

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.01.016

重型车辆发动机电镀 Cr 活塞环的摩擦学性能^{*}

李 奇^a, 王宪成^a, 蔡志海^b, 底月兰^b, 何 星^a

(装甲兵工程学院 a. 机械工程系 b. 装备再制造工程系, 北京 100072)

摘 要: 利用 SRV 试验机模拟重型车辆发动机电镀 Cr 活塞环/缸套摩擦副的工作状态, 测试了不同条件下摩擦副的摩擦因数和磨损量。采用扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)分析了磨痕形貌和表面化学成分, 研究了电镀 Cr 活塞环的磨损机制。结果表明, 随载荷的增加, 摩擦副的摩擦因数减小, 总失重量增加。随滑动频率的增加, 摩擦副的摩擦因数减小, 总失重量先减小后增加, 滑动频率为 20 Hz 时, 总失重量达到最小值。随温度的升高, 摩擦副的摩擦因数增大, 总失重量增加。活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主, 在高载荷, 高频率或高温条件下, 活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损。

关键词: 活塞环; 缸套; 摩擦因数; 磨损量; 磨损机理

中图分类号: TQ153; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)01-0091-07

Tribological Property of Plated Cr Piston Ring for Heavy Vehicle Engine

LI Qi^a, WANG Xian-cheng^a, CAI Zhi-hai^b, DI Yue-lan^b, HE Xing^a

(a. Department of Mechanical Engineering, b. Department of Equipment Remanufacture Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Working conditions of piston rings coated with Cr platings/cylinder liner mate for heavy vehicles were simulated by SRV test rig. Different working conditions of friction coefficient and weight loss of the mate were tested. The wear marks and chemical contents were analysed by SEM and EDS. Wear mechanisms of piston rings were researched. The results show that the friction coefficient of mate decreases and weight loss increases with increasing. The friction coefficient decreases, while the weight loss first decreases then increases with increasing sliding frequency. The weight loss reaches the minimum when the sliding frequency is 20 Hz. Both the friction coefficient and weight loss increase with increasing of the temperature. The main wear mechanism of piston rings and cylinder liners is abrasive wear. The wear mechanisms of piston rings coated with Cr platings are abrasive wear and adhesion wear under the conditions of high load, frequency, or temperature.

Key words: piston ring; cylinder liner; friction coefficient; weight loss; wear mechanisms

0 引 言

近年来,随着发动机不断向高功率、高转速、长寿命方向发展,活塞环/缸套摩擦副的工作条件更加苛刻,经常处于高温、高压、边界润滑等恶劣工作状态,这就要求活塞环与缸套具备良好的匹配性,两者具有优良的耐磨性和可靠性。然而,当前大部分重型车辆发动机在使用过程中仍然沿用传统的电镀 Cr 活塞环。虽然大量学者对

电镀 Cr 活塞环进行过研究^[1-3],但尚缺少采用实际的电镀 Cr 活塞环和缸套,在摩擦磨损试验机上不同参数的试验,及其磨损机制系统深入的分析。

因此,文中将实际使用的活塞环和缸套加工成试样,在 SRV 试验机上模拟活塞环/缸套摩擦副的工作状态,测试了不同条件下摩擦副的摩擦因数和磨损量,并结合磨痕形貌和能谱分析,研

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2013-01-06; 基金项目: * 国家自然科学基金(50901089); 军队重大科研项目(2012ZB02)

作者简介: 李奇(1982—),男(汉),辽宁沈阳人,博士后;研究方向: 发动机关键零部件摩擦磨损、表面工程、应力腐蚀

网络出版日期: 2013-01-22 11:19; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130122.1119.001.html>

引文格式: 李奇,王宪成,蔡志海,等. 重型车辆发动机电镀 Cr 活塞环的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 91-97.

