

钛基复合材料耐磨性研究进展

钟 亮, 付 玉, 徐永东*, 宋运坤, 王荫洋

(中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 钛合金因具有高比强度、高比模量、耐腐蚀、耐低温、无磁等性能特点而被广泛应用。然而, 与传统钢铁材料相比, 钛合金存在弹性模量低、耐热性能不足、耐磨性差等局限, 阻碍其在航空航天、兵器行业等领域的推广应用。与钛合金相比, 钛基复合材料可将基体钛合金高强塑性与增强体高模量、高耐磨的优势相结合, 具有比钛合金更高的弹性模量、耐磨性及高温性能, 从而满足一些高承载、抗冲击、高耐磨和高温抗氧化等极端工况条件下的使用要求。从钛基复合材料发展历程出发, 对钛基复合材料耐磨性研究进展加以概述, 主要介绍了钛基复合材料耐磨性表征方法和摩擦磨损行为, 对钛基复合材料良好耐磨性能、高耐磨钛基复合材料的设计及 TMCs 表面耐磨改性技术进行阐述, 最后进行总结与展望。

关键词: 钛基复合材料; 耐磨性; 耐磨机理; 表面耐磨改性; 激光熔覆沉积

中图分类号: TF823, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0036-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

Research progress on wear resistance of titanium matrix composites

Zhong Liang, Fu Yu, Xu Yongdong*, Song Yunkun, Wang Yinyang

(Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, Zhejiang, China)

Abstract: Titanium alloys are widely used because of their excellent comprehensive properties such as high specific strength, high specific modulus, corrosion resistance, low temperature resistance, and non-magnetism. However, compared with traditional steel materials, titanium alloys have limitations such as low elastic modulus, insufficient heat resistance and poor wear resistance, which hinder their promotion and application in the aerospace, weapon and other industries. Compared with titanium alloys, titanium matrix composites can combine the advantages of high-strength plasticity of the matrix titanium alloy and the high modulus and high wear resistance of the reinforcement. Titanium matrix composites have higher elastic modulus, wear resistance and high-temperature performance than titanium alloys. It meets the requirements of extreme working conditions such as high load, impact resistance, high wear resistance and high temperature oxidation resistance. Starting from the development history of titanium matrix composites, this paper summarized the research progress on wear resistance of titanium matrix composites, and the characterization methods of wear resistance, friction and wear behaviors of titanium matrix composites were also introduced. The good wear resistance mechanism of titanium matrix composites, the design of high wear-resistance titanium matrix composites and wear resistant surface modification technology were also described.

Key words: titanium matrix composites, wear resistance, mechanism, wear resistant surface modification technology, laser cladding deposition

收稿日期: 2021-06-15

基金项目: 宁波市自然科学基金项目(202003N4340)。

作者简介: 钟亮 (1995 —), 男, 湖北麻城人, 硕士研究生, 研究方向为钛合金及其复合材料, E-mail: huahu163huahu@163.com; * 通讯作者: 徐永东, 男, 研究员, 研究方向为轻金属及其复合材料, E-mail: ydxu108@163.com。

0 引言

随着国防事业发展,兵器行业中弹箭武器壳体、装甲车辆平衡肘等构件都对钛合金性能提出更高要求,但钛合金仍存在弹性模量低、耐热性能不足、耐磨性差等缺点,阻碍其在兵器行业等领域的推广应用^[1-3]。一直以来,人们在提高钛合金的耐磨性和耐热性能方面做了很大努力,研究发现钛基复合材料有望解决这些问题。钛基复合材料(Titanium Matrix Composites, TMCs)可将基体钛合金高强塑性与增强体高模量、高耐磨的优势相结合,与钛合金相比,不仅有更高强塑性,而且具有良好的耐磨性^[4-5]。TMCs可弥补钛合金耐磨性差等缺点,替代部分钛合金构件,拓宽钛合金在兵器领域的应用,提升装备性能。因此,研究TMCs的摩擦磨损机理,开发耐磨TMCs能促进先进武器装备的发展,延长以TMCs为兵器构件的使用寿命。

