

高速电主轴油气润滑产生的油雾对 空气质量的影响

张丽秀^{1,2}, 于诗瑶^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 高档石材数控加工装备与技术
国家地方联合工程试验室, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究电主轴润滑系统供气压力、供油量、供油间隔及主轴转速4个参数对电主轴油雾粒径的影响;分析各因素对油雾粒径影响的显著性,计算得出各因素对油雾粒径的影响强度.方法 以100MD60Y4电主轴产生的油雾为研究对象,通过单一因素试验方法分析供气压力、转速、供油量及供油间隔因素对油雾颗粒粒径分布的影响,利用单因素方差法证明各因素对油雾粒径 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 均具有显著性影响.结果 供气压力为0.29 MPa时对空气质量影响最小,为保证加工环境空气质量,加工过程中应尽量避免转速在18 000~24 000 r/min、供油量在13.5~17 mL/h、供油间隔在45~90s工作.结论 电主轴系统供气压力、供油量、供油间隔及转速对电主轴油雾粒径均有显著性影响.对油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 所占比例的影响强度从大到小依次为:供油间隔、供气压力、转速、供油量;对油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例的影响强度从大到小依次为:供气压力、供油量、供油间隔、转速.

关键词 电主轴;油气润滑;油雾颗粒;空气质量

中图分类号 TH166;TG506 文献标志码 A

Influence of Oil Mist on Air Quality by High Speed Motorized Spindle Lubrication

ZHANG Lixiu^{1,2}, YU Shiyao^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. National-Local-Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper, the oil mist produced by 100MD60Y4 spindle was taken as the research object. The influence of gas pressure, speed, fuel supply quantity and oil supply interval on the particle size distribution of oil mist was analyzed by single factor test. The single factor variance was

收稿日期:2017-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51375317);辽宁省自然科学基金项目(2015020122);沈阳市科技计划项目(F16-205-6)

作者简介:张丽秀(1970—),女,教授,博士,主要从事主轴相关技术及绿色制造方面研究.

used to prove the gas pressure, speed, fuel supply quantity and oil supply interval had a significant impact on $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The results showed that: the air supply pressure of 0.29 MPa minimal impact on air quality, and to ensure air quality, processing should be avoided in the speed of $18\ 000 \sim 24\ 000\ r \cdot min^{-1}$, the fuel supply at $13.5 \sim 17\ mL/h$, oil interval in the $45 \sim 90\ s$ interval work. The effect intensity descending order for the oil mist particle size less than or equal to the proportion of $PM_{2.5}$ is as follows: oil supply interval > gas pressure > speed > fuel supply quantity; the influence intensity for the oil mist particle size less than or equal to PM_{10} proportion is: gas pressure > fuel supply quantity > oil supply interval > speed.

Key words: motorized spindle; oil-gas lubrication; oil mist particles; ambient air quality

为满足低碳制造和可持续发展的需要,数控机床的制造及使用要求保证其绿色性,而电主轴作为数控机床的关键部件,其运行过程中主要排放物来自于润滑系统,因此电主轴润滑系统绿色设计及绿色工艺必须受到重视^[1-2]. 密西根技术大学开展的“环境意识制造”项目,对机械加工过程产生的废物进行研究,并提出了减少废物排放的工艺优化方法^[3]. 王静等^[4]对机械加工过程排放的粉尘、切削液、冷却液、废屑进行分析,提出了减少废弃物排放的对策. 胡浩平^[5]以 MJ-50 型主轴的模块化绿色配置设计为例,将技术性能极优和环境影响极小设为目标函数,建立了组合优化模型. 李涛等^[6]采用碳足迹的方法,提出了数控机床绿色度的设计方案. 李先广^[7]对机床制造过程碳排放特性进行分析,根据碳排放量情况,提出了节能减排的措施建议. 乌克兰 Lubrikom 公司研制出一种可稳定气体压降的特殊结构,将其加在原油气润滑系统上,可限制空气流速在合适范围内,同时扩大系统润滑油储存量,延长了轴承的使用寿命^[8]. 慕尼黑工业大学齿轮研究中心发现油气润滑系统供油量与摩擦副润滑效果之间的关系^[9]. Chen Guoding^[10]使用解析方法,研究不同润滑剂在不同流型下压力和速度的分布情况. T. Tawakoli 等^[11]通过试验探寻微量润滑系统参数对磨削的影响,发现供气压力是影响加工效果的一个重要因数. 现今,有关油气润滑系统对润滑效果的研究较多,对空气质量影响研究较少. 油雾所带来的

