

WC/C 固体润滑涂层的滑动摩擦磨损性能研究

Friction and Wear Properties of WC/C Solid Lubricant Coating

莫继良, 陈 龙, 朱旻昊

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所, 成都 610031)

MO Jiliang, CHEN Long, ZHU Minhao

(Tribology Research Institute, Traction Power State Key

Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

摘要: 在 CETR UMT-2 摩擦磨损试验机上用 Si_3N_4 陶瓷球和纯钛 (TA2) 球作为对磨副, 对物理气相沉积 (PVD) 方法制备的 WC/C 固体润滑涂层进行了球-盘式的滑动摩擦磨损实验。利用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和电子能谱 (EDX) 对磨损表面进行了微观分析, 探讨了 WC/C 涂层的摩擦磨损机理。结果表明: 滑动速度对 WC/C 涂层的摩擦特性影响很大, 较小的滑动速度有利于在两种对磨副的磨痕表面形成致密连续的转移膜。 Si_3N_4 球作为对磨副时, WC/C 涂层的损伤主要表现为剥层及氧化磨损; 纯钛球作为对磨副时, 涂层损伤表现为轻微的磨粒磨损和氧化磨损, WC/C 涂层拥有良好的抗钛粘着性能。

关键词: PVD; WC/C; 固体润滑涂层; 摩擦磨损; 钛; 抗粘着性

中图分类号: TH117.1TG; 174.444 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0013-04

Abstract: WC/C solid lubricant coating was prepared by Physical Vapor Deposition (PVD) technique. The friction and wear properties of the WC/C coating sliding against Si_3N_4 ceramic ball and titanium ball were investigated by using CETR UMT-2 micro-tribometer in a ball-on-disc configuration. The worn surfaces of the coating and counterparts were evaluated by Optical Microscope (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and the wear mechanism of the coating was discussed consequently. The results showed that the sliding velocity had great influence on the friction properties of the WC/C coating, and a relatively lower sliding velocity was of benefit to forming dense and continuous transferred films on the two counterparts. The wear damage of the WC/C coating was characterized by a combination of delamination and oxidative wear when sliding against Si_3N_4 ball, and by a combination of ultra-mild abrasive and oxidative wear when sliding against titanium ball. The WC/C coating exhibited good anti-adhesion properties against titanium.

Key words: PVD; WC/C; solid lubricant coating; friction and wear; titanium; anti-adhesion

类金刚石 (DLC) 涂层的制备、力学及摩擦学性能研究始于 20 世纪 70 年代, 并一直备受关注^[1], 目前对其性能的研究主要集中于摩擦学特性^[2,3]。WC/C 作为一种掺碳化合物含氢的 DLC 涂层, 具有高弹性、低化学活性、低摩擦系数及良好的耐磨性等优点, 已经成功地应用于轴承、泵、压缩机、齿轮和各种工模具中^[4,5]。在切削领域, WC/C 涂层已经成为新一代刀具润滑涂层的代表, 其优越的切削性能已有报道^[5]。目前国外对于 WC/C 涂层的研究主要集中在制备工艺及基本材料、力学性能分析^[6,7], 其摩擦磨损特性方面的研究报道却不多^[8-10], 且主要集中在涂层成分、结构对摩擦学性能的影响, 摩擦环境对涂层摩擦磨损行为的影响以及摩擦化学机理的探讨等方面, 而对于涂层损伤机理、不同配副下涂层的摩擦学性能以及涂层的抗粘

着性能等报道较少。本工作分别采用 Si_3N_4 陶瓷球和纯钛球作为对磨副, 考察了不同对磨材料条件下 WC/C 涂层的摩擦磨损性能, 分析了滑动速度对涂层摩擦学特性的影响, 并考察了涂层对“软金属”钛的抗粘着性能。

1 实验

基体材料选用牌号为 ZK40UF 的超细颗粒硬质合金 (组分为 Co: 10%, (WC+ 添加剂): 90%, 质量分数), 硬度为 $\text{HV}_{50\text{g}}$ 1350, 表面粗糙度 R_a 约 0.04 μm , 尺寸为 $\phi 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。WC/C 涂层沉积采用直流磁控溅射技术, 其中 WC 相由氩气溅射靶 WC/Ni (WC : Ni = 93 : 7, 原子分数, %) 沉积而成, 而 C 相则在含

