

等离子喷涂 TiC-Graphite 复合涂层摩擦磨损性能

洪 督^{1,2}, 牛亚然¹, 李 红², 钟 鑫¹, 郑学斌¹

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘 要: 等离子喷涂 TiC 涂层具有良好的综合性能, 在极端环境能起到较好的耐磨保护作用, 而石墨是一种优异的自润滑材料。通过喷雾干燥与真空烧结技术制备不同石墨添加量(1.25%、2.5%、5%和 10%, 质量分数)的 TiC-Graphite 球形粉体, 并采用大气等离子喷涂技术制备 TiC-Graphite 复合涂层。对涂层的相组成、显微结构和力学性能进行了表征, 并对涂层的摩擦磨损性能进行了比较研究。结果发现, TiC-Graphite 涂层主要由 TiC 和石墨相组成。随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层截面微裂纹增多, 表面粗糙度增大, 硬度下降。石墨对 TiC 涂层在高载荷的磨损性能影响更显著。在 50 N 高载荷条件, 随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层磨损率降低后急剧增大, 而摩擦系数持续减小。当石墨添加量为 2.5%时, 涂层获得最低的磨损率为 $0.67 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 同时具有较低的摩擦系数(0.35), 与不添加石墨的 TiC 涂层相比, 分别降低了 72.4%和 27.8%。

关 键 词: TiC-Graphite 复合涂层; 磨损性能; 大气等离子喷涂; 显微结构; 力学性能

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Tribological Properties of Plasma Sprayed TiC-Graphite Composite Coatings

HONG Du^{1,2}, NIU Yaran¹, LI Hong², ZHONG Xin¹, ZHENG Xuebin¹

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Plasma sprayed TiC coating has now been a frequent choice for wear-resistant applications in extreme environments owing to its good comprehensive performance. Meanwhile, graphite is an excellent self-lubricating material. Here, spherical TiC-Graphite composite powders with different contents of graphite (1.25%, 2.5%, 5%, and 10% in mass) were fabricated by spray drying and vacuum sintering, and then TiC-Graphite composite coatings were prepared by atmospheric plasma spray (APS) technology. The phase composition, microstructure and mechanical properties of the coatings were characterized, and its tribological performances were evaluated. The results showed that the TiC-Graphite coatings were mainly composed of TiC and graphite phases. With the increase of graphite addition, the micro-cracks in the section and the roughness of the TiC-Graphite coatings increased while the hardness gradually decreased. Compared with low load, graphite had more significant effect on wear performance of the TiC coating under high load. Under the load of 50 N, wear rate of the TiC-Graphite coating first decreased and then increased, but the friction coefficient kept decreasing with the increase of graphite addition. When the graphite addition was 0.25%, the minimum wear rate of $0.67 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ was obtained, whereas the friction coefficient was 0.35, which were reduced by 72.4% and 27.8% compared with the pure TiC coating, respectively.

收稿日期: 2021-08-23; 收到修改稿日期: 2021-11-14; 网络出版日期: 2021-12-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0111200) National Key R&D Program of China (2016YFE0111200)

作者简介: 洪 督(1992-), 男, 硕士研究生. E-mail: hongdu@mail.sic.ac.cn

HONG Du (1992-), male, Master candidate. E-mail: hongdu@mail.sic.ac.cn

通信作者: 郑学斌, 研究员. E-mail: xbzheng@mail.sic.ac.cn

ZHENG Xuebin, professor. E-mail: xbzheng@mail.sic.ac.cn

Key words: TiC-Graphite composite coatings; tribological property; atmospheric plasma spray; microstructure; mechanical property

陶瓷涂层具有优异的物理和化学性能,在保护部件免受磨损和腐蚀等方面得到广泛应用^[1-5]。TiC 薄膜/涂层因其高硬度、优异的摩擦和磨损性能、良好的物理和化学稳定性受到广泛关注^[6-8]。通过物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)制备的 TiC 薄膜已成功应用于各种耐磨部件,例如刀具、模具及机械零部件等^[9-12],但其应用受到沉积效率低和成本高的限制。厚涂层具有更好的综合性能,在高载荷、高速度和长服役时间等极端环境能起到更好的耐磨保护作用^[6,13-15]。大气等离子喷涂(APS)具有沉积效率高、等离子焰流温度高、可以处理不同基材,并且制备的涂层较致密均匀等优点,是制备陶瓷涂层的最佳方法之一。

在诸多力学性能指标中,硬度与摩擦磨损关系最为密切,在大多数情况下磨损率都会随硬度的提高而降低,但是硬度高往往会造成摩擦系数高^[14-17]。向硬质涂层中加入自润滑材料,使得涂层同时具有高硬度和低剪切强度,可以有效降低涂层的摩擦系数和磨损率^[14-17]。石墨具有层间滑移的特点,具有良好的自润滑减摩特性。此外,石墨还具有低密度(1.67~1.83 g/cm³)、高熔点(3527 °C)、高热导率(90~300 W/(m·K))、较好的热稳定性和化学稳定性等特点^[17-18]。近年来,研究人员试图通过引入石墨来改善硬质涂层的摩擦学性能。Mi 等^[14]采用反应等离子喷涂技术制备了不同石墨含量的 Ti(CN)涂层,并对其磨损性能进行研究。结果表明,随着石墨添加量增大,涂层摩擦系数降低,磨损率先降低然后增加。30%石墨添加量的 Ti(CN)涂层具有较低的磨损率。Natarajan 等^[19]研究了石墨对等离子喷涂 NiCrBSi 涂层磨损行为的影响,结果表明,在涂层中添加石墨可以减小体积损失和磨损率, NiCrBSi-8% Graphite 复合涂层具有优异的耐磨性能。从已有研究可以看出,添加适量的石墨可以有效减小硬质涂层摩擦系数和磨损率,改善涂层摩擦学性能,而未见添加石墨对 TiC 涂层磨损性能影响的有关报导。

