

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190212001

苛刻环境下材料表面防护技术的研究进展

鞠鹏飞¹, 张达威², 吉利³, 马国政⁴, 陈建敏³, 徐滨士⁴

(1. 上海航天设备制造总厂有限公司 上海 200245; 2. 北京科技大学 新材料技术研究院 北京 100083; 3. 中国科学院兰州化学物理研究所 兰州 730000; 4. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 近年来, 材料表面防护技术已由普通环境下的材料保护技术向苛刻环境下的特种防护技术发展, 主要包括高速、高温、高压、重载环境下的长寿命润滑与强化技术, 严酷海洋大气、深海环境、辐射环境下的腐蚀与防护技术, 以及面向重大装备的维修与再制造技术等。这些技术的发展促进了磁控溅射、多弧离子镀、冷喷涂、热喷涂、智能防腐涂层等多项新技术的发展, 并在航空、航天、船舶、兵器、核电等多个重点行业中得到应用。文中对近年来苛刻环境下材料表面防护技术的发展现状和趋势进行了研究, 以我国重大工程装备为出发点, 重点对材料的腐蚀与防护、减摩与润滑、耐磨与强化以及维修与再制造 4 个领域技术的新成果、新观点、新方法和新技术进行了综述, 为相关的工作提供技术参考。

关键词: 腐蚀; 润滑; 强化; 表面工程; 进展

中图分类号: TG174; TB304; TH17

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)04-0001-16

Progress in Research of Surface Protection Technology of Materials in Harsh Environment

JU Pengfei¹, ZHANG Dawei², JI Li³, MA Guozheng⁴, CHEN Jianmin³, XU Binshi⁴

(1. Shanghai Aerospace Equipment Manufacture, 200245 Shanghai, China; 2. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, 100083 Beijing, China; 3. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, 100072 Beijing, China)

Abstract: In recent years, surface protection technology of materials has developed from material protection in ordinary environment to special material protection in harsh environment. The latter mainly includes long-life lubrication and strengthening technology under high speed, high temperature, high pressure and overloading environment, corrosion and protection technology in harsh marine atmosphere, deep-sea environment and radiation environment, as well as repairing and remanufacturing technology for key equipment, etc. The development of the above technologies have promoted the evolution of numerous novel technologies such as magnetron sputtering, multi-arc ion plating, cold spraying, thermal spraying and intelligent anti-corrosion coating. All these techniques have gained rapid growth by application in key industries such as aviation, aerospace, ships, weapons and nuclear power. The current situation and development trend of surface protection technologies of materials under harsh environment over the past years are investigated. Taking major engineering equipment as a starting point, new achievements, new ideas, new methods and new technologies in four technological fields, including material corrosion and protection, friction and lubrication, wear-resisting and reinforcement as well as repairing and remanufacturing, were reviewed in order to provide technical reference for related research.

Keywords: corrosion; lubrication; strengthening; surface engineering; progress

收稿日期: 2019-02-12; 修回日期: 2019-07-28

通信作者: 鞠鹏飞 (1987—), 男 (汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 航天材料表面工程; **E-mail:** jupengfei10@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51771122, U1637204)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51771122, U1637204)

引用格式: 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. Progress in research of surface protection technology of materials in harsh environment[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 1-16.

0 引言

先进材料是实现核电、船舶、运载火箭、卫星及航空航天飞行器等先进装备高性能、高可靠性、轻量化、小型化的基础和保障。随着我国海洋工程、空间站、深空探测、重型运载火箭、大飞机、天地往返以及核电等重大战略工程的实施,在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质、辐射环境等条件下,关键部件材料可靠防护与长期可靠服役成为限制上述高端装备发展的主要瓶颈之一,其中苛刻工况下材料的腐蚀、磨损是主要失效行为。近年来,国内外针对材料的腐蚀与防护、减摩与润滑、耐磨与强化以及维修与再制造4个领域开展了大量研究。针对海洋大气、深海、高原严寒以及核辐照环境开展了材料腐蚀机制与防护技术研究;针对航空航天、地质钻探等行业,开展了长寿命固体润滑、高温固体润滑、材料表层硬化等润滑与强化技术研究;针对装备的修复与延寿,创立了再制造技术领域,并开展了大量研究。以下将从这几个方面综述苛刻环境下材料表面防护技术应用现状与发展情况。

1 腐蚀与防护技术

材料的腐蚀问题伴随材料的设计而产生,一直影响其服役寿命。随着我国高端装备的发展,材料的应用环境愈发严酷,对材料的防护提出更高的要求。军事装备作为国防建设的核心内容之一,具有种类多、数量大、存储时间长以及应用环境复杂多样的特点^[1]。尤其是飞机、船舶和核电等大型装备,通常要求其能够在严酷的环境中长期使用,任何一个零部件的腐蚀都会给整个装备带来安全隐患,影响装备运行服役。在诸多自然环境中,海洋是极为苛刻的腐蚀环境,普通的材料氧化膜对于海洋环境的保护作用较弱。据不完全统计,海洋腐蚀损失约占材料总腐蚀损失的1/3,因此海洋腐蚀导致的损失是远高于其他环境腐蚀^[2]。针对海洋环境中机械腐蚀、电化学腐蚀及生物腐蚀作用影响,其防护主要分为3个方面:材料的选择和合理设计,材料的表面保护,以及外加电流或牺牲阳极的阴极保护。

此外,极地高原地区材料老化、风蚀和磨蚀,以及核反应堆中高温高压和辐照等问题同样值得引起关注。

1.1 海洋大气环境腐蚀与防护

海洋大气腐蚀主要由潮湿大气环境下的薄液膜所导致,腐蚀多发生在高温高湿的沿海地区。尤其是当高温高湿的海洋大气中含有酸性污染物或者盐分颗粒时,腐蚀问题将进一步加重。高温高湿的大气环境会造成金属基材的腐蚀,例如轻武器在高温高湿的海洋大气环境中常发生的弹匣斑状腐蚀等;同时极易导致装备涂镀保护层的失效,例如弹箭在储存过程中发生的涂层老化、膜下腐蚀、鼓泡、脱落等;高温高湿大气环境还会引起橡胶、塑料等非金属材料的变形、变脆、龟裂、溶胀、长霉等现象^[1]。

采用涂层表面防护技术对军事装备进行防护是目前广泛应用且行之有效的防腐技术之一。表面防护涂镀层的设计与选择需充分考虑军事装备不同的应用环境,根据实际需要研究具有特殊功能的涂镀层防护体系。例如杜克勤等^[3]采用双极性脉冲控制方式对镁合金进行微弧氧化,改善了其膜层的抗腐蚀性能。Li等^[4]通过直流磁控溅射在316L不锈钢上制造了具有不同调制周期的Cr/GLC多层膜,显着提高了其人工海水中的摩擦磨损性能。对于容易受到海水浸泡的舰艇表面,采用电弧喷涂锌、铝涂层等赋予舰艇金属表面优良的耐海水腐蚀能力^[5]。应对海水中微生物的附着及腐蚀问题,船舶工业中采用了具有防污功能及杀菌功能的智能涂层进行涂装^[6]。除上述几种常用表面涂镀技术外,其它表面防护技术,如非晶态合金化学镀层、纳米颗粒复合涂层等同样展现出了巨大的应用潜力^[7]。

目前石墨烯涂层以及自修复涂层等是海洋防腐涂层近年来研究的热点。对于石墨烯的研究,Chen等^[8]制备的石墨烯涂层,其抗氧化性相对于原来的Cu/Ni基体有大幅度提高。对于石墨涂料的研究主要集中于有机涂料、无机涂料两类,Prasai等^[9]最早发明制备石墨烯涂料的方法,即以聚甲基丙烯酸甲酯为中间介质将需要的石墨烯涂层制备在基体表面,材料的抗腐蚀性能得到了大幅度提升。另外,石墨烯也可以用于对现有涂料的改性,例如中科院宁波材料所^[10]将石墨烯添加到水性环氧涂料,与纯环氧树脂防腐涂料相比,其涂层的性能得到改善。另一方面,石墨烯改性在无机涂料领域的应用逐渐增多,万春玉等^[11]研

究发现,在无机防腐涂料中添加石墨烯,在涂覆量仅有 $100\sim 150\text{ mg}/\text{dm}^2$ 的情况下,涂层的抗盐雾能力可高达 1200 h ,说明其防腐性能得到大幅度改善。沈海斌等^[12]用石墨烯代替金属铬添加到达克罗涂料中,涂层也可以具有较好的抗腐蚀性,同时对于环境也十分友好。

自修复防腐涂层是新兴智能防护涂层的一种,当涂层被破坏损伤后,涂层在一定条件下恢复其抗腐蚀的性能。现有的自修复涂层主要分为自主修复和非自主修复两类,自主修复涂层常以包埋的成膜物质或缓蚀剂对受损涂层进行修复。Yang等^[13]采用界面聚合的方法,异氰酸酯与水分子反应填充涂层损坏后的缺陷。Aoki等^[14]在醇酸树脂涂层加入十二烷胺缓蚀剂,验证了缓蚀剂可以减弱其腐蚀。对于非自主修复类的涂层,依靠温度、光照等外界环境对涂层进行修复,Guo等^[15]设计出一种基于紫外光引发阳离子聚合的修复涂层。

1.2 深海环境腐蚀与防护

在深海领域海水的溶解氧含量、盐度、温度及生物条件等都与浅海有一定差异,材料在深海领域中的腐蚀行为与浅海有所不同^[16-17]。就海水中的溶氧量而言,随着海洋深度的增加,海洋中的溶解氧逐渐降低,但由于有洋流的补充,深海领域中溶解氧又会逐渐增加。其次,深海领域中的盐度含量约为 35 PSU ,不会随深海深度有所改变^[18]。随着海洋深度的增加,海水的温度逐渐降低,这样会降低阴极和阳极过程的反应速度,同时可以降低氧的扩散速率,深海环境中材料的腐蚀有所减缓,尤其是碳钢等金属材料。此外,由于微生物的存在,金属材料在浅海中腐蚀较为严重,而在深海领域中海洋微生物数量稀少,材料的腐蚀多是由厌氧菌造成的,这种情况多发生于深海海底。东北大学的研究者通过搭建系列深海模拟装置,研究发现深海环境的电化学腐蚀更加严重,而牺牲阳极性能下降,电偶腐蚀加剧^[19]。

