

N/Ti/Al 离子注入 304 不锈钢的耐磨性

袁联雄^{1,2}, 唐德文^{1,2}, 邹树梁², 刘军^{1,2}, 李朋雪^{1,2}

(1. 南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;
2. 南华大学 核设施应急安全技术装备湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 目的 研究 N, Ti, Al 离子注入对 304 不锈钢耐磨性的影响规律, 为 304 不锈钢材料的改良提供参考。方法 采用等离子注入技术, 在不同剂量下对 304 不锈钢分别进行 N, Ti, Al 离子注入, 对离子注入后的试样进行表面微观形貌观测、表面硬度测试、摩擦磨损性能测试, 并与 304 不锈钢基材进行对比。结果 304 不锈钢经 3 种离子注入后, 均能获得平整、致密, 没有裂纹, 具有一定光洁度的表面组织, 但是注入剂量增大会引起表面起泡现象, 形成多孔形貌, 光洁度降低。此外, 3 种离子注入均能提高 304 不锈钢的表面硬度, 且高剂量注入试样的硬度比低剂量注入试样更高, 相较而言, N 离子注入使表面硬度的提高更明显。相比未注入基材, 注 N 与注 Ti 表面层的摩擦系数均变小, 注 Al 表面层的摩擦系数反而变大, 但磨损量都明显降低。高剂量注 N、注 Al 试样的耐磨性均高于低剂量注入试样, 而高剂量注 Ti 试样的耐磨性低于低剂量注入试样, 但仍好于注 N、注 Al 试样。结论 在相同实验条件与注入工艺下, N 离子注入对表面硬度提高最显著(剂量为 5.0×10^{17} ions/cm²), 约提高 41%; Ti 离子注入对耐磨性提高最显著(剂量为 3.0×10^{17} ions/cm²), 约提高 6 倍。

关键词: 304 不锈钢; 离子注入; 注入剂量; 表面硬度; 摩擦系数; 磨损量; 耐磨性

中图分类号: TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)09-0043-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.008

Wear Resistance of 304 Stainless Steel Implanted with N/Ti/Al Ions

YUAN Lian-xiong^{1,2}, TANG De-wen^{1,2}, ZOU Shu-liang², LIU Jun^{1,2}, LI Peng-xue^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Emergency Safety Technology and Equipment for Nuclear Facilities, University of South China, Hengyang 421001, China)

收稿日期: 2015-05-17; 修订日期: 2015-06-05

Received: 2015-05-17; Revised: 2015-06-05

基金项目: 湖南省科技重大专项(2012FJ1007); 中国博士后面上基金(2013M542123); 高等学校博士学科点专项科研基金(20134324110001); 湖南省自然科学基金省市联合基金(S2015J512J)

Fund: Supported by Key Specialized Project for Science and Technology of Hunan Province(2012FJ1007); General Fund for Post-doctoral Scientists of China(2013M542123); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20134324110001) and Provincial and Municipal Joint Fund for Natural science of Hunan Province(S2015J512J)

作者简介: 袁联雄(1989—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要研究先进制造技术与装备、金属材料表面改性。

Biography: YUAN Lian-xiong(1989—), Male, from Hunan, Master graduate student, Research focus: advanced manufacturing technology and equipment, surface modification of metallic materials.

通讯作者: 唐德文(1976—), 男, 湖南人, 博士, 副教授, 主要从事先进制造技术与装备、金属材料改性方面的研究。

Corresponding author: TANG De-wen(1976—), Male, from Hunan, Ph. D., Associate professor, Research focus: advanced manufacturing technology and equipment, modification of metallic materials.

ABSTRACT: Objective To study the influence law of wear resistance for 304 stainless steel implanted with N, Ti, Al ions, in order to provide a reference for the improvement of 304 stainless steel. **Methods** The plasma implantation technology was used to implant 304 stainless steel with N, Ti, and Al ions respectively at different doses, and surface microstructure, surface hardness test and friction wear test were performed on each sample after ion implantation, and the results were compared with those of the 304 stainless steel substrate. **Results** The results showed that the samples of 304 stainless steel implanted with all 3 kinds of ions had a flat and dense surface without cracks and with a certain smoothness, but with increased implantation dose, the smoothness decreased because the excessive ion implantation could cause blistering and lead to a porous morphology. In addition, all three kinds of ions implantation could improve the surface hardness of 304 stainless steel, and the sample hardness with high-dose implantation was higher than that with low-dose implantation, in comparison, the improvement in the surface hardness of samples implanted with N ions was more obvious. Compared to the non-implanted substrate, the friction coefficient decreased after implanted with N or Ti ions, while the friction coefficient of sample implanted with Al ions increased, but the amount of wears on all implanted samples reduced significantly. The wear resistance of all the samples implanted with N, Al ions at a high-dose was higher than that of the samples with low-dose implantation, while the wear resistance of the sample implanted with Ti ions at a high-dose was lower than that of the sample with the low-dose implantation, however, it was still higher than that of the samples implanted with N or Al ions. **Conclusion** Under the same experimental conditions and implantation process, the N ion implantation improved the surface hardness most significantly (at a dose of 5.0×10^{17} ions/cm²), by about 41%, while the Ti ion implantation improved the wear resistance most significantly (at a dose of 3.0×10^{17} ions/cm²), by about 6 times.

