

# 青铜 - 石墨复合材料在干摩擦和水润滑下的摩擦磨损性能及磨损机理研究

贾均红<sup>1</sup>, 周惠娣<sup>1</sup>, 王静波<sup>1</sup>, 周 华<sup>2</sup>, 陈建敏<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**对比考察了青铜 - 石墨复合材料在水润滑和干摩擦两种状态下的摩擦磨损性能及磨损机理。结果表明:水润滑下青铜 - 石墨复合材料的磨损率明显比干摩擦下的小,其最小磨损率为  $1.01 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ ,而摩擦系数比干摩擦下的大。复合材料在干摩擦下的磨损机理主要为粘着磨损、剥层磨损和犁削,磨损较严重;而在水润滑下,复合材料的磨损机理主要为磨粒磨损和疲劳磨损,磨损较小。这是因为水有利于降低摩擦副接触表面的温度,有效地抑制了基体青铜的转移;同时水促进了不锈钢偶件的氧化,形成薄而致密氧化膜,从而降低了磨损。

**关键词:**青铜 - 石墨;复合材料;水润滑;摩擦磨损性能;磨损机理

**中图分类号:** TB333; TH117.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004 - 0595(2002)01 - 0036 - 04

随着人们对环境保护和安全健康两大主题关注的与日俱增,以水代油的纯水液压传动技术的重要性日益凸显。然而由于水的粘度低、气蚀性强、使用温度范围窄及难以形成润滑膜等缺点,纯水液压元件及水介质中的传动系统面临密封难、磨损大和易腐蚀等问题。因此,寻求在水润滑下具有良好耐磨、密封、耐腐蚀及抗气蚀性能的相关材料成为发展纯水液压传动技术的关键难题之一<sup>[1,2]</sup>。

金属基自润滑复合材料已广泛用于汽车工业、家用电器、办公机械及电子元件等领域。其中具有代表性的该类材料主要包括青铜基、铁基、镍基及新近开发成功的铝基自润滑复合材料等<sup>[3~5]</sup>。本文作者根据水压传动的特点,考察了青铜基 - 石墨自润滑复合材料在水润滑条件下的摩擦学性能,并初步探讨了该复合材料在水润滑下的磨损机理。

## 1 实验部分

用粉末冶金法,通过配料 - 混料 - 压制 - 烧结 - 切割等程序制得长方形青铜 - 石墨自润滑复合材料试样,其尺寸为:13 mm × 7 mm × 6 mm。摩擦磨损试验在 MM - 200 型试验机上进行,下试样为

1Cr18Ni9Ti 不锈钢环,外径 50 mm;线速度分别为 1.07 m/s(400 r/min)和 0.54 m/s(200 r/min),载荷为 15 ~ 1 000 N。试样接触形式为线接触,试样和偶件试环在试验前均用 900# 水砂纸打磨,并用丙酮清洗,表面粗糙度  $R_a$  为 0.08 ~ 0.18  $\mu\text{m}$ ,采用蒸馏水作为润滑介质,以 65 ~ 70 滴/分的速度滴注到摩擦副接触表面;试验时间为 120 min。用读数显微镜测量磨痕宽度并换算成磨损率。利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线光电子能谱仪(XPS)及 X 射线能量色散谱仪(EDAX)对复合材料磨痕进行表征分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 载荷对摩擦系数和磨损率的影响

图 1 示出了 2 种试验条件下载荷对青铜 - 石墨复合材料摩擦磨损性能的影响。可以看出:随着载荷的增大,在两种试验条件下复合材料的摩擦系数变化不大;但水润滑下的摩擦系数较高,而磨损则明显较小。在干摩擦下,随着载荷的增大,磨损率逐渐降低;而在水润滑下当载荷为 200 N 时磨损率最低,呈先下降后上升的变化趋势。

基金项目:国家自然科学基金(59925513);国家重点基础研究(G19909065005)和浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放课题资助(9905)。

