

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170108001

添加CeO₂对MoS₂基复合涂层摩擦学性能的影响

邱明^{1,2}, 张瑞¹, 李迎春¹, 周占生¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 河南科技大学 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对MoS₂基复合涂层耐磨性差和承载能力低的问题, 以不同含量(质量分数)的CeO₂作为添加剂, 采用喷涂法在GCr15钢表面制备MoS₂基复合涂层。利用摩擦磨损试验机和划痕仪分别研究涂层摩擦磨损性能和结合强度, 并借助金相显微镜对涂层磨损形貌进行表征。结果表明: 添加适量CeO₂可以改善涂层的摩擦磨损性能, 其最佳含量为2%, 此时摩擦因数和磨损量均最小, 分别为0.232和0.011 3 mm³; 同时结合强度从22 N提高到28.29 N。涂层磨损量随载荷的增大而增大; 而载荷小于8 N时, 涂层的摩擦因数随载荷的增大而减小, 当载荷大于8 N时, 摩擦因数又有回升趋势。添加稀土后涂层的承载能力有明显提高。未添加稀土时, 涂层产生严重剥离, 并发生磨粒磨损; 添加2% CeO₂后, 涂层发生轻微磨粒磨损, 耐磨性得到显著提高。

关键词: 稀土; MoS₂; 摩擦磨损; 涂层; 磨粒磨损

中图分类号: TG174.442; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)02-0106-07

Effects of CeO₂ Addition on Tribological Performance of MoS₂ Based Composite Coatings

QIU Ming^{1,2}, ZHANG Rui¹, LI Ying-chun¹, ZHOU Zhan-sheng¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan; 2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan)

Abstract: To improve the wear resistance and bearing capacity, MoS₂ based composite coatings with the different content additive CeO₂ were prepared on the surface of GCr15 steel via spraying process. An tribo-tester and a adhesion tester were used to investigate the tribological properties and the adhesion strength of the coatings. Meanwhile, the worn surfaces of the coatings was characterized by a metallurgical microscope. The results show that the reasonable addition of CeO₂ can improve the tribological properties of the MoS₂ based coatings. The friction coefficient and wear volume show the minimum value of 0.232 and 0.011 3 mm³ under the CeO₂ content of 2%, and the adhesion strength is also improved from 22 N to 28.29 N. With the increase of the load, the wear volume of the coating increases, while the friction coefficient decreases firstly, with a tendency to rise when the load is larger than 8 N. The bearing capacity of the coating is improved obviously with CeO₂ addition. The coatings without CeO₂ addition are severely stripped and abrasive wear occurred. While after the addition of 2% CeO₂, slight abrasive wear occurs on the coating surface and the wear resistance is improved significantly.

Keywords: rare earth; MoS₂; friction and wear; coating; abrasive wear

收稿日期: 2017-01-08; 修回日期: 2017-02-20

网络出版日期: 2017-03-10 08:15; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170310.0815.006.html>

通讯作者: 邱明(1969—), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 轴承设计及性能评价; E-mail: qiuming69@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51275155); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2015AA043004); 河南省科技创新杰出人才计划(154200510013)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51275155), National High-tech R&D Program of China (863 Program)(2015AA043004) and Outstanding Talent Fund Projects in Henan Province (154200510013)

引文格式: 邱明, 张瑞, 李迎春, 等. 添加CeO₂对MoS₂基复合涂层摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 106-112.

QIU M, ZHANG R, LI Y C, et al. Effects of CeO₂ addition on tribological performance of MoS₂ based composite coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 106-112.