KEY WORDS: 304 stainless steel; ion implantation; implantation dose; surface hardness; friction coefficient; the amount of wear; wear resistance

304 不锈钢因其优良的耐腐蚀性能而广泛应用于各种不同领域,但有时需要其同时具有一定的耐磨性^[1-2],以适应某些特定工况,如核电站的管道回路经常承受高温流体的冲刷与摩擦,要求耐磨性高。因此,解决 304 不锈钢的耐磨性问题是一项迫在眉睫的工作,对拓宽其应用领域具有深远的意义^[3-4]。

近年来的研究都是对 304 不锈钢进行改良,通过表面改性技术获得适用于特定环境下的表面层^[5-8],使不锈钢达到一定的性能要求。离子注入技术是当前比较先进的表面改性技术,注入层和基体之间没有明显的界限,结合极其紧密。陈康、白彬等人研究了 N 离子注入对不锈钢摩擦磨损特性的影响^[9-10],发现 N 离子注入后,不锈钢表面硬度与耐磨性均有一定的提高。尹妍等人研究了不锈钢经离子注硼后的摩擦磨损性能^[11],结果表明,注硼后,不锈钢表面硬度与耐磨性均得到明显提高。Evans P J 等人研究发现,离子注入 Ti 可提高不锈钢的耐磨性^[12]。王天明等人研究发现,离子注入 Al 后,316 奥氏体不锈钢的耐磨性和耐腐蚀性得到提高,显微硬度提高了 43.7%,摩擦系数降低了约 50%^[13]。这些研究在一定程度上说明了各种离子注入对不锈钢表面性能的影响,但缺乏在相同实验条件下,不同种类的离子注入对不锈钢性能影响的对比。文中在前人的研究基础上,对普通 304 不锈钢分别进行 N, Ti, Al 离子注入,通过对比表面层的形貌、硬度、耐磨性,获得包括离子种类、注入剂量、

控制温度等在内的最优工艺参数,拟为 304 不锈钢材料的改良提供参考。

1 实验

1.1 离子注入

以 304 不锈钢为基材,厚 3.7 mm,化学成分(以质量分数计)为: C ≤ 0.07%, Si ≤ 1.0%, Mn ≤ 2.0%, Cr 17.0% ~ 19.0%, Ni 8.0% ~ 12.0%, P ≤ 0.035%, S ≤ 0.03%, Fe 余量。将不锈钢板材加工成工作面尺寸 50 mm × 50 mm 的试样,先经过砂纸粗磨、机械抛光,使表面粗糙度 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$,然后依次在丙酮、蒸馏水和酒精中进行超声波清洗,冷风烘干后,密封于密封袋内,并置于干燥箱中备用。

实验在西南物理研究院完成,设备为其自制的 LZD-800 型多功能离子注入机。在离子注入工艺中,注入能量和注入剂量是两个非常重要的参数。注入能量主要影响注入深度,注入能量越大,注入深度就越大,但是过大的注入能量会导致表面粗糙度迅速增大,从而影响到实际注入零件的精度^[14]。注入能量的选择原则是在保证一定注入深度的前提下,避免表面粗糙度增加。根据此原则,选择加速电压为 60 kV。注入剂量对材料表面强化效果的影响较大,随着注入剂量的增大,表面力学性能会得到改善,但是高剂量

的离子注入会引起表面起泡现象,形成多孔形貌^[15]。由于离子注入过程涉及复杂的物理和化学变化,加之基体材料成分存在多样性,因此注入层的结构分析和计算难度大大增加,使得实际生产过程中无法准确预知处理结果,工艺参数的制定和选取存在一定的盲目性。为此,笔者依据前人的研究基础,并结合理论计算,最终确定注入工艺参数。

文中采用 SRIM 软件,输入离子种类、注入能量与靶材料,获得离子注入的理论投影射程与投影射程统计偏差,以此计算离子注入的饱和浓度,进而选择离子注入剂量。由 SRIM 软件运算得到加速电压为 60 kV 时,在 304 不锈钢中分别注入 N,Ti,Al 离子的投影射程 R_p 和投影射程统计偏差 ΔR_p ,结果见表 1。

表 1 投影射程及投影射程统计偏差的计算结果

Tab.1 The calculation results of R_p , ΔR_p

Ion species	R_p/nm	$\Delta R_p/\text{nm}$
N	70.5	30
Ti	48	21
Al	127	53

注入剂量的确定需依据具体的材料预期效果,并且应小于饱和注量 ϕ_0 。 ϕ_0 是指注入到靶材料的离子数量等于从靶材料溅射出来的注入原子数量时的注入量临界值,计算公式^[16]为:

$$\phi_0 = (6.36\Delta R_p + R_p) n_0 / Y \tag{1}$$

式中: n_0 为靶原子密度, Y 为溅射系数。溅射系数 Y 是指每个入射离子所打出的靶原子数目,实质是入射离子从表面打击的原子数与入射离子数之比,计算公式^[16-17]为:

$$Y = 0.042 S_n(E) \cdot \alpha / U_0 \tag{2}$$

式中: U_0 为靶原子升华能,其值可查阅《物理学常用数表》获得; $S_n(E)$ 为入射离子在靶中的核阻止本领; α 是与入射离子和靶原子质量相关的常数,其值由(3)式算得,其中的 M_1, M_2 分别指入射离子和靶原子的质量。

$$\begin{cases} \alpha = 0.1019 + 0.0842 (M_2/M_1)^{0.9805} & M_2/M_1 < 2.163 \\ \alpha = -0.4137 + 0.6092 (M_2/M_1)^{0.1708} & M_2/M_1 > 2.163 \end{cases} \tag{3}$$

