

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180123002

45 钢的脉冲爆炸-等离子体表面改性

汪少婷¹, 彭文屹¹, 张林伟², 陆磊², 陆德平², 邓晓华³

(1. 南昌大学 材料科学与工程学院, 南昌 330031; 2. 江西省科学院 应用物理研究所, 南昌 330029; 3. 南昌大学 空间科学技术研究院, 南昌 330031)

摘要: 采用脉冲爆炸-等离子体 (PDP) 技术对 45 钢进行表面改性处理, 用 OM、SEM、XRD 分析了 PDP 处理前后试样的截面形貌和相结构变化, 利用显微维氏硬度计、磨损测试和电化学方法研究了 PDP 处理前后显微硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能。结果表明: 由于 PDP 过程中含有空气成分, 并在处理时快速加热与冷却试样, 使改性层有残余奥氏体出现, 并生成新相 Fe_3N , 形成了一层厚约 $52.10\ \mu\text{m}$ 的含有柱状晶与细晶区双层结构的改性层。PDP 处理使 45 钢表层在一定深度范围内显微硬度提高约 2.9 倍, 耐磨损性能也得到了有效的改善, 磨损质量损失仅为基体的 1/3, 磨痕宽度也明显减小。

关键词: 脉冲爆炸-等离子体; 45 钢; 表面改性

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)04-0088-08

Surface Modification of 45 Steel by Pulse Detonation-plasma Technology

WANG Shao-ting¹, PENG Wen-yi¹, ZHANG Lin-wei², LU Lei², LU De-ping², DENG Xiao-hua³

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031; 2. Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Science, Nanchang 330029; 3. Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031)

Abstract: 45 steel were treated by pulse detonation-plasma (PDP) technology. The cross section morphology and phase structure of 45 steel before and after treatment were analyzed by OM, SEM and XRD. The microhardness, wear resistance and corrosion resistance before and after treatment were investigated by microhardness tester, wear test and electrochemical method, respectively. The results show that both Fe_3N phase, retained austenite and $\gamma\text{-Fe}$ phase appear in the double-structure modified layer with the thickness of about $52.10\ \mu\text{m}$, including column-like zone and fine microstructure zone, for the detonation plasma including air and the specimen heated and cooled rapidly during the PDP process. The PDP technology can improve the microhardness nearly tripling that of the substrate in a certain depth, and the wear resistance is also improved effectively. The wear loss is only one third of that of the substrate and the width of grinding is also significantly reduced. However, the corrosion resistance after treatment is weakened as well.

Keywords: pulse detonation-plasma (PDP); 45 steel; surface modification

收稿日期: 2018-01-23; 修回日期: 2018-06-05

网络出版日期: 2018-07-02 10:47; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180702.1047.010.html>

通信作者: 彭文屹 (1968—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 新型智能材料性能与结构、材料表面改性; **E-mail:** wenyi.peng@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51461030, 51501085)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51461030, 51501085)

引用格式: 汪少婷, 彭文屹, 张林伟, 等. 45 钢的脉冲爆炸-等离子体表面改性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 88-95.

WANG S T, PENG W Y, ZHANG L W, et al. Surface modification of 45 steel by pulse detonation-plasma technology[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 88-95.

0 引 言

45 钢是常用的中碳钢, 因成本低、强韧性好在机械行业中主要用于主轴、齿轮、曲轴等。但 45 钢硬度低, 耐磨性差等制约了其应用范围。因此, 为了提高 45 钢的表面性能, 延长 45 钢零件的使用寿命, 减少成本和能耗, 多种高能束表面强化技术得到了应用^[1-2], 如激光淬火、强流脉冲电子束等。常用的高能束表面处理技术设备成本高、能量利用率低、工作环境要求高等因素而被限制^[3-4]。相比之下, 近几年兴起的脉冲爆炸-等离子体 (Pulse detonation-plasma, PDP) 表面改性技术不仅综合运用了爆炸与高能束表面处理来提高材料的硬度、耐磨损性能、耐疲劳性能等性能^[5], 而且可在大气环境下进行处理, 能量利用率高, 无需预处理, 工艺控制简单, 操作容易。研究表明, 由爆炸产生的等离子体能量密度高达 10^7 W/cm², 速度也可达到 8 000 m/s, 瞬间沉积在材料表面, 可快速加热融化甚至汽化材料表面; 同时, 外加的冷却作用又能使得材料表面快速冷却, 加热和冷却的速度能达到 $10^4\sim10^8$ K/s; 由于能量传递, 在材料表面会形成冲击波^[6-9]。在这种力和热的双重作用下, 材料表面引进很大的残余应力, 从而使材料表面发生塑性变形及相变强化, 进而在距表层一定深度范围内硬度提高^[10-12]。

1 试 验

1.1 试样的制备

试验选取 45 钢作为基体材料, 调质态, 回火索氏体组织, 尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm, 主要化学成分见表 1。

采用 PDP 技术对 45 钢样品进行表面改性, 试验参数为: 电压为 3.5 kV, 爆炸频率为 3 Hz, 可燃气体流量为 0.35 m³/h, 氧气流量为 1.4 m³/h, 空气流量为 2.6 m³/h, 电感为 3 mL, 电容参数为 1 040 μF, 处理次数为 2 次, 处理距离为 50 mm。装置原理如图 1 所示。

表 1 45 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 45 steel (w/%)

Element	C	Si	Mn	P	S
Content	0.45–0.50	0.17–0.37	0.50–0.80	≤0.035	≤0.035
Element	Cr	Ni	Cu	Fe	
Content	≤0.25	≤0.3	≤0.25	Bal.	

