

表面织构改善钛合金摩擦学性能的研究进展

林乃明, 谢瑞珍, 邹娇娟, 王振霞, 马 永, 王志华, 唐 宾

(太原理工大学, 山西 太原 030024)

摘 要: 源于自然界非光滑表面的表面织构能够起到捕捉磨屑、储存润滑剂、减小接触面积等积极作用, 被认为是一种改善材料摩擦学性能的有效途径, 并在改善钛合金摩擦学性能方面取得了有益成果。本文重点关注了钛合金表面织构的设计与加工、减摩与抗磨机理、与表面技术的复合应用, 综述了表面织构在改善钛合金的摩擦学性能方面的研究进展, 并展望了相关研究思路和方法。

关键词: 表面织构; 钛合金; 摩擦学

中图分类号: TG146.23; TG 174.451

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2592-08

钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性优良和生物相容性好等特点, 而被应用于诸多领域^[1-6]。但表面低硬度、摩擦系数大、耐磨性差等缺点严重限制了钛合金在摩擦工况下的应用^[7-9]。而从制备成型和热处理方面改善钛合金摩擦学性能的效果有限, 表面工程技术能够赋予材料表面全新组织、成分和性能, 被广泛用于提高钛合金的表面性能^[10-12]。按照表面处理的实现途径分类, 已用于改善钛合金摩擦学性能的表面技术有: 表面涂镀、表面改性和表面加工(硬化)等^[13-15]。

除了借助表面技术能够改善材料的摩擦学性能外, 恰当的表面形貌设计, 即形成表面织构亦会对其摩擦学行为产生积极影响^[16]。表面织构的设计思想来源于自然界中普遍存在着的非光滑表面(图 1), 这些非光滑表面显示出独特的耐磨、减摩、疏水、防污等功能^[16-18]。近期的仿生学研究表明, 具有一定规则排列特征、非光滑形态的织构表面, 如凹坑、沟槽和凸

包等(图 2)具有更好的摩擦学性能^[17]。源于仿生非光滑表面的表面织构已成为国内外表面和界面科学领域的一个研究热点, 亦是表面织构设计的创新源泉^[18]。研究表明, 基于荷叶、三叶草、海豚、鲨鱼、壁虎和蝴蝶等功能化的表面仿生摩擦学已日益受到广泛关注, 且自首次在发动机缸套表面制造交叉网纹结构以来, 在仿生减摩、抗磨、增摩、减震、抗粘附、抗蠕爬等多个领域取得一定的研究成果, 如滑雪板、高尔夫球、飞机螺旋桨蒙皮贴片等(图 3)^[19-21]。通过合理设计在材料表面加工形成非光滑微细织构能够影响摩擦运动部件表面的接触状态和润滑状态, 达到改善摩擦学性能的目的。

本文基于表面织构的积极作用, 从表面织构的加工设计、减摩与抗磨机理、功能化应用入手, 以 Ti6Al4V 合金为主, 综述了表面织构在改善钛合金摩擦学性能的研究进展。

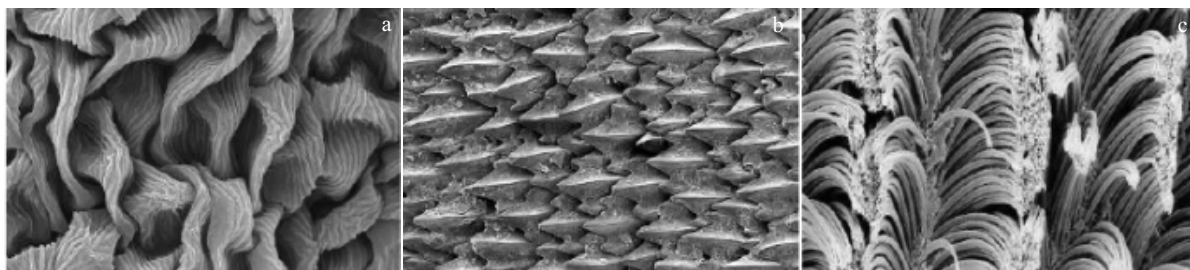


图 1 自然界中的非光滑表面

Fig.1 Non-smooth surfaces in nature: (a) clover, (b) shark skin, and (c) gecko plantar

收稿日期: 2017-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51501125); 中国博士后科学基金(2016M591415)

作者简介: 林乃明, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 太原理工大学表面工程研究所, 材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024, 电话: 0351-6010540, E-mail: lnmlz33@126.com

