

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.019

微量润滑条件下铣削速度对油雾浓度的影响分析

赵威¹ 陈冲¹ 何宁¹ 李亮¹ 任斐² 梁鑫光²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海, 200245)

摘要:微量润滑(Minimum quantity lubrication, MQL)切削是现代机加工领域一种先进的准干式切削技术,但微量润滑切削过程中产生的切削油雾仍会影响切削现场的环境空气质量,危害切削场所人员的健康。应用重量分析法对切削现场油雾浓度进行检测,分析了润滑油用量、供气压力、喷射靶距、射流温度等不同微量润滑系统参数下铣削速度对切削现场油雾浓度的影响规律。研究表明,随着铣削速度的增大,油雾颗粒与高转速刀具发生激烈碰撞形成二次雾化,造成切削现场油雾浓度 PM10 与 PM2.5 均相应增大,但微量润滑系统参数不同,PM10 与 PM2.5 随铣削速度的变化规律亦不相同。

关键词:微量润滑; 铣削速度; 油雾浓度; 环境空气质量

中图分类号: TG502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)03-0440-06

Effect of Milling Speed on Oil Mist Concentration in Minimum Quantity Lubrication

Zhao Wei¹, Chen Chong¹, He Ning¹, Li Liang¹, Ren Fei², Liang Xinguang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer, Shanghai, 200245, China)

Abstract: Minimum quantity lubrication (MQL) has been accepted as a successful semi-dry application because of its satisfactory performance in practical machining operations. However, the oil mist generated from MQL machining process has a direct impact on the ambient air quality, and then does harm to those who permanently work in this environment. Using the weighing method, the oil mist concentration in machining workshop is measured. The effect of milling speed on the oil mist concentration under different MQL system parameters such as oil flow rate, air pressure, spray distance to target and jet temperature, is analyzed. The research results show that, the oil mist concentration PM10 and PM2.5 in machining workshop will increase with the increase of milling speed due to the secondary atomization, which results from the fierce collision between oil mist particles generated from MQL system and cutting tool with high rotation speeds. But the varying patterns of oil mist concentration PM10 and PM2.5 are changing with the increase of milling speed at different MQL system parameters.

Key words: minimum quantity lubrication; milling speed; oil mist concentration; ambient air quality

微量润滑以其良好的冷却、润滑、排屑以及低污染等综合性能而受到了工业界的普遍关注,是高速、高性能切削采用的主要冷却润滑方式之一^[1]。目前国内外对微量润滑切削技术的研究涵盖了钻

基金项目:国家自然科学基金(51005118)资助项目;材料与工艺预研基金(GY2013149-04)资助项目。

收稿日期:2014-04-30; **修订日期:**2014-09-17

通信作者:赵威,男,博士,副教授, E-mail: nuaazw@nuaa.edu.cn。

削、铣削、车削、磨削和锯切等多种切削工艺^[2]。大量的研究表明,针对淬硬钢、高温合金、钛合金以及不锈钢等难加工材料的高速切削,与干式切削和湿式切削相比,微量润滑能够表现出更优良的冷却润滑性能^[3-8]。然而,一直以来人们普遍关注微量润滑替代切削液之后所带来的冷却、润滑、排屑等综合性能,却常常忽略切削油雾所带来的环境空气质量安全问题,而这种问题往往会对长期处于加工现场人员的健康带来严重的潜伏性危害^[9]。如微量润滑所产生的切削油雾进入呼吸系统,通过累积效应对呼吸系统造成危害,油雾颗粒越小,油雾浓度越高,对人体健康的危害越大^[10]。此外,在加工场所环境条件的影响下,即使采用植物型润滑油,其产生的细小润滑油颗粒有可能沾染上环境空气中其他有害粉尘、细菌、微生物等物质而变质或污染,从而对环境空气质量和人体安全产生一定的危害^[11-13]。

