

钛铝基多元合金氮化层的耐磨性能研究

张倩^{1,2}, 马兰^{2,3*}, 杨绍利^{2,3}, 朱奎松^{2,3}

(1. 成都理工大学材料与化学化工学院, 四川 成都 610059; 2. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀枝花学院钒钛学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:以攀枝花酸溶性钛渣、铝粉、氧化钙为原料制备钛铝基多元合金,并将钛铝基多元合金在不同温度不同时间条件下直接氮化处理,得到氮化层。采用扫描电镜、X射线衍射仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机、三维形貌仪等对制得的氮化层的性能进行检测分析。结果表明,在不同条件下对钛铝基多元合金进行直接氮化,均能提高合金的表面硬度及耐磨性。氮化温度对合金硬度及耐磨性能的影响较大,氮化时间为2 h时,适宜的氮化温度为800 ℃,此时氮化层的平均硬度(HV)高达698.8,平均摩擦系数为0.120,往复摩擦的磨损率为19.44 mm³/(N·m),表面粗糙度为0.731 μm;氮化温度为900 ℃时,适宜的氮化时间为3 h,此时得到的氮化层硬度(HV)为682.6,平均摩擦系数为0.059,往复摩擦的磨损率为9.48 mm³/(N·m),表面粗糙度为0.601 μm。

关键词:钛铝基多元合金;直接氮化;氮化层;耐磨性

中图分类号:TF823

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2023)05-0084-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on wear resistance of nitriding coatings of Ti-Al base multielement alloys

Zhang Qian^{1,2}, Ma Lan^{2,3*}, Yang Shaoli^{2,3}, Zhu Kuisong^{2,3}

(1. College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources in Sichuan, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. College of Vanadium and Titanium, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the titanium-aluminum-based multi-component alloy was prepared from Panzhihua acid-soluble titanium slag, aluminum powder and calcium oxide. After directly nitriding treatment at different temperatures and different time, a nitrided layer was obtained. Scanning electron microscopy, X-ray diffractometer, microhardness tester, friction and wear testing machine, and three-dimensional topography instrument were used to detect and analyze the properties of the nitriding layer. The results show that the surface hardness and wear resistance of Ti-Al based multielement alloy can be improved by direct nitriding under different conditions. The nitriding temperature has a great effect on the hardness and wear resistance of the alloy. When the nitriding time is 2 h, the optimum nitriding temperature is 800 ℃, the average hardness (HV) of the nitriding layer is up to 698.8, the average friction

收稿日期:2022-07-26

基金项目:攀枝花市重点科技计划项目(2021CY-G-14)。

作者简介:张倩,1997年出生,重庆合川人,硕士研究生,主要从事钒钛资源综合利用研究, E-mail: 1421735661@qq.com;

*通讯作者:马兰,1972年出生,女,四川资阳人,教授,主要从事钒钛新材料新技术及钒钛资源综合利用研究, E-mail: yangslsl@163.com。

coefficient is 0.120, the reciprocating friction wear rate is $19.44 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the surface roughness is $0.731 \mu\text{m}$. When the nitriding temperature is 900°C and the optimum nitriding time is 3 h, the hardness (HV) of nitriding layer is 682.6, the average friction coefficient is 0.059, the reciprocating friction wear rate is $9.48 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the surface roughness is $0.601 \mu\text{m}$.

Key words: Ti-Al base multi-element alloy, direct nitriding, nitriding layer, wear resistance

0 引言

钛铝合金具有高弹性模量、较高的高温强度、密度低等特点,且兼有金属与陶瓷的性能,因而广泛用于航空航天、汽车制造等领域^[1-7]。然而,钛铝合金室温下呈脆性,缺乏足够的延展性,变形加工性及耐磨性能较差。高钛铝合金耐磨性差造成材料损失、设备失效和能源浪费等问题,限制其应用领域。

氮化工艺因其能够制得在苛刻条件下使用依旧保持良好性能的耐磨材料而得到广泛应用^[8-9]。氮化物不仅熔点高、硬度大、热稳定性及耐磨性好,同时还具有良好的生物惰性,尤其是在高温、高压等复杂条件下应用时拥有明显的优势,因此氮化逐渐成为应用最广泛的表面强化技术^[10]。直接氮化与其它氮化技术相比,增强体是在金属基体内成核、自发长大,基体和增强体的相容性良好,界面结合强度较高^[11],制得的氮化层均匀、致密且不易脱落。同时免去了增强体预处理过程中的复杂步骤,使制备过程得到了简化,成本更低,无污染且适合大规模生产^[12-16]。

笔者以攀枝花酸性钛渣、铝粉、氧化钙为原料制备钛铝基多元合金,经精炼后进行直接氮化,一方面能提高合金的耐磨性,进一步挖掘其在工业生产、民用生活等领域的应用潜力;另一方面能够延伸钛资源产业链,进一步开拓钛原料应用领域。

1 试验材料与方法

以攀枝花酸性钛渣、铝粉、氧化钙为原料制备钛铝基多元粗合金,其化学成分见表1。将精炼后的合金切割至一定尺寸(微观形貌、物相及显微硬度的试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,摩擦磨损以及三维形貌检测试样尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),进行超声清洗、磨抛后 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 温度下在竖式管式气氛炉中直接氮化 $1 \sim 5 \text{ h}$;再利用 SEM 和 EDS、XRD、显微硬度计、三维形貌仪、摩擦磨损试验机对氮化样品进行微观形貌、微区成分、耐磨性测试研究。

