

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170830002

TC4 合金表面 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层的摩擦磨损性能

李 轩^{1,2}, 李 辉¹, 王凯强¹, 李秀兰¹, 谢文玲¹

(1. 四川理工学院 机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 四川理工学院 材料腐蚀与防护四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘 要: 为提高 TC4 合金表面耐磨性能, 采用复合镀方法在其表面制备 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层, 研究镀层的组织结构及其在常温 and 高温下 (600 ℃) 下的摩擦磨损行为。结果表明, 所制备的 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层组织致密且与基体结合紧密, 主要由 Ni 基体和弥散分布其中的 SiC 颗粒及微量 Y₂O₃ 混合组成。镀层的硬度明显高于 TC4 基体合金, 且由表向内呈梯度降低趋势。与 GCr15 对摩时, Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层在常温和 600 ℃ 均具有一定程度的减磨作用, 并且耐磨性能明显优于 TC4 基体合金。镀层在常温下的磨损失重显著低于 TC4 基体合金, 此时其磨损机制可以归结为疲劳磨损和轻微的氧化磨损; 随磨损温度升高至 600 ℃, 镀层的磨损失重明显增大, 此时的磨损机制为严重的氧化磨损、削层磨损和疲劳磨损。

关键词: TC4 合金; Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层; 组织; 摩擦磨损; 磨损机制

中图分类号: TG174.441; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0094-09

Wear Properties of Ni-SiC-Y₂O₃ Composite Coating Prepared on TC4 alloy

LI Xuan^{1,2}, LI Hui¹, WANG Kai-qiang¹, LI Xiu-lan¹, XIE Wen-ling¹

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, Sichuan; 2. Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, Sichuan)

Abstract: Ni-SiC-Y₂O₃ composite coatings were prepared on TC4 alloy using composite electroplating technology to improve wear resistance. Micro-structure and wear behavior of the coatings were investigated at room temperature and 600 ℃, respectively. The results show that the obtained Ni-SiC-Y₂O₃ composite coatings are dense and compact, consisting of Ni matrix with dispersed SiC particles and trace Y₂O₃ powders. Micro-hardness of the coating is obviously higher than that of TC4 substrate, which also presents a decreasing tendency on the depth direction from the coating surface to the substrate. Sliding against GCr15 ball, the Ni-SiC-Y₂O₃ composite coating has friction-reduction effect in a certain extent at both room temperature and 600 ℃. Wear resistance of the coating is superior to TC4 alloy at each evaluated conditions. Sliding at the room temperature, the mass loss of the coating after wear is much lower than that of TC4 alloy. The main wear mechanisms of the coating is fatigue wear combined with slight oxidation wear. While sliding at 600 ℃, the mass loss of the coating increases obviously and the main wear mechanisms are considered as serious oxidation wear, delamination abrasion and fatigue wear.

Keywords: TC4 alloy; Ni-SiC-Y₂O₃ compound coating; structure; friction and wear; wear mechanism

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-12-29

网络出版日期: 2018-03-12 12:38; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180312.1238.004.html>

通讯作者: 李轩(1982—), 男(汉), 讲师, 博士; 研究方向: 轻合金制备及表面改性; E-mail: biluaner@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51301115); 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金(2016CL18); 四川理工学院人才引进项目(2016RCL22)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51301115), Open Fund of Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province (2016CL18) and Program of Talent Introduction Project of Sichuan University of Science and Engineering (2016RCL22)

引文格式: 李轩, 李辉, 王凯强, 等. TC4 合金表面 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 94-102.

LI X, LI H, WANG K Q, et al. Wear properties of Ni-SiC-Y₂O₃ composite coating prepared on TC4 alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 94-102.

0 引言

Ti 合金具有密度低、比强度高及耐腐蚀性能优良等一系列优良性能,因而广泛应用于航空、航天及生物医疗等诸多领域^[1-2]。TC4 合金是 Ti 合金中应用最为广泛的一种,用量超过 Ti 合金使用总量的 50%,但该合金的硬度低而粘性大,抗摩擦磨损性能很差,导致其零部件特别是连接件表面极易出现划痕、粘着甚至咬合现象^[3]。因此,提高 TC4 合金的耐磨性能是进一步拓展其应用潜力的关键。

材料的磨损往往始于表面,制备表面防护涂层无疑是提高 Ti 合金耐磨性能的有效途径,并且能保持其低比重、高比强度等优势^[4]。对此,国内外的科研工作者做了大量研究,采用多种手段如化学热处理^[5]、等离子喷涂^[6]、激光熔覆^[7-8]、扩散渗^[9-10]、离子注入^[11-12]、微弧氧化^[13]、热烧蚀^[14]以及一些复合表面处理技术^[15]等制备了种类繁多的耐磨涂层,并取得了良好进展。德国的 Kaestner 等^[5]采用表面化学热处理方法,通过在 Ar-BCl 气氛中加热至 700~900 ℃,用直流脉冲等离子在纯 Ti 和 TC4 合金表面渗硼,所制备的 TiB₂ 和 TiB 涂层硬度明显高于基体合金。印度的 Perumal 等^[6]采用等离子喷涂的方法在 TC4 合金表面制备了 Al₂O₃-40%8YSZ 复合陶瓷涂层,划痕和摩擦磨损实验结果表明,所制备的涂层与基体结合较好,具有优良的耐磨性能。国内的李嘉宁等^[7]和吴东江等^[8]采用激光熔覆的方法在 TC4 合金表面分别制备了 Ti₃Al/TiAl+TiC 和 Al₂O₃-13%TiO₂ 陶瓷涂层,李嘉宁等发现由于硬质相的强化, Ti₃Al/TiAl+TiC 涂覆层的耐磨性较 TC4 合金基体高约 2 倍;吴东江等在一定程度上解决了涂层/基体间的结合问题。李涌泉等^[9-10]采用扩散渗方法在 Ti 合金表面制备了 Si-Y 和 Si-Al-Y 共渗涂层,发现扩散渗方法所制的涂层组织致密且与基体合金之间具有冶金结合界面,在常温 and 高温下均具有较优良的耐磨性能。林乃民等^[14]采用热烧蚀的方法在 TC4 合金表面制备了由大量金红石型和少量锐钛矿型 TiO₂ 构成的防护涂层,具有优良的耐磨性能。遗憾的是,由于制备技术或涂层自身性能的局限性,目前发展的耐磨涂层普遍存在抗冲击性能较差(如陶瓷涂层和热烧蚀涂层)、降低基体合

