

# 四硼酸钾在水介质中的极压抗磨性能研究

Extreme Pressure and Antiwear Performances of Potassium Borate in Water

陈波水, 方建华, 王 九, 李 嘉, 娄 方

(解放军后勤工程学院 军事油料应用工程系, 重庆 400016)

CHEN Bo-shui, FANG Jian-hua, WANG Jiu, LI Jia, LOU Fang

(Department of Applied Engineering of Military Oil,

Logistical Engineering University, Chongqing 400016, China)

**摘要:** 采用四球摩擦磨损试验机考察了四硼酸钾在水介质中的极压抗磨性能, 采用扫描电镜 (SEM)、X 射线能谱 (EDX)、X 射线光电子能谱 (XPS) 分析了磨斑表面形貌、元素分布特征和化学状态。结果表明, 四硼酸钾对提高水的极压性能效果十分突出, 对改善抗磨性能效果一般。极压条件下四硼酸钾水溶液的磨斑表面擦伤小, 硼含量高, 并在摩擦表面形成了具有良好极压抗磨作用的以  $B_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$  和  $Fe_2O_3$  等为主要成分的摩擦氧化物膜。

**关键词:** 四硼酸钾; 水; 极压; 抗磨

中图分类号: TH 117.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)03-0062-03

**Abstract:** The extreme pressure and antiwear performances of potassium borate in water were evaluated on four-ball friction testers. The topographies, element distribution and chemical characteristics of the worn surfaces were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersion of X ray (EDX) and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). The results indicate that potassium borate possesses very excellent extreme pressure and good antiwear capacities in water. The topography of worn surfaces lubricated with water containing potassium borate under severe friction conditions is much smoother than that under mild conditions, as can be attributed to the formation on friction surfaces of a tribochemical film mainly composed of oxides of boron and iron.

**Key words:** potassium borate; water; extreme pressure; antiwear

无机硼酸盐作为润滑油脂添加剂具有承载能力高、热稳定性和氧化安定性好、生理生态毒性低以及特殊的油粘度与摩擦学性能关系等特性, 是一类综合技术性能优良的环境友好型润滑油脂添加剂, 迄今已有大量研究报导并已获得应用<sup>[1-5]</sup>。但是, 目前关于含硼化合物作为水基润滑添加剂的研究报导较少, 少量相关研究主要集中在硼酸酯或其他改性有机硼化合物<sup>[6-9]</sup>, 直接针对水溶性无机硼酸盐作为水基润滑添加剂的研究很少。根据硼酸盐作为润滑油脂添加剂的优良特性, 研究无机硼酸盐在水介质中的摩擦磨损行为, 对于探索无机硼酸盐作为水基润滑添加剂的性能, 推进无机硼酸盐在水基润滑剂中的应用, 进而发展新型环境友好水基润滑剂具有重要理论意义和现实意义。本工作研究了四硼酸钾在水介质中的极压抗磨性能, 并对其极压抗磨机制进行了分析。

## 1 实验

### 1.1 试剂及仪器

四硼酸钾 ( $K_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$ ), 分析纯。MQ-800 型四球摩擦试验机 (济南试验机厂)、MMW-1P 双显式立式万能摩擦磨损试验机 (济南试验机厂)、德国 OPTON 公司 CSM-950 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线能谱仪 (EDX)、美国 PE 公司 PH-5100 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS)。

### 1.2 性能实验及表面分析方法

采用 MQ-800 型四球机评价最大无卡咬负荷 ( $P_B$ ) 和烧结负荷 ( $P_D$ ), 采用 MMW-1P 双显式立式万能摩擦磨损试验机评价试样的磨斑直径 (WSD)。实验所用钢球直径为  $\phi 12.7\text{ mm}$ , 硬度为 59~61HRC, 试验机转速为 1500 r/min, 室温约 25℃。四球实验后所

得试球用石油醚超声清洗 10min,采用 SEM 分析磨斑表面形貌,采用 EDX 进行表面元素分布扫描,采用 XPS 分析表面主要元素的化学状态。

2 结果与分析

2 1 水介质中四硼酸钾的极压抗磨性能

表 1 所示为四硼酸钾在水中的极压抗磨性能实验结果。从表 1 可以看出,在水中加入不同含量的四硼酸钾后,水溶液的最大无卡咬负荷( $P_B$ )增大,磨斑直径(WSD)减小,但不明显,表明四硼酸钾可在一定程度上改善水的抗磨性能。此外,从表中的实验结果看,四硼酸钾的加入十分显著地提高了水的烧结负荷( $P_D$ ),且随四硼酸钾加入量的增多 $P_D$ 迅速增大,表明四硼酸钾在提高水的极压性能方面效果极为优异。

表 1 四硼酸钾在水中的极压抗磨性能

Table 1 Antiwear and EP performances of potassium borate in water

Additive	Mass fraction / %	$P_B$ / N	$P_D$ / N	WSD / mm ( 137N, 10min)
Distilled water		98	314	0.46 <sup>(1)</sup>
K <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	1.0	255	3089	0.65
	2.0	275	4903	0.59
	3.0	275	6080	0.57

