

# 40Cr 钢循环离子渗氮工艺及渗层硬度研究

钟厉<sup>1</sup>, 马晨阳<sup>2</sup>, 韩西<sup>1</sup>, 罗明宝<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;  
2.哈尔滨市东安汽车发动机制造有限公司, 哈尔滨 150060)

**摘 要:**目的 探索循环离子渗氮与常规恒温离子渗氮技术的工艺效果。方法 先对试样进行调质处理, 分组进行离子渗氮, 固定氨气和乙醇的流量, 改变渗氮时间和渗氮温度两种工艺参数及渗氮工艺, 分别测定渗氮后各试样的表面硬度及渗层厚度, 观察其金相组织, 并分析每组试样渗氮层的性能。结果 循环离子渗氮 530 °C 6 h 试样的表面硬度最高, 随着渗氮温度的升高和渗氮时间的延长, 试样的表面硬度增加, 但是当温度超过 530 °C、时间超过 6 h 后, 试样的表面硬度反而降低。循环渗氮 550 °C 10 h 试样的渗层厚度最厚, 随着渗氮温度的升高和渗氮时间的增加, 试样的渗层厚度变厚, 但时间超过 6 h 后, 渗层厚度的增加较缓慢, 6、8、10 h 试样的渗层厚度差别不大。相同的渗氮温度下, 循环渗氮 6 h 的试样的渗层厚度基本与常规恒温渗氮 10 h 试样的渗层厚度一样, 相同渗氮时间内, 循环渗氮 510 °C 的试样的表面硬度高于恒温渗氮 550 °C 试样的表面硬度, 且两者的渗层厚度相差不多。结论 循环离子渗氮工艺优于常规的恒温离子渗氮, 循环离子渗氮 550 °C 8 h 试样的综合性能最好。

**关键词:** 40Cr; 循环离子渗氮; 恒温离子渗氮; 性能

**中图分类号:** TG174.445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0154-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.025

## Study on Surface Circular Plasma Nitriding Technology and Nitrided Layer Hardness of 40Cr Steel

ZHONG Li<sup>1</sup>, MA Chen-yang<sup>2</sup>, HAN Xi<sup>1</sup>, LUO Ming-bao<sup>1</sup>

(1.School of Mechanotronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2.Harbin Dongan Automotive Engine Manufacturing Co., Ltd, Harbin 150060, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the process effects of circular plasma nitriding and conventional constant temperature plasma nitriding technology. Firstly, the specimen quenching and tempering was carried out. Plasma nitriding was conducted by groups. The flows of ammonia and ethanol were fixed. The two technological parameters (nitriding time and nitriding temperature) and nitriding technology were changed to respectively measure the surface hardness and nitriding thickness of each specimen after nitriding. The metallographic structure of each specimen was observed and the nitrided layer performance of each group of specimens was analyzed. The surface hardness of circular plasma nitrided 530 °C 6 h specimen was the highest. With the increase in the nitriding temperature and the prolonged nitriding time, the surface hardness of specimens was increased. However, when the temperature exceeded 530 °C and the time was over 6 h, the surface hardness of specimens would be reduced instead. The nitrided layer thickness of the circularly nitrided 550 °C 10 h specimens was the maximum. With the increase in nitriding temperature and nitriding time, the nitrided layer of the specimen would become thicker. However, when the time

收稿日期: 2016-09-16; 修订日期: 2016-10-07

Received: 2016-09-16; Revised: 2016-10-07

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, Ph. D., Professor, Research focus: material surface engineering.

exceeded 6 h, the nitriding thickness was increased more slowly. The nitriding thicknesses at 6 h, 8 h and 10 h were of little difference. At the same nitriding temperature, the nitriding thickness of specimen circularly nitrided for 6 h was basically the same with that of the specimen subject to 10 h conventional constant temperature nitriding. Within the same nitriding time, the surface hardness of the circularly nitrided specimen at 510 °C was higher than that of the nitrided specimens at the constant temperature 550 °C, and both nitriding thicknesses were almost the same. Circular plasma nitriding technology is superior to the conventional constant temperature plasma nitriding and the circular plasma nitrided 550 °C×8 h specimens have the best overall performance.