切削环境空气质量与切削过程产生的油雾浓度及其粒径分布密切相关。目前公认对人体造成最主要危害的是空气动力学直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物(PM10)以及可直达肺泡造成无法修复伤害的空气动力学直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物(PM2.5)。因而,欧美等世界工业发达国家除了制订了相应的环境空气质量标准以外,又相继制定了针对车间切削环境的油雾浓度接触限值标准如 $\text{PM}_{10} \leq 5\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5} \leq 0.5\ \text{mg}/\text{m}^3$ 等^[14]。中国环境保护部与国家质量监督检验检疫总局于2012年联合发布了最新的环境空气质量标准(GB3095—2012),在GB3095—1996的基础上,增加了PM10的一级标准和PM2.5的一级、二级标准^[15];中国国家机械工业局曾于1999年发布了针对金属切削机床的油雾浓度测定的行业标准,该标准建议切削机床油雾浓度PM10的最大值不应超过 $5\ \text{mg}/\text{m}^3$ ^[16],但目前国内在车间切削环境油雾浓度方面,仍未制定相应的PM2.5限值标准。

针对微量润滑切削产生的油雾对切削环境的潜在危害,在课题组前期研究的基础上^[1, 11-13],采用重量分析法^[17],深入研究润滑油用量、供气压力、喷射靶距、射流温度等不同微量润滑系统参数条件下切削现场油雾浓度随铣削速度的变化规律,从而为微量润滑条件下的切削参数优化选择与环境空气质量安全控制提供数据支持。

1 试验方案

1.1 试验仪器与方法

试验用低温微量润滑系统主要由课题组研发

的低温冷风发生装置与德国VOGEL外混式微量润滑系统构成^[12-13];油雾采集装置为FA-3型8级气溶胶分布采样器;并应用OHAUS AR1140高精度分析天平对采集的切削油雾进行称重分析,从而计算油雾浓度大小。

所有试验均在半封闭机床上进行,该机床空间约为 $4\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 2\ \text{m}$;将FA-3型气溶胶分布采样器组装好放置于距地面 $1.5\ \text{m}$ 、离机床主轴 $0.5\ \text{m}$ 处(见图1);采用植物型润滑油进行微量润滑。具体实验过程为:(1)利用烤箱将玻璃纤维烘干(时长2 h),并放入密封袋并做好标记;(2)将密封袋连同装入其中的玻璃纤维经OHAUS AR1140型称重天平称重,多次测量取均值;(3)已称重的玻璃纤维滤膜分别放置于撞击器的第4级(收集PM10)与第8级(收集PM2.5)采样板上;(4)组装好FA-3型气溶胶分布采样器,并将其按照设定位置放于机床侧门内;(5)测量并记录试验现场的温度、湿度以及气压;(6)开启微量润滑系统调好系统参数,开启机床,待微量润滑系统喷射油雾稳定后打开FA-3型气溶胶分布采样器主机,进行油雾采集,流量调整为 $28.3\ \text{L}/\text{min}$,采样时间2 h以上;(7)采样结束后,取出采集板上的玻璃纤维并放于原来的密封袋中,多次称重取均值;(8)利用计算公式^[11]进行切削现场的油雾浓度数值计算。

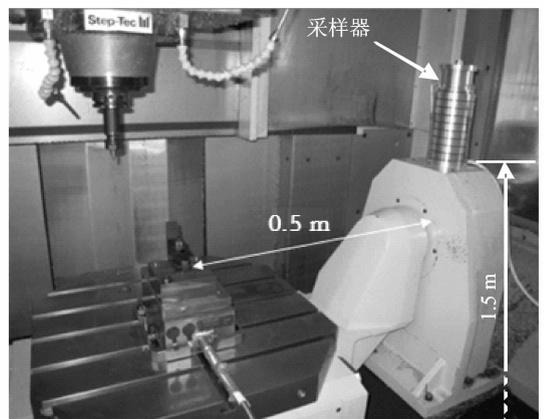


图1 FA-3型气溶胶分布采样器布局图

Fig. 1 Layout of FA-3 aerosol sampler

为减少环境温度与空气湿度等对测量结果的影响,所有试验要求环境温度 $20\sim 26\ ^\circ\text{C}$,室内空气相对湿度 $50\%\sim 70\%\ \text{RH}$,每次测试时间为2 h以上,测试间隔期内应用排气扇进行通风0.5 h以上以保证测试基数一致。