表1 钛铝基多元合金化学组成
Table 1 Chemical composition of Ti-Al base multi-element alloy

Ti	Al	Fe	Si	Mn	O
50.11	38.16	6.88	1.43	3.35	0.07

2 结果与讨论

2.1 氮化温度对氮化层物相组成及微观结构的影响
有研究表明 Ti_2AlN 具有低的结合能^[13]。Ti 元素的结合能略低于 Ti 处于金属态时的结合能。而 Al 比处于金属态的 Al 的结合能要低 $0.5 \sim 2 \text{ eV}$ 。图1为钛铝基多元合金在不同温度下直接氮化的物相组成分析,发现各温度条件下均有 TiN、AlN、FeN 等氮化物生成。 $800、900^\circ\text{C}$ 氮化时物相基本保持不变,且没有 TiAl_2 析出。当温度达到 1000°C 及以上时, TiAl_2 析出并与 Ti_2AlN 、AlN、TiAl 等共存。氮化温度为 1200°C 时,Al 与 N_2 发生强烈的放热反应,在较高温度下出现了 Al_2O_3 杂相及 $\text{Al}_{1.24}\text{Mn}_{0.76}\text{Ti}$ 固溶体。

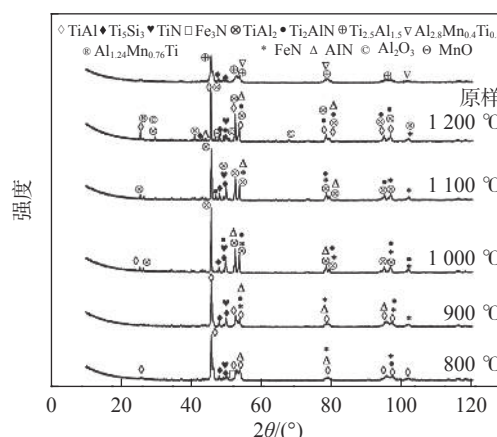
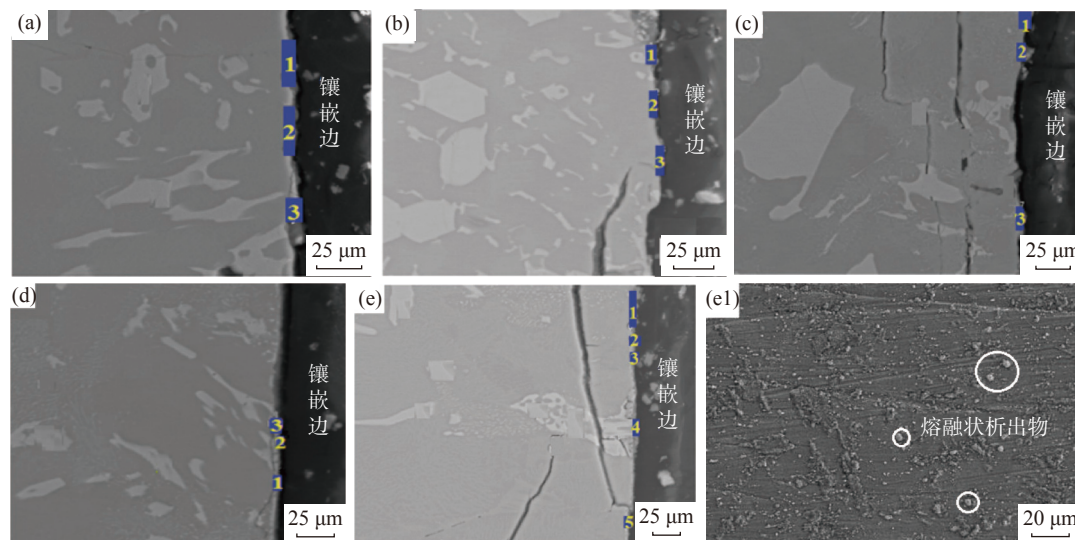


图1 不同温度制得的氮化层物相组成
Fig. 1 Phase compositions of nitrided layer prepared at different temperatures

图2为不同氮化温度下保温2 h制得的钛铝基多元合金与氮化层的微观结构。图3为不同温度得到的氮化层中氮含量平均值。图2显示钛铝基多元合金内部存在突起的不规则状以及细条状的组织为 Ti_5Si_3 , 基体主要为 TiAl 相。 Ti_5Si_3 脆性大, 增加

了材料的断裂韧性, 导致合金内部产生裂纹。在 800 °C 制得的氮化层与合金之间的界面最为清晰。由图 3 可以看出, 温度越高, 氮化层平均 N 含量越高。氮化温度为 1 200 °C 时, 基体中的铝在高温下

熔出, 氮化层表面出现细小熔融状析出物(图 2(e1)), 氮气与部分铝液反应生成氮化铝, 堆积在基体结合层处, 使得氮化层平均氮含量超过 50%。



(a)800 °C; (b)900 °C; (c)1 000 °C; (d)1 100 °C; (e)1 200 °C; (e1)1 200 °C 氮化层表面微观结构

图 2 不同温度下制得的氮化层的表面及基体结合层的 SEM

Fig. 2 SEM of nitriding coating surface and substrate binding layer prepared at different temperatures

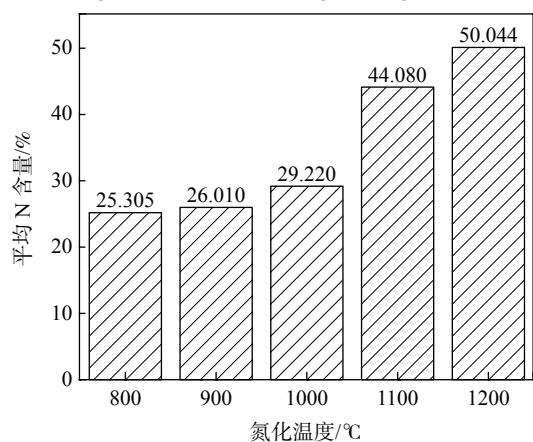


图 3 不同温度下氮化层氮含量(原子分数)平均值

Fig. 3 The average nitrogen content of nitrided layer at different temperatures

2.2 氮化温度对氮化层摩擦磨损性能的影响

1) 氮化层显微硬度

采用 HV100BZ 型显微硬度计对不同氮化温度下保温 2 h 后制得的氮化层的显微硬度进行检测, 试验所用载荷为 10 g, 加载时间为 10 s, 每个样品选取 5 个不同位置进行测量, 为了减小试验误差, 显微硬度测试结果为 5 次测试的平均值, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 在温度 800 ~ 1 200 °C 下直接氮化后制得的氮化层的显微硬度均高于未氮化的样品。这表明钛铝基多元合金在温度 800 ~ 1 200 °C 条件

