http://pmse.scu.edu.cn

润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层的研究进展

陈明锴[1]，陈 磊[2]，马彦军[2]，张定军[3]，周惠娣[2]，陈建敏[2]

(1.东方电气集团东方汽轮机有限公司 清洁高效透平动力装备全国重点实验室，四川 德阳 618000；2.中国科学院兰州化学物理研究所 中国科学院材料磨损与防护重点实验室，甘肃 兰州 730000；3.兰州理工大学 材料科学与工程学院，甘肃 兰州 730000)

摘 要：随着现代化装备技术的快速发展，高端机械装备服役工况变得愈加复杂苛刻，磨损与腐蚀耦合损伤加速了高端机械装备运动部件的损伤失效，导致装备服役寿命大幅缩减，带来了严重的安全问题。润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层克服了润滑耐磨涂层和防腐蚀涂层的单一功能局限，为解决运动部件的磨损和腐蚀问题提供了有效方案。文中首先探讨了关键运动部件面临复杂服役工况的严峻挑战、材料磨损与腐蚀耦合的损伤机制；然后分别由黏结剂、填料和润滑剂3个方面介绍了目前润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层的研究进展，对涂层的组成结构与力学性能、摩擦学性能、耐腐蚀性能间的构效关系进行了分析，并对不同涂层的局限性进行了概述；之后详细总结了润滑耐磨耐蚀功能一体化涂层的应用现状；最后对润滑耐磨耐蚀功能一体化涂层的发展方向进行展望。

关键词：磨损-腐蚀；减摩耐磨；耐蚀；功能一体化；有机黏结涂层

中图分类号：TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)04-0182-09

随着现代装备技术的迅速发展，高端机械装备的工作环境变得越来越复杂苛刻[1]，除表面磨损外，还要应对腐蚀的耦合损伤。为了解决这一问题，润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层作为一种新的表面处理技术应运而生。这种涂层涂装方便、高效且成本低，能够在低维尺度内具备润滑、耐磨损和耐腐蚀的特性，可以弥补单一润滑涂层和防腐功能涂层的不足。它能够对摩擦磨损和腐蚀介质共存环境下的材料进行协同防护，成为解决机械装备能动部件磨损与腐蚀防护难题的有效途径，因此受到了摩擦学和防腐领域科技工作者的广泛关注和研究。

1 关键运动部件面临严峻挑战

摩擦和磨损普遍存在于相对运动的机械接触面，我国每年因摩擦磨损造成高达上千亿的损失[2]，腐蚀也是机械失效的主要原因。海上发电设备、钻井平台、汽轮机、舰艇、舰载飞机等，其相关能动部件不仅要长期遭受高湿热、高盐度及干湿交替等腐蚀环境，而且还受到高载、高速条件下的磨损损伤，腐蚀的存在加速了材料表面的磨损进程，因此涉及摩擦磨损与腐蚀交互作用的关键运动部件的失效难题亟待解决[3]。鉴于相关装备失效甚至报废的情况，仅用于每年修复此类损伤及损坏设备的花费就高达百亿。因此，研发并合理使用性能优异的防护材料对于实现机械设备在摩擦磨损腐蚀耦合工况下的可靠性运行具有重要的现实意义。

然而，现有润滑技术及静态防腐技术远远不能满足高端装备及关键运动部件在复杂环境下长寿命服役的要求。因此，研发展兼具有润滑与防腐功能的涂层材料与表面技术，需先解决复杂服役条件下

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0063
收稿日期：2023-02-14
基金项目：国家重点研发计划(2022YFB3809000)；国家自然科学基金资助项目(52105228，51663013)；
国防基础科研计划([JCKY2021130B038])
通讯联系人：马彦军，主要从事磨损与表面工程研究，E-mail: mayanjun@licp.cas.cn；
张定军，主要从事涂料以及功能高分子材料研究，E-mail: zhangdingjunlut@163.com