TMCs的研究始于20世纪70年代,起初使用外加法制备连续纤维增强钛基复合材料(Continuously Reinforced Titanium Matrix Composites, CTMCs)^[6]。80年代,TMCs应用于航空航天领域,非连续短纤维/颗粒/晶须增强钛基复合材料(Discontinuously Reinforced Titanium Matrix Composites, DRTMCs)开始受到关注。由于CTMCs存在严重的各向异性、加工性差等问题^[7-8],研究逐渐聚焦在DRTMCs。90年代,DRTMCs制备工艺技术逐渐成熟^[9]。钛基复合材料常常作为结构材料,应用在火箭壳、导弹尾翼、战车履带、发动机等零件上。对于一些特殊零件,钛基复合材料的应用可以替代原来昂贵的材料,在保证性能的前提下节约成本。2000年前后,Lu等人^[10]制备(4%TiB_w+4%TiC)/Ti6242的TMCs综合性能优异,认为体积比TiB_w:TiC=1:1是最优的增强相配比。随着国防事业和工业领域的发展,对TMCs提出更高要求。然而,TMCs的发展还存在很多问题:①传统粉末冶金法制备的TMCs塑性低;②TMCs的耐磨性机理的研究不够充分;③TMCs耐高温性能有待进一步提高。21世纪至今,随着构型复合化、仿生化的提出^[11-12],多尺度混杂耦合增强相的引入以及增材制造等新型方法的提出与应用,TMCs的塑性、耐磨性、耐高温性有望极大改善^[13]。

笔者以TMCs的耐磨性为关注点,对TMCs的耐磨研究进行总结与展望。主要对TMCs的耐磨

性表征方法、摩擦磨损行为、耐磨特性、高耐磨设计、表面耐磨改性等方面加以阐述,为TMCs耐磨性研究提供基础和理论指导。

1 TMCs耐磨性研究进展

1.1 耐磨性表征

耐磨性能用以表征材料在摩擦过程中抵抗磨损的能力^[14]。耐磨性的表征均与摩擦磨损相关。为了评估耐磨性,定义材料磨损系数 K , K 由Archard^[15]方程计算得到,如式(1)所示,并且常用式(2)、(3)表示磨损率。此外,摩擦因数从一定程度上反映材料耐磨性。摩擦因数表示发生摩擦磨损时摩擦力与正压力间的比值。摩擦因数是材料内禀属性,可以用式(4)表示^[16]。耐磨材料往往摩擦因数小,但摩擦因数小并不意味着材料的耐磨性好。

$$Q = \frac{KPS}{H} \quad (1)$$

$$WR = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

$$W = \frac{Q}{PS} \quad (3)$$

$$COF = \frac{\tau_s}{H} \quad (4)$$

式中, Q 为摩擦磨损体积,mm³; K 为磨损系数; P 为摩擦磨损载荷,N; S 为摩擦磨损时滑动距离,mm; H 为材料维氏硬度; WR 、 W 为比磨损率; COF 为摩擦因数; τ_s 为表面的剪切强度,MPa。

孙亮^[17]制备的(5%TiC+5%TiB)/IMI834的摩擦因数为0.25,磨损量为3.638 mm³,主要归功于增强相的强化和热处理后硬度升高以及增强相的球化,硬度(HRC)最高达到58,加入0.2%La,硬度再次增加,摩擦因数减小为0.24,这种摩擦因数低的材料适合作为减摩耐磨TMCs材料。Gürbüz^[18]对石墨烯增强钛基复合材料的耐磨性进行了研究,石墨烯起到屏障的作用,能有效地抵抗剪切力,采用低含量石墨烯能有效地提高其耐磨性,在同样的载荷下磨损量小,0.15%的石墨烯-Ti在10 N载荷下磨损速率为 2.86×10^{-5} mm³/(N·m)。在相同的服役条件下,摩擦因数低的材料,磨损表面受剪切力小,更有利于抗磨损。

1.2 TMCs摩擦磨损方式

常见摩擦磨损方式主要有:磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。磨粒磨损摩擦副表面出现犁沟。硬度能表征材料抵抗磨粒磨损能力的强弱,但硬度与抵抗磨粒磨损能力不是简单的对应关系。

