

芦荟胶液对 Co-Cr-Mo 合金摩擦学性能影响的研究

张东亚¹, 赵飞飞¹, 高峰¹, 郭俊德², 秦立果²

(1.西安理工大学 机械及精密仪器工程学院, 西安 710048;

2.西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: **目的** 芦荟多糖胶液具有良好的流变性和生物相容性, 有望成为一种绿色润滑液。 **方法** 首先提取新鲜芦荟胶液充当润滑液, 采用红外光谱分析芦荟胶液中的多糖成分。在球-盘摩擦实验装置上分别研究干摩擦、水和芦荟胶液润滑下, 氧化锆陶瓷球与 Co-Cr-Mo 合金对磨时的润滑行为, 并对不同润湿性的 Co-Cr-Mo 表面的摩擦学性能进行初步探讨。最后利用扫描电镜和能谱仪分析磨损表面的微观形貌和元素分布。 **结果** 润湿性对 Co-Cr-Mo 表面的摩擦学性能有显著影响。干摩擦条件下, 疏水性表面的平均摩擦系数为 0.65, 低于亲水性表面的摩擦系数。水润滑时, 疏水性表面的平均摩擦系数为 0.35, 要比亲水性表面的低 20% 左右。当采用芦荟胶液润滑时, Co-Cr-Mo 表面的摩擦系数显著降低, 其中亲水性表面的摩擦系数更稳定, 其平均摩擦系数仅为 0.28。 **结论** 芦荟胶液润滑条件下, 合金表面的磨损较轻, 其主要磨损形式表现为轻微的犁沟。芦荟胶液中的多糖组分在摩擦作用下在摩擦表面形成转移膜, 对 Co-Cr-Mo 合金起到润滑防护的作用。

关键词: 芦荟胶液; Co-Cr-Mo 合金; 润湿性; 摩擦学性能; 转移膜

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0090-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.014

Effects of Aloe Mucilage on Tribological Properties of Co-Cr-Mo Alloy

ZHANG Dong-ya¹, ZHAO Fei-fei¹, GAO Feng¹, GUO Jun-de², QIN Li-guo²

(1.School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2.School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: Aloe mucilage solution featuring in good rheological property and biocompatibility is expected to be potential green lubricant. Firstly, fresh aloe mucilage was extracted as lubricant, and polysaccharide of aloe mucilage was analyzed with infrared spectrum. Tribological behavior of zirconia ceramic ball sliding against Co-Cr-Mo alloy provided with dry friction, water lubrication and aloe mucilage lubrication, respectively was studied on ball-on-disk frictional experiment apparatus. Tribological properties of the Co-Cr-Mo surfaces with different wettability were discussed preliminarily. Finally, morphology and element distribution of the worn surface were analyzed using with a scanning electron microscope and energy disperse spectroscopy. The wettability had obvious influence on tribological properties of Co-Cr-Mo surface. Provided with dry friction condition, average friction coefficient of hydrophobic surface was 0.65, lower than that of hydrophilic surface. Provided with water lubrication, the friction coefficient was 0.35, about 20% lower than that of hydrophilic surface. Provided with aloe mucilage lubrication,

收稿日期: 2017-02-04; 修订日期: 2017-03-29

Received: 2017-02-04; Revised: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51605381); 陕西省教育厅专项项目 (16JK1540)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605381), Shaanxi Provincial Education Department(16JK1540)

作者简介: 张东亚 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程及摩擦学。

Biography: ZHANG Dong-ya(1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface engineering and tribology.

tion, the friction coefficient reduced significantly to 0.28, less stable than that of hydrophilic surface. Provided with aloe mucilage lubrication, the alloy surface is subject to slight wear with main wear form of shallow furrow. The polysaccharide in aloe mucilage generates a transfer film during the friction process, which can lubricate and protect the Co-Cr-Mo alloy.

