

独立阳极对石油钻杆内壁离子渗氮过程的影响

冯涛, 刘斌, 王引真, 杨青霖, 刘俊

(中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: **目的** 利用脉冲离子渗氮提高石油钻杆内壁性能。**方法** 在钻杆内部插入独立阳极, 利用钻杆内部空腔作为渗氮炉体, 完成钻杆内壁离子渗氮。通过测定渗氮过程的温度分布并对渗层的硬度分布、耐蚀性及耐磨性能进行测定, 分析独立阳极对钻杆内壁渗氮过程、渗层显微组织、耐磨耐蚀性能的影响。**结果** 采用 L1700 长阳极时的温度场比采用 L600 短阳极均匀。采用 L600 短阳极时, 随距阳极距离的增加, 渗层厚度减小。采用 L1700 贯穿长棒时, 渗层形貌和厚度呈对称分布, 渗氮层的显微硬度由表及里逐渐降低。两种不同阳极相比, L1700 硬度变化更平缓。盐雾腐蚀及摩擦磨损试验表明, 采用 L600 短阳极时, 随着距离的增大, 性能下降, 而采用 L1700 长阳极时, 性能呈对称分布, 中间位置性能最低。**结论** 采用内置独立阳极的方法可以实现钻杆内壁离子渗氮, 独立阳极的影响范围约为 260 mm。采用 L1700 长阳极渗氮后, 表层最高硬度可达 848.0HV_{0.2}, 渗层最小厚度 0.33 mm。L1700 试样腐蚀速率最大为 1.6917×10^{-5} g/(mm²·h), 磨损率最大为 1.5513×10^{-7} mm³/(N·m)。

关键词: 石油钻杆; 内壁离子渗氮; 独立阳极; 硬度; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号: TG156.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0065-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.010

Effect of Independent Anode on Ion-nitriding Process of Oil Drill Pipe Inner Wall

FENG Tao, LIU Bin, WANG Yin-zhen, YANG Qing-lin, LIU Jun

(School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the performance of the inner wall of oil drill pipe by pulsed ion-nitriding. An independent anode was inserted into the oil drill pipe, and the inner cavity of the drill pipe was used as the nitriding furnace to complete the ion-nitriding on the inner wall of the drill pipe. By measuring the temperature distribution of the nitriding process, hardness distribution, corrosion resistance and friction and wear properties on the cementation layer were determined and the influence of the independent anode size on the nitriding process of the drill pipe inner wall, the microstructure of the cementation layer, and the wear resistance and corrosion resistance of the drill pipe was analyzed. The temperature field of L1700 anode was more uniform than that of L600 anode. When L600 anode was used, the thickness of infiltration layer decreased with the increasing distance from anode. When L1700 anode was used, the morphology and thickness of infiltration layer were distributed symmetrically. After nitriding, the micro-hardness of nitriding layer decreased gradually from the surface to the inside. By comparing the two different anodes, the hardness of L1700 changed more slowly. Salt spray corrosion and friction and wear tests showed that when L600 anode was used, the performance decreased with the increase of distance, while when L1700 anode was

收稿日期: 2018-12-20; 修订日期: 2019-02-15

Received: 2018-12-20; Revised: 2019-02-15

作者简介: 冯涛 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面改性。邮箱: ft_210750@163.com

Biography: FENG Tao (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: material surface modification. E-mail: ft_210750@163.com

used, the performance was symmetrically distributed, with the lowest performance at the middle position. The inner wall of drill pipe can be nitrided by the method of built-in independent anode. The influence range of independent anode is about 260 mm. With L1700 anode for nitriding, the maximum surface hardness can reach 848.0HV_{0.2}, and the minimum thickness of the layer is 0.33 mm. The corrosion test shows that the maximum corrosion rate of L1700 sample is $1.6917 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{h})$, and the maximum wear rate is $1.5513 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$.

KEY WORDS: oil drill pipe; inner wall ion-nitriding; independent anode; hardness; wear resistance; corrosion resistant

石油钻杆作为油田钻井作业中的主要工具,管壁会受到泥浆腐蚀、岩石颗粒磨损等,服役条件复杂恶劣,严重时会出现穿孔和断裂,失效事故频发^[1]。随着浅层石油资源枯竭,深井、超深井的石油钻采渐成趋势,石油钻杆的服役环境更为复杂,工作条件更加恶劣。如何保证钻杆在数千米的井下能长时间正常工作,减缓钻杆在井下恶劣环境中的腐蚀、磨损与断裂问题,提高钻杆质量的可靠性成为当务之急^[2]。现阶段,钻杆内壁常采用内涂层防护,以改性酚醛、环氧酚醛和改性有机硅系列涂料为主^[3],虽能起到一定的防腐蚀作用,但这些涂层耐高温能力较差、结合力弱,急需可替代的保护方法。离子渗氮可以提高工件的耐磨、耐蚀和抗疲劳性能,又可实现可控渗氮,因此钻杆渗氮的发展潜力较大^[4]。