0 引言

关节轴承在工作时,内外圈对偶面发生相对滑动,当载荷增大时,内圈钢表面和外圈钢表面的摩擦因数增大,使钢/钢摩擦副的磨损加剧,易导致关节轴承失效,在摩擦面上涂敷固体润滑涂层是减小摩擦副之间摩擦磨损的有效方法之一。

常见的固体润滑涂层有MoS₂^[1-2]、石墨^[3]、PTFE^[4-6]等。由于PTFE的表面能极低,润湿性能差,其涂层与基体的结合强度弱,转移膜在摩擦面上的附着性较差,导致做摩擦材料用PTFE有较严重的磨损;而石墨在空气环境中摩擦因数较高^[7-8]。MoS₂由于具有片层结构,在平行于层的平面方向具有非常低的剪切强度,而在垂直于层的方向的强度和硬度极高,因而MoS₂具有良好的减摩润滑特性^[9-10],应用十分广泛。由于纯MoS₂涂层在潮湿大气环境结构松散、硬度低且耐磨性不高,因而应用受限^[11],国内外很多学者一直在进行新型MoS₂的合成及其复合涂层的应用研究^[12-15]。

近年来,一些学者通过在MoS₂涂层中添加微量金属和一些润滑剂,以此来改善其摩擦学性能。Cardinal等^[16]利用脉冲电镀制备Ni-W-MoS₂复合涂层,并通过摩擦性能试验发现适当降低MoS₂含量可以减小复合涂层的摩擦因数。Balic等^[17-18]对MoS₂在复合材料中应用及其性能改善进行了研究。郭培锐等^[19]将MoS₂和PTFE混合,当二者质量比例为5:2时,复合涂层减摩润滑的协同效果最佳。稀土元素因特殊的4f电子层结构而具有优异的细化晶粒和改善摩擦学性能等作用。Ding等^[20]研究发现添加适量的CeO₂可以增强Co基复合涂层的耐磨性。张蕾等^[21]研究发现加入CeO₂后金属基复合涂层熔覆层组织得到细化,且枝晶生长的方向性减弱,显微硬度和耐磨性比未添加稀土的涂层有所提高。

通过对比发现,国内外对MoS₂涂层的研究主要为添加金属、金属化合物及其他润滑材料等来改善其耐磨性和摩擦学性能,而少有关于添加稀土改善MoS₂涂层的研究,因此把稀土应用于材料表面改性,不仅扩大了稀土的应用范围,同时可探究稀土在MoS₂涂层中的减摩润滑机理,促进固体润滑涂层的发展。文中以不同比例向MoS₂基减摩涂层中加入CeO₂,利用喷涂工艺制备自润滑涂层,主要研究CeO₂添加前后其摩擦学性能、粘接

性能及磨损机理变化,以期CeO₂在固体润滑涂层制备工艺中的应用提供借鉴。

1 试验方法

1.1 基体预处理

采用GCr15钢作为喷涂基体材料,尺寸大小为:Φ30 mm×10 mm。样片喷涂前依次用80、100、120号金相砂纸打磨至表面粗糙度Ra为0.4 μm左右,再用丙酮清洗除去试样表面的油污,自然晾干即可。

1.2 涂层制备过程

首先按照配方要求称取粘接剂环氧树脂,后依次称量并加入固体润滑剂MoS₂、石墨和含量(质量分数)为2%的CeO₂(99.99%,粒径:3~5 μm),然后用玻璃棒机械搅拌待其混合均匀,之后置于ZLD-300型搅拌器下,加入溶剂,并以300 r/min的转速搅拌3~5 min,同时加入相当于溶液体积1/3的锆珠,目的是使各组分混合更加充分、均匀。待各组分基本混合均匀后,转速调至1 200 r/min,为保证各组分分散均匀,搅拌过程中也可再滴加适量BYK-204分散剂(配方总质量以100 g计时,加入1~2滴),搅拌40 min或更长时间后加入固化剂聚酰胺,搅拌均匀后开始喷涂。

喷涂前将样片放入BPG-9030AH鼓风干燥箱中在100 ℃条件下加热5~7 min。取出样片后即可开始喷涂,调整H-2000喷枪压力为0.2 MPa,喷枪距离试样250~350 mm,涂层厚度为15~25 μm。喷涂完成后将试样在空气中放置2 h待溶剂充分挥发后,再放入鼓风干燥箱中在150 ℃条件下固化2 h,取出后空冷至室温。固化后涂层表面应光整,无明显孔隙、凹凸,粘结良好。

