DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3185

渗硼对 60NiTi 合金表面组织与性能的影响

官　磊[1],谭翠翠[2],陈树群[2],彭　健[3]

(1. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095; 2. 北京工业大学 材料与制造学部,北京 100124; 3. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430070)

摘　要:60NiTi 合金具有高硬度、低弹性模量、耐腐蚀等优点,被认为是极具应用潜力的新型航空航天轴承材料。为了进一步提升 60NiTi 合金的耐磨特性,本文利用固相渗硼技术对其进行了表面改性处理,研究了改性层的显微结构特征及其相结构的热力学形成机理,分析了表面改性对合金力学与摩擦学性能的影响规律。结果表明,60NiTi 经 1 000 ℃-5 h 渗硼处理后形成了 TiB_2 /$NiTi_2$+TiB_2/Ni_3Ti 的梯度涂层结构,整体厚度约 20 μm。渗硼后样品的表面硬度从 420 $HV_{0.2}$ 提升至 2 600 $HV_{0.2}$,20 N 外加载荷作用下的平均摩擦系数和磨损率分别降低了约 39%和 92%。由于摩擦热的作用,渗硼样品表面会生成具有润滑作用的氧化硼相,因此呈现出良好的减摩耐磨特性。

关键词:60NiTi 合金;固相渗硼;热力学计算;耐磨性能

中图分类号:TG146; TG156.8　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)10-0923-06

Effects of Boriding Treatment on the Surface Structure and Properties of 60NiTi Alloy

GUAN Lei[1], TAN Cuicui[2], CHEN Shuqun[2], PENG Jian[3]

(1. AECC, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: With high hardness, low elastic modulus and good corrosion resistance, 60NiTi alloys have been regarded as an ideal candidates for next generation aerospace bearings. In this study, pack boriding experiments were performed on 60NiTi alloys at the temperature of 1 000 ℃ for 5 h to improve wear resistance. The surface microstructure, mechanical and friction properties were systematically studied. The boronised layer shows a multilayer structure of TiB_2/$NiTi_2$+TiB_2/Ni_3Ti with a total thickness of ~20 μm. After boriding treatment, the surface hardness of 60NiTi alloy is increased from 420 $HV_{0.2}$ to 2 600 $HV_{0.2}$, while the coefficients of friction and wear rate are reduced by 39% and 92%, respectively, under the normal load of 20 N. The improved wear resistance of the borided specimens is achieved by the formation of boron oxide protective layers via shear-induced oxidation.

Key words: 60NiTi alloy; pack boriding; thermodynamic calculation; wear resistance

60NiTi 合金(Ni:Ti 质量分数比为 60:40)具有低弹性模量、高硬度、优异耐蚀性、无磁性、质轻和导电等优点,被认为是最具应用潜力的新型航空航天轴承材料[1-3]。早在 20 世纪 50 年代,60NiTi 合金就已经被美国海军军械实验室成功研制,但直到 2000 年之后其优异的综合特性才逐渐被美国国家宇航局(NASA)所发掘,目前 60NiTi 最典型的应用场景为国际空间站净水系统用耐蚀轴承[4-5]。近年来随着我国空天技术的快速发展,对于 60NiTi 合金的关注与研究正在显著增多。从 2017 年起,四川大学、北京航空航天大学、中南大学和上海工程技术大学等先后开展了热处理对铸态和变形态 60NiTi 合金第二相析出及力学性能的影响研究, 建立了合金相结构与性能间的关联[6-10]。2022 年,深圳大学和西安建筑科技大学相关学者还利用粉末冶金法制备了高致密 60NiTi 合金,并对其组织结构、力学与摩擦学特性

收稿日期:2023-07-07

基金项目:国家自然科学基金(51904015)

作者简介:官　磊,1981 年生,博士,高级工程师. 主要从事智能材料、先进轴承材料等研究工作. Email: guanlei06@tsinghua.org.cn

通讯作者:陈树群,1989 年生,博士,副教授. 研究方向为金属表面改性及涂层研究工作. Email: chensq@bjut.edu.cn

引用格式:官磊,谭翠翠,陈树群,等. 渗硼对 60NiTi 合金表面组织与性能的影响[J]. 铸造技术,2023,44(10): 923-928.

