

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170714001

20CrMo 上沉积 CrN 涂层的力学性能及 5W/40 润滑下的摩擦学性能

刘吉良¹, 廖日东¹, 罗 军², 廖 斌³, 吴先映³, 刘庆义⁴, 黄 鹏⁴

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京市辐射中心, 北京 100875; 3. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875; 4. 潍柴动力股份有限公司 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261001)

摘 要: 在活塞销材料 (20CrMo) 上沉积了 5 种不同厚度的 CrN 涂层, 研究其力学性能及发动机油 5W/40 润滑下的摩擦学性能。分别对 CrN 涂层的表面形貌、截面厚度、硬度、弹性模量 and 高温膜基结合性能进行了测试。探讨了不同接触压力和不同转速下 CrN 涂层与锡青铜 (QSn7-0.2) 配副以及基材 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副在 5W/40 润滑下的摩擦学性能差异, 并分析了接触电阻。结果表明: 涂层沉积厚度对 CrN 涂层的硬度等力学参数的影响较小, 但对高温膜基结合性能的影响较大。在 5W/40 润滑下, CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副在接触压力较大或较小的大部分区域都具有相对较低的摩擦因数, 且磨损体积极小。

关键词: 活塞销; CrN 涂层; 力学性能; 摩擦学性能

中图分类号: TG174.444; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)06-0103-08

Mechanical Properties of CrN Coating on 20CrMo and Its Tribological Properties Under 5W/40 Oil

LIU Ji-liang¹, LIAO Ri-dong¹, LUO Jun², LIAO Bin³, WU Xian-ying³, LIU Qing-yi⁴, HUANG Peng⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875; 3. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261001, Shandong)

Abstract: Five CrN coatings with different thickness were deposited on the 20CrMo of piston pin material. The mechanical properties and tribological properties under the engine oil 5W/40 lubrication were studied. The surface morphologies, section thickness, hardness and the elastic modulus and high temperature adhesion strength of the CrN coatings were tested. The differences in the tribological properties of the CrN coating against the tin bronze (QSn7-0.2) and the 20CrMo substrate against the QSn7-0.2 were investigated under the 5W/40 oil as well as under different contact pressures and sliding speeds, respectively. The contact resistance was analyzed as well. The results indicate that the thickness of CrN coating has slight impact on the hardness and other mechanical parameters. In contrast, the high temperature adhesion properties are highly affected. The CrN coating against the QSn7-0.2 exhibits lower friction coefficient in most areas of higher or lower contact pressure and the wear volume is minimal under the 5W/40 oil.

Keywords: piston pin; CrN coating; mechanical properties; tribological properties

收稿日期: 2017-07-14; 修回日期: 2017-11-06

网络出版日期: 2017-11-08 15:54; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171108.1554.002.html>

通讯作者: 刘庆义 (1963—), 男 (汉), 研究员, 学士; 研究方向: 内燃机工艺、新材料技术及快速成型技术; **E-mail:** liuqy@weichai.com

基金项目: 内燃机可靠性国家重点实验室开放基金 (SKLER-201607)

Fund: Supported by Science Fund of State Key Laboratory of Engine Reliability (SKLER-201607)

引文格式: 刘吉良, 廖日东, 罗军, 等. 20CrMo 上沉积 CrN 涂层的力学性能及 5W/40 润滑下的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 103-110.

LIU J L, LIAO R D, LUO J, et al. Mechanical properties of CrN coating on 20CrMo and its tribological properties under 5W/40 oil[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 103-110.

0 引言

高强度柴油机在军用和民用两方面都具有广泛的应用前景。然而,在实际研制过程中发现连杆小头轴承出现异常磨损、衬套松脱和胶合等故障,给高强度柴油机的可靠性带来了挑战。为此,一方面可以优化原有结构形式、几何尺寸和使用新的润滑剂;另一方面,可以通过表面工程和涂层技术来应对这些问题^[1]。当前,减摩抗磨涂层在发动机活塞环^[2-4]、活塞裙部^[5]、气门挺柱^[6]和活塞销^[6-8]等零部件上都有广泛的应用,实践表明其减摩抗磨效果良好。因此,在强化柴油机活塞销上沉积减摩抗磨涂层是一种提高连杆小头轴承可靠性的有效方法。

