

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.01.012

# 陶瓷颗粒含量对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀活塞环摩擦磨损性能的影响

徐佳子<sup>1</sup>, 李承娣<sup>1</sup>, 朱 峰<sup>1</sup>, 沈 岩<sup>1</sup>, 徐 涛<sup>2</sup>, 徐久军<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 船机修造工程交通行业重点实验室, 辽宁 大连 116026; 2. 威墅堰机车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011)

**摘 要:** 为了研究陶瓷颗粒含量对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀活塞环摩擦磨损性能的影响, 采用镀铬活塞环和 4 种 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒含量不同的 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环与 CuNiCr 合金铸铁缸套组成配对副, 对其进行摩擦磨损试验, 对比各配对副摩擦因数及磨损量。结果表明, 镀铬活塞环-缸套配对副摩擦因数较大, 约为其它 4 种含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒的 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环-缸套配对副的 1.2 倍, 磨损也比其它 4 种配对副严重, 摩擦副的表面均已经发生严重的粘着磨损现象; 其它 4 种含陶瓷颗粒的 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环-缸套配对副的摩擦因数相近, 缸套的磨损量也相近, 活塞环的磨损量随着陶瓷含量的增加而先减小后增加。陶瓷颗粒的镶嵌提高了活塞环的耐磨性能, 陶瓷含量过少, 活塞环表面承载能力不足; 陶瓷颗粒含量过多, 陶瓷颗粒易脱落, 这些都会增大活塞环的磨损量。

**关键词:** Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 活塞环; 陶瓷颗粒; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.441; TG115.58

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2016)01-0080-07

## Ceramic Particles Content on Friction and Wear Behavior of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Piston Rings by Composite Plating

XU Jia-zi<sup>1</sup>, LI Cheng-di<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, SHEN Yan<sup>1</sup>, XU Tao<sup>2</sup>, XU Jiu-jun<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Ship-Maintenance & Manufacture, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning; 2. Qishuyan Locomotive & Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu)

**Abstract:** The paper reports the effects of various content of ceramic particles on the friction and wear properties of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston ring. In this study, chrome plated piston ring and four types of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston rings with different contents of ceramic particles were used to match the CuNiCr alloy cylinder liner. Detailed information was acquired using the grinding tests to compare the friction coefficient and the wear quantity of each pair of matching. The results show that the friction coefficient of the non-ceramic matching pair is predominant, presenting 1.2 folds higher than other four Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston ring containing ceramic particles associated with cylinder. Moreover, the wear of the surface of the non-ceramic matching pair is more serious than the others, presenting a phenomenon of severe adhesive wear. The friction coefficient and the cylinder's wear of the other four pairs are comparable. The wear quantity of the Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston ring shows a growth stage before it decreases with the increase of ceramic particles content. The piston ring set with ceramic particles shows improved wear resistance. The surface of the bearing capacity of the piston ring is insufficient as ceramic content is too small. When the content of ceramic particles is too much, the ceramic particles are easy to fall off. These two conditions will increase the wear of the piston ring.

**Keywords:** Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; piston ring; ceramic particles; friction and wear

**收稿日期:** 2015-08-27; **修回日期:** 2015-10-12

**通讯作者:** 徐久军(1967-), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 内燃机摩擦学; **Tel:** (0411) 8472 3376; **E-mail:** jjxu@dlnu.edu.cn

**网络出版日期:** 2016-01-30 17:53; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160130.1753.024.html>

**引文格式:** 徐佳子, 李承娣, 朱峰, 等. 陶瓷颗粒含量对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀活塞环摩擦磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 80-86. XU J Z, LI C D, ZHU F, et al. Ceramic particles content on friction and wear behavior of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piston rings by composite plating[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 80-86.

