

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.006

静电喷雾润滑液滴的粒径分布特性研究*

孔 魁, 胡志强, 姚伟强, 黄水泉, 许雪峰*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为掌握静电喷雾润滑液滴的粒径分布特性, 将图像识别检测技术应用到荷电润滑液滴的粒径测量中。开展了采集图像中液滴区域的特征抽取和识别分析, 建立了液滴的平面二维直径和空间三维直径的转换关系, 提出了一种实用的气雾液滴粒径分布特性的检测方法。在建立液滴采集装置的基础上, 进行了气雾不同截面液滴的采集和识别试验。实验结果表明, 随着静电电压升高, 喷雾索特平均直径减小, 雾滴颗粒趋于均匀, 雾化质量明显改善; 在距喷嘴 60 mm~140 mm 的 3 个截面上, 随着距离的增加, 雾滴索特平均直径增大, 雾滴趋于发散。

关键词: 静电喷雾; 微量润滑; 粒径; Matlab; 图像处理; 索特平均直径

中图分类号: TH117 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1472-05

Sizes distribution characteristics of cutting fluid roplets for electrostatic atomization minimum quantity lubrication

KONG Kui, HU Zhi-qiang, YAO Wei-qiang, HUANG Shui-quan, XU Xue-feng

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to understand the sizes distribution characteristics of the cutting fluid droplets for electrostatic atomization lubrication, image recognition and detection technology was applied to the sizes measures of the charged cutting fluid droplets. After the feature extraction and recognition analysis of droplets areas in collecting images, the transformation of two-dimensional plane diameter and three-dimensional space diameter was established. A practical method was presented to detect the distribution characteristics of droplets sizes in gas-fog flow. On the basis of setting droplets collecting device, the droplets in gas-fog flow were collected and detected on the different sections. The experiment results indicate that the Sauter mean diameter(SMD) of droplets become smaller with the electrostatic voltage increasing. The distribution of the droplets diameters become more uniform and the atomization quality is improved dramatically. On the three sections from 60 mm~140 mm, the average SMD of droplets are increased with the spray distance increasing and the distribution of the droplets diameters become more nonuniform.

Key words: electrostatic atomization; minimum quantity lubrication(MQL); diameter; Matlab; image processing; sauter mean diameter (SMD)

0 引 言

微量润滑(MQL)技术是环境友好绿色切削技术的典型代表。MQL技术利用压缩空气将微量润滑液雾

化成微米级液滴, 喷向切削区, 对刀具与工件、切屑的接触界面进行润滑, 同时润滑液滴和压缩空气还起到冷却切削区的作用^[1]。目前, 国内外一些学者从不同的角度对 MQL 进行了研究, A.S.Varadarajan^[2]将 MQL 技术应用于切削铝合金及复合材料的加工, C.Angulo^[3]

收稿日期: 2013-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375454)

作者简介: 孔 魁(1987-), 男, 河南驻马店人, 主要从事静电喷雾微量润滑方面的研究. E-mail: vkongkui@163.com

通信联系人: 许雪峰, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: xuxuefeng@zjut.edu.cn

利用高速钢刀具对锻造铝合金 5083-H112 进行 MQL 铣削研究,何宁等^[4]将低温 MQL 应用于高速铣削钛合金的加工。这些实验研究表明:在高速切削过程中,传统的切削液很难进入到切削加工区域,MQL 时切削液在压缩气体的作用下,具有更强的渗透能力,能起到较好的润滑效果,工件表面粗糙度减小,刀具磨损降低。

静电喷雾是凭借静电力使液体微粒化的过程,在均匀、细化雾滴及提高雾滴在目标物的沉积量、吸附性能等方面有明显效果。静电喷雾广泛应用于农药静电喷雾^[5-6]、荷电喷雾燃烧^[7-8]、静电涂油^[9-11]等领域。

静电喷雾微量润滑作为一项新技术,润滑液荷电雾化液滴的粒径及其分布特性是该技术的基础研究内容。本研究结合 MQL 技术和静电技术,利用静电喷雾液滴粒径小、表面张力降低、吸附性好等特点,可以提高雾化润滑液的润滑和冷却性能。