深海领域设备腐蚀防护的主要措施有防腐涂层和阴极保护。与浅海防腐涂层不同,深海环境下涂层的防护性能和服役寿命主要与高水压下涂层的渗透行为有关。国外对深海环境中各类设备的腐蚀问题进行系统的实验和总结,都是以环氧类涂层为主,但尚未建立针对深海装备的耐压力

防腐涂层的相关标准规范。国内对于深海装备防腐涂层,要求其服役寿命一般不低于 15 年 ,但目前其使用寿命距要求还有一定差距,而国内深海装备防腐涂层主要有环氧树脂类防腐涂层、氟碳防腐涂层及有机硅树脂涂层等。相对于浅海,阴极保护在深海环境下的中腐蚀防护系统因为水压的问题发生了较大变化。就牺牲阳极保护而言,其抗腐蚀性能在深海环境下有所下降。国外的科研人员为解决其防护问题需要在不同海域、不同深度进行了系统的试验测试研究,以开发更合适的牺牲阳极材料。国内在深海环境下阴极保护方面的研究主要集中在保护机制和影响因素等方面,并得到一个完整的大数据。

1.3 极寒、高原腐蚀与防护

相对于常见气候,极寒、高原地区的环境更为严苛。高原环境主要为极端高低温和高日照强度;气温低和风速高也是极地的气候特征,如北极地区,其温度最低达 $-60\text{ }^\circ\text{C}$,风速最大达 50 m/s 。此外,极地环境还存在碎冰磨蚀等问题。

极寒、高原地区的防腐有机涂层包括传统的环氧涂层、醇酸涂层以及聚氨酯涂层等。丙烯酸树脂面漆也具有较好的耐候性,与环氧漆和醇酸漆相比,其光泽保持度较好,适合在较低温度下使用。极寒、高原环境虽低温干燥,但臭氧浓度高、紫外辐射较强,涂层老化较快,粘结力降低、变色、粉化、失去光泽等。针对于极寒环境的研究热点是通过降低涂层表面的粘附力实现抗结冰目的,主要分为牺牲性涂层、疏冰涂层和超疏水涂层3大类^[20]。Ayres等^[21]通过溶胶-凝胶法制备出一种抗结冰缓释涂层,可以有效的减小表面结冰附着力,抗结冰效果明显。美国NuSil公司开发出一种有机硅涂层,其抗结冰效果明显,是少有的疏冰涂层^[22]。而抗结冰涂层绝大部分是超疏水涂层, Wang等^[23]制备了纳米级氟碳膜涂层,可以有效地延迟结冰时间。

金属装备及构件的应力腐蚀断裂同样是极地、高寒防腐领域面临的重点问题之一。应力腐蚀一般发生在较低的应力和腐蚀性较弱的介质中,断裂失效发生突然,危害极大。飞机的金属构件中,例如门框、翼梁、螺旋桨毂等^[24],均会因应力腐蚀断裂而遭受严重破坏。

高原荒漠中的沙尘会给军用装备、系统和机

载设备带来严重磨蚀问题^[25]。例如直升机旋翼诱发的湍流气流中裹挟的沙尘碎石会磨损飞机的活动部件、金属表面以及涂镀层。细小的沙尘颗粒极易进入机身内部,并破坏机体内部的精密金属结构及电子系统。针对易遭受风沙磨损的飞机铝基体蒙皮和其他金属结构件,采用带有弹性聚氨酯面漆的复合涂层能够有效抵御砂石等坚硬物质的磨蚀^[26]。激光熔覆铜基、镍基合金涂层以其硬度高、耐磨性好等特点,被用于延缓火炮驻退机节制环的磨损失效^[27]。

1.4 核辐照腐蚀与防护

对于核电技术的发展,我国研究方向主要集中在核电设备所用的燃料包壳、发电装置等。但是就核反应堆而言,其高温、高压和强辐照所造成的腐蚀对于材料的选用提出更苛刻的要求。

锆合金包壳的燃料体系已经在轻水反应堆(Light water reactors, LWRs)中成功使用了40多年,表现出良好的抗辐照和抗腐蚀性能。在轻水反应堆这种苛刻环境下,对包壳材料及其他设备的抗高温、抗腐蚀的性能要求较高,最关键的是材料也能抵抗辐照损伤。根据现有的研究成果,锆合金的替代材料主要分为两类:一类是以FeCrAl为主的Fe基合金材料;另外一类是陶瓷材料如SiC/SiC复合材料、MAX相陶瓷材料等。但不管是新型的合金材料还是陶瓷材料都存在一定的问题,就Fe基合金材料而言,其机械加工及焊接需要进一步研究;而陶瓷材料因为其固有的特性即脆性高、强度低等很难真正设计为包壳结构。

同时,正开发用于锆合金的事故容错涂层,该涂层可以在非正常高温或LOCA条件下提供必要的保护,也可以在LWRs中提高材料的抗高温、高压、水蒸气等性能。新型三元层状结构MAX相陶瓷材料,具备较高的杨氏模量,较低的维氏硬度和剪切模量,易加工,导热、导电性能较好等^[28-30]。含铝的MAX相材料氧化后产物为Al₂O₃,由于其热膨胀系数^[30]和氧化前基本一致,使其能够致密覆盖在材料表面形成氧化膜。基于MAX相材料的辐射耐受性和结构稳定性,可以将其应用于先进核反应系统中。MAX相材料更高的抗辐照损伤能力,可使目前的核反应堆工作于更高的温度。国内外对MAX相涂层的制备进行了

不断尝试,Frodelius等^[31]采用超音速火焰法成功在不锈钢表面制备出厚度大于100 μm的涂层,并且对其进行了系统分析;Zhang等^[32]运用离子喷涂技术在Inconel600基体上喷涂Ti₂AlC涂层,但喷涂过程中Ti₂AlC会发生分解,其最高的保有量为26.0%。Tang等^[33]通过元素的非反应磁控溅射在Zircaloy-4基材合成致密的纯相Ti₂AlC涂层,其厚度约为5.5 μm;Maier等^[34]在Zircaloy-4基体上沉积了厚度90 μm的Ti₂AlC涂层,700 °C环境空气中的氧化试验和1005 °C下进行的LOCA测试表明,该涂层具有用于核燃料包壳的潜力。

2 减摩与润滑技术

磨损失效是机械装备失效的主要原因。减小磨损的最有效办法,是采用先进的润滑材料和技术。对于航空航天等高新技术装备来说,服役工况极端恶劣,经常遭受高真空、高温、高压等特殊考验,传统的流体润滑技术已不再适用,固体润滑技术为解决长寿命高可靠性工程装备制造设计的瓶颈难题发挥了重要的作用。目前已经发展了以二硫化物属、软金属、碳材料、聚合物、陶瓷氧化物、氮化物、碳化物等为主的润滑材料体系,采用了粉末冶金、涂料涂装、真空气相沉积(PVD、CVD等)、热喷涂(等离子、超音速喷涂等)、激光处理(熔覆、合金化、热处理、织构化等)、液相表面改性(化学和电化学表面改性)、表层强化(离子注入、渗碳、渗氮、喷丸等)、自组装分子有序膜等制备技术。随着空间站、高推重比航空发动机、高温气冷堆等国家重大装备工程的实施,对润滑材料又提出了更高的要求:①服役环境更加复杂、苛刻,对复杂多环境适应性提出要求,例如高推重比发动机热端温度范围不断提高,天地往返飞行器面临“空天地”多环境服役要求,核反应堆装备还需耐受核辐射等;②更高的可靠性和更长的服役寿命,例如新型航天器机构在轨设计使用寿命已由原来的3~5年提高到8~10年甚至15年;③新型功能要求,除了满足润滑功能外,还需兼具导电、导热、防核辐射、吸波等新的功能。以应用需求为牵引,润滑材料总体向着多功能、智能自适应和超长寿命等目标不断发展。

2.1 多环境自适应智能润滑材料和技术

近年来,空间/临近空间飞行器是国内外研究

的热点。这些装备的运动部件,需要在多种极端恶劣环境以及变工况条件下服役。运动部件不仅要经受多种严酷环境和极端变工况(大交变接触应力、瞬时过载等)的考验,而且对精度、寿命、承载等方面的要求非常高。极端变工况和多环境服役条件下的高效、可靠润滑问题已成为空间/临近空间装备关键运动部件面临的共性问题。

美国 MTI 项目对 NASA 多年空间机械失效的分析指出,发展能够适应多种环境和变工况条件下的新型智能润滑材料,是提高装备系统在变工况下可靠性和攻克其在多环境下长寿命的关键技术之一。固体润滑材料要具备低环境敏感性、自适应、自修复等功能,必须具备两方面条件:①必须包含在多环境和多工况条件下具有最佳润滑功能的各种材料组成,以充分利用各组分的协同效应;②材料的成分、微结构以及表面化学状态能够对服役温度、接触应力、气氛或介质的变化做出响应,并表现出稳定可靠的低摩擦磨损,进而适应环境变化的影响。采用纳米化、多元化、复合化的组分结构设计思路,借助界面结构、表面织构化的主动设计,是研制具有低摩擦、高强韧、长寿命、多环境适应性(智能)等特性于一体的固体润滑材料的基本理念和理想途径。21 世纪初,美国空军研究实验室(AFRL)进一步开展了自适应“智能”固体润滑薄膜的研究工作,发展的自适应复合薄膜包括 YSZ/Au/DLC/MoS₂、WC/DLC/MoS₂、YZS/Ag/Mo/MoS₂ 等^[35-36]。此后,A.A. Voevodin 进一步发展了自适应固体润滑复合薄膜思想^[37-38],提出在接触应力、摩擦热、外界高温的作用下,固体润滑复合薄膜的微观结构会发生相应的转变,如碳薄膜材料中 sp³-sp² 的转变或类金刚石向类石墨碳的转变,MoS₂、WS₂ 的重结晶和重组装,以及复合薄膜中不同组分之间的相互反应等。

