

高功率密度柴油机缸套-活塞环摩擦副磨损失效机理*

李 奇^a, 王宪成^a, 何 星^a, 蔡志海^b, 和 穆^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: 为延缓摩擦副磨损失效, 提升高功率密度柴油机的寿命, 同时为减磨措施提供理论依据, 研究缸套-活塞环摩擦副的磨损失效机理。利用扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)对原始及实际使用 500 h 以后失效缸套和活塞环的表面形貌和化学成分进行了分析。结果表明: 对于缸套, 上止点附近的磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损。缸套中部磨损机理与上止点附近相似, 但没有发生大面积的粘着磨损。下止点附近的磨损机理以磨粒磨损为主。梯形环表面的铬电镀层失效, 失去了保护基体的作用, 磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损。扭曲气环表面仍然覆盖着比较完整的铬电镀层, 磨损机理以磨粒磨损为主。

关键词: 缸套; 活塞环; 磨粒磨损; 粘着磨损

中图分类号: TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)04-0036-06

Wear Failure Mechanism of Cylinder Liner-Piston Ring Friction Pair for High Power Diesel Engines

LI Qi^a, WANG Xian-cheng^a, HE Xing^a, CAI Zhi-hai^b, HE Mu^a

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

Abstract: To delay friction pair failure, improve the life span of high power diesel engines, and provide theory for decreasing the wear of cylinder liner and piston ring friction pair, the wear mechanism of friction pair was investigated. The morphologies and chemical composition of original and failure (after 500 h) cylinder liner and piston rings were analyzed by SEM-EDS. The results show that the wear mechanism of top dead center (TDC) nearby is comprehensive abrasive wear, adhesion wear and corrosion wear. The wear mechanism of middle location is similar to that of TDC, nevertheless adhesion wear is not serious. The wear mechanism of bottom dead center (BDC) nearby is mainly abrasive wear. Cr coating of the top ring is worn out, and steel is exposed. The wear mechanism is comprehensive abrasive wear, adhesion wear and fatigue wear. Generally, Cr coating of the second ring is complete and wear mechanism is abrasive wear.

Key words: cylinder liner; piston ring; abrasive wear; adhesion wear

0 引 言

随着柴油发动机不断向高功率、高转速的方向发展, 缸套-活塞环摩擦副的工作条件越来越苛刻, 需要在高温、高压、腐蚀、边界润滑等恶劣条件下工作, 磨损极其严重。缸套-活塞环摩擦副的摩擦学性能对柴油机整机的性能和可靠性

具有重要影响。研究表明, 发动机的摩擦损失约占发动机总输出能量的 50%, 而摩擦损失主要消耗在轴承、活塞裙部和活塞环处, 其中缸套与活塞环的摩擦是影响发动机摩擦损失的主要因素^[1-2]。

因此, 文中选取了高功率密度柴油机实际使

收稿日期: 2012-05-11; 修回日期: 2012-06-20; 基金项目: * 国家自然科学基金(50901089)

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

网络出版日期: 2012-07-06 08:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120706.0855.006.html>

引文格式: 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.

用 500 h 以后失效的缸套和活塞环, 对其表面形貌和化学成分进行了分析, 总结其磨损失效机理, 以期采用各种表面技术优化摩擦副表层性能, 提高摩擦副的抗摩擦磨损性能打下基础。

1 试 验

试验选用某型高功率密度柴油机原始缸套和活塞环, 以及实际使用 500 h 以后失效的缸套和活塞环。缸套材料为 42MnCr52 合金钢淬火处理, 硬度为 740 HV_{0.2}, 规格为 Φ 150 mm \times 276 mm。活塞环材料为 65Mn 钢, 表面电镀 Cr, 硬度为 900 HV_{0.2}, 梯形环和扭曲气环的规格分别为 Φ 150 mm \times 2.6 mm、 Φ 150 mm \times 2.4 mm。其化学成分见表 1 和表 2。截取原始活塞环和缸套, 以及失效的活塞环、上止点附近、缸套中部、下止点附近制成试样, 用酒精进行超声波清洗,

表 1 42MnCr52 合金钢的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 42MnCr52 (ω /%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Cu
ω /%	0.45	0.25	1.1	0.43	<0.25
Element	Ni	P	S	Mo	Fe
ω /%	<0.3	<0.02	<0.02	0.01	Bal.

