

# 微量离子液体润滑下铝自配副 的载流摩擦学性能

杨贵荣<sup>1</sup>, 阳雪衡<sup>1,2</sup>, 吕晋军<sup>2,3\*</sup>, 姚瑞清<sup>3</sup>, 孟军虎<sup>2</sup>, 宋波涛<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 西北大学 化学与材料科学学院, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 本文中考察了铝自配副在干摩擦和微量离子液体润滑条件下的载流摩擦学性能. 在干摩擦条件下, 铝自配副因黏着极易发生卡咬. 而微量的离子液体 L-P106 就可有效润滑铝自配副, 摩擦系数可低至 0.1 左右. 无论载流与否, 润滑状态均为边界润滑. 与无载流条件相比, 载流时铝自配副的摩擦系数稍有增大, 且在高速 (0.79 m/s 及以上) 磨损由中等程度的磨损转化为严重磨损. 电流会导致电侵蚀磨损, 从而使磨损加剧.

**关键词:** 离子液体; 铝; 自配副; 载流; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2014)06-0689-08

## Tribological Behavior of Self – Mated Al Lubricated by Minimal Quantity Ionic Liquid under Electrical Contact

YANG Gui – rong<sup>1</sup>, YANG Xue – heng<sup>1,2</sup>, LU Jin – jun<sup>2,3\*</sup>, YAO Rui – qing<sup>3</sup>,  
MENG Jun – hu<sup>2</sup>, SONG Bo – tao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non – ferrous Metal Materials,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication,  
Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3. College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi’an 710069, China)

**Abstract:** The tribological behaviors of self – mated Al under electrical contact in both dry sliding and ionic liquid lubricated conditions were investigated. In dry sliding, seizure of self – mated Al was observed due to strong adhesion. By using minimal quantity ionic liquid L – P106 in the sliding contact, the friction coefficient of self – mated Al was as low as 0.1. Results indicate that the lubricating regime is boundary lubrication with or without current. The friction coefficient of self – mated Al under current – carrying was higher than that without current. The transition from moderate wear to severe wear at higher speeds (>0.79 m/s) was observed. Erosive wear induced by current aggravated the wear of self – mated Al.

**Key words:** ionic liquid, aluminum, self – mated, carrying current, friction and wear

载流条件下摩擦学的主要任务是研制高性能润滑材料以及发展可靠的润滑技术, 而摩擦学性能和

电学性能是其考核指标. 贵金属基自润滑复合材料可在大气和真空载流条件下正常使用, 而导电性能

Received 20 January 2014, revised 17 March 2014, accepted 9 April 2014, available online 28 November 2014.

\* Corresponding author. E – mail: jjlu@licp.cas.cn, Tel: +86 – 931 – 4968196.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51205178) and the opening project foundation of State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL – 1301).

国家自然科学基金(51205178)和固体润滑国家重点实验室开放基金(LSL – 1301)资助.

优异而且价格相对低廉很多的铜和铝却因摩擦学问题而无法应用.从摩擦学原理的角度看,铜自配副和铝自配副在真空甚至大气中均因摩擦界面不同程度的黏着而发生卡咬.我们能否用一类兼备润滑性和导电性的介质来解决这一问题呢?离子液体正是这样的介质.

离子液体是指在室温或室温附近呈液态的、完全由正负离子构成的熔盐体系,一般是由特定的、体积相对较大的有机阳离子和体积相对较小的无机或有机阴离子通过库仑力结合构成<sup>[1]</sup>.其液态性质和离子存在形式使其展现出独特的理化性质及特有的功能,是一类很有前途的新型介质或“软”功能材料<sup>[2]</sup>.离子液所具有极低的挥发性、低熔点、不可燃、优良的热氧化安定性和无污染等优点<sup>[3]</sup>,使其有望成为一种理想润滑剂.叶承峰等<sup>[4-5]</sup>合成了烷基咪唑四氟硼酸盐和六氟磷酸盐离子液并考察了其作为润滑剂的摩擦学性能,发现其对钢/钢、钢/铝、钢/铜、钢/陶瓷等摩擦副均具有良好的润滑作用,减摩抗磨性能优于磷嗪 x-1P 和全氟聚醚(PFPE),是一种极具发展前途的多功能润滑剂.离子液体又以其良好的导电性、宽的电化学窗口、低的蒸汽压等优点被广泛的应用于化学合成、分离和电化学.其离子导电性是其电化学应用的基础<sup>[6]</sup>,离子液体的室温离子电导率一般在  $10^{-3}$  S/cm 左右,其大小与离子液体的黏度、分子量、密度以及离子大小有关.

基于离子液具有的润滑性和导电性,我们考察了铜自配副在离子液体润滑下的载流摩擦学性能,获得了较好的结果.本文作者拟考察铝自配副在离子液体润滑下的载流摩擦学性能,以期对材料在电滑动领域的工程应用提供实验依据.