究了摩擦副的磨损机制。为改善摩擦副的减摩耐磨性提供试验数据,为开展重型车辆发动机活塞环新一代的表面处理技术研究提供参考。

1 试验

采用 Optimol Instruments 公司生产的 SRV[®]4 高温摩擦磨损试验机。它能够较好的模拟活塞环/缸套往复运动的工作方式,从而对实际应用更具指导意义^[4]。为了模拟发动机中活塞环/缸套的实际运动方式,文中采用相对滑动的面接触运动形式。如图 1 所示,上试样取自实际球面梯形环的一部分,材料为 65 Mn 钢,表面电镀 Cr 工艺;下试样是用实际缸套加工制成的,材料为 42 MnCr52 钢,采用中频淬火工艺处理,尺寸为 20 mm×12 mm×5 mm。同时设计了符合 SRV 试验机要求的下卡具,设计的卡具有便于拆卸,定位准确的优点。试验过程中固定下试样不动,使上试样进行往复运动。试样之间的接触部分采用 CD10W/40 号机油进行润滑。

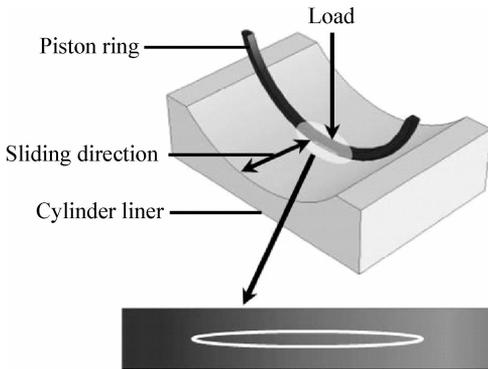


图 1 试验中活塞环/缸套试样的接触方式和运动形式

Fig. 1 Contacting and sliding modes of piston ring/cylinder liner simulated by SRV test rig

通过发动机台架考核试验可知,发动机实际工作过程中,气缸内壁最高温度约为 200 ℃,缸内最大爆发压力约为 10 MPa^[5],换算成此试验机最大载荷为 400 N。当活塞环处在止点附近时,活塞环-缸套摩擦副之间温度极高,润滑油膜非常稀薄,处于边界润滑状态,所以文中采取 Jensen^[6]等人的方法模拟边界润滑。在低频率、高载荷的测试条件下,可以近似地模拟活塞环在上止点附近的运行状况,反映活塞环-缸套摩擦副在上止点附近的摩擦磨损特性。摩擦学试验条件见表 1~3。

表 1 不同载荷条件下的摩擦学试验参数

Table 1 Parameter of tribological tests under different loads

Load/ N	Frequency/ Hz	Temperature/ ℃	Time/ s	Stroke/ mm
50	15	100	7 200	4
170	15	100	7 200	4
290	15	100	7 200	4
400	15	100	7 200	4

表 2 不同滑动频率条件下的摩擦学试验参数

Table 2 Parameter of tribological tests at different frequencies

Load/ N	Frequency/ Hz	Temperature/ ℃	Time/ s	Stroke/ mm
170	10	100	7 200	4
170	15	100	7 200	4
170	20	100	7 200	4
170	25	100	7 200	4

表 3 不同温度条件下的摩擦学试验参数

Table 3 Parameter of tribological tests at different temperatures

Load/ N	Frequency/ Hz	Temperature/ ℃	Time/ s	Stroke/ mm
170	15	50	7 200	4
170	15	100	7 200	4
170	15	150	7 200	4
170	15	200	7 200	4

试验前后,采用无水乙醇对活塞环和缸套试样进行超声波清洗。利用 Nova NanoSEM 450/650 型高分辨场发射扫描电镜观察活塞环、缸套表面摩擦磨损后的微观形貌,采用 Feature Max 型 X 射线能谱仪分析表面元素分布情况,分析划伤、犁沟及金属黏着的转移、脱落状态。用精度为 0.1 mg 的天平称量试样磨损前后的质量,所得质量差为试样的磨损量。

2 试验结果与分析

2.1 不同载荷条件下的摩擦学性能

图 2 是摩擦副在不同载荷下的摩擦因数。

由图可见,摩擦副的摩擦因数随载荷的增加而减小。当载荷从 50 N 增加到 170 N 时,摩擦因数下降的较为明显,而载荷从 170 N 增加到 400 N 时,摩擦因数下降的较为平缓。与 50 N 相比,载荷为 400 N 时摩擦因数下降了约 26%。在摩擦过程中,随着载荷的增加,摩擦表面的微凸体发生变形,导致接触面积增加。由于 Cr 电镀层具有较高的硬度和承载能力,导致载荷增加的比例大于剪切强度和接触面积增加比例的乘积,所以摩擦副的摩擦因数随载荷的增加而减小^[7-8]。

