

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.09.006

油水气混合的数字化微量润滑装置

陶桂宝^{a,b}, 王丽丹^b, 朱怡澄^b

(重庆大学 a. 高端装备机械传动全国重点实验室; b. 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要: 微量润滑装置对油水气量的准确控制及其雾化效果, 将直接影响切削冷却效果, 进而影响零件加工质量。为改善微量润滑装置的辅助切削效果, 研制了一种具有油水气混合的数字化微量润滑装置, 有效改善了润滑油雾喷射的连续性和均匀性。基于微量润滑雾化技术, 设计开发了数字化微量润滑装置, 搭建铣削工艺实验平台, 测试新型微量润滑装置的辅助切削效果。结果表明, 所研制的油水气混合的数字化微量润滑装置能够明显提高油雾质量和辅助切削效果。

关键词: 微量润滑; 油水气混合; 雾化; 喷嘴设计; 装置

中图分类号: TH11

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)09-061-09

Digital minimum quantity lubrication device with oil-water-air mixing

TAO Guibao^{a,b}, WANG Lidan^b, ZHU Yicheng^b

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions for Advanced Equipment; b. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The accurate control of oil-water-air volume and its atomization effect by the minimum quantity lubrication (MQL) device directly affect the cooling and cutting performance, thereby influencing the machining quality of parts. To improve the auxiliary cutting effect of the MQL device, a digital MQL device with oil-water-air mixing has been designed and developed to improve the continuity and uniformity of lubricant mist spray. Based on MQL atomization technology, an experimental platform for the milling process has been constructed to test its auxiliary cutting effect. The results show that the developed oil-water-air mixing digital MQL device significantly improves the quality of oil mist and the auxiliary cutting effect.

Keywords: minimum quantity lubrication; oil-water-air mixing; atomization; nozzle design; device

与传统机械切削加工冷却方式相比, 微量润滑 (minimum quantity lubrication, MQL) 技术润滑油用量少、对环境污染危害小、生产成本低, 是一种新型的半干式绿色切削技术, 因其符合 21 世纪新时代制造业的发展要求而被广泛应用于钛合金、铝合金、不锈钢等金属材料的加工工业^[1-4]。MQL 也称最小量润滑, 即使用最小量的润滑油达到最佳切削效果, 由于微量润滑技术采用极少量的润滑油, 因此, 对装置的雾化效果要求极高^[5-7]。

微量润滑装置一般由油箱、油泵、控制阀、喷嘴及管路附件等组成, 集成后的系统轻巧、成本低廉, 可以方

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB2010500)。

Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB2010500).

作者简介: 陶桂宝 (1967—), 男, 副教授, 主要从事先进制造技术、智能制造及装备、机电一体化技术等研究, (E-mail) gb_tao@163.com。

便安装在机床上^[8]。根据不同的润滑方式,可以将微量润滑装置分为内冷装置和外冷装置^[9-10],内冷装置是压缩气体通过精密油雾发生器在内部发生雾化,产生的细小油雾颗粒再经由主轴和刀具中心孔道直接喷射到切削区进行润滑冷却;外冷装置将定量泵出的微量润滑油与压缩空气分别输送至喷嘴处,在喷嘴处完成雾化过程,再送至切削区,外冷装置较容易产生喷嘴和工件干涉的现象,受限于工艺环境,且喷嘴稳定精确对准切削区域困难,因此,内冷装置的效果好于外冷装置^[11]。

近年来,国内外学者围绕微量润滑技术进行了较多研究,且市场上有多种微量润滑装置,但多数为外冷装置。姚薇等^[12]设计了基于脉冲气阀和精密润滑泵控制的低温微量润滑装置,可以通过改变脉冲气阀频率来控制微量润滑油的输出量和输出压力。为了提高微量润滑油的渗透性,有学者在微量润滑装置上加入了“静电喷涂”技术,高压静电可以电离电场中的空气,润滑油易于进入切削区形成边界薄膜^[13-15]。梁赐乐等^[16]研究了不同微量润滑雾化参数和雾粒传输方式条件下的油量调控性能和规律,发现对传输油雾量进行调节需要结合压差和进气压力,油雾的雾粒特性与传输管路的尺寸有关。目前大多数微量润滑装置的流量调节都是基于气动脉冲发生器,这样会导致无法连续供给微量润滑油,无法形成持续的冷却润滑效果。夏瑞^[17]研制了一种基于 Arduino 控制板和蠕动泵的油气复合微量润滑装置,实现对油量、水量、气压和温度的控制。Dinata 等^[18]开发了一个具有 Arduino 控制的微量润滑装置,可以用时间或者切削温度来设定装置的开启和关闭。上述基于 Arduino 的微量润滑装置产生的油雾具有脉动性,油雾连续稳定性有待提高。

