

等离子束表面改性技术 在金属材料领域的研究现状与应用

张健^{1, 2}, 李尚^{1, 2}, 潘万枫^{1, 2}, 董选普^{1, 2}, 曹华堂^{1, 2}

1. 材料成形与模具技术全国重点实验 湖北武汉 430074

2. 华中科技大学材料科学与工程学院 湖北武汉 430074

摘要: 随着现代工业技术的迅猛发展,对金属材料表面性能的要求日益提高,传统材料逐渐难以满足高性能零部件的应用需求。等离子束表面改性技术作为金属材料表面工程领域的核心技术之一,通过高能等离子体与金属基体的相互作用,可实现对材料表面性能的精准调控,在材料工程领域受到广泛关注。通过聚焦等离子束表面改性技术的研究现状及其应用,系统综述了该技术的国内外研究进展、主要分类与特点、作用机理、典型应用场景,以及未来发展趋势等。虽然等离子束表面改性技术在材料硬度、耐腐蚀、抗氧化及抗磨损等性能提升中展示出显著优势,但该技术仍面临着设备成本高、工艺稳定性不足及改性层结合力有限等关键挑战。由此,总结了等离子束表面改性技术在人工智能工艺优化、智能化控制系统、复合改性技术融合,以及新型材料适配等方面的未来研究方向。

关键词: 等离子束;表面改性;金属材料;工业应用;未来发展

Research status and application of plasma beam surface modification technology in the field of metallic materials

ZHANG Jian^{1, 2}, LI Shang^{1, 2}, PAN Wanfeng^{1, 2}, DONG Xuanpu^{1, 2}, CAO Huatang^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract: With the rapid advancement of modern industrial technologies, the demand for superior surface properties of metallic materials has significantly increased, while conventional materials increasingly struggle to meet the requirements for high-performance components. As one of the core technologies in the field of metallic surface engineering, plasma beam surface modification technology enables precise modulation of material surface properties through the interaction between high-energy plasma and metallic substrates, garnering extensive attention in materials engineering. This review focuses on the current research status and applications of plasma beam surface modification technology, systematically summarizing the domestic and international research progress, main classifications, characteristics, underlying strengthening mechanisms, typical application scenarios, as well as future

基金项目: 湖北省自然科学基金资助 (No. 2022CFB770)。

通信作者: 曹华堂, 教授, 博士生导师, 主要从事高能束表面改性、涂层技术、金属凝固、铸造工艺与3D打印等研究, E-mail: caoht@hust.edu.cn。

development trends. Although plasma beam surface modification technology demonstrates remarkable advantages in enhancing material hardness, corrosion resistance, oxidation resistance and wear resistance, it still faces critical challenges including high equipment costs, insufficient process stability, and limited adhesion strength of modified layers to the substrates. Consequently, this review summarizes the future research directions of plasma beam surface modification technology in artificial intelligence-driven process optimization, intelligent control systems, hybrid modification techniques, and adaptation to novel materials.

Keywords: plasma beam; surface modification; metallic materials; industrial application; future development

1 序言

金属材料作为现代工业的基石，广泛应用于航空航天、汽车制造、机械加工及电子器件等众多领域，其性能优劣直接关乎产品质量与使用寿命。然而，在复杂多变的使用环境下，金属材料的表面性能往往存在局限性^[1]，如易磨损、耐蚀性差、表面硬度不足，以及生物相容性欠佳等问题，这些缺陷极大地制约了金属材料的进一步应用。为满足日益苛刻的应用需求，表面改性技术应运而生，以提升金属材料的表面性能成为材料科学领域的研究热点^[2]。高能束表面改性技术通过高能量密度束流为热源作用于材料表面，改变其成分、组织或结构，从而优化材料性能，其主要分为激光束、电子束和离子束三大类（见图1）。作为高能束成形的一个重要分支，等离子束表面改性技术利用高能等离子束对材料表面进行物理和化学改性，在金属材料表面改性领域中展现出巨大的应用潜力^[3]。

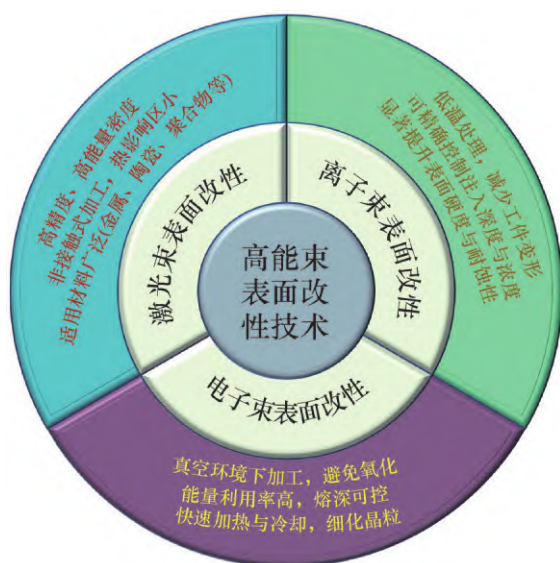


图1 高能束表面改性技术分类及特点

等离子表面改性技术起源于20世纪70年代的等离子喷涂，80年代后随着束流精确控制技术的发展，逐渐拓展至纳米复合涂层制备，近年结合增材制造与人工智能优化参数，进一步推动了其在航空航天、生物医学等领域的应用。高能束成形是其核心环节，它通过控制等离子束的参数（如尺寸、强度和空间分布）来实现高度目标化的表面改性，是一种通过高能等离子束轰击材料表面，引发熔凝、合金化或相变，从而提升表面硬度、耐磨性、耐蚀性及疲劳性能的高效方法^[4]。该技术具有能量密度高（可达 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ ）、热影响区小、加工速度快的特点，且成本低于传统的激光技术，可通过调整束流参数（如功率、扫描速度）实现梯度改性，适用于高温合金、钛合金、铝合金、钢等多种材料。

在提升金属材料性能方面，等离子表面改性技术具有显著优势：一方面，它属于表面处理技术，主要作用于材料表层，对基体材料的固有性能影响极小，能够在保留金属材料整体力学性能的基础上，精准优化表面特性；另一方面，该技术具有高效、精准、环保等特点，处理过程可精确控制，能够实现微观层面的精细调控，且相较于传统表面处理工艺，能耗更低、污染更少，也更符合现代工业的可持续发展理念。在金属表面改性工程中，通过调整气体流量、脉冲频率、功率输入和载气类型等参数，可实现精确的等离子束整形，从而改善表面涂层的附着力或增强耐蚀性。

2 等离子束表面改性技术原理及分类

等离子束表面改性主要是通过高能等离子束在部件表面形成具有特定成分或功能梯度的合金化层，从而实现对金属材料表面的综合强化，以提升其硬度、耐磨性、耐蚀性和抗氧化性等性能^[5]。该

技术的核心在于等离子体的形成及其与金属材料表面的相互作用，等离子体被认为是物质的第四种聚集状态，其工作原理主要为离子轰击^[6]和离子注入^[7]两种机制。离子轰击是通过高能离子束对金属材料表面进行高速撞击，从而改变材料表面的物理和化学性质；而离子注入是将高能离子注入金属材料表面，使其与金属表面原子发生化学反应，从而改变金属表面的化学成分和物理结构，等离子体表面改性的原理如图2所示。

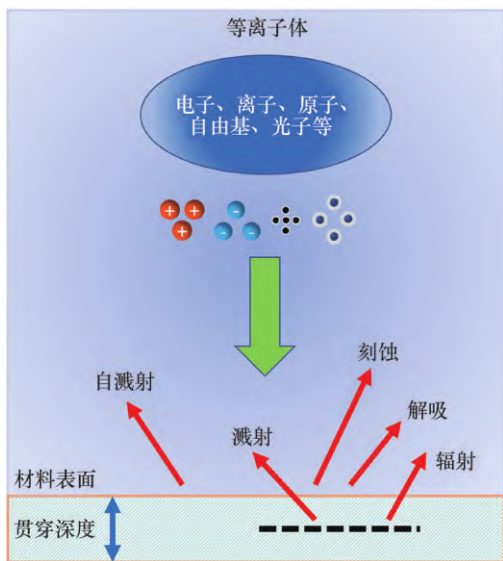


图2 等离子体表面改性原理

当等离子束定向冲击金属材料表面时，高能粒子与金属原子频繁碰撞而发生物理或化学反应。根据电子温度与气体温度（离子和中性粒子）的关系，等离子体通常可分为高温等离子体（大于 10^6K ）和低温等离子体（ $10^3\sim 10^5\text{K}$ ）。其中，低温等离子体又可分为热等离子体和冷等离子体两大类^[8]，两者在金属表面改性中的对比见表1。热等离子体可通过电弧放电、高频电磁感应、激光等方式产生，其温度高达数千至数万摄氏度，具有高温、高电离度、高能量密度和热平衡状态的特点，能够对材料表面产生显著的热效应，适用于高能量材料处理。在金属材料表面改性中，热等离子体可用来进行表面合金化、熔覆、喷焊、渗碳或渗氮等处理，实现材料表面性能的提升。冷等离子体可通过射频、微波、辉光放电和电晕放电等方式产生，其温度较低，一般在室温至数百摄氏度之间，具有高化学活性、低电离度、低热效应和非平衡状态的特

点，适用于对热敏感的金属材料表面改性。相比之下，冷等离子体具有典型的非平衡态特征，可用来进行表面刻蚀、活化、辅助化学气相沉积、接枝改性等处理，从而实现金属材料的表面功能化、活化和改性，且不会对基体造成严重热影响。

表1 热等离子体与冷等离子体在金属表面改性中的对比

参数	热等离子体	冷等离子体
温度	高温（ $>5000\text{K}$ ）	低温（室温~几百K）
电离度	高（接近100%）	低（ $<1\%$ ）
热影响	强，可能改变基材	低，不影响基材
主要作用	表面熔融、重熔、涂层沉积	表面清洁、活化、功能化
典型应用	等离子体喷涂、等离子弧重熔、渗氮	辅助化学气相沉积、表面活化、等离子体蚀刻
适用材料	高温耐受材料（如钛合金、不锈钢等）	需精细处理的金属（如电子元件、贵金属等）

一方面，粒子携带的能量足以克服金属原子间的化学键能，使表面原子挣脱原有晶格束缚，形成大量空位、间隙原子等缺陷，促使表面原子活跃度大幅提升；另一方面，等离子体中的活性粒子，如氧离子、氮离子等，会与金属表面原子发生化学反应，形成新的化合物相，如金属氧化物、氮化物等。这些新生相不仅改变了材料表面的化学成分，其晶体结构往往具有更高的硬度、耐磨性及耐蚀性，从而优化材料表面性能^[9]。与此同时，等离子体中的电子还可激发金属表面原子的外层电子，使其跃迁到高能级轨道，形成不稳定的激发态。激发态原子倾向于与周围粒子发生反应，从而进一步促进了化学键的断裂与重组。部分化学键断裂后产生的自由基，具有极高的化学活性，能够引发一系列链式反应，会持续改变材料表面的微观结构与化学组成，甚至赋予材料特殊功能，如亲水性、生物相容性改善等^[10]，最终实现对金属材料表面性能的精准调控。