退火状态下材料耐磨性与硬度成正比,因摩擦磨损过程中摩擦副表面本身就存在冷作硬化,故加工变形冷作硬化对材料的耐磨性贡献不大。磨粒磨损破坏方式有表面材料的切削、剥落、疲劳。当摩擦副接触面积小,接触处表面压力极大时,温度会急剧升高,易发生粘着磨损,典型特征为发生材料的转移。当摩擦副接触应力循环变化,相互滚动摩擦面之间常发生疲劳磨损。典型特征为材料表面因疲劳剥落形成凹坑,常有鳞剥和点蚀两种疲劳坑。腐蚀磨损有氧化磨损和特殊介质腐蚀磨损两种,在摩擦过程中,金属与环境介质发生反应或电化学腐蚀而使得表面损伤。

TMCs 的摩擦磨损机制主要为磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损等方式^[19-21]。TMCs 加入高硬度的增强相,当增强相脱落时,磨损时易与磨屑形成磨粒,发生磨粒磨损。经过长时间磨损,摩擦副表面温度升高,塑性增大,伴随着粘着磨损和氧化磨损。若加入石墨等润滑增强相,增强相脱落反而起到润滑作用。An 等人^[22]通过真空热压烧结制备 3.5%TiB/TC4 进行了耐磨性能测试。图 1 为 3.5%TiB/TC4 摩擦磨损表面形貌,具有 TMCs 磨损的典型特征形貌特

征。图 1(a)表明较软的基体被硬质颗粒滑出犁沟,增强相能阻断犁沟连续性,犁沟窄而短,并且伴随有材料转移和氧化磨屑。图 1(b)表明增强相含量增加时,阻碍作用变得明显,耐磨效果显著。何波等人^[23]采用激光沉积技术原位合成制备了 (TiB+TiC)/TA15,并对其摩擦磨损性能展开研究,对磨屑的能谱分析发现,主要为磨粒磨损和轻微的氧化磨损。随着 (TiB+TiC) 含量增加,磨屑产生机理由微观切削转为微观切削和挤压剥削。摩擦磨损是一个非常复杂的过程,不同环境下磨损机制也不一样。Zheng 等人^[24]对 (2.92%TiB + 3.08%TiC)/Ti-6Al-4V 摩擦性能进行评价。发现随着载荷增大,材料磨损率增大;随着滑动速度增加,磨损率降低。在滑动速度低时,主要磨损机制为分层磨损和轻微氧化磨损;滑动速度较大时,主要为分层磨损和磨粒磨损,高滑动速度时主要为氧化磨损。TMCs 的摩擦磨损研究较多,Zheng、王健硕、Liu 等人^[24,25-27]对不同工艺及不同种类 TMCs 摩擦磨损机制进行了研究,但目前研究集中在室温摩擦磨损行为,高温摩擦磨损行为研究尚不明晰,并且高温下存在晶界弱化、材料强度和硬度降低、塑性增加等问题。

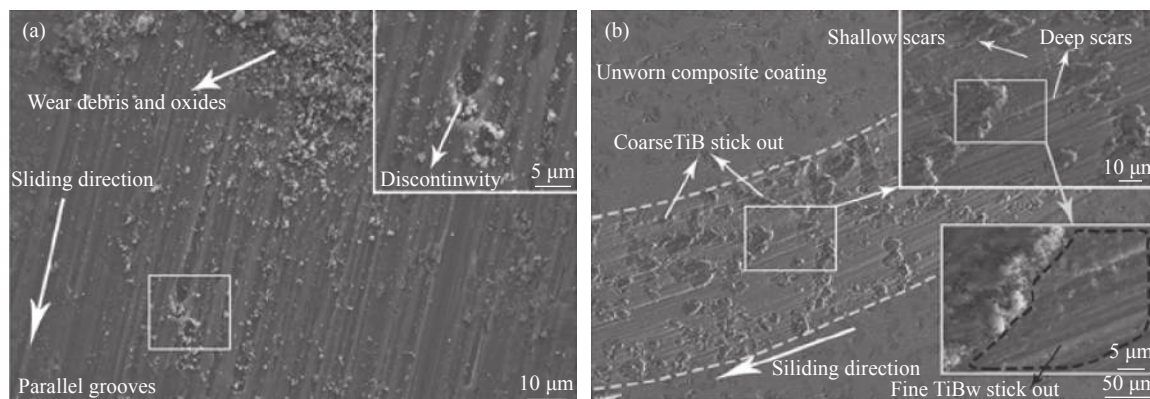


图 1 典型 TMCs 摩擦磨损典型的表面形貌^[22]