KEY WORDS: aloe mucilage; Co-Cr-Mo alloy; wettability; tribological properties; transfer film

人工关节是临床需求量最多的植入体之一,属于典型的生物摩擦学系统^[1]。人工关节置换术切除了患者的关节囊和滑膜,导致关节无法继续分泌滑液。人工关节常因润滑不良而导致剧烈磨损,产生的磨屑会引起组织排异反应从而加剧患者的痛苦^[2],可见润滑效果对人工关节摩擦副的使用寿命和患者的生活质量有极其重要影响。从表面改性角度出发,通过离子注入、激光熔覆及磁控溅射等工艺,在人工关节表面生成防护薄膜,其耐磨性能得到不同程度的改善^[3]。但这种改性薄膜因与基底的弱结合力而易发生早期失效及脱落,难以满足人工关节高可靠、长寿命的要求。华子恺^[4]提出针对人工膝关节的关节囊技术,研发了一种注入治疗性仿生滑液,以达到润滑人工关节的目的。李久青^[5]采用小牛血清和透明质酸(HA)作为润滑剂,在0.75%(质量分数)HA溶液润滑下,由聚乙烯醇水凝胶软骨材料和不锈钢组合成的摩擦副具有较低的摩擦系数和良好的耐磨性。

大自然中,植物汁液或提取物具有高黏度和低摩擦系数等特性^[6]。如经过生物技术提取植物纤维所获得的生物多糖胶液可改善润滑^[7],含有多糖多缩戊糖的莼菜黏液也具有极低的摩擦系数^[8]。芦荟是一种肥厚多汁的单子叶植物,芦荟叶中含有丰富的胶液,胶液具有粘稠、保湿和润滑作用^[9]。临床医学上将新鲜去皮芦荟塞入人体直肠至结肠,研究发现芦荟中的大量活性水能对肠壁进行有效润滑,可治疗便秘^[10]。大量研究表明,芦荟胶液含有混合多糖化合物,而多糖化合物作为一种关节炎症的注射性药物,已经用于临床,如膝关节清理术后关节内注射玻璃酸钠可在一定程度上代替损失的关节液,对关节软骨起到保护作用^[11]。

芦荟作为一种绿色植物,目前对其性能研究主要侧重于医学、美容和食品等方面,其生物润滑方面的报道还较少,可见这种绿色环保的生物润滑液未引起足够重视。本研究拟利用在氧化锆陶瓷球的挤压作用下,研究芦荟多糖胶液对Co-Cr-Mo合金摩擦学性能的影响,同时初步研究不同润湿性的Co-Cr-Mo表面的润滑行为。

1 实验

1.1 材料

新鲜芦荟胶液的提取方法如下:(1)取叶大、无

损坏的新鲜芦荟叶若干片,用40℃去离子水冲洗干净,擦干外表皮水分后,置于紫外灯下密闭照射30 min进行杀菌消毒,而后除去叶面边缘尖刺,静置、晾干;(2)将芦荟叶沿主茎脉切成两半,分离芦荟叶片的外皮与胶液,用勺子将果冻状胶液刮出置于研钵中进行研磨;(3)将研磨后的胶液进行过滤,即得到浅绿色的芦荟胶液。

摩擦实验所用的上试样为氧化锆陶瓷球(弹性模量310 GPa,硬度85HRA),购置于上海泛联科技股份有限公司,球的直径为 $\phi 9.5$ mm,表面粗糙度约为 $Ra=0.08$ 。下试样为 $\phi 30$ mm $\times 5$ mm的Co-Cr-Mo合金圆盘,圆盘依次经由400#—1000#砂纸打磨,最后圆盘表面的粗糙度 Ra 为0.32。表1为Co-Cr-Mo合金的化学成分。为了考察表面润湿性能对摩擦学性能的影响,采用喷涂法对表面进行氟化处理,通过分子自组装在圆盘表面形成一层硅烷疏水膜,并获得静态接触角为115°左右的疏水性表面。而未经氟化处理的表面是接触角约为41°的亲水性表面。

表 1 Co-Cr-Mo 合金成分
Tab.1 Elements of Co-Cr-Mo alloy

Element	C	Cr	Mo	Ni	Fe	Mn	Co
Weight content/%	0.23	28.20	5.98	0.41	0.70	0.64	Balance

1.2 性能测试

用300目筛过滤芦荟胶液,去除纤维质,过滤液在真空箱内干燥12 h,得到芦荟粉末。采用TENSOR27傅里叶变换红外光谱仪(德国BRUKER公司)分析芦荟胶液的多糖成分。

