

# 活塞环用 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)复合涂层的优化研究

Optimization of Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) Composite Coating for Piston Ring Application

李 辉,孙日超,杨海鑫,谷佳宾,栗卓新

(北京工业大学 材料科学与工程学院,北京 100124)

LI Hui,SUN Ri-chao,YANG Hai-xin,GU Jia-bin,LI Zhuo-xin

(College of Materials Science and Engineering,Beijing

University of Technology,Beijing 100124,China)

**摘要:** 采用机械混合方法配制喷涂用粉末 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>),并利用大气等离子喷涂方法制备活塞环耐磨涂层,对涂层进行力学性能以及摩擦学性能测试。结果表明,Mo 的添加有助于减小涂层的孔隙率,涂层显微硬度随 Mo 含量的增加而降低,添加 20%(质量分数)Mo 的复合涂层具有较好的摩擦磨损性能。复合涂层的磨损主要表现为黏着磨损和磨粒磨损,NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 含量高的涂层存在较多的剥落现象。涂层的耐磨性与涂层的硬度模量比( $H/E$ )有较好的对应关系。

**关键词:** NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>;Mo;复合涂层;力学性能

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.12.007

**中图分类号:** TG17;TH11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)12-0037-07

**Abstract:** The composite powder of Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) was mechanically blended and deposited using atmospheric plasma spraying. The mechanical property and tribological performance of the prepared coating were tested. The results show that the porosity and the microhardness of the composite coating are inversely proportional to the Mo content. The coating with the Mo addition of 20%(mass fraction) presents better performance in the frictional test. All the composite coatings mainly endures adhesive wear and abrasive wear. The coating containing large portion of NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> is prone to flake during the wear. The wear resistance of the coating shows a good accordance with the index of  $H/E$  of the coating.

**Key words:** NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>;Mo;composite coating; mechanical property

随着发动机功率的提高和排放法规的日趋严格,由活塞环和缸套组成的摩擦副面临着更为严重的磨损问题,尤其是活塞环的磨损现象变得异常严峻<sup>[1-3]</sup>。传统的电镀硬铬活塞环已经很难满足使用需求,而且电镀工艺对环境造成十分严重的污染。目前,有望替代电镀硬铬的新技术主要有改良电镀技术(Chrom-Keramik-Schicht,CKS)、物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,PVD)、热喷涂等,其中热喷涂技术工艺灵活,生产效率高,在替代电镀硬铬领域极具应用前景<sup>[4-12]</sup>。

新型热喷涂活塞环耐磨涂层的开发,需要综合考虑涂层的摩擦因数、磨损量、对磨材料的磨损量等指标<sup>[13,14]</sup>,从热喷涂涂层材料上看,以 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>,Co-WC 为代表的金属陶瓷涂层,兼具有较高的硬度和韧性,表现出良好的耐磨性,其中的金属黏结相 NiCr,Co

等可以很好地连接涂层与基体,有利于承受较高的摩擦副载荷<sup>[7-10]</sup>。而在活塞环用涂层中,Mo 基材料的应用较为广泛,这是因为 Mo 元素能够增加复合涂层与基体的结合强度,并且涂层韧性好,抗裂性高,耐刮擦性强<sup>[7,10,11,15]</sup>。但从应用来看,单一材料的涂层很难同时满足上述 3 项指标,因而金属陶瓷复合涂层成为活塞环耐磨涂层研究关注的焦点之一<sup>[6-11,14]</sup>。

NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 系列涂层是热喷涂金属陶瓷复合涂层的研究重点之一,在国外已有商业化涂层应用于活塞环上的报道<sup>[16]</sup>,但是 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层往往有较高的摩擦因数,降低涂层的摩擦因数是发展方向。P. Niranatlumpong 等<sup>[7]</sup>的研究表明,向 NiCrBSi 涂层中添加一定含量的 Mo 可以显著降低摩擦因数,并且涂层的耐磨性也得到提高。参考此研究结果,为进一步改善热喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的性能,本工作向热喷涂

NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉末中添加 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% (质量分数, 下同) 的 Mo 粉, 并制备涂层。在模拟活塞环运转的高载荷、干摩擦条件下, 研究不同含量的 Mo 对 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) 复合涂层力学性能、摩擦磨损性能的影响, 以获得 Mo 与 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的最佳配比方案。