## 0 引言

随着现代内燃机不断向高功率、高效率、低污染的方向发展,其工况条件越来越恶劣,导致活塞环-缸套配对副的磨损寿命和可靠性大大降低<sup>[1-3]</sup>。因此,新材料和新技术不断被引进到活塞环制造业之中,以满足现代内燃机特别是大功率柴油机对活塞环的苛刻要求<sup>[4]</sup>。其中,铬基陶瓷复合镀是近年来应用于活塞环表面处理的一种新工艺,可有效增强表面的硬度和耐磨性<sup>[5]</sup>。

铬基陶瓷复合镀活塞环采用层积方式,周期换向电流,将纳-微米尺度的陶瓷微粒嵌入并固定在硬铬层的网状微裂纹之中<sup>[6-8]</sup>。这种技术使得镀层整体强度和韧性均有所提高,并增加了其耐磨性<sup>[9]</sup>。第二项颗粒的复合量及电镀工艺条件是复合镀层性能的主要影响因素,特别是第二项颗粒的复合量。一般来说,随着复合量的增加,镀层的一些特殊性能会得到随之改变,如硬度、耐磨和耐腐蚀性等<sup>[10]</sup>。

Węglewski W<sup>[11]</sup>通过有限元数值计算方法模拟 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料的结构,李奇<sup>[12]</sup>研究了镀铬活塞环的摩擦学性能,Sun Ke-Ning<sup>[13]</sup>、章硕<sup>[14]</sup>研究了 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层的性能,S. F. Wayne<sup>[15]</sup>、朱峰<sup>[16]</sup>分别研究了合金铸铁缸套与喷钼活塞环、CrN 活塞环配对时的摩擦磨损性能,但他们对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环配对时的摩擦磨损规律研究较少,特别是对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环中陶瓷颗粒含量(质量分数)的研究鲜见报道。文中研究陶瓷颗粒含量对 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环的摩擦磨损性能的影响,对优化活塞环的制造工艺具有重要意义。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验选取 CuNiCr 合金铸铁缸套,缸套的化学成分见表 1,缸套基体组织为珠光体,少量的硬质相主要由合金碳化物组成,呈块状分散镶嵌在珠光体中。缸套内径为 270 mm,壁厚为 8 mm。采用线切割方法切割成圆周方向 8°、轴向 42 mm 的试样。

试验选取镀铬<sup>[17]</sup>和 4 种陶瓷颗粒含量不同的 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环,陶瓷颗粒含量分别为 0%、2.82%、3.45%、4.38% 和 5.03%,分别用 R1、R2、R3、R4 和 R5 表示,见表 2。

表 1 缸套的化学成分

Tab 1 Chemical composition of the cylinder liner

(wt/%)					
Element	C	S	P	Mn	Si
Content	2.90	0.005 2	0.52	0.88	1.86
Element	Cr	Ni	Cu	Fe	
Content	0.33	0.51	0.84	Bal.	

表 2 5 种活塞环陶瓷颗粒的含量

Table 2 Content of the ceramic particles on five kinds of piston ring

(wt/%)	
Sample	Content of ceramic particles
R1	0
R2	2.82
R3	3.45
R4	4.38
R5	5.03

5 种活塞环试样表面网纹特征见图 1,由图可观察到,活塞环表面不均匀地分布着网状裂纹,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒镶嵌于网纹中。活塞环表面轮廓为偏桶状,外径为 270 mm,轴向高度为 6 mm,采用无齿锯切割成沿着圆周方向 15°弧长的活塞环试样。

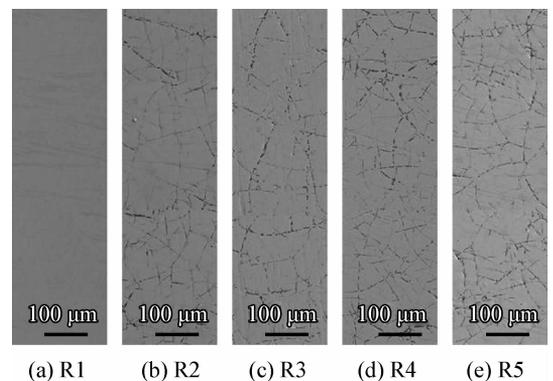


图 1 5 种活塞环表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of the five kinds of piston rings