在自制球-盘摩擦磨损试验机上评价芦荟胶液的润滑性能,球-盘的相对运动方式为旋转运动。下试样为具有不同润湿性的Co-Cr-Mo表面,上试样为 $\phi 9.5$ mm的氧化锆陶瓷球。润滑方式分别为干摩擦、去离子水和芦荟胶液润滑,所有试验均在温度为20~25℃、相对湿度为40%~45%的条件下进行。实验开始前,将试样和夹具分别在无水乙醇中用超声波清洗10 min,并用吹风机烘干。在实验过程中,新鲜芦荟溶液或去离子水经由滴管滴加到摩擦表面,以提供相应的润滑液。实验参数为:载荷200 g(平均赫兹接触压力0.23 GPa),电机转速100 r/min,摩擦圆半径10 mm,每组测试时间30 min。

实验结束后,再次超声波清洗试样并烘干。采用扫描电子显微镜(SEM)观察磨损表面磨痕形貌,并采用能谱分析仪(EDS)对磨痕表面进行元素种类及含量分析。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱

在 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 区间内对干燥后芦荟粉末进行红外光谱分析,所测结果如图1所示。在 3700 cm^{-1} 和 3400 cm^{-1} 附近有 O—H 伸缩振动,表明存在羟基吸收峰。在 $2800\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为 C—H 伸缩振动,是糖类的特征峰。 1780 cm^{-1} 处的弱吸收表明存在糖醛酸。在 1380 cm^{-1} 附近的吸收峰为 C—H—键,表明存在葡萄糖。而在 846 cm^{-1} 附近的峰为 C—O—键,表明存在甘露糖苷。文献[12]报道芦荟胶液是由葡萄糖、半乳糖、甘露糖和阿拉伯糖等连接而成的多糖,这与本文的结果接近。可见本实验所提取的芦荟胶液主要成分为多糖胶液。

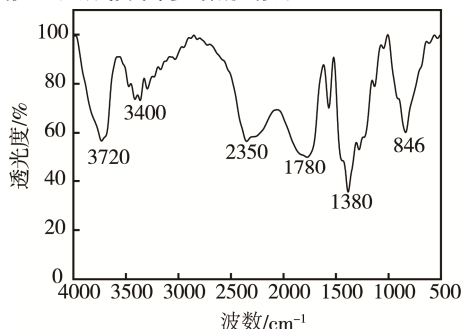


图1 芦荟的红外光谱

Fig.1 The infrared spectra of aloe

2.2 摩擦学性能

2.2.1 不同润滑条件下的摩擦学性能

图2为干摩擦条件下,氧化锆陶瓷球与 Co-Cr-Mo 对磨时摩擦系数随时间的变化规律。从图2可以看出,当 Co-Cr-Mo 表面为亲水性表面时,启动阶段的摩擦系数迅速上升到 0.77 左右,经过 180 s 磨合后,摩擦系数迅速上升到 1.38,再经 100 s 后,又迅速下降到 0.82。整个实验过程中,摩擦系数始终在较大的范围内波动,其平均摩擦系数为 1.15。实验刚开始时,球与盘的接触为点接触,高硬度的陶瓷球在接触半圆区域产生较高的剪切应力和压应力,容易诱发表面疲劳微裂纹[13]。干摩擦时,陶瓷球表面剥落,发生剧烈的磨粒磨损,因此摩擦系数波动较大。

当 Co-Cr-Mo 表面为疏水性表面时,摩擦系数从启动时的 0.20 迅速增加到 0.67,并在前 200 s 内稳定在 0.65 左右,随后摩擦系数急剧上升到最大值(1.12)。随着滑动的继续,摩擦系数缓慢下降到 0.75

左右,运行 900 s 后,摩擦系数以较小的波动幅度下降,并最终维持在 0.70,整个实验期的平均摩擦系数为 0.65。与亲水性表面相比,疏水性表面的摩擦系数更平稳,且平均摩擦系数较低。其原因为氟硅烷修饰降低了试样的表面自由能,使表面的吸附作用减小,可有效降低摩擦系数[14]。氟硅烷基疏水膜为一种吸附膜,它在一定程度上可以将氧化锆球与 Co-Cr-Mo 基体隔开,避免氧化锆球与 Co-Cr-Mo 表面直接接触,具有一定的润滑作用。

