

稀土含量对 Ti6Al4V 钛合金等离子渗氮层组织和摩擦学性能的影响

韦乃安^{1,2a,2b}, 韦春贝^{2a,2b}, 代明江^{2a,2b}, 柏松¹, 林松盛^{2a,2b},
侯惠君^{2a,2b}, 李洪^{2a,2b}, 苏一凡^{2a,2b}, 唐鹏^{2a,2b}

(1.中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2.广东省新材料研究所 a.现代材料表面工程技术国家工程实验室 b.广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: **目的** 研究稀土含量对 Ti6Al4V 钛合金表面等离子体渗氮层结构和性能的影响。**方法** 运用等离子表面改性技术对 Ti6Al4V (TC4) 钛合金进行等离子渗氮处理, 渗氮过程中通入不同含量的稀土作为催渗剂, 以获得钛合金表面强化层。利用金相显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 观察渗氮层组织, 用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析渗层相组成, 用能谱仪 (EDS) 检测渗层的化学成分, 用维氏显微硬度计测量渗层的显微硬度, 用球-盘式摩擦磨损试验机和三维轮廓仪检测渗层的摩擦磨损性能。**结果** TC4 钛合金表面等离子渗氮层结构包括表面化合物层 (主要成分为 δ -TiN) 和扩散层 (主要为 N 原子扩散形成的 N-Ti 固溶体), 加入稀土可以促进 N 原子向基体的扩散, 提高渗氮速度。渗层厚度增加, 硬度和耐磨性能提高, 扩散层使钛合金基体与化合物层之间的硬度梯度更加平缓。当稀土通入速率为 60 mL/min 时, 渗层厚度可达 155 μm , 表面硬度为 1275HV_{0.05}, 摩擦系数降到 0.27, 磨损率明显降低。**结论** 钛合金等离子渗氮过程中加入稀土可以有效提高渗速, 改善渗氮层硬度, 提高材料表面的耐磨性能。

关键词: TC4 钛合金; 等离子渗氮; 稀土; TiN; 显微硬度; 摩擦磨损

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0148-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.019

Effect of Rare Earth Content on the Microstructure and Friction Properties of Ti6Al4V Alloy by Plasma Nitriding

WEI Nai-an^{1,2a,2b}, WEI Chun-bei^{2a,2b}, DAI Ming-jiang^{2a,2b}, BO Song¹, LIN Song-sheng^{2a,2b},
HOU Hui-jun^{2a,2b}, LI Hong^{2a,2b}, SU Yi-fan^{2a,2b}, TANG Peng^{2a,2b}

(1.School of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2.a.National

收稿日期: 2019-06-24; 修订日期: 2020-01-25

Received: 2019-06-24; Revised: 2020-01-25

基金项目: 广州市科技计划项目 (201807010027); 广东省科技计划项目 (2017A070701027, 2014B070705007); 广东省科学院科技提升项目 (2017GDASCX-0111)

Fund: Guangzhou Science and Technology Program (201807010027); Guangdong Science and Technology Program (2017A070701027, 2014B070705007), GDAS' Project of Science Technology Development (2017GDASCX-0111)

作者简介: 韦乃安 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: WEI Nai-an (1993—), Male, Master, Research focus: material surface engineering.

通讯作者: 代明江 (1964—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为表面工程。邮箱: daimingjiang@tsinghua.org.cn

Corresponding author: DAI Ming-jiang (1964—), Male, Ph. D., Professorate senior engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: daimingjiang@gdinm.com

引文格式: 韦乃安, 韦春贝, 代明江, 等. 稀土含量对 Ti6Al4V 钛合金等离子渗氮层组织和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 148-154.

WEI Nai-an, WEI Chun-bei, DAI Ming-jiang, et al. Effect of rare earth content on the microstructure and friction properties of Ti6Al4V alloy by plasma nitriding[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 148-154.

Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology; b.Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the influence of rare earth content on the structure and properties of Ti6Al4V alloy by plasma nitriding. Plasma nitriding of Ti6Al4V(TC4) titanium alloy was carried out by plasma surface modification technology. Rare earth with different contents were introduced as accelerating agents in the nitriding process to obtain strengthening layer on titanium alloy surface. Microstructure and phase composition of nitrided layer were observed and evaluated by SEM and XRD. Chemical components were detected by EDS. Microhardness was tested by Vickers microhardness tester. The friction and wear properties of the infiltration layer were tested by ball-disc friction and wear tester and three-dimensional profiler. The structure of plasma nitrided layer on TC4 alloy surface consisted of compound layer (δ -TiN phase) and diffusion layer (N-Ti solid solution mainly formed by diffusion of N atoms.). Rare earth could promote the diffusion of N into the matrix during nitriding process, thus increasing the nitriding speed, the thickness, the microhardness and the wear properties. The diffusion layer could smooth the hardness gradient between the titanium alloy matrix and the compound layer. When the flow rate of the rare earth content was 60 mL/min, the thickness of the nitride layer reached 155 μm and the surface mircohardness was 1275HV_{0.05}. The friction coefficient was reduced to 0.27, and the wear rate was obviously reduced. The addition of rare earth elements in the plasma nitriding process can effectively increase the penetration rate and improve the hardness and the wear resistance of the nitriding layer.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; plasma nitriding; rare earth; TiN; microhardness; friction and wear