金的力学性能(如化学热处理和扩散渗方法制备的涂层)、高温下退化迅速(如离子注入法制备的涂层)等缺点。

在合金表面制备 Ni-SiC 复合涂层是提高其耐磨性能常用的手段,该涂层体系充分利用 Ni 和 SiC 的优势性能,具有高硬度,良好的耐蚀性、自润滑性和耐磨性等优点^[16-17],并且采用电镀或化学镀的方法就能方便地在合金表面制备出厚度均匀、组织可控的 Ni-SiC 复合涂层,同时涂层的制备过程对基体合金综合性能的影响很小^[18]。因此, Ni-SiC 复合镀层适合用于 TC4 合金的表面防护。但由于 Ti 合金的活性高,表面暴露在空气中很快会被氧化,使得所制备的镀层与基体合金之间的结合强度较低,并且单纯的 Ni-SiC 镀层在循环载荷下还容易出现开裂甚至剥落^[19]。已有的研究表明,在合金或涂层中添加微量的 Y、Ce 等活性元素或其氧化物,能够有效改善合金/涂层的组织结构和综合性能,并且该效应具有普遍性^[20-22]。文中采用复合电镀工艺在 TC4 合金表面制备了 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层,研究了该镀层在常温 and 高温(600 ℃)下的摩擦磨损行为;同时通过对镀层的磨损形貌和成分进行分析,揭示了其摩擦磨损机制,为进一步提高 TC4 合金在工程中的应用提供支持。

1 材料与方法

1.1 镀层的制备

基材为 TC4 合金,名义成分为: Ti-6Al-4V。试样为 10 mm×10 mm×5 mm 的片状,采用 80~2000 号 SiC 水砂纸将试样各表面逐级打磨至光滑后酒精超声波清洗。

电镀前将抛光的试样进行预处理,步骤为:除油→碱洗→酸洗→除光。复合电镀时将预制备镀层试样作为阴极,100 mm×50 mm×5 mm 的纯镍板作为阳极,TC4 合金试样为阴极。课题组前期研究了复合镀工艺参数对 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层组织结构的影响,发现以下工艺参数制备的复合镀层具有更加致密的镀层组织和生长速率:① 镀液的成分: NiSO₄·6H₂O 为 500 g/L, NiCl₂·6H₂O 为 50 g/L, H₃BO₃ 为 40 g/L, 糖精为 1.5 g/L, SiC 粉为 30 g/L, 粒度为 5~10 μm, 74 μm (200 目) 的 Y₂O₃ 粉末 10 g/L, 在电镀前采用球磨

机进行 4 h 球磨; ② 其它工艺参数: 镀液的 pH 值约为 4, 阴极电流密度为 $2\sim 2.5\text{ A/dm}^2$, 镀液温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 电镀时间为 30 min, 搅拌速度为: 前 15 min 为 $60\sim 100\text{ r/min}$, 后 15 min 为 $300\sim 350\text{ r/min}$ 。

1.2 摩擦磨损试验

采用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机对 Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层试样进行常温 and 高温摩擦磨损试验。鉴于球-平面的接触方式具有接触状态良好以及损伤形式容易分析等一系列优点, 试验均采用球-盘式干摩擦方式进行。摩擦磨损温度为常温和 $600\text{ }^\circ\text{C}$, 摩擦配副为 GCr15 球 (直径 4.76 mm); 其余摩擦磨损条件为: 磨损载荷 500 g, 回转半径 4 mm, 转速 224 r/min, 磨损时间 60 min。

1.3 分析方法

采用精度为 0.01 mg 的电子分析天平称取试样和对磨球在磨损前后的质量, 为减小测试误差, 每组数据均进行 5 次测量后取平均值。采用 HV-1000 型显微硬度仪测量镀层沿截面的硬度分布, 加载的载荷为 0.49 N, 保持时间为 20 s。利用飞利浦 X'Pert-Pro 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析镀层的相组成 (Cu 靶, 40 kV); 采用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜 (SEM/EDS) 观察镀层组织及磨痕形貌, 并分析典型磨损产物的成分。

2 结果与讨论

2.1 Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层的组织结构

图 1 给出了 Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层表面和截面的 BSE 形貌、表面 XRD 谱和镀层中典型相的 EDS 成分图谱。

可以看出, 所制备的复合镀层组织致密且与基体合金结合紧密, 在镀层内及镀层/基体合金界面区域无可见裂纹或微裂纹。整个镀层由灰白色的基体相 (点 1 所示) 和弥散分布其中的黑色的颗粒相 (点 2 所示) 组成。