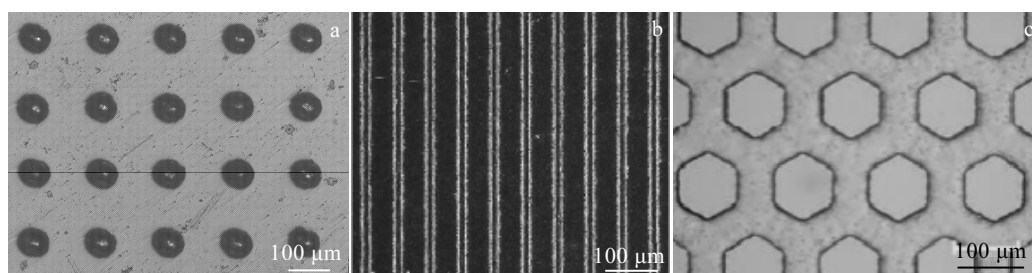


图 2 典型表面织构

Fig.2 Typical surface texture: (a) dimple, (b) groove, and (c) protrusion

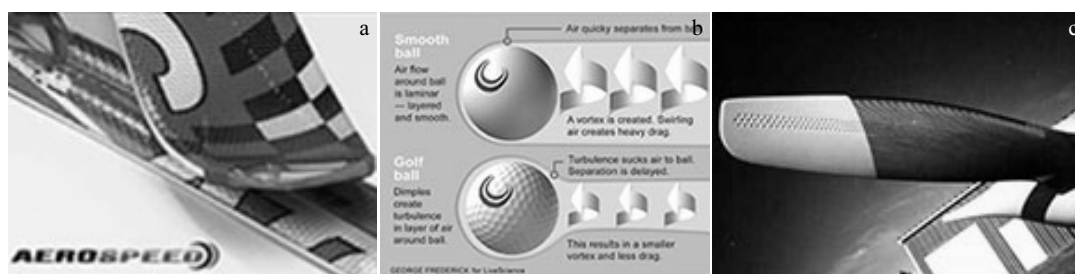


图 3 表面织构应用实例

Fig.3 Application examples of surface texture: (a) skis, (b) golf, and (c) propeller skin patch

1 Ti6Al4V 合金的表面织构化研究

1.1 表面织构的减摩、抗磨机理及摩擦学测试

摩擦学测试主要通过球-盘式、销-盘式和往复式磨损试验,测试条件有干摩、水润滑和油润滑磨损^[22]。对摩材料有 AISI 52100、Cr 合金、涂 Cr SAE 52100、100 Cr6、GCr15 和 Si_3N_4 。不同的表面织构对特定测试条件下摩擦学性能的影响各有差异,但织构化的 Ti6Al4V 在磨损形貌、摩擦系数、磨损率和磨损极限等方面均表现出一定程度的改善。总的来说,表面织

构的功能化可以通过在材料表面加工具有不同形状、尺寸和面积率的下凹状或凸起状纹理来实现^[23-25]。这里以微凹坑阵列点接触磨损为例,说明表面织构的减摩机理,不同的润滑状态下,表面织构改善运动部件间摩擦学性能的作用机理也不相同^[26-28]。

表面织构在相对运动的部件摩擦过程中的积极作用如图 4 所示,主要包括 2 方面:(1) 在富油或混合润滑条件下,微坑或微沟槽能够充当微小流体动压润滑轴承,产生附加流体动压;(2) 而干摩擦条件下,表面织构可以捕捉并容纳磨屑颗粒,减少磨粒对摩擦

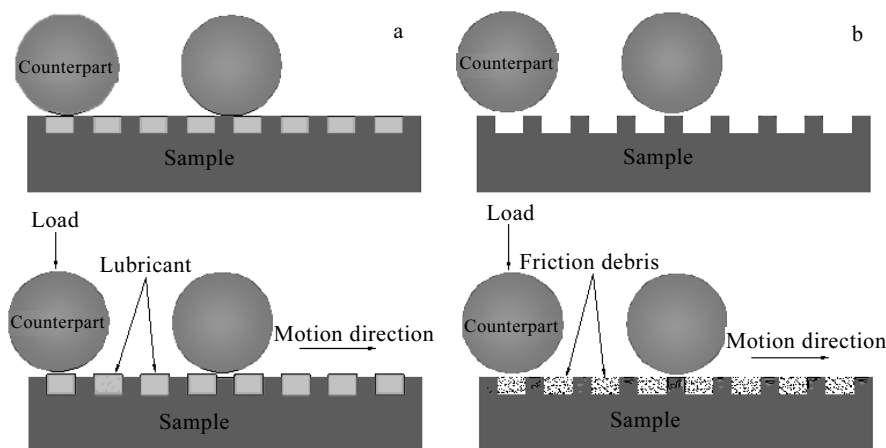


图 4 表面织构减摩抗磨机理

Fig.4 Friction reducing/wear resist mechanism of texture surface: (a) storing lubricants and (b) capturing wear debris