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属,钛合金因具有强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点,而被广泛应用于国防工业、航空航天、医学工程、化工石油、汽车船舰等各个领域^[1-2]。然而,钛合金材料硬度低、耐磨性差的特点极大地限制了其应用范围,因此在工业生产中,常常需要采用各种表面处理技术改善钛合金的表面性能,提高其硬度和耐磨性能。由于氮钛化合物具有高强度、高耐磨等优点,且氮原子可以渗入钛合金形成固溶体,因此可以采用渗氮技术对钛合金表面进行强化。常用的有高温气体渗氮、盐浴渗氮、等离子渗氮等^[3-5],其中,气体渗氮和盐浴渗氮形成的氮化钛渗层较薄,强度和摩擦学性能提高不明显。采用等离子渗氮技术可以在钛合金表面形成高强度、高耐磨的渗层。钛合金表面等离子渗氮技术具有效率高、渗层质量好且不存在结合力问题等优点。Hosseini 等^[6]运用等离子渗氮技术在 TC4 钛合金表面制备渗氮层,明显提高了钛合金的硬度和耐磨性。王琳等^[7]对 TC4 钛合金进行等离子渗氮处理,使钛合金表面硬度提高了近 3 倍,起到了较好的强化效果。

稀土用作添加剂运用于金属材料的研究由来已久,已经被认为是最有实用前景的合金化元素之一^[8-9]。陈方生等^[10]在研究 40 钢的稀土催渗等离子渗

氮时发现,稀土可以细化 γ' 相晶粒,同时增加晶体缺陷数量,有效加速渗氮过程。胡德昌等^[11-12]在研究 20CrMnTi 材料的稀土碳氮共渗过程中发现,稀土具有提高渗速和有效硬化层深度的作用。马永等人^[13]在研究稀土掺杂对钛合金表面激光熔覆组织性能的影响中发现,适量稀土可以使熔覆层组织细化,显著提高耐磨性。多数研究表明,稀土对渗氮技术和钛合金的组织性能都有较大影响,然而在钛合金等离子渗氮过程中加入稀土的相关研究报道较为少见。本文采用等离子渗氮技术,探讨稀土含量对 TC4 钛合金表面等离子渗氮层组织和性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料和工艺

试验材料为 TC4 钛合金,主要成分见表 1。钛合金被切割成 $\phi 26\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的试样,用金相砂纸打磨,经抛光后,用酒精和丙酮进行超声波清洗,最后干燥封存备用。

试验在 LD-2-50A 型离子渗氮炉中进行。试验用到的稀土是氧化钇在酒精中的饱和溶液,通过质量流量计控制通入量,气氛为氢气、氮气和氩气的混合气体,具体工艺参数见表 2。

表 1 Ti6Al4V 钛合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti6Al4V titanium alloy

Elements	Al	V	C	Fe	N	O	H	Ti
Component	5.97	3.55	0.016	0.03	0.01	0.13	0.001	Bal.

表 2 渗氮工艺参数
Tab.2 Plasma nitriding parameters

Number	Temperature/°C	Bias voltages/V	N ₂ : H ₂ : Ar/%	Time/h	RE/(mL·min ⁻¹)	Symbol
a	880	600	80 : 5 : 15	4	0	RE-0
b	880	600	80 : 5 : 15	4	20	RE-20
c	880	600	80 : 5 : 15	4	40	RE-40
d	880	600	80 : 5 : 15	4	60	RE-60
e	880	600	80 : 5 : 15	4	80	RE-80

1.2 渗层性能测试

使用 MH-5D 型维氏显微硬度仪测试渗氮层的表面硬度, 载荷 50 g, 加载时间 15 s, 其中梯度硬度每隔 20 μm 取一个点进行测量, 测量深度为 200 μm 。渗层物相使用德国 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪进行分析, 扫描范围 30°~80°。采用球-盘式摩擦磨损试验仪对材料表面渗层的耐磨性能进行表征, 载荷 1000 g, 转速 250 r/min, 摩擦半径 8 mm, 测试时间 30 min, 摩擦副材料为 Si₃N₄ 球 ($\phi 4$ mm)。在该试验中, 使用三维表面轮廓仪 (DektaXT, Bruker, USA) 测量试样表面粗糙度、磨痕的横截面积以及磨痕的 3D 显微形貌。采用美国 FEI Quanta 200 型扫描电子显微镜 (SEM) 对涂层表/截面形貌和磨痕形貌进行表征, 同时利用 X 射线能谱仪 (EDS) 进行渗层化学成分分析。