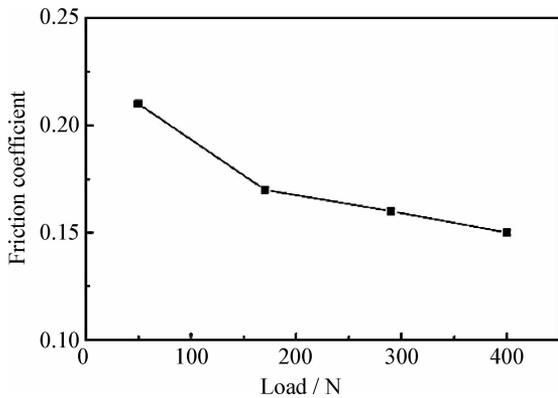


图 2 不同载荷下的摩擦因数

Fig. 2 Friction coefficient of mate under different loads

图 3 是摩擦副在不同载荷下的磨损总失重量。总体上,摩擦副的总失重量随载荷的增加而增加。当载荷为 50 N 和 170 N 时,总失重量增加较为平缓,当载荷超过 170 N 后,随载荷的增加,总失重量增加明显。与 50 N 相比,载荷为 400 N 时摩擦副总失重量增加了约 47%。

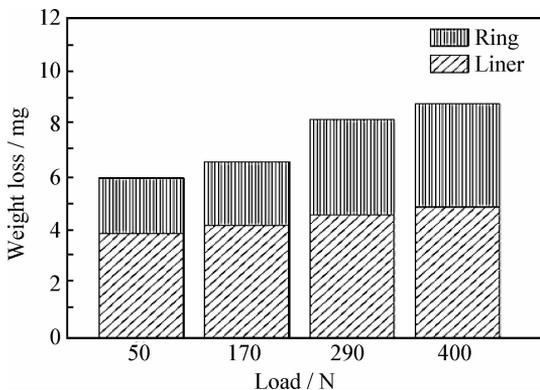


图 3 不同载荷下的磨损总失重量

Fig. 3 Weight loss of mate under different loads

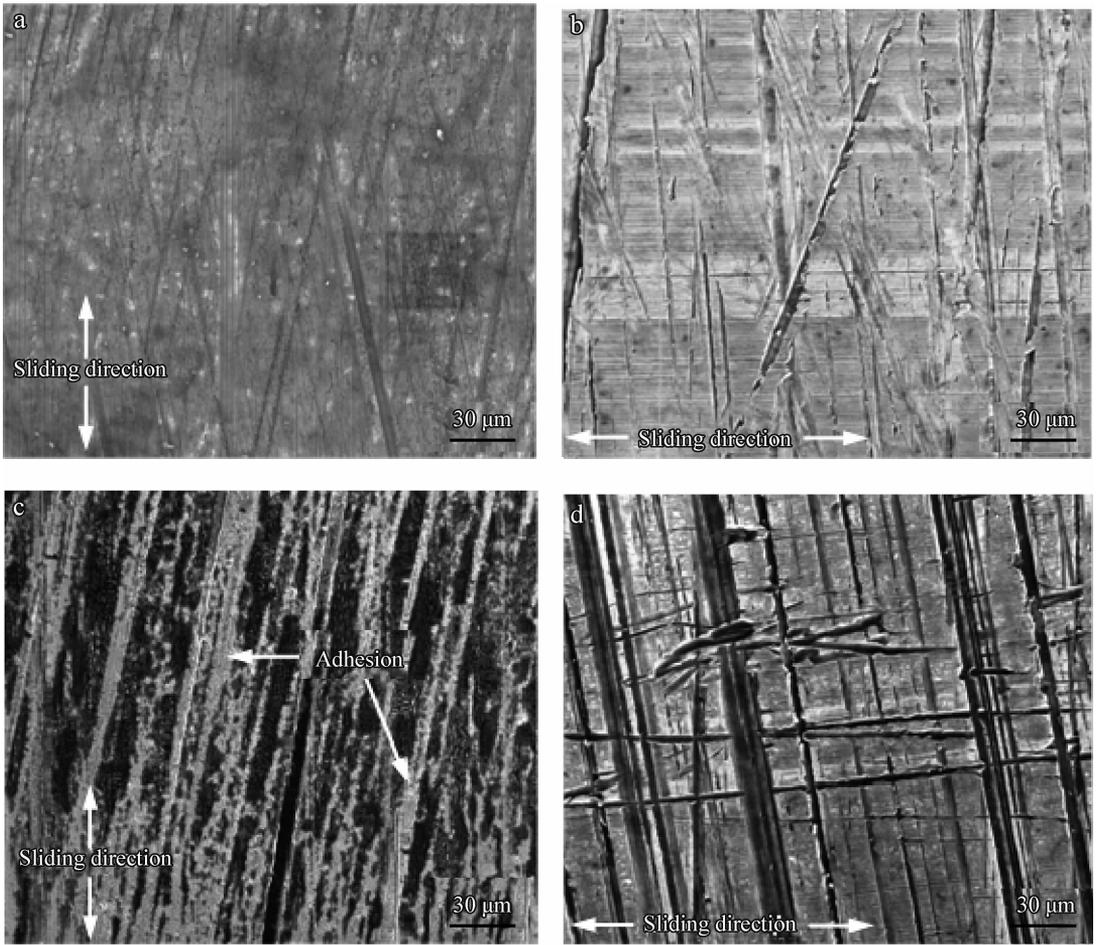
图 4 是摩擦副在不同载荷下磨损后的磨痕

形貌。当载荷为 50 N 时,活塞环表面由于磨屑的犁削作用,形成轻微的犁沟,与之对磨的缸套表面划痕呈细且浅的长条状存在,活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主(图 4(a),(b))。当载荷增加到 400 N 时,与前几种载荷相比,活塞环表面出现了严重的磨粒磨损,以及摩擦过程中因黏着-摩擦热产生的黏着磨损(图 4(c)),此时活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损,缸套表面犁沟明显加深加宽(图 4(d)),导致磨损失重量继续增加。