### 1.2 试验方法

在实际工作条件下,当活塞环在运行达上止点附近时,由于线速度低、缸套温度高润滑油粘度低同时燃气爆发压力大,活塞环-缸套配对副

的磨损最严重,根据“磨损形式-条件统一”的模拟准则<sup>[18]</sup>,通过模拟活塞环-气缸套配对副的往复运动形式、上止点附近的工作温度,同时降低活塞环、气缸套试样之间的相对滑动速度来获得其边界润滑状态,并在保持边界润滑状态的前提下,采用强化载荷的方式加速磨损。按照以上模拟的参数,采用对置往复摩擦磨损试验机进行试验,试样的接触及运动形式如图2所示。

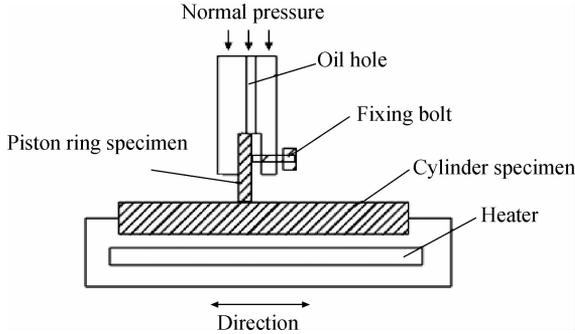


图2 试样接触及运动形式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the movement direction and contact state of the cylinder and ring specimen

采用适当强化的载荷,选择 200 r/min 进行磨损试验,能够模拟实机柴油机在气缸套上止点时气缸套-活塞环摩擦副的边界润滑状态。为模拟内燃机第一道气环的工作温度,试验温度选定为 200 ℃。低载磨合阶段选择燃烧室内最大爆压 22 MPa,高载磨损阶段选择燃烧室内最大爆压的 4 倍为 88 MPa。采用以上条件时,可以保证在 24 h 内的磨损量达到可测的程度。试验参数见表 3。润滑介质选取长城 4012 润滑油,每种配对副在相同试验参数下重复试验 5 次。

表3 不同磨损阶段的试验参数

Table 3 Experimental parameters of different wear stages

Stage	Parameters
Running-in	200 r/min, 200 ℃, 10 MPa, 3 h
Experiment	200 r/min, 200 ℃, 88 MPa, 21 h

### 1.3 表征方法

试样中实时记录摩擦力,每个往复循环不同行程位置的摩擦力大小不同,其中止点附近由于速度低润滑不良,边界摩擦的成分较大,一般摩擦力也最大,试验中用 50 次往复循环对应的 50 个最大摩擦力值取平均值,除以法向压力得到摩擦

因数;采用梅特勒 AL204-IC 型电子天枰(精度 0.1 mg)称量缸套试样磨损前后的质量差值来表示磨损量;采用 OLYMPUS 公司 LEXT (OLS3100)型 3D 激光共聚焦显微镜测量活塞环已经磨损区域和未磨损区域的台阶高度来表示线磨损量。

## 2 结果及分析

### 2.1 摩擦因数

图3是5种配对副摩擦因数随时间变化曲线,由图可知,在稳定磨损阶段,当 CuNiCr 合金铸铁缸套分别与 5 种活塞环对磨时,4 种 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环的摩擦因数比较相近,约 0.096~0.098 之间。R1 环的摩擦因数比较大,约为 0.121(由于 R1 活塞环-缸套配对副后期发生严重粘着磨损现象,摩擦力也随之发生变化,所以此处选取严重磨损前的数据),是其它 4 种环的 1.2 倍。在高载高速的环境下,镀铬层的网状裂纹和张应力降低了镀层的硬度,镀层易产生疲劳剥落<sup>[19]</sup>,从而导致 R1 活塞环的摩擦因数比其它 4 种环大。

