DOI: 10.3901/JME.2018.03.169

MQL 条件下的油滴覆盖率及尺寸分布研究*

张 松^{1,2} 张成良³ 石文浩^{1,2} 吕 盈^{1,2} 陈 杰^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院 济南 250061;

2. 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室 济南 250061;

3. 中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062)

摘要: 微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)切削过程中, 刀具-切屑界面和刀具-工件界面的油滴覆盖率、油滴大小及其尺寸分布是决定切削区油膜均匀性和覆盖面积大小的重要因素, 进而直接影响微量切削油的润滑性能。针对不同喷射距离和气体流量下的油滴覆盖率、油滴大小及其尺寸分布进行研究。借助于图像处理技术, 获得不同喷射距离和气体流量下的油滴位图, 分析油滴形状以及喷射距离对油滴覆盖率的影响规律; 然后, 利用油滴体积计算模型, 阐释油滴尺寸分布与气体流量之间的内在关系。研究表明: 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, 进而充分发挥 MQL 技术的润滑性能。

关键词: 微量润滑(MQL); 润滑油膜; 油滴覆盖率; 油滴尺寸分布

中图分类号: TG506

Investigation of Oil Droplet Coverage Rate and Droplet Size Distribution under Minimum Quantity Lubrication Condition

ZHANG Song^{1,2} ZHANG Chengliang³ SHI Wenhao^{1,2} LÜ Ying^{1,2} CHEN Jie^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture (Shandong University), Ministry of Education, Jinan 250061;

3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., LTD., Changchun 130062)

Abstract: During minimum quantity lubrication (MQL) cutting processes, the coverage rate of the oil droplet, as well as the droplet size and its distribution at the tool-chip and tool-workpiece interfaces are the important factors influencing the oil film uniformity and oil coverage area at the cutting zone, which then directly determine the lubricating performance of the lubrication oil. The coverage rate of the oil droplet is investigated, as well as the droplet size and its distribution under different spray distance and air flow rate. First, by means of image processing technology, the bitmap images of the oil droplets under different spray distance and air flow rate are obtained, and the effects of droplet shape and spray distance on the coverage rate of the oil droplet is analyzed. Then, the relationship between the oil droplet size distribution and the air flow rate are explored by aid of the mathematic model of the oil droplet volume. The results indicate that the combination of properly shortening the spray distance and increasing the air flow rate is benefit to increasing the coverage rate of the oil droplet, and reducing the droplet size, and then improving the lubrication performance of MQL technology.

Key words: minimum quantity lubrication (MQL); lubrication oil film; oil droplet coverage rate; droplet size distribution

0 前言

金属切削过程中, 切屑与工件表面层金属的塑性变形抗力使得刀具与切屑和工件之间存在着很

高的切削温度、接触应力。切削区的高温、高压加剧了刀具磨损, 破坏刀具的几何形状, 影响加工精度, 降低刀具寿命^[1-3]。欲达到控制切削温度和接触应力, 降低刀具磨损率, 提高刀具寿命, 改善加工精度和表面质量的目的, 除了合理选择刀具材料、几何形状和切削参数外, 合理选择润滑冷却方式也是一个重要因素。

使用大流量切削液的传统润滑冷却方式对于提

* 国家自然科学基金(51575321, 51175309)和山东省泰山学者工程专项经费资助项目。20170315 收到初稿, 20170618 收到修改稿

高刀具寿命和加工质量是有益的,并有利于断屑和排屑^[4]。但切削液采购成本约占零件加工成本的 7%~17%^[5];若再考虑切削液的排放、回收费用,该比例还会进一步增加。另一方面,传统切削液还会造成严重的生态污染^[6-7],对机床操作者的健康造成威胁^[8]。

近年来,随着加工成本的不断提高和人们环保意识的增强,不使用切削液或使用微量切削液的生态友好型加工方式开始应用于机械制造领域^[9]。其中,微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)技术凭借其良好的冷却润滑性能以及低污染等优点,得到了工业界的广泛关注,并逐步应用于车削^[10]、铣削^[11]、钻削^[12]、绞削^[13]和磨削^[14]等加工过程。