对上述典型相的 EDS 分析结果表明, 灰白色基体相的成分 (原子数分数, %) 为 91.62Ni-5.56C-2.82Si, 黑色的颗粒相的成分 (原子数分数, %) 为 48.38C-49.65Si-1.97Ni, 结合图 1(c) 中的镀层表面 XRD 图谱可知, 所制备的复合镀层主要由 Ni 和弥散分布其中的 SiC 颗粒组成。这些弥散分布的高硬度 SiC 颗粒相, 可有效提高 Ni 基镀层的硬度及耐磨性能。需要指出的是, 在复合镀过程中添加了一定量的 Y_2O_3 , 虽然在镀层内无可见的 Y_2O_3 颗粒相, 但对镀层表面进行 EDS 成分分析的结果为 72.39Ni-6.07Si-10.39C-1.78Y-9.37O, 结合图 1(c) 中的表面 XRD 谱可知复合镀过程中在镀层内引入了一定量的 Y_2O_3 。

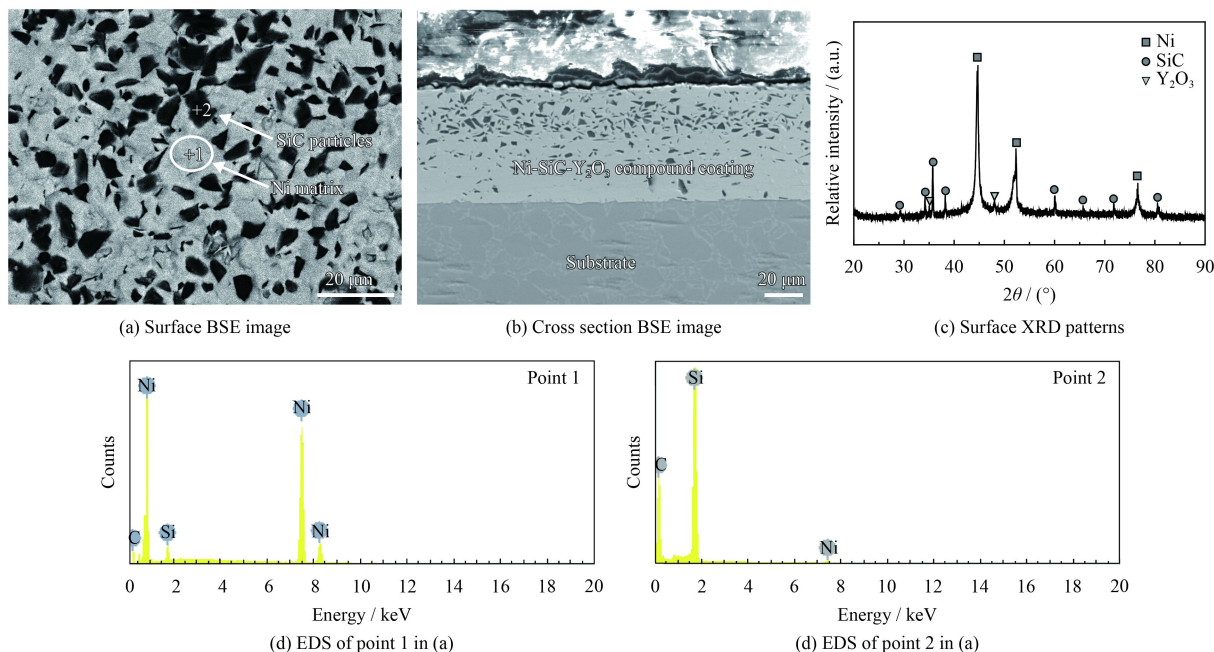


图 1 Ni-SiC- Y_2O_3 复合镀层表面和截面的 BSE 形貌、表面 XRD 图谱和典型相的 EDS 成分

Fig.1 Surface and cross section BSE images, surface XRD patterns and EDS analysis of the typical phases of Ni-SiC- Y_2O_3 compound coating

2.2 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层的显微硬度分布

图 2 为 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层沿截面的显微硬度分布。可以看出, 镀层的硬度明显高于 TC4 合金, 且硬度分布由表向内呈梯度降低趋势, 这主要归因于镀层内 SiC 含量的影响: SiC 颗粒在镀层表面区域含量较高而在靠近基体合金区域含量较低 (对 10 组镀层截面上 SiC 含量 (体积分数) 的统计结果表明, 表层区域 SiC 含量接近 30%, 靠近基体合金区域 SiC 含量低于 10%)。SiC 在镀层内的含量受共沉积过程中搅拌速率的控制, 为了获得较优良的镀层/基体合金结合强度和较高的镀层表面硬度, 在共沉积前期采用的搅拌速率较低而在后期的搅拌速率较高。已有的研究^[23]表明, 材料的摩擦磨损抗力与其表面硬度密切相关, 一般来讲, 材料的表面硬度越高其摩擦磨损抗力也越高。同时, 镀层显微硬度的梯度分布特征还能有效避免摩擦磨损过程中的“eggshell”效应, 也即, 在较软的基体材料表面所制备的高硬度涂层在磨损过程中可能会在切向应力的作用下产生塌陷和失效^[24]。文中制备的复合镀层内部区域相对较低的硬度能够在镀层表面和基体合金之间形成过渡区域, 从而有效避免“eggshell”效应, 增加其摩擦磨损抗力。

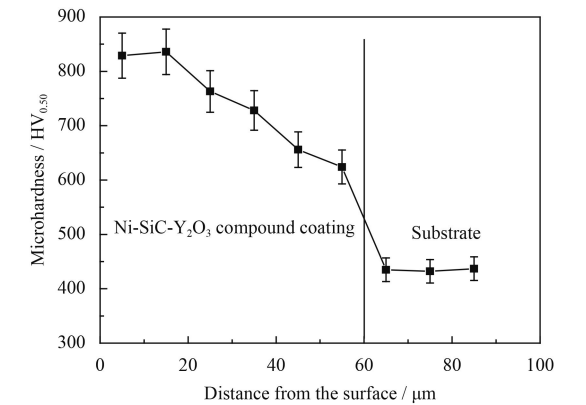


图 2 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层沿截面方向的显微硬度分布

Fig.2 Microhardness distribution of the Ni-SiC-Y₂O₃ compound coating on the depth direction from its near surface to the substrate