危害程度与油雾颗粒的粒径分布有关^[12-14]. 研究表明,空气动力学直径大于 $2.5\ \mu m$ 且小于 $10\ \mu m$ 的油雾颗粒可进入上呼吸道,部分通过痰液排出体外或被鼻腔的绒毛阻挡,对人体危害较小,而直径小于 $2.5\ \mu m$ 的油雾颗粒,通过支气管进入血液,颗粒中的有害物质渗入到血液中,对人体伤害巨大^[15-16]. 如何使电主轴参与先进切削技术获得高加工质量的同时,有效监测和控制油气润滑条件下的空气质量,使其对人体健康影响降低至安全标准之下,是目前我国机械制造技术领域所重点关注的问题. 笔者试验研究电主轴油气润滑系统供气压力、转速、供油量及供油间隔因素对油雾颗粒粒径分布的影响,从而为油气润滑条件下电主轴绿色运行提供保障.

1 油气润滑装置产生油雾原理

油气润滑利用油泵把油输入到由油量分配器和油气混合块组成的油气混合器,油被油气分配器分成若干部分后进入油气混合块,在不间断压缩空气的作用下,油被送到润滑部位形成油膜,起润滑作用^[17]. 油与压缩空气在油气混合块中进行混合,使得油能很好地转化成油滴,均匀地分散在管道内表面^[18]. 高速旋转的电主轴产生离心力,使得分散在管道内表面的油滴雾化,从而形成油雾.

2 试验

2.1 试验仪器

为了研究电主轴润滑系统参数产生的油

雾对环境空气质量的影响,将油气润滑系统中的润滑油量、油气压力、供油间隔以及主轴转速作为自变量.研究对象为 100MD60Y4 高速磨削电主轴产生的油雾,电主轴的最高转速为 $60\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,额定功率为 4 kW . 选用 Laser Diffraction 激光粒度仪观测空气中油雾颗粒大小的变化.图 1 为试验装置图.

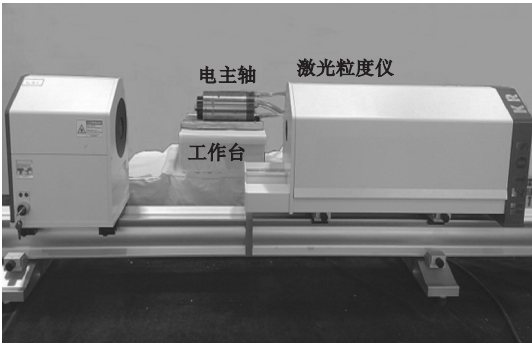


图 1 试验装置

Fig. 1 Testing apparatus diagram

2.2 试验方案

试验主要从油气润滑系统参数方面来研究对油雾特性的影响,而油气润滑系统参数包括供气压力、供油量和供油间隔等^[19-20].此外,电主轴转速对空气流场速度会产生影响,从而影响润滑油在运动过程中的聚合与分散.因此,试验方案中将润滑油量、油气压力、供油间隔以及主轴转速作为自变量.由于润滑油量、供气压力、供油间隔以及主轴转速

对油雾粒径的影响可能存在耦合影响,为了避免分析结果出现偏差,采用单因素对比分析方法,即在分析某一影响因素时,在试验方案中将其他影响因素固定,从而分析该因素的变化对于颗粒粒径体积分布的影响.

根据激光粒度仪的使用要求,电主轴油雾喷射口距离采样区固定为最近距离 20 cm .每次试验保证电主轴自然冷却到室温.采样间隔为 5 min ,每次试验电主轴运行时间为 40 min ,结果取各次试验的平均值.油气润滑装置中,润滑油供油量调整为 $3\sim 24\text{ mL/h}$,轴承腔的气流压力调整为 $0.03\sim 0.5\text{ MPa}$,程序控制器可调整供油间隔为 $0\sim 300\text{ s}$.试验结果统计空气动力学直径小于等于 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)所占比例和空气动力学直径小于等于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物(PM_{10})所占比例,以此来确定油雾颗粒对人体的危害程度.