根据上述公式计算,将所得相关数据列于表 2。为满足强化效果和表面形貌的要求,根据表 2 数据,注入剂量选择两个梯度,即 $3 \times 10^{17}, 5 \times 10^{17} \text{ ions/cm}^2$ 。不同种类、不同剂量的离子注入试样编号见表 3。为

减少温度对实验的影响,通过水冷却循环方法将注入温度控制在 200 ℃ 以内。

表 2 离子注入 304 不锈钢的相关数据计算结果

Tab.2 The calculation results of correlative data for ion implantation of 304 stainless steel

Ion species	Y	$\phi_0 / (\times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2})$
N	0.65	44.92
Ti	3.24	6.22
Al	1.26	41.00

表 3 304 不锈钢离子注入试样编号

Tab.3 The experimental parameters of 304 stainless steel ion implantation

Sample number	Ion species	Dose/ ($\times 10^{17} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-2}$)
1 [#]	N	5.0
2 [#]	N	3.0
3 [#]	Ti	5.0
4 [#]	Ti	3.0
5 [#]	Al	5.0
6 [#]	Al	3.0

1.2 性能测试

1) SEM 表面形貌。采用 JEOL-JSM-6490LA 型扫描电子显微镜观测分析各离子注入试样的表面微观形貌,并与未注入离子的 304 不锈钢表面进行对比。

2) 显微硬度。利用 HXD-1000B 维氏硬度计测定各试样的显微硬度,压头为维氏正菱形金刚石压头,载荷为 200 g,加载时间为 15 s。在试样表面均匀分散测试 5 个点,取平均值。

3) 摩擦磨损性能。在 MM-W1B 立式万能摩擦磨损试验机上测试室温、干摩擦条件下,离子注入试样和 304 不锈钢基材的摩擦磨损性能。采用销盘对磨的方式,上试样通过线切割加工成 4.7 mm×4.7 mm×3.7 mm 的立方体,下试样为 $\phi 31 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的淬火 45[#] 钢圆盘。在摩擦磨损试验过程中,装夹有试样的上部分在水平方向上做匀速圆周运动,转速设置为 60 r/min,装有对磨件的下部分相对静止不动。由于离子注入试样的注入层比较浅,在剧烈的干摩擦过程中很容易磨损掉,为了准确描述离子注入层的耐磨性,设定试验时间为 60 s,加载载荷为 20 N。摩擦磨损试验前后,试样经无水乙醇清洗、空气中自然风干,用 BS210S 型电子天平(精度 0.1 mg)称量,计算试样的质量磨损量 $\Delta m = m_1 - m_2$ (m_1 和 m_2 分别为试验前后

的质量)。

2 结果与分析

2.1 SEM 形貌

如图1所示,各离子注入试样,有的表面呈现颗粒、微孔状,光洁度变差,有的表面犹如镀上了一层薄膜,光洁度变好,表面更加致密,这显然与离子注入的

剂量有关。 $1^{\#}$ 试样(5.0×10^{17} ions/cm² 离子注 N)的表面明显比 $2^{\#}$ 试样(3.0×10^{17} ions/cm² 离子注 N)粗糙,且有明显的小孔、凹坑,尽管 $2^{\#}$ 也有一定的褶皱,但光洁度好,表面整体上更加致密。注入剂量对材料表面强化效果的影响较大,随着注入剂量的增大,表面力学性能会得到改善,但是高剂量的离子注入会引起表面起泡现象,形成多孔形貌,影响表面的光洁度。 $1^{\#}$ 试样的多孔形貌恰好印证了这一观点。同样,对于 $3^{\#}$ 和 $4^{\#}$, $5^{\#}$ 和 $6^{\#}$ 表面形貌的不同也是基于这样的原因。

