

增强钢在海水环境下耐腐蚀的研究进展

王帅^{1,2,3}, 张月新¹, 徐东^{1,2,3*}, 孙晓林¹, 李辰昊¹, 王晓英^{1,2}, 刘颖¹, 郭龙鑫⁴, 王智聪^{4,5}

¹河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北工程大学, 河北省高品质冷镀锌技术创新中心, 河北 邯郸

³河北工程大学, 河北省高校高端紧固件全流程应用技术研发中心, 河北 邯郸

⁴河北普阳钢铁集团, 河北 邯郸

⁵河北省高韧性风塔钢工程研究中心, 河北 邯郸

收稿日期: 2024年8月30日; 录用日期: 2024年9月28日; 发布日期: 2024年10月8日

摘要

随着时代的发展, 钢由于其比较低廉的价格和可靠的性能成为了世界上被使用最多的材料之一。由于海洋环境中的含盐量、温度、微生物等一些因素, 钢材被腐蚀的情况也越来越多, 因此, 耐海水腐蚀钢逐渐出现。本文综述了近年来降低钢材在海水中的腐蚀速率的方法, 包括改变钢材元素含量、柠檬酸钝化、牺牲阳极或外加电流的阴极保护法、物理气相沉积法、化学气相沉积法、热喷涂法、电沉积法等对钢材进行成分或者表面改性, 进而达到增加钢材的耐腐蚀性的目的。最后对钢材耐腐蚀性的提高进行了总结及展望。

关键词

钢, 海水环境, 耐腐蚀, 耐腐蚀速率

Research Progress on Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Seawater Environment

Shuai Wang^{1,2,3}, Yuexin Zhang¹, Dong Xu^{1,2,3*}, Xiaolin Sun¹, Chenhao Li¹, Xiaoying Wang^{1,2}, Ying Liu¹, Longxin Guo⁴, Zhicong Wang^{4,5}

¹School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Technology Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

³Whole Processes of High Quality Fastener Application Technology Research Center of Universities in Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

⁴Hebei Puyang Iron and Steel Co., Ltd., Handan Hebei

*通讯作者。

文章引用: 王帅, 张月新, 徐东, 孙晓林, 李辰昊, 王晓英, 刘颖, 郭龙鑫, 王智聪. 增强钢在海水环境下耐腐蚀的研究进展[J]. 材料科学, 2024, 14(10): 1353-1365. DOI: 10.12677/ms.2024.1410150

Abstract

With the development of the times, steel has become one of the most used materials in the world due to its relatively low price and reliable performance. Due to some factors such as salt content, temperature, and microorganisms in the marine environment, steel is increasingly corroded, so seawater corrosion-resistant steel is gradually emerging. In this paper, the methods to reduce the corrosion rate of steel in seawater in recent years are reviewed, including changing the element content of steel, citric acid passivation, cathodic protection method of sacrificial anode or impressed current, physical vapor deposition, chemical vapor deposition, thermal spraying, electro-deposition, etc., to modify the composition or surface of steel, so as to achieve the purpose of increasing the corrosion resistance of steel. Finally, the improvement of steel corrosion resistance is summarized and prospected.

Keywords

Steel, Seawater Environment, Corrosion Resistance, Surface Modification

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢是一种铁-碳合金,其碳含量在0.02%~2.11%之间。其中,含碳量在1.7%以下的钢被称为碳素钢[1];在实际应用中,由于用途的不同,通常会加入不同的合金成分,如锰、镍、钒等。目前,钢材价格便宜,性能可靠,已广泛应用于建筑、制造业及人们的生产生活中等。可以说,钢铁是当今社会重要的物质基础之一[2]。

海洋工程的迅速发展离不开钢材,然而,海洋中的环境复杂,海水中盐类的成分以及种类繁多,主要以3.0%~3.5% NaCl为主,PH值约为8,且富含悬浮泥沙、溶解氧[3]、污损生物和腐败的有机物质等,这些物质会导致钢材在海水中完全浸泡的区域内极易发生腐蚀。海水的温度存在着周期性的波动,当水温升高时,就会加剧像钢材这样的金属产品的腐蚀。此外,海水中的微量元素、养分等也为污损微生物提供了适宜的生长条件,恶化了钢材等金属材料的服役环境,降低了钢材及其他金属材料的机械性能[4],进而影响各种海洋设备的使用寿命与安全,并对海洋工程造成重大经济损失。因此,研究提高钢材的耐海水腐蚀性能刻不容缓。

2. 海水腐蚀及耐海水腐蚀钢

根据海水的侵蚀状况,将其划分为五个区域,分别为:海上大气区、全浸区、潮差区、飞溅区、土壤区。海上大气区[5]通常是指高于海面2 m,海浪不能到达,潮汐也不能淹没的区域。全浸区[6]的侵蚀受海水中溶解氧、盐度、温度、海洋生物、泥沙等因素的影响,可划分为三个区:①浅海区:从海平面到海平面以下50 m,由于此区域海水中溶解氧含量高,腐蚀现象比较严重[7]。②中等深度区:在海平面以下

50~200 m 范围内, 处于中度侵蚀状态。③深海区: 是指在海面下 200 m 以上, 由于海水中溶解氧的含量很少, 所以腐蚀影响不大。潮差区[8]指的是涨潮时淹没在水中, 退潮时则在水面之上的区域。飞溅区[9]通常是在海面以上 0~2 m 处, 常受海浪和飞沫的影响。这里是锈蚀最严重的地方。海底土壤区[10]是指被细菌侵蚀和污染的积层土侵蚀, 该区域侵蚀程度相对平缓。

耐海水腐蚀就是利用一些方法降低钢在海水中的腐蚀速率, 延长钢在海水中的服役时间, 增加钢在海水中的利用率。

3. 国内外耐海水腐蚀钢研究进展

针对海洋环境下钢材易发生腐蚀的问题, 国内外对耐蚀钢进行了大量研发, 例如美国自 1936 年开始研制耐海水腐蚀钢, 到 1951 年成功研制“Mariner”钢, 几年后投入了市场, 提高了在船舶和海洋工程中所用钢的耐腐蚀性能和服役寿命[11]。从 1965 年[12]开始, Cu 系、PV 系、P-Nb-RE 系以及 Cr-Al 系等[13]耐海水腐蚀低合金钢开始被研究, 试验钢号近 200 种, 其中 10Cr₂MoAlRE、08PVRE、09MnCuPTi、10MnPNbRE、10CrMoAl 等虽然通过了鉴定, 但在大型固定式和移动式海洋结构件上应用较少[14]。