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

图 1 是稀土含量对渗层表面形貌的影响。渗氮处理过程中, 稀薄气体在阴阳极直流高压下形成 N⁺、H⁺、Ar⁺等正离子, 轰击阴极工件表面, 溅射出 Ti 离子, 从而与活性 N 原子结合形成化合物。由于等离子不断地轰击表面, 并伴随化合物的生成与分解, 因此表面粗糙度会发生改变。从图 1 可以看出, 渗氮层表面形成了凹凸不平的微小颗粒, 未加稀土的样品表面 (图 1a) 颗粒分布较为均匀且平整, 而渗氮过程通入稀土形成的颗粒较大, 并伴有团聚现象发生, 其表面较粗糙。经检测, 钛合金渗氮前粗糙度为 0.139 μm , 在通入不同量的稀土 (0、20、40、60、80 mL/min) 进行渗氮处理后, 表面粗糙度分别为 0.195、0.275、0.298、0.246、0.254 μm 。

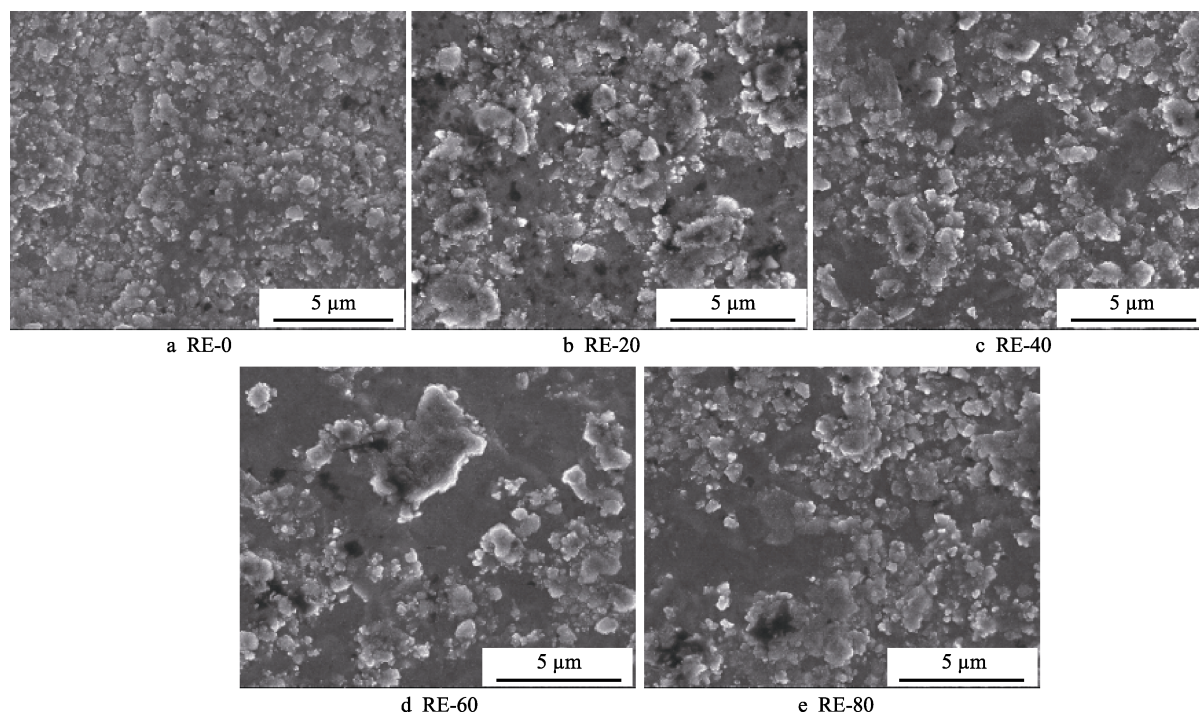


图 1 稀土含量对渗氮层表面形貌的影响

Fig.1 Effect of RE content on surface topography of plasma nitrided layers

图 2 是 TC4 钛合金经过等离子渗氮处理后的截面形貌。从图中可以看出, 钛合金表面形成了明显的

改性层, 从外到内分别由化合物层 (I)、扩散层 (II) 和基体 (III) 组成, 这是钛合金渗氮处理后常见的一

种结构形式。化合物层均匀而致密, 且与基体结合紧密, 其主要成分是氮钛化合物, 属于高硬陶瓷层, 可以在 TC4 钛合金表面起到很好的强化作用; 扩散层

内形成了较多的氮钛化合物, 高硬相氮化物可以使白亮层和基体之间的硬度下降趋势较为平缓, 有助于提高基体的承载能力。

