DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3304

医用钛合金表面纳米化组织与性能研究

柴　艳[1],于　源[2,3],王　瑜[1]

(1. 陕西盛航鑫材科技有限公司，陕西 西安 712000; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室,甘肃兰州 730000; 3. 青岛市资源化学与新材料研究中心,山东 青岛 266000)

摘　要:针对近β型TLM钛合金试样表面进行了不同时间的高能喷丸处理,采用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)以及显微硬度仪等对不同喷丸处理后的试样进行了组织观察和性能测试。研究发现,在喷丸的近表层发生了纳米化,形成了一定厚度的纳米晶层。喷丸处理时间越长,最表层的平均晶粒尺寸越小,晶粒尺寸沿着厚度方向有梯度变化,距喷丸表面越远,晶粒尺寸就会越大。同时纳米晶层的显微硬度相对于基体组织有大幅提高,显微硬度距表面距离越远,显微硬度越低,硬度的提升主要是由于表面晶粒细晶强化的作用所致。

关键词:TLM钛合金;高能喷丸;表面纳米化;组织;力学性能

中图分类号:TG146.2+3; TG113.25　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)02-0142-06

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Medical Titanium Alloy after Surface Nanocrystallization

CHAI Yan[1], YU Yuan[2,3], WANG Yu[1]

(1. Shaanxi Shenghang Xincai Technology Co., Ltd., Xi'an 712000, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Qingdao Center of Resource Chemistry & New Materials, Qingdao 266000, China)

Abstract: In this study, surface of type near β-type TLM titanium alloy samples were subjected to high-energy shot peening treatment at different time. The microstructure and mechanical properties of the samples after different shot peening time were observed using metallographic microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and microhardness testing. Research has shown that nanocrystallization occurs near the surface of samples after shot peening, forming a certain thickness of nanocrystalline layer. As the duration of the shot peening treatment increases, the average grain size of the surface layer decreases, and the grain size has a gradient change along the thickness direction. The further away from the shot peening surface, the larger the grain size will be. Moreover, compared with that of the matrix, the microhardness of the nanocrystalline layer significantly improves. The greater the distance from the surface is, the lower the microhardness. The increase in hardness is mainly due to the strengthening effect of surface grain refinement.

Key words: TLM titanium alloy; high energy shot peening; surface nanocrystallization; microstructure; mechanical property

由于β型钛合金具有优良的生物相容性和极低的弹性模量,具有广阔的应用前景和较大的市场潜力,各国纷纷开始研究和开发这类钛合金[1-3]。美国最早开发出一种名为TMZF的β型钛合金,并已经进入实际应用阶段。日本开发出多种β型钛合金,如TNTZ亚稳β钛合金、$Ti_{17}Mo$和$Ti_{30}Zr_5Cr$等。中国也成功开发出多种医用β型钛合金，如TLM和TLE等,其性能优异[4]。作为生物医用材料,首先必须评估其物理性能、力学性能和加工性能,以确定其是否满足特定用途的基本要求。其次,作为医用植入材料,必须确保其不含有毒元素和过敏元素,并具有良好的生物相容性。TLM钛合金作为植入材料具有

收稿日期:2023-12-14

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3405800);中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室开放基金课题(RZH2021-KF-01);中国科学院青年创新促进会会员(2021423)

作者简介:柴　艳,1980年生,博士,工程师.主要从事金属表面性能优化等方面的工作.Email: chaiyan1026@163.com

通讯作者:于　源,1987年生,博士,副研究员.研究方向为高性能结构-润滑金属材料.Email: yuyuan@licp.cas.cn

引用格式:柴艳,于源,王瑜.医用钛合金表面纳米化组织与性能研究[J].铸造技术,2024,45(2): 142-147.