有烃类气体(乙炔)和氩气的等离子体中生长而成。涂层与基体间沉积一层厚约 $0.1\mu\text{m}$ 的纯 Cr 过渡层来提高涂层与基体的结合强度。本研究所用的基体及涂层试样皆由自贡硬质合金厂成都刀具分公司提供,涂层厚度约 $2\mu\text{m}$, 表面粗糙度 R_a 约 $0.07\mu\text{m}$, HV_{50g} 为 1408, 纳米硬度为 15.28GPa , 弹性模量为 176.22GPa , XRD 分析表明: 涂层由纳米级碳化钨颗粒与非晶碳组成, 其中 WC 以 NaCl 类型的 $\beta\text{-WC}_{1-x}$ 相的 (111) 晶面存在。

涂层的摩擦学实验在 CETR UMT2 摩擦磨损试验机上完成, 采用球-盘滑动模式, 环境为大气下干态(温度为 $20\sim 25^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $\text{RH} = 60\% \pm 10\%$); 球试样采用直径为 10mm 的 Si_3N_4 陶瓷球(硬度 HV_{50g} 1800, $R_a = 0.02\mu\text{m}$) 和纯钛(TA2)球(硬度 HV_{50g} 110, $R_a = 0.16\mu\text{m}$)。实验主要参数为: 法向载荷(F_n) 为 5N ; 滑动速度(V) 为 0.48 , 5m/min 和 10m/min ; 磨痕轨迹直径为 5mm ; 滑移路程为 300m 。磨损实验后用光学显微镜(OM)、QUANTA2000 型扫描电

子显微镜(SEM)和 EDAX-7760/68 ME 型电子能谱仪(EDX)分析涂层和对磨球的磨损表面。

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数

图 1 为两种对磨副的 WC/C 涂层在不同滑动速度下的摩擦系数随滑移距离变化关系曲线。由图 1a 可知, 在与 Si_3N_4 陶瓷球对磨时, 滑动速度越大, 涂层摩擦系数稳态值越大, 对应的跑合阶段越短, 表明涂层的摩擦行为强烈地依赖于滑动速度。滑动速度为 0.48m/min 时, 涂层摩擦系数经历了约 66m 的跑合阶段后并没有立即趋于稳定, 而是随着滑移距离的增加而逐渐降低, 并在滑移距离约 140m 后趋于极低的稳态值约 0.016 。而当滑动速度为 5m/min 和 10m/min 时, 涂层摩擦系数曲线走势较低速时明显不同, 摩擦系数在经历较短的滑移距离(分别约为 35m 和 10m)后即趋于较高的稳态值(分别约为 0.10 和 0.18)。