目前,应用较为广泛的减摩抗磨涂层有类金刚石膜(Diamond-like carbon, DLC)、TiN、CrN 和硬 Cr 膜等。其中,具有代表性的 DLC 用于 2 L 的发动机活塞销上有效的提高了活塞销的耐磨损性能^[6]。然而,研究发现应用在强化柴油机活塞销上,涂层在较短的时间内就出现了脱落现象。说明 DLC 涂层在强冲击,周期性交变载荷作用下,其可靠性难以满足要求。CrN 涂层由于其良好的韧性、较低的摩擦因数、较强的抗磨损性能和较高的硬度^[9-12],相对其它减摩抗磨涂层用于强化柴油机活塞销上具有很大的优势。过去几十年,大量的学者采用物理气相沉积技术(Physical vapor deposition, PVD)制备 CrN 涂层并对其力学性能和摩擦学性能进行了系统研究。在研究方法上主要基于试验手段来实现;在涂层设计方面不仅考虑了单层膜也研究了多层膜^[13-15];在沉积参数控制上考虑了 N_2 流量、偏压和沉积时间等^[16-17]。尤其值得注意的是:Wang 等人^[18]对 CrN 涂层及其掺杂 Al 和 Ti 后的涂层硬度、断裂韧性和膜基结合性能等方面的研究,对于 CrN 涂层的力学性能分析具有重要的参考价值。Mydlowska 等人^[19]则对不同厚度的 CrN 涂层与基体组成的热机交互系统的热膨胀系数进行了研究,结果表明 CrN 涂层的厚度对膜基系统的热膨胀系数和热应力有着明显的影响。然而,这些研究并没有指出 CrN 涂层厚度对高温退火后的膜基结合性能的影响规律。在摩擦学性能研究方面,Paskvale 等^[20]对基础油 PAO8 及 PAO8 中加入 MoS_2 润滑下 CrN 涂层的摩擦学性能进行了比较研究。Podgornik

等^[21]则进一步探讨了接触压力在 1~3 GPa 之间时 CrN 涂层的摩擦磨损性能。尽管这些研究对了解高强度柴油机活塞销上沉积 CrN 涂层的摩擦学性能具有借鉴意义,但在材料配副、接触压力和试验温度等方面与高强度柴油机的实际工作情况相距甚远。因此,根据连杆小头轴承的实际工作状态,开展 CrN 涂层与衬套材料(锡青铜, QSn7-0.2)配副的摩擦学性能研究具有重要意义。

文中利用 MEVVA 离子注入与磁过滤阴极真空电弧复合沉积技术(Metal vapor vacuum arc ion implantation and the magnetic filtered cathodic vacuum arc deposition system, MEVVA-FCVA)在强化柴油机活塞销材料(20CrMo)上制备了 CrN 涂层。比较了不同沉积时间对 CrN 涂层的截面形貌、表面形貌和力学性能的影响,并对发动机润滑油 5W/40 润滑下 CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副,以及基材 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副在不同接触压力 and 不同转速下的摩擦学性能进行了探讨。

1 试验与方法

1.1 试样制备

CrN 涂层沉积基体为活塞销材料 20CrMo。试样尺寸为 $\Phi 52\text{ mm} \times 6.7\text{ mm}$ 。沉积 CrN 涂层前基体经过调质、渗氮、研磨和抛光等工艺处理,其工艺流程与活塞销的工艺流程一致。基体显微硬度(657 ± 20) HV,表面粗糙度为 $(0.07 \pm 0.03)\text{ }\mu\text{m}$ 。与 CrN 涂层或 20CrMo 配副的材料是采用强力旋压工艺加工的连杆小头衬套毛坯 QSn7-0.2,试样由 $\Phi 4\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ 的圆片与 45 号钢销钉焊接而成。焊接在销钉前端的 QSn7-0.2 材料经打磨后外径为 2 mm。试件示意图如图 1 所示。

涂层制备采用 MEVVA-FCVA 复合沉积系统,沉积参数如表 1 所示。最终制备了 5 种不同厚度的 CrN 涂层试样, CrN 的沉积时间分别为 45、70、100、130 和 170 min。

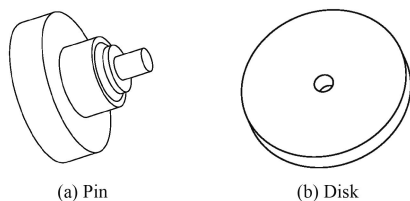


图 1 试件示意图

Fig.1 Diagram schematic of specimens

表 1 CrN 涂层的沉积工艺参数

Table 1 Deposition process parameters for CrN coating		
Parameters	Cr deposition	CrN deposition
Vacuum / (10 ⁻³ Pa)	2.5	2.5
Arc current / A	100	100
Negative bias / V	200	200
Deposition time / min	5	45–170
N ₂ flow rate / (10 ⁻³ m ³ ·h ⁻¹)	0	1.2
Substrate heating temperature / °C	200	200

1.2 表征与分析

采用 NanoMap-D 三维形貌仪的光干涉模式测试基体上沉积 CrN 涂层前后的三维形貌。运用 S-4800 型场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 测试 CrN 涂层截面厚度, 加速电压 20 kV。利用 CSM 公司的 NHT² 型纳米硬度仪测试 CrN 涂层的纳米硬度和弹性模量。施加载荷 20 mN, 保持压力时间 5 s, 加载和卸载速率 40 mN/min。为测试 CrN 涂层高温退火后的膜基结合性能, 把不同厚度的 CrN 涂层试件放入多功能摩擦磨损试验机 (Universal material tester, UMT) 高温炉中加热到 800 °C 并保温 1 h, 自然冷却到室温后运用 UMT 往复模块对 CrN 涂层的结合性能进行测试。压头直径 0.2 mm, 锥角 120°, 往复模块移动速度约 0.34 m/s, 加载时间 35 s, 载荷从 1.5 N 增加到 15 N。测试完成后用三维形貌仪观测划痕形貌。