1 实验材料及方法

为满足活塞环高强度、高韧性的需求, 碳钢已被逐渐应用于活塞环基体材料中, 所以本实验选用 45# 钢

作为涂层的基体材料。为模拟实际活塞环涂层的工作状态, 对磨材料选用缸套常用的含硼铸铁。实验用 Mo 粉为团聚烧结法制备, 粒径范围 45~90 μm, 而 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉末为烧结破碎粉, 粒径范围 45~80 μm, 原始粉末形貌如图 1 所示。采用机械法混合 Mo 与 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 制备出 Mo 含量 0% (NCC), 20% (80NCC), 40% (60NCC), 60% (40NCC), 80% (20NCC), 100% (Mo) 的 6 种复合粉末。采用 Metco 9Mb 大气等离子喷枪进行喷涂, 混合粉末的喷涂参数如表 1 所示, 喷涂前对试样进行常规的清洁和喷砂粗化处理。

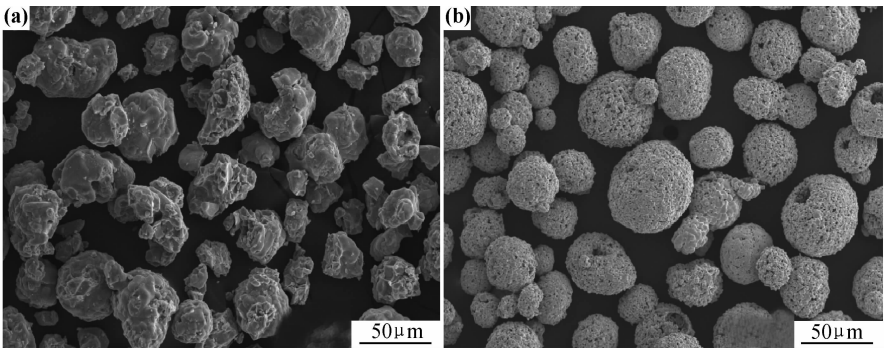


图 1 原始粉末的 SEM 形貌 (a) NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; (b) Mo  
Fig. 1 SEM morphology of the raw powder (a) NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; (b) Mo

表 1 混合粉末的喷涂参数

Table 1 Plasma spraying parameters of the blended powder

Powder feeding rate/(g · min <sup>-1</sup> )	Spray distance/mm	Current/A	Voltage/V	Flow rate of Ar/H <sub>2</sub> /(L · min <sup>-1</sup> )
40	100	500	55	28/7

根据国标 GB/T9790—1988 进行涂层的显微硬度测试, 测试条件: 载荷 200g, 加载时间 15s。在每个涂层不同区域取 5 点进行测量, 并取平均值作为最终显微硬度值。涂层的弹性模量采用压入法测试, D. B. Marshall 等<sup>[17]</sup> 给出了努氏压头测量涂层弹性模量的简单方法, 其计算公式

$$E = \frac{\alpha \cdot H}{b/a - b'/a'} \tag{1}$$

式中:  $a'$ ,  $b'$  分别为努氏压痕的对角线长度;  $a$ ,  $b$  为努氏压头对角线的长度, 其比值为 7.11;  $E$  为涂层的弹性模量;  $H$  为努氏硬度;  $\alpha$  为与脆性材料相关的系数, 其值为 0.45。

利用 SEM 分析涂层截面组织结构; 借助能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 分析涂层元素组成; 采用 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 分析涂层的物相组成; 利用 Image J 图像处理软件分

析涂层的孔隙率。

采用 MRH-3 型高速环块摩擦磨损试验机分析涂层在干摩擦条件下的常温摩擦学性能, 其工作原理如图 2 所示, 上试样为喷涂涂层, 固定在卡具上, 下试样为圆周运动的对磨件。由于表面粗糙度对摩擦磨损影响较大, 参考相关研究<sup>[18]</sup>, 测试前对上下试样表面用 1000# 砂纸打磨。摩擦磨损实验参数的确定参考 S. Johansson<sup>[19]</sup> 的研究结果, 如表 2 所示。对磨件的磨损量采用称重法, 使用精度 0.1mg 的天平测量磨损前后的质量, 取其差值。涂层的磨损量根据磨损体积确定, 用 Wykont1100 白光干涉仪对磨痕进行测量得出。

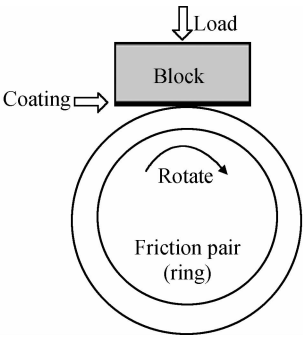


图 2 环块摩擦磨损试验机原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of the ring-block test machine

