

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.009

静电喷雾润滑液滴的荷电特性和摩擦磨损性能

胡志强, 孔 魁, 姚伟强, 李中亚, 许雪峰

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

摘 要:采用十二烷基苯磺酸钠表面活性剂对 Accu-Lube LB-2000 基础油进行改性处理来提高其电导率, 获得了适用于静电喷雾润滑的润滑液。通过目标网状法检测改性润滑液的荷电性能, 利用四球摩擦磨损试验分析润滑液流量、时间和载荷对静电喷雾润滑摩擦磨损性能的影响。结果表明, 表面活性剂溶液体积含量为 5% 的润滑液具有较稳定的乳化状态, 且电导率可达到 6.5×10^{-5} S/m, 能满足静电喷雾润滑的荷电要求; 与普通喷雾润滑相比, 静电喷雾润滑在不同润滑液流量与载荷下均能获得更好的减摩抗磨性能, 尤其是在润滑液流量为 5 mL/h 和载荷为 147 N 下作用效果更显著。

关 键 词:静电喷雾; 电导率; 荷质比; 摩擦磨损

中图分类号: TG501

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2014)01-0036-06

Charged and Tribological Characteristics of Cutting Fluid Droplets for Electrostatic Spraying Lubrication

HU Zhiqiang, KONG Kui, YAO Weiqiang, LI Zhongya, XU Xuefeng

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The Accu-Lube LB-2000 base oil was modified by sodium dodecyl benzene sulfonate to obtain the lubricants suited for the electrostatic spraying lubrication, which had a higher conductivity. The charged performance of conductivity-modified lubricants was detected by the method of target meshing, based on which the effect of cutting fluids flow, time and load on the properties of the friction and wear were evaluated by using the four-ball friction wear testing experiment. The result showed that the lubricants had a stable emulsified state and met the charged requirements because its conductivity could reach 6.5×10^{-5} S/m when the concentration of surfactant was at 5%, the better tribological characteristics can be obtained by electrostatic spraying lubrication compared with the normal spraying lubrication at different flows and loads, especially getting more obvious at the flow of 5 mL/h and the load of 147 N.

Key words: electrostatic atomization; conductivity; charge-to-mass ratio; friction and wear

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 技术是指利用压缩空气将微量润滑剂雾化成微米级液滴, 喷向切削区, 对刀具与工件、切屑的接触界面进行润滑, 同时润滑剂液滴和压缩空气还起到冷却切削区的作用^[1]。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上的沉积量、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^[2-3]、荷电喷雾燃烧^[4-5]、静电涂油^[6-7]

等领域。结合静电喷雾和微量润滑技术提出的静电喷雾微量润滑技术, 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, 并可降低工作环境空气中的颗粒物浓度。静电喷雾微量润滑是一项新技术, 润滑液荷电雾化液滴的荷电特性和摩擦磨损性能是该技术的基础研究内容。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

材料: Accu-Lube LB-2000 中黏度纯天然基础油,

收稿日期: 2013-06-29; 修回日期: 2013-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51375454)

专利项目: 浙江工业大学, 切削液气雾微量润滑装置 (201320072042.7)

作者简介: 胡志强 (1987), 男, 湖北咸宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为静电喷雾润滑。E-mail: huzhiqiang1110@163.com