1.3 涂层性能测试

采用HSR-2M高速往复摩擦磨损试验机测试涂层的摩擦磨损性能。上试样为Φ6 mm的GCr15钢球,下试样为已制备的涂层样片,加载径向载荷分别为4、8和12 N;往复移动速度为150 r/min,往复移动长度为5 mm,往复移动时间为20 min,环境温度为23~25 ℃。磨损试验在摩擦试验结束之后进行,通过位移传感器测量摩擦试验留下的磨痕的体积磨损量,对每个涂层试样表面上的一条磨痕分别进行3次测量,取平均值作为磨损量。

摩擦因数的计算公式为:

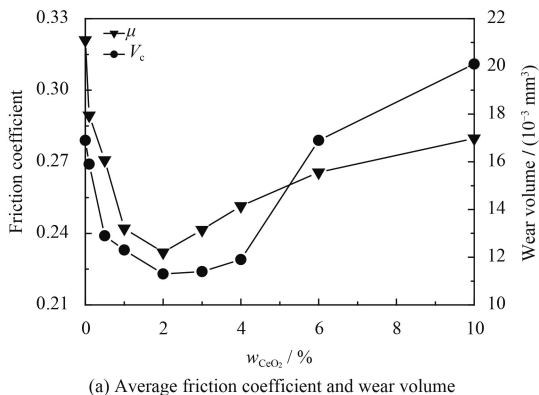
$$\mu = F_t / F_n \quad (1)$$

其中 F_t 为上、下试样摩擦副之间的摩擦力, N ; F_n 为施加在涂层试样上的径向载荷, N 。磨损量由表面轮廓仪精确地测量, 经位移传感器将信号输送至计算机, 磨损体积由式(2)计算:

$$V_c = \frac{\pi b^4}{4R} + 2bdh \quad (2)$$

式中 b 为磨痕半径, mm ; h 为磨痕深度, mm ; R 为球试件半径, mm ; d 为磨痕底长, mm ; V_c 为试样表面涂层磨损体积, mm^3 。

粘接性能采用WS—2005型涂层附着力自动划痕仪进行测量。根据GB/T9286—1998选用动载荷连续加载, 当划针将材料的涂层划破或表面剥落时会发出微弱的声信号, 此时的载荷值即为涂层与基体的结合强度。最后借助Leica-DMI3000倒置金相显微镜对涂层的磨损表面形貌进行观察和分析。



2 结果与讨论

2.1 CeO_2 对涂层摩擦学性能和粘接性能的影响

图1分别给出了涂层的摩擦因数和磨损量随 CeO_2 含量的变化和涂层的粘接性能对比结果。从图1(a)中可以看出, 随着 CeO_2 含量的增加, 涂层的摩擦因数呈现先降低后增加的趋势。当 CeO_2 含量低于2%时, 摩擦因数和磨损量随着 CeO_2 含量的增加而降低; 当 CeO_2 含量高于2%时, 摩擦因数和磨损量随着 CeO_2 含量的增加而升高; 当 CeO_2 含量为2%时, 涂层摩擦因数和磨损量均达到最低, 分别为0.232和 0.0113 mm^3 。稀土元素具有特殊4f电子结构, 化学活性强, 在摩擦表面熔点低, 其氧化物 CeO_2 用作润滑添加剂时可起到润滑作用^[22], 另外和 MoS_2 、石墨混合之后, 均匀分散在涂层体系中, 并有效填充了复合涂层组织的各成分粒径间隙, 对涂层起到机械强化作用和润滑作用, 表现出良好的协同效果。在摩擦过程

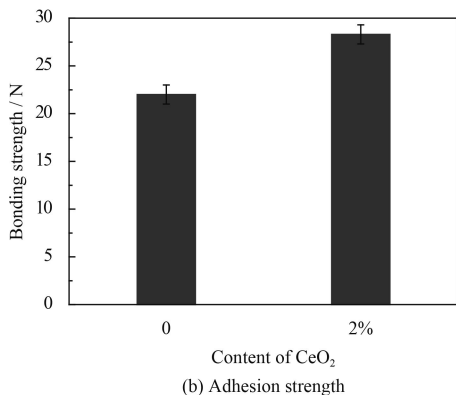


图1 载荷为8 N时 CeO_2 含量对 MoS_2 基涂层摩擦学性能和结合强度的影响

Fig.1 Effects of CeO_2 concent on tribological performance and adhesion strength of MoS_2 based coatings of the load is 8 N