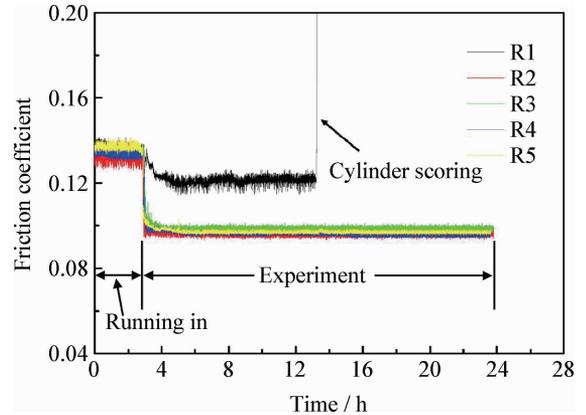


图3 摩擦因数随时间的变化

Fig. 3 Curves of the friction coefficient vary with time

### 2.2 磨损量

图4为5种配对副磨损后的宏观照片,每种配对副选取一组作为代表。R1 活塞环和与之对磨的缸套磨损均比较严重,活塞环已出现很深的磨痕,与之对磨的缸套表面可以明显地观察到严重犁沟状擦伤痕迹,表现为拉缸现象,因此,其磨损量不与其它 4 组做对比。其它 4 种配对副磨损都较为轻微,活塞环上只有很轻微的磨痕,与之对磨的缸套上的珩磨纹依然清晰可见。

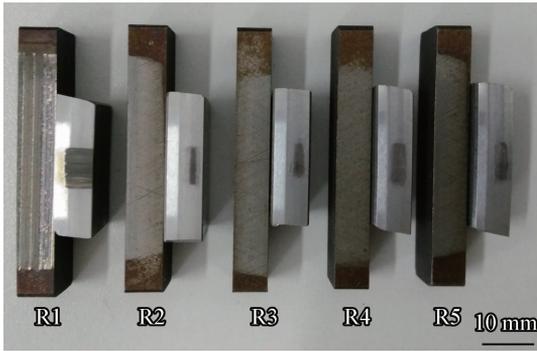


图4 5种配对副磨损后的宏观照片

Fig. 4 Macro photos of the five pairs after wearing

图5是与R2、R3、R4和R5这4种Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环对磨的缸套磨损量对比图。由图可知,合金铸铁缸套分别与这4种环对磨时,缸套的磨损量相近。与R2环对磨时的缸套磨损量最大(2.23 mg),与R5环对磨的缸套磨损量最小(2.09 mg),其余的磨损量均在两者之间。

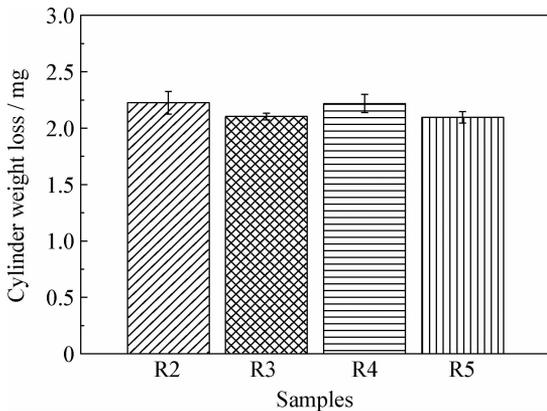


图5 与4种活塞环对磨缸套的磨损量

Fig. 5 Comparison chart of the cylinder wear volume against with four kinds of rings

图6是R2、R3、R4和R5这4种Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环试验后磨损量对比图。由图可知,4种环磨损量的大致规律是,随着陶瓷颗粒含量的增加,Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环磨损量先减小后增大。其中,R4环的磨损量最低,为0.65 μm。

图7是R2、R3、R4和R5这4种Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环磨损后的SEM表面形貌。R2、R3两环陶瓷颗粒含量比其它两种环少,低倍下观察,表面有较多划痕,高倍下观察,表面有严重划伤痕迹,已经不能明显看出陶瓷颗粒。R4环表面仍比较光滑,微裂纹和陶瓷颗粒依然清晰可见,无明显划痕;高倍下观察,表面依然无明显划痕,陶

瓷颗粒很好地镶嵌在微裂纹之中。R5环陶瓷颗粒含量比其它3种环多,低倍下观察,表面比较光滑,但有少许划痕;高倍下观察,表面出现了一些较大的凹坑,凹坑均位于微裂纹的位置,这些凹坑是微裂纹中的陶瓷颗粒脱落后形成的。