1 实验方法

1.1 实验材料及设备

基础润滑液为美国 ITW 集团生产的 Accu-Lube LB-2000 中黏度纯天然基础油。为提高润滑液的电导率,本研究将 5% 的十二烷基苯磺酸钠饱和溶液、5% 的水与 90% 的 LB-2000 润滑液混合,配制成具有一定导电性的改性润滑液。气雾发生装置为 ITW 生产的 Accu-Lube 准干式微量喷油装置,静电发生装置为北京华晶汇科技有限公司生产的 EST705 高精度高稳定静电发生器,显微镜为日本 KEYENCE 公司生产的 VW-600 动态分析三维显微系统。

1.2 润滑液静电雾化系统

润滑液静电雾化发生系统如图 1 所示。在 Accu-Lube 准干式微量喷油装置喷嘴出口,本研究设置了针状电极电晕发生装置,其结构示意图如图 2 所示。当对针状电极施加负高压电位时,尖端电极附近的空气电离,形成电子雪崩,电子吸附到初次雾化液滴上,导致液滴的表面张力下降,促使液滴继续细化。实验中,压缩空气压强为 0.2 MPa,润滑液流量 20 ml/h,静电发生器输出电压分别为 0 kV、-15 kV、-25 kV 和 -35 kV。

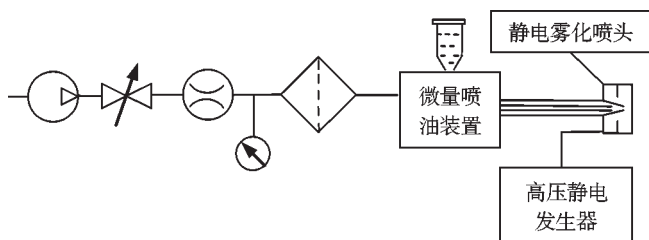


图1 雾化系统示意图

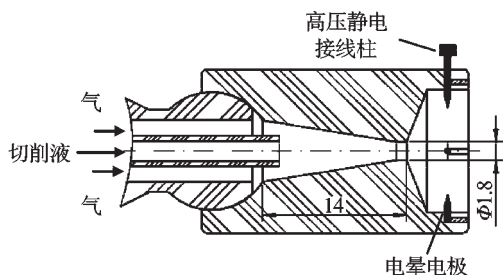


图2 电极结构示意图

1.3 静电雾化液滴采样

静电雾化液滴采样方案如图 3 所示。为防止硅片表面产生雾滴重叠现象,气雾首先通过带有小孔的挡板,确保只有适当数量的雾滴可以达到硅片表面。通过调节 h 和 H 值的大小,采集距喷嘴不同高度截面上的雾滴颗粒。根据截面距离 ($h + H$) 优化挡板孔径,随着截面距离的增减,孔径亦相应地增减:在 60 mm 截面上,孔径取 0.6 mm;在 100 mm 截面上,孔径取 1 mm;在 140 mm 截面上,孔径取 1.5 mm。利用显微镜采集硅片表面液滴图像,图像中设置的标尺用来标定液滴的尺寸。