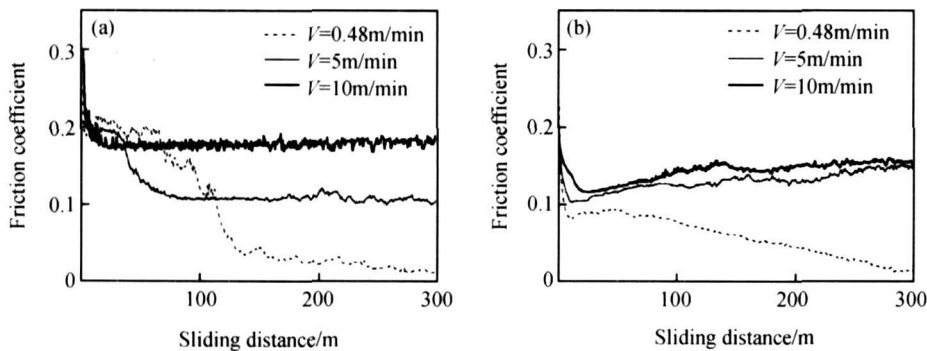


图 1 不同滑动速度下 WC/C 涂层的摩擦系数曲线 (a) 与 Si_3N_4 陶瓷球对磨; (b) 与纯钛球对磨

Fig. 1 Friction coefficients of WC/C coating at different sliding velocities

(a) against Si_3N_4 ball; (b) against Ti ball

当对磨副为钛球时, 如图 1b 所示, WC/C 涂层在三种滑动速度下的摩擦系数均经历了较短的跑合阶段, 其原因为钛球的硬度相对较低, 表面的粗糙峰容易被磨损去除。滑动速度为 0.48m/min 时, 涂层的摩擦系数经历短暂的跑合阶段后下降到 0.08 , 并在随后阶段呈均匀下降趋势, 在滑移距离约 140m 后趋于极低的稳态值约 0.015 。当滑动速度为 5m/min 时, 涂层的摩擦系数曲线走势与速度为 0.48m/min 时的差别很大, 涂层摩擦系数在跑合阶段后趋于平稳, 在随后阶段反而呈现轻微的上升趋势。当滑动速度为 10m/min 时, 涂层摩擦系数演变规律与速度为 5m/min 时的一致, 并略高于 5m/min 时, 这一点与对磨副为 Si_3N_4 球的情况有明显差异。

由以上结果可见, 在两种材料和力学特性截然不

同的对磨副情况下, 涂层在低滑动速度 0.48m/min 时的摩擦系数均与另外两组较高滑动速度时的摩擦系数存在很大差异。表现为: 涂层在低速时的摩擦系数在跑合阶段后持续缓慢下降, 并最终稳定于较低的数值; 而涂层在较高滑动速度下的摩擦系数的稳态值较高, 并随滑动速度的增加而增加, 其中在纯钛球配副时, 摩擦系数在跑合阶段后略有上升, 可能与摩擦界面转移膜的形成状态有关。

2.2 损伤及机理分析

图 2 为与 Si_3N_4 陶瓷球配副时, 不同滑动速度下涂层的磨损表面形貌, 可以看出滑动速度对涂层磨损形貌的影响较大, 滑动速度的增大导致涂层磨损明显加剧。如图 2a 所示, 涂层在低滑动速度下的损伤较为轻微, 但在孔洞(这些微小孔洞是涂层在沉积过程中产

生的缺陷, 轮廓分析表明大部分孔洞深度较浅) 处有较小的片状剥落; 当滑动速度为 5m/min 时, 涂层磨损加重, 临近的孔洞所引起的剥落相互贯穿连接, 涂层呈较大片状剥落, 如图 2b 所示; 当滑动速度增至 10m/min 时, 从图 2c 可见涂层的损伤明显加剧, 出现大面积涂

层剥落, 并可观察到磨痕中有磨屑堆积。剥落处的 EDX 谱图上主要是涂层元素峰以及较明显的氧峰, 因此可以判断, WC/C 涂层损伤为磨损剥落及氧化磨损共同作用的结果, 涂层并没有出现整体剥落而失效, 磨损剥落仅局限于孔洞缺陷所在的范围。

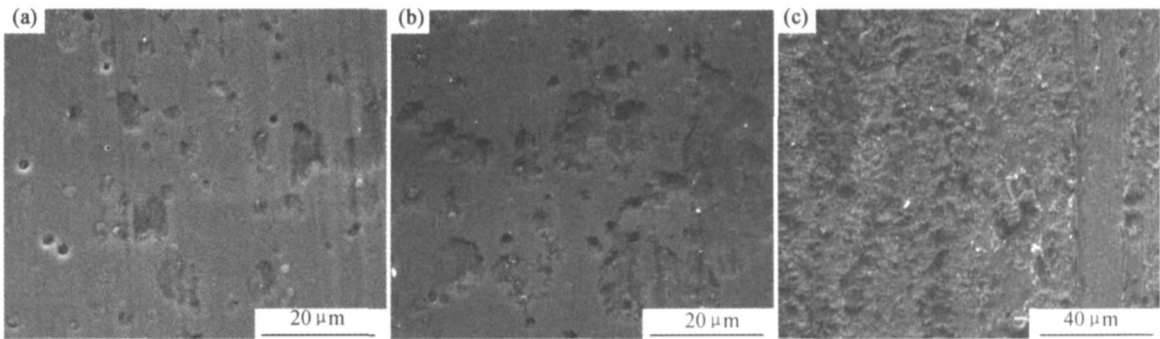


图 2 与 Si₃N₄球对磨时, 不同滑动速度下 WC/C 涂层的磨损表面 SEM 形貌

(a) $V = 0.48\text{ m/min}$; (b) $V = 5\text{ m/min}$; (c) $V = 10\text{ m/min}$

Fig. 2 SEM morphologies of worn surfaces of WC/C coating at different sliding velocities when against Si₃N₄ ball