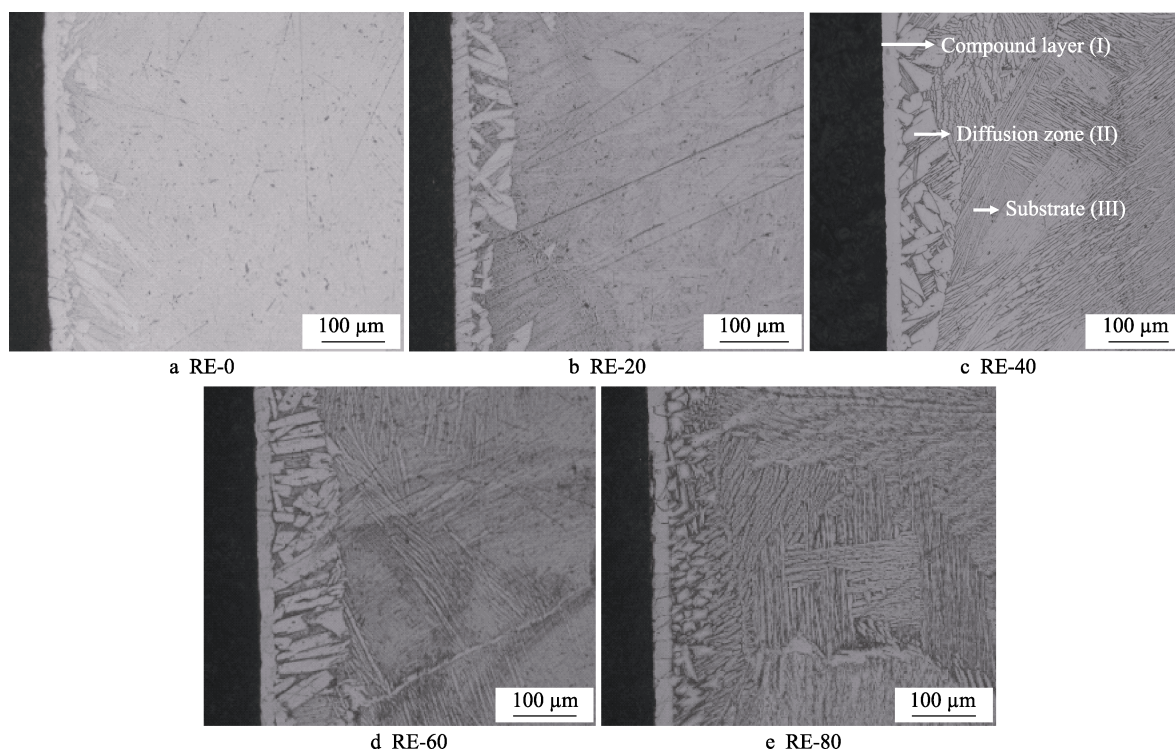


图 2 不同稀土含量的 TC4 渗氮层截面形貌

Fig.2 Cross section microstructure of nitrided layers with different RE contents

图 3 给出了稀土通入量和渗层厚度的关系, 可以看出, 随着渗氮过程中加入稀土的量增多, 化合物层厚度随之增大, 当稀土流量为 80 mL/min 时, TC4 钛合金表面形成化合物层的厚度达 34 μm , 迅速形成的化合物层抑制了 N 原子继续向基体内的扩散^[14], 导致总的渗层深度变化呈现先增加后减少的趋势。因此可以通过控制稀土的加入量, 得到所需渗层厚度。

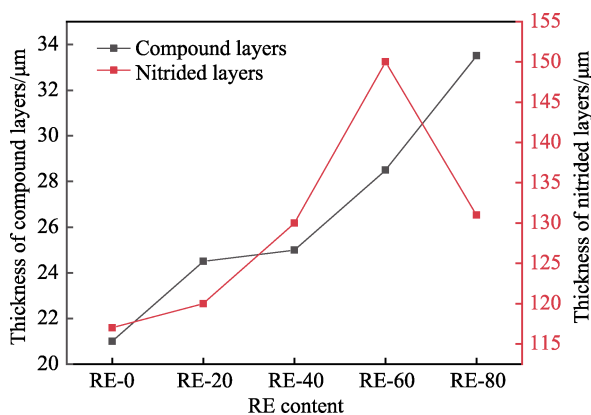


图 3 稀土含量与渗氮层厚度关系

Fig.3 Relationship between RE content and thickness of nitrided layers

2.2 物相分析

图 4 为不同稀土含量对渗氮层 XRD 相结构的影响。

由图可以看出, 基体 α -Ti 的主要衍射峰(100)和(101)在渗氮后强度明显下降, 并出现了比较明显的 δ -TiN(111)和(200)两个衍射峰。渗氮过程加入稀土使得衍射峰整体加强, 并随着稀土加入量增多, δ -TiN(111)和(200)峰相对强度逐渐增强。加入稀土会造成衍射峰向低角度偏移大约 0.5° 。Yildiz 等人^[15-16]在研究钛合金等离子渗氮的过程中也发现了 α -Ti 峰的偏移, 这是由于渗入的 N 原子造成了 α -Ti 晶胞的增大。本试验在渗氮过程中加入稀土, 衍射峰的偏移更加明显, 这应是半径更大的稀土原子进入钛合金晶格, 导致