下直接氮化制得的氮化层均能在不同程度上提高基体表面的硬度。在 800 °C 条件下制得的氮化层的显微硬度 (HV) 值最大, 为 698.8, 900 °C 条件下制得的氮化层显微硬度值最小, 为 630.2。

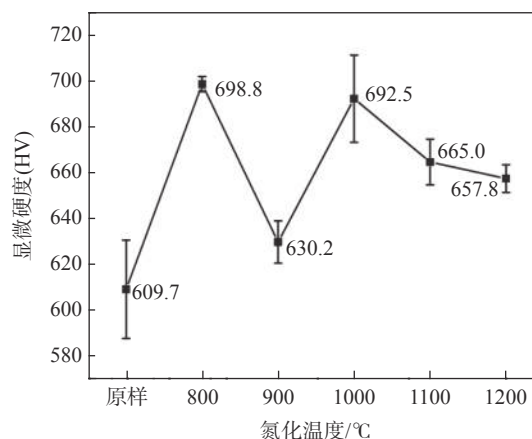


图 4 不同温度下制得的氮化层的显微硬度

Fig. 4 Microhardness of nitriding coatings prepared at different temperatures

钛铝基多元合金的 β 相非常稳定, 容易被过冷, 因此在 800 °C 直接氮化, 其组织更为均匀, 因此显微硬度最大; 而在 900 °C 及以上温度, 基体组织在回复过程中, 金属原子就近扩散, 导致位错密度降低, 显微硬度也相应降低; 随着温度的升高, Ti_5Si_3 增多,

在一定程度上提高了显微硬度。

2) 氮化层室温摩擦磨损性能

采用 Rect MFT-5000 型 (USA) 多功能摩擦磨损试验机将各试样在室温条件下进行往复摩擦磨损试验, 其中往复长度为 10 mm (磨痕 5 mm), 加载载荷为 4 N, 摩擦副为氮化硅, 介质为空气, 测试时间为 0.5 h。

图 5 (a)、(b) 分别为钛铝基多元合金在不同氮化温度下保温 2 h 后氮化层的摩擦系数随时间的变化曲线及其平均摩擦系数。由图 5(a) 可知, 随着往

复摩擦的进行, 所有样品摩擦系数均产生一定波动后趋于稳定, 这是因为在摩擦副反复摩擦氮化层表面的过程中磨屑累积, 摩擦磨损过程变得不稳定, 导致样品摩擦系数的波动较大造成的^[17], 往复摩擦 1 200 s 后, 摩擦系数趋于稳定。图 5(b) 显示原样的平均摩擦系数最大, 800 °C 得到的氮化层摩擦系数最小。试验条件下得到的氮化层均能降低钛铝基多元合金基体表面的摩擦系数, 可降低合金表面粗糙度, 提高基体的耐磨性能。

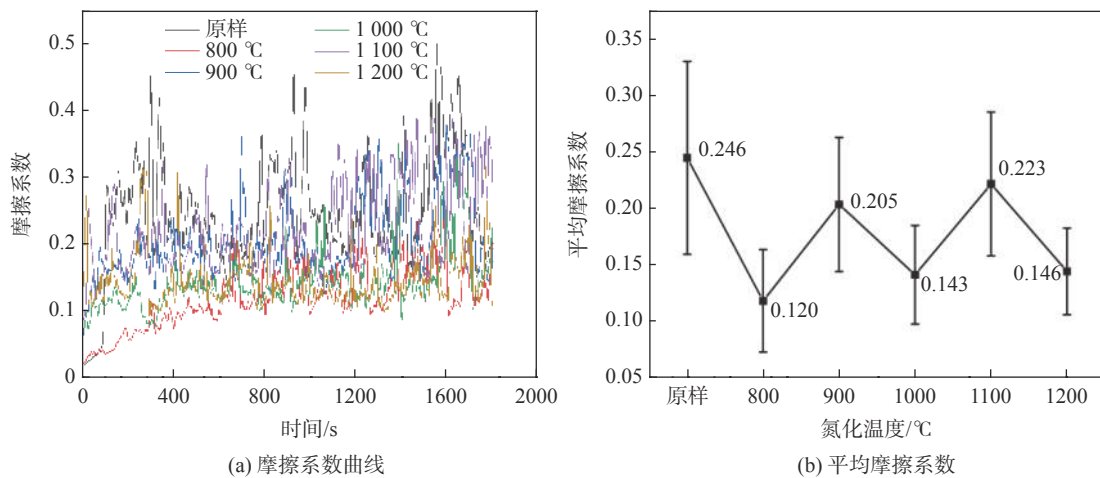


图 5 不同氮化温度下制得的氮化层的摩擦系数变化情况

Fig. 5 Changes of friction coefficient of nitriding layer prepared at different nitriding temperatures