的开放运动系统/部件的磨损与腐蚀耦合损伤问题。

2　磨损-腐蚀耦合损伤机制

相对于静态腐蚀或单纯的磨损,“磨损-腐蚀”是力学场与化学/电化学耦合作用的结果[4],其损伤速率比单独作用时高2～3个数量级。摩擦过程中能量耗散根源是变形功及摩擦热,涂层在摩擦过程中受到力、热的作用发生变形、断裂等现象,内部结构易产生缺陷。同时由于摩擦生热而导致材料局部自由体积增加,结构致密性下降。伴随着缺陷增多、致密性下降,腐蚀因子(H_2O,O_2及Cl^-等)更易渗透到材料内部结构中,不仅导致内聚强度降低,磨损加剧,同时还会促进涂层内部的电化学反应进而引发腐蚀加剧。此外,相互接触界面在摩擦过程中,由于相对运动而造成材料的直接磨耗,破坏了材料表面原有的保护膜,导致新鲜的材料表面不断接触腐蚀介质,形成腐蚀与磨损相互促进的交互作用。反之,在腐蚀环境下,腐蚀介质与机械摩擦副发生腐蚀化学反应,在机械摩擦副表面生成腐蚀产物,腐蚀产物层结构较为疏松,且与本体间的结合力较差,因此更易通过摩擦作用发生磨损耗除,重新暴露出新生表面产生恶性循环(如Fig.1)。由此可见,机械装备在摩擦磨损腐蚀耦合工况下的损伤机制相对复杂,是由摩擦、磨损和腐蚀及其耦合交互作用共同造成。

3　功能一体化有机黏结涂层研究进展

润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层主要由黏结剂、填料、润滑剂、溶剂和添加剂组成[5,6],它们可以由各种化学物质和材料的组合组成,其中,黏结剂、填料和润滑剂是目前的研究热点。

3.1　聚合物黏结剂

聚合物黏结剂是涂层中最重要的成分,涂层的外观和防腐性能取决于黏结剂的化学成分和固化机理。此外,它还确保了涂层与金属的黏结性。因此在设计涂层时,选择合理的黏结剂尤为重要[7]。

环氧树脂因其高化学稳定性、耐热、耐水和优良的黏结性,已被用于许多高性能有机黏结涂层中,Rahsepar等[8]将MBT负载到中孔纳米SiO_2上并引入环氧涂层,MBT能够钝化金属,增强了涂层的耐腐蚀性能的,同时SiO_2赋予涂层优异的耐磨损性能;Sun等[9]将石墨烯纳米片分散入环氧涂层,制备了具有强耐腐蚀性的石墨烯/环氧涂层。聚氨酯和聚酰亚胺因其优异的耐磨性、耐腐蚀性和较好的黏结性等广泛应用于各种领域[10],据报道,复合SiO_2、碳纳米管、石墨烯等纳米材料也被证实可以显著提高聚氨酯和聚酰亚胺的摩擦学性能和防腐性能[11]。

3.2　填料

黏结剂保障了涂层的整体性能,但在考虑防护机制与长效性时,填料是至关重要的。在过去的20年里,防腐科学和润滑技术领域已经发展了各种填料和润滑剂,这些材料不仅可以提高屏障性能,还可以被设计为提供钝化、电流保护、pH缓冲或有机黏结剂基质的自愈合[12,13],或减少摩擦磨损延长使用寿命等。

3.2.1　*屏障填料*:由于聚合物黏结剂对水和氧固有的渗透性[14],因此通常在涂层中引入填料提供屏障

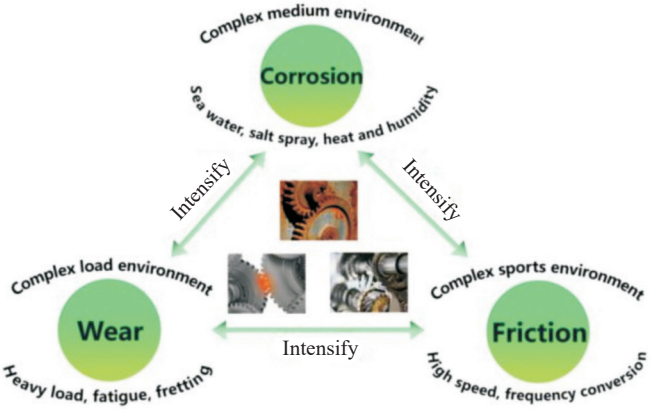


Fig. 1　Coupling damage mechanism of wear and corrosion

保护或增强“迷宫效应”来抑制腐蚀。填料的分散状态、尺寸、形状、化学结构和质量分数对涂层的防腐性能有显著的影响。Fig.2描述了不同尺寸和形状的碳基纳米材料对涂层屏障性能的影响及扩展腐蚀介质渗透路径的作用[15,16]。

此外，纳米材料优异的机械性致使涂层具备一定耐磨损性能，特别是二维纳米材料还具有良好的润滑特性。得益于石墨烯的快速发展，大量二维纳米材料如氧化石墨烯（GO）、六方氮化硼纳米片（h-BN）等备受关注。GO保留了石墨烯独特的结构和力学性能，且在片层上引入含氧官能团，使GO有更高的反应活性以及可功能化处理的能力[17]，极大地拓展了应用范围。Tab.1总结了部分二维纳米材料制备涂层的研究。同样地，有“白色石墨烯”之称的氮化硼，具有优异的润滑性、力学强度和化学稳定性。Wu等[28]采用GO纳米片对h-BN进行非共价键改性，并引入环氧涂层，GO和h-BN对腐蚀性介质还存在协同阻隔效应，这赋予涂层优异的耐腐蚀性能。