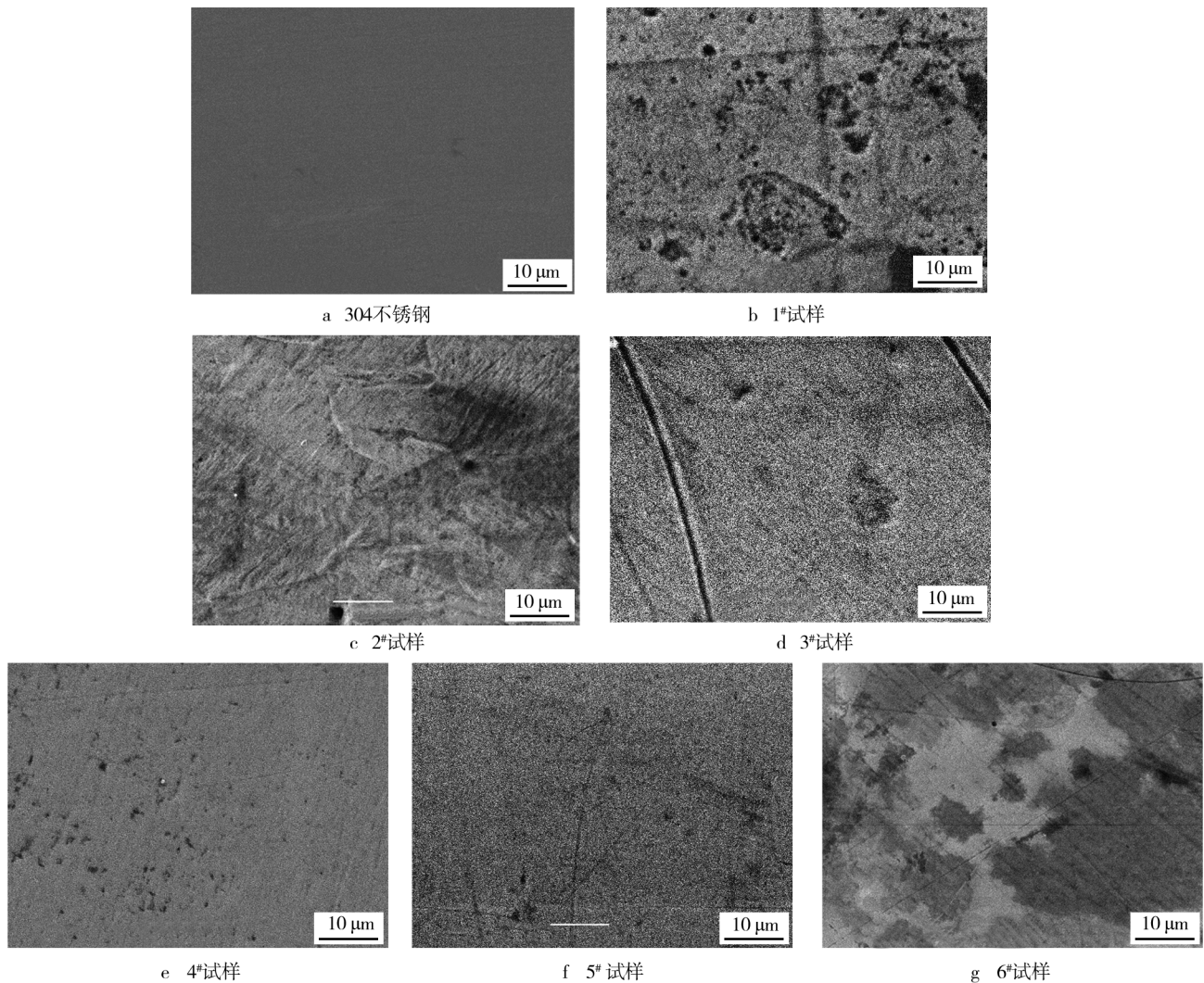


图1 304 不锈钢离子注入 N,Ti,Al 前后的表面微观形貌

Fig. 1 The surface microstructure of 304 stainless steel before and after ion implantation of N, Ti, and Al;

a) 304, b) Sample 1, c) Sample 2, d) Sample 3, e) Sample 4, f) Sample 5, g) Sample 6

2.2 显微硬度

对各试样的显微硬度测试结果见图2。从图2可以看出,304 基材的平均硬度明显低于各离子注入试样,说明离子注入能够提高不锈钢的表面硬度。对比

各试样的硬度值,在注入剂量相同的情况下, $1^{\#}$ 试样(注 N) $>3^{\#}$ 试样(注 Ti) $>5^{\#}$ 试样(注 Al);在同种类离子注入的情况下, $1^{\#}$ 试样(5.0×10^{17} ions/cm²) $>2^{\#}$ 试样(3.0×10^{17} ions/cm²), $3^{\#}$ 试样(5.0×10^{17} ions/cm²) $>4^{\#}$ 试样(3.0×10^{17} ions/cm²), $5^{\#}$ 试样(5.0×10^{17} ions/cm²) $>$

6#试样(3.0×10^{17} ions/ cm^2)。由此可见,高剂量的离子注入有利于提高注入层的硬度,且相比之下,N 离子注入使表面硬度的提高更明显。

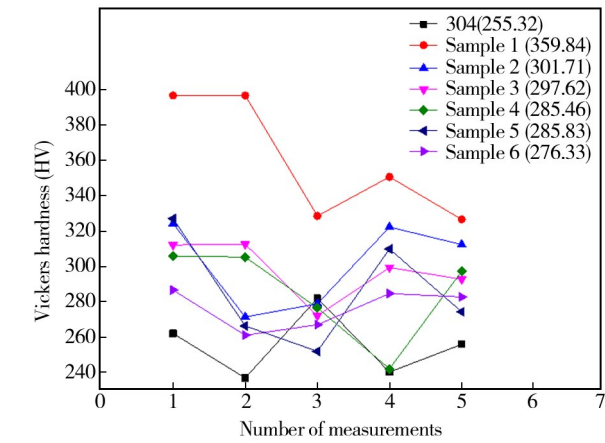


图 2 各试样的显微硬度
Fig.2 Vickers hardness of the samples

对于离子注入提高表面层硬度的机理,报道的文献很多,公认的机理为:一系列的离子碰撞过程使被撞击的表面层内部产生强辐射损伤区,改变正常的晶格原子排列,阻止位错滑移,使金属表面从长程有序变为短程有序,形成非晶态,从而性能发生改变,表面得到强化^[18],硬度提高;此外,在离子注入过程中,一系列的高速离子轰击基体表面,类似于喷丸强化的冷加工硬化作用。当然,影响表面硬度的因素还有很多,后文将结合注入层的耐磨性进行具体分析。