2.2.1 供气压力的单因素试验

以电主轴转速 $n=21\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,供油间隔 $t=0.2\text{ s}$,润滑油用量 $Q=24\text{ mL/h}$ 为试验基底 1;以电主轴转速 $n=9\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,供油间隔 $t=0.2\text{ s}$,润滑油用量 $Q=17\text{ mL/h}$ 为试验基底 2.针对 6 个不同供气压力值,进行了两组试验基底的单因素比对试验,共计 12 组,其各个影响因素的取值见表 1.

表 1 供气压力单因素试验参数取值范围

Table 1 Parameter range in supply pressure single factor test

试验基底编号	供气压力/MPa	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	供油间隔/s	供油量/($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	0.26,0.29,0.32,0.35,0.38,0.41	21 000	0.2	24
2	0.26,0.29,0.32,0.35,0.38,0.41	9 000	0.2	17

2.2.2 电主轴转速的单因素试验

以供气压力 $G=0.32\text{ MPa}$,供油间隔 $t=0.2\text{ s}$,润滑油用量 $Q=24\text{ mL/h}$ 为试验基底 3;以供气压力 $G=0.29\text{ MPa}$,供油间隔

$t=0.2\text{ s}$,润滑油用量 $Q=17\text{ mL/h}$ 为试验基底 4.针对 9 个不同的转速,进行了两组试验基底的单因素比对试验,共计 18 组.各个影响因素的取值见表 2.

表 2 转速单因素试验参数取值范围

Table 2 Parameter range in speed single factor test

试验基底编号	供气压力/MPa	转速/ $10^3(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	供油间隔/s	供油量/($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$)
3	0.32	6,9,12,15,18,21,24,30,36	0.2	24
4	0.29	6,9,12,15,18,21,24,30,36	0.2	17

2.2.3 润滑油供油量的单因素试验

以供气压力 $G = 0.29\text{ MPa}$, 转速 $n = 21\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 供油间隔 $t = 0.2\text{ s}$ 为试验基底5; 以供气压力 $G = 0.32\text{ MPa}$, 转速 $n =$

$9\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 供油间隔 $t = 0.2\text{ s}$ 为试验基底6. 针对6个不同的润滑油供油量, 进行了两组试验基底的单因素比对试验, 共计12组. 其各个影响因素的取值见表3.

表3 供油量单因素试验参数取值范围

Table 3 Parameter range in fuel supply single factor test

试验基底编号	供气压力/MPa	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	供油间隔/s	供油量/($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$)
5	0.29	21 000	0.2	6.5, 10, 13.5, 17, 20.5, 24
6	0.32	9 000	0.2	6.5, 10, 13.5, 17, 20.5, 24

2.2.4 供油间隔的单因素试验

以供气压力 $G = 0.29\text{ MPa}$, 转速 $n = 21\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 润滑油用量 $Q = 24\text{ mL/h}$ 为试验基底7; 以供气压力 $G = 0.32\text{ MPa}$, 转速

$n = 9\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 润滑油用量 $Q = 24\text{ mL/h}$ 为试验基底8. 针对5个不同的供油间隔, 进行了两组试验基底的单因素比对试验, 共计10组. 其各个影响因素的取值见表4.

表4 供油间隔单因素试验参数取值范围

Table 4 Parameter range in fuel supply interval single factor test

试验基底编号	供气压力/MPa	转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	供油间隔/s	供油量/($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$)
7	0.29	21 000	0.2, 45, 90, 135, 180	24
8	0.32	9 000	0.2, 45, 90, 135, 180	24

3 试验结果

3.1 供气压力对油雾粒径的影响

在供气压力为 0.41 MPa 、转速 $9\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、供油量 17 mL/h 、供油间隔 0.2 s 的条件下, 激光粒度仪测试结果显示如图2所示. 由图2可知, 粒径大致分布在 $0.5 \sim 3.5\text{ }\mu\text{m}$, 且在 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 粒径分布密度最大. 此时小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比例为 97.59% , 小于等于 PM_{10} 所占比例为 100% .

