

38CrMoAl 钢钛催渗等离子氮化工艺研究

钟厉, 王帅峰, 门昕皓, 韩西

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: **目的** 探究 38CrMoAl 钢钛催渗等离子渗氮工艺及机理。**方法** 在其他工艺参数确定的情况下, 通过常规等离子渗氮与钛催渗等离子渗氮处理对比试验, 研究 38CrMoAl 钢钛催渗离子渗氮处理随渗氮时间的变化规律。对试样进行表面硬度、渗层深度检测和显微金相组织与 SEM 形貌的观察, 探究不同处理工艺的催渗效果及钛催渗等离子渗氮的机理。**结果** 在渗氮的前 3 h, 渗氮层厚度增加明显, 当渗氮时间超过 3 h 后, 其氮化层的厚度便趋于饱和。对比不同时间 (3、5、8 h) 钛催渗等离子渗氮的表面硬度, 差距不大。综合得出 38CrMoAl 钢在渗氮温度 535 °C、氨气流量 2.0 L/min 的工艺参数下, 钛催渗等离子渗氮效率最优的渗氮时间为 3 h, 其表面硬度为 1160.8HV, 渗层深度为 300 μm, 优于常规离子渗氮 8 h 的作用效果。**结论** 38CrMoAl 钢试样经过钛催渗等离子渗氮后, 渗层的表面硬度和深度明显高于常规离子渗氮。钛的加入可以促使合金元素向表面富集, 有利于表面合金化, 提升渗氮效率, 增强渗氮效果。

关键词: 等离子渗氮; 钛; 催渗; 38CrMoAl 钢; 微观组织

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0159-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.016

Research on Plasma Nitriding Process of 38CrMoAl Steel with Ti Catalyst

ZHONG Li, WANG Shuai-feng, MEN Xin-hao, HAN Xi

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: This paper aims to explore the mechanism of plasma nitriding process for 38CrMoAl steel. Under the condition that other process parameters are determined, through the contrast test of conventional plasma nitriding and titanium catalyzed plasma nitriding, the variation law of titanium catalyzed plasma nitriding treatment with nitriding time of 38CrMoAl steel is studied. The surface hardness, depth, micro-structure and SEM morphology of the samples are observed to explore the effect of different treatment processes and the nitriding mechanism of plasma nitriding. It is shown that in the first 3 hours of nitriding, the thickness of nitriding layer increases obviously. When the nitriding time exceeds 3 hours, the thickness of nitriding layer tends to be saturated. At the same time, comparing with the surface hardness of titanium-catalyzed nitriding at different times, there is little difference in surface hardness in 3, 5 and 8 hours. It is concluded that the optimal nitriding time is 3 hours under the conditions of nitriding temperature 535 °C and ammonia flow rate 2.0 L/min. Under this process parameter, the surface

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-06-04

Received: 2020-12-22; Revised: 2021-06-04

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2020jcyj-msxmX0749); 重庆市研究生联合培养基地项目 (JDLHPYJD2020031); 重庆市研究生导师团队建设项目 (JDDSTD2019007)

Fund: General Project of Chongqing Natural Science Foundation (cstc2020jcyj-msxmX0749); Chongqing Postgraduate Joint Training Base Project (JDLHPYJD2020031); Chongqing Postgraduate Tutor Team Building Project (JDDSTD2019007)

作者简介: 钟厉 (1965—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: ZHONG Li (1965—), Female, Doctor, Professor, Research focus: materials surface engineering.

引文格式: 钟厉, 王帅峰, 门昕皓, 等. 38CrMoAl 钢钛催渗等离子氮化工艺研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 159-166.

ZHONG Li, WANG Shuai-feng, MEN Xin-hao, et al. Research on plasma nitriding process of 38CrMoAl steel with Ti catalyst[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 159-166.

hardness of titanium ion nitriding is 1160.8HV, and the penetration depth is 300 μm , which is better than the effect of conventional ion nitriding for 8 hours. The surface hardness and depth of the nitrided layer of 38CrMoAl steel sample after plasma nitriding with titanium catalyst are significantly higher than that of conventional plasma nitriding. The addition of titanium can promote the enrichment of alloying elements to the surface, which is conducive to surface alloying, nitriding efficiency improvement, and nitriding effect enhancement.

KEY WORDS: plasma nitriding; titanium; catalyst; 38CrMoAl steel; microstructure

38CrMoAl 钢多用于冲击载荷小、疲劳强度及耐磨性高、尺寸精度高的零件,如车床主轴、压缩机活塞杆、精密丝杆、高压阀门等^[1]。导致这些零部件失效的主要原因是磨损和疲劳裂纹的产生,因此对提升材料表面性能的要求变得更加严苛。离子渗氮技术作为提升材料表面性能的重要手段,得到了广泛应用^[2],但常规离子渗氮仍然存在渗氮效率低、渗层性能较差的问题。为了进一步提升渗氮效率和渗层性能,国内外学者做了很多研究,许多新的渗氮工艺也不断研究出来,如离子氮碳共渗、活性屏离子渗氮、复合离子渗氮强化、快速离子渗氮、离子多元共渗等。