从图 4(c)可看出,活塞环表面覆盖着条状深色区域。通过能谱进一步分析表明,该区域有一定量来自机油的元素:P、Zn、Ca,说明在摩擦过程中,通过摩擦化学反应,在活塞环表面形成摩擦反应膜。这是因为,当载荷增加到一定程度,摩擦副接触面会产生很大的塑性应力和剪切力,产生大量的摩擦热,导致摩擦副接触处摩擦温度升高,在塑性应力和高摩擦温度下很容易产生磨屑的转移从而形成摩擦反应膜^[9-10]。摩擦反应膜可以减小摩擦副之间的接触面积,这是摩擦因数会降低的另一个原因。此时,虽然摩擦副之间的接触面积减小了,但是作用在已接触的点上的压力增加较大,因此磨损失重量增加较多^[11]。

2.2 不同滑动频率条件下摩擦副的摩擦学性能

图 5 为摩擦副在不同滑动频率时的摩擦因数。由图可知,随滑动频率的增加,摩擦副的摩擦因数减小。从 10 Hz 到 15 Hz,摩擦因数降低幅度很小,当频率超过 15 Hz 以后,摩擦因数降低幅度比较明显。与 10 Hz 相比,频率为 25 Hz 时摩擦因数下降了约 14%。图 6 为摩擦副在不同滑动频率时的磨损总失重比较图。摩擦副的总失重量随滑动频率的增加,先减小后增加。与 10 Hz 相比,滑动频率为 20 Hz 时,摩擦副的总失重量达到最小值,下降了约 31%,频率为 25 Hz 时摩擦副总失重量增加了约 9%。随着滑动频率增加,润滑油膜变厚,减小了摩擦副之间的直接接触,所以摩擦因数减小。当滑动频率增加到 25 Hz 时,摩擦副之间产生的表面瞬间高温,将显著降低材料的强度^[12],发生表面局部熔化而降低抗剪切强度,因此摩擦因数降低到熔融层的黏性力所决定的较低数值,但是材料表面的局部熔化所产生的黏着磨损会导致磨损失重量迅速增加。



(a) Piston ring, 50N (b) Cylinder liner, 50N (c) Piston ring, 400N (d) Cylinder liner, 400N