(a) $V = 0.48\text{ m/min}$; (b) $V = 5\text{ m/min}$; (c) $V = 10\text{ m/min}$

当对磨副为纯钛球时, 在不同速度条件下, WC/C 涂层的磨损都较轻微, 滑动速度对磨痕形貌的影响并不明显。图 3a 为 WC/C 涂层在滑动速度为 10m/min 时的磨痕形貌, 可以看出磨痕内部除了极其轻微的犁沟外, 无其他损伤特征出现。如图 3b 所示, 在高倍形

貌中, 可观察到涂层表面较完好, 仅在个别孔洞缺陷处存在有磨屑颗粒填充的现象。采用 EDX 对磨痕表面多处位置处进行检测, 都没有发现 Ti 元素的存在, 但磨屑的主要成分为 Ti, 另有少量 O 元素。因此, WC/C 涂层的损伤表现为轻微的磨粒磨损和氧化磨

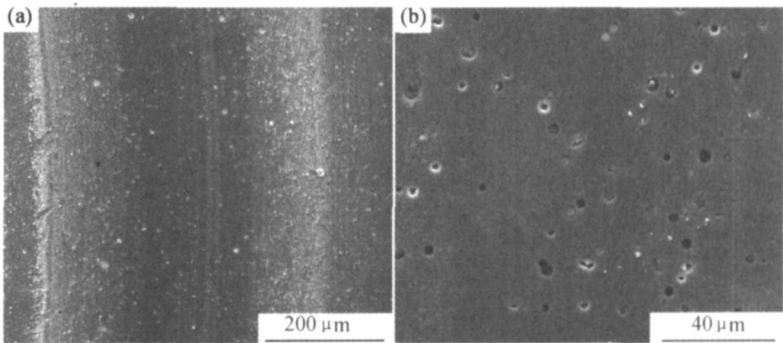


图 3 与纯钛球对磨时, WC/C 涂层的磨痕 SEM 形貌 ($V = 10\text{ m/min}$) (a) 磨痕; (b) 磨痕内部磨损表面

Fig. 3 SEM morphologies of wear track of WC/C coating when against Ti ball at sliding velocity of 10 m/min

(a) wear track; (b) worn surface inside the wear track

损, 涂层对纯钛有良好的抗粘着性能。

图 4 为不同滑动速度下 Si₃N₄ 球表面磨痕光学形貌。如图 4 所示, 可以看出 Si₃N₄ 球在低滑动速度 ($V = 0.48\text{ m/min}$) 下的磨损较为轻微, 磨痕表面形成的转移膜较为致密均匀, 并呈彗星的拖曳状; 而滑动速度为 $V = 10\text{ m/min}$ 时的磨痕表面的转移膜均匀性较差, 分布区域面积较小, 且磨痕中心部位不连续。这表明较

低的滑动速度有利于 Si₃N₄ 陶瓷球表面转移膜的形成。同样地, 在纯钛球表面(见图 5) 可以发现, 较低滑动速度有利于致密均匀的转移膜的形成, 从而明显降低摩擦系数和磨损。Liu 等^[10] 认为: 石墨化转变是决定涂层低摩擦系数的关键, 石墨化可导致显微石墨层片在低剪切应力的束缚下在涂层表面跃迁和来回流动, 这可以很好地解释上述实验结果。

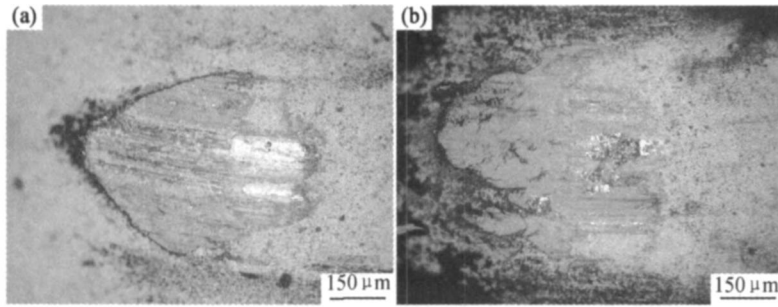


图 4 不同滑动速度条件下 Si_3N_4 球表面磨痕光学形貌 (a) $V = 0.48 \text{ m/min}$; (b) $V = 10 \text{ m/min}$