纳米材料能够显著提升涂层的润滑、耐磨和耐腐蚀性能。为构筑润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏

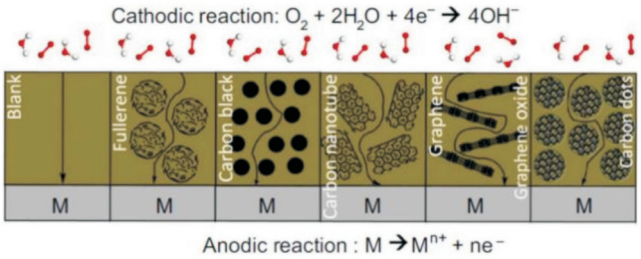


Fig. 2 Effects of different sizes and shapes of carbon-based nanomaterials on the performance of polymer-coated barriers[16]

Tab. 1 Review of organic bonded coatings on graphene, GO and reduced GO for corrosion protection of metal substrates

G/GO/RGO	Polymer	Coating thickness /μm	Optimum mass fraction/%	Base material	Corrosion resistance and other functions	Literature
G	EP	28		AA 2024-T3	Corrosion resistance, increased contact Angle	18
GO	EP	20 ± 5	0.1	Carbon steel	Maze effect, strong barrier	19
GO	PU	60	0.1	Pig iron	Corrosion resistance, strong adhesion	20
GO	PBO	50	3	Carbon steel	Strong barrier property	21
GO-PPDA	EP		0.1	Mild steel	Strong hydrophobicity, barrier	22
GO-PANI	EP	50		Steel	Strong barrier and corrosion resistance	23
GO-POSS	WAA	3		Galvanized steel	Enhanced corrosion resistance	24
GO-GPTMS	PU	70		Steel	Corrosion resistance, high mechanical properties	25
RGO	EP	60	0.25	Steel	Anticorrosive properties, antibacterial	26
RGO	PU	70	0.15	Mild steel	Corrosion resistance	27

G: graphene; GO: graphene oxide; RGO: reduced graphene oxide; PPDA: p- phenylenediamine; PANI: polyaniline; POSS: polyhedral oligomeric silsesquioxane; GPTMS: trimethoxysilane; EP: epoxy; PU: polyurethane; PBO: polybenzoxazine; WAA: waterborne acrylic acid

结涂层提供了诸多思路，但纳米材料的高昂成本也限制了其在工业等领域的应用。

3.2.2　牺牲填料：牺牲填料能够与被防护金属形成腐蚀微电池。腐蚀发生时，牺牲填料先被腐蚀，基体金属作为阴极受到保护，牺牲填料的腐蚀产物再填充入涂层的缺陷中，进一步抑制局部腐蚀的发生。常见的牺牲填料有镁、锌、铝和铁4类，铝基牺牲填料由于低密度、大电容量、原料易得等优势，被广泛应用于海洋环境阴极保护系统。Li等[29]制备了聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯/铝复合涂层，片状铝优异的力学性能和聚四氟乙烯良好的润滑性能赋予了涂层出色的摩擦学性能；聚四氟乙烯的疏水性与片状铝粉牺牲阳极保护和阻隔性的协同作用显著提高了涂层的耐腐蚀性（如Fig.3）。

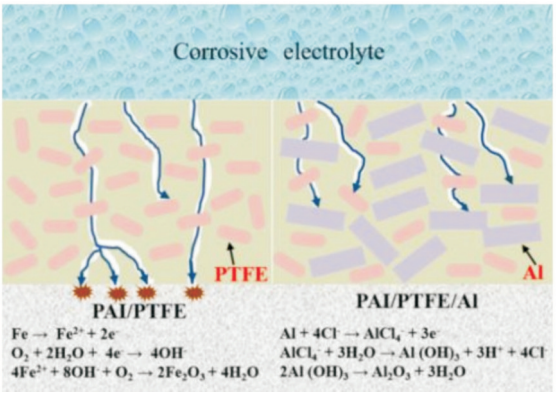


Fig. 3　Schematic diagram of anti-corrosion mechanism of PAI/PTFE/Al bond coating[29]