因石油钻杆的长径比远超过 15,属于超细长金属管,若采用普通离子渗氮方法会出现“无限长管电场屏蔽”现象,钻杆内没有电场,无法电离出带电粒子,不能提供轰击工件的氮离子和氢离子,达不到钻杆内壁渗氮的目的^[5-6]。在钻杆中心放置一根金属棒,作为阳极,钻杆作为阴极,在高电压作用下,通电的金属棒和待渗氮钻杆之间形成足够大的电场,产生辉光放电效应,可实现管筒内壁离子渗氮,该技术称为“独立阳极”技术。通过改变独立阳极的材质和直径,可以产生类似于“空心阴极”的现象,使辉光放电时得到更大的粒子流,并可减缓炉内温度分布不均现象^[7-8]。

1 试验材料及方法

试验选用的母材为 S135 石油钻杆,其化学成分见表 1,其力学性能见表 2。

表 1 S135 钻杆材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of S135 drill pipe

wt. %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ti	V	Al
0.29	0.24	1.14	0.011	0.003	0.914	0.155	0.001	0.009	0.003

表 2 S135 钻杆力学性能

Tab.2 Mechanical properties of S135 drill pipe

σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$A_k(20^\circ\text{C})/\text{J}$	$A_k(-20^\circ\text{C})/\text{J}$
1027	1128	22	115	120

试验中固定渗氮工艺参数为:渗氮温度 540°C ,保温时间 8 h,渗氮用气体为氨气。试验后分析独立阳极对渗氮温度场、渗层形貌、厚度、硬度分布、元素分布、摩擦磨损性能及耐蚀性能的影响。盐雾试验温度 35°C ,试验溶液为 5%NaCl 溶液,pH 值 6.5~7.2,试验时间 96 h,每隔 40 min 喷雾 20 min。摩擦磨损试验形式为滑动摩擦,试验条件为干式,试验压力负荷为 200 N,试验时间 60 min,摩擦转速 200 r/min,对磨件为淬火后的 GCr15 滚动轴承钢,其硬度为 65HRC。

独立阳极的尺寸主要影响阴阳两极间的距离,试验中使用的 S135 钻杆内径为 $\phi 62 \text{ mm}$,长 1360 mm,结合独立阳极自身的刚度及其夹持方式,选择独立阳极直径为 10 mm,长度分别选择 600 mm 和 1700 mm。长 600 mm 的独立阳极称为 L600 半炉短棒,长 1700 mm 的独立阳极称为 L1700 贯穿长棒。两种尺寸的独立阳极在钻杆内的分布如图 1 所示。为研究独立阳极的影响,在钻杆上相同位置,从左向右间隔 130 mm,选取 5 个试样。试验中,采取两端交替进气方式。

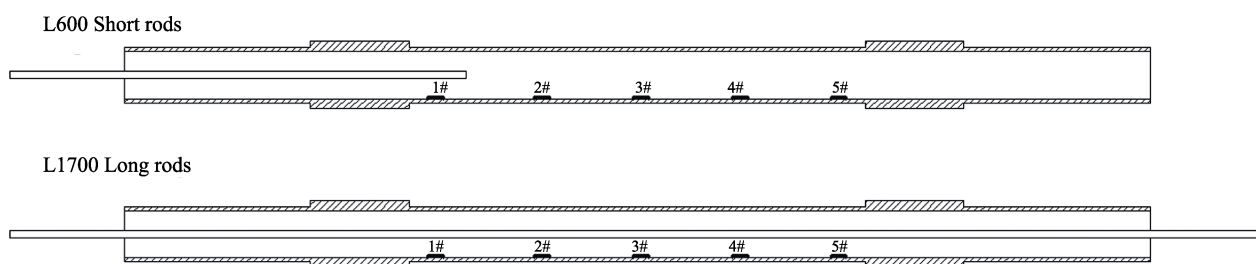


图 1 独立阳极在 S135 钻杆内的位置示意图

Fig.1 Schematic diagram for position of independent anode in the S135 drill pipe

2 试验结果及分析

2.1 独立阳极管筒内壁渗氮温度分布

在渗氮保温过程中, 选取保温 3 h 和保温 6 h, 测量各个试样放置位置的实际温度, 图 2 所示为渗氮炉内的温度场。由图 2 可见, L1700 长阳极所产生的温度场更为均匀, 且温度更高。采用 L1700 贯穿长棒渗氮时, 独立阳极贯穿整个渗氮炉腔, 炉内阴阳极间距离变化较小, 炉内电场分布更为均匀, 产生的温度场也会更均匀。L600 短阳极位于钻杆腔体左侧, 腔体右侧由于缺少独立阳极, 导致电场减弱和消失, 带电粒子轰击工件表面的作用减弱, 导致 S135 钻杆腔体右侧温度较低。S135 钻杆两侧温度较低, 是因为两侧受水冷系统的影响, 导致温度下降。

