2020 年 5 月 May 2020

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-35784

激光原位制备硼化钛与镍钛合金的 摩擦磨损性能



林英华1,林振衡1,陈庆堂1, 雷永平1,2

(1. 莆田学院 机电工程学院,莆田 351100)(2. 北京工业大学 材料科学与工程学院,北京 100124)

摘 要:为了制备出可对比的两类复合涂层,采用 TiB₂和 Ni+TiB₂分别作为熔覆材料,在钛合金表面通过激光原 位熔覆制备复合涂层。采用 XRD、SEM、EPMA 与摩擦磨损仪等实验手段,对合成的钛基复合涂层进行研究。 结果表明:采用 TiB₂为熔覆材料时,可获得 TiB₂颗粒与 TiB 短纤维增强钛基复合涂层。采用 Ni+TiB₂为熔覆材 料时,可生成 NiTi 合金填充在 TiB₂颗粒与 TiB 短纤维周围,但 TiB₂颗粒尺寸和 TiB 短纤维长度都得以减小。通 过微动磨损测试,发现引入 NiTi 合金和 TiB₂颗粒及 TiB 短纤维复合强化,无法有效抵抗微动磨损性能。这主要 与摩擦接触区的温度超过 NiT 超弹性变形的温度区间,且 NiTi 合金无法使裂纹扩展曲折及硬度低相关。最后, 探讨了该复合涂层在抗微动磨损与干滑动磨损过程中的差异性。

关键词:激光熔覆;TiB短纤维;NiTi合金;摩擦;磨损

文章编号: 1004-0609(2020)-05-1057-08 中图分类号: TN249; TG174.44 文献标志码: A

钛合金材料存在摩擦因数大、粘着磨损严重等问 题,导致服役过程中对微动磨损特别敏感^[1-2]。而 TiB 短纤维(简称TiB_f)作为增强相已应用于钛基复合材料: 一方面, TiB_f 具有高弹性模量、高硬度、高耐磨性、 优异的抗氧化性以及与 Ti 之间好的相容性与稳定性; 另一方面, TiB_f与 Ti 基体具有非常相近的密度和热膨 胀系数,这有利于获得粘附性强及稳定性高的 TiB_f/Ti 复合涂层^[3-4]。同时,TiB_f和Ti基体之间不发生化学反 应,能获得固定的取向关系,并且界面结构能以共格或 半共格的形式结合^[5],这有利于提高 TiB₄Ti 复合涂层 的力学性能及疲劳性能。近年来,激光原位熔覆技术 发展迅速:一方面,激光束通过聚焦获得高的能量密度, 为钛合金表面制备 TiB₄Ti 复合涂层提供良好的热源; 另一方面,激光原位熔覆加热速度快(1×10⁵~1× 10⁹ ℃/s)、基体自冷度高(>10⁴ ℃/s)等优势,能获得与 基材呈冶金结合且组织致密的涂层[6]。目前研究表明, 钛合金表面采用激光原位熔覆制备 TiB₄/Ti 复合涂层 具有一定的抗微动磨损性能,但抗磨损效果不显著^[7]。

以其独特形状记忆功能的 NiTi 合金,由于具有超 弹性、形状记忆效应、优异的力学性能及高阻尼性等 特点,在工业领域已获得了应用^[8-10]。近年来,研究 表明^[11-12],激光原位熔覆制备 NiTi 合金涂层能表现出 优异的抗干滑动磨损性能,但需要与强化相复合使用。 然而,干滑动磨损与微动磨损在摩擦过程方面存在差 异,比较明显的区别是微动磨损的位移幅值较小,一 般为 100~300 µm 之间^[13-14]。虽然通过引入 NiTi 合金 与 TiB_f进行复合能提高涂层的抗干滑动磨损性能,但 能否提高涂层的抗微动磨损性能,目前尚未有学者进 行该方面的研究。