2.3 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层的摩擦磨损性能

2.3.1 摩擦因数和磨损失重

图 3 给出了 TC4 合金及其表面 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层与 GCr15 球在常温和 600 ℃ 对摩时的摩擦因数和 60 min 后的磨损失重。由图 3(a) 可以看出, 在常温下基体合金和镀层的摩擦因数均

跳动较大, 且镀层的平均摩擦因数略低于基体合金试样, 表明 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层在常温下具有一定的减磨润滑作用; 在 600 ℃ TC4 合金和镀层的摩擦因数跳动较小, 但长时间磨损后摩擦因数的变化较大, 并且镀层试样的摩擦因数在磨损前期较高, 但对摩约 25 min 后摩擦因数降低至约 0.4, 此后趋于平稳。与常温时的摩擦因数相比, TC4 合金在高温下的平均摩擦因数略有增加, 而镀层试样的平均摩擦因数显著降低。图 3(b) 中的磨损失重柱形图表明, TC4 合金在高温下的磨损失重低于其在常温下的磨损失重, 这与王兰等^[3]的研究结果一致: GCr15 在高温下 (600 ℃) 的硬度会显著降低, 而 TC4 合金的硬度受温度影响相对较小, 导致 TC4 合金在高温下与 GCr15 对摩时的磨损失重反而低于其在常温下的磨损失重; 镀层试样在高温下的磨损失重则明显高于其在常温下的磨损失重, 表明随磨损温度增加复合镀层的耐

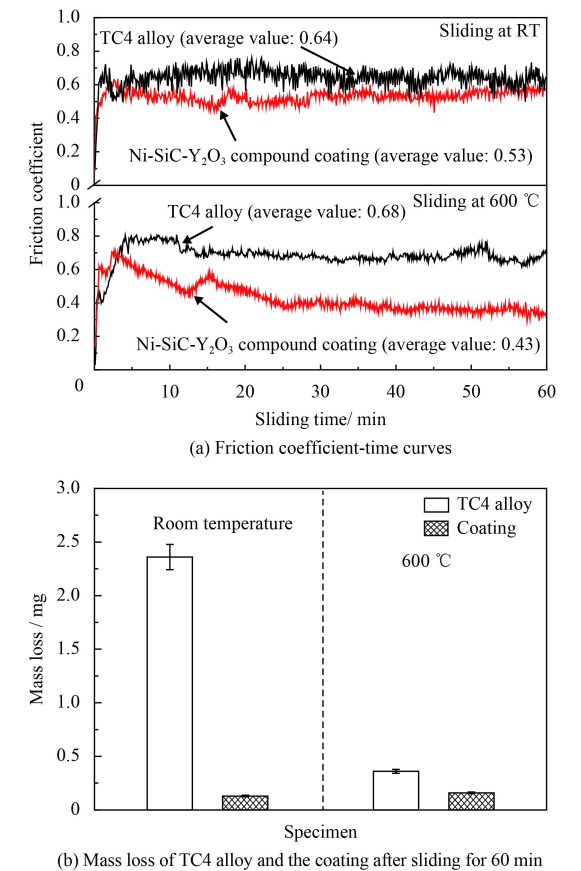


图 3 TC4 合金与 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层在常温和 600 ℃ 与 GCr15 球对摩时的摩擦因数和 60 min 后的磨损失重

Fig.3 Friction coefficient and mass loss of TC4 alloy and Ni-SiC-Y₂O₃ compound coating sliding against GCr15 balls at room temperature and 600 ℃ for 60 min

磨效果变差。但无论在常温还是高温下镀层的磨损失重均显著低于 TC4 基体合金, 说明所制备的 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层无论在常温还是高温下耐磨性能均优于 TC4 合金。

2.3.2 磨损形貌

图 4 为 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层和 GCr15 球在常温时对摩 60 min 后磨损面的 SEM 形貌及典型磨损产物的 EDS 成分。由图 4(a) 中的磨损形貌可以看出, 经 60 min 磨损后镀层的磨痕表面粘附有不连续的磨损产物层, 在磨痕两侧分布有大量的

细小磨屑。对这些磨屑进行的 EDS 成分分析结果 (如点 3 所示) 为 50.72O-42.39Fe-2.42Si-3.41Ni-0.85Cr-0.21Al(原子数分数, %), 说明其主要为 GCr15 的磨损产物。由磨损面的高倍形貌 (图 4(b)) 可见, 镀层在局部区域发生了剥落。图 4(c) 中镀层磨损面的截面形貌显示, 磨损产物层厚约 2~4 μm, 相对较为致密, 对该粘附层进行 EDS 成分分析结果 (如点 4 所示) 为 44.63O-40.82Fe-8.37Ni-3.62Si-1.37Al-0.52Ti-0.67Cr(原子数分数, %), 说明该粘附层主要为 GCr15 的磨损产物。同时, 粘