本工作制备了不同石墨添加量的 TiC-Graphite 球形团聚粉体,石墨的引入量(质量分数)分别为 1.25%、2.5%、5%和 10%。采用大气等离子喷涂技术制备 TiC-Graphite 复合涂层与单相 TiC 涂层,研究不同石墨添加量对 TiC-Graphite 涂层相组成、显微结构和力学性能的影响,进而分析其对涂层磨损性能的影响,以期在实际应用提供实验依据。

1 实验方法

1.1 涂层制备

将市售的石墨粉体(纯度: 99.5%, 国药集团)和 TiC 粉体(纯度: 99.0%, 株洲广源硬质材料有限公司)分别按照质量比 1.25 : 98.75、2.5 : 97.5、5 : 95 和 10 : 90 进行配比,加入去离子水和粘结剂配置成浆料,进行喷雾干燥得到 TiC-Graphite 复合粉体;对喷雾造粒的粉体进行烧结致密化,然后过筛选择合适粒径的喷涂粉体。

实验选用石墨作为基体,尺寸为 $\phi 33$ mm \times 3 mm。喷涂前对基体进行喷砂预处理,以获得清洁粗糙、活性高的表面。首先采用 APS-2000 大气等离子喷涂技术在基体表面喷涂 Si 涂层;然后将其放置在真空气氛炉中进行热处理,生成 SiC 过渡层;最后在基体表面喷涂 350~400 μ m 厚的 TiC-Graphite 涂层。Si 和 TiC-Graphite 涂层的喷涂参数如表 1 所示。为了方便说明,石墨添加量为 0、1.25%、2.5%、5%和 10%的 TiC-Graphite 涂层依次标记为 TG0、TG1.25、TG2.5、TG5 和 TG10。

1.2 样品表征

采用激光粒度仪(BT-9300Z, 丹东百特仪器有限公司, 中国)测试粉体粒径分布。采用附带能谱仪(EDS)的场发射扫描电子显微镜(Magellan 400, FEI, 美国)对粉体、涂层、磨痕和磨屑的结构和化学组成进行分析。采用 X 射线衍射仪(RAX-10, Rigaku, 日本)分析粉体和涂层的物相组成,选用 Cu K α 射线,波长为 0.154056 nm。采用表面轮廓仪(DektakXTL, Bruker, 德国)测量涂层的表面平均粗糙度(R_a)。采用显微硬度计(TUKON-2100B, INSTRON, 英国)测量涂层截面的维氏硬度,取 10 个测量的平均值。试验力为 9.8 N,保持时间为 15 s。

表 1 Si 和 TiC-Graphite 涂层大气等离子喷涂工艺参数
Table 1 Atmospheric plasma spray parameters for Si and TiC-Graphite coatings

Parameter	Si	TiC-Graphite
Powder/kW	30-40	35-45
Primary gas Ar/(L·min ⁻¹)	34-40	36-42
Secondary gas H ₂ /(L·min ⁻¹)	5-10	7-12
Powder feed speed/(r·min ⁻¹)	15-20	13-18
Spray distance/mm	100-130	100-130

采用摩擦磨损试验机(DX-NPO11, 东兴电讯材料有限公司, 中国)以球-盘接触方式测试抛光后涂层的摩擦磨损性能。对磨球选用 WC-Co, 直径为 5 mm, 硬度为(16.1±0.4) GPa。载荷为 20 和 50 N, 线速度为 0.5 m/s, 时间为 1800 s。采用摩擦磨损试验仪的传感器测量涂层的受力情况, 采用仪器系统自带公式计算摩擦系数, 结果由仪器显示器直接读取。摩擦系数的具体计算公式为:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

式中, F 为摩擦力, N 为涂层竖直方向实验载荷。体积磨损率由以下公式计算得出:

$$W = \frac{V}{NL} \quad (2)$$

式中, W 为体积磨损率, V 为磨损体积, N 为涂层垂直方向实验载荷, L 为摩擦行程。磨损体积 $V=2\pi R \cdot S$, 其中 S 为磨痕横截面积, R 为磨痕半径(11 cm)。磨痕截面积 S 由表面轮廓仪(DektakXTL, Bruker, 德国)测量, 选取磨痕的 8 个位置进行磨痕截面积的测量, 取其平均值。每种条件下试验重复 3 次, 最终的摩擦系数和磨损率为 3 次试验数据的平均值。

2 结果与讨论

2.1 粉体和涂层显微结构和物相组成

图 1 为 TG2.5 粉体形貌、粒径分布和相关 EDS 分析。粉体呈球形, 大小均匀(图 1(a))。中位粒径为 40 μm 左右, 粉体粒径分布较集中(图 1(c)), 适合等离子喷涂。从高倍形貌和相关 EDS 分析(图 1(b, d))