并冷风吹干。利用 Nova NanoSEM 450/650 型高分辨场发射扫描电子显微镜观察表面形貌和特征, 采用 Feature Max 型 X 射线能谱仪分析表面元素分布情况。

表 2 65Mn 合金钢的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of 65Mn (ω /%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Cu
ω /%	0.70	0.35	1.1	<0.25	<0.25
Element	Ni	P	S	Fe	
ω /%	<0.3	<0.03	<0.03	Bal.	

2 试验结果与分析

2.1 缸套原始表面分析

图 1(a) 为缸套原始表面形貌, 珩磨过程中在缸套表面产生大量的网状栅格。这些栅格类似沟槽, 具有良好的储油能力, 其粗糙度比表面周围区域的粗糙度大得多(图 1(b)), 所以网状栅格在摩擦过程中将起到重要作用。Michail, Srivastava 等人的研究发现, 珩磨过程所产生的网状栅格对缸套摩擦磨损、耗油量有重要影响^[3-4]。

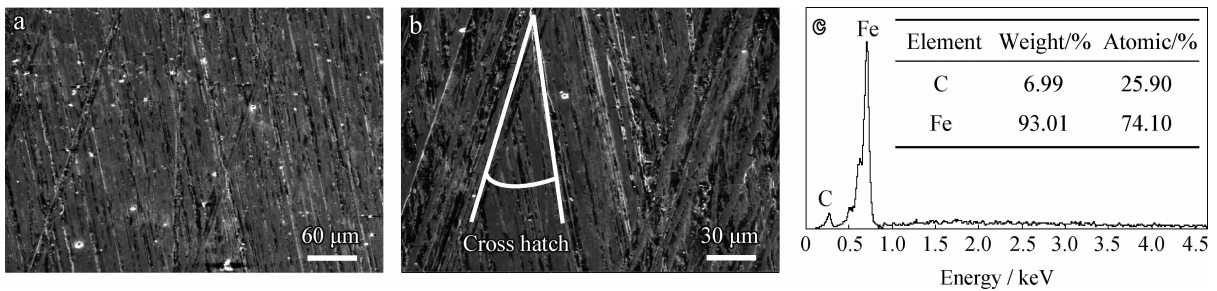


图 1 缸套表面形貌和能谱分析

Fig. 1 SEM morphologies and EDS analysis of cylinder liner

2.2 缸套磨损机理分析

图 2(a) 为上止点附近表面磨损形貌, 可以看出其存在清晰的磨粒磨损和粘着磨损特征。对 A 区域进行放大(图 2(b)), 发现材料表面有明显的犁削、脱落和点蚀坑的痕迹。由于缸壁表面的硬微凸体在摩擦作用下会发生断裂而形成磨粒, 磨粒与缸壁、活塞环形成三体磨损, 沿滑动方向对缸壁表面进行犁削, 材料产生塑性流动, 形成一系列较深且非常密集的犁沟, 犁沟侧边形

成脊背。此过程同时产生大量摩擦热, 使缸壁表面温度升高, 导致材料软化甚至进入熔融状态。再加上此时缸套-活塞环摩擦副处于边界润滑状态, 当油温高于润滑油的极限温度时, 边界膜将分解破裂而失去保护作用, 在正压力作用下, 导致缸壁表面直接与活塞环滑动表面接触, 接触点焊合在一起, 形成粘着。摩擦副相对运动便出现粘着-剪断-再粘着-再剪断的循环过程, 产生粘着磨损^[5]。点蚀坑是由腐蚀磨损造成的, 腐蚀磨损主要