MQL 切削过程中,由压缩空气与大量微小切削油滴构成的油-气混合物可以降低刀具与切屑和工件之间的摩擦系数,有效地抑制刀具磨损,减小切削力,并能带走更多的切削热^[15-17]。张春燕等^[18]利用毛细管理论模型分析了微小油滴在刀具-工件界面的渗透作用,发现微小油滴的良好渗透性可以保证 MQL 润滑作用的发挥。TASDELEN 等^[19]发现 MQL 条件下的刀-屑接触长度明显短于干切削条件下的刀-屑接触长度,并且切削时间越短, MQL 的冷却润滑作用越明显。吕宏刚^[20]的研究表明:相对于干切削, MQL 可以使 H13 钢铣削过程中的三个切削分力降低 10%~30%,并能降低表面粗糙度和增大表面层残余压应力值。MULYADI 等^[21]的研究发现:尽管 H13 钢的 MQL 切削过程所需要消耗的能量略高于干切削,但刀具寿命得到了提高。

MQL 切削过程中,经压缩空气雾化后的大量微小油滴在刀具-切屑界面和刀具-工件界面发生沉积,形成润滑油膜,起到润滑作用;此外,高速流动的压缩空气可以加快切削区的热量交换,带走更多的切削热,起到冷却作用。刀具-切屑界面和刀具-工件界面的油滴覆盖率、油滴尺寸大小及其尺寸分布是决定油膜均匀性与覆盖面积大小的重要因素,进而对微量切削油的润滑效果产生直接影响。DUCHOSAL 等^[22-23]对微小油滴在铣刀前刀面的沉积情况进行了分析,研究了不同铣刀转速和气体压力对润滑油膜形成的影响。BALAN 等^[24]利用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)分析了 MQL 磨削过程中的油雾形成。该研究表明:中等尺寸(直径约为 16.3 μm)油滴的润滑性能最佳,可以降低磨削力和表面粗糙度。

MQL 条件下的刀具表面油滴覆盖率、尺寸大小及其分布规律与 MQL 喷射距离、压缩空气流量密

切相关,但迄今为止有关这方面的研究还相对缺乏。因此,本文针对不同喷射距离和气体流量下的油滴覆盖率、油滴大小及其尺寸分布进行研究。首先,借助于图像处理技术,获得不同喷射距离和气体流量下的油滴位图,分析油滴形状以及喷射距离对油滴覆盖率的影响规律;然后,利用油滴体积计算模型,阐释油滴尺寸分布与气体流量之间的内在关系。

1 MQL 油-气混合物制备及油滴采集、分析方法

1.1 MQL 油-气混合物制备

本研究采用微量润滑装置(BASIC4E4, 德国 SKF Vogel 公司)作为油-气混合物供给系统(图 1),该装置的技术参数如表 1 所示。气体采用常温压缩空气(20 $^{\circ}\text{C}$),切削油采用西班牙老鹰公司的 Bescut 173 植物基可降解性切削油。空气流量和切削油用量则分别由不同的流量调节阀控制。压缩空气进入贮油罐后产生一定压力,将切削油通过双层软胶管输送至喷嘴处。从中心油孔喷出的切削油被外围通道喷出的压缩空气包围,在高速气流的剪切作用下破碎成微小油滴(图 2)。

图 1 油-气混合物供给系统示意图

表 1 微量润滑装置技术参数

参数	数值
最大切削油贮存量/L	3
供油范围/(mL/h)	0~100
最高启动气压/MPa	0.60
最低启动气压/MPa	0.25
最低工作压力/MPa	0.20
工作电压/V	24 DC