美国 ITW 集团生产。十二烷基苯磺酸钠化学纯(表面活性剂),上海英鹏化学试剂有限公司生产。

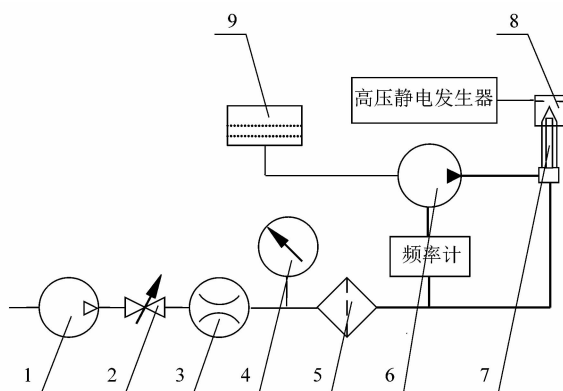
仪器:Accu-Lube 精密润滑喷油机,美国 ITW 集团生产。EST705 高精度高稳定静电发生器,最高输出电压 -60 kV 、电流 2 mA ,北京华晶汇科技有限公司生产。DDSJ-318 电导率仪,量程为 $0.000\text{ }\mu\text{S}/\text{cm} \sim 199.9\text{ mS}/\text{cm}$,上海仪电科学仪器股份有限公司生产。VW-600 动态分析三维显微系统,日本 KEYENCE 公司生产。MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机,济南试金集团生产。

1.2 润滑油改性

首先,取 10 g 表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和 90 g 水放入烧杯中,搅拌溶解,然后取不同体积比的表面活性剂溶液和 Accu-Lube LB-2000 基础油放入烧杯中,用溶液分散器进行分散,配制成含表面活性剂溶液体积分数为 1% 、 2% 、 3% 、 4% 、 5% 、 6% 、 7% 、 8% 、 9% 、 10% 、 20% 、 30% 的改性润滑液,用电导率仪测定各种配比的电导率。

1.3 荷电性能测试

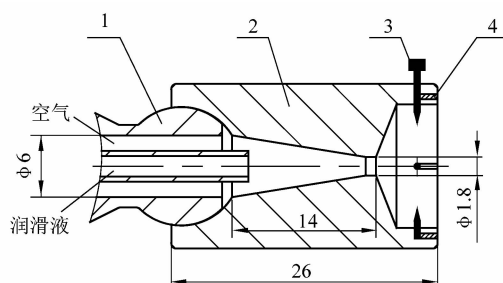
润滑液静电雾化发生系统如图 1 所示。在 Accu-Lube 精密喷油机喷嘴出口,设置了针状电极电晕发生装置,其结构示意图如图 2 所示。



1—空压机;2—调节阀;3—流量计;4—压力表;5—过滤器;
6—液泵;7—气液双相管;8—尖状电晕电极;9—储油罐

图 1 润滑液静电雾化发生系统
Figure 1 Electrostatic atomization system for lubricants

采用网状目标法测量润滑液滴的荷电量,图 3 是润滑液微量喷雾荷质比测量系统框图。从 Accu-Lube 精密喷油机喷嘴口喷出的气雾通过电晕电场后荷电,带电液滴进入金属外套接地屏蔽壳的雾滴接收筒,电压记录仪测得荷电液滴释放的电荷流经电阻时的电压。以润滑液流量、压缩空气气压和充电电压为变量



1—气液双相管;2—电晕喷嘴头;3—电晕针;4—连接环

图 2 喷嘴针状电极电晕发生装置示意图

Figure 2 Schematic of the set-up for needle electrode corona in the front of nozzle tip

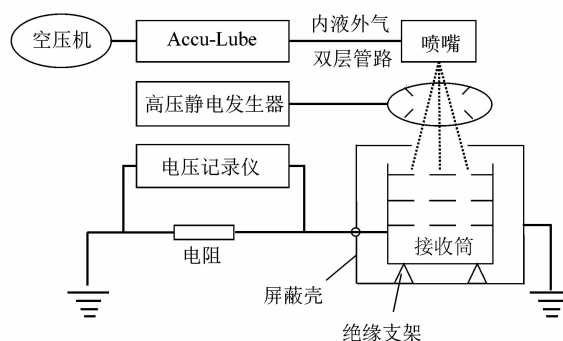


图 3 静电喷雾液滴荷质比测量系统框图

Figure 3 Diagram of the system for measuring charge-to-mass ratio of electrostatic spray droplets