GUAN L, TAN C C, CHEN S Q, et al. Effects of boriding treatment on the surface structure and properties of 60NiTi alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 923-928.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进行了深入分析[11-12]。

除了内部组织调控，表面改性(如化学热处理、离子注入等)是提升金属材料使用性能的另一经典手段，但国内外对于 60NiTi 合金表面改性的研究非常有限。2016 年，Ucar 等[13]采用化学热处理渗硼的方式对 60NiTi 合金进行了改性处理，合金表面硬度提高至 1 800 $HV_{0.1}$ 以上。2021 年 Yan 等[14]对 60NiTi 合金进行了硼离子注入改性，合金在海水环境中的腐蚀磨损率降低了一个数量级。可以看出硼元素的引入对于 60NiTi 耐磨性能的提升具有积极作用，但上述研究中对于表面硼化层的结构解析十分匮乏。基于此，本文首次对 60NiTi 合金表面硼化改性层的显微结构及其相结构的热力学形成机理进行了系统分析，并探究了渗硼处理对样品力学与摩擦学性能的影响规律，解析了相应的摩擦磨损机制，为 Ni-Ti 合金化学热处理过程的后续优化提供一定的理论支撑。

1 实验方法

实验材料使用由中国航发北京航空材料研究院自行研制的轧制态 60NiTi 合金基材。首先将样品线切割成 15 mm×15 mm×2 mm 小片，用 400~2000 目金相砂纸逐一对样品进行磨光处理，再用酒精、去离子水超声清洗 10 min 后烘干备用。采用固相包埋渗的方法对 60NiTi 合金进行渗硼处理，渗剂组分由 B_4C 粉(纯度 99%，黑龙江省牡丹江市碳化硼厂)、KFB_4 粉(分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司)、ZrO_2 粉(分析纯，麦克林生化科技股份有限公司)和 Al_2O_3 粉(分析纯，麦克林生化科技股份有限公司)组成，质量分数分别为 92%、1%、3%和 4%。使用前，将各试剂称重后混合均匀，并加热至 150 ℃保温 2 h 进行脱水处理。之后，将样品与渗剂一同放入管式热处理炉中，渗硼温度和保温时间分别设定为 1 000 ℃和 5 h，整个过程使用氩气进行保护。

利用 XRD(Bruker D8 Advance)、SEM(JEOL JSM 7200F)、TEM(FEI Talos F200X)和 EDS(Oxford X-Max)对 60NiTi 合金表面改性层的显微结构进行系统分析。在此基础上，结合热力学相图计算探明 Ni-Ti-B 三元合金在 1 000 ℃时的平衡相组成，进而解释改性层形成的原因。利用维氏硬度计测试了样品的表面显微硬度。最后，利用 CFT-1 型材料表面性能综合测试仪测试 60NiTi 基体及渗硼样品的摩擦系数曲线和磨痕体积，进而采用式(1)计算出相应的磨损率。

$$K=V/FL \tag{1}$$

式中，V 为磨痕体积；F 是施加载荷；L 为总滑动距离。摩擦磨损试验后，采用 SEM 和 EDS 对磨痕特征进行分析。

2 实验结果及讨论

图 1 为 60NiTi 合金渗硼处理前后的 XRD 图谱。对于轧制态基体而言，其主要由 NiTi 相组成，并含有少量的 $NiTi_2$ 和 Ni_3Ti 相。经过高温硼化处理后，样品表面物相结构发生了明显转变，变成了 TiB_2、$NiTi_2$ 和 Ni_3Ti 的混合组织。与前期 Ucar 等[15]报道的 55NiTi 合金表面硼化结果相比，利用氧化铝替代碳化硅为填充剂的举措，有效避免了多孔疏松的 NiSi 和 Ni_2Si 相产生，实现了渗硼层相结构的优化。此外，渗硼样品中未检测到硼化镍相的生成，这可能是因为热力学平衡条件下 B 元素会优先与 Ti 元素发生反应。

