

AISI 316L 奥氏体不锈钢低温离子-气体渗碳工艺优化

周梦飞, 赵程

(青岛科技大学, 山东 青岛 266061)

摘要: 目的 将低温离子-气体乙炔渗碳应用于 AISI 316L 奥氏体不锈钢表面硬化处理, 同时探讨其硬化处理的最优工艺参数及优化效果。方法 采用离子轰击去除不锈钢表面钝化膜并活化其表面, 再进行低温气体乙炔渗碳, 实验过程使用脉冲式供气循环处理方式。进行温度梯度实验, 寻找渗碳处理的临界温度。并采用正交试验法设计 3 因素 3 水平共 9 组实验, 分析气体比例、离子轰击时间、保温压强 3 个因素对渗碳层硬度和厚度产生的影响, 以期得到不锈钢低温离子-气体乙炔渗碳优化工艺。通过对经过最优化工工艺处理后的不锈钢硬化层组织、成分、厚度、硬度、耐磨性、耐蚀性能的研究分析, 验证此工艺对 AISI 316L 奥氏体不锈钢硬化处理的适用性。结果 处理温度为 540 °C 时渗碳层有碳的铬化物析出; 离子轰击时间对渗碳层硬度影响最大, 保温压强对硬化层厚度影响最明显。在硬化处理温度为 520 °C, $V(\text{H}_2) : V(\text{C}_2\text{H}_2) = 1 : 1$, 渗碳压强为 -0.02 MPa, 离子轰击时间为 20 min 时, 316L 奥氏体不锈钢离子-气体乙炔渗碳效果最优。经优化工艺处理后不锈钢硬化层厚度达到 30 μm 左右, 表面硬度达到 838HV0.05, 耐蚀性和耐磨性能等都显著提高。结论 低温离子-气体乙炔渗碳硬化处理适用于 AISI 316L 奥氏体不锈钢, 其处理最合适温度为 520 °C。经优化工艺处理后的不锈钢具有较高的硬度、厚度, 良好的硬度梯度, 高耐蚀性能及高耐磨性能。

关键词: AISI 316L 奥氏体不锈钢; 离子轰击活化; 低温离子-气体乙炔渗碳; 渗碳工艺参数; 正交实验; S 相中图分类号: TG174.445 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2017)02-0159-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.026

Process Optimizing about Low Temperature Ion-Gas Carburizing of AISI 316L Austenitic Stainless Steel

ZHOU Meng-fei, ZHAO Cheng

(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

ABSTRACT: To apply the low temperature ion-gas acetylene carburizing to AISI 316L austenitic stainless steel surface hardening treatment, and investigate the optimal process parameters and the optimization effect of hardening treatment. In addition to removing the stainless steel surface passivation membrane and ion bombardment activating surface, then the low-temperature gas acetylene carburizing, the experimental process uses pulsed gas circulation processing methods, temperature gradient experiment was conducted to find the critical temperature of carburizing process. Experiments were designed using a factorial design based on a L9 orthogonal array. The effect of gas proportion, ion bombardment time and heat preservation pressure on the carburized layer hardness and thickness was analyzed in order to obtain a stainless steel ion-gas acetylene carburizing optimization process. Through the research and analysis of stainless steel hardening layer structure, composition, thickness, hardness, wear resistance, corrosion resistance, verify the applicability of the hardening process of AISI 316L austenitic stainless steel. When

收稿日期: 2016-06-26; 修订日期: 2016-07-08

Received: 2016-06-26; Revised: 2016-07-08

作者简介: 周梦飞 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究低温等离子体材料表面改性处理。

Biography: ZHOU Meng-fei (1990—), Male, Master graduate student, Research focus: low temperature plasma surface modification.