表 2 摩擦磨损实验参数  
Table 2 Wear test conditions

Load/ N	Temperature/ ℃	Test duration/ min	Rotational speed/ (r · min <sup>-1</sup> )
150	20	30	234

2 涂层摩擦学性能分析

图 3 是等离子喷涂 Mo 与 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (NCC) 复合涂层截面的微观组织图。涂层中白色物相为 Mo，深

色相为 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>，灰色物相为 NiCr。可看出不同配比混合粉末的复合涂层中，Mo 与 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 呈现出交互堆叠的层状结构，这是典型热喷涂涂层的结构特点。其中硬质相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 为脆硬相，其颗粒直径大概在几微米到十几微米，并且均匀地分布在粘接相 NiCr 中，有助于在摩擦磨损过程中起到减磨作用。图 3(a) 可看出纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (NCC) 涂层局部存在显微裂纹，这是因为 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 组织硬且脆<sup>[1,20,21]</sup>，在喷涂过程中，很难通过塑性变形释放应力，从而引发裂纹。

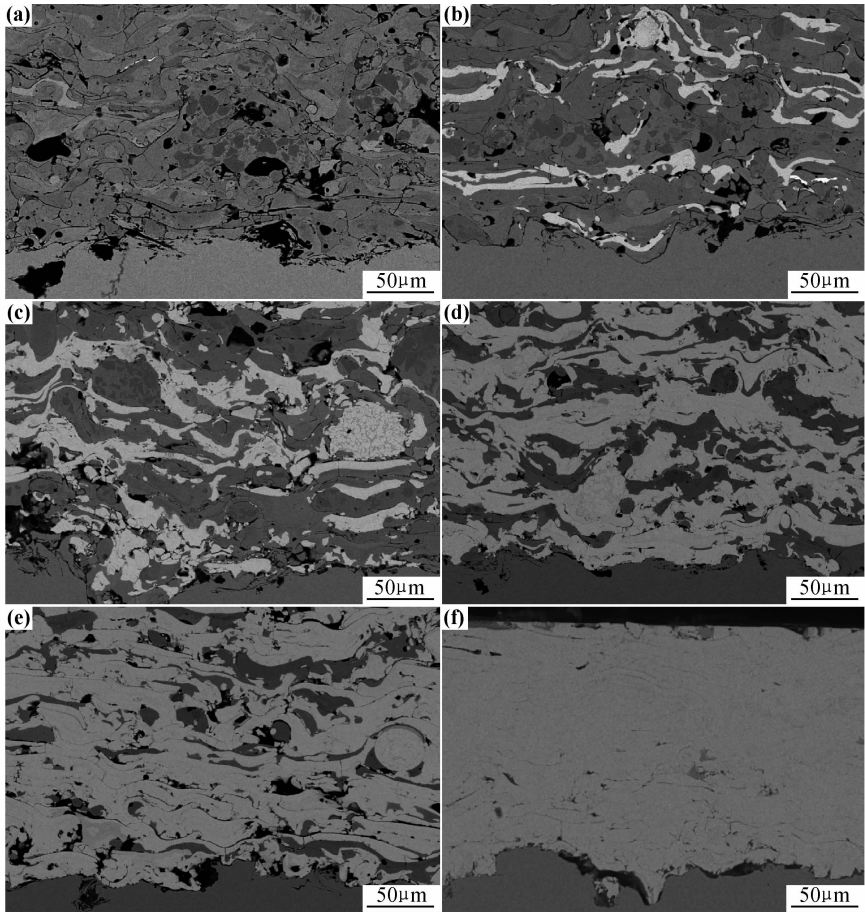
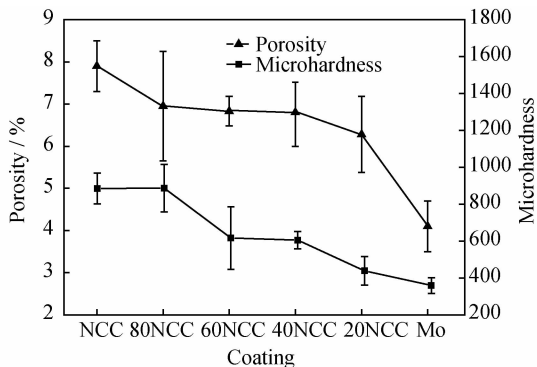


图 3 涂层截面 SEM 照片 (a)NCC; (b)80NCC; (c)60NCC; (d)40NCC; (e)20NCC; (f)Mo  
Fig. 3 SEM micrographs of the cross section of the as-sprayed coating  
(a)NCC; (b)80NCC; (c)60NCC; (d)40NCC; (e)20NCC; (f)Mo