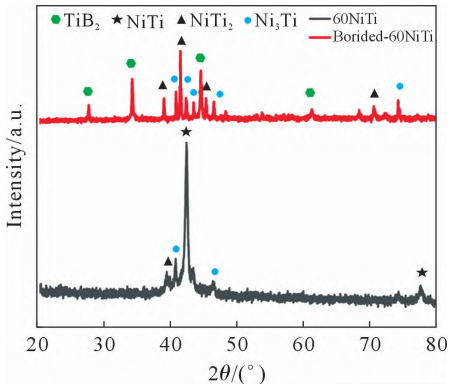


图 1 60NiTi 基体及硼化处理样品的 XRD 图谱

Fig.1 Comparison of the XRD patterns of 60NiTi alloy before and after boriding treatment

图 2 为 60NiTi 合金经 1 000 ℃-5 h 渗硼处理后的截面组织形貌图(EDS 能谱分析结果见表 1)。从不同倍数背散射 SEM 图可以看出，渗层在厚度方向呈现出较为清晰的梯度分层结构。其中颜色最深的顶层约 5 um 厚，EDS 结果显示该层富含 B 元素和 Ti 元素(原子比约 2.6)，结合 XRD 分析推断其应为 TiB_2 硼化物。图 2c 为硼化层的 TEM 图片，可以看出硼化钛层十分致密且颗粒尺寸细小(小于 100 nm)，这对获得高表面硬度十分有利。在顶层下方存在一个约 5 um 厚的次顶层，该层由颜色相对较深的主相和深色的条状析出相构成，其中主相晶粒形貌不规则，析出相宽度为亚微米级。对条状组织进行 EDS 分析发现其含有高含量 B 元素和 Ti 元素，应为 TiB_2 相；而主相区域富含 Ti 和 Ni(原子比约 1.7)，应该为 $NiTi_2$ 相；因此次顶层很可能是 $NiTi_2$ 相和 TiB_2 相的混合组织。在次顶层之下，还观测到一个约 10 um 厚的过渡层，其晶粒组织较为粗大并呈现柱状晶特征，EDS

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

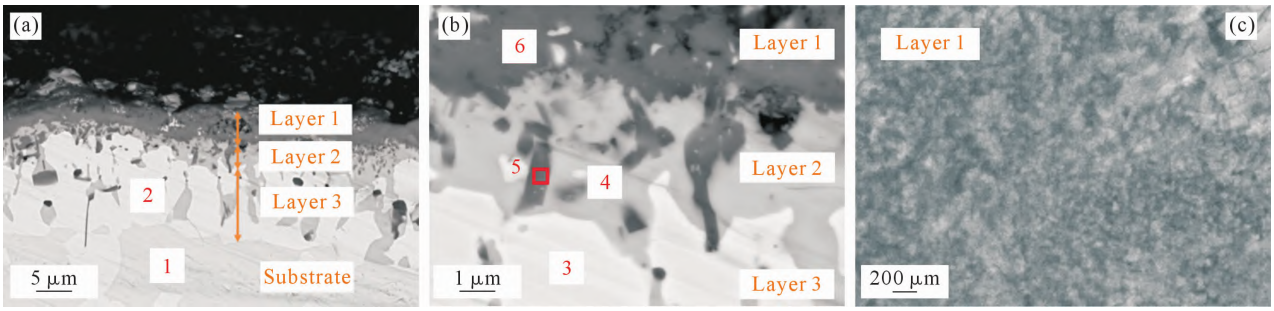


图 2　不同放大倍数下 60NiTi 合金硼化改性层的截面形貌图：(a~b) SEM 图片，(c) TEM 图片

Fig.2　Cross-sectional morphology of the boride coating on 60NiTi alloy at different magnifications: (a~b) SEM, (c) TEM