为实现微量润滑装置中油水气的充分混合,改善喷射润滑油雾的连续性和均匀性,文中基于微量润滑雾化技术与油水气混合特点,设计开发了一种新型数字化微量润滑装置。

1 新型微量润滑装置开发

复合微量润滑油、电解防锈水、压缩气体形成三相射流介质,替代传统油气混合射流技术,创新微量润滑射流多参量数字化控制及接口技术,替代传统手动调节,开发基于油水气三相复合的数字化微量润滑装置,并实现与机床数控系统的联动控制。

1.1 新型微量润滑装置雾化回路设计

油水气雾化回路设计如图1所示。

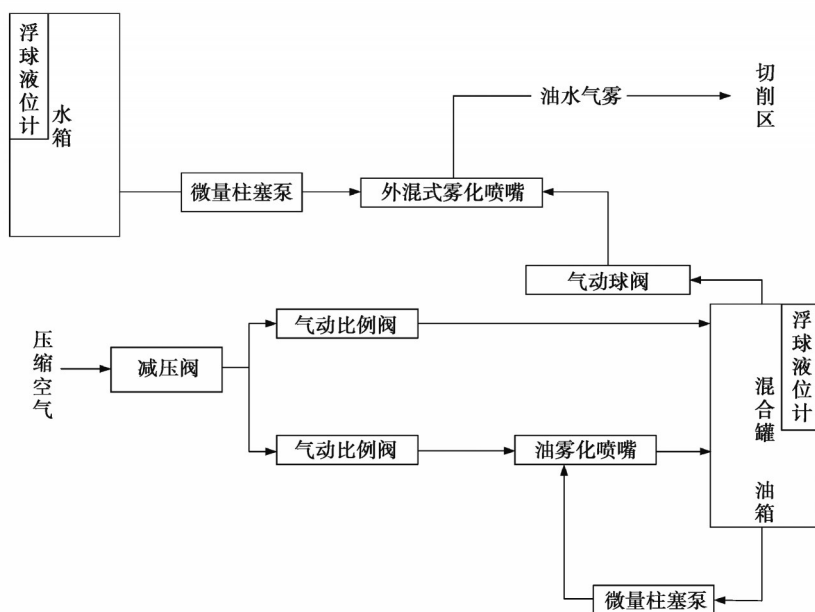


图1 新型微量润滑装置雾化回路图

Fig. 1 The atomization circuit of new MQL device

装置具有独立的油水气三相通道,采用3次混合雾化技术。第1次,压缩空气与微量润滑油通过油雾化

喷嘴混合形成油雾进入混合罐,油雾化喷嘴所需的压缩空气压力高,而耗气量少,能够对润滑油进行精细雾化;第2次,压缩空气进入混合罐与油雾混合形成油气雾;第3次,离开混合罐的油气雾与水通过外混式雾化喷嘴混合形成油水气雾喷射到切削区,实现辅助切削冷却效果。外混式雾化喷嘴所需的油气雾压力要比油雾化喷嘴所需的气体压力低些,但耗气量更大,因此油雾化喷嘴和外混式雾化喷嘴的设计是不同的。气动球阀控制开关油水气雾,油量和水量由2对微量柱塞泵控制,实现油量和水量连续精准控制,油雾化气压和混合油气气压通过气动比例阀数字化调节。

1.2 油雾化喷嘴设计

在油雾化喷嘴中,微量润滑油与压缩空气发生雾化作用,破碎成为油雾。油雾化喷嘴采用Y型设计,有如下优点:调节比大,可达1:6~1:10;雾化角不变;耗气量小等。通常采用经验设计方法设计喷嘴参数。图2为设计的Y型雾化喷嘴结构图。