为研究高强化柴油机连杆小头轴承的摩擦性能, 采用销-盘试验对有/无 CrN 涂层的 20CrMo 盘与 QSn7-0.2 销配副的摩擦磨损情况进行测试。采用 UMT 旋转模块, 在 5W/40 润滑下进行摩擦学正交试验, 试验方案如表 2 所示。润滑油在 100 °C 时的运动黏度为 13.5~16.3 mm²/s, 在-46 °C 时的布氏黏度不大于 17 000 mP·s。把润滑油加热到 100 °C, 其接触压力 (载荷与接触面积的比值) 分别设置为 10、30、50、70、90 和 110 MPa, 每组接触压力下的转速设定为 0.1、0.5、1.0、1.5、

2.0、2.5 和 3.0 m/s, 每种工况的运行时间为 10 min。其中, CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副在同一个试件上进行所有接触压力下的试验 (盘代号为 D1)。20CrMo 与 QSn7-0.2 配副时, 由于磨损相对较为严重, 接触压力为 10、30 和 50 MPa 时在同一个试件上进行 (盘代号为 D2), 接触压力为 70、90 和 110 MPa 时在另一个试件上进行 (盘代号为 D3)。试验前, 在油腔中加入足量的润滑油, 使试验盘完全浸泡在润滑油中。为获取试验中销和盘的接触状态, 使用 UMT 自带的测试系统对接触电阻进行测试。采用 NanoMap-D 三维形貌仪的光干涉模式测试试验盘上的磨痕三维形貌, 采用探针模式测试磨痕二维截面形貌。根据二维截面计算磨损体积, 磨损体积计算式为:

$$V = A \times L = 2\pi rA$$

(1)

式中: V 为磨损体积, mm³; L 为磨痕中心处周长, mm; r 为磨痕半径, mm; A 为磨痕轮廓截面积, mm²。 A 取 3 个位置的平均磨痕轮廓截面积。

2 结果与讨论

2.1 CrN 涂层的截面形貌及表面形貌

利用 SEM 对不同沉积时间制备的 CrN 涂层截面进行观测, 得到随沉积时间的增加 CrN 涂层厚度分别为 3.33、7.64、8.83、12.0 和 16.1 μm, 其截面形貌如图 2 所示。从图中可以看出涂层截面厚度均匀。为进一步反映沉积时间对表面形貌的影响, 利用 NanoMap-D 三维形貌仪对 20CrMo 基体沉积涂层前后的表面形貌进行观测, 得到的三维形貌如图 3 所示。从图中可看出, 20CrMo 基体在沉积 CrN 涂层后表面粗糙度略有增加。随着 CrN 涂层厚度的增加表面微孔数量有所增多, 微孔深度也在增加。从以上测试结果可以看出, 在不同沉积时间内 CrN 涂层的沉积效果良好。

2.2 CrN 涂层的力学性能

CrN 涂层的力学性能可以用纳米硬度测试和划痕试验来反映。采用纳米硬度仪对 5 种不同厚度 CrN 涂层进行测试, 每个样本测试 4 个点。图 4 为不同厚度 CrN 涂层样本纳米硬度测试结果最接近平均值的一个点的加载-卸载曲线。可以看出, 加载-卸载曲线形状受 CrN 涂层厚度的影响较小。

表 2 摩擦学正交试验方案

Table 2 Tribological orthogonal test scheme							
Factors	Levels						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Sliding speed / (m·s ⁻¹)	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Contact pressure / MPa	10	30	50	70	90	110	

