

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.002

微量润滑喷嘴电晕电极的电场特性及其对油雾荷电性能的影响研究^{*}

王 争, 李中亚, 万家傲, 易 芳, 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:针对静电气雾微量润滑系统的电晕电极产生的高压静电场影响润滑油雾的荷电性能,以及电晕电极的结构形式决定了电场的强度和分布的问题,对不同电晕电极数量及布置型式对空间电场强度的影响展开了分析。利用 Ansoft Maxwell 软件对不同结构形式电晕电极的空间电场强度进行了仿真,并建立了电晕静电气雾微量润滑油雾荷电性能测试系统,研究了不同电极结构形式对油雾荷质比的影响。研究结果表明,对比多电晕电极,单电晕电极具有结构简单、电场强度高以及高场强集中分布于润滑油锥状气雾区域的特点。电晕电极的空间电场仿真结果与油雾荷质比实验结果基本符合,单电晕电极的油雾荷质比优于多电晕电极,适用于电晕静电气雾微量润滑系统。

关键词:静电气雾微量润滑;电晕电极结构形式;电场仿真;荷质比

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0253-06

Electric field characteristics of MQL nozzles corona electrode and effect on lubricant mist charging performance

WANG Zheng, LI Zhong-ya, WAN Jia-ao, YI Fang, XV 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: Aiming at the problem that in electrostatic spraying-minimum quantity lubrication system, the high voltage electrostatic field generated from the corona electrode affects the lubricant mist charging performance, and the electric field intensity and distribution was determined by corona electrode configuration, the influence of corona electrode number and arrangement to the spatial electric field strength was investigated. Using Ansoft Maxwell to simulate the spatial electric field strength of corona electrode in different configuration, a system of lubricant mist charging performance of the electrostatic spraying-minimum quantity lubrication was established to conduct the tests, from which the effect of different electrode configuration on charge-mass ratio. The results indicate that compared with the multi-electrode, single electrode has a simple structure, high electric field strength and the high electric field strength concentrate in the lubricant mist tapered region. The simulated results of spatial electric field is well accord with the experiment ones, the charging performance of the lubricant mist with single electrode is better than multi-electrode, which is suitable for a corona electrostatic spraying-Minimum quantity lubrication system.

Key words: electrostatic spraying-minimum quantity lubrication; corona electrode configuration; electric field simulation; droplets charge-mass rate

收稿日期:2015-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375454)

作者简介:王 争(1991-),男,浙江宁波人,主要从事静电喷雾微量润滑方面的研究. E-mail:wz931356229@163.com

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

0 引 言

传统制造业中,切削液的大量使用对环境及人员健康造成危害。环境友好无污染的干式切削是 21 世纪绿色加工追求的最终目标,但不适用于高温合金和钛合金等难加工材料的加工^[1]。开发环境友好且低(无)污染的润滑冷却方法是现阶段的主要任务^[2]。微量润滑(minimal quantity lubrication, 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油雾化成微米级雾滴,喷向切削区,对刀具与工件、切屑的接触界面进行润滑与冷却,起到减小摩擦、降低切削温度及阻止切屑粘附到刀具上的作用^[3]。目前, MQL 技术已成功应用于车削、铣削和钻削等领域。研究表明, MQL 加工中,油雾的粒径与分布、渗透及润湿性及在加工区域的沉积量是影响其润滑冷却性能的关键因素^[4]。