(1): Values obtained under the load of 59N

2 2 极压抗磨机制

2 2 1 磨斑表面形貌和元素分析

图 1 所示为用含 3.0% (质量分数,下同)四硼酸钾水溶液分别进行抗磨和极压实验后,所得钢球磨斑表面的 SEM 照片。

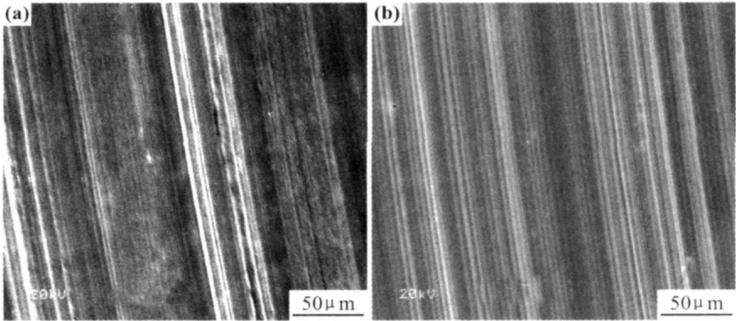


图 1 抗磨和极压试验后钢球磨斑表面形貌的 SEM 照片 (a) 负荷: 137N, 时间 10min; (b) 负荷: 4903N, 时间 10s  
Fig. 1 SEM images of worn surfaces after wear tests (a) load: 137N, time: 10min; (b) load: 4903N, time: 10s

从图 1 可以看出,四硼酸钾水溶液进行长时抗磨实验后的磨斑表面(图 1a)有较深的犁沟擦伤,磨损较为严重,但在高负荷下进行极压实验时,磨斑表面(图 1b)擦伤反而较为轻微,表面较为光滑,这显然与四硼酸钾具有优异极压性能直接相关。

图 2 所示为用含 3.0% 四硼酸钾水溶液分别进行抗磨和极压实验后,所得钢球磨斑表面硼元素的 X 射线

线能谱面扫描分析结果。从图 2 可以看出,两种磨斑表面的 B 元素均呈弥散分布,但在极压条件下 B 含量较多,极压条件下表面较多的含硼化合物可能是四硼酸钾具有优异极压性能的主要原因。

2 2 2 表面化学特征分析

图 3 所示为用含硼酸钾水溶液进行极压性能实验后,磨斑表面 B, O, Fe, C 元素的 XPS 分析谱图。

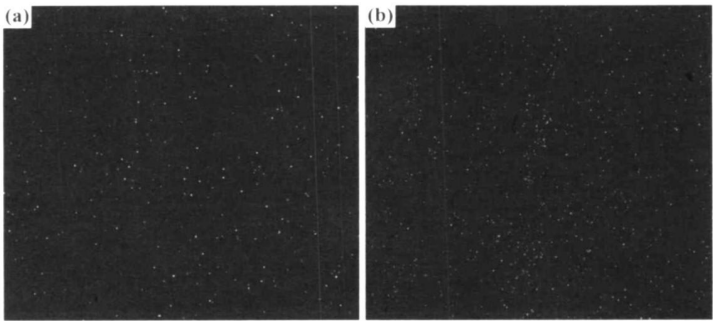


图 2 磨斑表面硼元素分布 (a) 负荷: 137N, 时间 10min; (b) 负荷: 4903N, 时间 10s  
Fig. 2 Distributions of boron on worn surfaces (a) load: 137N, time: 10min; (b) load: 4903N, time: 10s