**KEY WORDS:** 40Cr; circular plasma nitriding; constant temperature plasma nitriding; performance

40Cr 钢经调质处理后常用于制造承受中等负荷及中等速度工作的机械零件,如汽车的转向节、后半轴,以及机床上的齿轮、轴、蜗杆、花键轴、顶尖套等。此外,40Cr 钢还适于制造进行碳氮共渗处理的各种传动零件,如直径较大和低温韧性好的齿轮和轴。随着零件服役条件的变化,工件往往会发生失效,因此对材料表面的处理要求愈来愈高,其表面层的组织存在高硬度的碳化物和氮化物,渗氮作为一种表面热处理技术,得到了广泛的应用及发展。

Li 等<sup>[1]</sup>分别对 42CrMo 钢进行等离子直流脉冲渗氮和活化屏渗氮,研究结果表明,和传统的离子渗氮相比,活化屏渗氮的相结构、硬度、耐腐蚀性能等无明显提高。Sato 等<sup>[2]</sup>研究了微波渗氮工艺,研究结果表明,随着微波功率的增大,氮化物形成的含量越高。Yasavol 等<sup>[3]</sup>研究了渗氮和氧化的复合工艺对 AISI4130 钢性能的影响,研究结果表明,AISI4130 在渗氮温度 500 °C,氢氧比 3:1 的气体气氛中进行等离子氧化后,钢的耐腐蚀性能得到了很大提高,但其硬度有所下降。Alsaran 等<sup>[4]</sup>通过正交实验研究了渗氮温度、渗氮气氛等主要工艺参数对 AISI 5140 钢经离子渗氮后渗层组织性能的影响。英国伯明翰大学的 Dong 等<sup>[5]</sup>进行低温等离子体渗氮和碳氮共渗,对 AISI316 奥氏体不锈钢的耐腐蚀性能作了比较研究。Li 等<sup>[6]</sup>研究了不同的渗氮处理温度对 AISI410 马氏体不锈钢组织结构的影响。Taktak 等<sup>[7]</sup>研究了不同氮氢流量对 AISI 5210 钢和 8620 钢渗氮处理后表面摩擦性能的影响。Arvaidas Galdikas 等<sup>[8]</sup>通过建立 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在渗氮过程中氮原子的扩散模型,分析了离子渗氮时工件内应力与渗入氮元素扩散快慢之间的关系。S. R. Hosseini 等<sup>[9]</sup>通过能谱定量分析、辉光放电光发射谱仪和计算数据分析研究了离子渗氮的氮浓度分布状况。钟厉等<sup>[10]</sup>通过对 38CrMoAl 钢进行循环等离子氮碳氧硫共渗、循环等离子渗氮、常规恒温等离子渗氮,研究了三种工艺对试样表面硬度、渗层厚度及硬度梯度的影响;此外还研究了喷砂处理与离子渗氮的复合工艺<sup>[11]</sup>;并通过研究激光淬火与离子渗氮的复合工艺,证明了复合工艺要比单一的

离子渗氮工艺性能要好<sup>[12]</sup>。

1 实验

1.1 材料的制备

实验材料为 40Cr 合金钢,40Cr 最开始的状态为正火态,试样为直径为φ45 mm 的圆柱形棒材,其化学成分见表 1。

表 1 实验基体材料 40Cr 化学成分及含量

Tab.1 Experimental 40Cr base material chemical composition and content

wt. %

元素种类	C	Si	Mn	Cr	Al	Ni	Cu	Mo
含量	0.41	0.22	0.55	1.0	—	≤0.03	≤0.03	—

为了减少工件加工时产生的内应力以及离子渗氮后工件的变形,以便得到性能优良的氮化层组织,对工件进行调质处理作为渗氮的前处理。调质处理工艺如表 2 所示,调质处理后,40Cr 的显微硬度为(270±5)HV<sub>0.2</sub>。