表1 60NiTi合金硼化处理样品的截面EDS数据

Tab.1 The chemical compositions of selected areas in Fig. 2 (atomic fraction/%)

位置	B	Ti	Ni
区域 1	-	48.0	52.0
区域 2	-	25.3	74.7
区域 3	-	24.8	75.2
区域 4	-	63.4	36.6
区域 5	66.6	28.9	4.5
区域 6	72.2	27.0	0.8

结果显示其富含 Ni 和 Ti (原子比均接近 3)，结合 XRD 结果推断该层应为 Ni_3Ti相。最后，在合金基体处的 Ni:Ti 原子比约为 1.1，应为 NiTi 相。综合以上分析，经渗硼处理后 60NiTi 合金表面形成了 TiB_2 硼化层/$NiTi_2$+TiB_2 混合层 /Ni_3Ti 过渡层的梯度涂层结构。由于改性层整体厚度较大(~20 um)，X 射线难以穿透这一区域，因此 XRD 结果中并能呈现出基体 NiTi 相信息。

为了更好地解释上述梯度涂层结构的形成机理，利用 Thermo-Calc 软件对 Ni-Ti-B 三元合金进行一系列的热力学相图计算。图 3 为 Ni-Ti-B 三元合金 1 000 ℃等温截面，可以看出该温度下 60NiTi 合金基体主要由 NiTi 和 Ni_3Ti 两种相组成。当 B 元素引入后，Ni_3Ti 相首先被溶解形成了 NiTi+Liq(液相富含 Ni-Ti-B 元素)双相组织。随着硼元素含量的进一步增加，NiTi 相不断被液相溶解直至消失，但

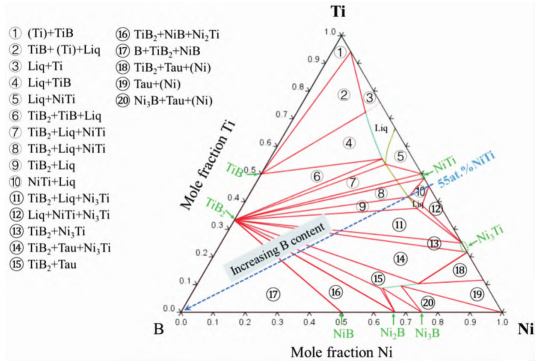


图 3　Ni-Ti-B 三元系相图 1 000 ℃等温截面

Fig.3　Calculated isothermal section of the Ni-Ti-B phase system at 1 000 ℃

与此同时在液相会析出 TiB_2 相，形成 TiB_2+Li_q 双相组织。在高温加热过程中，正是这些 TiB_2 颗粒不断从液相中析出实现了硼化层厚度的增长。若 B 含量继续增加，液相又会析出 Ni_3Ti 相直至液相完全消失。以上相结构变化规律可由图中虚线所示。结合对 60NiTi 渗硼样品的结构分析，热力学计算结果很好的解释了梯度涂层中 TiB_2 层和 Ni_3Ti 层形成的原因。此外，对于 $NiTi_2$+TiB_2 混合层，我们推断应该是富含 Ni-Ti-B 元素的液相经凝固后形成的固相组织，因此呈现出无规则形貌。在凝固过程中由于溶解度下降 TiB_2 会不断析出，同时其生长受束缚较小因此形成了独特的条状组织。