CHAI Y, YU Y, WANG Y. Study on the microstructure and mechanical properties of medical titanium alloy after surface nanocrystallization[J]. Foundry Technology, 2024, 45(2): 142-147.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

良好的力学相容性，其强度和韧性较好。同时其弹性模量较低，能够与生物组织的弹性模量很好匹配。在植入人体后，能够有效传导力学负荷，将受到的载荷连续而均匀地传递到周围组织上。此外，TLM 钛合金还具有良好的耐磨性和疲劳强度[5-6]。

纳米化晶粒具有晶粒尺寸细小、晶界多且界面密度高、晶界结构与普通大角度晶界相似等特点。研究表明，纳米晶粒与传统粗晶相比，纳米晶体金属的强度、硬度、韧性、摩擦性能以及低温塑性等力学性都能得到显著提高[7-9]。因此，通过一定的处理工艺，使被处理金属在一定厚度的表层中发生纳米化过程，从而在处理表面获得一定厚度的具有纳米级尺寸的晶体结构表层，可有效提高表层的各项性能指标，使整个金属材料的性能和服役能力得到有效提高，使其具有更加广阔的应用领域[5-6,10-11]。

用于钛合金表面的纳米化方法主要有高能喷丸法、激光脉冲喷丸法、超音速微粒轰击法、深滚法、机械研磨法、超声深滚法等[12-14]。这些方法的原理都是通过工具与工件之间的机械作用，使钛合金的局部发生严重变形，从而使表面晶粒破碎细化，通过细晶处理达到表面强化的目的。闫秀霞[15]研究了高能喷丸使 TC4 钛合金表面纳米化后对疲劳性能的影响，结果表明，TC4 钛合金经喷丸后其表面的晶粒尺寸可达到 20 nm，并且在喷丸表面会出现硬化层，表层的硬度明显比基体高，且研究发现其对疲劳极限会产生不同的影响。罗钦豪[16]研究了喷丸处理后 TB6 钛合金表面纳米化层的组织和性能，发现 TB6 钛合金经高能喷丸处理后，纳米化表层晶粒形成了形变孪晶，对表面起到了强化和硬化的作用。张聪惠等[17]对表面纳米化 TC4 合金工艺参数进行了探索研究。王荣华等[10] 采用表面机械研磨对 5052 铝合金进行表面纳米化处理，使得材料的抗拉强度有明显提升。武永丽等[18]采用超音速微粒轰击表面纳米化技术在 TC11 钛合金表层构筑了一定层深的梯度纳米结构，表层纳米晶尺寸小于 10 nm，材料的屈服强度、抗拉强度显著增加。本文针对 TLM 钛合金进行表面纳米化处理，采用表面喷丸工艺研究不同处理时间对材料表面组织和性能的影响，为后续该合金表面优化提供借鉴。

1　实验材料与方法

实验材料为近 β 型 TLM 医用钛合金，名义成分(原子百分数，%)为：1.5~4.5 Ti，0.5~5.5 Zr，1.5~4.4 Sn，23.5~26.5 Mo，Nb[2]。其初始组织如图 1 所示，晶粒较为粗大。将 TLM 钛合金利用线切割机切割成 60 mm×30 mm×4 mm 的样品，放入 MP6000PT 型气动式喷丸机中进行喷丸。首先将试样固定在基盘上，将喷头与试样的位置校准完成后，对试样按照指定工艺参数进行喷丸，喷丸参数见表 1，喷丸时间分别为 15、30、45 和 60 min，喷丸后的试样如图 2 所示。

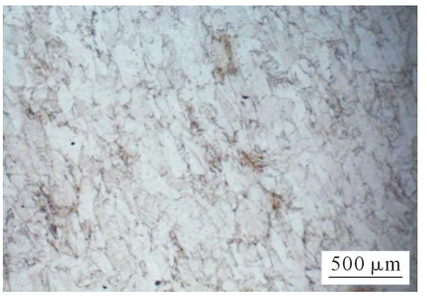

图 1 TLM 钛合金初始组织
Fig.1 Initial structure of the TLM titanium alloy

表1 喷丸的工艺参数
Tab.1 Process parameters for shot peening

基本参数	数值
弹丸直径/mm	ϕ0.6(铸钢丸)
喷丸角度 /(°)	90
空气压力/MPa	0.3
喷枪至试样表面距离/mm	300
弹丸流量/(kg·min^{-1})	10
喷枪移动速率/(mm·min^{-1})	14

