

研究论文(240—249)

几种陶瓷和金属等离子喷涂层 铸铁副的摩擦学特性研究*

吴华东 夏为民 金元生

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要 本文对等离子喷涂 $ZrO_2 + MgO$ 和 $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 陶瓷涂层、 $Mo + NiCrBSi$ (Ar/H_2) 和 $Mo + NiCrBSi(N_2/H_2)$ 混合粉末涂层, 以及 $Mo + 4\% O_2$ 渗氧涂层等的摩擦学特性进行了试验研究, 测定了它们的抗咬合载荷及其在边界润滑状态下的磨损率。结果表明, $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 陶瓷涂层/铸铁副的抗咬合性能最好, 在其轻度粘着的表面上形成了一层表面膜; $Mo + NiCrBSi(N_2/H_2)$ 金属涂层是一种实用性能较好的活塞环材料; 在粘着磨损条件下, 涂层材料的抗咬合性越好, 与之配磨的铸铁材料的磨损率越低; 涂层材料的抗咬合性与其本身的固有特性及孔隙率等有关。

关键词 陶瓷涂层, 等离子喷涂, 摩擦学特性, 抗咬合性

1. 前 言

发动机的热效率和燃油消耗率是其工作性能的重要指标^[1]。随着现代工业的迅速发展, 又出现了无冷发动机和绝热发动机^[2]。这类发动机是利用陶瓷绝热材料, 在缸套内壁形成有效的热绝缘层, 从而达到提高发动机性能之目的。它们通常是在比普通发动机更高的温度和压力下工作。在这样的条件下, 缸套和活塞环间的油膜厚度与环套表面之综合粗糙度的比值接近于 1, 因而表面直接接触是不可避免的^[3]。在活塞运动过程中, 活塞环在缸套表面滑过的大部分区域都处在边界润滑状态, 磨损比较严重, 并以粘着磨损为主。因此, 必须优选那些在边界润滑条件下能够改善润滑状态且又具有良好抗咬合特性的活塞环材料和涂层。

缸套/活塞环摩擦副的优劣直接影响到发动机的性能与寿命。理想的摩擦副要求具有较低的摩擦系数和磨损率。作为活塞环材料, 等离子喷涂层的一个重要特征是要尽量减轻缸套的磨损。氧化物陶瓷涂层目前在摩擦学领域的应用还很有限, 特别是 Al_2O_3 和 ZrO_2 等陶瓷涂层的摩擦学应用都还需要进一步完善和发展。

本文对等离子喷涂 $ZrO_2 + MgO$ 和 $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 陶瓷涂层、不同载气的 $Mo +$

1991-04-03收到初稿, 1991-09-22收到修改稿。本文通讯联系人吴华东。

* 国家自然科学基金资助项目。

NiCrBSi混合粉末涂层以及Mo+4%O₂涂层等5种材料的摩擦学特性进行了评价,测定了它们的抗咬合载荷及其在边界润滑状态下的磨损率,并且对磨损表面的特征进行了观察与分析。

2. 试 验 部 分

2.1 试验设备及材料

摩擦磨损试验在图1所示Optimel SRV摩擦磨损试验机上进行。这种试验机由一个固定的下试样座和一个可以拆卸的上试样固定架组成。上下试样通过一种可以调节的力相互压紧。由一个频率、冲程操纵系统来控制上试样往复运动的冲程和频率。摩擦力通过试样传到石英压力传感器,由传感器的压电电压模拟摩擦系数的变化,并进行记录测量。通过安装在底座中的电阻式加热器,可以使底座和下试样在很短时间内加热到预先设置的温度。