Hodgkiess 等[15]在 1981 年研究并对比了几种金属在海水中的腐蚀情况。结果表明: 由于 316L 不锈钢铬和钼元素的含量较高进而在较低温度下也可以具有良好的耐腐蚀性能, 但在较高温度及高含氧量下的耐腐蚀性较差。Al-Makloy 等[16]研究了几种金属材料在海水中的腐蚀情况, 表明在静态海水、动态海水及剧烈流动海水的情况下, 几种金属材料耐腐蚀顺序依次是钛合金、超级奥氏体不锈钢、哈氏合金 C-276 以及 316 L 不锈钢和 430 不锈钢。

目前, 国内在海水环境下不锈钢的报道大多关于 304、316 L 钢。如高丽飞等[17]研究了 304 不锈钢在被淡化海水中的点蚀行为, 得出 304 不锈钢的点蚀敏感性与 Cl⁻浓度有关。胡建朋等[18]分析了 304 不锈钢在模拟海水中的腐蚀行为, 结果证明了 304 不锈钢在模拟海水溶液中出现应力腐蚀敏感性。邱萍等[19]分析了模拟海水中 304 不锈钢的腐蚀行为, 发现 304 不锈钢在海水环境比在淡水环境中更易腐蚀, 在海水中腐蚀坑的深度大约为 42.421 μm, 在淡水中则为 23.821 μm。表 1 为国内外耐海水腐蚀金属材料的研究情况。

Table 1. Research on seawater-resistant metal materials at home and abroad

表 1. 国内外耐海水腐蚀金属材料研究

研究人员	研究结论
Hodgkiess 等	316L 不锈钢铬和钼元素的含量较高进而在较低温度下也可以具有良好的耐腐蚀性能, 但在较高温度及高含氧量下的耐腐蚀性较差。
Al-Makloy 等	在静态海水、动态海水及剧烈流动海水的情况下, 几种金属材料耐腐蚀顺序依次是钛合金、超级奥氏体不锈钢、哈氏合金 C-276 以及 316 L 不锈钢和 430 不锈钢。
高丽飞等	304 不锈钢的点蚀敏感性与 Cl ⁻ 浓度有关。
胡建朋等	304 不锈钢在模拟海水溶液中出现应力腐蚀敏感性
邱萍等	304 不锈钢在海水环境比在淡水环境中更易腐蚀。

4. 增强钢耐海水腐蚀的方法

近年来, 提高耐海水腐蚀的方法有很多, 例如合金元素法[20]、柠檬酸钝化法[21]、牺牲阳极的阴极保护法[22]、外加电流的阴极保护法[23]以及涂层制备方法[24]等。

4.1. 合金元素法

合金元素法是指在冶炼钢的过程中添加的一种或者多种的元素, 其目的是为了改善钢材的力学性能

[25]，并赋予其特定的性质。常用的合金元素有铬、镍、钒、以及稀土等。

铬元素可以提高钢材的强度和硬度[26]、改善钢材的高温力学性能、增强钢材的抗腐蚀和氧化能力、防止石墨化。镍元素能使钢材的脆性转变温度下降，从而在一定程度上改善了钢材的低温韧性，同时也提高了钢材的耐蚀性能，并且在一定条件下可以改善钢材焊接加工性能[27]。钒元素可以提高钢的高温强度[28]，降低钢的强韧性，并且对一般低碳低合金钢具有明显的提高作用。常见的稀土元素有 17 种，其中未经分离的称为混合稀土，价格相对较低，对锻造钢材的塑性和冲击韧性有明显的改善作用。混合稀土可以提高钢材的抗氧化[29]、抗腐蚀等性能，还可以降低非金属夹杂，获得致密和纯净的结构。同时，在常规的低合金钢中，添加适量的稀土元素[30]，可以改善钢的各向异性，还可起到很好的脱氧去硫效果，增强钢的冲击韧度。

4.2. 柠檬酸钝化法

柠檬酸钝化法也是一种提高钢材耐海水腐蚀的方法[31]，柠檬酸钝化法具有钝化液比较温和、具有较好的钝化效果及环保性好等优点[32]。在柠檬酸钝化材料之前，首先对材料表面进行去氧化皮、去毛刺、去焊渣，其次可以使用抛光、盐酸或者高锰酸钾等溶剂进行水垢和油脂的处理，再根据材料表面油污的种类及其物理和化学性质来清除油污，接着对材料进行酸洗，去除材料表面的氧化膜，最后进行柠檬酸钝化。有研究表明[33]，柠檬酸钝化最佳的工艺配方是：柠檬酸 3%、双氧水 10%、乙醇 5%，温度 25℃，钝化时间 90 min。腐蚀时间可自行控制。柠檬酸钝化技术路线图如图 1 所示。

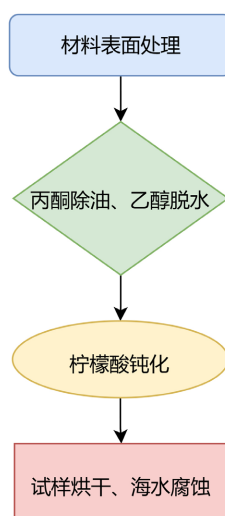


Figure 1. Technology roadmap for citric acid passivation
图 1. 柠檬酸钝化技术路线图

近几年，柠檬酸钝化的工艺越来越多，例如未钝化处理的 9Cr1Mo 钢在模拟和实际海洋环境中均发生严重腐蚀；柠檬酸钝化处理后的钢表面形成的钝化膜可以确保 9Cr1Mo 钢在海洋环境中腐蚀 78 d 且不发生明显腐蚀，使该钢耐海洋腐蚀的能力提高[34]。柠檬酸型钝化处理可以增加 L80-13Cr 钢钝化膜中 Cr 相关化合物的含量，显著提高 L80-13Cr 钢的抗电化学腐蚀，并可以确保 L80-13Cr 钢在海洋环境中至少 3 个月内没有明显腐蚀[35]。

4.3. 牺牲阳极的阴极保护法和外加电流的阴极保护法

牺牲阳极的阴极保护法和外加电流的阴极保护法都能提高钢的耐海水腐蚀性能。其中，牺牲阳极的

阴极保护是最早使用的一种电化学防护技术。此方法是将还原性较强的金属和被保护金属相连构成原电池，还原性较强的金属作为负极发生氧化反应而被消耗，被保护金属作为正极就可以避免被腐蚀。常用的牺牲阳极材料有镁和镁合金、锌和锌合金和铝合金等[36]。其优点是易于安装、很少维护、不需要电源，缺点是该阳极耗能很大，替换用废的阳极比较困难或者昂贵等。