收稿日期:2001 - 03 - 07;修回日期:2001 - 08 - 18/联系人贾均红。

作者简介:贾均红,1975 年生,在读博士生,主要从事磨损失效及摩擦学表面工程方面的研究。

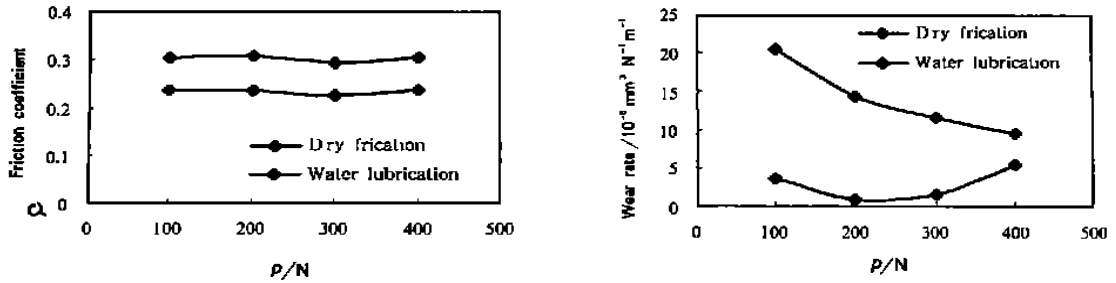


Fig 1 Variations in friction coefficient and wear rate of bronze-graphite composites with load at 0.54 m/s

图 1 干摩擦和水润滑下复合材料摩擦系数及磨损率随载荷的变化关系曲线

表 1 干摩擦和水润滑条件下青铜 - 石墨复合材料摩擦系数及磨损率随滑动速度的变化(200 N)

Table 1 Variations in friction coefficient and wear rate of bronze - graphite composites with sliding speed at 200 N

Sliding speed / $\text{m s}^{-1}$	Water lubrication		Dry friction	
	Friction coefficient	Wear rate / $\text{mm}^3 (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$	Friction coefficient	Wear rate / $\text{mm}^3 (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$
0.54	0.236	14.236	0.306	4.994
1.07	0.258	1.01	0.252	1.1

2.2 滑动速度对摩擦系数和磨损率的影响

表 1 给出了两种试验条件下复合材料的摩擦系数和磨损率随速度变化的关系曲线.可见:在干摩擦条件下,低速时的摩擦系数较低而磨损率很高,高速时摩擦系数略微增大而磨损率急剧降低;在水润滑低速条件下的摩擦系数及磨损率均较高,而高速下的摩擦系数及磨损率与干摩擦下的相近.总体而言,在适当速度下,水可以有效地改善青铜 - 石墨复合材料的磨损性能.

2.3 磨痕及偶件表面形貌和元素组成分析

图 2 给出了青铜 - 石墨复合材料在干摩擦和水润滑下的磨痕表面形貌 SEM 照片及相应的元素面分布照片.可以看出,干摩擦下的复合材料磨损表面存在犁沟和小面积的粘着剥落迹象[见图 2(a)],这主要是因为摩擦温升导致表面金属的氧化,氧化膜易发生脆性破坏并形成磨粒所致.图 2(c)所示的元素面分布照片表明,复合材料磨痕表面积聚了大量铜,说明温升可导致复合材料基体成分的富集;而复合材料磨损表面 Fe 的存在[图 2(e 和 f)]表明发生了粘着磨损.对比分析图 2(e 和 f)可以推测,水润滑有利于拟制复合材料同偶件钢试样之间的粘着磨损,这一结论可以从图 3 (c 和 d) 所示的偶件磨损表面 Cu 的面分布照片得到进一步证实.实际上,肉眼即可观察到偶件表面形成

