

不同离子注入工艺对 45CrMoVE 结构钢 性能影响研究

李奎*, 彭文雅, 李钢, 赵宇, 王影

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 目的 通过分析不同元素离子注入对结构钢耐腐蚀能力及力学性能的影响, 筛选出最佳注入元素, 以改善 45CrMoVE 结构钢的表面组成, 提高其耐腐蚀性能。方法 基于前期研究工艺, 开展 Mo、Co、Ta、Ti 等离子注入技术研究。将注入离子后的结构钢试样放入 NaCl 溶液中, 分析不同元素离子注入对结构钢腐蚀电位的影响, 结合盐雾腐蚀试验, 研究不同离子注入对结构钢耐腐蚀性能的影响, 同时结合 X 射线衍射技术和力学性能测试, 对结构钢试样表面层的物相进行分析, 研究离子注入对结构钢力学性能的影响。结果 氯化钠溶液在注入 Mo 离子后的自然腐蚀电位最高、最正, 当基体材料中注入的 Mo 剂量为 3×10^{17} atoms/cm² 时, 腐蚀电位接近 0.5 V, 腐蚀电流最小。注入 Mo 离子后, 试片的耐盐雾腐蚀性能最好。Mo 离子与结构钢中的 C 原子相结合, 在结构钢表面层形成较多的 MoC 和 Mo₂C 等碳化物, 提高了结构钢的耐腐蚀性能。离子注入层厚度尺寸小, 注入离子后基本不改变基体材料的表面形貌和宏观力学性能。结论 离子注入能够有效改善结构钢的耐腐蚀性能, 对于 45CrMoVE 结构钢试样, 当注入 3×10^{17} atoms/cm² 剂量的 Mo 离子、注入能量为 130 keV 时, 离子注入对 45CrMoVE 结构钢耐腐蚀能力的改善效果最佳。

关键词: 45CrMoVE 结构钢; 离子注入; 腐蚀电位; 耐腐蚀性; 界面组织; 力学性能

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)02-0073-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.010

Effects of Different Implantation Processes on Properties of 45CrMoVE Structural Steel

LI Kui, PENG Wenya, LI Gang, ZHAO Yu, WANG Ying

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Hunan Zhuzhou 412002, China)

ABSTRACT: The work aims to select the best injected elements by analyzing the effect of different ion implantation on the corrosion resistance and mechanical properties of the structural steel to improve the surface composition and corrosion resistance of 45CrMoVE structural steel. Based on the previous research process, the study of Mo, Co, Ta and Ti ion implantation technology was carried out. The structural steel samples with ion implantation were put into NaCl solution to analyze the effect of ion implantation of different elements on the corrosion potential of structural steel. Combined with the salt spray corrosion test, the effect of different ion implantation on the corrosion resistance of structural steel was studied. The phase of the surface

收稿日期: 2023-08-31; 修订日期: 2023-12-13

Received: 2023-08-31; Revised: 2023-12-13

引文格式: 李奎, 彭文雅, 李钢, 等. 不同离子注入工艺对 45CrMoVE 结构钢性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 73-80.

LI Kui, PENG Wenya, LI Gang, et al. Effects of Different Implantation Processes on Properties of 45CrMoVE Structural Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 73-80.

*通信作者 (Corresponding author)

layer of structural steel samples was analyzed by X-ray diffraction technique as well. Mechanical properties of structural steel after ion implantation were investigated by mechanical properties test. After Mo ions were injected into NaCl solution, the natural corrosion potential and pitting potential were the highest and most positive. When the structural steel was injected with Mo ions for 3×10^{17} atoms/cm², the corrosion potential was close to 0.5 V and the corrosion current was the minimum. After implantation of Mo ions, the test piece had the best salt spray corrosion resistance. Mo ion combined with C atom in structural steel to form more carbides such as MoC and Mo₂C on the surface layer of structural steel, which improved the corrosion resistance of structural steel. Due to the small thickness of the ion implantation layer, the surface morphology and macroscopic mechanical properties of the structural steel were basically unchanged after ion implantation. Ion implantation can effectively improve the corrosion resistance of 45CrMoVE structural steel. While Mo ions are injected with 3×10^{17} atoms/cm² and the implantation energy is 130 keV, the corrosion resistance of 45CrMoVE structural steel is the best.