1.2 试验参数

本试验重在考察不同微量润滑系统参数条件

下铣削速度对切削现场油雾浓度的影响变化规律,具体参数设置如表1所示。其中,通过调节低温微量润滑系统中的半导体制冷器工作电流可以控制射流温度的变化,通过调压阀可以实现对低温微量润滑系统供气压力的调节。

表1 试验参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	参数范围
润滑油用量 $Q / (\text{mL} \cdot \text{h}^{-1})$	10, 15
射流温度 $t / ^\circ\text{C}$	室温, 10, 0, -10, -20
供气压力 p / MPa	0.4, 0.5, 0.6, 0.7
喷射靶距 L / mm	20, 30, 40, 50
铣削速度 $v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	100, 300, 400, 500, 700

此外,试验用刀具为直径 $D=25 \text{ mm}$ 的2齿机夹式立铣刀,刀具螺旋角 0° ;刀片为WK10非涂层硬质合金,前角 25° ,后角 15° 。

2 试验结果与分析

2.1 变润滑油用量下铣削速度对油雾浓度的影响

当润滑油用量 $Q > 20 \text{ mL/h}$ 时,切削现场油雾浓度已经超出了切削环境空气质量控制标准 ($\text{PM}_{10} \leq 5 \text{ mg/m}^3$, $\text{PM}_{2.5} \leq 0.5 \text{ mg/m}^3$)^[13],因此本试验仅测试分析 $Q=10 \text{ mL/h}$ 和 $Q=15 \text{ mL/h}$ 时的切削油雾浓度情况(见图2)。从该图可以看出,随着铣削速度的提高,两组润滑油用量下的切削油雾浓度均有上升迹象,润滑油用量 $Q=10 \text{ mL/h}$ 、铣削速度 $v_c < 400 \text{ m/min}$ 时油雾浓度上升较为明显, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 均上升 0.1 mg/m^3 左右,但当铣削速度由 400 m/min 增加到 700 m/min 时油雾浓度上升相对变缓。这是由于润滑油从喷嘴射出后同高速转动的刀具发生激烈碰撞致使润滑油颗粒进一步破碎,铣削速度越高撞击越激烈,因此,油雾浓度随铣削速度的升高而上升,但是当铣削速度达到一定数值后,二次碰撞雾化颗粒增长缓慢,因而所测油雾浓度值增长亦随之缓慢。

对比图2(a)与图2(b)还可发现,润滑油用量 $Q=15 \text{ mL/h}$ 时的油雾浓度明显高于 $Q=10 \text{ mL/h}$ 时的测量结果。因此,润滑油用量对油雾浓度值起到了决定性的影响,故而在微量润滑切削时,在控制润滑油用量的前提下,可选择的切削速度范围相对较宽。

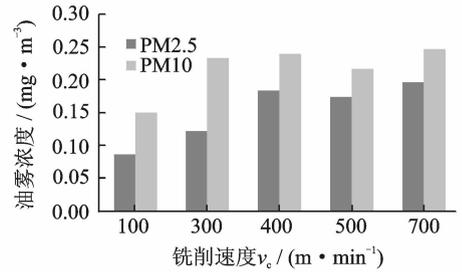
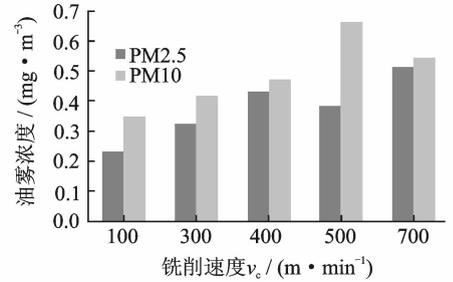
(a) $Q=10 \text{ mL/h}$ (b) $Q=15 \text{ mL/h}$

