《表面技术》编辑部 发给 bwu17b@imr.ac.cn

尊敬的吴彼先生/女士老师:您好!

您的论文(清动速度对社合金表面TiB2涂层高温抗挺粘着磨损行为的影响)(登记号:20240619003)经终审后,确定可以采用,请勿再投他刊。若论文相关内容已在其他刊物上发表,请尽快来电、来信告知,以免造成学术不識。特 别提醒:本刊任网络首发前、正式出版前还会采用中国知网文献不端检测系统进行2次重复率检测(检测范围包含中国知网公开的硕博论文),如果重复率过高,均作退稿处理。

登录本刊投稿系统,点击您的文章标题,在正上方可以下载"录用证明"。

请于接收到此部件起的5个工作日内将该论文的"版权转让协议"(登录期刊自网www.surface-techj.com可下载模板)电子扫描版发送至编辑部邮箱bmjs@surface-techj.com、收到版权转让协议后,将尽快安排刊期。

根据科技部和国家新闻出版署有关科技哪刊收取版面发表费的规定,并结合目前编辑部目筹全部办刊经费的实际情况,本刊将收取发表服务费(版面费通知单将在确定刊期后发出)。

此致 敬礼!

《表面技术》编辑部 < br> 2024-11-25 2024-11-25 11:40 隐藏信息

滑动速度对钛合金表面TiB2涂层

高温抗铝粘着磨损行为的影响

吴 彼,高禩洋*,薛伟海,李曙,段德莉

(中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 沈阳 110016

中国科学院金属研究所 辽宁省航发材料摩擦学重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要:目的 研究钛合金表面 TiB₂ 涂层在高温条件下与工业纯铝之间的粘着磨损行为,重点分析了不同滑动速度对其影响。通过实验探讨 TiB₂涂层的抗铝粘着磨损规律及其作用机制,为提升涂层的高温耐磨性能提供理论依据。方法 采用直流脉冲磁控溅射工艺在 TC4 钛合金表面制备具有致密结构和优异膜基结合强度的 TiB₂涂层,使用高温销-盘摩擦磨损试验机,探究滑动速度对 钛合金表面 TiB₂涂层与工业纯铝之间粘着磨损行为的影响,揭示涂层在不同速度条件下的磨损特 性及其抗铝粘着性能的变化规律。采用扫描电子显微镜、三维超景深光学显微镜和接触式轮廓仪 表征涂层与铝销表面磨痕形貌特征和磨损状态,并对摩擦学系统的铝粘着磨损转移程度进行定量 计算。结果 在 300 ℃高温下,随滑动速度提高,摩擦系数降低,TiB₂涂层磨痕内部的铝粘着转移 层形貌发生变化,由连续的岛状丘状片层逐渐转变为分散的颗粒状锚点。同时,铝粘着转移层的 平均厚度和覆盖率明显减小,表明滑动速度对铝粘着行为具有显著影响。此外,基于 TiB₂涂层表面铝粘着转移程度与纯铝销磨损量提出归一化的涂层抗粘着能力系数 A_c ,其可反应滑动速对 TiB₂涂层抗铝粘着转移能力的影响。随滑动速度升高,TiB₂涂层将体现出更加优异的抗铝粘着转移特性,抗铝粘着能力系数由 0.05 m/s 时的 0.917 降低至 0.30 m/s 时的 0.058。结论 300 ℃高温下 TiB₂涂层能够抑制铝的粘着转移行为。随滑动速度的升高,工业纯铝销对 TiB₂涂层表面铝粘着转移层 的剪切去除作用增强,因此 TiB₂涂层表面铝粘着转移程度降低。

关键词: TiB2涂层; 钛合金; 高温摩擦磨损; 滑动速度; 粘着磨损

中图分类号: TB37 文献标志码: A 文章编号:

D01:

Effect of Sliding Speed on Anti-aluminium Adhesion Behaviour of TiB₂ deposited Titanium Alloy under High Temperature