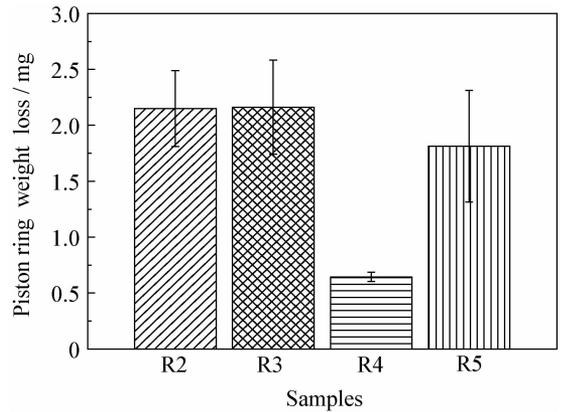


图6 4种活塞环的磨损量

Fig. 6 Comparison chart of the four kinds of piston ring wear

### 2.3 分析

活塞环磨损后的表面结构可用图8表示。图8(a)表示镀铬活塞环镀铬层网状微裂纹的存在降低了镀层整体的硬度和韧性,特别是高速高载条件下,其耐磨性下降较大<sup>[19]</sup>。因此,镀铬活塞环的摩擦因数较大,容易产生严重粘着磨损现象,导致拉缸。图8(b)是含有适量陶瓷颗粒的Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环,网纹表面处铬原子只是部分地被其它原子包围着,其相邻原子数比内部少,这将导致表层铬原子间结合键与内部不相等,表层铬原子就会偏离其正常的平衡位置,并影响到临近的几层原子,造成表层的点阵畸变,增大镀层内的应力。在镀铬层网纹中嵌入硬质陶瓷颗粒,不但使镀层本身的耐磨性能提高,而且网纹中嵌入陶瓷颗粒后可缓解网纹表层的点阵畸变,从而降低镀层内的应力;另外一个方面,在缸套与活塞环对磨的过程中,铬基体首先被磨损掉,硬质陶瓷颗粒逐渐凸出并成为第一滑磨面;同时,基体成为第二滑磨面,起到对硬质颗粒的镶嵌固定和储油的双重作用。以上几方面因素综合作用,导致含有适量陶瓷颗粒的活塞环摩擦因数及磨损量都较小。图8(c)是陶瓷含量较少的Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>活塞环,由于综合承载能力不足,当摩擦副在载荷较大的条件下相对滑动时,陶瓷颗粒

