

# 低温离子渗氮提高 2Cr13 不锈钢的冲蚀磨损与冲刷腐蚀抗力

Improvement of Erosion and Erosion-corrosion Resistance  
of 2Cr13 Stainless Steel by Low Temperature  
Plasma Nitriding

奚运涛<sup>1</sup>, 刘道新<sup>1</sup>, 韩 栋<sup>1</sup>, 韩增福<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 腐蚀与防护研究室, 西安 710072;

2 西安陕鼓动力股份有限公司, 西安 710611)

XI Yun-tao<sup>1</sup>, LIU Dao-xin<sup>1</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>, HAN Zeng-fu<sup>2</sup>

(1 Corrosion and Protection Research Lab, Northwestern Polytechnical

University, Xi'an 710072, China; 2 Xi'an Shaangu Power Co. Ltd, Xi'an 710611, China)

**摘要:** 采用喷射式固体粒子冲蚀磨损实验机和浆体冲刷腐蚀装置对比研究了 350℃ 低温离子渗氮和 550℃ 常规高温离子渗氮对 2Cr13 不锈钢冲蚀磨损和冲刷腐蚀行为的影响规律, 通过组织结构分析、硬度测试和电化学交流阻抗分析探讨了低温渗氮改善 2Cr13 不锈钢抗冲蚀磨损和抗冲刷腐蚀性能的机制。结果表明: 低温和常规高温离子渗氮均可提高 2Cr13 不锈钢在小角度固体颗粒干冲蚀条件下的冲蚀磨损抗力, 但是, 350℃ 低温渗氮处理表现出比 550℃ 高温离子渗氮层更好的抗冲蚀磨损性能。在含 10% 石英砂的中性和酸性 5% NaCl 水溶液中, 350℃ 低温渗氮处理使 2Cr13 不锈钢冲刷腐蚀速率分别降低 96.7% 和 87.4%; 然而, 550℃ 常规离子渗氮却导致 2Cr13 不锈钢冲刷腐蚀速率分别提高 4.13 倍和 0.49 倍。350℃ 渗氮层由  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  和 N 过饱和固溶体  $\alpha_{\text{N}}$  相组成, 其化学稳定性好, 硬度高, 因而表现出良好的耐腐蚀、抗冲刷磨损与抗冲刷腐蚀性能。550℃ 渗氮处理时,  $\alpha_{\text{N}}$  相分解成了  $\alpha$  相和 CrN 化合物, 造成基材贫 Cr, 耐腐蚀性能下降, 同时表面硬度低于 350℃ 低温渗氮层, 其抗冲蚀磨损性能不及 350℃ 低温渗氮处理, 冲刷腐蚀抗力则低于 2Cr13 不锈钢基材。

**关键词:** 低温离子渗氮; 2Cr13; 组织; 冲刷腐蚀

中图分类号: TG156.8; TG174.444 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)11-0076-06

**Abstract:** The erosion and erosion-corrosion behavior of 2Cr13 stainless steel influenced by nitriding treatment at 350℃ low temperature and 550℃ high temperature was studied using solid particle erosion tester and slurry erosion-corrosion apparatus. The mechanisms of erosion and erosion-corrosion resistance improvement by low temperature nitriding were investigated on the basis of microstructure analyzing, hardness testing and electrochemical impedance spectroscopy measurement. The results show that plasma nitriding treatment at both 350℃ and 550℃ can improve the erosion resistance of 2Cr13 stainless steel in the condition of dry erosion with small angle. Furthermore, the anti-erosion property of the steel nitrided by 350℃ low temperature is much more perfect than that by 550℃ nitriding. The erosion-corrosion rate of 2Cr13 stainless steel in 5% NaCl solution with 10% quartz sand was reduced by 96.7% in neutral environment and 87.4% in acidic environment by low temperature plasma nitriding, while the erosion-corrosion rate was increased 4.13 times in neutral environment and 0.49 times in acidic environment by normal nitriding. The 350℃ nitrided surface was dominated by both  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  and a supersaturated nitrogen solid solution  $\alpha_{\text{N}}$  phases which had good chemical stability and high hardness properties. Therefore the corrosion, erosion and erosion-corrosion resistances of 2Cr13 martensitic stainless steel were considerably improved by the 350℃ nitriding treatment. When the nitriding temperature was above 550℃, the  $\alpha_{\text{N}}$  phase decomposed into  $\alpha$  and CrN. The Cr composition in the nitrided surface was reduced and the corrosion resistance was decreased. In addition, because of the surface hardness of normal plasma nitriding was lower than that of low temperature nitri-