KEY WORDS: 45CrMoVE structural steel; ion implantation; corrosion potential; corrosion resistance; interfacial microstructure; mechanical property

针对航空发动机复杂的服役环境,零件材料面临着环境腐蚀问题,尤其在高湿、高盐的海洋环境下,材料的腐蚀问题尤其明显^[1-3]。考虑到结构钢材料密度低、强度高、性能特点,航空发动机零件轴类材料多用结构钢合金,该类零件接触大气环境容易发生腐蚀现象^[4-6],要求对零件材料进行腐蚀防护处理。采用离子注入技术,可以对合金进行表面改性,以提高合金的耐腐蚀性能^[7-12]。该技术是将预先选择的元素原子电离成离子,并在高压电场作用下,将离子高速打入固体表面,使之形成近表面合金层的物理过程^[13-15]。离子注入后,在金属表面形成稳定致密的合金、亚稳相合金、非晶态合金等组织。这种致密结构在金属表面形成了一层坚固的防护层,有利于阻止盐雾的浸入和扩散,从而有效提高低压轴结构钢材料的抗腐蚀能力,提高零件的使用寿命。

美国海军实验室用 Ti⁺、Ta⁺注入滚珠轴承钢 52100、M50 合金钢,提高其抗蚀能力,该技术已应用于海上飞机发动机轴承^[16-17]。美国宇航局(NASA)利用 Ti⁺、C⁺注入改性航天飞机发动机的燃料氧化剂涡轮泵轴承后,耐磨性和耐腐蚀性能大大提高^[18-19]。英国著名航空发动机制造商罗罗公司的统计表明,1976 年以前,航空发动机零件中有 60%是因磨损而报废,采用离子改性耐磨涂层后,报废率降至 33%,效果很显著。近年来,美国、欧洲相继制定和实施了 IHPTET、VAATE、UEET、ACME2II、AMET 等高性能航空发动机计划,这些研究计划均把发展离子注入表面改性技术作为主要的战略研究目标之一^[20]。

目前,国内该技术已在螺旋桨及涡轮叶片、精密轴承等方面的开始应用,主要是利用氮离子、氧离子注入技术进行表面改性^[21-23],金属离子注入技术的应用才刚起步。本文针对 45CrMoVE 结构钢,采用不同的金属离子注入,探索不同离子注入对结构钢耐腐蚀能力和力学性能的影响,筛选最佳注入工艺,从而实现航空发动机轴类零件表面改性,提高发动机寿命和安全性。

1 试验

1.1 离子注入试样制备

本文以 45CrMoVE 结构钢材料试片作为基体材料,通过注入不同元素的离子改善结构钢试样的耐腐蚀能力。试验前,首先将结构钢切成 $\phi 90 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 试片,并对试片表面进行打磨抛光,然后采用丙酮和无水乙醇进行超声清洗,并烘干备用。基于前期研究(注入 C 离子),分别选择 Ta、Mo、Co、Ti 等 4 种元素作为注入离子,按表 1 所示工艺方案,采用 MEVVA 源离子注入机,将不同元素不同注入剂量/注入能量注入静置结构钢试片中。

表 1 离子注入工艺方案
Tab.1 Ion implantation process scheme

注入方案	注入元素	剂量/ (10^{17} atoms·cm ⁻²)	能量/keV	温度/°C
1	C	5	50	200
2	Ta	3	130	200
3	Mo	1	130	200
		3	130	200
		5	130	400
		7	130	400
4	Co	5	130	200
5	Ti	5	130	200

1.2 表征方法

1.2.1 电化学分析

利用美国普林斯顿公司电化学工作站(PARSTAT 2273)对离子注入样品的电化学性能进行测试,样品的测试面积为 0.5 cm²。测试前,先将样品在 NaCl 水溶液中浸泡 30 min,等开路电压稳定后,再开始测试。动电位极化的扫描速率为 1 mV/s,电化学阻抗的测试频率为 1 MHz~0.01 Hz,扰动信号

是幅值为 10 mV 的正弦波。在 3.5% 的 NaCl 溶液实验时, 温度为室温。通过上述实验条件得到样品的电位极化曲线。极化曲线的测试数据利用 CorrView 软件进行 Tafel 函数拟合处理, 以此来评估样品的耐腐蚀性能。

1.2.2 盐雾腐蚀试验

采用英博联科技 ZDD1T 盐雾腐蚀试验机进行试验, 盐溶液的质量浓度为 $(5 \pm 1)\%$, 进行连续 6 h 的盐雾试验, 试验温度为 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。盐雾实验结束后, 先用流动自来水轻轻洗涤试件, 再用去离子水洗涤, 去除盐的沉积物, 并摇动去除水滴, 然后放置在正常大气条件下 10~20 min, 立即检查。对试样进行拍照, 称量检查质量损失情况。

1.2.3 表面层物相分析

采用 D/max-RB 型大功率 X 射线衍射仪 (XRD) 对试样注入前后的物相进行分析, 研究注入前后的相变化情况。

1.2.4 硬度

采用 HX-1000 型显微硬度计测量不同注入样品表面的维氏硬度, 使用顶角为 136° 的金刚石棱锥体作为压印头, 在 100 g 的轻载荷下, 缓慢压入试样表面。加载时间为 12 s, 然后缓慢卸载。