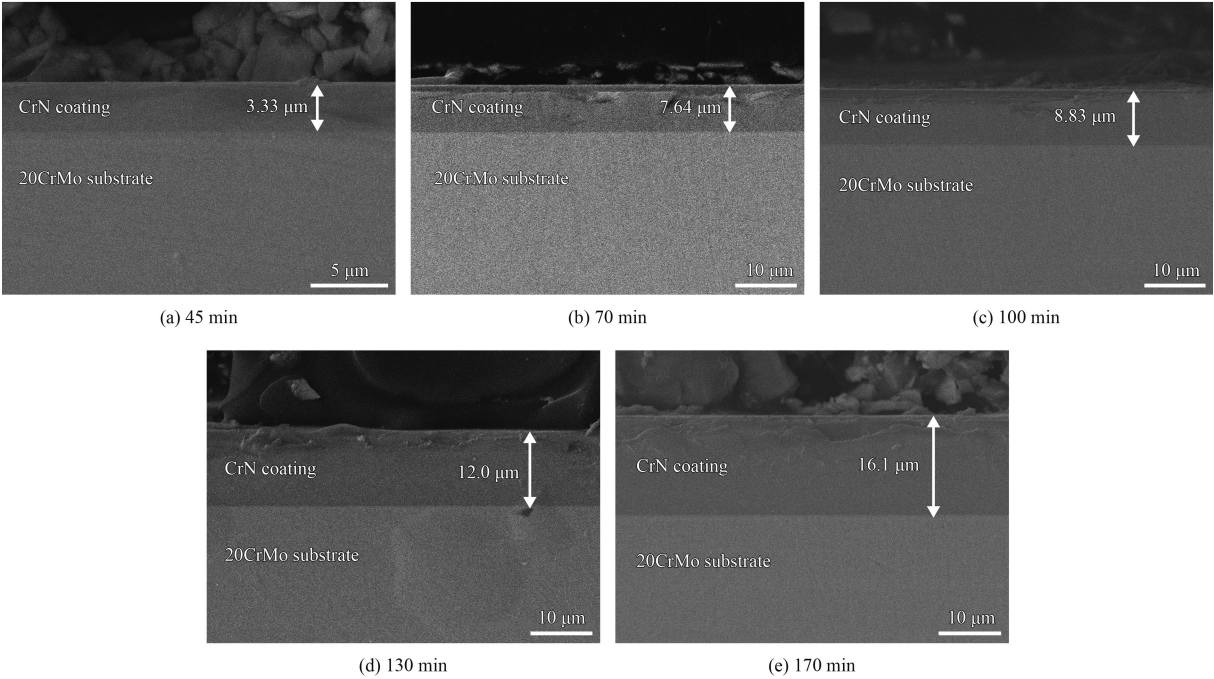


图 2 不同沉积时间下 CrN 涂层的截面形貌

Fig.2 Cross section morphologies of the CrN coatings with different deposition time

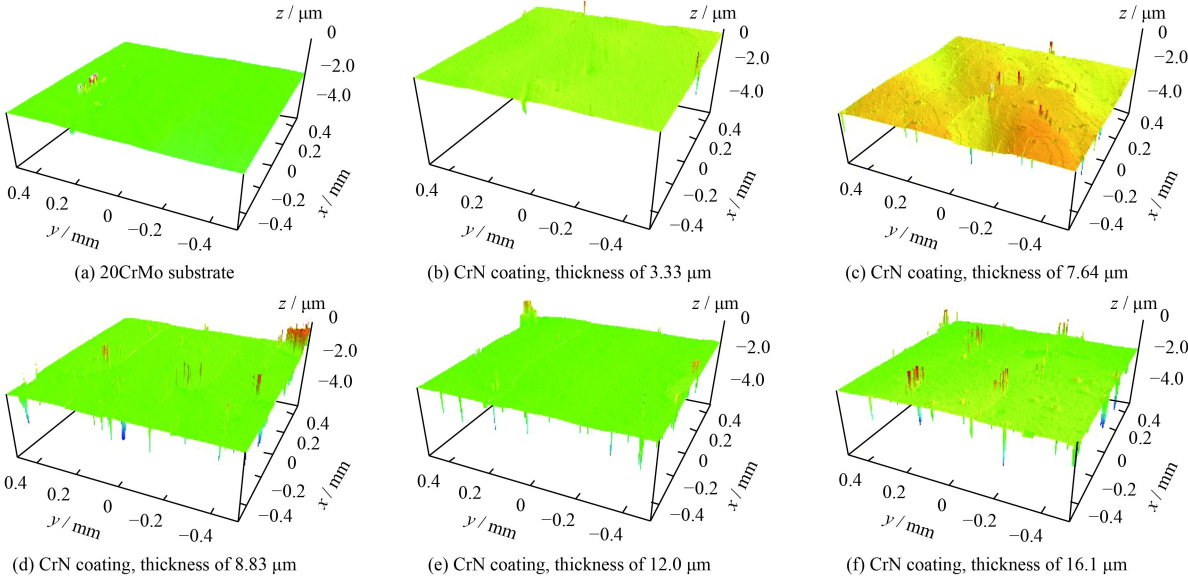


图 3 基体和不同厚度 CrN 涂层的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of the substrate and CrN coatings with different thickness

CrN 涂层泊松比取 0.23^[22]，根据相关公式计算^[23-25]，得到平均硬度和平均弹性模量，相关测试结果如表 3 所示。从表 3 可知，CrN 涂层厚度为 16.1 μm 时具有相对较大的硬度和较小的最大压入深度，分别为 22.23 GPa 和 207.6 nm。但是，不同厚度的 CrN 涂层纳米硬度差别并不大，厚度对其它相关测试参数的影响也不大。

CrN 涂层的膜基结合性能可以通过划痕试验来反映，观测划痕形貌并结合摩擦因数的变化情况进行分析^[26-28]。由于高强度柴油机活塞销在极端条件下可能处于无油或乏油状态下工作，这将导致接触表面的温度迅速升高，从而引起活塞销与衬套过热甚至胶合等故障的发生。由于 CrN 涂层是一种耐高温涂层，当 CrN 涂层沉积在活塞销上