ding, so the erosion resistance of the former was inferior to that of the latter and the erosion-corrosion properties was also poorer than the latter.

**Key words:** low temperature plasma nitriding; 2Cr13; microstructure; erosion-corrosion

不锈钢尽管耐腐蚀性能好,但是由于其硬度低、耐磨性能差,因而当被用于制造工业设备动力装置(如工业风机、航空发动机、汽轮机、水轮机)中的叶片等转动零部件时,其抗固体粒子的冲蚀磨损(erosion)和抗固液两相介质的冲刷腐蚀(erosion-corrosion)性能均不能满足设备对高可靠性、长寿命设计的技术要求<sup>[1,2]</sup>。常规离子渗氮(温度在 600℃左右)可以明显提高不锈钢材料的表面硬度和摩擦学性能,但却导致其耐蚀性能显著下降<sup>[3,4]</sup>,因而不适用于改善腐蚀环境下的不锈钢零部件的抗冲刷性能。近年来 Bell 等人<sup>[4-6]</sup>研究发现低温(≤450℃)离子渗氮能够在提高奥氏体不锈钢表面硬度的同时,不降低、甚至提高基材的耐腐蚀性能,而引起国内外的广泛关注<sup>[6-8]</sup>。最近 Bell 等人的研究又表明<sup>[9]</sup>,马氏体不锈钢低温离子渗氮处理同样能够获得耐腐蚀性能好的表面改性强化层。然而,低温渗氮对不锈钢耐固体颗粒冲蚀磨损行为和抗固液两相介质的冲刷腐蚀性能有怎样的影响的研究尚未见报道,其作用机理也需要探讨。为此,本工作以耐蚀性能相对较低,但是在制造工业设备动力装置叶片中得到广泛应用的 2Cr13 马氏体不锈钢为研究材料对象,探讨低温渗氮对不锈钢抗冲蚀磨损和耐冲刷腐蚀行为的影响,揭示其作用机制,为低温渗氮技术在不锈钢零部件上的推广应用提供依据。

1 实验方法

实验材料为 2Cr13 马氏体不锈钢,其化学成分(质量分数/% ,下同)为 0.19C, 0.28Si, 0.20Mn, 0.007S, 0.028P, 12.65Cr, 0.11Cu, 0.12Ni, 其余 Fe。热处理制度为: 820℃×4h 退火, 900℃×3h 油淬, 600℃×6h 炉冷回火。试样为 φ30mm×10mm 的圆片, 试样表面经研磨抛光, 用丙酮超声波清洗 15min, 烘干后置于辉光离子渗氮炉中进行离子渗氮。实验在 LD2-50 型离子渗氮炉中进行, 采用 WDL-31 型光电温度计监控温度, 渗氮温度选择为 350℃低温和 550℃常规高温两种条件, 渗氮时间 15h。

用 X'pert-PRO 型 X 射线分析仪(XRD)分析渗氮层的相组成。用 XJL-03 型光学显微镜观察渗氮层的断面金相形貌。用 HV-1000 型显微硬度计测量离子