中, 适量的 CeO_2 由于层间剪切力小, 易滑动, 起到“微滚珠”作用, 同时填充了磨损表面的凹处, 增大了摩擦对偶面之间的接触面积, 降低对偶面的粘连作用, 使摩擦因数和磨损程度大幅降低。但随着 CeO_2 含量的继续增加, 涂层润滑体系间各成分的协同效果降低, 涂层沉积时的机械结合作用减弱, 导致大量的 CeO_2 颗粒在摩擦过程脱落, 使得磨削更加剧烈, 因而摩擦因数和磨损量开始升高。连亚峰等^[23]也发现不同添加量的 CeO_2 会使涂层抗磨性能产生较大差异, 加入过量的 CeO_2 时会降低涂层的抗磨性能, 因此, 合理配比可使 MoS_2 涂层和 CeO_2 之间产生配合协同作用, 使其抗

磨减摩效果最优。图1(b)为添加稀土前后涂层的结合强度, 可以看出未添加稀土 CeO_2 时, 涂层的结合强度为22 N, 添加2% CeO_2 后涂层的结合强度为28.29 N, 相比提高了28.6%, 说明稀土氧化物的添加, 增强了涂层和基体的之间的附着力。

2.2 载荷对涂层摩擦磨损性能的影响

图2为添加2% CeO_2 前后 MoS_2 涂层在干摩擦下的摩擦因数和磨痕截面随载荷的变化。从图2中可以看出, 改性前涂层摩擦磨损过程呈现3个阶段特征。阶段1: 跑合期。开始于摩擦磨损试验初期, 摩擦因数值较低, 持续时间短。在这一阶段, 摩擦因数上升速度较缓。阶段2: 过渡期。摩擦因数