Wu Bi, GAO Si-yang, XUE Wei-hai, LI Shu, DUAN De-li*

(SHI Changxu Advanced Material Innovation Center, Chinese Academy of Sciences,

Shenyang 110016

Liaoning Key Laboratory of Aero-engine Materials Tribology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: In the low-pressure compressors of aero-engines, titanium alloy blade tips are prone to high-speed rubbing against aluminum-based sealing coatings. This rubbing often results in aluminum-adhesive transfer, which can degrade the performance and lifespan of the aero-engine. To address this issue, the preparation of TiB_2 coatings on titanium alloy blades has been investigated to achieve efficient cutting and resistance to aluminum-adhesive transfer. The introduction of TiB_2 coatings

基金项目:中国科学院基础与交叉前沿科研先导专项(XDB047010204);辽宁省航空推进系统先进测试技术重点 实验室开放基金(MTAPS202302)

Fund: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Science (XDB047010204); The Fund of Liaoning Key Laboratory of Advanced Test Technology for Aeronautical Propulsion System (MTAPS202302)

could provide a hard, wear-resistant surface that minimizes material transfer and maintains the integrity of the blade tips. Furthermore, the interactions in the tribological system are significantly influenced by loads, temperature, and sliding speed. This study investigates the adhesive wear behavior between TiB_2 coatings and aluminum at high temperatures under varying sliding speeds, highlighting the mechanisms and effectiveness of TiB_2 coatings in resisting aluminum adhesive wear. The dense-structured TiB_2 coatings were prepared on TC4 titanium alloy surfaces using pulsed-DC magnetron sputtering. The sputtering parameters included a pressure of 0.5 Pa, a target-substrate distance of 100 mm, a sputtering power of 500 W (with a duty cycle of 90% and a frequency of 40 kHz), a substrate bias of -60 V, and a deposition time of 90 minutes. The as-deposited TiB_2 coatings had an excess boron chemical ratio (B/Ti = 3.91) and a thickness of 1.1 μ m, with hardness and elastic modulus at 34.4 GPa and 431.2 GPa, respectively. A high-temperature pin-on-disk tribometer was utilized to examine the effect of sliding speed on the adhesive wear behavior between TiB₂ coating and aluminum. The surface characteristics and wear states of the coatings and aluminum pins were analyzed using a scanning electron microscope, a 3D super-depth optical microscope, and a contact profilometer. The aluminum-adhesive transfer in the tribological system was quantitatively assessed. At elevated temperatures (300° C), the TiB₂ coatings effectively suppressed Al-adhesive transfer. As the sliding speed increased from 0.05 m/s to 0.30 m/s, the coefficient of friction decreased from 0.55 to 0.14. Simultaneously, the shear removal effect of the aluminum pin on the TiB₂ coating's aluminum adhesion transfer layer increased, reducing the extent of aluminum transfer on the TiB_2 coating. The morphology of the Al- adhesive transfer layer within the TiB_2 coating's wear tracks transitioned from continuous islands to particulate anchors, decreasing the average thickness and coverage of the aluminum transfer layer. Plastic smearing and shear tongues were observed on the edges of the aluminum pin. A normalized anti-adhesive capability coefficient (Ac) was proposed, based on the degree of Al-adhesive transfer on the TiB₂ coating and the wear of the pure aluminum pin, to reflect the influence of sliding speed on the anti-adhesive performance of TiB₂ coatings. As the sliding speed increased, the TiB₂ coatings demonstrated superior resistance to aluminum-adhesive transfer, with the anti-adhesive capability coefficient decreasing from 0.917 at 0.05 m/s to 0.058 at 0.30 m/s.

Keywords: TiB₂ coating; Titanium alloy; High temperature friction and wear; Sliding speed; adhesive wear

引言

在航空发动机压气机中, 钛合金叶片尖端易与机匣内壁的铝基封严涂层发生高速刮擦^[1,2]。该 类偶发碰磨现象会导致铝基涂层材料粘着转移至钛合金叶尖表面, 引起叶尖长度增加, 并加剧铝 基涂层的磨损。上述变化不仅会降低航空发动机气路的密封性能, 还将影响其运行的稳定性^[3-5]。 TiB₂陶瓷因晶体结构中较高的共价键比例而体现出极高的熔点(3225 ℃^[6])和硬度(25 GPa^[7])。 同时, TiB₂ 的高热力学形成焓, 使其具有优异的化学稳定性^[8]。Xi 等^[9]研究高温(700~1400℃) 下 TiB₂陶瓷与熔融铝液界面行为, 二者界面清晰完整, 无界面反应发生。因此, 在钛合金叶片尖 端制备 TiB₂陶瓷涂层有望对高速刮擦过程中铝基封严涂层粘着转移实现有效抑制。