在完成显微结构分析之后，我们对 60NiTi 基体及硼化处理样品进行了硬度测试，所有测试均采用维氏硬度计，载荷为 200 g。结果显示合金基体的硬度约为 420 $HV_{0.2}$，经渗硼处理后表面硬度显著提升至约 2 600 $HV_{0.2}$，较基体增长了 5 倍以上。根据相关文献报道，TiB_2 室温下的显微硬度仅次于金刚石、立方 BN 和 B_4C，这主要归因于其复杂的键型结构，既同时具有强 Ti-B 离子键和 B-B 共价键[16]。

图 4a~b 为 60NiTi 基体及硼化处理试样在与氮化硅球对磨时的摩擦系数曲线，试验分别在 5、10 和 20 N 恒定载荷下进行，测试时间均为 30 min。从图中可以看出，随着磨损时间的延长，摩擦系数呈现出先增大后减小再趋于平衡的趋势，即经历了跑合期、上升期以及稳定期[17]。通常认为，摩擦初期对磨副材料之间相互接触的微凸起较少，所受的切向阻力也较小，摩擦系数也相对较小；随着摩擦时间的延长，试样表面微凸起不断被磨平或脱落，摩擦副实际接触面积不断增大，导致摩擦力与摩擦系数相应增加[18]。进一步分析发现，60NiTi 的平均摩擦系数稳定在 1.1 左右，并随载荷变化的幅度很小；而渗硼处理试样的平均摩擦系数分别为 0.97(5 N 载荷)、0.71(10 N 载荷)和 0.67(20 N 载荷)，呈现出一定的润滑特性。在完成摩擦磨损实验之后，我们通过二维表面轮廓仪测量磨痕的磨损体积，进而计算出试样的磨

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

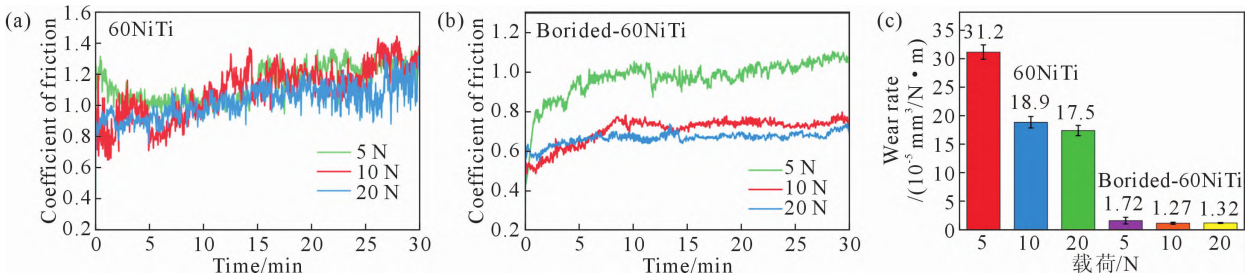


图 4 不同载荷下 60NiTi 基体及硼化处理样品的摩擦性能数据:(a~b) 摩擦系数,(c) 磨损率

Fig.4 The friction properties of bare and borided 60NiTi alloys under different loads: (a~b) the coefficient of friction (COF) curve, (c) wear rate

损率值。如图 4c 所示,硼化处理后试样磨损率较基体下降了 90%以上,合金耐磨性能得到显著提升。

图 5 为不同载荷条件下 60NiTi 基体及硼化处理试样的磨痕形貌。首先可以看出硼化处理样品的磨痕宽度(380~520 um)均显著小于基体样品(980~1 300 um),这与磨损率的计算结果一致。具体来说,对于 60NiTi 合金,在 5 N 载荷下其磨痕存在大量的深犁沟, 为典型的磨粒磨损,EDS 结果显示表面氧含量只有 5.6%(原子分数)(区域 1),说明氧化磨损程度较低;当载荷增加到 10~20 N 后,除了深犁勾外磨痕处还出现了大量的磨屑黏着,能谱分析显示黏着区富含 Ni 元素、Ti 元素和 O 元素(区域 3 和区域 6),应为镍氧化物和钛氧化物,因此其磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。在干摩擦条件下,由于摩擦热的作用基体金属会不断被氧化并形成金属氧化物磨屑,而滑动使大量的磨屑被碾碎、挤压并敷抹在两个相对运动的摩擦表面[19]。根据我们前期研究结果,界面摩擦热与外加载荷、摩擦系数呈线性关系[20],这也是 5 N 载荷下 60NiTi 磨痕未呈现明显氧化的原因。同时从 60NiTi 样品的高摩擦系数结果来看,氧化镍和氧化钛并不具有润滑效果。