2.3 耐磨性

各试样摩擦系数随时间的变化如图 3 所示。可以看到,各试样的摩擦系数上下波动,整体来看,304 不锈钢基材,4#试样和 6#试样的摩擦系数偏高,说明它们的耐磨性较差;1#试样、2#试样、3#试样的摩擦系数偏低,说明它们的耐磨性较好。

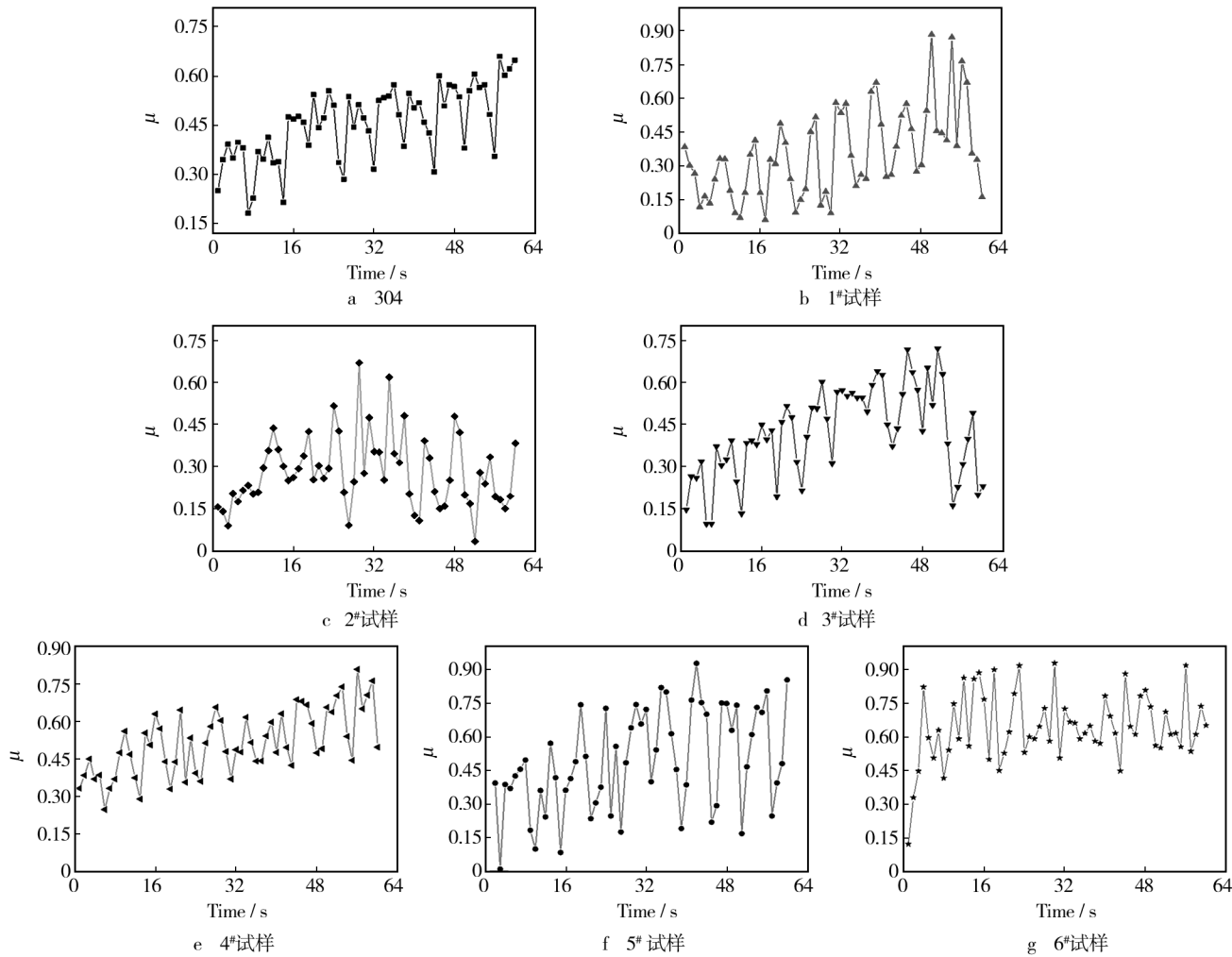


图 3 各试样摩擦系数随时间的变化
Fig.3 Change of friction factor of the samples over time;
a) 304, b) Sample 1, c) Sample 2, d) Sample 3, e) Sample 4, f) Sample 5, g) Sample 6