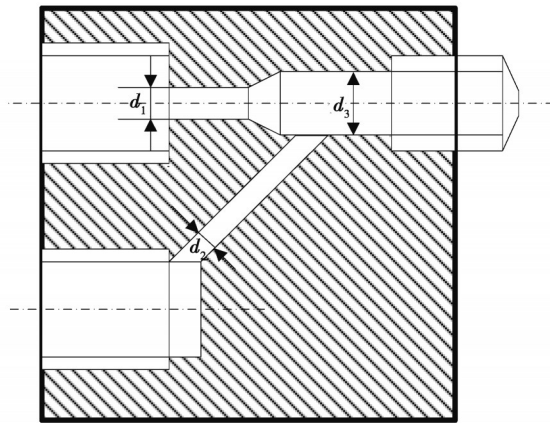


图2 Y型雾化喷嘴结构图

Fig. 2 Y-type atomizing nozzle structure

微量润滑油雾化是一个复杂的过程,不同的微量润滑油在相同的喷嘴里,产生的雾化效果是不同的,与润滑油黏度、密度、油压和气压等相关,本装置使用的雾化喷嘴是在特定微量润滑油的使用前提下设计的。表1为Y型雾化喷嘴主要尺寸参数。图3是开发的Y型喷嘴实物图。

表1 Y型雾化喷嘴主要尺寸参数

Table 1 Main parameters of Y-type atomizing nozzle

主要参数	数据	主要参数	数据
油孔直径 d_1 /mm	2.20	混合孔直径 d_3 /mm	3.20
气孔直径 d_2 /mm	1.20	油孔和气孔夹角 θ (°)	50



图3 Y型雾化喷嘴实物图

Fig. 3 Y-type atomizing nozzle

1.3 基于沉降原理的混合罐设计

在雾化喷嘴中形成的油雾进入混合罐中,与压缩气体进行二次混合雾化,形成更小的油气雾颗粒。图4是混合罐的三维结构示意图。

如图5所示,混合罐的密封盖上开7个孔。进气口通入用于二次雾化的压缩气体,也提供了将油气雾推出混合罐的压力。出气口则将雾化后的油气雾排出混合罐。密封盖上安装了安全阀,避免内部油气雾的压力超标。最大直径的孔用于安装液位传感器,计量实际耗油量和实现高低液位报警。其他3个孔分别连接3个相同的Y型雾化喷嘴产生油雾,根据用油量大小自动分配Y型雾化喷嘴工作的数量。



图4 混合罐结构示意图

Fig. 4 The structural of atomization tank

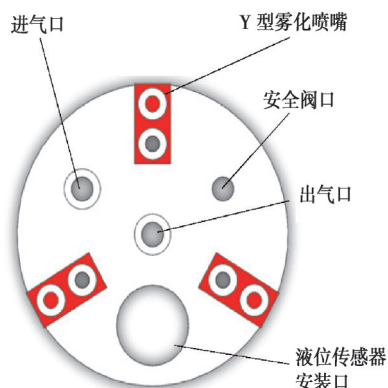


图5 混合罐密封盖结构俯视图

Fig. 5 The top view of sealing cover for atomization tank

润滑油黏度是影响Y型雾化喷嘴雾化效果的最重要因素^[9],润滑油的黏度越大,用油量越大,则越不易雾化成颗粒。因此,采用3个相同的雾化喷嘴去进行第一次雾化,根据用油量大小自动分配Y型雾化喷嘴工作的数量。

混合罐既是雾化场所,也是储存微量润滑油的压力密封容器,微量润滑油从混合罐底部吸出进入微量柱塞泵。另外,混合罐也起到了筛去大雾化颗粒的作用。大雾化颗粒将沉降,雾化颗粒的直径越大,沉降速度越快,雾化颗粒重新回到混合罐底部,转化为液态的微量润滑油。从混合罐吹出的是微米级雾化颗粒,使更多的颗粒通过切削区形成润滑膜,提升切削润滑冷却效果。

1.4 外混式雾化喷嘴设计

在外混式雾化喷嘴中,水与油气雾发生第3次雾化,转换成最终的油水气雾,最后直接喷射到切削区。外混式雾化喷嘴结构简单,制造方便,运行可靠,调节比可达1:5以上,对不同微量润滑液的适应性较好,雾化锥角不会随着流量变化。图6是本装置的外混式雾化喷嘴结构图,油气雾从喷嘴侧面进入,水则从喷嘴底部中心进入内部,两者将在喷嘴出口处发生雾化作用。图7是外混式雾化喷嘴实物图,表2是外混式雾化喷嘴主要尺寸参数。