对于硼化处理样品, 不同载荷下的磨痕特征也差异显著。当载荷为 5 N 时,磨痕表面存在细小的犁沟,为轻微磨粒磨损;EDS 结果显示磨痕表面富含 B 元素和 Ti 元素(区域 2),说明高硬度的硼化钛层在低载荷作用下没有被完全磨损, 呈现出良好的耐磨

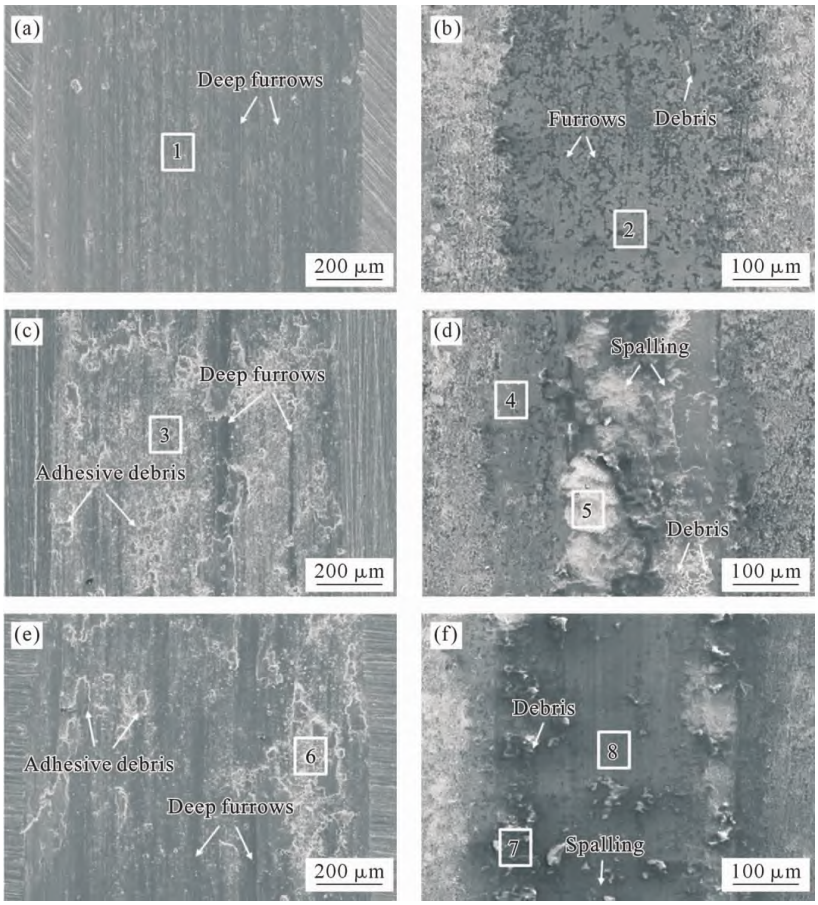


图 5 不同载荷下 60NiTi 基体及硼化处理样品的磨痕形貌图:(a~b) 5 N, (c~d) 10 N, (e~f) 20 N

Fig.5 SEM images of the worn surfaces of bare and borided 60NiTi alloys under different loads: (a~b) 5 N, (c~d) 10 N, (e~f) 20 N