## 1 实验部分

### 1.1 试验材料

铝为市售商品工业纯铝,牌号:1060;其化学组成为:Al $\geq$ 99.6%、Fe $\leq$ 0.35%、Si $\leq$ 0.25%、Cu $\leq$ 0.05%、Zn $\leq$ 0.05%、Mg $\leq$ 0.03%、Mn $\leq$ 0.03%、Ti $\leq$ 0.03%、V $\leq$ 0.03%.离子液体选用 1-甲基-3-己基咪唑六氟磷酸盐离子液,简称 L-P106,由兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室根据文献<sup>[7]</sup>方法合成.其结构式如图 1 所示,性能如表 1 所列.

### 1.2 试验方法

在自行研制的 EMM-1 载流摩擦磨损试验机(图 2)上评价其摩擦学性能.采用双栓-盘接触方

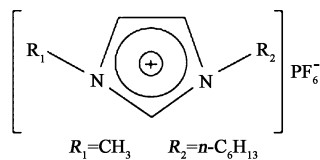


Fig. 1 Molecular structure of L-P106

图 1 离子液体 L-P106 的分子结构

表 1 L-P106 的理化性能

Table 1 Physical property of L-P106

Kinetic viscosity/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		Viscosity index	Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Pour point/ $^{\circ}\text{C}$
40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$			
162.6	15.3	94	1 292.8	< -50

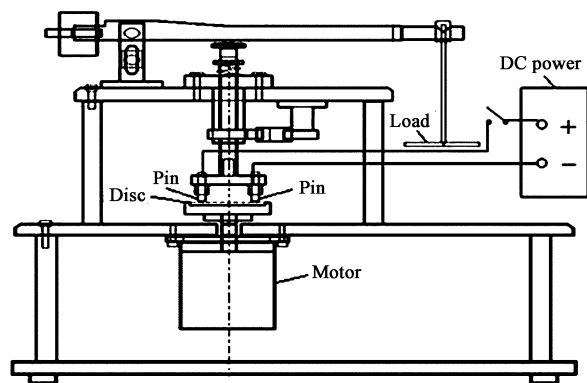


Fig. 2 Schematic of EMM-1 tribo-meter

图 2 EMM-1 载流摩擦磨损试验机示意图

式,栓、盘均由工业纯铝经加工制得.其中,栓尺寸为  $5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,栓的一端为  $5 \text{ mm}$  的半球,该半球面与盘面摩擦;盘的尺寸为  $50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,表面粗糙度  $R_a$  为  $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ .试验前铝栓、铝盘均用无水乙醇超声清洗  $15 \text{ min}$  以除去表面污染物,而后干燥,备用.用恒流直流电源(型号 JBP-150,  $0 \sim 5 \text{ A}$  可调)控制电流,直流电压加在两个试验栓上,直流电从两栓中一栓进入,经过与盘接触区,由另一栓-盘接触区流出.在离子液体 L-P106 润滑的实验中,用微量进样器各吸取  $15 \mu\text{L}$  的 L-P106 滴于每一栓-盘接触处.非载流摩擦试验条件为滑动速率  $0.110 \sim 0.903 \text{ m/s}$ ,载荷  $14.7 \text{ N}$ ,时间  $30 \text{ min}$ ;载流摩擦试验的电流为  $2 \text{ A}$ ,其他条件与非载流试验相同.摩擦系数由力矩传感器测定的摩擦矩换算的摩擦力除以法向载荷而得.栓的磨损率由读数显微镜测得的磨斑直径经计算获得,并以正、负极两个栓的平均磨损率作为栓的磨损率.采用 ADE Phase Shift 公司生产的 MicroXAM 型三维表面轮廓仪测定 Al 盘的粗糙度和磨损体积,进而计算盘的磨损率;

利用附带能量色散谱仪(EDS)的JSM-5600LV型扫描电镜(SEM)观察试样磨损表面形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Al自配副在干摩擦和离子液体润滑下的摩擦学性能

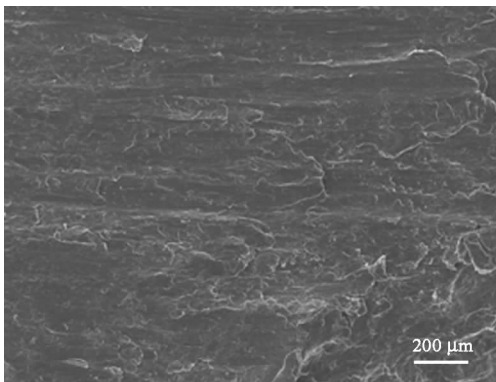
表2示出了Al自配副在干摩擦和离子液体润滑下的摩擦学性能。在干摩擦条件下,无论载流与否,低速下均极易在短时间内发生卡咬,即使在速度较高时不卡咬,但摩擦系数高达0.8,磨损也特别严重(栓的

体积磨损率达到了 $8.38 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,盘的体积磨损率高达 $2.35 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。这主要是因为摩擦界面发生了严重的黏着,如图3(a)所示。并且在载流的情况下,由于严重的磨损造成栓与盘之间有时接触不良,会出现电弧放电现象,电弧的侵蚀则加重磨损。在离子液体润滑下,Al自配副的摩擦系数明显降低(0.1左右),同时在不载流条件下,未见黏着发生,磨损表面较光滑,仅见轻微的塑性变形,如图3(b)所示,由此可见,离子液能有效阻止Al自配副黏着的发生。但载流条件下的摩擦系数略