Fig. 1 Typical surface morphology of TMCs friction and wear

1.3 TMCs 耐磨特性

与钛合金相比,TMCs 具有优良的耐磨性。增强相承担载荷,能有效抵抗剪切,基体塑性大使变形均匀、协调,减少增强相的脱落,从而提高耐磨性。同时不少研究表明,与钛合金相比,TMCs 部分性能得到增强,从而提高耐磨性。主要有以下性能:

1)TMCs 与基体相比,硬度提高,高的硬度能减轻材料的磨损,保证良好的耐磨性,提高的程度略有差异。王伟等人^[28]通过放电等离子烧结制备了石

墨烯/Ti 复合材料,并对其摩擦学性能进行了研究,发现加入质量分数为 0.8% 石墨烯后,复合材料硬度(HV)从纯钛 298.6 增加到 350.3,增幅为 14.7%,磨损体积降低 19.5%。石墨烯/Ti 复合材料耐磨性增加的原因主要有增强相加入硬度升高,石墨烯的润滑作用。Salehikahrizsangi、Yang 等人^[29-30]的研究也表明 TMCs 较基体材料硬度有不同程度增加。硬度的增加,能显著的提高耐磨性。

2)TMCs 与基体相比,具有更高的强度和塑性

剪切抗力^[31]。抗剪切能力的提高,能够有效抵抗磨损面的剪切作用,降低磨损率。当发生相对运动时,摩擦表面受到正压力和剪切力,在这两种力作用下产生磨损。根据 Hashin-Shtrikman 理论^[32],增强相的加入,不仅能提高钛合金的弹性模量和强度,并且硬质增强相能抵抗剪切抗力,减少材料的磨损,改善耐磨性。焦阳、Mu 等人^[33-34]运用强化理论进行计算,阐明各种强化作用的贡献;苏颖等人^[35]采用等离子烧结制备 0.2% 石墨烯/Ti 材料,室温和高温的抗压强度较 Ti 分别增加 13.91% 和 28.57%。一般而言,TMCs 较基体有较高的抗剪切能力,有利于耐磨损性能的提高。

3) TMCs 相比于基体具有低的摩擦因数。在相同载荷下,摩擦因数越低,表面剪切力越小。低摩擦因数是耐磨材料典型特征,一般低摩擦因数的材料抗磨损能力强于低摩擦因数的材料。Cai 等人^[36]采用热等静压法制备 TiB/Ti-6Al-4V 复合材料,发现随着增强相 TiB 含量的增加,复合材料摩擦因数减小。当加入质量分数为 8% TiB₂ 硼源时,与 Ti-6Al-4V 基体相比,摩擦因数降低 33.8%,摩擦因数与显微硬度变化趋势相反,并且增强相加入使摩擦磨损过程中摩擦因数更加稳定,有更稳定摩擦性能。

4) TMCs 与基体相比,具有高的抗氧化性,间接提高耐磨性。钛化学活性高,易于氧化,在摩擦磨损中易发生氧化磨损,是造成钛合金低耐磨性部分原因。研究发现 TMCs 形成氧化物不易脱落,能形成屏障,减缓基体进一步氧化,TMCs 比钛合金抗氧化性能更好,一定程度提高耐磨性^[37-38]。伴随着磨损的进行,摩擦表面温度升高,在新磨损的表面易于氧化,增强体的存在,能减缓氧的扩散,减少氧化磨损。Bai 等人^[37]对 TiC/Ti-6Al-4V 磨损过程中的氧化物进行了研究,主要是 SiO₂ 和 TiO₂,形态为球形,在磨损过程中充当磨粒。

1.4 耐磨 TMCs 设计

耐磨材料要求摩擦因数低,磨合性能良好,足够的强度,抗压应力和抗剪切力强,同时有一定的韧性、抗氧化、抗冲击、抗疲劳能力,能承受高温,热传导性能好,良好的润湿性。总的来说,耐磨材料具备良好的综合性能的同时,具有优越耐磨性能。

TMCs 综合性能优良,能满足耐磨材料性能绝大多数要求,能够充当耐磨材料。通过进一步耐磨设计能够将 TMCs 性能优势充分发挥出来,实现高强度韧等综合性能的同时,进一步提高耐磨性,可以通

