

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180521003

活性屏等离子体源渗氮工艺特性及传质机制

李广宇¹, 雷明凯²

(1. 营口理工学院 机械与动力工程系, 营口 115014; 2. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘要: 为揭示活性屏等离子体源渗氮工艺特性(试样偏压电位和试样距屏高度)对 AISI 316 奥氏体不锈钢渗氮效果的影响规律, 利用最小二乘法线性回归拟合了不同工艺条件下渗氮层厚度数据, 绘制了活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢的工艺特性图, 以此确定其最佳工艺参数。并通过对金属网屏上溅射颗粒的化学成分和相结构分析, 探讨了活性屏等离子体源渗氮的传质机制。结果表明: 渗氮层厚度随试样距屏高度增大而降低, 当适当降低渗氮气压或试样施加一定负偏压时, 均有助于提高渗氮层的厚度, 并且证实了“溅射-再沉积”模型是活性屏等离子体源渗氮重要的传质机制。

关键词: 活性屏等离子体源渗氮; 奥氏体不锈钢; 工艺特性; 线性回归; 传质机制

中图分类号: TG156.82

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)05-0092-07

Process Characteristics and Mass Transfer Mechanism of Active Screen Plasma Source Nitriding

LI Guangyu¹, LEI Mingkai²

(1. Department of Mechanical and Power Engineering, Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115014, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The active screen plasma source nitriding of AISI 316 austenitic stainless steel was used to study the effect of process characteristic (namely the various samples bias and the distance between screen and sample) on the nitriding result. A process characteristics map was constructed to summarize the measured thickness of the nitrided layer and processing conditions through systematic experimentation. The mass transfer mechanism of active screen plasma source nitriding was discussed by analyzing concentration and microstructure of nano-particles sputtered from material screen. The results show that the thickness of the nitriding layer is reduced with the increase of the distance between the screen and the samples. A greater thickness of the nitriding layer is obtained at a moderate nitriding pressure with a suitable samples bias. The sputtering and redeposition mechanism is proven to be an important mass transfer mechanism for active screen plasma source nitriding.

Keywords: active screen plasma source nitriding; austenitic stainless steel; processing characteristics; linear regression; mass transfer mechanism

0 引言

离子渗氮技术具有渗氮速度快、渗氮层组织易控制、节能环保等优势, 被广泛应用于工业生产中。但受气体辉光放电特性的影响, 离子渗氮

过程存在的工件表面电弧烧损、空心阴极效应、边缘效应及电场效应等固有技术问题, 制约了该技术的大规模推广应用。活性屏等离子体源渗氮(又称 Active screen plasma nitriding^[1], 或 Cathodic

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-09-06

网络出版日期: 2018-09-18 10:19; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180918.1019.012.html>

通信作者: 李广宇(1981—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 等离子体表面改性; E-mail: gyli@mail.dlut.edu.cn

基金项目: 营口理工学院优秀科技人才支持计划(2018003)

Fund: Supported by Program for Excellent Talents of Science and Technology in Yingkou Institute of Technology (2018003)

引用格式: 李广宇, 雷明凯. 活性屏等离子体源渗氮工艺特性及传质机制[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 92-98.

LI G Y, LEI M K. Process characteristics and mass transfer mechanism of active screen plasma source nitriding[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 92-98.

cage plasma nitriding^[2], 或 Through cage plasma nitriding^[3]) 是一种新颖的离子渗氮技术, 其技术特征是在渗氮真空炉内放置一个金属网屏作为阴极, 工件置于金属网屏内, 处于悬浮电位或施加一定的负偏压。等离子体是在阳极的炉体与阴极的金属网屏之间产生, 即作为等离子体源, 从而解决了传统直流离子渗氮因离子轰击工件表面所产生的固有技术问题, 并且适用于多种金属材料, 甚至陶瓷和高分子材料的表面改性处理, 具有明显的设备和工艺优势, 应用潜力巨大^[4-5]。