国内在此方面的研究虽起步较晚,但也逐渐引起重视并取得了良好进展,中科院兰州化物所、中科院宁波材料所、清华大学等单位,都分别对多环境自适应润滑材料体系的制备物性与应用探索开展了研究^[39-41]。采用强碳(W、Mo、Ti 等)与弱碳金属(Al、Cu、Ag 等)多元掺杂复合技术,获得了具有高硬度、高韧性以及一定摩擦自适应特性的碳基固体润滑复合薄膜,并提出了

基于非晶/纳米晶多尺度耦合设计的环境自适应固体润滑薄膜构筑理念。设计制备了不同调制周期的 MoS₂/a-C:H 多层薄膜^[42],结果表明软硬交替多层薄膜不但界面结合良好,而且多界面的设计有效地阻止了裂纹扩展。多层膜兼具了软层低剪切力和硬层高承载力的优异性能,在摩擦诱导二元复合协同润滑作用下,MoS₂/a-C:H 纳米多层薄膜在真空、空气、惰性气氛多种环境气氛中都展示了优异的摩擦学性能(GJB3032-97 测试条件下摩擦因数均小于 0.04,磨损寿命超过 3×10⁵ r),实现了多环境润滑适应性。

2.2 宽温域自适应润滑材料与技术

普通油脂类润滑材料最高使用温度一般不超过 200 ℃,聚合物基自润滑材料(包括有机涂层)的最高使用温度为 400 ℃,在高温环境下,润滑材料和技术的选择面迅速变窄。随着高新技术的发展,以航空航天发动机、空气箔片轴承、涡轮增压器等系统装备的服役温度越来越高,尤其是大多数军用发动机运动部件所处的温度高于 800 ℃,其运动部件的润滑和耐磨问题成为决定装备可靠性和寿命乃至整个系统设计成败的关键。以航空领域为例,随着航程和速度的进一步提高,对发动机的推力和推重比提出了更高的要求,发动机的压力比、进口温度、燃烧室温度以及转速均大幅提升。发动机中运动部件的工作温度将大幅度提高,高温润滑问题已经成为技术发展的瓶颈。除此之外,在发动机启动与停车阶段,还需经历室温至高温和高温至室温的变化过程。上述环境为典型的航空发动机极端宽温域环境,迫切需要解决 1000 ℃ 范围内连续、多循环润滑问题。

NASA Glene 研究中心率先于 20 世纪 70 年代开展宽温域自润滑材料研究,分别发展了 PM 系列的自润滑复合材料和 PS 系列的热喷涂自润滑涂层^[43-45]。PM/PS212 成功地实现了从室温到 800 ℃ 的连续润滑,他们的设计理念是将低温润滑材料(15% 的银)和高温润滑材料(15% 的 CaF₂/BaF₂ 共晶物)分散混合在高温金属基体(70% 的镍/钴合金)中,在不同温域内各润滑材料显出各自的润滑性能,从而达到宽温域连续润滑。由 Ni-Cr、Cr₂O₃、Ag 和 BaF₂/CaF₂ 等组成的 PS304 等离子喷涂复合涂层,成功应用于箔片空气动压轴承在低温到高

温起停时的润滑,可达到箔片轴承在高于 650 °C 启停 10 000 次的效果。目前国外已经利用 PVD 技术发展了在空气中热稳定性能达到 1000~1200 °C 的 PVD 硬质高温耐磨涂层,如 Balzers 公司推出 AlCrN 基涂层、IonBong 公司的 TiSiN 基涂层等。上述涂层在超过 1000 °C 的高温条件下也具有优异的耐磨防护性能,但是这些涂层的摩擦因数很大,高达 0.5 以上,润滑性能较差。在 PVD 高温润滑涂层方面主要有 3 大类型:①多元金属涂层如 Cu/Ni/Ag、Ag/Ti、Au/Cr 等。②双金属氧化物 M_xTMyO_z (其中,Me 为贵金属, TM 为过渡金属)。如 $AgMo_xO_y$ 、 AgV_xO_y 、 $CuMo_xO_y$ 等。③氮化物基温度自适应涂层。该类涂层以 MeN 为基础抗磨相,采用润滑剂复配技术,在温度连续变化过程中,引发涂层发生润滑剂扩散迁移、生成氧化物等变化,使得涂层具备优异的宽温域润滑性能。美国空军研究基地研究了 MoS_2 与 PbO 或 WS_2 与 ZnO 等低温润滑剂组配制备复合薄膜,发现利用摩擦化学反应在高温条件下分别生成 $PbMoO_4$ 或 $ZnWO_4$ 作为高温固体润滑剂,可实现在宽温度范围内润滑剂可持续补充的连续润滑。这一研究发现“激活”了宽温域高温固体润滑材料的研究思路。美国空军材料制造研究室发展了 VN/Ag、MoN/Ag 涂层和 MoN/ MoS_2 /Ag 三元复合涂层体系^[46],在室温~300 °C 温度范围内, MoS_2 起到润滑作用;在 300~500 °C 范围内,Ag 扩散到涂层表面起润滑作用;在 500~800 °C 时,氧化生成 $AgMo_xO_y$ 层状氧化物起到润滑作用,从而实现室温到 800 °C 高温的连续润滑。

然而上述设计思想的不足是:一方面,组分太过复杂,材料结构及性能调控较为困难;另一方面,多种润滑剂虽然能够在各自温度段发挥作用,但在高温下一些中低温润滑相的化学组分和结构较初始时会发生不可逆的变化,再次使用时性能也就大幅退化。

氧化物陶瓷是一种优异的耐高温、抗氧化材料,而且兼具一定的润滑特性。然而其脆性极差,高应力作用下寿命受到限制。李红轩等^[47]从 PVD 单相氧化铬陶瓷薄膜入手,利用热处理过程中元素热扩散现象实现材料重结晶及结构自组装,不仅克服了氧化铬陶瓷材料的脆性问题,同时利用特有的自组装表面形貌及其优异的化学和

热稳定性,获得了在 5 次热循环条件下优异的宽温域自适应润滑性能(0~1000 °C 温域范围内,摩擦因数小于 0.3,磨损率: $1.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$)。而且在温度循环的摩擦过程中,热扩散导致的自组装结构可以发生温度响应的智能补给,持续发挥减摩抗磨作用。氧化物陶瓷材料是一个庞大的家族,还拥有众多的优异特性,围绕氧化物陶瓷材料体系设计,并主动控制热扩散过程,将会是宽温域自润滑材料非常有希望的研究方向。

2.3 空间导电与润滑功能一体化材料与技术

对于高精密的空间电接触部件,传统采用金作为电接触材料,主要是因为,金有着优异的化学稳定性、导电性和导热性,在空间环境下比较稳定。缺点是硬度较低,易发生磨损,因此,常加入钴、银、铜、铂、钯等元素做成合金来提高金的综合性能。然而单纯的金-金配副在真空载流条件下摩擦因数会呈现一个很高的水平,《空间摩擦学手册》^[48]数据表明金-金配副典型摩擦因数为 0.8,会造成严重的磨损,寿命较低。为此从国内外就如何改善真空电接触界面间的摩擦磨损状态均开展了大量的研究工作^[49-51],主要研究机构有:IMI(UK)、Le Carbone(France)、Carbex(Sweden)、ESTL,NASA(USA)、Boeing(USA)、中科院兰州化物所、中南大学、昆明贵金属研究所等。改善的途径主要集中在复合各种润滑材料,结合制备技术的发展,不断优化和创新材料体系。

润滑材料的复合需要综合兼顾其导电性和真空润滑性能。石墨是最早广泛使用的电接触润滑材料,它兼具优异的润滑、导电和导热性能,特别是对于大气环境下大载流条件,石墨/Ag 复合材料发挥了重要的作用。然而石墨在真空环境下摩擦性能迅速恶化,并没有在空间电接触部件上有效使用。以二硫化钼为代表的二硫化物属润滑材料在真空中具有极低的摩擦因数,但是其导电性差。因此,在没有发现更理想的润滑相的条件下,只能将石墨与二硫化钼复合添加到金属体相中,利用石墨发挥在大气跑合过程的润滑作用,利用二硫化钼发挥在真空环境下的润滑作用,利用金属体相发挥导电作用,满足航天滑环等使役工况要求。但是均是以牺牲一部分材料的导电性或力学性能为代价,加入的量很少。制备方法一般为以银、铜、金以及合金为基体、以石墨、

MoS₂、NbS₂、WS₂等为润滑相,采用粉末冶金工艺(压制烧结/热压)或者电镀工艺分别制备复合材料和复合镀层材料。典型的材料为美国NASA开发的Ag-MoS₂-C卫星导电滑电刷^[50]。

随着材料制备新技术的不断涌现,研究者们尝试了许多其他的新工艺和材料体系^[52]:如等离子体增强气相沉积TiNiC、TiN等薄膜、等离子体喷涂AgCu膜层、溶胶-凝胶法氧化物等。其基本思想是直接制备导电、耐磨功能一体化材料,主要利用材料本身高硬度起到延长磨损寿命的作用。其中采用物理气相沉积技术制备的膜层具备的膜基结合强、致密纯度高、高硬耐磨、表面光滑、无污染等优点极具优势。中科院兰州化学物理研究所翁立军等人利用PVD技术,设计制备了PdNiAu合金化导电润滑膜层,针对兼顾低电噪声和低磨损率的技术难点,通过制备方法、工艺参数、组分和结构的调整,突破了润滑薄膜兼顾导电及韧性的技术关键,设计制备的PdNiAu薄膜耐磨寿命、磨损率、电噪声、表面粗糙度、厚度均匀性及耐热冲击性能达到了较高水平。低温沉积技术是进一步提高膜层致密性和耐磨寿命的有效途径。研究表明,低温状态下沉积膜层有效控制了结晶速率和晶粒尺寸,结构更为致密,改善了应力状态,提高了膜-基结合强度,大幅降低了磨损率。