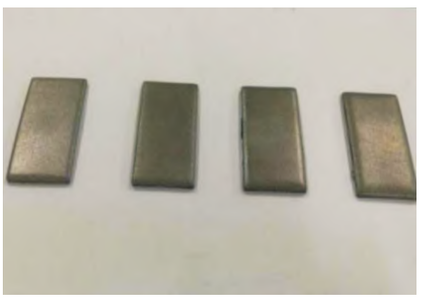

图 2 不同时间喷丸后的样品
Fig.2 Samples after shot peening at different time

将喷丸后的试样镶嵌后依次采用 80#、180#、400#、800#、1000#、1500#、2000# 粒的碳化硅砂纸进行打磨，磨好后用三氧化二铬粉末和水的混合液进行抛光，至表面光亮无划痕后，将其放入盛有酒精的烧杯中进行超声波清洗，随后对抛光面进行腐蚀，腐蚀液的配比为 $HF:HNO_3:H_2O$=1:2:97；腐蚀时间为 15 s 左右，腐蚀完成后进行组织观察。

采用日立 S-4800 型扫描电镜对试样进行扫描，加速电压为 15 kV。采用 X 射线衍射仪测定试样表面的晶粒尺寸和微观畸变，测试用Cu 靶。具体参数为管电压 40 kV，管电流 40 mA，20°～85°连续扫描，扫描步长 0.02°，扫描速率为 0.05(°)/s。采用 HV-1000A 型显微硬度仪在每个试样垂直于喷丸表面的截面区域测量其显微硬度，测量部位为从喷丸层一次向

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试样的内部延伸，每隔 50 μm 取 3 个测量结果的平均值作为相应深度层的显微硬度。测试载荷为 300 g，加载时间为 15 s，通过分析试样不同深度处显微硬度的变化，得出表面喷丸对试样不同深度的影响。

2 实验结果及讨论

2.1 金相组织分析

图 3 为经过不同时间喷丸处理后的组织照片。将喷丸后的试样和热处理原样组织进行比较可以发现，试样经喷丸处理后，喷丸表层的组织有明显细化迹象，最表层组织的细化更为显著，向内部依次递减，并在一定深度处，其组织与原样组织一致，呈现等轴晶。通过对比不同喷丸时间后试样的金相组织，可以看到，在喷丸表层处产生了严重的变形，其晶界比较模糊。在不同喷丸时间下，其变形层厚度和变形的严重程度均有明显差别，可以发现随着喷丸时间的延长，变形层的厚度及近表层的变形程度显著增大。经测试后，表面变形层厚度分别为 102.75 μm(15 min)、110.21 μm(30 min)、124.62 μm (45 min)、130.58 μm(60 min)。

2.2 表层截面 SEM 分析

图 4 为 TLM 钛合金经不同喷丸时间后的 SEM 形貌。图 4a 为试样经 15 min 喷丸的 SEM 形貌，可以看到，在 TLM 合金表面上下两部分的形貌有了明显的差别。图中所示的上半部分为近喷丸表面部分，下半部分远喷丸面部分，可以看出在近喷丸面的部分发生了明显的塑性变形。通过对比可以发现，随着喷丸时间的延长喷丸表层的晶粒细化程度更高，试样从喷丸表面至晶粒细化结束处的厚度变得更大。这个现象说明，在其他条件保持不变的情况下，喷丸时间的增加，可以明显提高 TLM 钛合金的表面细化程度，不仅使得表层的晶粒更加细小，还可以显著提高细化层的厚度。

TLM 钛合金为近 β 型钛合金，β 相具有体心立方(BCC)晶体结构，属于高层错能金属，塑性变形以位错运动为主。在弹丸冲击过程中，TLM 钛合金表面产生剧烈塑性变形，塑性变形使得变形部位产生大量的位错，这些位错相互运动，缠结，交割，还会形成高密度的位错墙，位错在产生和运动的过程中会对组织晶粒进行分割，将原先的粗晶状组织逐步切割成更加细小的晶粒，其晶粒细化机制为“位错分