Fig. 4 OM morphologies of worn surfaces of Si_3N_4 ball at different sliding velocities

(a) $V = 0.48 \text{ m/min}$; (b) $V = 10 \text{ m/min}$

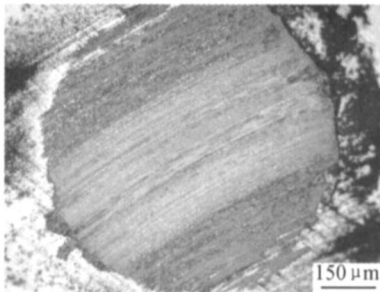


图 5 纯钛球表面磨痕光学形貌 ($V = 0.48 \text{ m/min}$)

Fig. 5 OM morphology of worn surface of Ti ball at sliding velocity of 0.48 m/min

3 结论

(1) Si_3N_4 陶瓷和纯钛球配副条件下, 滑动速度对 WC/C 涂层摩擦系数存在明显的影响, 涂层在低滑动速度 (0.48 m/min) 时的摩擦系数较另外两组 ($5, 10 \text{ m/min}$) 较高滑动速度时的摩擦系数明显降低, 且曲线走势存在很大差异。

(2) 当对磨副为 Si_3N_4 球时, WC/C 涂层的磨损主要表现为剥层和氧化磨损。滑动速度的变化对涂层的磨损有很大影响, 滑动速度增大涂层损伤加剧, 涂层沉积过程所产生的孔洞缺陷是涂层剥落的起始源。与纯钛球对磨时, 涂层的损伤仅表现为极其轻微的磨粒磨损和氧化磨损, WC/C 涂层拥有良好的抗钛粘着性能。

(3) 较小的滑动速度有利于转移膜在两种对磨球表面形成。

参考文献

- [1] GRILL A. Diamond-like carbon: state of the art[J]. Diamond Related Mater, 1999, 8 (2-5): 428-434.
- [2] DONNET C. Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review[J]. Surface and Coatings

Technology, 1998, 100-101: 180-186.

- [3] 张俊彦. 薄膜/涂层的摩擦学设计及其研究进展[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 387-395.
- [4] WÄNSTRAND O, LARSSON M, HEDENQVIST P. Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 111(2-3): 247-254.
- [5] NAVINSEK B, PANJAN P, CEKADA M, et al. Interface characterization of combination hard/solid lubricant coatings by specific methods[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 154(2-3): 194-203.
- [6] PARK S J, LEE K R, KO D H, et al. Microstructure and mechanical properties of WC/C nanocomposite films[J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 1750-1760.
- [7] CZYZNIEWSKI A. Deposition and some properties of nanocrystalline WC and nanocomposite WC/a-C:H coatings[J]. Thin Solid Film, 2003, 433: 180-185.
- [8] VOEVODIN A A, O'NEILL J P, ZABINSKI J S. Tribological performance and tribochemistry of nanocrystalline WC/amorphous diamond-like carbon composites[J]. Thin Solid Film, 1999, 342(2-3): 194-200.
- [9] PRODGORNIK B, VIŽINTIN J, JACOBSON S, et al. Tribological behaviour of WC/C coatings operating under different lubrication regimes[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177-178: 558-565.
- [10] LIU Y, GUBISCH M, HILD W, et al. Nanoscale multilayer WC/C coatings developed for nanopositioning, part II: friction and wear[J]. Thin Solid Film, 2005, 111(1-2): 140-148.

基金项目: 教育部优秀博士论文基金资助项目(200536); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-04-0885); 四川省科技攻关计划资助项目(04CN032-009)

收稿日期: 2007-11-07; 修订日期: 2008-03-05

作者简介: 莫继良(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事表面工程及摩擦学研究, 联系地址: 成都市二环路北一段 111 号西南交通大学摩擦学研究所(610031)。E-mail: mojiliang126@126.com