石墨烯是一种拥有独特二维纳米结构的新型碳材料。最重要的是石墨烯兼具优异的电学性能和润滑性能,其电子是以恒定速率传递的,载流子迁移率在所有导体中是最大的,石墨烯是目前发现的导电性能最强的材料;同时近年来国内外研究表明,具有原子厚度的石墨烯不仅在微纳机械领域的微观尺度下具有超润滑性能(即摩擦因数在10⁻³量级,较常规固体润滑材料降低1~2数量级),而且还可以在宏观力接触方式下展现出非凡的摩擦学特性。美国Argon国家实验室研究人员^[53]于2016年在Science期刊上首次报道了石墨烯作为润滑剂在宏观接触大气环境条件下的超低摩擦特性,摩擦因数低至0.004。2017年吉利等^[54]发现:石墨烯在高真空、宏观接触条件下,也表现出超低摩擦因数和长寿命特性,石墨烯基膜层在真空环境下其摩擦因数低至0.01以下(较现役Au膜层0.2~0.4的摩擦因数降低1~2个数量级),

0.5 GPa接触应力下,耐磨寿命达到8×10⁵转以上,可以克服传统石墨类碳材料在真空润滑和耐磨不佳的问题。同时在摩擦过程中保持了良好的接触电导性。石墨烯材料的出现颠覆了传统石墨材料长期以来面临的真空润滑失效的局限问题,为新型空间用超低摩擦、长寿命、导电润滑材料的设计带来新的理念和机遇。

2.4 抗核辐照润滑材料与技术

针对核反应堆堆高温、高压、水蒸汽等恶劣环境下传动机构部件的磨损失效机理,法国、日本等国外机构曾进行过系统的研究,认为材料的腐蚀磨损是主要失效机制。在我国实际故障分析过程中也发现,滚轮跑道中有大量腐蚀产物、磨损产物积聚。因此提高传动部件材料表面的耐腐蚀性、耐磨性是必由之路。反应堆传动部件整体材料的选材在耐辐照、耐腐蚀、韧性等力学性能等方面具有非常严格的要求,从整体材料本身提高其耐磨性难度较大。而采用先进的表面处理技术对传动部件表面强化改性被证明是简便而行之有效的途径。法国、美国、日本、韩国等利用表面强化改性技术已具备一些解决核反应堆反应棒驱动机构部件的成功经验。改性的思路主要有两种,一种是利用润滑功能化处理减小磨损;另一种是利用硬化与防腐处理达到耐磨的目的。国外高温反应堆大都使用二硫化钼润滑薄膜解决转动部件和摩擦偶件的磨损问题^[55]。例如,高温液态钠冷快增殖堆的传动机构工作在氩气和钠蒸气之中,使用二硫化钼润滑,零件表面生成了抗摩的Na₂MoO₄薄膜;英国的“龙”高温气冷堆传动机构密闭在充满氦气的干套管中,对其轴承的滚珠和内外滚道涂镀二硫化钼后,摩擦因数可保持在0.003,磨损量也小;此外,西德AVR高温球床堆,美国的圣·符仑堡高温气冷堆的传动机构也都是应用二硫化钼进行轴承润滑的。而对于压水堆传动机构,二硫化钼在高温水蒸汽环境下,润滑性能丧失,而且耐腐蚀性较差,不被使用。主要途径为采用钛和铬的氮化物/碳化物等硬质、耐腐蚀的陶瓷涂层材料。处理方法包括传统的电镀、渗氮以及新近发展的离子喷涂、真空离子镀等技术。法国卡达拉希中心、法玛通先进核能公司等机构综合对比了不同制备技术以及材料的性能,认为真空气相沉积、离子喷涂技术制备的CrC复

合材料热态性能最佳^[56], 其不仅具有高硬度、耐腐蚀性能, 而且润滑性能较好, 已在压水堆反应棒驱动机构喷嘴、一回路阀门、销爪、丝杠、开合螺母(滚轮)等部件上成功应用。

中科院兰州化物所自 20 世纪 80 年代就开始了核反应堆用润滑材料的研制工作^[57], 分别采用有机和无机粘结涂层、热喷涂、PVD 等多种表面工程技术, 成功研制了系列核反应堆用润滑耐磨涂层/薄膜材料产品, 完成了国家科技重大专项《大型先进压水堆及高温气冷堆核电站》(HTR-PM 气冷堆核电站)4 大系统 30 余种运动部件(滚轮、丝杠、分裂转子下端轴承、大/小锥齿轮、导程螺杆等)的固体润滑和耐磨处理, 在实验堆以及示范堆中得到成功应用, 解决了零件在高湿、氦气、高温、辐照环境下的长寿命可靠运行难题, 积累了丰富的基础数据, 为抗辐射润滑设计的选材提供了有力的指导。

3 耐磨与强化技术

近年来, 随着航空航天、地质钻探、机械加工、模具制造等工业的飞速发展, 单一的材料已经无法满足高性能特种装备的使用要求, 特别是航空和地质勘探用高承载相对运动件, 对材料的承载能力和表面耐磨特性提出越来越高的要求。材料耐磨与强化技术应运而生, 并广泛应用与上述行业的运动部件, 提高装备的服役性能与寿命。

3.1 高承载件表面强化技术

硬质耐磨强化涂层技术可以有效弥补不同应用环境中基体材料的性能不足, 使其适应严苛的工作环境。从涂层体系来说, 高承载件表面强化涂层体系主要包括碳氮化物、硼化物、氧化物等传统硬质涂层, 以及金刚石、类金刚石、立方氮化硼、碳化硼、纳米多层结构涂层及纳米复合涂层等超硬涂层。

过渡族金属碳氮化物具有硬度高、热稳定性好、耐腐蚀和抗高温氧化等性能优势, 被广泛用于机械切削、矿物开采、耐磨损和耐高温等部件。研究最早、应用最广泛的是 TiN 和 CrN 涂层。在高速钢刀具表面沉积 TiN 涂层后, 刀具的使用寿命可提高十几倍甚至数十倍。但 TiN 涂层的氧化耐受温度只有 550 ℃, 相对较低, 一定程度上限制了它的使用^[58]。CrN 涂层比 TiN 涂层耐磨减

摩、耐高温和耐腐蚀。中科院宁波材料所王永欣等人通过阴极电弧沉积制备了厚度达 80 μm 的超厚 CrN 涂层, 从而达到长效耐磨的效果^[59]。对二元涂层引入第三种元素进行合金化, 使涂层中产生多元金属化合物, 能够进一步提高涂层的耐磨特性。例如对 TiN 涂层掺入 C 和 B 得到的 Ti-C-N 涂层和 Ti-B-N 涂层比原 TiN 涂层的硬度更高, 摩擦因数更低, 耐粘着磨损和磨粒磨损性能更好, 其中用 CVD 法制备的 Ti-B-N 涂层硬度可达到 50 GPa, 且涂层拥有很好的韧性^[60-61]。对 TiC 涂层掺入 N、B、Si 等元素得到的 Ti-C-N、Ti-B-C、Ti-Si-C 三元涂层, 可不同程度提高 TiC 涂层的综合力学性能。当对涂层引入更多元素时, 可制备四元及以上氮化物硬质耐磨涂层, 池成忠等人采用多弧离子镀在高速钢基底上沉积制备了 Cr-Ti-Al-Zr-N 五元梯度超硬涂层, 涂层硬度可达 4400 HV, 膜基结合力达 200 N^[62]。

以 Al₂O₃、ZrO₂、Cr₂O₃、TiO₂ 为主的氧化物涂层, 因具有高硬度、高化学稳定性和热稳定性等特性, 也是硬质耐磨防护涂层的理想选择。其中 Al₂O₃ 致密稳定, 硬度最高, 常用做高温机械零部件硬质耐磨涂层, 但其脆性较大, 可通过和 TiO₂ 复合的方式增加涂层的韧性。ZrO₂ 涂层拥有高熔点、低导热系数、高热膨胀系数、良好高温稳定性、隔热性以及生物惰性, 在航空、航天、等领域被广泛应用。

具有高 sp³ 含量的金刚石、类金刚石和具有立方结构的立方氮化硼、碳化硼等, 相较其他普通耐磨硬质强化涂层, 具有极高的硬度, 极低的摩擦因数, 突出的耐磨特性和化学稳定性。热丝化学气相沉积因稳定性好, 沉积面积大, 工艺简单等优点, 被广泛用于制备金刚石涂层。中科院宁波材料所江南等人用 CVD 法生长大单晶金刚石, 并成功将其产业化^[63]。

类金刚石(DLC)涂层结构介于金刚石结构和石墨结构之间, 其中的碳碳键以 sp³ 共价键为主, 混杂一定量的 sp² 键, 因而具有和金刚石相近的高硬度、电阻率、导热系数、电绝缘强度和化学稳定性。通过调控沉积参数调控 sp³ 键的含量, 能够使涂层的硬度达到 95 GPa; 同时, DLC 中的 sp² 能够起到良好的润滑效果, 使 DLC 涂层有很低的摩擦因数, 广泛应用于轴承、齿轮、活塞等表面作

为耐磨损表面强化涂层以及工具涂层。日本新潟大学 Kyohei Horita 等^[64]将 DLC 涂层应用于加工线路板的微型钻头,在钻头钻孔速度和使用寿命提高的同时,大大降低成本。西安工业大学杨巍等人利用 DLC 涂层的优良生物兼容性,采用离子束法在微弧氧化处理后的钛合金表面沉积 DLC 涂层,达到在人工关节表面制备耐磨保护涂层的目的^[65]。中科院宁波材料所汪爱英团队通过理论计算和实验相结合,对过渡族金属元素成键特性进行筛选分类,并采用离子束沉积和磁控溅射相结合的方式,对 DLC 涂层掺入金属元素以降低涂层内应力,实现高结合力 DLC 涂层的可控制备^[66]。另外, DLC 属于亚稳态材料,超过 300 °C 的高温环境下易发生 sp^3 向 sp^2 转变,导致涂层力学性能大幅度下降, DAMASCENO J C 等^[67]通过对 DLC 涂层掺入 Si 元素,改善 DLC 涂层的高温稳定性。