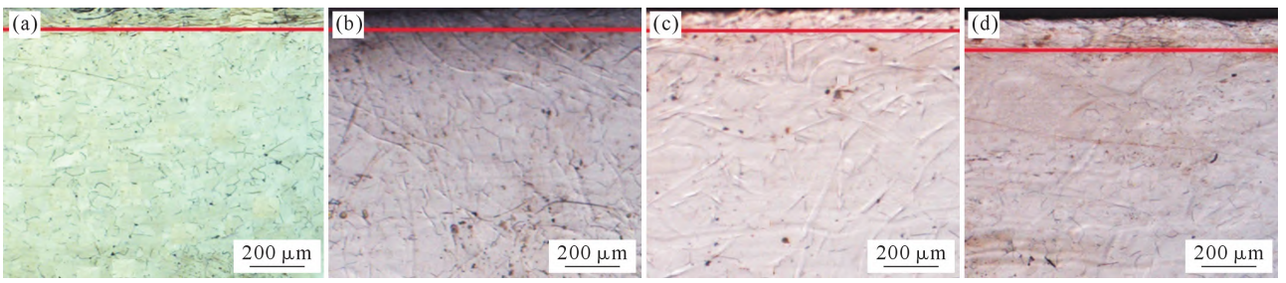

图 3 不同喷丸时间后 TLM 钛合金组织：(a) 15 min, (b) 30 min, (c) 45 min, (d) 60 min
Fig.3 Metallography of TLM titanium alloy after different shot peening time: (a) 15 min, (b) 30 min, (c) 45 min, (d) 60 min

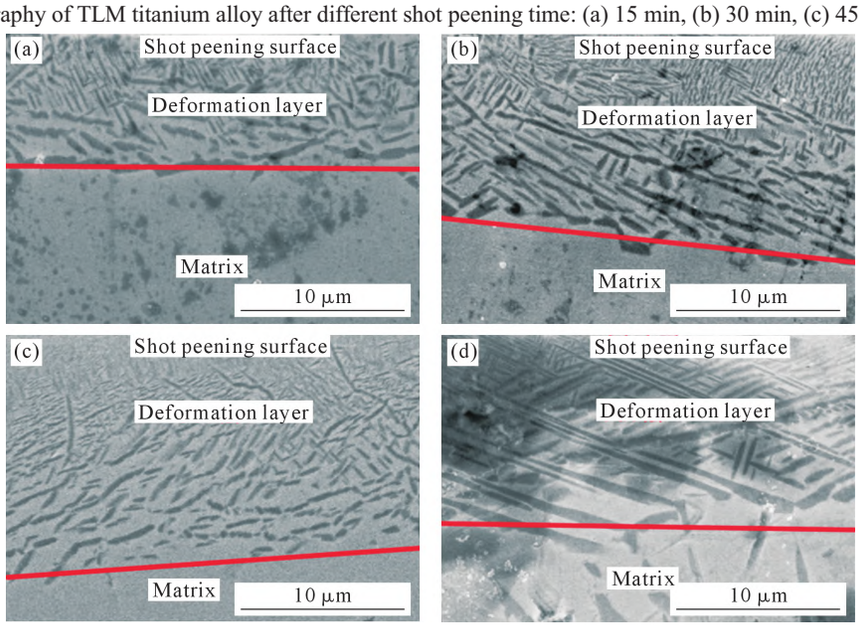

图 4 不同喷丸时间 TLM 钛合金的 SEM 组织形貌：(a) 15 min, (b) 30 min, (c) 45 min, (d) 60 min
Fig.4 SEM microstructure of TLM titanium alloy with different shot peening time: (a) 15 min, (b) 30 min, (c) 45 min, (d) 60 min

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

割”方式[17,19]。由于弹丸冲击在合金的表层，所以最表层处最先发生塑性变形和晶粒细化，在向内部延伸时其变形程度逐级减弱，晶粒细化的速度也会减缓，直至不发生塑性变形和晶粒细化的过程。因此，喷丸后的 TLM 钛合金其晶粒大小从表层向内部有一个梯度的变化，向内部晶粒尺寸逐渐增加，在一定距离处变为亚晶，直至最后晶粒不发生细化，为基体组织。

2.3 XRD 分析

采用 X 射线衍射仪对热处理原样和经不同时间喷丸后的试样进行表征，得到的结果如图 5 所示。对比发现，TLM 钛合金经过喷丸处理后，并没有新的 Bragg 衍射峰出现，说明喷丸处理后 TLM 钛合金的组成相没有发生变化，即在喷丸过程中没有发生相变。

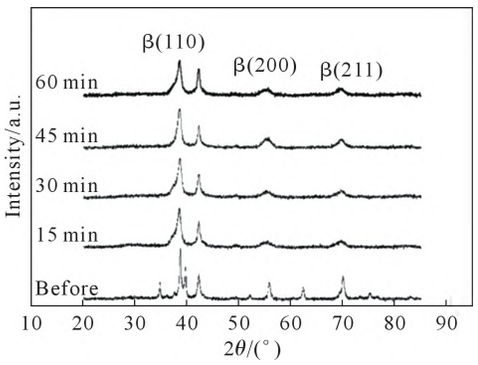

图 5 不同条件下 TLM 钛合金 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of the TLM titanium alloy under different conditions