过以下方面实现:

1) 对于高强韧性、高耐磨性 TMCs,一般选择 $\alpha+\beta$ 型、 β 型钛合金、钛镍金属间化合物为基体,同时要求耐磨基体有一定的韧性。例如 Ti-1300、Ti-153、 β -21S、TiNiAl。金属间化合物作为基体能提供高的硬度,显著改善耐磨性。Odetola 等人^[39]通过等离子火花烧结制备含量 6% SiC 的 TiNiAl-SiC 减摩耐磨材料,摩擦因数为 0.4,拥有较高的耐磨性。在 20 N 载荷与 10 Hz 的转速下,低摩擦因数的 6% SiC/TiNiAl 磨损表面受到的剪切力小,表面划出凹槽较少。

2) 耐磨 TMCs 选择硬度高、相容性好的硅化物、石墨、MAX 相(通式为 $M_{n+1}AX_n$, M 代表早期过渡金属元素, A 代表主族元素, X 是 C 或 N)作为增强相,有利于改善耐磨性。Si 元素的加入,一方面可以原子形式固溶于基体或形成硅化物析出,起到固溶强化和析出强化作用;另一方面 Si 能提高抗蠕变性和氧化性,有利于耐磨性提高。SiC、Si₃N₄、Ti₅Si₃ 可作为耐磨 TMCs 的增强相。石墨作为增强相,在摩擦磨损时,可起到润滑作用,有利于磨合,提高耐磨性。MAX 相具有良好的耐磨特性,极具发展潜力。Zhang 等人^[40]将 MAX 相 Ti₃AlC 作为增强相,复合材料较基体 TA15 的硬度明显提高, Ti₃AlC 有自润滑作用,1.5% Ti₂AlC-TA15 耐磨性好,在 15 N 载荷与 200 r/min 的转速下,磨损率为 $3.98 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较基体 TA15 的磨损率减少 20%。但增强相含量不宜过高,过高的增强相使得 TMCs 脆性增大,磨损时易形成磨屑,发生严重的磨粒磨损现象。

3) TMCs 复合构型和微观组织对耐磨性具有显著的影响。金属基复合材料的构型设计有分级复合构型、叠层复合构型、网状复合构型、仿生复合构型等。高耐磨 TMCs 中常见结构有软相和硬相镶嵌分布结构、层状梯度结构。DRTMCs 是典型的软相和硬相镶嵌结构,硬相承载,软基体支撑硬相,软相能够使变形均匀,增大接触面积,减少压应力,提高耐磨性。Bai 等人^[37]在制备 TiC/Ti-6Al-4V 时得到一种多孔 TiC/Ti-6Al-4V(图 2),结构类似蜂窝状,硬质 TiC 相包裹着较软的 Ti64 基体形成“蜂窝结构”,TiC 界面结合牢固,界面纳米压痕显示为 12.4 GPa 的超高纳米硬度,磨损试验表现出良好耐磨性,磨损率降低 28%。

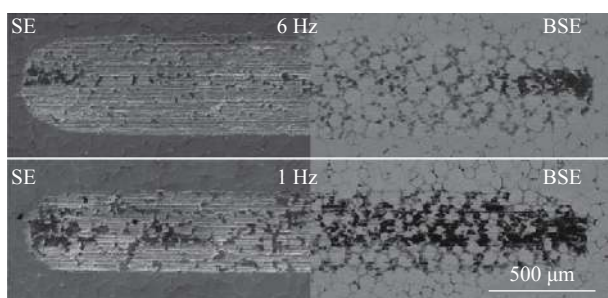


图2 蜂窝状的多孔TiC/Ti-6Al-4V结构^[37]