图4 不同载荷下磨损后的磨痕形貌

Fig. 4 SEM morphologies of wear marks of mate under different loads

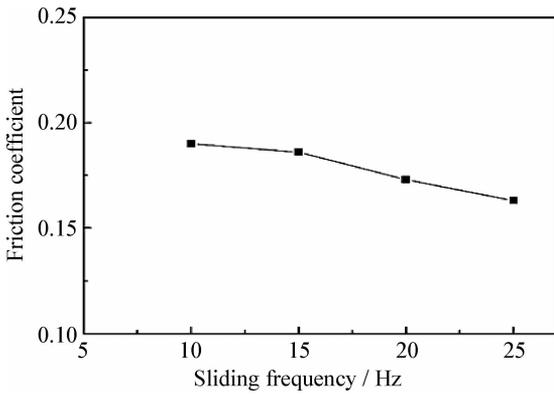


图5 不同滑动频率时的摩擦因数

Fig. 5 Friction coefficient of mate at different sliding frequencies

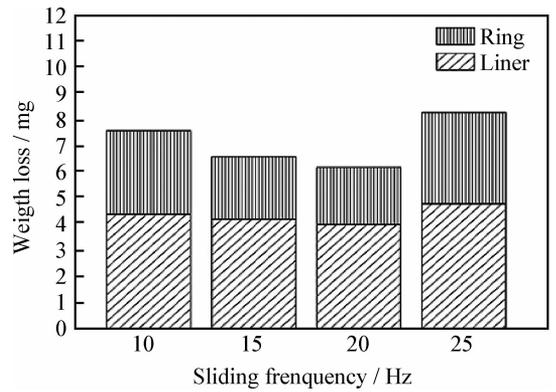
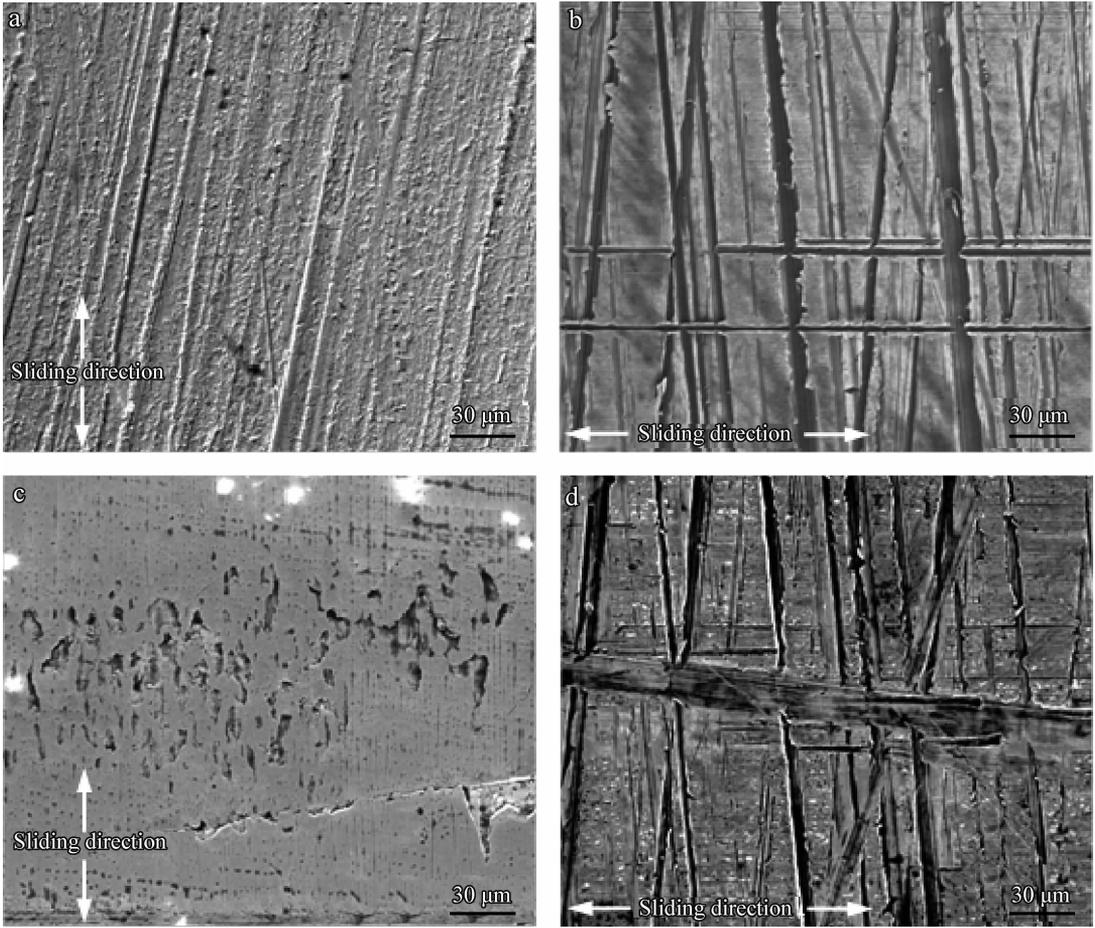