通讯作者: 赵程 (1952—), 男, 教授、博导, 主要研究表面工程技术。

Corresponding author: ZHAO Cheng (1952—), Male, Professor, Doctoral tutor, Research focus: surface engineering technology.

processing temperature is 540 °C carburized layer with carbon chromium compound precipitation; ion bombardment time has the greatest effect on carburized layer hardness, heat preservation pressure has the greatest impact on the thickness of hardened layer, when carburizing temperature is 520 °C, $V(\text{H}_2) : V(\text{C}_2\text{H}_2) = 1 : 1$, carburizing pressure -0.02 MPa, ion bombardment time 20 min, the hardening treatment effect is best. The stainless steel hardening layer thickness after optimization process has reached about 30 μm , surface hardness is 838HV0.05, corrosion resistance and wear resistance are improved significantly. Conclusion Low temperature ion-gas acetylene carburizing treatment applies to the AISI 316L austenitic stainless steel, which the most suitable temperature is 520 °C; stainless steel after optimized process treated has high hardness, thickness, good hardness gradient, high corrosion resistance and high wear resistance.

KEY WORDS: AISI 316L austenitic stainless steel; ion bombard and activity; ion-gas acetylene carburizing at low temperature; carburizing process parameters; orthogonal experiment; S phase

奥氏体不锈钢具有良好的耐蚀性能, 归功于其表面具有一层 Cr_2O_3 钝化膜, 其化学稳定性极佳且可以自行修复, 所以不锈钢在核工业、军工业、航空航天等各大行业中得到普遍的应用, 但由于其表面力学性能较差, 在使用时往往不能满足耐磨性、硬度方面的要求, 很大程度上降低其在机械产品中的应用。自 20 世纪 80 年代起, 研究者对奥氏体不锈钢表面进行了低温渗碳^[1]、渗氮^[2]和氮碳共渗^[3]硬化处理的探究, 使不锈钢可以在不降低其表面耐蚀性的前提下, 很大程度上提高其表面耐磨性和硬度。在不锈钢低温渗氮、渗碳和氮碳共渗硬化处理中, 低温渗碳最具有应用价值, 现已获得工业化应用^[4]。奥氏体不锈钢低温硬化处理有 2 个技术难点: 一是在硬化处理前如何去除不锈钢表面化学稳定性极好的钝化膜; 二是在硬化处理过程中样件温度控制比较严格。目前国内外奥氏体不锈钢低温渗碳的方法有离子法^[5]和气体法^[6]。离子法优点是表面钝化膜去除较易, 而且处理过程中无污染; 不足是其温度均匀性比较差。虽然气体法的控温精度与温度均匀性比较好, 但不锈钢表面的钝化膜的去除需要采用氯化物或氟化物等, 容易造成设备腐蚀与环境污染。本研究采取了离子轰击去除不锈钢表面钝化膜, 然后再进行气体渗碳的复合处理工艺。试验采用了离子轰击和气体渗碳交替循环进行的方法, 目的是为了保证在长时间的气体渗碳过程中, 不锈钢表面始终处于活性状态。

目前国内外不锈钢低温气体渗碳用的渗碳气体是 CO 气体, 并且是在常压下进行渗碳^[6], 而在钢的低压气体渗碳中采用的是乙炔作为渗碳气体^[7-8], 这是因为乙炔气体能提供更多的碳, 而且乙炔的分解发生在和钢表面接触时, 因此在渗碳过程中炉膛里形成的炭黑比较少, 所以本研究尝试采用乙炔作为渗碳气体。在奥氏体不锈钢离子-气体低温渗碳处理过程中, 要严格控制渗碳的工艺参数, 避免渗层铬的碳化物析出, 导致不锈钢表面耐蚀性能降低。对不锈钢中铬的

碳化物析出产生影响的因素有硬化处理温度、气体比例和处理时间等^[9-12], 但是影响最大的因素是硬化处理温度。实验利用离子-气体复合硬化处理方法, 用 C_2H_2 作为渗碳气体, 研究硬化层的组织和性能受不同处理温度的影响, 同时对硬化处理结果产生影响的工艺参数, 如氢气与乙炔的比例、保温压强、离子轰击时间等, 经过正交实验得以分析和检测, 以优化不锈钢低温离子-气体复合乙炔渗碳工艺参数。