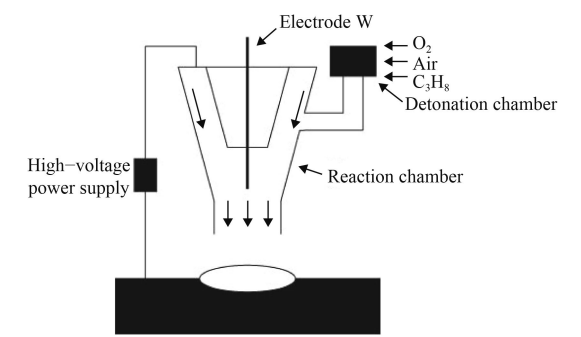


图 1 脉冲爆炸-等离子体工艺原理图
Fig.1 Principle diagram of PDP process

1.2 结构表征及性能测试

采用 PANalytical EMPYREAN 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析 45 钢 PDP 处理前后的物相。采用 Leica DMI 3000M 型光学显微镜、JEOL JSM 6701F 型和 FEI Quanta200 型扫描电镜 (SEM) 观察改性层形貌, 并采用专业图像分析软件 Nano Measurer 测定改性层厚度。截面显微硬度用 HXS-1000A 型显微维氏硬度计进行测量, 载荷 25 g, 保压 10 s, 结果取 5 个点的平均值。采用 MM-W1A 立式万能摩擦磨损试验机考察处理前后样品的摩擦磨损性能, 摩擦副为直径 6 mm 的 ZrO₂ 球体, 载荷 150 N, 转速 150 r/min, 磨损时间 60 min。利用 Corr Test 电化学工作站测量处理前后的极化曲线, 以甘汞电极为参比电极, Pt 为对电极, 试样为工作电极, 采用常温 3.5% NaCl 溶液作为电解液, 扫描速率为 1 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 组织形貌及相结构

图 2 为 PDP 处理后 45 钢表面的 SEM 形貌, 明显可见, 未处理的 45 钢表面存在许多清晰的机械加工磨痕, 划痕边缘锐利; 而处理后的表面光滑, 机械划痕也全部消失, 同时出现了少量的微小熔坑。因为当高能量密度的等离子体作用在试样表面时, 试样表面达到甚至超过熔点温度从而使得表面重熔, 导致划痕的消失, 表面变得光滑。微小熔坑的形成原因^[13]主要如下: ① 材料本身受热处理状态、元素分布等因素的影响存在成分分布不均匀的现象, 在 PDP 处理过程中存在低熔点区域优先熔化; ② 脉冲爆炸-等离子体处理能产生速度高达 6 000 m/s 的等离子体, 在如此高速的等离子体的冲击下, 熔化的区域将偏离原来的

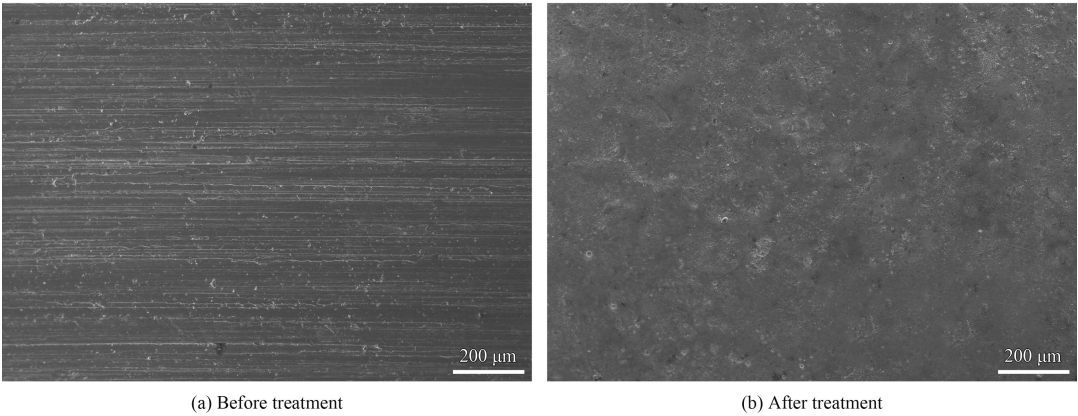


图 2 PDP 处理前后 45 钢表面的 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphologies of 45 steel surface before and after PDP treatment