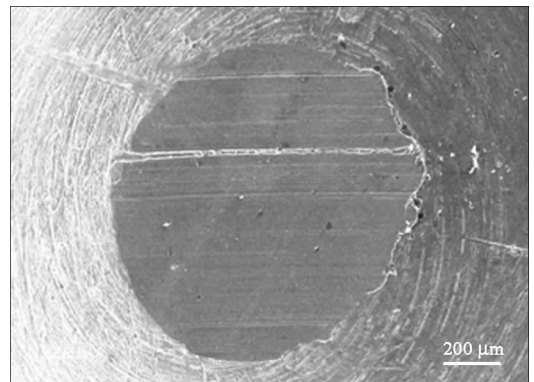
表2 Al自配副在干摩擦和离子液体L-P106润滑下的摩擦学性能

Table 2 Tribological property of self-mated Al under dry sliding and using L-P106 as lubricant

Lubrication regime and electrical current	Friction coefficient		
	$v = 0.11 \text{ m/s}$	$v = 0.34 \text{ m/s}$	$v = 0.68 \text{ m/s}$
Dry sliding and 0 A	Seizure after 11 s	Seizure after 45 s	0.813
Dry sliding and 2 A	Seizure after 23 s	Seizure after 30 s	Seizure after 86 s
Lubricated by L-P106 and 0 A	0.100	0.088	0.110
Lubricated by L-P106 and 2 A	0.103	0.096	0.110



(a) Dry sliding, 0.34 m/s, 0 A



(b) Lubricated by L-P106, 0.34 m/s, 0 A

Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of Al pins under dry sliding and lubrication

图3 干摩擦与离子液体润滑条件下Al栓磨损表面的SEM照片

高于非载流条件下的摩擦系数。

### 2.2 速度及电流对摩擦磨损性能的影响

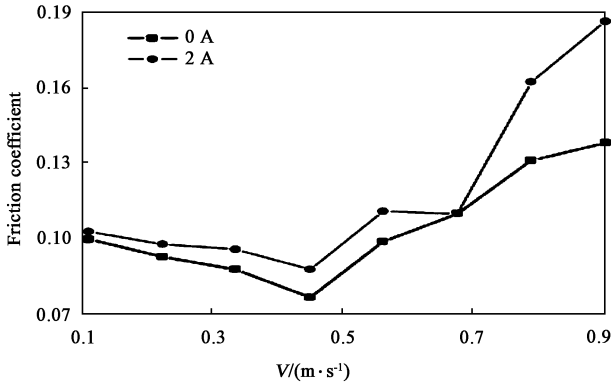
图4(a)示出了微量离子液体润滑下铝自配副的平均摩擦系数-滑动速率图,从图中可以看出,无论是否载流,摩擦系数都随速度的增大先降低后升高,且均在速度为 $0.45 \text{ m/s}$ 时得到最低的摩擦系数(0.08左右)。并且速度相同时,载流下的摩擦系数略高于非载流下的摩擦系数。图4(b)所示为其栓的磨损率随速度的变化,同样可以得出,磨损率随速度的增大先减小后增大,并在速度为 $0.45 \text{ m/s}$ 时磨损率最低,载流时为 $4.8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,非载流时为 $2.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。此外,载流下的磨损

率高于非载流下的磨损率。这与摩擦系数随滑动速率的变化趋势完全相符合,表现出高的摩擦系数对应大的磨损率,低的摩擦系数对应小的磨损率。由摩擦系数和磨损率所处的范围及其所具有的的变化趋势可见,在非载流条件下,铝自配副处于边界润滑状态,磨损较大,离子液体因磨屑的产生而呈现黑色。在载流条件下,铝自配副同样处于边界润滑状态,但在较高速率(高于 $0.79 \text{ m/s}$ )的摩擦系数会因磨损产生的大量磨屑积累在栓旁边而突变大(1.0左右),并出现严重磨损导致离子液体润滑失效而终止试验,这是非载流条件下所没有的。

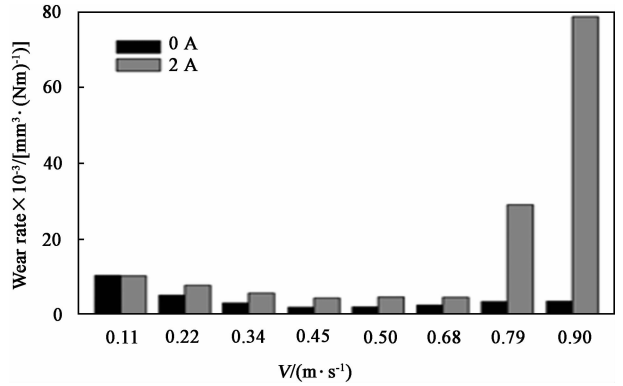
为了进一步研究离子液体润滑下铝自配副在载流

与非载流条件下的摩擦磨损机理,分别对试验后的铝盘磨痕表面进行了三维轮廓观察以及铝栓磨斑表面的电镜扫描,结果如图5和图6所示.从图5中可以看出,在非载流条件下,当速度较低时,盘的摩擦表面仅有窄且浅的犁沟,说明仅受到了轻微的犁沟作用,其对偶栓磨斑[图6(a)]表面十分光滑,无明