试样简图如图2所示,上下试样的接触面积始终保持16mm²。

下试样采用SOFIM发动机的灰铸铁缸套材料,其除主成分Fe以外的化学组成如表1所列。

这种铸铁的显微组织如图3所示,系由带片状石墨的珠光体和磷共晶

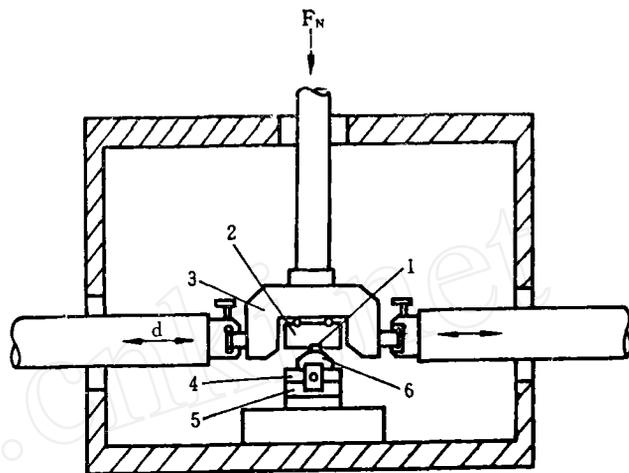


图1 SRV试验机的结构原理简图

F_N 表示垂直载荷; d 表示往复运动方向

1—上试样; 2—上夹具;

3—上固定架; 4—下底座;

5—摩擦测量元件; 6—下试样

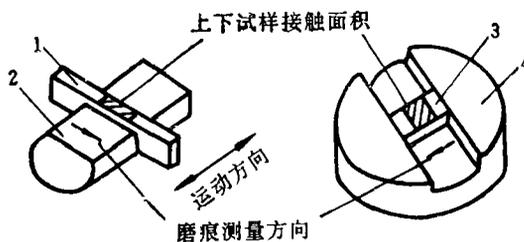


图2 试样简图

1—上试样; 2—上夹具;

3—下试样; 4—下夹具

组成。其表面粗糙度 $Ra=0.1740\mu\text{m}$ 。试样表面的显微硬度平均为 $HV358$ 。

上试样材料是5种等离子喷涂陶瓷和金属涂层,其特性参数如表2所列。

试验用油是含添加剂的CD级矿物油。添加剂主要有清净剂、分散剂和ZnDTP抗磨极压剂。润滑油在温度为40℃和100℃时的运动粘度分别是 $90\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 和 $11\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$,粘度指数为105。

2.2 测试参数

2.2.1 抗咬合载荷试验

跑合阶段: 50℃, 50N, 5 min;

表1 灰铸铁下试样除Fe以外的化学组成

元素名称	含量(wt%)
C	3.110
Si	1.960
Mn	0.880
Ni	0.540
Mo	0.025
P	0.300
S	0.037
Cr	0.300
Cu	0.420

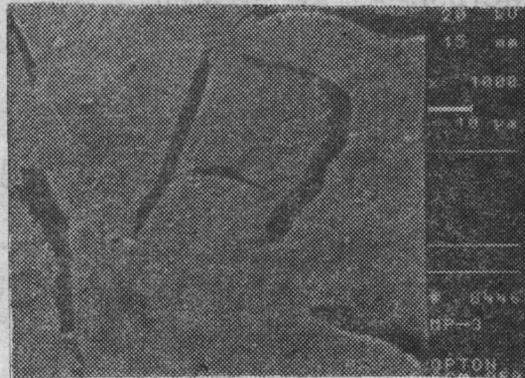


图3 下试样表面典型的显微组织

表2 5种涂层材料的特性参数

涂层材料	厚度 (μm)	显微硬度* (HV)	表面粗糙度Ra (μm)	孔隙率 (%)
ZrO ₂ -MgO	375	524	0.6510	9.7
Al ₂ O ₃ +40%ZrO ₂	220	877	0.4937	7.8
Mo+NiCrBSi(Ar/H ₂)	298	652	0.3494	3.4
Mo+NiCrBSi(N ₂ /H ₂)	294	621	0.2166	6.9
Mo+4%O ₂	220	655	0.5124	7.0

* 显微硬度测定时的载荷为3N, 持续时间为20秒。

100°C, 100N, 5 min。

测试阶段: 温度为300°C;