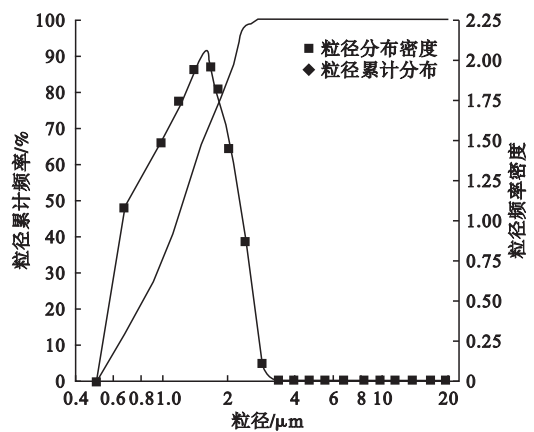


图2 粒径累计分布及分布密度

Fig. 2 Particle cumulative distribution and distribution density

图3为试验基底1与试验基底2条件下供气压力对油雾粒径的影响. 由图3(a)可知, 在基底1条件下随供气压力增大, 油雾粒径小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 和小于等于 PM_{10} 所占比例均呈上升趋势. 供气压力在 $0.29 \sim 0.35\text{ MPa}$ 时, 油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例上升趋势明显; 大于 0.35 MPa 时, 油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例趋于饱和. 而供气压力在 $0.29 \sim 0.38\text{ MPa}$ 时, 油雾粒径小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比例上升趋势平缓; 供气压力大于 0.38 MPa 时, 油雾粒径小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比例上升趋势显著. 由图3(b)可知, 随压力增大, 油雾粒径小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 和小于等于 PM_{10} 所占比例均呈上升趋势, 且上升趋势均在供气压力为 0.38 MPa 时趋于缓和. 图3(a)与图3(b)比较可得出, 随供气压力的不断增大, 油雾粒径小于等于 $\text{PM}_{2.5}$ 所占比例曲线上升趋势为先缓后急, 油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例曲线先急后缓, 这说明随供气压力的不断增大, 气体的流速随之增大^[21-22], 油雾粒径呈减小趋势. 考虑供气压力对空气质量的影响, 在其变化范围内, 供气

压力为 0.29 MPa 时对空气质量影响最小.

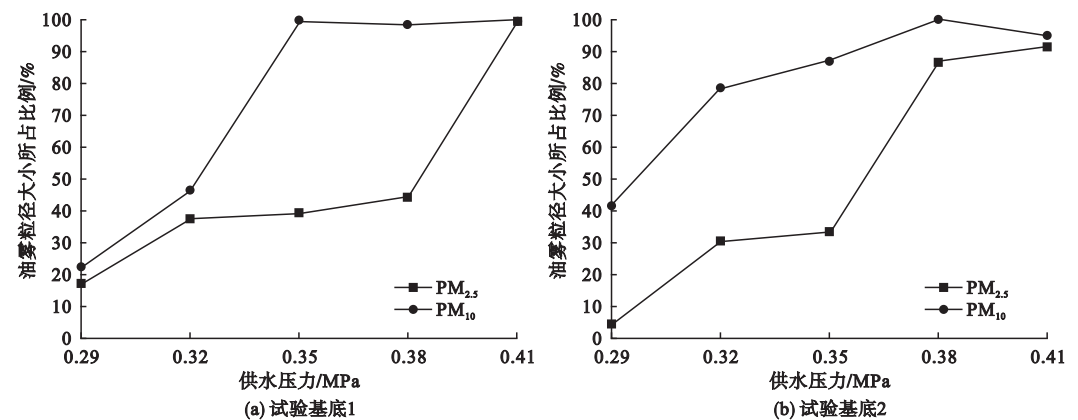


图3 供气压力与油雾粒径关系

Fig. 3 Relationship between supply pressure and oil mist particle size

3.2 电主轴转速对油雾粒径的影响

电主轴转速对油雾粒径的影响.