静电喷雾(electrostatic spraying, ES)技术利用高压静电场使雾滴带电,可有效降低雾滴的平均粒径^[5-6],提高雾滴分布的均匀性^[7]、增强雾滴对目标物的吸附性、沉积效率及润湿渗透性^[8-12],广泛应用于农药喷雾、喷墨打印和静电涂油等领域。高全杰等^[13]对静电涂油中多针电极喷雾刀梁静电场特性与雾化效果进行了研究,得出液滴荷电后能破碎成更小的液滴,同时指出针电极最佳间距为 2 mm 时雾化粒径最小且分布更均匀;杨超珍等^[14]对农药喷雾电晕荷电进行研究,得出荷电能提高雾滴对目标物的吸附性和沉积效率。电极位置对雾滴荷电性能有较大影响,电极距离喷雾锥面越近,荷电效果越好;陈志刚等^[15]采用高压脉冲负电晕方式对农药喷雾进行荷电,电极数量对雾滴荷电存在较大影响,农药喷雾因其雾滴区域较宽的特点,电极数量增加可使雾滴荷电量增大。

在微量润滑基础上结合静电喷雾发展起来的静电气雾微量润滑技术(electrostatic spraying-minimum quantity lubrication, ES-MQL),具有液滴粒径小、雾化均匀、液滴表面张力、接触角小、液滴荷电及吸附性好等特点,可提高雾化切削液雾滴的润滑及冷却性能。静电气雾微量润滑技术中,油雾荷电可采用针状电极电晕放电的方式。笔者针对电晕电极布置结构对空间静电场强度及分布的影响进行研究,分析不同电极数量及结构型式对润滑油油雾荷电性能的影响。

1 电晕静电喷雾微量润滑技术原理

1.1 静电喷雾微量润滑系统

电晕静电喷雾微量润滑系统的示意图如图 1 所

示。气泵产生的压缩空气经内液外气双层管流向喷嘴,在气动频率发生器的控制下润滑油在喷嘴口破碎雾化。电晕环设置于喷嘴前方,电晕电极接高压静电发生器,构成电晕喷嘴单元。雾化润滑油经过电极电晕区,发生电晕荷电,以荷电气雾的形式二次雾化喷出,对目标物起到润滑冷却作用。

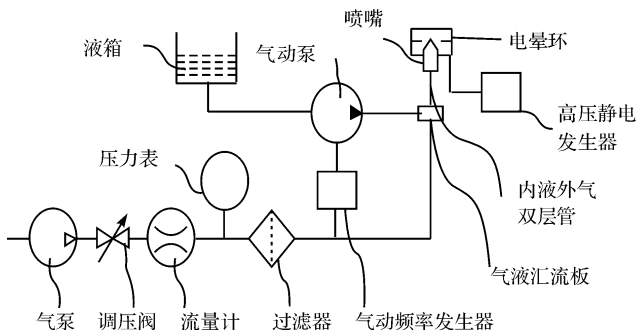


图 1 电晕静电喷雾微量润滑系统示意图

1.2 电晕电极布置结构

由于针电极尖端曲率半径小,接通高压静电后,尖端附近形成高电场,产生电晕放电现象^[16]。电晕静电喷雾微量润滑下电极布置结构示意图如图 2 所示,电极布置结构三维图如图 3 所示。电晕环以一定的极距 d (电极中心与喷嘴平面间的距离) 布置于喷嘴前方。定义两针尖距离为极尖距离 S , 极尖距离变化会影响电极在油雾区域的场强。同时,荷电区域的空间电场的强度及分布也受电晕环上电极数量的影响。在电晕静电气雾微量润滑条件下,润滑油雾经喷嘴呈锥状喷射,根据喷嘴直径、喷雾角及电极平面所在位置等实验条件,油雾主要分布在截面直径约为 10 mm 区域内。当极尖距离 $S = 4 \text{ mm}$ 、 10 mm 、 16 mm 时,电极尖端分别位于喷雾体内部、相切及外部位置。相比正电晕放电,负电晕放电具有起晕电压低、荷电效率高、击穿电压高、电晕离子电流大及电压工作范围宽等特点,有利于润滑油的荷电。基于上述特点,本研究采用负电晕放电形式开展研究。