1 实验

1.1 材料

实验使用 AISI 316L 奥氏体不锈钢棒材作为实验材料, 其组成成分为: $w_{\text{C}} \leq 0.03\%$, $w_{\text{Si}} \leq 1.00\%$, $w_{\text{Mn}} \leq 2.00\%$, w_{Cr} 为 16.0%~18.5%, $w_{\text{S}} \leq 0.03\%$, w_{Mo} 为 2.0%~3.0%, w_{Ni} 为 10.0%~14.0%。实验样件的大小为 $\phi 18 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

1.2 设备及方法

实验设备是自行研制的气体-离子两用渗碳炉, 见图 1。真空室用 316 不锈钢制造, 尺寸为 $\phi 186 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ 。采用 CPCA-100Z 型电容薄膜式绝对压力计和真空压力表对炉内压强进行测量。

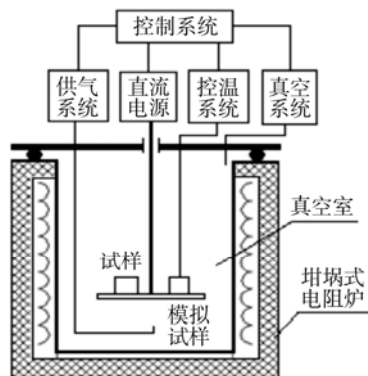


图 1 设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of equipment

将制备好的试样放入炉内样品台上,开启外加热电源将真空室加热至实验温度,同时将真空室抽至极限真空,然后按下述步骤进行处理:

- 1) 通入 150 mL/min 氢气,控制真空泵的蝶阀维持真空室内压强为 150 Pa 左右,接通电源系统对试样进行离子轰击以去除其表面的钝化膜,轰击时间为 t_{s1} 。
- 2) 关闭电源系统和真空泵的蝶阀,按实验所需的气体比例向真空室中通入混合气体,当炉内压强达到试验所需压强后,停止通气,进行保温渗碳,保温渗碳时间为 t_{c1} 。
- 3) 渗碳时间结束后,打开真空泵上的蝶阀,将真空室抽至极限真空。
- 4) 重复操作 1~3,直到整个实验完成,然后关闭外加热电源及真空泵,渗碳样件在真空中冷至 200 °C 以下,开炉取出样件。

整个实验的工艺曲线见图 2,循环处理周期为 6 次。

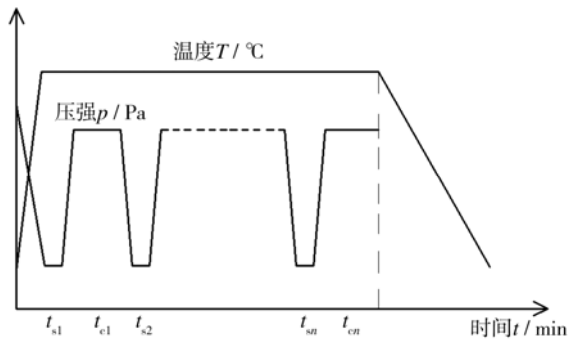


图 2 AISI 316L 奥氏体不锈钢低温离子-气体渗碳工艺曲线
Fig.2 Process curve of ion-gas carburizing of AISI 316L austenitic stainless steel at low temperature

为探究温度对离子-气体复合乙炔硬化处理的影响,在不同的温度下完成离子-气体复合乙炔硬化处理实验,实验的处理条件为: 440~540 °C, 气体比例 $V(H_2):V(C_2H_2)=1.5:1$, 处理周期 6 次, 每个周期离子轰击时间 (min): 保温时间 (min) = 20: 50, 离子轰击电压 300~700 V, 电流 0~3 A, 气体压强 260~300 Pa。

1.3 离子-气体复合硬化处理正交实验设计

实验选择 3 个独立因素, 每一个独立因素确定 3 水平的 $L_9(3^3)$ 正交实验表, 因素及水平的选取见表 1。

表 1 低温离子-气体渗碳因素和水平表
Tab.1 Table of low temperature ion-gas carburizing factors and levels