渗氮试样沿截面方向的硬度分布, 加载时间 20s, 载荷为 0.245N, 压头为 Knop 型压头。

利用 PARSTAT2273 型电化学综合测试仪测定 2Cr13 不锈钢及其渗氮试样在 NaCl 水溶液中的交流阻抗谱。实验腐蚀介质为 5% NaCl 水溶液, 温度 25℃±2℃。采用三电极体系, 饱和甘汞电极为参比电极, 铂片为辅助电极, 测试频率范围 100kHz~10MHz, 正弦电位的振幅为 10mV。

固体颗粒冲蚀实验在喷射式冲蚀实验机上进行(原理如图 1 所示, 设计依据 ASTM-g76 标准)。试样按一定角度固定在夹具上, 固体粒子被压缩空气加速后由喷嘴喷出, 入射到试样表面, 造成试样冲蚀磨损。通过控制空气压力来控制固体粒子速度。平行试样取 3 件, 冲蚀实验前后用丙酮超声清洗。用失重法计算冲蚀磨损速率, 光学分析天平(精度 0.1mg)称重。冲蚀固体粒子速度取 25m/s, 冲蚀角度为 15°, 冲蚀时间为 6min。用 HITACHI-570 型扫描电镜(SEM)分析磨损形貌。

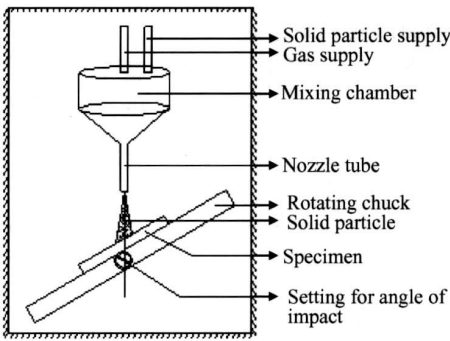


图 1 喷射式冲蚀实验机示意图

Fig 1 Schematic diagram of solid particle erosion equipment

浆体冲刷腐蚀实验在旋转式实验机上进行。为了模拟不同的工况环境, 冲蚀实验条件如下: 冲蚀介质取两种, 第一种为中性砂浆介质(溶液 pH 值 6.5~7), 粒径 0.15~0.25mm, 含量 10% 的石英砂悬浮于 5% NaCl 的水溶液中; 第二种为弱酸性砂浆介质, 在第一种介质中加入少量亚硫酸, 调节 pH 值为 3±0.2。平行试样取 3 件。冲蚀线速率取 4.8m/s, 冲蚀时间为 10h。冲蚀实验前后用丙酮超声清洗, 用失重法评价冲刷腐蚀速率。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 渗氮层的硬度分布

图2所示为350℃和550℃两种不同温度下渗氮试样的截面显微硬度分布测试结果。可以看到,两种温度下渗氮试样的表面显微硬度均高于1000HK,较2Cr13不锈钢基体硬度(290HK)显著提高,且350℃渗氮试样的表面硬度高于550℃渗氮试样,为基体硬度的4倍以上。同时,从渗氮层表面到基体内部,硬度呈现理想的梯度分布,这对基材的表面力学性能是十分有益的。

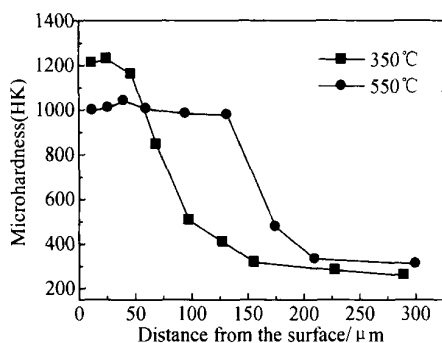


图2 离子渗氮试样截面显微硬度分布

Fig. 2 Microhardness profiles of nitrided samples

### 2.2 S 渗氮层的组织结构

金相分析表明,低温与常规高温下所获渗氮层均包括氮化物层和氮元素过饱和马氏体扩散层两部分(如图3所示)。氮化物层的厚度随着渗氮温度的增加

而增加,350℃和550℃渗氮试样的氮化物层的厚度分别为90μm和130μm。根据图2的显微硬度测试结果可以看到,350℃和550℃渗氮试样的渗氮层的总厚度分别约为150μm和200μm。