图 2 喷嘴结构及雾化机理示意图

1.2 油滴采集

为了研究喷嘴下游不同位置处油滴分布情况的变化规律,构建了如图 3 所示的油滴采集装置。一支外部混合式雾化喷嘴被固定在加工中心(DAEWOO ACE-V500, 韩国大字公司)主轴上,喷嘴出口垂直向下,喷嘴距工作台距离为 L 。尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的单晶硅片固定于喷嘴正下方的工作台上,硅片两侧放置挡板以保证其运动至喷嘴正下方时开始采集油滴。经过抛光处理后,单晶硅片表面粗糙度 R_a 小于 0.5 nm ,可以有效地避免单晶硅片表面形貌对光学显微镜下的油滴图像产生干扰。为了精确控制油滴采集时间,利用加工中心的工作台作为试验支撑平台。一方面,通过控制机床工作台的 X 方向移动速度,达到控制油滴采集时间的目的;另一方面,通过控制机床主轴的 Z 方向位置,调节单晶硅板距喷嘴的距离(即喷射距离)。工作台以 $6\,000\text{ mm/min}$ (相当于 0.1 m/s)的速度移动,喷嘴经过硅片正上方的时间为 0.2 s ,即油滴采集时间为 0.2 s 。试验过程中,切削油用量设为 12.6 mL/h ,而空气流量和喷射距离各有三个水平,则共进行 9 组试验(表 2)。其中,空气流量和切削油用量的参数是根

图 3 油滴采集装置示意图

表 2 试验参数表

试验 编号	空气流量 $Q/(L/min)$	喷射距离 L/mm	切削油用量 $m/(mL/h)$
1	30	150	12.6
2	30	220	12.6
3	30	290	12.6
4	40	150	12.6
5	40	220	12.6
6	40	290	12.6
7	50	150	12.6
8	50	220	12.6
9	50	290	12.6

据试验仪器的性能选定的:试验仪器的气体流量为 $20 \sim 60\text{ L/min}$,故选择 30 L/min 、 40 L/min 、 50 L/min 作为试验参数;经过对喷头出油量的多次测量取平均值,得到切削油用量 12.6 mL/h ;喷射距离的选取首先进行了一次预试验,预试验结果表明,当喷射距离低于 100 mm 时,油滴在硅片上会互相粘结在一起,无法分辨;当距离超过 350 mm 时,油滴则会十分稀疏,不利于试验的开展。所以,试验中喷射距离设为 150 mm 、 220 mm 、 290 mm 。为了保证获得充足的样本数量,每组试验完成后,在单晶硅板上选取九个位置采样,总计获得 81 张油滴图片。

1.3 油滴速度的确定

油滴在碰撞平板(单晶硅版)前的速度对其碰撞变形及最终状态有着较大影响^[25-27]。因此,有必要分析工作台移动速度对油滴平均速度的影响效应。利用智能风速仪(SYT-2000V, 上海永智公司)对喷嘴轴线方向上的空气流速进行测量,则不同位置处的空气流速如图 4 所示。

图 4 油-气混合物流场速度

MQL 条件下,雾化后的大多数油滴直径介于 $2 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 之间^[28]。喷嘴出口处的微小油滴所受的气流的推力(阻力) F_b 为^[29]

$$F_b = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{2\pi RT}{3\mu}} \rho D^2 \Delta v \quad (1)$$

式中, R 为普适气体常数, $R=8.3144\text{ J/mol}\cdot\text{K}$; T 为空气温度, $T=293\text{ K}$; μ 为气体摩尔质量, $\mu=28.8 \times 10^{-3}\text{ kg/mol}$; ρ 为空气密度, $\rho=1.22\text{ kg/m}^3$; D 为油滴半径; Δv 为油滴与气流的相对速度。

油滴在喷嘴出口处的速度很低,可视为 0。因此,可将气流的速度 v 近似为油滴与气流的相对速度 Δv 。

在压缩空气的作用下,油滴获得的加速度 a 为

$$a = \frac{F_b}{m} = \frac{F_b}{\frac{1}{3}\pi D^3 \rho_m} = \frac{3F_b}{\pi D^3 \rho_m} \quad (2)$$

式中, m 为油滴质量; ρ_m 为切削油密度, $\rho_m=$

950 kg/m³。

当油滴自喷嘴出口处的移动距离为 L 时, 其达到的速度 v' 为

$$v' = \sqrt{2aL} \quad (3)$$

式中, L 为油滴的移动距离(将喷嘴出口处视为坐标原点)。

联立式(1)~(3), 可以求得距喷嘴不同距离处的油滴平均速度。图 5 为气体流量为 30 L/min 时, 3 种不同直径油滴的平均速度与喷射距离之间的关系曲线。从该图可以看出, 对于喷射距离大于 40 mm 的 MQL 油-气混合物流场而言, 油滴经过压缩气体的加速作用, 其运动速度与气体流动速度十分相近, 故可将测得的气体流速近似看作油滴沿喷嘴轴线方向的运动速度。