进行交叉实验,根据荷质比优化静电喷雾主控参数。

1.4 摩擦磨损实验

将润滑液静电雾化发生系统安装于 MMW-1 型摩擦磨损试验机上,利用四球摩擦副进行静电喷雾润滑和普通喷雾润滑的摩擦磨损对比实验。按图 4 调整喷嘴与四球摩擦副的位置,靶距为 80 mm ,角度为 45° 。所用钢球为上海钢球厂生产的 II 级标准 GCr15 钢球,硬度为 HRC59 ~ 61,直径为 12.7 mm 。实验前,所有钢球和摩擦副都用清水洗净并用带丙酮棉花擦拭 2 次。试验条件为转速 $1\text{ }000\text{ r}/\text{min}$,室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$,气压 0.3 MPa ,电压 -30 kV 。当以流量为单因素变量时,试验时间为 5 min ,载荷采用 147 N ;当以载荷为单因素变量时,试验时间为 20 min ,润滑液流量采用 $10\text{ mL}/\text{h}$ 。摩擦系数由计算机通过测定摩擦力矩计算得到。用显微镜拍摄 3 个试球的磨损形貌,并测量出其磨斑直径,计算出平均值。

2 结果与讨论

2.1 润滑液的改性

液滴荷电大小与其荷电弛豫时间 τ 有关^[8],液滴

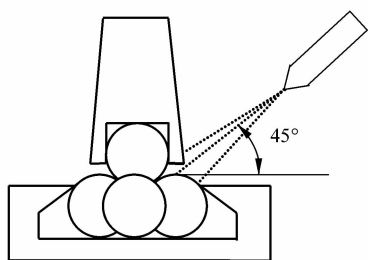


图4 喷嘴安装位置示意图

Figure 4 Schematic of nozzle installation position

通过电晕电场的时间小于弛豫时间 τ , 不易荷电。同时, 液滴电导率 γ 与荷电弛豫时间 τ 成反比, 增大液体电导率可缩短液滴的荷电弛豫时间。Accu-Lube LB-2000 基础油的电导率小于 10^{-8} S/m, 实验用电晕荷电装置无法使其荷电。可以用添加表面活性剂的方法提高液体的电导率^{[9]528}, 增加其荷电能力。

表1为十二烷基苯磺酸钠表面活性剂溶液添加体积分含量对LB-2000基础油电导率的影响。十二烷基苯磺酸钠为亲水性表面活性剂, 其亲水部分对油滴聚结的阻碍作用比水滴大, 使水的聚结速度大于油滴的聚结速度, 易形成导电性良好的O/W型乳状液。添加体积分数为1%~10%活性剂时, 改性基础油的电导率在 10^{-6} ~ 10^{-4} S/m之间, 基本符合液体带电的电导率要求^{[9]530}。活性剂添加体积分数大于10%后, 改性基础油的电导率显著增大, 同时乳化液的稳定性降低。这是由于十二烷基苯磺酸钠水溶液含量过多, 水滴易从改性基础油乳状液中渗出, 导致乳状液发生沉淀分离现象^[10]。综合考虑, 采用添加表面活性剂体积分数为5%的改性基础油, 作为实验用润滑液, 其电导率符合荷电要求, 溶液稳定性满足喷雾要求。

表1 不同溶液配比下润滑液的电导率

Table 1 Conductivity of the lubricants under different ratio of solution

表面活性剂溶液 体积分数/%	电导率/ ($S \cdot m^{-1}$)	表面活性剂溶液 体积分数/%	电导率/ ($S \cdot m^{-1}$)
1	7.7E-06	7	7.8E-05
2	1.6E-05	8	8.5E-05
3	1.9E-05	9	9.2E-05
4	2.4E-05	10	1.0E-04
5	6.5E-05	20	1.5E-01
6	7.0E-05	30	2.5E-01

2.2 润滑液荷电性能

图5表明, 在-10 kV和-15 kV电晕电压下的液滴荷电困难, 荷质比很小。在-20 kV时, 液滴荷质比为 -3.6×10^{-4} C/kg, 液滴开始荷上电, 说明此时空气