本课题组前期研究表明^[15-16],通过在钛合金表面 激光原位熔覆 Ni+TiB₂粉可制备出 BCC 结构的 NiTi 合金、TiB 短纤维与 TiB₂颗粒增强钛基复合涂层,且 形成 BCC 结构的 NiTi 可填充在 TiB 短纤维和 TiB₂颗 粒周围。而且,该复合涂层通过短纤维断裂偏移与颗 粒脱粘方式诱发裂纹扩展曲折来提高复合涂层的断裂 韧性^[16]。为了探索 NiTi 合金与 TiB 短纤维、TiB₂颗粒 复合强化的抗微动磨损性能,本工作对比研究了 NiTi 合金引入前后复合涂层的抗微动磨损性能差异,并对 复合涂层抗干滑动磨损性能与微动磨损性能的差异性 进行探讨。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2019J01813, 2018J01557); 莆田市科技项目资助(2019GP004); 莆田学院人才引进项目资助(2019016) 收稿日期: 2019-04-23; 修订日期: 2020-01-07

通信作者:林振衡,教授,博士;电话: 0594-2822156; E-mail: 147121176@qq.com

1 实验

1.1 复合涂层制备

选用 TC4 钛合金为实验基材,并将钛合金切割成 圆片状,圆片直径 30 mm,圆片长度 15 mm。将圆片 端面用水砂纸进行逐级打磨成光滑面,并用无水乙醇 清洗光滑面,以保证圆片端面无残留的氧化物和油污 等杂质。选用质量分数为 99.5%的 TiB2 粉末(晶粒尺寸 5 µm)与质量分数为 99.0%的 Ni 粉末(晶粒尺寸 5 µm) 为熔覆材料。为了降低熔覆材料的流失率,采用少量 的 2123 酚醛树脂为粘接剂。将 TiB2 粉末与 Ni+TiB2 粉末(n(Ni):n(TiB2)=1:1)分别预置于试样的圆片端面上, 预置涂层厚度控制为 0.4 mm。然后,将预置层放置烘 干箱进行烘干,温度与烘干时间分别设置为120℃和 5h。激光器选用 YLS-6000 型 IPG 光纤激光器,保护 气选用 Ar,流量设置为 15 L/h。选用的激光工艺参数 为: 激光功率 P 为 1~5 kW, 激光束扫描速率 v 为 3~10 mm/s, 光斑尺寸 D 为 5 mm (类圆形光斑)。激光熔覆 的试验方法,如图1所示。



图1 激光熔覆试验方法示意图



表1 干滑动磨损实验参数

 Table 1
 Measuring parameters of dry sliding wear test

Wear material	Hardness, HRC	Diameter/mm	Speed/ $(r \cdot min^{-1})$	Load/N	Time/min	Size/mm
GCr15	60	45	480	200	30	10×12

表2 微动磨损实验参数

 Table 2
 Measuring parameters of fretting wear test

Test temperature/°C	Load/N	Frequency/Hz	Amplitude/µm	Time/min	Size/mm
23-30	100	20	100	30	$12 \times 20 \times 10$

1.2 复合涂层表征和性能测试

激光熔覆后,采用电火花线切割、研磨、抛光, 用体积比为 V(HNO₃):V(HF):V(H₂O)=3:2:95 的腐蚀剂 腐蚀后,利用 JSM-6490LA 型扫描电镜(SEM)观察复 合涂层横截面的微观组织。采用 D/max 2550 VL/PC 型 X 射线衍射仪(XRD)对复合涂层表面进行物相识 别。由于 B 元素是低原子序数,能谱不能定量检测出 其含量,本研究采用 JXA-8100 型电子探针(EPMA) 对显微组织中相种类进行分析。

采用 MM-200 型环块式磨损试验机进行复合涂 层的干滑动摩擦磨损试验,实验参数如表1所示。采 用 FTM200 微振动摩擦磨损试验机进行复合涂层的微 动摩擦磨损测试,摩擦过程中的接触形式为线-面接 触,实验参数如表2所示。采用多点热电偶对摩擦磨 损近接触区的温度进行测试,测温试验方法,如图2 所示。试样磨损后,磨痕形貌采用扫描电镜(SEM)观



图 2 摩擦磨损接触区温度测量方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of temperature measurement method for friction and wear contact zone

1059

察,复合涂层和基材的磨痕轮廓采用 Mahr-M1 型轮廓 仪进行测量,且根据以下公式计算微动磨损体积,公 式为

V=SA

式中: V为磨损体积; S为磨痕截面积; A为位移值。

2 结果与分析

为了对比研究引入NiTi合金前后对TiB短纤维复 合涂层抗微动磨损性能的影响,以TiB₂和Ni+TiB₂分 别为熔覆材料,在钛合金表面采用激光原位熔覆制备 两类复合涂层。经正交参数试验,工艺参数优化结果 如表3所示。