3.2 材料表层强化技术

新一代航天、航空、汽车、机械装备的发展,对材料与构件的组织、变形以及表面完整性提出了更高的要求,尤其是传动、转动等运动构件,例如活塞、阀门等采用钛合金制件以降低结构重量,减小摩擦因数,提高耐磨性和抗微动磨损能力;要求柱塞泵靴、盘等高耐磨高导热率兼备等等。因此表层强化技术将发挥重要作用,技术研发重点也从传统的气体渗碳、气体渗氮、液体渗氮化学热处理技术向新型等离子体轰击、真空低压、高能激光加热、感应加热等方式转移,例如等离子体渗碳、渗氮及共渗,真空低压渗碳及碳氮共渗,激光淬火、感应加热淬火等。

不锈钢的表层强化工艺大致可分为形变表面强化工艺和改性表面强化工艺。表面形变强化是利用机械能使工件表面产生塑性变形,产生应变细晶层,从而使表层硬度、强度提高的方法,包括喷丸、滚压、挤压等传统技术和超声冲击强化等新颖表面机械强化技术。超超临界火电机组的极限高温高压对锅炉用钢的高温强度和抗氧化性能提出了更高要求。王锐坤通过优化表面喷丸工艺参数,可成功在 Super304H 奥氏体不锈钢表面实现纳米晶化。0.5 MPa/3~20 min 喷丸处理后 Super304H 钢表层硬度值均是未处理试样硬度的 2~3 倍,在 404~554 HV 左右,极大地提高其抗高

温蒸汽氧化性能和抗高温热腐蚀的能力^[68]。李钱瑞以核电站关键构建爆破阀拉力螺栓预断凹槽为研究对象,通过优化超声冲击强化处理的振幅、冲击时间和能量等参数,使得 1Cr13 马氏体不锈钢的显微硬度达到 395HV 左右,表面压应力和疲劳极限提高 10 倍^[69]。另外,不锈钢的改性表面强化工艺主要集中在激光淬火、真空低压渗碳、等离子渗氮、离子注入等先进表面工程技术上。目前,提高航天用高强钢的构件极限服役性能已成为制约航天高端装备产品研制的瓶颈技术之一。如某航天型号锁紧机构零件,需在反复锁紧与松开的动作中接受冲击,零件整体较好的强韧性和局部接触面的高硬度 (≥ 50 HRC) 缺一不可。王健波等人采用激光淬火工艺,选用 1100 W 激光功率,4.5 mm/s 扫描速度,3 次激光宽带扫描处理后,20Cr13 硬化层深度 $> 500 \mu\text{m}$,表面晶粒极细,硬度 $> 600 \text{HV}_{0.1}$ ^[70]。针对运载型号产品中的衬筒 (15Cr)、活塞筒 (20CrMnTi) 等零件,唐丽娜^[71]等采用真空低压渗碳处理,零件表面清洁光亮、无晶间氧化脱碳现象,盲孔处渗碳层深度偏差仅为 0.04 mm,并很好地满足零件表面硬度 (700 HV 以上) 和渗碳层深的技术指标要求,显著优于传统气体渗碳工艺。

航空发动机用钛合金构件工作环境恶劣,除了高的离心负荷、振动负荷和热负荷,还要承受环境介质的腐蚀与氧化作用,因此对钛合金进行表面强化处理是永恒的话题。钛合金表面强化技术的发展从基于热处理、物理化学反应的传统表面改性向以电子束、离子束、激光束等高能束的使用为标志的“三束改性”现代表面改性技术发展,目前以及未来的发展方向将是多种强化手段和能量场结合开发而成的复合新工艺。高玉魁^[72]采用了喷丸强化、激光强化和低塑性抛光强化对 TC4 钛合金进行表面改性处理,从表面硬度提升效果上看,喷丸强化加工硬化最明显 (450 HV 左右),低塑性抛光次之,而激光冲击强化效果最小 (400 HV 左右),由于残余应力的引入均可提高 TC4 的旋转弯曲疲劳寿命和疲劳强度。航天八院采用钛合金等离子体渗氮处理,在钛合金表面制备一定厚度的渗氮层,白亮层由金黄色 TiN 和 Ti₂N 相组成,随着渗氮温度的升高和保温时间的延长, Ti₂N 相对含量减少, TiN 相增多; 830 °C

渗氮 15 h 表面硬度可达 1056 HV、层深 125 μm ，耐磨性显著提高^[73]。陈宇海利用将气体爆炸能量、脉冲电场能量、等离子体多重能量共同作用的脉冲等离子体爆炸技术 (Pulsed plasma detonation, PPD)，采用纯钨电极，丙烷、氧气、压缩空气作为爆炸气体，在 TA2 和 TC4 表面制备 PPD 改性层，获得由 TiN、TiN_{0.3}、Ti_xO_y、Ti 以及少量 W 组成的改性层，硬度较基体提高 3.8 倍，磨损机制主要为三体磨粒磨损，并伴有轻微的黏着磨损特征^[74]。新型等离子体浸没离子注入与沉积技术 (PIID) 可有效地将离子注入技术和真空弧蒸发技术结合，通过脉冲高压电场将离化的等离子体加速注入并沉积于工件表面，从而实现对材料的表面改性。刘洪喜等人通过 PIID 技术向 TC4 钛合金表面注入了不同剂量的金属 Ag，当注入量为当注入剂量为 1×10^{17} ions/cm² 时，材料表面纳米硬度和弹性模量分别提高 62.5% 和 54.5%，耐摩擦磨损和抗腐蚀性得到了大幅提高^[75]。王宝婷等^[76]的研究发现 TC4 钛合金表面制备的微弧氧化+强流电子脉冲 (MAO+HCPEB) 复合涂层，表面发生重熔，形成平整的改性层，耐盐雾腐蚀和摩擦磨损性能更好，并可通过改变微弧氧化电参数来减少复合层中的熔坑。

在地质勘探领域，铝合金钻杆已逐步替代传统钢钻杆，被越来越多的运用在深井、超深井及难进入地区钻探。但由于铝合金硬度低于钢，在摩擦过程中，较易产生严重磨损，并且在高温及含盐环境中，其力学性能和耐蚀性能明显下降，很难达到高可靠长效运行的目的，急需对其表面进行强化耐蚀处理。激光熔覆可通过熔化铝基体部分表面以及不同涂层粉末 (TiC、SiC、Al₂O₃ 等)，使铝合金表面生成一层陶瓷复合涂层，大大改善基体表面性能摩擦磨损和耐腐蚀性能^[77]。李琦等^[78]通过激光熔覆在铝合金表面制备了一层 NiCrAl/TiC 复合涂层，结果显示激光熔覆涂层只发生了轻微的磨粒磨损，铝合金基体发生严重的磨粒磨损和剥层磨损；表明激光熔覆层可明显提高铝合金材料的耐磨性。张志超^[79]研究了激光熔覆参数对 ZL109 铝合金表面 CNT/Al₂O₃ 复合涂层的影响，表明了激光功率、扫描速度、熔覆材料配比等都会影响到熔覆层的孔隙率和显微硬度。表面机械强化与电化学改性方法的复合处理也有

望可克服单一强化方法的缺点，使得铝合金表面获得更高的硬度和耐磨损性能。中国地质大学岳文等^[80]采用超声波冷锻处理 (UCFT)、微弧氧化 (MAO) 及两者相复合等表面强化技术，对典型 2618 铝合金钻杆材料进行处理，在钻杆表面产生一层强化层，以增加其表层硬度和耐蚀特性，研究发现，和未经处理试样相比，UCFT 试样、MAO 试样和 UCFT+MAO 试样的耐磨特性均不同幅度上升。在高温环境中，尤其在液体环境中，UCFT+MAO 复合处理技术表现最优。文磊等^[81]通过表面纳米化-微弧氧化复合涂层处理 LY12CZ 铝合金，发现机械研磨处理后，铝合金表面生成一层纳米层，该纳米层的生成对后续微弧氧化层的致密度有很好的改善作用；同时，机械研磨处理能够使材料表面处于压应力状态，耐磨性能和疲劳寿命均有所改善。

4 维修与再制造技术

在高温、高湿、辐射等苛刻环境和高速、重载、冲击等极端工况条件下，装备零件腐蚀、磨损、断裂等各类失效问题更加严重。要恢复装备功能、性能，保持装备持续作业能力，必须开展装备维修与再制造技术研究。表界面是装备零件服役过程中承担工作载荷、接触苛刻环境的重要部位，零部件的腐蚀从浅表开始，磨损发生在表面，疲劳裂纹大多源于表层^[82]。在破坏应力持续作用下，表界面的局部损伤又慢慢演变为整个零件失效，最终导致装备严重损坏甚至报废。因此，装备维修与再制造的关键在于对关键零件局部损伤表面的高质量修复、强化和防护^[83-84]。

4.1 装备维修与再制造工程的发展现状

维修在装备全寿命周期中具有重要作用，通过维修恢复装备的使用性能、延长装备服役寿命，可产生显著的军事、经济效益^[85]。

随着装备更新换代速度越来越快，大量淘汰的老旧装备造成了极大的资源浪费和环境污染，以节约资源能源和保护环境为准则、以实现废旧产品性能提升和寿命延长为目标、以先进技术和产业化生产为手段的高技术维修快速发展，再制造工程应运而生^[86-87]。美、欧、日的再制造产业已日趋成熟，但国外的再制造从技术标准到生产工艺都完全依托于现有制造业体系，再制造模式以