活性屏等离子体源渗氮技术, 与传统直流离子渗氮技术相比, 由于其等离子体产生于渗氮炉体和金属网屏之间, 活性氮源远离工件表面, 存在活性氮源空间传输及分布问题, 导致传质机理必然存在较大差异。自 1999 年发明人 Georges^[6] 开发出活性屏等离子体源渗氮技术以来, 对其传质过程的研究取得了一定的成果, Li 和 Bell^[1] 提出了“溅射-再沉积”模型、Zhao 等^[7] 建立了“溅射-吸附-脱附-扩散”模型、Hubbard 等^[8-9] 提出了高能氮粒子注入模型, 以及活性氮吸附模型^[10] 等。但关于活性氮原子在等离子空间中的输运机理并未达成共识, 并且其工艺参数又增加了工件与金属网屏距离和工件偏压, 给渗氮工艺过程增添了诸多不确定因素, 给工业实践者的使用带来许多困惑^[11-13]。虽然该技术已经成功改性处理多种材料, 但其工艺特性的研究并不系统和全面, 尤其是渗氮传质机制仍不明确, 限制了工业化应用。因此, 文中系统研究了试样位置和试样偏压电位对活性屏等离子体源渗氮奥氏体不锈钢渗氮层成分和厚度的影响规律, 通过对金属网屏上溅射颗粒的化学成分和相结构分析, 探讨活性屏等离子体源渗氮传质过程, 以期为实际应用提供理论支持。

1 试验

1.1 样品制备

试验材料为 $\Phi 20\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 AISI 316 奥氏体不锈钢热轧棒材, 经 SiC 金相砂纸打磨和粒径为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石抛光膏抛光, 丙酮溶液清洗后, 吹干备用。在大连理工大学表面工程实验室自主设计的活性屏等离子体源渗氮装置进行渗氮处理。炉内的金属网屏由 2 mm 厚的 AISI 304 奥氏体不锈钢薄板制成, 尺寸为 $\Phi 400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,

其上均布直径为 $\Phi 16\text{ mm}$ 的孔洞, 相邻孔间的圆心距为 20 mm。金属网屏与直流脉冲电源的负极连接, 试样置于样品台与直流电源的负极连接, 样品台断开直流电源时, 试样处于悬浮电位; 接通直流电源时, 试样施加一定的负偏压电位。试验工艺参数: 渗氮温度为 $450\text{ }^\circ\text{C}$, 纯 NH_3 的工作气压分别为 300 和 500 Pa, 渗氮时间为 6 h。试样处于悬浮电位或施加 200、400 V 负偏压, 试样摆放于金属网屏中心轴线处, 距金属网屏顶部的距离分别为 20、50、100、150 和 200 mm, 并且在试样相同高度放置单晶硅片 Si(100), 收集金属网屏上溅射下来的颗粒。

1.2 结构表征及力学性能测试

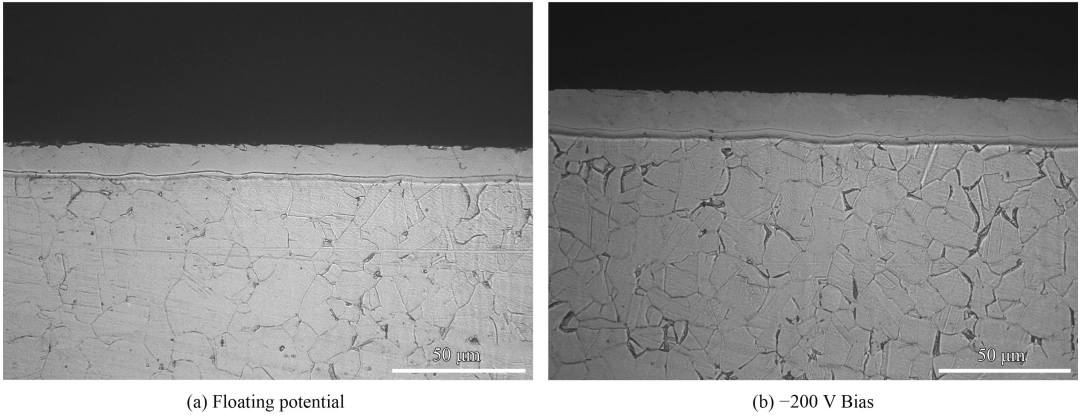
采用由 10 g CuSO_4 、50 mL HCl 和 50 mL H_2O 组成的 Marble 试剂对渗氮层横截面进行腐蚀, 在 LEICA MEF4A 型光学显微镜上观察其显微组织, 并测量渗氮层厚度; 采用 SHIMADZU EPMA-1600 型电子探针显微分析渗氮层成分分布和溅射颗粒的化学成分; 使用 SHIMADZU XRD-6000 型 X 射线衍射仪分析渗氮层和溅射颗粒的相结构; 采用 Zeiss SUPRA55-32-76 场发射扫描电子显微镜观察单晶 Si(100) 表面沉积的溅射颗粒形貌; 用 Surfcoorder ET 4000A 型轮廓仪测定单晶 Si 表面沉积的溅射颗粒层厚度。