表3 复合涂层的工艺参数

 Table 3
 Process parameters of composite coating

Cladding material	Pre-layer thickness/ mm	Laser power/ kW	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Spot size (square)/ mm
TiB ₂	0.4	2.62	6	5×5
n(Ni):n(TiB ₂)= 1:1	0.4	2.36	6	5×5

2.1 复合涂层组织结构

图 3 所示为 Ni 添加前后复合涂层的 XRD 谱。由 图 3 可以看出,在钛合金表面采用 TiB₂为熔覆材料制 备激光复合涂层,主要由 TiB₂、TiB 与 α-Ti 物相构成。 说明在此激光条件下,Ti 与 TiB₂会通过原位反应形成 TiB。而在钛合金表面采用 Ni 与 TiB₂为熔覆材料制备 激光复合涂层,主要由 BCC 结构的 NiTi、TiB、TiB₂、 α-Ti、β-Ti 及少量的 TiO₂组成。说明在此激光条件下, 可原位合成 NiTi 合金。而之所以能避免 Ni₃Ti 及 NiTi₂ 的形成,主要与 TiB 形核驱动力大、Ti 原子扩散系数 大及熔池形成初期 Ni 和 Ti 液分布相关^[16]。

图 4 所示为 Ni 添加前后复合涂层横截面中部的 SEM 像。由图 4 可以看出, Ni 添加前,复合涂层主 要由颗粒与细针状组织构成,颗粒的平均尺寸为 5~7 µm 左右,细针状平均长度为 12~15 µm 左右,通过 XRD 和 EPMA 识别,发现颗粒和细针状分别为 TiB₂ 和 TiB,如表 4 所示。而 Ni 添加后,复合涂层也主要 由颗粒与细针状组织构成,但颗粒的数量和尺寸都呈 下降趋势,颗粒的平均尺寸为 3~5 µm 左右。说明 Ni 添加明显提高了 TiB₂颗粒的溶解程度。细针状数量呈 增多趋势,但细针状长度呈略微降低,细针状平均长 度为 8~10 µm 左右。另外,由于 Ti 与 NiTi 的耐腐蚀



图 3 Ni 添加前后复合涂层表层的 XRD 谱 Fig. 3 XRD patterns of surface of composite coating: (a) TiB₂; (b) *n*(Ni):*n*(TiB₂)=1:1



图 4 Ni 添加前后复合涂层横截面中部的 SEM 像 Fig. 4 SEM images of middle regions of coatings before(a) and after(b) adding Ni

性能差异小,而 TiB 与 TiB₂陶瓷相又很耐腐蚀。因此, 采用 EPMA 线扫描进行分析,发现 Ni 元素与 B 元素 的含量分布刚好呈相反趋势,结合 XRD 推测 NiTi 合 金会分布在 TiB 周围,如图 5 所示。

表4 图4中各位置的 EPMA 点区域测试结果

Table 4EPMA point area test results of different positionsmarked in Fig. 2

Position	Mass fraction/%							
No.	Ti	В	Ni	Al	V			
1	48.7	43.3	0.9	5.2	1.9			
2	36.9	57.2	1.2	3.2	1.5			
3	79.5	0	5.6	10.8	4.1			
4	34.2	58.5	1.5	4.2	1.6			
5	47.5	42.7	1.5	6.5	1.8			
6	65.1	0	27.4	5.3	2.2			



图 5 复合涂层线扫描测试结果

Fig. 5 Line scanning test results of coating: (a) Scanning area;(b) Line scan results for different elements

2.2 复合涂层抗干滑动磨损与微动磨损性能

由前期研究结果可知^[17], TiB 短纤维复合涂层在 干滑动磨损条件下表现出优异的耐磨性能,但在微动 磨损条件下该复合涂层无法有效抵抗微动疲劳。虽然 TiB 短纤维在抗微动疲劳方面能表现出一定的优越 性,但从实验结果来看减磨效果并不显著。具有独特 形状记忆功能的 NiTi 金属间化合物在变形过程中能 产生应力诱发马氏体相变及超弹性效应而表现出良好 的抗疲劳性能。王华明等^[18-19]采用 NiTi 和其他强化相 (如 B₄C、TiB₂、TiC 及 Ni₃Ti)增强钛基复合涂层,实 验表明复合涂层在干滑动和磨粒磨损条件下都表现出 优异的耐磨性能。本研究试图采用 NiTi 和 TiB₂颗粒 及 TiB 短纤维进行复合强化来进一步提高抗微动磨损 性能。