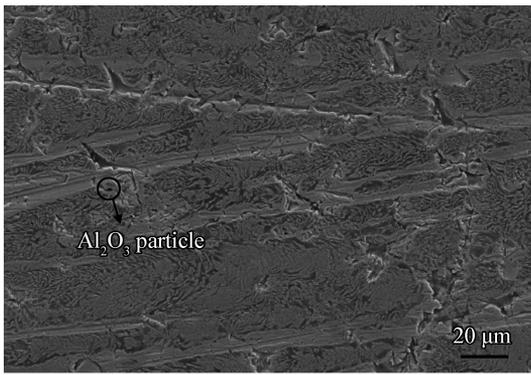
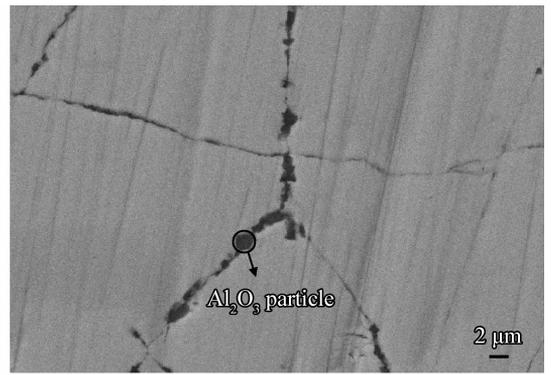
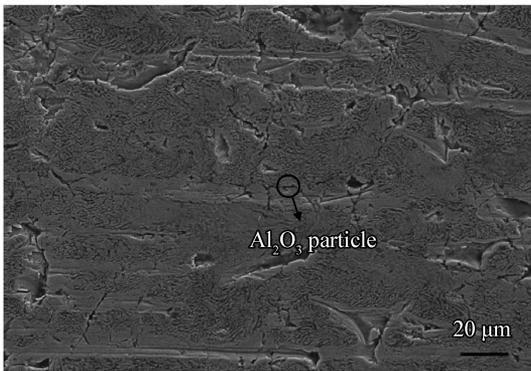
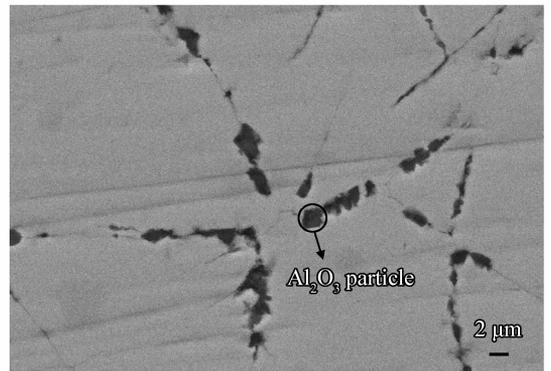
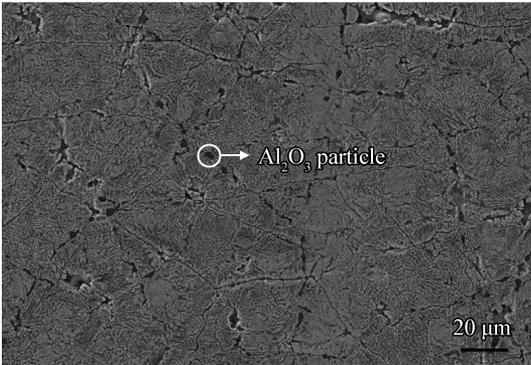
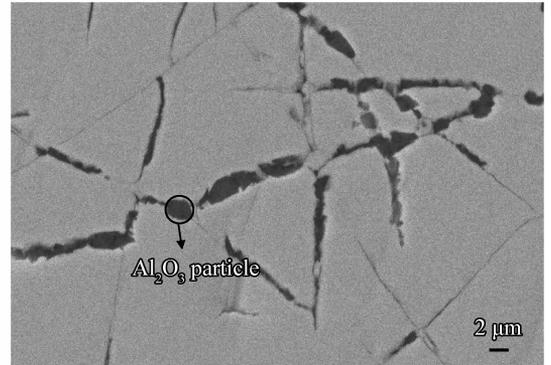
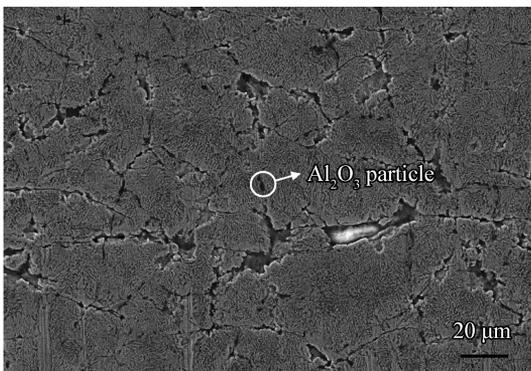
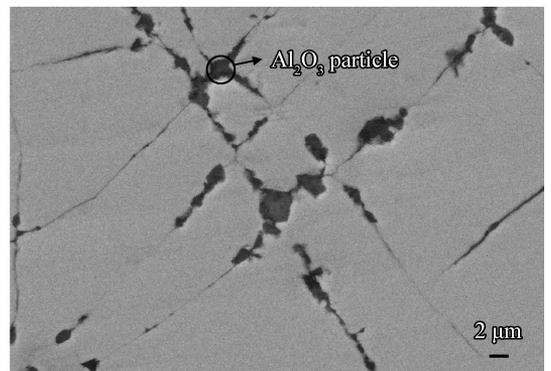
(a<sub>1</sub>) R2(a<sub>2</sub>) Magnification of (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>) R3(b<sub>2</sub>) Magnification of (b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>) R4(c<sub>2</sub>) Magnification of (c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>) R5(d<sub>2</sub>) Magnification of (d<sub>1</sub>)

