

引文格式: 裴宏杰, 李付, 陈钰荧, 等. 微量润滑系统的喷射雾化特性研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(7): 70-76.

PEI Hongjie, LI Fu, CHEN Yuying, et al. Atomizing spray characteristics study of minimum quantity lubrication system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(7): 70-76.

微量润滑系统的喷射雾化特性研究*

裴宏杰, 李付, 陈钰荧, 王贵成

(江苏大学, 镇江 212013)

[摘要] 为了揭示微量润滑系统的喷射雾化规律, 采用基于激光多普勒效应的三维粒子动态分析仪测量了油滴雾化特性。针对3种可降解绿色润滑油——三羟甲基丙烷三油酸酯、植物油6000和聚乙二醇400, 测试得到了不同的油量、空气流量和截距条件下的雾化锥角及油滴大小、速度、数量的分布规律。试验表明, 喷雾锥角主要由喷嘴结构决定, 油滴数量基本符合正态分布且空气流量和油量对油滴数量影响较大, 油滴速度分布曲线呈钟形且射流中心速度最高。该雾化分布特性对实施微量润滑加工具有重要的工程意义。

关键词: 微量润滑; 雾化; 油滴; 植物油; 绿色加工

Atomizing Spray Characteristics Study of Minimum Quantity Lubrication System

PEI Hongjie, LI Fu, CHEN Yuying, WANG Guicheng

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

[ABSTRACT] To reveal the spray atomization rule of the minimum quantity lubrication system, a three-dimensional particle dynamic analyzer based on laser Doppler effects was used to measure the atomization characteristics of oil droplets. For the three degradable green lubricating oils—trimethylolpropane trioleate, vegetable oil 6000 and polyethylene glycol 400, the atomization cone angle and distribution law of oil droplet size, speed and quantity under different oil volume, air flow and intercept conditions were tested. Experiments show that the spray cone angle was mainly determined by the nozzle structure, the number of oil droplets basically conformed to the normal distribution, and the air flow and oil quantity had a greater influence on the number of oil droplets, the oil drop velocity distribution had a bell-shaped curve and the jet center velocity was the highest. This atomization distribution characteristic had important engineering significance for the implementation of minimum quantity lubrication processing.

Keywords: Minimum quantity lubrication; Atomization; Oil droplets; Vegetable oil; Green machining

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.07.070

微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)技术, 目前在铸造铝合金、变形合金、高合金轴承钢、淬火和回火钢等材料的车削、铣削、钻削、攻丝、螺纹成形、深孔钻、锯切等切削加工中, 已能够完全代替传统湿切削^[1-3]。传统湿切削的冷却液是以连续的形式注入切削区域, 而MQL是以油滴形式喷射抵达刀具-工件之间的接触区边界, 进而渗透进入刀具-工件之间界面, 然后形成有效的润滑膜, 减小摩擦和磨损, 因此MQL油滴的雾化参

数对加工具有重要的影响。国内外学者关于MQL雾化特性进行了大量的研究。

2004年, 东京工业大学的Kamata等^[4]采用CFD方法对MQL的流场进行了分析, 得到了后刀面的流场速度和压力分布。2009年, 日本东京大学的Obikawa等^[5]对MQL精密车削Inconel 718钢3种喷嘴的油雾流场进行了CFD仿真, 发现当喷嘴靠近刀尖时, 靠近切削刃的油滴数量显著增加, 并且尺寸太小的油滴不能有效达到切

* 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04009031-4)。

削区域,试验结果与仿真一致。2010年,德国富特旺根大学 Tawakoli 等^[6]对 MQL (HAKUFORM 20-34 油)雾化参数对平面周磨 100Cr6 淬硬钢的影响进行了研究,其中雾化参数包括流量(20mL/h、50mL/h、100mL/h)、空气压力(200kPa、300kPa、400kPa、700kPa)、喷射靶距(40mm、60mm、80mm、120mm)和喷射方向(工件、弧区、倾斜喷射砂轮、垂直喷射砂轮),发现随着空气压力与流量的增加,磨削力和粗糙度降低,并且倾斜喷射砂轮润滑效果最好,合适靶距为 80mm。2010年,美国密歇根州立大学的 Park 等^[7]采用共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)和图像处理技术分析抛光硅片上的 MQL 雾滴及其分布,发现随着空气压力增大,油滴直径减小,数量增多,合适靶距可获得最大油滴覆盖面积。2013年,伊朗塔比阿特莫达勒斯大学的 Emami 等^[8]研究了 MQL 雾化和喷射参数对磨削 Al_2O_3 工程陶瓷的影响,通过理论建模和试验分析了 MQL 的雾化特性,发现空气速度增加时,油滴尺寸减小且速度增大;空气速度、油滴大小和速度会影响喷雾覆盖范围,油滴碰撞速度接近砂轮转速时润滑效果较好,砂轮外部空气吸附层有助于油滴进入砂轮-工件接触区域。2015年,法国圣艾蒂安国立工程师学院(ENISE)的 Duchosal 等^[9]对内置式 MQL 雾滴碰撞刀片建立了仿真模型并进行了试验测量,通过仿真计算得到的油膜形状和尺寸与试验一致。2017年,北京航空航天大学袁松梅等^[10]综述了 MQL 润滑剂的雾滴特性、渗透特性及润滑剂选择方面的研究进展。2018年,山东大学张松等^[11]对气体流量和喷射距离对 MQL 油滴大小、尺寸分布及其油滴覆盖率的影响进行了研究,结果表明,适当缩短喷射距离和增大气体流量可以提高油滴覆盖率和减少油滴尺寸。