依据等离子体产生方式、应用方式、能量密度及作用温度等因素，等离子束表面改性技术可细分为多种类型，如图3所示。常见的有等离子体渗碳或氮化^[11-14]、等离子体喷涂^[15-17]、等离子体熔覆^[18, 19]、等离子体浸没离子注入^[20, 21]、等离子体电解氧化^[22, 23]、等离子体增强化学气相沉积^[24]或物理气相沉积^[25, 26]

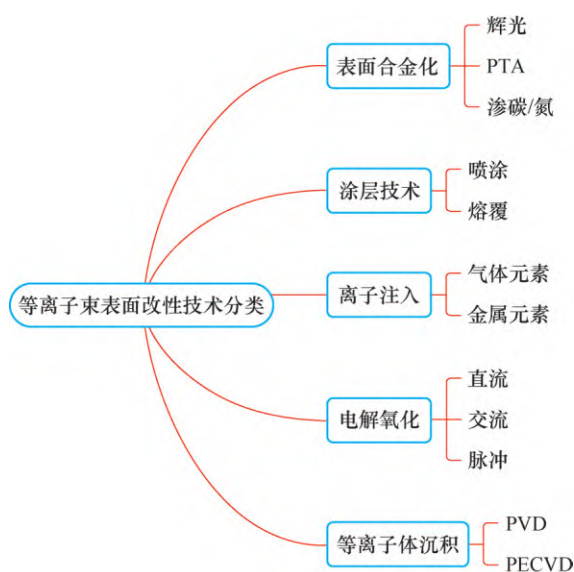


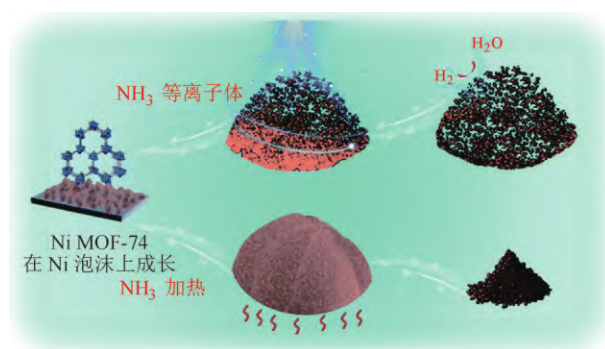
图3 等离子束表面改性技术分类

等。各类技术在工艺过程、改性效果上各有千秋，通过不同的机制和工艺，实现对金属材料表面的多

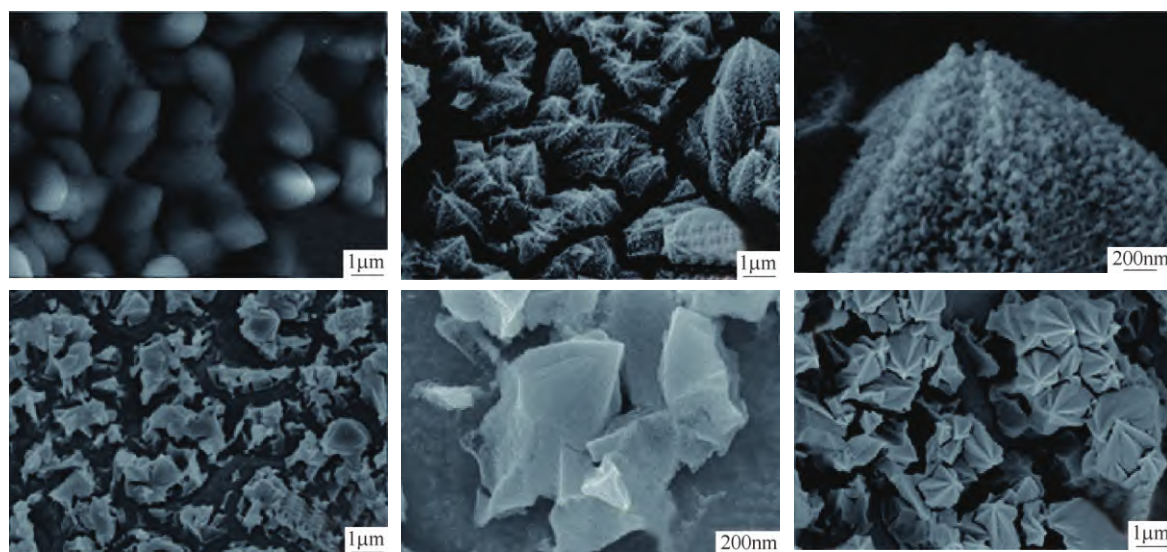
种改性效果，显著提升材料的综合性能，为满足不同领域、不同工况对金属材料表面性能的多样化需求提供了丰富选择。

3 等离子束表面改性技术国内外研究现状

鉴于金属材料应用的广泛性与表面改性需求的迫切性，等离子束表面改性技术在国内外的研究和应用也取得了显著进展^[27-30]。在国内，GUO等^[31]在国内率先开发了低温等离子体金属表面改性，采用低温 NH_3 等离子体处理Ni MOF-74，实现Ni纳米晶体的超细化并被氮掺杂碳层包裹（见图4），此独特的结构特征使其在HER反应中表现出卓越的性能，为工程化MOF衍生催化剂中的活性催化位点提供了新思路。球墨铸铁具有高强度、良好的韧性和铸造性，但其表面硬度和摩擦性能较差。CAO等^[32]研究了等离子转移弧（PTA）表面合金化工艺在球墨铸铁基材上制备的高钒分层复合涂层的微观结构和力



a) 等离子改性示意

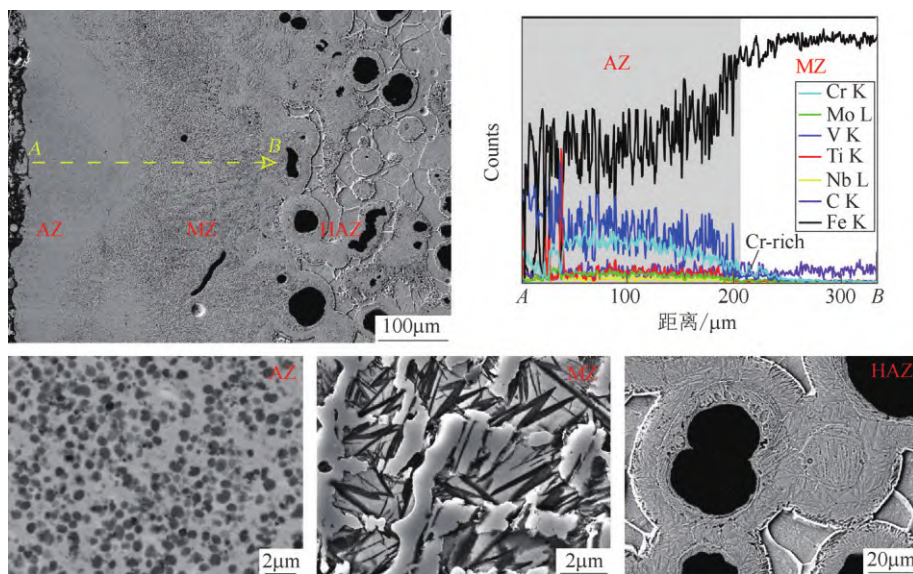


b) 改性后表面形貌

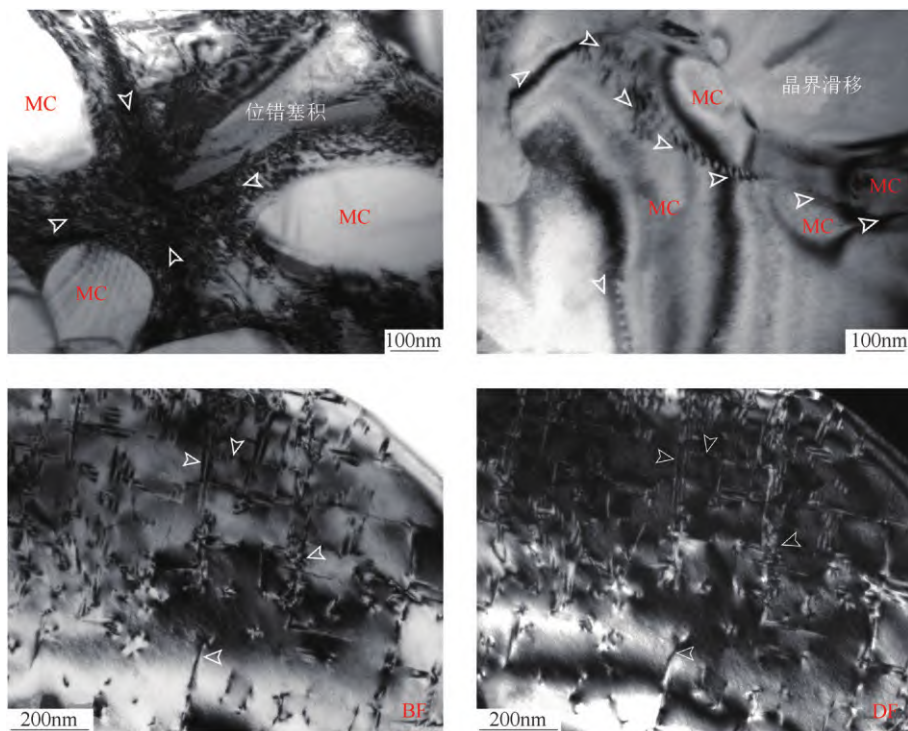
图4 低温 NH_3 等离子体改性Ni MOF-74提高催化性能^[31]

学性能，揭示了强度-韧性组合源于异质形核和快速凝固速率共同激活的内在强化机制（见图5）。该涂层合金化区的硬度达到 (9.6 ± 1.0) GPa，约为球墨铸铁基材的4倍，为制备高强度-延展性-韧性组合提供了一种新的途径。此外，还通过等离子转移电弧增材制造（PTAAM）工艺制备高钒高速钢（HVVHSS）涂层^[33]。结果显示，HVVHSS涂层中含有大量亚微米级球形碳化物，其微悬臂在弯曲过程

中显示出较高的能量吸收能力，具有比中间熔化区更高的韧性（见图6）。Fe-Co-Mo合金具有优异的高温硬度和韧性，被认为是潜在的高温耐磨涂层材料，但传统Fe基合金涂层因碳化物的聚集和生长导致高温硬度和耐磨性不足。XIE等^[34]通过等离子熔覆技术在40Cr钢上制备的Fe-Co-Mo合金涂层，并对其微观结构、相组成、显微硬度、耐热性和高温耐磨性进行了研究。该熔覆涂层兼具高温耐磨性和优