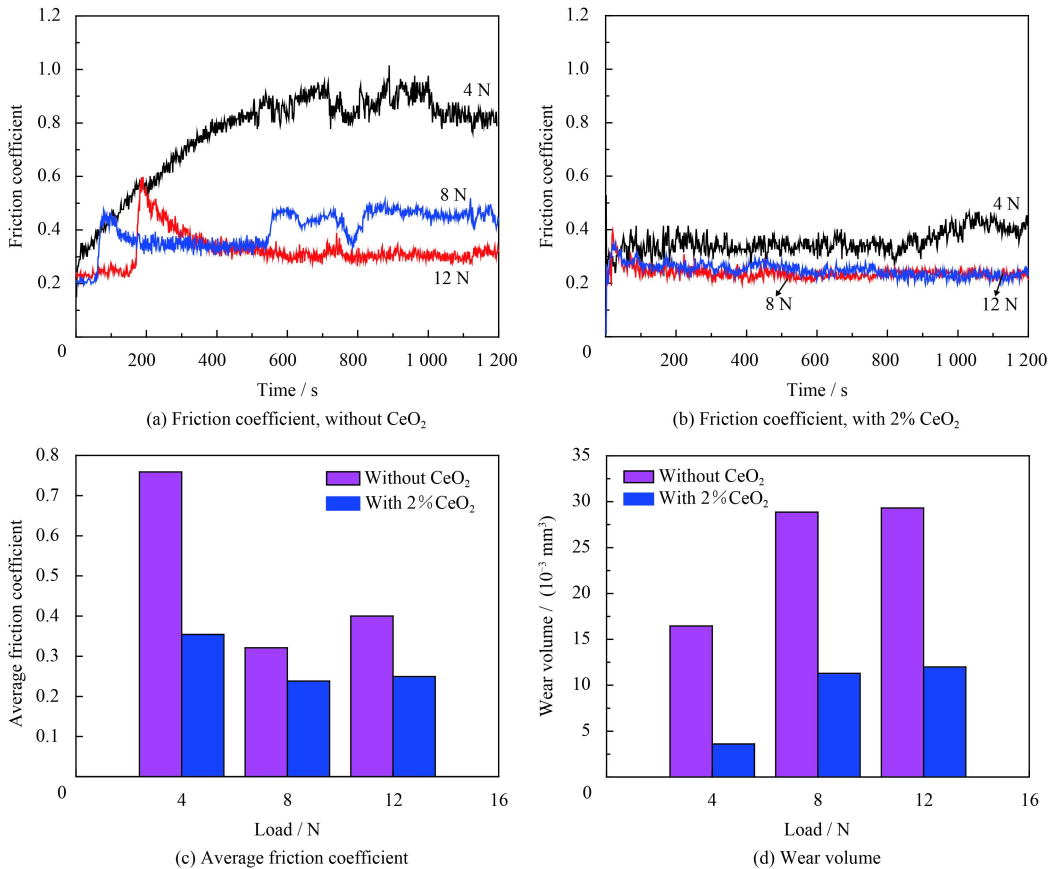


图 2 载荷对MoS₂基涂层的摩擦因数和磨损量的影响

Fig.2 Effects of applied load on friction coefficient and wear volume of MoS₂ based coatings

瞬间突然增大, 然后又缓慢降低。阶段3: 稳定期。该阶段摩擦因数稳定, 幅值较低, 维持时间最长。

摩擦磨损试验中, 在钢球往复移动初期, 涂层和钢球对偶面实际接触峰点压力很高, 磨损和塑性变形非常严重, 因而会出现摩擦因数在一定范围内波动性较大。随着对摩时间的增加, 摩擦副接触面形态得到一定改善, 钢球与涂层接触面压力减小, 摩擦因数逐渐降低, 进入稳定磨损阶段, 摩擦因数在一定时间范围内保持稳定。

未添加CeO₂的MoS₂基涂层在径向载荷为4 N的测试条件下, 摩擦因数主要呈现出跑合期和稳定期。跑合期摩擦因数随时间不断增大, 在测试中段600 s左右时摩擦因数达到峰值, 为0.85左右; 之后变化趋势不明显, 仅在小范围内波动。当径向载荷为8 N和12 N时, 磨损阶段均呈现上述的跑合期、过渡期和稳定期, 且摩擦因数均比4 N条件下明显降低。相较于12 N, 在径向载荷为8 N时, 跑合期增加到200 s, 且进入稳定期后摩擦因

数相对更低, 波动性更小。

添加2% CeO₂的MoS₂基涂层在4、8和12 N条件下, 摩擦磨损过程无明显的跑合期, 且过渡期时间短, 波动小, 很快进入稳定期(图2(b))。结合图2(c)给出的3种载荷下涂层的平均摩擦因数可知, 在一定范围内, 随载荷增加摩擦因数逐渐降低, 但随着载荷继续增加, 摩擦因数出现微小回升趋势。分析认为: 摩擦特性试验中, 对偶面接触副由开始的点接触逐渐扩展为面接触。随着载荷增加, 磨损加重, 磨痕加宽, 接触面积增大, 且增加速度大于载荷变化率, 因而摩擦因数逐渐减小, 但是当载荷增大到一定程度时, 接触面积的增长速度减缓, 故导致摩擦因数开始回升。对比添加CeO₂前后的平均摩擦因数, 可以看出, 适量的CeO₂可以明显改善MoS₂基涂层的摩擦学性能, 且从摩擦因数随时间变化曲线可以看出, 添加CeO₂后涂层摩擦因数更低且稳定, 性能更优。从图2(d)给出的磨损体积可以看出, 随着载荷增大, 磨损体积增大; 添加CeO₂后, 在相同载荷条

件下涂层磨损体积显著降低，说明耐磨性得到明显提高。另外，添加稀土后在8 N和12 N条件下涂层的磨损体积仍低于未添加稀土涂层的磨损体积，说明CeO₂还增强了MoS₂基涂层的承载能力。

