对润滑性能的精确调控还受到其他多种因素的制约。

**关键词:** 磨削; 植物油; 微量润滑; 理化特性; 表面微观形貌; 比磨削力

**中图分类号:** TG582 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0071-14

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.007

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-11-15

Received: 2021-09-30; Revised: 2021-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010500); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020111)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2020YFB2010500), Key Research and Development Project of Shandong Province (2019JZZY020111)

作者简介: 施壮(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能与洁净精密制造。

Biography: SHI Zhuang (1996—), Male, Master, Research focus: intelligent and clean 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 clean precision manufacturing.

引文格式: 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.

## Experimental Evaluation of Minimum Quantity Lubrication of Biological Lubricant on Grinding Properties of GH4169 Nickel-base Alloy

SHI Zhuang<sup>1</sup>, GUO Shu-ming<sup>1</sup>, LIU Hong-jun<sup>2</sup>, LI Chang-he<sup>1</sup>, ZHANG Yan-bin<sup>1</sup>, YANG Min<sup>1</sup>,  
CHEN Yun<sup>3</sup>, LIU Bo<sup>4</sup>, ZHOU Zong-ming<sup>5</sup>, NIE Xiao-lin<sup>6</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;  
2.Machinery Industry Information Institute, Beijing 100037, China; 3.Chengdu Tool Research Institute Co., Ltd., Chengdu  
610500, China; 4.Sichuan Future Aerospace Industry LLC., Shifang 618400, China; 5.Hanergy (Qingdao) Lubrication  
Technology Co., Ltd., Qingdao 266200, China; 6.Nanjing Kerun Lubricants Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**ABSTRACT:** Castor oil has excellent film-forming ability, but due to its high viscosity and poor fluidity, which limits its application in the field of machining lubrication. In order to improve the comprehensive lubrication performance of castor oil, try to mix it with other vegetable oils with low viscosity and good fluidity, and explore the difference of lubrication performance between mixed vegetable oil and pure castor oil in grinding GH4169 nickel-base alloy. First, the exploratory experiment of 1 : 1 mixed vegetable oil was carried out. Taking the specific grinding energy, specific grinding force, surface roughness and grinding temperature as the screening parameters, the three optimized groups are compared with pure castor oil to obtain the optimal group. The reasons for the improvement of lubricating performance are analyzed from the perspective of fatty acid, and the oil film contact angle was measured for verification; Due to the difference of fatty acid type and content, the lubrication performance is different. By adjusting the different volume ratio of the optimal group, change the fatty acid content proportion of the oil, make further experimental exploration on the same evaluation parameters, analyze the impact of the change of fatty acid content proportion on the lubrication performance, and finally carry out confirmatory analysis according to the surface micro morphology. The three optimal groups obtained from the exploratory experiment are the mixed group of palm oil, soybean oil, corn oil and castor oil. It is found that the contact angle of micro droplets gradually decreased with the increase of the content of unsaturated fatty acids in the three groups. The grinding temperature of castor oil/soybean oil was the lowest in the three groups, which is 100.7 °C; The surface micro morphology is the best; The most suitable contact angle is 70°; The proportion of unsaturated fatty acids is the most appropriate, 66.5%. After different volume ratios, it is further found that with the gradual increase of the proportion of unsaturated fatty acids, the evaluation parameters of lubrication performance decrease first and then increase in the overall trend, but between each adjacent ratio, the parameters do not show obvious regularity with the gradual increase of the proportion of unsaturated fatty acids. The type, content and proportion of fatty acids in oil play an indispensable role in improving lubrication performance. Saponification reaction and improve film-forming ability can be promoted by stearic acid. Unsaturated fatty acid C=C double bond structure can reduce oil film density and improve oil fluidity. After mixing castor oil with other vegetable oils, the proportion of unsaturated fatty acids and oil film fluidity are increased in varying degrees. Therefore, the appropriate proportion of unsaturated fatty acids can take into account the film-forming ability and fluidity of droplets. By reducing the change range of the proportion of unsaturated fatty acids, it is found that the proportion of unsaturated fatty acids can regulate the improvement of lubrication performance in stages, but the accurate regulation of lubrication performance is also restricted by many other factors.

**KEY WORDS:** grinding; vegetable oil; minimum quantity lubrication; physical and chemical properties; surface micro morphology; specific grinding force

镍基合金是以镍为基体, 在 600~1000 °C 的高温下具有较高的强度和硬度<sup>[1]</sup>, 以及较强的组织结构稳定性、抗氧化腐蚀能力<sup>[2]</sup>的一类合金, 被广泛应用于航空喷气发动机和工业燃气轮机的最热端<sup>[3]</sup>。由于镍基合金自身优秀的机械特性, 导致对其加工成为难点, 具有加工时切削力大、切削温度高、加工后表面残余应力大等难加工特性。

近年来, 国内外学者们为了改善镍基合金表面加工质量, 提高镍基合金加工效率, 针对镍基合金难加工特性进行了多方面的研究。覃孟扬等人<sup>[4]</sup>从低温微量润滑方面研究了加工镍基合金 GH4169 对刀具耐用度的影响, 发现随着气体温度的降低, 低温微量润滑加工 GH4169 材料, 可以显著提高刀具寿命。胡建武<sup>[5]</sup>通过摸索和生产实践, 总结了一套新的加工工艺方案

来改善镍基合金圆周台深孔加工时的精度和加工质量。武鑫磊等人<sup>[6]</sup>通过电火花辅助电弧高效铣削技术,对高温镍基合金进行了试验。结果表明,镍基合金材料去除率高达 11 523 mm<sup>3</sup>/min,电极损耗 1.5%左右,可以降低成本,并极大地提高加工效率。Singh 等<sup>[7]</sup>采用 MQL 铣削镍基合金的方式,通过粒子群算法优化切削用量等参数,来更好地实现对工件的加工。学者们通过改变润滑方式、调整加工工艺方案、采用非传统机械加工电火花辅助电弧高效铣削技术、优化切削用量等方面,对加工镍基合金进行了探索,并均取得良好的效果。微量润滑(MQL)作为代替传统浇注式的一种绿色冷却润滑方式<sup>[8]</sup>,如今已被广泛应用在机械加工行业中。该润滑方式在降低磨削液用量的同时,仍能保持同等或更优越的润滑效果<sup>[9]</sup>,因此便有学者尝试通过研究微量润滑磨削液来提高镍基合金工件加工质量。Ryszard Wójcik 等<sup>[10]</sup>选取了两种磨削液在 MQL 工况下对 3 种镍基合金进行了磨削实验,发现 2 种矿物油基磨削液的理化特性对磨削结果影响明显。但是,由于传统切削液往往是以石油附加产物<sup>[11]</sup>作为基础油配制而成的,若不从油液本身解决污染源,即使再少量的切削液,进入环境后仍会造成严重污染。经研究发现,植物油基的理化特性同矿物油基有着很大的差异性。因此,国内外研究者们选择了更易生物降解、更具环境友好性、对人的健康危害更低的植物油基润滑油<sup>[12-13]</sup>作为微量润滑油,进行同传统切削液之间的对比性实验。杨永丰等<sup>[14]</sup>针对拉削负载过大的情况,将蓖麻油、玉米油、芝麻油、橄榄油、大豆油与传统拉削油做拉削性能对比,研究了 5 种植物油对拉削负载和表面粗糙度的影响。结果表明,植物油可以对拉削性能进行改善,其中芝麻油改善拉削性能最佳。Sachin M. Agrawal 等<sup>[15]</sup>将芦荟凝胶同棉籽油进行 1:1 混合加热后,配制成芦荟油,进行 M2 钢的车削 MQL 实验。结果表明,与常规切削液相比,使用芦荟油时的表面粗糙度降低了 6.7%,刀具磨损降低了 0.14%。Wang 等<sup>[16]</sup>通过对 MQL 磨削镍基合金实验,对 7 种植物油与石蜡油的润滑性能进行评价,发现几种植物油均比石蜡油取得了更优的工件表面质量,其中蓖麻油的黏度最大,润滑性能最优。由此可见,植物油基润滑油同矿物油基润滑油在不同加工工况下进行对比,植物油基具有优越的润滑性能。接着,再通过对植物油之间理化特性的对比,从而挑选出润滑性能更优的植物油基润滑油,具有重要

的研究意义。裴宏杰等<sup>[17]</sup>采用 MQL 车削 7075 铝合金,以蓖麻油、玉米油为植物油基,对比分析了微量润滑条件下的润湿角、切削力、切削温度和表面粗糙度,发现蓖麻油更优。Li 等<sup>[18]</sup>选择了 7 种植物油分别作为 MQL 基础油来磨削镍基合金,从植物油脂肪酸总类含量比、分子结构方面进行了分析,发现蓖麻油的润滑能力最好,而棕榈油作为磨削基础油的综合性能最好。