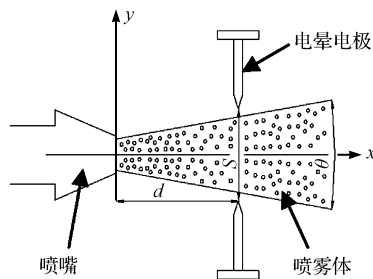


图 2 电极布置结构示意图

2 电晕电极空间电场分布的分析

2.1 电晕电极数量及极尖距离的选择

电晕电极布置结构如图3所示,针电极布置于绝缘材料制成的电晕环内侧。单电极结构简单,电极的尖端布置在喷雾中心轴线上。双电极、四电极和六电极以一定极尖距离分布于电晕环内侧。为研究极尖距离对电晕区电场强度的影响,双电极按4 mm、10 mm、16 mm的极尖距离对称布置于喷雾中心轴线周围。

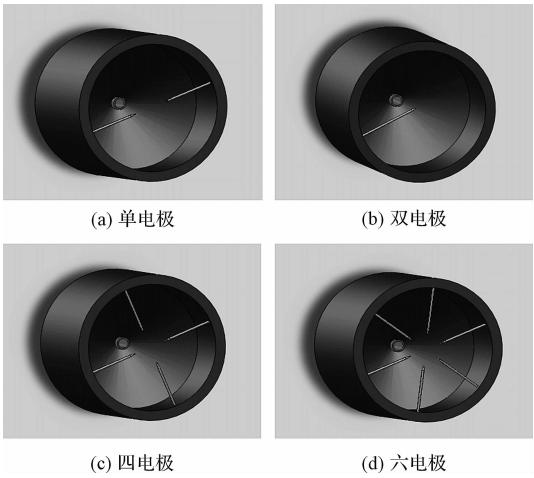


图3 电晕电极布置结构图

2.2 电极布置结构的电场模拟

电晕电极的数量与结构形式对空间电场强度及分布有着直接影响。为得到适用于电晕静电喷雾微量润滑系统的电晕环,本研究对不同数量电极以及不同极尖距离电晕环的空间电场进行仿真分析。基于电极实际结构及加工环境,Ansoft Maxwell 中参数设定如下:电晕电压为-15 kV;电极材料设定为 perfect conductor (相对介电常数为1,电导率为 $1e+30\text{ S/m}$);接地板材料为 steel (相对介电常数为1,电导率为 $2e+6\text{ S/m}$);计算域空间材料为 air (相对介电常数为1,电导率为0)。针电极直径1 mm,电极长度10 mm,尖端长度1.5 mm,尖端曲率半径为0.05 mm,电极尖端距离钢板80 mm,电极数量为1,2,4,6。

不同电极数量下极尖距离为10 mm的电极产生的空间静电场的场强云图如图4所示。由图4(a)可以看出,单电晕电极针尖处场强较大(云图颜色为淡黄色处),远离电极尖端时,场强急剧减小。由于针电极尖端曲率半径小于电极其他部分,根据尖端效应,更易电离出空间带电粒子,使得针尖场强较大。由图4(b)可以看出,双电晕电极时,在两电极中心附近存在一场强较弱区域。这是因为对置电极产生的电场会

相互干扰,导致中心区域电场强度抵消并降低。由图4(c),4(d)可以看出,四电晕电极和六电晕电极时,同样存在相邻电极电场相互抵消的现象,中心区域电场强度降低。但由于电极数量增加,空间矢量电场合成后的场强相比于双电极时有所增大。