例如研发的以 Al-Zn-In-Si-Mg-Ti 为基底，外层浇铸 15 mm 厚的 Mg-Al-Zn-Mn 合金，获得镁包铝型复合阳极[37]。极化初期，通过镁合金较高的驱动电压产生的电流，使钢构件快速极化，待外层镁全部溶解消耗后，钢构件达到稳定极化，此时钢构件表面形成钙镁保护层，而这时驱动电位较低的铝合金基底可在小电流下维持钢构件的稳定极化。有文献报道[38]在海水中用碳钢作为牺牲阳极保护不锈钢，保护时长可达 8 h 以上。牺牲阳极的阴极保护法原理图如图 2 所示。

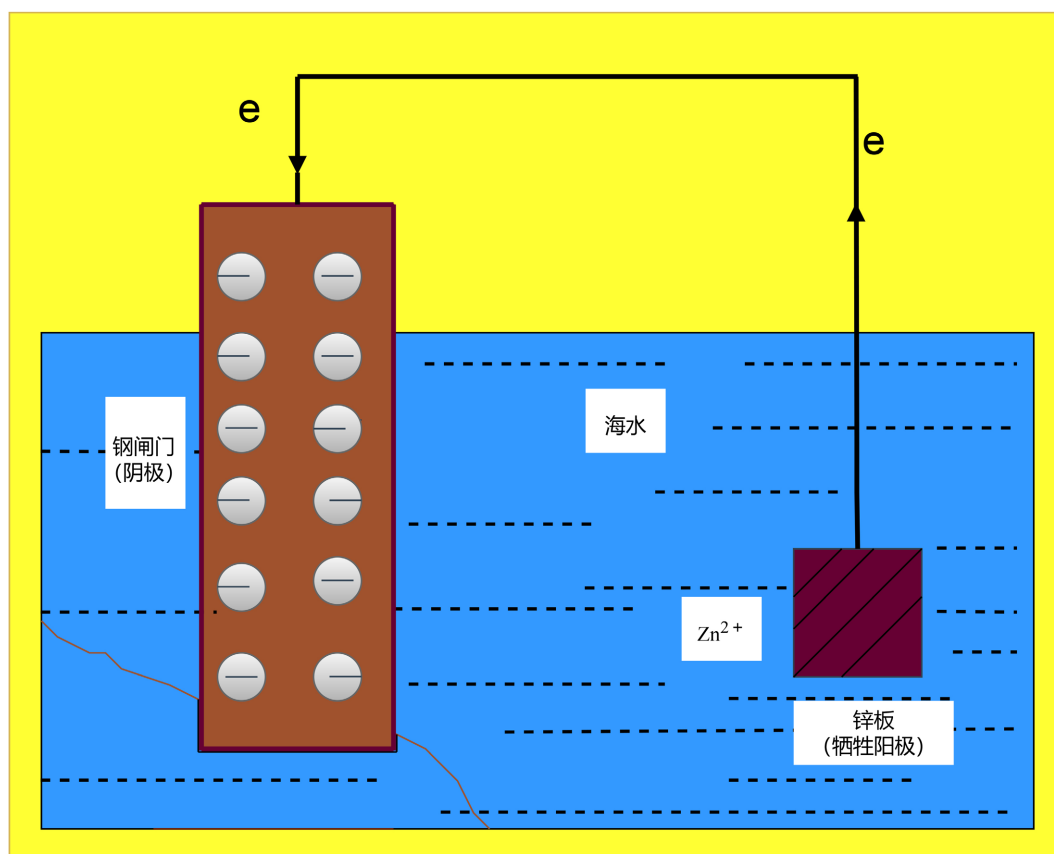


Figure 2. Schematic diagram of the cathodic protection method for sacrificial anodes

图 2. 牺牲阳极的阴极保护法原理图

外加电流的阴极保护是以海水、钢铁材料、辅助阳极、和直流电源构成的电化学体系。在保护电位的范围内，电源向钢铁材料输入保护电流，辅助阳极只起导电作用而不溶解[39]。其原理图如图 3 所示。该方法不需较多的辅助阳极就可以达到防护要求，电位以及电流可以调节；但其技术难度较高，需要电源以及较多的维护和检测费用。

采用外加电流阴极保护法可以有效地提高电缆在 3.5% 的氯化钠模拟海水溶液中的耐腐蚀性[40]。通过外加电流阴极保护法对低合金钢 25CD4/182 奥氏体不锈钢在室温海洋环境下进行了电化学测试，结果表明该组件的阴极保护标准是基于钢基体的标准[41]。

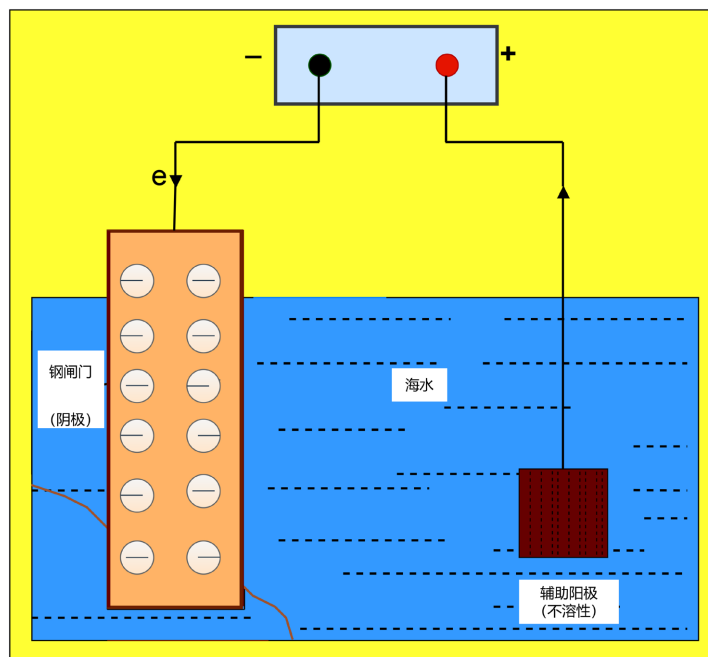


Figure 3. Schematic diagram of the cathodic protection method for impressed current
图 3. 外加电流的阴极保护法原理图