综上所述,研究者已经针对切削液理化特性,将植物油基与矿物油基切削液做了对比研究,并发现植物油基切削液具有更优越的润滑性能,针对植物油之间的差异性进行了试验,分析了植物油中的极性基团、脂肪酸种类、分子结构等对润滑性能的影响程度。但是由于不同植物油中所含有的脂肪酸种类、饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸占比不同,且脂肪酸分子中的碳链长度、基团数量也各有差异,造成了植物油之间的黏度、倾点等理化特性存在很大的差异<sup>[19-20]</sup>。根据这种差异性,考虑将润滑性能优越的单一润滑植物油同其他植物油进行混合配制,汲取各自优势,探究润滑效果能否实现增益效果<sup>[21]</sup>,这种研究目前较少。本文正是依据不同植物油的理化特性,进行混合配制,再从植物油脂肪酸种类以及饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸占比方面,对磨削镍基合金的评定参数同混合植物油的润滑性能做了对照分析。

# 1 实验

## 1.1 材料

实验材料为高温镍基合金 GH4169,其化学成分及力学性能见表 1—2,工件尺寸为 40 mm×30 mm×30 mm。实验采用可降解的植物油作为微量润滑剂,7 种植物油的部分脂肪酸组成见表 3。由表 3 可知,植物油中的不饱和脂肪酸占比较大,而不饱和脂肪酸中的碳碳双键导致油液的抗氧化性差,因此在磨削过程中加入体积分数为 0.2%的维生素 E,可增强油液的抗氧化性能。

表 1 镍基合金化学成分  
Tab.1 Chemical composition of nickel-base alloy wt%

Ni	C	Cr	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Mn	Cu	Fe
50~55	0.08	17~21	5.25	3.1	0.96	1.0	0.95	0.35	0.3	Bal.

表 2 镍基合金力学性能  
Tab.2 Mechanical properties of nickel base alloy

Density/ (g·cm <sup>-3</sup> )	Thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Brinell hardness (HBS)	Elastic modulus/GPa	Tensile strength /GPa	Shear modulus/GPa	Yield stress /MPa	Poisson's ratio
8.24	14.7 (100 ℃)	435	199.9	965	77.2	550	0.3

表 3 7 种植物油的脂肪酸组成  
Tab.3 Partial fatty acid composition of seven vegetable oils

wt%

Parameter	Castor oil	Soybean oil	Rapeseed oil	Maize oil	Peanut oil	Sunflower oil	Palm oil
Oleic acid	2.8	23.0	5.9	32.6	40.8	28.8	36.8
Linoleic acid	3.7	52.4	23.6	51.4	34.5	50.5	10.2
Palmitic acid	0.7	8.9	2.6	1.9	11.9	11.2	45.1
Stearic acid	0.6	3.8	11.7	13.3	4.3	6.5	4.8
Erucic acid	—	—	43.6	—	—	—	—
Octadecanoic acid	—	—	5.0	—	—	—	—
Linolenic acid	—	10.6	3.3	—	—	—	—
Ricinoleic acid	90.9	—	—	—	—	—	—
Saturated fatty acids	52.0	15.0	6.0	13.0	21.0	11.0	35.0
Monounsaturated fatty acids	37.0	24.0	58.0	29.0	49.0	19.0	15.0
Polyunsaturated fatty acids	11.0	61.0	36.0	58.0	30.0	70.0	50.0

## 1.2 方案

在单一植物油中,蓖麻油具有特有的蓖麻酸,因此润滑成膜能力较强<sup>[18]</sup>。但由于蓖麻油黏度过高,流动性能较差,导致磨削过程中热量不能随着油液被带走,使工件加工表面温度过高,限制了其应用于工业生产。为了改善蓖麻油的润滑性能,提高植物油作为微量润滑剂对工件表面加工质量的影响,采用以下方案:先选取流动性较好的 6 组植物油<sup>[13]</sup>,分别将蓖麻油与 6 种植物油混合,进行探索性实验,筛选出 3 个较优组,通过对 3 个较优组进行分析与验证,得出 3 组中的最优组;之后,将蓖麻油与该最优组进行不同体积配比,通过评定参数进一步研究分析,筛选出其中较优的体积配比。

### 1.2.1 不同种植物油与蓖麻油 1 : 1 混合

将蓖麻油与其他 6 种常见植物油分别进行 1 : 1 比例混合,以高温镍基合金 GH4169 作为工件,进行砂轮/工件界面的摩擦学润滑性能实验评价。对比磨削力、比磨削能、表面粗糙度  $Ra$ 、磨削温度及对应温度下的油液黏度进行测量与计算,得出表面质量较优的 3 个混合组,并将这 3 组同纯蓖麻油做对比,分析改善润滑性能的原因,从而得出 3 个较优组中的最优组。实验采用不同混合植物油作为单因素变量控制。

实验过程所需仪器设备主要分为两大部分:第一部分为磨削设备,主要包括数控磨床、微量润滑供液装置、测力仪、热电偶;第二部分为分析测量设备,主要包括黏度计、粗糙度仪、扫描电镜、接触角测量仪。仪器如图 1 所示。

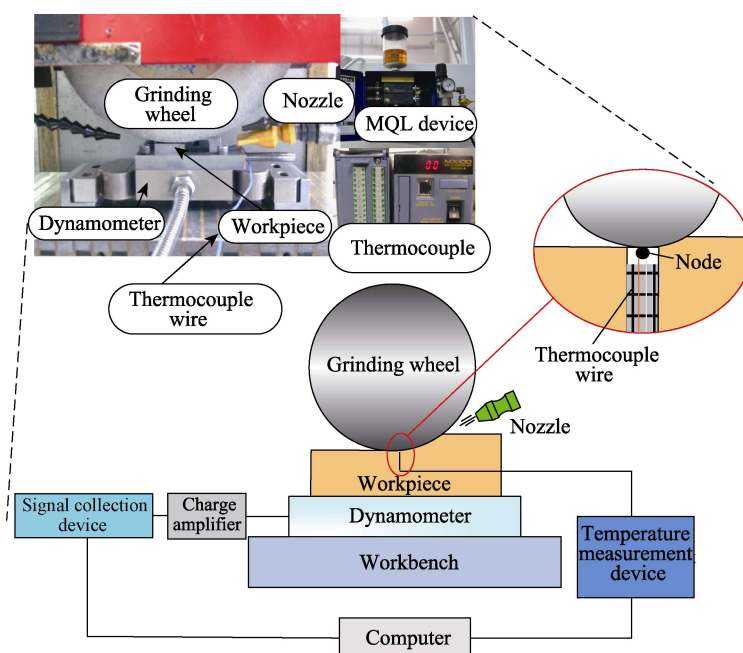


图 1 实验系统

Fig.1 Experimental system diagram

在磨削过程中,为了达到实验条件一致及测量数据的准确性,每测量 60 次便对砂轮进行修整,修整参数见表 4。

采用精密数控磨床 K-P36 对高温镍基合金 GH4169 进行磨削加工。所用砂轮为 WA80MV12P 白刚玉砂轮,尺寸为 300 mm×20 mm×76.2 mm,砂轮粒度为 80#,最高线速度为 50 m/s。微量润滑供液装置使用可以控制气液比的气动式 KINS KS-2106 装置。测力仪采用 YDM-Ⅲ 99,在磨削过程中,对磨削力进行测量,经 YE5850D 设备放大后,测量数据及记录

力的大小。采用 DV2TLV 数字黏度计测量黏度。采用 JC2000C1B 仪测量接触角。工件加工表面通过 S-3400N 型扫描电镜进行观测,采用 TIME3220 表面粗糙度仪进行粗糙度测量。磨削温度采用夹式热电偶测量,利用 MX100 热电偶数据采集器进行信号采集,采集数据点频率为 20 Hz。

由于 Li 等人<sup>[18]</sup>已针对上述 7 种植物油做了润滑性能对比实验,本文基于此进行进一步混合植物油探索性实验,并控制磨削参数固定不变。磨削参数见表 5。

表 4 修整参数  
Tab.4 Trimming parameters

Dresser type	Single-stroke trimming quantity/mm	Transverse feed rate/(mm·r <sup>-1</sup> )	Stroke number
Grinding machine fixed PCD dresser	0.01	0.5	25

表 5 磨削参数  
Tab.5 Grinding parameters

Grinding pattern	Grinding wheel speed $V_s/(m·s^{-1})$	Feed rate $V_w/(mm·min^{-1})$	Cutting depth $a_p/μm$	MQL flow rate/(mL·h <sup>-1</sup> )	MQL nozzle distance/mm	MQL nozzle angle/(°)	MQL gas pressure/MPa
Surface grinding	30	3000	10	50	12	15	0.6

1.2.2 最优组与蓖麻油不同体积配比混合

通过探索性实验中 3 个较优组对纯蓖麻油润滑性能改善的分析,发现不饱和脂肪酸含量占比上升程度不同,润滑能力改善程度也相应不同。因此,通过进一步精准调节饱和脂肪酸含量占比,将探索性实验得出的最优组同蓖麻油进行不同体积配比混合,并在镍基合金 GH4169 工件上进行微量润滑磨削,对比磨削力、表面粗糙度  $Ra$ 、磨削温度及对应温度下的油

液黏度进行测量与计算。从脂肪酸含量占比角度进行润滑性能分析,探究不饱和脂肪酸对油液润滑性能的进一步影响程度。

通过探索性实验可知,提高油液中不饱和脂肪酸的含量,可以提高整体的流动性。因此,实验配比方案(见表 6)通过逐渐降低饱和脂肪酸含量入手,采用不同体积配比的蓖麻油/最优组(这里的最优组基于上述 6 种混合植物油实验筛选而得)作为单因素变量控制。