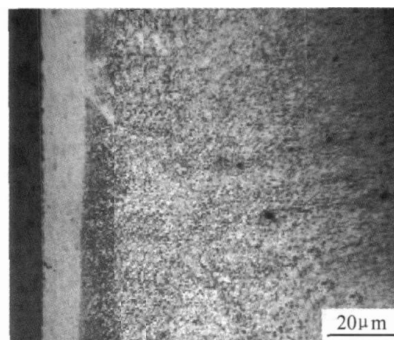


图3 550℃离子渗氮试样截面形貌图

Fig. 3 Microstructures of plasma nitrided sample at 550°C

图4所示为两种处理温度下2Cr13不锈钢渗氮试样表面的XRD图谱。可以看到,350℃温度下渗氮试样表面层主要由 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ 组成。在42.8°位置出现了N元素在 $\alpha$ 相中的过饱和固溶体 $\alpha_N$ 的衍射峰。 $\alpha_N$ 的衍射峰位相比2Cr13不锈钢基材组织 $\alpha$ 相的(110)面衍射峰位(44.8°)向低角度偏移,由此说明氮元素的过饱和和使得 $\alpha\text{-Fe}$ 相的晶格常数明显增大,形成了膨胀型马氏体结构。 $\alpha_N$ 相具有很高的硬度和抗腐蚀性能<sup>[9]</sup>。

550℃渗氮处理层中, $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ 的量较少,大量的 $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ 衍射峰出现在渗氮层中。在该渗氮处理温度下, $\alpha_N$ 相的42.8°衍射峰消失,表明渗氮试样表面的

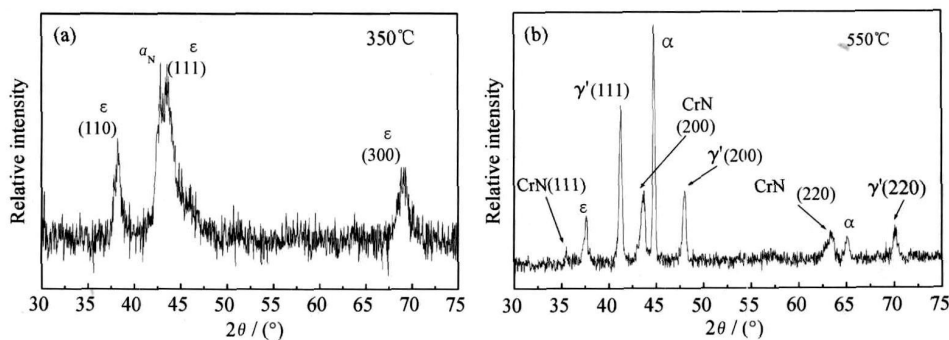


图4 2Cr13 不锈钢离子渗氮试样的 XRD 图谱 (a) 350℃渗氮; (b) 550℃渗氮

Fig. 4 X-ray diffraction patterns for the untreated and plasma nitrided 2Cr13

(a) 350°C nitrided; (b) 550°C nitrided

$\alpha_N$  相完全分解,是一种亚稳相<sup>[10]</sup>,分解出的N与基材中的Cr原子结合生成了CrN相。由于相变 $\alpha_N \rightarrow \text{CrN} + \alpha$ 的发生,使得 $\alpha\text{-Fe}$ 的点阵膨胀降低,XRD图谱中 $\alpha$ (44.8°)峰位取代了 $\alpha_N$ 的衍射峰位(42.8°)。