Factor	A	B	C
	$V(H_2):V(C_2H_2)$	Carburizing pressure/MPa	Bombardment time/min
Level	1:1	-0.06	10
	1:3	-0.04	20
	1:5	-0.02	30

1.4 表征与分析检测

采用 $HCl:HNO_3:H_2O=1:1:1$ 的腐蚀液对经粗磨、细磨、金相抛光后的渗碳试样进行腐蚀处理。用 4XC 型金相显微镜对硬化层组织进行观察。渗碳件表层硬度及横截面的硬度梯度是通过 HVS-1000 型数显硬度计进行测量的, 其加载荷为 50 g, 加载时间为 20 s。用 TD3691 型电化学仪测量处理前后试样的耐蚀性能, 腐蚀环境为质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液, 采用饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极, 扫描速率 10 mV/s。离子-气体渗碳前后样件的物相分析在 D/max-III A 型 X 射线衍射仪上进行。用 HSR-2M 型高速往复摩擦磨损试验机测量处理前后不锈钢的耐磨性能, 滚珠采用直径 5 mm 的 Si_3N_4 陶瓷材料, 所加载荷为 10 N, 电机转速为 500 r/min (转一圈滚珠往复一次), 磨损实验时间为 3 h。

2 实验结果与分析讨论

2.1 低温离子-气体渗碳处理温度的确立

奥氏体不锈钢离子-气体硬化处理过程中, 为保证处理后的不锈钢保持原有的耐蚀性能, 必须严格控制硬化层内无碳的铬化物析出。然而, 渗碳温度是影响不锈钢中铬的碳化物析出中最重要因素。由此可知正交实验前合适的渗碳处理的温度区间的确定是至关重要的。

316L 不锈钢在不同温度下经离子-气体乙炔处理的样件渗碳样件与基体的 XRD 衍射图和横截面金相照片见图 3 和图 4。

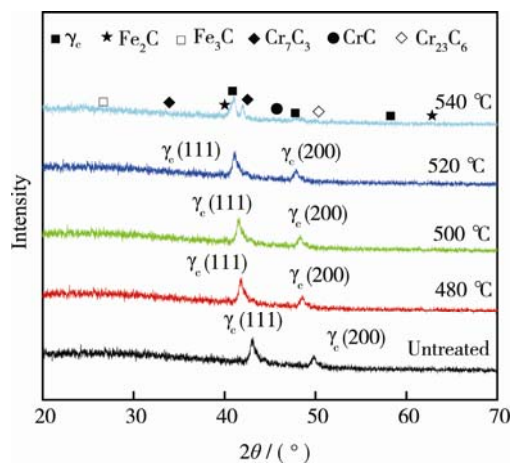


图 3 在不同处理温度下低温离子-气体硬化处理前后样件的 XRD 图

Fig.3 XRD patterns before and after ion-gas carburizing at different temperatures

由图 4 知当处理温度低于 540 °C 时, 不锈钢基体已被腐蚀变黑, 但渗层仍为均匀的白色。由此得出, 在相同的腐蚀条件下, 硬化层的耐腐蚀性优于

基体的耐腐蚀性。然而,当硬化处理温度达到 540 ℃ 时,渗碳件硬化层内有黑色的组织出现,根据 X 射线衍射图知渗碳层中出现了一些碳化物组织,如 Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , CrC , Fe_3C , Fe_2C 等,就是这些 Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , CrC 等的析出导致奥氏体不锈钢表面的耐腐

蚀性降低。根据试验结果可知,奥氏体不锈钢低温离子-气体乙炔渗碳处理的最适宜温度为 520 ℃。在此温度下处理的不锈钢不仅具有高的硬度和良好的耐蚀性,而且硬化层横截面的硬度梯度也较为平缓。