上述研究中,对 MQL 喷射雾化部分特性进行了仿真和试验,对油滴大小、速度、数量和覆盖范围以及不同可降解润滑油的雾化特性并未全面涉及。因此本文基于美国 Accu-Lube MQL 系统,对 3 种可降解润滑油的雾化特性进行测试,对揭示 MQL 润滑机理和工程应用具有重要意义。

1 试验系统

1.1 润滑油的选择

MQL 用润滑油,属于环境友好润滑剂,必须满足切削加工时的润滑性能,同时在较短时间内可生物降解,生态毒性低,对生态环境无危害,或者一定程度上被环境容许。

选取了 3 种可生物降解润滑油,即三羟甲基丙烷三油酸酯(Trimethylolpropane trioleate, TMPTO, $CH_3CH_2C(CH_2OOC_{17}H_{33})_3$)、植物油 6000 (Vegetable oil 6000,

VO 6000)和聚乙二醇 400 (Polyethylene glycol 400, PEG 400, $HO(CH_2CH_2O)_nH$),其理化性质如表 1 所示。

1.2 油滴测试方案

试验测试系统采用丹麦 DANTEC 公司生产的基于激光多普勒效应的三维粒子动态分析仪(Particle dynamic analyzer, PDA)进行油滴雾化测量。

切削加工中, Accu-Lube MQL 系统要求喷嘴到刀尖的距离为 10~30mm。因此油滴测量从喷嘴出口开始,截距分别为 10mm、20mm、30mm,垂直于射流轴线,相应 3 个截面测量油滴粒径、数量及速度,如图 1 所示。喷射方向向下,采样时间 10s。雾化喷嘴孔径为 4mm。

试验序号定义为“字母-数字-数字-数字”,其命名规则如表 2 所示。

1.3 油雾评价指标

油雾评价指标,包括喷雾锥角、液滴尺寸分布和平均直径等^[12]。

(1)喷雾锥角。切削液从喷嘴喷出后呈锥形扩散,两条喷雾边界切线之间的夹角即为喷雾锥角 θ (图 1)。喷雾锥角越大,润滑油覆盖面积就越大。

(2)液滴尺寸分布。液滴尺寸分布是指不同直径液滴的数量、质量和体积分布等。一种方法横坐标为液滴直径,纵坐标通常为液滴数目、体积或质量,或者所占比例;另一种方法用在某一直径以下的所有液滴数目、表面积、体积或质量占对应总数的百分含量,称为液滴尺寸的累计分布。

(3)平均直径。为了描述液滴直径大小不一的实

表 1 3 种润滑油的性能指标

Table 1 Performance specifications of three lubrication oils

性能指标	TMPTO	VO 6000	PEG 400
黏度(40℃)/($mm^2 \cdot s^{-1}$)	49.22	8.05	40
倾点/℃	<-45	-40	-65
闪点/℃	300	214	177
密度/($g \cdot mL^{-1}$)	0.85	0.93	1.14
水溶性/%	溶, <0.5	—	—

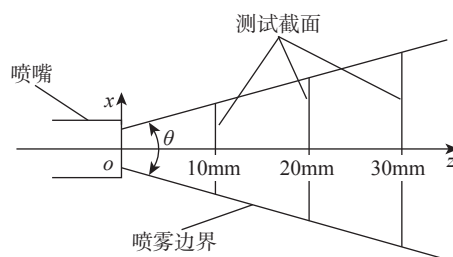


图 1 PDA 测试位置示意图

Fig.1 PDA test location diagram

表 2 试验序号命名规则

Table 2 Experiment nomenclature rules

位数	项目	内容			
第 1 位	字母	P	V	T	—
	润滑油	PEG 400	VO 6000	TMPTO	—
第 2 位	数字	1	2	3	4
	油量 / (mL · h ⁻¹)	2.3	4.6	6.9	9.2
第 3 位	数字	1	2	3	—
	空气流量 / (m ³ · h ⁻¹)	2.4	3	3.6	—
第 4 位	数字	10	20	30	—
	截距 / mm	10	20	30	—