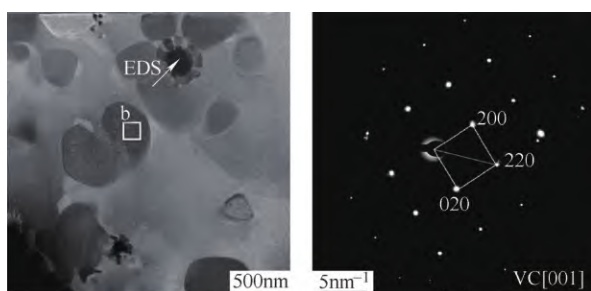


a) PTA涂层横截面SEM图、EDS扫描及微观结构

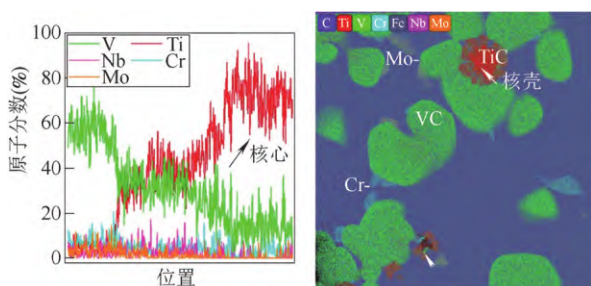


b) 硬度提升和增韧机制

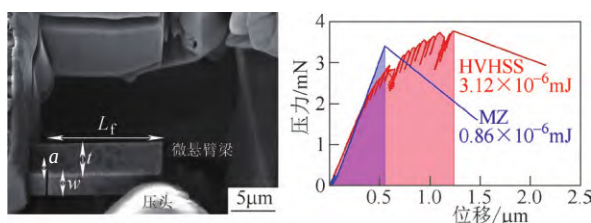
图5 等离子转移弧合金化高钒高速钢梯度涂层^[32]



a) 铁基体中纳米级球形碳化物的高角度环形暗场扫描TEM和VC碳化物的选定区域衍射图案



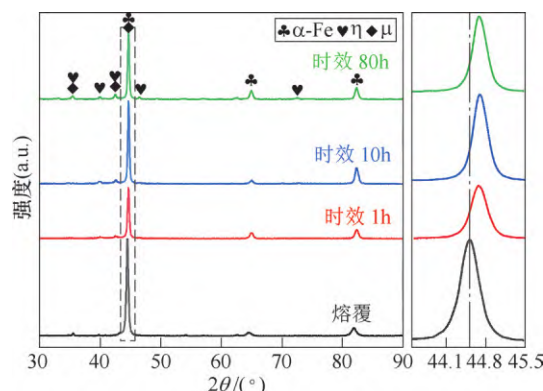
b) 线性及叠加STEM-EDS映射显示出核壳结构和TiC→MC→Cr/Mo多种碳化物非均匀体系



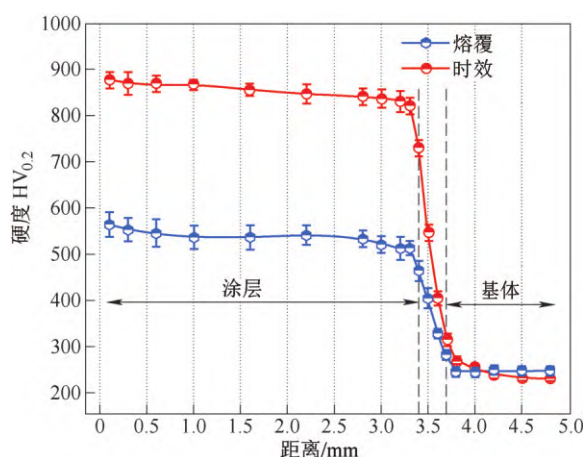
c) FIB切口微悬臂原位弯曲图和高钒高速钢涂层及熔覆区的典型微悬臂梁弯曲诱导载荷-位移曲线

图6 等离子转移电弧增材制造制备高钒高速钢涂层^[33]

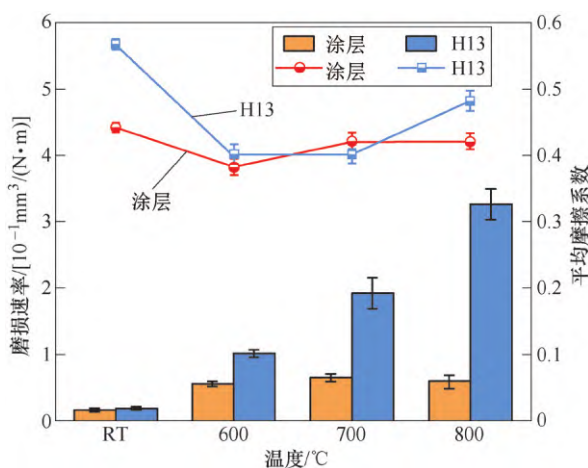
异韧性，为其在高温耐磨条件下的应用提供了工程价值。涂层与基体具有良好的冶金结合，其微观结构主要由 α -Fe基体和网状增强相(μ 相和 η 相)组成(见图7a)。涂层经过600℃时效处理后的平均显微硬度达到849HV0.2,是基体的3.5倍(见图7b),且在600℃和700℃长时间回火后仍保持较高的显微硬度;涂层在高温下的磨损率显著低于H13热作模具钢,800℃时的磨损率仅为H13的17%(见图7c)。为提升航天飞行器热端部件的承温能力,李春等^[35]研究了等离子喷涂钴酸钨(GZO)热障涂层表面涂覆TL-43三防漆的附着性及隔热性能,并详细分析高温高热环境下GZO+TL-43复合涂层的热导率变化趋势和性能影响机制。试验结果表明,GZO涂层在等离子焰中熔融良好,呈典型的层状结构,增加喷涂距离可以降低GZO涂层的表面粗糙度和细小粒



a) 600℃下熔覆和时效涂层的XRD图谱



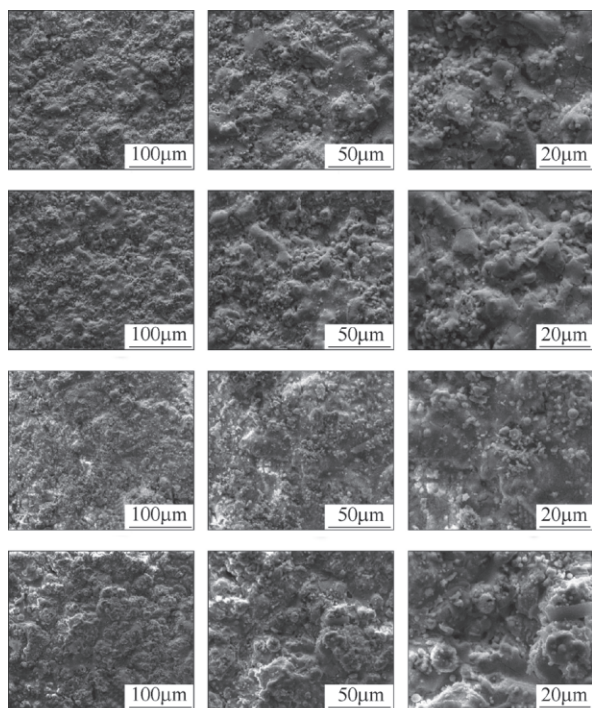
b) 涂层显微硬度分布



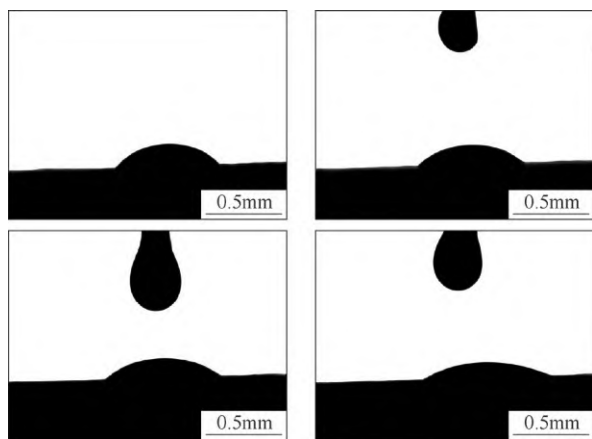
c) 不同温度下的磨损率和平均摩擦系数

图7 等离子熔覆技术制备高温耐磨Fe-Co-Mo合金涂层^[34]

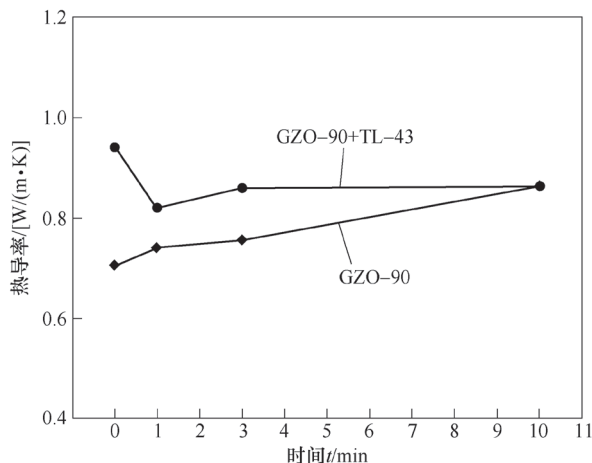
子数量,并提高涂层的致密度(见图8a)。随喷涂距离的增大,TL-43的接触角从51.5°降低至37.8°(见图8b),展现出良好的润湿性和铺展性。此外,GZO+TL-43复合涂层具有优异的附着力,在不同工艺条件下均可达到0级,其热导率在制备态下达到0.94W/(m·K),比单一GZO-90高出32%(见图8c)。