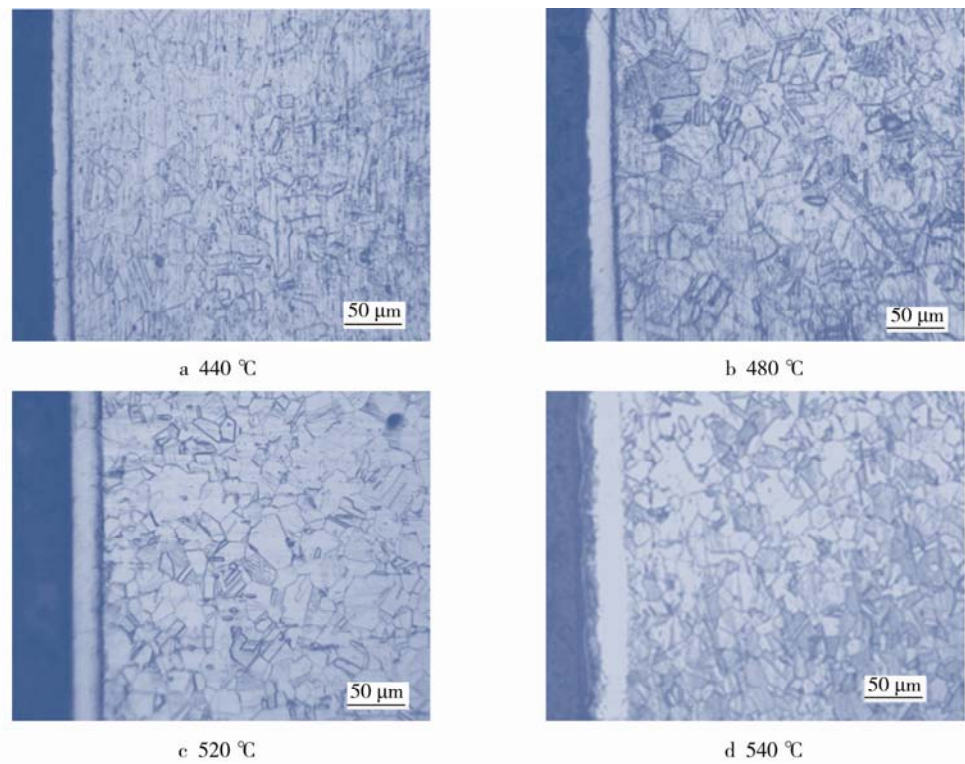


图 4 在不同温度下离子-气体渗碳后不锈钢样件横截面金相照片

Fig.4 Metallographic photos of ion-gas carburizing of stainless steel at different temperatures

2.2 正交试验工艺优化

低温离子-气体硬化处理正交实验设计和结果见表 2, 实验的评判标准是硬化层厚度 M_1 和渗碳层硬度 M_2 。如果以硬化层的硬度作为实验评判标准, 其极差分

析数据见表 3, 其中 N_1 , N_2 , N_3 分别为单个因素各水平对应最高硬度的平均值。由表 3 可以得出, 在因素 C 影响下的结果的极差最大, 对硬化层硬度影响的最主要因素是 C, 因素 B 的影响次之, 处理后的渗碳件的表面能获得最大硬度的工艺组合应该是 A_1 、 B_3 、 C_2 。

表 2 离子-气体硬化处理实验设计和结果
Tab.2 Ion-gas hardening experimental design and results

序号	A	B	C	D	$M_1/\mu\text{m}$	$M_2(\text{HV}0.05)$
	$V_{\text{H}_2}:V_{\text{C}_2\text{H}_2}$	Carburizing pressure/MPa	Bombardment time(min): holding time(min)	Cycle		
1	1:1	-0.06	10:50	6	20.83	682
2	1:1	-0.04	20:50	6	22.44	837
3	1:1	-0.02	30:50	6	25.22	835
4	1:3	-0.06	20:50	6	25.57	862
5	1:3	-0.04	30:50	6	19.48	660
6	1:3	-0.02	10:50	6	20.87	752
7	1:5	-0.06	30:50	6	25.74	800
8	1:5	-0.04	10:50	6	19.08	714
9	1:5	-0.02	20:50	6	21.22	796

表 3 硬化层硬度极差分析结果
Tab.3 Results of range analysis of the hardened lay hardness

因素	N_1	N_2	N_3	Range	Optimal
A	784	758	770	26	A_1
B	781	737	794	57	B_3
C	716	831	765	115	C_2