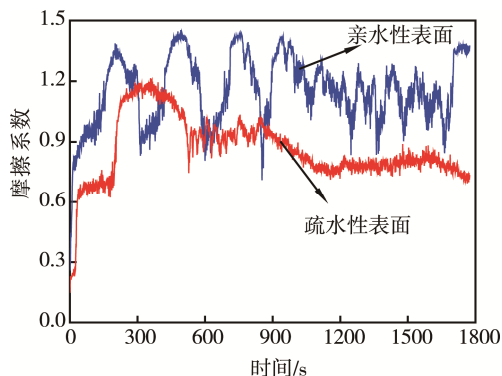


图2 干摩擦时 Co-Cr-Mo 表面的摩擦系数曲线

Fig.2 The friction coefficient curves of Co-Cr-Mo under dry sliding condition

2.2.2 水润滑

图3为不同试样在水润滑条件下的摩擦系数随时间的变化曲线,当 Co-Cr-Mo 表面为亲水性表面时,在前 150 s 内,摩擦系数迅速上升到 0.35 左右,随后逐渐上升并在 0.46 左右波动。当 Co-Cr-Mo 表面存在疏水膜时,实验开始时,摩擦系数在 0.12 左右,随后摩擦系数急剧上升。960 s 后,摩擦系数稳定在 0.35。从图3可以看出,摩擦系数在整个实验过程中始终比较稳定,没有大幅度的波动。与干摩擦相比,水润滑条件下,Co-Cr-Mo 的摩擦系数均比较小且稳定,相比之下,疏水性表面的减摩性能优于亲水性表面。整个试验过程中,亲水性表面的平均摩擦系数为 0.42,而疏水性表面的平均摩擦系数为 0.35。

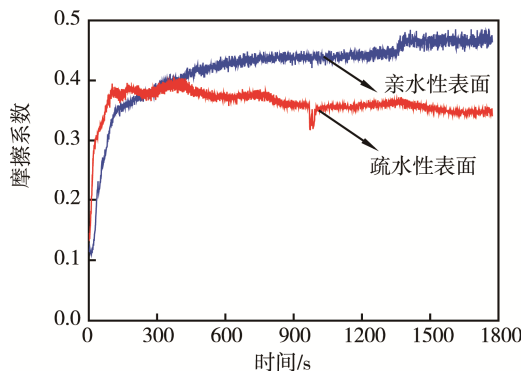


图3 水润滑时 Co-Cr-Mo 表面的摩擦系数曲线

Fig.3 The friction coefficient curves of Co-Cr-Mo under water lubrication condition

水润滑时,球与盘表面的接触界面间会形成一个弯月面,这种弯月面的形成增加了粘附力和摩擦力^[15],疏水性表面可减小弯月面产生的力。液膜厚度也与摩擦表面的润湿性能密切相关,摩擦表面越容易被水润湿,液膜的保持能力越强,当形成的液膜越厚,润滑作用越显著。已有研究报道硅烷能够吸附在摩擦副表面起到润滑作用^[16],因此低表面能修饰的疏水性表面的摩擦系数更小。

2.2.3 芦荟胶液润滑

图 4 为芦荟胶液润滑时,Co-Cr-Mo 表面的摩擦系数曲线。在芦荟胶液润滑条件下,对于亲水性表面,其启动阶段的摩擦系数为 0.40,随后迅速降低。当运行到 450 s 时,摩擦系数降低到 0.30,随着滑动的持续,摩擦系数开始缓慢降低,最终稳定在 0.25 左右。当 Co-Cr-Mo 表面为疏水性表面时,启动时的摩擦系数为 0.22,迅速上升到 0.34 后便开始下降。在前 500 s,疏水性表面的摩擦系数低于亲水性表面的摩擦系数,但 500 s 后,疏水性表面的摩擦系数缓慢上升并高于 0.30,当运行到 1400 s 时,摩擦系数开始降低。本试验期内,亲水性表面的平均摩擦系数为 0.28,疏水性表面的平均摩擦系数为 0.27。

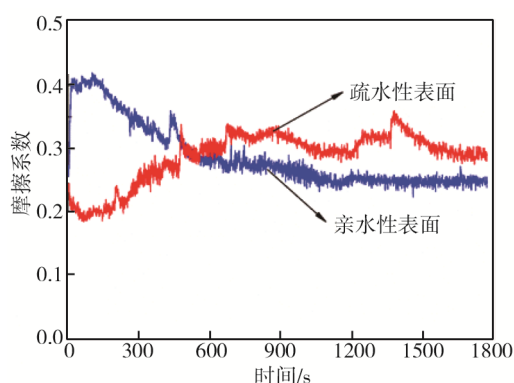


图 4 芦荟胶液润滑时 Co-Cr-Mo 表面的摩擦系数曲线
Fig.4 The friction coefficient curves of Co-Cr-Mo under aloe mucilage lubrication condition