“换件修理法和尺寸修理法”为主,对于损伤较重的零件直接更换新件;对于损伤较轻的零件,则利用车、磨、镗等减材加工手段恢复零件配合精度,但会改变零件的设计尺寸。这种再制造模式的旧件利用率低、浪费大,还会造成再制造产品零部件的非标化^[88]。

针对上述不足,中国自1999年正式提出基于维修工程和表面工程的自主创新的再制造模式,将“通过表面局部增材修复实现整体服役性能提升”作为再制造的主要技术途径。近20年的实践证明,中国的再制造虽然起步较晚,但特色鲜明、技术先进,具有更为优异的综合效益,特别是节能环保效益突出。当前,我国在再制造的基础理论和关键技术研究已取得重要突破,再制造的学科和人才培养体系已基本完善。形成了以再制造毛坯损伤评估和再制造产品寿命预测为主体的基础理论,突破了再制造毛坯无损拆解和绿色清洗技术、复杂约束下局部增材成形和减材加工技术等关键技术,构建了再制造过程质量控制和产品质量保证的系列标准规范。特别是在发改委、工信部先后组织的汽车、工程机械、矿采机械、机床、船舶等多个领域再制造试点企业和再制造产业集聚区的示范带动和引领下,全国已形成湖南长沙、上海临港、重庆九龙工业园等8个再制造产业聚集区和示范基地,培育出年再制造2.5万台重载汽车发动机,年再制造1万台自动变速箱、年再制造1万台矿山机械等代表性企业。在高端装备再制造领域,航空发动机再制造已成为保障空军高强度实战化训练的重要途径,再制造的盾构机已在北京地铁建设中推广应用,再制造高端医疗器械也已经进入临床应用^[89-90]。

4.2 装备维修与再制造关键技术及应用

我国的装备维修与再制造始终围绕装备关键零件局部表面的损伤修复和防护、强化展开,并将无损检测理论与技术、表面工程理论与技术和寿命评估理论与技术等引入再制造,形成了旧件剩余寿命评估、局部损伤增材修复、再制造产品安全评价等完整的技术体系。

旧件剩余寿命评估是在对再制造毛坯进行全面的损伤检测的基础上,通过对磨损、腐蚀和疲劳裂纹扩展速率等的计算,实现再制造对象损伤程度的定量评估和剩余寿命预测。针对量大面广

的铁磁特性再制造毛坯损伤检测难题,Dong等^[91]开展了基于自发弱磁信号的铁磁性再制造毛坯隐性损伤检测技术研究,实现了以应力集中特征为参量的再制造毛坯隐性损伤识别与检测,极大提高了毛坯可再制造性的检测精度,已批量用于大型离心式压缩机叶轮、重载发动机再制造毛坯检测。再制造零件局部损伤增材修复是再制造的核心环节,存在新旧材料相容性差、空间遮蔽可达性差、缺少定位基准等多重限制。以发动机废旧缸体再制造为例,国外一直采用镗缸恢复表面精度的方法,不仅改变了原始设计尺寸、破坏配副零件互换性,可修复的次数也有限。王海斗等^[92]研制了内孔旋转等离子喷涂技术,并解决了半封闭空间有限距离内喷涂热量累积、粉尘聚集等核心难题,目前已用于航空活塞发动机缸体,舰船柴油机缸体和石油装备泥浆泵缸体等内孔类零件的高质量再制造,平均寿命延长3倍。废旧零件经过表面增材修复再制造技术恢复原始尺寸的同时,也引入了复杂的表界面结构和微观缺陷。开展再制造产品寿命预测和服役状态监测是确保再制造产品安全完成下一轮服役的重要措施。Xing等^[93]采用等离子喷涂技术在再制造零件表面制备兼具耐磨抗疲劳和压电传感功能的陶瓷涂层,克服了传统外置传感器不能接近承载界面、破坏构件完整性等不足,目前已在实验室条件下实现了再制造发动机曲轴、压缩机主轴等运行中磨损和疲劳状态的在线监测。

4.3 装备维修与再制造的发展方向探讨

我国已成为全球制造大国,但是发展模式仍比较粗放,进一步发展面临能源、资源和环境的诸多压力。中国特色的装备维修与再制造始终以产品全寿命周期理论为指导,以恢复产品功能、提升装备性能为目标,以表面增材修复和性能强化为主要技术手段,以为经济和国防建设服务为主线,是延长装备使用寿命、提升装备服役性能、实现资源高效循环利用的最佳途径之一,具有显著的军民融合特色和突出的节能环保效益。

在政策支持、市场需求和社会责任等多因素推动和产、学、研、用各主体的共同努力下,装备维修与再制造的相关基础理论、技术标准、生产工艺和产业化推广均取得了显著成效。但我国的再制造产业尚处于起步阶段,从事高端装备再制

造的大型企业数量较少,企业中推广应用绿色清洗、无损检测、表面增材、寿命评估等关键技术的范围还有限,涉及再制造旧件回收、质量检测和流通的政策法规尚需完善^[94]。

在新时期,为推进我国装备维修和再制造工程的持续创新发展,以期为装备维修保障和经济、社会建设作出更大贡献,建议重点开展如下工作:

(1) 重视基础科学研究的支撑和引领作用,为再制造技术创新提供不竭动力。深入开展再制造全流程的基础科学问题研究。例如再制造毛坯和产品剩余寿命精准预测理论与方法,再制造微纳涂层材料宏微观构性关系,缺损零件局部增材区域嵌合键合机制和应力分布规律等等。

(2) 攻克高端智能装备再制造核心技术,进一步做大做强再制造产业。通过关键共性技术攻关,推动新一代信息技术、新生物学和再生学技术与现有再制造技术的深度融合,不仅实现再制造工艺过程及流程管理的信息化、智能化,还要赋予再制造产品结构健康智能管理能力,实现航空发动机、医疗影像设备等高端装备高质量再制造。

(3) 实施在役装备现场、主动、升级再制造,促进装备战斗力再生、降低装备全寿命周期费用。在军事领域,面向未来一体化联合作战,需大力提升复杂武器装备现场(战场)快速再制造和精确伴随保障能力。在民用领域,面向制造业转型升级,通过对在役老旧机电装备主动再制造,改善其信息化、智能化和环保水平,提升服役性能、降低运维成本。

(4) 着眼长远发展,全面协调推进技术创新、商业模式创新和人力资源储备。坚持创新引领,坚持绿色发展,坚持生产-服务并重,进一步释放中国特色再制造模式的节能环保潜能,推动服务型再制造快速发展。坚持学科的龙头地位,将再制造学科建设和人才培养放在首要位置,既要培养能把握规划再制造发展方向的领军人才,也要培养具有大国工匠素养的产业工人。

5 总结与展望

普通环境下的材料防护技术已经不能满足日益发展的海洋、航空、航天、核能行业高速、高温、高压、重载环境等苛刻环境工况下机械装备的需求,近年发展起来的石墨烯重防腐涂层、防

结冰涂层、自修复智能涂层等特种涂层技术解决了材料在海洋大气、极地环境、核电环境下的长期可靠防护难题;宽温域润滑、空间长寿命润滑、导电超润滑等涂层技术解决了材料在复杂空间、广速率、宽温域等环境下的服役难题;超硬薄膜、强韧一体化薄膜、表层硬化技术解决了材料在重载荷、高压等环境下的高承载耐磨需求。上述技术有效支撑了我国海洋、航空航天、船舶、核电等行业重大装备的研制与发展。

随着高端机械装备的发展,材料所面临的环境会愈加苛刻,未来材料表面防护技术将朝着适应复杂多变环境的多重功能一体化,以及超长寿命方向发展。这需要基础理论研究结合实验分析,从防护材料的设计、制备以及全寿命服役与失效机制方面,明确材料的构效关系、表界面作用等,从而达到材料长寿命可靠防护。此外,通过再制造技术,实施在役装备现场的维修升级,也是提升材料服役性能与寿命的重要发展方向之一。

参考文献

- [1] 庞留洋. 兵器装备常见腐蚀形态分析[J]. 国防技术基础, 2010(5): 56-60.
PANG L Y. Analysis of common corrosion forms of weapon equipment[J]. National Defense Technology Foundation, 2010(5): 56-60 (in Chinese).
- [2] 侯保荣, 张盾, 王鹏. 海洋腐蚀防护的现状与未来[J]. 中国科学院院刊, 2016(12): 48-53.
HOU B R, ZHANG D, WANG P. Current status and future of marine corrosion protection[J]. Chinese Journal of Academy of Sciences, 2016(12): 48-53 (in Chinese).
- [3] 郭泉忠, 杜克勤. 负向脉宽对 Mg-Gd-Y 合金微弧氧化膜致密性的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 25(2): 89-94.
GUO Q Z, DU K Q. Effect of negative pulse width on the densification of micro-arc oxidation film on Mg-Gd-Y Al-loy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 25(2): 89-94 (in Chinese).
- [4] LI L, LIU L L, LI X, et al. Enhanced tribocorrosion performance of Cr/GLC multilayered films for marine protective application[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018: acsami.8b00628.
- [5] JIANG Q, MIAO Q, LIANG W, et al. Corrosion behavior of arc sprayed Al-Zn-Si-RE coatings on mild steel in 3.5wt% NaCl solution[J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 115: 644-656.
- [6] BANERJEE I, PANGULE R C, KANE R S. Antifouling coatings: recent developments in the design of surfaces that prevent fouling by proteins, bacteria, and marine organisms[J].