图 4 是不同配比涂层的孔隙率与显微硬度的测试结果，可以看出，涂层显微硬度和孔隙率与涂层中 Mo 含量相关，Mo 含量越多，涂层的显微硬度越低，这是由于 Mo 相的硬度要低于 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>，所以添加 Mo 会降低涂层整体的硬度。涂层的孔隙率则随 Mo 含量的增多不断减小，因为在喷涂过程中 Mo 颗粒易于变形铺展，这有利于减小涂层的孔隙。如图 3(a) 所示，NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 含量较多的涂层，孔隙与显微裂纹的数量也比较多，孔隙的产生还可能是由于 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒在制

样过程中发生剥落造成的。总体来说，活塞环涂层显微硬度的升高有利于提高耐磨性<sup>[22,23]</sup>，而孔隙率的影响较为复杂，在油润滑条件下，孔隙率有利于涂层的储油<sup>[24]</sup>，但另外一方面，涂层的抗裂性、耐磨性、耐疲劳性与涂层的孔隙率大致成反比<sup>[25,26]</sup>。一般认为，孔隙率控制在一定范围有助于改善涂层的耐磨性。

经过磨损实验后，所有涂层磨痕表面的形貌较为相似。典型涂层(80NCC)磨痕形貌如图 5 所示，磨痕深度在 20~80μm 之间，但各涂层磨损体积差异较大，

图 4 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)系列涂层孔隙率及显微硬度Fig. 4 Porosity and microhardness of Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) series coatings

统计后的结果如图 6 所示。纯 Mo 涂层的磨损体积最大,大约是磨损体积最小的 80NCC 涂层的 2 倍,纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层中存在大量显微裂纹,因此磨损量也比较大。60NCC 涂层的磨损体积仅次于 Mo,这可能与涂层的组织结构有关,如图 3(c) 所示,60NCC 涂层中 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相之间、Mo 相之间组织结构分布不均,使得涂层在磨损过程中容易被破坏。

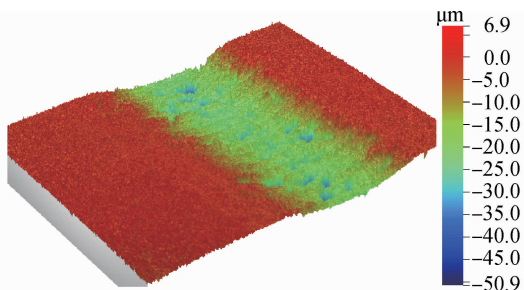


图 5 80NCC 涂层的磨损形貌

Fig. 5 Morphology of the worn surface of 80NCC coating

由图 6 可知,除纯 Mo, NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层外,其他对磨件磨损质量差异不大。纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层对对磨件的磨损程度明显大于其他涂层,这是由于涂层中含有 75% 的高硬度陶瓷相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 涂层硬度高,对对磨件产生严重的磨损。纯 Mo 涂层的硬度较低,对对磨件损害极小,实验中纯 Mo 涂层的对磨件还出现了质量增加的现象,磨损表面有一定量的黑色黏着物,说明发生了材料转移。

图 7 是各复合涂层的摩擦因数,可看到各涂层摩擦因数均随转数的增加而增大,其中纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的摩擦因数明显大于其他涂层,这与其硬度高有关<sup>[22]</sup>。图 7 中并不能看出 Mo 含量的变化对涂层摩擦因数的变化有规律性的影响,但从摩擦因数及磨损量的结果看,Mo 含量 20% 的复合涂层摩擦因数较小,而且 Mo 含量在某一范围内变化时,复合涂层表现出最佳的摩擦学性能。

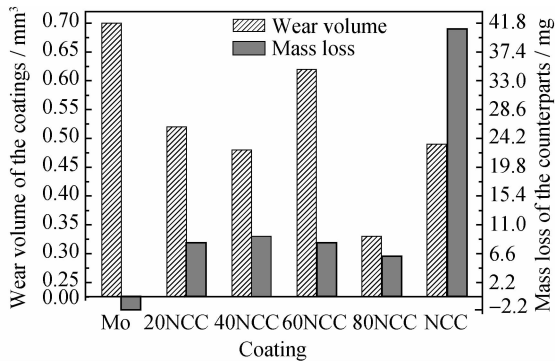
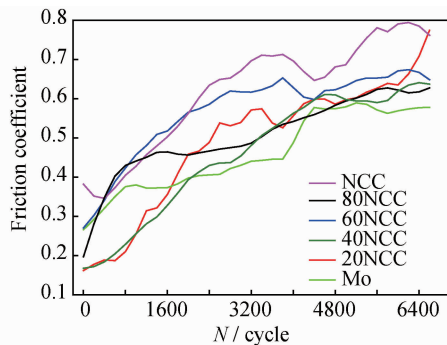