Fattah 等^[3]对 AISI4140 奥氏体钢进行了渗氮和氮碳共渗的对比研究,得出碳原子的存在会促进 $\epsilon\text{-Fe}_2.3\text{N}$ 相的生成,使共渗层的耐蚀性能高于渗氮层。但相比渗氮处理,氮碳共渗会在化合物层与奥氏体区的界面处形成富碳区,阻碍氮、碳原子的扩渗,导致化合物层较薄。Hoshiyama Yasuhiro 等^[4]对奥氏体不锈钢进行了活性屏等离子体氮化处理,并评估了处理后样品的力学性能,发现 S 相的厚度随着处理时间的增加而增加。结果表明,活性屏等离子渗氮提高了奥氏体不锈钢的耐磨性和疲劳强度。H. Aghajani 等^[5]利用激光相变硬化-离子渗氮-渗硫复合改性工艺,在材料表面制备了一层由球状颗粒相互叠嵌沉积而成的复合改性层,该改性层具有耐磨、耐蚀、自润滑等综合性能,摩擦系数较基体有所降低,磨损质量也大为降低。韩宝军等^[6-12]在离子渗氮过程中通过加入稀土发现,稀土可加速渗氮介质的分解,且稀土进入钢件表面会引起周围铁原子点阵畸变,有利于氮原子的吸附和扩散,具有明显的催渗作用,且能提高渗层性能。钟厉等^[13-21]通过对离子多元共渗工艺的研究发现,其提高渗氮效率的同时改善了渗氮层的性能。

在离子多元共渗工艺的研究中,碳、氮、硼、铝、硫、钒元素研究较多,但钛元素共渗研究很少。钛作为一种强氮化元素,在等离子渗氮过程中,氮元素在扩散之前可能优先与钛结合生成氮化物,并且氮化钛具有高硬度和低摩擦系数的特性。因此,钛元素参与材料共渗处理将会有助于提升其表面硬度和渗层深度。本文基于等离子渗氮工艺特点,通过有效控制渗氮温度、氨气流量等参数,研究了钛在不同渗氮时间参数下,其等离子渗氮催渗效果的变化规律,分析了渗氮层的形成机理和渗层形貌特征,探讨了钛催渗等

离子渗氮的综合性能和渗氮效率最优的工艺参数,为等离子快速渗氮新工艺提供理论和实际应用参考。

1 试验

1.1 材料

本次试验材料为 38CrMoAl 钢,其化学成分(质量分数)为: C 0.35%~0.42%, Mn 0.30%~0.60%, Mo 0.15%~0.25%, Cr 1.35%~1.65%, Al 0.70%~1.10%, Si 0.20%~0.45%。将 38CrMoAl 钢进行调质处理后,加工成尺寸为 11 mm×11 mm×9 mm 的长方体。

1.2 方案

本文用 LDMC-50A 型脉冲等离子氮化炉进行渗氮试验,结合氮化炉自身结构,钛的添加方式为,在阳极盘外接一个立柱,并外挂钛条,同时在阴极盘上放置海绵钛。

首先进行对比试验,确定钛参与的离子渗氮的处理效果,基于之前的研究^[22],并结合参考文献[8,13],渗氮时间定为 8 h,进行试验一:在保温温度 535 $^{\circ}\text{C}$ 、氨气流量 2.0 L/min 的条件下进行 8 h 的常规离子渗氮(R)和钛催渗离子渗氮(T)。

在确定渗氮效果后,对钛参与的离子渗氮进行进一步研究,其他因素不变,通过改变保温时间,确定钛催渗快速离子渗氮最适合的保温时间,即试验二:钛催渗渗氮温度为 535 $^{\circ}\text{C}$,氨气流量为 2.0 L/min,保温时间分别为 1、3、5 h。选择综合效果最优、效率最高的钛催渗等离子渗氮工艺的保温时间,并进行同样保温时间的常规离子渗氮,与其进行对比。具体试验方案见表 1。

表 1 钛催渗离子渗氮对比试验方案

Tab.1 The comparison experiment scheme of titanium catalyzed plasma nitriding

Samples	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Ammonia flow/(L·min ⁻¹)	Time/h	Ti
R8	535	2.0	8	N
T8	535	2.0	8	Y
T5	535	2.0	5	Y
T3	535	2.0	3	Y
T1	535	2.0	1	Y

1.3 检测方法

在测试硬度前, 用 5#金相砂纸对被测表面进行打磨、清洁, 以便于通过目镜清晰地观察试样表面的压痕。用 HX-1000TM/LCD 型显微硬度计施加 200 g 载荷, 保载 15 s, 测量其渗层深度及表面硬度。以检测平均硬度值作为试样的最终硬度值。

金相观察时, 试样表面不能出现划痕、污迹, 需达到镜面效果。进行金相显微组织观察前, 首先选用 800#、1000#、1200#水磨砂纸进行粗磨, 使用 10#、7#金相砂纸精磨试样剖面, 再经 P-2 型金相抛光机抛光—4%的硝酸乙醇溶液腐蚀—清水冲洗腐蚀面—无水乙醇溶液擦去腐蚀污迹。最后用 XJZ-6 型金相显微镜对显微金相组织进行观察与分析。

用日立 S-3700N 型扫描电子显微镜进行 SEM 形貌观察及渗层能谱分析, 以确定渗层主要元素的含量。为了解元素以何种形式存在于渗氮层表面, 采用 Rigaku D/max-2500P C 型 X 射线衍射仪进行物相分析, 试验管电压为 30 kV, 管电流为 20 mA, 靶材选用铜靶。扫描方式为连续扫描, 步长为 0.02, 起始角度为 10°, 终止角度为 90°。

2 试验结果

2.1 表面硬度与渗层深度

在对试样经预处理和切割后, 按照所设计的试验方案进行试验。从表面硬度和渗层深度可以初步判断出离子渗氮效果。38CrMoAl 钢 6 组试样的渗层硬度分布曲线、表面硬度和渗层深度对比及渗氮层厚度与保温时间的关系曲线分别如图 1—3 所示。