3.2.3　缓蚀剂：缓释剂能够在金属表面形成一层钝化膜或吸附膜，减缓金属的腐蚀速率。缓蚀剂分为无机和有机缓蚀剂，普遍认为无机缓蚀剂可以在金属表面形成钝化膜。美国于20世纪80年代开发的航空紧固件自润滑铝涂层Hi-Kote1采用了$SrCrO_4$和$ZnCrO_4$，表现出优异的腐蚀防护性能。然而，Cr^{6+}是致癌物质，且对土壤和地下水有很大危害，目前有关部门已逐步限制该类材料的使用。有机缓蚀剂多是含O，S，N，P官能团的复杂结构分子，通过物理或化学吸附在金属表面形成覆盖保护层，隔绝腐蚀因子侵入。Bagherzadeh等[30]制备了聚苯胺环氧涂层，结果表明，纳米聚苯胺的防腐性能优于微米聚苯胺，如Fig.4所示当聚苯胺为纳米尺度时，涂层与金属界面产生了均匀的氧化层，降低了腐蚀速率。

将多种缓蚀剂复配，依靠组分间的协同作用能够提升涂层的服役寿命。Tavandashti等[31]采用化学聚合法合成了掺杂硝酸铈的氧化铝/聚苯胺杂化纳米颗粒，并掺入环氧涂层中，其腐蚀电流密度与纯环氧涂层相比降低了2个数量级。而在解决缓蚀剂有关的环境问题中，绿色缓蚀剂已初现锋芒。Zhou等[32]将植酸分子（PA）成功修饰在氧化石墨烯表面，将其分散入水性环氧涂层中，盐雾试验证实PA-GO/WEP涂层具有优异的防腐性能。此外，“自愈合涂层”因能延长涂层的服役寿命而被广泛关注[33,34]。Yu等[35]在氧化石墨烯/层状双氢氧化物（GO/LDHs）纳米容器中装载MBT并引入环氧涂层，研究发现，腐蚀发生时MBT阴离子从涂层立即转移到腐蚀区域，通过吸附形成保护膜达到自愈合目的。

然而，有机缓蚀剂制备、天然缓蚀剂提取及自愈合涂层所需的纳米容器带来的昂贵成本及复杂工艺成为阻止其广泛应用的障碍。

3.3　润滑剂

润滑剂通常是包含N，O，P，S等其他活性元素的化合物[36]。这类化合物在摩擦表面通过物理或化学吸附成膜，并与摩擦界面发生摩擦化学反应形成

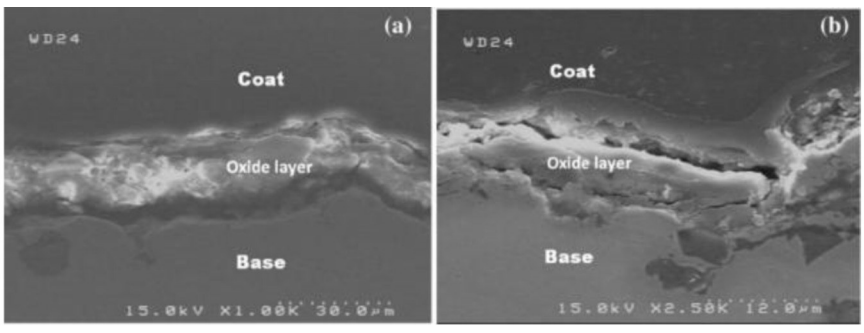


Fig. 4　Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) of polyaniline epoxy coating ((a): nanoscale; (b): micron scale)[30]

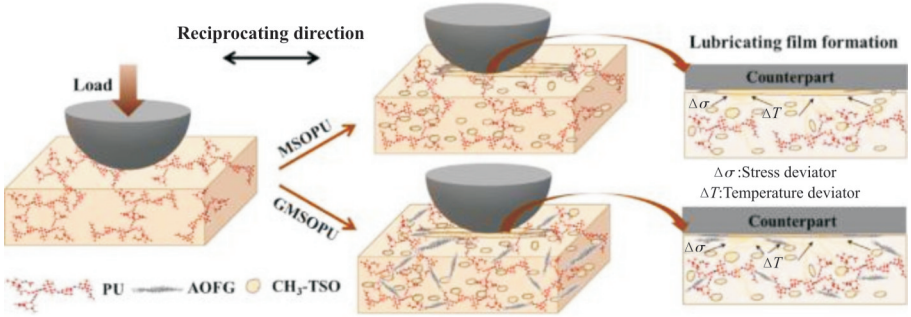


Fig. 5 Lubrication mechanism diagram of MSOPU and GMSOPU bonding coatings[38]