际喷雾场,采用一个液滴尺寸完全均匀一致的假设喷雾场代替,这个假想均匀一致液滴直径就是平均直径。常用的平均直径的表示方法有长度平均直径 D_{10} 、表面积平均直径 D_{20} 、体积平均直径 D_{30} 、索特 (Sauter) 平均直径 D_{32} 和德布鲁克 (De Brouchere) 平均直径 D_{43} 等。各平均直径所代表的含义不同,应用领域相应也不同。动力装置最常用的是 D_{32} ,液体流动常采用 D_{30} 等。

2 PDA 试验结果与讨论

2.1 综合测试结果

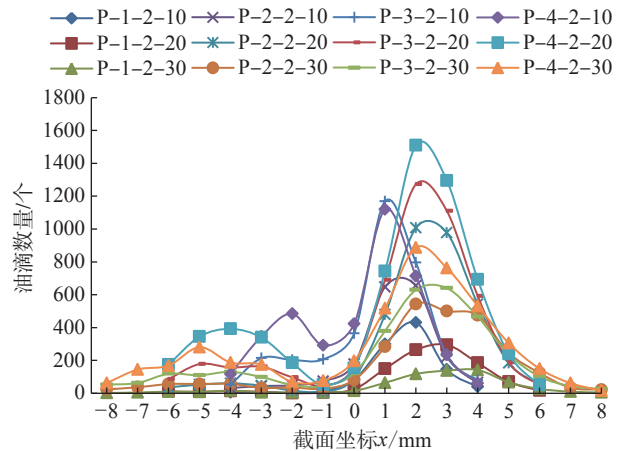
PDA 测试结果如图 2~8 所示。其中图 2~4 为 3 种油品所有的测试结果,分别包括油滴大小、速度和数量在不同截面的分布。由于图 2~4 数据太多不容易分辨,因此针对不同工况,分别用图 5~8 细化表示。其中,根据图 2~4,可得到以下结论:

(1) 油滴覆盖范围与截距有关。截距为 10mm 时,对应坐标分布范围为 -1~4mm;截距为 20mm 时,对应坐标分布范围为 -1~6mm;截距为 30mm 时,对应坐标分布范围为 -1~8mm。相应可计算出对应的喷雾锥角 $\theta = 2 \cdot \arctan 2/10 = 22.62^\circ$ 。喷雾锥角主要由喷嘴结构决定,与油品、压缩空气流量和压力、润滑油流量等因素基本无关。

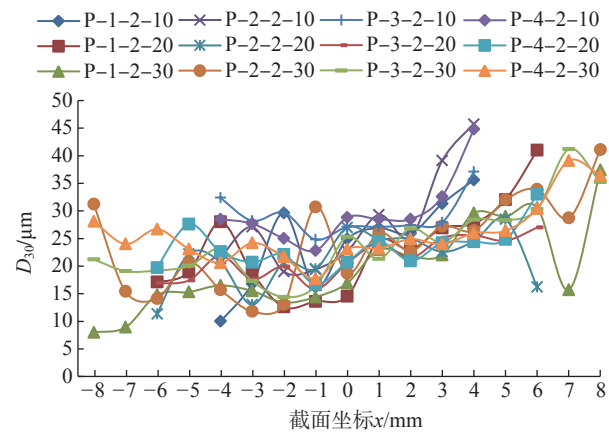
(2) 油滴数量基本符合正态分布,以分散中心呈左右对称分布。随着截距的增大,飘散在覆盖范围外的油滴数量增多。

(3) 油滴平均直径 D_{30} 基本在 22~32 μm 范围内。在截距 10mm、20mm、30mm 处,油滴直径逐渐减小。在 x 坐标 [1, 4]mm 范围内,油滴大小相对均匀,并且随着 x 向外增大,油滴直径增大。

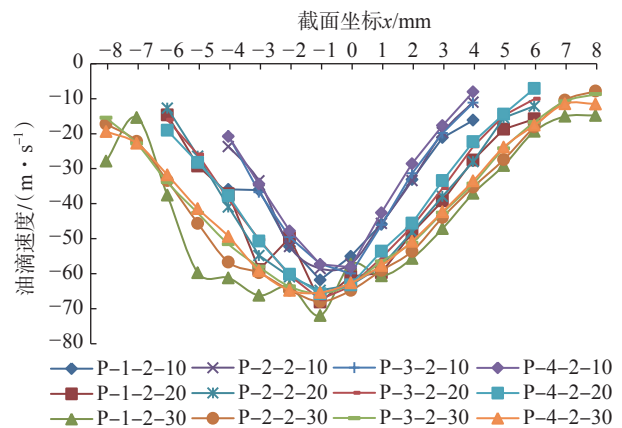
(4) 油滴速度分布曲线呈钟形,射流中心速度最高。沿截面向外,油滴速度呈梯度减小。在截距 10mm、