Fig. 2 SEM images of honeycomb porous TiC/Ti-6Al-4V structure

1.5 TMCs表面耐磨改性技术

TMCs本身较钛合金基体有众多优势,如上述的高硬度、强度,通过进一步设计可以从材料本身提高耐磨性,实现耐磨TMCs设计。为提高TMCs的耐磨性,除了从材料本身外,对耐磨TMCs进一步表面改性处理也是重要的途径。TMCs表面处理技术包括电镀、化学镀、阳极氧化、微弧氧化、激光熔覆、渗镀、离子注入等^[41-44]。TMCs同钛合金一样,可以渗镀氮、碳、硼、钼等得到不同合金层。比如碳氮共渗处理,在TMCs表面形成TiN、TiC的改性层,从而改善TMCs的耐磨性。黄雪丽等人^[45]采用电弧离子镀膜技术在钛合金表面制备了TiN/CrN纳米多层涂层,硬度高达24 GPa, TiN/CrN纳米多层涂层与基体的结合力很强。当采用Al₂O₃作为对磨球进行球盘式摩擦磨损试验时, TiN/CrN涂层磨损率为 $3.44 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。刘元才等人^[46]对TB8钛合金进行微弧氧化表面改性,随着电解液中BN含量的增加,微弧氧化后合金表面的耐磨性大为改善,摩擦磨损后磨痕随着添加剂含量的增多逐渐变窄和变浅。此外,将先进喷射成型技术、增材制造技术应用于耐磨TMCs成型制备,提高耐磨性。目前最先进喷射沉积法之一是激光熔覆沉积工艺^[47]。基于增材制造工艺有选择性激光烧结技术和

选择性激光熔化系统,两者采用激光作为热源,可实现快速成型工艺,易实现反应控制和自动化,节约成本,有利于耐磨性提高。Al-Sayed等人^[48]采用同轴激光熔覆技术在Ti-6Al-4V合金基体上沉积了60%WC-40%NiCrBSi金属基复合层,发现激光熔覆层的稀释比与入射激光热输入成正比。Ti-6Al-4V合金上覆层NiCrBSi-WC-MMC层的显微硬度值与稀释率的增加成正比。复合材料显微硬度(HV)值由母材380增加到1200,显微硬度增加3倍,覆层耐磨性比母材合金耐磨性提高400倍。

2 展望

与钛合金相比,TMCs具有高模量、高强塑性、高硬度以及良好耐磨性等一系列优势,是一种综合性能优越的材料。TMCs摩擦磨损行为研究多,但耐磨性认识仍然有限。开发高耐磨TMCs,促进先进武器装备发展,未来可从以下方面做更深入研究:

1)随着航空航天、船舶、兵器等领域的发展,要求TMCs在常温及高温下都有更高的耐磨性。目前TMCs耐磨性的研究大多集中在室温摩擦磨损行为上,然而TMCs在高温保持良好综合性能十分困难,因此研究高温下TMCs摩擦磨损行为、揭示高温耐磨机理、开发高温耐磨TMCs十分迫切。

2)以激光熔覆沉积工艺、选择性激光烧结技术为代表,将先进材料加工技术、成型工艺技术应用到耐磨TMCs制备上,探究新技术、新工艺对TMCs耐磨性的影响,实现低成本高耐磨TMCs制备技术。

3)将现代材料计算技术引用到TMCs上,加强计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)与新工艺、新方法的结合应用,实现计算机模拟预测,建立组织、工艺与耐磨性关系模型,指导高耐磨TMCs生产应用。

参考文献

- [1] Jiang Hong, Zhang Xiaodan. Research and application status of titanium alloys at domestic and abroad[J]. *New Material Industry*, 2017, (3): 7-10.
(江洪, 张晓丹. 国内外钛合金研究及应用现状[J]. *新材料产业*, 2017, (3): 7-10.)
- [2] Zhu Zhishou, Shang Guoqiang, Wang Xinnan, et al. Microstructure controlling technology and mechanical properties relationship of titanium alloys for aviation applications[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 1-10.
(朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 航空用钛合金显微组织控制和力学性能关系[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 1-10.)
- [3] Li Zhong, Chen Wei, Wang Xianmei, et al. The application of titanium in automobiles[J]. *World Nonferrous Metals*, 2010, (6): 66-69.