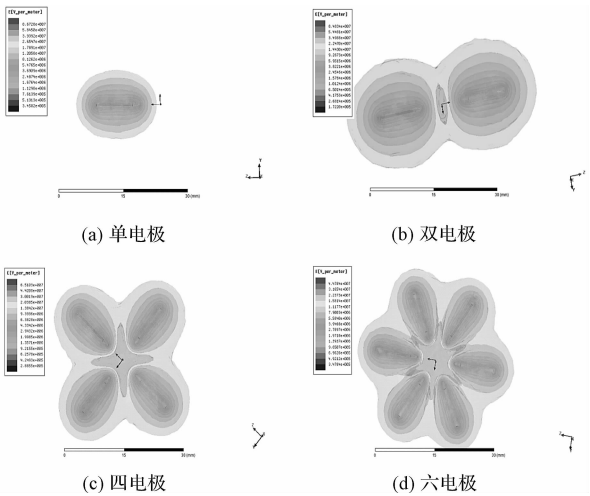


图4 不同数量电晕电极空间电场强度分布云图

不同数量电极在喷雾方向中心轴线上的电场强度如图5所示。由图5可见,单电极时,在中心轴线上,零位表示位于电极尖端起始位,电场强度为零;离开电极尖端,电场强度迅速增加到最高值,之后随着离尖端距离的增大而减弱。由于开始阶段处于针电极等势体内部,场强为零。因电荷易聚集在曲率半径小的尖端,导致峰值出现在针电极尖端处。多电极则呈现先增大后减小趋势,这是因为多电极下干扰强烈,对电场的削弱作用强。

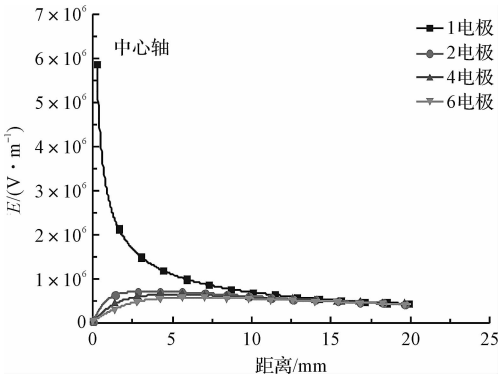


图5 不同数量电极在喷雾方向中心轴线上的电场强度

由于电晕电极中心截面处于电极内部,场强为零,本研究对电晕电极平面右侧1 mm处径向截面的电场强度进行分析。不同数量电极在喷雾方向距离电晕电极平面1 mm处径向截面的电场强度如图6所示。图6中虚线范围表示油雾区域,单电极在此区域内的电场强度由圆心向外逐渐减小,曲线呈正抛物线状;多电极在该区域内的电场强度曲线则呈现一反抛物

线状,中心强度最小,且电极数量减少,波谷变得陡峭。可见,单电极在油雾区域的电场强度明显大于多电极。

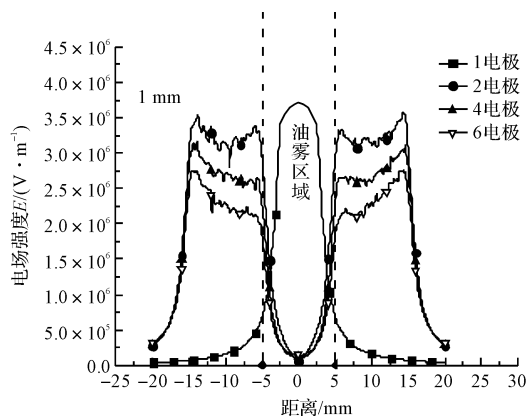
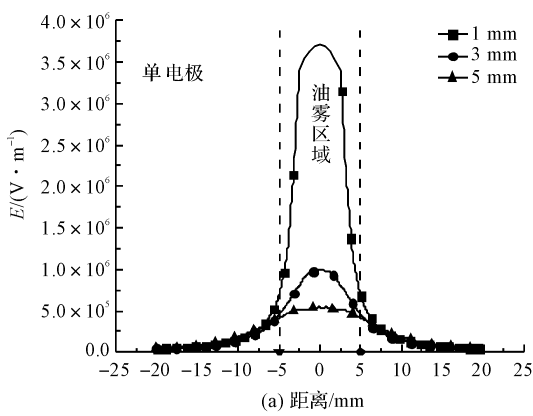
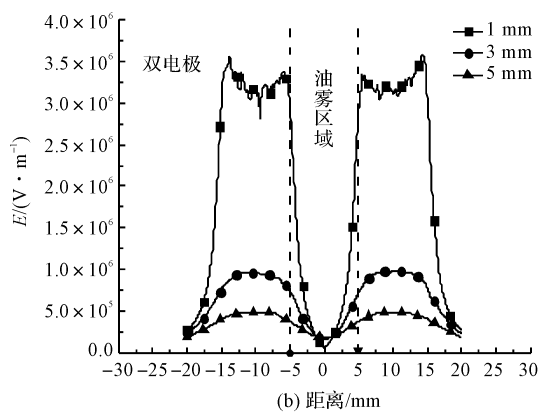