图6 不同滑动频率时的磨损总失重量

Fig. 6 Weight loss of mate at different sliding frequencies

图7为摩擦副在不同滑动频率时磨损后的磨痕形貌。当滑动频率为10 Hz时,活塞环表面

由于磨屑的犁削作用,形成清晰的犁沟,与之对磨的缸套表面也存在清晰的犁沟,活塞环和缸套



(a) Piston ring, 10 Hz (b) Cylinder liner, 10 Hz (c) Piston ring, 25 Hz (d) Cylinder liner, 25 Hz

图 7 不同滑动频率时磨损后的磨痕形貌

Fig. 7 SEM morphologies of wear marks of mate at different sliding frequencies

的磨损机理以磨粒磨损为主(图 7(a),(b))。当频率增加到 25 Hz 时,摩擦副摩擦过程中产生的热量增加,摩擦面温度升高,导致边界膜分解破裂,磨粒或缸套与 Cr 电镀层表面直接接触,产生瞬时“闪温点”,使镀层处于熔融状态与磨粒或缸套焊合在一起,形成黏着,摩擦副相对运动的瞬间焊合点被撕裂,产生黏着磨损。此时活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损,导致磨损失重量迅速增加(图 7 (c),(d))。

图 8 是摩擦副在不同温度下的摩擦因数。从图中可以看出,摩擦副的摩擦因数随温度的升高而增大。与 50 °C 相比,温度升高到 200 °C 时摩擦因数增大了约 12%。图 9 是摩擦副在不同温度下的磨损总失重图。由图所示,摩擦副的总失重量随温度的升高而增加。与 50 °C 相比,温度为 200 °C 时摩擦副总失重量增加了约 10%。在低温条件下,电镀 Cr 涂层外表面孔隙以及缸

套表面的珩磨纹会储存一定量的润滑油,摩擦表面的润滑状态良好,持续的润滑效果使得摩擦因数和磨损失重量都比较低。随着温度的升高,活塞环和缸套表面开始软化,润滑油逐渐挥发,摩擦副表面的润滑状态恶化,导致摩擦因数和磨损失重量都迅速上升。