表 2 40Cr 钢的调质处理工艺及硬度

Tab.2 Quenching process and the hardness of 40Cr steel

实验材料	调质处理工艺	硬度 (HV <sub>0.2</sub> )
40Cr	850 °C×1 h, 油淬; 520 °C×2 h 回火	270

调质处理后,根据棒材的原始形态以及后续便于实验和检测,确定试样的尺寸为 12 mm×10 mm×8 mm。将试样切割成形后,依次用 120<sup>#</sup>、400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1200<sup>#</sup>砂纸从粗到细打磨至所需的尺寸,再用丙酮超声波清洗,最后在试样上打上记号。

1.2 方案

离子渗氮的实验参数有很多,根据前期的试验经验<sup>[12—14]</sup>,本文选择时间和温度作为变量,时间为 2、4、6、8、10 h,温度为 510、530、550 °C,氮气的

流量为  $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ , 乙醇的流量为  $0.4 \text{ L}/\text{min}$ , 渗氮方式采用变温和恒温两种方式。

## 2 结果和分析

### 2.1 表面硬度结果的分析

从图1可以看出, 处理时间为2、4、6 h的试样, 其表面硬度都随着渗氮时间的增加而逐渐增大, 2 h的试样表面硬度增加的速率最快, 渗氮时间为6 h的试样, 其表面硬度最高, 达到了  $1100 \text{HV}_{0.2}$  以上, 8、10 h的试样随着时间的增加, 其表面硬度反而缓慢降低。这主要是因为长时间的加热保温, 试样表面的Cr元素逐渐流失, 导致试样表面CrN的含量降低, 因为CrN本身拥有较高的强度和硬度, 所以CrN含量的降低会导致试样的表面硬度降低。

另外, 相同温度内10 h的循环渗氮试样的表面硬度均高于同温度下的恒温渗氮10 h的试样, 且循环处理6、8 h试样的表面硬度也比恒温处理10 h试样的硬度高, 这说明循环离子渗氮要优于常规的恒温离子渗氮, 并且能大大缩短渗氮时间。这是因为在循环渗氮工艺中, 降温阶段使炉内气氛的氮势降低, 并加快了富氮层中的氮向氮浓度低的部位的扩散速度,  $\epsilon$ 相分解成 $\gamma'$ 相, 并且氮在 $\gamma'$ 相中的扩散速度大于在 $\epsilon$ 相中的扩散速度, 此时氮的浓度是由表及里依次降低, 因而形成了氮扩散的通道, 并使渗氮速度得到加快。

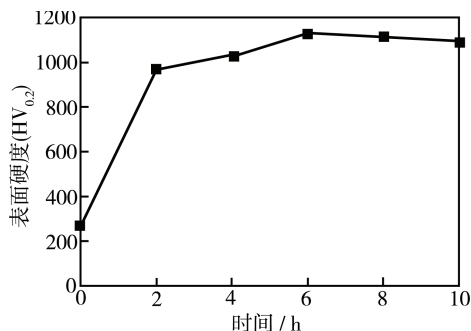


图1 循环渗氮温度为  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下的表面硬度随时间变化曲线  
Fig.1 The change of surface hardness with different time of cycle nitriding at  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2.2 渗层厚度的结果分析

从图2可以看出, 渗氮时间为2、4 h的试样在相同的循环渗氮时间内, 试样的表面硬度随着渗氮温度的升高而逐渐增大, 而渗氮时间为6、8、10 h的试样在  $510 \sim 530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  期间, 试样的表面硬度随着温度的升高而增大。这主要是由于氮、碳、氧原子的扩散系数随着渗氮温度的升高而变大,  $\text{N}^+$ 、 $\text{H}^+$ 等的动能也会随渗氮温度的升高而增大, 从而促进氮、碳、氧元素的扩散。此外, 这时C、N都比较稳定, 富C层中的外来游离C会和试样表面的合金元素反应并大量