2 结果与分析

2.1 试样偏压电位对渗氮效果的影响

图 1 为工作气压 300 Pa、试样距屏高度 100 mm、悬浮电位和 200 V 负偏压下渗氮层的横截面的显微组织。可见, 不同电位下试样表面均形成了组织均匀、结构致密无裂纹, 且与基体有明显界线的白亮色渗氮层, 体现了其良好的耐蚀性能。试样处于悬浮电位时, 渗氮层厚度为 $15.1\text{ }\mu\text{m}$, 试样施加 200 V 负偏压时, 渗氮层厚度为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 2 为工作气压 300 Pa、试样距屏高度 100 mm、悬浮电位和 200 V 负偏压下渗氮层氮浓度-深度分布曲线。可见, 试样处于悬浮电位时, 距表面 $13\text{ }\mu\text{m}$ 范围内, 渗氮层内氮的体积分数为 8%~20.5%; 试样施加 200 V 负偏压时, 距表面 $15\text{ }\mu\text{m}$ 范围内, 渗氮层内氮的体积分数为 12%~23%。活性屏等离子体源渗氮过程中试样施加负偏压, 有助于提高渗氮层的厚度和氮浓度。



(a) Floating potential

(b) -200 V Bias

图1 不同电位下渗氮层横截面的显微组织

Fig.1 Microscopic structure of nitrided layers with various bias

图3为工作气压300 Pa、试样距屏高度100 mm、悬浮电位和200 V负偏压下渗氮层的XRD谱。可

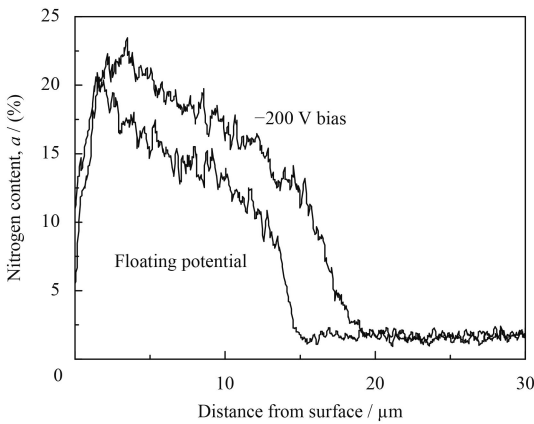


图2 不同电位下渗氮层中氮的浓度-深度分布

Fig.2 Distribution of nitrogen concentration in the nitrided layer with various bias

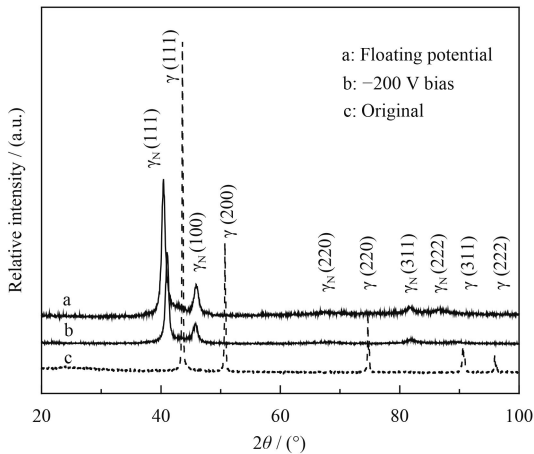


图3 不同电位下渗氮层的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of nitrided layers with various bias