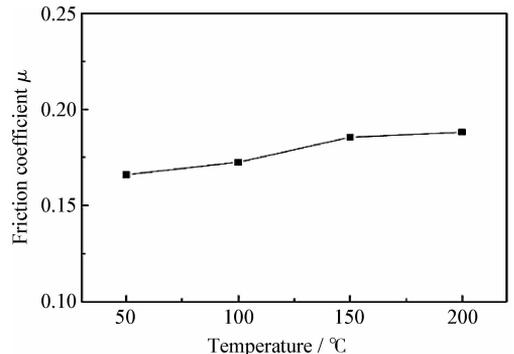


图 8 不同温度下的摩擦因数

Fig. 8 Friction coefficient of mate at different temperatures

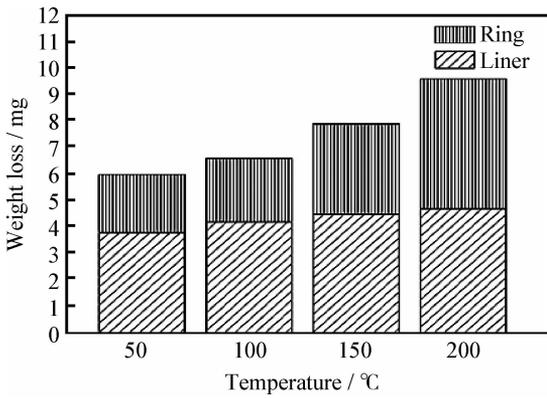
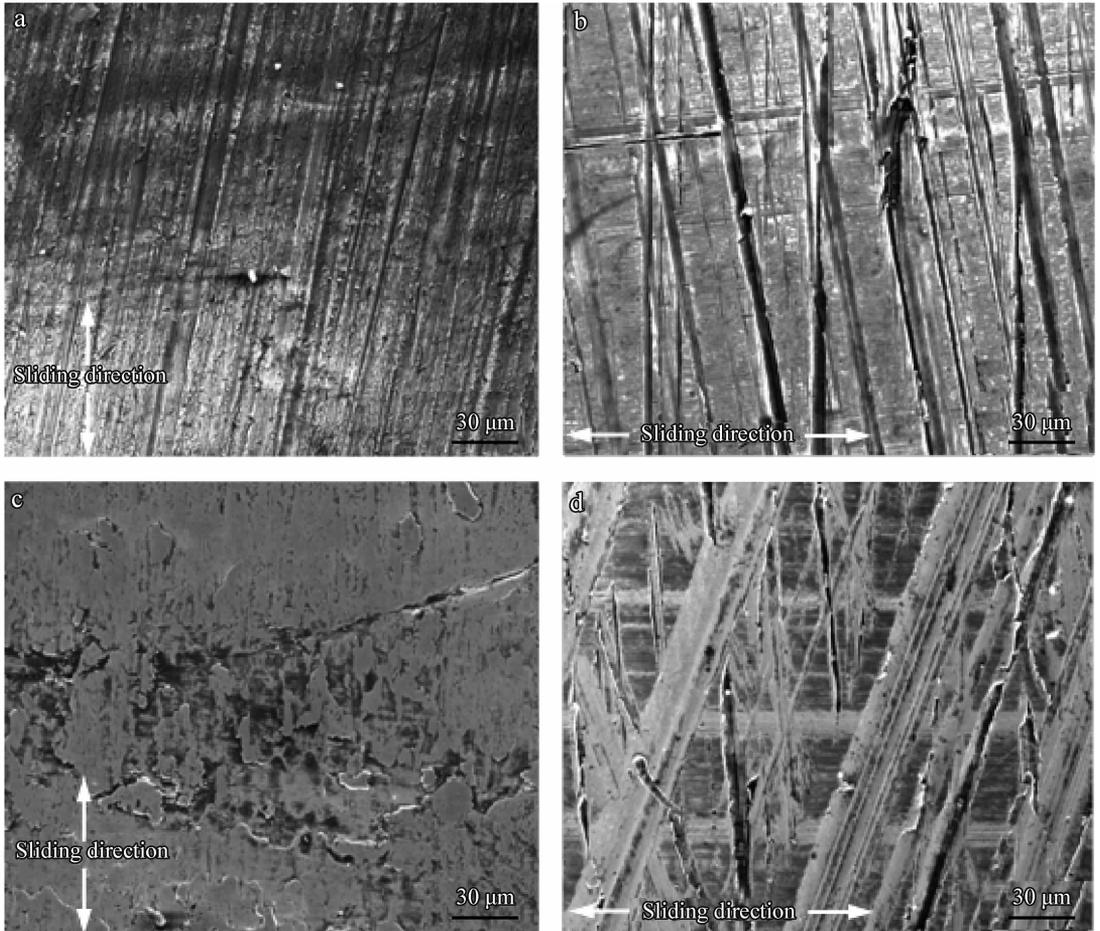