副表面的犁削作用，此外也减少了摩擦副表面的实际接触面积，从而达到减摩、抗磨的目的^[23-29]。

1.2 表面织构的设计与制备

表面织构的设计在改善 Ti6Al4V 合金摩擦学性能上影响很大，研究表明，合适的表面织构几何参数，如形状、深度、面积率等参数的优化匹配将直接影响其摩擦学性能。目前，Ti6Al4V 的表面织构形状主要是表面“减材”方式，包括点阵、网纹、沟槽等，且表面织构单元以圆形凹坑为主(如表 1 所示)。不同形状、尺寸的表面织构都对应不同的摩擦学性能影响以及不同的最佳面积率。电火花精细加工、Nd:YAG 激光加工、激光熔凝、激光喷丸等技术均可实现 Ti6Al4V 合金表面织构化。其中激光表面织构技术 (laser surface texturing, LST) 是在材料表面施加极高的能量，使之发生物理化学变化，从而显著改变材料表面耐磨性。这种快速、控制精准、热影响区小且无污染的加工技术明显应用较多。

Hu 等^[30]研究了 45, 160, 300 μm 3 种不同孔径的 ST 1-1 型阵列表面在 2 种不同粘度润滑油润滑条件下与 AISI 52100 对磨时的耐磨性。结果显示,ST-Ti6Al4V 的摩擦系数在高转速、高载荷、高粘度润滑条件下明显更小，且最佳孔径为 160 μm。徐鹏飞等^[31]研究了不同网纹宽度、深度、间宽比和网纹角度的 ST 1-2 型网纹型表面与 Si₃N₄ 对磨时的水润滑摩擦学性能，结果表明，当网纹宽度为 0.2 mm，深度为 0.125 mm，间

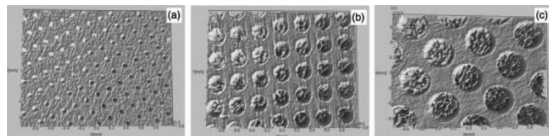
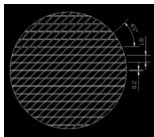
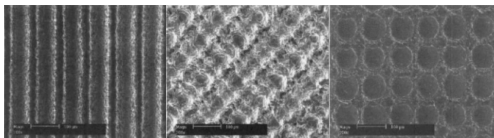
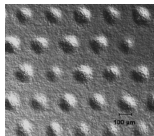
宽比为 10，角度为 45°时，摩擦副的稳态摩擦系数最小；当网纹深度为 0.05 mm，角度为 45°时，摩擦副磨损量最低。连峰等^[32]通过研究直线、网格、凹坑 ST 1-3 型 3 种不同间距的图案表面与 Si₃N₄ 小球对磨的干摩擦磨损性能，发现 3 种织构表面的磨痕与 Ti6Al4V 相比明显较浅，磨损量明显较小。但是直线、网格织构不利于减小摩擦系数,而间距为 200 和 300 μm 的凹坑织构表面摩擦系数明显较小。Caslaru 等^[33,34]也探索研究了凹坑直径为 120 μm，深度为 0.507 μm 的不同凹坑密度(10%, 20%)的 ST 1-4 型微凹坑阵列表面与铬钢球对磨时的油润滑摩擦学性能。结果表明,密度为 10% 的凹坑阵列在润滑条件下对减摩有积极作用。

1.3 “表面织构+表面技术”的复合处理

基于表面织构和表面工程技术在改善材料摩擦学性能方面的积极作用，图 5 所示的 2 种复合形式可实现“1+1>2”的效果已受到许多学者的关注。目前，Ti6Al4V 的摩擦学研究方面主要是表面织构+表面涂层/薄膜的复合。

在遵循物理性质、结构及化学与基材匹配的原则的基础上，Ti6Al4V 的表面织构已由单一的表面织构过渡到表面织构-表面(涂层/薄膜)技术复合且能进一步提高 Ti6Al4V 合金的耐磨性，其中表面织构的存储润滑剂和捕获磨屑功能亦发挥着显著的作用^[35]。如表 2 所示，Hu 等^[36]研究了涂有光亮的 MoS₂ 固体润滑涂层的不同微孔密度(13%，23%，44%)的 ST2-1 型图案