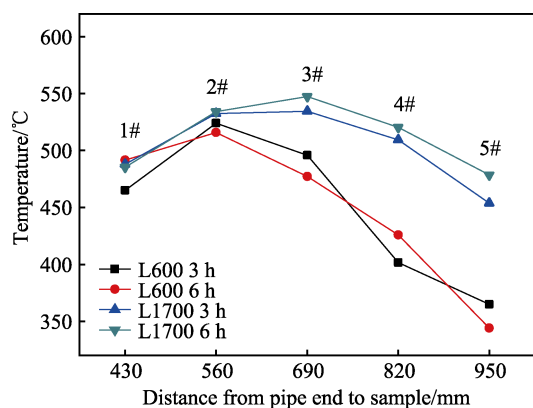


图 2 渗氮炉内的温度场

Fig.2 Temperature field in nitriding furnace

2.2 独立阳极对渗层组织的影响

图 3 为 L600 半炉短棒渗氮试验后钻杆内壁的显微组织形貌。图 4 为 L1700 贯穿长棒渗氮试验后钻杆内壁的显微组织形貌。由图 3 可见, L600 的 1#、2# 和 3# 试样有明显的白亮层和扩散层组织, 在白亮层内侧平行于试样表面出现了黑色富氮层^[9]。1# 试样位于独立阳极下方, 靠近进气端, 氮势较高, 但受水冷循环系统的影响, 温度较低, 氮原子扩散速度慢, 且较厚的白亮层阻止了氮原子向内部扩散, 使得富氮层厚度小于 2# 试样。2# 试样富氮层最厚, 且扩散层中出现了脉状组织。3# 试样温度和氮势较低, 白亮层、富氮层和扩散层都较薄。4# 试样远离独立阳极, 电场作用弱, 温度较低, 基本看不到扩散层组织, 试样表面仅有一层较薄的白亮层。5# 试样距离独立阳极最远, 基本看不到渗氮层组织。

由图 4 可见, L1700 的渗氮层组织呈对称分布, 1# 和 5# 相似, 2# 和 4# 相似。3# 试样距炉体端部 690 mm, 靠近独立阳极弯曲变形最大处, 阴阳极间距离最小且远离进气端, 等离子体浓度不足, 氮势较低, 导致在显微组织上看不到白亮层的存在。

2.3 独立阳极对渗层显微硬度和厚度的影响

图 5 为两种尺寸的独立阳极渗氮所得到的钻杆试样显微硬度变化趋势。由图 5 可见, 钻杆渗氮后, 显微硬度显著提高, 最高可达 600HV_{0.2}, 比基体硬度高出一倍多。随着距渗层表面距离的增大, 各位置试样的显微硬度均呈现下降趋势, 且下降趋势逐渐变缓。L1700 长阳极显微硬度变化更为缓和, 距表面