由前面分析可知,采用 TiB₂ 粉末和 n(TiB₂):n(Ni)= 1:1 的粉末分别作为熔覆材料,在钛合金表面通过激光 原位熔覆技术都能制备出 TiB₂颗粒和 TiB 短纤维增强 钛基复合涂层,并且 Ni 的添加还可生成 NiTi 合金。 图 6 所示为两种不同摩擦载荷下复合涂层和基体的磨 损量。由图 6 可知,在高磨损载荷条件下(200 N),复 合涂层的磨损体积都比基体大,并且 Ni 添加后,复合 涂层的磨损体积更大。在低磨损载荷条件下(100 N), 虽然复合涂层的磨损体积都比基体小,但 Ni 添加后,



图6 不同摩擦载荷下复合涂层和基体的磨损量



复合涂层的磨损体积比 Ni 添加前的大。说明涂层中引入部分 NiTi 合金并不能改善微动磨损性能。

图 7 所示为添加 Ni 前后复合涂层在磨损载荷为 100 N 下磨痕形貌。由图 7 可知, Ni 添加后, 涂层表 面的疲劳颗粒脱落面积变得更大。由此可更进一步表 明涂层中 NiTi 合金的引入无法有效抵抗微动疲劳性 能。这主要有3个方面的原因;1)由于摩擦生热,并 且微动磨损中磨屑不易排出,会导致摩擦接触区温度 持续升高。从表 5 可知,摩擦区温度远超过 132 ℃, 而NiTi合金超弹性行为的有效温度区间为低于110 ℃ 下才能发挥明显作用^[20]。2) 复合涂层中存在 NiTi 合 金不能诱使裂纹扩展方向发生偏转。由图 8 可知, NiTi 区周围的 TiB,颗粒能明显改变裂纹扩展方向,但 NiTi 本身无法实现。其他研究者[21]也研究表明当使用温度 高于应力诱发马氏体相变温度时, NiTi 合金的裂纹扩 展方向没有发生偏转。3) 当 NiTi 合金成为普通材料 时,其硬度仅为241 HV02,比钛合金的硬度还低(330 HV_{0.2}).



图 7 磨损载荷为 100 N 时的磨痕形貌

Fig. 7 Wear scar morphologies under 100 N of wear load:(a) Before adding Ni; (b) After adding Ni

表 5 干滑动磨损与微动磨损下距磨损区边缘 1 mm 位置的 温度

Table 5	Temperature	at	location	of	1	mm	from	wear	area
edge unde	r dry sliding a	nd	fretting v	veai	ſ				

Material	Dry sliding wear position temperature/°C	Fretting wear position temperature/°C				
Substrate	158	183				
Coating 2	105	132				



图8 NiTi裂纹扩展区的形貌

Fig. 8 Morphology of crack propagation of NiTi

2.3 复合涂层干滑动与微动磨损的差异性

干滑动磨损和微动磨损,所涉及的磨损机制主要为:粘着磨损、磨粒磨损、疲劳断裂磨损和氧化磨损。由于 TiB₂和 TiB 都是抗高温陶瓷相,即分别由 B—B 共价键和 Ti—B 离子键组成的密排六方晶系和斜方晶系结构组成,具有很高的键能和化学稳定性^[22-23]。因此,在常规摩擦磨损过程中,TiB₂颗粒和 TiB 短纤维都较难与 Ti、O、Si 和 N 发生化学反应,摩擦的结果主要造成材料的磨损和转移。然而,由前面分析结果可知,相同复合涂层在抗干滑动磨损和微动磨损的效果差别很大。接下来将从以下 3 方面探讨干滑动磨损和微动磨损方式的差异性。