表 6 实验配比方案  
Tab.6 Experimental proportioning scheme

	1	2	3	4	5	6	7	8
Volume ratio	1 : 0	1 : 0.5	1 : 1	1 : 1.5	1 : 2	1 : 2.5	1 : 3	1 : 4
Experimental condition	MQL							

2 不同种植物油与蓖麻油 1 : 1 混合实验结果

2.1 比磨削能和比磨削力

比磨削能被定义为磨削单位体积的金属工件材料所消耗的能量,是磨削加工中一个重要的性能参数<sup>[22]</sup>。对于提高磨削加工质量,估计磨削力和功率消耗有着重要的意义。根据比磨削能的计算公式可知:

$$U = \frac{F_t(v_s \pm v_w)}{v_w b a_p}$$

(1)

式中:  $F_t$  为切向磨削力, N; “+”号为逆磨; “-”号为顺磨;  $v_s$  为砂轮转速, m/s;  $b$  为工件的宽度, mm;  $v_w$  为工件的进给速度, mm/s;  $a_p$  为磨削深度, mm。由式(1)可知,磨削力与比磨削能之间存在量化关系。比磨削力是指单位宽度砂轮实际承受的平均载荷,由实际测得法向及切向磨削力除以工件宽度所得。该参数不受砂轮宽度和工件宽度的影响,在磨削力的研究中,作为实验参数更具有普适性<sup>[23]</sup>。因此,比磨削能与比磨削力之间也存在一定的量化关系。根据试验测量的磨削力,取平均值,并计算出比磨削力、比磨削能,计算结果如图 2 所示。

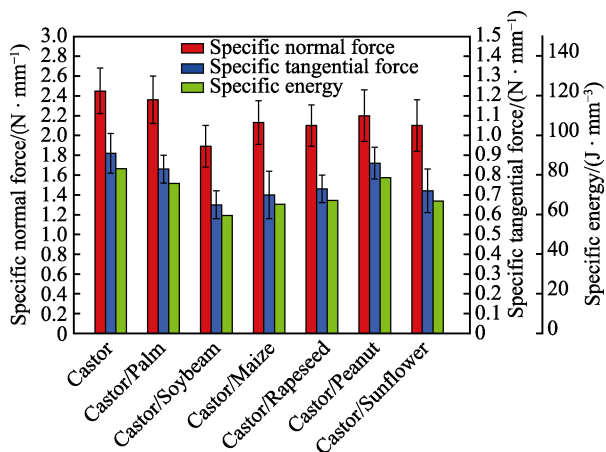


图2 不同植物油与蓖麻油混合 MQL 磨削下的比磨削力与比磨削能

Fig.2 Specific grinding force and specific grinding energy under MQL grinding of different vegetable oil and castor oil

由图2可知,混合植物油工况下的比磨削能相比于纯蓖麻油均有所下降,蓖麻油工况下的比磨削能最大,为  $83.24 \text{ J/mm}^3$ ;蓖麻油/大豆油工况下的比磨削能最小,为  $60.71 \text{ J/mm}^3$ ,相比于纯蓖麻油降低了  $27.07\%$ ;其次分别是蓖麻油同玉米油、葵花油、菜籽油的混合植物油工况;蓖麻油同棕榈油、花生油的混合植物油工况下的比磨削能相比纯蓖麻油均只有较小程度下降。由于比磨削能与比磨削力之间存在量化关系,比磨削力的整体走势同比磨削能一致。因此,混合植物油工况下的比磨削力相比于纯蓖麻油也均有所改善。

## 2.2 表面粗糙度

表面粗糙度反映的是工件表面微观的几何形状误差,需要采用专用的粗糙度仪来测量。粗糙度的评定通常用轮廓算术平均偏差  $Ra$ 、轮廓最大高度  $Ry$ 、微观不平度十点高  $Rz$  等3个参数表示。实验中测量了纵向评定参数——轮廓算术平均偏差  $Ra$ ,如图3所示。

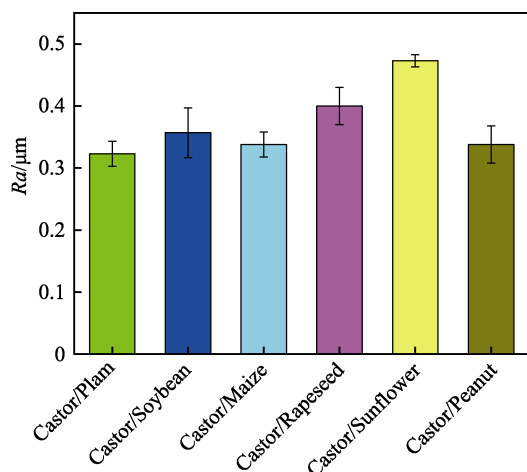


图3 不同植物油与蓖麻油工况表面粗糙度  $Ra$  值

Fig.3  $Ra$  value of surface roughness under different conditions of vegetable oil and castor oil

由图3可见,蓖麻油/棕榈油工况的表面粗糙度在6组中最为优秀,  $Ra$  值最小,为  $0.323 \mu\text{m}$ ,蓖麻油/花生油、蓖麻油/玉米油与蓖麻油/大豆油工况的  $Ra$  值较小,分别为  $0.338$ 、 $0.338$ 、 $0.357 \mu\text{m}$ ;蓖麻油/菜籽油工况的  $Ra$  值明显增大,为  $0.400 \mu\text{m}$ ;蓖麻油/葵花油的  $Ra$  值最大,为  $0.473 \mu\text{m}$ 。

## 2.3 磨削温度以及对应温度下混合植物油黏度

常用的温度与黏度表达关系方程主要有3种,这里选取雷诺方程来计算对应温度下的黏度值,计算公式为:

$$u = Re^{-a} \quad (2)$$

式中:  $u$  表示黏度, cP;  $t$  表示温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a$  为常数。

根据实验测得6种混合植物油工况下工件表面的温度,通过雷诺方程,计算各混合植物油对应温度下的黏度,结果如图4所示。由图4可知,6种混合植物油中,蓖麻油/玉米油工况下的磨削温度最低,对应的油液黏度最高,分别为  $100.7^{\circ}\text{C}$ 、 $2.85 \text{ cP}$ ;蓖麻油/大豆油工况下的磨削温度较低,此时油液黏度也较高,分别为  $109.39^{\circ}\text{C}$ 、 $2.76 \text{ cP}$ ;而蓖麻油/棕榈油同蓖麻油/菜籽油具有相近的磨削温度和黏度。

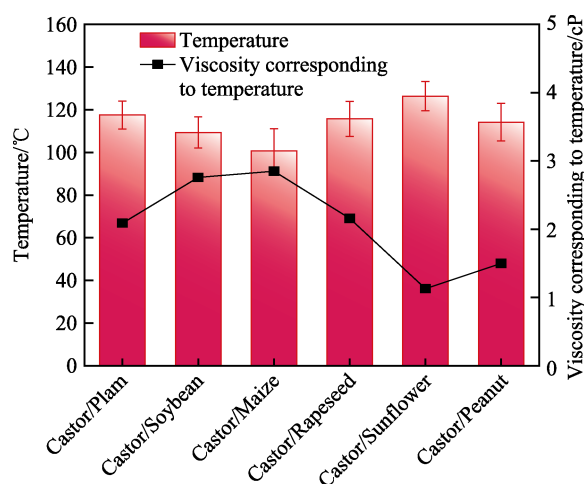


图4 不同混合植物油工况下的温度及黏度

Fig.4 Temperature and viscosity of mixed vegetable oil under different working conditions

## 2.4 表面微观形貌

根据上述比磨削力、比磨削能、表面粗糙度、磨削温度以及对应温度下混合植物油黏度的测量计算,在6组混合植物油中,蓖麻油/大豆油是比磨削力与比磨削能最小组;蓖麻油/棕榈油是  $Ra$  值最小组;蓖麻油/玉米油工况时,磨削温度最低,对应温度下混合植物油的黏度最大。因此,选取蓖麻油/大豆油、蓖麻油/玉米油、蓖麻油/棕榈油同纯蓖麻油进行进一步的表面微观形貌的观测。



蓖麻油/大豆油、蓖麻油/玉米油、蓖麻油/棕榈油同纯蓖麻油工况下的表面微观 SEM 形貌如图 5 所示。从图 5a 中可以发现，纯蓖麻油工况下的工件表面，磨削纹路清晰可见，存在气孔、残余材料、犁沟以及皱叠现象。图 5b 中，蓖麻油/棕榈油工况下的工件表面，无气孔，存在少量残余材料，但是磨削纹路仍然清晰可见，犁犁现象存在，但整体相比于图 5a 中有较大改善。图 5c 中，蓖麻油/大豆油工况下的工件表面光滑，存在较浅的磨削纹路，几乎没有犁犁与皱叠的现象。图 5d 中，蓖麻油/玉米油工况下的工件表面