如果以硬化层的厚度作为实验评判标准，其极差分析数据见表 4。由表 4 可知，对硬化层厚度影响因素的主次关系是 $B>C>A$ ；处理后的渗碳件的表面能获得最大厚度的工艺组合应该是 $A_1B_1C_3$ 。

表 4 硬化层厚度极差分析结果
Tab.4 Results of range analysis of the hardened lay thickness

因素	N_1	N_2	N_3	Range	Optimal
A	22.83	21.97	22.00	0.86	A_1
B	24.05	20.32	22.43	3.73	B_1
C	20.25	23.08	23.48	3.23	C_3

由表 3 和表 4 可得知，B(保温压强)和 C(离子轰击时间)是影响不锈钢低温离子-气体乙炔硬化处理效果较大的因子，因子 A(气体比例)产生的影响没有前两者大。衡量渗碳层性能好坏的最重要的标准为渗碳层的硬度，所以因素组合 $A_1B_3C_2$ ，即气体 $V(H_2):V(C_2H_2)=1:1$ 、保温压强 -0.02 MPa 、离子轰击时间 20 min 、渗碳温度 $520\text{ }^\circ\text{C}$ 为 AISI 316L 不锈钢低温离子-气体乙炔硬化处理的最优的工艺参数组合。

2.3 硬化层的组织和结构

AISI 316L 奥氏体不锈钢试样经优化工艺参数处理后的横截面金相图片见图 5。从图片上反映出，经离子-气体乙炔渗碳硬化处理后的试样表面获得了一层较厚的白亮硬化层。经检测此硬化层中无铬的碳化物析出，其为碳在奥氏体晶格中的过饱和固溶体（S 相^[13]）。硬化层的耐蚀性能明显优于 AISI 316L 不锈

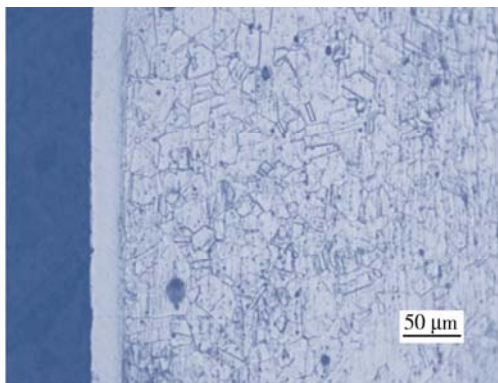


图 5 AISI 316L 不锈钢经优化工艺处理后的渗碳层的金相组织

Fig.5 Microstructure picture of the Carburized layer of AISI 316L stainless steel by process optimizing

钢基体，原因在于此 S 相是一种单相组织。
经低温离子-气体乙炔渗碳硬化处理前后奥氏体不锈钢试样的 X 射线衍射图见图 6。由图 6 可知，经低温离子-气体乙炔硬化处理后的 AISI 316L 不锈钢仍具有原来的晶体结构，没有新物相生成。但是（100）（101）（110）衍射峰都向小角度发生了偏移。这是因为经低温离子-气体乙炔渗碳处理后的奥氏体不锈钢晶格内部被大量的原子通过扩散作用而进入，促使不锈钢组织的晶面间距变大，由 $n\lambda=d$ 可知衍射角 θ 变小，即向小角度发生偏移。

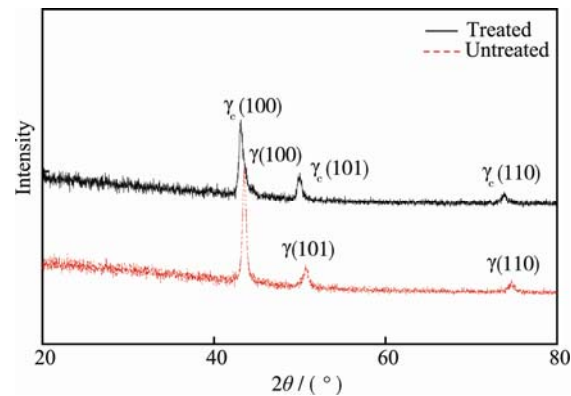


图 6 经优化工艺处理前后 AISI 316L 不锈钢渗碳件的 X 射线

Fig.6 X-ray diffraction patterns of the AISI 316L stainless steel samples carburized before and after process optimizing