图4为试验基底3与试验基底4条件下

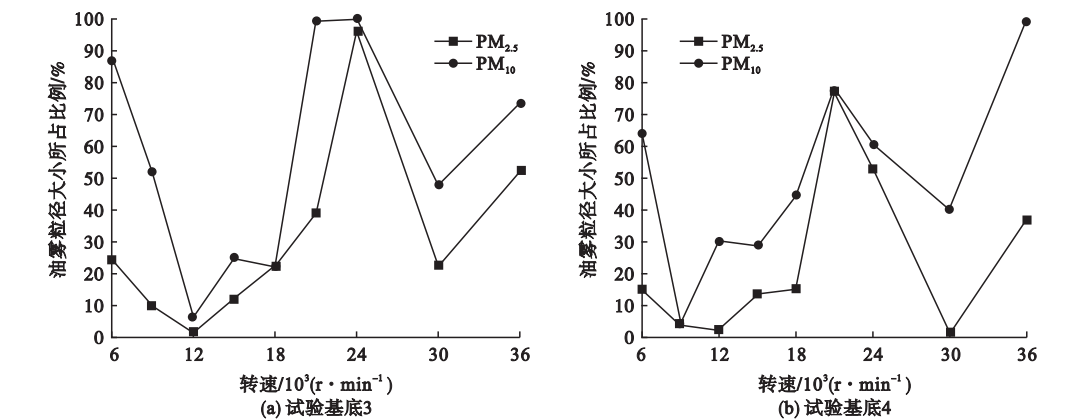


图4 转速与油雾粒径关系

Fig. 4 Relationship between speed and oil mist particle size

从图4(a)可以看出,在试验基底3条件下,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例随转速变化趋势基本相同,呈现出波动趋势.转速介于6 000 ~ 12 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,随着转速的增加,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例呈下降趋势,转速为12 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时达到最低点;12 000 ~ 24 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例快速上涨,转速为24 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时达到最高点;之后又出现下降-上升的过程.由图4(b)可知,在试验基底4条件下,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及油雾粒径小于等于 PM_{10} 所

占比例随转速变化也呈现波动变化,在转速21 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时二者均达到极大值;转速36 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例达到最大值;转速9 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时油雾粒径小于等于 PM_{10} 所占比例为最小值,趋于0;转速12 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和30000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 所占比例为极小.由图4(a)和(b)比对知,转速在6 000 ~ 12 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 所占比例呈降低趋势.转速在12 000 ~ 24 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 所占比例整体呈上升趋势.

转速在24 000 ~ 30 000 r·min⁻¹时,油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 所占比例呈下降趋势. 转速在30 000 ~ 36 000 r·min⁻¹时,油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 所占比例呈上升趋势. 转速在 12 000/min 和 30 000 r·min⁻¹ 为最佳.

3.3 润滑油供油量对油雾粒径及电主轴温升的影响

润滑油供油量是影响油雾粒径的重要因素之一. 图 5 为试验基底 5 与试验基底 6 润滑油供油量对油雾粒径的影响曲线.

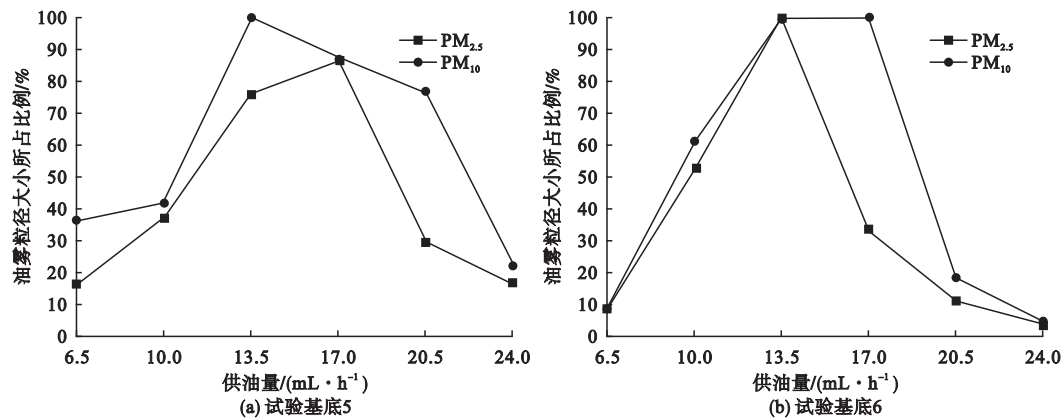


图 5 供油量与油雾粒径关系

Fig. 5 Relationship between fuel supply and oil mist particle size

由图 5(a)可知,在试验基底 5 条件下,随供油量增加,油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 及 PM₁₀ 所占比例均呈先上升后下降的趋势,且油雾粒径小于等于 PM₁₀ 所占比例在供油量为 13.5 mL/h 达到最大值,油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 所占比例在 17 mL/h 时达到峰值. 由图 5(b)可知,在试验基底 6 条件下,随供油量增加,供油量在 13.5 ~ 17 mL/h,油雾粒径小于等于 PM₁₀ 所占比例达到峰值,趋于百

分百. 油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 所占比例在 13.5 mL/h 时为最大值,趋于饱和. 由图 5(a)、图 5(b) 综合来看,供油量在 13.5 ~ 17 mL/h 时,油雾粒径小于等于 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 所占比例最高.

