

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.006

# 植物油切削液在拉削加工过程中的应用研究\*

杨永丰<sup>1</sup>, 屠春晖<sup>2</sup>, 倪敬<sup>1,2\*</sup>, 何利华<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江百立机械有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:**针对传统拉削过程负载大,且传统切削液对环境有一定危害等问题,对绿色植物油切削液技术在拉削加工中的应用进行了研究。提出了将纯蓖麻油、玉米油、芝麻油、橄榄油和大豆油等 5 种植物油以及传统拉削油作为切削液的研究,利用微量润滑系统(MQL),将切削液喷射到了拉削加工区域;并以干拉削为对照,设计了拉刀前半段干拉、后半段油拉的实验方案;利用拉削实验系统,对切削液的性能进行了测试,通过对植物油分子结构的分析,研究了不同植物油对拉削负载和表面粗糙度的影响。研究结果表明:在 5 种植物油中,芝麻油有着最佳的拉削性能;相比于传统油拉削,应用微量润滑芝麻油可明显降低拉削负载,拉削负载图中的波峰和波谷均值分别提高了 74.0% 和 63.2%,表面质量提高了 22.1%;该研究结果有助于改善拉削性能,具有一定的实际应用价值。

**关键词:**拉削负载;植物油;绿色切削液;微量润滑

中图分类号:TH117.22;TH161.1;TG57

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0032-06

## Application research of vegetable oils in broaching process

YANG Yong-feng<sup>1</sup>, TU Chun-hui<sup>1</sup>, NI Jing<sup>1,2</sup>, HE Li-hua<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Baili Machinery Co., Ltd., Shaoxin 312000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the large load of traditional broaching process and the traditional cutting fluid has certain harm to the environment, the application research of the green vegetable oil cutting fluids in the broaching process was investigated. Conventional broaching oil and five vegetable oils such as pure castor oil, corn oil, sesame oil, olive oil and soybean oil were used as cutting fluids, and were sprayed into the broaching area by a minimum quantity lubrication (MQL) system. The experimental scheme of the dry broaching on front half of broach tool and the oil broaching on back half was designed by dry broaching as control. The performances of the cutting fluids were tested by the broaching experiment system. The effects of different vegetable oils on broaching load and surface roughness were studied by the molecular structure of vegetable oil. The results indicate that the application of sesame oil has the best broaching performance. In addition, compared with conventional broaching oil, the application of misco sesame oil ubricating can obviously reduce broaching load, and the average value of wave peak and wave valley in broaching load chart is increased by 74.0% and 63.2% respectively, and the surface quality is increased by 22.1%. This helps to improve the broaching performance and it has practical application value.

**Key words:** broaching force; vegetable oils; green cutting fluid; minimum quantity lubrication

## 0 引言

拉削加工是采用拉刀,逐齿依次从工件上切下很

薄的金属层,使表面达到较高的尺寸精度和较低的粗糙度的加工方式,广泛应用于航空航天、能源、模具和汽车等行业<sup>[1-2]</sup>。拉削加工过程中,因为其单次拉削负载较大(超过 10 kN),刀-工-屑接触区域温度较高,在

收稿日期:2019-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775153);浙江省教育厅科研项目(Y201840763)

作者简介:杨永丰(1994-),男,四川雅安人,硕士研究生,主要从事绿色切削加工技术方面的研究。E-mail: yfywind@163.com

通信联系人:倪敬,男,教授,博士生导师。E-mail: nijing2000@163.com

加工过程中通常都会向加工区域施加切削液,以降低摩擦磨损,提高加工质量。

工业切削液多以矿物油为主要成分,并加入润湿剂、极压添加剂等,具有一定毒性,在使用中会危害操作工人身体健康,同时,其后续的回收处理也会造成一定的环境污染<sup>[3]</sup>。植物油具有低毒性、环境友好性以及良好的可降解性等优点,因此,为拉削加工找寻一种合适的植物油切削液,具有非常重要的理论与工程实际意义。