载荷由150N开始阶梯式加载, 每隔2 min加载50N;

供油方式是在跑合前后用量程范围为0—50 μl 的微量移液管各加油一次, 每次10 μl 。

2.2.2 磨损率测量试验

跑合阶段: 50°C, 50N, 5 min;

100°C, 100N, 5 min。

测试阶段: 温度为250°C;

载荷为300N (平均压力为18.75MPa);

时间为60 min (总行程为720m);

供油量为10 μl /10 min。

磨损率的测量是用Talysurf-5型表面形貌仪测量磨痕深度完成的, 磨痕测量方向见图2。

SRV试验机的其它参数设置如下:

冲程为2000 μm , 频率为50Hz; 平均速度为0.2m/s。

3. 试验结果

3.1 抗咬合载荷

摩擦副在不同载荷阶段的摩擦系数和不同涂层的抗咬合载荷如表 3 所列。

表3 5种涂层在不同载荷下的摩擦系数及其抗咬合载荷

载 荷 (N)	摩 擦 系 数				
	ZrO ₂ +MgO	Al ₂ O ₃ +40%ZrO ₂	Mo+NiCrBSi (Ar/H ₂)	Mo+NiCrBSi (N ₂ /H ₂)	Mo+4%O ₂
150	0.190	0.100	0.085	0.085	0.085
200	0.195	0.216	0.082	0.084	0.082
250	0.180	0.100	0.083	0.082	0.082
300	0.160	0.085	0.080	0.082	0.084
350	0.155	0.060	咬合	0.081	0.120
400	咬合	0.040	—	0.079	0.178
450	—	0.028	—	咬合	咬合
500	—	0.026	—	—	—
550	—	0.030	—	—	—
600	—	0.012	—	—	—
650	—	咬合	—	—	—
700	—	—	—	—	—

由表 3 可知, 与铸铁配磨时 5 种涂层材料的抗咬合载荷大小顺序如下:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\% \text{ZrO}_2 > \text{Mo} + \text{NiCrBSi}(\text{N}_2/\text{H}_2) > \text{Mo} + 4\% \text{O}_2 > \text{ZrO}_2 + \text{MgO} > \text{Mo} + \text{NiCrBSi}(\text{Ar}/\text{H}_2)$$

3.2 磨损率

试样的磨损率测量结果如表 4 所列。

表4 5种涂层/铸铁副试样的磨损率测量结果

涂 层 材 料	平均摩擦系数	磨痕深度(μm)		磨损率(mm/Nm, ×10 ⁻⁷)	
		上试样	下试样	上试样	下试样
ZrO ₂ +MgO	0.104	16.2	26.7	7.5	12.4
Al ₂ O ₃ +40%ZrO ₂	0.098	<1.0	13.7	<0.5	6.3
Mo+NiCrBSi(Ar/H ₂)	0.076	<1.0	1.7	<0.5	0.8
Mo+NiCrBSi(N ₂ /H ₂)	0.078	3.2	<1.0	1.5	<0.5
Mo+4%O ₂	0.078	<1.0	2.9	<0.5	1.4

4. 分析与讨论

人们常把活塞环/缸套摩擦副由于熔着被剪切而引起的表面剧烈损伤叫“拉缸”, 产生拉缸的主要原因^[4]有:(a)气缸温度过高引起润滑油粘度下降, 导致金属直接接触部位增大, 容易引起拉缸;(b)在很多情况下是由于润滑油不足而造成拉缸。因此, 在相同的温度和供