1.2.5 拉伸性能研究

对离子注入前后的试样按照 GB/T 228—2002 开展室温拉伸。该试验在 WE-300B 型试验机上进行, 采用液压加荷, 拉伸速率为 5~25 MPa/s。试样尺寸如图 1 所示。

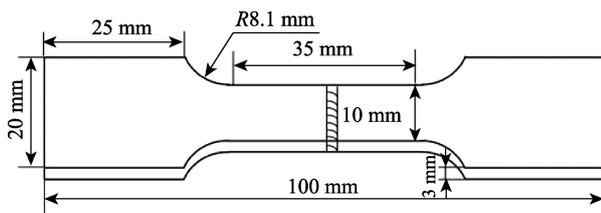


图 1 拉伸试样尺寸
Fig.1 Tensile specimen size

2 试验结果

2.1 试片表面电位

注入不同元素离子后, 试样的极化曲线对比如图 2 所示。从多组试验结果可以清楚看到, 在低压轴钢 45CrMoVE 中注入 C、Co、Mo、Ta、Ti 离子后, 结构钢试样表面的腐蚀电位相较于结构钢样品都有一定程度的提高。当基体材料中注入 Mo 离子时, 其腐蚀电位最高最正, 而注入 Ti 离子时的腐蚀电位相对较低。从合金元素对电化学腐蚀的影响发现, 注入

Mo 离子的试样在氯化钠溶液中的自然腐蚀电位最高, 耐腐蚀性能最佳, 注入 Co、Cr、C 离子的试样, 自然腐蚀电位也非常高, 注入 Ta、Ti 离子的试样自然腐蚀电位也有明显提高。值得关注的是, Ta 作为一种具有极好耐腐蚀合金元素, 耐腐蚀性能不如试验前预期的高, 可能与 Ta 元素较重、射程和饱和注入都比较低有关。钢中增加碳含量一般会降低耐腐蚀性能, 注入 C 离子后获得了比注入耐腐蚀元素 Ta 更高的耐腐蚀性能。原因在于离子注入表面层是注入离子与基体原子在原子尺度产生的复杂相互作用, 形成了非平衡态结构的铁碳化合物, 与钢中形成的化合物有本质区别。从离子注入层对结构钢耐腐蚀性能的影响机制分析, 离子注入对腐蚀电流的影响不明显。离子注入大幅度提高了自然腐蚀电位, 自然腐蚀电位代表电极没有通过电流时的电位, 在自然腐蚀电位以下, 电解液发生阴极反应, 材料表面不发生腐蚀, 只有高于自然腐蚀电位才发生腐蚀。因此, 离子注入是通过提高低压轴钢 (45CrMoVE) 表面在氯化钠溶液中的自然腐蚀电位, 使结构钢表面更难发生电化学腐蚀来提高结构钢的耐蚀性。

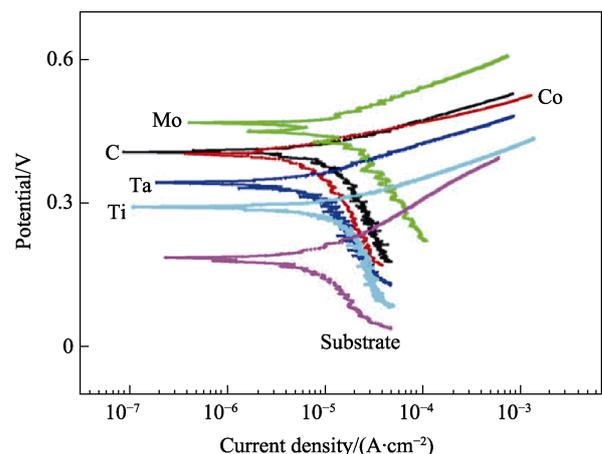


图 2 不同元素离子注入的电位极化曲线
Fig.2 Potential polarization curves of ion implantation of different elements

为了探索 Mo 离子的最佳注入剂量, 研究了不同注入剂量下试样表面的极化曲线, 结果如图 3 所示。从 4 组试验结果可以看出, 注入 Mo 的低压轴钢 (45CrMoVE) 材料样品中, 所有注入剂量的腐蚀电位和腐蚀电流密度相较于未注入的基体样品都有大幅度提高。离子注入剂量对电化学腐蚀有明显影响, 随注入剂量的增加, 表面 Mo 元素含量增加, 自然腐蚀电位提高。达到饱和注入剂量后, Mo 饱和注入剂量样品都具有最高的自然腐蚀电位。再增加剂量, 表面合金元素含量不会继续增加, 耐腐蚀性能还有所下降。当基体材料中注入的 Mo 剂量为 $3 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^2$ 时, 腐蚀电位接近 0.5 V, 结果最正, 腐蚀电流也最小。