图 6 不同数量电极在距离电晕电极平 1 mm 处
径向截面上的电场强度

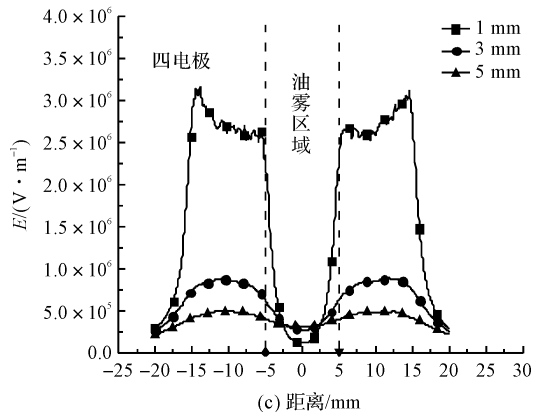
不同数量电极在喷雾方向距离电晕电极平面 1、3、5 mm 处径向截面上的电场强度分布曲线图如图 7 所示。由图 7(a) 可见,单电极在不同截面上的电场强



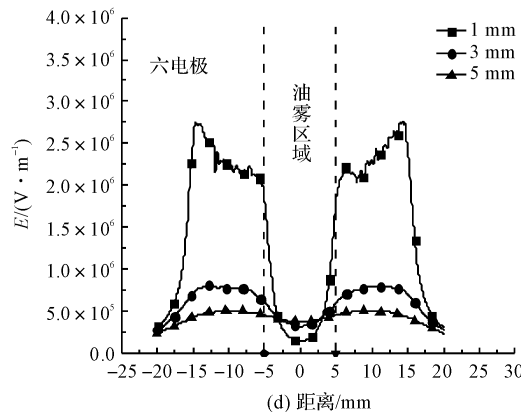
(a) 距离/mm



(b) 距离/mm



(c) 距离/mm



(d) 距离/mm

图 7 电晕电极在不同距离截面上的电场强度

综上分析表明,由于微量润滑油雾分布区域呈细锥状,采用针尖布置于喷雾轴心线上的单电极荷电方式,可在油雾荷电区域获得较高的电场强度及较为合理的电场分布,有利于提高油雾荷电。

度曲线都呈一抛物线状,且随截面距离增加峰形变缓,强度有所下降,高场强集中分布于雾滴经过区域。由图 7(b),7(c),7(d) 可见,多电极情况下,电场强度曲线呈现 M 状,随截面距离增加,峰形变缓。油雾区域由于电极间相互干扰,使得电场强度低于两侧,不利于雾滴荷电。

对于多电极,极尖距离 S 的变化同样会影响其电场强度大小与分布。不同极尖距离下,双电极在距离截面处的电场强度分布曲线如图 8 所示。计算结果表明,当极尖距离为 4 mm 时,两电极极尖距离过小,相互抵消十分严重,导致电场强度弱且更分散;当极尖距离为 16 mm 时,虽然电极间距离的加大减少了相互间的干扰,但电极尖端与喷雾锥面距离增大,同样导致油雾区域电场强度降低。极尖距离为 10 mm 时雾滴所在区域电场强度最大;此外,从图 8(b),8(c),8(d) 可以看出,在相同距离截面处,极尖距离为 10 mm 时电场强度曲线两波峰的间距最短,说明此时高场强区域最为集中,相互间干扰较弱。