油条件下,考察各种摩擦副的抗咬合性能具有很大的实际意义。

图4示出了3种涂层与铸铁配磨时的摩擦系数随载荷及时间的变化曲线。可以看出,在

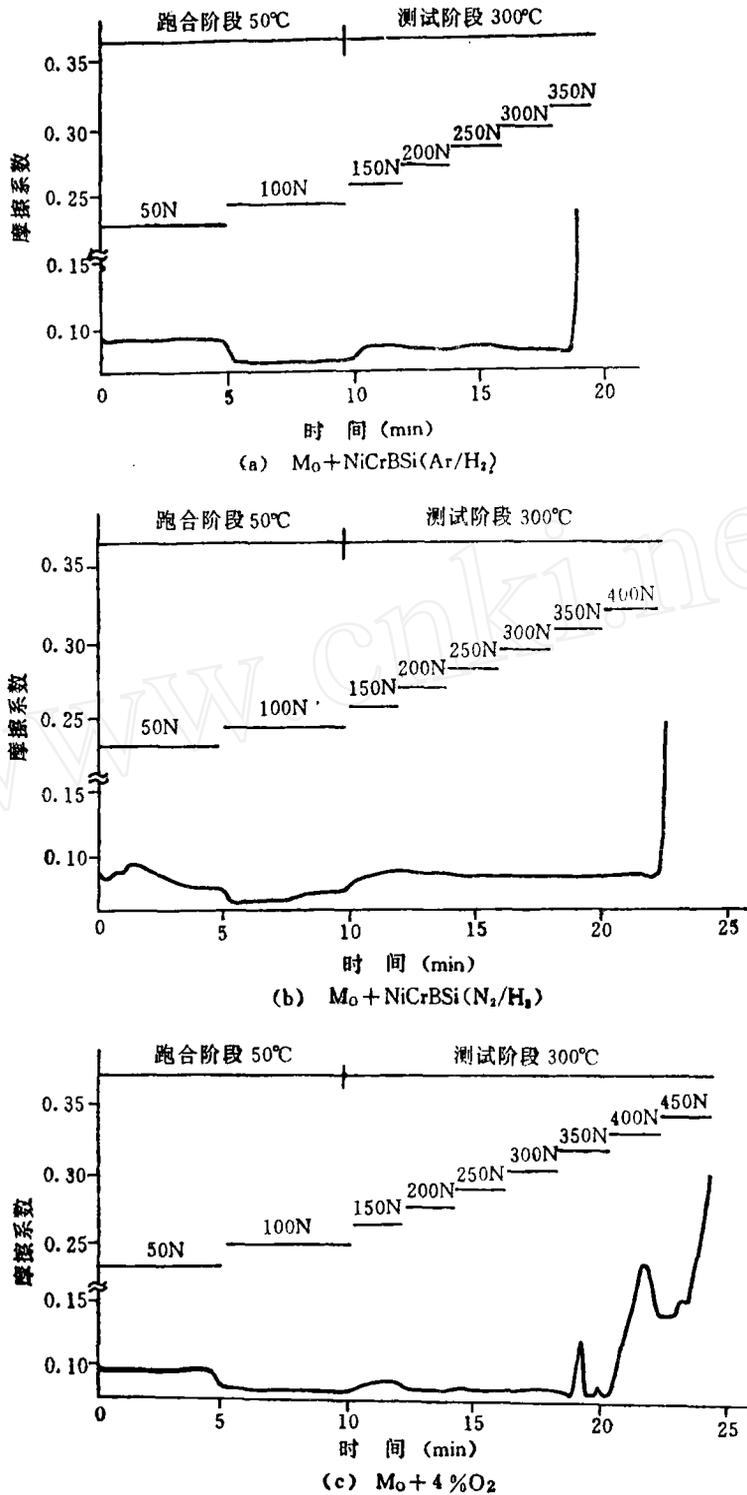


图4 3种涂层与铸铁配磨时的摩擦系数随载荷及时间的变化曲线

300℃下加载至350N以前,三者的摩擦系数都没有发生明显的变化,表明这3种摩擦副与试验用润滑油的配伍性较好,在油膜完全破裂前耐冲击载荷的能力较强。在油润滑条件下,各种摩擦副的抗咬合特性与润滑剂的性质有关。据文献[5]报道,不同种类的润滑油对陶瓷涂层之减磨效果的影响不同。对于 $ZrO_2 + MgO$ 和 $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 涂层,它们在300℃下出现咬合之前于各不同载荷阶段的摩擦系数都有明显的变化(见图5)。这种不稳定性与摩擦过