### 2.3 固体颗粒冲蚀磨损行为

图5为15°冲击角度下,未处理试样和两种渗氮处理试样冲蚀磨损失重实验结果,可以看到,在相同冲蚀条件下,未处理试样、低温350℃渗氮和常规550℃渗

氮试样的冲蚀失重比分别为 2.8:1:1.8。即两种温度渗氮处理均可以明显改善 2Cr13 不锈钢表面的抗固体粒子冲蚀性能,但是 350℃低温离子渗氮试样具有较常规 550℃渗氮试样更高的抗冲蚀磨损性能。图 6 所示为冲蚀试样的表面 SEM 形貌特征。可见,2Cr13 马氏体不锈钢基体由于硬度低,表面冲蚀磨痕的宽度和深度较大,有明显的犁沟和形唇产生<sup>[11]</sup>(图 6a)。350℃低温离子渗氮的试样冲蚀磨痕的宽度和深度均明显低于 2Cr13 基材,以较轻的切削磨损为主(图 6b)。550℃常规离子渗氮处理试样的冲蚀磨损磨痕的宽度和深度介于未处理 2Cr13 基材和低温渗氮试样

之间,磨痕特征以切削磨损和犁削为主(图 6c)。

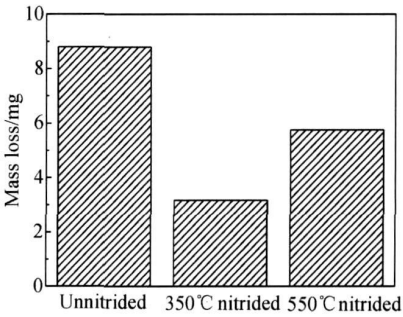


图 5 固体颗粒冲蚀试样失重

Fig. 5 The mass loss of samples by solid particle erosion

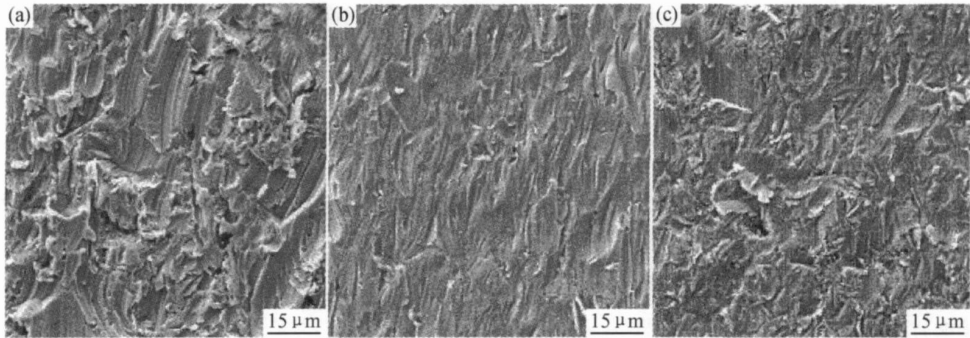


图 6 未处理及渗氮试样固体粒子冲蚀后表面形貌 (a) 未处理; (b) 350℃ (c) 550℃

Fig. 6 Solid particles erosion-wear morphologies of samples

(a) untreated; (b) 350℃ nitrided; (c) 550℃ nitrided

350℃和 550℃离子渗氮试样表面均有坚硬的渗氮物层,这类渗氮物( $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ ,  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ )不仅具有高硬度,同时它们的存在会使表面形成高残余压缩应力,阻止了砂粒撞击产生的犁沟和切削损伤<sup>[12]</sup>。因此,在小角度固体粒子冲蚀磨损条件下,两种渗氮处理均可以明显改善 2Cr13 基材表面的耐冲蚀性能,并且以低温渗氮处理更为突出。

2.4 电化学交流阻抗谱

图 7 所示为 5% NaCl 水溶液中静态浸泡 0.5h 后测定的 2Cr13 未处理试样和渗氮试样的电化学交流阻抗谱(EIS)。可看到,各试样的交流阻抗图谱均由单一的容抗弧构成<sup>[13]</sup>。350℃低温离子渗氮后,电极/溶液界面传递电阻比未处理试样提高了一个数量级,明显提高了基体的耐腐蚀性能,原因是由于表层形成了化学稳定性好的  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  和 N 过饱和固溶体  $\alpha_{\text{N}}$  相,同时又有固溶 Cr 元素的联合作用,导致表面形成了致密的钝化膜。550℃常规高温渗氮处理试样的电极/溶液界面传递电阻比未处理实验却降低了很多,使基体材料的耐蚀性严重下降,其原因主要是表面层的过饱和固溶体相  $\alpha_{\text{N}}$  分解成贫 Cr 的  $\alpha$  相,造成晶界选择性腐蚀,从而导致表面钝化能力尚不及 2Cr13 马氏体不锈