表 1 Ti6Al4V 合金的单一表面织构
Table 1 Single surface texture on Ti6Al4V alloy

Surface textures (ST) on Ti6Al4V		Wear condition	Properties	Ref.	
ST 1-1	Dimple texture		Pin (AISI 52100)-on-disk; poly-alphaolefin (PAO) lubricants	COF	[30]
ST 1-2	Mesh pattern grooves		Ball (Si ₃ N ₄)-on-disk; deionized water	COF, wear loss	[31]
ST 1-3	Line, grid and dot textures		Dry sliding; Si ₃ N ₄ Ball	COF, wear loss	[32]
ST 1-4	Dent arrays		Linear sliding; oil (gear box oil and engine oil) lubricant; chrome steel ball	COF, wear rate	[33,34]

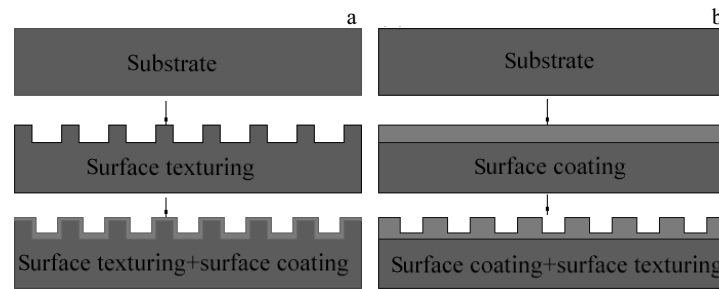
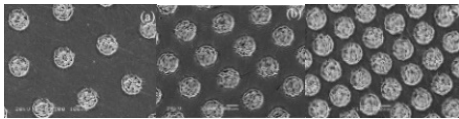
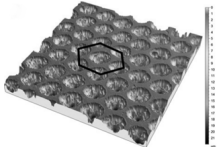
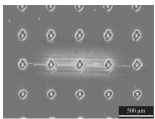
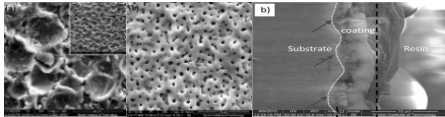
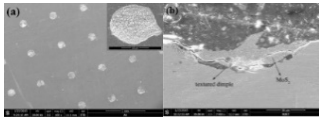
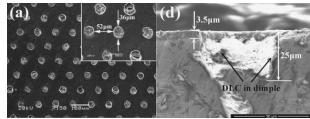
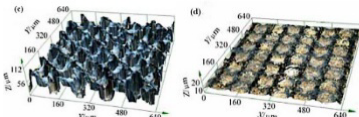
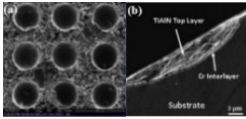
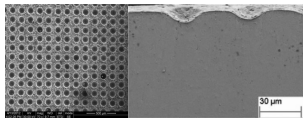


图 5 表面织构化与表面技术复合示意图

Fig.5 Schematic diagrams of complex treatment: (a) surface texturing+surface coating/film and (b) surface coating/film+surface texturing

表 2 Ti6Al4V 合金表面织构-表面涂层/薄膜体系

Table 2 Surface texture-surface coating/film system on Ti6Al4V alloy

	Systems of ST		Wear conditions	Properties	Ref.
ST 2-1	Micro-dimple Burnished MoS ₂ film		Pin (AISI 52100)-on-disk; dry friction	COF, wear life	[36]
ST 2-2	Dimple texture 2-μm-thin MoS ₂ coating		Dry reciprocating sliding; 100Cr6 steel ball	COF, lifetime	[37]
ST 2-3	Dimple texture Cr-doped DLC film		Pin (Cr-plated SAE 52100)-on-disk; PAO oil lubricant	COF, wear rate	[38]
ST 2-4	FPSP micro- pattern MAO		Ball (SAE 52100)- on-disk dry sliding	Wear volume	[39]
ST 2-5	Dimple arrays Hard peo coating MoS ₂ film		Pin (GCr15 steel)- on-disk dry sliding	COF, friction life	[40,41]
ST 2-6	Dimple patterns Chromium interlayer 3.3 μm thin-DLC films		Ball (AISI52100)- on-plate dry and ionic liquid reciprocating	COF, wear rate	[42]
ST 2-7	Grid and dot micro- structure Epoxy resin SiO ₂ coating		Dry reciprocating sliding; Si ₃ N ₄ ball	COF, wear rate	[43]
ST 2-8	Dimple texture Cr interlayer TiAlN film of 4~5 μm		Pin-on-disk (AISI 52100) dry sliding	Wear rate, sliding distance	[44]
ST 2-9	Dimple texture AlCrN coating of 4± 0.5 μm ^[43]		Pin-on-disk (AISI 52100) dry sliding	Wear rate, sliding distance	[45]