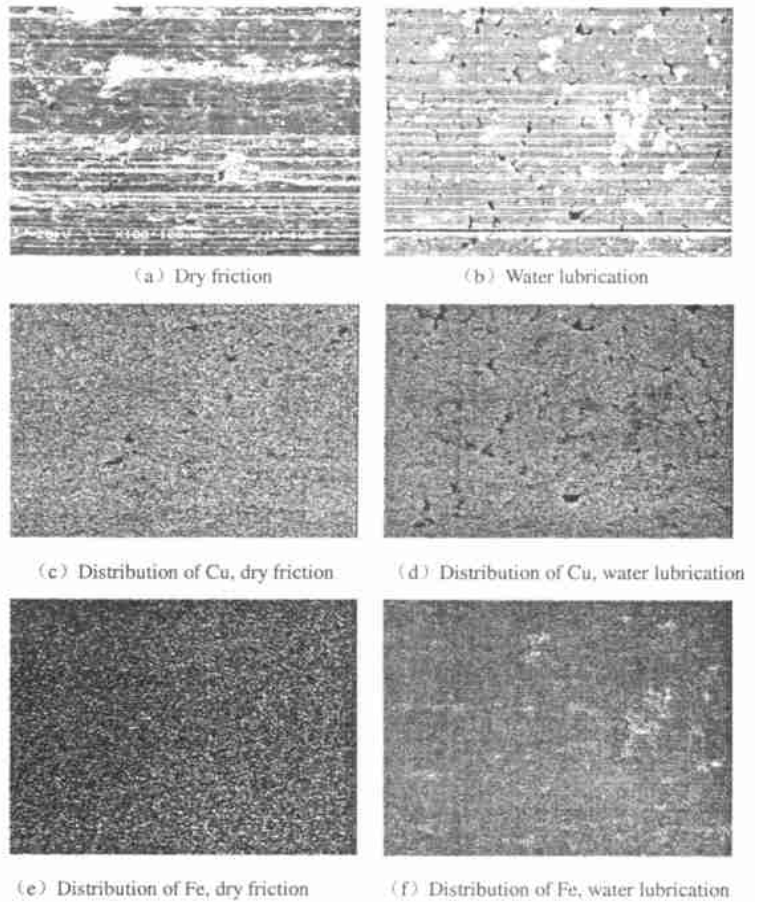


Fig 2 SEM morphologies of and elemental distributions in the worn surface of bronze-graphite composites at 1.07 m/s and 200 N

图 2 复合材料磨痕表面形貌及元素面分布 SEM 照片 (1.07 m/s, 200 N)

的黄色的具有金属光泽的 Cu 转移膜,其表面结构疏松[图 3(a)]. XPS 分析结果表明转移膜主要由 Cu 及其氧化物组成[图 4(a、b 和 c)]. 根据剥层理论,可以认为<sup>[6,7]</sup>:滑动速度的增大导致磨损逐渐增大,当滑动速度达到一定程度之后,温度效应就成为主导因素,在摩擦热作用下接触区域的基体铜发生局部熔融,导致粘着作用增强,石墨的润滑效果降低,青铜向偶件表面的转移加剧,磨损增大. 随着速度的进一步增大,粘着转移趋向稳定,磨损率变化不大,但摩擦表面塑性变形加剧,摩擦阻力的变形分量增大,故摩擦系数随之增大. EDAX 分析结果表明,偶件表面薄膜组成主要为 Fe,并含有少量铜. XPS 分析结果表明,偶件磨损表面的 Fe 主要以氧化物形式存在[图 4(d、e 和 f)]. 对比分析图 4(b 和 e)可知,水介质促进了不锈钢偶件表面的氧化;同时水起冷却作用,使得温度不再是影响材料磨损率的主导因素,故水润滑下材料磨损率受滑动速度的影响相对较小.