图 6 涂层与对磨件的磨损量

Fig. 6 Wear loss of the coating and the counterpart

图 7 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)系列涂层摩擦因数Fig. 7 Friction coefficient of Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>) series coating

纯 Mo 涂层的摩擦因数在整个摩擦过程中均比较低,这可能与等离子喷涂过程中 Mo 的氧化有关。在背散射模式下,纯 Mo 涂层颗粒之间存在少量衬度不同的物相,对纯 Mo 涂层表面进行 XRD 分析,结果如图 8 所示,在涂层表面检测出少量的 MoO<sub>2</sub> 相,这与 P. Niranatumpom 等<sup>[7]</sup> 的结果相符。在磨损过程中,MoO<sub>2</sub> 可以充当润滑相,使得两接触表面在很小的剪切应力(即摩擦力)下分开,因此摩擦因数较低。值得注意的是,Mo-80NCC 涂层摩擦因数也比较低,并且磨损量最小(图 6),综合性能表现最为突出,这可能与 Mo, NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 两种材料在涂层当中的分布及含量有关。

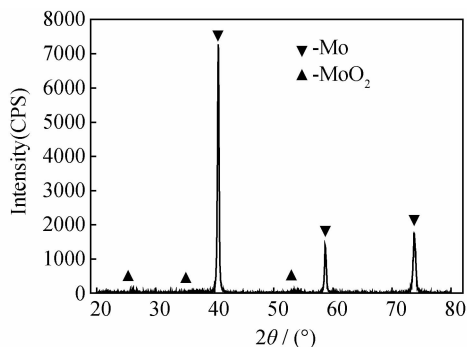


图 8 Mo 涂层 XRD 结果

Fig. 8 XRD pattern of the plasma sprayed Mo coating

综合考虑摩擦因数、磨损量,Mo 与 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 在质量比为 1:4 的情况下,复合涂层的综合性能最优。

### 3 涂层摩擦磨损机理分析

选取 Mo,NCC 和 80NCC 涂层的磨痕进行 SEM 分析(图 9)。可知,磨痕表面均没有出现明显的犁沟,但存在黏着(箭头 A)现象,纯 Mo、纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层(NCC)表面均有不同程度的黏着物,借助 EDS 分析发现 NCC 涂层黏着物主要是 Fe 的氧化物,而 Mo 涂层的黏着物主要是 Fe 与 Mo 的氧化物。在磨损过程中形成的磨屑以黏着物形式分布于涂层表面的不平处,其中 80NCC 涂层表面的磨屑量较少(图 9(c),(d)),而 NCC 涂层表面磨屑量最多,在整个磨痕表面都有分布(图 9(e),(f))。Mo 涂层表面存在大量黏着物,这是因为相对于 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 相,Mo 更易与 Fe 基对

磨件发生黏着<sup>[22]</sup>。80NCC 与 NCC 涂层的磨损形式有所差异,NCC 涂层磨痕表面微裂纹(箭头 B)数量较多,一部分裂纹可能是涂层本身所具有的,但更多是磨损过程中所产生的。在摩擦过程中硬质相 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 缺乏高韧性黏结相的保护,随着磨损变形的增大,硬质相被裸露在表面,在剪切应力作用下会整体从涂层表面剥落,这种形式的裂纹是一种典型的脆性断裂形式。对于高硬度硬质相和塑性好的黏结相匹配较佳的 80NCC 涂层(图 9(c),(d)),细小的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒镶嵌在 NiCr(灰色连续相)中,Mo 相(图 9(c)中白色物相)均匀分布在涂层中,Mo 相、NiCr 黏结相在摩擦过程中发生了充分的塑性变形,起到了抗磨减磨的作用,同时也使磨损后的涂层表面变得更为光滑。从上述磨痕的观察可看出,复合涂层与铸铁对磨时主要表现为黏着磨损和磨粒磨损,陶瓷相含量多的涂层存在较多的脆性剥落现象。