图9 不同温度下的磨损总失重量

Fig. 9 Weight loss of mate at different temperatures

图10是摩擦副在不同温度条件下磨损后的磨痕表面形貌。当温度为50℃时,活塞环和缸套表面的微凸体在平行于摩擦方向遭受剪切,发生塑性变形,破碎的微凸体作为磨屑沿摩擦方向犁削摩擦副的表面,导致活塞环表面存在均匀的犁沟,与之对磨的缸套表面划痕比较轻微,犁沟密度较小。此时活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主(图10(a),(b))。随着温度升高,活塞环Cr电镀层表面的孔隙以及缸套表面的珩磨纹会储存一定量的润滑油,摩擦表面的润滑状态良好,因此只发生了磨粒磨损,但随着温度升高,润滑油黏度下降,油膜变薄,导致摩擦因数升高,摩擦副表面的磨粒磨损加重,磨损失重量增加。



(a) Piston ring, 50 °C (b) Cylinder liner, 50 °C (c) Piston ring, 200 °C (d) Cylinder liner, 200 °C

图10 不同温度下磨损后的磨痕形貌

Fig. 10 SEM morphologies of wear marks of mate at different temperatures

在200℃条件下,摩擦和高温产生过多的热量,导致润滑油的挥发,摩擦副表面的润滑状态恶化,导致磨屑或缸套与活塞环Cr电镀层表面

直接接触,接触点焊合在一起,形成黏着,产生黏着磨损(图10(c))。此时活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损,导致磨损失重量迅速增

加。高温和摩擦产生的热量,还会导致缸套表面微凸体软化,易在摩擦状态下发生塑性变形,其顶端发生破裂形成磨屑,导致缸套表面珩磨纹被磨损过程中出现的磨屑或变形微凸体所填满,使得缸套表面被逐渐抹平,储油能力下降,暴露出更多的金属与活塞环表面接触,使得磨损重量增加(图10(d))。

3 结 论

在文中所述试验条件下,得到以下结论:

(1) 随载荷的增加,摩擦副的摩擦因数减小,总失重量增加。活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主,在400 N条件下,活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损,表面形成摩擦反应膜。

(2) 随滑动频率的增加,摩擦副的摩擦因数减小,总失重量先减小后增加,滑动频率为20 Hz时,总失重量达到最小值。活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主,在25 Hz条件下,活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损。

(3) 随温度的升高,摩擦副的摩擦因数增大,总失重量增加。活塞环和缸套的磨损机理以磨粒磨损为主,磨损程度随温度的升高而加重。在200 °C条件下,活塞环的磨损机理转变为磨粒磨损和黏着磨损。

参 考 文 献

- [1] 蔡志海,张平,杜军,等. 活塞环表面CrN基复合膜的组织结构与摩擦副匹配机理研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(5): 459-463.
- [2] 李奇,王宪成,何星,等. 高功率密度柴油机缸套—活塞

环摩擦副磨损失效机理[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 36-41.

- [3] 张庆茂,刘文今. 激光强化铸铁活塞环的磨损性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 447-452.
- [4] Hahn M, Bauer Ch, Theissmann R. The impact of microstructural alterations at spray coated cylinder running surfaces of diesel engines—findings from motor and laboratory benchmark tests [J]. *Wear*, 2011, 271: 2599-609.
- [5] 和穆. 高原坦克动力装置状态监测与寿命预测方法研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院博士学位论文, 2012.
- [6] Martin F Jensen, Jøgen Böttiger, Henrik H Reitz, et al. Simulation of wear characteristics of engine cylinders[J]. *Wear*, 2002, 253: 1044-56.
- [7] Guo C, Chen J, Zhou J, et al. Microstructure and tribological properties of TiAg intermetallic compound coating [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 10692-8.
- [8] La P Q, Ma J Q, Zhu Y T, et al. Dry-sliding tribological properties of ultrafine-grained Ti prepared by severe plastic deformation [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53: 5167-73.
- [9] Asadi Kouhanjani S, Zare Bidaki A, Akbari A. The effect of sliding speed and amount of loading on friction and wear behavior of Cu-0.65 wt. % Cr alloy [J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2009, 486(1): 319-324.
- [10] 张兴虎,郭纯,周健松,等. 激光熔覆NiCr涂层的结构及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 57-62.
- [11] Nam P Suh. *Tribophysics* [M]. World Publishing Corporation, Beijing, 1989: 75-83.
- [12] Bhushan B. *摩擦学导论* [M]. 机械工业出版社, 2007: 117.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎21号

100072

装甲兵工程学院机械工程系

Tel: (010) 6671 7789

E-mail: 56414929@qq.com