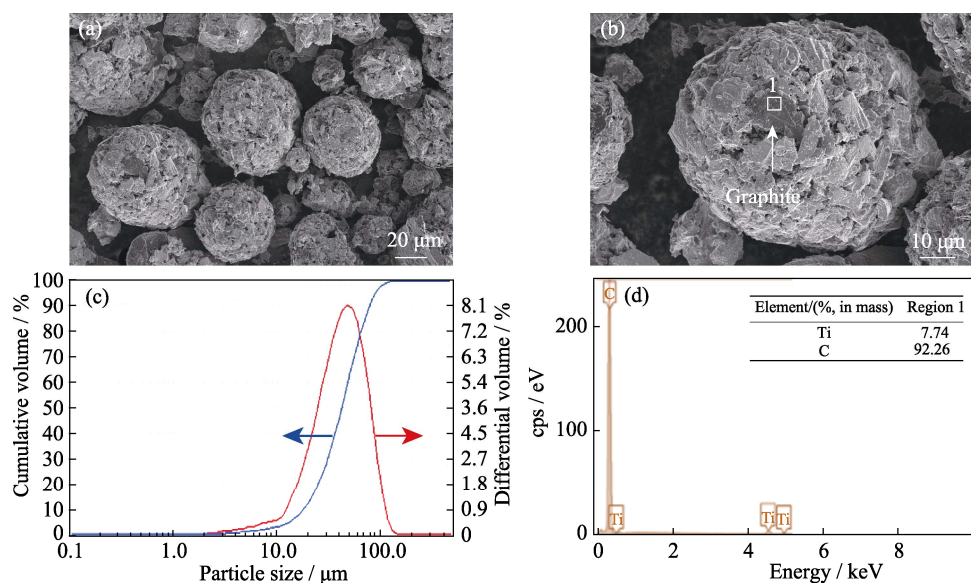


图 1 TG2.5 粉体的低倍形貌(a)、高倍形貌(b)、粒径分布(c)和相关 EDS 分析(d)

Fig. 1 Low (a) and high (b) magnification morphologies, particle size distribution (c) and EDS analysis (d) of TG2.5 powder

可以看到, 粉体区域 1 含有石墨相, 表明石墨被成功掺入 TiC 粉体。

图 2 为 TiC-Graphite 粉体和涂层的 XRD 图谱。粉体的主相为 TiC, 次相为石墨, 随着石墨添加量增大, TiC-Graphite 粉体的石墨相特征峰强度增强(图 2(a))。与粉体相比, 仅 TG10 涂层中检测到石墨相, 表明喷涂过程中石墨发生损耗, 涂层中石墨含量减少(图 2(b))。此外, TG0 涂层存在少量 TiO 相, 其它 TiC-Graphite 涂层未检测到钛的氧化物相, 这可能与石墨的添加有关。

图 3 为 TiC-Graphite 涂层表面微观形貌和 EDS 结果。可以看到, 涂层表面存在完全熔化和部分熔化区域, 并且存在少量孔隙^[19-20]。随着石墨添加量增大, 涂层表面粗糙度有增大的趋势(图 3(a~e))。此外, 涂层表面可以观察到黑色的石墨相(图 3(b~e))。

图 4 为 TiC-Graphite 涂层的截面形貌和元素分布。TiC-Graphite 涂层较致密, 孔隙率较低, 并且具有热喷涂典型的层状结构。随着石墨添加量的增加, TiC-Graphite 涂层微裂纹逐渐增多, 致密度减小(图 4(a~e))。这可能是由于石墨粒子与 TiC 的热膨胀系数和热导率等物理性能差异较大造成的^[18-21]。TG2.5 涂层的 O 元素面分布图显示涂层截面含有少量的 O 元素(图 4(f)), 表明喷涂过程中粉体发生了少量氧化。相关 EDS(图 4(g~i))分析显示, 颜色越深的区域, C 元素含量越高, 推测颜色较深的区域为石墨富集区。

2.2 涂层粗糙度和硬度

图 5 为 TiC-Graphite 涂层的表面粗糙度(R_a)和维氏硬度随石墨添加量变化的关系曲线。随着石墨添

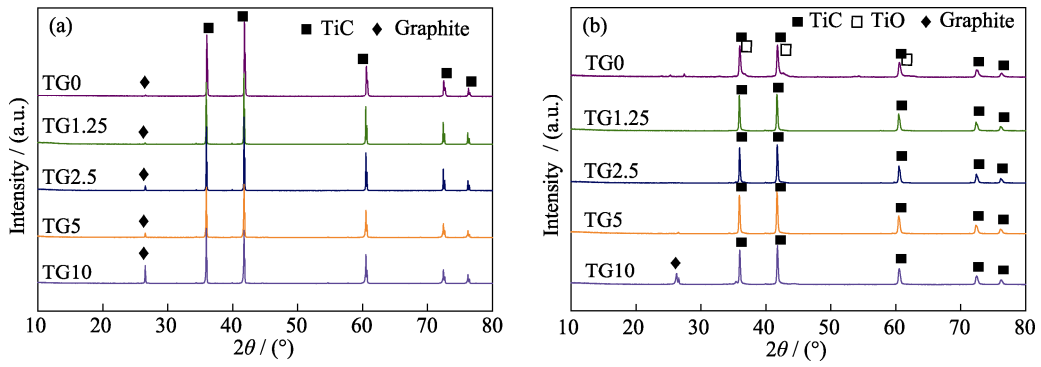


图 2 TiC-Graphite 粉体(a)和涂层(b)的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of TiC-Graphite powders (a) and coatings (b)