a) 制备态下GZO和YSZ热障涂层表面的SEM图



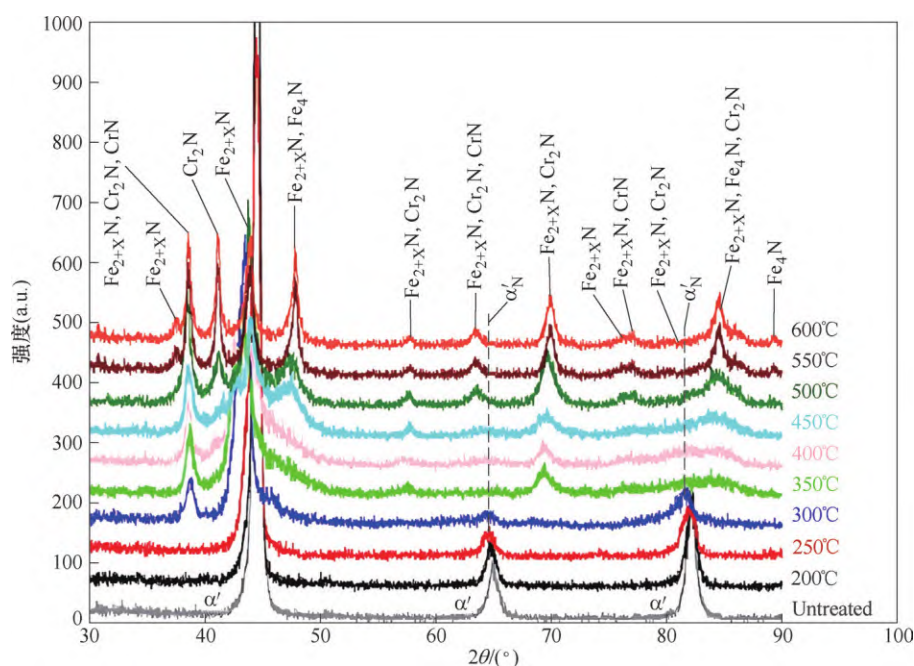
b) TL-43三防漆在GZO和YSZ热障涂层上的润湿效果



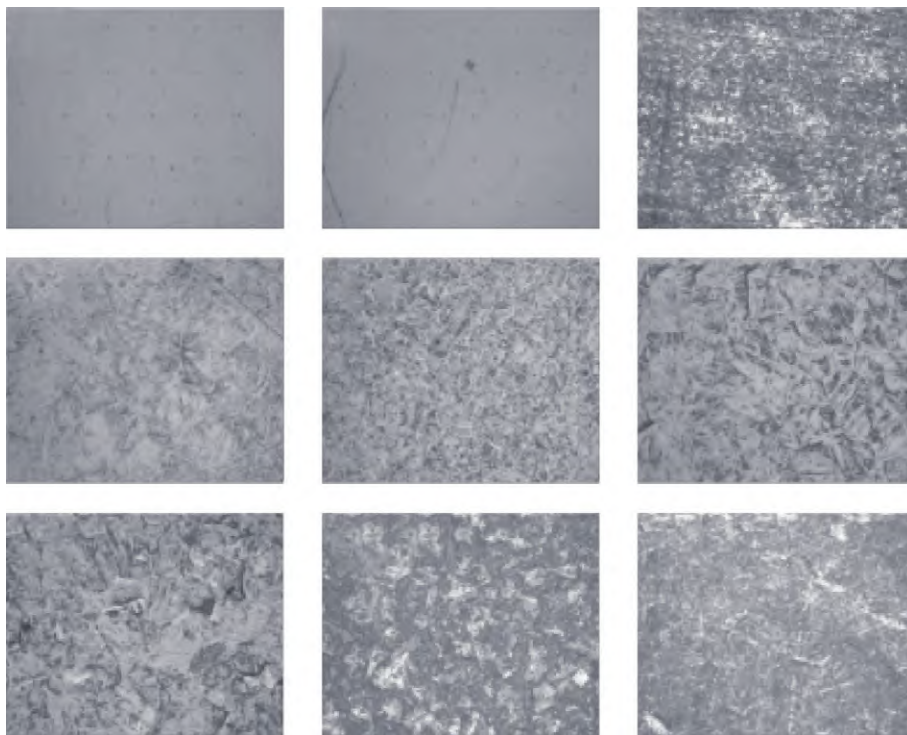
c) 不同涂层室温热扩散系数随热暴露时间的变化趋势

图8 等离子喷涂制备GZO和YSZ热障涂层^[35]

在国外,美国、欧洲和日本等国家在这一领域的研究起步较早,技术相对成熟。SCHEUER等^[36]研究了超低温至高温等离子体辅助渗氮处理对马氏体不锈钢的影响,尤其是AISI 420不锈钢在不同温度下渗氮层相组成和性能的关系,为马氏体不锈钢的低温氮化处理提供了新视角(见图9a)。研究表明,在超低温渗氮条件下渗氮层主要由N扩展马氏体组成;在低温渗氮条件下,渗氮层由N扩展马氏体和 $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}$ 相组成;在高温渗氮条件下,渗氮层中出现铬氮化物相,导致渗氮层变厚且硬度增加(见图9b)。同时,在不同温度下的渗氮层表现出不同的生长机制,超低温和低温渗氮条件下由高扩散路径控制,高温渗氮条件下由体积扩散控制。因增材制造固有的阶梯效应,导致其制造的部件表面粗糙度和力学性能各向异性较差。CHARI等^[37]通过等离子束重熔(PBR)技术改善SS316L不锈钢的表面性能(见图10a),并探讨了其在增材制造中提高表面粗糙度和微观硬度的应用。PBR技术能够有效降低表面粗糙度值(降低60%),提高微观硬度(提升75%)和增强晶粒细化程度,且该过程在开放大气中进行,是一种高效、低成本的增材制造后处理技术,如图10b、c所示。此外,还通过调整等离子束功率和扫描速度来优化PBR工艺^[38],以改善SS316L的表面质量和力学性能,并利用有限元模拟分析了温度分布和热处理效应区(HTEZ)的长度。结果表明,降低扫描速度会增加HTEZ的长度(见图10d),从而增强热应力缓解效果。选择性激光熔化(SLM)制造的马氏体时效钢在耐磨和耐腐蚀性能方面存在不足,GODEC等^[39]研究了等离子渗氮($520^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$)对SLM成形的18Ni-300马氏体时效钢表面性能的优化效果,并与传统锻造材料进行对比,为增材制造马氏体时效钢的表面强化提供了工艺指导。结果显示,SLM样品具有细胞状/树枝状凝固微观结构,而常规马氏体钢样品具有更细的晶粒和马氏体板条;渗氮处理后(见图11a),所有样品都形成115~130 μm 的渗氮层(由 Fe_4N 化合物层和扩散层组成)。同时,渗氮处理使样品表面硬度显著提高,增材制造+渗氮处理样品的化合物层硬度约为1150HV0.01(见图11b),耐磨性提升4~7倍(见图11c),磨损机制由黏着磨损转为磨粒磨损,耐蚀性也因化合物层的钝化效应而改善。



a) 未经处理和不同温度下等离子渗氮AISI 420马氏体不锈钢样品的X射线衍射图谱

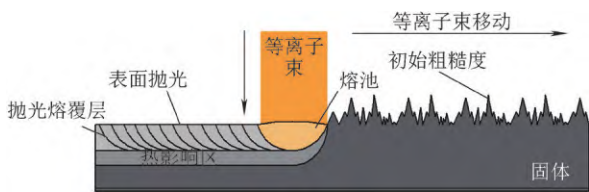


b) 等离子渗氮AISI 420马氏体不锈钢样品的表面形貌

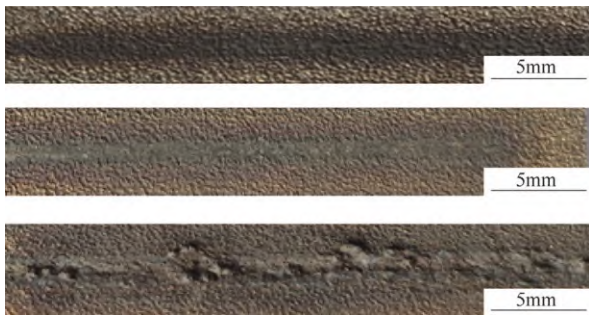
图9 不同温度下等离子体辅助渗氮对马氏体不锈钢处理的影响^[36]

近年来, 等离子束表面改性的研究集中在大气等离子射流 (APPJ) 的开发上, 射流在常压下操作消除了真空系统的需求, 降低了成本和复杂性。传统冷等离子体处理金属材料时可能会引起表面击穿或效率低下, LIU等^[40]开发了一种高效的氧气混合

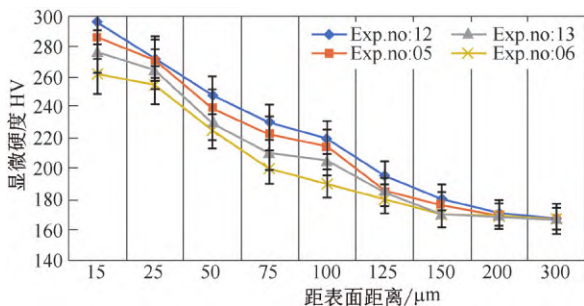
大气压冷等离子体射流装置 (见图12a), 通过氧气混合APPJ处理TC4钛合金, 在20s内达到超亲水状态 (氧气混合比为0.4%), 可实现工程金属材料的高效低损伤亲水化 (见图12b、c)。此外, 基于机器学习和深度学习的人工智能在等离子束表面改



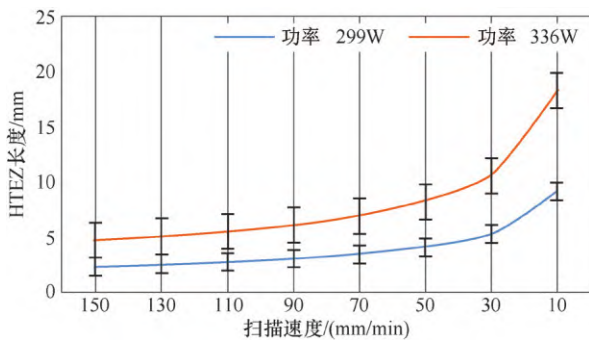
a) 等离子重熔工艺示意



b) 等离子束重熔样品的顶面形貌



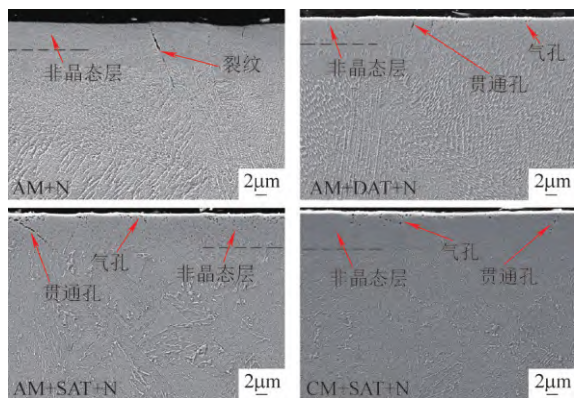
c) 等离子束重熔样品顶面的显微硬度



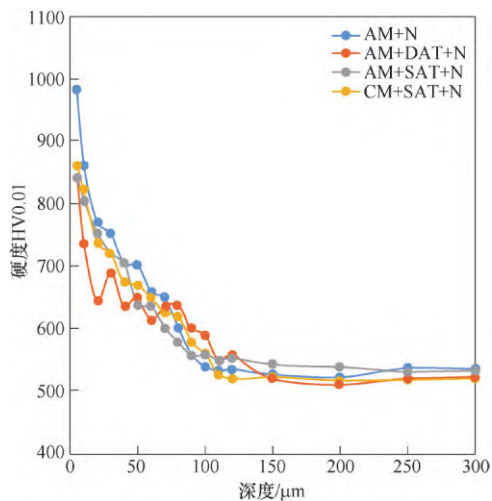
d) HTEZ长度随等离子束功率和扫描速度的变化关系

图10 等离子束重熔技术改善SS316L的表面性能^[37-38]