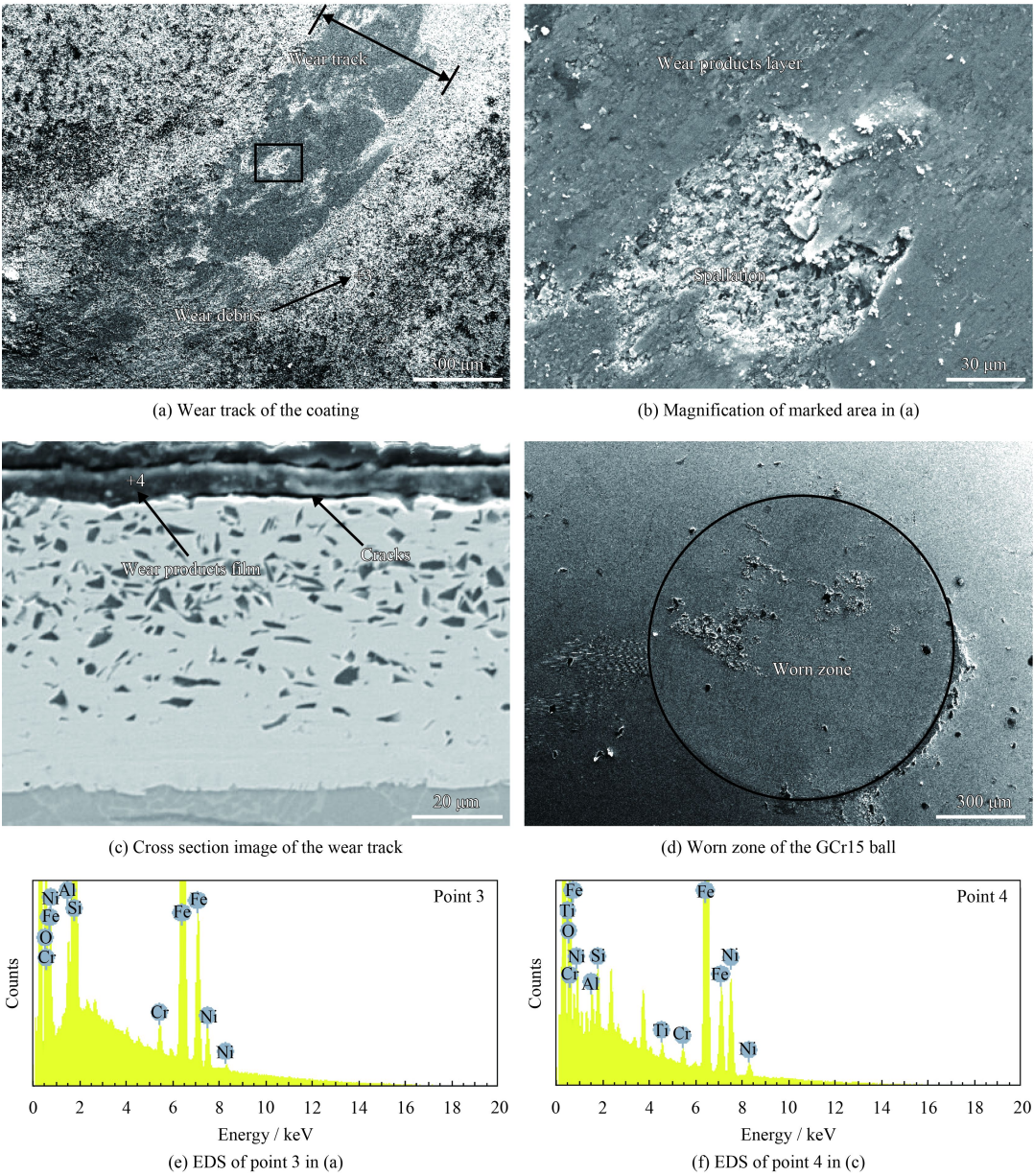


图 4 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层与 GCr15 球在常温下对摩 60 min 后磨损面的 SEM 形貌及典型磨损产物的 EDS 成分
Fig.4 SEM images and EDS analysis of typical phases of the worn zones of the Ni-SiC-Y₂O₃ compound coating and its GCr15 counterpart sliding at room temperature for 60 min

附中较高含量的 O 也说明在磨损过程中发生了一定程度的氧化。GCr15 球在磨损后的球缺呈近似圆形, 表面光滑, 只存在少量的粘附磨屑。

图 5 为 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层和 GCr15 球在 600 ℃ 对摩 60 min 后磨损面的 SEM 形貌及典型磨损产物的 EDS 成分。由图 5(a) 可以看出, 与常温下的磨痕形貌相比, 镀层试样在高温下的磨痕明显变宽, 在磨痕的两侧有大量的细小磨屑。这些磨屑的 EDS 成分分析结果 (如点 5 所示) 为

59.45O-29.39Fe-6.43Si-3.49Ni-0.85Cr-0.39Al (原子数分数, %), 表明其为 GCr15 和镀层的混合磨损产物。由磨损面的高倍 SEM 形貌 (图 5(b)) 可见, 在镀层的磨损面上形成了一层磨损产物层, 其上存在较多的犁沟和磨屑, 由镀层磨损面的截面形貌 (图 5(c)) 可以看出, 该磨损产物层很薄, 但组织致密, 对其进一步进行 EDS 成分分析结果 (如点 6 所示) 为 55.72O-10.33Fe-20.27Si-12.46Ni-0.53Al-0.69Cr (原子数分数, %), 说明其由 GCr15 和镀层