各试样的平均摩擦系数见图4。可以明显看出,5#试样和6#试样的摩擦系数高于304不锈钢基材,说明Al离子注入使304不锈钢摩擦系数变大,但判断其耐磨性还需结合试样的磨损量。相反,N和Ti离子注入304不锈钢均能得到较低的摩擦系数,根据摩擦学原理并结合其磨损量(图5),可知耐磨性得到了提高,其中1#试样和4#试样的耐磨性提高比较明显。由此可见,N,Ti离子注入能改善304不锈钢的耐磨性,并且高浓度的N离子注入能明显提高耐磨性,而高浓度的Ti离子注入不能显著提高耐磨性。

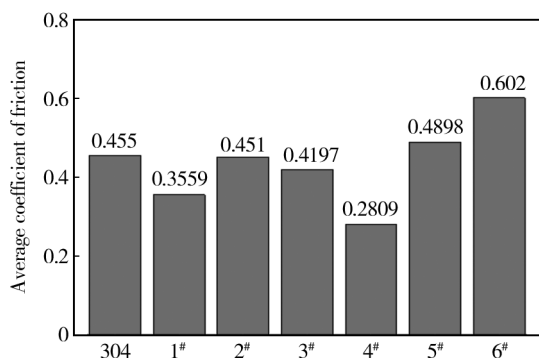


图4 各试样的平均摩擦系数

Fig. 4 Average coefficient of friction of the samples

N离子注入提高耐磨性的原因主要是:304不锈钢经离子注N后,表面生成了CrN和Cr₂N,而CrN比FeN的生成热高,使得表面层更加稳定,硬度也更高,耐磨性也得到提高,当N离子浓度增加时,CrN和Cr₂N的含量升高,进而耐磨性变得更好^[9];此外,氮离子注入层为过饱和氮的单相固溶体非晶态层,它强化了奥氏体不锈钢表面层,增加了表面层硬度,降低了摩擦系数,提高了耐磨性^[19]。Ti离子注入提高耐磨性的原因是:离子注入是一个非平衡过程,容易得到过饱和度很大的固溶体,并且注入原子对晶体的位错有钉扎作用,会造成位错运动的障碍,从而使材料强化,因此离子注Ti层硬度提高是Ti离子注入形成饱和固溶体强化的结果,进而使得摩擦系数降低,耐磨性得到提高。

由图4还可以看出,随着Ti离子注入量的增加(3#试样>4#试样),摩擦系数并没有降低,反而变高,其原因可能是:虽然高剂量的离子注入使硬度得到了提高^[20],但是由于Ti是强碳化物形成元素,它与碳的亲合力很强,以至于起到了固碳的作用,使得注入层单质碳含量降低,进而耐磨性变差。

各试样经摩擦磨损试验后,磨损量如图5所示。

可以看出,各离子注入试样的磨损量均小于304不锈钢基材,说明其耐磨性均得到提高。其中,4#试样的磨损量最小,这与其平均摩擦系数最小相符。当然,也不是摩擦系数小,磨损量就一定小,因为对于不同种类离子注入的试样,摩擦系数与磨损量之间的关系是有差异的,如1#试样的平均摩擦系数比3#试样小,但磨损量却大一些。结合图4和图5可以看出,5#试样和6#试样的平均摩擦系数都大于304不锈钢基材,但磨损量却小很多。Al离子注入后的摩擦系数增大是因为,随着Al离子的注入,304不锈钢表面层Al含量显著增加,致使注入层层错能增大,降低了滑动摩擦系数^[18]。Al离子注入后的磨损量显著降低是因为,离子注入试样磨损后,表面产生了均匀的断裂竹节,这些竹节属于金属氧化物,粘附于磨痕表面有利于提高注入层的硬度;另外,这种竹节状氧化物粘附于犁沟上,对磨损起到了润滑作用^[21]。

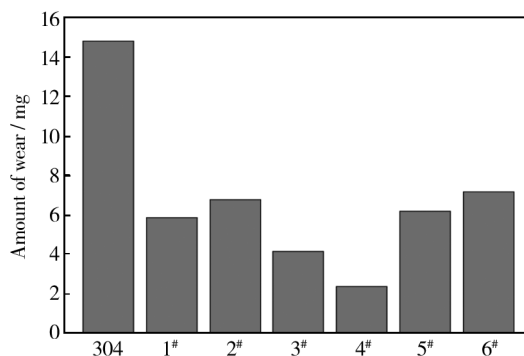


图5 各试样的磨损量

Fig. 5 The wear amount of the samples

3 结论

1) 304不锈钢分别经N,Ti,Al离子注入后,表面均能获得平整、致密,没有裂纹,具有一定光洁度的组织,但是随着注入剂量的增大,离子注入会引起表面起泡现象,形成许多微孔形貌,降低光洁度。

2) 304不锈钢分别经N,Ti,Al离子注入后,表面层硬度均得到提高。在相同注入剂量下,注N表面层的硬度最高(剂量为 5.0×10^{17} ions/cm²),提高约41%;其次是注Ti,提高约16%。此外,随着离子注入剂量的增加,硬度随之提高,相比之下,注N使硬度提高得更加明显。