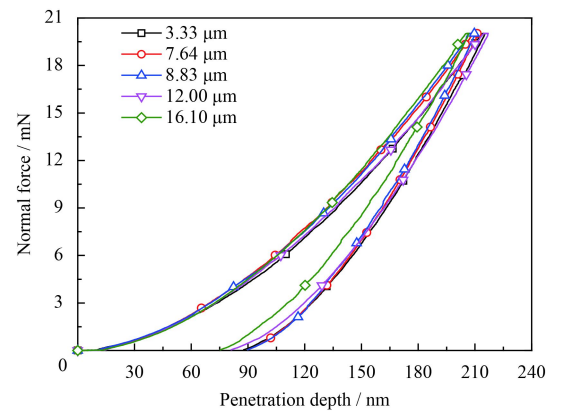


图 4 CrN 涂层的加载-卸载曲线

Fig.4 Load-unload curves of CrN coatings

表 3 不同厚度 CrN 涂层的纳米硬度

Table 3 Nanoindentation of CrN coatings with different thickness

Parameters	Thickness / μm				
	3.33	7.64	8.83	12.0	16.1
Average hardness, H / GPa	22.11	20.32	21.59	21.36	22.23
Average elastic modulus, E / GPa	244.9	247.0	258.4	235.8	240.3
Final unloading depth, h_p / nm	107.2	88.9	75.1	77.7	80.4
Unloading curve slope, $S / (\text{mN} \cdot \text{nm}^{-1})$	0.223	0.246	0.253	0.226	0.222
Maximum pressing depth, $h_{\text{max}} / \text{nm}$	215.7	211.8	210.4	217.3	207.6

时，可能会减轻或减少故障的发生。此时，高温膜基结合性能就显得非常重要。图 5 给出了不同厚度 CrN 涂层试件在 800 ℃ 环境下保温 1 h，再冷却到室温后进行划痕测试的摩擦因数。从图中可知，在厚度为 3.33 μm 时，涂层的摩擦因数最稳定，且数值也最小。随着 CrN 涂层厚度的增加，摩擦因数曲线的波动增加，这反映出涂层脱落程度的加重。这一现象可以通过图 6 中划痕终点处 (15 N 附近处) 的磨痕形貌反映出来。从图 6 中可以发现，CrN 涂层厚度在 3.33 μm 和 7.64 μm

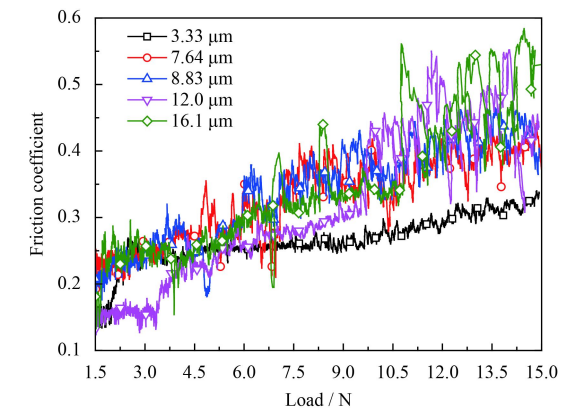


图 5 不同厚度 CrN 涂层划痕测试的摩擦因数

Fig.5 Friction coefficient measured during the scratch test for CrN coatings with different thickness

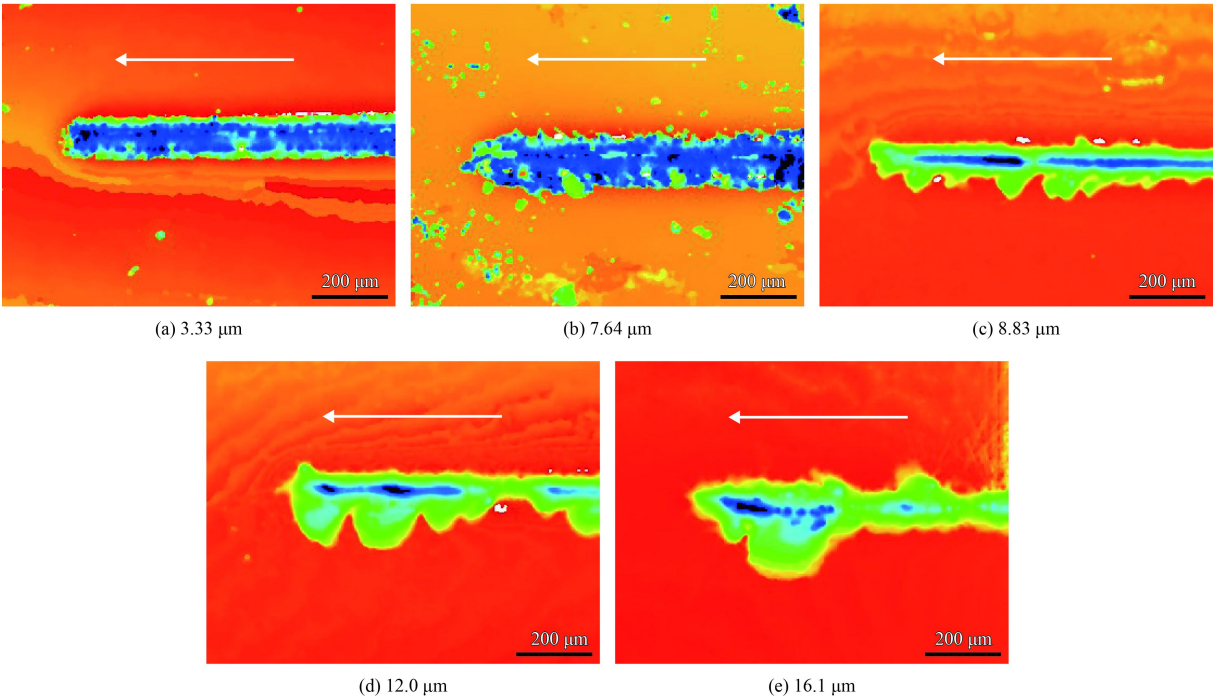


图 6 不同厚度 CrN 涂层在载荷为 15 N 处的划痕形貌 (退火温度 800 ℃)