稳定的边界润滑膜来降低摩擦系数[37]。Li等[38]将硅油(TSOs)引入聚氨酯(PU)制备了具有极低摩擦系数和耐腐蚀的涂层(如Fig.5),液相TSO与PU涂层的配合显著发挥固液复合润滑的作用,CH_3-TSO的强疏水性在一定程度上提高了涂层的耐腐蚀性。此外,还有通过微胶囊、中空管、引入离子液体等方式来将减摩抗磨剂引入有机黏结涂层[39]。Wang等[40]通过对Celatom填料进行表面修饰,成功合成了一种新型多功能载油体,将油脂注入该填料,并引入环氧涂层中,该涂层具有优异耐腐蚀性的同时,其摩擦系数相比纯环氧涂层降低80%,耐磨性大幅提升。

然而,上述润滑剂在黏结剂中的分散性始终是一个难点。目前通常使用固体润滑剂制备涂层,如二硫化钼(MoS_2)、石墨和聚四氟乙烯(PTFE)。MoS_2是一种重要的固体润滑剂,因其层状结构且易发生剪切而具有较好的润滑性能。陈建敏研究团队在MoS_2基有机黏结固体润滑涂层的制备与应用方面开展了系统且深入的研究,主要是以MoS_2作为固体润滑剂,环氧树脂、聚酰胺酰亚胺以及酚醛环氧树脂等作为黏结剂,制备有机黏结固体润滑涂层[41]。此类MoS_2基固体润滑涂层已广泛应用于航空航天等高精尖技术领域[42]。然而,当MoS_2和石墨应用到盐雾腐蚀环境中时,MoS_2和石墨极易吸收水汽或被腐蚀介质氧化,加剧摩擦,引发涂层失效[43]。而聚四氟乙烯(PTFE)较高的氟含量赋予其强化学稳定性和较低的表面能,使其具有优异的疏水性和阻隔性,既可以作为润滑剂又可以作为防腐填料。李桂花等[44]制备了聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯(PAI/PTFE)多功能黏结涂层。研究表明,涂层除具有较好的摩擦学性能外,还表现出较强的耐腐蚀性能,这都归因于PTFE优异的润滑性能、强疏水性以及对腐蚀介质的阻隔(见Fig.6)。

值得注意的是,润滑剂的分子结构与界面作用机制与金属防腐剂有许多相通之处,如果对润滑剂或防腐剂的分子结构进行适当的修饰或合理设计,将两者的优势整合,获得兼具减摩抗磨防腐性能的分子,这对研发润滑耐磨耐腐蚀功能一体化有机黏结涂层具有非同小可的影响。

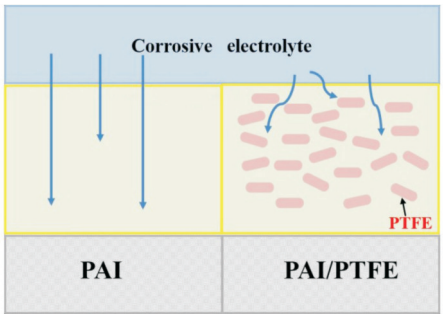


Fig. 6 Mechanism diagram of anticorrosion of PAI/PTFE bond coating[44]

4 功能一体化有机黏结涂层应用现状

目前在传统润滑涂层和静态防腐涂层的基础上发展了部分润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层,并已应用于多个领域。

(1)航空航天。针对航空发动机动力涡轮轴、低压轴、紧固件等,一些欧美国家率先于20世纪50年代开发了性能优异的涂层,其中最具代表性的有美国Praxair公司的SermeTel®Process 5380 DPTM、Hi-shear公司的Hi-Kote、Teleflex公司的Sermetel以及英国Indestructible Paints公司IPcote系列涂料体系。相比之下,国内一些科技公司虽然也发展了相关材料,但与国外相较仍存在差距[45]。

(2)海工装备。随着海洋强国战略的提出,相关高端海工装备的防护研究随即呼之欲出,多种用于

海上风力发电设备、钻井平台等相关机械设备抗冲蚀、耐腐蚀和耐磨损的防护涂层被投入使用[46]。

(3)透平工业。透平叶片等不仅要长期受到空蚀损伤,而且会遭受腐蚀,如今发展了以聚脲或环氧为黏结剂的涂层,能够有效为叶片、泵体及管道提供优异的抗磨损、冲击和腐蚀保护性能,提升设备的效率和安全性[47]。

5　结语与展望

本文重点关注了涂层在“磨损-腐蚀”耦合损伤环境下的失效机制,综述了润滑耐磨耐蚀功能一体化有机黏结涂层的研究进展,并总结了该类涂层的应用。该涂层不仅丰富了传统表面防护技术,还能促使研究者进一步完善相关摩擦学、电化学和腐蚀学的基础理论。然而,该研究仍任重而道远,还需发展以下几个方面。