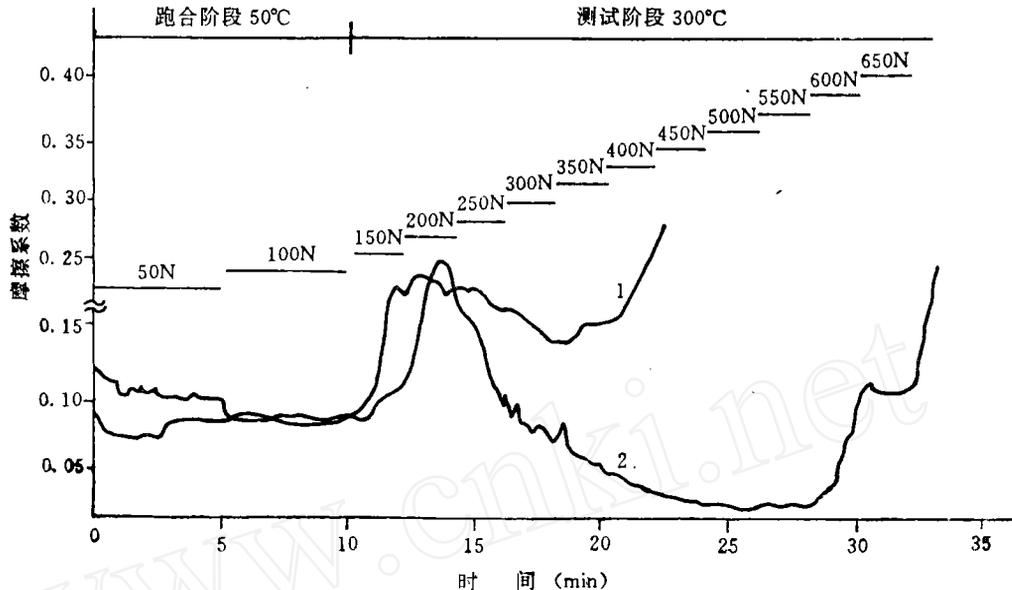


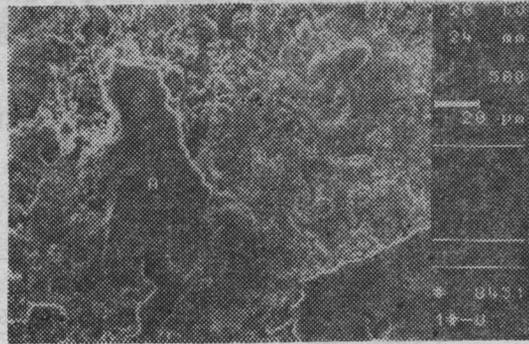
图5 两种陶瓷涂层与铸铁配磨时的摩擦系数随载荷及时间的变化曲线

1— $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$; 2— $ZrO_2 + MgO$

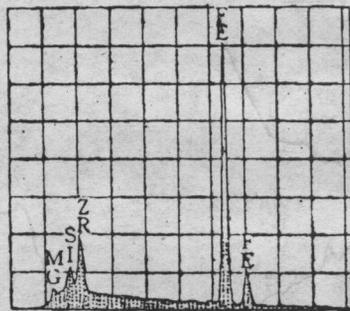
程中形成边界润滑膜的表面化学反应有关。由图5可以看出, $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 涂层材料表面形成了具有实用意义的化学反应表面膜,而 $ZrO_2 + MgO$ 涂层材料的摩擦系数却始终保持在0.15以上。5种涂层材料的磨损表面特征如图6—10所示。能谱观察结果表明,图中标有A的区域表面是铸铁材料,这是摩擦过程中偶件材料发生粘着转移的结果。