溶于奥氏体相中, 使固溶度增加, 因而形成了高硬度的扩大奥氏体相, 从而使表面硬度升高。当处理温度超过  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 试样的表面硬度反而降低, 因为随着渗氮温度的升高, 氨气和乙醇会不断地被分解电离, 使渗氮炉内的气压增大, 辉光厚度异常, 从而影响渗氮的效果。另外, 当渗氮温度过高时, 渗层中的氮化物会变大、变粗并呈网状, 导致试样的表面硬度降低, 且N的扩散系数会随渗氮温度的升高而不断增大, 同时降低了渗层表面氮元素的浓度, 从而也导致试样表面硬度的降低。当渗氮温度超过  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 富C、N层中的C、N变得不稳定, 会和奥氏体中的Cr化合形成化合物, 导致奥氏体相中的Cr含量降低, 使试样的表面硬度下降。

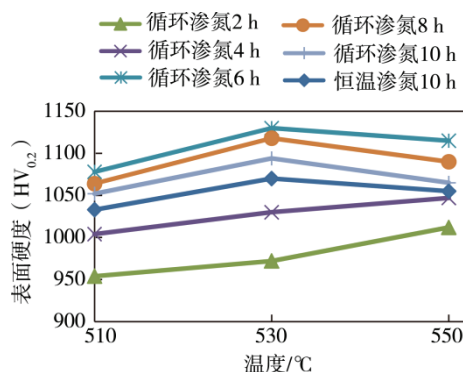


图2 相同时间下试样表面硬度随渗氮温度变化的趋势  
Fig.2 The change of surface hardness with different temperature at the same time

从图3可以看出, 在相同的温度下, 渗氮层的厚度随着渗氮时间的增加而变厚, 但超过6 h后, 随着时间的增加, 渗层厚度虽然持续增厚, 但是厚度增加的趋势越来越缓慢, 因为表面形成氮化物后, 氮化物需要向内部行进并输送氮原子, 随着扩散的动力越来越小, 其输送的速度也越来越慢, 渗层厚度上升的趋势也越平缓。

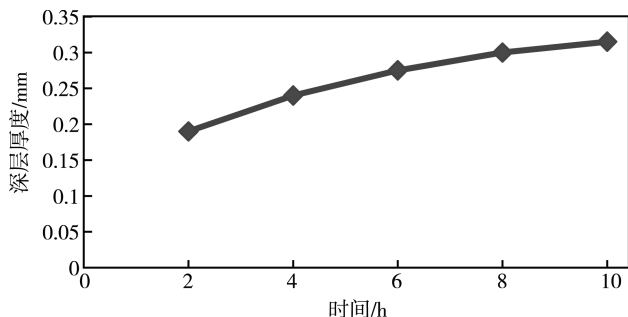


图3  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时试样的渗层厚度随渗氮时间变化的曲线  
Fig.3 The change of co-diffusion layer thickness with different time of 40Cr steel at  $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$

从图4可以看出, 在相同的渗氮时间内, 循环渗氮和恒温渗氮的渗层厚度都随着渗氮温度的升高而增加, 但是恒温渗氮的渗层厚度增加的趋势和循环



氮渗层厚度增加的趋势相比较显得缓慢,并且处理时间为 8 h 的循环渗氮,其渗层厚度基本和 10 h 的恒温渗氮下渗层的厚度相同,这就从渗层厚度的角度说明循环渗氮的工艺要优于常规的恒温渗氮。因为循环工

艺可以控制氮势并且有利于渗氮层的形成,通过每个循环中的降温阶段,能形成有利于碳、氮、氧元素进一步扩散的通道,加快了共渗元素的渗入速度,并且经过周期性的循环处理,共渗层便迅速向工件内部推进,从而达到了加速渗氮的目的。