Heck 等^[10]和 Konca 等^[11]对比研究 TiB₂、DLC、H-DLC(含氢类金刚石)、TiN、CrN 和 TiAlN 涂层在室温下的抗铝粘着磨损性能,其中仅 TiB₂和 H-DLC 涂层具有良好的抗铝粘着磨损性能。 然而,随着环境温度的提高,H-DLC 涂层抗铝粘着转移性能急剧降低。Gharam 等^[12]和 Ni 等^[13] 报道当温度高于 200℃后,涂层中 H 元素的析出和石墨化转变导致 H-DLC 涂层磨损率激增,涂层 脱落,丧失抗铝粘着转移效果。与之相反,Bjork 等^[14]发现 TiB₂涂层在达 500℃高温下,仍具有 优异的抗铝粘着磨损性能。同样,作者前期对钛合金表面 TiB₂涂层与工业纯铝高温粘着磨损行为 的研究表明,随温度提高至 450℃,TiB₂涂层表面铝粘着转移程度仅为钛合金基体的 64%,与室 温下钛合金基体表面铝粘着转移程度接近。高温下钛合金表面 TiB₂涂层通过抑制对摩铝销的塑性 机械涂抹并促进 TiB₂涂层表面铝粘着转移层的剪切去除而实现抗铝粘着效果^[15]。此外,摩擦学系 统交互行为受载荷^[16,17]、温度^[18,19]和滑动速度^[20,21]等服役工况影响显著。因此,有必要开展关于 高温条件下滑动速度对钛合金表面 TiB₂涂层抗铝粘着转移行为研究。

本文使用直流脉冲磁控方法,在 TC4 钛合金基体表面沉积 TiB2 涂层。通过高温摩擦磨损实验研究钛合金表面 TiB2 涂层与工业纯铝销间的粘着磨损行为。探讨滑动速度对 TiB2 涂层抗铝粘着转移行为的影响规律与调控机理。

1 试验

1.1 实验材料与制备

选择单晶 Si (100) 片与 TC4 钛合金片(20 mm×20 mm×4 mm) 作为基体材料,基体均为镜 面抛光状态,分别经酒精与丙酮超声清洗后,置入真空室内待镀。直流脉冲电源为 TiB2 靶材(99.9 at.%)供电。溅射气压 0.5 Pa,靶基距 100 mm,溅射功率 500 W(占空比 90%,频率为 40 kHz),基体偏压-60 V,沉积时间 90 min。高温销-盘摩擦磨损试验中,选用直径为 4 mm 的 1060 工业纯 铝球冠销作为与钛合金表面 TiB2 涂层配对的对摩材料。

1.2 试验方法与设备

使用电子探针(SHIMADZU EPMA-1610)对 TiB2涂层的成分进行测定。采用接触式轮廓仪 (哈尔滨刃具量具集团 2300A-R)测涂层平均厚度与涂层磨痕表面铝粘着转移层平均厚度,粘着 转移层平均厚度为10处随机位置测量磨痕轮廓最高点与基线高度差的平均值。使用场发射扫描电 子显微镜(ZEISS SUPRA55型)对涂层横截面形貌及摩擦磨损试验后涂层磨痕形貌进行观察与表 征,以揭示涂层的微观结构特征及其磨损机制。利用图像识别软件通过10张涵盖磨痕宽度视场下 扫描电子显微镜照片中铝粘着转移层与 TiB2 涂层磨痕衬度差别计算磨痕表面铝粘着转移层覆盖 率。铝销磨斑形貌采用三维光学测量系统(KEYENCE VHX-6000 型)进行表征。通过划痕法评 估TiB2涂层与钛合金基体的膜基结合强度。划痕试验采用多功能摩擦磨损试验机(RTEC MFT-5000 型)进行,划痕长度为5mm,渐进加载载荷范围为0.5N~50N,滑动速度为0.16mm/s。钛合金 表面 TiB2 涂层与铝销的摩擦学行为使用多功能摩擦磨损试验系统(CETR UMT-2 型)的高温销-盘试验模块进行评价。工业纯铝销与沉积 TiB2 涂层的钛合金盘为球-平面接触形式, 法向载荷为1 N, 滑动速度为 0.05 m/s、0.10 m/s、0.20 m/s 和 0.30 m/s, 回转半径为 20 mm, 在不同滑动速度下 保证磨程均为 60 m, 匹配试验时间由 20.0 min 渐次缩短至 3.3 min。铝基封严涂层在航空发动机 压气机中的服役温度通常不超过 450 ℃[22]。此外,前期高温销盘试验结果表明,温度达 300℃后, 钛合金 TiB2 涂层表面铝粘着转移倾向大幅升高[15]。故不同滑动速度条件下高温销-盘试验温度设 定为300℃。