从图6、8、10上的照片可以看出, $ZrO_2 + MgO$ 、 $Mo + NiCrBSi(Ar/H_2)$ 和 $Mo + 4\% O_2$ 涂层材料的表面粘着磨损十分严重,其上出现了大量的塑性流动和擦伤痕迹。尽管图9(a)所示 $Mo + NiCrBSi(N_2/H_2)$ 涂层表面也出现了材料转移现象,但粘着区却很小。相对而言, $Al_2O_3 + 40\% ZrO_2$ 材料表面却没有出现严重的粘着磨损区域,也未发生明显的塑性流动现象。对图7(a)所示F区域进行能谱分析发现,摩擦表面有来自添加剂中的S、P、Cl等元素,表明摩擦表面已经形成由S、P、Cl、Al、Fe组成的边界层,其在摩擦过程中可以起阻止咬合的作用。

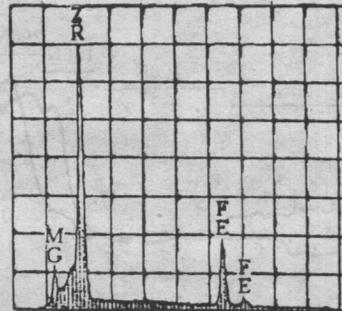
由表4可以看出,在5种涂层/铸铁摩擦副中, $Mo + NiCrBSi(N_2/H_2)$ 涂层材料的磨损率较高,而与之配磨的铸铁偶件的磨损率却最低。由表2可知, $Mo + NiCrBSi(N_2/H_2)$ 涂层材料的孔隙率是 $Mo + NiCrBSi(Ar/H_2)$ 涂层材料的两倍,可见同种材料的孔隙率高具有改善润滑和抗咬合性能的作用,但也会引起材料本身抗磨特性的下降。因此,适当控制涂层材料的孔隙率十分重要。尽管如此, $Mo + 4\% O_2$ 这种涂层材料的孔隙率也比较高,但与之配磨的铸铁试样的磨损率却最高,这表明涂层材料本身的固有特性也不容忽视。