从图 1 不难发现, 6 组试样的渗层硬度均是从表至里逐渐下降, 最终下降到基体的硬度。如图 2 所示, 2 组 R 试样中, R8 的表面硬度略大于 R3, 渗层深度增加明显。4 组 T 试样中, 当渗氮时间从 1 h 增加到 3 h 时, 表面硬度与渗层深度都有明显提高; 从 3 h 增加到 5、8 h 时, 表面硬度与渗层深度的增加明显减缓。初步确定优化时间为 3 h。通过 T8 和 R8 试样以及 T3 和 R3 试样的对比可以明显看出, 经钛催渗氮的试样, 渗层深度和表面硬度都有明显提高。同时, 相比常规渗氮, 钛催渗氮的硬度梯度更平缓。通过对比还可以看出, 3 h 钛催渗氮的渗层深度基本接近常规渗氮 8 h 的值, 且表面硬度有明显提升, 说明钛催渗等离子渗氮是一种快速高效的渗氮方法。

从图 3 可以看出, 在渗氮前 3 h, 渗氮层厚度增加明显。当超过 3 h 后, 其氮化层的厚度便趋于饱和。同时, 对比不同时间钛催渗氮的表面硬度来看, 3、5、8 h 的表面硬度差距不大。因此, 综合选择 38CrMoAl 钢钛催渗等离子渗氮的保温时间以 3 h 为最优。

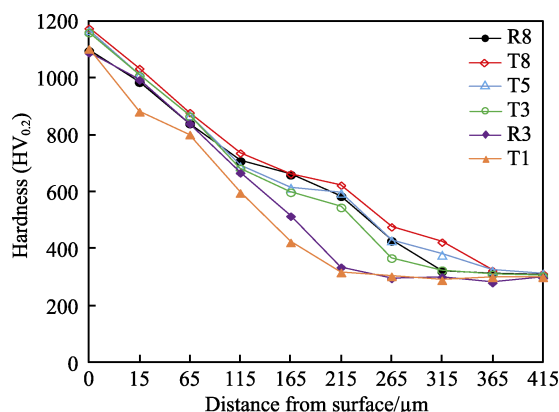


图 1 38CrMoAl 钢试样不同工艺下渗层硬度分布曲线
Fig.1 The hardness distribution curve of nitrided layers about 38CrMoAl steel samples under different processes

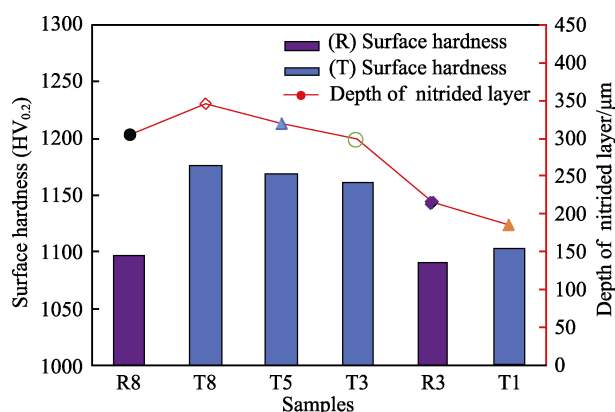


图 2 38CrMoAl 钢试样不同工艺下表面硬度和渗层深度对比
Fig.2 The comparison of surface hardness and penetration depth of 38CrMoAl steel samples under different processes

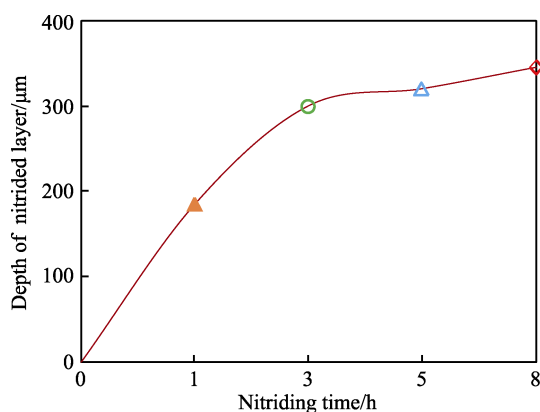


图 3 38CrMoAl 钢试样渗氮层厚度与渗氮时间关系曲线
Fig.3 Relationship between penetration depth and nitriding time of 38CrMoAl steel samples

2.2 渗层显微金相组织

38CrMoAl 钢不同处理工艺的金相显微组织如图 4 所示。通过观察可以看出, 试样从表至里依次为白色的化合物层、深色的扩散层、浅色的基体。

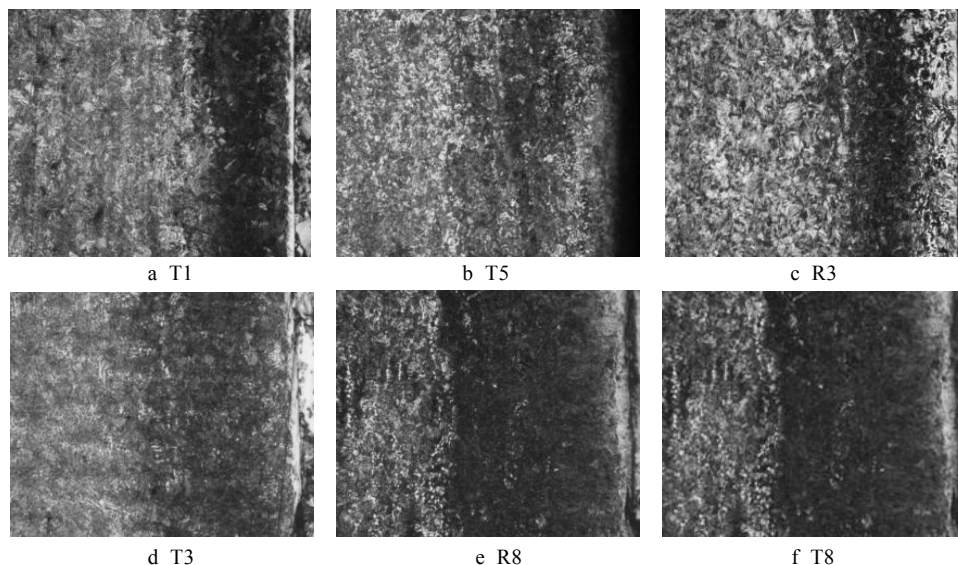


图 4 38CrMoAl 钢试样经不同工艺处理后的金相显微组织
Fig.4 The microstructure of 38CrMoAl steel samples under different treatment processes