磨削纹路清晰，存在犁犁现象，但不明显，整体相比于图 5a 也有较大改善。犁犁是磨削加工工件表面的一个必要阶段，当此现象发生时，磨粒使工件表面材料沿着犁沟的两侧和前端隆起，该阶段产生塑性变形以及较大的磨屑。同时，磨削区产生的热量若不能及时被油液与磨屑带走，将导致磨屑发生热软化残留在加工表面。蓖麻油/大豆油、蓖麻油/玉米油、蓖麻油/棕榈油同纯蓖麻相比，磨削工况下的表面微观形貌均有所改善，其中蓖麻油/大豆油工况下工件表面的微观形貌最好。

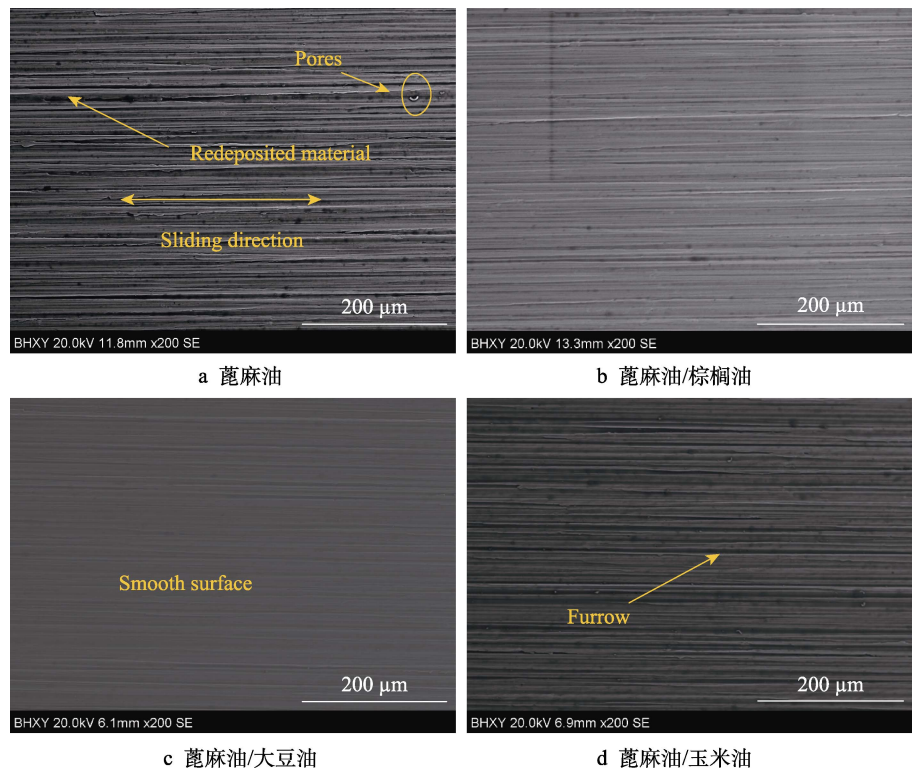


图 5 不同混合植物油工况下的工件表面 SEM 形貌

Fig.5 SEM images of workpiece surface under different mixed vegetable oil conditions: a) castor; b) castor/palm; c) castor/soybean; d) castor maize

## 2.5 结果分析

### 2.5.1 植物油脂肪酸类型对润滑性能的影响

常见动物性油脂(如猪油、牛油等)和植物油(如大豆油、菜籽油、花生油等)最大的区别在于，常温下，动物性油为固态，植物性油为液态。造成流动性存在巨大差异的原因之一在于，动物性油的成分往往是饱和脂肪酸较多，植物油的成分往往是不饱和脂肪酸较多。

如图 6 所示，饱和脂肪酸的碳链都是单键，且每个碳上都接满了氢，碳链竖直。不饱和脂肪酸的碳之间存在双键，而双键处的氢在同侧属于顺式不饱和脂肪酸，具有较大的折角；双键处的氢在异侧则属于反式不饱和脂肪酸，具有较小的折角，碳链相对较直。

磷脂质分子，若细胞膜上的脂质均由饱和脂肪酸构成的磷脂质组装，则分子与分子之间的距离很近，且分子链长，因此分子之间的作用力较大，两两之间相互制约对方的移动；若细胞膜上的脂质是由不饱和脂肪酸构成的磷脂质组装，由于折角的存在，使得分子与分子之间产生距离，随着碳链长度的增加，距离进一

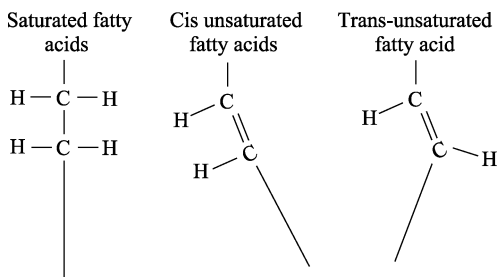


图 6 部分类型脂肪酸结构

Fig.6 Structural diagram of some types of fatty acids

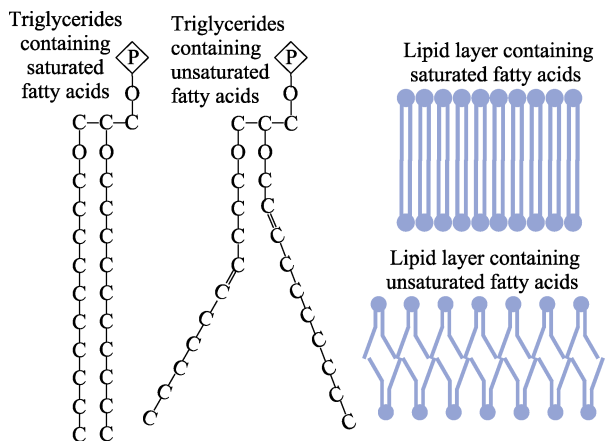


图 7 不同类型脂肪酸的细胞膜脂质层

Fig.7 Lipid layer of cell membrane with different fatty acid types

步变大,此时分子之间的作用力很小,无法相互制约对方的移动。其原理完全可以套用在油脂的理论分析上,因此植物油相对于动物油有着更好的流动性。

植物油的主要成分为丙三醇和脂肪酸,其中脂肪酸是直链碳酸,通常含有偶数个碳原子,但在碳链长度和  $C=C$  双键数上有所不同。根据图 8 的几种分子结构式可知,含有单个  $C=C$  双键的油酸、蓖麻酸为单不饱和脂肪酸;含有不止一个  $C=C$  双键的亚油酸、亚麻酸为多不饱和脂肪酸;不含有  $C=C$  双键的硬脂酸、棕榈酸为饱和脂肪酸。蓖麻酸在不饱和脂肪酸中较为特殊,只存在于蓖麻油中。图 8 所示的分子式中,蓖麻酸的第 12 号碳位上有羟基  $-OH$ 。因此,蓖麻酸相比于其他脂肪酸极性更强,成膜能力加强<sup>[24]</sup>。

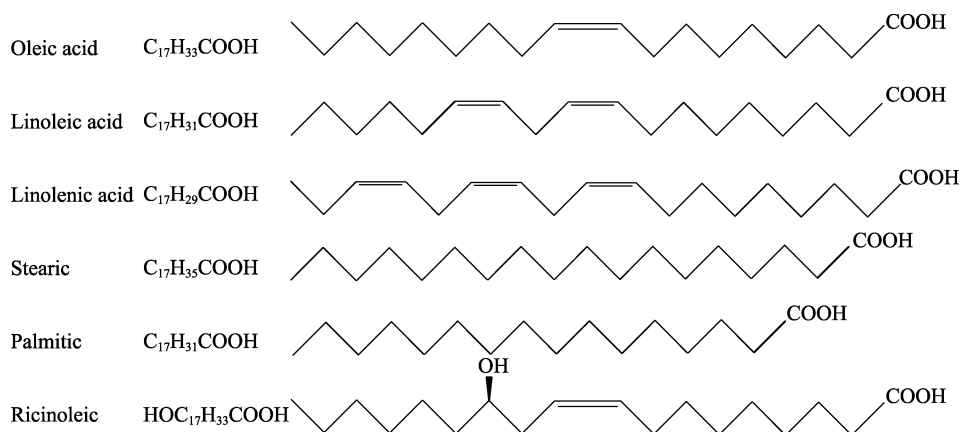


图 8 植物油中几种脂肪酸分子结构式

Fig.8 Molecular structure formulas of several fatty acids in vegetable oil

根据研究表明,饱和脂肪酸中的硬脂酸还可以与金属表面产生皂化反应,也称成盐反应,生成硬脂酸盐<sup>[25]</sup>。在本次实验磨削加工中,脂肪酸  $-COOH$  中的氢原子与金属表面镍原子发生置换,再同脂肪酸中的硬脂酸发生化学反应,生成硬脂酸镍,而硬脂酸镍金属皂主要起胶化、提高倾点、增加黏稠度的作用。同时研究还表明,饱和脂肪酸的润滑性能优于不饱和脂肪酸<sup>[26]</sup>,不饱和脂肪酸会因双键的存在,更易断裂,使其形成的吸附膜不再致密<sup>[27]</sup>。