- (李中, 陈伟, 王宪梅, 等. 钛在汽车上的应用[J]. 世界有色金属, 2010, (6): 66–69.)
- [4] Yu Zhentao, Yu Sen, Cheng Jun, *et al.* Development and application of novel biomedical titanium alloy materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(10): 1238–1264.
(于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(10): 1238–1264.)
- [5] Tan Qiming, Sui Nan. Research and progress of particle-reinforced titanium matrix composites[J]. *New Materials Industry*, 2019, (1): 59–64.
(谭启明, 隋楠. 颗粒增强钛基复合材料的研究与进展[J]. *新材料产业*, 2019, (1): 59–64.)
- [6] Tjong S C, Ma Z Y. Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: R*, 2000, 29: 49–113.
- [7] Qu Hewei. The research of microstructures and mechanical properties of high volume fraction titanium matrix composites prepared by in-situ synthesized method [D]. Beijing: Central Academy of Mechanical Sciences, 2018.
(曲赫威. 原位自生高体积分数钛基复合材料制备及组织性能研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.)
- [8] Zhao Xun. Preparation and properties of in-situ TiC reinforced titanium matrix composites[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
(赵勋. 原位自生TiC增强钛基复合材料的制备与性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.)
- [9] Tjong S C, Mai Y W. Processing-structure-property aspects of particulate and whisker-reinforced titanium matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(3-4): 583–601.
- [10] Lu W J, Zhang D, Zhang X N, *et al.* Microstructure and tensile properties of in situ (TiB+TiC)/Ti6242 (TiB:TiC=1:1) composites prepared by common casting technique[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2001, 311(1-2): 142–150.
- [11] Jiao Y, Huang L J, Wang S, *et al.* Effects of first-scale TiBw on secondary-scale Ti_5Si_3 characteristics and mechanical properties of in-situ (Ti_5Si_3 +TiBw)/Ti6Al4V composites[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2017, 704: 269–281.
- [12] Chávez J, Olmos L, Jiménez O, *et al.* Sintering behaviour and mechanical characterisation of Ti64/x TiN composites and bilayer components[J]. *Powder Metallurgy*, 2017, 60(4): 257–266.
- [13] Lai Xiaojun, Li Shaopeng, Han Yuanfei, *et al.* Progress on composite design and development of advanced processing technology of multi-phase and multi-scale reinforced titanium matrix composites[J]. *Titanium Industry Progress*, 2020, 37(3): 40–48.
(来晓君, 李劭鹏, 韩远飞, 等. 多元多尺度增强钛基复合材料复合设计与先进加工技术研究进展[J]. *钛工业进展*, 2020, 37(3): 40–48.)
- [14] Liu Zhenglin. Principles of tribology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
(刘正林. 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.)
- [15] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981–988.
- [16] Larsen-Basse J. Basic theory of solid friction[J]. Materials Park, OH:ASM International, 1992: 27–36.
- [17] Sun Liang. Microstructure control and wear resistance of (TiC+TiB) reinforced titanium matrix composites synthesized using in-situ technology [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
(孙亮. 原位自生(TiC+TiB)增强钛基复合材料组织调控与耐磨性[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.)
- [18] Gürbüz M, Mutuk T, Uyan P. Mechanical, wear and thermal behaviors of graphene reinforced titanium composites[J]. *Metals and Materials International*, 2020, 118: 1–9.
- [19] Farias I, Olmos L, Jimenez O, *et al.* Wear modes in open porosity titanium matrix composites with TiC addition processed by spark plasma sintering[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(8): 1653–1664.
- [20] Xie H, Jin Y, Niu M, *et al.* Effect of multilayer graphene/nano- Fe_2O_3 composite additions on dry sliding wear behavior of titanium matrix composites[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 27(9): 1117–1126.
- [21] Choi B J. Effect of contact load on wear property of (TiB+TiC) particulates reinforced titanium matrix composites[J]. *Journal of Korea Foundry Society*, 2017, 37(4): 115–122.
- [22] An Q, Huang L, Jiang S, *et al.* Two-scale TiB/Ti64 composite coating fabricated by two-step process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 755: 29–40.
- [23] He Bo, Lan Jiaojiao, Yang Guang, *et al.* Microstructure and wear-resistant properties of in situ TiB-TiC reinforced titanium matrix composites by laser deposition manufacturing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 377(12): 233–238.
(何波, 兰姣姣, 杨光, 等. 激光原位合成TiB-TiC颗粒增强钛基复合材料的组织与其耐磨性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 377(12): 233–238.)