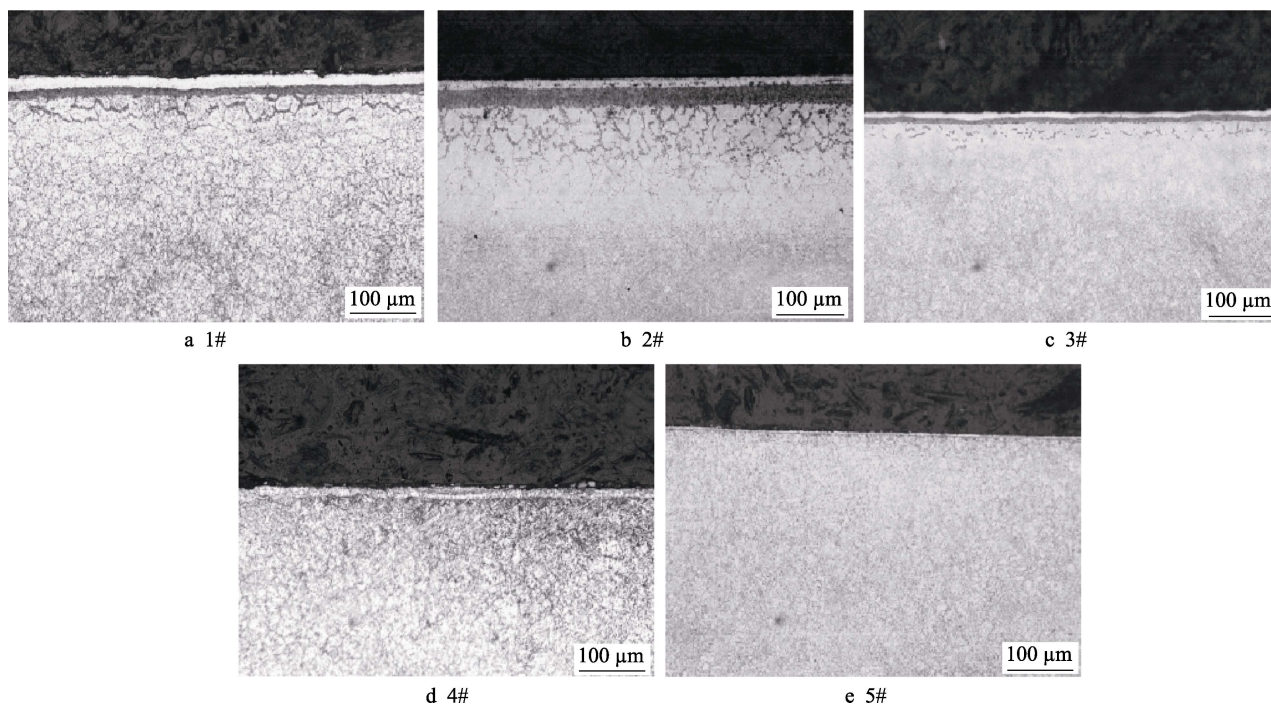


图 3 L600 半炉短棒对渗层显微组织的影响

Fig.3 Effect of the L600 independent anode on the microstructure of nitrided layer

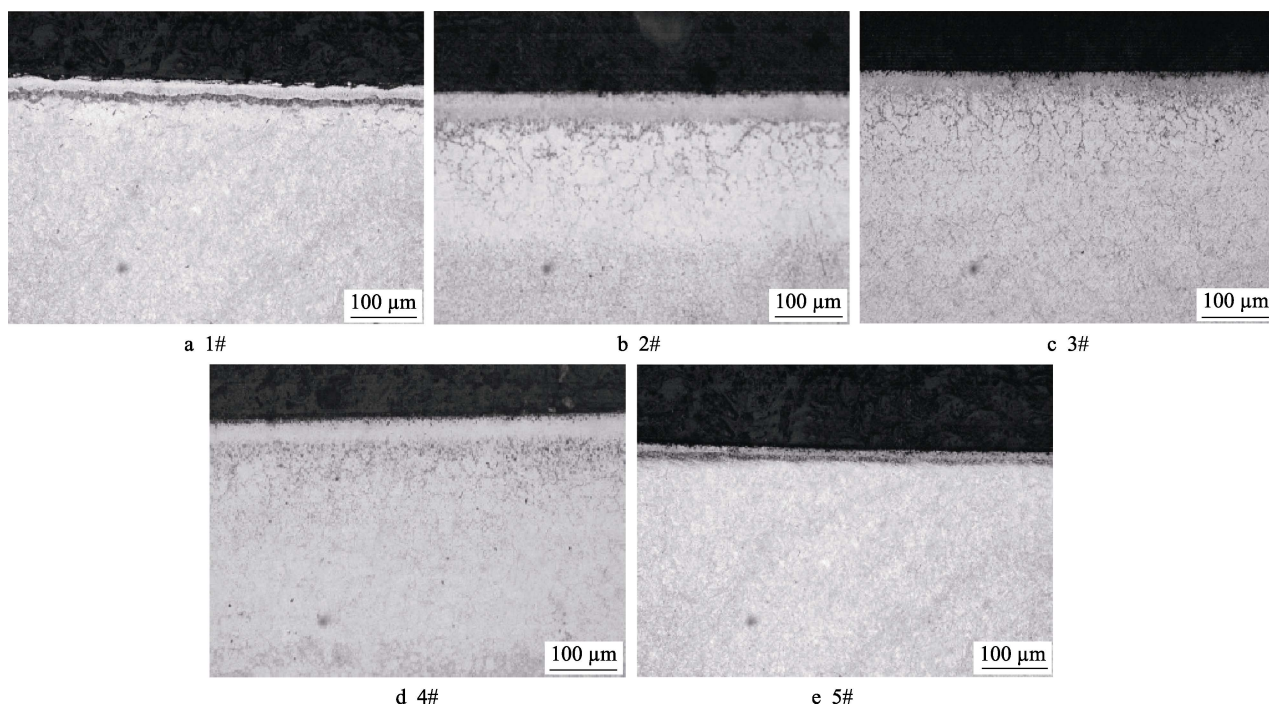


图4 L1700 贯穿长棒对渗层显微组织的影响

Fig.4 Effect of the L1700 independent anode on the microstructure of nitrided layer