(1)“磨损-腐蚀”耦合损伤机制。目前对于耦合损伤机制的认识尚不明确,需要研究者积累数据,结合计算机模拟等仿真技术,比较磨损与腐蚀交互作用的数据变化量,获得材料在复杂环境下的损伤行为规律,深刻认识涂层在复杂耦合条件下的“磨损-腐蚀”耦合损伤机制。

(2)监测和评价手段。苛刻环境下材料因多因素动态耦合的损伤具有非线性和开放性的特征。因此需要将电化学和摩擦磨损试验机相结合,发展“磨损-腐蚀”原位监测设备,实现动态摩擦与电化学腐蚀参数的原位测量,并构建科学合理的监测和评价体系。

(3)高可靠、长寿命润滑耐磨耐蚀功能涂层的研发。采用黏结剂复合、改性,功能组分协同及多层复合结构设计的方法研发新材料、新技术,构筑一个兼具腐蚀防护且高承载、长寿命的润滑防护涂层材料体系,为极端苛刻工况条件下新型海工装备的可靠服役奠定基础。

(4)润滑耐磨耐蚀功能一体化智能涂层。对减摩抗磨剂或防腐剂的分子结构进行修饰或合理设计,将两者的优势整合,获得兼具减摩抗磨防腐性能的分子,进而发展出具备自愈合、自修复功能的智能化涂层。

参考文献:

[1] 鞠鹏飞, 张达威, 吉利, 等. 苛刻环境下材料表面防护技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 1-16.
Ju P F, Zhang D W, Ji L, *et al*. Research progress of material surface protection technology in harsh environment[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 1-16.

[2] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.
Hou B R, Lu D Z. Corrosion costs and prevention and control strategies in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(6): 601-609.

[3] 常可可, 王立平, 薛群基. 极端工况下机械表面界面损伤与防护研究进展[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2):206-220.
Chang K K, Wang L P, Xue Q J. Research progress on interface damage and protection of mechanical surfaces under extreme conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2):206-220.

[4] 蒋璐瑶, 郭勇义, 黄伟九, 等. 微观组织特征对模拟海水中搅拌摩擦加工 Ti-6Al-4V 合金腐蚀磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(5):209-216.
Jiang L Y, Guo Y Y, Huang W J, *et al*. Effect of microstructure characteristics on corrosion and wear properties of Ti-6Al-4V alloy processed by friction stir in simulated seawater[J]. Surface Technology, 2019, 48(5):209-216.

[5] Rodrigo S S, Carlos A, Carlos A F, *et al*. Smart paint for anodic protection of steel[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 78:116-123.

[6] Taghavikish M, Dutta N K, Roy C N. Emerging corrosion inhibitors for interfacial coating[J]. Coatings, 2017, 7:217.

[7] Olajire A A. Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 269: 572-606.

[8] Rahsepar M, Mohebbi F. Enhancement of the wear resistance of epoxy coating in presence of MBT-loaded mesoporous silica nanocontainers[J]. Tribology International, 2018, 118: 148-156.

[9] Sun W, Wu T T, Wang L D, *et al*. The role of graphene loading on the corrosion-promotion activity of graphene/epoxy nanocomposite coatings[J]. Composites Part B: Engineering,

2019, 173: 106916.

[10] Li S Y, Liu Z Y, Hou L J, *et al.* Effect of polyether/polyester polyol ratio on properties of waterborne two- component polyurethane coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 141: 105545.

[11] Hodlur R M, Rabinal M K. Self assembled graphene layers on polyurethane foam as a highly pressure sensitive conducting composite[J]. Composites Science and Technology, 2014, 90: 160-165.

[12] Pélissier K, Thierry D. Powder and high- solid coatings as anticorrosive solutions for marine and offshore applications? A review[J]. Coatings, 2020, 10: 916.

[13] Kalendová A. Effects of particle sizes and shapes of zinc metal on the properties of anticorrosive coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2003, 46: 324-332.

[14] Ramezanzadeh M, Ramezanzadeh B, Mahdavian M, *et al*. Development of metal- organic framework (MOF) decorated graphene oxide nanoplatforms for anti-corrosion epoxy coatings [J]. Carbon, 2020, 161: 231-251.

[15] Pourhashem S, Ghasemy E, Rashidi A, *et al*. A review on application of carbon nanostructures as nanofiller in corrosion-resistant organic coatings[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2020, 17: 19-55.