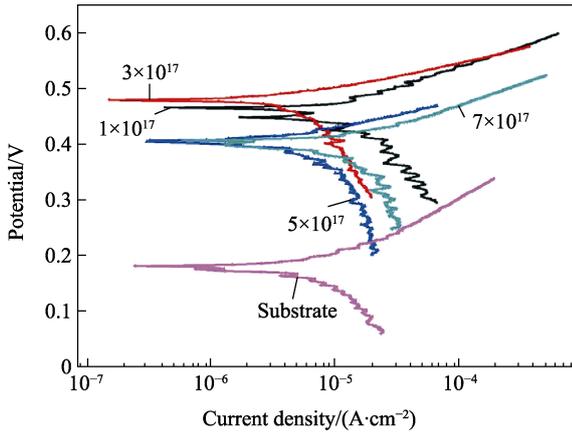


图3 不同剂量离子注入 Mo 的电位极化曲线
Fig.3 Potential polarization curves of Mo ions injected at different doses

2.2 盐雾腐蚀宏观形貌

对离子注入后试样进行 6 h 的盐雾腐蚀试验，不同元素离子注入条件下的腐蚀宏观形貌如图 4 所示。图 4a、4b 为未进行离子注入腐蚀试验前后对照试片，试件表面出现了很大面积的基体金属腐蚀，有大量的点蚀和红锈出现，表明该基体合金的抗腐蚀性能差。图 4c~4f 为注入不同元素离子试样经盐雾腐蚀试验后的表面形貌。从图 4c 可以看出，注入 Ta 元素试样经盐雾试验后，试件表面出现了金属的腐蚀，有大量的

点蚀坑和红锈产物出现。相对而言，腐蚀状况较对比未注入前有一定程度的改善，但抗腐蚀效果改善不明显。图 4d 结果显示，注入 Mo 元素后，45CrMoVE 结构钢试件表面局部存在轻微锈迹和点蚀现象，腐蚀状况较相对未注入试片有较大程度的改善，防护效果较明显。从图 4e、4f 可以看出，注入 Co 元素和 Ti 元素后，结构钢试样表面均能看到较为明显的金属光泽，腐蚀状态相比未注入试样有明显改善，不过这 2 种注入元素试样表面同时也存在一定面积的金属腐蚀，相比于注入 Mo 元素的试样，耐腐蚀能力稍有不如，一定程度上验证了上述电化学腐蚀分析结果。

在盐雾腐蚀性能试验中，各种离子注入条件后的试样质量损失情况对比见表 2，不同离子注入元素条件下试片质量损失量与未注入试片质量损失量占比情况如图 5 所示。从试验结果可以看出，各种注入工艺处理的材料在抗盐雾腐蚀性能方面都有了一定程度的提升，主要原因是形成弥散分布的纳米尺度碳化物，与离子注入过程中能量作用下原子尺度注入离子和基体原子相互作用形成的特殊结构密切相关^[24-25]。注 Mo 和注 Co 的试片，质量损失量都有一定程度的降低，一定程度上表明，注入 Mo 和 Co 离子对提高基体材料的耐盐雾腐蚀性能效果最好。与未注入相比，无论何种注入条件，试片的耐腐蚀性能均有所改善。