芦荟胶液有较高的黏度和良好的剪切稳定性,其中含有的多糖易于形成润滑膜,有益于润滑液与盘表面充分接触,因此有较好的润滑性能^[17]。结合文献[18]分析认为,当温度升高时,芦荟胶液的黏度显著降低,在滑动过程中,聚集在接触区域的摩擦热会导致芦荟胶液的黏度降低并降低成膜效果。芦荟胶液在亲水性表面很容易铺展和润湿表面,这样芦荟胶液中的多糖成分在摩擦热的作用下,会形成有效的转移膜。

2.3 磨损表面分析

图 5 为 Co-Cr-Mo 表面的磨损形貌 SEM 图片。由图 5a 可见,干摩擦时,试样表面存在大量的犁沟和粘着痕迹,表现为严重磨损。干摩擦时会产生大量

的摩擦热,在接触应力和热作用下,Co-Cr-Mo 表面的微凸体发生软化,导致摩擦过程中发生严重的粘着磨损。在水溶液润滑作用下,Co-Cr-Mo 表面的磨损较剧烈,在盘上能观察到明显的犁沟现象(图 5b)。这表明水不能在 Co-Cr-Mo 表面形成有效的边界润滑膜,摩擦副表面的微凸体发生直接接触,导致剧烈磨损。其机理是:两个硬表面接触时,相互作用的微凸体将发生接触,并且可能在接触点因法向高压强,不断引起局部的“冷焊”和“闪温”而形成粘结点,接触表面的粘结点在相对滑动过程中被剪断,同时较硬的微凸体切削较软的材料基体。微凸体接近与分离的过程包括 4 个主要阶段:微凸体的弹性变形、微凸体的塑性变形、粘接点的剪断和犁沟的产生。粘着点的形成和切断在接触表面上交替进行。文中的氧化锆陶瓷球的硬度高于 Co-Cr-Mo 合金,因此陶瓷球表面的微凸体会像犁地一样在合金表面形成犁沟。

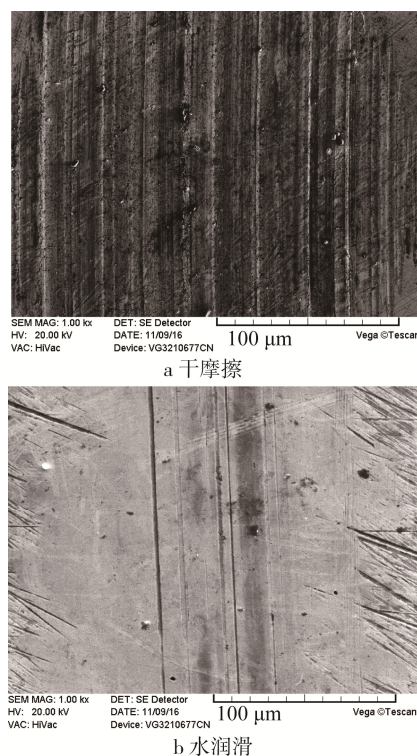


图 5 不同润滑条件下 Co-Cr-Mo 表面磨损的 SEM 图片
Fig.5 SEM images of the Co-Cr-Mo worn surface under: (a) dry friction, (b) water lubrication

图 6a 为在芦荟溶液润滑下盘的磨损 SEM 图片,可以看到表面轻微磨损,磨痕的数量较少,犁沟较浅。同时也可看到,在 Co-Cr-Mo 合金的磨痕表面形成了转移膜,其覆盖在摩擦表面起摩擦防护作用。为了进一步确定转移膜的成分,在图 6a 标记的 A 区域进行能谱分析。从图 6b 可看出,A 区域磨损表面的主要元素为 C、O、Co 和 Cr 等。由于芦荟溶液中的多糖为有机化合物,含有大量的 C 和 O 元素,形成的转移膜吸附在摩擦表面,使表面的 C 和 O 元素较高。

可见在摩擦作用下,芦荟溶液的多糖组分在合金表面形成转移膜,有效地阻止了微凸体的直接接触。同时通过能谱仪在陶瓷球表面上也检测到 C 和 O 元素,推测陶瓷球表面也存在转移膜,结果如图 7 所示。可见在芦荟胶液润滑下,芦荟胶液的多糖化合物在摩擦副表面形成了有效转移膜,对陶瓷球和合金表面起到了良好的润滑防护作用,避免了剧烈磨损。