4.4. 涂层法

涂层法是将一种材料通过不同方式涂覆于钢的表面，使其具有更好的耐腐蚀性能。制备涂层的方法有物理气相沉积法[42]、化学气相沉积法[43]、热喷涂法[44]、电沉积法[45]等。

4.4.1. 物理气相沉积法

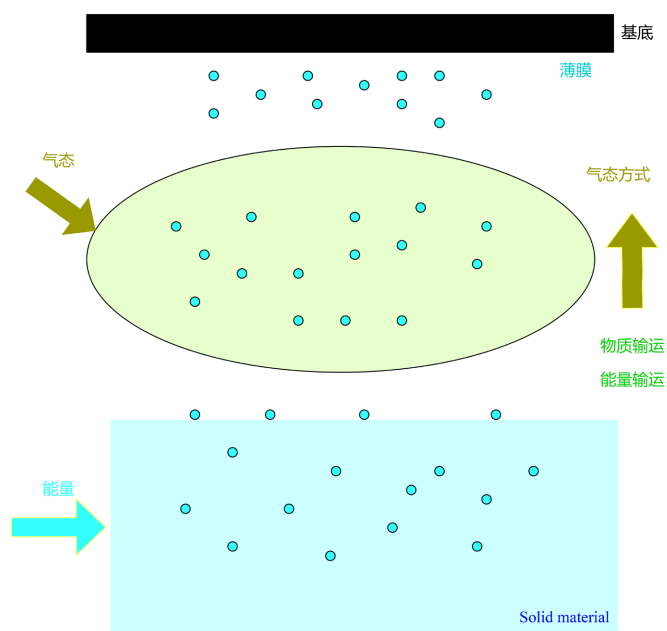


Figure 4. Schematic diagram of physical vapor deposition
图 4. 物理气相沉积原理图

物理气相沉积法作为一种常见金属表面成膜技术，采用物理手段将固态的物质转变为气态原子、分子或部分电离成离子，并通过低压气体在基体的表面上沉积成膜。物理气相沉积法主要包括真空蒸镀[46]、离子镀[47]、磁控溅射[48]等。物理气相沉积法原理及分类如图 4 和图 5 所示。该方法具有沉积温度低、结合强度高、硬度高及对环境不造成污染等优点，但其设备复杂、工艺要求高且易产生内应力和微裂纹。

通过磁控溅射技术制备的 DLC (Cr-Cr/WC-WC-WC/a-C)涂层能稳定材料的开路电位和腐蚀电位。并且腐蚀磨损后的涂层表面只存在比较微小的腐蚀坑，表明提高了材料的腐蚀性[49]。采用磁控溅射制备的 FeCoCrNiMo_{0.3} 涂层可以提高材料模拟海水中的抗点蚀能力；且较高的基底温度可以提高涂层的致密度[50]。

物理气相沉积法发展迅速并且应用十分广泛。随着科技不断进步，这一技术将获得越来越多的应用与发展。

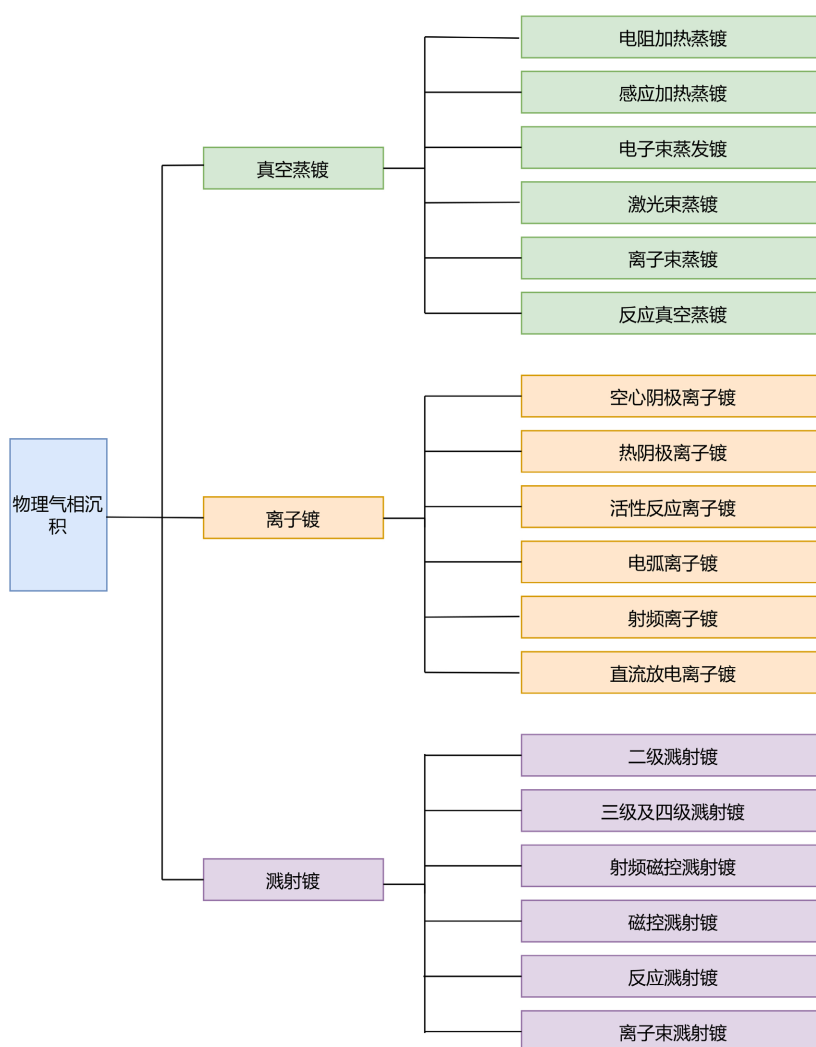


Figure 5. Physical vapor deposition classification map
图 5. 物理气相沉积分类图

4.4.2. 化学气相沉积法

化学气相沉积法是利用一种或者多种气态物质加热使其分解或反应，产生的生成物在材料表面沉积，

生成所需的薄膜。其基本过程为：反应物以气态的形式进入反应室并在反应室内通过加热、等离子体技术或者两者相结合的方式被激活；被激活的反应物在材料表面发生反应并形成薄膜；随着反应物不断进入反应室并不断与材料表面反应，形成最终的薄膜。因此，化学气相沉积(CVD)广泛应用于制备金属氧化物、氮化物、碳化物、立方氮化硼、类金刚石薄膜、石墨烯和碳纳米材料等[51]。化学气相沉积法原理及化学气相沉积法分类如图 6、图 7 所示。中科院宁波材料所赵文杰课题组[52]利用化学气相沉积技术在碳钢或不锈钢基底上沉积大面积高质量石墨烯薄膜，最终提出了长效腐蚀防护机制。