[16] 赵明月, 裴晓园, 王维, 等. 二维纳米材料/环氧树脂复合涂层在腐蚀防护中的应用[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 2049-2059.
Zhao M Y, Pei X Y, Wang W, *et al*. Application of two-dimensional nanomaterial/epoxy composite coating in corrosion protection[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(5): 2049-2059.

[17] Fan Z, Kanchanapally R, Ray P C. Hybrid graphene oxide based ultrasensitive SERS probe for label- free biosensing[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4: 3813-3818.

[18] Tullio M, Annalisa A, Francesco B. Graphene/epoxy coating as multifunctional material for aircraft structures[J]. Aerospace, 2015, 2: 423-434.

[19] Jiang F W, Zhao W J, Wu Y M, *et al.* Anti-corrosion behaviors of epoxy composite coatings enhanced via graphene oxide with different aspect ratios[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 127: 70-79.

[20] Ramezanzadeh B, Ghasemi E, Mahdavian M, *et al*. Covalently-grafted graphene oxide nanosheets to improve barrier and corrosion protection properties of polyurethane coatings[J]. Carbon, 2015, 93: 555-573.

[21] Caldona E B, de Leon Al Christopher C, Mangadlao J D, *et al*. On the enhanced corrosion resistance of elastomer- modified polybenzoxazine/graphene oxide nanocomposite coatings[J]. Reactive and Functional Polymers, 2018, 123: 10-19.

[22] Ramezanzadeh B, Niroumandrad S, Ahmadi A, *et al*. Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized graphene oxide[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 283-304.

[23] Hayatgheib Y, Ramezanzadeh B, Kardar P, *et al*. A comparative study on fabrication of a highly effective corrosion protective system based on graphene oxide- polyaniline nanofibers/epoxy composite[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 358-373.

[24] Zhang X R, Ma R N, Du A, *et al*. Corrosion resistance of organic coating based on polyhedral oligomeric silsesquioxane-functionalized graphene oxide[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 814-824.

[25] Pooneh H, Mehdi G, Bahram R, *et al*. The role of functionalized graphene oxide on the mechanical and anti- corrosion properties of polyurethane coating[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 86: 199-212.

[26] Wang M H, Li Q H, Li X G, *et al*. Effect of oxygen-containing functional groups in epoxy/reduced graphene oxide composite coatings on corrosion protection and antimicrobial properties[J]. Applied Surface Science, 2018, 448: 351-361.

[27] Mahmudzadeh M, Yari H, Ramezanzadeh B, *et al*. Urtica dioica extract as a facile green reductant of graphene oxide for UV resistant and corrosion protective polyurethane coating fabrications[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 78: 125-136.

[28] Wu Y Q, He Y, Chen C L, *et al*. Non-covalently functionalized boron nitride by graphene oxide for anticorrosive reinforcement of water- borne epoxy coating[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 587: 124337-124337.

[29] Li G H, Ma Y J, Wan H Q, *et al*. Flake aluminum reinforced polyamideimide- polytetrafluoroethylene bonded solid lubricating composite coating for wear resistance and corrosion protection[J]. European Polymer Journal, 2021, 152: 110485.

[30] Bagherzadeh M R, Ghasemi M, Mahdavi F, *et al*. Investigation on anticorrosion performance of nano and micro polyaniline in new water-based epoxy coating[J]. Progress in Organic Coatings,

2011, 72: 348-352.

[31] Pirhady T N, Molana A S, Esmaeilzadeh E. Corrosion protection performance of epoxy coating containing alumina/PANI nanoparticles doped with cerium nitrate inhibitor on Al- 2024 substrates[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 152: 106133.

[32] Zhou X N, Huang H W, Zhu R, *et al*. Green modification of graphene oxide with phytic acid and its application in anticorrosive water-borne epoxy coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 143: 105601-105601.

[33] 谢婵, 贾宇, 薛名山, 等. 自修复防腐蚀涂层技术及研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(5):171-181.
Xie C, Jia Y, Xue M S, *et al*. Research progress of self-healing anti- corrosion coating[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2022, 38(5):171-181.

[34] 李海燕, 崔业翔, 王晴, 等. 自修复涂层材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(10):177-182.
Li H Y, Cui Y X, Wang Q, *et al*. Research progress of self-healing coating materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(10):177-182.

[35] Yu M , Zhao X N, Xiong L L, *et al*. Improvement of corrosion protection of coating system via inhibitor response order[J]. Coatings, 2018, 8:365-365.

[36] Yang Y, Zhang C H, Dai Y J, *et al*. Tribological properties of titanium alloys under lubrication of SEE oil and aqueous solutions[J]. Tribology International, 2017, 109: 40-47.

[37] Cai M R, Yu Q L, Zhou F, *et al*. Physicochemistry aspects on frictional interfaces[J]. Friction, 2017, 5: 361-382.