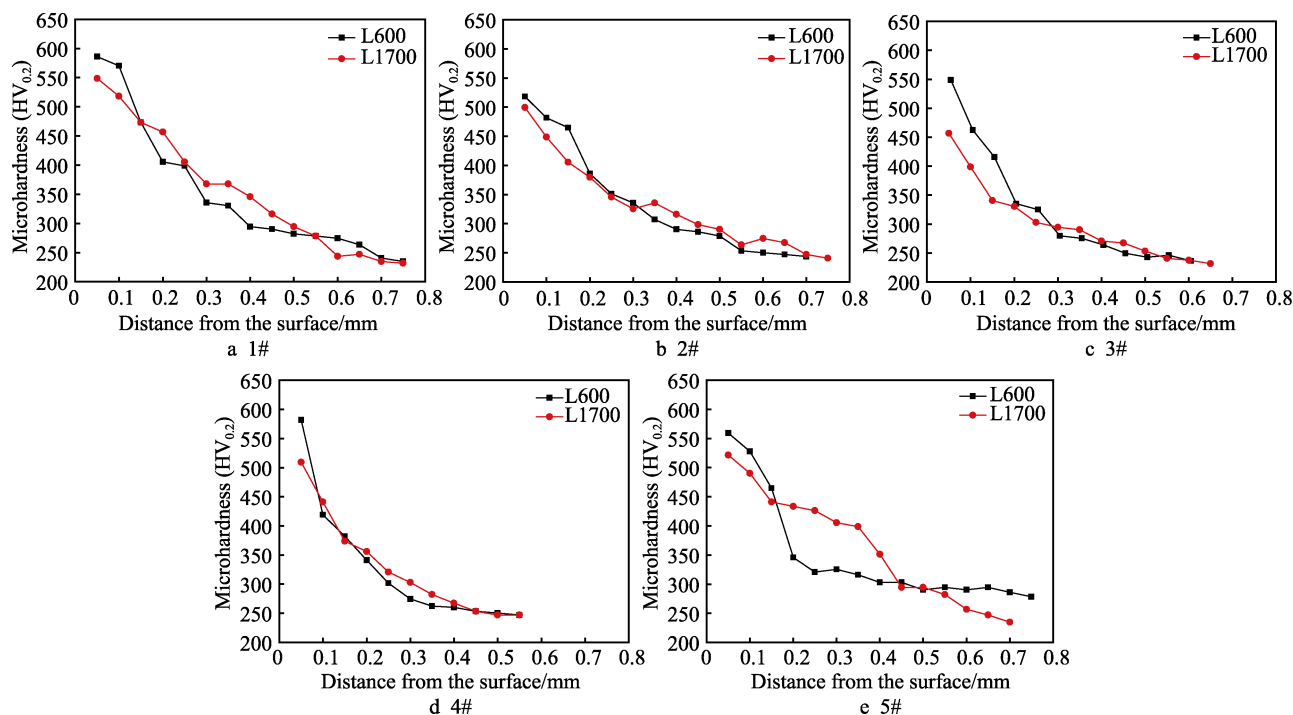


图5 渗氮层的显微硬度对比

Fig.5 Comparison of the microhardness of nitrided layers

0.15 mm 以内, L600 的显微硬度要高于 L1700。5# 试样显微硬度变化有较大不同: L600 短阳极的 5# 试样远离独立阳极, 电场强度小, 氮原子扩散系数小, 扩散缓慢, 使得硬度梯度较大; 而 L1700 贯穿长棒的 5# 试样温度高, 氮原子向内扩散较快, 显微硬度变化趋势较缓。

渗氮层的性能与渗氮层中的氮浓度紧密相关^[10]。

选取渗氮层硬度梯度变化较为明显的 L600-1# 试样, 对其渗氮层成分进行分析, 结果见图 6, 渗氮层中元素含量见表 3。由表 3 可知, 渗层中氮含量由表及里逐渐降低, 氮原子在扩散过程中与铁原子结合形成不同的金属间化合物。氮原子由表面向内扩散时, 最外侧氮含量最高, 铁氮元素结合成以 Fe_{2-3}N 为基的密排六方间隙相 ϵ 相, ϵ 相硬度高、脆性大。随着扩散的