对不同处理工艺进行对比, 首先对比 T1、T3、T5、T8 试样可以看出, 随着保温时间的延长, 试样的化合物层、扩散层的厚度均有所提升, 且组织更加均匀, 说明增加保温时间有助于氮离子的渗入, 提高渗氮效果。化合物层主要由 γ' 相和 ϵ 相组成^[23-24]。 ϵ 相硬度高, 具有良好的耐磨性, 且具有较高的电极电位, 能够提高零件的耐磨性和耐腐蚀性。 γ' 相的硬度低于 ϵ 相, 但韧性较好。因此, 相对与常规离子渗氮, 钛催渗等离子渗氮试样的硬度下降平缓。随着渗层深度的增加, 催渗效果也开始减弱, 试样渗层的硬度变化梯度随之变得陡峭。

对比钛催渗氮(图 4c、e)和常规离子渗氮(图 4d、f)的金相显微组织可以看出, 钛催渗氮的白

亮层和扩散层都比常规渗氮要厚, 渗氮效果明显优于常规渗氮。还可以看出, 3 h 钛催渗氮和常规渗氮相比, 渗氮层的厚度和均匀度提升较为明显, 说明钛催渗氮在快速离子渗氮中有重要作用。观察钛催渗氮和常规渗氮的化合物层和扩散层交界处还可以看出, 常规渗氮有较多的脉状组织。

2.3 渗层 SEM 形貌观察

为了观察渗层更为细微的部分, 用扫描电子显微镜对渗层的微观组织进行观察分析。为了进一步分析钛的加入对等离子渗氮的作用效果, 扫描电镜的观察选取常规离子渗氮和钛催渗离子渗氮 3 h 进行对比, 其结果如图 5 所示。

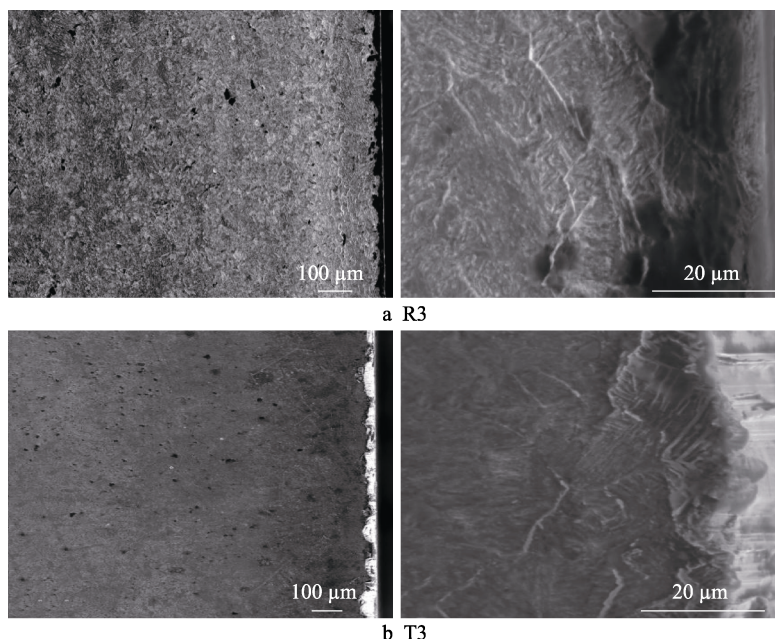


图 5 38CrMoAl 钢常规等离子渗氮和钛催渗离子渗氮 3 h 渗层截面 SEM 形貌

Fig.5 The SEM morphology of the cross-section of 38CrMoAl steel conventional plasma nitriding and titanium-catalyzed plasma nitriding for 3 hours

38CrMoAl 钢常规等离子渗氮 3 h 试样截面的 SEM 形貌如图 5a 所示。从图 5a 左图中很难看出化合物层的存在,大致可以看出扩散层与基体的交界,且交界处存在大量脉状组织,扩散层厚度明显小于 T3 试样。此外,从图 5a 右图中也可看出,其化合物层较薄,且与扩散层交界处存在较多横向析出的条状氮化物。

38CrMoAl 钢经钛催渗等离子渗氮 3 h 试样截面的 SEM 形貌如图 5b 所示。由图 5b 左图可以看出,试样有一层较薄的化合物层,扩散层颜色较深。因为渗层和基体的耐蚀性不同,经腐蚀后,呈现不同的颜色,渗层的耐蚀性显然强于基体。由图 5b 左图可大致测出扩散层的厚度在 300 μm 左右,与金相显微镜观察结果吻合。由图 5b 右图可以看出,化合物层颜色均匀,较为致密。在扩散层与化合物层交界处的条状组织为析出的氮化物。

经过对 38CrMoAl 钢两种渗氮试样化合物层与扩散层交界处的条纹状氮化物的分析表明,其对零件的韧性、疲劳强度有不利影响,金属材料易发生疲劳断裂。将 T3 与 R3 两试样渗层截面 SEM 形貌对比后发现,T3 试样的条状氮化物相对于 R3 试样较少,添加的 Ti 元素减少了条状析出物,说明钛的加入提高了渗层组织的性能。