- Advanced Materials*, 2011, 23(6): 690-718.
- [7] SADREDDINI S, AFSHAR A. Corrosion resistance enhancement of Ni-P-nano SiO₂ composite coatings on aluminum[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 303: 125-130.
- [8] CHEN S S, BROWN LOLA, LEVENDORFMARK, et al. Oxidation resistance of graphene-coated Cu and Cu/Ni alloy[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(2): 1321-1327.
- [9] PRASAI D, TUBERQUIA J, HARLR R, et al. Graphene: corrosion inhibiting coating[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(2): 1102-1108.
- [10] LIU S, GU L, ZHAO H C, et al. Corrosion resistance of graphene-reinforced waterborne epoxy coatings[J]. *Science & Technology*, 2015, 32(6): 1223-1230.
- [11] 常州君合科技有限公司. 无机防腐涂料及其制备方法和使用方法: 201410077551. 8[P]. 2014-06-11. Changzhou Junhe Technology Co., Ltd. Inorganic anticorrosive coating and preparation method and use method thereof: 201410077551. 8[P]. 2014-06-11. (in Chinese).
- [12] 沈海斌, 刘琼馨, 瞿研. 石墨烯在涂料领域中的应用[J]. *涂料技术与文摘*, 2014, 35(8): 20-22. SHEN H B, LIU Q X, YAN Y. The application of graphene in the field of coatings[J]. *Coating Technology and Abstracts*, 2014, 35(8): 20-22 (in Chinese).
- [13] HUANG M, YANG J. Salt spray and EIS studies on HDI microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(1): 168-175.
- [14] FALCÓN J M, OTUBO L M, AOKI I V. Highly ordered mesoporous silica loaded with dodecylamine for smart anti-corrosion coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 303: 319-329.
- [15] JIAO J, WANG H, GUO W, et al. In-situ confined growth of highly dispersed Ni nanoparticles into hierarchically yolk-shell Fe@SiO₂ structures as efficient catalysts based on a self-templating reduction strategy[J]. *Chemistry An Asian Journal*, 2016, 11(24): 3534-3540.
- [16] 周建龙, 李晓刚, 程学群, 等. 深海环境下金属及合金材料腐蚀研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2010, 22(1): 47-51. ZHOU J L, LI X G, CHENG X Q, et al. Research progress in corrosion of metals and alloy materials in deep sea environment[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2010, 22(1): 47-51 (in Chinese).
- [17] 侯健, 郭为民, 邓春龙. 深海环境因素对碳钢腐蚀行为的影响[J]. *装备环境工程*, 2008, 5(6): 82-84. HOU J, GUO W M, DENG C L. Influence of deep sea environmental factors on corrosion behavior of carbon steel[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, 5(6): 82-84 (in Chinese).
- [18] VENKATESAN R, VENKATASAMY M A, BHASKARAN T A, et al. Corrosion of ferrous alloys in deep sea environments[J]. *British Corrosion Journal*, 2002, 37(4): 257-266.
- [19] 刘莉. 深海环境下金属及防护涂层腐蚀失效行为研究[C]. 2018年全国腐蚀电化学及测试方法学术交流会论文集, 2018. LIU L. Study on corrosion failure behavior of metal and protective coatings in deep sea environment[C]. Proceedings of the National Symposium on Corrosion Electrochemistry and Test Methods, 2018 (in Chinese).
- [20] MEULER A J, MCKINLEY G H, COHEN R E. Exploiting topographical texture to impart icephobicity[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(12): 7048-7052.
- [21] AYRES J, SIMENDINGER W H, BALIK C M. Characterization of titanium alkoxide sol-gel systems designed for anti-icing coatings: II. mass loss kinetics[J]. *Journal of Coatings Technology & Research*, 2007, 4(4): 473-481.
- [22] Department of the Navy Office of Counsel. Erosion resistant anti-icing coatings: US20070254170A1[P]. 2007-11-01.
- [23] WANG H, HE G, TIAN Q. Effects of nano-fluorocarbon coating on icing[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(18): 7220-7224.
- [24] 许占显, 林为干. 军事装备腐蚀检测新技术及应用[J]. *新技术新工艺*, 2007(3): 100-103. XU Z X, LIN W Q. New technology and application of military equipment corrosion detection[J]. *New Technology & New Process*, 2007(3): 100-103 (in Chinese).
- [25] 马志宏, 汪浚. 砂尘环境中军用装备磨损腐蚀进展的研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2005, 17(2): 112-115. MA Z L, WANG W. Research on wear and corrosion progress of military equipment in sand dust environment[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2005, 17(2): 112-115 (in Chinese).
- [26] 周如东. 飞机蒙皮表面处理和涂层选择及涂装工艺[J]. *涂层与防护*, 2018, 39(6): 51-54. ZHOU R D. Surface treatment and coating selection and coating process of aircraft skins[J]. *Coatings and Protection*, 2018, 39(6): 51-54 (in Chinese).
- [27] 崔凯波, 王向东, 熊超, 等. 火炮驻退机节制环耐磨涂层组织及抗冲蚀性能[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1013-1022. CUI K B, WANG X D, XIONG C, et al. Microstructure and erosion resistance of wear-resistant coating of artillery retaining ring in artillery retaining[J]. *Explosion and Shock Wave*, 2018, 38(5): 1013-1022 (in Chinese).
- [28] WANG X H, ZHOU Y C. Solid-liquid reaction synthesis and simultaneous densification of polycrystalline Ti₂AlC[J]. *Zeitschrift Fur Metallkunde*, 2002, 93: 66-71.
- [29] BARSOUM M W, EL-RAGHY T, ALI M. Processing and characterization of Ti₂AlC, Ti₂AlN, and Ti₂AlC_{0.5}N_{0.5}[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2000, 31(7):

- 1857-1865.
- [30] BARSOUM M W, SALAMA I, EL-RAGHY T, et al. Thermal and electrical properties of Nb₂AlC, (Ti, Nb)₂AlC and Ti₂AlC[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2002, 33(9): 2775-2779.
- [31] FRODELIUS J, SONESTEDT M, BJÖRKLUND S, et al. Ti₂AlC coatings deposited by high velocity oxy-fuel spraying[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(24): 5976-5981.
- [32] ZHANG Z, SUO H L, CHAI J, et al. Plasma spray of Ti₂AlC MAX phase powders: effects of process parameters on coatings' properties[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 325.
- [33] TANG C, KLIMENKOV M, JAENTSCH U. Synthesis and characterization of Ti₂AlC coatings by magnetron sputtering from three elemental targets and ex-situ annealing[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 309: 445-455.
- [34] MAIER B R, GARCIA-DIAZ B L, HAUCH B, et al. Cold spray deposition of Ti₂AlC coatings for improved nuclear fuel cladding[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 466: 712-717.
- [35] SÁNCHEZ-LÓPEZ J C, FERNÁNDEZ A. Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 2008: 311-338.
- [36] DIMIGEN H, KIAGES C P. Microstructure and wear behavior of metal-containing diamond-like coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1991, 49: 543-547.
- [37] VOEVODIN A A, ZABINSKI J S. Supertough wear-resistant coatings with 'chameleon' surface adaptation[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 370: 223-231.
- [38] VOEVODIN A A, ZABINSKI J. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications[J]. *Composite Science and Technology*, 2005, 5: 741-748.
- [39] 薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
XUE Q J, WANG L P. Diamond-like carbon-based film materials, science press[M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese).
- [40] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. *中国表面工程*, 2011, 24(2): 1-12.
XU B S, TAN J, CHEN J M. Science and technology development in surface engineering[J]. *China Surface Engineering*, 2011, 24(2): 1-12 (in Chinese).
- [41] DAI W, KE P L, MOON M W, et al. Investigation of the microstructure, mechanical properties and tribological behaviors of Ti-containing diamond-like carbon films fabricated by a hybrid ion beam method[J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520: 6057-6063.
- [42] WU Y X, LI H X, JI L, et al. A long-lifetime MoS₂/a-C: H nanoscale multilayer film with low internal stress[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 236: 438-443.
- [43] DING C H, LI P L, RAN G, et al. Tribological property of self-lubricating PM304 composite[J]. *Wear*, 2007, 262(5-6): 575-81.
- [44] DELLACORTE C, EDMONDS B J. NASA PS400: A new high temperature solid lubricant coating for high temperature wear applications[R]. NASA TM-2009-215678, 2009.
- [45] KONG L Q, ZHU S Y, BI Q L, et al. Effect of Mo and Ag on the friction and wear behavior of ZrO₂(Y₂O₃)-Ag-CaF₂-Mo composites from 20 °C to 1000 °C[J]. *Tribology International*, 2014, 78: 7-13.
- [46] AOUDI S M, SINGH D P, STONE D S, et al. Adaptive VN/Ag nanocomposite coatings with lubricious behavior from 25 to 1000 °C[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(16): 5326-5331.
- [47] HE N R, LI H X, JI L, ET al. Reusable chromium oxide coating with lubricating behavior from 25 to 1000 °C due to self-assembled mesh-like surface structure[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 321: 300-308.
- [48] ROBERTS EW, EIDEN M. A space tribology handbook[M]. Netherlands: European Space Agency, 1998: 65-69.
- [49] ARGIBAY N, SAWYER W G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density[J]. *Wear*, 2012: 229-237.
- [50] WILLIAM R, JONES J R, JANSEN M J. Space tribology[D]. New York: NASA/TM-2000-209924, 2003, 3.
- [51] 王新平. 空间滑动电接触材料的性能及其寿命增长研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
WANG X P, Research on the performance and life growth of space sliding electrical contact materials, [D]. Changsha: Central South University, 2012 (in Chinese).
- [52] DYCK T, BUND A. An adaptation of the arc hard equation for electrical contacts with thin coatings[J]. *Tribology International*, 2016, 102: 1-9.
- [53] BERMAN D, DESHMUKH S A, SUBRAMANIAN K R S, et al. Macroscale superlubricity enabled by graphene nanoscroll formation[J]. *Science*, 2015, 110: 126.
- [54] SONG H, JI L, LI H X, et al. Self-forming oriented layer slip and macroscale super-low friction of graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 073101.
- [55] 吴运新, 汪复兴, 程荫芊, 等. 高温气冷反应堆中的摩擦磨损及表面涂层技术的应用[J]. *表面工程*, 1994, 1: 11-15.
WU Y X, WANG F X, CHENG Y X, et al. Application of friction and wear and surface coating technology in high temperature gas-cooled reactor[J]. *Surface Engineering*, 1994, 1: 11-15 (in Chinese).
- [56] HERTZ D. Approach to analysis of wear mechanisms in the case of RCCAs and CRDM latch arms: From observation to understanding[J]. *Wear*, 2006, 261: 1024-1031.