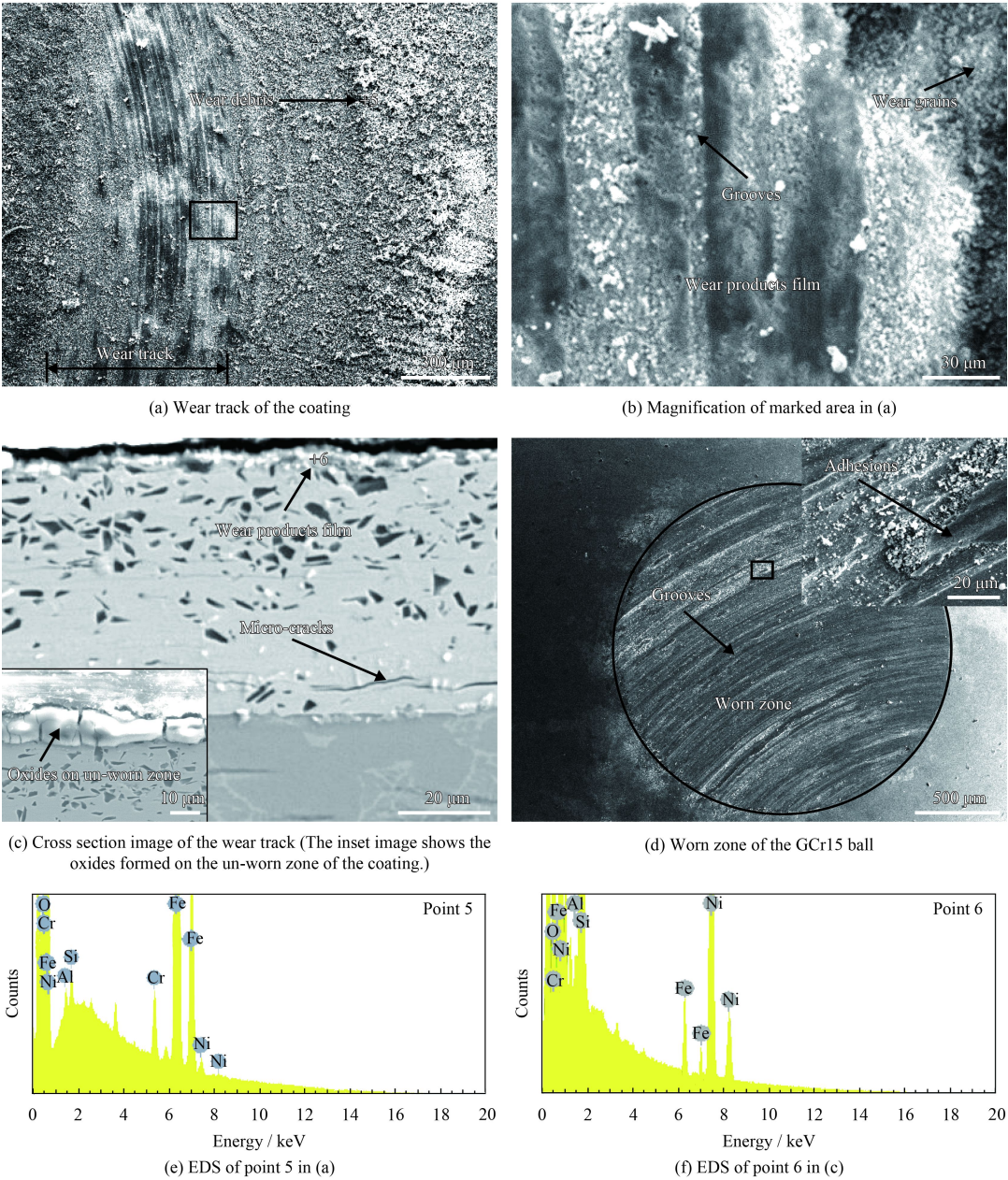


图 5 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层与 GCr15 球在 600 ℃ 对摩 60 min 后磨损面的 SEM 形貌及典型磨损产物的 EDS 成分
 Fig.5 SEM images and EDS analysis of typical phases of the worn zones of the Ni-SiC-Y₂O₃ compound coating and its GCr15 counterpart sliding at 600 °C for 60 min

的磨损产物混合组成,但 Si 的氧化物含量很高。实际上,图 5(c) 中镀层未磨损区域的截面形貌表明,其表面在高温下形成了一层相对较厚的氧化膜(该氧化膜的 EDS 成分分析结果为 66.10O-3.22Si-30.68Ni(原子数分数, %)),但其间分布着许多裂纹。但在磨损区域未见有该氧化膜的存在,说明其在磨损过程中产生了剥落。此外,经 60 min 磨损后,镀层中还出现了较多的微裂纹。GCr15 球在高温磨损后产生的球缺形貌与其在常温下的球缺形貌也存在明显差异,如图 5(d) 所示。可见,其上存在大量的犁沟和磨屑,在局部还可见有少量粘着物,这些粘着物与镀层磨损面上的磨损产物层具有相似的成分,为 GCr15 和镀层的混合磨损产物。

2.3.3 讨论

摩擦磨损试验结果表明,所制备的 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层在常温和高温下的摩擦磨损抗力均优于 TC4 基体合金,这首先归因于镀层特殊的组织结构和硬度分布特征:一方面硬度较高的 SiC 颗粒和 Y₂O₃ 弥散分布于韧性较高的 Ni 基体中,使得镀层兼顾了硬度和韧性优势;另一方面镀层中的 SiC 颗粒主要弥散分布于外部区域,从而使镀层的表面硬度较高,而内部硬度较低,因而镀层兼具优良的摩擦磨损抗力和良好的镀层/基体合金结合力,不易发生开裂和剥落。此外,镀层内添加的微量 Y₂O₃ 也发挥了积极的作用。已有的研究表明,添加微量的稀土元素或其氧化物对合金或涂层的组织结构和综合性能如力学性能和高温抗氧化性能有明显的改善作用,并且该改善作用具有普遍性^[25-26]。与未添加 Y₂O₃ 的 Ni-SiC 镀层相比, Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层的硬度有一定程度的提高并且镀层组织致密,这对提高其摩擦磨损性能有益^[19]。Ahmadi 等^[25]和 Li 等^[26]的研究结果也表明,添加 Y 或其氧化物对铝化物涂层和硅化物涂层的组织结构和摩擦磨损性能均有显著改善作用。需要说明的是,虽然添加活性元素对合金/涂层耐磨性能的改善作用异常显著,但目前的工作还主要集中在活性元素对合金或涂层性能的影响等宏观方面,而对活性元素的作用机制还缺少确定的理解,这也是作者未来需要进一步研究的内容。