首先,摩擦因数是摩擦磨损过程中的一项重要指标,能综合反映材料的耐磨性、摩擦磨损失效等特性。 根据课题组前期研究结果可知^[24],基体和复合涂层的 摩擦因数都呈周期性波动趋势。这种摩擦因数的周期 性波动主要与磨屑的产生、弹性变形、滚动、塑性变 形及溢出相关^[25-27]。而课题组前期研究和大量文献研 究表明^[28-29],干滑动磨损过程中,摩擦因数不会出现 明显的周期性波动,在整个过程中仅出现小幅度的波动。这是由于微动磨损产生的磨屑仅在小区域范围内 移动,这种磨损方式会使磨屑成为"第三体"参与磨 损。而干滑动磨损产生的磨屑很容易被排出摩擦区, 少量未被及时排出的磨屑也引起了摩擦因数的小幅度 波动。

其次,温度变化是诱发材料机械性能与化学成分 改变的重要因素。由于摩擦磨损过程,会产生大量的 摩擦热,使磨损接触面温度急剧升高。与干滑动磨损 相比,微动磨损的位移幅值小,会导致磨屑不易被排 出^[30],造成了摩擦热较难被迅速扩散。由表5可知, 无论基体或涂层,微动磨损下近磨损区1 mm 的测试 温度都比干滑动磨损下的高。尽管所测到的温度不高, 不至于引起 TiB₂和 TiB 与其他成分发生化学反应,但 会对基体相(如钛基体)的塑性变形和氧化造成影响, 从而加剧了材料的磨损。

最后,在同等载荷作用下,接触面积小的材料局 部承载的应力更大,于是在循环应力下会加速材料表 面及亚表层结构裂纹的萌生与扩展。相比于干滑动磨 损,微动磨损接触面间发生的振幅极小,导致对配件 与材料表面的接触面积变小,从而使材料局部承受更 大的载荷应力。图9所示为磨损载荷为200N与磨损 时间为3 min下涂层1的磨痕形貌。由图9可知,在



图 9 涂层 1 在 200 N 载荷下磨损 3 min 后磨损区的形貌 Fig. 9 Wear scar morphology of coating 1 under load of 200 N for 3 min: (a) Dry slid wear; (b) Fretting wear

同等载荷下,微动磨损区的裂纹数量及长度都比干滑 动磨损区的多及长。这也表明在对涂层微动磨损工况 的设计过程中,更应考虑涂层的疲劳要素。

以上分析可知,干滑动磨损与微动磨损的差异, 直观上表现为摩擦因数、温度与承载应力的不同。而 从材料角度看,干滑动磨损过程与微动磨损过程出现 的是磨屑排出、基体相塑性和氧化、接触区裂纹扩展 的不同。

3 结论

 Ni 添加前, 钛合金表面激光原位熔覆 TiB₂粉 可制备出 TiB₂颗粒与 TiB 短纤维增强钛基复合涂层;
 Ni 添加后, 通过激光原位熔覆制备出 NiTi 合金填充 在 TiB₂颗粒与 TiB 短纤维周围,但 TiB₂颗粒尺寸和 TiB 短纤维长度都得以减小。

2) 通过微动磨损实验,发现引入NiTi 合金和TiB₂ 颗粒及TiB 短纤维复合强化,无法有效抵抗微动疲劳 性能。这可能与摩擦接触区的温度超过NiT 超弹性行 为的温度区间,且NiTi 合金无法使裂纹扩展曲折 相关。

3) 微动磨损的近磨损区温度高于干滑动近磨损 区的温度,并且微动磨损区的裂纹数量和长度多于干 滑动磨损区的裂纹数量和长度。

REFERENCES

[1] 丁 燕,梁 军,邓 凯,柏 林,戴振东.损伤容限型 钛合金 TC4-DT 的微动磨损性能[J].中国有色金属学报, 2017, 27(3): 532-538.

DING Yan, LIANG Jun, DENG Kai, BO lin, DAI Zhen-dong. Fretting wear of damage tolerance TC4-DT alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(3): 532–538.

- [2] ZHOU Y, SHEN M X, CAI Z B, PENG J F, ZHU M H. Study on dual rotary fretting wear behavior of Ti6Al4V titanium alloy[J]. Wear, 2017, 376/377: 670–679.
- [3] BA J, LI H, REN B X, QI B X, ZHENG X H, NING R, QI J L, CAO J, CAI W, FENG J C. In situ formation of TiB whiskers to reinforce SiO₂-BN/Ti6Al4V brazed joints[J]. Ceramics International, 2019, 45: 8054–8057.
- [4] 黄立国,陈玉勇.少量 TiB 晶须对 Ti-B20 合金β晶粒长大 行为的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(8): 2108-2114.