已有的研究表明:在某些加工特性方面,植物油的加工性能要优于矿物油<sup>[4]</sup>。ELGNEMI T 等<sup>[5]</sup>证明了在切削过程中,植物油在减少切削力和改善刀具磨损方面发挥了重要作用;HOSSEINI T A 等<sup>[6]</sup>采用了可生物降解植物油与压缩空气相结合的喷射模式来车削 Inconel 706,与溢流模式相比,该方式减少了切削液的消耗,降低了切削力、切削温度和工件表面粗糙度;SHOKRANI A 等<sup>[7]</sup>在铣削 Inconel 718 时,使用了由低温液氮和 MQL 菜籽油组成的新型混合冷却系统,结果表明:该混合方式与传统冷却方式相比,刀具寿命有着成倍的提高;AJAY V B S 等<sup>[8]</sup>在 AISI 1040 钢的车削过程中,使用了 MQL 作用下的椰子油,发现椰子油具有良好的润滑性,易于在刀具和工件上吸附,减小了刀具磨损和摩擦系数,提高了工件的表面质量;SAHAB A S A 等<sup>[9]</sup>使用了离子液体混合麻风树油作为切削液来车削 AISI 1045 钢,发现了该液体有良好的润滑性能,降低了切削力和切削温度;LI B K 等<sup>[10]</sup>在磨削中采用植物油为磨削液,对高温镍合金进行了研磨温度和能量比系数的理论和实验研究,结果表明:棕榈油最适合作为磨削中的 MQL 基础油;ELMUNAFI M H S 等<sup>[11]</sup>使用蓖麻油作为切削液来车削硬化 AISI 420 钢,与干切削相比,应用 MQL 的蓖麻油在表面粗糙度、切削力和刀具寿命方面具有了更好的效果。

上述研究大都集中于植物油在车、铣、钻、磨等切削负载较小,且切削液容易进入刀具和工件接触区域的应用场合中,而对于负载较大的,且处于封闭状态的拉削加工过程中使用植物油,还鲜有报道,且没有对加工中,应用不同类型的植物油进行性能比较评价。

本文通过微量润滑喷射工艺,将 5 种植物油应用于拉削加工过程中,与传统拉削工况下的负载和表面粗糙度进行对比,分析植物油的分子结构,以获得一种适用于拉削加工过程的绿色植物油切削液。

## 1 拉削实验

### 1.1 拉削实验系统

该实验采用的拉削实验系统如图 1 所示。

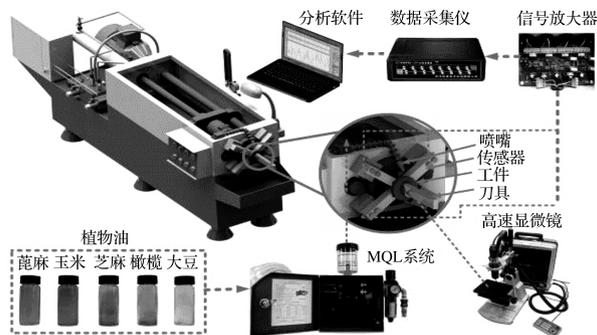


图 1 实验系统示意图

图 1 中,实验系统采用的是 LG612YA-800 卧式内孔拉床,其各类参数为:

额定拉削负载为 20 kN;最大拉削行程为 800 mm;额定拉削速度为 80 mm/s;主缸参数为 80 × 45-800;主缸额定油压为 6 MPa;主缸额定流量为 100 L/min。

在拉削实验中,使用型号为 01A3-STD-LLMB-600 的 Accu-lube 微量润滑喷射系统,将切削液喷入切削区域。该喷射系统的润滑油剂量为 0.003 mL/泵冲程,可以在 1.25 ml/h ~ 150 ml/h 的范围内调节。喷射系统工作时,使用气压为 0.6 MPa 的稳定气压,将切削液喷射至拉削加工区域。