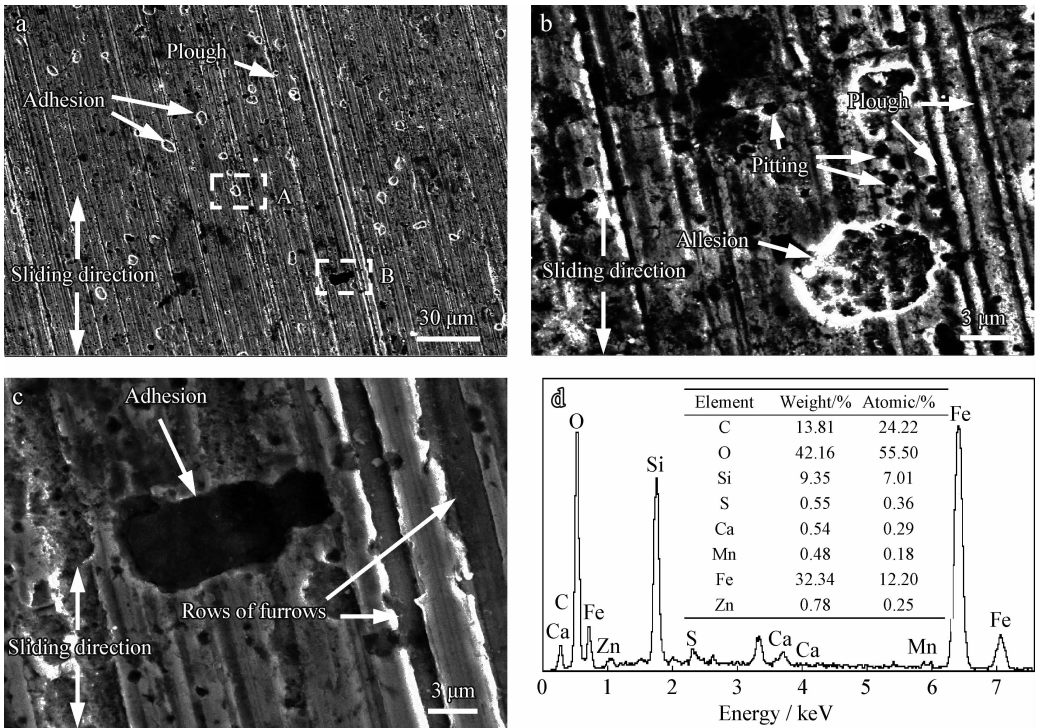
是燃气中冷凝成的硫酸等物质,作用于润滑不足的表面和被磨损的新鲜摩擦表面造成的。

对 B 区域进行放大(图 2(c)),两条犁沟的宽度约为 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.3\ \mu\text{m}$,缸壁表面因粘着磨损留下脱落坑,坑中存在黑色堆积物。对其进行能谱分析(图 2(d))可知,黑色堆积物可能为泥沙和磨损产物的混合物。

综上所述,上止点附近的磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损。

如图 3 所示,缸套中部内壁表面存在明显的

磨粒磨损和腐蚀磨损,局部存在粘着磨损。犁削过程中,经过反复加载和卸载,滑动的微凸体碾平一些犁沟侧边的脊背,导致其断裂。此犁削过程也引起亚表面的塑性变形,形成表面和亚表面裂纹的成核点,后续的加载和卸载导致这些裂纹在表层内扩展并与邻近裂纹相连,最终导致裂纹扩展到表面,形成磨损碎片^[6]。同活塞上止点附近类似,缸套中部磨损机理也为综合的磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损。不同的是,缸套中部没有发生大面积的粘着磨损。



(a) Worn morphology of surface (b) Enlarged view of area A in (a) (c) Enlarged view of area B in (a) (d) EDS analysis of black deposit in (c)