Fig.6 Scratch morphologies of CrN coating with different thickness at the load of 15 N (annealed temperature of 800 ℃)

时划痕边缘处涂层脱落较少,但随着涂层厚度的增加 CrN 涂层脱落越来越严重。这说明涂层厚度对膜基结合力的影响非常明显,高温退火后 CrN 涂层厚度在 $8.83\text{ }\mu\text{m}$ 以上时的膜基结合力明显变差。

2.3 5W/40 润滑下 CrN 涂层的摩擦学性能

2.3.1 磨痕形貌及磨损体积

为进一步研究 CrN 涂层在油润滑下的摩擦学性能,对沉积厚度为 $8.83\text{ }\mu\text{m}$ 的 CrN 涂层进行摩擦学正交试验。图 7 为 5W/40 润滑下 3 个不同试验盘的磨痕三维形貌。从图中可以看出,3 个试

验盘的磨痕深度关系为 $D1 < D2 < D3$ 。CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副时, CrN 涂层表面磨损极小,磨损体积难以计算。但 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副的磨损相对较大。图 8 给出了图 7 中 3 个试验盘的三维形貌中间位置处的二维截面形貌,根据二维截面形貌计算得到 D2 和 D3 上的磨损体积分别为 0.024 mm^3 和 0.050 mm^3 。由此可以看出,在 5W/40 润滑下 20CrMo 上沉积 CrN 涂层后其抗磨性能显著增强。试验中的对磨副 QSn7-0.2 在不同工况下其磨损量有所差别,但采用称重法和磨痕测试法都难以准确测量。因此,文中并未给出其相应的磨损体积。

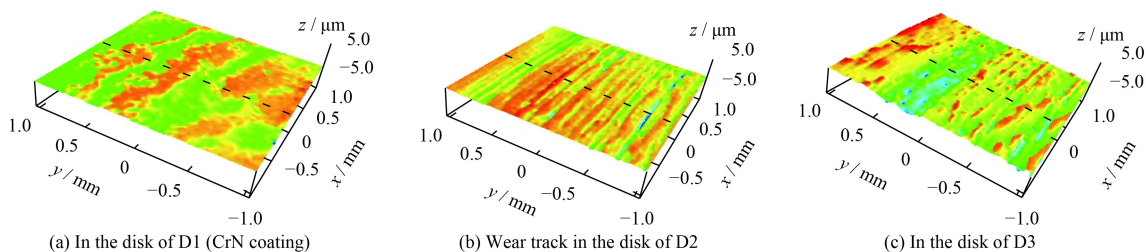


图 7 3 个不同试验盘的磨痕三维形貌

Fig.7 Optical 3D morphologies of the wear tracks for the three different test disks

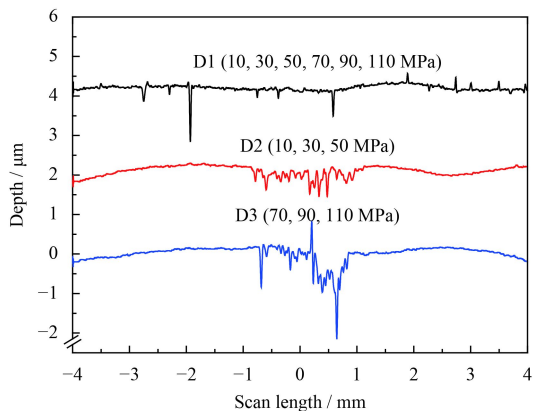


图 8 图 7 中 3 个试验盘的磨痕二维截面形貌

Fig.8 Section morphologies of the wear tracks for the three different test disks in Fig. 7

2.3.2 摩擦因数及接触电阻

在 5W/40 润滑下,通过摩擦学正交试验得到了各工况下的摩擦因数。试验发现,各工况下的摩擦因数较为稳定。图 9 给出了不同接触压力和转速下的平均摩擦因数分布曲面。由图可知,未沉积 CrN 涂层的 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副的平均摩擦因数最小值为 0.03,发生在接触压力 90 MPa,线速度 $\geq 1.5\text{ m/s}$ 的范围内。平均摩擦因数的最大

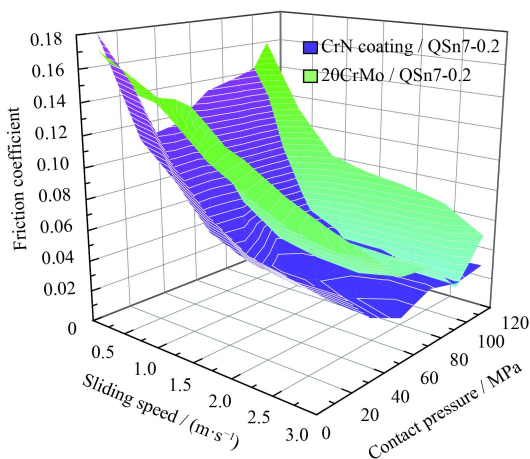


图 9 不同接触压力和转速下的摩擦因数分布曲面图

Fig.9 Friction coefficient distribution at different contact pressures and speeds