表 2 列出了不同温度条件下制得的氮化层的磨损量、磨损体积以及磨损率。由表 2 可知, 在 800 ~ 1 200 °C, 氮化时间为 2 h 的条件下直接氮化后的钛铝基多元合金的磨损量均小于未氮化的钛铝基多元合金, 800 °C, 氮化 2 h 的样品磨损量最少, 磨损体积最小, 磨损率最低。随着温度的升高, 在基体表面形成熔融状析出物, 凸起的析出物或熔融物质在摩擦副的作用下脱落, 与往复摩擦过程中产生的磨屑共同作用, 阻碍摩擦副的运动, 形成黏着磨损以及伴随的疲劳磨损等导致磨损量、磨损体积增加。

表 2 氮化温度不同制得的氮化层的磨损量、磨损体积及磨损率

Table 2 Wear amount, wear volume and wear rate of coatings prepared at different nitriding temperatures

氮化温度/°C	磨损量/g	磨损体积/mm ³	磨损率/[mm ³ ·(N·m) ⁻¹]
原样	0.000 17	8.69×10 ⁻³	34.76
800	0.000 06	4.86×10 ⁻³	19.44
900	0.000 09	7.91×10 ⁻³	31.64
1 000	0.000 13	6.30×10 ⁻³	25.2
1 100	0.000 11	7.05×10 ⁻³	28.2
1 200	0.000 13	6.47×10 ⁻³	25.88

采用 Bruker Contour GT-K1 型三维形貌仪对摩擦磨损试验后的样品局部进行分析, 通过颜色来反映磨损深度, 红高蓝低, 红色一般为凸起, 蓝色一般表示磨痕凹陷处。Sv (最大谷深) 为区域中最低点的高度; Sa (算术平均高度) 表示相对于表面的平均面, 各点高度差的绝对值的平均值, 是基于局部区域形貌的粗糙度评定参数。由图 6(a) ~ (f) 可以明显看到, 各试样往复摩擦后均存在不同程度的凸起和凹陷, 各试样的最大磨痕深度在 10 ~ 32 μm。具有氮化层的试样的 Sa 值分别为 0.731、1.413、1.345、1.255、1.509 μm, 除在 1 200 °C、保温 2 h 的条件下制得的钛铝基多元合金氮化层的 Sa 值大于未氮化试样, 其余均小于未氮化试样的 Sa 值 (1.465 μm)。氮化温度为 800 °C 下制得的钛铝基多元合金氮化层的 Sa 值最低, 耐磨性能较好。表明一定温度下对钛铝基多元合金进行直接氮化能够降低基体的表面粗糙度, 提高表面耐磨性能。氮化温度过高, 基体可能会发生相变或者化学反应, 导致在表面形成熔融状析出物, 氮化层有可能在高温下熔融脱落, 导致粗糙度增大。