表面对摩 AISI 52100 时的干摩擦耐磨性,发现涂有的织构表面在全部测试载荷下都表现比 Ti6Al4V 更加的耐磨性,而单一孔织构表面只有高孔密度表面在低载、低滑动速度条件下,摩擦系数才低于 Ti6Al4V。此外,对于摩擦系数而言,最佳孔密度为 23%,对于磨损寿命而言最佳孔密度为 44%。Ripoll 等^[37]也研究了 ST2-2 型呈六边形排列的不同孔间距(40, 50, 60, 70 μm)的 MoS_2 涂层-孔织构表面在不同振幅下的干摩擦耐磨性,结果表明 MoS_2 涂层-孔织构表面显著减小了摩擦系数,尤其是在高孔密度情况下;对于大振幅磨损,孔织构不利于涂层寿命,对于小振幅磨损,孔织构起到捕获磨屑的作用,但孔距离也不宜在 50 μm 以下。此外 Amanov 等^[38]对表层涂有掺 Cr 类金刚石薄膜的 ST 2-3 型孔阵列表面在 5~50 N 载荷下的油润滑磨损行为进行了研究。结果表明与基材和单一织构表面比,涂有掺 Cr 类金刚石薄膜的微孔表面摩擦系数减小量在织构表面的 39%的基础上增加 50%~65%,且磨损率明显低于与基材相差不大的织构表面。Wang 等^[39]研究了细颗粒喷丸(fine particle shot peening, FPSP)加工而成的微图案表面微弧氧化(micro-arc oxidation, MAO)陶瓷涂层的复合织构表面(ST 2-4)的干摩擦耐磨性。结果显示,由于多孔结构对磨屑的捕获作用,FPSP-MAO5 和 MAO10 涂层显著地提高了基体的耐磨性。

除了以上单层织构设计外,表面织构也向多层功能化过渡。Qin 等^[40,41]研究了从内到外依次由不同凹坑密度(8%, 12%, 20%, 33%, 55%)的表面织构、不同粗糙度等离子体电解氧化(plasma electrolytic oxidation, PEO)陶瓷层和 MoS_2 固体薄膜(ST 2-5)复合表层结构的干摩擦耐磨性。结果显示,由于这种直径 250 μm 大坑和小坑混合凹坑结构对润滑油、硬质氧化涂层的存储以及硬质氧化层提供高载荷支持作用,LST/PEO/ MoS_2 表层结构表现出比 LST/ MoS_2 更长的低系数磨损寿命,且织构凹坑密度为 55%与涂层粗糙度为 1.0 μm 匹配,摩擦系数最低,约 0.15。He 等^[42]也研究了以薄 Cr 层作中间层,不同密度(44%, 24%, 13%)凹坑图案作内层和类金刚石薄膜(diamond-like carbon, DLC)作外层的复合表层结构(ST 2-6)的干摩擦和油润滑耐磨性。结果表明,由于凹坑诱导石墨转移和凹坑存储磨屑/润滑液功能,在干摩和油润滑条件下,DLC-T44% 表面的摩擦系数明显比单一织构低凹坑密度表面更低。此外,膜硬度的维持 DLC-T24%表面在干摩时磨损率最低。连峰等^[43]研究了内层间距为 100 μm 的网格、点阵微结构,环氧树脂中间层和外层 SiO_2 涂层构成的表层(ST2-7)干摩擦耐磨性。结果表