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性能。当载荷增加至 10 N 时,沿滑动方向磨痕表面出现连续粗糙的剥落和少量磨屑黏着,对剥落区域 5 进行能谱分析发现含有极高含量的 O 元素(71.6%,原子分数)和一定量的 Ti 元素,说明发生了严重的氧化磨损,同时区域 4 的高 Ni 含量代表了硼化钛层已经被磨损耗尽。当载荷为 20 N 时,磨痕表面出现了细小的犁沟以及粒状磨屑,磨损机制与 10 N 载荷相似。基于上述分析,我们推测在 10~20 N 高载条件下,硼化钛层由于摩擦热的作用被氧化生成了氧化钛和氧化硼。由于氧化硼熔点较低(约 450 ℃),TiB_2 材料经一定温度氧化后即会形成表层为液相 B_2O_3 和内层为 TiO_2 的梯度氧化物结构[21-22]。在摩擦过程中,液相氧化硼易黏附在磨球表面从而降低界面摩擦系数。因此,硼化处理的 60NiTi 样品呈现出低摩擦系数和低磨损率,即良好的减摩特性。

表2 60NiTi基体及硼化处理样品磨痕的EDS数据
Tab.2 The chemical compositions of selected areas in Fig. 5 (atomic fraction/%)

位置	Ni	Ti	O	B
区域 1	56.3	40.7	5.6	-
区域 2	2.1	35.0	1.5	61.1
区域 3	46.0	35.8	17.6	-
区域 4	38.3	27.2	38.3	-
区域 5	5.8	17.2	71.6	-
区域 6	44.7	34.5	18.6	-
区域 7	8.7	14.1	70.5	-
区域 8	37.6	33.8	27.7	-

3　结论

(1)利用固相渗硼技术在 60NiTi 合金表面成功制备了 $TiB_2/NiTi_2+TiB_2/Ni_3Ti$ 梯度改性层,合金硬度从 420 $HV_{0.2}$ 提升至 2 600 $HV_{0.2}$。

(2)相比于 60NiTi 基体,渗硼处理后的试样在与氮化硅球对磨时具有更低的摩擦系数和磨损率,呈现出优良的减摩耐磨特性。

(3)硼化钛层自身的高硬度以及摩擦过程中生成的氧化物润滑相,是 60NiTi 渗硼样品在不同载荷条件下具有低磨损率的原因。

参考文献:

[1] 张家华,肖飞,王建中,等. 航天轴承新贵: 60NiTi 合金[J]. 金属热处理,2021, 46(6): 1-7.
ZHANG J H, XIAO F, WANG J Z, et al. New material for aerospace bearing: 60NiTi alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(6): 1-7.

[2] 黄雄荣,邵若男,朱淋淋. NiTi 合金与增材制造——下一代航空航天轴承用材料[J]. 热处理,2022, 37: 1-4.
HUANG X R, SHAO R N, ZHU L L. NiTi alloys and additive manufacturing—materials for next generation aerospace bearings [J]. Heat Treatment, 2022, 37: 1-4.

[3] 赵海燕,钮文良,刘琨. NiTi 形状记忆合金马氏体相变研究[J]. 铸造技术,2014, 35(6): 1138-1140.
ZHAO H Y, NIU W L, LIU K. Study on martensitic phase transformation of NiTi shape memory alloy [J]. Foundry Technology, 2014, 35(6): 1138-1140.

[4] DELLACORTE C, PEPPER S V, NOEBE R, et al. Intermetallic nickel-titanium alloys for oil-lubricated bearing applications [R]. No. NASA/TM-2009-215646, 2009.

[5] MILLER C, DELLACORTE C, ZOU M. Nanomechanical properties of hardened 60NiTi [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800: 140284.

[6] 张瑞谦,覃秋慧,文玉华. 热处理对铸态 60NiTi 合金第二相析出与硬度的影响[J]. 材料热处理学报,2017, 38(3): 76-82.
ZHANG R Q, QIN Q H, YU W H. Effects of heat treatment on precipitation of second phases and hardness of as-cast 60NiTi alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(3): 76-82.