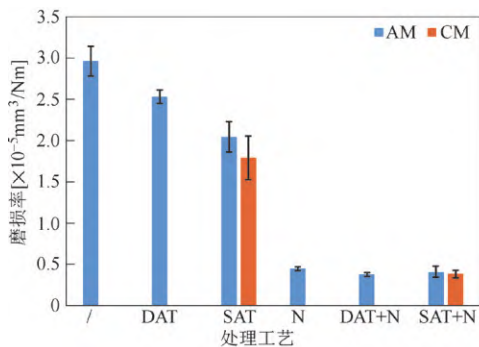
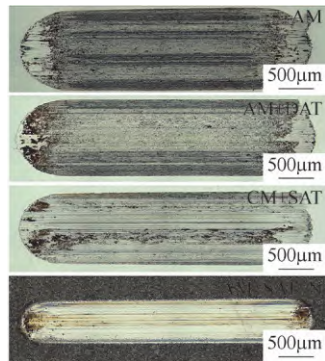
性技术中得到逐步应用, AI驱动的数字孪生技术为实时监测数据和模拟优化不同材料体系的改性效果提供了可能。KAMBARA等^[41]总结了基于科学和数据驱动的方法在低温等离子体处理中的应用。通过机器学习和深度学习技术, 预测等离子体参数和发现加工配方得到显著改进。数据驱动科学的发展为等离子体处理提供了新的工具和方法, 助推材料合成和器件集成的进步。TRIESCHMANN等^[42]总结了



a) 渗氮样品渗氮区上部的SEM图

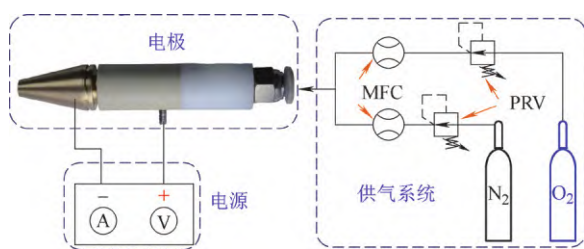


b) 渗氮样品的显微硬度深度分布

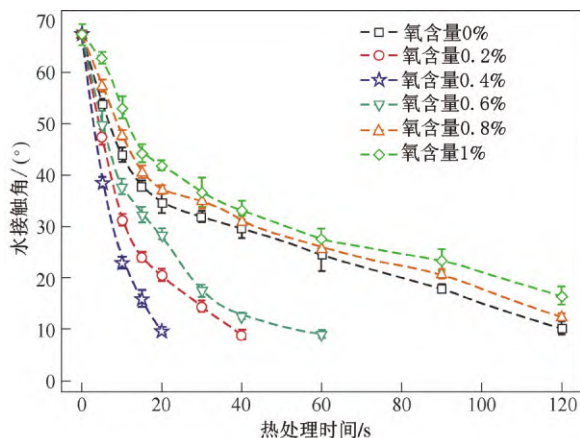


c) 样品磨损率及磨损轨迹显微照片

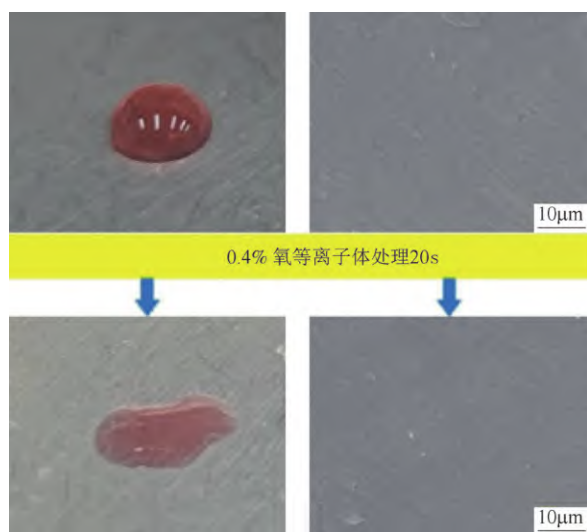
图11 等离子渗氮提高18Ni-300马氏体时效钢的耐磨性和耐蚀性^[39]



a) 氧气混合冷等离子体发生器



b) 不同等离子射流下水接触角随时间的变化



c) 未处理表面与0.4%氧气等离子体喷射处理表面20s后的对比

图12 大气等离子体射流提升TC4钛合金润湿性^[40]

近年来在低温等离子体建模和模拟中应用数据驱动方法的进展,强调了其在提高计算效率和预测精度方面的潜力。SULA等^[43]利用机器学习技术预测了冷大气等离子体(CAP)对生物材料表面性质的影响,特别是接触角和表面粗糙度的变化。研究表明,CAP可以显著提高钛和氧化锆等生物材料的表面粗糙度和亲水性。总体而言,国内外在等离子束

表面改性技术领域的研究进展和现状都表现出积极的发展态势,在等离子生成和控制技术方面也取得了显著进展。然而,目前的许多研究仍然存在一些技术和应用上的挑战^[1],需要实际工业应用来开展进一步的技术验证和优化。

4 等离子束表面改性技术应用领域及实例

等离子束表面改性技术通过调控材料表面的微观结构和化学成分,实现表面硬化、耐磨、耐蚀、抗氧化、结合力及生物相容性等性能提升,因此被广泛应用于航空航天^[44-47]、汽车制造^[48-51]、电子信息^[52-54]、生物医学^[55-58]及能源设备^[59-62]等领域(见图13)。在航空航天中用于发动机部件的耐高温与抗疲劳强化,在汽车领域用于提高关键部件寿命,在微电子制造中用于精细刻蚀与功能膜沉积,在生物医学中用于改善植入材料的细胞亲和性,在能源领域则用于提升核反应堆材料或电极材料的服役性能,展现出高度的技术适应性与产业化潜力。

(1) 表面硬化与耐磨性提高 研究表明,奥氏体不锈钢具有优异的可加工性、耐蚀性和生物相容性,但其低硬度和较差的耐磨性严重限制了其在工业中的应用,而等离子渗氮处理能显著提高不锈钢的表面硬度和耐磨性。HUANG等^[63]通过热丝增强等离子体辅助渗氮技术在AISI 316L奥氏体不锈钢表面形成超厚渗氮层($>80\mu\text{m}$)。XRD结果显示,渗氮层主要由高氮扩展奥氏体和CrN相组成;SEM图像显示,渗氮层具有双层结构,外层为富含CrN的高氮扩展奥氏体,内层为低氮扩展奥氏体和少量CrN沉淀(见图14)。该技术为在奥氏体不锈钢上形成具有优异耐蚀性和高硬度的超厚渗氮层提供了新方法。

(2) 耐腐蚀性能提升 铝合金在航空航天等行业中广泛应用,但其较低的耐磨性和耐蚀性限制了其应用范围,并缩短了组件的使用寿命。YANG等^[64]通过等离子电解氧化(PEO)技术在LY12铝合金表面形成氧化铝和磷酸锌相,制备出具有优异耐磨和耐腐蚀性能的高结晶度氧化铝涂层。PEO处理时通过调节电解液中磷酸盐浓度来提高耐磨相 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的结晶度,形成的涂层表面呈现异质性,表面上有火山口状的多孔结构以及一定大小和密度的平坦结构,且随着磷酸盐浓度的增加,孔径增

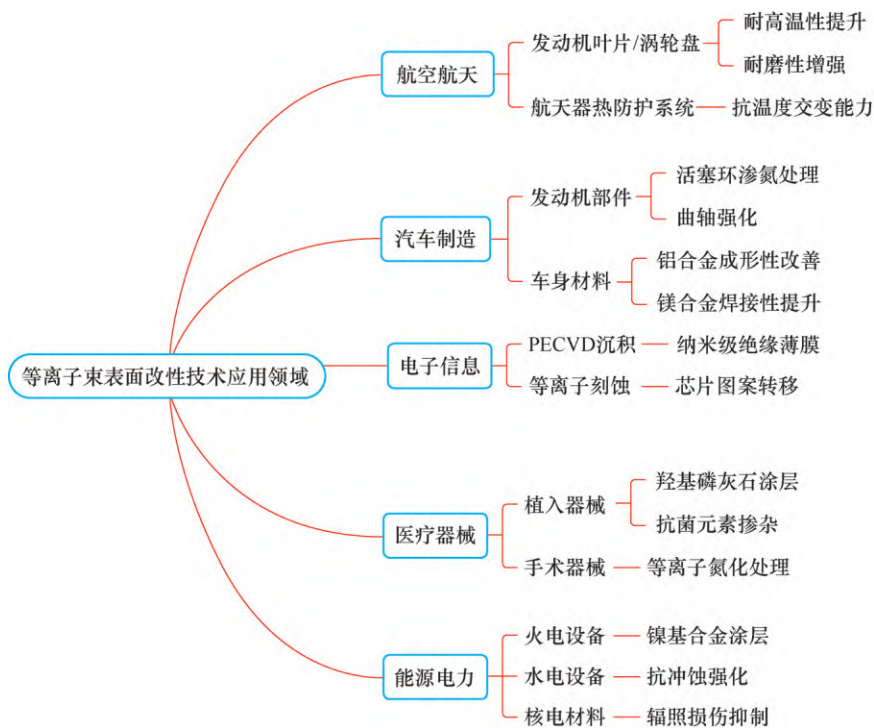


图13 等离子束表面改性技术应用领域

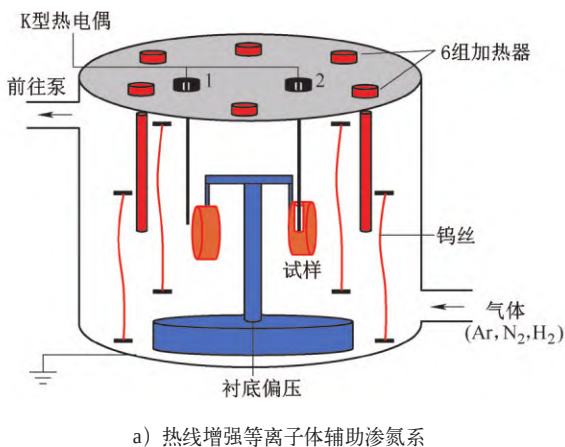
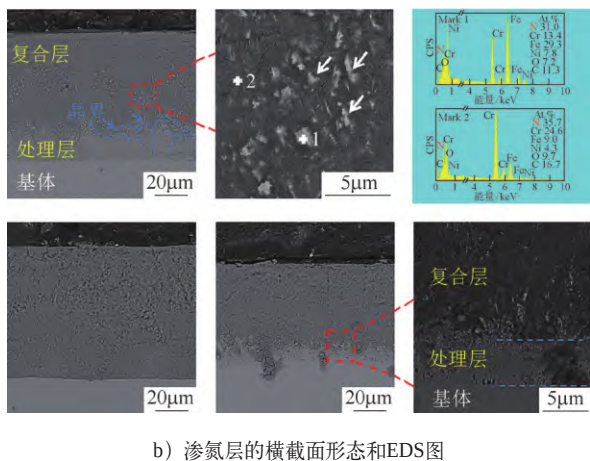