实验数据采集部分主要由力传感器和数据采集仪组成,具体为:

(1) 力传感器由 4 个压力传感器 CTY204 和 1 个放大板组成,用于检测拉削负载,并将信息放大后传输至数据采集仪。对于力传感器,其输出电压为 0 ~ 10 V,最大负载为 2 t,灵敏度为 2 mV/V,精度为 0.1% F · S,频率响应为 50 Hz;

(2) 数据采集仪选用 uT3408FRS-ICP。该采集仪具有 8 通道模拟,2 通道键相,采样频率设置为 10 240 Hz。采集分析软件使用 uTekAcqu V2.0&uTekSs V2004。

### 1.2 拉削刀具与工件

实验中使用的拉刀和工件分别如图 2 所示。

图 2 中,实验使用的拉刀参数为:

材料为高速工具钢 6542 (W6Mo5Cr4V2);

拉刀总长  $L = 600$  mm,宽度  $b = 16$  mm,前高  $h_1 = 35.04$  mm,后高  $h_{50} = 36.74$  mm;

拉刀表面排布 50 个刀齿,前角  $\gamma_0 = 12^\circ$ ,后角  $\alpha_0 =$

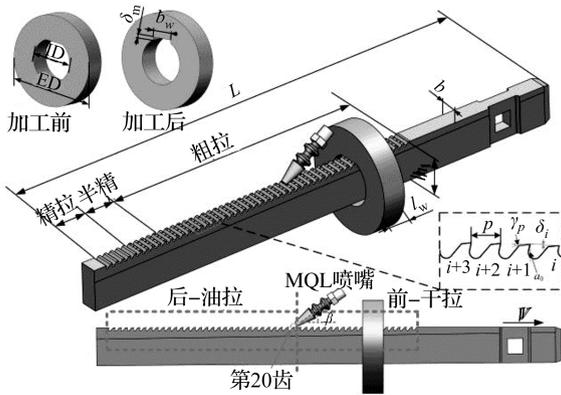


图 2 刀具、工件及喷嘴示意图

$6^\circ$ , 刀齿间距  $p = 6 \text{ mm}$ 。

根据齿升量  $\delta_i$ , 可将拉削过程分为粗拉加工、半精拉加工、精拉加工 3 部分; 刀齿数分别为: 粗拉部分为 40, 半精拉部分和精拉部分都为 5。粗加工和半精加工部分刀齿后刀面, 开设有均布的等宽等深分屑槽, 呈 3 分屑槽与 4 分屑槽交替分布。

实验中使用的工件参数为:

材料为 AISI 1045 结构钢, 其外径  $ED = 90 \text{ mm}$ , 内径  $ID = 43 \text{ mm}$ , 工件厚度  $l_w = 20 \text{ mm}$ ; 拉削后切深  $\delta_m = 1.88 \text{ mm}$ 。

### 1.3 实验过程

本文分别采用 5 种不同植物油和传统商用拉削油进行拉削实验。5 种不同植物油分别为: 纯蓖麻油、玉米油、芝麻油、橄榄油和大豆油(罗恩试剂)。实验中, 通过 MQL 系统, 将不同植物油喷射到刀具和工件的接触区域。

为了保证该实验的稳定性, 排除系统误差, 本研究将 MQL 喷嘴对准拉刀的第 20 个刀齿, MQL 装置的喷嘴与拉刀的倾角  $\beta = 30^\circ$ , 将拉刀分为前半段干拉削和后半段切削油拉削, 让每次拉削的前半段为对照。