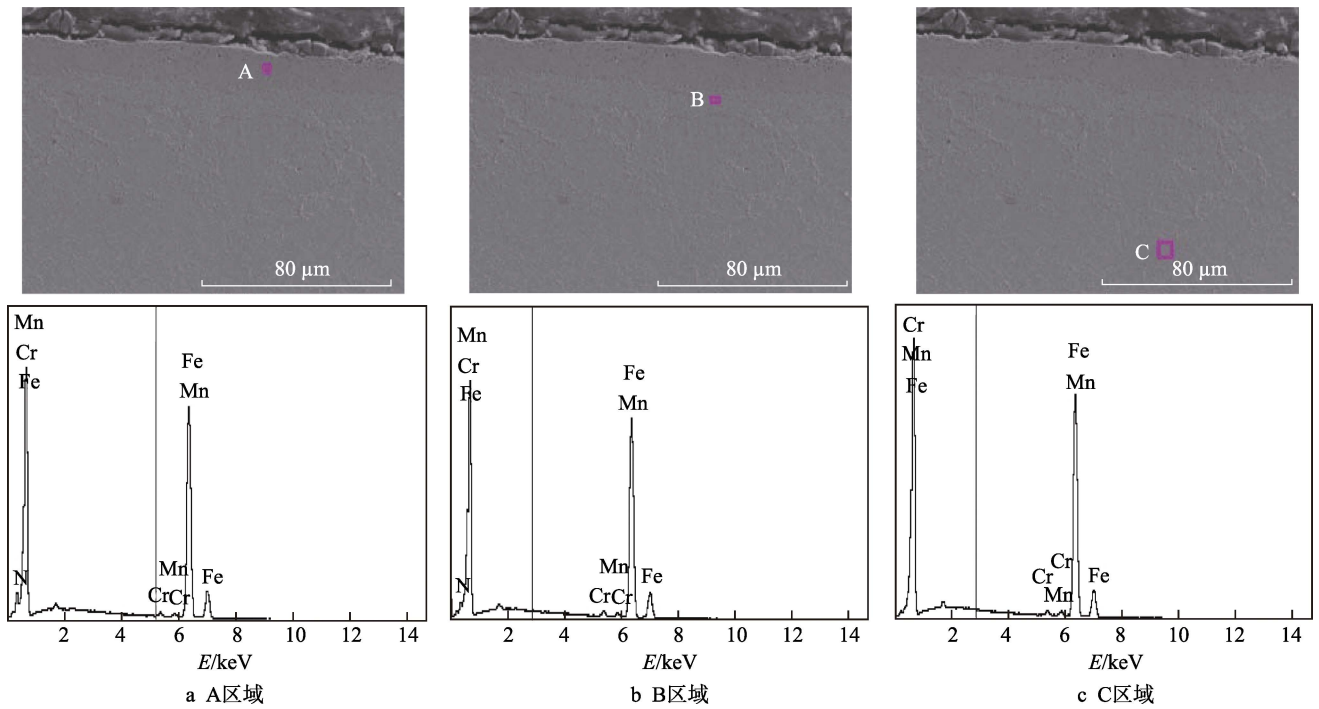


图 6 渗氮层不同区域的成分分析
Fig.6 Analysis of components in different regions of the nitrided layer: a) A zone; b) B zone; c) C zone

表 3 渗氮层不同区域的元素占比
Tab.3 Proportion of elements in different regions of the nitrided layer

Element	A zone		B zone		C zone	
	Weight percentage/%	Atomic percent/%	Weight percentage/%	Atomic percent/%	Weight percentage/%	Atomic percent/%
N	12.39	36.03	7.61	24.70	3.15	11.48
Cr	0.78	0.61	1.12	0.98	1.07	1.04
Mn	0.97	0.72	1.35	1.11	1.29	1.20
Fe	85.86	62.64	89.93	73.21	94.49	86.28

进行,氮含量逐渐降低,并在工件近表面形成以 Fe_4N 为基的面心立方间隙相 γ' 相, γ' 相硬度较高、韧性较好。氮原子继续向试样内部扩散,在试样内部形成体心立方的 α 相,其性能与 $\alpha\text{-Fe}$ 相似,硬度较低^[11]。渗氮层由表及里依次为 ε 相、 γ' 相、 $\gamma'+\alpha$ 相和 α 相,硬度逐渐降低。经过测量, L600 半炉短棒渗氮试样表面硬度值最大可达 910.8HV_{0.2}, 高于 L1700 贯穿长棒渗氮试样的 848.0HV_{0.2}。

根据 GB/T 11534—2005《钢铁零件渗氮层深度测定》,测得不同独立阳极离子渗氮的渗氮层厚度,见表 4。由表 4 可见, L1700 长阳极渗氮层厚度要大于 L600 短阳极渗氮层,且渗层呈现两端厚、中间薄的情况。L600 半炉短棒渗氮层厚度变化较大,距独立阳极越远,渗氮层厚度越小,呈下降趋势。L1700 长阳极贯穿整个钻杆内腔,电场分布均匀,炉腔内温差较小。但由于渗氮气体从两端进入钻杆内,使得处于钻杆中间的 3#试样氮势低,活性氮原子较少,从而导致渗氮层较薄。而 L600 半炉短棒独立阳极仅位于钻杆一侧,距独立阳极越远,则温度越低,氮原子

扩散系数越小,渗层越薄。综合以上分析,独立阳极对钻杆内壁进行氮化处理时,独立阳极的影响范围约为 260 mm,超过此范围时,白亮层不明显,富氮层和扩散层较薄,无工程应用价值。

表 4 不同独立阳极离子渗氮的渗氮层厚度
Tab.4 Thickness of the nitrided layer with different independent anodes

Sample number	1#	2#	3#	4#	5#
L600 nitriding depth/mm	0.49	0.42	0.32	0.29	0.22
L1700 nitriding depth/mm	0.47	0.44	0.33	0.42	0.45

2.4 独立阳极对钻杆内壁耐磨耐蚀性的影响

对渗氮后试样进行盐雾腐蚀试验,采用失重法计算盐雾试验腐蚀速率,计算结果见表 5。由表 5 可见,离子渗氮后,试样腐蚀速率明显减小,渗层抑制了金属表面的电化学腐蚀过程,保护基体不受或减缓腐蚀。白亮层主要由 $\varepsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ 构成,组织致密,较厚的白亮层可以阻止点蚀的发生^[12]。L600 短阳极试样腐