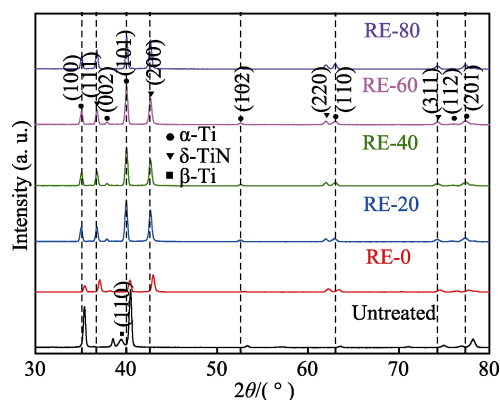


图 4 不同稀土含量对钛合金渗氮层相结构的影响

Fig.4 Effect of RE content on the phase structure of nitrided layers

钛晶胞畸变更明显。此外,由于大半径稀土原子扩散进入到钛合金中无法与钛形成化合物,一般以间隙原子的形式存在于晶格间,从而形成了大的扩散通道,有利于氮原子的扩散,因而随着稀土含量的增加,化合物层厚度增加。

2.3 显微硬度分析

TC4 钛合金基体的平均硬度为 $350\text{HV}_{0.05}$, 经过渗氮处理后, 其表面硬度均有明显的提高, 具体如表 3 所示。由表可知, 未加稀土的 TC4 渗氮层硬度值为 $950\text{HV}_{0.05}$, 而当通入稀土达到 60 mL/min 时, 渗氮层表面硬度值达到 $1272\text{HV}_{0.05}$, 接近于 TC4 基体材料硬度值的 4 倍, 较未加稀土的渗氮样品提高了约 30%。可以看出, 在渗氮过程中, 随着稀土含量的增加, 钛合金渗层表面硬度先增加后减小, 这与渗氮层深度变化趋势相一致。汤海芳^[17]在综述稀土对高温钛合金的影响中提出, 稀土的加入量是影响性能最为关键的因素, 含量过少作用不明显, 过多则会导致稀土元素在晶界处富集, 材料性能恶化。

表 3 不同稀土含量对渗氮层表面硬度的影响

Tab.3 Effect of RE content on the hardness of nitrided layers

RE/(mL·min ⁻¹)	0	20	40	60	80
Microhardness(HV _{0.05})	950	1020	1178	1274	1205

图 5 是稀土含量对显微硬度梯度的影响。可以看到, 未加稀土时, 由于形成的渗层扩散区较浅, 因此硬度下降较快, 脆性较大。加入稀土后, 渗氮过程中有较多的 N 原子通过扩散进入基体内部, 硬度较高, 因此渗层梯度变化较为缓和, 在表面以下 $40\text{ }\mu\text{m}$ 处的硬度为 600HV , 说明扩散层中 N 原子起到了良好的固溶强化效果。当更多的稀土原子渗入钛合金基体时, 可以为 N 原子的扩散提供大量的通道, 当稀土为 60 mL/min 时, 渗层获得最好的硬度梯度。

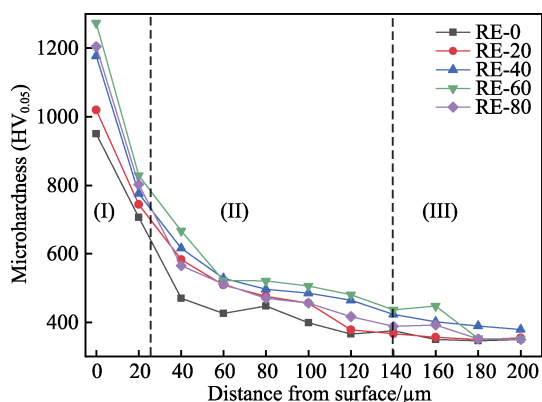


图 5 稀土含量对等离子渗氮层硬度梯度的影响

Fig.5 Effect of RE content on the hardness distribution of nitrided layers

图 6 为渗氮过程中, 稀土元素的作用原理示意图。钛合金等离子渗氮过程是活性氮原子在材料表面

发生的吸附和扩散过程。如图 6 所示, 未加入稀土时, 氮原子通过晶界扩散进入材料内部, 在表面形成氮化物层。当表面逐渐形成一层致密性较高的氮化物层后, 后继原子难以通过氮化物层进行扩散, 因此氮化层深度有限。当加入稀土后, 渗氮过程中, 原子半径较大的稀土元素在晶界富集, 造成钛原子点阵的较大畸变, 这有利于增加氮原子的扩散通道, 加速氮原子的扩散, 可以获得更深的氮化物层和扩散层。扩散层使化合物层与基体的结合更为牢固, 促进表面硬度的提高, 形成如图 5 的硬度梯度。

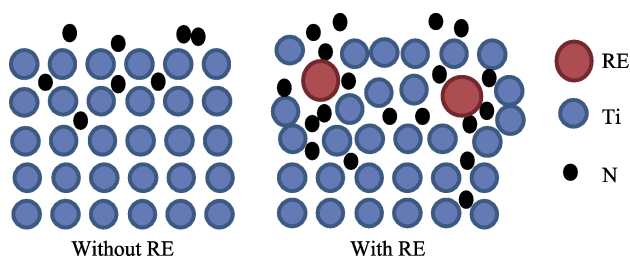


图 6 等离子渗氮稀土作用原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of the rare earth on plasma nitriding