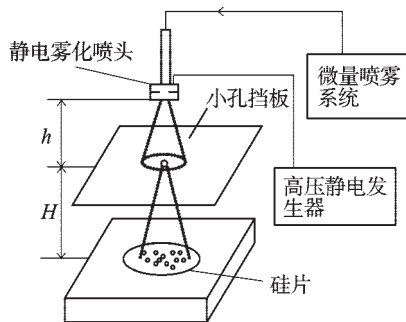


图3 静电雾化液滴采集方案示意图

1.4 静电雾化液滴粒径检测方法

液滴识别及尺寸检测流程如图 4 所示。通过液滴

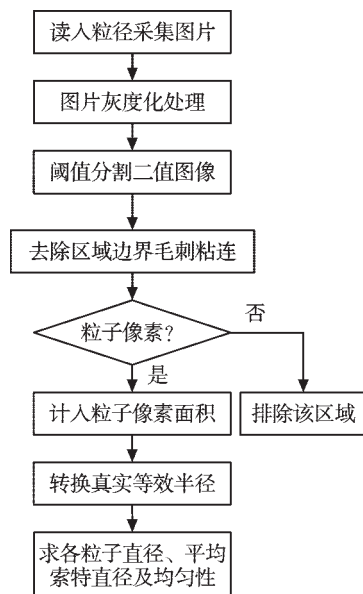


图4 液滴尺寸检测程序设计流程图

识别及尺寸检测的处理程序,获得不同工况下雾滴尺寸及其分布、雾滴样本的平均索特直径、雾滴的特征直径和发散度等信息。采用图像识别技术检测静电雾化液滴在硅片上的二维平面粒径 D_{2D} 。 D_{2D} 并不代表雾化液滴真实的三维空间粒径,但二者之间存在着相互转换的关系。本研究采用美国学者 Kyung-Hee Park^[12]提出的雾化液滴二维平面直径与三维空间直径之间的经验公式,将图像自动识别得到的二维平面直径转化为液滴的实际直径:

$$D_{3D} = 0.001 2D_{2D}^2 + 0.199 7D_{2D} - 0.098 7 \quad (1)$$

2 实验结果及讨论

2.1 静电雾化液滴粒径图像识别检测

液滴图像的识别与检测处理过程分为3个阶段^[13]: 图像预处理、图像特征抽取、图像的识别与分析。粒径采样原始图像如图5(a)所示。

首先,本研究对图像进行灰度化处理,处理后的灰度图像如图5(b)所示;其次,利用图像灰度分布阈值法将灰度图像化为二值图像,实现图像的分割,选用最小误差法(阈值法的一种),以目标和背景像素灰度均值的平均值作为分割阈值,取阈值为41,液滴图像的分割效果较好,分割并标记出粒径区域,处理结果如图5(c)所示;最后,统计各液滴区域像素面积,根据标尺像素值及粒径转换公式(1),将液滴像素面积转化为液滴的真实直径,统计处理各液滴尺寸。处理多张显微照片后得到的约300个液滴的粒径分布柱状图如图5(d)所示。

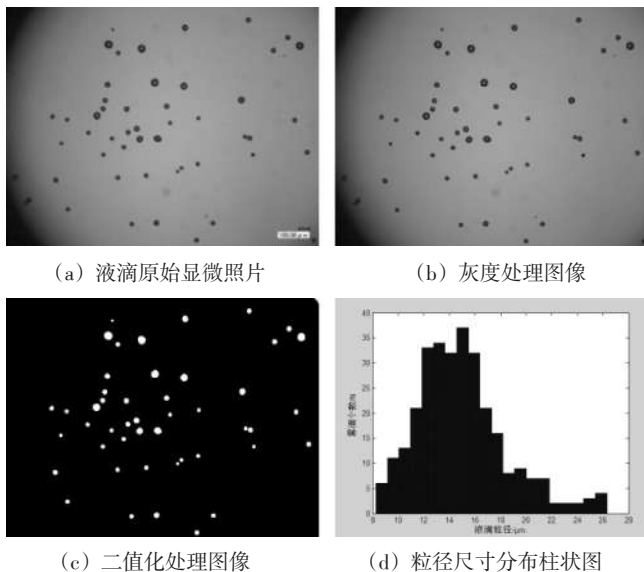


图5 液滴粒径图像识别与检测过程

2.2 不同距离截面雾化液滴粒径

距喷嘴不同距离截面上雾化液滴的索特平均直径的变化情况如图6所示。索特平均直径(SMD)定义

为雾滴的直径等于全部雾滴样本的总体积对总面积的比值,其计算如下式所示:

$$SMD = \frac{\sum d_i^3 N_i}{\sum d_i^2 N_i} \quad (2)$$

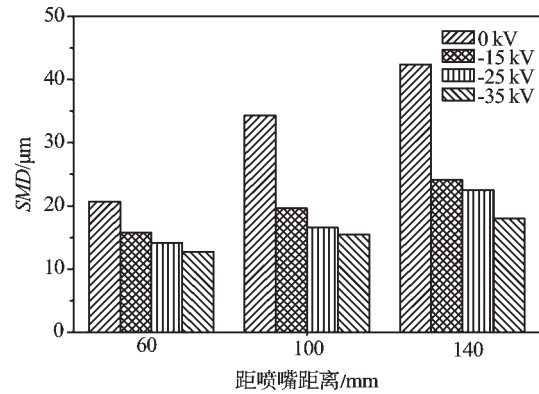


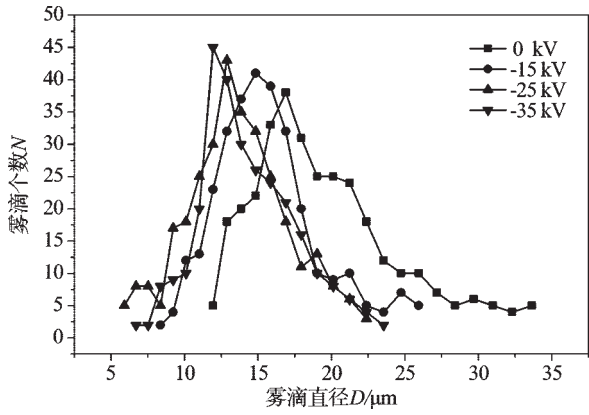
图6 索特平均直径变化情况

由图6可见,在不同截面上,液滴索特平均直径均随静电电压绝对值增大而减小。这是由于随着静电电压的提高,液滴的荷电量增加,吸附在液滴表面的电子相互排斥,产生与表面张力相反的静电力,降低了液滴的表面张力。在外部气动力的作用下,液滴更易发生二次雾化,从而呈现出随电压增加而索特平均直径减小的趋势。在相同电压条件下,液滴索特平均直径随距离增大而增加。其原因是随着喷雾距离的增大,液滴在前进过程中相互碰撞凝聚的几率增大,导致液滴粒径呈不断增大的趋势。

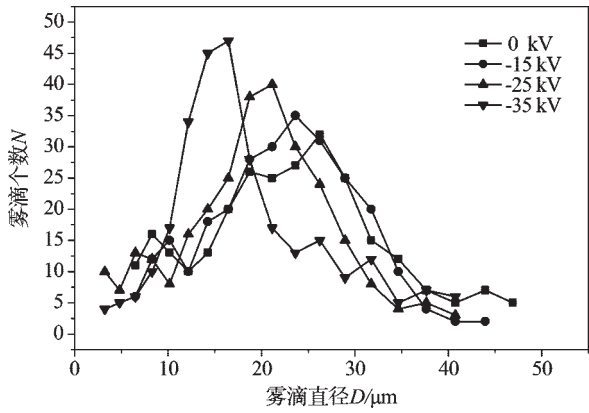
静电电压还影响不同截面上的液滴粒径增幅。由图6可见,不施加静电电压时,随着喷雾截面距离的增加,液滴索特平均直径增加较大;施加静电电压后,在不同截面上荷电液滴的索特平均直径增幅明显减小。这是由于液滴荷电后,液滴表面吸附电子,同性电荷的相互排斥,减小了液滴在前进过程中碰撞凝聚的几率,使得荷电液滴粒径并无显著地增加。

2.3 静电雾化液滴的尺寸分布

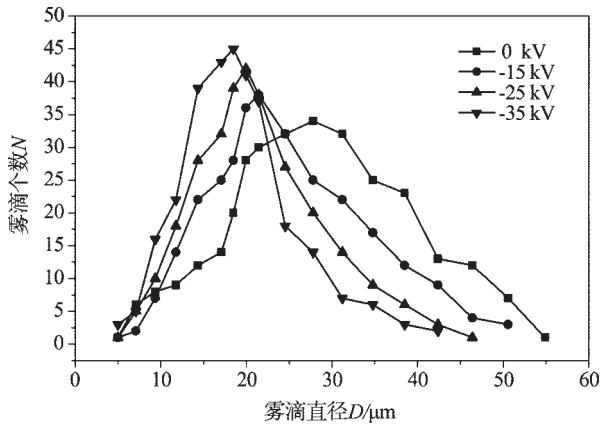
3个测量截面上粒径尺寸分布曲线如图7所示。由图7可知,每个截面上液滴的尺寸分布均呈现先增大后减小的趋势,不同电压下4条曲线大致相同。在电极电压绝对值由0~35 kV的增大过程中,曲线峰值向左移动,说明小粒径的液滴数量增多,电压升高加剧了液滴的破碎。同时,粒径谱峰形由平缓变得陡峭,说明了粒径尺寸分布更加集中,带电雾化液滴的尺寸均匀性提高。由此可见,在相同气压和润滑油流量条件下,随着荷电电压的绝对值升高,有效地减小了雾化液滴粒径,提高了雾化液滴的尺寸均匀性,从而改善了雾化质量。