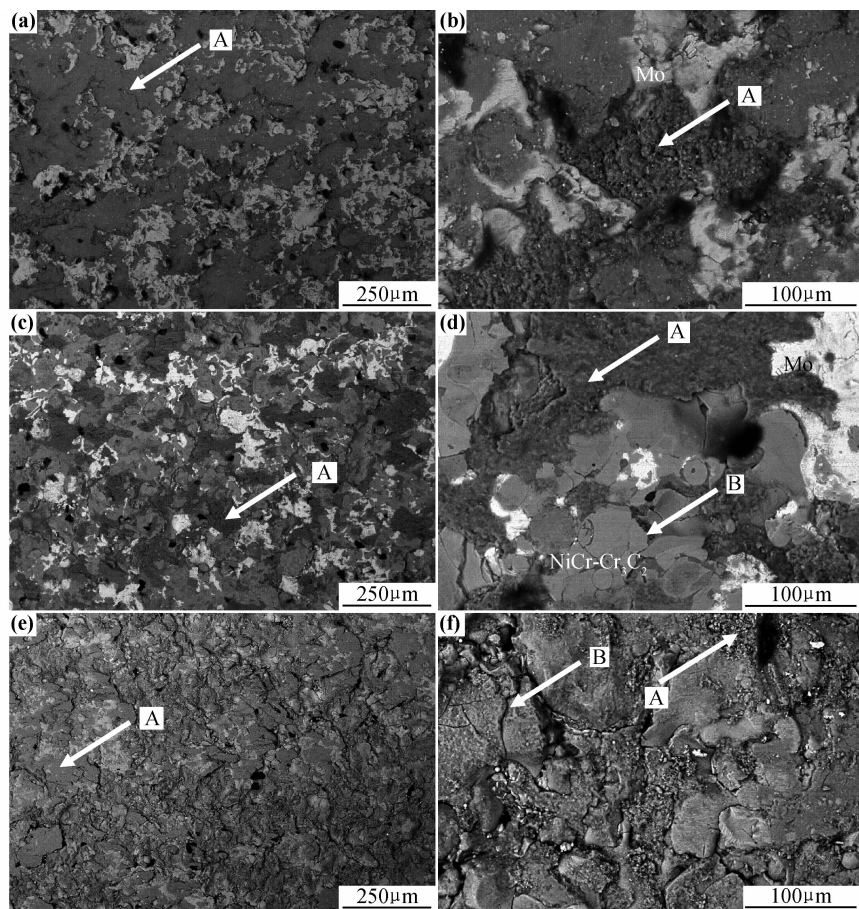


图 9 涂层的磨痕 SEM 磨痕形貌 (a),(b)Mo;(c),(d)80NCC;(e),(f)NCC

Fig. 9 SEM micrographs of the wear scar for coatings (a),(b)Mo;(c),(d)80NCC;(e),(f)NCC

涂层耐磨性的好坏与涂层的力学性能存在强烈的相关性,但涂层的耐磨性很难用单一的力学指标描述,如韧性、硬度、强度、模量等。从微观角度来说,本研究

中 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)复合涂层以黏着磨损和剥落失效形式为主,涂层磨损量很大程度取决于磨损载荷作用下裂纹的萌生与扩展的难易程度。在大量实验研究结

果的基础上,Dao M.<sup>[27]</sup>和 A. Leyland<sup>[28]</sup>总结指出,涂层的力学指标硬度模量比( $H/E$ )与涂层的耐磨性有较好的对应关系。用压痕法测试涂层的弹性模量,得到本研究中涂层  $H/E$  的数值如表 3 所示。

表 3 涂层的弹性模量与  $H/E$  值

Coating	$E$ /GPa	$H/E$
NCC	70.9	95.4
80NCC	66.3	100.5
60NCC	88.2	64.6
40NCC	69.1	74.9
20NCC	76.5	66.3
Mo	47.8	63.5

用涂层磨损体积的倒数作为耐磨性的指标,它与涂层  $H/E$  的关系如图 10 所示。可看出涂层的  $H/E$  与耐磨性有较好的对应关系。 $H/E$  是表示材料失效时极限弹性应变的一个指标<sup>[28]</sup>,高的  $H/E$  值说明材料裂纹萌生的极限应力更大,这有利于耐磨性能的增强。另一方面,在裂纹的扩展过程中,材料的韧性也起着相当重要的作用,因此涂层的耐磨性也与涂层的韧性相关。Dao M. 等<sup>[27]</sup>认为  $H/E$  值在一定程度上也能体现材料的断裂韧性,但涂层的断裂韧性也可通过