(a) 油滴数量分布图



(b) 油滴大小分布图



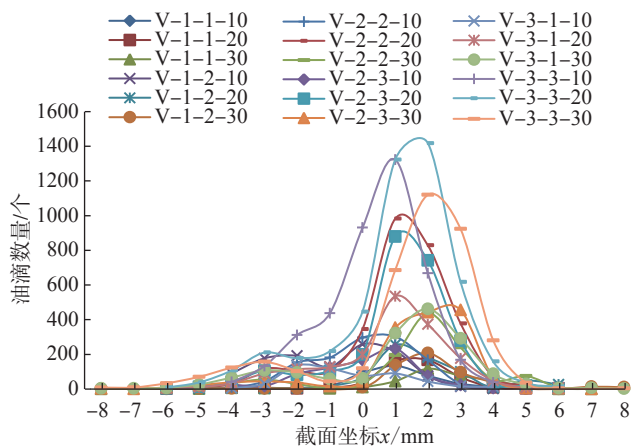
(c) 油滴速度分布图

图 2 聚乙二醇 400 雾化 PDA 测试结果

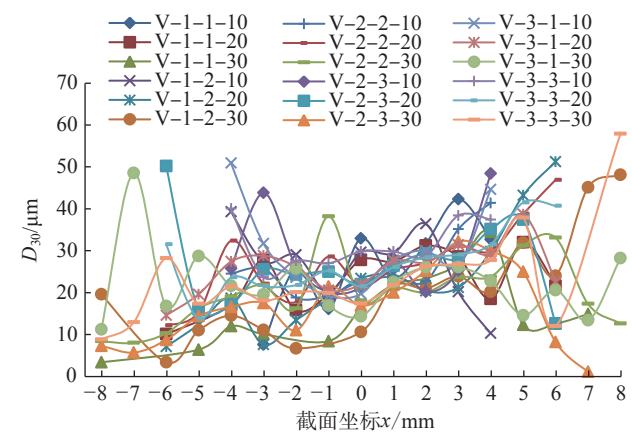
Fig.2 PDA test results of PEG 400 atomization

20mm、30mm 处,不同工况的油滴速度接近。随着截距逐渐增大,油滴速度增大。

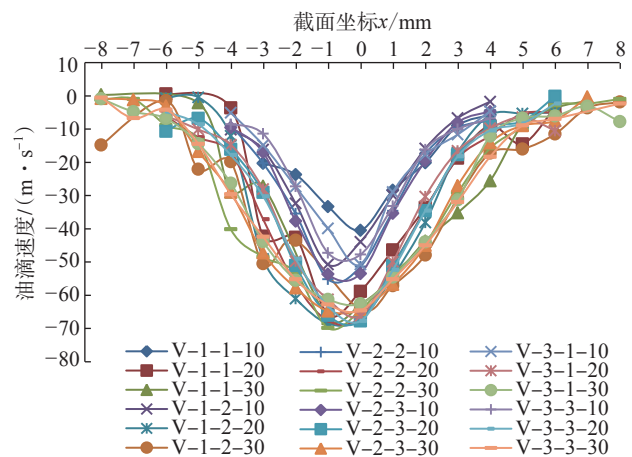
但在图 2 (a)、3 (a) 和 4 (a) 中,油滴数量分布中心线和射流中心不重合。由于油管在竹节管处固定偏差,造成油雾中心线和喷嘴的中心线不重合,使得油滴分布偏置,但总体对分析问题影响不大。