见,不同电位下渗氮层XRD谱线均由一系列相对于奥氏体基体(γ)相向低衍射角偏移,且明显宽化的衍射峰构成。Lei等^[14]通过成分和结构分析,证明了低温氮改性的奥氏体不锈钢表面形成了氮的体积分数在10%~35%的面心立方结构相—— γ_N 相。

2.2 试样距屏高度对渗氮效果的影响

图4为工作气压300 Pa、试样处于悬浮电位、不同距屏高度下渗氮层厚度与溅射颗粒厚度的变化曲线。可见,随着试样距金属网屏高度由20 mm增至200 mm时,渗氮层的厚度由15 μm 降低至6 μm ,表明试样距屏高度显著影响渗氮层的厚度。并且,渗氮层厚度与单晶Si片上收集的溅射沉积颗粒厚度变化规律几乎一致,说明金属网屏上溅射的颗粒与活性氮源的传输过程存在一定的关联性。由于设备测量精度的原因,在距屏200 mm处未检测出沉积颗粒的厚度值。

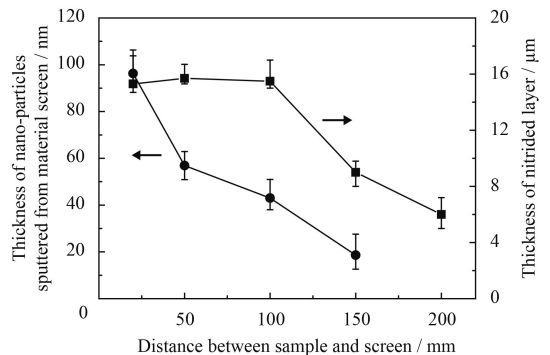


图4 不同距屏高度下渗氮层厚度与溅射沉积颗粒厚度

Fig.4 Effects of thickness of the nitrided layer on AISI 316 and thickness of particles sputtered from material screen on distances between sample and screen

2.3 溅射产物分析

图5为悬浮电位、距屏100 mm单晶硅片表面沉积的溅射颗粒SEM形貌。可见, 沉积的溅射颗粒大多呈现多边形和圆形粒子形貌特征, 与施加偏压时试样表面的溅射颗粒形貌相似, 尺寸在几十纳米的范围内变化, 有些粒子尺寸可达二百纳米。并且, 溅射颗粒的尺寸随着距屏高度的增加明显减小^[12]。

表1为悬浮电位、距屏100 mm单晶硅片上收集的溅射颗粒EPMA定量分析结果。可知, 单晶Si片沉积的溅射颗粒中含有Fe、Cr、Ni、N、O和C元素, 与AISI 304奥氏体金属网屏的化学元素相对应, 其中Fe和N元素的含量较高, 原子百分数近似1:1。由图6单晶硅片上收集的溅射颗粒XRD图谱可知, 溅射颗粒的XRD衍射峰与Fe_xN相衍射峰均相匹配, 根据JCPDS卡片03-1179发现溅射颗粒与FeN相的匹配程度更高。FeN是不稳定相, 沉积到Fe表面会发生分解, 形成Fe_xN稳定相, 检测到FeN相很可能是由于溅射颗

粒沉积在单晶硅表面才得以保留。通过对溅射颗粒的EPMA成分和XRD相结构分析, 有理由相信沉积的溅射颗粒很可能存在FeN相, 此结果也符合Li和Bell^[1]提出的“溅射-再沉积”模型中的描述, 证实“溅射-再沉积”模型是活性屏等离子体源渗氮极为重要的传质机制。