因此,不饱和脂肪酸的含量占比更多会使油膜稀薄,促进油液流动性,而饱和脂肪酸占比更大提高油膜的成膜能力。

### 2.5.2 植物油脂肪酸含量占比对润滑性能的影响

由探索性实验结果可以发现,3 组较优组中,蓖麻油/大豆油工况下的工件表面微观形貌最好,得到的比磨削力与比磨削能均最小,且在  $Ra$  值、磨削温度以及对应温度下混合植物油黏度中虽然不是表现最优,但也均得到了较好的测量值。因此,综合表现中,蓖麻油/大豆油为 3 组较优组中的最优组。蓖麻油/棕榈油在表面粗糙度上表现最优,蓖麻油/玉米油在磨削温度以及对应温度下混合植物油黏度中表现

最优。造成这种现象的原因可以根据 3 组较优组中的饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量占比来进行分析。

根据表 3 中每种植物油脂脂肪酸含量,计算出 1:1 混合的蓖麻油/棕榈油、蓖麻油/大豆油、蓖麻油/玉米油下脂肪酸含量占比,如图 9 所示。

图 9b 中蓖麻油/棕榈油中饱和脂肪酸含量在 43.5%,相比于纯蓖麻油下降了 8.5%,下降程度最小,依旧具有较强的成膜能力,流动性提高不大。如图 10a 所示,该混合组工况下工件表面的润滑油膜较厚,磨削时磨粒的耕犁现象有较大缓解,因此对应图 3 表面粗糙度最好。但由于流动性提高不大,导致磨削处热量被油液带走的能力较差,对应图 4 中蓖麻油/棕榈油工况下较高的磨削温度。而较高的磨削温度会导致未及时排除的磨屑出现热软化,粘结在工件表面,对应了图 5b 中表面微观形貌出现了少量残余材料的现象。

图 9c 中蓖麻油/大豆油中饱和脂肪酸含量在 33.5%,相比于纯蓖麻油下降 18.5%,下降程度介于蓖麻油/棕榈油与蓖麻油/玉米油之间。从脂肪酸含量占比角度分析,该混合组油膜的成膜能力以及流动性也应该介于蓖麻油/棕榈油与蓖麻油/玉米油之间,磨削时磨粒耕犁现象的缓解程度优于蓖麻油/玉米油。同时,



油液的流动性较高,油液带走磨削区温度的能力优于蓖麻油/棕榈油。对照图 4 中的磨削温度可知,该混合组磨削温度及确实介于两者之间。同时,通过图 5c 可见,由于兼顾了成膜能力与流动性,蓖麻油/大豆油的表面微观形貌在这 3 组较优组中最优。

因此,蓖麻油/大豆油的混合组在 3 组较优组中,油膜润滑性能最为优秀,其中饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量占比相较于其他 2 个较优组中的含量占比更为合适。

图 9d 中蓖麻油/玉米油中饱和脂肪酸含量在 32.5%,相比于纯蓖麻油下降了 19.5%,下降程度最大,此时油液流动性有很大提高,皂化反应成膜能力减弱。该混合组工况时,工件表面的润滑油膜较弱,但因该油液流动性大,磨削处热量能被油液及时带走,所以对磨削温度最小。然而因为油液流动性过强,不饱和脂肪酸含量较大,导致成膜能力弱,如图 10b 所示,油液缓解磨削时磨粒耕犁现象的能力较差,表面微观形貌出现较为明显的耕犁现象<sup>[28]</sup>。

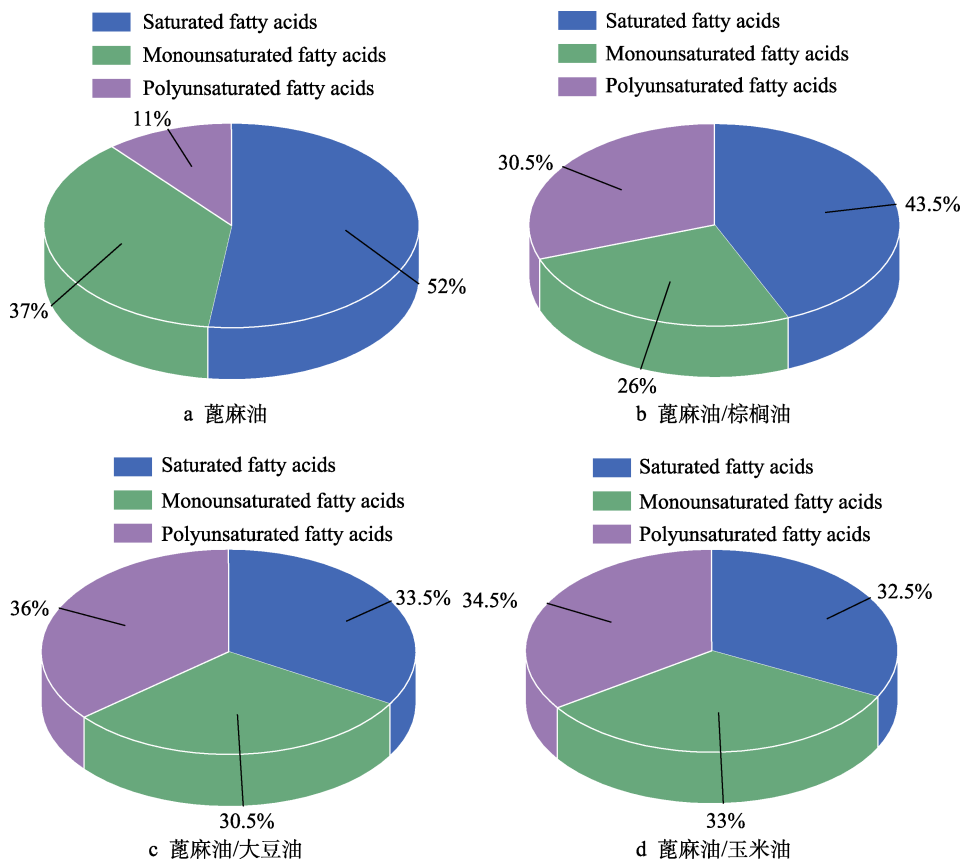


图 9 3 组较优组混合植物油中脂肪酸含量占比

Fig.9 Proportion of fatty acid content in mixed vegetable oil of three better groups: a) castor; b) castor/palm; c) castor/soybean; d) castor maize

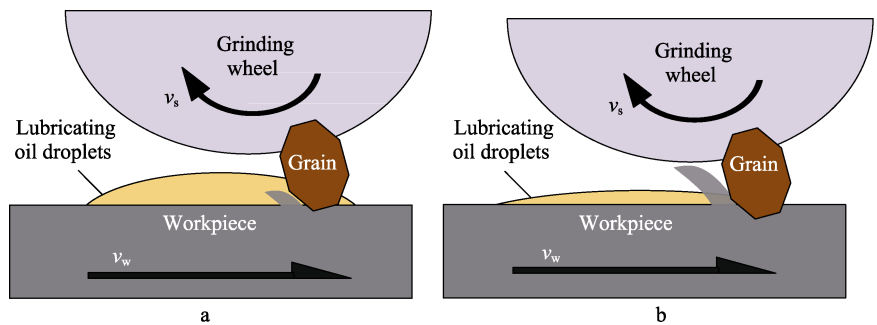


图 10 磨粒磨削工件表面示意

Fig.10 Schematic diagram of abrasive grinding workpiece surface

2.6 结果分析验证

通过对蓖麻油/玉米油、蓖麻油/棕榈油、蓖麻油/

大豆油以及蓖麻油的接触角测量<sup>[29-30]</sup>,验证上述从脂肪酸角度对磨削时油膜润滑性能的分析。如图 11a 所示,纯蓖麻油形成的液滴接触角最大,液滴的铺展性

最低,导致覆盖面积最小,因此工件表面整体润湿性最差。而其他3组较优组的液滴接触角均有不同程度

地减小,铺展性也有所提高,工件表面整体润湿性增强,磨削力和表面粗糙度得以降低。

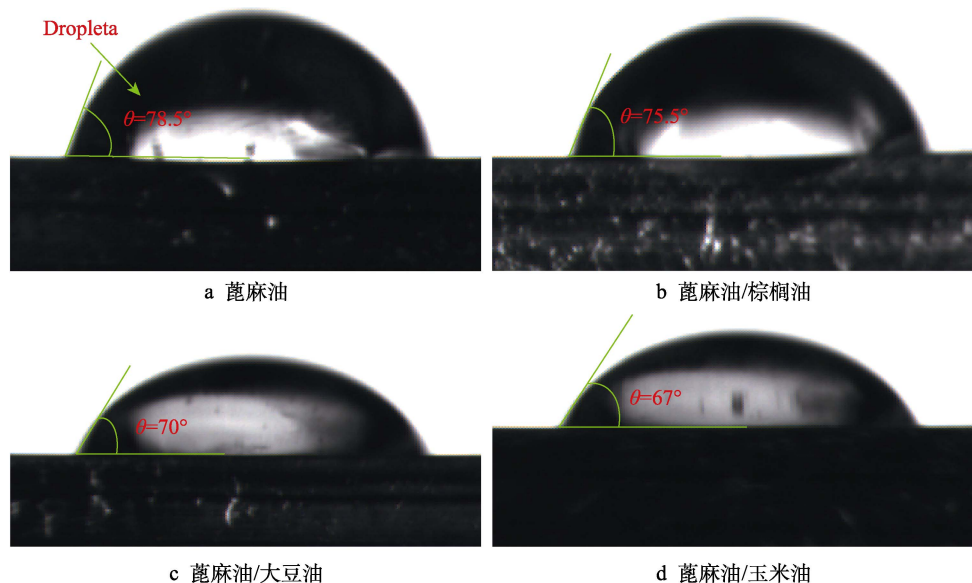


图 11 不同混合植物油液滴接触角测量示意

Fig.11 Schematic diagram of drop contact angle measurement of different mixed vegetable oils: a) castor; b) castor/palm; c) castor/soybean; d) castor maize