化学气相沉积法沉积物种类多，反应在常压或低真空进行，得到的镀膜纯度高、致密性好、附着力优良、结晶完全，且设备简单、操作维修方便。但该法的反应温度高，对许多基体材料不适用。

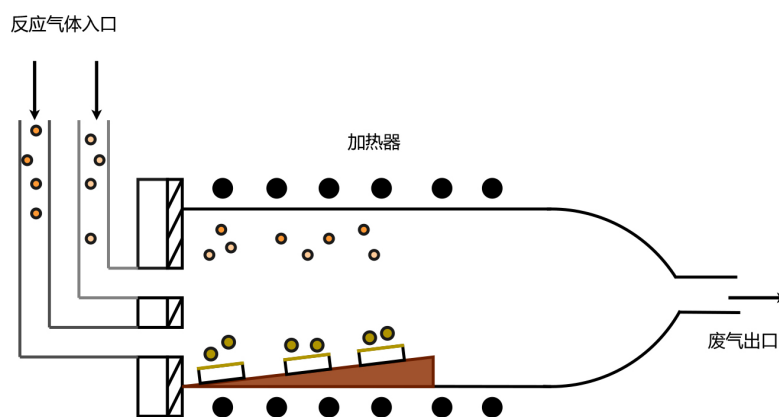


Figure 6. Schematic diagram of chemical vapor deposition
图 6. 化学气相沉积原理图

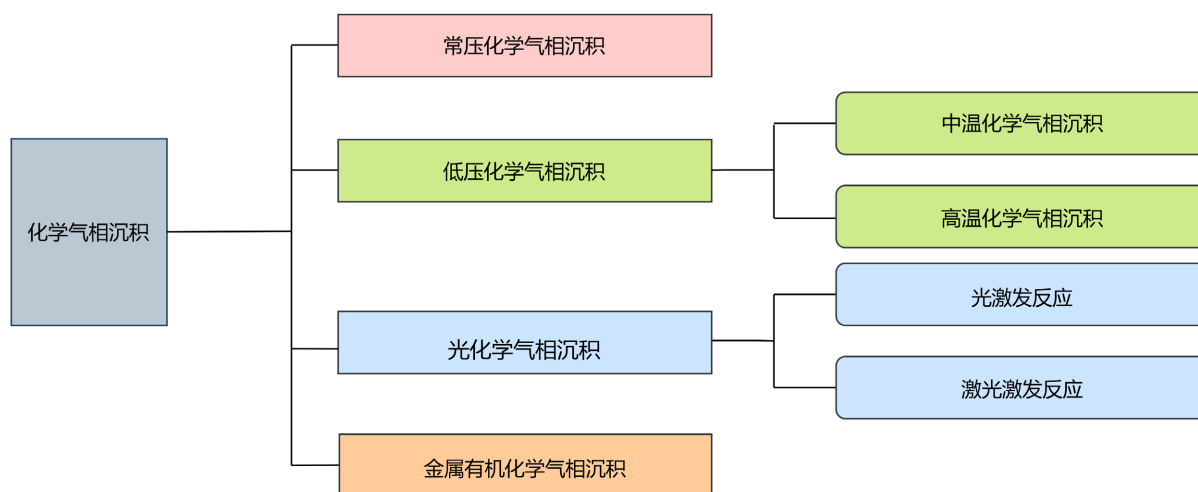


Figure 7. Chemical vapor deposition classification diagram
图 7. 化学气相沉积分类图

4.4.3. 热喷涂法

热喷涂法是指利用热源使喷涂材料加热到熔化或者半熔化状态，用高速气流将喷涂材料雾化成细小的颗粒，以一定的速度喷射到工件表面，最终形成涂层。热喷涂技术按热源不同，可分为火焰喷涂[53]、爆炸喷涂[54]、电弧喷涂[54]及等离子喷涂[55]。热喷涂法原理及其分类如图 8 和图 9 所示。Alireza [56]

等人采用等离子喷涂工艺在高硅铸铁上制备双层 NiCrAlY/莫来石保护层。研究了电化学试验对样品的腐蚀行为。结果表明,在 3.5%NaCl 溶液中,双层 NiCrAlY/莫来石涂层提高了其耐腐蚀性能。