3.4 供油间隔对油雾粒径的影响

供油间隔与供油量相同,都是控制润滑油的供给. 图 6 为试验基底 7 与试验基底 8 两组条件下供油间隔对油雾粒径的影响.

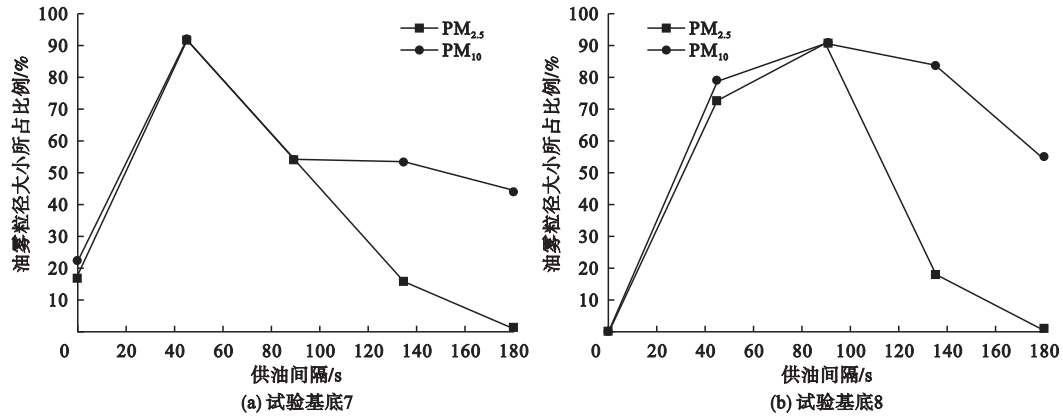


图 6 供油间隔与油雾粒径关系

Fig. 6 Relationship between fuel supply interval and oil mist particle size

在图 6(a) 中,随供油间隔时间的增加,供油量相对减少,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例呈现先增长后下降的趋势. 供油间隔在 45 s 时,二者均达到最大值. 而供油间隔在 180 s 时, $PM_{2.5}$ 趋于零. 在图 6(b) 中,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例随供油间隔增大呈现先增长后下降的趋势. 在 0.2 s 时,二者所占比例均为最小值,趋于零. 小于 45 s 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例处于急速增长状态,在 45 ~ 90 s 处于缓慢增长状态,直到 90s 时达到最大值. 从图 6(a)、6(b) 可知,供油间隔在 45 ~ 90 s 时,油雾粒径小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例相对较高.

4 单因素方差分析

为探究各试验因素对小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例是否具有显著性影响,采用 SPSS 软件进行单因素方差分析. 首先明确观测变量和控制变量,这里控制变量分别为转速、供气压力、供油量、供油间隔,观测变量为不同试验基底下的小于等于 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 所占比例值. 再剖析观测变量的方差,观测变量值的变动会受控制变量和随机变量两方面的影响. 设单一因素 A 有 k 个水平指标,每个水平指标下做 n_i 次试验,那么试验总次数为 $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_k$,水平 A_i 下的样本均值为

$$X_a = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \quad (n = 1, 2, \cdots).$$
 (1)

在 k 个水平指标下, n 次试验得到的点样本的均值为

$$X_b = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_a.$$
 (2)

单因素方差分析将观测变量总的离差平方和 (SST) 分解为组间离差平方和 (SSA) 和组内离差平方和 (SSE) 两部分,其中总离差平方和 (SST) 为全部观察值 X_{ij} 与总平均值 X_b 的离差平方和反应全部观察值的离散状况. 而组间离差平方和 (SSA) 反映各组总体样本均值之间的差异程度,既包括随机误差也包括系统误差. 组内离差平方和 (SSE) 反应每个样本各观察值的离散状况,反映随机误差的大小. 用数学形式表述为

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - X_b)^2,$$
 (3)

$$SSA = \sum_{i=1}^k n_i (X_a - X_b)^2,$$
 (4)

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - X_a)^2,$$
 (5)

$$SST = SSA + SSE.$$
 (6)

通过比较观测变量总离差平方和各部分所占的比例,推断控制变量是否给观测变量带来了显著影响. 假设给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,原假设 H_0 : 控制变量影响观测变量不存在显著性差异. 如果已经证明自变量对因变量有显著性影响,为了度量它们之间的关系强度 R^2 可以用组间离差平方和占总离差平方和的比例大小来反映.

$$R^2 = \frac{SSA(\text{组间})}{SST(\text{总})}.$$
 (7)

其算数平方根 R 就可以用来测量自变量与因变量的强度关系,其值越大表明关系越显著,反之越小. 结果如表 5 和表 6 所示.