- [57] 吴元强, 盛选禹, 汪复兴, 等. 高温气冷堆氦气气氛下的固体润滑技术[J]. *核动力工程*, 2001, 22: 460-464.
WU Y Q, SHENG X Y, WANG F X, et al. Solid lubrication technology in high temperature gas-cooled helium gas environment[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2001, 22: 460-464 (in Chinese).
- [58] 顾卿, 姜世杭, 褚尧. 磁控溅射氮化铬和氮化钛薄膜的性能[J]. *电镀与涂饰*, 2012, 30(12): 22-25.
GU Q, JIANG S H, CHU Y. Magnetron sputtering of chromium nitride and titanium nitride film properties[J]. *Plating and finishing*, 2012, 30(12): 22-25 (in Chinese).
- [59] LI Z C, WANG Y X, CHENG X Y, et al. Growing ultrathick crn coating to achieve high load-bearing capacity and good tribological property[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10: 2965-2975.
- [60] KIM J C, KIM J J, CHOI J Y, et al. Control of columnar-to-equiaxed transition in continuous casting of 16% Cr stainless steel[J]. *La Metallurgia Italians*, 2009(9): 43-48.
- [61] TAKEUCHI H, MORI H, IKEHARA Y, et al. The effects of electromagnetic stirring on solidification structure of continuously cast SUS340 stainless steel slabs[J]. *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1981, 21(2): 109-116.
- [62] 池成忠, 徐俊波, 陈良贤, 等. 非对称双极脉冲反应磁控溅射制备 TiN/NbN 多层膜[J]. *材料工程*, 2012(7): 92-96.
CHI C Z, XU J B, CHEN L X, et al. Preparation of TiN/NbN multilayer films by asymmetric bipolar pulse reactive magnetron sputtering[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012(7): 92-96 (in Chinese).
- [63] 宁波材料技术与工程研究所. 宁波材料所在 CVD 大块单晶金刚石合成技术方面取得进展[J]. *超硬材料工程*, 2014(4): 61.
Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering. Progress of CVD bulk single crystal diamond synthesis technology by ningbo institute of materials technology and engineering[J]. *Superhard Material Engineering*, 2014(4): 61 (in Chinese).
- [64] KYOHEI HORITA, HIROMI YOSHIMURA, SYUNSUKE AIKAWA, et al. Micro drilling of printed circuit board with DLC coated drill[C]. 2011 JSPE Autumn Conference, 2011 (in Japanese).
- [65] YANG W, KE P L, FANG Y, ZHENG H, et al. Microstructure and properties of duplex (Ti:N)-DLC/MAO coating on magnesium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 270: 519-525.
- [66] LI X W, LI L, ZHANG D, et al. Ab initio study of interfacial structure transformation of amorphous carbon catalyzed by Ti, Cr, and W transition layers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9: 41115-41119.
- [67] DAMASCENO J C, CAMARGO S S, FREIRE F L, et al. Deposition of Si-DLC films with high hardness, low stress and high deposition rates[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2000, 133: 247-252.
- [68] 王锐坤. 表面喷丸细化对 Super304H 不锈钢晶间腐蚀敏感性和脱敏特性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
WANG R K. Effect of surface grain refining by shot peening on the intergranular corrosion susceptibility and desensitization characteristics of Super304H stainless steel[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [69] 李钱瑞. 爆破阀拉力螺栓的表面超声冲击强化[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LI Q R. The surface strengthening of explosion valve bolt by ultrasonic impact treatment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [70] 王健波, 唐丽娜, 李辰旸. 环形零件局部激光表面淬火[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 106-108.
WANG J B, TANG L N, LI C Y. Local laser surface quenching of annular parts[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(4): 106-108 (in Chinese).
- [71] 唐丽娜, 郭立杰, 张天德. 航天典型材料与构件的热处理技术研究与应用[J]. *金属热处理*, 2018, 43(1): 1-5.
TANG L N, GUO L J, ZHANG T D. Research and application of heat treatment technology for aerospace materials and components[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(1): 1-5 (in Chinese).
- [72] 高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响[J]. *金属学报*, 2016, 52(8): 915-922.
GAO Y K. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy[J]. *ACTA Metallurgica Sinica*, 2016, 52(8): 915-922 (in Chinese).
- [73] 唐丽娜, 吴国华. TC4 钛合金等离子体渗氮层组织结构与耐磨性[C]. 上海: 中国航天科技集团公司 2016 年热处理工艺技术中心交流会论文集, 2016: 42-48.
TANG L N, WU G H. Microstructure and wear resistance of plasma nitriding layer of TC4 titanium alloy[C]. China Aerospace Science and Technology Corporation, 2016 Proceedings of the Heat Treatment Technology Conference. Shanghai, 2016: 42-48 (in Chinese).
- [74] 陈宇海. 钛及钛合金脉冲等离子体爆炸表面改性研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
CHEN Y H. Surface modification of titanium and titanium alloy by pulsed plasma detonation technology[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019 (in Chinese).
- [75] 刘洪喜, 蒋业华, 等. TC4 合金表面全方位离子注入 Ag 的耐摩擦磨损和抗腐蚀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009(12): 2127-2130.
LIU H X, JIANG Y H et al. Frictional wear resistance and

- corrosion resistance of Ag/Ti-6Al-4V alloy system treated by plasma immersion ion implantation technique[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009(12): 2127-2130 (in Chinese).
- [76] 王宝婷. 钛合金表面微弧氧化强流脉冲电子束复合处理技术[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
WANG B T. Composite treatment of micro-arc oxidation and high current pulsed electron beam on titanium alloy[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2017.
- [77] 张晓琳, 张可敏, 马金鑫, 等. 铝合金表面激光熔覆陶瓷复合涂层研究现状[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(20): 23-30.
ZHANG X L, ZHANG K M, MA J X, et al. Research status of ceramic composite coating on aluminium alloy surface by laser cladding[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(20): 23-30 (in Chinese).
- [78] 李琦, 刘洪喜, 张晓, 等. 铝合金表面激光熔覆 NiCrAl/TiC 复合涂层的磨损行为和耐蚀性能[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(11): 2805-2812.
LI Q, LIU H X, ZHANG X, et al. Wear behavior and corrosion resistance of laser clad NiCrAl/TiC composite coating on aluminum alloy surface[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(11): 2805-2812 (in Chinese).
- [79] 张志超. 铝合金表面激光熔覆 Al₂O₃ 涂层工艺研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2014.
ZHANG Z C. Study on process conditions of laser cladding of Al₂O₃ coatings on aluminium alloy[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [80] 刘俊秀. 铝合金钻杆材料腐蚀机理及表面防护研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
LIU J X. Research on corrosion mechanism and surface protection of aluminum alloy drill pipe materials[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017 (in Chinese).
- [81] 文磊. LY12CZ 铝合金表面纳米化-微弧氧化复合改性层组织结构与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
WEN L. Microstructure and properties of LY12CZ aluminum alloy surface nano-micro arc oxidation composite modified layer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [82] 徐滨士. 表面工程与维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
XU B S. Surface engineering and maintenance[M]. Beijing: China Machine Press, 1996 (in Chinese).
- [83] WANG H D, MA G Z, XU B S, et al. Design and application of friction pair surface modification coating for remanufacturing[J]. *Friction*, 2017, 5(3): 351-360.
- [84] 徐滨士, 马世宁, 刘家浚. 我国设备维修表面工程的发展[J]. *设备管理与维修*, 1998(2): 16-19.
- XU B S, MA S N, LIU J J. The development of equipment maintenance surface engineering in China[J]. *Equipment Management and Maintenance*, 1998(2): 16-19 (in Chinese).
- [85] 徐滨士, 梁秀兵. 发展高技术维修, 建设“预知维修”方式[C]. 中国机械工程学会 2003 年年会论文集: 426-428.
XU B S, LIANG X B. Development high-tech maintenance and construct predicted maintenance[C]. Proceedings of Annual meeting of Chinese Mechanical Engineering Society, 2003, 426-428 (in Chinese).
- [86] 徐滨士. 扩大军地交流, 共同促进维修事业发展[J]. *中国设备工程*, 1992, 4: 4-5.
XU B S. Expand military-to-society communications and jointly promote the development of repair and maintenance[J]. *China Plant Engineering*, 1992, 4: 4-5 (in Chinese).
- [87] 徐滨士. 徐滨士院士教学、科研文选[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
XU B S. Selection from Academician Xu bin-shi's Achievements[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [88] XU B S, WANG H D, MA G Z. Advanced surface engineering technologies for remanufacturing forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S1): 001-005.
- [89] 徐滨士. 再制造与循环经济[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
XU B S. Remanufacture and recycling economy[M]. Beijing: Science Press, 2007(in Chinese).
- [90] 徐滨士. 新时代中国特色再制造的创新发展[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(1): 1-6.
XU B S. Innovation and development of remanufacturing with Chinese characteristics for a new era[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(1): 1-6 (in Chinese).
- [91] DONG L H, XU B S, DONG S Y, et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(4): 323-327.
- [92] 王海斗, 何鹏飞, 陈书赢, 等. 内孔热喷涂技术的研究现状与展望[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(5): 14-38.
WANGHD, HE P F, CHEN S Y, et al. Research and prospect on internal thermal spraying techniques[J]. *China Surface eEngineering*, 2018, 31(5): 14-38 (in Chinese).
- [93] XING Z G, WANG H D, XU B S, et al. Structural integrity and ferroelectric-piezoelectric properties of PbTiO₃ coating prepared via supersonic plasma spraying[J]. *Materials & Design*, 2014, 62: 57-63.
- [94] 徐滨士, 刘世参, 史佩京. 再制造工程的发展及推进产业化中的前沿问题[J]. *中国表面工程*, 2008, 21(1): 1-5.
XU B S, LIU S C, SHI P J. The frontier issues of development and industrialization of remanufacturing engineering[J]. *China Surface Engineering*, 2008, 21(1): 1-5 (in Chinese).