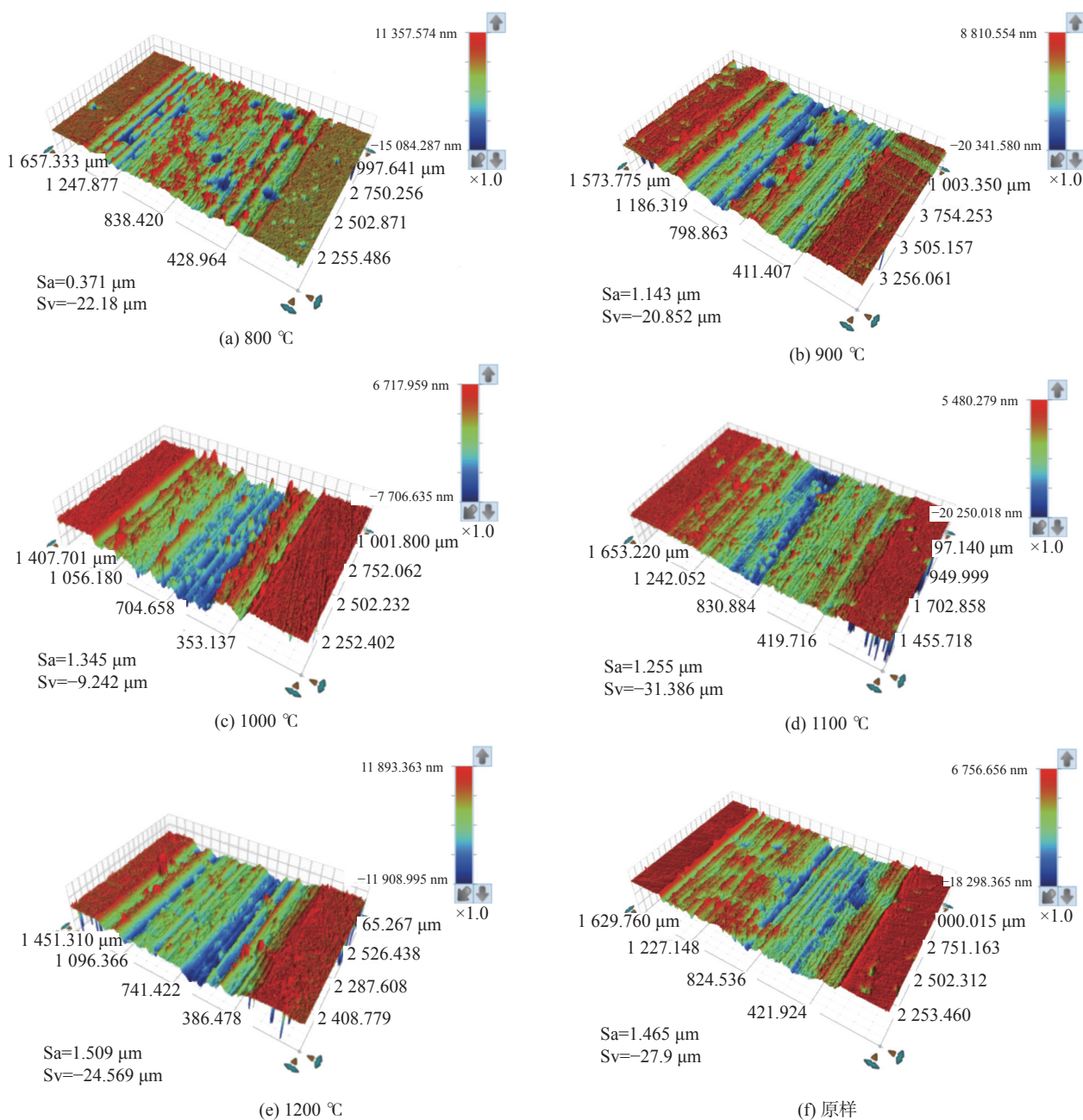


图6 不同氮化温度制得的氮化层的三维形貌

Fig. 6 3D morphologies of coatings prepared at different nitriding temperatures

2.3 氮化时间对氮化层物相及微观结构的影响

在 900 °C、1 ~ 5 h 制得的钛铝基多元合金氮化层的物相组成如图 7 所示。900 °C 氮化 1 h 合金基体主要物相由 $Ti_{2.5}Al_{1.5}$ 转变为 Ti_3Al_5 ，主要氮化产物为 TiN、AlN、FeN，氮化 2 h 及以上合金基体主要物相为 TiAl，主要氮化产物除 TiN、AlN、FeN 外，还产生了 Ti_2AlN 。图 8(a) ~ (f) 显示在 900 °C、1 ~ 5 h 氮化后的钛铝基多元合金基体内部以及原样存在 Ti_5Si_3 相导致裂纹产生。900 °C 氮化 2 ~ 3 h，

氮含量可大于 26%(图 9)。氮化时间过短，氮化不够充分导致氮化层平均 N 含量低。一般来说氮化时间与氮化深度呈抛物线，氮化时间越长，氮越难渗进去，会导致氮化层平均 N 含量降低。

2.4 氮化时间对氮化层摩擦磨损性能的影响

1) 氮化时间对氮化层显微硬度的影响

图 10 为在不同氮化时间下制得的钛铝基多元合金氮化层的显微硬度。900 °C 氮化 1 ~ 4 h 得到的氮化层显微硬度均高于原样，氮化 5 h 氮化层的

表面显微硬度比原样略低。氮化 3 h 后氮化层显微硬度 (HV) 可达到 682.6。未氮化样品中存在 TiAl 、 Ti_5Si_3 等物相, 而使表面的显微硬度表现出较大的离散程度, 在 900°C 氮化形成含有 TiN 、 AlN 、 Ti_2AlN 等氮化层后, 显微硬度的离散程度明显降低。

2) 氮化时间对氮化层室温摩擦磨损性能的影响

图 11(a)、(b) 分别为在 900°C 、不同氮化时间下制得的钛铝基多元合金氮化层的摩擦系数随时间的变化曲线以及平均摩擦系数。

图 12(a) ~ (f) 为 900°C 不同氮化时间制得的钛铝基多元合金氮化层以及原样进行摩擦磨损试验后的三维形貌。

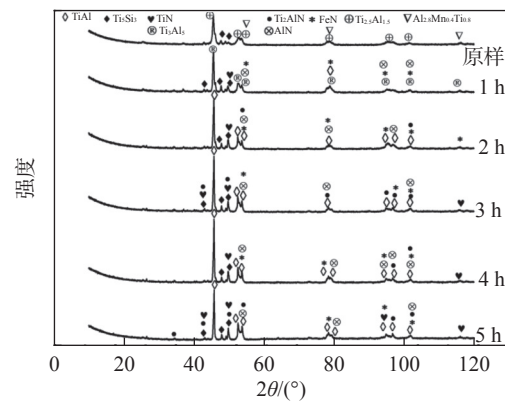
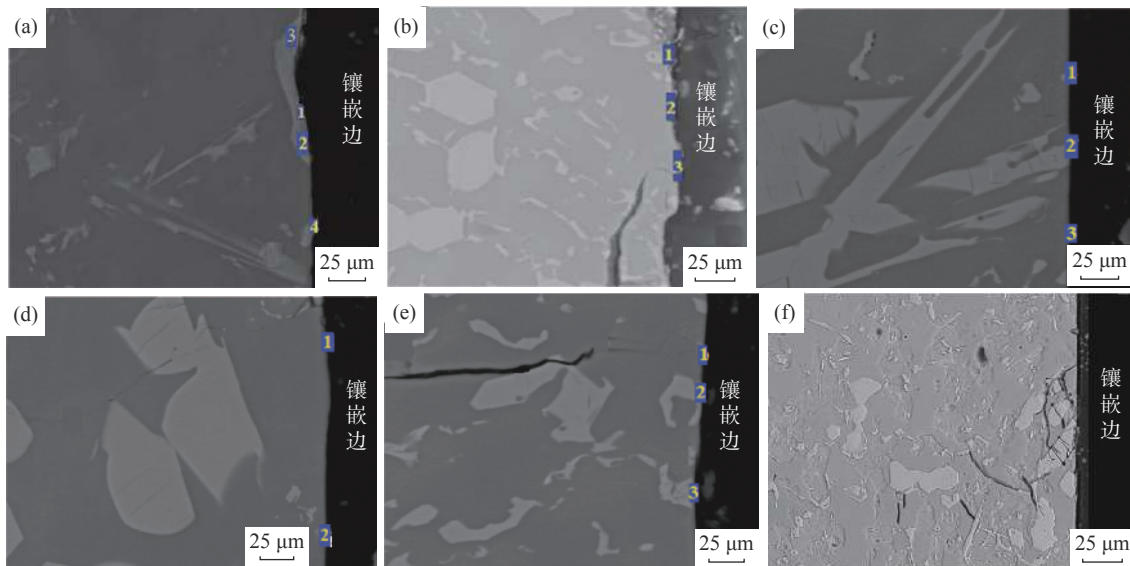