热喷涂法作为表面工程技术的重要组成部分之一,具有适用范围广、操作工艺灵活方便等优点。但该工艺制备的涂层材料利用率低及成膜孔隙率高。

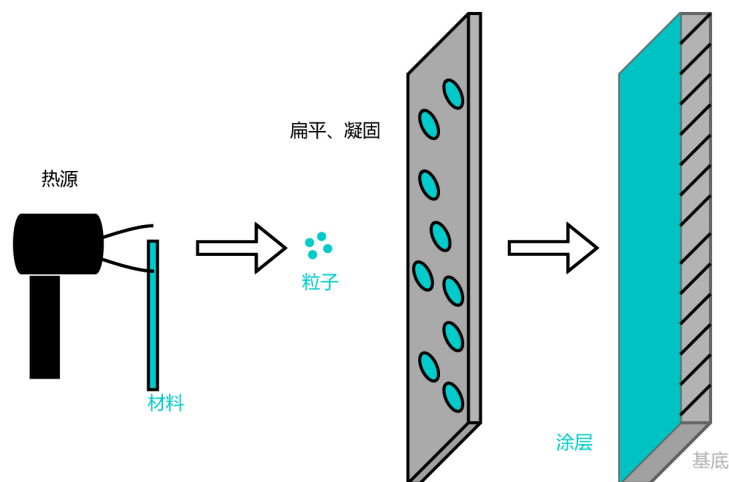


Figure 8. Schematic diagram of the thermal spray method
图 8. 热喷涂法原理图

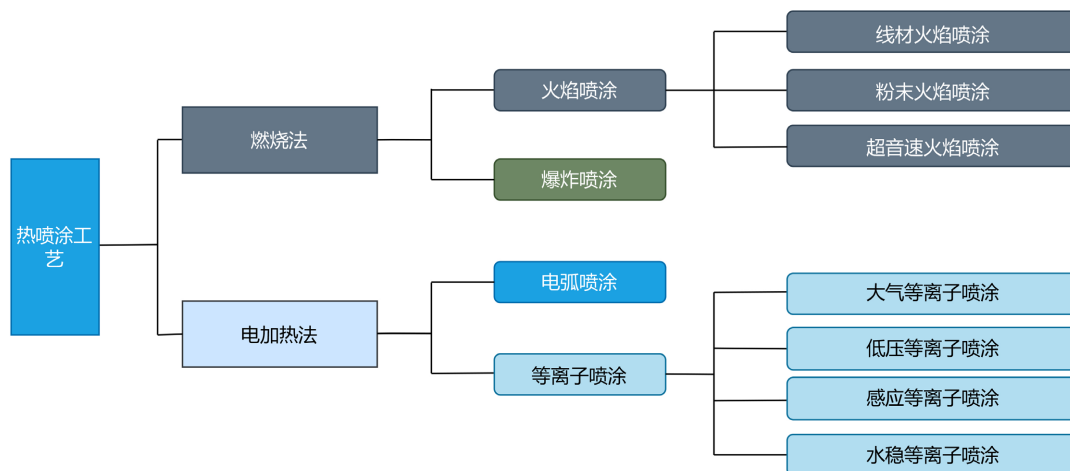


Figure 9. Classification diagram of thermal spraying method
图 9. 热喷涂法分类图

4.4.4. 电沉积法

电沉积是指在外电场作用下,正负离子在电解质溶液中迁移,以及在电极上得失电子的氧化还原反应[57],形成涂层的技术。目前,除了传统的电沉积技术外,还开发了复合沉积[58]、射流电沉积[59]、超声波电沉积[60]、磁场辅助电沉积[61]和脉冲电沉积等多种新技术。

研究表明[62],与直流电沉积相比,脉冲电沉积制备的低碳钢/Co-Cr 合金具有较低的腐蚀电流密度和较高的电荷转移电阻。采用电沉积[63]法制备了经十四烷酸改性的微纳米结构的超疏水锌涂层,与未改性锌涂层和碳钢基底相比,3.5 wt.%氯化钠溶液中涂层的腐蚀电流密度分别降低了 3 倍和 44 倍,显著提高

了碳钢的耐腐蚀性。

随着新能源、新技术等等的不断出现,电沉积技术在融合领域具有很大的发展空间,在许多行业中发挥着良好的保护和装饰作用。然而,该方法的单一生产能力有限,一些涂料(镁和铝)难以获得。

5. 结论和展望

由于海洋环境、材料和防腐方法自身的特性等原因,目前现有的防腐方法可能并不能取得满意的效果,且有些方法需要不断维护,消耗了大量的人力和资源。为了更有效地提高钢在海洋中的耐腐蚀性,可以对各种表面防腐方法进行综合分析,使其发挥各自的优势,达到优势互补。此外,积极开展各种防腐材料的研发与利用,并根据实际需要开发新的防腐技术与方法,从而减少钢材在海水中的腐蚀速率及海洋工程的建设与维修费用,促进海洋事业的发展。

基金项目

国家自然科学基金项目(51904085, U20A20272);河北省自然科学基金项目(E2021402056);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422101235)。

参考文献

- [1] Martinez, F., Edwards, G.R. and Liu, S. (2022) High Alloy Weldments for Fatigue Resistance in Structural Carbon Steel. https://www.researchgate.net/publication/268362803_High_Alloy_Weldments_for_Fatigue_Resistance_in_Structural_Carbon_Steel
- [2] Miraoui, M., Zentar, R. and Abriak, N. (2012) Road Material Basis in Dredged Sediment and Basic Oxygen Furnace Steel Slag. *Construction and Building Materials*, **30**, 309-319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.032>
- [3] Watts, M. (2012) Chlorpyrifos as a Possible Global POP. Pesticide Action Network North America.
- [4] Khaloo, A., Molaei Raisi, E., Hosseini, P. and Tahsiri, H. (2014) Mechanical Performance of Self-Compacting Concrete Reinforced with Steel Fibers. *Construction and Building Materials*, **51**, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>
- [5] Liu, F., Zhan, J. and Yi, Z. (2022) Performance Analysis of m-PSK/QAM Based on LDPC-BICM System in Maritime Atmospheric Turbulence Channel. 2022 *International Joint Conference on Information and Communication Engineering (JCICE)*, Seoul, 20-22 May 2022, 1-5. <https://doi.org/10.1109/jcice56791.2022.00011>
- [6] Abbas, R. (2014) The Excluded Element-Corrosion Challenges of Removing Dissolved Oxygen in Seawater from the Gulf to the Reservoir. *European Annals of Allergy & Clinical Immunology*, **43**, 54-57.
- [7] Tan, L., Chen, Q., Chen, P., Huang, X., Li, L., Zou, K., et al. (2023) Lithium Chloride Protective Layer for Stable Lithium Metal Anode via a Facile Surface Chemistry. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **928**, Article 117063. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.117063>
- [8] Flick, R.E., Murray, J.F. and Ewing, L.C. (2003) Trends in United States Tidal Datum Statistics and Tide Range. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, **129**, 155-164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2003\)129:4\(155\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:4(155))
- [9] Zhu, Y., Hu, T., Li, Y., Hao, J., Han, B. and Yuan, Q. (2023) Pitting Corrosion of 2A12 Aluminum Alloy Long-Scale Specimen in Simulated Seawater Splash Zone, Dynamic Waterline Zone and Full Immersion Zone. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **70**, 101-107. <https://doi.org/10.1108/acmm-01-2023-2747>
- [10] Group ORA (2017) New DNV GL Guidelines Ensure Best Practice Submarine Pipeline Soil Assessments. *Oil Review Africa*, **12**, 38.
- [11] 李健, 佟石, 杨洋, 等. 船舶及海洋工程用耐蚀 E36 钢板的性能分析[J]. 鞍钢技术, 2019(3): 26-31.
- [12] 纪世普. 海洋用低合金钢的研究与进展[J]. 钢铁, 1991, 26(4): 65-7064.
- [13] 杜伟, 李鹤林. 海洋石油平台用钢的现状与发展趋势(一)[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(3): 5-14.
- [14] 张国宏, 成林, 李钰, 等. 海洋耐蚀钢的国内外进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 426-435.
- [15] Hodgkiess, T. and Asimakopoulos, A. (1981) Studies of the Localised-Corrosion Behaviour of Some Stainless Steels, Incolony 825 and Titanium in Seawater. *Desalination*, **38**, 247-256. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(00\)86071-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(00)86071-3)