显犁沟,仅有少量较浅的轻微划痕;而速度较高时,Al盘的摩擦轨迹呈现较深的沟槽状,犁沟作用较明显,磨损增加,对应的栓[图6(b)]能看到明显的犁沟,但未出现明显的黏着磨损,磨斑的形成主要为接触面微凸体间以及在摩擦过程中所产生的磨屑对摩擦表面的犁削作用所致.在载流下,速度较低时,盘



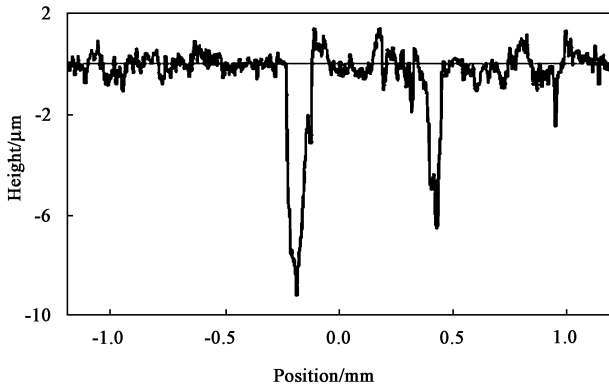
(a) Friction coefficients as a function of sliding speed with and without electric current



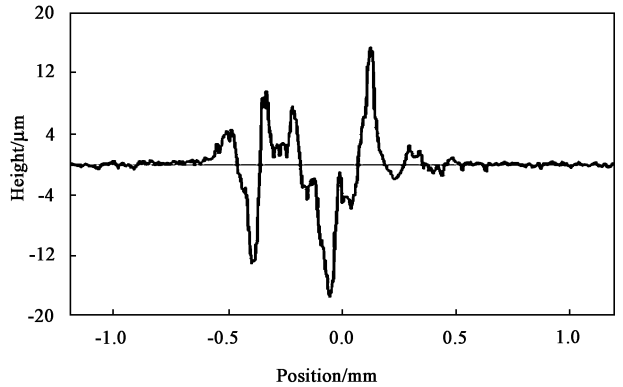
(b) Wear rates of pins as a function of sliding speed with and without electric current

Fig. 4 Effect of speed on the friction and wear properties with and without electric current under lubrication of L - P106