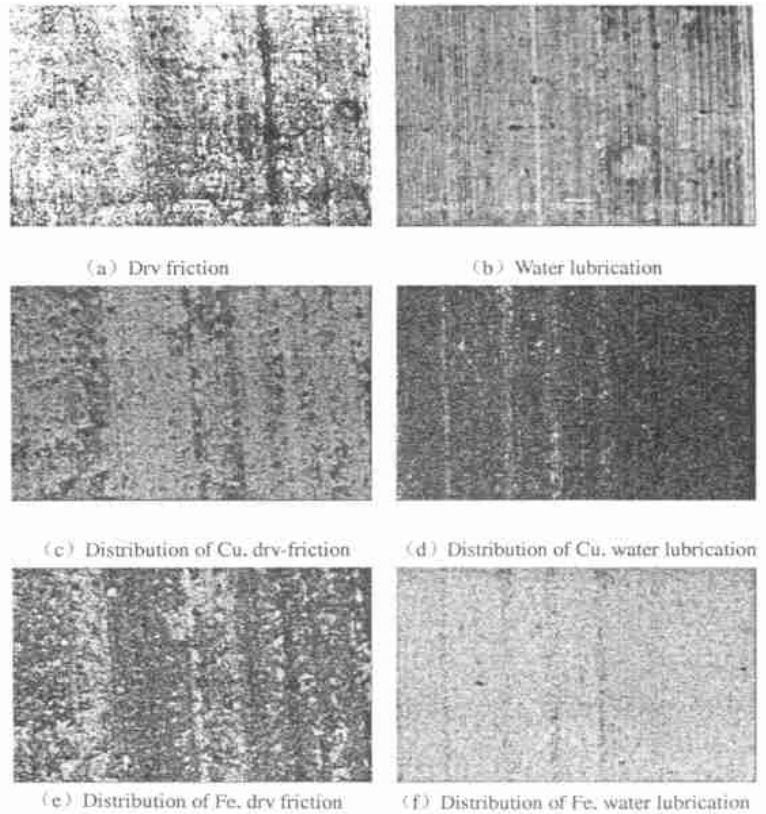


Fig 3 SEM morphologies of and elemental distributions in the worn surface of bronze-graphite composites at 1.07 m/s and 200 N (100 ×)

图 3 不锈钢偶件的 SEM 及元素面分布 (1.07 m/s, 200 N, ×100)

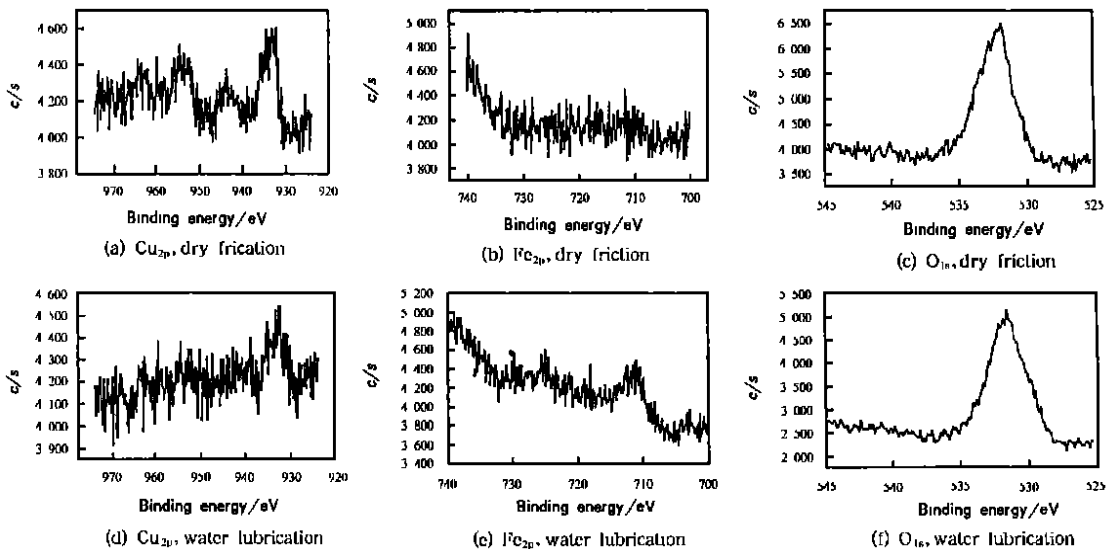


Fig 4 The XPS analysis result of the transfer film on stainless steel under dry friction and water lubrication

图 4 干摩擦和水润滑下摩擦偶件表面转移膜的 XPS 分析结果

### 3 结论

a. 在较低滑动速度下,水润滑下青铜 - 石墨

复合材料的磨损率明显比干摩擦下的小,摩擦系数则较高. 在较高滑动速度下,复合材料在干摩擦和水润滑下的摩擦系数和磨损率相近.