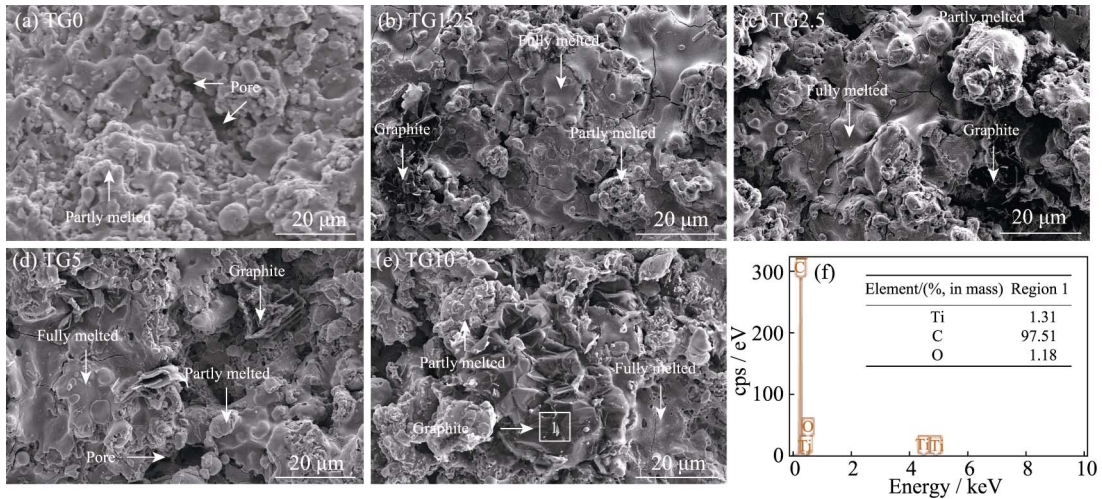


图 3 TiC-Graphite 涂层的表面形貌(a~e)和相关 EDS 分析(f)
Fig. 3 Surface morphologies (a~e) and corresponding EDS analysis (f) of TiC-Graphite coatings

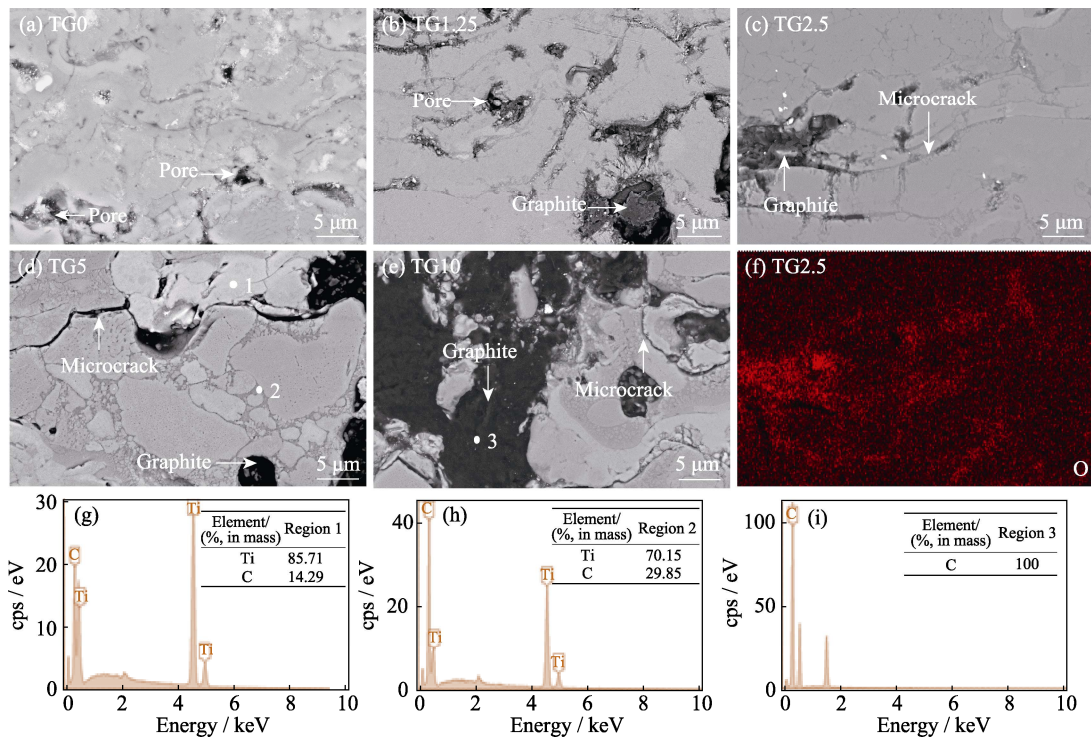


图 4 TiC-Graphite 涂层的截面形貌(a~e), TG2.5 涂层截面氧元素面分布(f)和不同区域 EDS 分析(g~i)
Fig. 4 Cross-sectional morphologies of TiC-Graphite coatings (a~e), oxygen element mapping (f) of cross section of TG2.5 coating and EDS analyses (g~i) of different areas among (d) and (e)

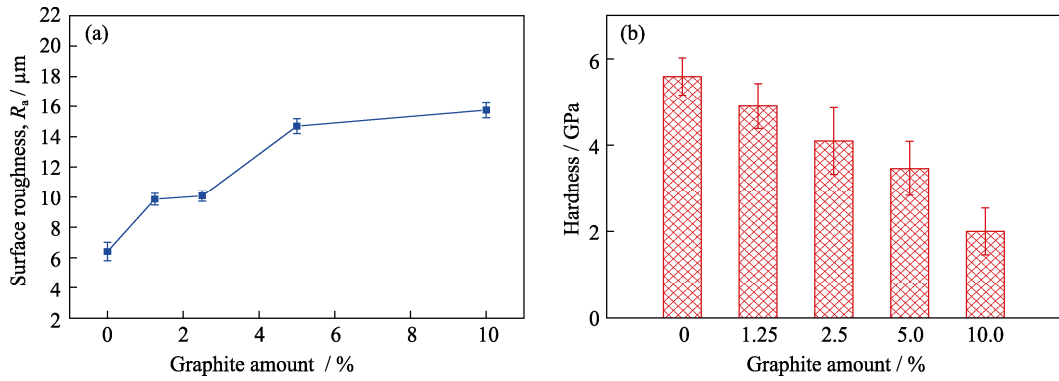


图 5 TiC-Graphite 涂层的表面粗糙度(a)和维氏硬度(b)