表 5 $PM_{2.5}$ 单因素方差分析结果

Table 5 The results of the variance analysis for the single factor experiment					
因素	SSA	SSE	SST	R	$PM_{2.5}$ 显著性
供气压力	8 606. 4	1 058. 4	9 664. 8	0. 943	0. 013
转速	10 149. 8	2 075. 6	12 225. 3	0. 911	0. 010
供油时间间	11 580. 1	999. 3	12 579. 4	0. 959	0. 006
隔供油量	9 519. 6	2 096. 2	11 615. 8	0. 905	0. 031

表 6 PM₁₀单因素方差分析结果

Table 6 The results of the variance analysis for the single factor experiment

因素	SSA	SSE	SST	R	PM ₁₀ 显著性
供气压力	6 819.0	799.9	7 619.0	0.946	0.012
转速	13 262.6	3 312.5	16 575.0	0.894	0.019
供油时间间隔	6 655.1	1 506.4	8 161.5	0.903	0.044
供油量	12 761.0	2 522.3	15 283.3	0.914	0.024

由表 5、表 6 中可知,各显著性均小于给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,表示各因素在影响 PM_{2.5}及 PM₁₀所占比例不存在显著性差异发生的概率均小于 5%,所以拒绝原假设 H_0 ,故都存在显著性影响.比较表 5 中的 R 值,可得出各因素在影响 PM_{2.5}所占比例的强度由大到小为供油间隔、供气压力、转速、供油量.比较表 6 中的 R 值,得出各因素在影响 PM₁₀所占比例的强度由大到小为供气压力、供油量、供油间隔、转速.

5 结 论

(1)电主轴系统供气压力、供油量、供油间隔及转速对电主轴油雾粒径均有显著性影响.

(2)供气压力越大,空气中粒径小于等于 PM_{2.5}的油雾颗粒及小于等于 PM₁₀的油雾颗粒所占比例越大,供气压力为 0.29 MPa 时对空气质量影响最小.

(3)随着电主轴转速增大,空气中粒径小于等于 PM_{2.5}的油雾颗粒及小于等于 PM₁₀的油雾颗粒所占比例呈现波动变化,为了保证空气质量,在实际机床加工过程中应尽量避免转速为 18 000 ~ 24 000 r·min⁻¹.

(4)供油量和供油间隔对空气中粒径小于等于 PM_{2.5}及 PM₁₀油雾颗粒所占比例影响,均呈现先增长后下降的趋势.为了保证空气质量,电主轴应尽量避免供油量在 13.5 ~ 17 mL/h 工作,避免供油间隔在 45 ~ 90 s 工作.

(5)在各因素中,对油雾粒径小于等于 PM_{2.5}所占比例的影响强度从大到小依次为:

供油间隔、供气压力、转速、供油量;对油雾粒径小于等于 PM₁₀所占比例的影响强度从大到小依次为:供气压力、供油量、供油间隔、转速.

参考文献

[1] 鄢萍,阎春平.智能机床发展现状与技术体系框架[J]. 机械工程学报,2013,49(21):1-10.
(YAN Ping, YAN Chunping. Development status and technical system framework for smart machine tool[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(21):1-10.)

[2] WEINERT K, INASAKI I. Dry machining and minimum quantity lubrication [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2004, 53(2): 511-537.

[3] HAND D, CRITTENDEN J. National center for clean industrial and treatment technologies[J]. Clean products & processes, 2000, 2(2): 80-81.

[4] 王静,宾鸿赞.加工过程的废弃物危害性分析及对策[J]. 机械工程师, 2000, 8: 5-7.
(WANG Jing, BIN Hongzan. Analysis and countermeasure for the waster in machining process[J]. Journal of mechanical engineer, 2000, 8: 5-7.)