图 2 上止点附近表面磨损形貌和能谱分析

Fig. 2 Worn morphologies and EDS analysis of TDC nearby

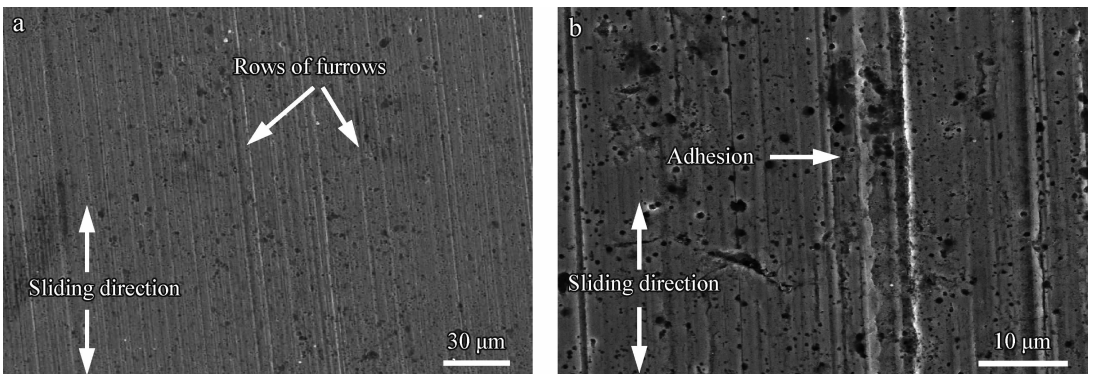


图 3 缸套中部表面磨损形貌

Fig. 3 Worn morphologies of middle location of cylinder liner

图 4 为下止点附近磨损形貌。该处表面分布着由磨粒磨损造成的犁沟, 与上止点附近相比, 这些犁沟相对最浅, 宽度也相对最小。整个表面只有极个别处发生粘着磨损, 这是因为在下