- [16] Al-Malahy, K.S.E. and Hodgkiess, T. (2003) Comparative Studies of the Seawater Corrosion Behaviour of a Range of Materials. *Desalination*, **158**, 35-42. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(03\)00430-2](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(03)00430-2)
- [17] 高丽飞, 杜敏. 304 不锈钢在淡化海水中的点蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(1): 8-14.
- [18] 胡建朋, 刘智勇, 胡山山, 等. 304 不锈钢在模拟深海和浅海环境中的应力腐蚀行为[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 9-14.
- [19] 邱萍, 许守武, 修林冉, 等. 304 不锈钢螺栓在模拟水下环境中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2021, 54(5): 42-50.
- [20] Chen, W., Schoenitz, M., Ward, T., Dave, R.N. and Dreizin, E.L. (2005) Numerical Simulation of Mechanical Alloying in a Shaker Mill by Discrete Element Method. *KONA Powder and Particle Journal*, **23**, 152-162. <https://doi.org/10.14356/kona.2005018>
- [21] Almeraya, F., Lara, M., Bernal Ponce, V., Tiburcio, C.G., Cabral, J.A., Perez Ortiz, D., et al. (2018) Electrochemical Corrosion of the Stainless Steel 15-5PH and 17-4PH Passivation in Citric Acid. *ECS Meeting Abstracts*, **2018**, 665. <https://doi.org/10.1149/ma2018-02/13/665>
- [22] Li, L., Shang, S.C., Guo, Y., et al. (2019) Optimal Design Method of Sacrificial Anode Cathodic Protection Based on Specifications. *Ship & Boat*, **30**, 87-94.
- [23] Hu, J., Wang, Y., Zhang, Z., Guo, W., Ma, Y., Zhu, W., et al. (2019) Evaluation on the Acidification Damage of the External Anode Mortar Induced by Impressed Current Cathodic Protection. *Construction and Building Materials*, **229**, Article 116869. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116869>
- [24] Li, G., Zheng, Y., Guo, H., Li, Z., Zhu, G., Dong, L., et al. (2024) Preparation Fe-N-C Catalyst for ORR with High Pyridine-Type FeN₄ Based on Nano-SiO₂ Shell Coating Method. *International Journal of Hydrogen Energy*, **64**, 468-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.294>
- [25] Yang, X.-J. and Jiang, Z.-X. (2012) Processing Performance and Corrosion Resistance of 445 Ferritic Stainless Steel. *Corrosion & Protection*, **33**, 630-633.
- [26] Han, X. and Sakairi, M. (2023) The Promotion Effect of Aluminium Ion on Hydrogen Entry into Steel during Atmospheric Corrosion. *Electrochimica Acta*, **458**, Article 142505. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142505>
- [27] Qingchun, L., Qilong, Y. and Zhiwang, Z. (2016) Effect of Nitrogen on the Vanadium Precipitation Behavior of Higher Yield Strength Weathering Steels. In: The Chinese Society for Metals and Chinese Academy of Engineering, Eds., *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015*, Springer International Publishing, 941-946. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48767-0_117
- [28] Wang, C.C., Li, B.L., Qiao, X., Wang, T.B., Qi, P. and Nie, Z.R. (2020) Effect of Primary A Phase Content on Creep Property of High Temperature Titanium Alloy. *Materials Science Forum*, **993**, 217-222. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.993.217>
- [29] Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., et al. (2012) Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environmental Science & Technology*, **46**, 3406-3414. <https://doi.org/10.1021/es203518d>
- [30] da Costa, A.T., de Oliveira, M.C.L. and Antunes, R.A. (2020) Interplay between the Composition of the Passive Film and the Corrosion Resistance of Citric Acid-Passivated AISI 316L Stainless Steel. *Surface and Interface Analysis*, **53**, 374-384. <https://doi.org/10.1002/sia.6927>
- [31] Turgeon, B.E. (2014) Removing Polymerized Linseed Oil and Aged Olive Oil Stains from Paper Using Three Prepared Solutions and Shout Triple Acting Stain Remover. Master's Thesis, Queen's University.
- [32] Lara-Banda, M., Gaona-Tiburcio, C., Zambrano-Robledo, P., Delgado-E, M., Cabral-Miramontes, J.A., Nieves-Mendoza, D., et al. (2020) Correction: Lara-Banda, M., et al. Alternative to Nitric Acid Passivation of 15-5 and 17-4PH Stainless Steel Using Electrochemical Techniques. *Materials* 2020, **13**, 2836. *Materials*, **13**, Article 5322. <https://doi.org/10.3390/ma13235322>
- [33] 马李洋, 丁毅, 马立群, 等. 316L 不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 39-41.
- [34] 程文佳, 闫翔林, 周欢, 等. 柠檬酸钝化 9Cr1Mo 钢在海洋大气环境中的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(12): 54-62.
- [35] 满宗通, 牛伟乾, 靳浩楠, 等. 柠檬酸钝化处理对 L80-13Cr 不锈钢耐海洋大气腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 97-105.
- [36] 袭奇. 试论油气储运管道防腐技术的应用现状[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(3): 51-52.
- [37] Rossi, S., Bonora, P.L., Pasinetti, R., Benedetti, L., Draghetti, M. and Sacco, E. (1998) Laboratory and Field Characterization of a New Sacrificial Anode for Cathodic Protection of Offshore Structures. *CORROSION*, **54**, 1018-1025. <https://doi.org/10.5006/1.3284815>
- [38] Schumacher, M. (1979) *Seawater Corrosion Handbook*. Noyes Data Corporation, 235.