3 润滑油雾滴荷电性能试验

3.1 试验设计

润滑油油雾的荷电量是表征油雾荷电性能最基本

的物理量,直接影响润滑油的雾化效果和润滑冷却性能。对于粉体、雾滴等物质的带电情况,通常用荷质比衡量,即带电量与物质质量之比^[17]。其他条件一定,通过对不同电极数量的电晕环油雾荷质比进行测量,便可比较不同电极布置结构对油雾荷电性能的影响。通常测量荷质比的方法有法拉第筒法、网状目标法及模拟目标法。本研究采用网状目标法^[18],检测润滑油油雾的荷电性能。

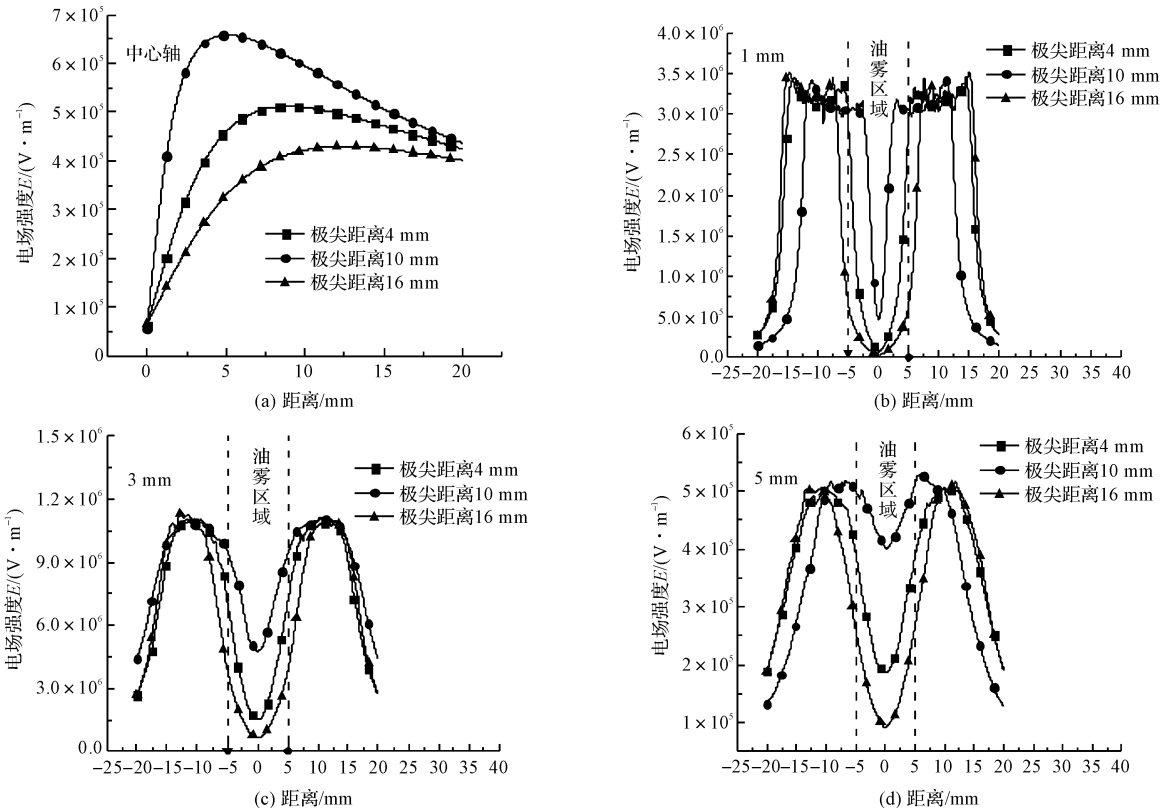


图8 不同极距双电极在不同距离截面上的电场强度

试验用润滑油为阿库路巴纯天然植物润滑油,不含矿物油、活性硫化物及挥发性有机化合物,是以亚油酸和油酸为主的脂肪酸甘油酯。主要理化性能:比重 0.92, 40 ℃ 下运动黏度 37 mm²/s, 闪点 320 ℃, 倾点 -20 ℃, 油膜强度 60 kg/cm², 25 ℃ 下表面张力 29.5 mN/m。