2.4 渗层能谱分析

R3 试样渗层扫描区域如图 6 所示,其能谱分析

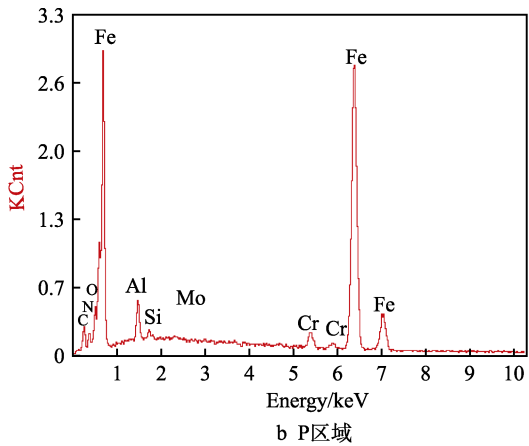
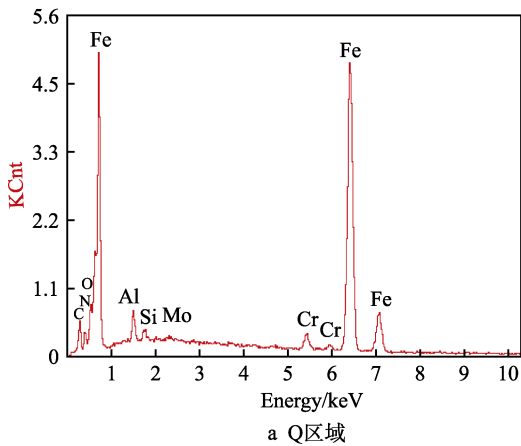


图 7 R3 试样能谱分析图谱
Fig.7 Energy spectrum analysis chart of R3 sample

表 2 R3 试样 EDS 能谱检测结果
Tab.2 EDS energy spectrum test results of R3 sample

	wt%					
Elements	C	N	Al	Si	Mo	Cr
Region Q	3.42	2.00	1.66	0.59	0.42	2.31
Region P	2.94	1.88	2.23	0.46	0.36	2.45

表 3 T3 试样 EDS 能谱检测结果
Tab.3 EDS energy spectrum test results of T3 sample

	wt%					
Elements	C	N	Al	Si	Mo	Cr
Region Q	2.87	4.32	2.83	1.07	0.86	4.49
Region P	3.00	3.09	3.18	0.69	0.55	3.30

图谱如图 7 所示,EDS 能谱检测见表 2。T3 试样渗层扫描区域示意图、能谱分析图谱分别如图 8 和 9 所示,EDS 能谱检测结果见表 3。

可以看出,两个工艺试样的氮元素含量从 Q 到 P 区域均依次减少。对比在 T3、R3 试样在两区域的氮元素含量,T3 试样渗入的氮元素均明显高于 R3 试样,而材料本身不含有氮元素,氮元素完全来自于离子渗入,说明钛的加入能明显提高氮元素的渗入。两工艺试样的氮元素含量均从表至里依次下降的分布规律与 38CrMoAl 钢试样不同工艺下渗层硬度从表至里逐渐下降相吻合,且 T3 试样的氮元素含量高于 R3 试样也与两试样的表面硬度测试结果一致。与 R3 试样

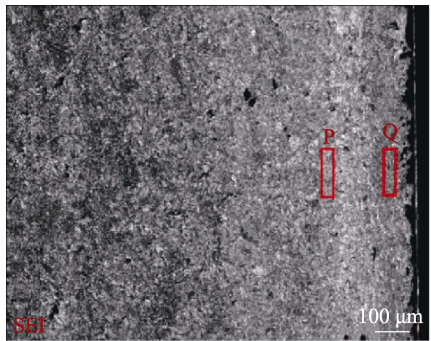


图 6 R3 试样渗层扫描区域示意图 (100×)
Fig.6 Scanning area sketch of R3 sample's penetrating layer (100×)