在常温下对摩时,得益于镀层较高的表面硬度, GCr15 球难以压入表面,此时镀层的磨损比

较轻微;相反,镀层对 GCr15 的磨损面产生了较为严重的犁削作用。被犁削下来的 GCr15 球的磨损产物在磨损表面被碾压、磨碎而逐渐形成磨屑,在此过程中由于摩擦热的作用还会发生氧化;所产生的大部分磨屑会随磨损的进行而被排出摩擦面,另一部分则会参与摩擦磨损过程,并在法向力的作用下被不断挤压而逐渐形成一层磨损产物层。该磨损产物层避免了摩擦副之间的直接接触,在一定程度上具有减摩润滑的作用。但是, Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层较高的硬度使其表面容易在循环载荷的作用下萌生疲劳裂纹,并随着磨损的进行和裂纹扩展而出现局部镀层剥落,如图 4(b) 和 4(c) 所示。因此,镀层和 GCr15 球在常温下的磨损机制主要为疲劳磨损及轻微的氧化磨损。在高温下磨损时, GCr15 球会发生软化,使得其磨损失重较常温下进一步增加。并且,高温及摩擦热的作用使得镀层和对摩球的磨损面均会发生氧化,由于氧化层的脆性较高而易于出现开裂,因此在摩擦载荷的作用下会不断发生剥落,使得镀层和 GCr15 球的磨损表面始终处于氧化→磨损→再氧化→再磨损的动态过程,此时氧化加剧了摩擦副之间的磨损程度。因此,镀层试样的磨损在高温下更加严重,如图 3(b) 所示。但是,与常温下的磨损类似,磨损产物在法向力的作用下会逐渐在镀层的磨损表面形成一层磨损产物层。Chen 等^[27]的研究认为, SiC 在高温下表面能够形成具有流动性的 SiO₂,这一方面能够有效填充磨损产物层之间的空隙,使其更加致密,另一方面能够在磨损表面产生润滑作用,降低摩擦因数。值得注意的是,在热应力和循环载荷的双重作用下,镀层容易发生疲劳破坏而产生局部或整体剥落,加剧磨损程度。因此, Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层与 GCr15 球在高温下对摩时的磨损机制可以归结为严重的氧化磨损、削层磨损和疲劳磨损。

3 结 论

(1) 所制备的 Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层组织致密,由 Ni 基体和弥散分布其中的 SiC 颗粒组成;镀层的整体硬度明显高于 TC4 基体合金,且由表向内呈梯度降低趋势。

(2) Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层在常温和 600 ℃ 时的摩擦磨损抗力均优于 TC4 基体合金,但随磨损温度升高,镀层的磨损失重呈增加趋势。

(3) Ni-SiC-Y₂O₃ 复合镀层和 GCr15 球在常温下的磨损比较轻微,磨损机制为疲劳磨损和轻微的氧化磨损;在高温下对摩时的磨损机制为严重的氧化磨损、削层磨损和疲劳磨损。

参考文献

- [1] LU K. The future of metals[J]. Science, 2010, 328(16): 319-320.
- [2] 陈玉勇, 苏勇君, 孔凡涛. TiAl 金属间化合物制备技术的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(3): 754-761.
CHEN Y Y, SU Y J, KONG F T. Research progress in preparation of TiAl intermetallic based compound[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(3): 754-761 (in Chinese).
- [3] 王兰, 张秋阳, 李新星, 等. 温度和载荷对 TC4 合金磨损性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(2): 480-484.
WANG L, ZHANG Q Y, LI X X, et al. Effect of temperature and load on wear performance of TC4 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(2): 480-484 (in Chinese).
- [4] FU Y Q, LOH N L, BATCHELOR A W, et al. Improvement in fretting wear and fatigue resistance of Ti-6Al-4V by application of several surface treatments and coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 106(2-3): 193-197.
- [5] KAESTNER P, OLFE J, RIE K T. Plasma-assisted boriding of pure titanium and TiAl6V4[J]. Surface & Coating Technology, 2001, 142-144(3): 248-252.
- [6] PERUMAL G, GEETHA M, ASOKAMANI R, et al. Wear studies on plasma sprayed Al₂O₃-40wt.% 8YSZ composite ceramic coating on Ti-6Al-4V alloy used for biomedical applications[J]. Wear, 2014, 311(1-2): 101-113.
- [7] LI J N, CHEN C Z, SQUARTINI T, et al. A study on wear resistance and microcrack of the Ti3Al/TiAl+TiC ceramic layer deposited by laser cladding on Ti-6Al-4V alloy[J]. Applied Surface Science, 2010, 257(5): 1550-1555.
- [8] 吴东江, 陈云啸, 卢卫锋, 等. 钛合金表面直接激光熔覆 Al₂O₃-13%TiO₂ 层互熔稀释特性[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(12): 2105-2108.
WU D J, CHEN Y X, LU W F, et al. Dilution characters of Al₂O₃-13wt%TiO₂ coating by direct laser cladding on titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(12): 2105-2108 (in Chinese).
- [9] 冷崇燕, 张旭, 周荣, 等. Ta 离子注入 Ti6Al4V 合金耐磨性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(3): 556-560.
LENG C Y, ZHANG X, ZHOU R, et al. Tribological performances of Ti6Al4V alloy modified by Ta ion implantation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(3): 556-560 (in Chinese).
- [10] 李涌泉, 李轩, 耿桂宏, 等. TiAlNb9 合金表面 Si-Y 共渗层的组织及摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(6): 736-740.
LI Y Q, LI X, GENG G H, et al. Microstructure and wear resistance of Si-Y Co-deposition coating on TiAlNb9 alloy[J]. Tribology, 2016, 36(6): 736-740 (in Chinese).
- [11] 李涌泉, 谢发勤, 吴向清, 等. TiAl 合金表面 Si-Al-Y 共渗层的组织与摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(11): 2257-2262.
LI Y Q, XIE F Q, WU X Q, et al. Microstructures and wear resistance of Si-Al-Y codeposition coatings on TiAl alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(11): 2257-2262 (in Chinese).
- [12] 陈道明, 孙明仁, 白贵元, 等. 氮/氟离子注入 Ti6Al4V 合金耐磨性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(11): 1279-1285.
CHEN D M, SUN M R, BAI G Y, et al. Tribological properties of Ti6Al4V alloy co-implanted with N and F ions[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(11): 1279-1285 (in Chinese).
- [13] 蒙晓涓, 李卫京, 崔世海, 等. Ti6Al4V 合金微弧氧化陶瓷膜的组织结构研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 39-42.
MENG X J, LI W J, CUI S H, et al. Microstructure of ceramic coating on Ti6Al4V alloy by microarc oxidation technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(2): 39-42 (in Chinese).
- [14] LIN N M, LIU Q, ZOU J J, et al. Surface damage mitigation of Ti6Al4V alloy via thermal oxidation for oil and gas exploitation application: characterization of the microstructure and evaluation of the surface performance[J]. RSC Advances, 2017, 7(22): 13517-13535.
- [15] YONEKURA D, FUJITA J, MIKI K. Fatigue and wear properties of Ti-6Al-4V alloy with Cr/CrN multilayer coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 275: 232-238.
- [16] VAEZI M R, SADMEZHAAD S K, NIKZAD L, et al. Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 315(1-3): 176-182.
- [17] FAZEL M, GARSIVAZJAZI M R, BAHRAMZADEH, et al. Effect of solid lubricant particles on room and elevated temperature tribological properties of Ni-SiC composite coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 254(10): 252-259.
- [18] GYAWALI G, HAMAL K, JOSHI B, et al. Microstructural and electrochemical analysis of Ni-SiC composite coatings prepared in presence of additives[J]. Materials Letters, 2014, 126(1): 228-231.