位置，从而在材料表面形成微小的熔坑。图 3 是 PDP 处理后 45 钢的截面金相和 SEM 形貌。可以得出 PDP 技术处理后，经 4% 硝酸酒精腐蚀的 45 钢表面出现一层白亮层组织 (改性层)，用 Nano Measurer 软件测定改性层厚度约为 52.10 μm。该层组织对 4% 硝酸酒精的耐蚀性也比基体组织更好。通过截面形貌可知，改性层组织得到了细化，这是在 PDP 处理中，材料表面快速加热熔化后又快速凝固形成的^[14]。同时可知改性层组织存在类柱状区和组织细化区的分层。根据文献^[14]和成分过冷理论^[15]，45 钢改性层的组织形态与熔体中的成分过冷度有关，温度梯度 G 和结晶速度 R 的比值越小，越容易形成等轴晶； G/R 越大，则容易形成柱状晶。45 钢在 PDP 处理过程中，表层形成瞬间的薄层小熔池，当熔池中溶质浓度一定时，熔池表层的结晶速度 R 稍大于熔池底层的结

晶速度，而在外加冷却的作用下熔池表层的温度梯度 G 远大于熔池底层的温度梯度。因此，由表层向心部方向， G/R 逐渐减小，成分过冷度逐渐增大。因此在熔池表层， G/R 值最大，组织形态为柱状晶，且沿热流方向排列，而靠近熔池底层的 G/R 值较小，组织为细小的等轴晶。

图 4 为 PDP 处理前后 45 钢表面的 XRD 分析结果。由图可见原始基体为体心立方结构的 α -Fe 相。经 PDP 处理，试样表层发生了回火索氏体向马氏体的转变，还出现了面心立方结构的残余奥氏体 γ -Fe 相和 Fe_3N 相。残余奥氏体 γ -Fe 的出现是由于试样在 PDP 处理的快热快冷过程中部分奥氏体相来不及转化为马氏体而被保留下来，同时由于处理过程在空气中进行，空气中的 N_2 参与爆炸并最终等离子体的形式到达工件表面，在高能量的轰击下氮原子易在表面扩渗，从而形成氮化

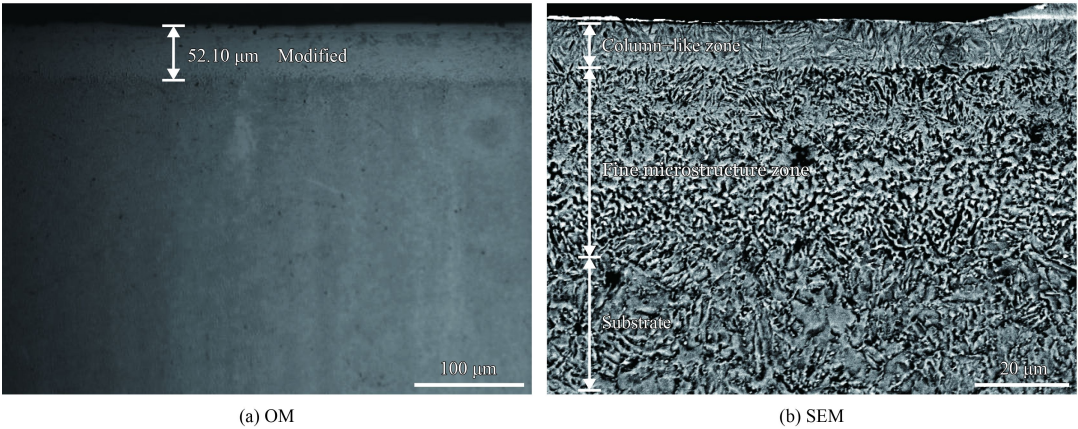


图 3 PDP 处理后 45 钢的截面金相和 SEM 形貌

Fig.3 Cross section OM and SEM morphologies of 45 steel after PDP treatment

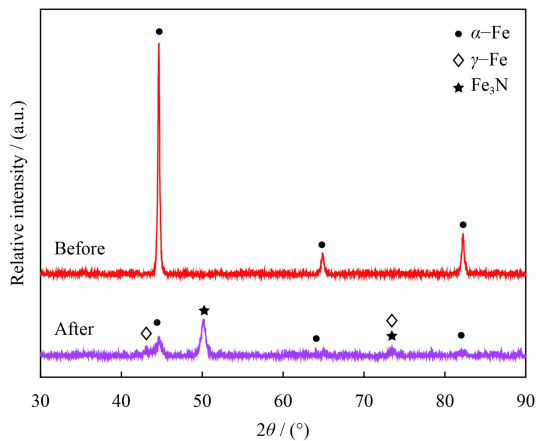


图 4 PDP 处理前后 45 钢表面的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of 45 steels surface before and after PDP treatment