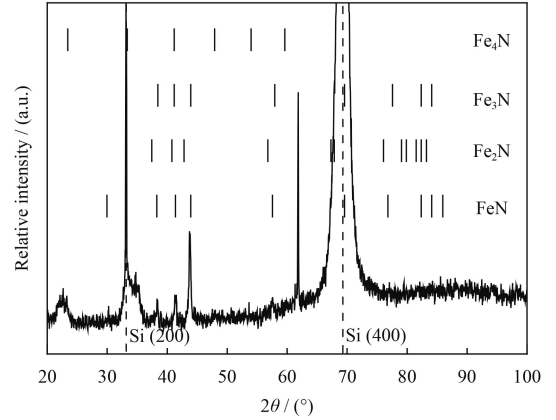


图6 溅射颗粒的XRD图谱

Fig.6 XRD patterns of the nano-particles sputtered from material screen

2.4 工艺特性图

表2为不同工作气压、试样偏压和试样距屏高度下渗氮层的厚度数据。通过建立二阶多项式解析活性屏等离子体源渗氮工作气压、试样偏压和试样距

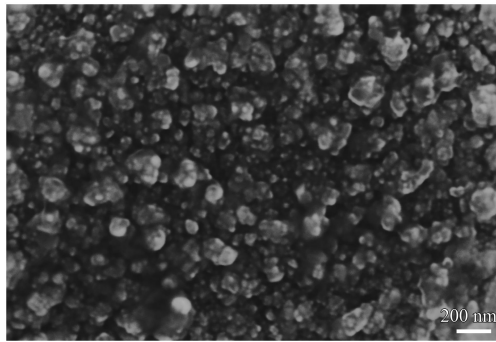


图5 硅片表面沉积的溅射颗粒的SEM形貌

Fig.5 SEM image of the nano-particles sputtered from material screen

表1 溅射粒子的化学元素含量

Table 1 Compositions of the nano-particles (w/%)

Element	Nano-particles	AISI 304
Fe	60.314	Bal.
Cr	7.497	17.20
Ni	4.563	11.70
N	16.082	-
O	9.409	-
C	2.135	0.06
Mo	-	2.20
Mn	-	1.30
Si	-	0.06

表2 不同工艺参数下渗氮层的厚度

Table 2 Thickness of the nitrated layer under various process parameters

Pressure / Pa	Bias / V	Distance / mm	Thickness / μm
300/500	0	20	15/8.5
		50	14.5/8
		100	15/7.5
		150	9/5
300/500	200	200	6/2.5
		20	17.5/13
		50	18.5/13.5
		100	18/12
300/500	400	150	12.5/10
		200	8/3.5
		20	17.5/15.5
		50	18/15
300/500	400	100	16.5/14.5
		150	13/6
		200	9/3

屏高度与渗氮层厚度之间的关系,如公式(1)所示。

$$L = aP^2 + bV^2 + cH^2 + dPV + eVH + fPH + gP + hV + iH + j \quad (1)$$

式中, L 表示渗氮层厚度; P , V , H 分别为工作气压、试样偏压和试样距屏高度; a , b , c , d , e , f , g , h , i 为常数; j 为随机误差。利用最小二乘法线性回归拟合不同工艺条件下渗氮层实测厚度数据, 确定系数值, $a = -5.03 \times 10^{-5}$, $b = -1.18 \times 10^{-4}$, $c = -1.18 \times 10^{-4}$, $d = 2.27 \times 10^{-5}$, $e = 2.27 \times 10^{-5}$, $f = -5.14 \times 10^{-5}$, $g = 2.87 \times 10^{-2}$, $h = 6.97 \times 10^{-2}$, $i = 4.94 \times 10^{-2}$, $j = 1.46$ 。将试验测得的渗氮层厚度值与公式(1)计算的厚度值进行比较如图7所示, 可见, 渗氮层厚度的计算值与试验值有很好的拟合度, 说明二阶多项式(1)中所确定的系数合理准确, 可以采用公式(1)绘制活性屏等离子体源渗氮奥氏体不锈钢工艺特性图。