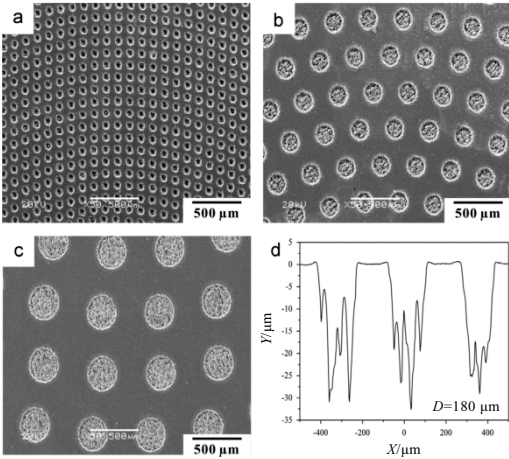
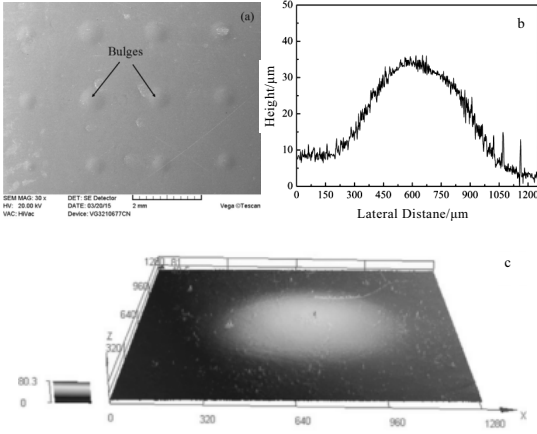
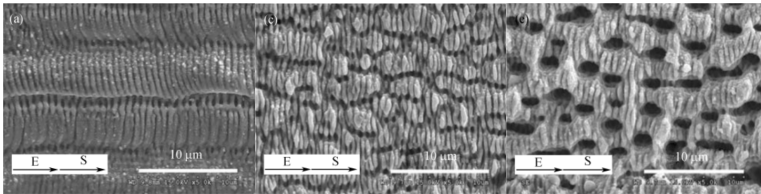
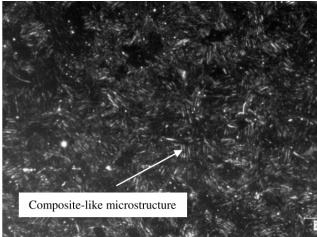
明,点阵和网格超疏水表面比磨损率分别降低了 32.3%和 53.8%,摩擦系数波动幅度和数值也都减小了,且点阵摩擦系数比网格小。Muthuvel 等^[44,45]研究了内层凹坑密度约为 38%~42%的表面织构,TiAlN 和 AlCrN 外层组成的织构表层在 9.8~29.7 N 载荷下干摩擦的耐磨性。结果表明,与单一涂层表面相比,Cr 中间层的 ST 2-8 和无中间层的 ST 2-9 型表层图案结构在膜-基结合强度得到提高的基础上,磨损率在所有试验载荷下都较小,且到稳定摩擦状态滑动距离都较大。

2 其它钛合金的表面织构化研究

目前,表面织构在改善其它钛合金的摩擦学性能方面也获得了较多关注(如表 3 所示)。Sun 等^[46]在 TC11 合金表面形成了 6 种不同孔径(60, 180, 300 μm)和表面密度(10%, 25%, 40%)的微结构,并研究了 500 $^{\circ}\text{C}$ 下织构表面的磨损特性。结果表明,规则的织构化表面增强了材料表面的吸收氧,促进了摩擦氧化物的形成,显著提高了 TC11 的耐磨性。与未织构化的合金相比,磨损量降低将近 50%,较小直径和较高密度的微坑结构有可能提高 500 $^{\circ}\text{C}$ 下 TC11 合金的耐磨性。Tang 等^[47]通过系列压痕(最大载荷分别为 15, 20, 25 kN)、打磨(400#, 800#, 1000# 砂纸)-加热(100 $^{\circ}\text{C}/10\text{ min}$)的方法,在 TiNi 合金表面构造了 3 种不同高度(24.3, 34.1, 31.0 μm)的自恢复凸起织构,并研究了其在油润滑销-盘式磨损条件下磨损行为。结果表明,磨料磨损和氧化磨损是凸起织构化试样的主要磨损机制。与未织构化表面相比,由于流体动力学效应,凸起高度为 24.3, 31.0, 34.1 μm 的织构表面摩擦系数分别降低了 13.8%, 40.5%, 44.8%。

Liang 等^[48]也通过线式偏振飞秒激光技术在 NiTi 合金表面制备了多孔微结构,聚焦点以一定的速度(0.8 mm/s)移动。在不同的激光能(10, 100, 400 μJ)条件下,形成新型微结构在保持晶体结构不变的前提下有所不同。有羽毛状的波纹花样和团簇状的孔织构,当激光能为 400 μJ 时,产生了周期性的多孔表面。此外,Qiao 等^[49]通过激光振动能(laser shock energy levels, LSEL)分别为 3, 6 和 9 J 的喷丸处理在 Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B 合金表面形成菊花状的花纹,当激光脉冲能足够高时,产生了许多微凹坑和凸起。且发现 TiAl 合金的粗糙度和菊花状结构覆盖面积随着激光脉冲能的增加而增加,当激光脉冲能(Laser pulse energy, LPE)为 9 J 时达到最大值 0.37 μm 。