- [39] 侯世忠. 阴极保护技术的研究与应用[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(10): 39-44, 65.
- [40] Hu, P., Li, S., Jiang, N. and Yan, Y. (2019) Investigation of the Impressed Current Cathodic Protection Method for the Cable Parallel Wires in the Rainwater Electrolyte Based on Acoustic Emission Method. *Construction and Building Materials*, **229**, Article 116918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116918>
- [41] Allou, D., Miroud, D., Ouadah, M., Cheniti, B. and Bouyegh, S. (2020) Criterion for Cathodic Protection of 25CD4/Inconel 182 System. *Applied Surface Science*, **502**, Article 144100. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144100>
- [42] Gailevicius, D., Grineviciute, L., Babayigit, C., Bor, E., Turdnev, M., Purlys, V., *et al.* (2019) Photonic Crystal Spatial Filters Fabricated by Physical Vapour Deposition. 2019 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, Munich, 23-27 June 2019, 1. <https://doi.org/10.1109/cleoe-eqec.2019.8872820>
- [43] Seah, C., Chai, S. and Mohamed, A.R. (2014) Mechanisms of Graphene Growth by Chemical Vapour Deposition on Transition Metals. *Carbon*, **70**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.073>
- [44] Toma, F., Bertrand, G., Klein, D., Meunier, C. and Begin, S. (2008) Development of Photocatalytic Active TiO₂ Surfaces by Thermal Spraying of Nanopowders. *Journal of Nanomaterials*, **2008**, Article 384171. <https://doi.org/10.1155/2008/384171>
- [45] Zhang, C., Wang, W., Li, Y., Yang, Y., Wu, Y. and Liu, L. (2018) 3D Printing of Fe-Based Bulk Metallic Glasses and Composites with Large Dimensions and Enhanced Toughness by Thermal Spraying. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 6800-6805. <https://doi.org/10.1039/c8ta00405f>
- [46] Cochachin-Carrera, B., Moreno-Cuevas, J. and Carvajal-Mena, N. (2023) Effects of Concentration by Block Freezing and Vacuum Evaporation on the Physicochemical Properties and Digestibility of Whey. *CyTA-Journal of Food*, **21**, 313-320. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2196321>
- [47] Wang, C., Wen, F., Wang, Y. and Guo, W. (2024) Structure and Tribological Properties of Multiphase Carbon Coatings Fabricated by Multi-Arc Ion Plating. *Surface and Coatings Technology*, **477**, Article 130319. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130319>
- [48] Atabaev, B.G., Dzabbarganov, R., Yuzikaeva, F.R., Permukhamedova, M.A., Shaymardanov, Z.S. and Khalmatov, A.S. (2023) Temperature Dependences of the Sputtering of Negative Silicon Cluster Ions. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **17**, S413-S415. <https://doi.org/10.1134/s1027451023070042>
- [49] Ye, Y., Wang, Y., Ma, X., Zhang, D., Wang, L. and Li, X. (2017) Tribocorrosion Behaviors of Multilayer PVD DLC Coated 304L Stainless Steel in Seawater. *Diamond and Related Materials*, **79**, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2017.09.002>
- [50] Dai, C., Fu, Y., Guo, J. and Du, C. (2020) Effects of Substrate Temperature and Deposition Time on the Morphology and Corrosion Resistance of FeCoCrNiMo0.3 High-Entropy Alloy Coating Fabricated by Magnetron Sputtering. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **27**, 1388-1397. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2149-2>
- [51] 崔洪芝, 练晓娟. 海洋耐蚀耐磨涂层研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(4): 1179-1208.
- [52] Wu, Y., Zhao, W., Zhu, X. and Xue, Q. (2019) Improving the Corrosion Resistance of Graphene-Coated Copper via Accurate Defect Healing without Sacrificing Electronic Conductivity. *Carbon*, **153**, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.07.006>
- [53] Taghi-Ramezani, S. and Valefi, Z. (2023) Effects of Spray Parameters on the Ysz-Alumina Splat Formation during Solution Precursor High Velocity Flame Spraying. *Metals and Materials International*, **30**, 928-940. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01548-x>
- [54] Zhou, H., Li, W., Wang, X., He, C., Wang, J., Zhang, X., *et al.* (2023) Continuous Wire Electrical Explosion Spraying for Porous Coating Deposition Inside a Narrow Tube. *Journal of Thermal Spray Technology*, **32**, 2283-2294. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01614-1>
- [55] Ma, Z., Cai, Z., Qu, D., Chen, T., Dong, S., Deng, C., *et al.* (2023) On the Heat-Transfer Effect of Spraying Speed during the Plasma Spraying on Turbine Blade. *Journal of Thermal Spray Technology*, **32**, 2563-2579. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01680-5>
- [56] Jam, A., Derakhshandeh, S.M.R., Rajaei, H. and Pakseresht, A.H. (2017) Evaluation of Microstructure and Electrochemical Behavior of Dual-Layer NiCrAlY/Mullite Plasma Sprayed Coating on High Silicon Cast Iron Alloy. *Ceramics International*, **43**, 14146-14155. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.155>
- [57] Louloudakis, D., Thongpan, W., Mouratis, K., Koudoumas, E., Kiriakidis, G. and Singjai, P. (2019) Novel Spark Method for Deposition of Metal Oxide Thin Films: Deposition of Hexagonal Tungsten Oxide. *physica status solidi (a)*, **216**, Article 1800513. <https://doi.org/10.1002/pssa.201800513>
- [58] Zhou, H., Gu, Y., Wang, W., Liu, R., Bai, Y., Zhang, B., *et al.* (2018) Study of Temperature Dependence of the Deposition Rates of Ni-P Based Sonication-Assisted Nanoscale Electroless Composite Plating. *Materials Science*, **24**, 382-386.

-
- <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.4.19128>
- [59] Wang, F., Fu, X., Shen, M., Ye, X.U., Duan, S., Wang, Q., *et al.* (2020) Preparation of Ni-P-Sic Composite Coatings by Magnetic Field- Enhanced Jet Electrodeposition. *International Journal of Electrochemical Science*, **15**, 10432-10452. <https://doi.org/10.20964/2020.10.13>
- [60] Li, A., Zhu, Z., Xue, Z. and Liu, Y. (2022) Periodic Ultrasound-Assisted Electrodeposition of Fe-Ni Alloy Foil. *Materials Research Bulletin*, **150**, Article 111778. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111778>
- [61] Agarwal, S., Kant, N. and Rajput, J. (2020) Magnetic Field Assisted Electron Acceleration Due to Inverse Free Electron Laser. *Journal of Physics: Conference Series*, **1531**, Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1531/1/012042>
- [62] Saravanan, G. and Mohan, S. (2012) Structure, Composition and Corrosion Resistance Studies of Co-Cr Alloy Electrodeposited from Deep Eutectic Solvent (DES) *Journal of Alloys and Compounds*, **522**, 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.01.140>
- [63] 凌凌, 白超云, 尹华伟, 等. 碳钢表面超疏水锌涂层的制备及防腐性能[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(22): 1677-1685.