图8为活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢工艺特性图, 图9和图10分别为工作气压 300 Pa 和试样施加 200 V 负偏压的工艺特性截面图, 图9~10中等高线代表渗氮层厚度 (μm)。可见, 随着工作气压的升高, 渗氮层厚度先急剧增大, 然后急剧减小, 工作气压在 250~350 Pa 时, 渗氮层具有较大厚度。随着试样负偏压的升高, 距屏高度 20~100 mm, 渗氮层厚度均显著增加, 试样负偏压约升至 250 V 时, 厚度均达到最大值。继续增加试样负偏压, 渗氮层厚度却略有下降。且从图8中可以得到活性屏等离子体源渗

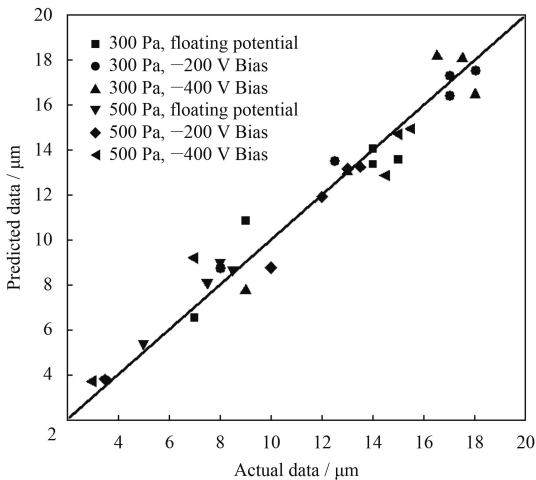


图7 不同工艺参数下渗氮层厚度试验值与计算值拟合

Fig.7 Fitting chart for experimental data and calculated data on thickness of the nitride layer with various process parameters

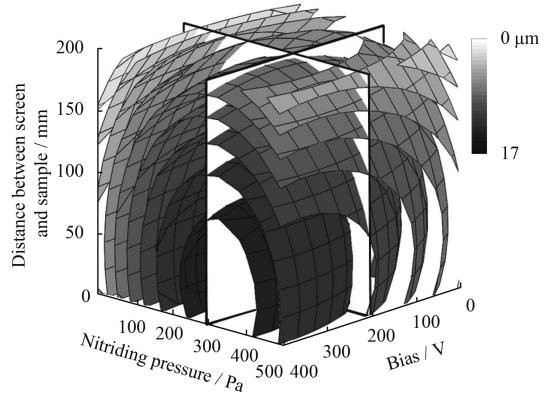


图8 活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢工艺特性图

Fig.8 Processing characteristic map of active screen plasma source nitrided AISI 316 austenitic stainless steel

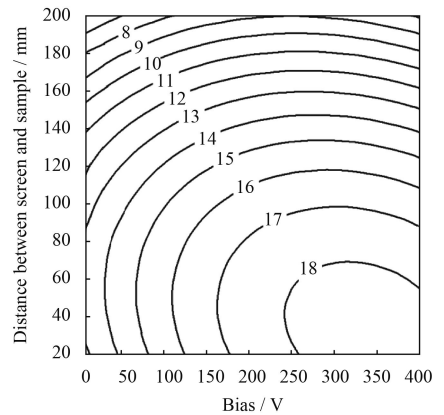


图9 工作气压 300 Pa 活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢工艺特性截面图

Fig.9 Cross sectional view of processing characteristic map for active screen plasma source nitrided AISI 316 austenitic stainless steel with a working pressure of 300 Pa

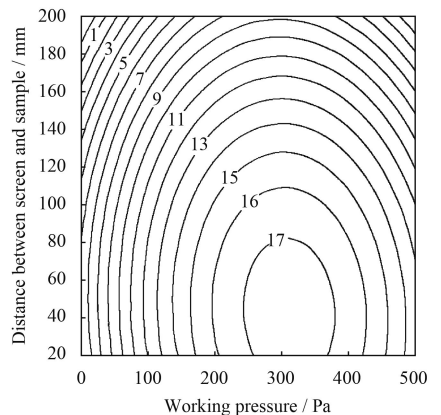


图10 200 V 负偏压活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢工艺特性截面图

Fig.10 Cross sectional view of processing characteristic map for active screen plasma source nitrided AISI 316 austenitic stainless steel with a sample bias of -200 V