将对应的衍射峰进行比较，发现其相应 Bragg 衍射峰的宽度有明显增大，且对应的 Bragg 衍射峰高度有所降低，说明试样在职被进行喷丸处理后，其喷丸表层的平均晶粒尺寸和微应变发生了变化，喷丸表层的平均晶粒尺寸明显减小，表面的微应变增加。根据布拉格衍射峰的谱线展宽，不同试样的平均晶粒尺寸通过式(1)计算[20]：

$$\text{Size}=\frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \tag{1}$$

式中，K 为常数，通常取 K=1；θ 为衍射角；λ 为 X 光波长；β 为最大值处 Bragg 衍射峰的半峰全宽。对图中 Bragg 衍射峰进行测量后，结合式(1)可以得出基体和喷丸后纳米化层的平均晶粒。通过计算得出 TLM 钛合金喷丸前的平均晶粒尺寸为 28 μm，喷丸 15、30、45、60min 后的平均晶粒尺寸分别为 320 nm (β=61.5×10^{-4})、240 nm (β=82.0×10^{-4})、110 nm (β=178.9×10^{-4})和 50 nm (β=393.6×10^{-4})。如图 6 所示，可以发现高能喷丸后，试样的平均晶粒尺寸急剧变小，且喷丸时间越长，晶粒尺寸越小。

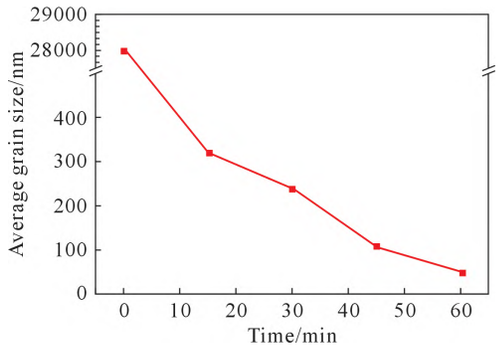

图 6 高能喷丸前后 TLM 钛合金的平均晶粒尺寸

Fig.6 Average grain size of the TLM titanium alloy before and after high-energy shot peening

将经过喷丸处理后的试样进行相互对比，可以发现，喷丸时间越长，Bragg 衍射峰就越宽，峰的高度就越低，TLM 钛合金喷丸表层的平均晶粒尺寸就越小，这是由于在表面喷丸过程中，弹丸撞击表面，使得表面发生塑性变形，产生了晶粒细化的过程，导致了晶粒尺寸的减小，也就是表层晶粒纳米化的过程。

2.4 显微硬度及分析

显微硬度的测试结果如图 7 所示，通过比较可以发现 TLM 钛合金热处理原样的硬度相对较低，位于最底部，平均硬度在 235 HV 左右。对比发现 TLM 钛合金喷丸面表层硬度都有了极大的提高，经过 15 min 的喷丸后，表层的最大硬度达到 355 HV左右，大约是基体硬度的 1.5 倍，并且随着喷丸时间的延长，表层的最大硬度提高的越多，当持续喷丸时间达到 60 min 后，试样表层的最大硬度达到 375 HV，此时的硬度相当于基体的 1.6 倍左右。在观察喷丸试样的显微硬度延深度方向的变化情况，可以发现试样的硬度随着深度增加而不断降低。在喷丸表面到 200 μm 的深度范围内，硬度下降幅度很大，如 60 min 喷丸试样的硬度由最表层的 375 HV 下降到 200 μm 深度处的 276 HV。在 500 μm 深度时趋于平稳，与基体硬度保持一致。

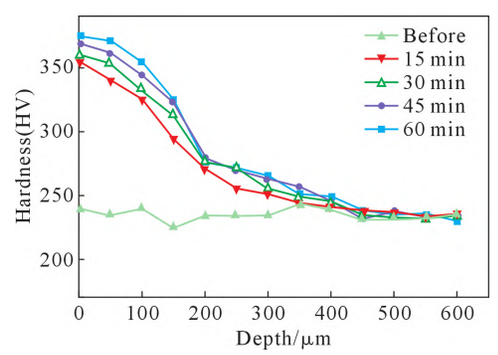

图 7 TLM 钛合金经处理后的显微硬度随深度的变化

Fig.7 Variations in the microhardness of the TLM titanium alloy with depth

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从硬度结果可以发现，对 TLM 钛合金进行表面喷丸，能够有效提高表面硬度，硬度增强会随着喷丸处理时间的延长而加强，但喷丸对表面的强化作用仅作用于表层部分，随着距喷丸表面距离的增加，其对硬度的强化效果也会减弱，当达到一定深度时，对合金的硬度强化作用也会消失。