图 5 不同喷射距离处的油滴速度(空气流量 $Q=30$ L/min)

由图 4 可知, 随着气体流量的增加, 相同位置处的空气流速增大。随着测量距离增大, 空气流速降低, 并且越靠近喷嘴处空气流速降低越快, 远离喷嘴处流速降低越缓慢。当喷射距离为 290 mm 时, 空气流量为 30 L/min、40 L/min 和 50 L/min 的油-气混合物流场分别为 5.9 m/s、8.0 m/s 和 12.0 m/s, 则相应的油滴平均速度近似为 5.9 m/s、8.0 m/s、12.0 m/s。由于油滴的平均运动速度远远大于工作台移动速度(0.1 m/s), 可认为工作台的移动运动对油滴采集效果几乎不产生影响。

1.4 油滴接触角和表面张力测量

接触角是指在气、液、固三相交点处所作的气-液界面的切线穿过液体与固-液交界线之间的夹角; 表面张力是指液体表面任意二相邻部分之间垂直于它们的单位长度分界线相互作用的拉力。接触角和表面张力均为油滴的固有属性, 其大小与温度、油滴类型、分子量等有关, 不随空气流量、喷射距离、速度的变化而变化。

作为衡量润滑油润湿性优劣的标准之一, 接触角大小是决定刀具表面的油滴覆盖率和油滴尺寸的

重要因素, 进而对油膜均匀性产生影响。利用光学接触角测量仪(Theta Lite101, 瑞典 Biolin 公司)对 Bescut 173 切削油与单晶硅平板之间的接触角进行测量。如图 6 所示, 经过计算得到油滴与单晶硅板之间的平均接触角 $\theta=17.99^\circ$ 。

图 6 油滴接触角

利用全自动表面张力仪(K100, 德国 KRUSS 公司)对 Bescut 173 切削油与空气界面的表面张力进行测量, 其表面张力 $\sigma=0.029$ N/m。

1.5 油滴图像分析程序

采用图 7 所示的流程, 对油滴覆盖率和油滴尺

寸及其分布进行研究。首先,待油滴形态稳定后,利用光学显微镜(BX41RF-LED,日本 OLYMPUS 公司)对其进行拍摄,获得油滴分布图(图 8)并计算图片中单个像素点的尺寸。其次,将图片导入 Matlab 软件,选取合适阈值对图像进行二值化处理以分割油滴和背景平面。二值图中,油滴覆盖区域以白色显示,未覆盖区域以黑色显示。然后,利用 Matlab 软件对油滴区域编号并统计该区域内像素点数目,计算其实际面积。最后,求得油滴的总覆盖面积和覆盖率,并利用球冠体积公式和球体积公式推导出油滴三维直径,获得油滴尺寸及其分布规律。

图 7 分析流程

图 8 不同喷射距离与流量下的油滴位图

2 结果与分析

2.1 喷射距离对油滴覆盖率影响

从图 8 中可以看出,喷射距离为 150 mm 时的大尺寸油滴数量明显多于喷射距离为 290 mm 时的大尺寸油滴数量;并且绝大多数大油滴呈现出不规则的椭圆形。这说明当喷射距离为 150 mm 时,较多的油滴发生了重叠或合并。其原因在于:当流线型的切削油剪切破碎成微小油滴后,在高速气流的

带动下逐渐扩散,形成锥状雾炬。距离喷嘴较近处的油滴扩散不充分,单位空间内的油滴密度较高,滴落至平板并摊开后的油滴具有较大的二维直径,并且间距小的油滴更容易合并,导致了大油滴的不规则形状;而距离喷嘴较远处的油滴扩散充分,合并现象有所减少,油滴二维形状多呈现规则的圆形。