值为 0.17,发生在接触压力 10 MPa,线速度 0.1 m/s 时。CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副的平均摩擦因数最小值为 0.03。其发生在多个区域,分别为接触压力 50 MPa,线速度 $\geq 2.5\text{ m/s}$ 的区域;接触压力 90 MPa,线速度 $\geq 2.5\text{ m/s}$ 的区域;接触压力 110 MPa,线速度 $\geq 1.5\text{ m/s}$ 的区域。平均摩擦因数的最大值为 0.18,发生在接触压力 10 MPa,线速度 0.1 m/s

时。在接触压力一定的情况下,随着转速的增加摩擦因数减小。在接触压力较大或较小的大部分区域,CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副的平均摩擦因数小于 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副。

图 10 给出了正交试验得到的不同接触压力和转速下的平均接触电阻分布曲面。由图可知,在接触压力一定的情况下,随着转速增加,接触电阻增大。这说明在高转速下润滑油膜更容易形成。在高接触压力区,尤其是在高转速下,CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副的接触电阻显著小于 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副,说明在此区域该配副的油膜更难形成。但摩擦因数并未因此升高。这是由于在高接触压力下,20CrMo 表面磨痕较深,粗糙度较大,造成摩擦力增加,从而增加了摩擦因数。对于 CrN 涂层,由于表面磨痕较浅,粗糙度相对较小,从而降低了摩擦因数。对于相对平整的 CrN 涂层表面,由于润滑油不宜储存,因此在高速和高接触压力下,润滑油膜更难形成,从而导致其接触电阻减小。

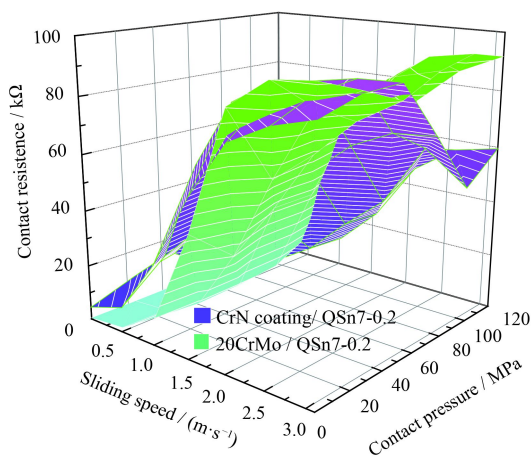


图 10 不同接触压力和转速下的接触电阻分布曲面图

Fig.10 Contact resistance distribution at different contact pressures and speeds

3 结 论

利用 MEVVA-FCVA 技术在 20CrMo 上沉积了 CrN 涂层。研究了不同沉积时间下 CrN 涂层的截面形貌、表面形貌和力学性能。同时,在 5W/40 润滑下,通过销-盘试验对比了 CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副以及 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副的磨损体积、摩擦因数和接触电阻变化。

(1) CrN 涂层截面厚度均匀,表面平整,表面

粗糙度略有增加,随着厚度的增加微孔的数量和深度也略有增加。力学性能测试表明,CrN 涂层厚度对纳米硬度及相关参数的影响并不大,其硬度在 20.32~22.23 GPa 之间,但对高温膜基结合性能的影响较大。800 °C 退火后的划痕测试表明,在厚度大于 8.83 μm 时,CrN 涂层与 20CrMo 基体的结合性能显著变差,涂层脱落严重。

(2) 在 5W/40 润滑下,通过摩擦学正交试验发现在接触压力较大或较小的大部分区域,CrN 涂层与 QSn7-0.2 配副的平均摩擦因数小于 20CrMo 与 QSn7-0.2 配副的情况,最小摩擦因数为 0.03。在给定试验条件下,CrN 涂层的磨损体积很小,难以测量,而 20CrMo 的磨损体积分别为 0.024 mm³ (D2) 和 0.050 mm³ (D3)。

(3) CrN 涂层具有良好的抗磨性能,在高强化柴油机活塞销上的应用具有较大的潜能。尤其是在连杆小头轴承处于高速、重载等极端工况下运行时,CrN 涂层的应用有望降低摩擦因数。

参考文献

- [1] WONG V W, TUNG S C. Overview of automotive engine friction and reduction trends—effects of surface, material, and lubricant-additive technologies[J]. Friction, 2016, 4(1): 1-28.
- [2] 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, 2009, 19(4): 992-996.
- [3] MA Y J, ZHAO W C, LI S H, et al. Tribological performance of three advanced piston rings in the presence of MoDTC-modified GF-3 oils[J]. Tribology Letters, 2005, 18(1): 75-83.
- [4] 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).
- [5] CHO D H, LEE S A, LEE Y Z. The effects of surface roughness and coatings on the tribological behavior of the surfaces of a piston skirt[J]. Tribology Transactions, 2009, 53(1): 137-144.
- [6] KONG X L, ZHOU B, WANG J X, et al. Engineering research of DLC coating in piston pins and bucket tappets[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68(5): 530-535.