钢基材。

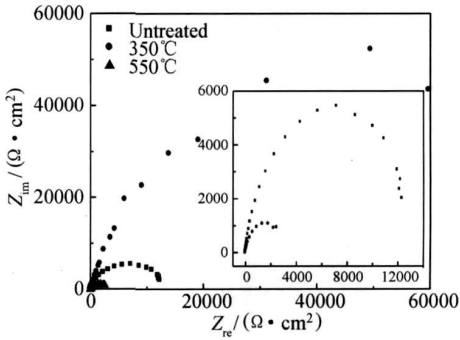


图 7 在 5% NaCl 溶液中浸泡 0.5h 后各试样的 Nyquist 图

Fig. 7 Nyquist plot of samples in 5% NaCl solution after 0.5h immersion

2.5 浆体冲刷腐蚀行为

表 1 所示为 2Cr13 未处理和渗氮处理试样在浆体介质中的冲刷腐蚀磨损实验结果。可以看到,350℃渗氮试样在中性和弱酸性砂浆环境中的冲刷腐蚀速率较未处理试样分别降低 96.7% 和 87.4%,表现出了良好的耐冲蚀性能。然而,550℃渗氮试样在中性和弱酸性环境中的冲蚀速率则相对 2Cr13 基材增大了 4.13 倍和 0.49 倍,表明经 550℃常规温度渗氮后的 2Cr13 试

样的耐冲刷腐蚀性能较 2Cr13 不锈钢基材显著降低。图 8 所示为未处理和渗氮处理试样在酸性浆体介质中冲刷腐蚀实验后的表面形貌特征,可见,未处理试样表面出现明显的腐蚀红锈产物和小的点蚀坑,而 350℃

渗氮处理试样表面腐蚀较为轻微。550℃渗氮试样表面出现了大而深的腐蚀坑,即发生了严重的局部腐蚀现象。渗氮处理对 2Cr13 不锈钢耐冲刷腐蚀行为的影响规律在中性浆体介质中与酸性浆体介质中是一致的。

表 1 2Cr13 不锈钢冲刷腐蚀磨损结果(未处理和渗氮试样)

Table 1 Erosion-corrosion results of 2Cr13 steel  
(nitrided and unnitrided)

Test condition	Surface state	Erosion-corrosion rate $/(g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	Relative performance
Neutral slurry (pH: 6.5-7)	Untreated	4.01321	1
	350℃ nitrided	0.13116	3.3%
	550℃ nitrided	20.60769	5.13 times
Acid slurry (pH: 3±0.2)	Untreated	23.66502	1
	350℃ nitrided	2.98184	12.6%
	550℃ nitrided	35.16678	1.49 times

固液两相中的冲刷腐蚀是固体颗粒的冲刷磨损与液相腐蚀介质对试样腐蚀的协同作用的破坏过程<sup>[14]</sup>。固液两相冲刷腐蚀过程中,水流携带着砂粒以一定速度旋转,砂粒被加速后以一定角度撞击试样表面。石英砂粒子对材料表面的冲击运动可分解为平行于表面的切向运动和垂直于表面的法向运动,砂粒的切向运动有如刀具对材料的切削运动,砂粒会对表面产生切削作用,结果会产生凿切唇,容易在连续冲击下脱落。而砂粒的法向运动造成的材料表面损伤与粒子冲击时靶材的变形机制有关,冲蚀过程实际为多冲疲劳破坏,受交变力学因素影响,表面损伤为亚表面层裂纹成核