2.3 磨损形貌及磨损机理

图3为CeO₂粒子在涂层中的面分布图，可以看出其均匀分布在涂层表面，表明CeO₂颗粒可以均



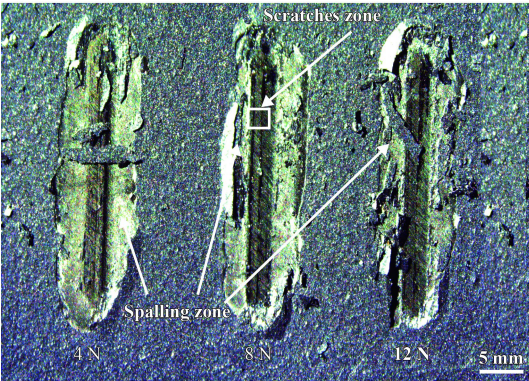
图 3 CeO₂颗粒在涂层中的分布

Fig.3 Distribution of CeO₂ in the coatings

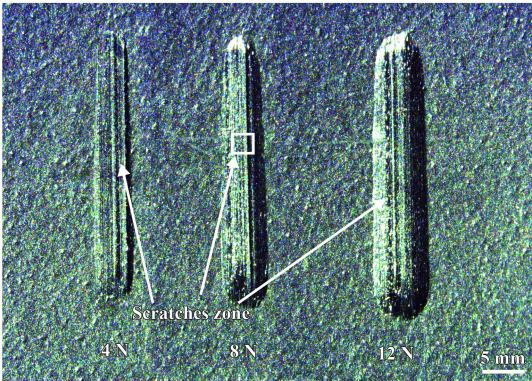
匀的分布在涂层中。

图4给出了未添加稀土和添加2% CeO₂的MoS₂基涂层在不同载荷下的磨痕整体形貌和局部放大图。从图4(a)可以看出，未添加稀土的MoS₂基涂层经过摩擦磨损试验后，磨损区域呈现两个部分：中心磨穿区和两侧剥离区。在4、8和12 N径向载荷条件下，涂层均遭到严重破坏，MoS₂基涂层被磨穿致GCr15基体裸露，其中载荷为12 N时，基体裸露程度最严重，8 N时次之，4 N时基体裸露程度最轻。在磨穿区两侧涂层并未受到压力，但有部分裂痕以及大片涂层被压溃的情况存在，结合图1(b)中结合强度测试结果，说明未添加稀土时涂层结合强度低，被磨损时由于受到对偶面的挤压作用，会大量剥离产生条状磨屑。图4(c)为图4(a)中磨痕区域的局部放大图，可以看出，涂层表面产生大量细长的犁沟，说明涂层表面发生了磨粒磨损。

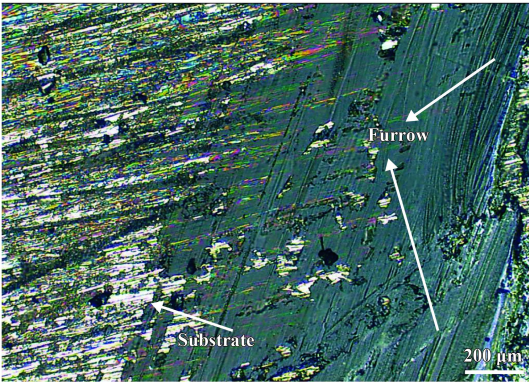
从图4(b)中可以看到，添加2%稀土CeO₂后，随载荷的不断增大，磨痕不断加宽，磨痕深度也在加深。对比图4(a)可知，在相同载荷条件下，添



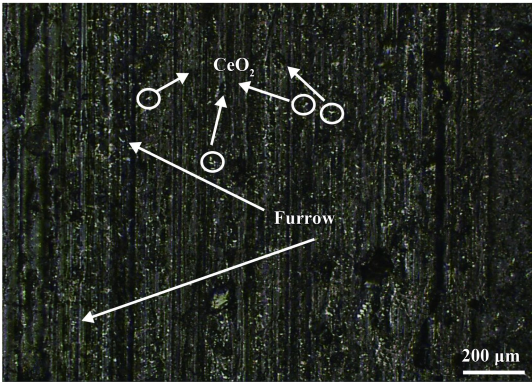
(a) Coatings without CeO₂ under different loads