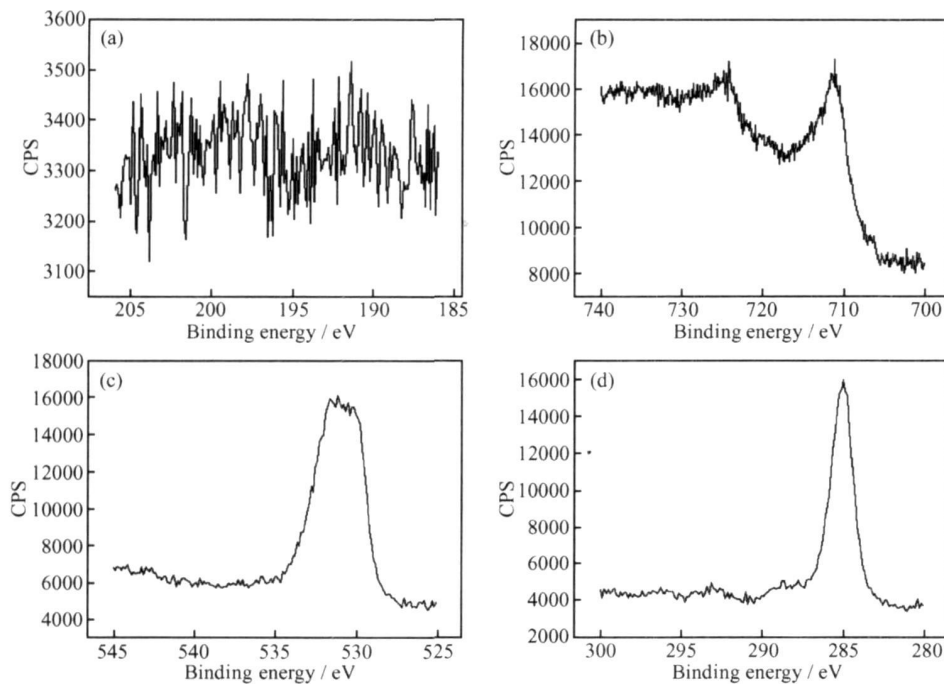


图3 含四硼酸钾水溶液极压实验后磨斑表面 XPS 谱 (a) 硼元素  $B_{1s}$ ; (b) 铁元素  $Fe_{2p}$ ; (c) 氧元素  $O_{1s}$ ; (d) 碳元素  $C_{1s}$

Fig. 3 XPS spectra of worn surfaces lubricated with water containing potassium borate

(a) boron,  $B_{1s}$ ; (b) iron,  $Fe_{2p}$ ; (c) oxygen,  $O_{1s}$ ; (d) carbon,  $C_{1s}$

从图3的XPS分析谱图看,磨斑表面硼元素  $B_{1s}$  的谱峰位于电子结合能为 192.0 eV 处,表明硼元素在摩擦表面以  $B_2O_3$  的形式存在;铁元素  $Fe_{2p}$  的电子结合能为 710.8 eV,表明 Fe 以  $Fe_3O_4$  和  $Fe_2O_3$  的形式存在于摩擦表面;氧元素  $O_{1s}$  结合能为 533.0 eV、530.0 eV,分别归属于  $B_2O_3$  和  $Fe_3O_4$ 、 $Fe_2O_3$  中氧的化学态,而位于电子结合能为 285.0 eV 处的碳元素  $C_{1s}$  谱峰则可能源于表面的石墨碳或污染碳。 $B_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$  和  $Fe_2O_3$  已被证明具有较好的润滑作用,由此可以推断,摩擦表面交织形成的以  $B_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$  和  $Fe_2O_3$  等氧化物为主要成分的摩擦化学反应膜,是四硼酸钾具有优异极压性能的重要原因。

### 3 结论

(1) 四硼酸钾在水介质中具有优异的极压性能和较好的抗磨性能,四硼酸钾在水中的含量越多,极压性能越好。

(2) 极压条件下四硼酸钾水溶液的磨斑表面摩擦小,硼含量高,并在摩擦表面形成了以  $B_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$  和  $Fe_2O_3$  等氧化物为主要成分的摩擦化学反应膜,该摩擦氧化物膜起到了良好的极压抗磨作用。

#### 参考文献

- [1] ADAMS J H. Tribological performances of borates as lube additives [J]. *Lubrication Engineering*, 1977, 33 (5): 25-31.

- [2] 刘维民,薛群基. 无机硼酸盐润滑油抗磨添加剂的发展现状[J]. *摩擦学报*, 1993, 13(4): 382-387.
- [3] STANULOV K G, HARHARA H N. An opportunity for partial replacement of phosphates and dithiophosphates in EP packages with boron-containing additives [J]. *Tribology International*, 1998, 31(5): 257-262.
- [4] 李雪梅,杨义勇. 硼类化合物极压抗磨润滑油添加剂的研究进展[J]. *润滑与密封*, 2006, (9): 197-205.
- [5] LIU W M, XUE Q J. The anti-wear properties of sodium metal borate as oil additive [J]. *Lubrication Engineering*, 1992, 48(5): 290-296.
- [6] 黄伟九,陈波水,董浚修. 水溶性硼酸酯的摩擦学性能研究[J]. *机械工程学报*, 2001, 37(5): 18-21.
- [7] 黄伟九,谭援强. 水溶性润滑添加剂研究概况[J]. *润滑与密封*, 2002, (1): 72-75.
- [8] ZHIZ, GU ANQIU S, YONG W. Synthesis, Hydrolytic stability and tribological properties of novel borate esters containing nitrogen as lubricant additives [J]. *Wear*, 1998, (222): 135-142.
- [9] HIB T, MORIKAWA H. Borate ester-based water-soluble lubricant compositions for hot processing of metal [P]. Japanese Patent: 263497, 1991.

基金项目: 国家自然科学基金(50275147); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-04-1002)资助项目

收稿日期: 2007-07-31; 修订日期: 2008-09-01

作者简介: 陈波水(1963—),男,教授、博士、博士生导师;研究方向: 润滑材料与摩擦学,联系地址: 重庆市长江二路174号后勤工程学院军事油料应用工程系(400016),E-mail: chenboshui@yahoo.com.cn