氮 AISI 316 奥氏体不锈钢最佳工艺参数范围是工作气压 250~350 Pa, 试样施加 200~300 V 负偏压, 与屏距离在 20~100 mm 范围内, 获得的渗氮层厚度约 15~18 μm 。

3 讨论

活性屏等离子体源渗氮工艺特性(试样距屏高度和试样偏压)对渗氮层的厚度和氮浓度分布有重大影响。渗氮层厚度随着试样距屏高度的增加逐渐降低, 并且收集的溅射颗粒厚度与渗氮层厚度有直接关系。

通过对溅射颗粒的成分和结构分析表明, Li 和 Bell^[1]提出的“溅射-再沉积”模型是活性屏等离子体源渗氮极重要的传质机制, 虽然不能忽略其它传质机制的存在。Gallo 等^[5]将渗氮试样置于金属网屏的空洞和网罩处, 发现网罩下的试样呈灰色且具有较高硬度, 而空洞下的试样呈金属光泽, 硬度值相对较低, 这归因于溅射沉积颗粒作为活性氮源载体的作用。Zhao 等^[7]用铜片收集到的溅射产物为 Fe_xN , 认为 Fe_xN 是氮运输的载体, 活性氮原子吸附其表面完成传质过程。然而, Hubbard 等^[8]实验发现金属网屏上溅射沉积颗粒的厚度与其相对应的试样表面硬度之间并没有关联性, 推断溅射产物对氮的传质过程没有载体的作用, 而工件施加充分的负偏压才是活性屏等离子体源传质的关键。可见, 在不同工艺条件下主导的传质机制是不同的。

由图 9 可见, 随着试样施加负偏压的增大, 试样表面能吸收更多的活性氮源参与扩散过程, 渗氮层的厚度明显增加。但进一步增大试样偏压电位, 渗氮层厚度略有降低, 并且导致气体放电不稳定。郑少梅等^[16]试验结果显示: 当试样负偏压达到 400~450 V 时, 工件进入正常辉光放电区, 才是适宜的偏压范围。Gallo 等^[17]通过光纤辅助光发射谱和平面静电探针技术研究表明: 在确定工作气压下, 活性屏等离子体源渗氮工件表面的等离子体状态随着施加工件负偏压的增大, 光发射谱的强度单调升高, 直至极限值。并且工件施加过大的负偏压将产生边缘效应。因此, 可以推断试样施加适当的负偏压, 有助于更多的活性含氮离子与试样表面发生反应, 并且试样经较弱的离子轰击溅射可以起到清洗活化试样表面的作用, 有利于活性氮原子向试样内部扩散, 同时也

避免直流离子渗氮技术存在的固有缺陷。

活性屏等离子体源渗氮过程存在活性氮源的空间运输问题, 所以其工艺参数的变化对渗氮效果的影响更为显著。渗氮工作气压的变化将影响等离子体的放电特性, 改变等离子体鞘层内粒子的平均自由程。基于 Li 和 Bell^[1]提出的“溅射-再沉积”模型, 当工作气压很低时, 单位体积内气体分子数较少, 鞘层中的粒子碰撞几率小, 虽然离子可以获得有很高的动能, 但金属网屏上溅射颗粒的数量较少, 相应的等离子体气氛中的活性氮源的载体数量少, 能输送到试样表面的活性氮源数量也少。当工作气压较大时, 单位体积内气体中分子数增多, 等离子体中的粒子平均自由程变短, 微粒在碰撞过程中发生能量的损失, 使得输送至试样表面活性氮源的能量减低, 导致了渗氮层的厚度及氮浓度降低。Sousa 等^[11]研究结果同样表明, 在较低工作气压下, 离子的平均自由程增大, 可增强溅射沉积效率, 获得的渗氮层厚度显著增加。因此, 适当降低工作气压, 可以获得更好的渗氮效果。

4 结论

(1) 活性屏等离子体源渗氮工艺特性(试样距屏高度和试样偏压)对渗氮效果有重大影响。渗氮层厚度和氮浓度分布随试样距屏高度增大而下降, 试样施加适当的负偏压或适当降低渗氮气压, 均有助于提高渗氮层的厚度和氮浓度分布。