[38] Li F Y, Chen L, Ji L, *et al*. Ultralow friction and corrosion resistant polyurethane/silicone oil composite coating reinforced by functionalized graphene oxide[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 148: 106473.

[39] 李志科, 陈斯佳, 马英杰, 等. 自润滑聚合物材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(8): 165-172.
Li Z K, Chen S J, Ma Y J, *et al*. Research progress of self-lubricating polymer materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(8): 165-172.

[40] Wang C J, Wang H Y, Li M L, *et al*. Anti- corrosion and wear resistance properties of polymer composite coatings: effect of oily functional fillers[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 85: 248-256.

[41] 李斌, 冶银平, 万宏启, 等. 水性二硫化钼基粘结固体润滑涂层制备及其摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 142-149.
Li B, Ye Y P, Wan H Q, *et al*. Preparation and tribological properties of aqueous molybdenum disulfide bonded solid lubricating coatings [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 142-149.

[42] Zhao Z C, Ma Y J, Ju P F, *et al*. Improved wear resistance and environmental adaptability of a polysiloxane/molybdenum disulfide composite lubricating coating using polyhedral oligomeric silsesquioxane[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14: 36105-36115.

[43] Ma Y J, Ye Y P, Wan H Q, *et al.* Chemical modification of graphene oxide to reinforce the corrosion protection performance of UV- curable polyurethane acrylate coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 141: 105547.

[44] 李桂花, 冶银平, 马彦军, 等. 聚酰胺酰亚胺/聚四氟乙烯复合涂层的制备及其摩擦学性能和耐腐蚀性能[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(4):455-466.
Li G H, Ye Y P, Ma Y J, *et al*. Preparation and tribological properties and corrosion resistance of polyamide imide/ polytetrafluoroethylene composite coatings [J]. Tribology, 2021, 41(4):455-466.

[45] 孙哲, 杨康, 马宏, 等. 航空、航天涂料现状及未来发展[J]. 中国涂料, 2019, 34(1):28-32.
Sun Z, Yang K, Ma H, *et al.* Current situation and future development of aerospace coatings [J]. China Coatings, 2019, 34 (1):28-32.

[46] 罗一旻, 杨军华, 李霞, 等. 热带海洋盐雾气氛自润滑耐磨防腐涂层技术研究新进展[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(1):104-120.
Luo Y M, Yang J H, Li X, *et al*. Research progress of self-lubricating, wear- resistant and anticorrosive coating technology for salt spray atmosphere in tropical ocean [J]. Tribology, 2023, 43(1): 104-120.

[47] 李全德, 倪荣, 孟惠民, 等. 酚醛环氧涂料在核电汽轮机油系统中的应用研究[J]. 东方汽轮机, 2017(2): 31-35.
Li Q D, Ni R, Meng H M, *et al.* Application of phenolic epoxy coating in oil system of nuclear power turbine [J]. Dongfang Turbine, 2017(2): 31-35.

Progress of Multifunctional Organic Bonded Coatings with Lubrication, Wear and Corrosion

Mingkai Chen[1]，Lei Chen[2]，Yanjun Ma[2]，Dingjun Zhang[3]，Huidi Zhou[2]，Jianmin Chen[2]

(*1.State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachiney Power Equipment, Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang 618000, China; 2. Key Laboratory of Science and Technology on Wear and Protection of Materials, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Department of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China*)

ABSTRACT: With the rapid development of modern equipment technology, the service conditions of high-end machinery and equipment have become more complex and demanding, and the coupling damage of wear and corrosion has accelerated the damage and failure of moving parts of high-end machinery and equipment, resulting in a significant reduction in the service life of equipment and serious safety problems. The integrated organic bond coating overcomes the single functional limitations of the lubricating wear-resistant coating and anti-corrosion coating, and provides an effective solution to the wear and corrosion problems of moving parts. This paper first discussed the severe challenge of key moving parts facing complex service conditions, the coupling damage mechanism of material wear and corrosion; then, the research progress of organic bonded coatings with integrated lubrication, wear resistance and corrosion resistance was introduced from three aspects: binder, filler and lubricant. The structure-activity relationship between the composition and mechanical properties, tribological properties and corrosion resistance of coatings was analyzed, and the limitations of different coatings were summarized. Then, the application status of integrated coating with lubrication, wear and corrosion resistance was summarized in detail. Finally, the development direction of integrated coatings with lubrication, wear and corrosion resistance was prospected.

Keywords: wear and corrosion; friction-reducing and anti-wear; corrosion resistance; functional integration; organic bonded coating