2.4 渗碳层的硬度和耐磨性

经优化工艺处理后的 AISI 316L 奥氏体不锈钢渗碳件横截面的硬度梯度分布曲线见图 7。经低温离子-气体乙炔硬化处理后渗碳件表面硬度可达到 $838\text{ HV}0.05$ ，相比于奥氏体不锈钢基体，其硬度高出好几倍。硬化层的耐磨性能及基材的承载能力显著提高，其主要由于硬化层的高硬度以及渗碳后不锈钢较平缓的硬度梯度。

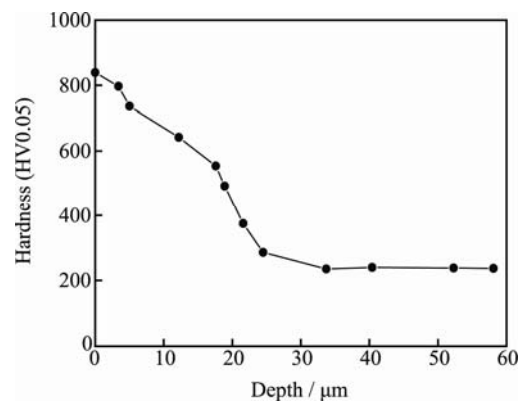


图 7 经优化工艺处理后 AISI 316L 奥氏体不锈钢渗碳件横截面的硬度梯度分布

Fig.7 Hardness profiles of the AISI 316L austenitic stainless steel samples carburized by process optimizing

经过低温离子-气体乙炔硬化处理前后奥氏体不锈钢耐磨性能的变化为: 未处理的不锈钢件磨损量是 $19.38 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$, 经低温离子-气体乙炔硬化处理后的奥氏体不锈钢的耐磨量为 $0.1624 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 。由此可以看出经过处理的不锈钢的耐磨性能有明显的提高。

AISI 316L 奥氏体不锈钢经过离子-气体渗碳处理后其组织成分、结构发生了改变, 致使其力学性能产生了明显的提高。大量的 C 原子固溶于奥氏体晶格中, 导致其发生晶格畸变, 从而使其位错密度显著增加, 进而表现为渗碳层的硬度和耐磨性能得到很大程度上的提高^[14]。

2.5 硬化层的耐蚀性分析

经优化工艺处理前后 AISI 316L 奥氏体不锈钢的极化曲线见图 8。经过低温离子-气体渗碳处理后硬化层的自腐蚀电位要比未处理的奥氏体不锈钢的自腐蚀电位要高得多, 自腐蚀电位由 -391 mV 提高到 -200 mV , 且在很宽的电位变化范围内, 维钝电流密度变化较平稳, 这说明经过低温离子-气体乙炔渗碳硬化处理后奥氏体不锈钢表面的耐蚀性不仅没有降低反而提高。这是由于渗层内 C 原子的含量高, 使渗层内应力场及晶格发生畸变, 阻碍自由电子的迁移, 同时活性原子填充了不锈钢表面的晶界等缺陷, 使表面原子排列更加致密, 从而提高了其耐蚀性。

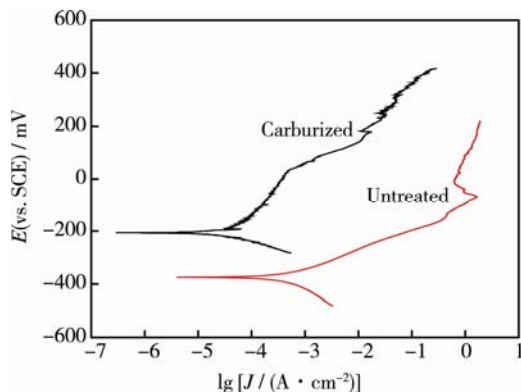


图 8 低温离子-气体硬化处理前后 AISI 316L 奥氏体不锈钢的极化曲线

Fig.8 Polarization curves of the AISI 316L austenitic stainless steel before and after ion-gas carburizing at low temperature