(b) Coatings with 2% CeO₂ under different loads



(c) Magnification of marked area in (a)



(d) Magnification of marked area in (b)

图 4 不同载荷下添加稀土前后涂层的磨痕

Fig.4 Scratches of coatings before and after adding rare earth under different loads

加2%稀土后涂层的磨损程度明显降低,并且没有剥离区域产生,涂层亦没有磨穿。这是由于在干摩擦过程中摩擦副接触而使表面温度快速升高,导致材料软化,使涂层承载能力降低而导致涂层发生粘着转移和剥落。添加CeO₂之后,一方面增加了涂层对基体金属表面的润湿性,提高了涂层与基体的结合强度,减轻了剥离程度;另一方面起到一定的弥散强化作用,增强了涂层的抗粘着磨损能力和抗塑性变形能力,从而抑制涂层发生严重磨损,MoS₂基涂层的耐磨性大大改善。另外,结合图4(d)中磨痕的放大图,可以看出有少量磨屑堆积在磨痕两侧及末端,磨损过程中涂层脱落之后在摩擦对偶面形成细小磨屑,堆积且被压至磨损表面,构成三体摩擦状态,产生犁沟的同时也减缓了磨损程度,降低了摩擦因数。然后在摩擦副的反复磨碾下破裂形成小磨屑,磨痕边缘的磨屑继续参与磨损过程,直到磨屑颗粒小到一定程度排出。

3 结 论

(1) 随着CeO₂含量的增加,MoS₂基减摩涂层的摩擦因数和磨损量呈现出先降低后升高的规律。当CeO₂含量为2%时,摩擦因数和磨损量均达到最低,分别为0.232和0.011 3 mm³;添加2% CeO₂后涂层的结合强度从22 N提高到28.29 N。

(2) 涂层的摩擦因数随载荷的增大先减小,之后有所回升;而磨损量随载荷的增大而增大,添加稀土后涂层的承载能力得到显著提高。

(3) 未添加稀土时,涂层磨损严重,产生严重剥离,并发生磨粒磨损;添加稀土后,涂层发生轻微磨粒磨损,耐磨性得到显著提高。

参考文献

- [1] LUO J, ZHU M H, WANG Y D, et al. Study on rotational fretting wear of bonded MoS₂ solid lubricant coating prepared on medium carbon steel[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1565-1570.
- [2] 王玮, 王引真, 王海芳, 等. 二硫化钼含量对自润滑涂层组织及性能影响[J]. 中国表面工程, 2006, 19(20): 43-46.
WANG W, WANG Y Z, WANG H F, et al. Effect of MoS₂ content on microstructures and performances of the self-lubricant coating[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(20): 43-46 (in Chinese).
- [3] 赵敏海, 刘爱国, 郭面焕, 等. 石墨固体自润滑材料研究现状[J]. 焊接, 2007(12): 24-27.
- [4] ZHAO M H, LIU A G, GUO M H, et al. Research status of graphite solid self-lubricating material[J]. Journal of Welding, 2007(12): 24-27 (in Chinese).
- [5] SEUNG MINYEO, ANDREAS A. Polycarpou. Fretting experiments of advanced polymeric coatings and the effect of transfer films on their tribological behavior[J]. Tribology International, 2014, 79(11): 16-25.
- [6] SHEN J T, TOP M. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO₂ particles[J]. Wear, 2015, 322-323: 171-180.
- [7] 孙瑞敏, 赵辉, 周永恒. 聚酰胺酰亚胺复合涂层的制备及摩擦磨损性能研究[J]. 涂料工业, 2014, 44(7): 1-4.
SUN R M, ZHAN H, ZHOU Y H. Preparation of PAI composite coatings and its frictional wear performance[J]. Paint & Coatings Industry, 2014, 44(7): 1-4 (in Chinese).
- [8] GRILL A. Tribology of diamond-like carbon and related materials: an updated review[J]. Surface & Coatings Technology, 1997, 94-95(97): 507-513.
- [9] 胡志彪, 李贺军, 付前刚, 等. 低摩擦因数固体润滑涂层研究进展[J]. 材料工程, 2006, 21(3): 60-68.
HU Z B, LI H J, FU Q G, et al. Research progress on low friction coefficient solid lubricating coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, 21(3): 60-68 (in Chinese).
- [10] SCHAT T W, KOTULA P G, PRASAD S V. Friction and wear mechanisms in MoS₂/Sb₂O₃/Au nanocomposite coatings[J]. Acta Materialia, 2010, 58(12): 4100-4109.
- [11] LANSDOWN A R. Molybdenum disulphide lubrication[M]. Elsevier, 1999, 45-47.
- [12] CAO T K, LE H T, ZHANG M. The friction and wear behavior of Cu/Cu-MoS₂ self-lubricating coating prepared by electrospray deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270: 24-32.
- [13] WANG H D, XU B S, LIU J J, et al. Characterization and anti-friction on the solid lubrication MoS₂ film prepared by chemical reaction technique[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(5): 535-539.
- [14] CARDINAL M F, CASTRO P A, BAXI J, et al. Characterization and frictional behavior of nanostructured Ni-W-MoS₂ composite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204(1/2): 85-90.
- [15] ZHOU H, ZHU J, WANG Q P. The effect of Ti content on the structure and mechanical properties of MoS₂-Ti composite coatings deposited by un-balanced magnetron sputtering system[J]. Physics Procedia, 2011, 18: 234-239.
- [16] ZHANG P, FANG Y H, DAI S. Preparation and characterization of MoS₂-Ti₄/MoS₂-Ti₄ nano multilayer coating with excellent wear properties [J]. Materials Letters, 2016, 173:

- 35-38.
- [16] CARDINAL M F, CASTRO P A, BAXI J, et al. Characterization and frictional behavior of nanostructured Ni-W-MoS₂ composite coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204(1/2): 85-90.
- [17] BALIC E E, BLANCHET T A. Thrust-washer tribological evaluation of PS304 coatings against Rene 41[J]. *Wear*, 2005, 259(7/8/9/10/11/12): 876-881.
- [18] HIROTAKA K, MASAHIRO T, YOSHIRO I, et al. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide[J]. *Wear*, 2003, 255(1/2/3/4/5/6): 573-578.
- [19] 郭培锐, 邱明, 李迎春, 等. MoS₂对PTFE基粘结固体润滑涂层摩擦学和附着性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(7): 82-85.
- GUO P R, QIU M, LI Y C, et al. Effects of MoS₂ on tribology and adhesion properties of polytetrafluoroethylene based bonded lubrication coating[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2015, 39(7): 82-85 (in Chinese).
- [20] DING L, HU S S. Effect of nano-CeO₂ on microstructure and wear resistance of Co-based coatings[J]. *Surface Coating & Technology*, 2015, 276: 565-572.
- [21] 张蕾, 陈华辉, 赵会友. CeO₂对WC-Co/Ni60B激光熔覆涂层组织和磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(6): 485-491.
- ZHANG L, CHEN H H, ZHAO H Y, et al. Effects of CeO₂ on structure and wear resistance of laser cladding WC-Co/Ni60B coatings[J]. *Tribology*, 2008, 28(6): 485-491 (in Chinese).
- [22] 王莉, 朱达川, 陈国需. 白云母/CeO₂复合粉体的制备及其摩擦学性能研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(5): 72-76.
- WANG L, ZHU D C, CHEN G X. Study of preparation and tribological behaviors of muscovite/CeO₂ compound particles[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(5): 72-76 (in Chinese).
- [23] 连亚峰, 薛群基, 张绪寿, 等. 氟化物及二氧化铈添加剂对润滑脂的抗磨和极压性能的影响[J]. *中国稀土学报*, 1995, 13(1): 39-44.
- LIAN Y F, XUE Q J, ZHANG X S, et al. Antiwear and extreme pressure properties of fluoride and CeO₂ as additive in lubricating grease[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 1995, 13(1): 39-44 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)