将图 11b—d 与图 9b—d 对照,可以直观地发现,随着不饱和脂肪酸含量占比的提高,液滴接触角角度随之减小,在图 11 与图 9 中可以形成一一对应。图 9b 中蓖麻油/棕榈油的不饱和脂肪酸含量比例相对较小,图 11b 中形成的液滴接触角较大,油膜较厚,油膜液滴的铺展性较差,导致覆盖面积较小,因此工件表面整体润湿性较差,热量高导致图 5b 中表面出现残余材料。图 9c 中蓖麻油/大豆油的饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量比例相对合适,图 11c 中形成的液滴接触角处于两者之间,油膜厚度、接触角大小也更合适,兼顾流动性与润滑。因此,蓖麻油/大豆油在 3 组较优组中为最优组。图 9d 中蓖麻油/玉米油的不饱和脂肪酸含量相对较大,图 11d 中形成的液滴接触角较小,油膜液滴的铺展性较好,油膜较薄,导致润滑能力不足,因此图 5d 中工件表面微观形貌犁耕较明显。

### 3 蓖麻油与最优组不同体积配比混合实验结果

根据上述探索性实验结果、分析与验证可知,在 6 个混合组中,虽然蓖麻油/大豆油的综合润滑性能最优,但蓖麻油/棕榈油、蓖麻油/玉米油分别在表面粗糙度与磨削温度 2 个评定参数上具有最优值,而这两组最优值的出现与脂肪酸含量占比存在一定程度的关系。

为了进一步验证脂肪酸含量占比对油膜润滑性能的影响程度,通过选取已经得到的最优组蓖麻油/大豆油,进行不同体积配比,达到对脂肪酸含量占比的调节。在相同的实验条件与实验评价参数下,进行

不同脂肪酸含量占比的对比性实验。

#### 3.1 比磨削力

不同配比蓖麻油/大豆油工况下的比磨削力如图 12 所示。随着大豆油体积比例的增加,切向比磨削力具有更明显的规律,出现先减小、再增大的趋势。当蓖麻油/大豆油配比为 1:1.5 与 1:2 时,切向比磨削力明显小于纯蓖麻油,分别为 1.6、1.7 N/mm,而法向比磨削力也均优于纯蓖麻油。因为在实验结果 2.1 小节中已说明比磨削力与比磨削能存在定量关系,所以比磨削能的变化规律与切向比磨削力一致。

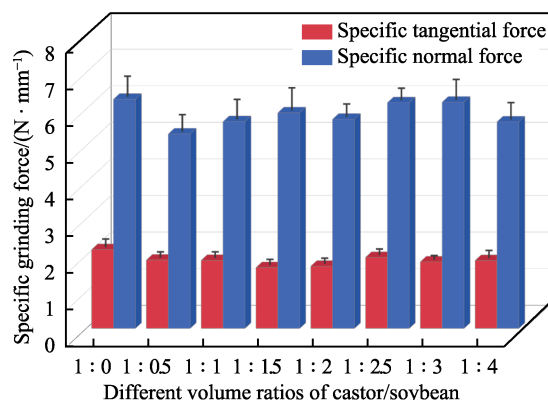


图 12 不同配比的蓖麻油/大豆油工况下比磨削力  
Fig.12 Specific grinding force under different ratio of castor oil/soybean oil

#### 3.2 表面粗糙度

不同配比蓖麻油/大豆油工况下的表面粗糙度  $R_a$

如图 13 所示。除了 1:2.5 配比时蓖麻油/大豆油工况下的  $Ra$  值大于纯蓖麻油工况外, 其他配比工况下的  $Ra$  值均小于纯蓖麻油工况。其中, 配比为 1:2 的蓖麻油/大豆油工况下的  $Ra$  值最小, 为 0.231  $\mu\text{m}$ 。

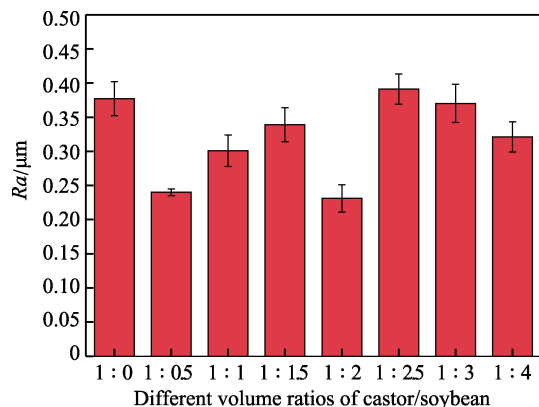


图 13 不同配比的蓖麻油/大豆油工况下表面粗糙度  $Ra$  值  
Fig.13  $Ra$  value of surface roughness under different ratio of castor oil/soybean oil

### 3.3 磨削温度以及对应温度下混合植物油黏度

根据不同配比的蓖麻油/大豆油工况下测量的温度, 采用 Vogel 黏度方程计算出对应温度下油液的黏度:

$$\eta = k e^{\frac{b}{t+\theta}} \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为动力黏度, cP;  $k$ 、 $\theta$ 、 $b$  为常数。温度测量结果与对应黏度计算结果如图 14 所示。

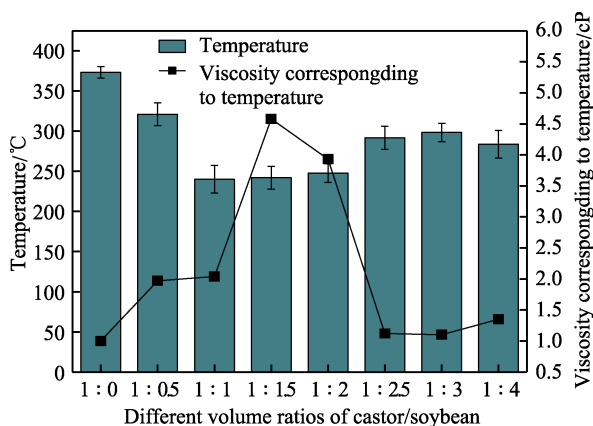


图 14 不同配比的蓖麻油/大豆油工况下的温度及黏度  
Fig.14 Temperature and viscosity of castor oil/soybean oil with different ratios

从图 14 中可知, 混合植物油工况下的磨削温度均小于纯蓖麻油工况下。其中, 蓖麻油/大豆油体积配比为 1:0.5 时, 磨削温度相比纯蓖麻油时的 373.15  $^{\circ}\text{C}$  下降明显, 为 321  $^{\circ}\text{C}$ ; 体积比 1:1 时, 磨削温度最低, 为 240  $^{\circ}\text{C}$ ; 体积比为 1:1.5 与 1:2 时, 磨削温度较低, 分别为 242、247.7  $^{\circ}\text{C}$ ; 当体积比为 1:2.5、1:3、1:4 时, 磨削温度再次上升明显, 分别为 291.6、

298.32、283.67  $^{\circ}\text{C}$ 。

蓖麻油/大豆油体积配比为 1:1.5 时, 对应磨削温度时的黏度最大, 达到了 4.58 cP; 当体积比为 1:2 时, 黏度为 3.93 cP; 当体积比为 1:0.5、1:1 时, 黏度分别为 1.97、2.04 cP; 纯蓖麻油和蓖麻油/大豆油体积比为 1:2.5、1:3、1:4 时, 黏度均较小。

### 3.4 结果分析

根据表 3 中蓖麻油与大豆油植物油脂肪酸含量, 计算出蓖麻油/大豆油不同配比混合后不饱和脂肪酸含量占比, 如图 15 所示。

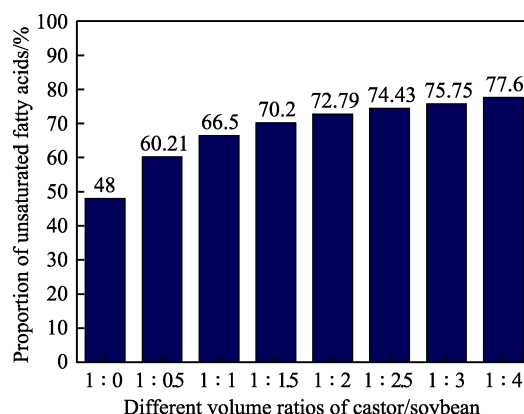


图 15 不同配比的蓖麻油/大豆油中不饱和脂肪酸含量占比  
Fig.15 Proportion of unsaturated fatty acids in castor oil/soybean oil with different ratios