已经开始电离, 但起晕效果不明显。在-25 kV时, 液滴荷质比为 -8×10^{-2} C/kg, 液滴荷电效果明显提高。进一步提高电晕电压, 液滴的荷质比同步提高, 但保持在 10^{-1} C/kg数量级水平。

电晕电压高于-25 kV后, 液滴荷质比随气压增大而增大。由集肤效应可知, 电晕荷电时电荷主要分布在液滴表面。液滴粒径随气压的增大而减小, 导致液滴表面积增大, 更多的电荷吸附在液滴表面, 荷质比增大。

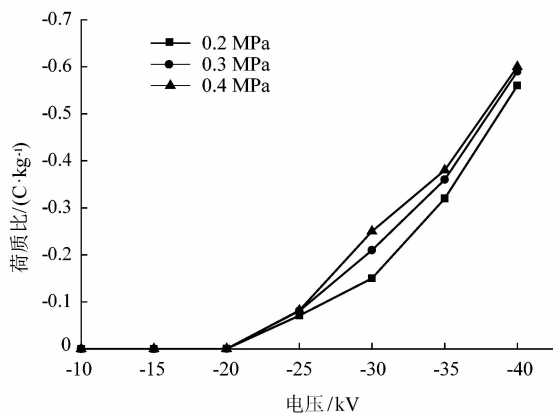


图5 10 mL/h时不同气压和电压下液滴的荷质比

Figure 5 Charge-to-mass ratio of the droplets under different air pressure and voltage at the flow of 10 mL/h

图6表明, 润滑液流量为5 mL/h时液滴的荷电能力强, 荷质比大。随着润滑液流量增大, 液滴荷电能力减弱, 荷质比依次减小。这是由于润滑液流量越小, 分散在电晕区域的雾滴体积分数越小, 单个液滴在电晕场中撞到电离电子的机会越大; 且在小流量下, 液滴雾化粒径较小, 液滴相对表面积较大, 总体液滴荷电性能增强。

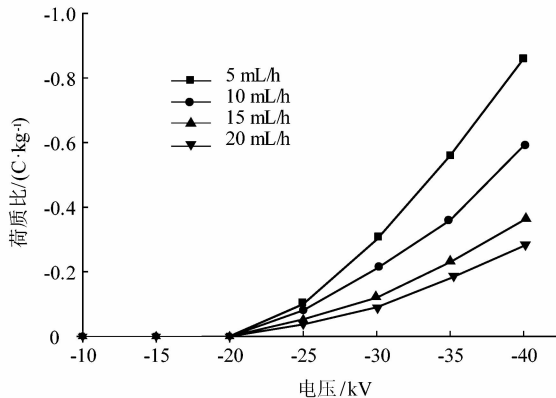
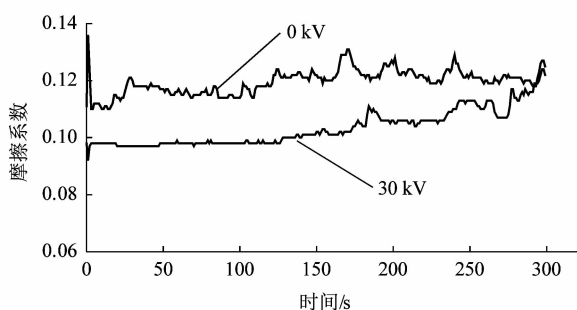


图6 0.3 MPa时不同流量和电压下液滴的荷质比

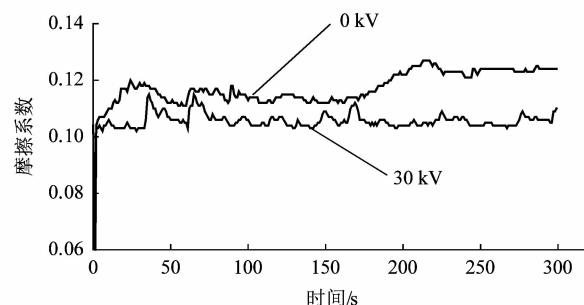
Figure 6 Charge-to-mass ratio of the droplets under different flows and voltage at the air pressure of 0.3 MPa