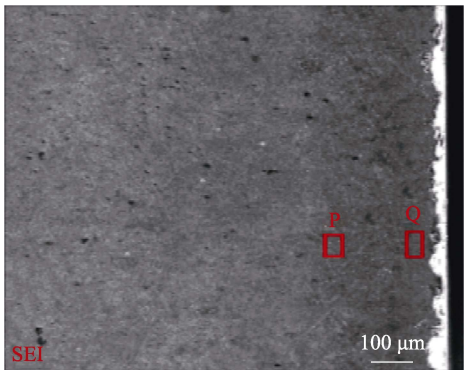


图 8 T3 试样渗层扫描区域示意
Fig.8 Scanning area sketch of T3 sample's penetrating layer

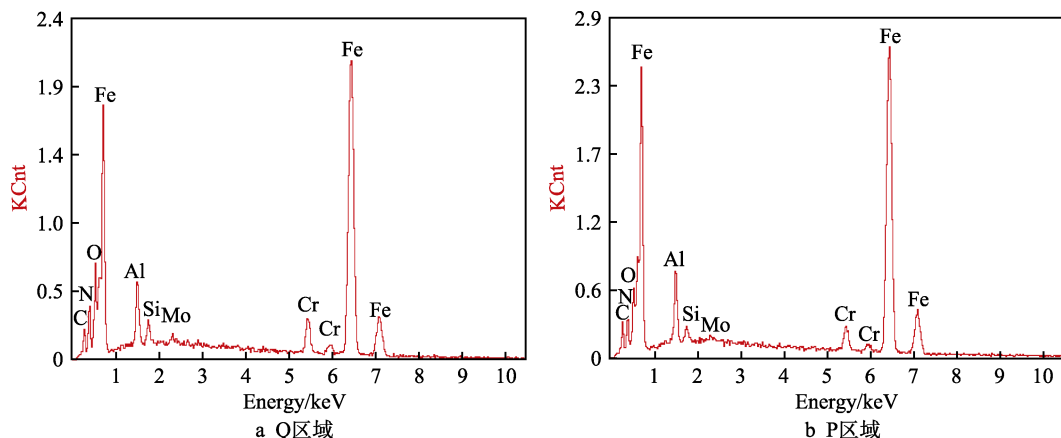


图9 T3 试样能谱分析图谱

Fig.9 Energy spectrum analysis chart of T3 sample

相比, T3 试样的渗层深度有明显提高, 且化合物层 γ' 相和 ϵ 相氮化物提高了试样的渗层硬度。

同时可以发现, T3 试样 Al、Cr 元素的含量明显高于 R3 试样, 而 Al、Cr 元素为材料本身所含元素, 说明钛的加入有促进合金元素从基体向表面扩散、积聚的作用, 即有促进表面合金化的作用。在检测中未发现钛元素的存在, 说明在检测区域钛元素并未渗入, 初步判断可能由于含钛层太薄, 仅存在于试样表层。

2.5 XRD 物相分析

38CrMoAl 钢 T3 试样的 X 射线衍射图谱见图 10。从衍射图谱可知, T3 试样表面化合物总体是以 ϵ 相 (Fe_{2-3}N) 为主, 同时还含有一定量的 TiN 化合物。在渗层表面检测到的 TiN 确定了 Ti 元素在表面的存在状态, TiN 是一种熔点高、硬度大且具有较低摩擦系数的一种化合物。通过 EDS 能谱以及 XRD 检测, 结合之前的硬度检测, 可以认为, 钛加入的离子渗氮

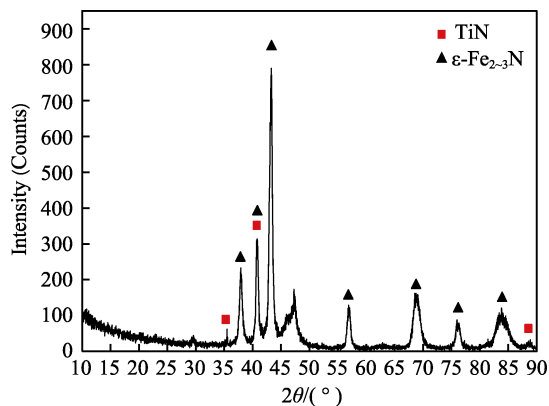


图10 T3 试样 X 射线衍射图谱

Fig.10 X-ray diffraction pattern of T3 sample

在渗层表面形成了弥散分布的 TiN, 使表面硬度得到极大提升。

3 钛催渗等离子氮化机理分析

通过对比分析钛催渗等离子渗氮和常规离子渗

氮后试样的表面硬度、渗层深度、金相组织、SEM 形貌、EDS 能谱, 以及对钛催渗等离子渗氮的 XRD 物相分析表明, 钛的加入可以显著提升渗氮效果, 增加渗层中氮元素含量。其催渗机理是多因素相互作用的结果。

在电子或正离子轰击下, 放在阳极和阴极上的海绵钛被轰击出钛离子 (Ti^+)。在直流电场的作用下, 钛离子轰击工件表面, 借助于晶体缺陷层中空位的运动, 钛在表层扩散, 并在工件表面上形成非常薄的钛层。同时, 因为阴极溅射效应, 所以进入试样表面的钛原子可能被轰出, 并与试样表面附近等离子体区的氮离子结合, 形成含氮量高的钛氮化合物, 其会吸附在工件表面, 并因其不稳定特性而释放出氮, 快速分解成氮含量较低的钛氮化合物, 被释放的活性氮原子, 则从工件表面向内部扩散。试样表面氮含量高的钛氮化合物的吸附和释放氮的作用, 将会形成较常规离子渗氮的氮浓度更大的表面, 因此加快了氮化速度, 并使得渗层加厚, 而表面硬度也因离子渗氮和钛化合物生成的叠加作用而高于常规离子渗氮^[25-26]。

在钛催渗离子渗氮的过程中, 不仅有渗氮的固有正离子向试样表面高速轰击, 还增加了钛的正离子参与, 因此表面晶体缺陷 (可能增多空位和位错密度) 也会相应增加, 从而形成了更有利的扩散条件^[27]。在钛离子渗氮的过程中, 钛和氮的正离子同时产生, 同时轰向工件表面。上述过程同时进行, 使得在工件表面形成的晶体缺陷层、含钛层以及高浓度的含氮层相互重叠, 并密切连系在一起。因此, 钛催渗离子渗氮的复合作用有利于化合物层和扩散层的厚度增加。

4 结论

1) 38CrMoAl 钢试样经过钛催渗等离子渗氮后, 渗层的表面硬度和深度明显高于常规离子渗氮。钛的加入可以提升渗氮效率, 提高渗氮效果。

2) 在保温温度为 535 °C、氨气流量为 2.0 L/min

的工艺参数下, 38CrMoAl 钢钛催渗等离子渗氮的综合性能和渗氮效率最优的保温时间为 3 h。38CrMoAl 钢钛催渗等离子渗氮 3 h 样品的表面硬度可达 1160.8HV, 渗层深度为 300 μm , 与常规离子渗氮 8 h 的渗氮效果相当, 渗氮效率提升明显。

3) 钛的加入可以显著增强合金元素向表面富集的趋势, 有利于表面合金化。

参考文献:

- [1] [作者不详]. 38CrMoAl 钢[J]. 热处理技术与装备, 2016, 37(5): 64.
[s.n.]. 38CrMoAl steel[J]. Heat treatment technology and equipment, 2016, 37(5): 64.
- [2] 陈立奇, 何如俊, 朱文明. 离子渗氮技术简介[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(3): 12-14.
CHEN Li-qi, HE Ru-jun, ZHU Wen-ming. Brief introduction of plasma nitriding[J]. Heat treatment technology and equipment, 2011, 32(3): 12-14.
- [3] FATTAH M, MAHBOUBI F. Comparison of ferritic and austenitic plasma nitriding and nitrocarburizing behavior of AISI 4140 low alloy steel[J]. Materials & design, 2010, 31(8): 3915-3921.
- [4] HOSHIYAMA Y, MIZOBATA R, MIYAKE H. Mechanical properties of austenitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding[J]. Surface and coatings technology, 2016, 307: 1041-1044.
- [5] AGHAJANI H, TORSHIZI M, SOLTANIEH M. A new model for growth mechanism of nitride layers in plasma nitriding of AISI H11 hot work tool steel[J]. Vacuum, 2017, 141: 97-102.
- [6] 韩宝军. 稀土含量对 38CrMoAl 钢渗氮层性能的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 39-42.
HAN Bao-jun. Effect of rare earths content on nitriding performance of 38CrMoAl steel[J]. Surface technology, 2009, 38(6): 39-42.
- [7] 李双喜, 顾敏, 张兵华, 等. 稀土离子渗氮催渗的均匀性及渗氮层组织[J]. 金属热处理, 2014, 39(5): 114-117.
LI Shuang-xi, GU Min, ZHANG Bing-hua, et al. Microstructure and uniformity of plasma nitrided layer with rare earth accelerator[J]. Heat treatment of metals, 2014, 39(5): 114-117.
- [8] 钟厉, 门昕皓, 周富佳, 等. 38CrMoAl 钢喷丸预处理与稀土催渗等离子多元共渗复合工艺研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 162-170.
ZHONG Li, MEN Xin-hao, ZHOU Fu-jia, et al. Research on composite process by shot-peening pre-treatment of plasma multielement penetrating with rare-earth catalytic about 38CrMoAl steel[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 162-170.
- [9] 刘运锦, 刘静, 陆旭峰. 38CrMoAl 钢稀土催渗真空氮化膜的耐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 117-119.
LIU Yun-jin, LIU Jing, LU Xu-feng. Investigation on corrosion performance of rare earth catalyst of vacuum nitriding film on 38CrMoAl steel[J]. Hot working technology, 2014, 43(4): 117-119.
- [10] 韦乃安, 韦春贝, 代明江, 等. 稀土含量对 Ti6Al4V 钛合金等离子渗氮层组织和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 148-154.
WEI Nai-an, WEI Chun-bei, DAI Ming-jiang, et al. Effect of rare earth content on the microstructure and friction properties of Ti6Al4V alloy by plasma nitriding[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 148-154.
- [11] 陈方生, 王成国, 刘玉先, 等. 稀土对 38CrMoAl 钢离子渗氮层结构和性能的影响[J]. 钢铁, 2000, 35(8): 48-50.
CHEN Fang-sheng, WANG Cheng-guo, LIU Yu-xian, et al. Effect of rare earth on microstructure and properties of 38CrMoAl steel plasma nitrided case[J]. Iron and steel, 2000, 35(8): 48-50.
- [12] 刘经宇, 张全民, 李亚斐, 等. 30CrNi3 钢的稀土催渗研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(16): 224-225.
LIU Jing-yu, ZHANG Quan-min, LI Ya-fei, et al. Study on rare earth infiltration of 30CrNi3 steel[J]. Hot working technology, 2018, 47(16): 224-225.
- [13] 钟厉, 陆亚. 38CrMoAl 钢循环等离子氮碳氧硫共渗工艺的研究[J]. 金属热处理, 2011, 36(8): 97-100.
ZHONG Li, LU Ya. Cycle plasma oxy-sulpho-nitrocarburizing of 38CrMoAl steel[J]. Heat treatment of metals, 2011, 36(8): 97-100.
- [14] TANG Lei, JIA Wei-ju, HU Jing. An enhanced rapid plasma nitriding by laser shock peening[J]. Materials letters, 2018, 231: 91-93.
- [15] DAS K, ALPHONSA J, GHOSH M, et al. Influence of pretreatment on surface behavior of duplex plasma treated AISI H13 tool steel[J]. Surfaces and interfaces, 2017, 8: 206-213.
- [16] 王跃华. 高频淬火和多元共渗处理对 38CrMoAl 钢性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 175-178.
WANG Yue-hua. Effect of high frequency quenching and multi-component co-permeation treatment on properties of 38CrMoAl steel[J]. Hot working technology, 2017, 46(12): 175-178.
- [17] 钟厉, 杨再强, 韩西. 喷砂预处理与离子氮碳氧硫复合工艺[J]. 金属热处理, 2013, 38(2): 112-115.
ZHONG Li, YANG Zai-qiang, HAN Xi. Complex process of shot-blasting pretreatment and plasma oxy-sulpho-nitrocarburizing[J]. Heat treatment of metals, 2013, 38(2): 112-115.
- [18] 金小越, 吴杰, 杨璇, 等. 槽电压对纯铁表面液相等离子体电解硼碳氮三元共渗层摩擦磨损性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(4): 58-64.
JIN Xiao-yue, WU Jie, YANG Xuan, et al. Influence of bath voltages on wear performance of plasma electrolytic borocarbonitriding layer on pure iron[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(4): 58-64.
- [19] ALPHONSA J, MUKHERJEE S, RAJA V S. Study of