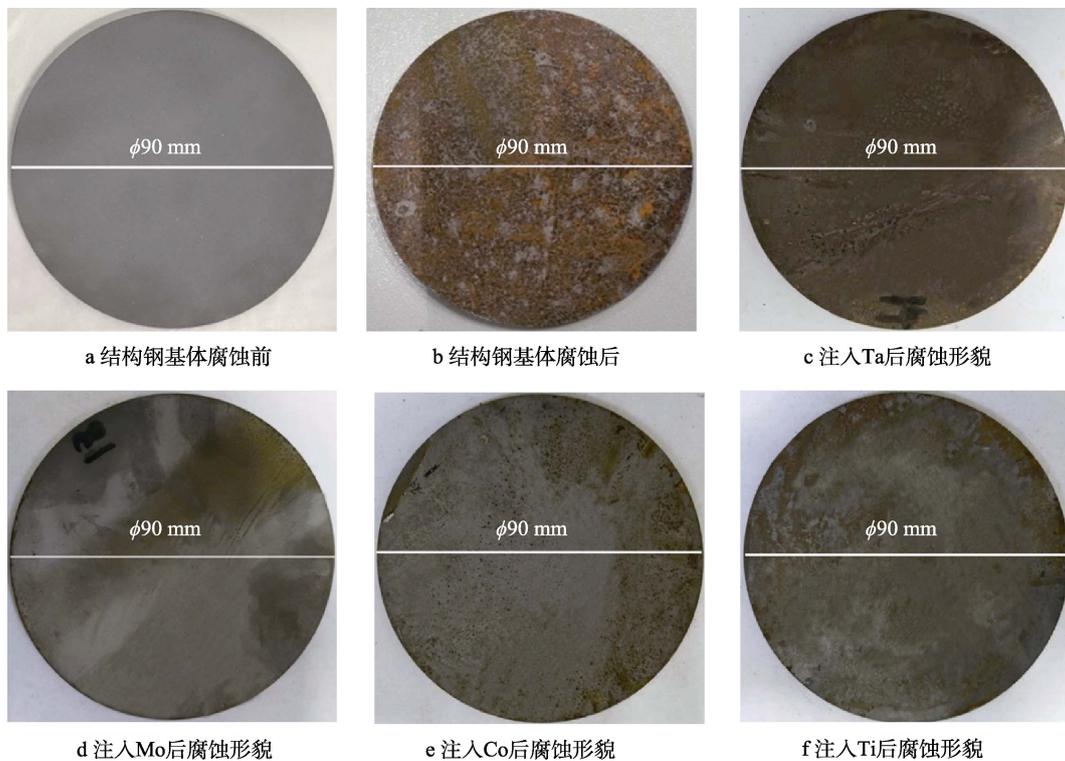


图4 不同注离子注入方案下腐蚀形貌

Fig.4 Corrosion morphology under different ion implantation schemes: a) before corrosion of structural steel; b) after corrosion of structural steel; c) corrosion morphology after Ta implantation; d) corrosion morphology after Mo implantation; e) corrosion morphology after Co implantation; f) corrosion morphology after Ti implantation

表 2 离子注入对盐雾腐蚀质量损失影响
Tab.2 Effect of ion implantation on the weight loss of salt spray corrosion

注入方案	试验前质量/g	试验后质量/g	损失质量/g	离子注入对盐雾腐蚀的影响/%
基体材料	148.591	148.521	0.07	—
方案 1 (注入 Ta 元素)	148.997	148.950	0.047	67.1
方案 2 (注入 Mo 元素)	148.207	148.177	0.030	42.9
方案 3 (注入 Co 元素)	149.710	149.673	0.037	52.9
方案 4 (注入 Ti 元素)	149.533	149.490	0.043	61.4

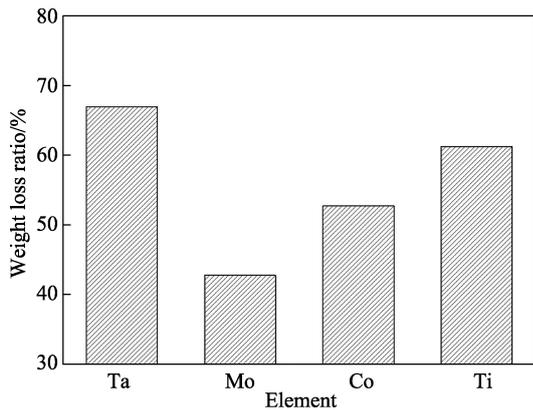


图 5 不同注入元素条件对盐雾腐蚀失重影响
Fig.5 Effect of implantation of different elements on the weight loss of salt spray corrosion

2.3 离子注入表面层物相分析

结构钢材料离子注入层耐腐蚀性能的提高与表面层特殊结构密切相关,离子注入是一个非平衡态过程,会产生亚稳态和非晶态结构^[26]。采用 XRD 等方法研究表面层物相分析,不同注入工艺下试片的 XRD 衍射谱结果如图 6 所示。结果显示,注入 Mo 离子后,试片表面层中存在一定强度的 MoC 和 Mo₂C 等 Mo 碳化物峰;注入 Ta 离子后,注入表面层中存在微弱的 TaC 和 FeTa 峰,Fe₃C 峰也有所增加;注入 Co 离子后,注入表面层中的碳化物明显很少;注入 Ti 后离子,存在 Fe₂Ti 相峰,碳化物峰也有所增强。结果表明,离子注入后,表面形成碳化物,有利于提高合金的耐腐蚀性能。也可看出,注入 Mo 离子后,