2.3 润滑液流量对摩擦性能的影响

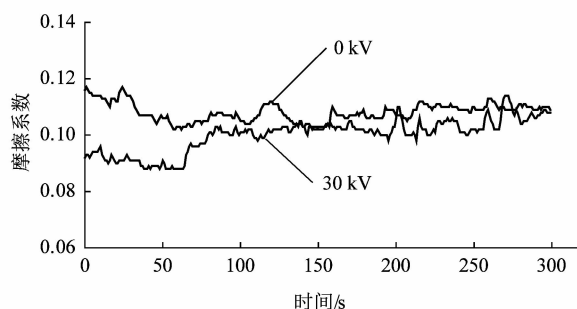
图7是载荷为147 N时不同流量下摩擦系数随时间变化的曲线。静电喷雾润滑条件下的摩擦系数都要比普通喷雾润滑条件下的小,说明静电喷雾有更好的润滑效果。主要有3个方面的原因:①液滴带电后表面张力减小,在快速运动过程中容易发生二次雾化,从而能得到更小更均匀的液滴,增大了与摩擦区域粘附的机率。②带电后的液滴具有环抱效应,能够更有效地吸附在喷射区域内的物体上。③静电改变了液滴与固体和气体之间的界面能,使得带静电的液滴有更好的润湿性,从而更有利于液滴渗透到摩擦区域。



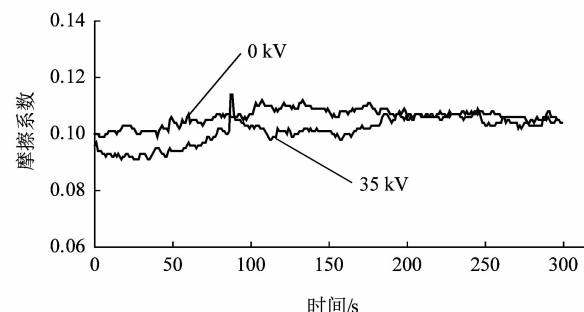
(a) 流量为5 mL/h下的四球摩擦系数



(b) 流量为10 mL/h下的四球摩擦系数



(c) 流量为15 mL/h下的四球摩擦系数



(d) 流量为20 mL/h下的四球摩擦系数

图7 不同润滑液流量下两种喷雾方式的四球摩擦系数

Figure 7 Four-ball friction coefficient for two types of spray under different flows

2.4 载荷对摩擦磨损性能的影响

图8为载荷对摩擦系数的影响,不同载荷下静电喷雾润滑的摩擦系数均比普通喷雾润滑的小。在98 N、147 N和196 N载荷下,静电喷雾比普通喷雾的摩擦系数明显要小,说明在低载荷下,带电液滴对金属表面有较好的吸附性,而更有利于润滑膜的形成。在247 N载荷下,两者摩擦系数较接近,静电对液滴润滑膜形成的促进作用受到减弱,说明静电喷雾主要增强了液滴对金属的物理吸附作用。至于196 N时,摩擦系数都高于其它载荷,可能是引起了摩擦区接触点数量的增加,致使摩擦系数有突增现象^[11]。