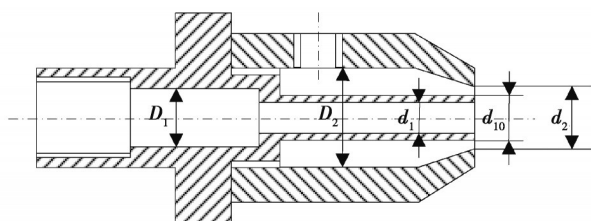


图6 外混式雾化喷嘴结构图

Fig. 6 External mixing nozzle structure

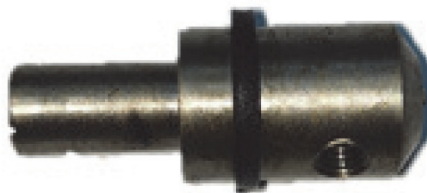


图7 外混式雾化喷嘴实物图

Fig. 7 External mixing nozzle

表2 外混式雾化喷嘴主要尺寸参数

Table 2 Main parameters of external mixing nozzle

Table 2 Main parameters of external mixing nozzle		mm	
主要参数	数据	主要参数	数据
水孔直径 D_1	3.30	水喷出口外径 d_{10}	2.50
气孔直径 D_2	5.00	喷气口内径 d_2	3.50
水喷出口直径 d_1	2.10		

1.5 新型微量润滑装置控制系统设计

装置选用西门子S7-1200型可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)作为核心控制器。装置控制系统框图如图8所示。每个微量柱塞泵都设置有零位检测,通过步进电机分别控制2对微量柱塞泵实

现油量和水量精确调控,且连续供液没有停顿和脉动现象;采用气压传感器和气动比例阀实现雾化气压和混合气压的数字化控制;通过电磁阀通断控制微量润滑工作与否,装置与数控机床联动控制,数控机床每换一次刀具改变切削参数,通过配方设置装置自动改变微量润滑参数,实现多刀具多工序切削参数和微量润滑参数自动匹配。微量润滑装置还可以与上位机联网实现润滑状态的监测和耗油量耗水量等信息上传统计。

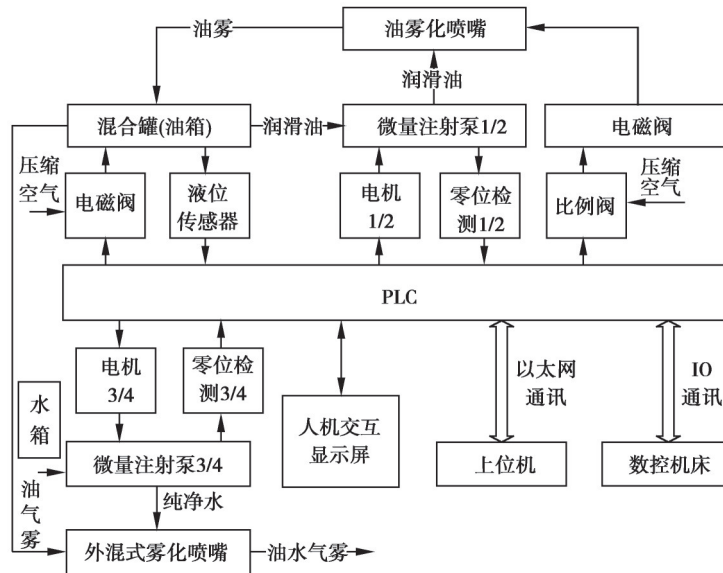


图 8 新型微量润滑装置控制系统框图

Fig. 8 Control system framework for a new MQL device

1.6 人机交互操作界面设计

装置采用触摸屏显示操作,系统启动后触摸屏进入初始化主界面,用户可以选择自动模式或手动模式,对切削区进行微量润滑冷却;也可以在配方设置中设定多个工艺配方及其微量润滑参数,或者在 HMI 界面查看每天和累计的微量润滑油和水的使用量。图 9 为部分操作界面。