2.4 摩擦学性能分析

图 7 是摩擦系数随时间的变化情况。试验结果表明, TC4 钛合金基体的平均摩擦系数为 0.35, 摩擦系数随试验时间的延长而逐渐上升, 说明在与氮化硅球对磨的过程中, 未经处理的钛合金的磨损越来越严重; 而经过稀土渗氮处理的钛合金的摩擦系数分别为 0.35 (RE-0)、0.30 (RE-20)、0.31 (RE-40)、0.27 (RE-60)、0.29 (RE-80)。表明渗氮过程加入稀土对钛合金起到了较好的减摩作用, 当稀土速率为 60 mL/min 时, 试样摩擦系数最低。

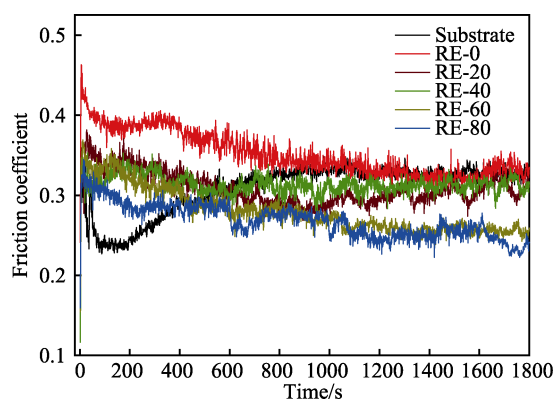


图 7 稀土含量对渗氮层摩擦系数的影响

Fig.7 Effect of RE content on the friction coefficient of nitrided layers

图 8 给出了不同稀土含量对渗层磨损率和表面硬度的影响。可以看出, 渗氮处理可以明显提高 TC4 钛合金表面的耐磨性能。随着稀土含量的增加, 磨损率逐渐降低, 当渗氮过程稀土通入量为 60 mL/min

时，其磨损率 ($1.586\times10^{-4}\text{ mm}^3/\text{mN}$) 相比于未加稀土的样品 ($2.933\times10^{-4}\text{ mm}^3/\text{mN}$)，降低了 46%。这主要是适量稀土的加入细化了渗层组织，提高了渗层表面硬度。有研究认为，稀土的加入使摩擦磨损产生的微裂纹扩展路径因其绕过机制而曲折化，获得了良好的抵制裂纹拓展的能力，从而减轻了材料的磨损^[8]。从表 4 可以看出，经过渗氮处理的试样的磨痕深度明显下降，其磨损深度约为 $30\text{ }\mu\text{m}$ ，可以有效地抵御磨损；此外，稀土加入速率不超过 40 mL/min 的样品的磨痕深度都超过了 $30\text{ }\mu\text{m}$ ，说明其化合物层已经被磨破，而其摩擦系数曲线并未发生明显的变化，说明渗氮形成的扩散层也具有较好的耐磨性能。

图 9 为磨损后的 3D 磨痕形貌，结合表 4 中的数据可以看出，未经处理的基体样品的磨痕轮廓较宽，且不规整。这是由于 TC4 基体较软，摩擦过程发生严重的粘着磨损(磨料被磨屑推动堆积到一定位置后产生的粘着台阶)；而经过渗氮处理的 RE-0、RE-60 样品的磨痕轮廓清晰且宽度均匀，磨痕轨迹没有发现“台阶”现象。

图 10 是磨痕表面 SEM 形貌图。可以看出，TC4

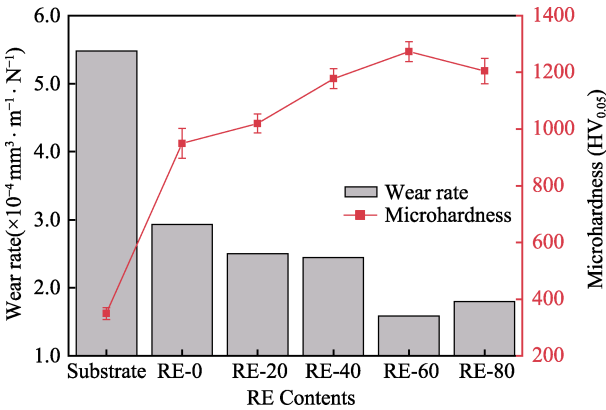


图 8 磨损量与渗层表面硬度
Fig.8 The wear rate and the surface hardness of the nitrided layers

表 4 TC4 基体与渗氮层的磨痕宽度和深度
Tab.4 Wear scar width and depth of TC4 substrate and nitrided layers

Samples	Substrate	RE-0	RE-20	RE-40	RE-60	RE-80
Width/ μm	1556	1408	1302	1321	1155	1169
Depth/ μm	54.45	39.09	34.26	32.63	23.50	27.66