物^[16]。此外, PDP 处理后的试样表面图谱中 α -Fe 峰发生了右移, 这表明 PDP 处理后试样表层中有宏观残余压应力产生。同时 α -Fe 和 γ -Fe 峰都有一定程度的宽化, 表明试样在 PDP 处理后表层晶粒发生了细化的现象, 这是由于在 PDP 处理过程中, 在超快速的加热和冷却条件下, 形核数目急剧增加, 在晶界、相界面和晶体缺陷处形核^[17], 但晶粒来不及长大。因而最终得到细化^[18-19]。

2.2 表层硬度

图 5 为 PDP 处理后 45 钢的显微硬度随距试样表面深度的变化情况。从图中可以看出, 基体的平均硬度为 281.55 HV_{0.025}, 距表面 35 μ m 距离内的平均硬度为 830.59 HV_{0.025}, 约为基体的 3 倍; 在距离表面 40 μ m 左右硬度略微降低, 40~55 μ m 时硬度下降明显。整个改性层的平均硬度为 812.49 HV_{0.025} 远大于基体硬度。

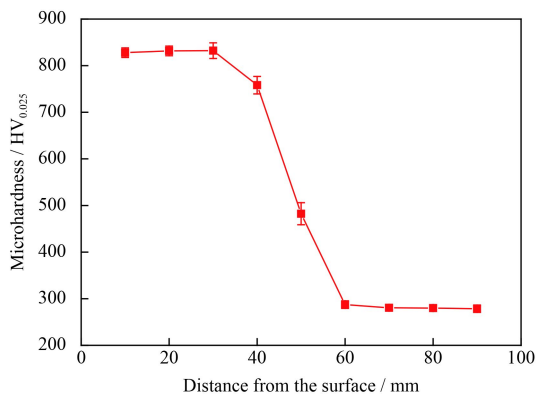


图 5 PDP 处理后 45 钢显微硬度随深度的变化
Fig.5 Depth distribution of microhardness of 45 steel after PDP treatment

综合 2.1 中截面形貌和相分析, 可将材料表层显微硬度的提高归结于以下几点: ① 材料表层快速凝固形成的组织晶粒细化的作用^[20]; ② 硬质相 Fe₃N 的生成; ③ 处理后的试样表层有大量的残余压应力^[16]。

2.3 摩擦磨损性能

图 6 为 45 钢基材及 PDP 处理后试样在 100 N 载荷下与 ZrO₂ 对磨后的摩擦因数随滑动时间的变化关系。从图中可以看出, 45 钢基材的摩擦因数在 0~500 s 内从 0.4 增加至 0.57, 随后保持在 0.5 左右上下波动。处理后试样的摩擦因数在 0~500 s 内从 0.2 增加到 0.55, 波动幅度很小, 且摩擦因数小于基材, 但在 500 s 之后, 摩擦因数升高至 0.7, 摩擦因数始终大于 45 钢基材的摩擦因数, 且波动幅度很大, 这可能是因为发生了粘着磨损造成的。而由图 7 所示的摩擦磨损试验后磨损质量损失情况来看, 基材的质量损失为 21 mg, 处理后试样的损失是 6.8 mg, 损失量不及基材损失的 1/3。由此可见, PDP 处理后试样的耐磨性得到了有效的提高。

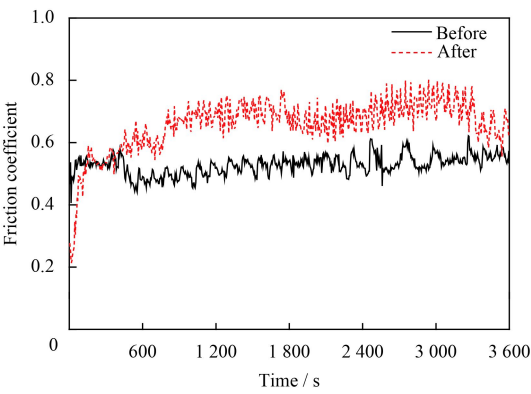


图 6 PDP 处理前后 45 钢的摩擦因数
Fig.6 Friction coefficient of 45 steel before and after PDP treatment

图 8 为 45 钢摩擦磨损试验后的表面形貌。由图 8(a)(c) 可见, 基材的磨痕宽度约为 1 778.85 μ m 左右, 磨痕边缘整齐, 成片状脱落。PDP 处理后试样的磨痕宽度约 1 047.89 μ m, 磨痕宽度明显减小, 而且并未形成完整且明显的磨痕边缘。由图 8(b)(d) 磨痕 SEM 形貌可知, 基材磨损表面存在明显的犁沟, 这是摩擦过程中产生的硬质磨屑划伤基体造成的^[21]; 同时还能明显看到材料涂抹的痕迹, 上述结果表明基体材料的主要磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损。对比之下发现处理后样