实验方法直接测试。参考 G. R. Anstis<sup>[29]</sup>文中大载荷维氏压头压入法,对 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)复合涂层进行断裂韧性分析,几种涂层的维氏硬度压痕如图 11 所示,可知,纯 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层中压痕附近产生了数量众多的微裂纹,而添加 Mo 的复合涂层,压痕附近的显微裂纹数量减少,并且长度也有所减短,这说明涂层中添加 Mo 后能有效提高断裂韧性。因此,在不过多损失涂层硬度和强度的情况下,适量添加增韧相,将有助于增大裂纹扩展的阻力,这对减少磨损量是十分有利的。

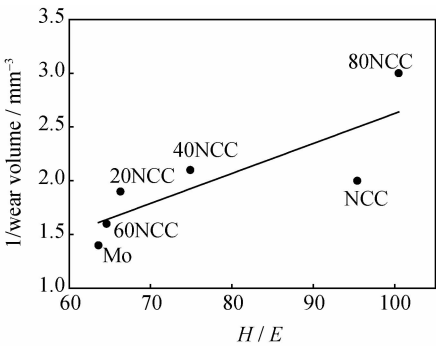


图 10 涂层耐磨性与  $H/E$  之间的关系

Fig. 10 Relationship between  $H/E$  and wear resistance of the coating

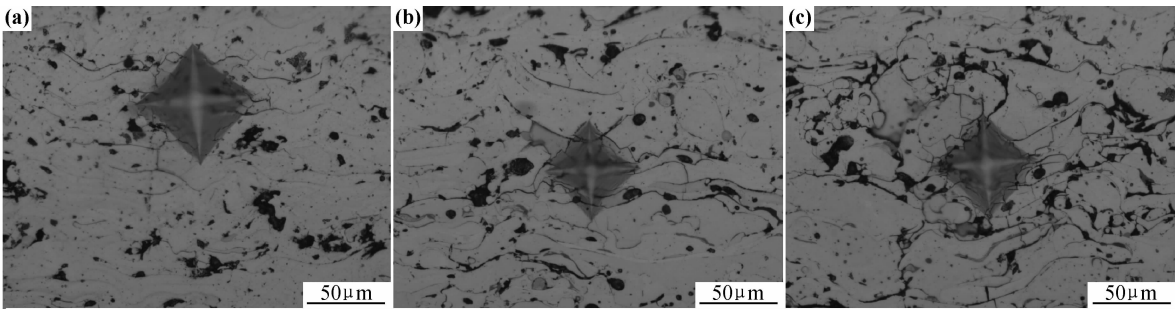


图 11 涂层的维氏硬度压痕 (a)20NCC;(b)80NCC;(c)NCC

Fig. 11 Vickers indentation of the as-sprayed coating (a)20NCC;(b)80NCC;(c)NCC

4 结论

- (1)等离子喷涂 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)复合涂层中,Mo 的添加有助于减小涂层孔隙率,但 Mo 含量较高时涂层的显微硬度值下降。复合涂层对磨件磨损情况差异不大。Mo 含量在 20%时,涂层具有较好的力学性能及摩擦学性能,综合性能最佳。
- (2)在确定的磨损条件下,复合涂层均表现出不同程度的黏着磨损,NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 含量较高的涂层存在较多的剥落,磨粒磨损更为严重。
- (3)热喷涂 Mo-(NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)复合涂层的耐磨性

与涂层的  $H/E$  值有关,随着  $H/E$  值的增大,涂层耐磨性随之提高。

参考文献

[1] HERBST-DEDERICHS C. Thermal spray solutions for diesel engine piston rings[A]. Proceedings of the 2003 International Thermal Spray Conference[C]. Materials Park, Ohio, USA: ASM International,2003. 129—138.

[2] PRIEST M, TAYLOR C M. Automobile engine tribology approaching the surface[J]. Wear,2000,241(2):193—203.

[3] TAYLOR C M. Automobile engine tribology-design consideration for efficiency and durability[J]. Wear,1998,221(1):1—8.