同时, 也进行了前后半段都为干拉削的情况作为对照。

在使用各组润滑油的情况下, 实验各重复 3 次。

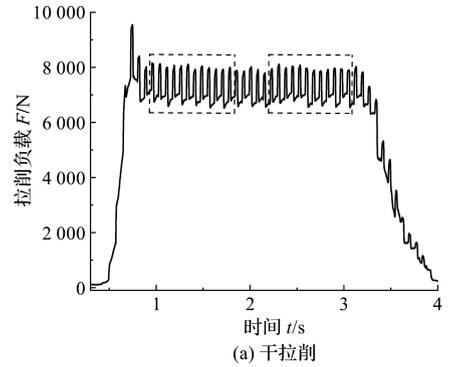
## 2 不同植物油拉削实验结果

### 2.1 拉削负载

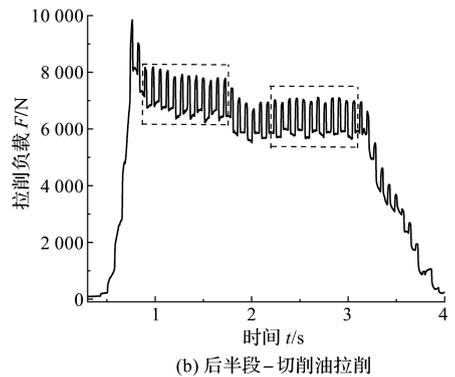
拉削负载是拉削工艺性能优劣的最为直接的评价之一, 该指标直接反应拉削过程的难易程度。

不同的拉削工况下, 拉削负载的信号反馈也有不同。

将采集仪采集的不同工况下的负载信号进行处理后, 得到的结果如图 3 所示。



(a) 干拉削



(b) 后半段-切削油拉削

图 3 不同拉削工况下的负载

图 3 中, 由于刀齿间距  $p = 6 \text{ mm}$ , 工件厚度  $l_w = 20 \text{ mm}$ , 在拉削过程中, 工件和刀具的啮合齿数为 3 齿与 4 齿交替, 在拉削负载上表现为高低起伏, 在 4 齿啮合时呈现高值, 在 3 齿啮合时呈现低值, 即在拉削阶段, 负载曲线中会存在波峰与波谷, 且在后半段喷射切削油后, 负载明显降低。

该实验将选取较为稳定的前后阶段数据, 即图 3 中前后虚线框中的 12 个波峰与波谷, 求平均值作为拉削负载, 并进行对比分析, 得到的结果如图 4 所示。

图 4(a,b) 中,  $\Delta F$  为前半段干拉削均值与后半段油拉削均值的差值, 其值大小表明了植物油对拉削负载的降低程度。

不同植物油作用下的  $\Delta F$  值如图 4(c) 所示。从图 4(c) 中可以看出: 波峰与波谷的负载变化趋势一致, 蓖麻油的负载降低最小, 波峰值降低 412 N, 波谷值降低 281 N。

传统油的波峰值降低 516 N, 波谷值降低 432 N, 而芝麻油的负载降低程度最大, 波峰值降低 898 N, 波谷值降低 705 N。这与传统油相比, 负载降低程度分别增加了 74.0% 和 63.2%。