3) 304不锈钢分别经N,Ti,Al离子注入后,表面层耐磨性均得到明显改善。相比未离子注入的基材,注N和注Ti表面层的摩擦系数均变小,注Al表面层

的摩擦系数变大,但磨损量都明显降低,耐磨性提高。在相同的注入剂量下,注 Ti 试样的耐磨性提高最为显著(剂量为 3.0×10^{17} ions/cm²),约为离子注入前的 6 倍。与低剂量注入相比,高剂量注 N 和注 Al 试样的耐磨性更好,而高剂量注 Ti 试样的耐磨性反而变差,但仍好于注 N 和注 Al 试样。

参考文献

- [1] WANG Cheng, WANG Wen, ZHU Sheng-long, et al. Oxidation Inhibition of γ -TiAl Alloy at 900 °C by Inorganic Silicate Composite Coatings [J]. Corrosion Science, 2013, 76: 284—291.
- [2] 冯凯. 离子注入提高不锈钢耐腐蚀和表面导电性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
FENG Kai. Improvement in Corrosion Resistance and Surface Conductivity of Stainless Steel 316L by Ion Implantation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [3] MEUNIER C, VIVES S, MUNNIK F, et al. Effect on Microstructure and Hardness of 1MeV Carbon Ion Implantation in Al, Co and W [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 262: 191—199.
- [4] PERUŠKO D, PETROVI S, STOJANOVI M, et al. Formation of Intermetallics by Ion Implantation of Multilayered Al/Ti Nano-structures [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2012, 282: 4—7.
- [5] ZHAO Yan-hui, GUO Chao-qian, YANG Wen-jin, et al. TiN Films Deposition inside Stainless-steel Tubes Using Magnetic Field-Enhanced Arc Ion Plating [J]. Vacuum, 2015, 112: 46—54.
- [6] LI D, GURUVENKET S, HASSANI S, et al. Effect of Cr Interlayer on the Adhesion and Corrosion Enhancement of Nanocomposite TiN-based Coatings Deposited on Stainless Steel 410 [J]. Thin Solid Films, 2011, 519 (10): 3128—3134.
- [7] NAGHIBI S A, RAEISSI K, FATHI M H. Corrosion and Tribocorrosion Behavior of Ti/TiN PVD Coating on 316L Stainless Steel Substrate in Ringer's Solution [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 148 (3): 614—623.
- [8] 徐成伟, 王振全, 胡欣, 等. 1Cr17Ni2 不锈钢表面激光熔覆层的微观组织和性能研究 [J]. 表面技术, 2011, 40 (1): 11—13.
XU Cheng-wei, WANG Zhen-quan, HU Xin, et al. Research on Microstructure and Property of Laser Cladding Layer on 1Cr17Ni2 Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 40 (1): 11—13.
- [9] 陈康, 赵玮霖. 304 奥氏体不锈钢氮离子注入层的组织与性能研究 [J]. 表面技术, 2011, 40 (2): 18—20.
CHEN Kang, ZHAO Wei-lin. Study on Organization and Performance of Nitrogen Ion Implantation Layer of 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 40 (2): 18—20.
- [10] 白彬, 张鹏程, 邹觉生, 等. 316L 不锈钢氮离子注入层的高温摩擦磨损特性 [J]. 摩擦学学报, 2009, 21 (2): 94—97.
BAI Bin, ZHANG Peng-cheng, ZOU Jue-sheng, et al. Friction and Wear Characteristics of 316L Stainless Steel Implanted with Nitrogen at Elevated Temperature [J]. Tribology, 2009, 21 (2): 94—97.
- [11] 尹研, 李翠玲, 刘成松, 等. AISI316 不锈钢表面等离子渗硼及摩擦磨损性能的研究 [J]. 表面技术, 2015, 44 (2): 43—47.
YIN Yan, LI Cui-ling, LIU Cheng-song, et al. Study on Tribological Performance of Surface Plasma Boronized AISI316 Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2015, 44 (2): 43—47.
- [12] EVANS P J, HYVARINEN J. Surface Modification of Austenitic Stainless Steel by Titanium Ion Implantation [J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 71: 151.
- [13] 王天民, 靳彩霞, 高美珍, 等. Al⁺注入 316 奥氏体不锈钢表面改性的研究 [J]. 摩擦学学报, 1994, 14 (4): 306—308.
WANG Tian-min, JIN Cai-xia, GAO Mei-zhen, et al. Study on the Surface Modification of 316 Stainless Steel by Al⁺ Ion Implantation [J]. Tribology, 1994, 14 (4): 306—308.
- [14] 朱生发, 徐莉, 黄楠, 等. 氮离子注入对纯铁表面显微形貌的影响 [J]. 功能材料, 2008, 39 (12): 2032—2034.
ZHU Sheng-fa, XU Li, HUANG Nan, et al. The Effect of Nitrogen Ion Implantation on the Surface Morphology of Pure Iron [J]. Functional Materials, 2008, 39 (12): 2032—2034.
- [15] 刘峰斌, 李景林, 金杰, 等. 氮离子注入 9Cr18Mo 不锈钢的表面结构与力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (9): 1838—1843.
LIU Feng-bin, LI Jing-lin, JIN Jie, et al. Surface Structures and Mechanical Properties of 9Cr18Mo Stainless Steels Implanted with Nitrogen Ions [J]. Raremetal Materials and Engineering, 2013, 42 (9): 1838—1843.
- [16] 武志玮. Ti、Nb 离子注入工模具钢表面改性研究 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
WU Zhi-wei. The Study of Surface Modification by Ti/Nb Ion Implantation into Mould Steels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [17] 张通和. 高剂量注入中离子溅射的影响 [J]. 核技术, 1987 (2): 30—33.