(a) 距喷嘴60 mm截面上粒径分布曲线



(b) 距喷嘴100 mm截面上粒径分布曲线



(c) 距喷嘴140 mm截面上粒径分布曲线

图7 静电雾化液滴的尺寸分布曲线

2.4 静电雾化液滴的特征直径及其发散度

特征直径代表某一直径下所有液滴体积占液滴总体积的百分比,笔者将其比值以下标的形式标出,用相对尺寸范围 Δ_s 表达液滴直径相对于体积中值直径 $D_{0.5}$ 的范围,如下式所示:

$$\Delta_s = \frac{D_{0.9} - D_{0.1}}{D_{0.5}} \quad (3)$$

用发散边界 Δ_b 表示最大直 $D_{0.99}$ 相对于体积中值直径 $D_{0.5}$ 的发散程度,如下式所示:

$$\Delta_b = \frac{D_{0.99} - D_{0.5}}{D_{0.5}} \quad (4)$$

各截面上静电雾化液滴的特征直径如表1所示。随着荷电电压绝对值的增加,各截面上液滴达到某一体积下的特征直径基本呈减小趋势;随着累计体积的增加,特征直径减小加剧,说明荷电更利于大颗粒液滴发生二次雾化,小液滴颗粒荷电细化效果有限。

表1 静电雾化液滴的特征直径

距喷嘴距离/mm	荷电电压/kV	$D_{0.1}$ / μm	$D_{0.5}$ / μm	$D_{0.9}$ / μm	$D_{0.99}$ / μm
60	0	13.7	17.4	28.6	34.2
	-15	10.6	14.7	21.7	25.7
	-25	9.9	14.6	19.7	23.8
100	-35	10.5	14.1	18.4	22.2
	0	13.7	23.7	39.7	47
	-15	13.2	23	34.7	45.2
140	-25	11.7	19.2	28.9	38.2
	-35	10.4	19.1	25.7	36.2
	0	12.6	27	46.3	54.8
	-15	12.3	26.2	43.7	50.5
	-25	10.4	24.4	36.6	48.3
	-35	9.1	23.7	32.2	45.8