3 结语

采用离子-气体乙炔渗碳方法并使用脉冲式供气方式能获得较好的渗碳白亮层; 奥氏体不锈钢低温离子-气体乙炔硬化处理温度应控制在 540°C 以下, 因为超过此温度渗碳层内会有铬的碳化物 (Cr_{23}C_6 、 Cr_7C_3 、 CrC 等) 析出, 从而使不锈钢的耐蚀性能大大降低; AISI 316L 奥氏体不锈钢低温离子-气体乙炔硬化处理最佳工艺组合是硬化处理温度 520°C , $V(\text{H}_2):V(\text{C}_2\text{H}_2)=1:1$, 保温压强为 -0.02 MPa , 离子

轰击时间为 20 min 。

参考文献:

- [1] SUN Y, LI C X, BELL T. Low Temperature Plasma Carburizing of Austenitic Stainless Steels for Improved Wear and Corrosion Resistance[J]. Surface Engineering, 1999, 15(1): 49—54.
- [2] ZHANG Z L, BELL T. Structure and Corrosion Resistance of Plasma Nitrided Stainless Steel[J]. Surface Engineering, 1985, 1(2): 131—136.
- [3] CHENG Z, LI C X, DONG H, et al. Low Temperature Plasma Nitrocarburising of AISI 316 Austenitic Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 191(2/3): 195—200.
- [4] 王萌, 巩建鸣, 荣冬松. 奥氏体不锈钢低温气体渗碳工艺研究现状[J]. 金属热处理, 2012, 18(7): 45—49.
WANG Meng, GONG Jian-ming, RONG Dong-song. Research Status of Low Temperature Gas Carburizing for Austenite Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 18(7): 45—49.
- [5] 赵程, 王宇. AISI201 奥氏体不锈钢低温离子渗碳[J]. 金属热处理, 2012, 37(5): 95—97.
ZHAO Cheng, WANG Yu. Low Temperature Plasma Nitrocar Burizing of AISI 316 Austenitic Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(5): 95—97.
- [6] CAO Y, ERNST F, MICHAL G M. Colossal Carbon Supersaturation in Austenitic Stainless Steels Carburized at Low Temperature[J]. Acta Materialia, 2003, 51(14): 4171—4181.
- [7] GRAFEN W. A Superior Carburizing Technology- Acetylene Low Pressure Carburizing[J]. Heat Treatment of Metals, 1999(4): 79—83.
- [8] 刘晔东, 曾爱群. 乙炔低压渗碳的工艺及装备[J]. 热处理, 2005, 20(3): 2047—2049.
LIU Ye-dong, ZENG Ai-qun. Process and Equipment of Acetylene Low Pressure Carburizing[J]. Heat Treatment, 2005, 20(3): 2047—2049.
- [9] BORGIOLO F, FOSSATI A, GALVANETTO E, et al. Glow-discharge Nitriding of AISI 316L Austenitic Stainless Steel: Influence of Treatment Temperature[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(7): 2474—2480.
- [10] ZHAO Cheng. Plasma Nitrocarburising of Austenitic Stainless Steel at Low Temperature[J]. China Surface Engineering, 2003(5): 23—26.
- [11] WANG L, JI S, SUN J. Effect of Nitriding Time on the Nitrided Layer of AISI 304 Austenitic Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(16/17): 5067—5070.
- [12] CHEN F S, CHANG C N. Effect of CH_4 Addition on Plasma Nitrocarburizing of Austenitic Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 173(1): 9—18.
- [13] LI C X, GEORGES J, LI X Y. Active Screen Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel[J]. Surface Engineering, 2002, 18(6): 453—458.
- [14] BELL T, SUN Y. Low-temperature Plasma Nitriding and Carburising of Austenitic Stainless Steels[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 29(3): 57—64.