表 3 其它钛合金的表面织构
Table 3 Surface texture on other titanium alloys

Alloys	Surface texture	Annotation	Ref.
TC11		a, 60 μm; b, 180 μm; c, 300 μm	[46]
TiNi		$F=25\text{ kN}$, a, 2D SEM; b, cross-sectional profile; [47] c, 3D morphologies	
NiTi		a, 10 μJ; b, 100 μJ; c, 400 μJ	[48]
Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B		9 J	[49]

3 结 语

上述关于表面织构改善钛合金摩擦学性能的有益成果为表面织构、表面技术的发展和进一步拓展钛合金的在摩擦工况下的应用提供了宝贵的理论指导和技术数据。

1) 合理设计表面织构能够改善钛合金的摩擦学性能，目前，钛合金表面织构的基本单元以圆形凹坑

型为主，在典型的凹坑、网格和沟槽型织构的基础上，更多复杂形状的凹坑、凸起形状和仿生表面织构有待深入研究。

2) 表面织构的积极作用会受载荷、频率、振幅等摩擦试验参数影响，相同的表面织构在不同的试验参数下的作用不同，不同的织构表面对基体材料摩擦学性能的改善也有所差异。

3) 表面织构+涂层/薄膜体系能进一步发挥表面

织构和表面技术的优势,除了与上述涂层/薄膜复合外,表面织构还能与表面合金化、表面纳米化等表面技术复合,达到“1+1>2”的效果,促进钛合金的表面功能化应用。

4) 目前,这种针对平面的表面织构加工在复杂的曲面上也有实际需求,这就需要进一步研究先进的现代制造技术,如高速成形技术和现代特种加工技术,从而推进表面织构化钛合金的工程化应用。

参考文献 References

- [1] Berni M, Lopomo N, Marchiori G *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2016, 62: 643
- [2] Zhang Jianbin(张建斌), Yu Dongmei(余冬梅). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(1): 247
- [3] Zhang Yunlu(张云露), Luo Xinyi(骆心怡), He Fei(何斐). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(1): 204
- [4] Leng Chongyan(冷崇燕), Zhang Xu(张旭), Zhou Rong(周荣) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(3): 556
- [5] Sampaio M, Buciumeanu M, Henriques B *et al. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*[J], 2016, 54: 123
- [6] Zhu Kangping(朱康平), Zhu Jianwen(祝建雯), Qu Henglei(曲恒磊). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(11): 2058
- [7] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤), Wang Yifei(王毅飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(12): 2135
- [8] Yao Xiaofei(姚小飞), Xie Faqin(谢发勤), Han Yong(韩勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(9): 1539
- [9] Yang Yingli(杨英丽), Luo Yuanyuan(罗媛媛), Zhao Hengzhang(赵恒章) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 538
- [10] Huang Weijiu(黄伟九), Li Zhaofeng(李兆峰), Wang Guo(王国) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(7): 1230
- [11] Qin Lin(秦林), Li Zhe(李哲), Ma Lianjun(马连军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(12): 2226
- [12] Tang Jingang(汤金钢), Liu Daoxin(刘道新), Tan Changbin(唐长斌) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 331
- [13] Feng C J, Hu S L, Jiang Y F *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2013, 42(12): 2427
- [14] Wang C P, Li F G, Xiao M L *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2015, 44(4): 838
- [15] Qin Lin(秦林), Tang Bin(唐宾), Liu Daoxin(刘道新) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(9): 1465
- [16] Wang Jingqiu(王静秋), Wang Xiaolei(王晓雷). *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2015, 51(23): 84
- [17] Ji Jinghu(纪敬虎), Fu Yonghong(符永宏), Hua Xijun(华希俊) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2014, 27(4): 107
- [18] Zhao Wenjie(赵文杰), Wang Liping(王立平), Xue Qunji(薛群基). *Tribology*(摩擦学学报)[J], 2011, 31(6): 622
- [19] Wen L, Weaver J C, Lauder G V. *Journal of Experimental Biology*[J], 2014, 217(10): 1656
- [20] Bixler G D, Bhushan B. *Soft Matter*[J], 2012, 8(44): 11 271
- [21] Autumn K, Gravish N. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*[J], 2008, 366(1870): 1575
- [22] Wang Xiaolei(王晓雷), Liu Haiye(刘海叶), Huang Wei(黄巍). *Machine Building and Automation*(机械制造与自动化)[J], 2013, 42(4): 5
- [23] Mu Qian(穆谦). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013
- [24] Yan Dongsheng(严东升). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009
- [25] Yuan Sihuan(袁思欢). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011
- [26] Kolobov Y R, Golosov E V, Vershinina T N *et al. Applied Physics A*[J], 2015, 119(1): 241
- [27] Ma W L, Lu J J. *Wear*[J], 2011, 270(3-4): 218
- [28] Wos S, Koszela W, Pawlus P. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*[J], 2015, 229(4): 389
- [29] Yu Haiwu(于海武), Yuan Sihuan(袁思欢), Sun Zao(孙造) *et al. Journal of South China University of Technology*(华南理工大学学报)[J], 2011, 39(1): 106
- [30] Hu T C, Hu L T, Ding Q. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*[J], 2012, 226(10): 854
- [31] Xu Pengfei(徐鹏飞), Zhou Fei(周飞), Wang Qianzhi(王谦之) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2012, 32(4): 377
- [32] Lian Feng(连峰), Zhang Huichen(张会臣), Pang Lianyun