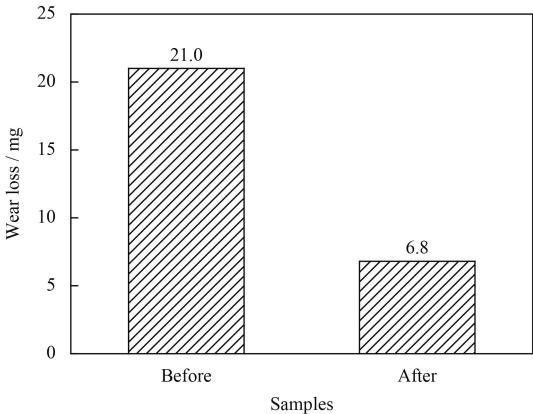


图 7 PDP 处理前后 45 钢的磨损质量损失
Fig.7 Wear loss of 45 steel before and after PDP treatment

品的磨损表面更为光滑，无法观察到明显的犁沟和塑性变形的痕迹，主要表现为粘着磨损和轻微磨粒磨损。

综上所述，PDP 处理后试样的耐磨损性能明显提高。在一定载荷和磨损条件下，金属材料的耐磨性随着硬度的增加而提高^[22-24]，根据 2.2 可知 PDP 处理使得 45 钢表面硬度大幅度增加从而有利于其耐磨性能提高。同时根据 XRD 分析结果，试样经 PDP 处理后表层有高硬度的 α' -Fe 相和较软的奥氏体 γ -Fe 相，这种结构提高了表层的韧性，减少磨损表面脆性断裂的可能性，进一步提高其耐磨损性能^[25]。

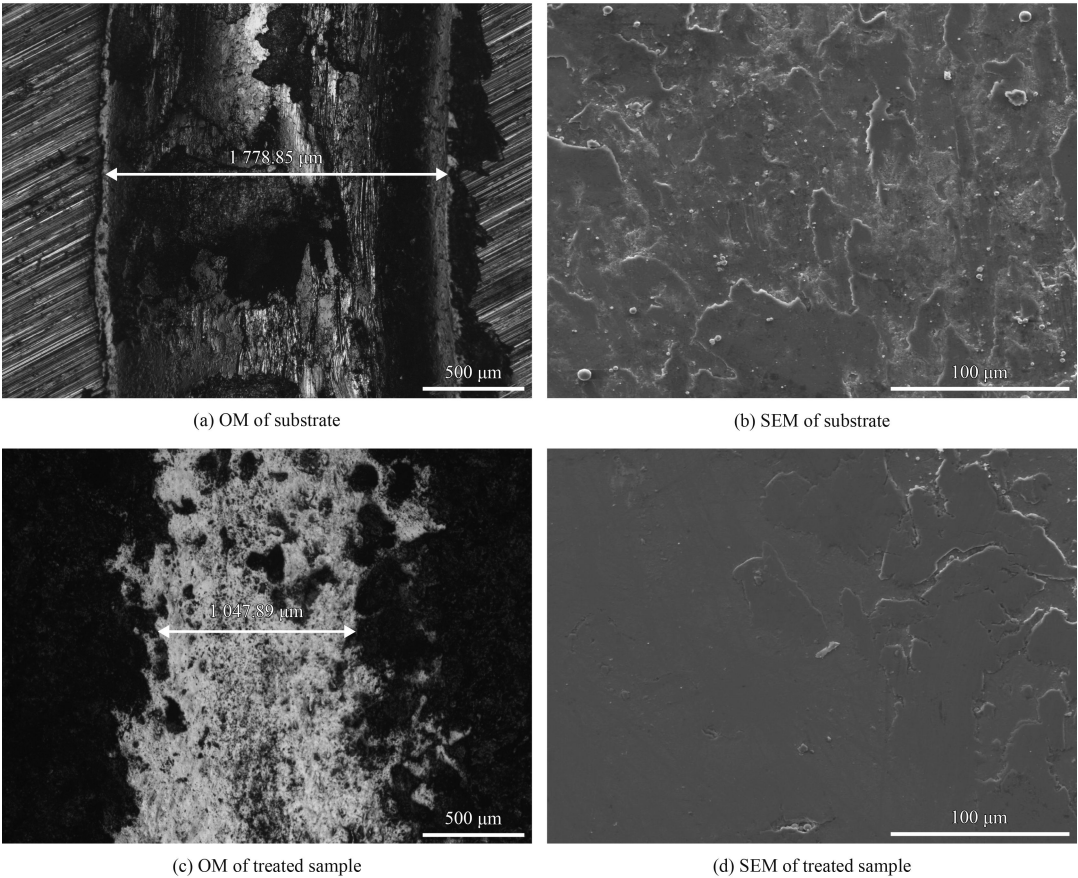


图 8 45 钢摩擦磨损试验后磨痕金相和 SEM 形貌
Fig.8 OM and SEM morphologies of abrasion mark of 45 steel after wear test