(a) 磨损表面的二次电子像

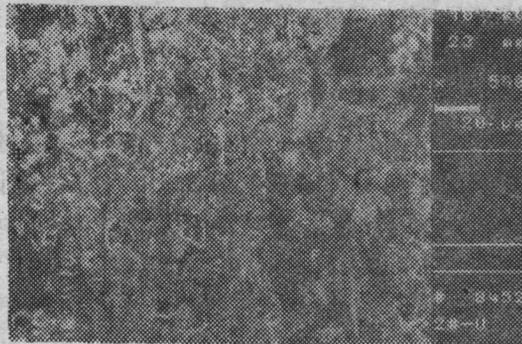


(b) 图(a)上严重粘着区(A)的能谱图

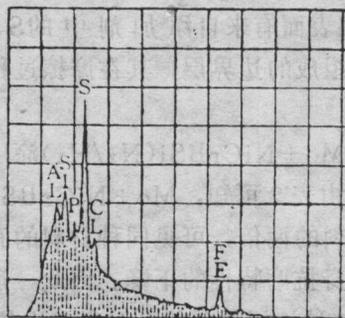


(c) 图(a)上轻度粘着区(B)的能谱图

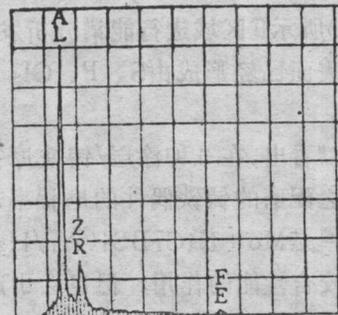
图 6 ZrO_2+MgO 涂层的磨损表面特征



(a) 磨损表面的二次电子像

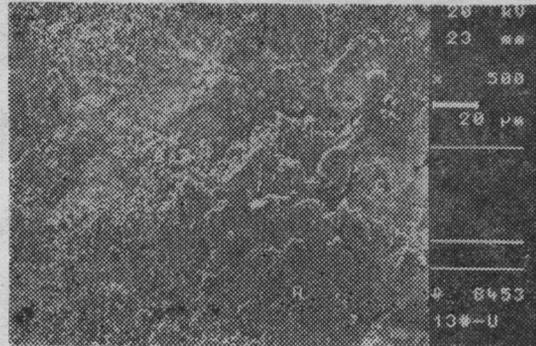


(1) 形成了表面膜的 F 区的能谱图

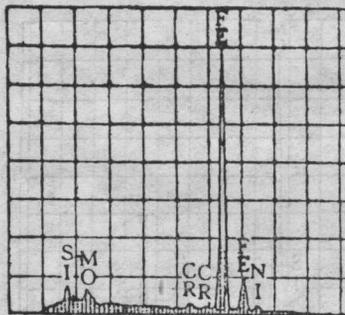


(c) 图(a)中轻度粘着区(L)的能谱图

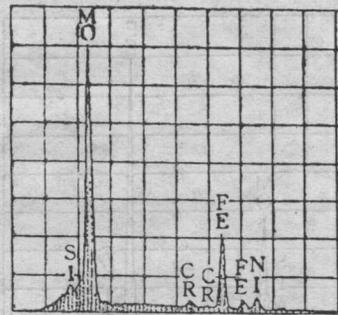
图 7 $Al_2O_3+40\%ZrO_2$ 涂层的磨损表面特征



(a) 磨损表面的二次电子像



(b) 图(a)中严重粘着区(A)的能谱图

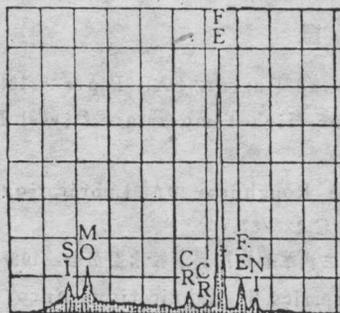


(c) 图(a)中轻度粘着区(C)的能谱图

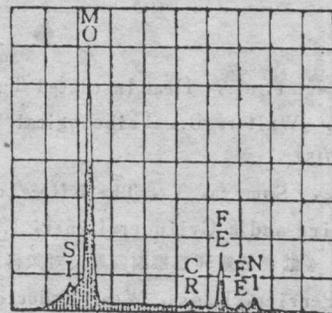
图 8 Mo+NiCrBSi(Ar/H₂)涂层的磨损表面特征



(a) 磨损表面的二次电子像

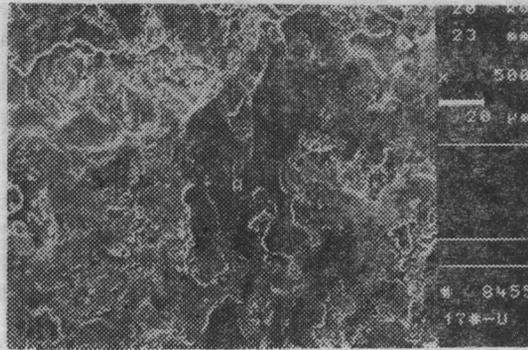


(b) 图(a)中严重粘着区(A)的能谱图

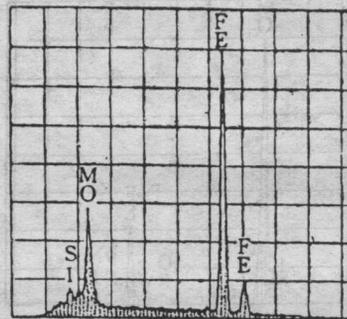


(c) 图(a)中轻度粘着区(L)的能谱图

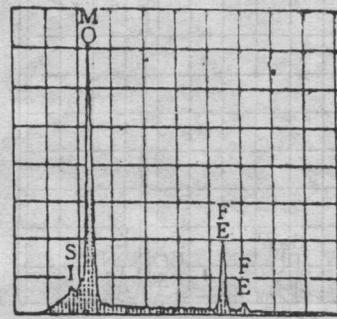
图 9 Mo+NiCrBSi(N₂/H₂)涂层的磨损表面特征



(a) 磨损表面的二次电子像



(b) 图(a)中严重粘着区(A)的能谱图



(e) 图(a)中轻度粘着区(B)的能谱图

图10 Mo+4%O₂涂层的磨损表面特征

5. 结 论

- a. 在5种涂层/铸铁副中, Al₂O₃+40%ZrO₂涂层材料的抗咬合性能最好, 在其轻度粘着的表面上形成了一层表面膜。
- b. Mo+NiCrBSi(N₂/H₂)金属涂层是一种实用性能较好的活塞环材料。
- c. 在粘着磨损条件下, 无论是陶瓷涂层还是金属涂层的抗咬合特性越好, 与之配磨的铸铁材料的磨损率越低。
- d. 涂层材料的抗咬合性与其本身的固有特性及孔隙率等有关。

附注 本文所用等离子涂层样品系由瑞士PT等离子技术公司提供。

参 考 文 献

- [1] Toyama, K. et al., Heat Insulated Turbocompound Engine, SAE Paper 831345.
- [2] Paul, S., Walter, B., Tribological Systems for High Temperature Diesel Engines, SAE Paper 870157.
- [3] Sanda, S., Someya, T., The Effect of Surface Roughness on Lubrication Between a Piston Ring and a Cylinder Liner, I. Mech.E. C 223/87.
- [4] 江庆信译, 《缸套活塞环摩擦副问题及对策译文集》, 第二汽车制造厂科学技术委员会, 1986, p.27-28.
- [5] Maurin-Perrier, Kapsa, Wear Reduction of Ceramics by Lubrication, Euro. Trib. Finland, 1989.
- [6] Yanushouis, T.M., Wolter, G.W., Ceram. Eng. Sci. Proc., 6(7-8), 1067-1076(1985).

Investigation on Tribological Behavior of Several Plasma Sprayed Ceramic Coatings Against Cast Iron

Wu Huadong Xia Weimin Jin Yuansheng