长大及屑片脱离母体的过程<sup>[15]</sup>。在浆体冲刷腐蚀磨损过程中,磨粒的实际冲击角比较低<sup>[16]</sup>,因为由于流体的黏性大,磨粒的运动方向将向流体运动的方向偏斜,致使磨粒的实际冲角下降。并且由于浆体在冲击材料表面时试件表面存在流体附面层,磨粒要冲击到材料表面就必然要穿过这种流体层,该流体附面层将会使磨粒受到粘性阻力作用而减速。因此,在冲刷腐蚀过程中,磨粒的切向运动将会被加强,而法向运动会减弱,固体粒子主要以小角度冲蚀破坏试件表面,即仅就固体颗粒对试样表面的作用,则与本文中 2.3 节所述的小角度固体颗粒干冲蚀磨损行为相近。

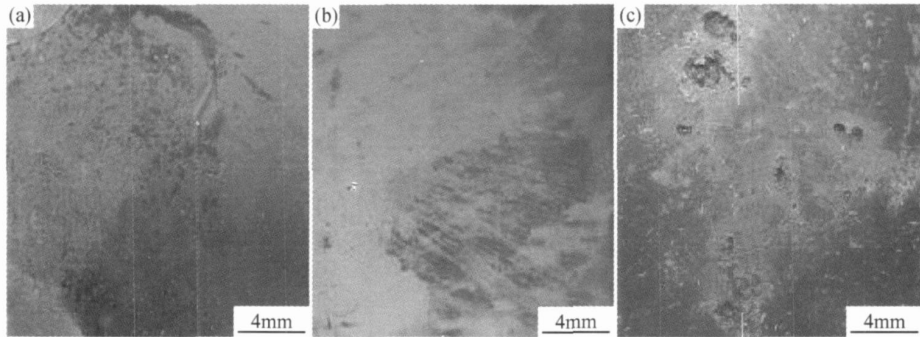


图 8 未处理及渗氮试样在酸性介质中的冲刷腐蚀形貌  
(a) 未处理; (b) 350℃渗氮; (c) 550℃渗氮

Fig.8 Erosion-corrosion morphologies of samples in the acid slurry  
(a) untreated; (b) 350℃ nitrided; (c) 550℃ nitrided

固液两相冲刷腐蚀过程中,一方面,固体粒子的冲蚀作用破坏了材料表面的钝化性保护膜,加速试件的腐蚀,即冲蚀磨损促进腐蚀破坏;另一方面,局部点腐

蚀造成表面粗糙度增加,有效暴露表面积增大,因而,冲刷磨损增强。此外,点蚀坑可能导致局部湍流产生,加速冲击腐蚀破坏。因此,固体粒子的冲刷与电解质

的腐蚀在固液两相冲刷腐蚀过程中具有协同破坏作用。然而, 由于 350℃ 渗氮试样表面硬度高, 抗冲刷磨损性能好, 同时钝化膜完整性好, 破坏后的自修复能力强, 因而表现出较基材更好的抗冲刷腐蚀性能。550℃ 离子渗氮试样虽然具有比 2Cr13 不锈钢基材好的抗固体石英砂冲蚀磨损性能, 但是, 由于其耐 NaCl 水溶液的腐蚀能力显著低于 2Cr13 不锈钢, 钝化膜稳定性差, 加之固体粒子的冲蚀作用进一步加速钝化膜的破坏, 导致其冲刷腐蚀速率明显高于 2Cr13 不锈钢基材, 并以局部点蚀为破坏特征。同时也表明, 在这种条件下, 冲刷磨损与腐蚀的协同破坏作用比二者单独影响更显著。在酸性环境中, Cl<sup>-</sup> 和 H<sup>+</sup> 共存, 因而, 钝化膜的稳定性和自修复能力下降, 故冲刷腐蚀速率较中性环境高。