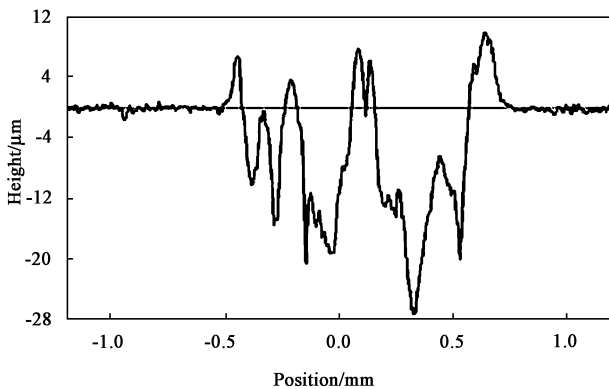
图4 有无载流条件下速度对离子液体 L - P106 润滑下摩擦磨损性能的影响



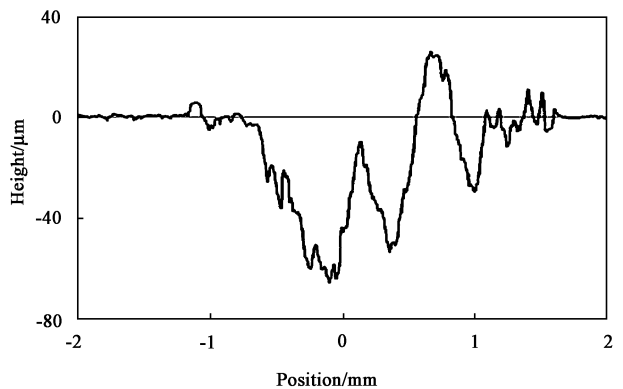
(a) 0.45 m/s, 0 A



(b) 0.79 m/s, 0 A



(c) 0.45 m/s, 2 A



(d) 0.79 m/s, 2 A

Fig. 5 The worn surfaces configuration of disks with lubrication of L - P106

图5 载流与非载流条件下铝盘磨痕的轮廓照片

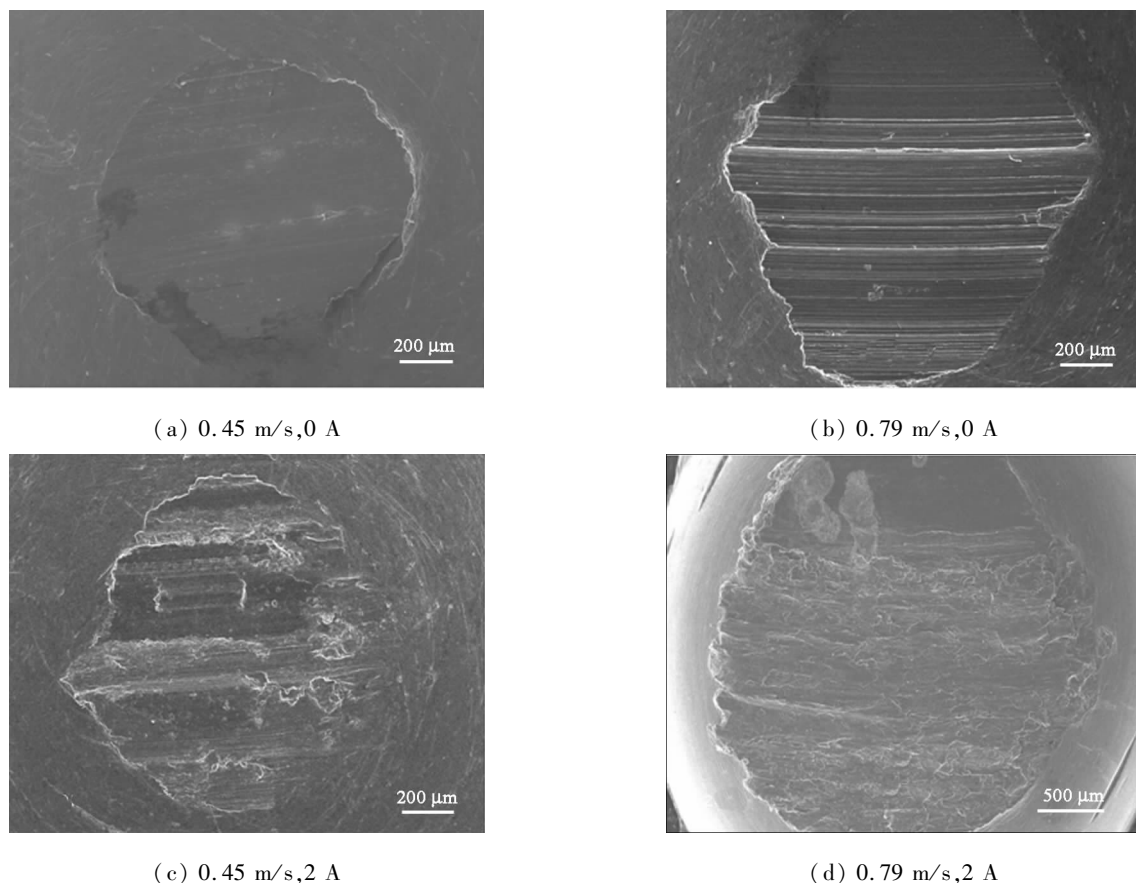


Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces of corresponding pins with lubrication of L-P106

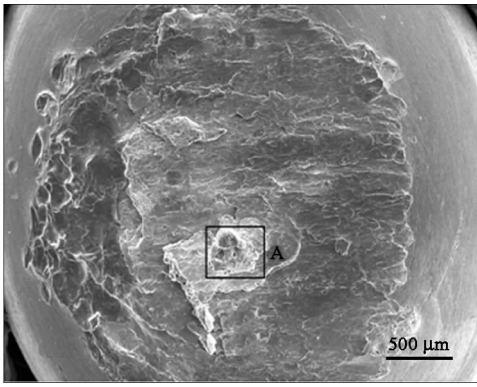
图6 载流与非载流条件下铝盘对应对偶栓磨损表面的SEM照片

的摩擦面磨损宽度超过了1 mm,最大深度接近28  $\mu\text{m}$ ,磨损较非载流下明显严重,与其对偶栓磨斑[图6(c)]相当粗糙,除了能观察到犁沟和塑性变形外,还有明显的黏着现象;当速度较高时,盘的磨损痕宽度和深度进一步加大,磨损进一步加剧,相应对偶栓[图6(d)]磨损面明显增大很多,流变层显著,呈现严重的塑性变形及黏着磨损痕迹.另外应该指出,在此条件下由于严重的磨损造成试验过程栓盘接触不良,会出现电火花,电弧侵蚀接触面.因而,可以得出,非载流条件下,磨损机理主要是轻微磨粒磨损;而载流条件下,磨损机理是黏着磨损,并会伴有电弧侵蚀磨损.这是因为在有电流作用时,摩擦表面产生的热量除了摩擦热外,还存在材料接触电阻热以及电弧放电产生的高热<sup>[8]</sup>,导致磨损表面温度升高,使材料部分软化,造成材料的微晶之间的联结变弱<sup>[9]</sup>,再加上铝本身就较软、熔点低,更易发生黏着磨损.所以,其他试验条件相同时,Al自配副在载流下的摩擦系数和磨损率均较高.