图2 变润滑油用量下铣削速度对油雾浓度的影响 ($p=0.6 \text{ MPa}$, $L=20 \text{ mm}$, 室温)

Fig. 2 Effect of milling speed on oil mist concentration under different oil flow rates ($p=0.6 \text{ MPa}$, $L=20 \text{ mm}$, room temperature)

2.2 变供气压力下铣削速度对油雾浓度的影响

图3为变供气压力下切削现场油雾浓度随铣削速度的变化趋势。从图3可以看出,随着铣削速度的增大,切削现场油雾浓度 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 均呈上升趋势。其中,供气压力 $p=0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$ 时油雾浓度上升趋势明显,但随着供气压力升高,油雾浓度上升趋势相对变缓,如供气压力 $p=0.7 \text{ MPa}$ 时,随着铣削速度的增大,油雾浓度 PM_{10} 几乎没有变化。然而,在高的供气压力下,随着铣削速度的提高, $\text{PM}_{2.5}$ 却持续升高(见图3(d))。这说明在高的供气压力下,小粒径油雾颗粒大量产生,不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的控制。因此,微量润滑铣削过程中要尽量避免同时采用高的供气压力和高的切削速度。

2.3 变喷射靶距下铣削速度对油雾浓度的影响

图4为变喷射靶距下油雾浓度随铣削速度的变化趋势。其中,当喷射靶距 $L=20 \text{ mm}$ 时,随着铣削速度的增大,油雾浓度有明显的增加(见图4(a));当喷射靶距 $L=30 \text{ mm}$ 时油雾浓度随铣削速度增加而增加的趋势有所减缓(见图4(b));而当喷射靶距 $L \geq 40 \text{ mm}$ 时油雾浓度几乎不随铣削速

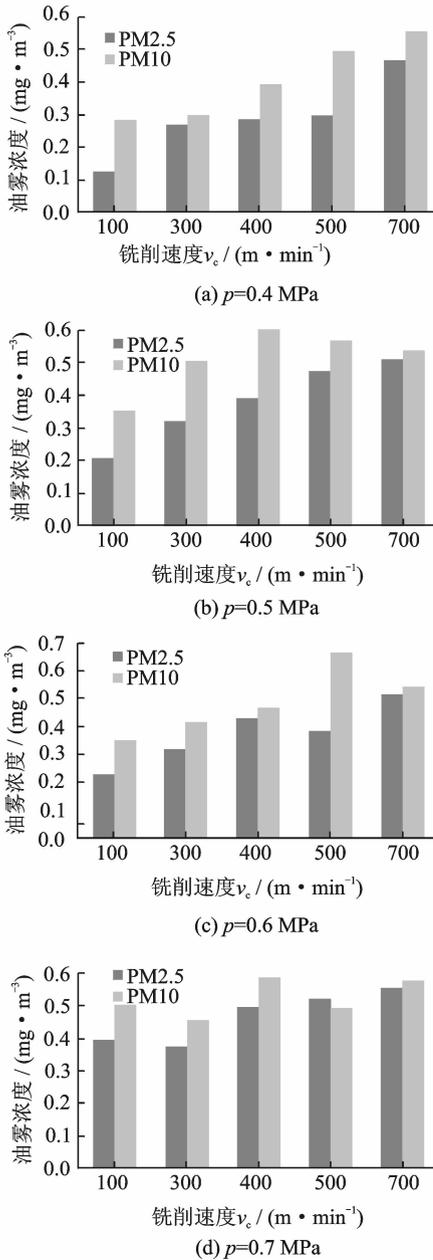


图 3 变供气压力下铣削速度对油雾浓度的影响 ($Q=15 \text{ mL}, L=20 \text{ mm}$, 室温)