Fig. 5 Surface roughness (a) and Vickers hardness (b) of TiC-Graphite coatings

加量增大, 涂层的粗糙度从(6.4±0.6) μm 增大至(15.7±0.5) μm (图 5(a)), 维氏硬度从(5.6±0.4) GPa 下降至(2.0±0.5) GPa (图 5(b))。涂层表面粗糙度增大可能是由于在涂层沉积过程中, TiC 熔滴的铺展受到石墨的影响, 导致涂层表面粗糙度增大^[17]。涂层的硬度下降一方面可能是由于石墨本身硬度低, 随着石墨添加量增大, 涂层的硬度必然减小; 另一方面, 添加石墨会导致涂层致密度减小, 裂纹等缺陷增多, 因此涂层显微硬度进一步降低^[14,22]。

2.3 涂层摩擦系数和磨损率

图 6 为 TiC-Graphite 涂层在 20 和 50 N 载荷条

件下摩擦系数随时间的变化曲线。在 20 和 50 N 载荷下, 随石墨添加量增加, 涂层摩擦系数均减小。与 20 N 载荷条件相比, 在 50 N 载荷条件摩擦系数较稳定。

图 7 为 TiC-Graphite 涂层在 20 和 50 N 载荷条件下稳态摩擦系数和磨损率曲线。在 20 和 50 N 载荷条件下, 随石墨添加量增大, 涂层稳态摩擦系数分别从 0.53、0.49 降至 0.33、0.28。在 20 N 载荷条件下, 当石墨添加量少于 2.5% 时, 涂层磨损率基本不变。当石墨添加量超过 2.5% 时, 涂层磨损率急剧增大。在 50 N 载荷条件下, 当石墨添加量少于 2.5% 时,

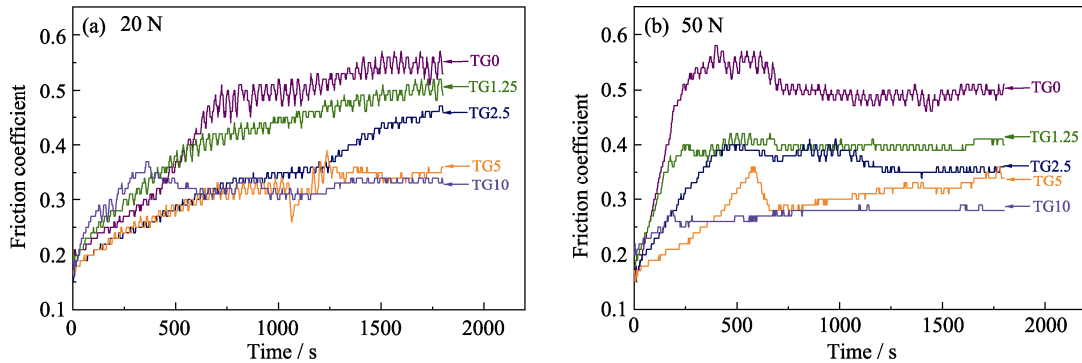


图 6 20 N(a)和 50 N(b)载荷条件 TiC-Graphite 涂层的摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 6 Change of friction coefficients of the TiC-Graphite coatings with time under 20 N (a) and 50 N (b)

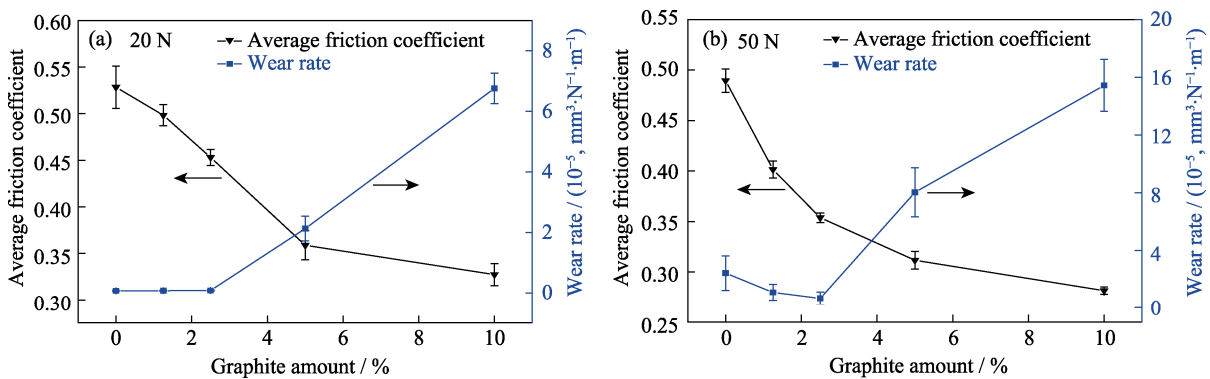


图 7 20 N(a)和 50 N(b)载荷条件 TiC-Graphite 涂层的摩擦系数和磨损率随石墨添加量的变化

Fig. 7 Change of friction coefficients and wear rates of the TiC-Graphite coatings with graphite amount under 20 N (a) and 50 N (b)

时, 涂层磨损率明显减小。当石墨添加量超过 2.5% 时, 涂层磨损率亦急剧增大。当石墨添加量为 2.5% 时, 涂层的磨损率最低, 仅为 $0.67 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 同时具有较低的摩擦系数(0.35)。与不添加石墨的 TiC 涂层相比, 磨损率和摩擦系数分别降低了 72.4% 和 27.8%。由此可见, 石墨对 TiC 涂层在高载荷的磨损性能影响更显著。