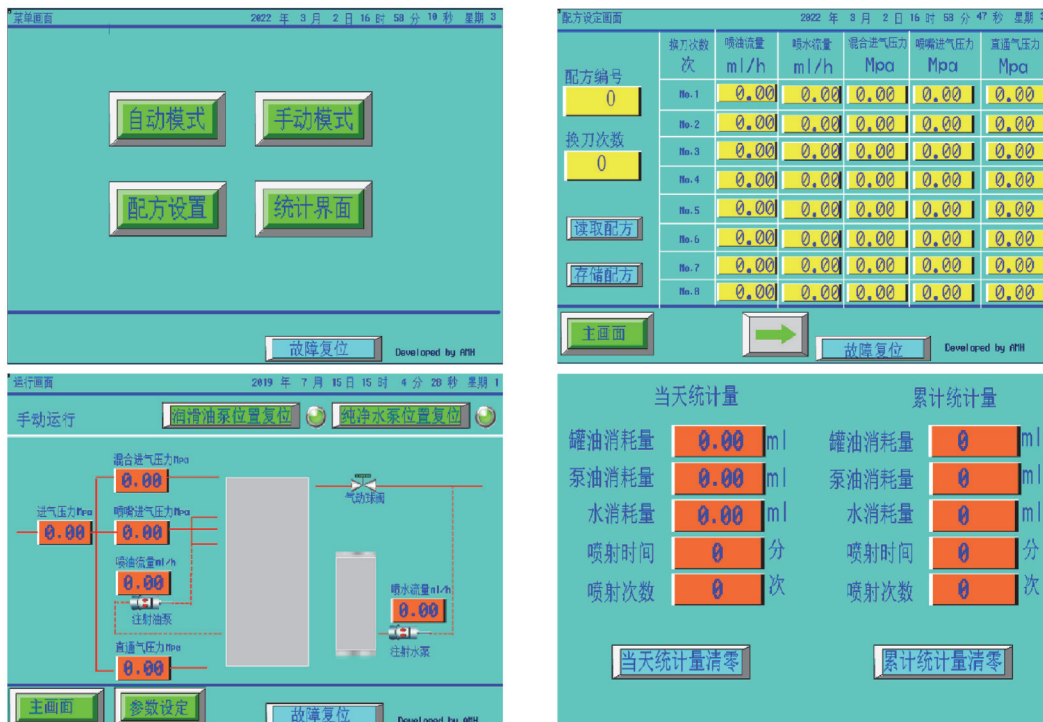


图 9 部分操作界面

Fig. 9 Partial operation interface

2 新型微量润滑装置实验

2.1 实验平台搭建

实验使用的机床为德国DMG五轴立式加工中心DMU60monoBLOCK,如图10所示。该机床主要参数:行程范围(X/Y/Z/B/C)为800 mm/550 mm/550 mm/-120~+30/360, X/Y/Z重复定位精度0.004 mm,电主轴转速为18 000 r/min,主轴功率为35 kW。新型微量润滑装置如图11所示,外形小巧,方便与数控机床集成。



图10 五轴立式加工中心

Fig. 10 Five-axis vertical machining center



图11 新型微量润滑装置

Fig. 11 The new MQL device

实验材料为304不锈钢块,长度为170 mm,宽度为100 mm,厚度为25 mm。实验刀具为4刃硬质合金铣刀,采用巴尔查斯涂层,刀具直径为10 mm,切削刃长25 mm。搭建的铣削实验平台如图12所示。