[5] 胡浩平,刘电霆.数控机床主轴绿色配置设计的不确定优化模型建立与求解[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(1): 38-41.
(HU Haoping, LIU Dianting. CNC machine tool spindle green configuration design optimization under uncertainty and model establishment[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2015(1): 38-41.)

[6] 李涛,杨庆东,祝英平.基于碳足迹方法的数控机床绿色度评估[J]. 制造技术与机床, 2016(12): 33-35.
(LI Tao, YANG Qingdong, ZHU Yingping. Greenness evaluation research of CNC machine based on carbon footprint method[J]. Manu-

- facturing technology & machine tool, 2016 (12):33-35.)
- [7] 李先广,李聪波. 基于 Petri 网的机床制造过程碳排放建模与量化方法[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(12):2723-2735.
(LI Xianguang, LI Congbo. Modeling and quantification methods for carbon emission in machine tools manufacturing processes based on Petri nets[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2012, 18(12): 2723-2735.)
- [8] OKUMURA F, TSUTSUMI M. Sound noise emission of high-speed spindle using oil-air lubrication-identification of noise source and its reduction[J]. Japan society for precision engineering, 2002, 68(7):938-942.
- [9] TRETYAKOV E I, YURCHENKO N A. Improving oil-air lubrication systems[J]. Metallurgist, 2004, 48(7/8):414-416.
- [10] CHEN G D, LIU M L. Characteristic flow parameters of oil/air lubricants in bearing chamber under different low patterns[J]. Chinese journal of aeronautics, 2010, 31(12):2400-2406.
- [11] TAWAKOLI T, HADAD M J. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2012, 54(55):10-17.
- [12] 高彦文,陈辉. 金属加工液油雾的收集与优化分析[J]. 机械工程师, 2011(10):26-28.
(GAO Yanwen, CHEN Hui. The gather and optimization analysis of oil mist from metal working fluids[J]. Journal of mechanical engineer, 2011(10):26-28.)
- [13] 刘晓丽,李亮. 基于微量润滑的切削油雾雾化特性测试与分析[J]. 工具技术, 2011, 45(12):16-18.
(LIU Xiaoli, LI Liang. Study on cutting oil mist spray characteristic based on minimum quantity lubrication [J]. Tool engineering, 2011, 45(12):16-18.)
- [14] HOHN B, MICHAELIS K. Minimised gear lubrication by a minimum oil/air flow rate[J]. Wear, 2009, 266(3/4):461-467.
- [15] 汤羽昌,何宇. 基于微量润滑的两级雾化仿真与试验研究[J]. 工具技术, 2013, 47(1):3-6.
(TANG Yuchang, HE Ning. Simulation of two-stage atomization and experimental study on minimum quantity lubrication[J]. Tool engineering, 2013, 47(1):3-6.)
- [16] HOLKUP T, KOLAR P. Influence of thermo-mechanical conditions of rolling bearing on the dynamic of machine tool spindles[J]. Matar spaha proceedings, 2008, 32(1):141-146.
- [17] WLASCHITZI P, HFLINGER W. A new measuring method to detect the emissions of metal working fluid mist[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 144:736-741.
- [18] 李松生,周鹏. 基于油气润滑的超高转速电主轴轴承润滑性能的试验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(10):25-28.
(LI Songsheng, ZHOU Peng. Experimental study of the lubricating performances for electric spindle bearings running in ultrahigh speed lubricated by oil-air[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(10):25-28.)
- [19] 陈建文,宋锦春. 关于油雾润滑中油雾浓度的影响因素分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(4):566-568.
(CHEN Jianwen, SONG Jinchun. Influencing factors on oil-mist concentration during atomized lubrication[J]. Journal of northeastern university (natural science), 2007, 28(4):566-568.)
- [20] MAYER E. Theory of liquid atomization in high velocity gas streams[J]. ARSJ, 1961, 31:1783-1785.
- [21] 康宁,曾文彬. 空气压力对油雾发生器雾化特性的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(8):14-16.
(KANG Ning, ZENG Wenbin. Effect of air pressures on mist characteristics of oil mist lubrication device[J]. Lubrication engineering, 2009, 34(8):14-16.)
- [22] 蔡斌,李磊. 液滴在气流中破碎的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4):613-616.
(CAI Bin, LI Lei. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow[J]. Journal of engineering thermophysics, 2003, 24(4):613-616.)