图9表明,在不同载荷下,静电喷雾润滑的磨斑直

径都比普通喷雾润滑小,尤其在147 N时,抗磨优势最明显。图10表明,在同等载荷下,与普通喷雾润滑相比,静电喷雾润滑的犁沟较浅且细小均匀,磨痕表面较光整。摩擦表面的真实接触面积会随着载荷的增加而有所增加,那么接触表面的间隙就会随着载荷的增加而减小,从而导致润滑液较难渗入接触区域。图10中98 N载荷下,静电喷雾与非静电喷雾的磨损形貌相差较小,说明两种情况下的液滴都能较容易渗入摩擦区域。在147 N载荷下,静电喷雾比普通喷雾润滑明显获得了更小的磨斑直径和更好的磨损形貌,此时静电喷雾的带电液滴表现出了更为优越的渗透性。载荷大于196 N后,两种润滑条件下的钢球磨损程度逐渐接

从图7得知,随着喷雾流量的增大,两种润滑条件下的摩擦系数曲线会逐渐接近,说明在小流量情况下,静电对喷雾润滑的增强作用较明显。这是由于此时液滴的荷质比较大,液滴的吸附性和渗透性较强,润滑效果作用比较明显。

径都比普通喷雾润滑小,尤其在147 N时,抗磨优势最明显。图10表明,在同等载荷下,与普通喷雾润滑相比,静电喷雾润滑的犁沟较浅且细小均匀,磨痕表面较光整。摩擦表面的真实接触面积会随着载荷的增加而有所增加,那么接触表面的间隙就会随着载荷的增加而减小,从而导致润滑液较难渗入接触区域。图10中98 N载荷下,静电喷雾与非静电喷雾的磨损形貌相差较小,说明两种情况下的液滴都能较容易渗入摩擦区域。在147 N载荷下,静电喷雾比普通喷雾润滑明显获得了更小的磨斑直径和更好的磨损形貌,此时静电喷雾的带电液滴表现出了更为优越的渗透性。载荷大于196 N后,两种润滑条件下的钢球磨损程度逐渐接