### 3 结论

(1) 350℃ 低温和 550℃ 常规高温离子渗氮均可显著提高 2Cr13 马氏体不锈钢在小角度石英砂颗粒干冲蚀条件下的磨损抗力, 有效地减缓了基材的切削与犁削磨损。但是, 350℃ 低温渗氮处理层因具有更高的表面硬度, 故表现出比 550℃ 高温离子渗氮层更好的抗冲蚀磨损性能。

(2) 在含 10% 石英砂的中性和酸性 5% NaCl 水溶液中, 350℃ 低温渗氮处理使 2Cr13 不锈钢冲刷腐蚀速率分别降低 96.7% 和 87.4%, 而 550℃ 常规离子渗氮却导致 2Cr13 不锈钢冲刷腐蚀速率分别提高 4.13 倍和 0.49 倍。原因归于低温渗氮层由  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$  和 N 过饱和固溶体  $\alpha_{\text{N}}$  相组成, 其硬度高, 抗小角度固体粒子冲击能力强, 同时表面钝化膜稳定性, 且有较强的自修复能力, 因而耐腐蚀性能好, 因此, 低温渗氮层有效控制了冲刷腐蚀过程中固体粒子的冲刷磨损与电解质的腐蚀的协同破坏作用。然而, 高温渗氮处理试样表面生成了大量的 CrN, 导致局部贫 Cr, 因而耐电化学腐蚀和抗冲刷腐蚀性能均显著降低。

#### 参考文献

- [1] TIM J CARTER. Common failures in gas turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12: 237-247.
- [2] 范华, 杨功显. 大型汽轮机末级叶片钢中夹杂物及其组织对疲劳

强度和应力腐蚀性能的影响[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(2): 111-117.

- [3] MENTHE E, BULAK A, OLFE J, et al. Improvement of the mechanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding[J]. Surface and Coating Technology, 2000, 1133-1134: 259-263.
- [4] 林义民, 徐姚, 梁爱民, 等. 处理温度对 1Cr18Ni9Ti 钢脉冲直流等离子渗氮的影响[J]. 金属热处理, 2005, 30(10): 64-67.
- [5] SUN Y, BELL T. Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel[J]. Wear, 1998, 218(1): 34-42.
- [6] BELL T, LI X Y, SUN Y. 刘家浚, 张秋英译. 对于提高奥氏体不锈钢离子渗氮表面腐蚀性能的措施[J]. 中国表面工程, 1998, (4): 40-49.
- [7] JOLANTA BARANOWSKA, BOZENA AMOLD. Corrosion resistance of nitrided layers on austenitic steel[J]. Surface and Coating Technology, 2006, 200(22-23): 6623-6628.
- [8] 王亮, 许晓磊, 许彬, 等. 奥氏体不锈钢低温氮化层的组织与耐磨性[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(1): 67-69.
- [9] LI C X, BELL T. Corrosion properties of plasma nitrided AISI410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions[J]. Corrosion Science, 2006, 48(8): 2036-2049.
- [10] Kim S K, YOO J S, PRIEST J M, et al. Characteristics of martensitic stainless steel nitrided in a low-pressure RF plasma[J]. Surface and Coating Technology, 2003, 163-164: 380-385.
- [11] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 1-240.
- [12] CHEN KC, HE J L, HUANG W H, et al. Study on the solid-liquid erosion resistance of ion-nitrided metal[J]. Wear, 2002, 252: 580-585.
- [13] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 53-242.
- [14] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 202-286.
- [15] 刘国宇, 鲍崇高, 张安峰. 不锈钢与碳钢的液固两相流冲刷腐蚀磨损研究[J]. 材料工程, 2004, (11): 37-40.
- [16] 王惠民. 流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社机械工业出版社, 2005. 1-240.

基金项目: 国家自然科学基金资助(50671085)

收稿日期: 2007-02-05; 修订日期: 2007-06-07

作者简介: 奚运涛(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事腐蚀防护与表面工程技术研究工作, 联系地址: 710072 西安市西北工业大学 398 信箱(710072)。E-mail: liudaox@mail.nwpu.edu.cn