Fig. 3 Effect of milling speed on oil mist concentration under different air pressure ($Q=15 \text{ mL}, L=20 \text{ mm}$, room temperature)

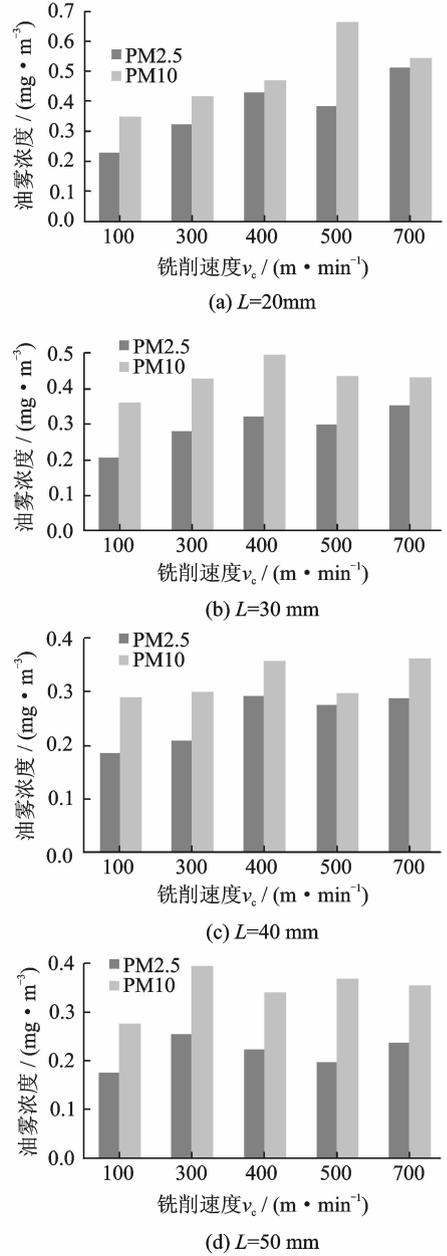


图 4 变喷射靶距下铣削速度对油雾浓度的影响 ($Q=15 \text{ mL}, p=0.6 \text{ MPa}$, 室温)

Fig. 4 Effect of milling speed on oil mist concentration under different spray distance to target ($Q=15 \text{ mL}, p=0.6 \text{ MPa}$, room temperature)

度的增加而增加(见图 4(c,d))。

随着喷射靶距增大,切削区与喷嘴之间的距离相应增大,因而到达切削区与高速转动刀具碰撞的油雾颗粒数变少;同时由于润滑油颗粒在雾化场中的时间较长得到充分雾化,参与撞击的颗粒平均粒径小,二次撞击雾化颗粒物较少。因而当喷射靶距增大时,铣削速度对油雾浓度的影响减弱,但此时微量润滑的切削效果亦会随之降低。因此,在微量

润滑切削过程中,应综合切削介质的冷却润滑效果与空气质量安全控制,合理选择喷射靶距与铣削速度。

2.4 变射流温度下铣削速度对油雾浓度的影响

图 5 为变射流温度下油雾浓度随铣削速度的变化趋势。从该图可以看出,不同射流温度下随着铣削速度的增大油雾浓度均呈现上升趋势。低温条件下的油雾浓度测量结果普遍大于室温条件下