(a) 油滴数量分布图



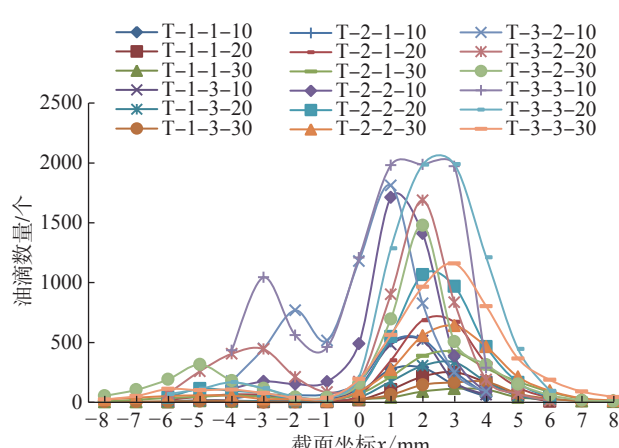
(b) 油滴大小分布图



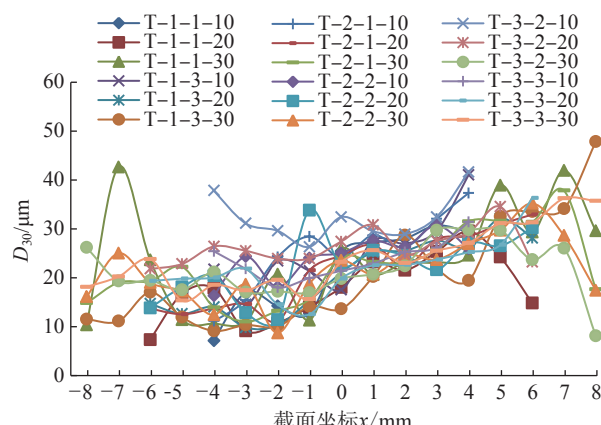
(c) 油滴速度分布图

图3 植物油 6000 雾化 PDA 测试结果

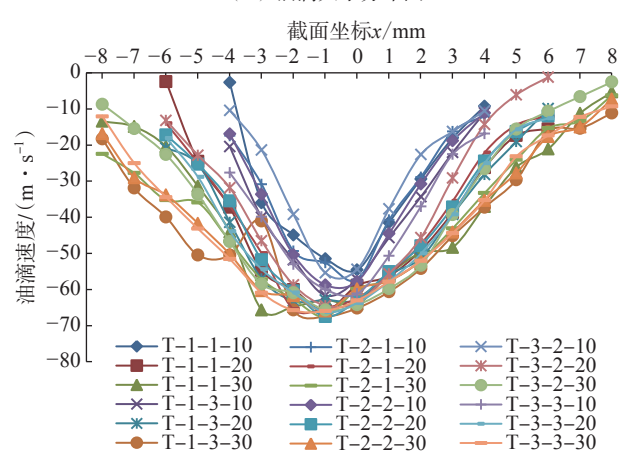
Fig.3 PDA test results of VO 6000 atomization



(a) 滴数量分布图



(b) 油滴大小分布图



(c) 油滴速度分布图

图4 三羟甲基丙烷三油酸酯雾化 PDA 测试结果

Fig.4 PDA test results of TMPTO atomization

2.2 油量对雾化的影响

根据图 5 (a),随着聚乙二醇 400 油量的增大,油滴数量增大,但增加速率减慢,而油滴数量的分布范围基本没有变化。由图 5 (b)可知,油量增大,油滴平均直径变化不大,原因可能在于空气对油滴的剪切作用变化不大,使得其变化甚小。由图 5 (c)可知,油量增大,油

滴数量增多,空气对油滴的推力减小,相应阻力增加,使得油滴速度降低。油滴速度分布呈钟形分布,喷射轴线油滴速度最高,随着离轴线 x 向距离的增加,油滴速度呈梯度减小。

在油滴分布区间截面坐标 $[-1, 6]$ mm 范围内,随着 x 坐标增加,远离喷射轴线,油滴平均直径增大,相应油

滴速度减小。一方面,根据流体力学,射流中心到边界,速度呈梯度减小;另一方面,很多较小液滴发生碰撞,在表面张力作用下,合成一个较大液滴,根据动量守恒定律,液滴速度减小。

2.3 截距对雾化的影响

图6给出了截距对植物油6000雾化的影响。由图6(b)~(d)可知,在截距10mm处,油滴数量较多,油滴平均直径最大,油滴速度最小;在截距20mm处,油滴数量

最多,油滴平均直径较小,油滴速度较大;在截距30mm处,油滴数量最少,油滴平均直径最小,油滴速度最大。

在喷嘴截距0~10mm处,油滴数量较多,但由于锥角太小,空间有限,造成截距10mm处油滴直径最大,速度最低。在截距10mm处,油滴速度最低,空气速度和油滴速度差距最大,韦伯数较大,油滴容易破碎,再加上油滴之间碰撞,根据动量守恒定律,使得在截距20mm处和30mm处,油滴速度越来越大,直径越来越小。虽然