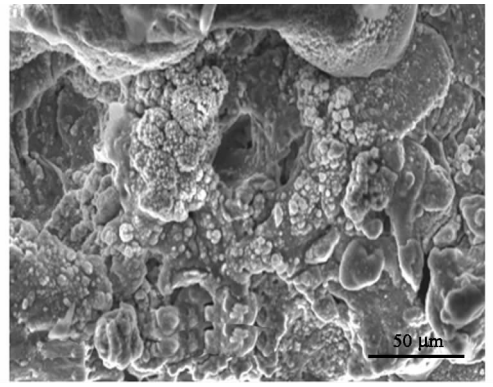
### 2.3 载流条件下的电弧侵蚀

如前所述,在载流条件下( $I=2\text{ A}$ ),无论是干摩

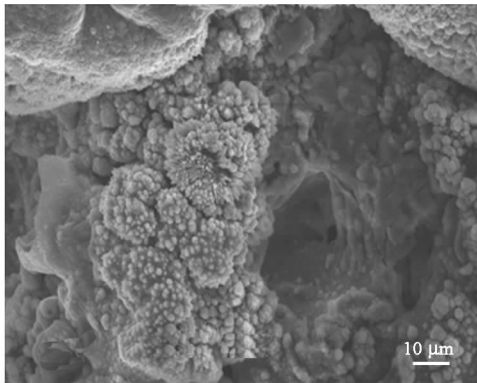
擦或是离子液润滑,当磨损严重造成摩擦副接触不良时,Al自配副均会出现电弧放电.这是因为当接触面接触良好时,两电极间的电压相等,而当摩擦磨损或是机械震动引起接触不良时,两电极发生分离瞬间,会致使两电极之间的电压迅速升高,从而击穿介质产生电火花,导致对材料的电弧侵蚀<sup>[10]</sup>.而电弧的烧蚀不仅会对材料造成损伤<sup>[11]</sup>,还会降低电极对电流的传输性能,严重影响整个电路系统的工作可靠性、稳定性及使用寿命<sup>[12]</sup>.研究表明:当对摩副之间的接触点瞬间脱离接触时会产生电弧,电弧的温度高达3 500~4 000 K<sup>[13]</sup>,使材料表面和亚表面的温度急剧升高,导致摩擦表面的材料软化甚至瞬间熔化蒸发,发生材料接触点熔焊、消耗和金属转移等现象<sup>[14]</sup>.如图7(a)和图7(e)分别为在干摩擦和离子液润滑时出现了电弧放电的栓磨损面的电镜照片,图中A、B分别为其烧蚀区,从宏观肉眼来看,烧蚀处均被烧蚀成黑色.从图7(b~c)可以看出:干摩擦下铝栓烧蚀处的形貌呈现许多近球状金属小颗粒(粒径1  $\mu\text{m}$ 左右)或是“针片状”的团聚在一起,形成了犹如“花絮”的结构,原因可能是铝的熔点较



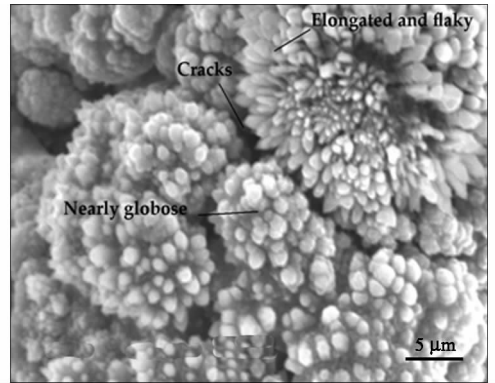
(a) Dry sliding, 2 A, 0.68 m/s



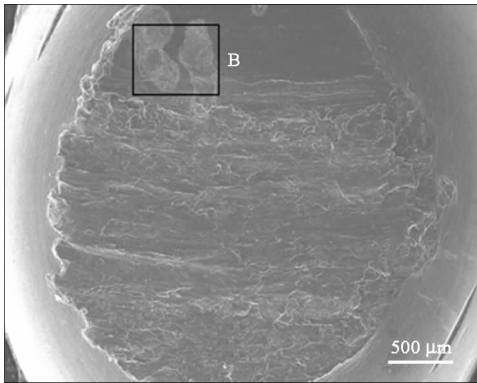
(b) Magnification of A area in Fig. 6(a)



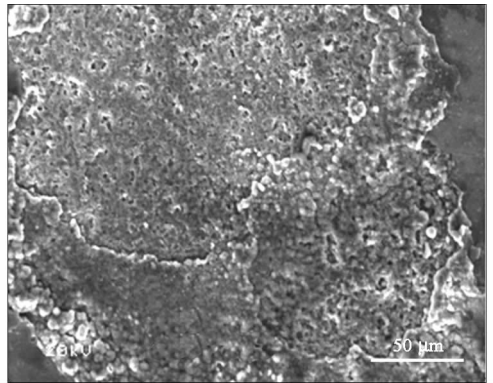
(c) Magnification of an area in Fig. 6(b)



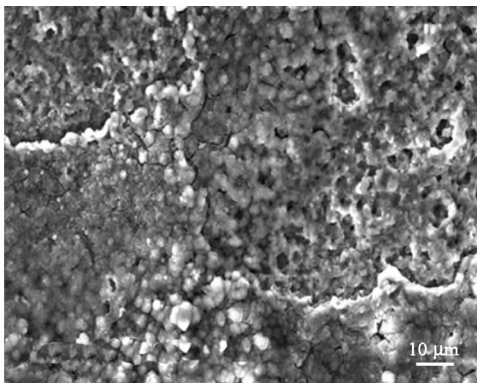
(d) Magnification of an area in Fig. 6(c)