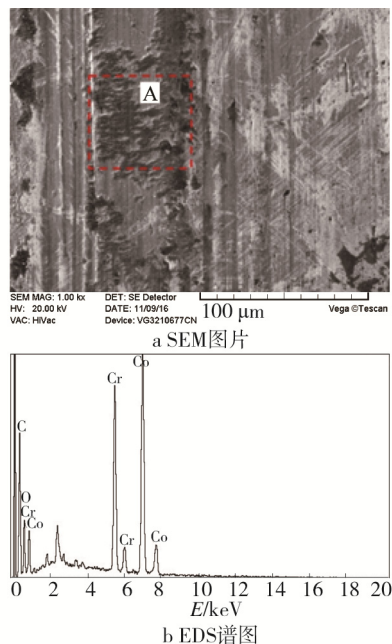


图 6 芦荟胶液润滑条件下 Co-Cr-Mo 磨损表面形貌及 EDS 谱图

Fig.6 EDS spectra on the Co-Cr-Mo worn surface under aloe lubrication

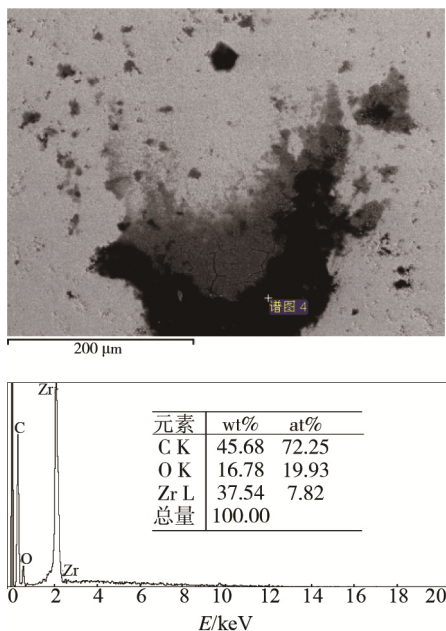


图 7 芦荟胶液润滑条件下陶瓷球磨损表面形貌及 EDS 谱图
Fig.7 EDS spectra on the ball worn surface under aloe lubrication

3 结论

1) 干摩擦和水润滑条件下, Co-Cr-Mo 合金的摩擦学性能显著不同。干摩擦时的摩擦系数波动较大, 其中亲水性表面的摩擦系数在 0.9~1.4 之间剧烈波动, 而疏水性表面的摩擦系数较平稳, 稳态时的摩擦系数为 0.8 左右。与干摩擦相比, 水润滑条件下的摩擦系数发生显著降低, 平均摩擦系数为 0.35~0.42。

2) 芦荟胶液润滑时, 不同表面能的 Co-Cr-Mo 合金的摩擦学性能不同。随着滑动摩擦的持续, 疏水性表面的启动摩擦系数较低, 随后逐渐增大到 0.32 以上; 而亲水性表面的摩擦系数呈降低趋势, 当达到稳定阶段时, 摩擦系数在 0.25 左右。

3) 芦荟胶液润滑条件下, Co-Cr-Mo 合金的表面磨损较轻。磨损表面的 SEM 和 EDS 分析结果表明: 在摩擦作用下, 芦荟胶液中多糖组分在摩擦表面形成转移膜, 有效地避免了 Co-Cr-Mo 合金表面的剧烈磨损。

参考文献:

- [1] SKINNER J, KAY P. Commentary: Metal on Metal Hips[J]. BMJ, 2011, 342(7807): 1123.
- [2] LANGTON D J, JAMESON S S, JOYCE T J, et al. Accelerating Failure Rate of the ASR Total Hip Replacement[J]. J Bone Joint Surg Br, 2011, 93(8): 1011—1016.
- [3] PLATON F, FOURNIER P, ROUXEL S. Tribological Behaviour of DLC Coatings Compared to Different Materials Used in Hip Joint Prostheses[J]. Wear, 2001, 250(1): 227—236.
- [4] HUA Z K, SU S H, ZHANG J H. Tribological Study on New Therapeutic Bionic Lubricants[J]. Tribology Letters, 2007, 28(1): 51—58.
- [5] 李久青, 顾正秋. 透明质酸对人工关节材料的润滑作用[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(4): 343—346.
LI Jiu-qing, GU Zheng-qiu. Lubricating Behavior of Hyaluronic Acid in Artificial Articular Materials[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 22(4): 343—346.
- [6] 周仲荣. 关于我国生物摩擦学研究的思考[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 7—10.
ZHOU Zhong-rong. On Bio-Tribology in China[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 7—10.
- [7] 贺倩芸, 佟大可, 纪方. 生物多糖冲洗胶液在踝关节骨折手术后粘连预防中的临床应用价值[J]. 天津药学, 2015, 27(5): 34—36.
HE Qian-yun, TONG Da-ke, JI Fang. Biological Poly-