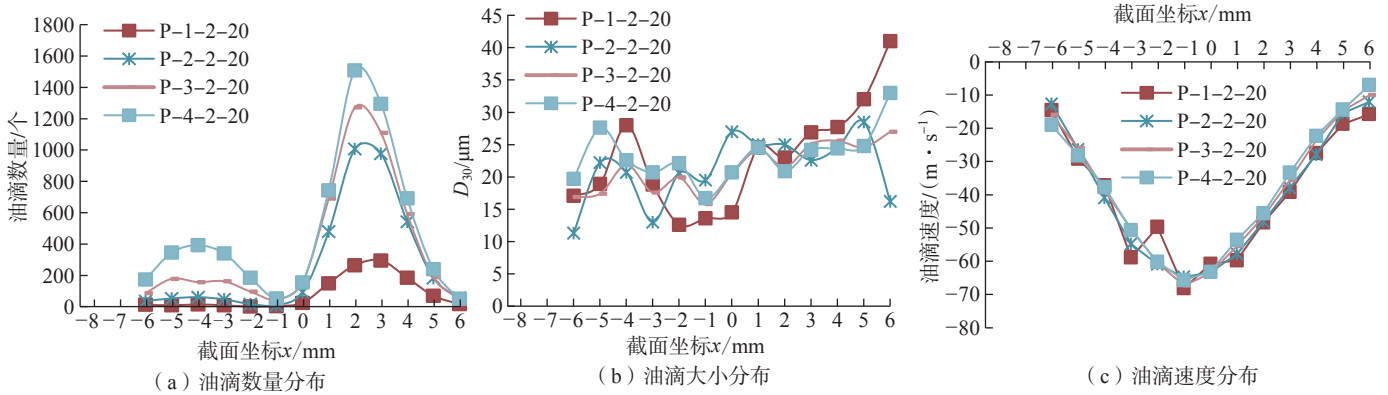


图5 油量对雾化分布的影响

Fig.5 Effect of oil quantity on atomization

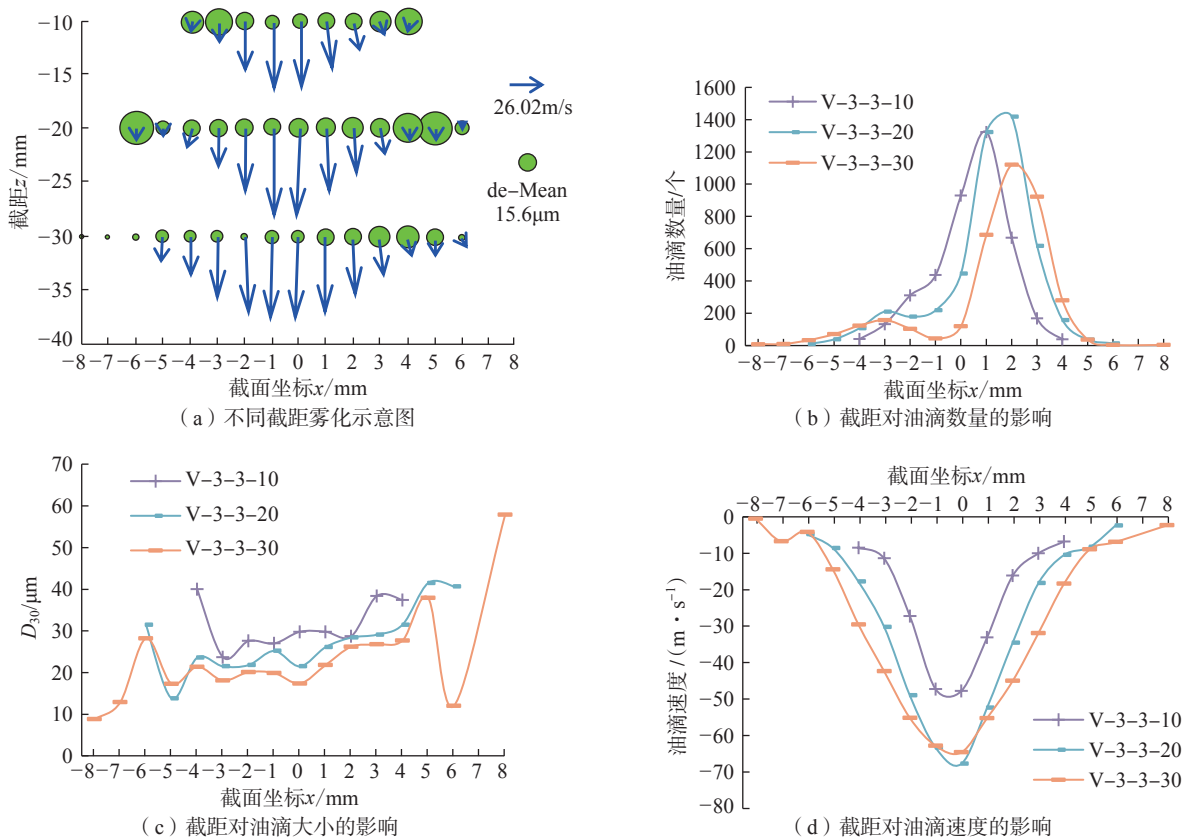


图6 截距对雾化的影响

Fig.6 Effect of intercept on atomization

在截距 20mm 处油滴数量增加,但在截距 30mm 处分散范围更大,使得中心部位油滴数量减小。

2.4 空气流量对雾化的影响

图 7 为空气流量对三羟甲基丙烷三油酸酯雾化的影响。可以看出,随着空气流量的增加,油滴数量增多,但数量分布范围基本没有变化。空气流量增加,虽然油滴直径减小和速度增大,但同样变化量甚小。

在实际加工中,压缩空气流速太大,使得刀具与工件接触楔形区^[13]内的正压太高,阻碍油滴的前行。但是如果压缩空气流速太低,一方面使得油滴的速度太小,不足以穿越楔形区内的正压区;另一方面,空气流速太低,楔形区内的最高压力减小,使得里面负压力梯度减小,进而油滴通过毛细管渗透进入刀具-工件接触区域就比较困难。因此需要合适的空气流速。