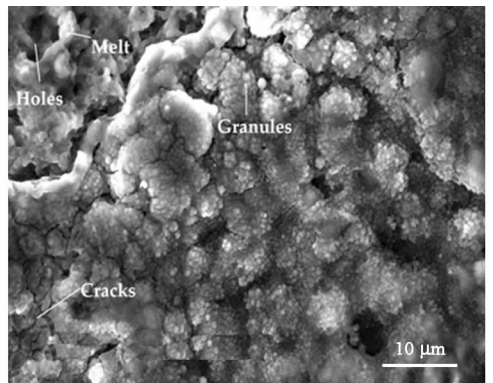
(e) Lubricated by L-P106, 2 A, 0.79 m/s



(f) Magnification of B area in Fig. 6(e)



(g) Magnification of an area in Fig. 6(f)



(h) Magnification of an area in Fig. 6(g)

Fig. 7 SEM micrographs of worn surfaces of pins with electrical erosion

图7 伴有电弧烧蚀的栓磨损表面的SEM照片

低,在电弧作用下熔化,但又迅速冷却凝固形成这种熔融的小颗粒,因各部分凝固速度不一样,会出现针片状,并存在裂纹;由图7(f~h)可见,离子液润滑下,烧蚀区布满了较多“蜂窝状”的烧蚀孔洞,孔洞周围有金属熔融物,也能看见一些金属小颗粒,而且出现了较多的裂纹,有的裂纹甚至相互贯通连接。这些形貌特征都是电弧烧蚀的典型形貌<sup>[15-16]</sup>,是因电弧放电产生的高热造成金属熔化后很快冷却凝固所致。邵文柱等<sup>[17]</sup>认为孔洞的形成是在电弧作用下,熔融的金属会吸收大量的气体,而快速冷却时,气体又迅速排出,因而在快速凝固表面形成气孔孔洞。而裂纹的形成则是电弧的热应力及电弧冲击力所产生的破坏应力大于材料的临界应力时,将开裂释放能量,并且裂纹容易沿着结合力较弱的相界、晶界扩展。李志鑫<sup>[10]</sup>研究了纯铝作为滑动电极,纯铜作为固定电极时的电极烧蚀行为,对纯铝烧蚀层表面进行了元素分析,主要是Al、O和部分Cu。由于本试验中采用的是Al自配副,因而在干摩擦下,电弧烧蚀后,烧蚀的产物主要是铝的氧化物。至于在离子液润滑下,烧蚀后的成分有待于在后续的试验中进一步进行研究。值得提出的是,在离子液L-P106润滑且载流条件的试验过程中,当速度低于0.7 m/s时,均没出现电弧放电现象,这很可能归功于离子液L-P106的加入有效地抑制了电弧放电。

### 3 结论

a. 铝自配副在干摩擦条件下因摩擦界面强烈黏着而极易发生卡咬,难以实现自润滑,而微量离子液体润滑下,铝自配副为边界润滑体系,摩擦系数在0.1左右,离子液L-P106能有效润滑铝自配副。

b. 微量离子液体润滑下,无论载流与否,铝自配副的摩擦系数和磨损率均随速度的增大呈先减小后增大的趋势,并均在速度为0.45m/s时,摩擦系数和磨损率最低。电流的作用使摩擦系数和磨损率较无电流时高。载流条件下,铝栓在低速下为中等程度磨损,在高速下会因离子液体润滑失效而转变为严重磨损。

c. 非载流条件下,铝自配的磨损机制主要为轻微磨粒磨损;载流下,磨损机制转变为黏着磨损,并会伴有电弧侵蚀磨损。电弧的作用会在烧蚀区形成孔洞、裂纹、金属小颗粒等形貌,对铝自配副造成严重的损害并加剧磨损。

### 参考文献:

[1] Welton T. Room - temperature ionic liquids: solvents for

synthesis and catalysis [J]. Chemistry Reviews, 1999, 99(8): 2071 - 2083.