3.2 试验装置

润滑油油雾荷质比测量系统如图 9 所示,系统主要由喷雾发生装置、高压静电发生装置及油雾荷电量采集装置 3 部分构成。喷雾发生装置采用 Accu-Lube 精密润滑喷嘴;高压静电发生装置采用型号为 EST705 高精度高稳定静电发生器,最大输出电压 -60 kV,电流 2 mA;油雾荷电量测量采用 Agilent 34420A7 1/2 Digit Nano Volt/Micro Ohm Meter 精密电压表,灵敏度为 100 pV。实验中,以不同电极数量的电晕环(多电

网状目标法利用数个金属网收集沉积的荷电油雾,用微安表测量金属网与大地之间的电流,通过测得的电流和油雾的沉积量计算出荷质比。平均荷质比计算公式为:

A_q = Q/M = I · t/ρqt = I/ρq (1)

式中:A_q—润滑油油雾的荷质比,Q—静电荷总量,M—收集的油雾总质量,I—电流强度,t—测量时间,ρ—润滑油密度,q—润滑油质量流量。

极极尖距离为 10 mm)、润滑油流量、压缩空气压和充电电压为变量进行交叉实验。

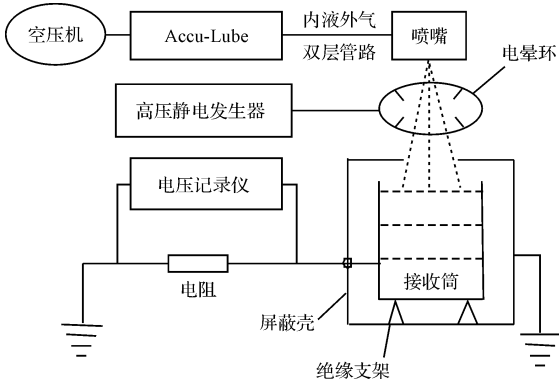


图9 荷质比测量试验系统图

3.2 试验结果分析

气压 0.3 MPa, 流量 10 ml/h, 不同电极数量下油雾荷质比随电压的变化规律如图 10 所示。由图 10 可

见,不同电极数量时油雾的荷质比均随着电压的升高而增大。单电极时,雾滴在 -10 kV 时的荷质比为 $-7 \times 10^{-2}\text{ C/kg}$, 5 kV 时才荷上电,且荷质比仅在 -10^{-4} C/kg 数量级水平,表明空气电离程度低。由于相同电压下单电极产生电场强度更大,利于润滑油介质的充分荷电;多电极则因电极间存在相互干扰,削弱了电场强度。增大电极间的极尖距离虽然可以有效地减少多电极间的相互干扰,但由于微量润滑气压大、流量小,雾化锥角小,油雾分布区域较窄。因此,通过增加电极的极尖距离不利于油雾荷电。可见,结构简单、起晕电压低、荷电效率高的单电极更适合于微量润滑气雾的荷电。此外,润滑油油雾的荷电量还受到气压和润滑油流量的影响。