2.4 耐腐蚀性能

图 9 为 PDP 处理前后 45 钢在常温 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线。由图中可得到基体和改性层自腐蚀电位、腐蚀电流密度和极化电阻，其结果如表 2 所示。由表 2 可见，与处理后的试样相比，基材的自腐蚀电位变化不大，腐蚀

电流密度低一个数量级，且极化电阻是处理后的 2 倍，这说明基体材料的耐蚀性更好。

图 10 为 PDP 处理前后 45 钢腐蚀后的表面形貌。明显可见基体腐蚀后表面平坦，而改性层腐蚀后表面出现大量的裂纹和腐蚀后的坑洞，这与极化曲线的结果一致。表明未经 PDP 处理的试样反

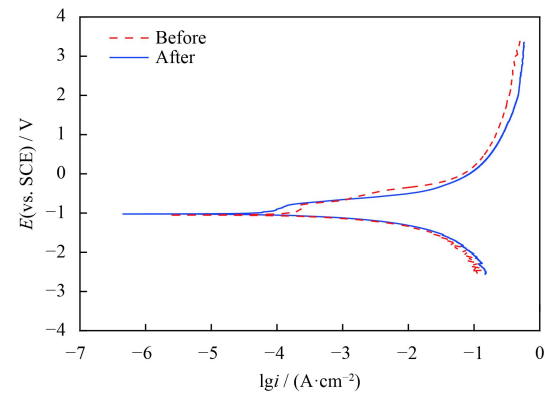


图 9 基体及 PDP 处理后样品的动电位曲线

Fig.9 Potentiodynamic curves polarization of 45 steel before and after PDP treatment

而耐蚀性更好。分析原因如下: ① 据文献[13-14, 26]可知, PDP 处理后试样表层会出现重熔现象, 存在大量的熔坑, 有利于 Cl⁻ 的侵蚀; ② 处理后的试样表层由于晶粒细化引入了大量的晶界, 界面

表 2 基体及 PDP 处理后样品各腐蚀参数			
Table 2 Corrosion parameters of 45 steel before and after PDP treatment			
Sample	Corrosion potential / V	Corrosion current density / (10 ⁻⁵ mA·cm ⁻²)	Polarization resistance / (Ω·cm ⁻²)
Before	-1.02	5.74	747.9
After	-1.05	26.2	190.39

面积大幅度增加, 加上轰击波的压力导致表层存在较大的残余应力, 这就使得晶界处的原子排列不规则, 晶格畸变能增大, 具有较高的能量, 因此在腐蚀过程中大量的晶界优先被腐蚀, 同时也有利于 Cl⁻ 的侵蚀导致腐蚀速度增加^[27-28]; ③ 结合 XRD 分析可知, 经 PDP 处理试样表层相成分增加, 而不同相之间又存在电位差, 在电化学腐蚀过程中这些相之间就构成了许多微小的腐蚀电流池, 加剧了材料的腐蚀。

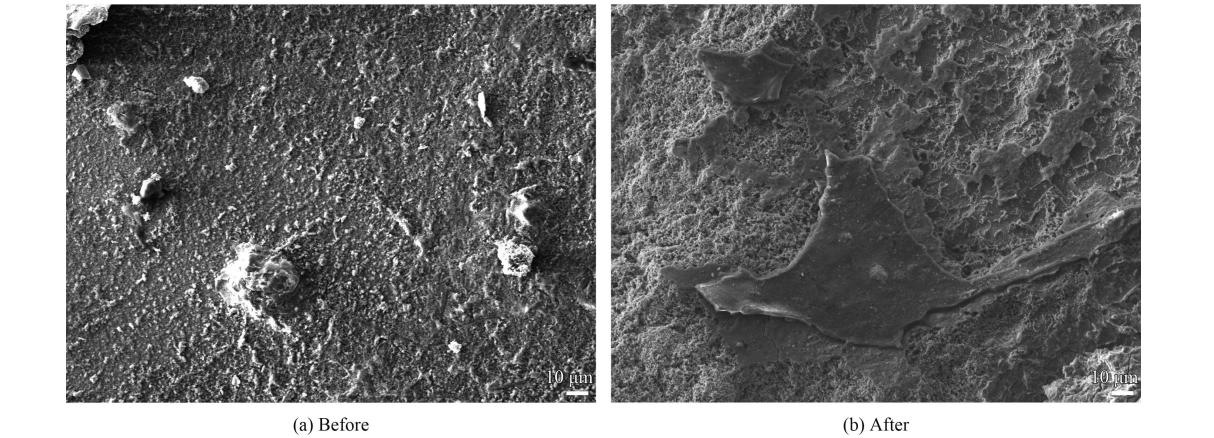


图 10 PDP 处理前后 45 钢在 3.5% NaCl 电解液中腐蚀后的表面形貌

Fig.10 Surface morphologies of 45 steel before and after PDP treatment after corrosion in 3.5% NaCl electrolyte