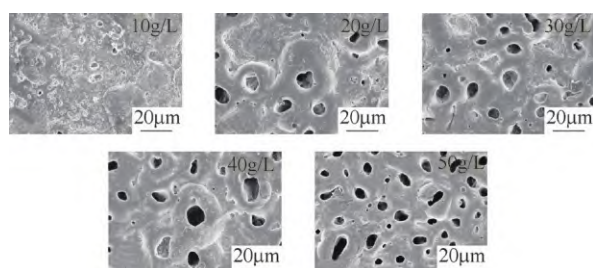
图14 等离子体辅助渗氮技术在奥氏体不锈钢表面形成超厚氮化层^[63]

大，孔密度先增加后减少（见图15a）。该涂层在海洋环境中表现出良好的耐蚀性，盐雾试验显示，涂层的寿命超过5000h，电化学腐蚀电流密度降低了约两个数量级（见图15b）。

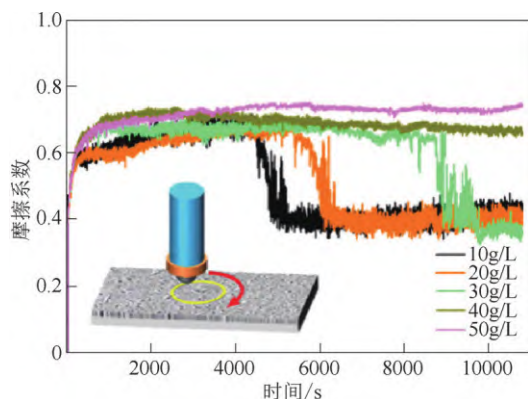
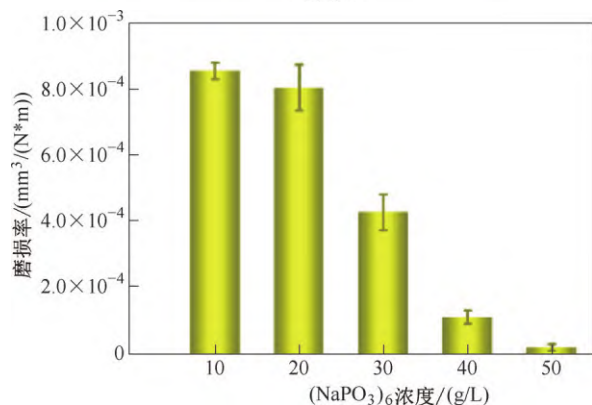
(3) 高温抗氧化性增强 钛及其合金在航空发动机和汽车工业中广泛应用，但在高温下其抗氧化性能不足，存在易氧化和起火的风险。研究表明，SiAlN涂层在高温下具有良好的抗氧化性和热稳定性，但如何改善涂层与基体之间的界面性能仍是难题。GAO等^[65]设计了一种双层氮化物涂层系统，通过磁控溅射技术在钛及其合金上沉积SiAlN涂层并插入Mo中间层的方法来提高涂层的抗氧化性和适应性（见图16a），显著提高了钛合金在高温下的抗氧化性和附着力，为高温环境下钛合金在航空发动机热端部件的应用提供了新的解决方案。该涂层微观结构显示其表面形成了复杂的分层结构，包括SiAlN顶层、TiN_{0.26}和Ti₅Si₃混合相中间层以及Ti-Mo固溶体层（见图16b、c）。TiN_{0.26}层中存在大量的机械孪生和堆垛缺陷，使涂层在热循环过程中自适应变形，并减少了应力集中，有效降低了涂层与基体之间的开裂和剥落风险。试验表明，800℃下热处理3h后涂层的附着力比初始涂层高约3倍，且经过200h（40个循环）的循环氧化测试，涂层未出现开

裂、剥落或氧化现象。

(4) 表面涂层功能化 近年来,在生物医学和工业领域利用高能等离子体对金属表面进行合金化,改变其化学组成和物理结构,从而优化表面功能特性(如提升抗菌性、生物相容性等)。ZHANG等^[66]提出使用基于等离子体渗氮的双辉光等离子体表面合金化(DGPSA)技术来解决生物医学金属表面改性的问题。在不同基体材料(如不锈钢、钛合金、钽合金等)上制备银基、铜基和其他合金涂层(见图17a),并对其进行抗菌性能、力学性能和耐腐蚀性能试验,实现在生物医学金属材料表面制备出具

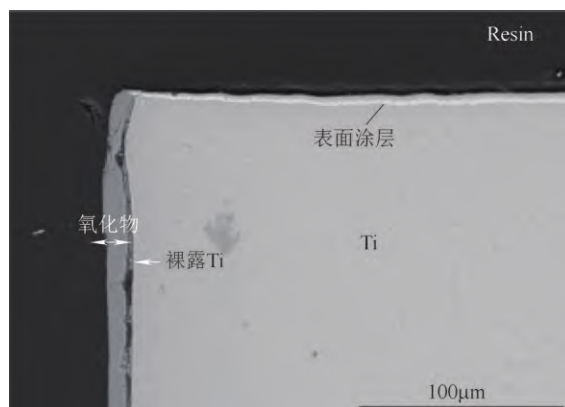


a) 不同电解质浓度下氧化铝涂层样品的SEM图

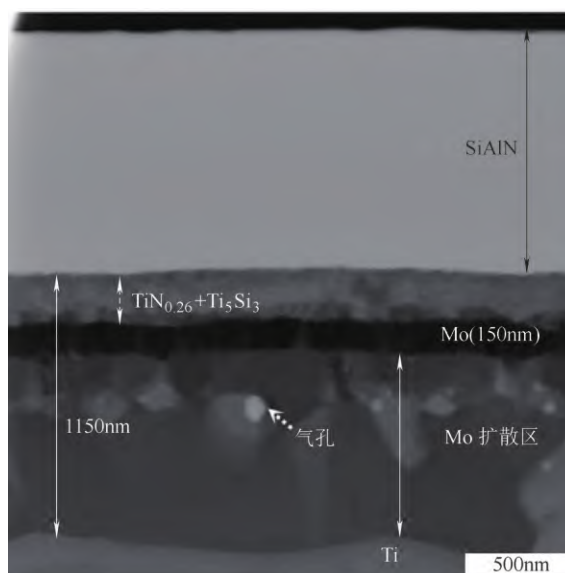


b) 不同电解质浓度下氧化铝涂层的摩擦系数和磨损率

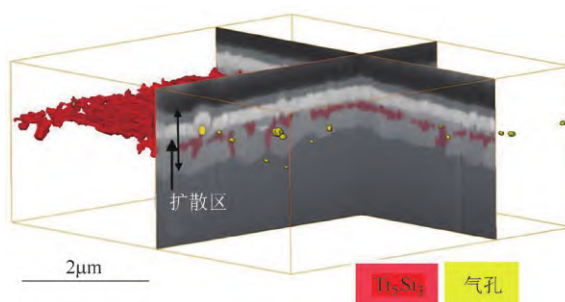
图15 等离子电解氧化技术在LY12铝合金表面制备耐磨性和耐蚀性涂层^[64]



a) 钛基底上涂层(顶部)和裸露(左侧)表面循环氧化后的横截面SEM图



b) 800℃×3h退火后的涂层厚度分布

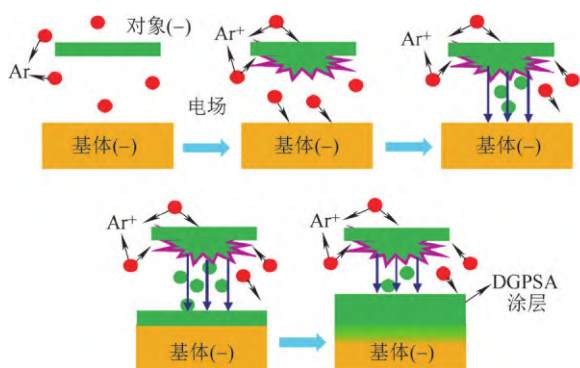


c) SiAlN/Mo和Mo/Ti界面的三维重建图

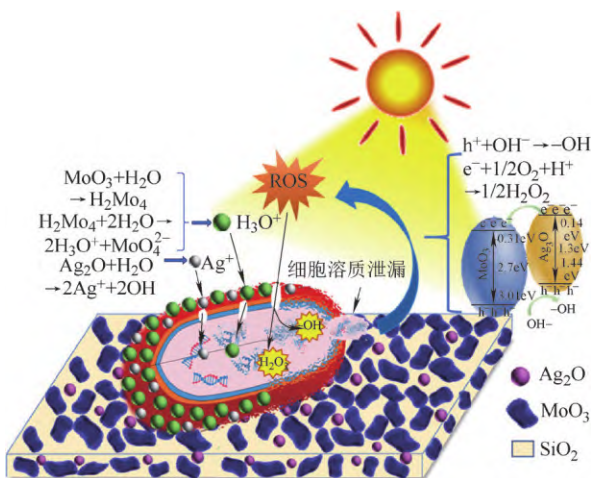
图16 PVD钛合金高温抗氧化氮化物涂层的设计^[65]

有高结合强度、高硬度和高耐磨性的涂层,且保证涂层的生物相容性和抗菌性能(见图17b)。

(5) 表面结构优化 大气等离子喷涂(APS)是通过氢气和氩气燃烧熔化粉末材料并将其高速喷射到基体上,使材料获得具有良好附着性和力学性



a) 双辉光等离子体表面合金化涂层形成过程示意



b) Ag-Mo-Si-O复合涂层的抗菌机制

图17 双辉等离子表面合金化技术提升金属材料表面性能^[66]

能的涂层。LORENZO-BAÑUELOS等^[67]通过大气等离子喷涂技术 (APS) 制备Ni-Al涂层, 研究了APS参数对铝合金基体上Ni-Al涂层厚度、硬度和抗性等力学性能的影响 (见图18), 并建立了涂层行为与APS技术选定参数之间缺陷存在的关系。结果表明, 在中等氩气流速 (55L/min) 和固定喷涂距离 (140mm) 时具有最佳效果。喷涂速度对最大负荷影响最大, 喷涂速度越高, 最大负荷也越高。喷涂距离越大, 氩气流速越高, 涂层就越厚; 喷涂距离对显微硬度影响最大, 喷涂距离越大, 显微硬度越高。氩气流速对表面粗糙度影响最大, 喷涂速度的影响较小, 氩气流速越高, 表面粗糙度值越高。

5 等离子束表面改性技术优势与挑战

与传统表面处理技术相比, 等离子束表面改性技术展现诸多优势。在处理精度方面, 离子注入、PECVD等技术能够精确控制元素掺杂剂量、薄膜沉积厚度至纳米级, 实现对材料表面微观结构与性