2.5 不同油品的雾化

图 8 为不同油品的雾化分布情况。可以看出,三羟

甲基丙烷三油酸酯和聚乙二醇 400 的分布情况基本一致,而植物油 6000 的油滴数量相比稍微降低,同时分布中心左移,分散范围由 $[-1,6]$ mm 减小到 $[-1,4]$ mm,更加集中。植物油 6000 的油滴直径增加,速度减小,可能植物油的雾化性能稍差。在截距坐标 1mm 处,植物油的数量最多 982 个,其平均直径为 $25.5\mu\text{m}$,与三羟甲基丙烷三油酸酯的 $25.6\mu\text{m}$ 和聚乙二醇 400 的 $25\mu\text{m}$ 相近。

3 结论

(1) MQL 喷雾锥角主要由喷嘴结构决定,油品、空气流量和压力、润滑油油量等因素的影响较小。

(2) 油滴数量基本符合正态分布,空气流量和油量对油滴数量影响较大,但数量分布范围变化甚小。随着空气流量和油量增多,油滴数量增多。截距 20mm 处,油滴数量最多。

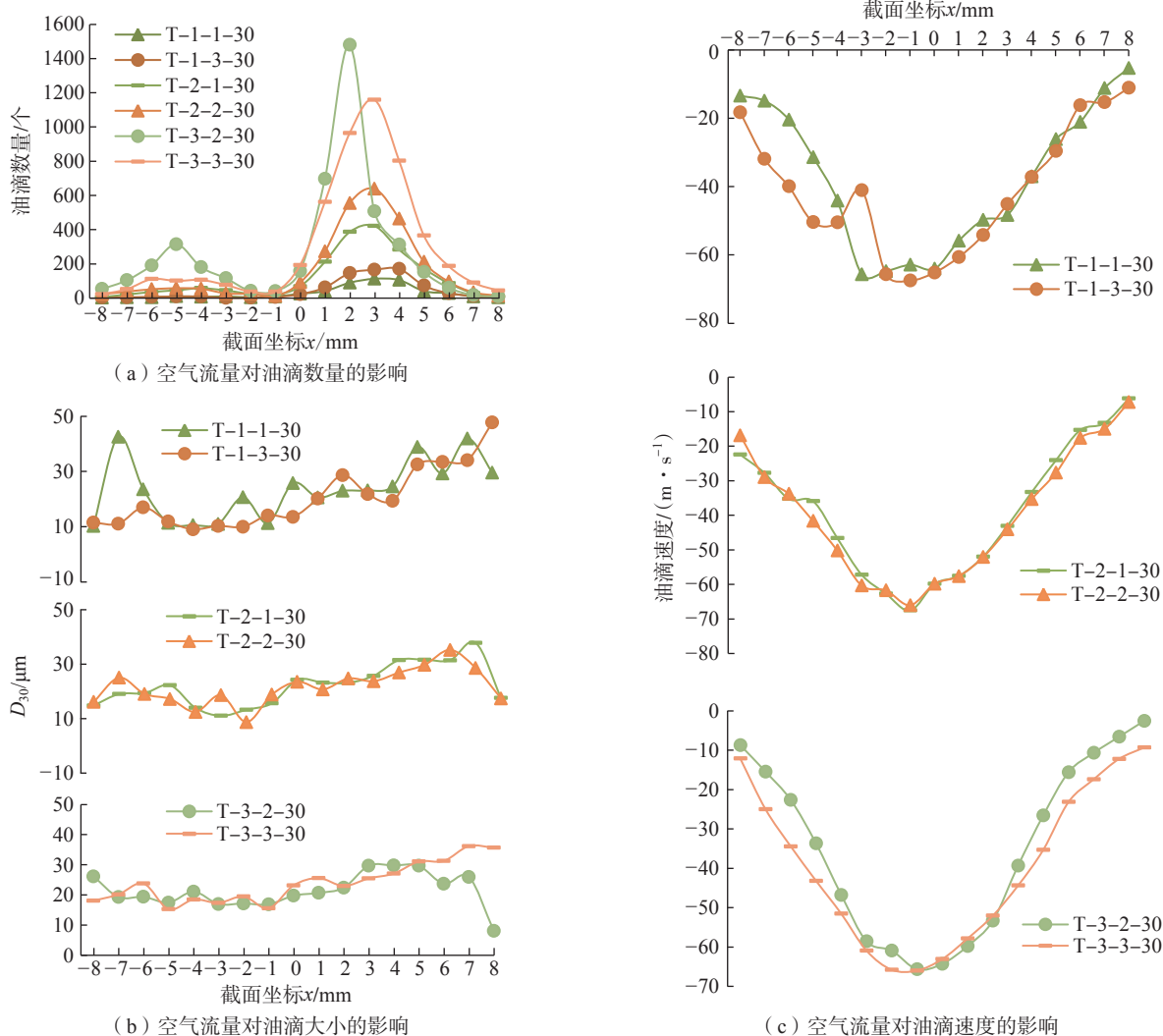


图 7 空气流量对雾化的影响

Fig.7 Effect of air flow on atomization

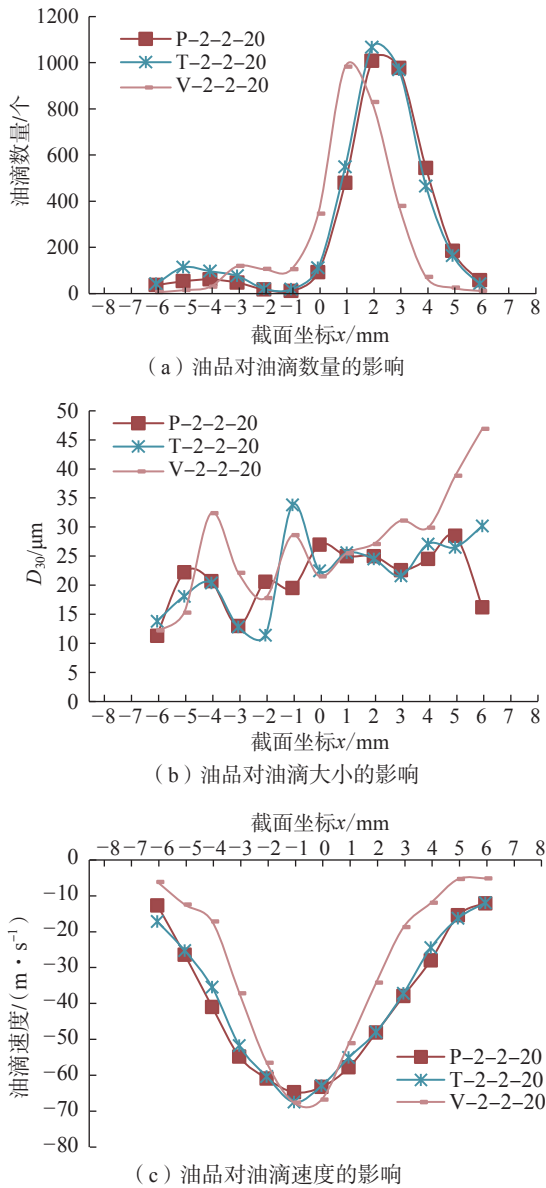


图8 不同油的雾化分布
Fig.8 Atomization of different oils

(3) 油滴速度分布曲线呈钟形,射流中心速度最高。截距对油滴速度影响较大,随着截距增大,油滴速度增大。其他条件下的油滴速度接近。

(4) 油滴平均直径 D_{30} 基本在 $22\sim 32\mu\text{m}$ 范围内。截距对油滴直径影响较大,随着截距增大,油滴直径逐渐减小。空气流量和油量对油滴直径影响较小。

(5) 三羟甲基丙烷三油酸酯和聚乙二醇 400 的分布情况基本一致,而植物油 6000 的油滴数量相比稍微降低,同时分布中心左移,分散范围缩小。

参考文献

[1] WEINERT K, INASAKI I, SUTHERLAND J W, et al. Dry

machining and minimum quantity lubrication[J]. CIRP Annals, 2004, 53(2): 511-537.

[2] SHASHIDHARA Y M, JAYARAM S R. Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution[J]. Tribology International, 2010, 43(5/6): 1073-1081.

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

[4] KAMATA Y, OBIKAWA T, SHINOZUKA J. Analysis of mist flow in MQL cutting[J]. Key Engineering Materials, 2004, 257-258: 339-344.

[5] OBIKAWA T, ASANO Y, KAMATA Y. Computer fluid dynamics analysis for efficient spraying of oil mist in finish-turning of Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(12-13): 971-978.

[6] TAWAKOLI T, HADAD M J, SADEGHI M H. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(6): 521-531.

[7] PARK K H, OLORTEGUI-YUME J, YOON M C, et al. A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(9): 824-833.

[8] EMAMI M, SADEGHI M H, SARHAN A A D. Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al_2O_3 engineering ceramics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(3): 374-388.

[9] DUCHOSAL A, WERDA S, SERRA R, et al. Numerical modeling and experimental measurement of MQL impingement over an insert in a milling tool with inner channels[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 37-47.

[10] 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 Songmei, ZHU Guangyuan, 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.

[11] 张松, 张成良, 石文浩, 等. MQL 条件下的油滴覆盖率及尺寸分布研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 169-177.

ZHANG Song, ZHANG Chengliang, SHI Wenhao, et al. Investigation of oil droplet coverage rate and droplet size distribution under minimum quantity lubrication condition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 169-177.

[12] 曹建明. 液体喷雾学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013. CAO Jianming. Liquid sprays[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.

[13] PEI H J, SHEN C G, HUANG J, et al. Flow field characteristics of the wedge zone between a major flank and a transient surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9-12): 4253-4261.

通讯作者: 裴宏杰, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能制造和精密加工。

(责编 七七)