- DENG Shu-hao, YI Dan-qing, LIU Yao-qiong, et al. Electrochemical Preparation and Performance of Biological Ceramic Film on Titanium Alloy [J]. Surface Technology, 2008, 37 (6): 5—9.
- [8] 韩建业, 于振涛, 周廉. 溶胶凝胶法制备 TiO_2/HA 复合生物活性涂层及其体外活性[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊4): 551—554.
- HAN Jian-ye, YU Zhen-tao, ZHOU Lian. Hydroxyapatite/Titania Composite Coating Processed by Sol-Gel Method and Its Bioactivity in Vitro [J]. Rare Metal and Engineering, 2008, 37(Suppl. 4): 551—554.
- [9] YU B, LEUNG K, GUO Q, et al. Synthesis of Ag- TiO_2 Composite Nano Thin Film for Antimicrobial Application [J]. Nanotechnology, 2011, 22(11): 115603.
- [10] FU T, SHEN Y, ALAJMI Z, et al. Sol-Gel Derived Ag-containing TiO_2 Films on Surface Roughened Biomedical NiTi Alloy [J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 12423—12429.
- [11] SHI X, NAKAGAWA M, KAWACHI G, et al. Surface Modification of Titanium by Hydrothermal Treatment in Mg-containing Solution and Early Osteoblast Responses [J]. Journal of Materials Science—Materials in Medicine, 2012, 23(5): 1281—1290.
- [12] AKGUN B, DURUCAN C, MELLOTT N. Effect of Silver Incorporation on Crystallization and Microstructural Properties of Sol-Gel Derived Titania Thin Films on Glass [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2011, 58(1): 277—289.
- [13] 汪宇炎, 汪洋. TiO_2 薄膜在玻璃材料上的亲水性研究 [J]. 表面技术, 2009, 38(2): 52—54.
- WANG Yu-yan, WANG Yang. Study on Hydrophilic Properties of TiO_2 Thin Films Prepared on Glass [J]. Surface Technology, 2009, 38(2): 52—54.
- [14] UENO T, YAMADA M, SUZUKI T, et al. Enhancement of Bone-Titanium Integration Profile with UV-photofunctionalized Titanium in a Gap Healing Model [J]. Biomaterials, 2010, 31(7): 1546—1557.
- [15] 郑志刚, 姚元元, 张延彪, 等. 银纳米粒子对大肠杆菌和金黄葡萄球菌杀灭机理研究 [J]. 分析科学学报, 2011, 27(6): 799—801.
- ZHENG Zhi-gang, YAO Yuan-yuan, ZHANG Yan-biao, et al. Bacteriostasis Mechanism of Ag Nanoparticles to Escherichia Coli and Staphylococcus Aureus [J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(6): 799—801.
-
- (上接第17页)
- [17] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- XIAO Ji-mei. The Metallography of Stainless Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [18] LIPPOLD John C, KOTECKI Damian J. 不锈钢焊接冶金学及焊接性 [M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- LIPPOLD John C, KOTECKI Damian J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels [M]. CHEN Jian-hong, Trans. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [19] 刘君, 孙志超, 唐文亭. K403 镍基铸造合金热暴露后的微观组织与性能 [J]. 铸造, 2013, 62(7): 612—615.
- LIU Jun, SUN Zhi-chao, TANG Wen-ting. Microstructure and Properties of K403 Nickel Based Alloy after Thermal Exposure [J]. Foundry, 2013, 62(7): 612—615.
-
- (上接第49页)
- ZHANG Tong-he. The Effects of Ions Sputtering in High Dose Implantation [J]. Nuclear Technology, 1987(2): 30—33.
- [18] 谭雪霏, 张新, 赵春波. 钛离子注入对 AZ31 镁合金表面力学性能及耐蚀性的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(8): 45—49.
- TAN Xue-fei, ZHANG Xin, ZHAO Chun-bo. Effect of Ti Ion Implanting on Mechanical Property and Corrosion Resistance of AZ31 Magnesium Alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(8): 45—49.
- [19] 陈秋龙, 蔡亦炜, 彭辉, 等. 奥氏体不锈钢氮离子注入层的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(3): 129—134.
- CHEN Qiu-long, CAI Yi-wei, PENG Hui, et al. Study on Austenitic Stainless Steel Nitrogen Ion Implantation Layer [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1995, 29(3): 129—134.
- [20] 张通和, 吴瑜光. 粒子束表面工程技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- ZHANG Tong-he, WU Yu-guang. Beam Surface Engineering Technology and Applications [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [21] 李朋. 铝离子注入 AZ31 镁合金的腐蚀磨损研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- LI Peng. Corrosion and Wear Resistance of Al Ion Implanted AZ31 Magnesium Alloys [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.