b. 在干摩擦条件下,青铜-石墨复合材料同不锈钢对磨时的主要磨损机理为粘着剥层磨损与犁削,磨损较严重。在水润滑下,复合材料的磨损以磨粒磨损和微观疲劳断裂为主,磨损程度减轻(低滑动速度下);同时,水的冷却作用导致表面温升降低,有利于减轻或抑制粘着转移。

c. 在干摩擦条件下,复合材料在偶件表面形成较厚且疏松的 Cu 粘着转移膜;在水润滑下,水促进了不锈钢偶件的氧化,导致偶件表面形成薄而致密的氧化膜,从而减轻磨损。

#### 参考文献:

- [1] YANG H Y(杨华勇), SHA D H(沙道航). Progress of application and research about pure water hydraulic transmission(纯水液压传动的应用与研究新进展) [J]. Lathes and Hydraulics(机床与液压), 1998, 3:129 - 138.
- [2] ZHOU H(周华), HE X F(贺晓峰). Study and application of sea water hydraulic transmission technique(海水液压传动技术研究与应用) [J]. Hydraulics and Pneumatics(液压与气动), 1995, 3:3 - 4.
- [3] (牛淑琴), (阮虎生), (朱家佩), *et al.* The Study and Application of Bronze - Graphite Oil - Containing Self - Lubricating Composites(青铜-石墨系含油自润滑复合材料的研究应用) [J]. Tribology(摩擦学学报), 1992, 12(4):335 - 339.
- [4] (欧阳锦林), (牛淑琴), (阮虎生), *et al.* Study on Nickel Alloy Base Self - Lubricating Composite(镍合金基自润滑复合材料的研究与应用) [J]. Tribology(摩擦学学报), 1993, 13(1):33 - 47.
- [5] WANG J B(王静波), LV J J 吕晋军), NING L P(宁丽萍), *et al.* Study on the Tribological Behavior of Bronze - matrix Self - lubricating Composites(锡青铜基自润滑材料的摩擦学特性研究) [J]. Tribology(摩擦学学报), 2001, 21(2):110 - 113.
- [6] Razavizadeh K, Eyre TS. Oxidative wear of Aluminium alloys[J]. Wear, 1982, 79:325 - 329.
- [7] (佟金), (陆有), (陈永潭), *et al.* The Effect of Sliding Velocity on Wear Characteristics of Aluminium Alloy - Graphite Composites(滑动速度对铝合金-石墨复合材料的磨损特性的影响) [J]. Journal of Solid Lubrication(固体润滑), 1989, 9(3):169 - 174.

## A Comparative Investigation of the Tribological Behavior and Wear Mechanism of Bronze - graphite Composite under Dry - and Water - lubricated Sliding against Steel

JIA Jun - hong<sup>1</sup>, ZHOU Hui - di<sup>1</sup>, WANG Jing - bo<sup>1</sup>, ZHOU Hua<sup>2</sup>, CHEN Jian - min<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University,

Hangzhou 310027, China)

**Abstract :** The friction and wear behavior of bronze - graphite composite under dry - and water - lubricated sliding against a stainless steel was comparatively investigated with an MM - 200 friction and wear tester. The wear mechanisms of the composites were examined as well based on scanning electron microscopic and X - ray photoelectron spectrometric analyses of the worn surfaces of the composite and counterpart. As the results, the composites registers lower wear rate and higher friction coefficient under water lubrication at a relatively smaller sliding speed. Little difference in the friction coefficient and wear rate is observed for the composite under both dry - and water - lubricated conditions as it slides against the steel at a relatively higher sliding speed. The composite is characterized by adhesion wear and scuffing under dry sliding, while it is characterized by abrasion and fatigue under water - lubricated sliding. The cooling effect of water helps to abate the surface temperature rise and restrain the adhesion and transfer. This contributed to decrease the wear rate. Though the oxidation of the counterpart steel was enhanced by water as the lubricant medium, the resultant generation of a compact oxide film contributes to restrain the adhesion and transfer and hence reduce the wear rate of the frictional pair.

**Key words :** bronze - graphite; composite; water lubrication; friction and wear behavior; wear mechanism

**Author :** JIA Junhong, male, born in 1975, Ph. D. student.