### 2.2 工件表面粗糙度

工件表面粗糙度是反映拉削效果最重要的参数之

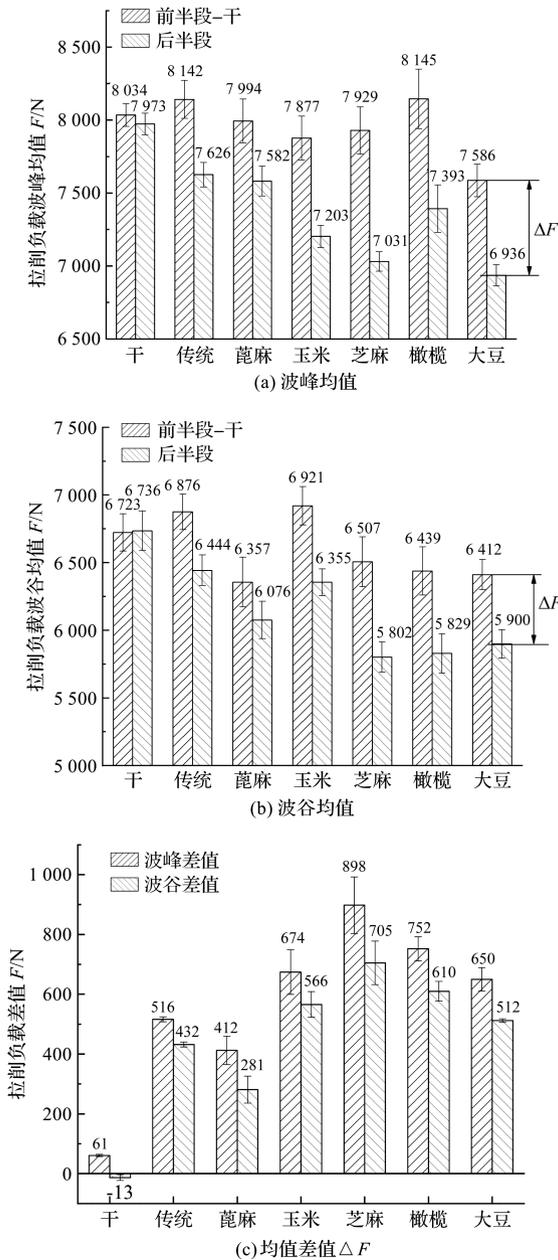


图4 不同拉削工况下的负载

一,体现了加工后的加工质量与加工精度。

本文对于7种拉削工况,采用SJ-210表面粗糙度仪,对被加工工件的表面粗糙度进行3次测量,然后计算其平均值,最后绘制成柱形图,如图5所示。

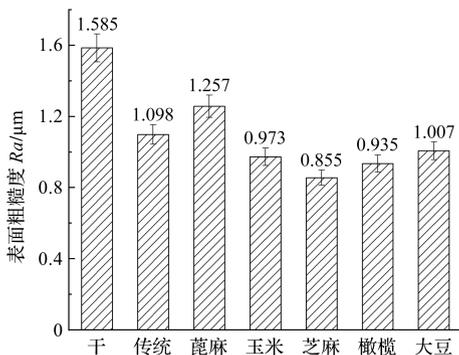


图5 不同拉削工况下的表面粗糙度

从图5中可以看出:

- (1) 表面粗糙度的变化趋势与负载降低程度相反,即较小的粗糙度值对应着较大程度的负载降低;
- (2) 在传统油作用下的粗糙度为  $1.098 \mu m$ ,而芝麻油的应用下,粗糙度值在几种工况中最小为  $0.855 \mu m$ ,这与传统油的粗糙度值相比减小了 22.1%,即 MQL 芝麻油的应用,可以提高 22.1% 的表面质量。

### 3 实验结果分析

对于拉削实验,植物油的分子结构会对拉削负载和表面粗糙度产生不同的影响。拉刀拉削工件产生摩擦时,这一过程中油膜承受较大负荷,导致保持流体润滑的可能性较小,几乎都呈现为边界润滑状态。

在边界润滑状态下,植物油在拉削区域,通过物理吸附和化学反应成膜来实现润滑作用,而这与植物油的分子结构特性相关<sup>[12-14]</sup>。

植物油主要成分是由脂肪酸和甘油化合而成的甘油三酯。不同的植物油,其脂肪酸种类和含量各不相同,从而影响了其本身的物理化学性能,以及应用于拉削加工时的润滑冷却性能。

该实验所采用的5种植物油的脂肪酸含量如表1所示。

表1 不同植物油脂肪酸含量(%)