在喷丸过程中，由于弹丸对试样的持续高速冲击，使得试样表层发生剧烈塑性变形，在塑性变形过程中产生大量位错，位错的移动、缠结及交互作用使原来的组织分割为更加细小的晶粒。晶粒尺寸的减小使晶粒数目和晶界界面增多，导致位错的运动需要克服更多的界面能，使位错的运动更加困难，也就意味着需要更大的外加载荷才能引起材料发生塑性变形。因此，喷丸使得 TLM 钛合金表层的硬度提高，而随着距离喷丸表面的深度增加，高能弹丸对深层合金的影响会降低，深层处接收到的能量和冲击力随之减小，塑性变形也减小；位错产生的数量变少，使得位错对晶粒的切割次数减少，晶粒细化效果减弱，导致喷丸对表层硬度的强化随着深度而减弱。当深度达到一定值时，传递到此处的能量已经无法引起合金产生塑性变形和位错，即无法对原晶粒产生位错切割和细化，使得从此处开始往后的组织晶粒保持基体的形貌，晶粒大小也与未喷丸前一致，导致从此处开始的硬度也就与未喷丸前试样硬度一致。

3 结论

(1)表面喷丸使得 TLM 钛合金表面产生塑性变形，形成一定厚度的变形层。经 XRD 分析，TLM 钛合金的组成相没有发生变化，且喷丸后其 Bragg 的衍射峰会显著变宽，峰高下降。通过计算表明表面喷丸使表层的平均晶粒尺寸降低至纳米尺寸，表面晶粒尺寸随着喷丸时间的延长而继续减小。

(2)喷丸处理可有效提高 TLM 钛合金表层的显微硬度，且喷丸的时间越长对硬度的提高幅度越大；随着到喷丸表面距离的增加，其显微硬度也不断减小，直至一定深度后，与喷丸前试样的硬度一致。

(3)TLM 钛合金高能喷丸后表层硬度提高的主要是因为表面因喷丸产生强烈的塑性变形，导致位错大量产生对晶粒进行分割，使得晶粒尺寸大幅降低，产生细晶强化的作用，使得表面的硬度得到了提高。

参考文献：

[1] 于振涛，周廉，王克光. 生物医用型 β 型钛合金的设计与开发[J]. 中国材料进展，2004, 23(1): 5-10.
YU Z T, ZHOU L, WANG K G. Design and development of biomedical β-Ti alloys[J]. Materials China, 2004, 23(1): 5-10.

[2] 樊瑜波. 植介入生物材料的结构、力学特性与生物效应[J]. 医用生物力学，2022, 37(2): 197-199.
FAN Y B. Structure, mechanical properties and biological effects of implant biomaterials[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2022, 37(2): 197-199.

[3] 梁芳慧，周廉. 钛和钛合金生物活化研究现状[J]. 稀有金属材料与工程，2003, 31(4): 241-245.
LIANG F H, ZHOU L. Research and development on surface bioactivity methods of titanium and its alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 31(4): 241-245.

[4] 于振涛，张亚锋，袁思波，等. 近 β 型钛合金 Ti4Zr1Sn3Mo25Nb (TLM)热处理与材料强化研究[J]. 稀有金属材料与工程，2008, 37(S4): 542-545.
YU Z T, ZHANG Y F, YUAN S B, et al. Microstructure and wear resistance of a novel Ti4Zr1Sn3Mo25Nb (TLM) alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S4): 542-545.

[5] 李阳，李净凯，邹云，等. 超声纳米表面改性对 316L 不锈钢耐磨性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版)，2021, 42(6): 49-54.
LI Y, LI J K, ZOU Y, et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on wear property of 316L stainless steel[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2021, 42(6): 49-54.