止点附近缸套的温度较低, 而且缸套-活塞环摩擦副之间的压力比较小, 所以两者之间的润滑状态良好, 润滑油膜未遭到破坏。下止点附近的磨损机制以磨粒磨损为主。

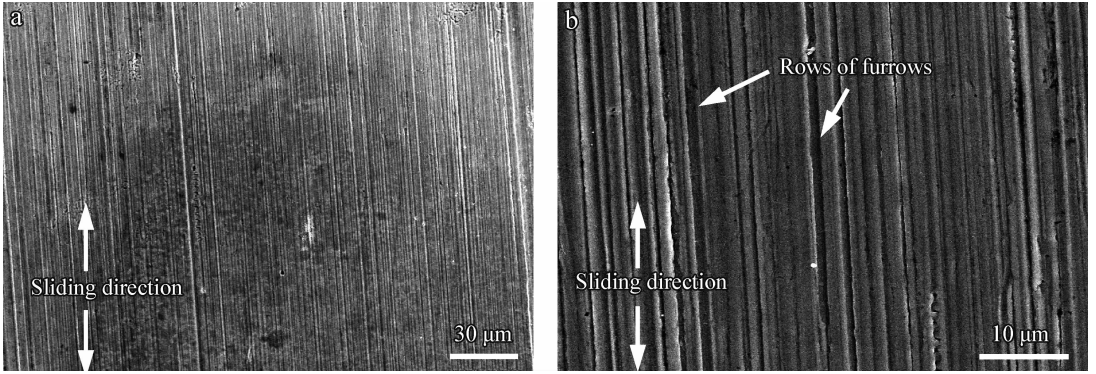


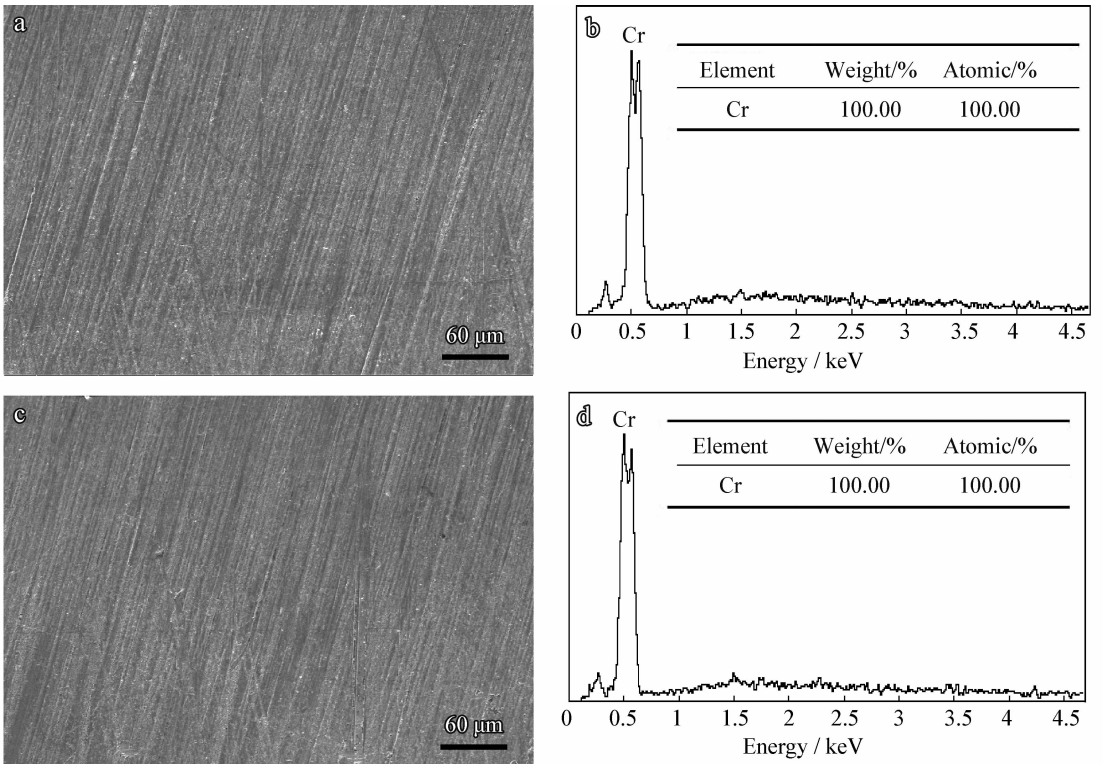
图 4 下止点附近表面磨损形貌

Fig. 4 Worn morphologies of BDC nearby

2.3 活塞环原始表面分析

图 5 为梯形环、扭曲气环原始表面形貌和能谱分析, 两道活塞环的表面存在均匀的 Cr 电镀层。活塞环电镀 Cr 工艺, 具有硬度略高于淬火

缸套、成本低、表面粗糙度低、摩擦系数与钢相接近、Cr 和 Fe 有较高亲和力, 易产生粘着磨损等特点, 目前仍是高功率密度发动机活塞环的主要表面处理方[7-9]。



(a) SEM morphology of the top ring (b) EDS analysis of the top ring (c) SEM morphology of the second ring (d) EDS analysis of the second ring