图 7 不同氮化时间制得的氮化层的物相分析
Fig. 7 Phase analysis of coatings prepared with different nitriding time



(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) 原样

图 8 不同氮化时间条件下制得的氮化层的表面及基体结合层的 SEM 图像

Fig. 8 SEM images of the coating surface and substrate binding layer prepared under different nitriding time

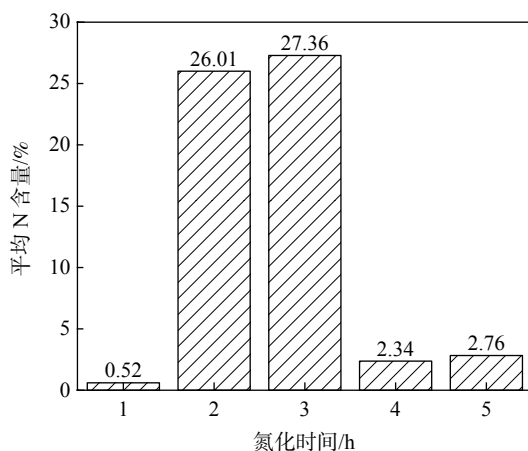


图 9 不同氮化时间制得的氮化层的表面及基体结合层的 EDS 中平均 N 含量(原子分数)

Fig. 9 EDS mean N content of nitriding layer surface and matrix binding layer prepared under different nitriding time

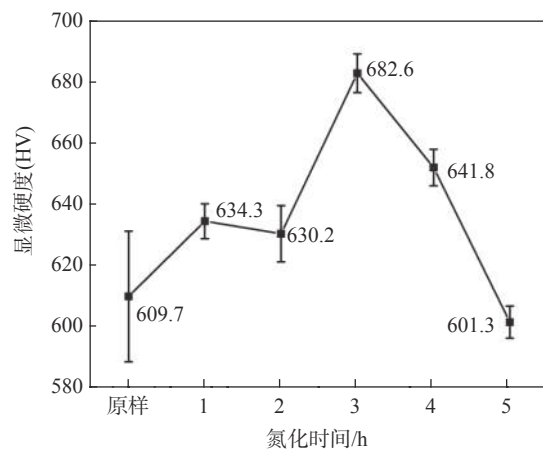


图 10 不同氮化时间条件下制得的氮化层的显微硬度

Fig. 10 Microhardness of coatings prepared at different nitriding time

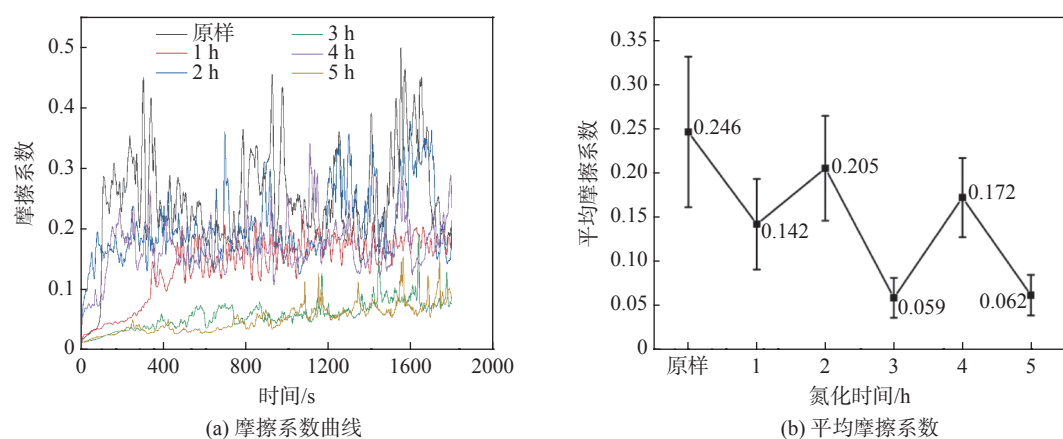


图 11 不同保温时间下制得的氮化层的摩擦系数变化情况
Fig. 11 Changes of friction coefficient of nitriding layer prepared under different holding time