蚀速率从 1#到 5#呈现递增趋势; L1700 长阳极的试样腐蚀速率呈现对称分布的特点, 3#试样腐蚀速率最大, 耐蚀性最差。

表 5 盐雾试验腐蚀速率
Tab.5 Corrosion rate of salt spray test

Sample number	Pretest weight/g	Post test weight/g	Weight loss/g	Corrosion rate/($\times 10^{-5}$ g \cdot mm $^{-2}\cdot$ h $^{-1}$)
Substrate	5.1036	4.8945	0.2091	2.1781
L600-1#	5.4921	5.3990	0.0931	0.9698
L600-2#	5.6805	5.5751	0.1054	1.0979
L600-3#	5.1974	5.0485	0.1489	1.5510
L600-4#	5.7732	5.6134	0.1598	1.6646
L600-5#	5.9153	5.7338	0.1815	1.8906
L1700-1#	5.1382	5.0349	0.1033	1.0760
L1700-2#	5.4823	5.3661	0.1162	1.2104
L1700-3#	5.3978	5.2354	0.1624	1.6917
L1700-4#	5.2077	5.0836	0.1241	1.2927
L1700-5#	5.6758	5.5572	0.1186	1.2354

L600 短阳极和 L1700 长阳极进行对比可知, 对于 1#、2#和 3#位置, L600 短阳极渗氮试样耐蚀性比 L1700 贯穿长棒渗氮试样要好。这是因为氨气流量相同时, L600 半炉短棒渗氮试样远离独立阳极的一侧电场强度较弱, 氨分解率低, 而放置独立阳极一侧氮浓度较高, 氮势较大, 白亮层较厚。

对渗氮钻杆试样进行摩擦磨损试验并记录下试样的平均摩擦系数, 测出试样的失重并计算磨损率, 如表 6 所示。由表 6 可见, 基体的平均摩擦系数为 0.638, 离子渗氮后, 试样的平均摩擦系数为 0.47~0.53, 这说明离子渗氮提高了试样的耐磨性^[13,14]。L600 短阳极渗氮试样的磨损率呈上升趋势, 5#试样

表 6 摩擦磨损试验数据
Tab.6 Data of friction and wear tests

Sample number	Initial weight/g	Post wear weight/g	Weight loss/g	Average friction coefficient	Wear rate/($\times 10^{-7}$ mm $^3\cdot$ N $^{-1}\cdot$ m $^{-1}$)
Substrate	2.1254	1.8130	0.3124	0.638	1.6864
L600-1#	2.3251	2.1453	0.1798	0.488	1.2965
L600-2#	2.3753	2.1856	0.1897	0.494	1.3313
L600-3#	2.3890	2.1744	0.2146	0.511	1.4672
L600-4#	2.3187	2.0942	0.2245	0.508	1.5570
L600-5#	2.3206	2.0738	0.2468	0.532	1.6303
L1700-1#	2.3254	2.1401	0.1853	0.495	1.3175
L1700-2#	2.2563	2.0650	0.1913	0.498	1.3393
L1700-3#	2.1971	1.9684	0.2287	0.518	1.5513
L1700-4#	2.2701	2.0624	0.2077	0.501	1.4656
L1700-5#	2.0732	1.8794	0.1938	0.496	1.3753

磨损率最大, 为 1.6303×10^{-7} mm 3 /(N \cdot m); L1700 长阳极渗氮试样的磨损率呈对称分布, 3#试样磨损率最大, 为 1.5513×10^{-7} mm 3 /(N \cdot m)。渗氮层层的白亮层主要由高硬度的密排六方结构的 ϵ 相组成, 组织致密, 扩散层中的 γ' 相硬度较高且有一定的韧性。渗氮层的存在, 在一定程度上降低了试样的平均摩擦系数, 提高了试样的耐磨性。若渗氮层较薄, 表层的耐磨组织一旦被磨损而露出内部的基体, 摩擦系数就会显著上升^[15]。

3 结论

1) 针对钻杆大长径比管件内壁的离子渗氮问题, 设计了两种长度的独立阳极, 分别为 L600 短阳极和 L1700 长阳极。采用 L600 短阳极渗氮时, 渗氮炉内的温度场分布不均匀, 距独立阳极越远, 渗氮炉内温度越低, 白亮层、富氮层和扩散层组织越薄。当距离增大到约 950 mm 时, 渗层的组织特征基本消失, 独立阳极有效影响范围约为 260 mm。随着距炉体左端距离的增大, 渗氮层厚度呈现下降趋势, 腐蚀速率和磨损率则均呈现递增趋势。

2) L600 试样表面硬度最高可达 910.8HV_{0.2}, 但试样硬度梯度较大, 氮元素扩散距离较短, 渗氮层厚度较薄, 最小仅为 0.22 mm。L1700 贯穿长棒表面硬度可达 848.0HV_{0.2}, 渗氮层厚度最小为 0.33 mm。渗氮层由表及里依次为 ϵ 相、 γ' 相、 $\gamma'+\alpha$ 相和 α 相, 硬度逐渐降低。