各截面上静电雾化液滴的相对尺寸范围和发散边界如图8、图9所示。

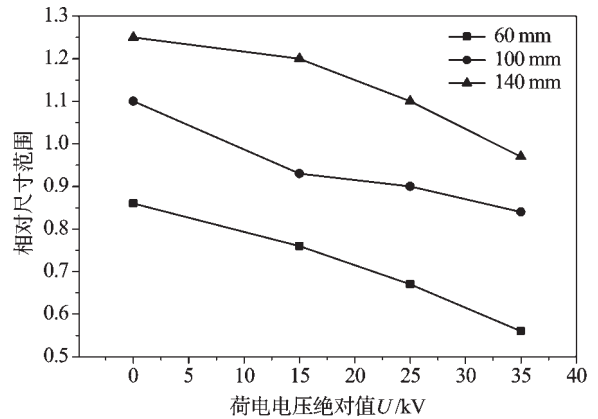


图8 静电雾化液滴相对尺寸范围

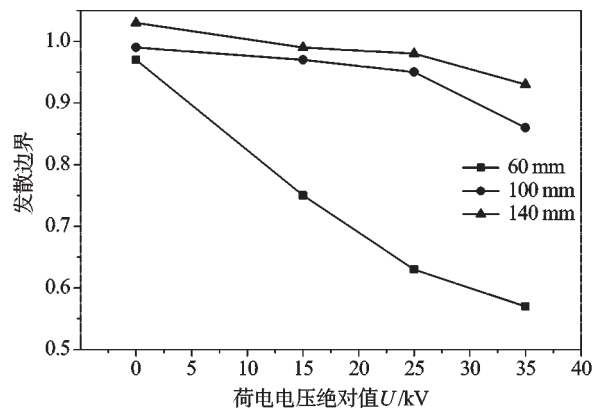


图9 静电雾化液滴发散边界

实验结果表明,随着荷电电压绝对值的增加,液滴的相对尺寸范围和发散边界呈减小趋势,说明液滴荷电后,雾化均匀度提高。在60 mm截面上,液滴的相对尺寸范围和发散边界均有较为显著地减小,在100 mm、140 mm截面上减小幅度不大,说明随着截面距离增加,荷电对提高液滴均匀度效果减弱。这是由于随着喷雾距离增加,液滴在运动过程中不断放电,碰撞凝聚几率增加,静电雾化效果减弱。

3 结束语

利用图像识别检测技术可以有效地识别出采集图像中各液滴区域。本研究通过对各区域像素面积的等效转换,实现了不同工况下各液滴直径的自动检测以及粒径尺寸分布和均匀性的自动统计。

在距喷嘴不同距离的3个测量截面上,液滴的索特平均直径均随静电电压绝对值增大而减小,静电使雾化液滴细化。在相同电压条件下,随着截面距离的增加,液滴平均索特直径增大。静电电压还影响不同截面上的液滴粒径增幅,施加静电电压后,在不同截面上荷电液滴的索特平均直径增幅明显减小。

在各个测量截面上,随静电电压绝对值的提高,雾化液滴尺寸分布曲线峰值左移,粒径谱峰形不断的由平缓变得陡峭,说明荷电使液滴粒径尺寸分布更加集中。荷电更利于大颗粒液滴发生二次雾化。对比60 mm截面与其他两个截面,液滴的相对尺寸范围和发散边界均有较为显著的减小。随截面距离增加,荷电对提高液滴均匀度效果减弱。

雾化液滴的粒径影响润滑液进入切削区域的能力,雾化液滴的索特平均直径及其均匀性是衡量散热能力的一个重要依据。因此,通过对静电喷雾润滑液滴粒径的分布特征的研究,有利于进一步从微观的角度去研究静电喷雾微量润滑的润滑冷却机理。

参考文献(References):

- [1] WEINERT K, INASAKI I, SUTHERLAND J W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication [J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2004, 53 (2) : 511–537.
- [2] VARADARAJAN A S, PHILIP P K, RAMAMOORTHY B. Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning [J]. *International Journal of Machine tool and Manufacture*, 2002, 42(2) : 193–200.
- [3] LACALLE L N L D, ANGULO C, LAMIKIZ A. Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 172(1) : 11–15.
- [4] 苏宇,何宁,李亮. 低温最小量润滑高速铣削钛合金的试验研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(22) : 2665–2670.
- [5] 贾卫东,邱白晶,施爱平,等. 农用高压静电喷雾场的实验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(12) : 66–70.
- [6] 陆军,贾卫东,李萍萍,等. 黄瓜叶片喷雾药液持留量试验[J]. *农业机械工程学报*, 2010, 41(4) : 60–64.
- [7] 闻建龙,王军锋,张军,等. 柴油高压静电雾化燃烧的研究[J]. *内燃机学报*, 2003, 21(1) : 31–34.
- [8] 邵霞,闻建龙. 重油静电雾化燃烧的初步研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2005, 23(4) : 46–48.
- [9] 高全杰. 静电涂油机中油液的荷电雾化研究[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(7) : 552–555.
- [10] 王家青,高全杰. 静电涂油机中新型油液荷电装置的试验研究及仿真分析[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(18) : 2176–2179.
- [11] 陈丽君,林世鸿. 静电除尘清洗方法在包装与食品机械中的应用[J]. *包装与食品机械*, 2012(5) : 57–59.
- [12] PARK K H, JORGE O Y, YOON M C. A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL) [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010(50) : 824–833.
- [13] 秦襄培. MATLAB图像处理与界面编程技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

孔魁,胡志强,姚伟强,等. 静电喷雾润滑液滴的粒径分布特性研究[J]. *机电工程*, 2013, 30(12) : 1472–1476.

KONG Kui, HU Zhi-qiang, YAO Wei-qiang, et al. Sizes distribution characteristics of cutting fluid droplets for electrostatic atomization minimum quantity lubrication [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(12) : 1472–1476.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>