利用 Matlab 软件对图 8 中的油滴图像进行二值化处理,得出油滴形态、形状及大小位图(图 9)。为排除图像分辨率的干扰,对于面积小于 30 像素点

(1 pix=0.1786 μm ×0.1786 μm), 即直径小于 1 μm 的区域予以忽略。利用图 9, 可以统计每粒油滴所占

用的像素点数目, 进而计算出油滴面积, 则油滴数量、油滴覆盖面积及油滴覆盖率如表 3 所示。

图 9 二值化处理后不同喷射距离与流量下的油滴位图

表 3 油滴统计数据

距离 L/mm	气体流量 $Q/(\text{L}/\text{min})$								
	30			40			50		
	N	$A_{\text{oil}}/\mu\text{m}^2$	α (%)	N	$A_{\text{oil}}/\mu\text{m}^2$	α (%)	N	$A_{\text{oil}}/\mu\text{m}^2$	α (%)
150	3 784	855 158	61.87	4 937	805 977	58.58	3 616	727 654	52.89
220	3 245	655 934	47.68	5 017	637 402	46.33	5 765	617 715	44.89
290	2 174	465 704	33.85	3 150	434 886	31.61	3 973	445 067	32.35

* N 为油滴数量; A_{oil} 为油滴覆盖面积(μm^2); α 为油滴覆盖面积占硅片总面积百分比(%), 即油滴覆盖率; 单晶硅板总面积为 1 375 787 μm^2 。

由图 10 可知, 随着喷射距离的增大, 油滴覆盖面积减小, 当流量 30 L/min、喷射距离为 150 mm 时, 覆盖率达到最大值 61.87%; 当喷射距离从 150 mm

图 10 油滴覆盖率

增大到 290 mm 时, 覆盖率减小了 45%。说明距离喷嘴越近, 油滴的密度越高, 有较多的油滴累计于平板表面。气体流量增加, 油滴覆盖面积开始变小。较大的气体流量意味着较高的气体速度和湍流强度^[30], 导致雾炬扩散的更快, 范围更大^[31], 虽然较快的流动速度提高了湍流换热能力, 但实际到达切削加工区的油滴数量反而减少, 润滑效果有所降低, 但其影响程度相对于距离来说要小很多。因此, 缩短喷射距离有助于提高润滑效率。

2.2 气体流量对油滴尺寸分布影响

对于微小油滴(尺寸在几个微米到十几个微米之间)而言, 可将单晶硅表面上附着的油滴形状看成球冠(图 11)。

图 11 油滴球冠示意图

球冠的体积 V 为

$$V = \frac{\pi(3R_0 - h)h^2}{3} \quad (4)$$

式中, R_0 为球冠的半径; h 为球冠高度, 它们与接触角 θ 和球冠底面半径 r 的关系为

$$R_0 = \frac{r}{\sin \theta} \quad (5)$$

$$h = \frac{r(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} \quad (6)$$

已知球体积公式为

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (7)$$

将式(4)~(6)代入式(7)中, 可得油滴球体直径 D 与油滴球冠底面半径 r 之间的关系为

$$D = \sqrt[3]{\frac{3}{\tan \theta} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \left[1 + \frac{1}{3} \frac{1}{\tan^2 \theta} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)^2 \right]} r \quad (8)$$

将测量出的接触角值 $\theta=17.99^\circ$ 代入式(8), 可得

$$D = 0.78r \quad (9)$$

借助于图 9, 借助于圆面积公式求出油滴二维“等效”半径 r 。在此基础上, 利用式(9), 可以求出油滴球体直径 D 。选取重叠油滴较少的 290 mm 处采集样本进行分析, 得出不同气体流量下的油滴直径的体积分数如图 12 所示。由该图可以看出, 随着气体流量的增大, 油滴直径峰值左移, 即油滴平均体积减小; 并且气体流量越大, 达到峰值直径的油滴所占的比例越高, 说明雾化更加均匀。气体流量为 30 L/min 的油滴直径峰值为 16 μm 左右, 该直径峰值所对应的油滴体积之和占到总体积的 23.4%; 气体流量为 40 L/min 的油滴直径峰值为 14 μm 左右, 该直径峰值所对应的油滴体积之和占到总体积的 29.8%; 气体流量为 50 L/min 的油滴直径峰值为 10 μm 左右, 该直径峰值所对应的油滴体积之和占到总体积的 34.9%。这是因为流速更快的气体造成了线状油膜表面更加剧烈的扰动和更强的剪切