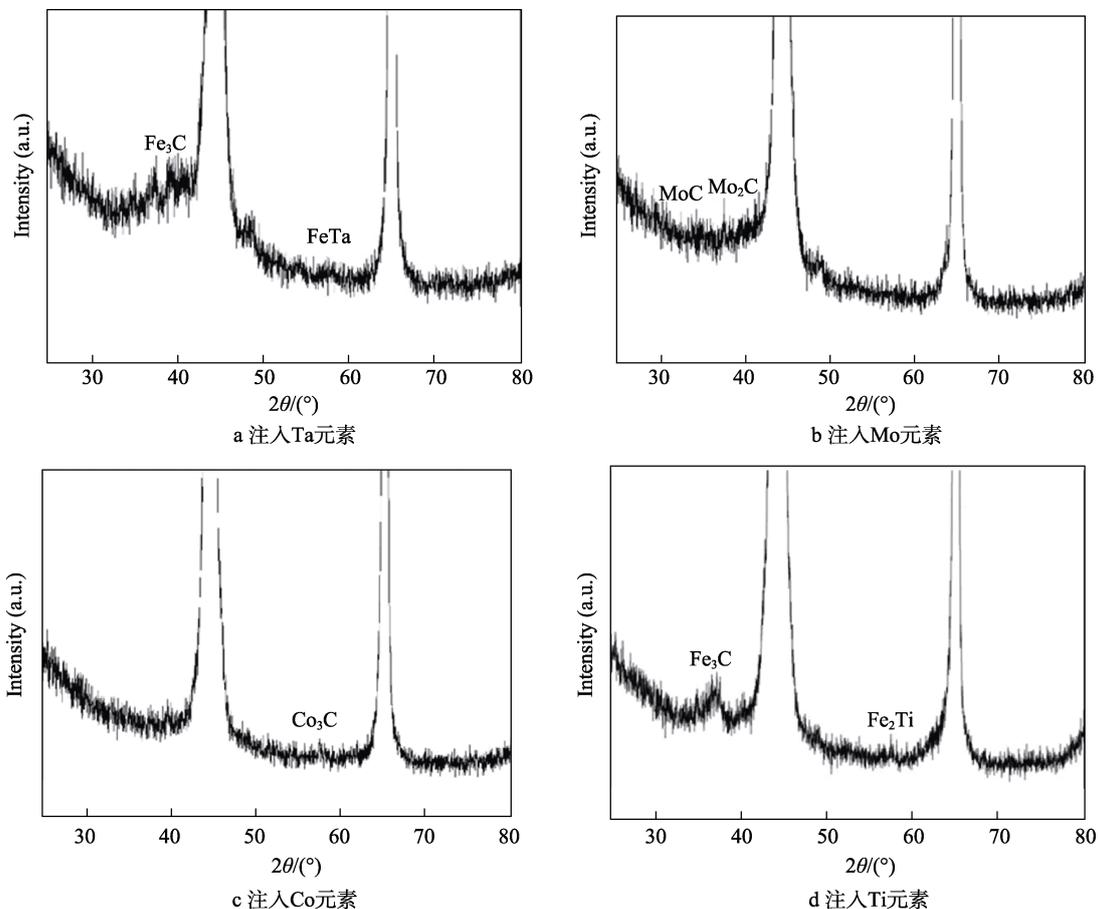


图 6 不同注入工艺的 XRD 衍射结果
Fig.6 XRD results of different implantation processes: a) injection Ta; b) injection Mo; c) injection Co; d) injection Ti

形成的 MoC 和 Mo₂C 等 Mo 碳化物形式多,产生的抗腐蚀效果好。

2.4 力学性能

为了研究离子注入对金属材料力学性能的影响,对不同离子注入的结构钢试样和未注入离子的结构钢试样开展了拉伸性能测试,每个条件下取 3 件样品的平均值作为有效结果,结果如图 7 所示。可以看出,与空白试样相比,注入不同离子后,试样抗拉强度、屈服强度以及伸长率均变化不大。这是因为离子注入是注入离子与基体原子在原子尺度相互作用的过程,而且发生在试样表面以下纳米量级,因而不会改变基体材料的拉伸性能。同时测试了不同离子注入后结构钢试样的表面硬度,见表 3。结果表明,离子注入后,45CrMoVE 结构钢的表面硬度变化不大,与基体材料相比相差不超过 2%,说明离子注入对结构钢表面硬度的影响不大。

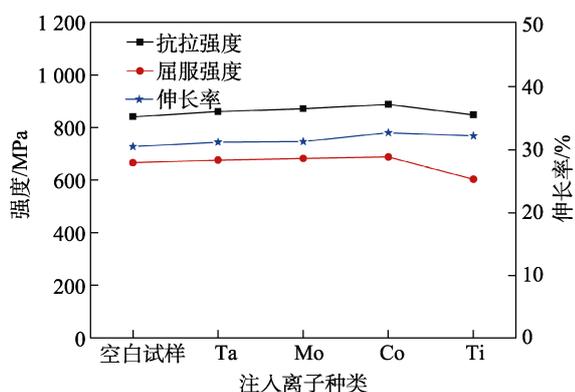


图 7 离子注入对拉伸性能影响

Fig.7 Effect of ion implantation on tensile properties

表 3 离子注入对结构钢表面硬度的影响

Tab.3 Effect of ion implantation on surface hardness of structural steel

注入方案	硬度 (HV)	离子注入对硬度的影响/%
基体材料	161.52	—
注入 Ta 元素	162.22	0.4
注入 Mo 元素	162.96	0.9
注入 Co 元素	164.27	1.7
注入 Ti 元素	161.58	0.03