2.3 试样金相组织的观察

从图 5 可以看出,a、b、c、d 四组试样的渗层组织基本相似:表面一层是较薄的白亮层,中间是深色的扩散层,最里面是基体,并且随着渗氮温度的升高以及渗氮时间的延长,白亮层的厚度越大,渗层厚度就越厚。因此金相显微组织的观察基本与显微硬度检测的结论一致。而图 5d 中白色化合物层不明显,且与黑色扩散层之间也没有明显的分界线,分析可能是由于循环渗氮的亮白色化合物层含氮量较高,耐腐蚀性能较好,所以腐蚀后呈明亮的白色。因此从四组金相图中也可以得到循环渗氮的效果要优于常规的恒温渗氮。

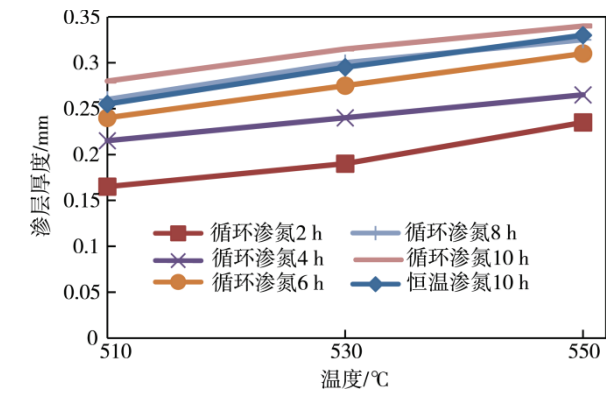


图 4 相同时间内渗层厚度随温度变化的曲线  
Fig.4 The change of co-diffusion layer thickness with different temperature at the same time

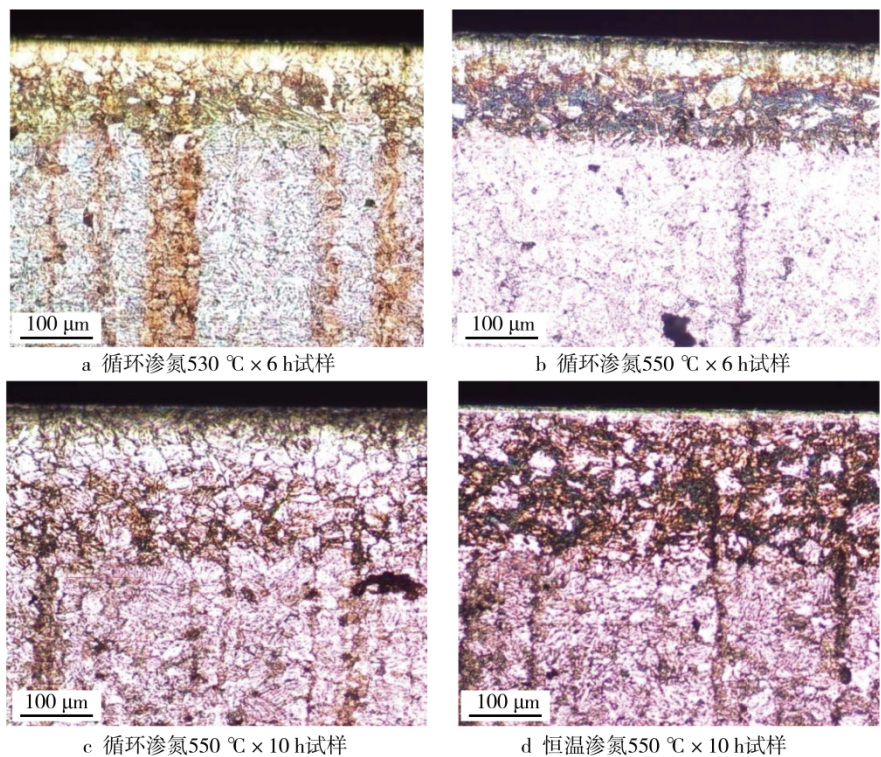


图 5 四组试样的金相图  
Fig.5 Phase diagram of four sets of samples: a) phase diagram of cycle nitriding 530 °C×6 h; b) phase diagram of cycle nitriding 550 °C×6 h; c) phase diagram of cycle nitriding 550 °C×10 h; d) phase diagram of thermostat nitriding 550 °C×10 h