[7] XU G X, ZHENG L J, ZHANG F X, et al. Influence of solution heat treatment on the microstructural evolution and mechanical behavior of 60NiTi [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 698-706.

[8] LIU G, CHEN D, TAN F, et al. Effects of annealing on softening and hardening behaviors of 60NiTi alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 3220-3234.

[9] LI B, XU G X, ZHENG L J, et al. Dependence of microstructure and mechanical properties of 60NiTi alloy on aging conditions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 840: 142903.

[10] 王子阳,左舜贵,王盖世, 等. 冷却方式与时效温度对 60NiTi 合金硬度和组织的影响[J]. 轴承,2022(5): 46-55.
WANG Z Y, ZUO S G, WANG G S, et al. Effects of cooling methods and aging temperatures on hardness and microstructure of 60NiTi alloy[J]. Bearing, 2022(5): 46-55.

[11] ZHOU Y H, YAO X Y, LU W, et al. Heat treatment of hot-isostatic-pressed 60NiTi shape memory alloy: Microstructure, phase transformation and mechanical properties [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 107: 124-135.

[12] 王伟,孙壮,程鹏,等. SPS 烧结压力对 60NiTi 合金显微组织及摩擦学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2022, 51(10): 3793-3801.
WANG W, SUN Z, CHENG P, et al. Effects of SPS sintering pressure on microstructure and tribological properties of 60NiTi alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(10): 3793-3801.

[13] UCAR N, TURKU N, OZDEMIR A, et al. Boriding of binary Ni-Ti and ternary Ni-Ti-Cu shape memory alloys[J]. Acta Physica Polonica A, 2016, 130: 492-495.

[14] YAN C, ZENG Q F, HE W J, et al. Enhanced surface hardness and tribocorrosion performance of 60NiTi by boron ion implantation and post-annealing[J]. Tribology International, 2021, 155: 106816.

[15] UCAR N, DOGAN S, KARAKAS M S, et al. Boriding of binary Ni-Ti shape memory alloys [J]. Zeitschrift für Naturforschung A, 2016, 71(11): 1017-1020.

[16] 祝弘滨. 等离子喷涂 TiB_2-M 金属陶瓷复合涂层的组织结构和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性能研究[D]. 北京:北京工业大学,2014.
ZHU H B. Microstructure and properties of plasma sprayed TiB_2-M coating[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.

[17] 邓力群,邹树梁,唐德文. H13 表面 TiAlN/CrAlN 复合涂层的摩擦磨损性能研究[J]. 铸造技术,2016, 37(5): 918-921.
DENG L Q, ZOU S L, TANG D W. Friction and wear properties of TiAlN/CrAlN composite coating on H13 surface[J]. Foundry Technology, 2016, 37(5): 918-921.

[18] 贺甜甜,邵若男,刘建,等. 不同载荷下 GCr15 钢的滑动摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报,2020, 41(7): 105-110.
HE T T, SHAO R N. LIU J, et al. Sliding friction and wear properties of GCr15 steel under different loads[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(7): 105-110.

[19] 刘金龙,熊党生,张晓云. 摩擦氧化及其对磨损的作用[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(10): 177-180.
LIU J L, XIONG D S, ZHANG X Y. Friction oxidation and its effect on wear[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(10): 177-180.

[20] TAN C C, ZONG X M, ZHOU W Y, et al. Insights into the microstructure characteristics, mechanical properties and tribological behaviour of gas-phase chromized coating on GCr15 bearing steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 443: 128605.

[21] KOH Y H, LEE S Y, KIM H E. Oxidation behavior of titanium boride at elevated temperatures[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(1): 239-241.

[22] XUE P F, MENG Q S, CHEN S P, et al. Tribological property of $(TiC\text{-}TiB_2)_p$Ni ceramics prepared by field-activated and pressure-assisted synthesis[J]. Rare Metals, 2011, 30: 599-603.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net