2.4 涂层磨损机理

不同石墨添加量显著影响 TiC 涂层的摩擦学性能, 本研究重点分析 50 N 载荷条件下涂层磨痕和磨屑, 从而探究 TiC-Graphite 涂层磨损行为及磨损机理。图 8(a~e) 为 TiC-Graphite 涂层的磨痕形貌。当石墨添加量少于 2.5% 时, 随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层磨痕剥落凹坑和脆性断裂减少, 转移层增多且未发现犁沟, 呈现疲劳磨损的典型形貌(图 8(a~c))^[23-24]。当石墨添加量达到 5% 时, TG5 涂层磨痕剥落凹坑和脆性断裂消失, 表面形成大面积且完整的转移层(图 8(d))。当石墨添加量达到 10% 时, 由于 TG10 转移层中石墨相过多, 不能承受高载荷, 导致磨痕又重新出现剥落凹坑(图 8(e))。此外, 从 TG5 和 TG10 涂层磨痕的高倍形貌(图 8(g~h)) 可以看到, 磨痕表面不存在犁沟, 表明未发生磨粒磨损^[25-26]。图 8(f) 为 TG2.5 涂层磨痕的 O 元素面分布

图, 可以看到, 转移层(区域 1)的氧含量高于非转移层(区域 2), 表明磨损过程中发生了氧化^[27]。图 8(i) 显示 TiC-Graphite 涂层磨痕表面各元素的相对含量, TiC-Graphite 涂层磨痕表面 W 元素含量极少, 表明对磨材料 WC-Co 几乎没有向磨痕转移, 未发生黏着磨损^[28]。

图 9 是 TiC-Graphite 涂层的磨屑形貌。磨屑主要由片状和颗粒结构组成。与其它涂层相比, TG0 涂层存在较多的片状磨屑, 且片状磨屑尺寸较大。随石墨添加量增加, 涂层片状磨屑减少, 颗粒磨屑增多。磨屑的结构变化主要是涂层的硬度和致密度逐渐减小导致的。EDS 结果(图 9(f)) 显示, TG0 和 TG10 涂层磨屑均含有少量 W 元素, 表明磨屑中存在少量对磨球材料(WC-Co)。与 TG0 磨屑(区域 1) 相比, TG10 磨屑(区域 2) 含有较多的 C 元素, 表明 TG10 磨屑中存在较多石墨相。

基于上述实验结果和分析可知, 当对磨球与 TiC-Graphite 涂层对磨时, 摩擦开始之初会产生细小的磨屑。随着摩擦进行, 在挤压力作用下含有石墨的混合磨屑在涂层表面形成低剪切强度的转移层。该转移层保留了石墨本身的润滑特性, 在磨损过程中起到一定程度的润滑作用^[22,29-30]。此外, 转移层阻止了对磨材料之间的直接接触, 从而减小了

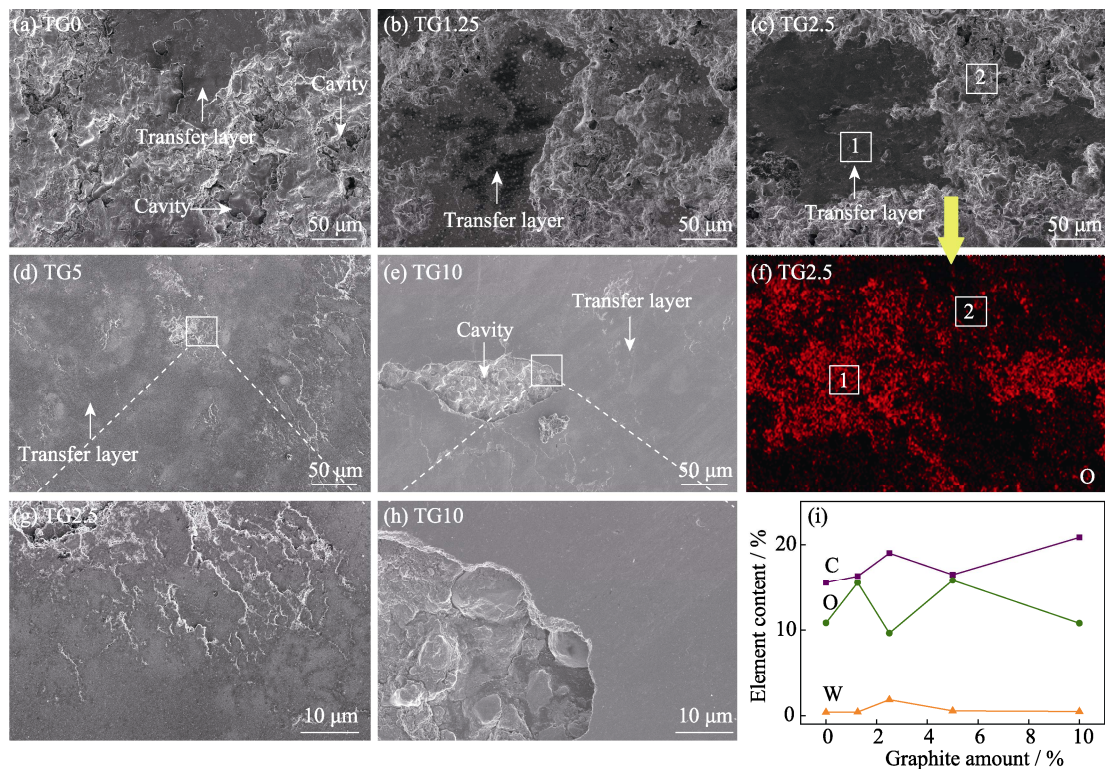


图 8 TiC-Graphite 涂层的磨痕形貌(a~e, g, h), TG2.5 涂层磨痕的氧元素面分布(f)和 TiC-Graphite 涂层磨痕表面相关元素含量(i)
Fig. 8 Morphologies of the wear tracks of TiC-Graphite coatings (a-e, g, h), oxygen element mapping (f) of the wear tracks of TG2.5 coating and elements content of the wear tracks of TiC-Graphite coatings (i)