- (庞连云). *Lubrication Engineering*(润滑与密封)[J], 2011, 36(9): 1
- [33] Caslaru R. *Thesis for Master*[D]. Tuscaloosa: The University of Alabama, 2010
- [34] Guo Y B, Caslaru R. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(4): 729
- [35] Zhang Xiaowei(张晓伟), Liu Hongxi(刘洪喜), Jiang Yehua(蒋业华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(1): 178
- [36] Hu T C, Hu L T, Ding Q. *Surface and Coatings Technology* [J], 2012, 206(24): 5060
- [37] Ripoll M R, Simić R, Brenner J *et al. Tribology Letters*[J], 2013, 51(2): 261
- [38] Amanov A, Sasaki S. *Tribology International*[J], 2013, 64: 155
- [39] Wang Y M, Guo J W, Zhuang J P *et al. Applied Surface Science*[J], 2014, 299: 58
- [40] Qin Y K, Xiong D S, Li J L. *Applied Surface Science*[J], 2015, 347: 475
- [41] Qin Y K, Xiong D S, Li J L. *Surface and Coatings Technology*[J], 2015, 269: 266
- [42] He D Q, Zheng S X, Pu J B *et al. Tribology International*[J], 2015, 82: 20
- [43] Lian Feng(连峰), Ren Hongmei(任洪梅), Guan Shankun(管善堃) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2015, 25(9): 2421
- [44] Muthuvel P A, Rajagopal R. *Surface Engineering*[J], 2014, 30(10): 758
- [45] Muthuvel P A, Rajagopal R. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*[J], 2013, 227(10): 1157
- [46] Sun Q C, Hu T C, Fan H Z *et al. Tribology International*[J], 2015, 92: 136
- [47] Tang G H, Ho J K L, Dong G N *et al. Tribology International*[J], 2016, 96: 11
- [48] Liang C Y, Yang Y, Wang H S *et al. Chinese Science Bulletin*[J], 2008, 53(5): 700
- [49] Qiao H C, Zhao J B, Zhang G X *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2015, 276: 145

Research Progress on Surface Texture for Improving Tribological Properties of Titanium Alloys

Lin Naiming, Xie Ruizhen, Zou Jiaojuan, Wang Zhenxia, Ma Yong, Wang Zhihua, Tang Bin
(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Inspired by non-smooth surfaces in nature, surface texture which can play positive roles in tribology such as capturing debris, storing lubricant and reducing the contact area during service has been regarded as an effective approach to improve the tribological behaviors of materials. Some beneficial results in enhancing tribological properties of titanium alloys have been obtained. This review was focused on the studies of design and processing of surface texture, mechanisms of friction reduction and wear-resistance, duplex treatments with surface technology applied on titanium alloys. Research progress on surface texture for improving tribological properties of titanium alloys was summarized. The prospect of surface texture related research ideas and methods of titanium alloys were suggested.

Key words: surface texture; titanium alloy; tribology

Corresponding author: Lin Naiming, Ph. D., Associate Professor, Research Institute of Surface Engineering, Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structure Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010540, E-mail: lnmlz33@126.com