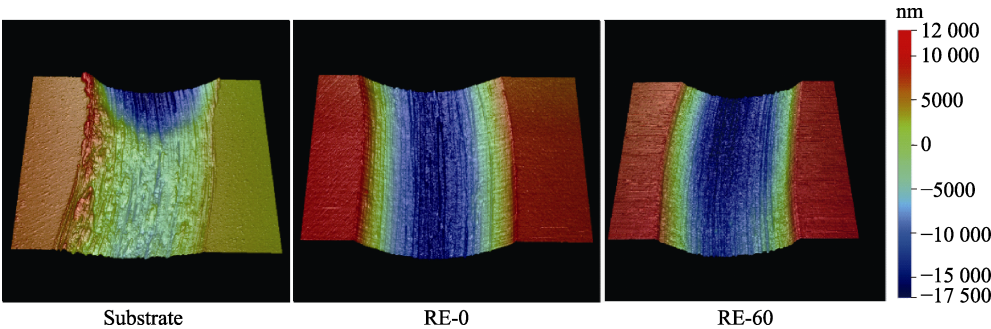


图 9 不同试样的 3D 磨痕形貌
Fig.9 3D morphology of wear scar on different samples

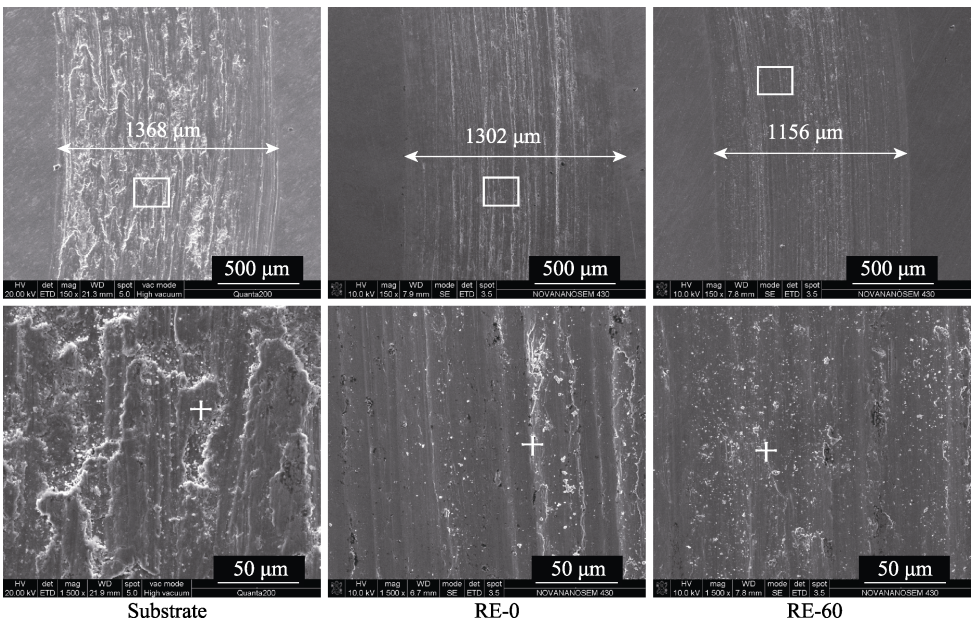


图 10 摩擦磨损试验后的磨痕形貌
Fig.10 Wear trace morphology after dry wear tests

基体材料的磨痕有明显的磨粒磨损和粘着磨损特性。由于钛合金具有较强的亲和力,在摩擦过程中的高温与压力作用下,很容易产生粘着磨损现象。同时,在磨损过程中,磨屑材料产生加工硬化现象形成的硬质颗粒以及氮化硅磨损产生的硬质颗粒,又会产生磨粒磨损,进一步加剧界面磨损。另外,钛合金较为活泼,导热性较差,摩擦生热易与氧结合生成氧化物,发生氧化磨损,EDS 结果(表 5)表明基体磨痕有较多的 O (21.71%)。钛合金经过等离子渗氮处理后(如图 10 中 RE-0),磨损现象较为轻微,磨痕犁沟较细,但是仍存在少量粘着和氧化现象,从其磨痕形貌还可以看到少量撕裂现象存在。而经过稀土渗氮处理的样品(图 10 中 RE-60)的磨痕几乎没有粘着现象发生,磨痕表面较为平整,EDS 表明其氧化磨损现象也得到了改善。渗氮层耐磨性提高的主要原因在于,表面生成的高硬相氮化物减少了磨损和粘着;此外,稀土的加入细化了组织,增强了表面硬度,也使材料的耐磨性得到提高。

表 5 磨损试样的 EDS 分析
Tab.5 EDS analysis of worn samples

Sample	Element/%					
	Ti	Al	V	Si	C	O
Substrate	61.11	4.87	4.61	0.98	6.72	21.71
RE-0	73.82	4.47	3.75	0.83	—	17.13
RE-60	79.74	4.62	4.79	0.54	—	10.31