- [24] Zheng B, Dong F, Yuan X, *et al.* Evaluation on tribological characteristics of (TiC+TiB)/Ti-6Al-4V composite in the range from 25 °C to 600 °C[J]. *Wear*, 2020; 203–256.
- [25] Zheng B, Dong F, Yuan X, *et al.* Insights into wear behavior of (TiC+TiB)/TC4 composites against different counterface materials[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 116584.
- [26] Wang Jianshuo. Titanium-based matrix Y-PSZ/ Ti particle reinforced composites research [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
(王健硕. 钛基Y-PSZ/Ti颗粒增强复合材料的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.)
- [27] Liu Y Y, Yao Z, Zhang S, *et al.* The formation mechanism and wear behavior of TiC+ Ti₃SiC₂+ Ti₃Si₃ reinforced Ti6Al4V with network microstructure fabricated by electron beam melting[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(9): 0965c3.
- [28] Wang Wei, Zhou Haixiong, Wang Qingjuan, *et al.* Tribological properties of graphene reinforced titanium matrix composites[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2019, 42(1): 26–32.
(王伟, 周海雄, 王庆娟, 等. 石墨烯增强钛基复合材料的摩擦学性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(1): 26–32.)
- [29] Salehikahrizangi P, Karimzadeh F, Enayati M H, *et al.* Investigation of the effects of grain size and nano-sized reinforcements on tribological properties of Ti6Al4V alloy[J]. *Wear*, 2013, 305(1-2): 51–57.
- [30] Yang B, Lujun H, Qi A, *et al.* Wire-feed deposition TiB reinforced Ti composite coating: Formation mechanism and tribological properties[J]. *Materials Letters*, 2018, 229: 221–224.
- [31] Wang Yulin. Friction and wear properties of TiC particle reinforced titanium matrix composite [D]. Changsha: Central South University, 2011.
(王玉林. TiC/Ti 基复合材料摩擦磨损性能与氧化行为的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.)
- [32] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of polycrystals[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1962, 10(4): 343–352.
- [33] Jiao Yang. Research on (Ti₃Si₃+TiBw)/Ti6Al4V composites with two-level network structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
(焦阳. 两级网状结构(Ti₃Si₃+TiBw)/Ti6Al4V复合材料研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.)
- [34] Mu X N, Zhang H M, Cai H N, *et al.* Microstructure evolution and superior tensile properties of low content graphene nanoplatelets reinforced pure Ti matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 687: 164–174.
- [35] Su Ying, Zuo Qian, Yang Gang, *et al.* Compressive properties of the graphene reinforced titanium composites[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(12): 3882–3886.
(苏颖, 左倩, 杨刚, 等. 石墨烯增强钛基复合材料的压缩变形行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(12): 3882–3886.)
- [36] Cai C, Song B, Qiu C, *et al.* Hot isostatic pressing of in-situ TiB/Ti-6Al-4V composites with novel reinforcement architecture, enhanced hardness and elevated tribological properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 710: 364–374.
- [37] Bai M, Mohsen R, Xu Y, *et al.* In-situ Ti-6Al-4V/TiC composites synthesized by reactive spark plasma sintering: processing, microstructure, and dry sliding wear behaviour[J]. *Wear*, 2019, 432-433: 202944.
- [38] Xu X, Liu Y, Tabie V, *et al.* High-temperature oxidation resistance of a Ti-Al-Sn-Zr titanium matrix composites reinforced with in situ TiC and Ti₅Si₃ fabricated by powder metallurgy[J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(4): 1–10.
- [39] Odetola P I, Ajenifuja E, Popoola A P I, *et al.* Effects of silicon carbide contents on microstructure and mechanical properties of spark plasma-sintered titanium-based metal matrix[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5-6): 2491–2500.
- [40] Zhang F, Du M, Fan K, *et al.* Fabrication and mechanical properties of network structured titanium alloy matrix composites reinforced with Ti₂AlC particulates[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 776(3): 139065.1–139065.9.
- [41] Li Zhengxian, Wang Shaopeng, Mu Weiyi, *et al.* Research status of titanium surface treatment technology [C]//Proceedings of the 10th National Surface Engineering Conference and 6th National Youth Surface Engineering Forum. Wuhan: Chinese Society of Mechanical Engineering, China Surface Engineering Association, 2014: 76.
(李争显, 王少鹏, 慕伟意, 等. 钛表面处理技术的研究现状[C]// 第十届全国表面工程大会暨第六届全国青年表面工程论文集. 武汉: 中国机械工程学会, 中国表面工程协会, 2014: 76.)

(下转第 77 页)