图7 4种活塞环磨损后的表面形貌

Fig. 7 Surface morphologies of the four kinds of piston rings after wearing

会在基质铬中移动,有的甚至会脱落形成磨粒,犁削基质铬,加速了活塞环的磨损。因此,陶瓷含量相对较少的 R2 和 R3 活塞环表面有深的划痕。图 8(d)是陶瓷含量较多的 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活塞环,由于陶瓷颗粒含量过高,其与铬基质的接触面积变大,总的表面能也将随之增大,从而影响到陶瓷颗粒固化在网纹中的稳定性,导致了大块陶瓷颗粒的脱落,脱落后的陶瓷颗粒成为磨粒,加快了活塞环的磨损。因此,陶瓷颗粒含量较多的 R5 活塞环表面有大颗粒脱落的痕迹,并有一些划痕。所以,随着陶瓷颗粒含量的增加,活塞环的磨损量先减小后增大。

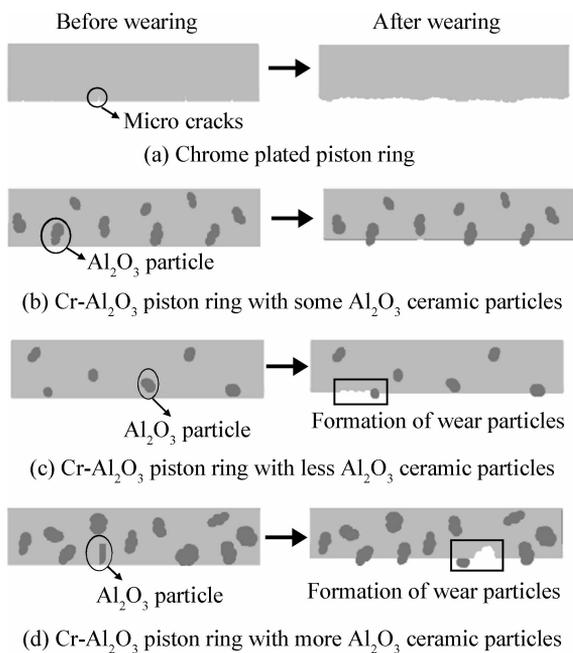


图 8 活塞环磨损机理示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of the piston ring wear mechanism