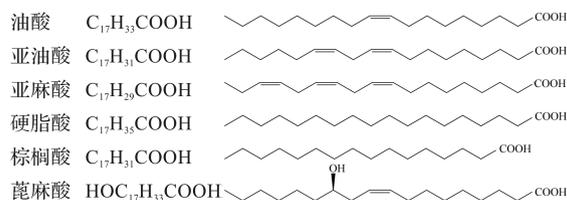
类别	植物油				
	蓖麻油	玉米油	芝麻油	橄榄油	大豆油
油酸	3.0-9	20.0-42.2	34.4-45.5	55-83	17.7-28
亚油酸	2.0-3.5	34.0-65.6	36.9-47.9	3.5-21	49.8-59
亚麻酸	-	0-2	0.2-1	0-1	5-11
硬脂酸	-	0-3.3	4.5-6.7	0.5-5	2.5-5.4
棕榈酸	-	8.6-16.5	7.9-12	7.5-20	8-13.5
蓖麻酸	80-88	-	-	-	-

脂肪酸又分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸。碳链中没有不饱和键的脂肪酸称为饱和脂肪酸,而碳链中含双键的脂肪酸称为不饱和脂肪酸。

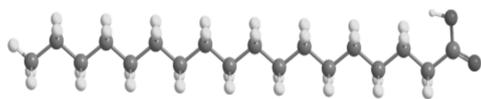
表1中,油酸、亚油酸、亚麻酸、蓖麻酸是不饱和脂肪酸,硬脂酸和棕榈酸则是饱和脂肪酸。

这6种脂肪酸的分子结构示意图,以及油酸(不饱和脂肪酸)和硬脂酸(饱和脂肪酸)的球棍模型如图6所示。

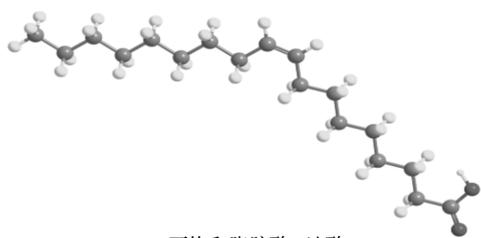
对于脂肪酸而言,饱和脂肪酸的润滑性能优于不



(a) 脂肪酸的分子结构



(b) 饱和脂肪酸-硬脂酸



(c) 不饱和脂肪酸-油酸

图 6 脂肪酸的分子结构和球棍模型

饱和脂肪酸<sup>[15]</sup>。在不饱和脂肪酸中,脂肪酸分子  $C=C$  双键数量较少的润滑膜强度,强于  $C=C$  双键数量较多。其原因在于:

(1)  $C=C$  双键容易氧化导致植物油降解,从而使油膜失效;

(2) 不饱和脂肪酸分子链中的  $C=C$  双键所在处,会导致碳链弯曲,降低其吸附膜的致密度,使得油膜强度及润滑性能降低。

芝麻油有着最大程度的负载降低和最低的表面粗糙度,这是由于芝麻油中的饱和脂肪酸,特别是硬脂酸在 5 种油中含量较高。

已有的研究表明:饱和脂肪酸,尤其是硬脂酸对摩擦和磨损的减少具有显著影响,其通过增强分子之间的作用力,为油膜提供更为强有力的保护<sup>[16]</sup>。

对于橄榄油、玉米油和大豆油而言,其饱和脂肪酸含量相近,且较不饱和脂肪酸含量较少。在不饱和脂肪酸中,含一个  $C=C$  双键的油酸润滑性能比多个  $C=C$  双键的亚油酸和亚麻酸较好。橄榄油在 3 种油中有着最高含量的油酸,所以其润滑性能在 3 种油中最好,有着较高度度的负载降低和较好的表面粗糙度。

对于玉米油和大豆油,因为大豆油有着最高含量的 3 个  $C=C$  双键的亚麻酸,其润滑性能较差,负载降低程度较小,表面粗糙度也较高。

蓖麻油的不饱和脂肪酸含量较高,其主要成分是

蓖麻酸,比其他植物油多了  $-OH$  基团,其极性比其他植物油强,金属吸附及润滑的能力十分优异,很容易吸附在金属摩擦表面形成膜。但蓖麻油粘度较高(蓖麻油在  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,运动粘度为  $252\text{ mm}^2/\text{s}$ ,而其他植物油粘度值都在  $30\text{ mm}^2/\text{s} \sim 40\text{ mm}^2/\text{s}$  内),不易进入刀具与工件接触的狭窄楔形区,因此,负载降低程度较小,其表面粗糙度在几种油中是最高。