图 5 活塞环表面形貌和能谱分析

Fig. 5 SEM morphologies and EDS analysis of piston rings

2.4 活塞环磨损机理分析

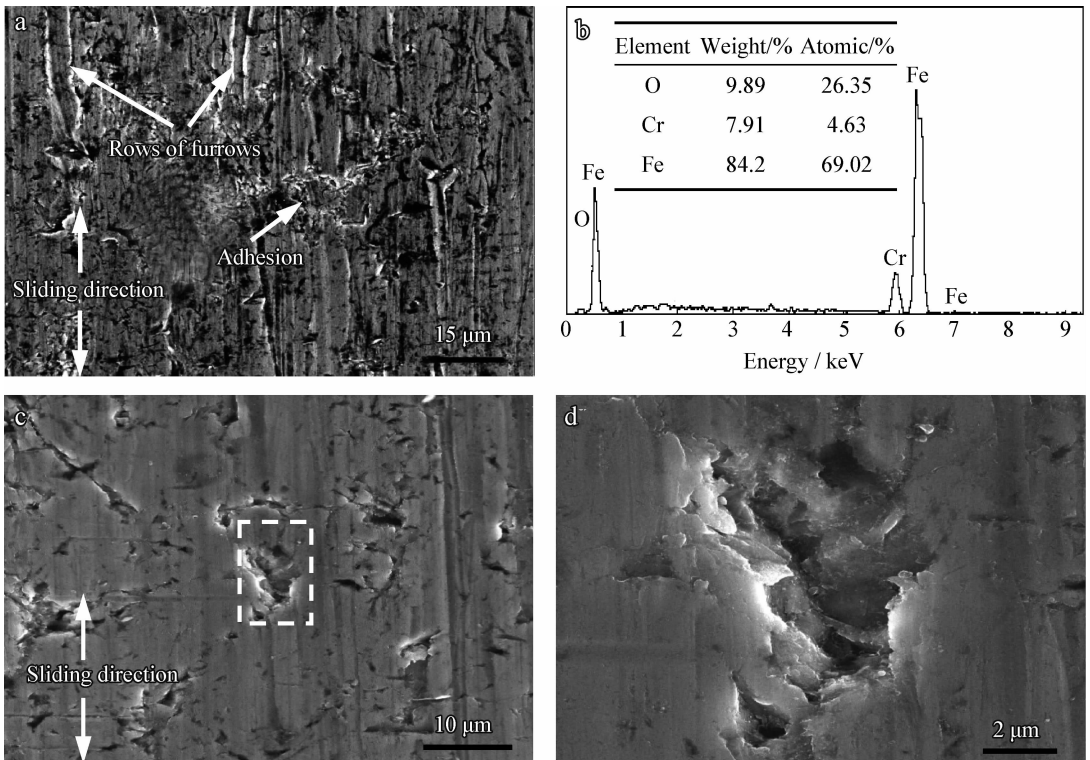
对于梯形环,表面的Cr电镀层存在犁沟和粘着特征(图6(a))。犁沟是由硬的磨粒或磨削对镀层进行犁削造成的,属于磨粒磨损。发生粘着磨损的原因如下:由于梯形环靠近燃烧室,因此活塞环-缸套摩擦副的温度受缸内放热率影响较大,随着发动机转速的增加,摩擦副之间相对运动速度和缸内放热率增加,导致摩擦产生的热量增大,摩擦面温度显著升高,引起摩擦副之间的油温升高,当油温高于机油的极限温度,摩擦副之间的边界膜将分解破裂而失去保护作用,导致软化甚至进入熔融状态的镀层与缸套表面直接接触。由于镀层的化学成分为单质Cr,缸套的主要化学成分为单质Fe,两者都属于单质金属类,化学组分相近,所以容易与缸套产生微观焊合,两者相对运动分离的瞬间高温接点被撕裂,发生物质转移,造成磨损量和剪切力加大,导致粘着磨损^[10]。

图6(b)为梯形环磨损表面能谱分析。存在

Fe元素表明65Mn钢基体暴露在表面且被氧化,此时梯形环表面的Cr电镀层已经失效,失去了保护基体的作用。

对图6(c)虚线部分进行放大,发现镀层存在剥落现象,这是由磨粒磨损和疲劳磨损两种机制共同造成的。磨粒磨损对剥落的影响在于:当磨粒或缸套与镀层表面直接接触时,发生磨粒磨损,磨粒磨损过程中会有较大的摩擦力产生,摩擦力对镀层有一种剪切作用。这种持续不断的剪切使得镀层与基体的结合受到疲劳破坏,直至镀层剥离基体,作为磨屑被排出。疲劳磨损对剥落的影响在于:当活塞环与缸套相对滑动时,接触表面产生一定的循环应力,随着时间、载荷及滑动速度的不断增加,循环应力迅速增大,当应力值超过镀层与基体的结合强度时,镀层与基体的结合界面将产生大量裂纹,裂纹的扩展最终导致镀层剥离基体(图6(d))。

因此,梯形环的磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损。



(a) Worn morphology of surface (b) EDS analysis of (a) (c) morphology of exfoliating coating (d) Enlarged view of dashed area in (c)

图6 梯形环表面磨损形貌和能谱分析

Fig. 6 Worn morphologies and EDS analysis of the top ring

如图7所示,扭曲气环表面分布着磨粒磨损造成的浅犁沟,其磨损机制以磨粒磨损为主。能谱分析表明在发动机运行500 h之后,扭曲气环表面仍然覆盖着比较完整的Cr电镀层。与梯形环相比,扭曲气环磨损相对较轻,其原因为:当活塞运动到上止点时,梯形环承受最大的压缩压力和燃烧压力,急剧上升的燃烧压力对梯形环产生冲击并使其变形,减小了梯形环的有效支撑面积