[6] 张鑫，熊毅，陈正阁，等. 疲劳试验温度对 TC11 钛合金表面纳米化后的组织和性能的影响[J]. 中国表面工程，2021, 34(2): 76-85.
ZHANG X, XIONG Y, CHEN Z G, et al. Effect of fatigue test temperature on microstructure and properties of TC11 titanium alloy after surface nanocrystallization[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(2): 76-85.

[7] 段冰冰，王治国，蔡晋，等. 钛合金表面纳米化强化研究进展[J]. 表面技术，2021, 50(12): 202-216, 245.
DUAN B B, WANG Z G, CAI J, et al. Research progress on surface nanocrystallization strengthening of titanium alloys[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 202-216, 245.

[8] 徐圣航，沈凯杰，张惠斌，等. 钛及钛合金表面自纳米化行为研究进展[J]. 中国有色金属学报，2021, 31(11): 3141-3160.
XU S H, SHEN K J, ZHANG H B, et al. Research progress in self-surface nanocrystallization of titanium and titanium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3141-3160.

[9] 顾英剑，黄润，杜恒，等. 钛基金属表面自纳米结晶化对其耐磨性能影响综述[J]. 宁波工程学院学报，2023, 35(1): 1-8.
GU Y J, HUANG R, DU H, et al. Effect of surface self-nanocrystallization on wear resistance of titanium-based metals-an overview [J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2023, 35(1): 1-8.

[10] 王荣华，刘振奇. 表面机械研磨对 5052 铝合金表面纳米化与性能的影响[J]. 锻压技术，2022, 47(1): 209-215.
WANG R H, LIU Z Q. Influence of surface mechanical attrition on surface nanocrystallization and properties for 5052 aluminum Alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(1): 209-215.

[11] 刘星，冉斗，孟惠民，等. 表层纳米化对钛合金电化学腐蚀影响的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程，2021, 50(6): 2244-2253.
LIU X, RAN D, MENG H M, et al. Research progress of the effect

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of surface nanocrystallization on the electrochemical corrosion of titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (6): 2244-2253.

[12] 高家诚，王强，高正源. 机械研磨金属表面纳米化的研究进展[J]. 功能材料，2010, 5(41): 745-750.
GAO J C, WANG Q, GAO Z Y. Research progress in metallic surface nanocrystallization induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 5(41): 745-750.

[13] 何柏林，熊磊. 金属表面纳米化及其对材料性能影响的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程，2016, 39(2): 116-120.
HE B L, XIONG L. Research progress in effect of metal surface nanocrystallization on material properties[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 116-120.

[14] 潘高峰，庞景和，王威. 金属表面纳米化材料重要性能研究进展[J]. 现代经济信息，2016(36): 330-331.
PAN G F, PANG J H, WANG W. Progress in the study of important properties of nanosized materials on metal surfaces[J]. Modern Economic Information, 2016(36): 330-331.

[15] 闫秀侠. 高能喷丸表面纳米化对 TC4 合金疲劳性能的影响[D]. 大连：大连交通大学，2009.
YAN X X. Effect of nanocrystallization in surface layer on fatigue strength of TC4 titanium alloy by high energy shot peening[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009.

[16] 罗钦毫. TB6 钛合金表面纳米化层的组织与性能研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2015.
LUO Q H. Structure and properties of surface nanometer layer in TB6 alloy[D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2015.

[17] 张聪惠，解钢，宋薇，等. 表面纳米化 TC4 疲劳性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2015, 44(4): 866-870.
ZHANG H C, XIE G, SONG W, et al. Fatigue performance of surface nanocrystallized TC4[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 866-870.

[18] 武永丽，王迎辉，熊毅，等. 超音速微粒轰击诱导表面纳米化对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料开发与应用，2022, 37(6): 63-70.
WU Y L, WANG Y H, XIONG Y, et al. Effect of supersonic fine particle bombardment induced surface nanocrystallization on the microstructure and mechanical properties of TC11 alloy[J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(6): 63-70.

[19] 何晓梅，赵西成，王敬忠，等. 喷丸处理实现纯钛表面纳米化的研究[J]. 热加工工艺，2007, 36(16): 7-9, 55.
HE X M, ZHAO X C, WANG J Z, et al. Surface nanocrystallizatien of pure titannium treated by shot peening[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(16): 7-9, 55.

[20] WANG Z, LUAN W Z, HUANG J J, et al. XRD investigation of microstructure strengthening mechanism of shot peening on laser hardened 17-4PH[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(21): 6417-6425.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net