效果, 使得油滴表面能不足以在一个相对较大的尺寸上维持其完整的形态, 导致油滴进一步分裂为尺寸更小的油滴。

图 12 不同气体流量下的油滴体积分布

在相同切削油用量下, 油滴体积越小表示其总体表面积越大, 更容易受到常温压缩空气的冷却影响, 使其粘度增大, 更易于附着在切削加工区的刀具和工件表面。并且油滴尺寸的减小可增大切削油与工件和刀具之间的总接触面积, 使得油滴和工件之间的换热效果得到增强, 有利于吸收切削加工区的热量。从这一点来说, 获得大量小尺寸的油滴有助于油-气混合切削介质冷却、润滑作用的发挥。需要说明的是, 少量油滴的叠加使得大尺寸的油滴体积分数会增加, 导致测得的油滴三维直径较真实直径略微偏大; 同时, 少量油滴在滴落到单晶硅片表面时发生碎裂, 导致更多小直径油滴的出现, 使得体积分布图变得略显扁平。但这些现象并不会对油滴尺寸随气体流量的变化规律产生影响。

3 结论

(1) 喷射距离对油滴覆盖率有着显著影响。随着喷射距离的增大, 油滴覆盖率减小, 最大减小幅度达到 45%。当气体流量为 30 L/min、喷射距离为 150 mm 时, 可以获得高达 61.87% 的油滴覆盖率。因此, 缩短喷射距离有利于提高油滴覆盖率和油-气混合物的润滑能力。

(2) 气体流量对油滴覆盖率和油滴尺寸有着不同的影响规律。一方面, 气体流量的增加使覆盖率略有减小。另一方面, 气体流量的增加可以减小油滴的峰值直径大小; 并且气体流量越大, 达到峰值直径的油滴数量所占的比例越高, 说明雾化更加均匀。因此, 提高气体流量, 可以减小油滴的峰值直径大小和提高油滴的雾化均匀程度, 有利于切削油渗入刀具-切屑和刀具-工件接触界面, 形成均匀的

润滑油膜；并且较大的气体流量可以有利于切削区的对流换热，带走更多的切削热。

(3) 尽量小的喷射距离(130 mm)和适当大的气体流量(50 L/min)有助于发挥油-气混合物的冷却、润滑性能，改善切削性能。

参 考 文 献

- [1] 龙震海, 王西彬, 刘志兵. 高速铣削难加工材料时硬质合金刀具前刀面磨损机理及切削性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 83-87.
LONG Zhenhai, WANG Xibin, LIU Zhibing. Research on wear modes and mechanism of carbide tools in high-speed milling of difficult-to-cut materials[J]. Tribology, 2005, 25(1): 83-87.
- [2] HONG S Y, DING Y C. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(8): 1417-1437.
- [3] HONG S Y, BROOMER M. Economic and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Clean Products and Processes, 2000, 2(3): 157-166.
- [4] OBIKAWA T, KAMATA Y, ASANO Y, et al. Micro-liter lubrication machining of Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48, 1605-1612.
- [5] WEINERT K, INASAKI I, SUTHERLAND J W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 511-537.
- [6] JEONG W C. Investigation of liquid nitrogen lubrication effects in cryogenic machining[D]. New York: Columbia University, 2002.
- [7] KLOCKET F, EISENBLATTER G. Dry cutting[J]. CIRP Annals, 1997, 46(1): 519-526.
- [8] FRATILA D. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(9): 839-845.
- [9] FRATILA D, CAIZAR C. Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg₃[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(6-7): 640-645.
- [10] 姜立. 微量润滑的流场分析及应用于外螺纹车削的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
JIANG Li. Analysis of flow field for minimum quantity lubrication and experimental study on outer thread turning performances[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] 严鲁涛, 袁松梅, 刘强. 绿色切削高强度钢的刀具磨损及切屑形态[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 187-192.
YAN Lutao, YUAN Songmei, LIU Qiang. Tool wear and chip formation in green machining of high strength steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 187-192.
- [12] 高昆, 齐乐华, 郁大照, 等. 基于复合油雾喷射润滑的飞机钛合金蒙皮原位钻削技术研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 198-204.
GAO Kun, QI Lehua, YU Dazhao, et al. Study on the in situ drilling technology used in titanium alloy thin-walled structure of plane based on combined oil mist-jet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 198-204.
- [13] SHERI K, JEAN M D, DANIEL L S, et al. Evaluation of the convective heat transfer coefficient for minimum quantity lubrication (MQL)[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2012, 64(6): 376-386.
- [14] MAO C, HUANG Y, ZHOU X, et al. The tribological properties of nanofluid used in minimum quantity lubrication grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5-8): 1221-1228.
- [15] OBIKAWA T, KAMATA Y, SHINOZUKA J. High-speed grooving with applying MQL[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(14): 1854-1861.
- [16] LIAO Y S, LIN H M, CHEN Y C. Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(11): 1667-1676.
- [17] VAZQUEZ E, KEMMOKU D T, NORITOMI P Y, et al. Computer fluid dynamics analysis for efficient cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11-12): 1494-1501.
- [18] 张春燕, 王贵成, 裴宏杰, 等. 基于毛细管理论的 MQL 理论模型及应用[J]. 机械设计与制造, 2009(9): 62-64.
ZHANG Chunyan, WANG Guicheng, PEI Hongjie, et al. MQL theoretical model and application based on capillaries[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009 (9): 62-64.
- [19] TASDELEN B, THORDENBERG H, OLOFSSON D. An experimental investigation on contact length during minimum quantity lubrication (MQL) machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203 (s1-3): 221-231.
- [20] 吕宏刚. H13 钢硬态铣削过程中的刀具磨损及其对表面完整性的影响[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LÜ Honggang. Tool wear and its effect on surface