### 3 结 论

(1) 不镶嵌陶瓷颗粒的镀铬活塞环的摩擦因数和磨损量显著高于陶瓷颗粒的复合镀活塞环。镶嵌陶瓷颗粒有效改善了活塞环的摩擦磨损性能。

(2) 陶瓷颗粒含量适当时耐磨性能最好,过高或者过低时,磨损量均有增大的趋势。

(3) 陶瓷颗粒复合镀铬活塞环耐磨的机理是:陶瓷颗粒耐磨+减少镀层拉应力+形成双滑磨面结构等综合因素作用的结果。含量过低,承载能力不足,含量过高,脱落倾向加重。

### 参考文献

- [1] 彭浪, 石太亮. 微车汽油发动机开发方案的研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(2): 67-73.  
PENG L, SHI T L. Research on small gasoline engine layout developed for miniture vehicle[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(2): 67-73 (in Chinese).
- [2] 刘震涛, 夏琪伟, 张宇, 等. 活塞环润滑油膜厚度影响因素的模拟试验研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(6): 47-53.  
LIU Z T, XIA Q W, ZHANG Y, et al. Experimental research of factors affecting on piston ring oil film thickness[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6): 47-53 (in Chinese).
- [3] 李凯凯, 于海武, 王静秋, 等. 混合织构发动机缸套的减摩试验研究[J]. 内燃机工程, 2014, 35(5): 113-118.  
LI K K, YU H W, WANG J Q, et al. Experimental investigation on friction reduction of mixed texture cylinder liner [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(5): 113-118 (in Chinese).
- [4] 郝建军, 马跃进, 张建华. 表面工程技术在车用发动机上的应用[J]. 车用发动机, 2001, 136(6): 13-15.  
HAO J J, MA Y J, ZHANG J H. The present situation in research and application of surface engineering technology on vehicle engine[J]. Vehicle Engine, 2001, 136(6): 13-15 (in Chinese).
- [5] 赵散梅. 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基表层复合材料的制备与磨损性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
ZHAO S M. Research on preparation and wear properties of high chromium cast iron matrix composites reinforced by ceramic particles[D]. Changsha: Central South University, 2012 (in Chinese).
- [6] GAO J, SUO J. Preparation and characterization of the electrodeposited Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC composite coating[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(22): 9643-9648.
- [7] ZENG Z, ZHANG J. Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(12): 2725-2730.
- [8] JUNEGHANI M A, FARZAM M, ZOHDIRAD H. Wear and corrosion resistance and electroplating characteristics of electrodeposited Cr-SiC nano-composite coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1993-2001.
- [9] JANG J H, JOO B D, LEE J H, et al. Effect of hardness of the piston ring coating on the wear characteristics of rubbing surfaces[J]. Metals and Materials International, 2009, 15(6): 903-908.
- [10] 彭元芳, 曾振欧, 赵国鹏, 等. 电沉积纳米复合镀层的研究现状[J]. 电镀与涂饰, 2002, 21(6): 17-21.  
PENG Y F, ZENG Z O, ZHAO G P, et al. Current study

- of electrodeposited composite coatings with nano particles [J]. *Electroplating & Finishing*, 2002, 21(6): 17-21 (in Chinese).
- [11] WEGLEWSKI W, BASISTA M, CHMIELEWSKI M, et al. Modeling of thermally induced damage in the processing of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(2): 255-264.
- [12] 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.  
LI Q, WANG X C, CAI Z H, et al. Tribological property of plated Cr piston ring for heavy vehicle engine[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(1): 91-97 (in Chinese).
- [13] SUN K N, HU X N, ZHANG J H, et al. Electrodeposited Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating for wear resistance[J]. *Wear*, 1996, 196(1): 295-297.
- [14] 章硕, 胡树兵, 陈文旗, 等. 灰铁基 Cr-n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合电刷镀层的性能 [J]. *材料工程*, 2012, 2(9): 23-27.  
ZHANG S, HU S B, CHEN W Q, et al. Properties of Cr-n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings grown on grey cast iron substrates[J]. *Material Engineering*, 2012, 2(9): 23-27 (in Chinese).
- [15] WAYNE S F, SAMPATH S, ANAND V. Wear mechanisms in thermally-sprayed mo-based coatings[J]. *Tribology Transactions*, 1994, 37(3): 636-640.
- [16] 朱峰, 王增全, 王建平, 等. 合金铸铁缸套与 PVD(CrN) 活塞环配对时缸套磨损机理 [J]. *内燃机学报*, 2014, 32(5): 474-479.  
ZHU F, WANG Z Q, WANG J P, et al. Wear Mechanism of alloy cast iron cylinder liner coupled with PVD(CrN) piston ring[J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(5): 474-479 (in Chinese).
- [17] 罗庆, 王利华, 普学仁, 等. 高耐蚀性镀铬工艺研究 [J]. *表面技术*, 2012(5): 99-101.  
LUO Q, WANG L H, PU X R, et al. Research on high anti-corrosion hard chromium plating process[J]. *Surface Technology*, 2012(5): 99-101 (in Chinese).
- [18] 高志, 李英. 快速磨损试验机及其试验方法 [J]. *润滑与密封*, 1998, 23(4): 43-45.  
GAO Z, LI Y. Rapid wear tester and its test method[J]. *Lubrication Engineering*, 1998, 23(4): 43-45 (in Chinese).
- [19] 沈永秋, 刘志强, 查树兰, 等. 六种典型表面强化层的摩擦学特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 1992, 12(1): 45-54.  
SHEN Y Q, LIU Z Q, CHA S L, et al. Study on the tribological properties of six typical surface enhanced layers [J]. *Tribology*, 1992, 12(1): 45-54 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)