2 结果与讨论

2.1 TiB2涂层的成分、结构与性能

在溅射等离子体中,B原子的碰撞截面积和能量传递系数均小于Ti原子,B原子在溅射等离子体中的平均自由程更大,到达基体表面概率更高^[23, 24]。因此,本文采用磁控溅射工艺制备B元素含量超过TiB2标准化学配比的TiB2涂层(B/Ti原子比3.91)。Dorri等^[25]和Mitterer等^[23]报道过量的B元素以富B相形式存在于晶界处。在TiB2涂层发生变形过程中晶界处的富B相会抑制该区域内位错的形成与滑移。因此,过化学配比的TiB2涂层一般体现出较高的硬度^[26]。

图1给出单晶硅基体表面TiB₂涂层的横截面扫描电子显微镜照片。通过该图像测量,涂层的平 均厚度为1.1 μm,在TiB₂涂层与基体间沉积200 nm厚度的硬金属Cr过渡层。Cr过渡层具有较高的 硬度和弹性模量,可实现钛合金基体与TiB₂涂层间力学性能的过渡,提高涂层基体协调变形能力, 进而释放涂层内部残余应力并提高涂层与基体的结合强度。



图1 TiB2涂层的横截面扫描电子显微镜照片

Fig.1 Cross-sectional SEM image of TiB₂ coating on Si substrate

基于沉积TiB₂涂层前后Si片基体曲率的变化以及涂层厚度,采用Stoney公式计算了涂层内部的 残余应力状态和应力值^[27]。结果表明,涂层的残余压应力为1.36 GPa。涂层中较高残余压应力的 存在会阻碍硬度测量过程中压头的压入引起的弹塑性变形,从而提高涂层硬度^[28]。采用纳米压痕 仪测量涂层的平均硬度为34.4 GPa,平均弹性模量为431.2 GPa。此外,由于TC4钛合金的硬度为 2.4 GPa,弹性模量为120 GPa,TiB₂涂层与TC4基体硬度和弹性模量差异较大,二者在外力加载下 难以一同发生协调变形。因此,通过Cr过渡层和TiB₂层沉积工艺设计,实现TiB₂向基体硬度与弹 性模量过渡,涂层在钛合金表面获得良好膜基结合强度(Cr过渡层的硬度为9.50 GPa,弹性模量 分别为289.24 GPa)。采用划痕法评估钛合金表面TiB₂涂层的膜基结合强度。划痕边缘涂层出现裂 纹的临界载荷L_{c1}为10.8 N,划痕边缘涂层破裂或脱落的临界载荷L_{c2}为17.9 N,而划痕中心区域涂 层破裂的临界载荷L_{c3}为28.1 N。