3 分析与讨论

根据上述试验结果,离子注入能够有效改善结构钢表面的耐腐蚀性能,原因主要在于 2 个方面:一是在离子注入后,由于金属阳离子与结构钢基体发生反应,导致结构钢表面的电荷分布发生变化,提高了结构钢表面的自然腐蚀电位和点蚀电位,使得结构钢在腐蚀环境中更难被氧化和发生电化学腐蚀,从而提高了结构钢的抗腐蚀性能,本项研究中的电位极化曲线

未能观察到明显的点蚀电位,注入 4 种离子主要是提高了结构钢的自然腐蚀电位;二是离子注入过程中,注入的金属阳离子会与结构钢中的 C 离子发生反应,并在表面形成不同类型的碳化物层,从而一定程度上抑制了结构钢的表面腐蚀。本次研究中注入 Mo 离子后,形成的 MoC 和 Mo₂C 等 Mo 碳化物形式多,产生的抗腐蚀效果好。此外,根据空白试样和注入不同离子后试样的力学性能试验结果,离子注入过程由于是针对结构钢表面的改性处理,离子注入量和注入深度较小,影响层深度仅为结构钢试样表面以下纳米量级,离子注入后对结构钢本身的力学性能没有产生太大影响,不影响其正常使用。因此,离子注入技术对提高结构钢的耐腐蚀能力,增强其工程应用具有非常重要的意义。

4 结论

1) 在低压轴钢 45CrMoVE 中注入 C、Co、Mo、Ta、Ti 离子后,结构钢试样表面的腐蚀电位相较于结构钢样品都有一定程度的提高,注入 Mo 离子的试样在氯化钠溶液中的自然腐蚀电位最高、最正。当基体材料中注入的 Mo 剂量为 3×10^{17} atoms/cm² 时,腐蚀电位接近 0.5 V,结构钢的耐腐蚀性能最好。

2) 注入 Mo 离子后,45CrMoVE 试片的耐盐雾腐蚀性能最好。这与离子注入过程中能量作用下原子尺度注入离子与基体原子相互作用形成的特殊结构密切相关。

3) 离子注入 Mo 元素后,在结构钢表面层形成较多的 MoC 和 Mo₂C 等碳化物,有利于提高合金的耐腐蚀性能。

4) 注入离子与基体原子的相互作用过程发生在表面以下纳米量级,不会改变基体材料的表面形貌和宏观力学性能。

参考文献:

- [1] 叶远珩. 航空发动机腐蚀防护与控制[J]. 军民两用技术与产品, 2017(2): 52.
YE Y H. Corrosion Protection and Control of Aero-Engine[J]. Dual Use Technologies & Products, 2017(2): 52.
- [2] 余肖飞, 敖良忠, 吴梓祺. 沿海地带航空发动机腐蚀研究[J]. 现代工业经济和信信息化, 2021(11): 179-182.
YU X F, AO L Z, WU Z Q. Research on Aircraft Engine Corrosion in Coastal Zone[J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2021(11): 179-182.
- [3] 柳文林, 徐可君, 段成美. 军用航空发动机的腐蚀及腐蚀控制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(2): 116-118.
LIU W L, XU K J, DUAN C M. Corrosion and Corrosion Control for Aeroengine Used for Military Plane[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(2): 116-118.