(2) 通过最小二乘法线性回归拟合绘制出活性屏等离子体源渗氮 AISI 316 奥氏体不锈钢的工艺特性图, 以此确定的最佳工艺参数范围是工作气压 250~350 Pa, 试样施加 200~300 V 负偏压, 与屏距离在 20~100 mm 范围内。

(3) 通过对溅射颗粒成分和结构的分析表明, 金属网屏溅射颗粒很可能为 FeN 相, 并且溅射颗粒的厚度与渗氮层的厚度有直接关系, 证实了“溅射-再沉积”模型是活性屏等离子体源渗氮极为重要的传质机制。

参考文献

- [1] LI C X, Bell T, DONG H. A study of active screen plasma nitriding[J]. *Surface Engineering*, 2002, 18(3): 174-181.
- [2] ALVES C, ARAUJO F O D, RIBEIRO K J B, et al. Use of cathodic cage in plasma nitriding[J]. *Surface & Coatings*

- Technology, 2006, 201(6): 2450-2454.
- [3] GEORGES J. TC plasma nitriding[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 28(2): 33-37.
- [4] LI C X. Active screen plasma nitriding-an overview[J]. Surface Engineering, 2013, 26(1): 135-141.
- [5] 李广宇, 王中一, 陈琳, 等. 活性屏等离子体源渗氮技术原理及应用[J]. 金属热处理, 2013, 38(2): 9-14.
LI G Y, WANG Z Y, CHEN L, et al. Principle and application of active screen plasma source nitriding[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(2): 9-14 (in Chinese).
- [6] GEORGES J. Nitriding process and nitriding furnace therefore[P]. US Patent: 5989363. 1999.
- [7] ZHAO C, LI C X, DONG H, et al. Study on the active screen plasma nitriding and its nitriding mechanism[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201: 2320-2325.
- [8] HUBBARD P, PARTRIDGE J G, DOYLE E D, et al. Investigation of nitrogen mass transfer within an industrial plasma nitriding system I: The role of surface deposits[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(8): 1145-1150.
- [9] HUBBARD P, DOWEY S J, PARTRIDGE J G, et al. Investigation of nitrogen mass transfer within an industrial plasma nitriding system II: Application of a biased screen[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(8): 1151-1157.
- [10] BURLACOV I, BORNER K, SPIES H J, et al. In-situ monitoring of plasma enhanced nitriding processes using infrared absorption and mass spectroscopy[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(19-20): 3955-3960.
- [11] DE SOUSA R R M, GE ARAUJO F O, DA COSTA J A P, et al. Nitriding in cathodic cage of stainless steel AISI 316: Influence of sample position[J]. Vacuum, 2009, 83(11): 1402-1405.
- [12] NISHIMOTO A, NAGATSUKA K, NARITA R, et al. Effect of the distance between screen and sample on active screen plasma nitriding properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205: S365-S368.
- [13] LI Y, WANG L, SHEN L, et al. Plasma nitriding of 42CrMo low alloy steels at anodic or cathodic potentials[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(15): 2337-2342.
- [14] LEI M K, LIANG J. X-ray diffraction of high nitrogen face centered cubic phase formed on nitrogen modified austenitic stainless steel[J]. Surface Engineering, 2010, 26: 305-311.
- [15] GALLO S C, DONG H. On the fundamental mechanisms of active screen plasma nitriding[J]. Vacuum, 2010, 84: 321-325.
- [16] 郑少梅, 赵程. 偏压对活性屏离子渗氮工艺的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(6): 701-704.
ZHENG S, ZHAO C. Influence of bias voltage on active screen plasma nitriding technology[J]. Chinese Journal of Vacuum Science & Technology, 2011, 31(6): 701-704 (in Chinese).
- [17] GALLO S C, DONG H. Study of active screen plasma processing conditions for carburising and nitriding austenitic stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(24): 3669-3675.

(责任编辑: 王文宇)