HUANG Li-guo, CHEN Yu-yong. Influence of trace TiB whisker on grain growth behavior of β grain in Ti-B20 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(8): 2108–2114.

- [5] PANDA K B, RAVI CHANDRAN K S. First principles determination of elastic constants and chemical bonding of titanium boride (TiB) on the basis of density functional theory[J]. Acta Materialia, 2006, 54: 1641–1657.
- [6] FENG Y Q, FENG K, YAO C W, LI Z G, SUN J H. Microstructure and properties of in-situ synthesized (Ti₃Al+TiB)/Ti composites by laser cladding[J]. Materials and Design, 2018, 157: 258–272.
- [7] LIN Y H, JIANG C C, LIN Z H, CHEN Q T, LEI Y P. Laser in-situ synthesis of high aspect ratio TiB fiber bundle reinforced titanium matrix composite coating[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 115: 364–373.
- [8] JIANG S Y, ZHAO Y N, ZHANG Y Q, HU L, LIANG Y L. Effect of solution treatment and aging on microstructural evolution and mechanical behavior of NiTi shape memory alloy[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3658–3667.
- [9] HAN T, SOHN Y H, PARK S J, KIM Y C, LEE K S, KIM H S, YOON S G, KIM D J, HAN J H. Reduction of magnetic resonance image artifacts of NiTi implant by carbon coating[J]. Materials Science and Engineering C, 2019, 98: 1–8.
- [10] HSU W N, POLATIDIS E, SMID M, PETEGEM S V, CASATI N, SWYGENHOVEN H V. Deformation and degradation of superelastic NiTi under multiaxial loading[J]. Acta Materialia, 2019, 167: 149–158.
- [11] FERNANDEZ J, ISALGUE A, CINCA N, GARCIA-CANO I, VENTAYOL J. Comparison of mechanical and tribological properties of TiC- NiTi and TiC-TiB₂-NiTi coatings[J]. Physics Procedia, 2010, 10: 65–68.
- [12] GAO F, WANG H M. Abrasive wear property of laser melting/deposited Ti₂Ni/TiNi intermetallic alloy[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17: 1358–1362.
- [13] 张晓宇,任平弟,蔡振兵,彭金方,刘建华,朱旻昊.
 300 ℃氮气中交变载荷条件下 Inconel 690 合金的微动磨 损特性[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 544-550.
 ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, CAI Zhen-bing, PENG Jin-fang, LIU Jian-hua, ZHU Min-hao. Fretting wear behavior of Inconel 690 alloy under alternating load conditions at 300 ℃ in nitrogen environment[J]. The Chinese

Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(3): 544–550.

- [14] LIN Y, LIN Z H, CHEN Q T, LEI Y P, FU H G. Laser in-situ synthesis of titanium matrix composite coating with Ti B-Ti network-like structure reinforcement[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 1665–1676.
- [15] 林英华, 雷永平, 符寒光, 林 健. 激光原位制备硼化钛 与镍钛合金增强钛基复合涂层[J]. 金属学报, 2014, 50(12): 1513-1519.
 LIN Ying-hua, LEI Yong-ping, FU Han-guang, LIN Jian.
 Laser in citu synthesized titanium dihoride and nitinol

Laser in situ synthesized titanium diboride and nitinol reinforce titanium matrix composite coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(12): 1513–1519.

[16] 林英华, 雷永平, 符寒光, 林 健. Ni 添加对 TiB₂/TiB 钛 基复合涂层组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(12): 1520-1528.

LIN Ying-hua, LEI Yong-ping, FU Han-guang, LIN Jian. Effect of Ni addition on microstructure and mechanical properties of TiB₂/TiB titanium matrix composite coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(12): 1520–1528.