3 结 论

(1) PDP 处理 45 钢后在材料表层形成双层改性层, 分别为最表层的类柱状层和亚表层的组织细化区。该层组织晶粒较基体得到细化, 厚度约 52.10 μm。

(2) PDP 处理后 45 钢试样表面得到了马氏体相、残余奥氏体和少量 Fe₃N。

(3) 由于 PDP 处理过程中的快热快冷和轰击波的作用, 材料改性层晶粒细化, 同时产生了大量的位错和残余应力, 使得 45 钢改性层的显微硬度提高约 2.9 倍。耐磨损性能也得到了明显的改善, 磨损质量损失仅为基体的 1/3, 并且磨痕宽度

明显减小。磨损机制也发生改变, 基体的磨损机制主要是磨粒磨损和粘着磨损, 处理后样品主要为粘着磨损。

(4) PDP 处理后试样比 45 钢基材耐蚀性更弱。

参考文献

[1] 符轲, 张修庆, 续晓霄, 等. 45 钢激光淬火工艺优化及性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 154-158.

FU K, ZHANG X Q, XU X X, et al. Process optimization and property analysis of 45 steel by laser quenching[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(1): 154-158 (in Chinese).

[2] 邹慧, 关庆丰, 张庆瑜, 等. 利用强流脉冲电子束对 45 钢进行表面改性[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(1): 127-131.

- ZOU H, GUAN Q F, ZHANG Q Y, et al. Surface modification of 45 steel by high-current pulsed electron beam[J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(1): 127-131 (in Chinese).
- [3] 雷贻文, 孙荣禄, 唐英. 钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层中析出相热力学模拟计算[J]. 材料工程, 2013, 41(10): 36-40, 47.
- LEI Y W, SUN R L, TANG Y. Thermodynamic calculation on precipitated phase in laser clad Ni base alloy coating on TC4 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(10): 36-40, 47 (in Chinese).
- [4] 刘敬, 高晓丽, 徐杨, 等. 激光熔覆仿生非光滑表面磨粒磨损性能的研究[J]. 材料工程, 2013, 41(12): 32-36.
- LEI J, GAO X L, XU Y, et al. Research on abrasive wear properties of bionic non-smooth coating by laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(12): 32-36 (in Chinese).
- [5] TYURIN Y N, KOLISNICHENKO O V. Plasma-detonation technology for modification of the surface layer of metal parts[J]. The Open Surface Science Journal, 2009, 1(1): 13-19.
- [6] BORISOV Y S, KOLISNICHENKO O V. Investigation of amplitude-time characteristics of the current pulse in plasma-detonation treatment of items[J]. Paton Welding Journal, 2000(12): 55-59.
- [7] PIEKOSZEWSKI J, WERNER Z, LANGER J, et al. Modification of the surface properties of materials by pulsed plasma beams[J]. Surface & Coatings Technology, 1998, 106(2-3): 228-233.
- [8] TOBAR M J, ALVAREZ C, AMADO J M. Laser transformation hardening of a tool steel: Simulation-based parameter optimization and experimental results[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(22-23): 6362-6367.
- [9] TYURIN Y N, ZHADKEVICH M L, GUBENKO B G, et al. Features of pulsed-plasma alloying of the surface of iron-base alloys [J]. Paton Welding Journal, 2002, 3: 37-41.
- [10] SHULOV V, NOCHOVNAYA N. High-power ion beam treatment application for properties modification of refractory alloys[J]. Surfaces & Technology, 1998, 99(1): 74-81.
- [11] LE X Y, ZHAO W J. The thermodynamical process in metal surface due to the irradiation of intense pulse ion beam[J]. Surfaces & Coatings Technology, 2002, s158-159(2): 14-20.
- [12] BILLER W, HEYDEN D, MULLER D. Modification of steel and aluminum by pulsed energetic ion beams[J]. Surfaces & Technology, 1999, s116-119(99): 537-542.
- [13] 张林伟, 张旭, 余玖明, 等. T8 钢的脉冲爆炸-等离子体处理表面改性[J]. 金属热处理, 2016, 41(10): 84-89.
- ZHANG L W, ZHANG X, YU J M, et al. Surface modification of T8 steel by pulse detonation plasma technology[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(10): 84-89 (in Chinese).
- [14] 张林伟, 余玖明, 张旭, 等. 脉冲爆炸-等离子体技术处理对 T8 钢表层组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(5): 100-105.
- ZHANG L W, YU J M, ZHANG X, et al. Effect of pulse detonation-plasma technology treatment on surface layer and performance of T8 steel[J]. Materials and Engineering, 2017, 45(5): 100-105 (in Chinese).
- [15] 肖纪美. 合金相与相变[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 233-234.
- XIAO J M. Alloy phase and phase transition[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 233-234 (in Chinese).
- [16] OZBEK Y Y, SARIOGLU C, DURMAN M. The effect of plasma detonation parameters on residual stresses developed in the plasma modified layer[J]. Vacuum, 2014, 106(6): 11-15.
- [17] 刘春阁, 邱星武. 激光硬化表面处理技术及其应用现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2012, 40(1): 62-64.
- LIU C G, QIU X W. Laser hardening surface treatment technology and its present application[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2012, 40(1): 62-64 (in Chinese).
- [18] AKAMATSU H, IKEDA T, AZUMA K, et al. Surface treatment of steel by short pulsed Injection of high-power ion beam[J]. Surface & Coatings Technology, 2001, 136(1-3): 269-272.
- [19] LANDRY F, SCHAAF P, NEUBAUER M, et al. Laser nitriding of iron: Influence of the spatial laser intensity distribution[J]. Applied Surface Science, 1999, s138-139(1): 266-270.
- [20] YU J M, ZHANG L M, LIU K M, et al. Effect of pulse detonation-plasma technology treatment on T8 microstructures[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(5): 6198-6206.
- [21] 王明政, 王成彪, 康嘉杰, 等. 激光表面织构形状参数对钛合金摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 71-77.
- WANG M Z, WANG C B, KANG J J, et al. Effects of shape parameters of laser surface texture on tribological performance of titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 71-77 (in Chinese).
- [22] 高彩桥. 金属的硬度与耐磨性的关系[J]. 机械工程, 1981, 17(4): 6-8.
- GAO C Q. The relationship between the hardness and wear resistance of the metal[J]. Mechanical Engineer, 1981, 17(4): 6-8 (in Chinese).
- [23] 靳尔昌, 王景珍. 碳素钢耐磨性与硬度关系的探讨[J]. 林业机械, 1988, 24(4): 16-19.
- JIN E C, WANG J Z. Discussing the relation between the carbon steel hardness and wear resistance[J]. Forestry Machinery, 1988, 24(4): 16-19 (in Chinese).