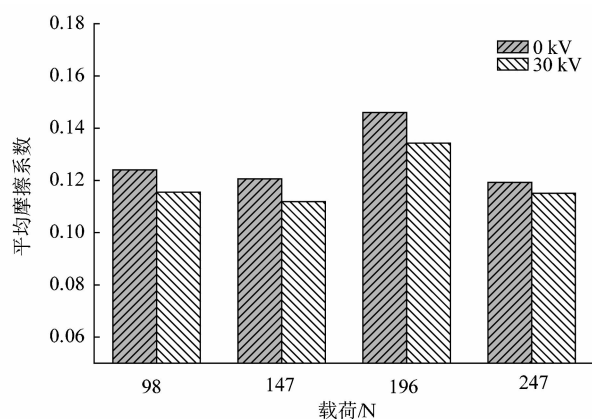


图 8 载荷对平均摩擦系数的影响

Figure 8 Effect of load on average coefficient friction

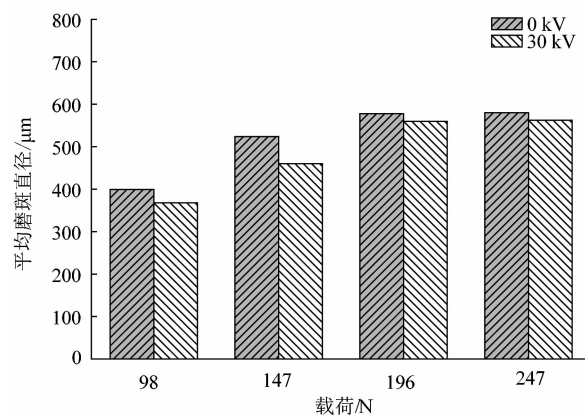


图 9 载荷对钢球平均磨斑直径的影响

Figure 9 Effect of load on average wear scar diameter of steel ball

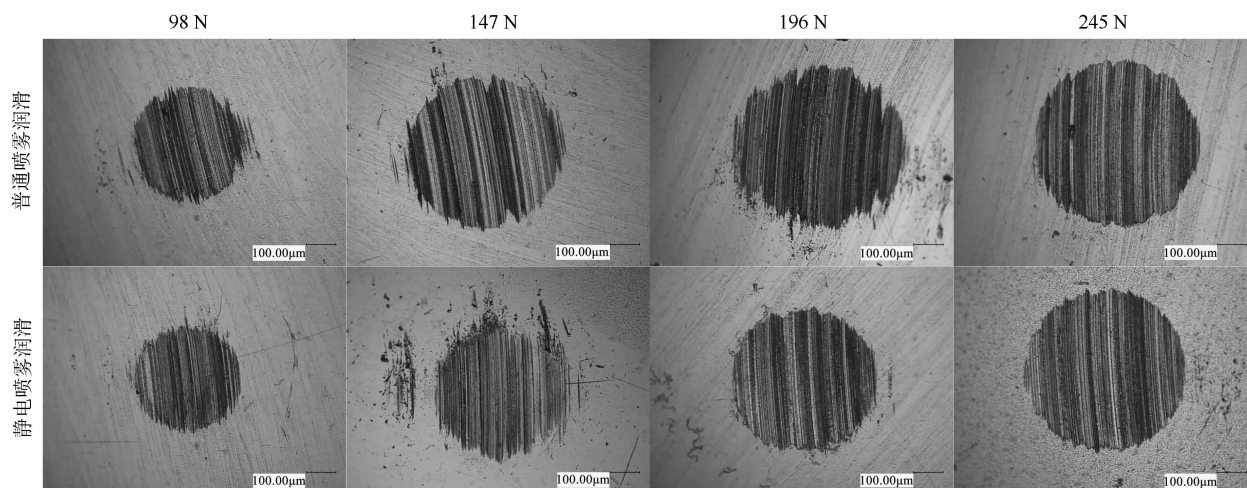


图 10 不同载荷下的钢球磨斑形貌

Figure 10 Worn surfaces of tested steel balls under different loads

近,这是由于摩擦区域接触点数目开始增加,接触间隙显著减小,润滑油很难渗入,润滑油带电后的相对润滑效果在一定程度上也有所削弱。

3 结语

1) LB-2000 基础油的电导率小于 10^{-8} S/m, 添加了体积分数为 5% 的表面活性剂溶液后, 形成了较稳定的 O/W 型乳状液, 电导率增大为 6.5×10^{-5} S/m, 满足荷电要求。

2) 静电喷雾中液滴在 -20 kV 时开始出现荷电迹象, 在 -25 ~ -40 kV 之间能达到良好的荷电效果并随电压上升效果越好。同一电压下, 荷质比随着喷雾流量的增大而减小。

3) 润滑油流量较小时, 静电对喷雾润滑的减摩性能增强作用较明显; 润滑油流量较大时, 摩擦表面所需

润滑油逐渐趋于饱和, 静电的增强作用难以体现。静电能增强润滑油滴的吸附性能和渗透性能, 从而提高润滑油的使用效率, 使得 10 mL/h 流量下的静电喷雾润滑可以达到 20 mL/h 流量下普通喷雾润滑的减摩性能。

4) 与普通喷雾润滑相比, 静电喷雾润滑条件下, 钢球磨损量减小, 磨损形貌较光整, 并随载荷增加, 其相对减摩抗磨性能先变强后减弱。

参考文献:

- [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] 贾卫东. 农用高压静电喷雾场的实验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 66 - 70.
- [3] 陆军. 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.
- [4] 闻建龙. 柴油高压静电雾化燃烧的研究[J]. 内燃机学报,2003,21(1):31-34.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王家青. 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.
- [8] 葛自良,毛骏健,陆汝杰. 液体静电雾化现象及其应用[J]. 自然杂志,2000,22(1):37-40.
- [9] SMITH D P H. The electrohydrodynamic atomization of liquids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1986, IA-22(3):527-535.
- [10] 王世荣,李祥高,刘东志,等. 表面活性剂化学[M]. 北京:化学工业出版社,2007:33-34.
- [11] 黄平,孟永钢,徐华. 摩擦学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2008:71-72.