分析图 15 可知, 随着不饱和脂肪酸的占比逐渐增大, 各实验评价参数均出现了阶段性的先减小、后增大趋势, 但就相邻组别之间的变化而言, 对各评价参数的影响无明显规律性。当体积比为 1:0.5 时, 不饱和脂肪酸含量上升明显, 虽然蓖麻油仍占主导地位, 但可以推测出混合油液的流动性开始提高, 皂化反应产物开始减少, 成膜能力也开始下降, 此时图 14 中磨削温度开始有明显下降; 体积比为 1:1、1:1.5、1:2 时的不饱和脂肪酸的质量分数在 70% 左右, 可得出混合油液的流动性较高, 皂化反应生成的硬脂酸镍更少, 成膜能力下降程度变大。同时, 不饱和脂肪酸的占比增大, 使得油膜不再致密, 流动性明显提高, 此时 3 种配比的磨削温度均处于较低水平; 体积比为 1:2.5、1:3、1:4 时, 不饱和脂肪酸含量进一步上升, 大豆油占主导地位, 混合油液的流动性过高, 成膜能力较差, 因此表面温度虽有下降, 但由于油膜开始稀疏变薄, 对耕犁现象的缓解能力变差, 从而加剧了磨粒与工件表面的作用力 (对应图 12 中比磨削力), 导致磨削温度虽有下降, 但明显劣于体积比为 1:1、1:1.5、1:2 几种工况时的磨削温度, 如图 14 所示。

研究还发现, 油膜会随着温度的变化影响其稳定性, 蓖麻油的热稳定温度为 285  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[31]</sup>。当磨削温度



大于油的热稳定温度时,会出现裂解,影响油膜的厚度,从而导致磨削时工件表面质量变差。而大豆油在超过 240 °C 时,酯键会发生断裂,影响油膜的稳定。体积比为 1 : 2.5、1 : 3、1 : 4 时,大豆油为主要占比,且磨削温度均明显高于 240 °C,降低了这 3 组配比工况下的油膜稳定性,所以也导致了这 3 组配比的比磨削力与表面粗糙度均较大。

### 3.5 结果分析验证

根据 3.5 小节不饱和脂肪酸含量占比对实验结果影响的分析,通过 200 倍扫描电镜进行观测蓖麻油/大豆油不同配比工况下表面微观形貌,来验证不饱和脂肪酸含量占比对油液润滑性能的影响程度,如图 16 所示。

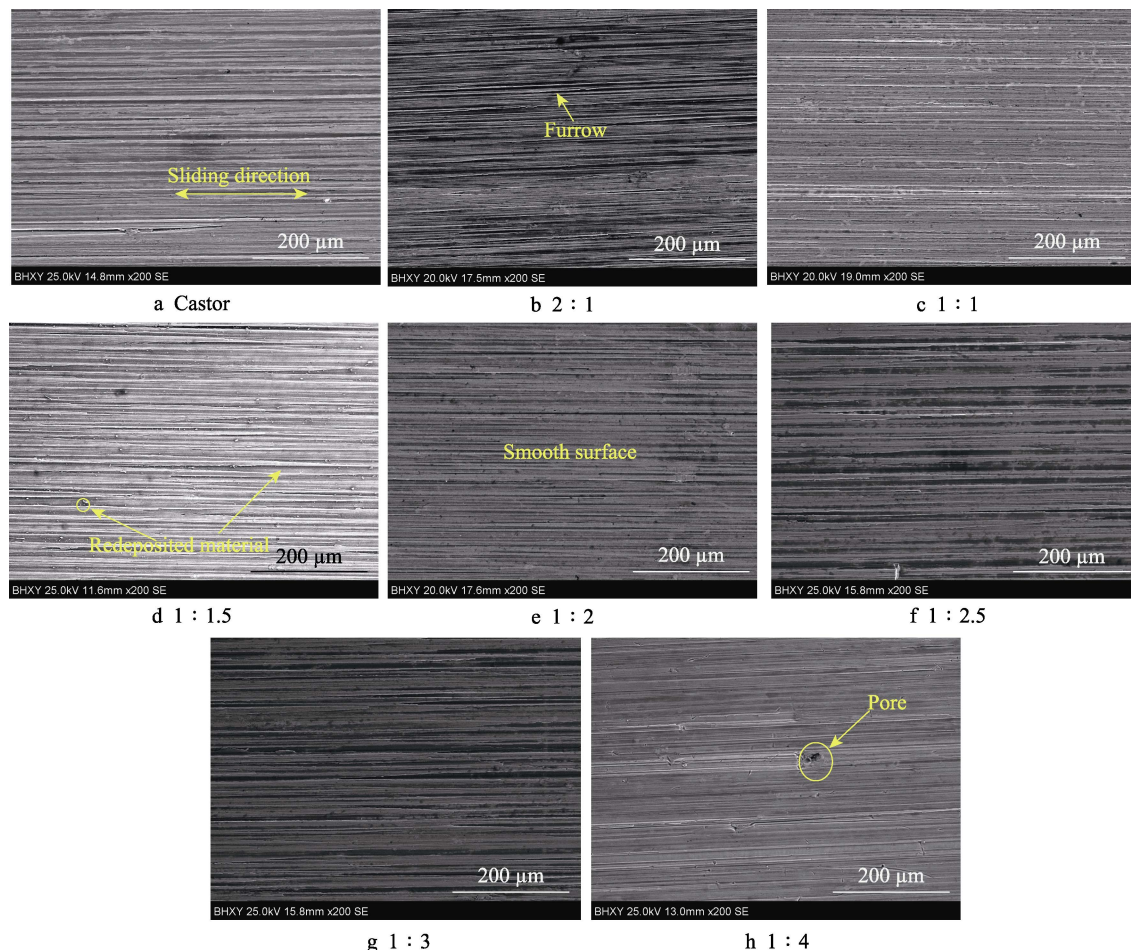


图 16 不同配比的蓖麻油/大豆油工况下表面微观形貌

Fig.16 Surface micro morphology of castor oil / soybean oil with different ratios

通过对不同体积配比时的表面微观形貌进行观测,发现随着不饱和脂肪酸含量占比的逐渐增大,表面微观形貌总体也呈现出由差变好、再变差的阶段性变化。1 : 1 与 1 : 2 体积配比是几组配比中表面微观形貌较好的,工件表面没有残留材料,磨削纹路较浅,没有明显的耕犁和皱叠;在 1 : 1.5 配比时出现残余材料,磨削纹路较为清晰。即当不饱和脂肪酸含量占比为 66.5%与 72.79%时,表面微观形貌较好;而占比为 70.2%,表面微观形貌略微变差。造成 1 : 1.5 时表面微观形貌变差的原因可能是此时的润滑成膜性能与流动性能相比于 1 : 1 与 1 : 2 时均不占优势,综合润滑性能较为中庸。而 1 : 1 体积配比时,成膜性能占优,兼顾流动性;1 : 2 体积配时,流动性能占优,兼顾成膜能力。从图 16a、b 可以发现,工件表面磨

削纹路非常清晰,耕犁现象严重,表面皱叠现象明显。其原因在于蓖麻油占据主要优势,此时不饱和脂肪酸含量占比对油液流动性影响不大,所以油液成膜能力好,但铺展性差,导致磨削时磨粒与工件表面直接接触的概率增加,且较差的流动性也无法及时带走加工表面磨削热,最终造成表面微观形貌较差。从图 16f、g、h 可以发现,工件表面磨削纹路非常清晰,耕犁现象严重,且图 16h 中出现明显凹坑。其原因在于大豆油占据主要优势,此时不饱和脂肪酸含量占比对油液流动性影响较大,所以油液流动性与铺展性好,但成膜能力差,导致液滴油膜较薄,磨削时磨粒与工件表面发生耕犁时,很容易破坏油膜,发生严重耕犁现象。在 1 : 4 体积配比时,润滑性能差,更薄的油膜导致耕犁现象更严重,而由于砂轮上的磨粒大小不

一,且随机布置,可能造成大颗磨粒对工件表面出现随机性的凹坑现象。

因此,综合上述 2 组实验可知,植物油中的饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸含量占比,可以对油液的流动性、成膜性能进行调控,并且在含量占比的变化程度达到一定程度时,润滑性能变化明显,表征参数出现阶段性的规律变化。但是,当含量占比进行逐步微小变化时,润滑性能的改善不明显,表征参数的变化无明显规律。

## 4 结论

1) 6 组混合植物油中,蓖麻油/棕榈油在表面粗糙度上具有最小值,蓖麻油/玉米油在磨削温度上具有最低温度值,而蓖麻油/大豆油在比磨削力、比磨削能以及整体的表面微观形貌中均最优,这 3 组为较优组。

2) 饱和脂肪酸可以促进油液与金属工件表面皂化吸附膜的形成,而不饱和脂肪酸的碳碳双键会使润滑油膜变得稀疏,减小分子之间的作用力从而提高流动性。随着不饱和脂肪酸含量的提高, C=C 双键的结构反应出了液滴流动性的提高,导致润滑油液的接触角变小。蓖麻油/大豆油作为 3 组较优组中的最优组,相对于其他 2 组而言,脂肪酸含量占比最能兼顾油膜成膜性能以及油液流动性。