[24] LEYLAND A, MATTHEWS A. On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite coating to optimized tribological behavior[J]. Wear, 2000, 246(1-2): 1-11.

[25] 何倩, 孙德恩, 曾宪光, 等. TC4 钛合金表面沉积 CrSiN/SiN 纳米多层膜在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(1): 74-80.

HE Q, SUN DE, ZENG XG, et al. Wear corrosion resistance in 3.5% NaCl solution of CrSiN/Si N nano-multilayer coatings deposited on TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(1): 74-80 (in Chinese).

[26] 余玖明, 张林伟, 邹晋, 等. M2 高速钢表面脉冲爆炸-等离子体改性后的组织结构及性能[J]. 材料保护, 2016, 49(3): 4-7.

YU J M, ZHANG L W, ZOU J, et al. Structure and proper-

ties of M2 high speed steel surface modified by pulse detonation-plasma technology[J]. Journal of Materials Protection, 2016, 49(3): 4-7 (in Chinese).

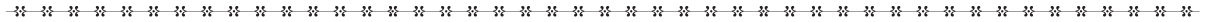
[27] 周俊, 谢发勤, 吴向清, 等. 纳米晶体材料腐蚀行为的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(4): 126-128.

ZHOU J, XIE F Q, WU X Q, et al. Recent research on corrosion behavior of nano-crystalline materials[J]. Materials Review, 2007, 21(4): 126-128 (in Chinese).

[28] 刘年富, 张喜燕, 周明哲, 等. 组织纳米化对锆合金耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2006, 20(12): 74-78.

LIU N F, ZHANG X Y, ZHOU M Z, et al. Summarization the study of the corrosion resistance of nano-crystallization zirconium alloys[J]. Materials Review, 2006, 20(12): 74-78 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)



• 本刊讯 •

2018 第四届智能制造与工业 4.0 国际峰会将于 9 月在上海举办

2018 年 9 月 17—18 日, 由中国机电一体化技术应用协会主办的“2018 第四届智能制造与工业 4.0 国际峰会”将在上海举办。

此次会议主题为“创新引领, 智见未来”, 议题范围包括: ①智能制造发展现状与趋势; ②工业 4.0 战略分析与发展趋势; ③智能装备与智能机器人技术应用; ④智能制造解决方案与工业大数据技术应用; ⑤人工智能与机器人新技术应用。会议将邀请国家有关部委领导, 科研院所、高等院校的专家学者等出席大会并做主旨报告和主题演讲, 还将邀请国内外行业组织领导、相关区域的领导或负责人、供应商及合作媒体与投资机构等。

会议 18 日上午日程包括的开幕式、相关领导致辞及特邀主旨报告; 下午同时举行 3 个分论坛: 智能制造系统解决方案与工业大数据论坛、人工智能与机器人产业发展论坛暨智能机器人工程分会换届大会和工业互联网与精益制造论坛。

此次会议免收会议费, 食宿自理。在线报名网址: <http://lxi.me/q2fwu>
中国机电一体化技术应用协会相关联系人: 张志东, 18613890448; 范红, 13764918905。

(摘自中国机电一体化技术应用协会 网站)