(上接第31页)

系数减小,呈现良好的趋势。之后,随着安装距离的增大,最大压力系数反而增大了约90 Pa。

文章仅对影响弯管防腐性能的单因素进行规律性研究,可对以后进一步的优化研究提供有利参考。

参考文献:

- [1] 董家梅,孙绪新. 缓蚀剂防腐及其在石油机械中的应用[J]. 石油机械,2000,28(5):18-21.
- [2] 毕法森,孙本达,李德勇. 采用给水加氧处理抑制流动加速腐蚀[J]. 热力发电,2005,34(2):52-53.
- [3] 朱晓磊,陆晓峰,凌祥. 三种压力管道金属材料的流动加速腐蚀性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2012,24(1):57-60.
- [4] 石继红,武保林,刘刚. 316L 不锈钢表面纳米化后腐蚀性能研究[J]. 材料工程,2005(10):42-46.
- [5] 魏英华,张立新,柯伟. 有机防腐涂层在流动条件下的加速失效行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2006,26(1):43-47.
- [6] RICHARD G, VIVEK S, CHENG D Y. A new tailpipe design for GE

frame-type gas turbines to substantially lower pressure losses [J]. Journal of Turbomachinery, 2003,125(1):128-132.

- [7] VOISIN A, TOWNSEND R D. Model testing of submerged vanes in strongly curved narrow channel bends [J]. Canadian Journal Civil Engineering, 2002,29(1):37-49.
- [8] 冯民权,范术芳,郑邦民,等. 导流板的布置方式及其导流效果[J]. 武汉大学学报:工学版,2009,42(1):87-95.
- [9] 谢振华,周艳荣. 90°方截面弯管内加装导流板的优化研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(4):566-572.
- [10] 张新育,沈珞婵,樊建人. 方截面弯管加导流板时湍流二次流数值模拟[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1996,30(4):440-445.
- [11] 贾兴豪,彭向和,龙血松. 导流板改善弯管流场的数值模拟与优化[J]. 西南大学学报,2011,33(3):139-143.
- [12] 高万夫,郑雁军,崔立山. 管道弯头磨损特性的研究[J]. 石油化工高等学校学报,2003,16(4):56-60.
- [13] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence:1 basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986,1(1):39-51.

(上接第35页)

参考文献:

- [1] 孙东升. 填料塔分离技术新进展[J]. 化工进展,2002,21(10):769-772.
- [2] FOURATI M, ROIG V, RAYNAL L. Experimental study of liquid spreading in structured packings[J]. Chemical Engineering Science, 2012,80:1-15.
- [3] 王树檀. 现代填料塔技术指南[M]. 北京:中国石化出版社,1998.
- [4] ZHAO L, CERRO R L. Experimental characterization of viscous film flow over complex surfaces [J]. International Journal of Multiphase Flow,1992,4(18):495-516.
- [5] HATTORI K, ISHIKAWA M, MORI Y H. Stings of liquid beads for gas-liquid contact operations [J]. AIChE Journal, 1994,40:1983-1992.
- [6] NUSSELT W. Die oberflächensanation des wasser-dampfes [J]. Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure,1916,60(4):569-

575.

- [7] RAYLEIGH L. On the stability of jets [J]. Proceedings of London Mathematical Society,1878(1/10):4-13.
- [8] GRUNIG J, SKALR T. Liquid flow on a vertical wire in a countercurrent gas flow [J]. Chemical Engineering Journal, 2010,164:121-131.
- [9] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of Computation Physics, 1992,100(2):335-354.
- [10] 王瑞金. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [11] 李相鹏,陈冰冰,高增梁. 规整填料表面液膜流动特性的数值模拟[J]. 化工学报,2013,64(6):1925-1933.
- [12] 黄庆,卜建杰. 液态锂在金属丝网上毛细作用 [J]. 舰船科学技术,2007,29(6):124-130.