- [2] Gu Y L, Shi F, Deng Y Q. Room temperature ionic liquids: a new type of soft medium and functional materials [J]. Chinese Sciences Bulletin, 2004, 49(6): 515 - 521 (in Chinese) [顾彦龙, 石峰, 邓友全. 室温离子液体: 一类新型的软介质和功能材料[J]. 科学通报, 2004, 49(6): 515 - 521].
- [3] Olivier H. Recent developments in the use of non - aqueous ionic liquids for two - phase catalysis [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 1999, 146(1 - 2): 285 - 289.
- [4] Liu W M, Ye C F, Wang H Z, et al. Tribological behavior of the - ionic liquid of alky limidazolium tetrafluoroborate as a lubricant [J]. Tribology, 2001, 21(6): 482 - 484 (in Chinese) [刘维民, 叶承峰, 王海忠, 等. 烷基咪唑四氟硼酸盐离子液作为润滑剂的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 482 - 484].
- [5] Wang H Z, Ye C F, Liu W M. Tribological behavior of the ionic liquid of 1 - Methyl - 3 - Butyl - Imidazolium Hexafluorophosphate as a lubricant [J]. Tribology, 2003, 23(1): 38 - 41 (in Chinese) [王海忠, 叶承峰, 刘维民. 1 - 甲基 - 3 - 丁基咪唑六氟磷酸盐离子液的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1): 38 - 41].
- [6] Bonhote P, Dias A P, Papageorgiou N, et al. Hydrophobic highly conductive ambient - temperature molten salts [J]. Inorganic Chemistry, 1996, 35: 1 168 - 1 178.
- [7] Hagiwara R, Ito Y. Room temperature ionic liquids of alky limidazolium cations and fluoroanions [J]. J Fluorine Chem, 2000, 105: 221 - 227.
- [8] Shunichi Kubo, Koji Kato. Effect of discharge on wear rate of Cu - impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current [J]. Wear, 1998 (216): 172 - 178.
- [9] Kang B. The performances of several kinds of typical solid self - lubricating materials under the friction with carries flows [J]. Sichuan Metallurgy, 2007, 29(4): 19 - 22 (in Chinese) [康斌. 几种典型固体自润滑材料在载流摩擦条件下的性能[J]. 四川冶金, 2007, 29(4): 19 - 22].
- [10] Li Z X. Design of testing device and research on sliding electrode erosion under high current [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012 (in Chinese) [李志鑫. 大电流下的电极烧蚀试验装置设计及烧蚀研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012].
- [11] Dong L. Study on the Mechanism of friction and wear with electric current [D]. Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2008 (in Chinese) [董霖. 载流摩擦磨损机理研究[D]. 成都, 西南交通大学, 2008].
- [12] Wang X P. The properties and lifetime growth research of sliding electrical contact materials for space application [D]. Changsha: Central south University, 2013 (in Chinese) [王新平. 空间滑动电接触材料的性能及其寿命增长研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013].
- [13] Jia S G, Zheng M S, Liu P, et al. Effect of Cr on the wear

- property of Cu - Ag alloy under electrical current [J]. Tribology, 2005, 25 (5): 484 - 488 (in Chinese) [贾淑果, 郑茂盛, 刘平, 等. 在加载电流作用下 Cr 对 Cu - Ag 合金磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2005, 25 (5): 484 - 488].
- [14] Xu W, Hu R, Gao Y, *et al.* Friction and wear properties of carbon nanotubes reinforced copper matrix composites with and without electric current [J]. Tribology, 2010, 30 (3): 303 - 307 (in Chinese) [许玮, 胡锐, 高媛, 等. 碳纳米管增强铜基复合材料的载流摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30 (3): 303 - 307].
- [15] Zhang K H, Guan W M, Sun J L, *et al.* Preparation and DC arc erosion morphology of electrical contact materials contact [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 36 (1): 924 - 927 (in Chinese) [张昆华, 管伟明, 孙加林, 等. 电接触材料的制备和直流电弧侵蚀形貌特征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 36 (1): 924 - 927].
- [16] Zheng R G, Zhan Z J, Wang W K. Wear behavior of Cu - La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite with or without electrical current [J]. Wear, 2010, 268 (1 - 2): 72 - 76.
- [17] Shao W Z, Chui Y S, Wang Y, *et al.* The failure behavior of Cp/CuCd used for electrical contact material under the influence of arc [J]. Electrical alloy, 2000 (4): 8 - 22 (in Chinese) [邵文柱, 崔玉胜, 王岩, 等. Cp/CuCd 电接触材料在电弧作用下的失效行为 [J]. 电工合金, 2000, (4): 8 - 22].

## 订 阅 指 南

本刊为中国科学院兰州化学物理研究所主办、科学出版社出版并向国内外公开发行的覆盖摩擦学各分支学科的综合性学术期刊(双月刊)。本刊为中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》和科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》,已连续五版列入《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《金属文摘》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及《日本科技文献速报(JST)》等国际知名检索系统收录。

本刊主要报道摩擦学设计、摩擦力学、摩擦化学、摩擦学材料、摩擦学表面工程、特殊工况下的摩擦学、摩擦学测试技术与设备及摩擦学系统工程与应用等重要的基础研究和应用研究新成果。设有研究简报、研究论文、工程应用、专家论坛、评述与进展、回顾等栏目。

读者对象主要是从事摩擦学研究和新材料研制的科研技术人员及高等院校相关专业的教师和研究生以及工业领域的技术人员等。

### 订 阅 方 式

#### 1 邮局订阅

全国各地邮局均可订阅,邮发代号:54 - 42, 2015 年定价:38.0 元/期, 228.0 元/年(全年 6 期)

#### 2 直接汇款至编辑部订阅(可随时订阅)

方式一: 邮局寄汇

地 址: 兰州市天水中路 18 号中国科学院兰州化学物理研究所《摩擦学学报》编辑部收。

邮 编: 730000

方式二: 银行汇款

开 户 行: 中国工商银行兰州市开发区支行

户 名: 中国科学院兰州化学物理研究所

帐 号: 2703000909026405762(银行汇款请注明“《摩擦学学报》编辑部”)