综上所述,芝麻油在 5 种植物油中有着最好的拉削性能。芝麻油是一种植物油,没有传统油的复杂制作工艺和配方,也不含传统油的毒性成分。将其应用到拉削加工中,对环境友好,回收处理较传统油方便;同时,其不仅具有良好的实用性与经济性,且与实验采用的 MQL 方式和传统浇注式供液相比,也可以减小切削液的使用量。

## 4 结束语

针对拉削工况中的高负载、摩擦磨损严重的问题,本研究提出将植物油作为切削液,应用于拉削加工实验中;并使用微量润滑系统,将 5 种常见植物油以及传统拉削油喷射到加工区域。

实验结果表明:由于芝麻油分子优异的润滑性能,在 MQL 芝麻油的应用下,与传统拉削油相比,负载降低程度在波峰和波谷均值上分别提高了 74.0% 和 63.2%,同时,表面粗糙度也提高了 22.1%。

因此,将芝麻油作为切削液,可以在改善拉削性能的同时,其具有成分简单、绿色经济环保的优点,对切削液的成分优化具有参考意义。

## 参考文献 (References):

- [1] STONEY R, PULLEN T, ALDWELL B, et al. Observations of surface acoustic wave strain and resistive strain measurements on broaching tools for process monitoring[J]. **Procedia CIRP**, 2014(14):66-71.
- [2] 倪敬,顾瞻华,杨肖.内孔拉削动态负载计算模型[J].浙江大学学报:工学版,2017,51(3):445-452.
- [3] OSAMA M, SINGH A, WALVEKAR R, et al. Recent developments and performance review of metal working fluids[J]. **Tribology International**, 2017(114):389-401.
- [4] 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.

- [5] ELGNEMI T, AHMADI K, SONGMENE V, et al. Effects of atomization-based cutting fluid sprays in milling of carbon fiber reinforced polymer composite[J]. **Journal of Manufacturing Processes**, 2017(30):133-140.
- [6] HOSSEINI T A, SHABGARD M, PILEHVARIAN F. On the feasibility of a reduction in cutting fluid consumption via spray of biodegradable vegetable oil with compressed air in machining inconel 706[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2015(104):422-435.
- [7] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Hybrid cooling and lubricating technology for cnc milling of inconel 718 nickel alloy[J]. **Procedia Manufacturing**, 2017(11):625-632.
- [8] AJAY V B S, AMARNATH M, DURWESH J, et al. Influence of coconut oil on tribological behavior of carbide cutting tool insert during turning operation[J]. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2018, 40(9):450.
- [9] SAHAB A S A, ABD R E, SAFIAN S, et al. The influence of modified vegetable oils on tool failure mode and wear mechanisms when turning AISI 1045[J]. **Tribology International**, 2019(129):347-362.
- [10] 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.
- [11] ELMUNAFI M H S, KURNIAWAN D, NOORDIN M Y. Use of castor oil as cutting fluid in machining of hardened stainless steel with minimum quantity of lubricant[J]. **Procedia CIRP**, 2015(26):408-411.
- [12] 张彦彬,李长河,贾东洲,等. 纳米粒子射流微量润滑磨削镍基合金润滑性能实验评价[J]. **组合机床与自动化加工技术**, 2015(6):113-117.
- [13] 孙洪佩. 润滑系统液压软管失效分析与研究[J]. **液压气动与密封**, 2018(3):84-86.
- [14] 朱可. 浅谈静压轴承润滑系统的调试及保护条件[J]. **液压气动与密封**, 2017(9):60-63.
- [15] 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.
- [16] WANG Y G, LI C H, ZHANG Y B, et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/work-piece interface in MQL grinding with different nanofluids[J]. **Tribology International**, 2016(99):198-210.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>