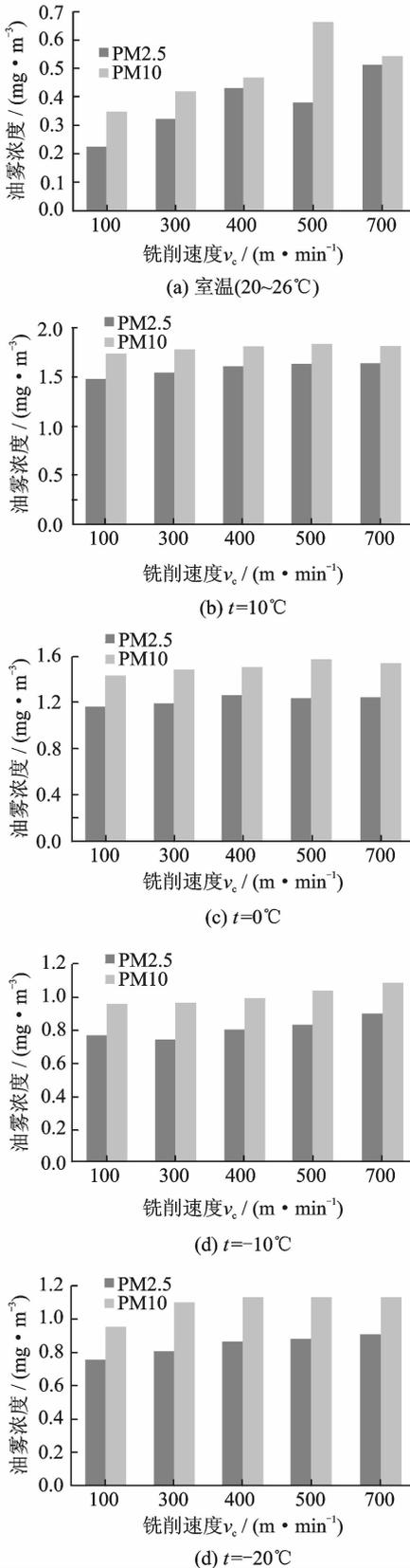


图5 变射流温度条件下铣削速度对油雾浓度的影响
($Q=15\text{ mL}$, $p=0.6\text{ MPa}$, $L=20\text{ mm}$)

Fig. 5 Effect of milling speed on oil mist concentration under different jet temperature ($Q=15\text{ mL}$, $p=0.6\text{ MPa}$, $L=20\text{ mm}$)

的测量结果。这主要是由于切削现场空气湿度较大,空气中悬浮的水汽容易在低温射流影响下凝聚成可测颗粒物,从而使得低温微量润滑条件下测得的油雾浓度数值远大于室温下测得的结果。但是,在 $10\sim-20^\circ\text{C}$ 的射流温度条件下,随着射流温度的降低,切削现场油雾浓度 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 数值有逐渐降低的趋势。这主要是因为低温条件下,润滑油黏度增大,雾化效果减弱,从而导致小颗粒油滴数相对减少。虽然相对于常温微量润滑条件,低温微量润滑条件下的切削现场油雾浓度数值较大,但低温微量润滑对于提高难加工材料加工效率、延长刀具寿命等方面具有较大的优势^[7-8]。

从图5还可以看出, $t=10^\circ\text{C}$, 0°C 时,铣削速度超过 500 m/min 后 PM_{10} 几乎不变或略有降低,而 $\text{PM}_{2.5}$ 仍略有增加; $t=-10^\circ\text{C}$, -20°C 时, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 均随铣削速度的增加而变化明显。这是因为随着射流温度的进一步下降,润滑油粘度进一步增大,雾化颗粒的平均粒径增大,二次撞击雾化在油雾产生过程中的比重加大,此时铣削速度对油雾浓度的影响相对明显。因此,可以在保证切削环境空气质量安全的条件下,兼顾空气湿度的影响,选取合适的射流温度。但在低温微量润滑切削条件下,应增强切削场所的通风设施,否则容易造成切削现场 $\text{PM}_{2.5}$ 油雾浓度超过控制标准。

3 结 论

通过研究分析不同微量润滑系统参数下铣削速度对油雾浓度的影响规律,可得到以下结论:

(1)在较高的润滑油用量下,射流高速撞击高转速刀具,使得二次雾化增强,油雾浓度随铣削速度增长趋势明显。

(2)在较小的供气压力下($\leq 0.5\text{ MPa}$),油雾浓度随铣削速度增长的趋势明显,在较大的供气压力下($\geq 0.6\text{ MPa}$), PM_{10} 增幅较小,但小粒径油雾颗粒数增多,不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的控制。

(3)在较小的喷射靶距下($\leq 20\text{ mm}$),油雾浓度随铣削速度的增大有明显的增加,在较大的喷射靶距下($\geq 40\text{ mm}$),油雾浓度几乎不随铣削速度的增大而增加。

(4)在射流温度与环境温度差值较大的情况下,由于切削场所空气湿度的影响,造成油雾浓度检测结果增大,但随着射流温度的降低,润滑油黏度亦会相应降低从而导致雾化效果减弱,油雾浓度相对降低。此外,当射流温度小于 -10°C 时,油雾浓度均随铣削速度的增加而变化明显。

参考文献:

- [1] 赵威,何宁,李亮等. 微量润滑系统参数对切削环境空气质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 184-189.
Zhao Wei, He Ning, Li Liang, et al. Investigation on the influence of system parameters on ambient air quality in minimum quantity lubrication milling process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 184-189.
- [2] Schulz H, Abele E, 何宁. 高速加工理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Schulz H, Abele E, He Ning. The high speed machining-fundamentals and applications [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] Rahman M, Kumar A S, Salam M U. Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(5): 539-547.
- [4] 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 and Manufacture, 2007, 47(11): 1667-1676.
- [5] Sun Wu. High speed milling of high heat-resistant steels with minimum quantity lubrication [D]. Darmstadt: Darmstadt University of Technology, 2005.
- [6] Kamata Y, Obikawa T. High speed MQL finish - turning of Inconel 718 with different coated tools [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(192/193): 281-286.
- [7] Bian Rong, He Ning, Li Liang, et al. Effects of cryogenic minimum quantity lubrication (CMQL) on high performance milling of PH13-8Mo stainless steel [C]//The 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting. Nagarakawa, Japan: [s. n.], 2010.
- [8] Yuan S M, Yan L T, Liu W D, et al. Effects of cooling air temperature on cryogenic machining of Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 356-362.
- [9] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012.
He Ning. High speed cutting [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 2012.
- [10] 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.
- [11] 田佳. 低温微量润滑切削环境空气质量研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
Tian Jia. An investigation of ambient air quality in cutting process with cryogenic minimum quantity lubrication [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [12] 刘晓丽. 基于微量润滑的切削环境空气质量检测与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Liu Xiaoli. The detection and analysis of ambient air quality in the cutting process based on minimal quantity lubrication [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [13] 汤羽昌. 基于环境空气质量安全控制的微量润滑铣削试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Tang Yuchang. The milling test research on minimal quantity lubrication based on ambient air quality in cutting process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [14] Mwfsc (OSHA). Metalworking fluids safety and health best practice manual [S]. Washington D C: Occupational Safety & Health Administration, 2008.
- [15] 环境保护部国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标(GB 3095-2012)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
Ministry of Environmental Protection of P. R. C., General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. R. C. Ambient air quality standards (GB 3095-2012) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- [16] 国家机械工业局. 金属切削机床油雾浓度测量方法(JB/T 9879-1999)[S]. 北京: 国家机械工业局, 1999.
State Bureau of Machine-Building Industry. Metal cutting machine tools-determination method of oil mist concentration (JB/T 9879-1999) [S]. Beijing: State Bureau of Machine-Building Industry, 1999.
- [17] Chen Meiru, Tsai Perngjy, Chang Chihching, et al. Particle size distributions of oil mists in workplace atmospheres and their exposure concentrations to workers in a fastener manufacturing industry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(1/2): 393-398.