3 结论

1) 采用等离子体渗氮技术对 TC4 钛合金进行了处理,渗氮层主要由表面化合物层和扩散层组成,增加稀土含量,可以提高表面 δ -TiN 相含量。

2) 稀土的加入可以有效提高渗速,且随着稀土含量的增加,化合物层厚度增加,表面硬度提高到 1274 HV,硬度梯度更加平缓。

3) 加入稀土可以有效提高钛合金渗氮层的耐磨性能,当加入稀土量为 60 mL/min 时,钛合金摩擦系数为 0.27,磨损率为 $1.586 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,粘着磨损现象明显降低,耐磨性能提高。

参考文献:

- [1] YOSHIMITSU Y, ICHIKI R, KASAMURA K, et al. Atmospheric-pressure-plasma nitriding of titanium alloy[J]. Japanese journal of applied physics, 2015, 54(3): 030302.
- [2] 屠振密, 李宁, 朱永明. 钛及钛合金表面处理技术和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [3] TU Zhen-mi, LI Ning, ZHU Yong-ming. Surface treatment technology and application of titanium and its alloy[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [4] ANI Z, WEI S, SAVKO M, et al. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods[J]. Surface & coat-

- ings technology, 2005, 200: 2192.
- [4] JACQUOT P, BUVRON M, SOUCHARD J P. Plasma nitriding and plasma carburizing of pure titanium and Ti6Al4V alloy[J]. Materials science forum, 1992, 102-104: 301-318.
- [5] JIN J, DUAN H, LI X. The influence of plasma nitriding on microstructure and properties of CrN and CrNiN coatings on Ti6Al4V by magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2016, 136: 112-120.
- [6] HOSSEINI S R, AHMADI A. Evaluation of the effects of plasma nitriding temperature and time on the characterisation of Ti6Al4V alloy[J]. Vacuum, 2013, 87: 30-39.
- [7] 王琳, 孙赞, 王枫, 等. TC4 钛合金的离子渗氮工艺[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 171-175.
- [8] WANG Lin, SUN Yun, WANG Feng, et al. Plasma nitriding of TC4 titanium alloy[J]. Heat treatment of metal, 2018, 43(9): 171-175.
- [8] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的作用与机理[J]. 中国有色金属学报, 1996(2): 15-20.
- [9] DU Ting. The effect and mechanism of rare earth elements in metals[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 1996(2): 15-20.
- [9] 唐相国, 代明江, 韦春贝, 等. 不同稀土掺杂固体渗铬对 Cr-RE 渗层结构及性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 168-175.
- [10] TANG Xiang-guo, DAI Ming-jiang, WEI Chun-bei, et al. Influence of solid chromizing doped with various rare earths on microstructures and properties of Cr-RE coatings fabricated by pack cementation[J]. Surface technology, 2018, 47(10): 168-175.
- [10] 陈方生, 刘玉先, 徐军, 等. 稀土催渗离子渗氮机理的研究[J]. 金属热处理, 1999(2): 7-9.
- [11] CHEN Fang-sheng, LIU Yu-xian, XU Jun, et al. Study on catalysis mechanism of plasma-nitriding by rare-earth element[J]. Heat treatment of metals, 1999(2): 7-9.
- [11] 程先华, 丁定远. 稀土元素在碳氮共渗过程中的作用[J]. 中国表面工程, 1989(1): 26-29.
- [12] CHENG Xian-hua, DING Ding-yuan. The role of rare earth elements in the process of carbonitriding[J]. China surface engineering, 1989(1): 26-29.
- [12] 胡德昌. 稀土元素在气体碳氮共渗中的作用研究[J]. 宇航材料学, 1992(1): 25-30.
- [13] HU De-chang. The role of rare earth elements in gas carburizing[J]. Aerospace material technology, 1992(1): 25-30.
- [13] 韦永德, 刘志如, 王春义, 等. 稀土对碳氮共渗过程的活化催化及微合金化研究[J]. 中国稀土学报, 1986(1): 50-55.
- [14] WEI Yong-de, LIU Zhi-ru, WANG Chun-yi, et al. Effect of rare earth elements on surface activating and micro-alloying of carbonitriding process and its application[J]. Chinese journal of rare earth, 1986(1): 50-55.
- [14] JI Z S. Effect of rare earth on B-Al permeating and computer kinetic simulation of permeation layer forming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999(4): 791-795.
- [15] YILDIZ F, YETIM A F, ALSARAN A, et al. Plasma nitriding behavior of Ti6Al4V orthopedic alloy[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202(11): 2471-2476.
- [16] YETIM A F, CELIK A, ALSARAN A. Improving tribological properties of Ti6Al4V alloy with duple surface treatment[J]. Surface & coatings technology, 2010, 205: 320-324.
- [17] 汤海芳, 赵永庆, 权洪, 等. 稀土元素对高温钛合金组织和性能的影响[J]. 钛工业进展, 2010, 27(1): 21-26.
- [17] TANG Hai-fang, ZHAO Yong-qing, QUAN Hong, et al. Effects of rare earth elements and properties of high temperature titanium alloy[J]. Titanium industry process, 2010, 27(1): 21-26.