2.2 不同滑动速度下钛合金表面TiB2涂层与工业纯铝在的高温粘着磨损行为

2.2.1 滑动速度对摩擦系数的影响

图2给出不同滑动速度条件下钛合金表面TiB2涂层与工业纯铝销的摩擦系数。在300 ℃的高温 下,当工业纯铝销以0.05 m/s的速度滑动时,与钛合金表面TiB2涂层对摩的摩擦系数曲线呈现较大 波动,表现为缓慢上升后下降的趋势,平均摩擦系数为0.55。将滑动速度提高至0.10 m/s后,摩擦 系数波动趋于稳定,平均摩擦系数降至0.38。继续提高滑动速度至0.20 m/s时,摩擦系数略有上升, 如图2b所示。当滑动速度进一步增加至0.30 m/s时,摩擦系数降至最低值0.14。摩擦系数略有上升, 如图2b所示。当滑动速度进一步增加至0.30 m/s时,摩擦系数降至最低值0.14。摩擦系数的波动与 铝的粘着转移行为动态转变密切相关,涂层表面铝的粘着、剥落与再粘着均会引起摩擦系数的波动与 铝的粘着转移行为动态转变密切相关,涂层表面铝的粘着、剥落与再粘着均会引起摩擦系数的波动与 铅和铅粘着转移层的剪切行为,会提高滑动阻力与摩擦系数。因此,尽管如图2b给出摩 擦系数平均值整体随滑动速度提高而出现降低趋势,但在滑动速度为0.20 m/s时,平均摩擦系数有 所升高,其可能因铝销对铝粘着转移层剪切行为所导致。此外,在低摩擦系数情况下,铝销向TiB2 涂层表面的塑性机械涂抹倾向更低,铝销材料不易通过涂抹方式粘着于涂层表面。





2.2.2 滑动速度对TiB2涂层磨痕形貌和铝粘着转移程度的影响

结合TiB₂涂层磨痕形貌的变化,进一步分析滑动速度对钛合金表面TiB₂涂层与工业纯铝销之间粘着磨损行为的影响规律。钛合金表面TiB₂涂层表面在不同滑动速度下均较为光滑,无犁沟等磨粒磨损特征,如图3所示。这表明TiB₂涂层具有优异的耐磨性,能够为钛合金基体提供有效的摩擦学防护。在较低滑动速度下(0.05 m/s和0.10 m/s),涂层表面磨痕中部的铝粘着转移层主要呈大面积片状岛丘形态,岛丘沿滑动方向呈长条形分布,长度可达几百微米(图3 a-d)。岛丘表面可见犁沟和由于严重塑性变形产生的裂纹。而在磨痕边缘,铝粘着转移层则多为颗粒状锚点,且分布较为随机,这些颗粒状锚点可以成为后续铝粘着转移的诱发位置。当滑动速度提高至0.20 m/s时,铝粘着转移层的岛丘尺寸明显减小。进一步提高至0.30 m/s时,粘着转移层几乎完全由直径仅为10 µm~20 µm的颗粒状岛丘组成(图3 e-h)。



图3 不同滑动速度下钛合金表面TiB₂涂层磨痕扫描电子显微镜形貌 Fig.3 SEM micrographs of wear track on TiB₂ coating deposited TC4 substrates with virous slidding speed:a),b) 0.05 m/s, c),d) 0.10 m/s, e), f) 0.20 m/s, g), h) 0.30 m/s 图4给出钛合金表面TiB₂涂层磨痕表面铝粘着转移层覆盖率和平均厚度。当滑动速度由0.05 m/s提高至0.30 m/s, TiB₂涂层磨痕内部铝粘着转移层覆盖率由18.91 %降低至3.64 %。同时,铝粘 着转移层平均厚度也随之减小。铝粘着转移层在形貌上亦体现出较大差异,仅通过铝粘着转移层 的覆盖率难以准确评价其粘着转移程度。因此,采用多点测量的铝粘着转移层平均厚度(Average thickness)与铝粘转移层覆盖率(Coverage rate)的乘积作为无量纲的铝粘着转移体积评价因子 (Adhesion volume factor, V)。图5给出不同滑动速度下的铝粘着转移层体积评价因子V。当滑动 速度由0.05 m/s提高至0.10 m/s后,铝粘着转移层体积评价因子V降低62 %。滑动速度进一步提高至 0.30 m/s,铝粘着转移层体积评价因子V仅为0.05 m/s时的3.9%。TiB₂涂层表面铝粘着转移现象得到 显著抑制,钛合金表面TiB₂涂层体现出更强的抗铝粘着转移特性。



图4 不同滑动速度下TiB₂涂层表面铝粘着转移层覆盖率和平均厚度 Fig.4 Coverage rate and average thickness of Al-adhesive transfer layer on TiB₂ coatings