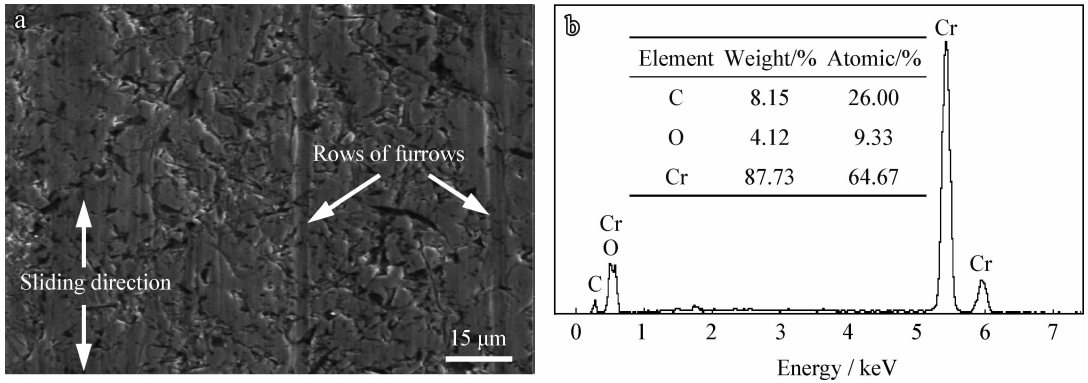


图7 扭曲气环表面磨损形貌和能谱分析

Fig. 7 Worn morphologies and EDS analysis of the second ring

3 结论

(1) 对于缸套,上止点附近磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损。缸套中部磨损机理与上止点附近相似,但没有发生大面积的粘着磨损。下止点附近的磨损机制以磨粒磨损为主。

(2) 梯形环表面的铬电镀层已经失效,失去了保护基体的作用,磨损机理为综合的磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损。扭曲气环表面仍然覆盖着比较完整的铬电镀层,磨损机制以磨粒磨损为主。

(3) 中频淬火缸套—电镀铬活塞环摩擦副的匹配性较差,摩擦副间磨损严重,成为制约高功率密度柴油发动机使用寿命的瓶颈。因此必须改善摩擦副表面接触状态,有效提高摩擦副的摩擦学性能,从而达到延长使用寿命的目的。

参考文献

[1] 王完成,和穆,张晶,等. 高原柴油机气缸套-活塞环磨损计算研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(1): 13-16.

[2] 蔡志海,曾庆强,赵军军,等. 高功率密度柴油机缸套激光渗硫复合处理技术研究[J]. 中国表面工程, 2009, 22(5): 75-84.

[3] Michail S K, Barber G C. The Effects of roughness on piston ring lubrication - part II: The relationship between cyl-

并增加了比负荷。而此时扭曲气环只承受泄漏的气体压力,此压力仅为梯形环气体压力的1/10~1/15^[11]。

通过以上分析试验可以看出,由于高温、高压、化学腐蚀、边界润滑等苛刻工作条件,中频淬火缸套—电镀铬活塞环摩擦副在使用500 h后,磨损非常严重,过早失效报废,严重制约了高功率密度柴油发动机的使用寿命。

inder Wwall surface topography and oil film thickness [J]. STLE Tribology Transactions. 1995b, 38: 173-177.

[4] Nathan W Bolander. Piston ring lubrication and friction reduction through surface modification[D]. Purdue University, 2007, 6.

[5] 戴雄杰. 摩擦学基础 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984: 69-73.

[6] 布尚 B. 摩擦学导论 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 190-195.

[7] 梁超. 汽车发动机活塞环的技术现状和发展 [J]. 汽车与配件, 2006, 16(8): 32-35.

[8] 张平,梁志杰,王海军,等. 装甲装备发动机气缸套/活塞环摩擦副再制造技术研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 92-95.

[9] Cho Dae Hyun, Lee Young Ze. Evaluation of ring surfaces with several coatings for friction, wear and scuffing life [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19: 992-996.

[10] 蔡志海. 坦克发动机活塞环 CrN 基复合涂层的摩擦学性能与抗高温腐蚀行为研究 [D]. 装甲兵工程学院, 2010, 6.

[11] 魏春源,张卫正,葛蕴珊. 高等内燃机学 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2001: 116-119.

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: liqiqi_ren_0@sohu.com