- saccharide Gel Washing Liquid in Ankle Fractures of the Clinical Application Value of Adhesion Prevention after the Operation[J]. *Tianjin Pharmacy*, 2015, 27(5): 34—36.
- [8] LI J, LIU Y, LUO J, et al. Excellent Lubricating Behavior of *Brasenia Schreberi* Mucilage[J]. *Langmuir*, 2012, 28(20): 7797—7802.
- [9] XU J, LUO J B, LIU S H, et al. Tribological Characteristics of Aloe Mucilage[J]. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2008, 2(2): 72—76.
- [10] 李春联, 李巧勤, 张小梅, 等. 芦荟茎塞肛解除老年人便秘的效果观察[J]. *护理研究*, 2004, 18(15): 1363—1364.
- LI Chun-lian, LI Qiao-qin, ZHANG Xiao-mei, et al. Effect of Aloe Stem Anal Applying to Relieve Constipation for Elder Patients[J]. *Chinese Nursing Research*, 2004, 18(15): 1363—1364.
- [11] CALVO E, CASTANEDA S, LARGO R, et al. Osteoporosis Increases the Severity of Cartilage Damage in an Experimental Model of Osteoarthritis in Rabbits[J]. *Osteoarthritis and Cartilage*, 2007, 15(1): 69—77.
- [12] PUGH N, ROSS S A, ELISOHLY M A, et al. Characterization of Aloeride, a New High-Molecular-Weight Polysaccharide from Aloe Vera with Potent Immunostimulatory Activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(2): 1030—1034.
- [13] 唐群国, 陈品申, 金文浩. 氧化锆陶瓷/碳纤增强聚醚醚酮在水润滑下的摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(6): 601—606.
- TANG Qun-guo, CHEN Jing-shen, JIN Wen-hao. Tribological Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone Sliding Against Zirconia Lubricated with Water[J]. *Tribology*, 2010, 30(6): 601—606.
- [14] 连峰, 任洪梅, 管善堃, 等. 表面形貌和润湿性对钛合金摩擦学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016(8): 2182—2188.
- LIAN Feng, REN Hong-mei, GUAN Shan-kun, et al. Impacts of the Surface Pattern and Wettability on Tribological Properties of Ti Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016(8): 2182—2188.
- [15] 连峰, 张会臣, 常允乐, 等. 表面润湿性对水润滑Al-Mg合金摩擦学特性的影响[J]. *功能材料*, 2013, 44(21): 3154—3158.
- LIAN Feng, ZHANG Hui-chen, CHANG Yun-le, et al. Effect of Surface Wettability of Al-Mg Alloy on Its Tribological Characteristics Condition of Water Lubrication[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(21): 3154—3158.
- [16] 祖艳华, 姜鹏波, 宋爽, 等. 氟硅改性聚氨酯自组装膜的合成及其性能[J]. *应用化学*, 2012(10): 1138—1142.
- ZU Yan-hua, JIANG Peng-bo, SONG Shuang, et al. Synthesis and Properties of Fluorine and Silicon Modified Polyurethane Self-assembly Films[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2012(10): 1138—1142.
- [17] DRIDI A, BENSALAH W, MEZLINI S, et al. Influence of Bio-lubricants on the Orthodontic Friction[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 60: 1—7.
- [18] 常秀莲, 王长海, 冯咏梅, 等. 库拉索芦荟凝胶黏度及多糖的热稳定性研究[J]. *精细化工*, 2004, 21(7): 496—498.
- CHANG Xiu-lian, WANG Chang-hai, FENG Yong-mei, et al. Research on Viscosity and Thermal Stability of Aloe Gel of *Barbadensis* Mill[J]. *Fine Chemicals*, 2004, 21(7): 496—498.