3 结语

- 1) 试样的表面硬度先随着渗氮温度、时间的增加而升高。循环离子渗氮 530 °C×6 h 试样的表面硬度最高,为 1130HV<sub>0.2</sub>,当温度到达 530 °C 且时间超过 6 h 后,硬度反而降低。
- 2) 试样的渗层厚度随着渗氮温度、时间的增加

持续增厚,循环离子渗氮 550 °C×10 h 试样的渗层厚度最厚,为 0.340 mm。  
3) 通过表面硬度和渗层厚度的测定,证明循环离子渗氮要优于常规的恒温离子渗氮。

参考文献

[1] LI Yang, WANG Liang, SHEN Lie, et al. Plasma Nitriding

- of 42CrMo Low Alloy Steels at Anodic or Cathodic Potentials[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(15): 2337—2342.
- [2] SATO S, ARAI Y, YAMASHITA N, et al. Surface-Nitriding Treatment of Steels Using Microwave Induced Nitrogen Plasma at Atmospheric Pressure[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(19): 7574—7580.
- [3] YASAVOL N, MAHBOUBI F. The Effect of Duplex Plasma Nitriding-Oxidizing Treatment on the Corrosion Resistance of AISI 4130 Steel[J]. Materials and Design, 2012, 38: 59—63.
- [4] ALSARAN A, CELIK A, CELIK C. Determination of the Optimum Conditions for Ion Nitriding of AISI 5140 Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 160(2/3): 219—226.
- [5] DONG H, Qi P Y, Li X Y, et al. Improving the Erosion-Corrosion Resistance of AISI 316 Austenitic Stainless Steel by Low-temperature Plasma Surface Alloying with N and C[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 431(1/2): 137—145.
- [6] LI C X, BELL T. Corrosion Properties of Plasma Nitrided AISI 410 Martensitic Stainless Steel in 3.5%NaCl and 1%HCl Aqueous Solutions[J]. Corrosion Science, 2006, 48: 2036—2049.
- [7] TAKTAK S, GUNES I, ULKER S, et al. Effect of  $N_2+H_2$  Gas Mixtures in Plasma Nitriding on Tribological Properties of Duplex Surface Treated Steels[J]. Materials Characterization, 2008, 59(12): 1784—1791.
- [8] ARVAIDAS G, TERESA M. Modeling of Stress Induced Nitrogen Diffusion in Nitrided Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 3742—3746.
- [9] HOSSEINI S R, SHRAFIZADEH F A. Compositional Depth Profile Investigation of Plasma Nitriding by Multiple Analyses Techniques [J]. Vacuum, 2011, 85: 920—926.
- [10] 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 C,N,O,S-Sulpho-Nitrocarburizing of 38CrMoAl Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36 (8): 97—100.
- [11] 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—114.
- 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—114.
- [12] 钟厉, 王立文, 杨再强. 激光淬火预处理对 40Cr 钢离子碳氮氧硫共渗层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(3): 53—56.
- ZHONG Li, WANG Li-wen, YANG Zai-qiang. Effects of Laser Hardening Pretreatment on Microstructure and Properties of 40Cr Steel Ion NCOS Co-diffusion Layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(3): 53—56.
- [13] 钟厉, 邵丽, 陆亚. 2Cr13 钢氮碳氧硫变温离子共渗工艺及性能研究[J]. 热加工工艺, 2012(10): 149—152.
- ZHONG Li, SHAO Li, LU Ya. Research on N-C-O-S Variable Temperature Ion Penetrating Technology and Properties of 2Cr13 Stainless Steel[J]. Hot Working Technology, 2012 (10): 149—152.
- [14] 钟厉, 戴仲谋, 邵丽. 循环 N/C/O/S 离子共渗对 316Ti 钢组织及耐腐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 67—70.
- ZHONG Li, DAI Zhong-mou, SHAO Li. Influence of Ion N/C/O/S Cycling Penetration on the 316Ti Steel Layer Structure and Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 67—70.