- [7] ETSION I, HALPERIN G, BECKER E. The effect of various surface treatments on piston pin scuffing resistance[J]. *Wear*, 2006, 261(7-8): 785-791.
- [8] SOIZAK T A, POLYCARPOU A A. Tribology of hard protective coatings under realistic operating conditions for use in oilless piston-type and swash-plate compressors[J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53(3): 319-328.
- [9] WAN S H, PU J B, LI D S, et al. Tribological Performance of CrN and CrN/GLC coated components for automotive engine applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 433-442.
- [10] 付英英, 李红轩, 吉利, 等. CrN 和 CrAlN 薄膜的微观结构及在不同介质中的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(6): 34-41.
FU Y Y, LI H X, JI L, et al. Microstructure and tribological properties of CrN and CrAlN films under different contact conditions[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(6): 34-41 (in Chinese).
- [11] 单磊, 王永欣, 李金龙, 等. TiN、TiCN 和 CrN 涂层在海水环境下的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2013, 26(6): 86-92.
SHAN L, WANG Y X, LI J L, et al. Tribological property of TiN, TiCN and CrN coatings in seawater[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(6): 86-92 (in Chinese).
- [12] HAQUE T, MORINA A, NEVILLE A, et al. Tribochemical interactions of friction modifier and antiwear additives with CrN coating under boundary lubrication conditions[J]. *Journal of Tribology*, 2008, 130(4): 042302-042313.
- [13] APERADOR W. Electrochemical and tribological and mechanical performances coatings multilayer type NbC/CrN[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, 11: 6347-6355.
- [14] OU Y X, LIN J, TONG S, et al. Structure, adhesion and corrosion behavior of CrN/TiN superlattice coatings deposited by the combined deep oscillation magnetron sputtering and pulsed dc magnetron sputtering[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 293: 21-27.
- [15] JIN J, DUAN H, LI X. The influence of plasma nitriding on microstructure and properties of CrN and CrNiN coatings on Ti6Al4V by magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2017, 136: 112-120.
- [16] SUBRAMANIAN B, PRABAKARAN K, JAY-ACHANDRAN M. Influence of nitrogen flow rates on materials properties of CrN_(x) films[J]. *Bulletin of Materials Science*, 2012, 35(4): 505-511.
- [17] OBROSOV A, SUTYGINA A, VOLINSKY A, et al. Effect of hydrogen exposure on mechanical and tribological behavior of Cr_xN coatings deposited at different pressures on IN718[J]. *Materials*, 2017, 10(5): 1-11.
- [18] WANG Q Z, ZHOU F, YAN J W. Evaluating mechanical properties and crack resistance of CrN, CrTiN, CrAlN and CrTiAlN coatings by nanoindentation and scratch tests[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 285: 203-213.
- [19] MYDŁOWSKA K, MYŚLIŃSKI P, SZPARAGA U, et al. Analysis of the effect of antiwear crn coating thickness on the evolution of thermomechanical interactions in the substrate/PVD coating system[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 125(3): 1241-1247.
- [20] PASKVALE S, REMSKAR M, CEKADA M. Tribological performance of TiN, TiAlN and CrN hard coatings lubricated by MoS₂ nanotubes in polyalphaolefin oil[J]. *Wear*, 2016, 352, 353: 72-78.
- [21] PODGÓRNIK B, SEDLACEK M, MANDRINO D. Performance of CrN coatings under boundary lubrication[J]. *Tribology International*, 2016, 96: 247-257.
- [22] BOUZAKIS K D, VIDAKIS N, LEYENDECKER T, et al. Determination of the fatigue behaviour of thin hard coatings using the impact test and a FEM simulation[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1996, 86: 549-556.
- [23] SHAH H N, JAYAGANTHAN R, PANDEY A C. Nanoindentation study of magnetron-sputtered CrN and CrSiN coatings[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(5): 2628-2634.
- [24] BROITMAN E. Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview[J]. *Tribology Letters*, 2017, 65(1): 1-18.
- [25] 刘孟奇, 郭惠霞, 王永欣, 等. CrN/CrAlSiN 涂层海水环境下的摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(2): 63-70.
LIU M Q, GUO H X, WANG Y X, et al. Tribological behaviors of CrN/CrAlSiN coatings in seawater[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(2): 63-70 (in Chinese).
- [26] ELANGO VAN T, KUPPUSAMI P, THIRUMURUGESAN R, et al. Nanostructured CrN thin films prepared by reactive pulsed DC magnetron sputtering[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2010, 167: 17-25.
- [27] WARCHOLINSKI B, GILEWICZ A, KUKLINSKI Z, et al. Arc-evaporated CrN, CrN and CrCN coatings[J]. *Vacuum*, 2008, 83: 715-718.
- [28] WIECINSKI P, SMOLIK J, GARBACZ H, et al. Microstructure and mechanical properties of nanostructure multilayer CrN/Cr coatings on titanium alloy[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519(12): 4069-4073.