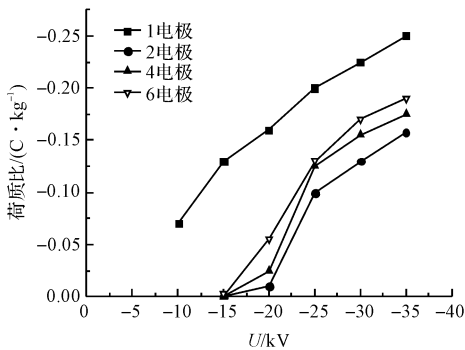


图 10 不同电极数量电压对润滑油荷质比的影响

润滑油流量 10 mL/h , 单电极时不同电压下气压对油雾荷质比的影响规律如图 11 所示。由图 11 可知,在相同电压下,油雾荷电量随气压增大而增加,气压为 0.4 MPa 时油雾荷电量最大,荷电能力最强。提高喷雾系统压力,液体从喷嘴喷出时,较高的内外压力差及空气较强的撞击力增强了润滑油的雾化效果,使润滑油破碎成更小的雾滴,获得更大的表面积,使得雾滴更容易荷电。

气压 0.3 MPa , 单电极时不同电压下润滑油流量对油雾荷电性能的影响如图 12 所示。流量为 5 mL/h 时润滑油荷质比最大,荷电性能最好,随流量的增加,油雾荷电能力逐渐变弱。润滑油流量越大,雾化产生的雾滴粒径也相对越大,空间存在的静电荷数一定时,雾滴粒径变大,单位质量所带电荷量减少,平均荷质比减小,导致雾滴荷电性能降低。

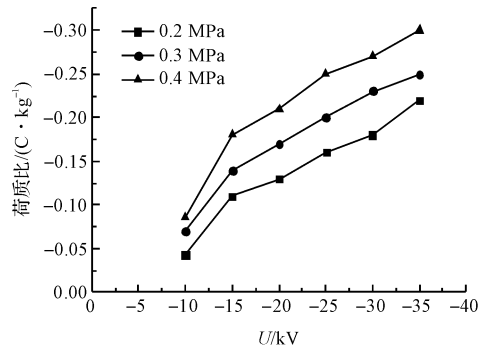


图 11 单电极 10 mL/h 时气压对雾滴的荷质比的影响

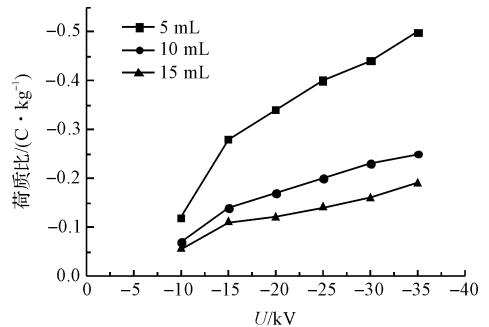


图 12 单电极 0.3 MPa 时流量对雾滴的荷质比的影响

4 结束语

(1)多电晕电极在电极平面中心区域产生的空间矢量电场相互干扰、抵消,使得电晕静电气雾微量润滑条件下细锥状油雾区域的电场强度低且分散,不利于油雾荷电。

(2)采用针尖位于喷雾轴心线上的单电晕电极具有结构简单、电场强度高以及高场强集中分布于润滑油细锥状气雾区域等特点,适用于电晕静电气雾微量润滑系统。

(3)油雾荷电实验表明:在单电晕电极施载 -10 kV 高压时,油雾可见明显的荷电现象,荷质比达 $-7 \times 10^{-2}\text{ C/kg}$;多电晕电极由于存在空间矢量电场干扰,油雾在 -15 kV 才开始荷电,且在相同的电压下,多电极下测得的油雾荷质比远小于单电极。因此采用针尖位于喷雾中心轴线上的单电晕电极荷电方式,能使油雾获得较好的荷电效果。

(下转第 279 页)

本文引用格式:

王 争,李中亚,万家傲,等.微量润滑喷嘴电晕电极的电场特性及其对油雾荷电性能的影响研究[J].机电工程,2016,33(3):253-258,279.

WANG Zheng, LI Zhong-ya, WANG Jia-ao, et al. Electric Field Characteristics of MQL Nozzles Corona Electrode and Effect on Lubricant Mist Charging Performance [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):253-259,279.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>