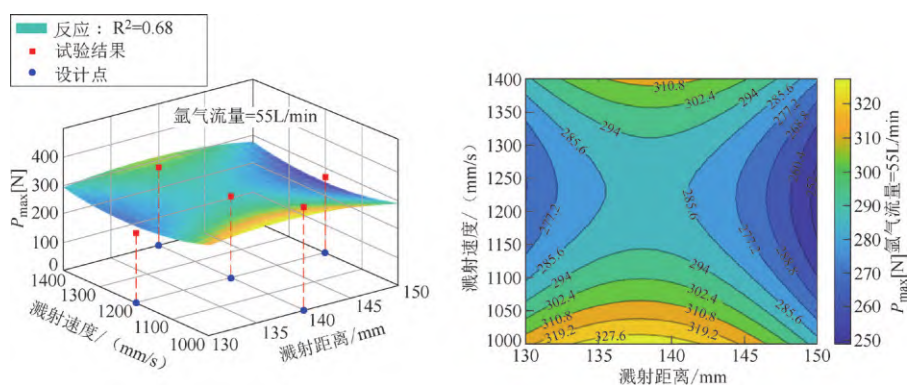
能的精细雕琢, 如在微电子芯片制造中, 保障线路精度与电学性能稳定^[68], 而传统热扩散处理难以达到如此精准控制, 易造成成分不均匀、性能波动大等问题。在处理效率上, 等离子体喷涂、熔覆技术借助高能等离子束, 可使材料迅速熔化、凝固, 短时间内在大面积表面形成涂层, 相较传统电镀、化学镀, 沉积速率大幅提升数倍甚至数十倍, 可满足工业化生产需求, 如汽车发动机零部件批量处理。在环保方面, 等离子处理过程多在真空或低污染环境下进行, 不涉及大量化学试剂使用与废液排放, 避免传统湿法化学处理带来的环境污染, 环保性能突出, 契合绿色制造理念, 以等离子体清洗替代化学清洗^[69], 降低挥发性有机化合物 (VOCs) 排放。此外, 成本效益兼具, 虽然等离子束设备前期投资较高, 但从长期运行看, 其能耗低、材料利用率高、次品率少, 且能延长零部件使用寿命, 减少更换频次, 因此综合成本优势显著, 如航空发动机热障涂层采用等离子体喷涂, 降低维修成本、提升运营效益^[70]。等离子束表面改性技术作为在材料科学中一种颇具前景的先进处理手段, 已在诸多领域中显示出了其巨大的应用潜力。尽管前景广阔, 该技术的应用与发展仍面临以下四大挑战。

(1) 设备与维护成本高 高性能等离子设备价格昂贵, 对国外进口设备存在一定依赖性, 维护复杂、依赖专业人员, 制约其推广。应对策略: 推动模块化、标准化设计与共享平台建设, 提升设备利用率; 加大研发投入, 优化设备结构; 发展远程监控与本土技术团队, 降低维护成本。

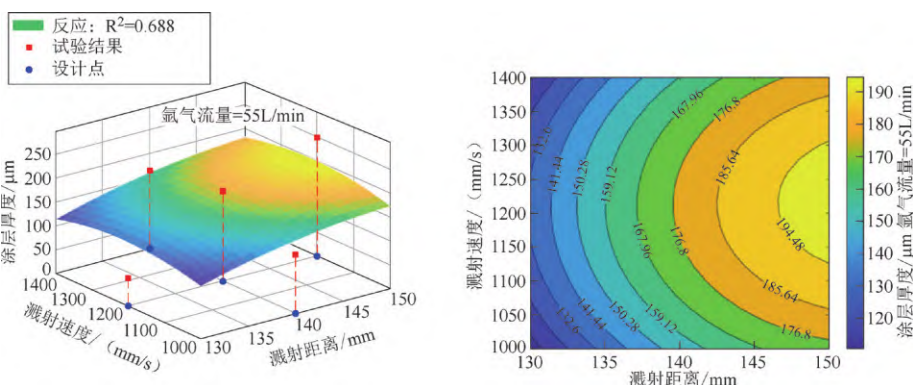
(2) 工艺稳定性与重复性差 等离子改性工艺参数敏感, 稍有波动即影响改性质量, 工艺窗口窄, 优化困难。应对策略: 借助试验设计与模拟手段优化参数, 采用自动化控制与实时监测技术, 建立标准化操作流程与校准制度, 确保工艺一致性。利用数字孪生方法集成多传感器数据采集、机器学习算法和多物理模型来优化处理过程^[71]。

(3) 应用范围受限 对复杂结构或特殊材料效果不佳, 大面积处理时面临均匀性与效率问题。应对策略: 加强对新材料与复合材料的适应性研究, 开发新型等离子源与复合处理工艺^[72], 推进技术集成与跨领域融合, 拓展应用场景。

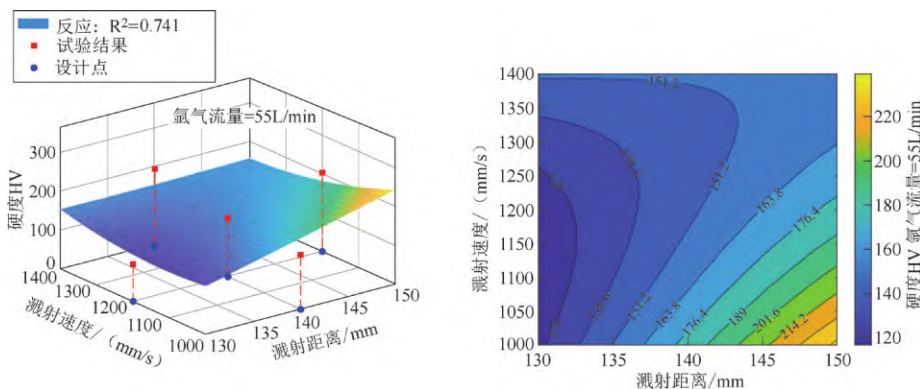
(4) 改性层结合力不足 部分涂层在服役中易



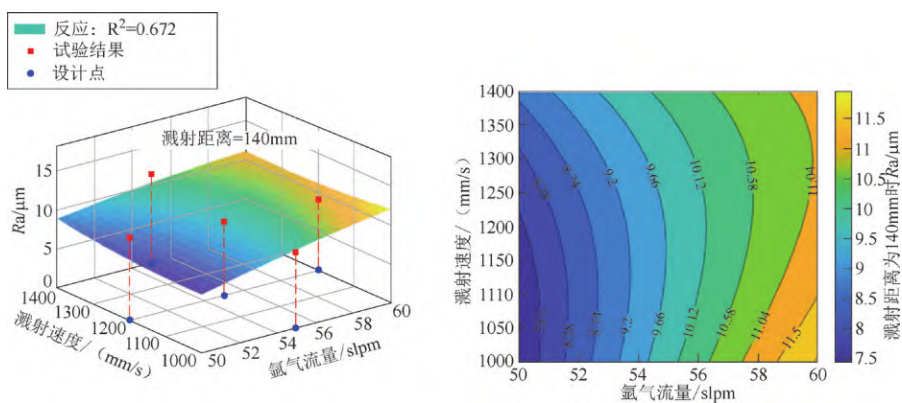
a) 在55L/min固定氩气流速下获得的 P_{max} 响应面



b) 在55 L/min固定氩气流下获得的涂层厚度响应面



c) 在55L/min固定氩气流速下获得的硬度响应面



d) 固定喷涂距离为140mm时获得的 Ra 响应面

图18 大气等离子喷涂参数对铝合金基体上Ni-Al涂层力学性能的影响^[67]

剥落,从而影响寿命与可靠性。应对策略:优化表面预处理与过渡层设计,提高界面结合力;通过调控工艺参数来促进冶金结合;采用热处理、热等静压等后处理工艺以增强黏结性能。

总之,随着基础研究深入、关键技术突破与产业化推进,等离子束表面改性技术将逐步解决当前瓶颈,成本得以不断降低,工艺稳定性、普适性及改性层结合力显著提升,向高性能、智能化与绿色制造等方向迈进,成为未来材料表面工程的重要支撑。

6 结束语

等离子束表面改性技术凭借精准调控、能效高、适应性强等优势,突破传统金属材料性能瓶颈,显著提升材料表面性能,广泛应用于航空航天、汽车、电子、医疗及能源等领域,助力制造业向轻量化、高可靠性、高性能方向迈进。然而,当前仍面临工艺稳定性不足、高端设备依赖进口、基础机理研究薄弱及人才短缺等挑战,制约了其规模化推广与技术迭代。未来,需从以下方向深入推进。

1) 提升工艺稳定性与一致性。通过AI辅助设计、原位监测等手段优化工艺参数控制与标准化处理,确保改性效果的高重复性与能效提升。

2) 实现高端设备国产化。加大核心装备研发力度,推动产学研协同,攻克关键技术,降低设备成本与外部依赖。

3) 发展复合改性工艺。融合激光、化学镀等技术,构建协同增强的多元改性体系,实现功能化、多性能材料表面的高效制备。

4) 推进智能化控制系统建设。引入大数据与算法优化,建立工艺模型,实现参数自适应调控与效果预测,提升自动化与智能化水平。

5) 拓展新材料应用边界。针对高熵合金、非晶合金等新型材料,开展适配性研究,释放材料潜力,拓展等离子改性技术的应用深度与广度。

随着技术持续演进与产业协同深化,等离子束表面改性有望成为未来金属材料表面工程的重要支柱,为高端制造注入强劲动能。

参考文献:

[1] 陈楠,王蕊,王蕾.等离子体技术在金属材料表面

改性中的应用[J].科技与创新,2022(16):149-151,155.

[2] 卫中山,王珉,左敦稳.离子束金属材料表面改性技术[J].机械制造与自动化,2001(6):15-17,21.

[3] 谭俊,杜军.离子束表面工程技术的进展[J].中国表面工程,2012,25(5):6-14.

[4] 潘应君,周磊,王蕾.等离子体技术在材料中的应用[M].武汉:湖北科学技术出版社,2003.

[5] 黄齐文,胡树兵,王爱华.等离子束表面强化技术的研究进展[J].金属热处理,2011,36(8):1-8.

[6] NIU C, HAN J, HU S, et al. Surface modification and structure evolution of aluminum under argon ion bombardment[J]. Applied Surface Science, 2021, 536: 147819.

[7] 罗胜阳,苑振涛.离子注入技术在材料表面改性中的应用及研究进展[J].热加工工艺,2018,47(4):43-46,50.

[8] 张波.低温等离子体对材料的表面改性[J].现代物理知识,2006(6):37-40.

[9] 刘爱国.低温等离子体表面强化技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.

[10] FRANCISCO L TABARÉS. Plasma applications for material modification: From microelectronics to biological materials[M]. USA: CRC Press, 2021.

[11] RAO K R M, NOUVEAU C, TRINADH K. Low temperature plasma nitriding of low alloy steel for the enhancement of hardness[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 17: 26-33.

[12] 姚佳伟. M50钢等离子体氮碳双渗耐磨减摩功能层的设计与制备[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.