3) L600 试样腐蚀速率从 1#到 5#呈递增趋势, 最高为 1.8906×10^{-5} g/(mm $^2\cdot$ h), L1700 的 3#试样腐蚀速率最高, 为 1.6917×10^{-5} g/(mm $^2\cdot$ h), 但均低于母材的腐蚀速率。L600 短阳极渗氮试样 1#—5#的磨损率呈上升趋势, 5#试样磨损率最大, 为 1.6303×10^{-7} mm 3 /(N \cdot m); L1700 长阳极渗氮试样 1#—5#的磨损率呈对称分布, 3#试样磨损率最大, 为 1.5513×10^{-7} mm 3 /(N \cdot m)。

参考文献:

- [1] 毕雪亮, 王长江, 阎铁, 等. 深井钻具失效分析与预防[J]. 钻采工艺, 2005, 28(6): 27-30.
BI Xue-liang, WANG Chang-jiang, YAN Tie, et al. Analysis and precaution of drilling tools failure in deep well[J]. Drilling and production technology, 2005, 28(6): 27-30.
- [2] 李建强, 于丽松, 牛成杰, 等. 石油钻杆的生产现状与发展趋势[J]. 焊管, 2011, 34(11): 35-38.
LI Jian-qiang, YU Li-song, NIU Cheng-jie, et al. The production status and development trend of drill pipe[J]. Welded pipe and tube, 2011, 34(11): 35-38.
- [3] 张江江, 刘强, 朱原原. 高温固化涂层在塔河油田井下油管防腐中的应用[J]. 涂料工业, 2015, 45(5): 58-62.

- ZHANG Jiang-jiang, LIU Qiang, ZHU Yuan-yuan. Application of high temperature crosslinking organic coatings in corrosion control of downhole tubing in Tahe oil-field[J]. Paint & coatings industry, 2015, 45(5): 58-62.
- [4] 杜树芳. 离子渗氮技术发展及设备改造[J]. 金属加工(热加工), 2018(6): 16-23.
- DU Shu-fang. Development of ion nitriding technology and equipment modification[J]. MW metal forming, 2018(6): 16-23.
- [5] 张津, 陈健, 赵祖德, 等. 细长管内壁高频脉冲离子渗氮[J]. 金属热处理, 2008, 33(5): 75-77.
- ZHANG Jin, CHEN Jian, ZHAO Zu-de, et al. High frequency pulse plasma nitriding on inner surface of tube with large ratio of length to diameter[J]. Heat treatment of metals, 2008, 33(5): 75-77.
- [6] 傅乐荣, 牛君, 左治江. 油管离子渗氮方法及防腐耐磨性能分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2012, 29(2): 12-15.
- FU Le-rong, NIU Jun, ZUO Zhi-jiang. Analysis of oil pipe nitriding techniques and corrosion & friction resistance performance[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2012, 29(2): 12-15.
- [7] 崔立超. 油管内壁离子渗氮工艺及渗层性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016: 48-70.
- CUI Li-chao. Study on process and properties of nitriding layer of plasma nitriding on the tubing wall[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016: 48-70.
- [8] 陈全刚, 牛君, 张庆纯, 等. 大长径比油管离子渗氮技术生产工艺技术研究[J]. 石化技术, 2018(1): 60.
- CHEN Quan-gang, NIU Jun, ZHANG Qing-chun, et al. Application of ion nitriding technology in oil tube production with large draw ratio[J]. Petrochemical industry technology, 2018(1): 60.
- [9] 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(7): 365-368.
- [10] 丁一, 杨兴宽, 彭明霞, 等. 42CrMo 钢离子渗氮过程氮浓度分布的数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2017(12): 129-138.
- DING Yi, YANG Xing-kuan, PENG Ming-xia, et al. Numerical simulation of nitrogen concentration profile in 42CrMo steel during plasma nitriding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017(12): 129-138.
- [11] TONG W P, TAO N R, WANG Z B, et al. Nitriding iron and 38CrMoAl steel with a nanostructured surface layer[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005(2): 230-238.
- [12] 汤金钢, 刘道新, 唐长斌, 等. 辉光离子渗氮对 Ti6Al4V 合金在航空煤油中摩擦学性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(1): 140-145.
- TANG Jin-gang, LIU Dao-xin, TANG Chang-bin, et al. The effect of the plasma nitriding layer in aviation kerosene environment on the tribological behavior of Ti6Al4V titanium alloy[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2014, 33(1): 140-145.
- [13] CHO K T, LEE Y K, LEE W B. Wear behavior of AISI D2 steel by enhanced ion nitriding with atomic attrition[J]. Tribology international, 2015, 87: 82-90.
- [14] TANG L N, YAN M F. Influence of plasma nitriding on the microstructure, wear, and corrosion properties of quenched 30CrMnSiA steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2013, 22(7): 2121-2129.
- [15] 李广宇, 曾心睿, 王楠, 等. 等离子体源渗氮奥氏体不锈钢的摩擦磨损行为[J]. 机械工程材料, 2018, 42(5): 14-19.
- LI Guang-yu, ZENG Xin-rui, WANG Nan, et al. Friction and wear behavior of plasma source nitrided austenitic stainless steel[J]. Material for mechanical engineering, 2018, 42(5): 14-19.