3) 通过 3 组较优组及纯蓖麻油的接触角测量验证,随着不饱和脂肪酸含量增大,接触角逐渐变小。蓖麻油/大豆油的液滴接触角既兼顾了液滴的铺展性,又具有足够的油膜厚度,相较其他 3 组而言,接触角大小最为合适。

4) 蓖麻油与大豆油不同体积配比中,切向比磨削力随着大豆油体积占比变大,规律性地先减小、后增大,比磨削能具有完全相同的规律。除了 1:2.5 的蓖麻油/大豆油体积配比外,其他体积配比得到的  $Ra$  值均小于纯蓖麻油工况,并在体积比为 1:2 时最小。

5) 随着不饱和脂肪酸含量占比的逐渐增大,比磨削力、 $Ra$  值、磨削温度出现阶段性先减小、后增大的趋势。就单个相邻配比之间,不饱和脂肪酸含量占比的改变,比磨削力、 $Ra$  值、磨削温度没有明显而精确的规律性。通过观测表面粗糙度 SEM 图,验证了不饱和脂肪酸含量占比变化对各评定参数的影响程度。

通过将润滑性能优秀的单一植物油同其他植物油配比,汲取各自优势,配比出润滑性能更优越的混合植物油,对加工镍基合金的质量改善具有指导意义。同时,从脂肪酸种类,与含量占比角度的研究,为研发润滑性能更加优越的新型绿色植物油基切削液提供了新思路。

## 参考文献:

- [1] 田伟,常松,周长申,等. 镍基变形高温合金的热处理组织转变及金相分析[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 30-35.  
TIAN Wei, CHANG Song, ZHOU Chang-shen, et al. Microstructure transformation and metallographic analysis of Ni-based wrought superalloy during heat treatment[J]. Heat treatment of metals, 2021, 46(8): 30-35.
- [2] 李丹阳,殷凤仕,王晓明,等. 镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 105-122.  
LI Dan-yang, YIN Feng-shi, WANG Xiao-ming, et al. Research status and development trend of reinforcement technique of nickel-based superalloy[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 105-122.
- [3] 初铭强,丁仁根,张书彦,等. 航空零部件加工表面完整性[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7183-7189.  
CHU Ming-qiang, DING Ren-gen, ZHANG Shu-yan, et al. Surface integrity for machining aerospace parts[J]. Materials reports, 2021, 35(7): 7183-7189.
- [4] 覃孟扬,徐兰英,潘小莉,等. 低温微量润滑刀具耐用度试验研究[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 152-154.  
QIN Meng-yang, XU Lan-ying, PAN Xiao-li, et al. Experimental study on tool durability of cryogenic minimal quantity lubrication[J]. Machinery design & manufacture, 2021(7): 152-154.
- [5] 胡建武. 镍基高温合金圆周台阶深孔的加工方案[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 223-225.  
HU Jian-wu. Machining plan of deep hole with circular step in nickel-base superalloy[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2021, 50(8): 223-225.
- [6] 武鑫磊,刘永红,亓梁,等. 镍基高温合金电火花辅助电弧高效铣削技术[J]. 航空学报, 2021(6): 1-11.  
WU Xin-lei, LIU Yong-hong, QI Liang, et al. High-efficiency electrical discharge assisted arc milling of nickel-based superalloy[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2021(6): 1-11.
- [7] SINGH G, GUPTA M K, MIA M, et al. Modeling and optimization of tool wear in MQL-assisted milling of Inconel 718 superalloy using evolutionary techniques[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 97(1-4): 481-494.
- [8] DHAR N R, KAMRUZZAMAN M, AHMED M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel[J]. Journal of materials processing technology, 2006, 172(2): 299-304.
- [9] BARCZAK L M, BATAKO A D L, MORGAN M N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2010, 50(11): 977-985.
- [10] WÓJCIK R, NADOLNY K. Effects of a variety of cutting fluids administered using the minimum quantity lubrication method on the surface grinding process for nickel-based



- alloys[J]. Journal of Zhejiang University—Science A, 2017, 18(9): 728-740.
- [11] 岳鹏, 张玉娟, 张平余, 等. 润滑油纳米添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 19-34.
- YUE Peng, ZHANG Yu-juan, ZHANG Ping-yu, et al. Research progress of nanomaterials as lubricant oil additives[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 19-34.
- [12] 贾东洲, 李长河, 张彦彬, 等. 磨削加工冷却润滑现状及展望[J]. 机械工程与自动化, 2017(3): 201-202.
- JIA Dong-zhou, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Overview and prospect of cooling lubrication in grinding[J]. Mechanical engineering & automation, 2017(3): 201-202.
- [13] SINGH Y, SHARMA A, SINGH N, et al. Prospects of inedible plant oil-driven bio-lubricants for tribological characteristics—A review[J]. International journal of ambient energy, 2020, 41(13): 1534-1547.
- [14] 杨永丰, 屠春晖, 倪敬, 等. 植物油切削液在拉削加工过程中的应用研究[J]. 机电工程, 2020, 37(1): 32-37.
- YANG Yong-feng, TU Chun-hui, NI Jing, et al. Application research of vegetable oils in broaching process[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2020, 37(1): 32-37.
- [15] 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.
- [16] WANG Yao-gang, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, 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.
- [17] 裴宏杰, 刘成石, 王贵成, 等. MQL高速车削 7075 铝合金的试验研究[J]. 工具技术, 2018, 52(3): 32-34.
- PEI Hong-jie, LIU Cheng-shi, WANG Gui-cheng, et al. Experimental study on high-speed MQL turning of 7075 aluminum alloy[J]. Tool engineering, 2018, 52(3): 32-34.
- [18] LI Ben-kai, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, 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.
- [19] 张文超, 李会珍, 张志军, 等. 8 种不同植物油的脂肪酸组成及抗氧化性比较[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 68-71, 75.
- ZHANG Wen-chao, LI Hui-zhen, ZHANG Zhi-jun, et al. Fatty acid composition and antioxidant properties of eight different vegetable oils[J]. China oils and fats, 2021, 46(4): 68-71, 75.
- [20] ZHANG Yan-bin, LI Chang-he, JIA Dong-zhou, et al. Experimental evaluation of MoS<sub>2</sub> nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil[J]. Journal of cleaner production, 2015, 87: 930-940.
- [21] 倪敬, 刘晓帆, 何利华, 等. 含添加剂蓖麻油切削液的拉削加工性能研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2849-2856.
- NI Jing, LIU Xiao-fan, HE Li-hua, et al. Research on broaching performance of castor oil based cutting fluid with additives[J]. China mechanical engineering, 2019, 30(23): 2849-2856.
- [22] SINGH V, VENKATESWARA RAO P, GHOSH S. Development of specific grinding energy model[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2012, 60: 1-13.
- [23] 陈永清, 赵坤, 郭建亮, 等. GCr15 轴承钢比磨削力建模[J]. 轴承, 2021(4): 41-44.
- CHEN Yong-qing, ZHAO Kun, GUO Jian-liang, et al. Modelling of specific grinding force for GCr15 bearing steel[J]. Bearing, 2021(4): 41-44.
- [24] GUO Shu-ming, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy[J]. Journal of cleaner production, 2017, 140: 1060-1076.
- [25] 李科, 蒋剑春, 聂小安. 油脂化学反应 I—水解皂化成盐[J]. 化学工程师, 2017, 31(3): 47-50, 78.
- LI Ke, JIANG Jian-chun, NIE Xiao-an. Oil chemical reaction I—Hydrolysis saponification and salification[J]. Chemical engineer, 2017, 31(3): 47-50, 78.
- [26] ABDALLA H S, PATEL S. The performance and oxidation stability of sustainable metalworking fluid derived from vegetable extracts[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: Journal of engineering manufacture, 2006, 220(12): 2027-2040.
- [27] GUO Shu-ming, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, 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.
- [28] YANG Min, LI Chang-he, SAID Z, et al. Semiempirical heat flux model of hard-brittle bone material in ductile microgrinding[J]. Journal of manufacturing processes, 2021, 71: 501-514.
- [29] 王晓铭, 张建超, 王绪平, 等. 不同冷却工况下的磨削钛合金温度场模型及验证[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5): 572-578, 586.
- WANG Xiao-ming, ZHANG Jian-chao, WANG Xu-ping, et al. Temperature field model and verification of titanium alloy grinding under different cooling conditions[J]. China mechanical engineering, 2021, 32(5): 572-578, 586.
- [30] 杨敏, 李长河, 张彦彬, 等. 神经外科颅骨磨削温度场预测新模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 215-222.
- YANG Min, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. A new model for predicting neurosurgery skull bone grinding temperature field[J]. Journal of mechanical engineering, 2018, 54(23): 215-222.
- [31] 靳福泉, 解淑媛. 蓖麻油热稳定性研究[J]. 中国油脂, 2005, 30(7): 58-60.
- JIN Fu-quan, XIE Shu-yuan. Studies on thermal stability of castor oil[J]. China oils and fats, 2005, 30(7): 58-60.