2.2.3 不同滑动速度对工业纯铝销磨斑形貌的影响

图6给出工业纯铝销的磨斑表面光学显微镜形貌。以滑动速度为0.05 m/s铝销磨斑为例(图6 a),在背离滑动方向侧(上方),铝销磨斑边缘体现出拖尾特征,其主要原因为高温铝销因塑性 机械涂抹所致;在迎接滑动方向侧(下方),铝销磨斑出现剪切舌,其原因主要为铝销本身对涂 层表面铝粘着转移层的剪切去除作用。铝销的塑性机械涂抹和铝销对铝粘着转移层的剪切去除作 用相互竞争,控制铝的粘着转移行为^[15]。因此,铝销表面呈现出剪切舌与拖尾特征。

当滑动速度较低时(0.05 m/s和0.10 m/s),铝销磨斑上方边缘拖尾特征明显,如图6a和b所。 这表明在低滑动速度下,高温软化的铝销与TiB₂涂层间较高的摩擦系数促进铝销的塑性机械涂抹。 在TiB₂涂层表面出现大量铝粘着转移层后,后续摩擦磨损接触逐渐转变为铝销和铝粘着转移层间 同种材料的粘着磨损。因此,TiB₂涂层表面铝粘着转移较为严重,铝销磨斑拖尾特征更加显著。 当滑动速度提高至0.20 m/s时,工业纯铝销对TiB₂涂层表面铝粘着转移层的剪切去除作用增强,导 致更多的铝粘着转移层被剪切去除。这些铝粘着转移层可能会以磨粒的形式离开磨痕,或在工业 纯铝销磨痕边缘堆积并形成剪切舌,进一步加剧磨损过程。铝销的剪切舌特征也变得更加明显, 如图6c和d所示。尤其是当滑动速度提高至0.30 m/s时,低摩擦系数抑制铝销向TiB₂涂层表面塑性 涂抹行为,铝销磨斑拖尾特征减弱。因此,在高温下钛合金表面TiB₂涂层表面铝粘着转移现象随 滑动速度的提高而得到明显缓解。此外,铝销球冠在磨损过程中被磨耗,磨斑半径逐渐增加,引 起铝销与钛合金表面TiB₂涂层间接触应力逐渐降低,进而一定程度减缓铝销和TiB₂涂层的磨损。



图6 摩铝销磨斑光学显微镜形貌 Fig.6 Optical microscope images of the wear scar on the Al pins

2.2.3 TiB2涂层抗铝粘着转移能力的评价

对于钛合金表面TiB₂涂层与铝销对摩副,在TiB₂涂层的抗铝粘着磨损能力的研究中,易于忽略铝销磨损的影响,只通过TiB₂涂层表面铝粘着转移体积评估因子/进行评估。在相同铝磨损量的情况下,获得的涂层抗粘着磨损定量评价结果才更加准确客观。但是由于高温氧化的影响使得铝销失重测量难以直接反应其磨损量,故选取铝销磨损前后长度变化作为铝销磨损量判据。

滑动速度的增加会影响铝销和TiB₂涂层间的塑性涂抹和铝销对涂层表面铝粘着转移层的剪切 去除行为。因此,根据铝销磨损和涂层表面铝粘着转移程度的定量评价结果,应用磨损单位长度 铝销产生的涂层表面铝粘着转移体积因子*V*来评价涂层抗粘着能力,提出抗粘着能力系数 (Anti-adhesive capability cofficient, *A*_c):

$$A_c = \frac{V}{VL} \tag{1}$$

其中ΔL为工业纯铝销长度变化量(length chang),V为无量纲的铝粘着转移体积评价因子 (Adhesion volume factor)。抗粘着能力系数A_c值越小,表明对摩副系统间更难发生粘着磨损和对 摩副材料的粘着转移。表1给出不同滑动速度下TiB₂涂层抗铝粘着能力系数A_c。随着滑动速度的提 高,A_c值降低,表明在对应摩擦学工况下钛合金表面TiB₂涂层体现出更加优异的抗铝粘着转移能 力。此外,存在一个滑动速度的阈值,抗粘着能力系数A_c在滑动速度高于0.10 m/s后出现量级的变 化,数值大幅度降低,抗铝粘着转移能力也显著提高。TiB₂涂层磨痕表面铝粘着转移层和铝销磨 斑形貌特征与分析数据的变化也与涂层抗铝粘着转移能力系数的突变存在对应。在滑动速度为 0.50 m/s和0.10 m/s时,TiB₂涂层磨痕表面铝粘着转移层呈大面积岛丘状,且铝销磨斑可见明显的 拖尾特征。然而,滑动速度超过0.10 m/s后,TiB₂涂层磨痕表面铝粘着转移层多为锚点状颗粒形态, 工业纯铝销磨斑拖尾特征减弱,其边缘区域剪切舌特征相对占主导。因此,采用抗粘着能力系数 A_c评价高温条件下钛合金表面TiB₂涂层抗铝粘着转移行为具有一定可行性。