- plasma nitriding and nitrocarburising of AISI 430F stainless steel for high hardness and corrosion resistance[J]. Corrosion engineering, science and technology, 2018, 53(sup1): 51-58.
- [20] 揭晓华, 董小虹, 黄拿灿, 等. H13 钢碳、氮、氧、硫、硼五元共渗层的性能研究[J]. 金属热处理, 2002, 27(7): 21-23.
JIE Xiao-hua, DONG Xiao-hong, HUANG Na-can, et al. The properties of H13 steel treated by C-N-O-S-B multi-elements penetrating[J]. Heat treatment of metals, 2002, 27(7): 21-23.
- [21] ZHOU Hai, CHEN Fei, YAO Bin, et al. Research on the properties of inside surface of subsurface pump barrel by N-C-O multi-elements penetrating[J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(9-11): 5165-5167.
- [22] 刘振民. 温度对 38CrMoAl 钢离子氮化渗层性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2016, 37(6): 6-9.
LIU Zhen-min. Effect of temperature on the properties of ion nitriding layer of 38CrMoAl steel[J]. Heat treatment technology and equipment, 2016, 37(6): 6-9.
- [23] 周上祺, 侯琼, 任勤. 38CrMoAl 钢离子渗氮微观结构的研究[J]. 金属热处理, 2002, 27(10): 10-12.
ZHOU Shang-qi, HOU Qiong, REN Qin. Microstructure of ion nitriding layer in 38CrMoAl steel[J]. Heat treatment of metals, 2002, 27(10): 10-12.
- [24] 陈玮, 王蕾, 付勇涛, 等. 循环等离子渗氮工艺对 38CrMoAl 钢渗氮层组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2009, 30(6): 55-57.
CHEN Wei, WANG Lei, FU Yong-tao, et al. Effect of cycle plasma nitriding process on structure and properties of nitrided layer of steel 38CrMoAl[J]. Special steel, 2009, 30(6): 55-57.
- [25] 杨烈宇. 离子软氮化的研究与应用[J]. 大连海运学院学报, 1979, 5(2): 1-42.
YANG Lie-yu. The study and application of ion-tufftriding[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1979, 5(2): 1-42.
- [26] 宋娜, 强巍, 杨小宁, 等. 稀土元素对 38CrMoAl 钢离子渗氮工艺的影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 74-78.
SONG Na, QIANG Wei, YANG Xiao-ning, et al. Effects of rare earth elements on ionic nitriding process for 38CrMoAl steel[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(9): 74-78.
- [27] 杨烈宇. 工业纯钛 TA2 离子氮化的研试[J]. 大连海运学院学报, 1979(3): 1-16.
YANG Lie-yu. A study on the ion-nitriding of titanium TA2[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1979(3): 1-16.
- (上接第 148 页)
- [16] WU Dao-xia, YAO Chang-feng, ZHANG Ding-hua. Surface characterization and fatigue evaluation in GH4169 superalloy: Comparing results after finish turning; shot peening and surface polishing treatments[J]. International journal of fatigue, 2018, 113: 222-235.
- [17] ZHANG J W, LU L T, SHIOZAWA K, et al. Analysis on fatigue property of microshot peened railway axle steel[J]. Materials science and engineering: A, 2011, 528(3): 1615-1622.
- [18] 朱有利, 孙寒晓, 侯帅. 循环载荷下喷丸层残余应力与半高宽的变化[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(5): 82-85.
ZHU You-li, SUN Han-xiao, HOU Shuai. Changes of residual stress and full width at half maximum in shot peening strengthened layer under the cycle load[J]. Journal of academy of armored force engineering, 2016, 30(5): 82-85.
- [19] 李国禄, 李少凡, 董丽虹, 等. 表面强化后梯度结构与残余应力对疲劳寿命的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 1-10, 63.
LI Guo-lu, LI Shao-fan, DONG Li-hong, et al. Influence of gradient structure and residual stress on fatigue life after surface hardening[J]. Surface technology, 2019, 48(9): 1-10, 63.
- [20] ZHAN K, JIANG C H, JI V. Surface mechanical properties of S30432 austenitic steel after shot peening[J]. Applied surface science, 2012, 258(24): 9559-9563.
- [21] WANG Zi-meng, JIA Yun-fei, ZHANG Xian-cheng, et al. Effects of different mechanical surface enhancement techniques on surface integrity and fatigue properties of Ti-6Al-4V: A review[J]. Critical reviews in solid state and materials sciences, 2019, 44(6): 445-469.
- [22] AVILÉS A, AVILÉS R, ALBIZURI J, et al. Effect of shot-peening and low-plasticity burnishing on the high-cycle fatigue strength of DIN 34CrNiMo₆ alloy steel[J]. International journal of fatigue, 2019, 119: 338-354.
- [23] LI J K, YAO Mei, WANG Duo, et al. An analysis of stress concentrations caused by shot peening and its application in predicting fatigue strength[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 1992, 15(12): 1271-1279.
- [24] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- [25] ARAKAWA J, HANAKI T, HAYASHI Y, et al. Evaluating the fatigue limit of metals having surface compressive residual stress and exhibiting shakedown[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2020, 43(2): 211-220.
- [26] PALLARÉS-SANTASMARTAS L, ALBIZURI J, AVILÉS A, et al. Mean stress effect on the axial fatigue strength of DIN 34CrNiMo₆ quenched and tempered steel[J]. Metals, 2018, 8(4): 213.
- [27] BUCH A. Fatigue strength calculation[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1988.