- [4] 宗方勇, 詹青青. 海洋环境耐蚀结构钢研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 97-105.
ZONG F Y, ZHAN Q Q. Research Progress of Corrosion Resistant Structural Steels in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 97-105.
- [5] 丁振. 海洋平台结构钢腐蚀疲劳裂纹扩展的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
DING Z. Research on Corrosion Fatigue Crack Growth of Offshore Platform Structural Steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [6] 张幸, 何卫平. 飞机外场腐蚀损伤检测方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 116-123.
ZHANG X, HE W P. Investigations on Outfield Detection Methods for Corrosion Damages of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 116-123.
- [7] 束娜, 方光荣. 离子束材料改性技术及其应用[C]// 第十三届全国电子束、离子束、光子束学术年会论文集. 长沙: 中国电子学会, 2005.
SHU N, FANG G R. Ion Beam Material Modification Technology and Its Application[C]// Proceedings of the 13th National Academic Annual Conference on Electron Beam, Ion Beam, and Photon Beam. Changsha: China Electronics Society, 2005.
- [8] 陈敏. 离子注入在超导研究领域中的应用[J]. 材料导报, 1997, 11(4): 33-35.
CHEN M. Application of Ion Implantation to Superconducting Research[J]. Materials Review, 1997, 11(4): 33-35.
- [9] 汤宝寅. 等离子体源离子注入(I)——原理和技术[J]. 物理, 1994, 23(1): 41-45.
TANG B Y. Plasma Source Ion Implantation (I) — Principle and Technology[J]. Physics, 1994, 23(1): 41-45.
- [10] 詹中伟, 孙志华, 汤智慧, 等. 离子镀铝与离子液体电镀铝涂层性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 74-81.
ZHAN Z W, SUN Z H, TANG Z H, et al. Comparison Study on Performance of IVD and ILEP Aluminum Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 74-81.
- [11] 张通和, 吴瑜光. 离子束材料改性科学和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
ZHANG T H, WU Y G. Science and Application of Ion Beam Material Modification[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [12] 戴达煌, 周克崧. 现代材料表面技术科学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
DAI D H, ZHOU K S. Modern Material Surface Technology Science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [13] 陈勇军, 史庆南, 左孝青, 等. 金属表面改性——离子注入技术的发展与应用[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 4-7.
CHEN Y J, SHI Q N, ZUO X Q, et al. Improvement of Surface Property of Metallic Materials—The Development and Application of Ion Implantation[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 4-7.
- [14] 张志强. 离子注入技术与金属表面改性强化[J]. 机械工程师, 2005(11): 81-83.
ZHANG Z Q. Ion Implantation Technology and Metal Surface Modification and Strengthening[J]. Mechanical Engineer, 2005(11): 81-83.
- [15] 张光胜, 章宗城. N⁺注入提高 GCr15 钢抗接触疲劳性能研究[J]. 金属热处理学报, 2001, 22(4): 60-64.
ZHANG G S, ZHANG Z C. Study on the Contacting Fatigue Resistance of GCr15 Steel by N⁺ Ion Implantation[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2001, 22(4): 60-64.
- [16] 陈锦. 离子注入航空轴承延寿应用研究[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(6): 84-86.
CHEN J. Application Research for Prolonging Life of aero-Bearing with Ion Implantation[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(6): 84-86.
- [17] 王小峰, 汤宝寅, 李福泉. Cr₄Mo₄V 轴承钢金属离子注入抗磨损、抗腐蚀性能研究[J]. 机械工程师, 2002(10): 17-19.
WANG X F, TANG B Y, LI F Q. Effects of Metal Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition on Corrosion and Wear Resistances of Cr₄Mo₄V Bearing Steel[J]. Mechanical Engineer, 2002(10): 17-19.
- [18] 刘洪喜, 汤宝寅, 王小峰, 等. 9Cr18 轴承钢表面不同等离子体浸没离子注入强化处理技术研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(2): 167-171.
LIU H X, TANG B Y, WANG X F, et al. Enhancement on the Surface Properties of 9Cr18 Bearing Steel by Different Plasma Source Immersion Ion Implantation Processes[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(2): 167-171.
- [19] POATE J M, SAADATMAND K. Ion Beam Technologies in the Semiconductor World (Plenary)[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(2): 868-872.
- [20] 梁华, 雷建中, 梁林霞, 等. 一种 GCr15 轴承钢球表面强化的离子注入工艺: CN100523284C[P]. 2009-08-05.
LIANG H, LEI J Z, LIANG L X, et al. An Ion Implantation Process for Surface Strengthening of GCr15 Bearing Steel: CN100523284C[P]. 2009-08-05.
- [21] 孙跃, 林秀, 江少群, 等. 1Cr₁₈Ni₉ 等离子体注渗氮层的组织及性能分析[J]. 中国表面工程, 2005, 18(5): 5-11.
SUN Y, LIN X, JIANG S Q, et al. Microstructure and Properties of Ion Implanted and Nitrided Layer of 1Cr₁₈Ni₉ Steel[J]. China Surface Engineering, 2005, 18(5): 5-11.
- [22] 孙跃, 董学军, 夏立芳. N 等离子体基注渗方法研究[J]. 真空, 2003, 40(3): 33-37.
SUN Y, DONG X J, XIA L F. N Ion Implantation Using Method of Plasma Base Ion Implantation at Elevated Temperature[J]. Vacuum, 2003, 40(3): 33-37.
- [23] 王贻华, 胡正琼. 离子注入与分析基础[M]. 北京: 航

- 空工业出版社, 1992.
- WANG Y H, HU Z Q. *Fundamentals of Ion Implantation and Analysis*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992.
- [24] 刘洪喜, 孟春蕾, 林波, 等. 氮钛双离子注入 AZ31 镁合金的抗腐蚀和力学性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(8): 137-142.
- LIU H X, MENG C L, LIN B, et al. Corrosion Resistance and Mechanical Property of AZ31 Magnesium Alloy by N/Ti Duplex Ion Implantation[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(8): 137-142.
- [25] 黄拿灿, 吴起白, 胡社军. 工模具钢的金属离子注入及其强化机理[J]. 热加工工艺, 2000, 29(2): 8-10.
- HUANG N C, WU Q B, HU S J. Metallic Ions Implantation and Its Strength Mechanism in Tool and Mould Steel[J]. *Hot Working Technology*, 2000, 29(2): 8-10.
- [26] NA H. Metallic Ions Implantation and Its Strength Mechanism in Tool and Mould Steel[J]. *Hot working technology*, 2000, 2: 8-10.