Temperature	Sliding speed	Adhesion volume factor, V	ΔL	Anti-adhesive capability coefficient, A_c
°C	m/s		μm	
300	0.05	119.38	130.1	0.917
	0.10	44.82	57.2	0.784
	0.20	6.42	115.2	0.056
	0.30	4.69	81.5	0.058

表1 不同滑动速度下钛合金表面TiB₂涂层抗铝粘着转移能力系数 A_c Table1 Anti-adhesive capability coefficient A_c of TiB₂ coatings with virous sliding speed

3 结论

(1)采用直流脉冲磁控溅射方法,在TC4钛合金表面制备具有致密类非晶结构的TiB2涂层。 TiB2涂层具有B过量的化学配比,其硬度达34.4 GPa,内部残余压应力为1.36 GPa。TiB2涂层与钛 合金基体间膜基结合强度优异,满足严苛摩擦学工况下使用要求。

(2) 钛合金表面TiB₂涂层与铝销对摩的粘着磨损行为受摩擦学工况影响显著。在高温下,随 滑动速度升高,对摩副间摩擦系数降低,TiB₂涂层表面铝粘着转移层由大面积岛丘状转变为零星 小尺寸颗粒锚点,TiB₂涂层表面铝粘着转移层的覆盖率和平均厚度逐渐降低。同时,与TiB₂涂层 对摩铝销磨斑边缘拖尾特征减弱,而剪切舌特征凸显。滑动速度的提高可促进TiB₂涂层表面铝粘 着转移层被铝销剪切去除,TiB₂涂层抗铝粘着转移能力显著增强。

(3)根据钛合金表面TiB2涂层铝粘着转移程度和对摩工业纯铝销磨损量,提出归一化的涂层 抗粘着能力系数A_c,用于钛合金表面TiB2抗铝粘着转移能力的评价。抗粘着能力系数A_c评价结果 与涂层磨痕和铝销磨斑形貌特征变化规律能够良好对应,能够较好反应高温下滑动速度对钛合金 表面TiB2涂层抗铝粘着转移能力的影响。

参考文献:

- [1] XUE W, GAO S, DUAN D, et al. Effects of blade material characteristics on the high-speed rubbing behavior between Al-hBN abradable seal coatings and blades[J]. Wear, 2018, 410: 25-33.
- [2] GAO S, XUE W, DUAN D, et al. Effect of thermal-physical properties on the abradability of seal coating under high-speed rubbing condition[J]. Wear, 2018, 394: 20-29.
- [3] WU B, GAO S, ZHANG R, et al. Investigation of the Al-adhesive transfer mechanism on Ti6Al4V blade tips under high-speed rubbing in an aero-turbine engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106692.
- [4] WU B, GAO S, XUE W, et al. Anti-adhesion mechanism of TiB₂-deposited Ti6Al4V blade tip against Al-hBN seal coating during high-speed rubbing[J]. Tribology Letters, 2023, 71(2): 51.
- [5] 吴彼, 张振波, 李曙. 航空发动机材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(10): 1099-1117.
 WU B, ZHANG Z B, LI S. Advances in Tribology of Aero-Engine Materials[J]. TRIBOLOGY, 2023, 43(10): 1099-1117.
- [6] MURRAY J, LIAO P, SPEAR K. The B-Ti (boron-titanium) system[M]. 1986: 550-555.
- [7] RABIEZADEH A, HADIAN A, ATAIE A. Synthesis and sintering of TiB₂ nanoparticles[J]. Ceramics International, 2014, 40(10): 15775-15782.
- [8] CHEN J-S, WANG J. Diffusion barrier properties of sputtered TiB₂ between Cu and Si[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(5): 1940.
- [9] XI L, KABAN I, NOWAK R, et al. High-temperature wetting and interfacial interaction between liquid Al

and TiB2 ceramic[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(7): 2682-2690.