实验采用如图13所示的深圳睿奥便携式表面粗糙度测量仪TR200测量不锈钢工件的加工表面粗糙度Ra,以表征铣削实验结果。

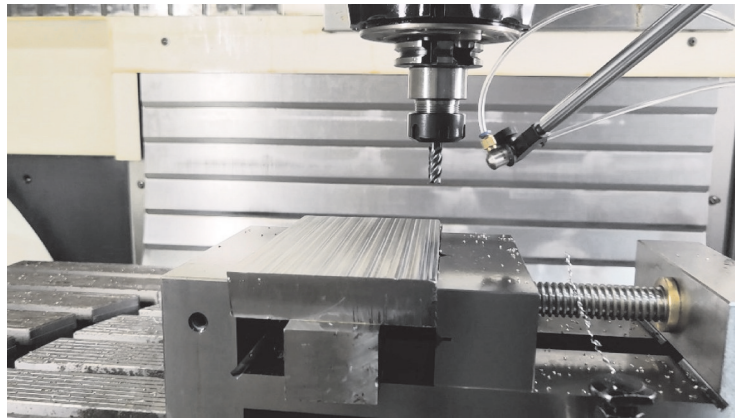


图12 铣削试验平台

Fig. 12 Milling test platform



图13 TR200表面粗糙度测量仪

Fig. 13 TR200 surface roughness tester

2.2 微量润滑铣削实验

为了验证新型微量润滑装置的润滑冷却效果,将微量润滑铣削与干切削、传统浇注式切削进行实验对比,4个实验组的冷却方式如表3所示。实验1组和2组使用开发的新型微量润滑装置辅助切削冷却,微量润滑油是合作企业提供的不锈钢专用微量润滑油。实验过程中,加工中心进给速度为600 mm/min,主轴转速为3 000 r/min,铣削深度为1 mm,铣削宽度为5 mm,图14为铣削过程中新型微量润滑装置的油水气雾喷射效果。

表3 实验方案

Table 3 Experimental scheme

实验号	微量润滑油流量/(mL·h ⁻¹)	水流量/(mL·h ⁻¹)
1	80	0
2	40	40
3	0	0
4	乳化液浇注	

从图14中可以看出,在铣削过程中,微量油水气雾能够连续且均匀地从外混式雾化喷嘴中喷出,对铣削过程中刀具起良好的润滑冷却作用。

按照表3中的冷却参数对微量润滑装置和加工中心进行设置,对不锈钢块进行分段铣削。每个实验分别测量5次工件表面粗糙度并取平均值,实验数据如表4所示。

由表4可知,干切削的工件表面粗糙度均值为0.383 μm,大于另外3组实验的工件表面粗糙度均值,说明其他3种冷却方式是有效的,可降低工件加工表面粗糙度。在4组实验结果中,微量润滑用油量为80 ml/h时切削的工件表面粗糙度最小,由此可见,研制的新型微量润滑装置的辅助切削是有效的,可完全替代传统浇注式冷却切削,用油量小,具有绿色环保的特点。另外,用油量80 ml/h的微量润滑切削与用油量40 ml/h、水量40 ml/h的微量润滑切削加工效果相差不大,说明油水可以配合进行微量润滑切削,将电解防锈水替代部

分微量润滑油加工工件,可降低企业生产成本。



图14 铣削过程中的油水气雾喷射

Fig. 14 Oil-water-air mist spraying during the milling process

表4 工作表面粗糙度对比

Table 4 Workpieces' surface roughness

实验号	表面粗糙度/ μm					平均值/ μm
1	0.299	0.301	0.290	0.301	0.307	0.300
2	0.301	0.312	0.308	0.304	0.315	0.308
3	0.393	0.391	0.386	0.374	0.371	0.383
4	0.321	0.314	0.313	0.310	0.309	0.313

3 结束语

1)研制了一种油水气混合的数字化微量润滑装置,采用PLC精确调控装置的油量、水量和气压;双柱塞泵控制产生连续稳定油水气雾,气雾无停顿或脉动现象;混合罐起到了筛去大雾化颗粒的作用,使产生的油雾颗粒达到微米级,辅助切削润滑冷却效果更佳。

2)搭建了用于测试新型微量润滑装置辅助切削效果的铣削实验平台,4组切削实验结果表明,新型微量润滑装置具有良好的人机界面,操作方便,工作稳定,辅助切削冷却有效,用油量80 ml/h的切削工况可以获得最小的表面粗糙度,完全可以替代传统浇注式冷却,实现绿色环保加工。

参考文献

- [1] 袁松梅,韩文亮,朱光远,等.绿色切削微量润滑增效技术研究进展[J].机械工程学报,2019,55(5):175-185.
Yuan S M, Han W L, Zhu G Y, et al. Recent progress on the efficiency increasing methods of minimum quantity lubrication technology in green cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 175-185.(in Chinese)
- [2] 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):2783-2791,2798.
Lin J B, Lyu T, Huang S Q, et al. Experimental investigation on grinding performance based on EMQL technology[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(23): 2783-2791, 2798.(in Chinese)
- [3] Laakso S V A, Mallipeddi D, Krajnik P. Evaluation of subcooled MQL in cBN hard turning of powder-based Cr-Mo-V tool steel using simulations and experiments[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1): 511-531.
- [4] Mark Benjamin D, Sabarish V N, Hariharan M V, et al. On the benefits of sub-zero air supplemented minimum quantity lubrication systems: an experimental and mechanistic investigation on end milling of Ti-6-Al-4-V alloy[J]. Tribology International, 2018, 119: 464-473.