[4] CHO D H, LEE Y Z. Evaluation of ring surfaces with several



- coatings for friction, wear and scuffing life[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2009, 19(4): 992-996.
- [5] KARAMIS M B, YILDIZLI K, CAKIRER H. An evaluation of surface properties and frictional forces generated from Al-Mo-Ni coating on piston ring[J]. Applied Surface Science, 2004, 230(1-4): 191-200.
- [6] 鹿云. 柴油机活套缸套摩擦学特性研究[J]. 汽车技术, 2008, 20(5): 88-92.
- LU Y. Study on tribology property of cylinder liner piston ring for diesel engine[J]. Automobile Technology, 2008, 20(5): 88-92.
- [7] NIRANATLUMPONG P, KOIPRASERT H. The effect of Mo content in plasma-sprayed Mo-NiCrBSi coating on the tribological behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(2): 483-489.
- [8] LEGG K O, GRAHAM M, CHANG P, et al. The replacement of electroplating[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 81(1): 99-105.
- [9] RASTEGAR F, RICHARDSON D E. Alternative to chrome; HVOF cermet coatings for high horse power diesel engines[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 90(1-2): 156-163.
- [10] AHN H S, LYO I W, LIM D S. Influence of molybdenum composition in chromium oxide-based coatings on their tribological behavior[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133-134: 351-361.
- [11] 周克崧. 热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(增刊 1): 182-191.
- ZHOU K S. Progress of thermal spray coating of hard Cr instead of plating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 182-191.
- [12] 祁三军, 陈阳, 张萍. 内燃机活塞环表面处理技术的发展趋势[J]. 机车车辆工艺, 2006, (2): 7-9.
- QI S J, CHEN Y, ZHANG P. Progress in the surface treatment technologies for the piston ring of diesel engine[J]. Locomotive and Rolling Stock Technology, 2006, (2): 7-9.
- [13] WOYDT M, KELLING N. Testing the tribological properties of lubricants and materials for the system "piston ring/cylinder liner" outside of engines[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2003, 55(5): 213-222.
- [14] WOYDT M, EBRECHT J. Testing friction and wear of the tribosystem piston ring and cylinder liner outside of engines[J]. Tribo Test, 2008, 14(2): 113-126.
- [15] OZDEMIR I, TEKMEK C, OKUMUS S C, et al. Thermal behaviour of plasma-sprayed Mo coating on cast-iron substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174-175: 1064-1069.
- [16] HWANG J H, HAN M S, KIM D Y, et al. Tribological behavior of plasma spray coatings for marine diesel engine piston ring and cylinder liner[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(3): 328-335.
- [17] MARSHALL D B, NOMA T, EVANS A G. Simple method for determining elastic-modulus-to-hardness ratios using knoop indentation measurements[J]. Communications of the American Ceramic Society, 1982, 65(10): C175-C176.
- [18] SUI P C, ARIGA S. Piston ring pack friction and lubrication analysis of an automotive engine using a mixed lubrication model [A]. International Pacific Conference on Automotive Engineering[C]. Phoenix, Arizona, USA: SAE International, 1993.
- [19] JOHANSSON S, NILSSON P H, OHLSSON R, et al. Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact [J]. Wear, 2011, 271(3-4): 625-633.
- [20] 黑鹏辉. 等离子喷涂制备 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr 与 WC-NiCr 涂层及其结构性能[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [21] XIE G Z, LU Y J, HE Z Y, et al. Microstructure and corrosion properties of plasma-sprayed NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coatings comparison with different post treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(13): 2885-2890.
- [22] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 262-272.
- [23] HOLMBERG K, MATTHEWS A, RONKAINEN H. Coatings tribology-contact mechanisms and surface design[J]. Tribology International, 1998, 31(1-3): 107-120.
- [24] JIN Y S, YANG Y Y. Tribological behavior of various plasma-sprayed ceramic coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 88(1-3): 248-256.
- [25] HOUDKOVÁ Š, ZAHÁLKA F, KAŠPAROVÁ M, et al. Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement [J]. Tribology Letters, 2011, 43(2): 139-154.
- [26] HUANG C B, DU L Z, ZHANG W G. Preparation and characterization of atmospheric plasma sprayed NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-BaF<sub>2</sub> center dot CaF<sub>2</sub> composite coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(20-21): 3058-3065.
- [27] DAO M, LU L, ASARO R J, et al. Toward a quantitative understanding of mechanical behavior of nanocrystalline metals[J]. Acta Materialia, 2007, 55(12): 4041-4065.
- [28] LEYLAND A, MATTHEWS A. On the significance of the  $H/E$  ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behavior[J]. Wear, 2000, 246(1-2): 1-11.
- [29] ANSTIS G R, CHANTIKUL P, LAWN B R, et al. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, direct crack measurements [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1981, 64(9): 533-538.
- 基金项目:**北京市自然科学基金重点资助项目(2101003);清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLTKF11B07)
- 收稿日期:**2012-11-09;**修订日期:**2013-04-15
- 作者简介:**李辉(1976-),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为热喷涂与焊接,联系地址:北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学材料学院 328 室(100124),E-mail: hui. li@bjut. edu. cn