- [17] LIN Y H, YAO J H, WANG L, ZAHNG Q L, LI X Q, LEI Y P, FU H G. Effects of TiB₂ particle and short fiber sizes on the microstructure and properties of TiB₂-reinforced composite coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27: 1876–1889.
- [18] WANG H M, CAO F, CAI L X, TANG H B, YU R L, ZHANG L Y. Microstructure and tribological properties of laser clad Ti₂Ni₃Si/NiTi intermetallic coatings[J]. Acta Materialia, 2003, 51(20): 6319–6327.
- [19] GAO F, WANG H M. Effect of TiNi in dry sliding wear of laser melt deposited Ti₂Ni/TiNi alloys[J]. Materials Characterization, 2008, 59(9): 1349–1354.
- [20] XIAO Y, ZENG P, LEI L P. Micromechanical modelling on thermomechanical coupling of superelastic NiTi alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 153/154: 36–47.
- [21] AHADI A, SUN Q P. Grain size dependence of fracture toughness and crack-growth resistance of superelastic NiTi[J]. Scripta Materialia, 2016, 113: 171–175.
- [22] LU W J, ZHANG D, ZHANG X N, WU R J, SAKATA T, MORI H. HREM study of TiB/Ti interfaces in a TiB-TiC in situ composite[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(7): 1069–1075.
- [23] GAO Q, WU S S, LU S L, DUAN X C, ZHONG Z Y. Preparation of in-situ TiB₂ and Mg₂Si hybrid particulates reinforced Al-matrix composites[J]. Journal of Alloys and

Compounds, 2015, 651: 521-527.

- [24] LIN Y H, YAO J H, LEI Y P, FU H G, WANG L. Microstructure and properties of TiB₂-TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86: 216–227.
- [25] PEARSON S R, SHIPWAY P H. Is the wear coefficient dependent upon slip amplitude in fretting? Vingsbo and Soderberg revisited[J]. Wear, 2015, 330/331: 93–102.
- [26] HINTIKKA J, LEHTOVAARA A, MANTYLA A. Fretting-induced friction and wear in large flat-on-flat contact with quenched and tempered steel[J]. Tribology International, 2015, 92: 191–202.
- [27] WANG S, WANG F, LIAO Z H, WANG Q L, LIU Y H, LIU W Q. Study on torsional fretting wear behavior of a ball-on-socket contact configuration simulating an artificial

cervical disk[J]. Materials Science and Engineering C, 2015, 55: 22-33.

- [28] SUN Q C, HU T C, FAN H Z, ZHANG Y S, HU L T. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 °C: Influence of laser surface texturing[J]. Tribology International, 2015, 92: 136–145.
- [29] UYSAL M, AKBULUT H, TOKUR M, ALGUL H, CETINKAYA T. Structural and sliding wear properties of Ag/Graphene/WC hybrid nanocomposites produced by electroless co-deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 654: 185–195.
- [30] CAI Z B, ZHU M H, YANG S, XIAO X B, LIN X Z, YU H Y. In situ observations of the real-time wear of PMMA flat against steel ball under torsional fretting[J]. Wear, 2011, 271(9/10): 2242–2251.

Friction and wear properties of laser in situ synthesized titanium diboride and NiTi alloy

LIN Ying-hua¹, LIN Zhen-heng¹, CHEN Qing-tang¹, LEI Yong-ping^{1, 2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Putian University, Putian 351100, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to prepare two kinds of composite coatings for comparison, TiB_2 and $Ni+TiB_2$ were, respectively, used as cladding materials, and the composite coatings were prepared by laser in-situ cladding technique on the surface of titanium alloy. The synthesized titanium-based composite coatings were studied by XRD, SEM, EPMA and friction and wear instruments. The results show that TiB_2 particle and TiB short fiber reinforced titanium-based composite coating can be obtained when TiB_2 is used as the cladding material. When $Ni+TiB_2$ is used as the cladding material, the NiTi alloy can be formed to be filled around the TiB_2 particles and the TiB short fibers, but the size of the TiB_2 particles and the length of the TiB short fibers are all reduced. Through the fretting wear test, it is found that the composite reinforcement of NiTi alloy and TiB_2 particles and TiB short fiber can not effectively resist the fretting wear performance. There are three reasons for this: the temperature of the friction contact zone exceeds the temperature of the NiTi alloy is low. Finally, the difference between the anti-friction wear and dry sliding wear of the composite coating was discussed. **Key words:** laser cladding; TiB short fiber; NiTi alloy; friction; wear

Received date: 2019-04-23; Accepted date: 2020-01-07

Corresponding author: LIN Zhen-heng; Tel: +86-594-2822156; E-mail: 147121176@qq.com

(编辑 李艳红)

Foundation item: Projects(2019J01813, 2018J01557) supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China; Project(2019GP004) supported by the Science and Technology Project of Putian, China; Project(2019016) supported by the Talent Introduction project of Putian University, China