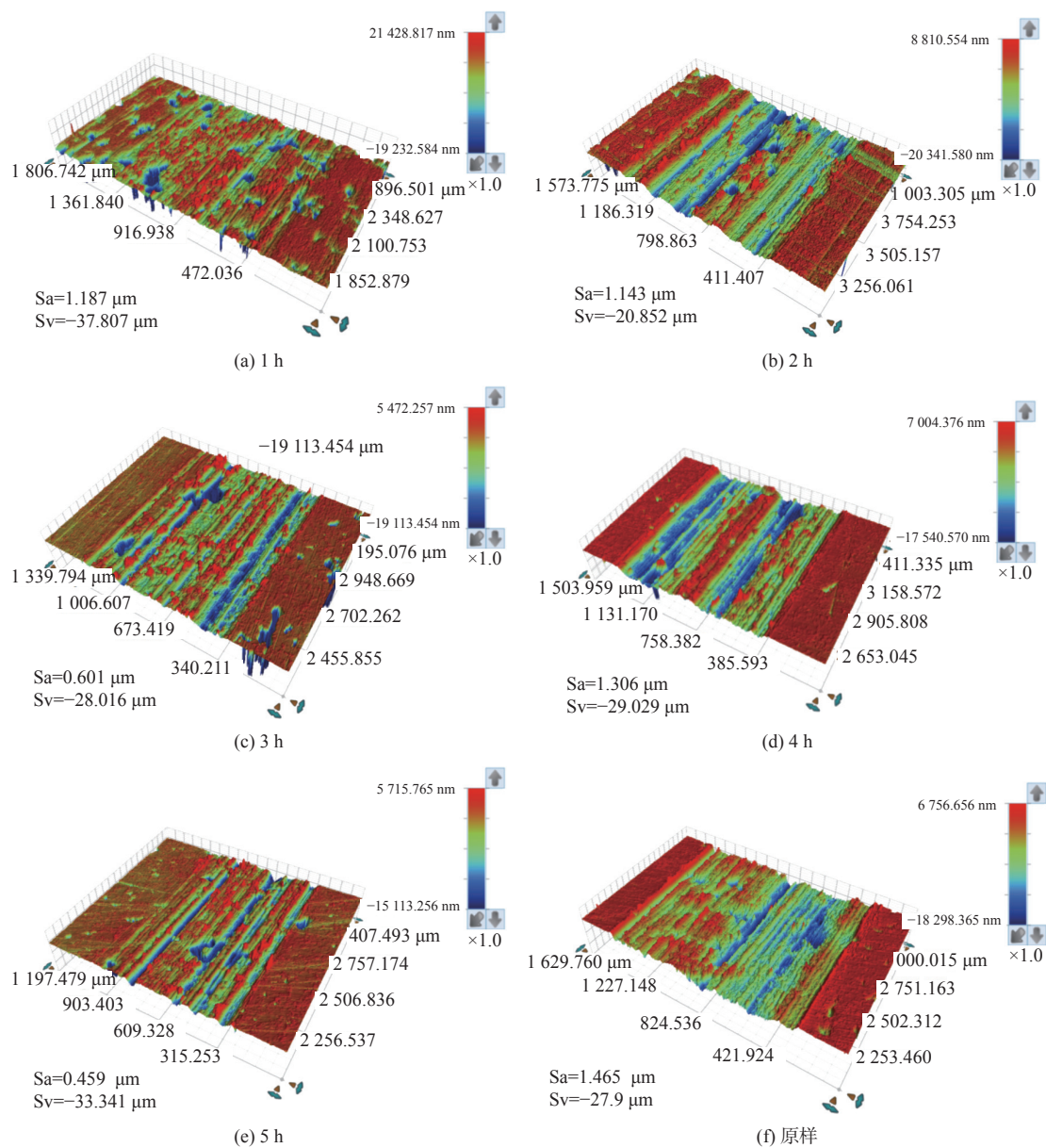


图 12 不同氮化时间条件下制得的氮化层磨损后的三维形貌
Fig. 12 3D morphologies of worn nitriding coatings prepared at different nitriding time

由图 11(a)可知,随着往复摩擦的进行,未氮化试样及不同氮化时间的钛铝基多元合金氮化层的摩擦系数先上升后下降,随后反复上升下降,最后趋于稳定。摩擦的过程很复杂,在相互摩擦中会产生发热、化学相变等现象,导致摩擦系数反复波动。

由图 11(b)可以明显看出,氮化后样品的平均摩擦系数均低于未氮化的样品,这表明不同氮化时间下制得的钛铝基多元合金氮化层均不同程度地降低了合金表面的摩擦系数。一般来说摩擦系数越低代表表面的粗糙程度越小,其耐磨性能也会越好,钛铝基多元合金氮化层在一定程度上提高了合金的耐磨性能。其中,900 ℃ 氮化 3 h 得到的钛铝基多元合金氮化层的摩擦系数离散程度最小,平均值最小,其耐磨性最好。

图 12 中显示各试样往复摩擦后均存在不同程度的波浪状的凹坑,伴有磨屑,且氮化后的试样磨痕波动情况比未氮化试样的磨痕波动平缓,各试样的最大磨痕深度(Sv)在 21 ~ 38 μm。氮化后试样的 Sa 值分别为 1.187、1.413、0.601、1.306、0.459 μm,均小于未氮化试样的 Sa 值(1.465 μm)。粗糙度的数值越小,代表样品耐磨性越好,这是由于粗糙度的降低能够减小摩擦力从而减少摩擦热,进而减缓了试样的磨损。在 900 ℃、氮化时间为 3 h 的条件下制得的钛铝基多元合金氮化层的 Sa 值最低,进一步证明其耐磨性能最好。

表 3 为不同氮化时间获得的氮化层的磨损量、磨损体积以及磨损率。材料的磨损率越大,其使用寿命就越短。表 3 显示在 900 ℃,氮化 3 h 制得的氮化层因其较小的表面粗糙度而磨损率最少,原样及其他氮化时间获得的样品磨损率都较大。在摩擦磨损过程中不仅有摩擦副与样品表面产生的磨损,还伴随着多种形式的磨损,比如氮化层在不断往复摩擦的过程中容易产生疲劳磨损,形成裂纹,导致磨

痕深度增加以及在摩擦副反复摩擦氮化层表面的过程中磨屑累积,阻碍摩擦副运动,形成黏着磨损等,这些都会导致磨损率的增加。

表 3 氮化时间不同的氮化层的磨损量、磨损体积及磨损率
Table 3 Wear amount, wear volume and wear rate of nitriding coatings with different nitriding time

氮化时间/h	磨损量/g	磨损体积/mm ³	磨损率/[mm ³ ·(N·m) ⁻¹]
原样	0.000 17	8.69×10 ⁻³	34.76
1	0.000 16	8.60×10 ⁻³	34
2	0.000 09	7.91×10 ⁻³	31.64
3	0.000 04	2.37×10 ⁻³	9.48
4	0.000 10	6.97×10 ⁻³	27.88
5	0.000 07	3.36×10 ⁻³	13.44

3 结论

利用攀枝花酸溶性钛渣制备出的钛铝基多元合金经精炼后直接氮化,能提高合金的表面硬度及摩擦磨损性能,对不同氮化温度 and 不同氮化时间制得的合金氮化层进行性能检测,得到以下主要结论:

1) 对钛铝基多元合金在 800 ~ 1 200 ℃ 氮化 2 h 以及 900 ℃ 氮化 1 ~ 5 h, 均能得到含 TiN、AlN、Ti₂AlN 等氮化物的氮化层。

2) 在 800 ~ 1 200 ℃ 氮化 2 h, 均能不同程度提高钛铝基多元合金表面硬度。其中 800 ℃ 氮化 2 h 氮化层硬度(HV)可达 698.8, 平均摩擦系数为 0.120, 往复摩擦的磨损率为 19.44 mm³/(N·m), 表面粗糙度为 0.731 μm, 表现出较好的耐磨性能。

3) 在 900 ℃ 氮化 1 ~ 5 h, 不同程度地降低了合金表面的摩擦系数。其中 900 ℃ 氮化 3 h 得到的氮化层硬度(HV)为 682.6, 平均摩擦系数为 0.059, 往复摩擦的磨损率为 9.48 mm³/(N·m), 表面粗糙度为 0.601 μm, 耐磨性能较好。

参考文献

- [1] Guo Li, He Weixia, Zhou Peng, *et al.* Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 22-28.
(郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 22-28.)
- [2] Narayana P L, Li C L, Kim S W, *et al.* High strength and ductility of electron beam melted β stabilized γ-TiAl alloy at 800 °C[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 756: 41-45.
- [3] Chen R, Wang Q, Yang Y H, *et al.* Brittle-ductile transition during creep in nearly and fully lamellar high-Nb TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2018, 93: 47-54.
- [4] Song L, Hu X G, Zhang T B, *et al.* Precipitation behaviors in a quenched high Nb-containing TiAl alloy during annealing[J].

- [Intermetallics](#), 2017, 89: 79–85.
- [5] Chen G, Peng Y B, Zheng G, *et al.* Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. [Nature Materials](#), 2016, 15: 876–882.
- [6] Wu H, Fan G H, Geng L, *et al.* Nanoscale origins of the oriented precipitation of Ti_3Al in Ti-Al systems[J]. [Scripta Materialia](#), 2016, 125: 34–38.
- [7] Appel F, Clemens H, Fischer F D. Modeling concepts for intermetallic titanium aluminides[J]. [Progress in Materials Science](#), 2016, 81: 55–124.
- [8] Pan Jiansheng, Hu Mingjuan. Heat treatment technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 514-527.
(潘健生, 胡明娟. 热处理工艺学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 514-527.)
- [9] Ma Pengfei, Li Meilan. Heat treatment technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 116-127.
(马鹏飞, 李美兰. 热处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 116-127.)
- [10] Stappen M Van, Stals L M, Kerkhofs M, *et al.* State of the art for the industrial use of ceramic PVD coatings[J]. [Surface and Coatings Technology](#), 1995, 74-75(2): 629–633.
- [11] Zhang Minghai, Yang Gangbin. Research progress of Lanxide materials[J]. [Journal of Luoyang Technical College](#), 2006, (1): 5–7.
(张明海, 杨刚宾. Lanxide材料及其研究进展[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2006, (1): 5–7.)
- [12] Shi Chengcheng. Thermal deformation behavior and isothermal forging/diffusion bonding process of P/M Ti-Al base alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
(史程程. P/M 钛铝基合金的热变形行为与等温锻造/扩散连接工艺[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.)
- [13] Li Yong, Wang Qiulin, Zhu Jinbo, *et al.* Technology status and prospect of titanium aluminum alloy prepared by powder metallurgy[J]. [Journal of Chengdu Aeronautical Vocational and Technical College](#), 2020, 36(3): 74–77, 80.
(李勇, 王秋林, 朱金波, 等. 粉末冶金制备钛铝合金技术现状及展望[J]. 成都航空职业技术学院学报, 2020, 36(3): 74–77, 80.)
- [14] Li Jun, Wu Enhui, Yang Shaoli, *et al.* Study on vacuum magnetic levitation refining of titanium aluminum alloy prepared by electrothermic reduction[J]. [Iron Steel Vanadium Titanium](#), 2019, 40(2): 41–49.
(李军, 吴恩辉, 杨绍利, 等. 电铝热还原法制备的钛铝合金真空磁悬浮精炼研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(2): 41–49.)
- [15] Li Jun, Lu Xiongfang, Yang Shaoli, *et al.* Theoretical and experimental study on preparation of TiAl alloy by electrothermic reduction[J]. [Iron Steel Vanadium Titanium](#), 2017, 38(5): 46–52.
(李军, 鲁雄刚, 杨绍利, 等. 电铝热还原法制备TiAl合金理论及试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 46–52.)
- [16] Piao Rongxun, Yang Shaoli, Ma Lan, *et al.* Vacuum electromagnetic levitation melting of Ti-Al based alloy prepared by aluminothermic reduction of acid soluble Ti bearing slag[J]. [Metals and Materials International](#), 2020, 26: 130–142.
- [17] Li Y M, Yue Q B, He H B, *et al.* Friction and wear characteristics of 20Cr steel substrate and TiAlN coating under different lubrication conditions[J]. [International Journal of Precision Engineering and Manufacturing](#), 2018, 19(10): 1521–1528.

编辑 杨冬梅

宝钛集团钛带公司宽幅 TC4 冷轧带卷实现批量生产

(2023 年 10 月 23 日消息) 近日, 宝钛集团钛带公司成功生产出幅宽 1 030 mm、厚度 0.5 mm 规格的 TC4 冷轧带卷, 开创了国内宽幅 TC4 带卷冷成品生产的完整流程, 首批合同预计 10 月底交付。

目前, 钛带公司已具备批量交付厚度 0.5 mm 至 3.0 mm 区间多种规格宽幅 TC4 带材的能力, 性能均符合相关标准要求。

摘自 <http://www.baotigroup.com/view.php?id=18291>