- [10] HECK S, EMMERICH T, MUNDER I, et al. Tribological behaviour of TiAlBN-based PVD coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 86: 467-471.
- [11] KONCA E, CHENG Y-T, WEINER A, et al. Elevated temperature tribological behavior of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings against 319 aluminum alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(12-13): 3996-4005.
- [12] ABOU GHARAM A, LUKITSCH M, BALOGH M, et al. High temperature tribological behaviour of carbon based (B₄C and DLC) coatings in sliding contact with aluminum[J]. Thin Solid Films, 2010, 519(5): 1611-1617.
- [13] NI W, CHENG Y-T, WEINER A M, et al. Tribological behavior of diamond-like-carbon (DLC) coatings against aluminum alloys at elevated temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3229-3234.
- [14] BJöRK T, BERGER M, WESTERGåRD R, et al. New physical vapour deposition coatings applied to extrusion dies[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146: 33-41.
- [15] 吴彼, 高禩洋, 段德莉. 钛合金表面 TiB₂涂层与纯铝的高温黏着磨损行为[J]. 中国表面工程, 2022, 35(03): 64-72.

WU Bi,GAO Siyang,XUE Weihai,DUAN Deli,LI Shu.High-temperature Adhesive Wear Behavior Between TiB₂ Coating on TC4 Substrate and Pure Al[J].China Surface Engineering,2022,35(3):64~72

- [16] AMEEN H A, HASSAN K S, MUBARAK E M M, et al. Effect of loads, sliding speeds and times on the wear rate for different materials[J], 2011, 2(1): 99-106.
- [17] STOTT F, JORDAN M. The effects of load and substrate hardness on the development and maintenance of wear-protective layers during sliding at elevated temperatures[J]. Wear, 2001, 250(1-12): 391-400.
- [18] WILSON S, ALPAS A. Effect of temperature on the sliding wear performance of Al alloys and Al matrix composites[J]. Wear, 1996, 196(1-2): 270-278.
- [19] LI C, DENG X, HUANG L, et al. Effect of temperature on microstructure, properties and sliding wear behavior of low alloy wear-resistant martensitic steel[J]. Wear, 2020, 442: 203125.
- [20] WILSON S, ALPAS A. Effect of temperature and sliding velocity on TiN coating wear[J]. Surface Coatings Technology, 1997, 94: 53-59.
- [21] LI X, ZHOU Y, JI X, et al. Effects of sliding velocity on tribo-oxides and wear behavior of Ti–6Al–4V alloy[J]. Tribology international, 2015, 91: 228-234.
- [22] QU W-W, ZHANG X-X, YUAN B-F, et al. Homologous layered InFeO 3 (ZnO) m: new promising abradable seal coating materials[J]. Rare Metals, 2018, 37: 79-94.
- [23] MITTERER C. Borides in thin film technology[M]. 1997: 279-291.
- [24] CHRISTOU C, BARBER Z, FILMS. Ionization of sputtered material in a planar magnetron discharge[J]. Journal of Vacuum Science Technology A: Vacuum, Surfaces, 2000, 18(6): 2897-2907.
- [25] DORRI S, PALISAITIS J, GRECZYNSKI G, et al. Oxidation kinetics of overstoichiometric TiB₂ thin films grown by DC magnetron sputtering[J]. Corrosion Science, 2022, 206: 110493.
- [26] MAYRHOFER P H, MITTERER C, WEN J G, et al. Self-organized nanocolumnar structure in superhard TiB2 thin films[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(13).
- [27] FENG X, HUANG Y, ROSAKIS A. On the Stoney formula for a thin film/substrate system with nonuniform substrate thickness[J]. ASME. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74(6): 1276-1281.
- [28] AHLGREN M, BLOMQVIST H. Influence of bias variation on residual stress and texture in TiAlN PVD coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(1-4): 157-160.
- [29] WARREN C, WERT J. A model for adhesive wear[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 1990, 4(1): 177-196.