- integrity in hard milling H13 steel[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [21] MULYADI I H, BALOGUN V A, MATIVENGA P T. Environmental performance evaluation of different cutting environments when milling H13 tool steel[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 108: 110-120.
- [22] DUCHOSAL A, SERRA R, LEROY R. Numerical study of the inner canalization geometry optimization in a milling tool used in micro quantity lubrication[J]. *Mechanics & Industries*, 2014, 15(5): 435-442.
- [23] 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 & Manufacture*, 2015, 94: 37-47.
- [24] BALAN A S S, VIJAYARAGHAVAN L, KRISHNAMURTHY R. Computational fluid dynamics analysis for predicting the droplet size in MQL during grinding of super-alloy[C]//*Proceedings of the 37th International MATADOR Conference*, 2013: 161-164.
- [25] REIN M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces[J]. *Fluid Dynamics Research*, 1993, 12(2): 61-93
- [26] LEI X, ZHANG W W, NAGEL S R. Drop splashing on a dry smooth surface[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94: 184505
- [27] MARUDA R W, KROLczyk 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 & Manufacture*, 2016, 100: 81-92.
- [28] 张成良. CMQL 油气流场分析及内冷式刀具切削性能评价[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- ZHANG Chengliang. Oil-air flow field analysis of CMQL and cutting performance evaluation of internal cooling cutters[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [29] 李武刚. 空气微粒的阻力系数计算及动力学行为分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2011, 31(2): 314-318.
- LI Wugang. Air resistance coefficient calculation and analysis for mote dynamic behavior in the air[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(2): 314-318.
- [30] 邹林涛. 低温 MQL 流体动力学分析及冷却、润滑性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- ZOU Lintao. Computational fluid dynamic analysis and cooling/lubrication effect of cryogenic minimum quantity lubrication[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [31] MARUDA R W, KROLczyk 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 & Manufacture*, 2016, 100: 81-92.
-
- 作者简介:** 张松(通信作者), 男, 1969 年出生, 教授。主要研究方向为高效切削机理及加工表面完整性等。
E-mail: zhangsong@sdu.edu.cn
- 张成良, 男, 1990 年出生, 硕士。主要研究方向为高效切削加工技术。
E-mail: zhangchengliang01@126.com
- 石文浩, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高效切削加工技术。
E-mail: seven7hao@foxmail.com
- 吕盈, 女, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高效切削加工技术。
E-mail: lvying20140906@163.com
- 陈杰, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高效切削加工技术。
E-mail: 1220242893@qq.com