- [5] 孔晓瑶,袁松梅,朱光远,等. 微量润滑系统参数对雾化特性的影响[J]. 中国机械工程, 2021, 32(5): 579-586.
Kong X Y, Yuan S M, Zhu G Y, et al. Influences of MQL system parameters on atomization characteristics[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(5): 579-586.(in Chinese)
- [6] Boswell B, Islam M N, Davies I J, et al. A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1): 321-340.
- [7] 王晓铭,李长河,张彦彬,等. 微量润滑赋能雾化与供给系统关键技术研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 1-14.
Wang X M, Li C H, Zhang Y B, et al. Research progress on key technology of enabled atomization and supply system of minimum quantity lubrication[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 1-14.(in Chinese)
- [8] 卢家锋. 低温冷风微量润滑切削技术发展及应用[J]. 模具制造, 2019, 19(9): 70-73.
Lu J F. Development and application of cryogenic MQL cutting technology[J]. Die & Mould Manufacture, 2019, 19(9): 70-73. (in Chinese)
- [9] 严鲁涛,袁松梅,刘强. 绿色切削中的微量润滑技术[J]. 制造技术与机床, 2008(4): 91-93.
Yan L T, Yuan S M, Liu Q. Minimal quantity lubrication technology in the green machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(4): 91-93.(in Chinese)
- [10] Sreejith P S, Ngoi B K A. Dry machining: Machining of the future[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 101(1/2/3): 287-291.
- [11] 贺爱东,叶邦彦,王子媛. 内冷刀具低温微量润滑切削试验[J]. 工具技术, 2015, 49(7): 21-24.
He A D, Ye B Y, Wang Z Y. Experimental study on effect of cryogenic MQL cutting by tool with internal cooling structure[J]. Tool Engineering, 2015, 49(7): 21-24.(in Chinese)
- [12] 姚薇,申晟,余亿坤,等. 低温微量润滑冷却装置的设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(4): 117-119.
Yao W, Shen S, Yu Y K, et al. Design of a pneumatic-hydraulic system for cryogenic minimum quantity of lubricant[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(4): 117-119.(in Chinese)
- [13] 孔魁. 静电喷雾润滑雾化特征参数及其车削试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
Kong K. The experimental study on characteristic parameters and turning for electrostatic spray minimum quantity lubrication [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] Reddy N K, Yang M. Development of an electro static lubrication system for drilling of SCM 440 steel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(2): 217-224.
- [15] Huang S Q, Wang Z, Yao W Q, et al. Tribological evaluation of contact-charged electrostatic spray lubrication as a new near-dry machining technique[J]. Tribology International, 2015, 91: 74-84.
- [16] 梁赐乐,袁尧辉,王成勇,等. 微量润滑系统油雾调控及雾粒特性研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(5): 607-614, 622.
Liang C L, Yuan Y H, Wang C Y, et al. Study on oil mist control and oil mist particle characteristics of MQL systems[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 607-614, 622.(in Chinese)
- [17] 夏瑞. 数字化微量润滑装置设计及铣削应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Xia R. The design and milling application of digital minimum quantity lubrication device[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [18] Dinata G G S, Jember U, Muttaqin A Z, et al. Rancang bangun Dan uji performa sistem kendali pemberian fluida permesinan MQL berbasis arduino[J]. Rekayasa Mesin, 2020, 11(1): 97-104.
- [19] 陈建文,张志伟,王长周,等. 液体黏度和表面张力对雾化颗粒粒径的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 1023-1025.
Chen J W, Zhang Z W, Wang C Z, et al. Effects of fluid viscosity and surface tension on the size of atomized droplets[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(7): 1023-1025.(in Chinese)

(编辑 詹燕平)