[19] GUO B H, WANG Z Y, LI H L. Study on the friction and wear behavior of a TA15 alloy and its Ni-SiC composite coating[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5): 1763-1772.

[20] MOON D P. Role of reactive elements in alloy protection[J]. Materials Science and Technology, 1989, 5(8): 754-764.

[21] THANNEERU R, PATIL S, DESHPANDE S, et al. Effect of trivalent rare earth dopants in nanocrystalline ceria coatings for high-temperature oxidation resistance[J]. Acta Materialia, 2007, 55(10): 3457-3466.

[22] LI X, GUO X P, QIAO Y Q. Friction and wear behavior of an Nb-Ti-Si-Cr based ultrahigh temperature alloy and its Zr-Y jointly modified silicide coatings[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1892-1901.

[23] PAWLAK W, KUBLAK K J, WENDLER B G, et al. Wear resistant multilayer nanocomposite WC(1-x)JC coating on Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Tribology International, 2015, 82(B): 400-406.

[24] TANG B, WU P Q, LI X Y, et al. Tribological behavior of plasma Mo-N surface modified Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 179(2-3): 333-339.

[25] AHMADI H, LI D Y. Beneficial effects of yttrium on mechanical properties and high-temperature wear behavior of surface aluminized 1045 steel[J]. Wear, 2003, 255(7): 933-942.

[26] LI Y Q, XIE F Q, WU X Q. Effects of Y₂O₃ on the microstructures and wear resistance of Si-Al-Y co-deposition coatings prepared on TiAl alloy by pack cementation technique[J]. Applied Surface Science, 2013, 278(2): 30-36.

[27] CHEN Z S, LI H J, FU Q G, et al. Tribological behavior of SiC coating on C/C composites against SiC and WC under unlubricated sliding[J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1765-1773.

(责任编辑: 常青)



• 本刊讯 •

第十二届全国表面工程大会将在昆明召开

2018 年 11 月 9—12 日, 由中国机械工程学会表面工程分会主办, 昆明理工大学承办的第十二届全国表面工程大会暨第十届全国青年表面工程论坛将在美丽的西南名城昆明召开。每两年一届的全国表面工程会议已成为我国表面工程领域影响力较高的品牌学术会议。

会议以“迈向制造强国中的表面工程”为主题, 注重交流我国在由制造大国向制造强国发展征程中, 作为基础支撑技术的表面工程的最新发展及其发挥的重要作用, 同时探索学科未来的发展方向。会议将邀请表面工程相关领域的知名院士和专家做大会主旨报告, 并将同时设有 9 个分论坛, 论坛名称和召集人分别是: 第十届全国青年表面工程论坛(杨冠军)、薄膜科技论坛(李红轩)、热喷涂技术论坛(李长久)、涂料涂装表面工程技术论坛(刘亚莉)、摩擦学表面工程论坛(朱旻昊)、生物材料表面工程论坛(刘宣勇)、表面工程装备技术论坛(藺增)、材料表层强化和改性技术论坛(高玉魁)、表面工程基础和应用技术论坛(范云鹰)。

会议征文形式为详细摘要, 篇幅控制在 1 页 A4 稿纸以内, 正文用小四号仿宋体, 1.2 倍行距, 会议将汇集摘要并制作提供电子版摘要集(U 盘), 会议将向《中国表面工程》期刊推荐优秀论文, 有意向者请提供全文。投稿邮箱: 2018bmgc@sina.com; 截止日期: 2018 年 8 月 30 日。

(本刊编辑部 供稿)