[13] GUAN S, LI G, SHI Q, et al. Process parameters optimization of plasma nitriding depth of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel: experimental and simulation studies[J]. JOM, 2024, 76(4): 1937-1950.

[14] ZHANG Z, WANG Z, JIN B, et al. Comparative study of multiple plasma nitriding processes on a single system[J]. Surface and Coatings Technology, 2025, 496: 131688.

[15] 李荣久,邓畅光,胡永俊,等.等离子喷涂-物理气相沉积热障涂层的表征技术研究进展[J].表面技

- 术, 2020, 49 (11): 124-140.
- [16] 艾鹏, 刘军和, 孙颖, 等. 等离子喷涂CoMoCrSi涂层性能及其在航空发动机中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2023 (8): 101-103.
- [17] 高玉魁, 郑翔元, 龚思婕. 等离子喷涂制备吸波涂层及等离子渗碳技术研究现状[J]. 中国表面工程, 2023, 36 (6): 1-15.
- [18] 李超, 刘英, 常超强, 等. 基于深度神经网络的等离子熔覆修复路径规划[J]. 金属加工(热加工), 2023 (7): 29-34.
- [19] 王兴涛, 吴一凡, 刘宏伟, 等. 等离子熔覆CoCrFeMnNi高熵合金涂层的组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2025 (8): 40-47.
- [20] 罗胜阳, 苑振涛. 离子注入技术在材料表面改性中的应用及研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 43-46, 50.
- [21] CHEMAA K, HASSANI S, KEZRANE M, et al. Effect of plasma immersion ion implantation (PIII) nitriding on austenitic stainless steel multilayer coatings[J]. Applied Physics A, 2023, 129 (2): 149.
- [22] 郭嘉奇, 商剑. 钛合金表面等离子体电解渗技术研究发展[J]. 金属加工(热加工), 2023 (12): 19-24, 38.
- [23] KASEEM M, FATIMAH S, NASHRAH N, et al. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100735.
- [24] SNYDERS R, HEGEMANN D, THIRY D, et al. Foundations of plasma enhanced chemical vapor deposition of functional coatings[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2023, 32 (7): 074001.
- [25] 王晨曦. 物理气相沉积硬质涂层的开发及工程应用[J]. 价值工程, 2020, 39 (12): 236-237.
- [26] GUDMUNDSSON J T, ANDERS A, VON KEUDELL A. Foundations of physical vapor deposition with plasma assistance[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31 (8): 083001.
- [27] 臧晓蓓, 黄锦滨, 孙静, 等. 高能束表面改性技术的研究现状及发展趋势[J]. 中国材料科技与设备, 2009, 6 (3): 1-4.
- [28] 董选普, 潘璋, 黄齐文. 等离子束表面改性技术研究进展: “全国青年表面工程论坛”论文集[C]. 北京: 中国表面工程协会, 2014.
- [29] EL-AWADI G A. Review of effective techniques for surface engineering material modification for a variety of applications[J]. AIMS Materials Science, 2023, 10 (4): 652-692.
- [30] FAN Y, XU C, FU E G. Recent research progress in the field of ion beam modification of materials in the Department of Technical Physics at Peking University[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, 53 (10): 100011.
- [31] GUO Y, GAO X, ZHANG C, et al. Plasma modification of a Ni based metal-organic framework for efficient hydrogen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7 (14): 8129-8135.
- [32] CAO H T, DONG X P, CHABOK A, et al. Hard-yet-tough high-vanadium hierarchical composite coating: Microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 736: 87-99.
- [33] LI S, DONG X, CHABOK A, et al. In-situ micromechanical analysis of a high-vanadium high-speed steel coating made with additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 870: 144850.
- [34] XIE F, HE Y, YUAN Z, et al. Microstructure and high-temperature sliding wear performance of Fe-Co-Mo alloy coating fabricated by plasma cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 444: 128667.
- [35] 李春, 高旭, 耿琼, 等. 铅酸钎热障涂层表面三防漆附着性及隔热性能研究[J]. 材料保护, 2025, 58 (2): 73-82.
- [36] SCHEUER C J, ZANETTI F I, CARDOSO R P, et al. Ultra-low to high-temperature plasma-assisted nitriding: revisiting and going further on the martensitic stainless steel treatment[J]. Materials Research Express, 2018, 6 (2): 026529.
- [37] CHARI V S, JHAVAR S. Surface properties modification of SS316L using plasma beam

- remelting (PBR) and its applications in additive manufacturing[J]. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2021, 6 (4) : 1017-1025.
- [38] KUMAR N C, JHAVAR S. Modelling substrate analysis for remanufacturing: investigating the plasma beam remelting process (PBRP) in surface modification of additively manufactured SS316L[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2023: 73-85.
- [39] GODEC M, PODGORNIK B, KOCIJAN A, et al. Use of plasma nitriding to improve the wear and corrosion resistance of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting[J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1) : 3277.
- [40] LIU J, WANG S, LI Y, et al. High-efficiency and low-damage modification of engineering metal materials by oxygen-mixing atmospheric pressure cold plasma jets[J]. Applied Surface Science, 2024, 662: 160142.
- [41] KAMBARA M, KAWAGUCHI S, LEE H J, et al. Science-based, data-driven developments in plasma processing for material synthesis and device-integration technologies[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 62 (SA) : SA0803.
- [42] TRIESCHMANN J, VIALETTO L, GERGS T. Machine learning for advancing low-temperature plasma modeling and simulation[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2023, 22 (4) : 041504-041504.
- [43] SULA Y D, OZDEMIR G D, OZDEMIR M A, et al. Machine learning to predict the effect of cold atmospheric plasma on the surface properties of biomaterials: 2023 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO) [C]. USA: IEEE, 2023: 1-4.
- [44] 刘永, 张凡云, 施国梅, 等. 高能束表面改性技术在航空制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2014 (S1) : 41-43, 52.
- [45] 何金梅, 蔡卿, 张麓娟. 表面工程技术在航空发动机制造中的应用与发展[J]. 金属加工 (冷加工), 2016 (24) : 1-2, 8.
- [46] 于凤梅, 杨薛军, 张科伟, 等. 表面处理技术在航天材料中的应用[J]. 理化检验 (物理分册), 2018, 54 (6) : 411-417.
- [47] 陈军, 李伟, 郝胜智. 高能束表面改性技术在航空领域的应用[J]. 航空制造技术, 2024, 67 (4) : 32-43.
- [48] 李长青, 董怀斌, 邹育根, 等. 低温空气等离子体处理对铝合金表面粘接性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30 (6) : 34-42.
- [49] 魏兵剑, 程昱琳, 刘媛媛, 等. 磁控溅射和等离子体电解氧化双重工艺处理AZ31镁合金的耐蚀和耐磨性能 (英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (8) : 2287-2306.
- [50] 赵鸿岳, 朱宗宁, 卢周, 等. 液相等离子体电解渗氮技术提升活塞环表面硬度的研究[J]. 内燃机与配件, 2021 (4) : 18-19.
- [51] 刘志浩, 邹田春, 李晔, 等. 等离子体处理对AA7075铝合金表面特性及胶接性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51 (11) : 452-461.
- [52] 黄得俊, 李照飞, 王伟业. 离子注入技术应用于PCB行业的研究[J]. 印制电路信息, 2016, 24 (A02) : 242-247.
- [53] 马会中, 路军涛, 张兰. 等离子体增强化学气相沉积法制备类金刚石薄膜研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (18) : 7597-7606.
- [54] 宋琳, 周燕萍, 左超, 等. 铂电极的电感耦合等离子体刻蚀工艺研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2024, 44 (3) : 264-268, 274.
- [55] PESODE P, BARVE S. Surface modification of titanium and titanium alloy by plasma electrolytic oxidation process for biomedical applications: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 594-602.
- [56] 许朗, 黄忠卫, 石锐. 锆等离子体浸没离子注入增强聚醚醚酮材料的细胞相容性[J]. 局解手术学杂志, 2023, 32 (9) : 760-763.
- [57] 于德浩, 宁凤婷, 杜易朗, 等. 微弧氧化对金属植入物抗菌和抗炎能力的调节效应[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28 (10) : 1613-1619.
- [58] ÇAKIR M A, KÖSEOĞLU B. Investigation of the structural, tribological, and electrochemical properties of nitrided and boronized AISI 316L stainless steel[J]. Transactions of the Indian Institute

- of Metals, 2023, 76 (6) : 1517-1533.
- [59] SLOBODYAN M. High-energy surface processing of zirconium alloys for fuel claddings of water-cooled nuclear reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 382: 111364.
- [60] 陈思邈, 程昌明, 李平川, 等. 等离子体熔融技术在核电站放射性废物处理中的研究应用现状[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42 (7) : 483-490.
- [61] 赵云松, 张迈, 戴建伟, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37 (6) : 77-83.
- [62] TAN X Y, CHEN G B, TEO S L, et al. Substrate dilution and interface structures of tungsten coating deposited by double-glow plasma surface alloying on stainless steel substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 489: 131153.
- [63] HUANG Z, GUO Z X, LIU L, et al. Structure and corrosion behavior of ultra-thick nitrided layer produced by plasma nitriding of austenitic stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126689.
- [64] YANG C, ZHU J, CUI S, et al. Wear and corrosion resistant coatings prepared on LY12 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409: 126885.
- [65] GAO Z, ZHANG Z, ZHANG X, et al. A conformable high temperature nitride coating for Ti alloys[J]. Acta Materialia, 2020, 189: 274-283.
- [66] ZHANG M, ZHU L, WANG J, et al. Surface modification of biomedical metals by double glow plasma surface alloying technology: A review of recent advances[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3423-3452.
- [67] LORENZO-BAÑUELOS M, DÍAZ A, RODRÍGUEZ D, et al. Influence of atmospheric plasma spray parameters (APS) on the mechanical properties of Ni-Al coatings on aluminum alloy substrate[J]. Metals, 2021, 11 (4) : 612.
- [68] OEHRLEIN G S, BRANDSTADTER S M, BRUCE R L, et al. Future of plasma etching for microelectronics: Challenges and opportunities[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2024, 42 (4) .
- [69] BOLOTOV M G, PRYBYTKO I O. Application of glow discharge plasma for cleaning (activation) and modification of metal surfaces while welding, brazing, and coating deposition[J]. Progress in Physics of Metals, 2021, 22 (1) .
- [70] RAFIQ N M, WANG S. Thermal barrier coatings: an insight into conventional plasma spray and water-stabilized plasma spray[J]. Coatings, 2022, 12 (12) : 1916.
- [71] MITCHELL A, WEI X, SUN R, et al. A proposed methodology to develop digital twin framework for plasma processing[J]. Results in Engineering, 2024, 24: 103462.
- [72] KIM D H, KIM H S, JUNG Y, et al. Plasma treatment of metal surfaces for enhanced bonding strength of metal-polymer hybrid structures[J]. Polymers, 2025, 17 (2) : 165.

(收稿日期: 20250410)