(National Tribology Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Plasma sprayed ceramic coatings and metallic composite coatings have a wide application in the ring-cylinder components of various engines. In this paper, Al_2O_3 -40% ZrO_2 , ZrO_2 - MgO ceramic coatings and $\text{Mo}+\text{NiCrBSi}$ (Ar/H_2), $\text{Mo}+\text{NiCrBSi}$ (N_2/H_2) and Mo doped oxygen composite metallic coatings were investigated. The seizure resistance characteristics of these five ceramic and metallic composite coatings against cast iron have been evaluated under lubrication with CD grade mineral oil at 300°C, and the wear rates under the boundary lubrication (250°C, 300N, 60min) have been tested. All friction and wear experiments were carried out on a SRV test machine. The parameters, such as temperature, load, frequency, stroke and time, can be set up according to the experiment requisition. The wear surfaces were observed with CSM950 scanning electric microscope and TN5402 energy dispersion microanalysis of X-ray. The wear rate was calculated according to the depth of wear tracks measured with a Talysurf-5 profile meter communicated with VAX8350 computer system.

The results indicated that the seizure resistance of Al_2O_3 -40% ZrO_2 /cast iron couple is better than that of ZrO_2 - MgO , and the $\text{Mo}+\text{NiCrBSi}$ (Ar/N_2)/cast iron couple is the best among the three metallic composite coatings in seizure resistance. It seems that Al_2O_3 -40% ZrO_2 /cast iron is promising in practical application and worthwhile further research. Under adhesive wear mode, the better the couple's seizure resistance, the lower the wear rate of the matched cast iron specimen both for ceramic coatings and metallic coatings.

The seizure resistance properties are closely related to the inherent properties of coating material itself, the compatibility between lubricant and coating material and the coating porosity. The increasing of coating material porosity is beneficial to improving lubrication and seizure resistance, but high porosity results in a severe wear.

Key words plasma sprayed coating, tribological behavior, seizure resistance load