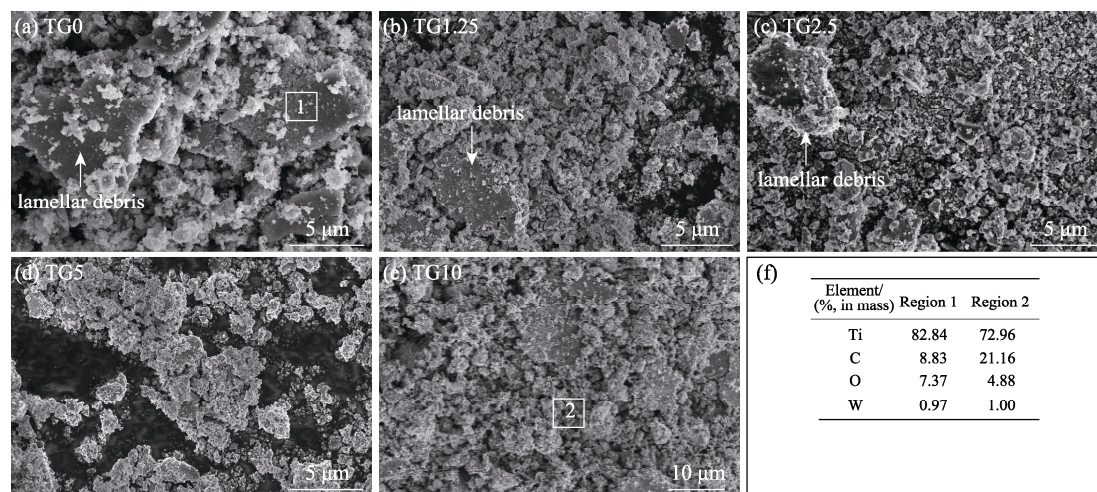


图 9 TiC-Graphite 涂层的磨屑形貌(a~e)和磨屑 EDS 分析(f)

Fig. 9 Morphologies (a-e), and EDS analysis of wear debris (f) of wear debris of TiC-Graphite coatings

摩擦力, 对 TiC-Graphite 涂层起到较好的保护作用。因此, 在 50 N 载荷条件下, 随石墨添加量的增加, TiC-Graphite 涂层磨痕表面转移层增多, 疲劳剥落和脆性断裂减少, 从而减小了摩擦系数和磨损率。随石墨添加量进一步增加, 摩擦系数持续减小, 但涂层内部微裂纹增多和致密度减小, 反而导致 TiC-Graphite 涂层磨损率增加。

3 结论

采用大气等离子喷涂技术制备了不同石墨添加量的 TiC-Graphite 涂层, 并研究了不同石墨添加量对 TiC-Graphite 涂层相组成、显微结构和力学性能的影响, 进而分析其对涂层磨损性能的影响, 并对 TiC-Graphite 涂层磨损机理进行了探究, 得出如下结论:

1) 随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层截面微裂纹增多, 表面粗糙度增大, 硬度持续下降。

2) 石墨添加相对 TiC 涂层在高载荷条件的磨损性能影响更显著。50 N 高载荷条件, 随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层磨损率先减小后急剧增大, 而摩擦系数持续减小。当石墨添加量为 2.5% 时, 涂层获得较低的摩擦系数为 0.35, 同时具有最低的磨损率 ($0.67 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$), 与不添加石墨的 TiC 涂层相比, 摩擦系数和磨损率分别降低了 27.8% 和 72.4%。

3) 随石墨添加量增大, TiC-Graphite 涂层磨痕表面转移层增多, 疲劳剥落和脆性断裂减少, 从而减小了摩擦系数和磨损率。随石墨添加量进一步增加, 摩擦系数持续减小, 但涂层内微裂纹增多和致密度减小, 反而导致 TiC-Graphite 涂层磨损率增加。TiC-Graphite 涂层磨损机理主要包括疲劳磨损和摩擦氧化。

参考文献:

- [1] ZHU H Y, NIU Y R, LIN C C, *et al.* Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed B₄C-Ni composite coatings. *Ceramics International*, 2013, **39**(1): 101-110.
- [2] WANG Y W, NIU Y R, ZHONG X, *et al.* Water vapor corrosion behaviors of plasma sprayed RE₂SiO₅ (RE = Gd, Y, Er) coatings. *Corrosion Science*, 2020, **167**: 108529.
- [3] WANG Y W, NIU Y R, ZHONG X, *et al.* Water vapor corrosion behaviors of plasma sprayed ytterbium silicate coatings. *Ceramics International*, 2020, **46**(18): 28237-28243.
- [4] PAN X H, LI C, NIU Y R, *et al.* Effect of tungsten-containing additives (WB/WSi₂/W) on ablation behavior of ZrB₂-SiC coating. *Corrosion Science*, 2020, **168**: 108560.
- [5] XU X T, PAN X H, NIU Y R, *et al.* Difference evaluation on ablation behaviors of ZrC-based and ZrB₂-based UHTCs coatings. *Corrosion Science*, 2021, **180**: 109181.
- [6] GUO X Q, NIU Y R, HUANG L P, *et al.* Microstructure and tribological property of TiC-Mo composite coating prepared by vacuum plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, **21**(5): 1083-1090.
- [7] KUPTSOV K A., SHEVEYKO A N, MANAKOVA O S, *et al.* Comparative investigation of single-layer and multilayer Nb-doped TiC coatings deposited by pulsed vacuum deposition techniques. *Surface and Coatings Technology*, 2020, **385**: 125422.
- [8] LUO J, OU Y X, ZHANG Z Q, *et al.* Low friction coefficient of superhard nc-TiC/a-C:H nanocomposite coatings deposited by filtered cathodic vacuum arc. *Materials Research Express*, 2019, **6**(9): 096418.
- [9] CHITSAZ-KHOYI L, KHALIL-ALLAFI J, MOTALLEBZADEH A, *et al.* The effect of hydroxyapatite nanoparticles on electrochemical and mechanical performance of TiC/N coating fabricated by plasma electrolytic saturation method. *Surface and Coatings Technology*, 2020, **394**: 125817.
- [10] SOUČEK P, DANIEL J, HNILICA J, *et al.* Superhard nanocomposite nc-TiC/a-C:H coatings: the effect of HiPIMS on coating microstructure and mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*, 2017, **311**: 257-267.
- [11] FOUTS J A, SHILLER P J, MISTRY K K, *et al.* Additive effects on the tribological performance of WC/a-C:H and TiC/a-C:H coatings in boundary lubrication. *Wear*, 2017, **372-373**: 104-115.

- [12] OLAH N, FOGARASSY Z, SULYOK A, *et al.* Ceramic TiC/a:C protective nanocomposite coatings: structure and composition versus mechanical properties and tribology. *Ceramics International*, 2016, **42(10)**: 12215–12220.
- [13] HONG D, NIU Y R, LI H, *et al.* Comparative study on wear behavior of plasma-sprayed TiC coating sliding against different counterparts. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, **29(5)**: 1082–1092.
- [14] MI P B, HE J N, ZHAO H J, *et al.* Effect of graphite addition on structure and properties of Ti(CN) coatings deposited by reactive plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, **25(8)**: 1588–1595.
- [15] HONG D, NIU Y R, LI H, *et al.* Comparison of microstructure and tribological properties of plasma-sprayed TiN, TiC and TiB₂ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2019, **374**: 181–188.
- [16] LI H Q, XIE Y T, LI K, *et al.* Microstructure and wear behavior of graphene nanosheets-reinforced zirconia coating. *Ceramics International*, 2014, **40(8)**: 12821–12829.
- [17] 李虹庆. 石墨烯增强陶瓷基复合涂层的摩擦学行为及细胞相容性研究. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所硕士学位论文, 2014.
- [18] 肖明颖. 耐磨自润滑涂层的组织和性能研究. 青岛: 中国石油大学硕士学位论文, 2007.
- [19] NATARAJAN S, ANAND E E, AKHILESH K S, *et al.* Effect of graphite addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of plasma sprayed NiCrBSi coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 2016, **175**: 100–106.
- [20] HE J N, ZHANG F Y, MI P B, *et al.* Microstructure and wear behavior of nano C-rich TiCN coatings fabricated by reactive plasma spraying with Ti-graphite powders. *Surface and Coatings Technology*, 2016, **305**: 215–222.
- [21] CAI B, TAN Y F, TU Y Q, *et al.* Tribological properties of Ni-base alloy composite coating modified by both graphite and TiC particles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21(11)**: 2426–2432.
- [22] ZHAO X Q, LI S J, HOU G L, *et al.* Influence of doping graphite on microstructure and tribological properties of plasma sprayed 3Al₂O₃-2SiO₂ coating. *Tribology International*, 2016, **101**: 168–177.
- [23] MUSSA A, KRAKHMALOV P, BERGSTROM J, *et al.* Sliding wear and fatigue cracking damage mechanisms in reciprocal and unidirectional sliding of high-strength steels in dry contact. *Wear*, 2020, **444–445**: 203119.
- [24] ZHANG R J, ZHENG C L, CHEN C, *et al.* Study on fatigue wear competition mechanism and microstructure evolution on the surface of a bainitic steel rail. *Wear*, 2021, **482–483**: 203978.
- [25] WOLLMANN T, NITSCHKE S, KLAUKE T, *et al.* Investigating the friction, wear and damage behaviour of plain bearing bushes of the variable stator vane system. *Tribology International*, 2022, **165**: 107280.
- [26] JI C C, GUO Q Q, LI J P, *et al.* Microstructure and properties of CrN coating via multi-arc ion plating on the valve seat material surface. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, **891**: 161966.
- [27] TAVARES A F, LOPES A P O, MESQUITA E A, *et al.* Effect of transfer layers on friction and wear mechanisms in strip drawing tests of commercially coated forming tools. *Wear*, 2021, **476**: 203733.
- [28] FABBRO S, ARAUJO L M, ENGEL J, *et al.* Abrasive and adhesive wear behaviour of metallic bonds in a synthetic slurry test for wear prediction in reinforced concrete. *Wear*, 2021, **476**: 203690.
- [29] CAO J, HUANG H B, LI S X, *et al.* Tribological and mechanical behaviors of engine bearing with CuSn10 layer and h-BN/graphite coating prepared by spraying under different temperatures. *Tribology International*, 2020, **152**: 106445.
- [30] WAHLISCH F, HOTH J, HELD C, *et al.* Friction and atomic-layer-scale wear of graphitic lubricants on SiC(0001) in dry sliding. *Wear*, 2013, **300(1/2)**: 78–81.