

# 重载顶推装备滑动副的摩擦磨损机理

梁 敖, 卞永明, 邵 杰, 杨继翔, 刘广军

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 为了研究重载顶推装备滑动副的摩擦磨损性能, 提出一种可以模拟重载顶推装备顶推过程的试验台, 研究以聚四氟乙烯(PTFE)/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)/二硫化钼( $\text{MoS}_2$ )复合材料和 0Cr18Ni9 不锈钢组成的滑动副在不同载荷且无润滑工况下, 摩擦因数变化趋势并揭示摩擦副的磨损机理。利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)对滑动副磨损后的表面微观形貌和化学成分进行分析。研究表明: 随着滑动次数的增加, 滑动副摩擦因数呈先增大后减小, 最后趋于稳定的变化趋势。重载下滑动副摩擦因数初始值高于轻载下摩擦因数, 但最终稳定值低于轻载下摩擦因数。轻载下主要磨损机制表现为磨粒磨损和黏着磨损; 而重载下主要磨损机制表现为黏着磨损和疲劳磨损。

**关键词:** 磨损机制; 摩擦因数; 重载顶推装备滑动副; 复合材料; 0Cr18Ni9 不锈钢

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

## Friction and Wear Mechanism of Sliding Pairs for Incremental Launching Equipment

LIANG Ao, BIAN Yongming, SHAO Jie, YANG

Jixiang, LIU Guangjun

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to study the friction and wear performance of sliding pair of incremental launching equipment, a wear test-bed which can simulate the working process of incremental launching equipment is proposed. Tribological tests for the sliding pair composed of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ) reinforced polytetrafluorethylene (PTFE) and 0Cr18Ni9 stainless-steel were conducted on the wear test-bed. At different loads without lubrication, the variation of friction coefficient of friction pair was

discussed and the wear mechanism of the friction pair was revealed. The microscopic and chemical composition of the worn surface for the sliding pairs were discussed by using scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that, with the increase of sliding times, the friction coefficient of the sliding pair first increases, then decreases, and finally stabilize. Moreover, the initial value of friction coefficient at heavy load is larger than that at light load, but the final stable value is smaller than that at light load. At light load, the main wear mechanism is abrasive wear and adhesive wear. However, at heavy load, the main wear mechanism is adhesive wear and fatigue wear.

**Key words:** wear mechanism; coefficient of friction; sliding pair of incremental launching equipment; composite; 0Cr18Ni9 stainless-steel

顶推施工方法是一种高效、安全、经济的现代桥梁施工方法。由于不受地形或地质条件的限制, 可充分利用桥墩结构, 降低了对大型施工设备的需求, 而被广泛应用于预应力混凝土等截面连续桥梁或斜拉桥的施工建设中。在顶推施工中, 利用引道等施工便利的场地完成钢桥的拼装或混凝土桥梁的预制, 再通过顶推装备将桥梁结构移动至最终位置<sup>[1-2]</sup>。目前许多研究学者主要关注施工中桥梁的应力应变及变形情况<sup>[3-4]</sup>或顶推时的自动控制系统的研究<sup>[5]</sup>, 而对重载顶推装备自身结构零部件研究相对较少。但在顶推施工中, 使用重载顶推装备可有效降低桥墩承受的水平载荷, 减小对桥梁底部的损伤, 同时也可以实现多点同步顶推<sup>[6]</sup>。换言之, 采用顶推装备可以提高施工效率, 增强施工质量, 降低施工成本。并且该装置已广泛应用于诸多桥梁的施工中,

收稿日期: 2021-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875412)

第一作者: 梁敖(1993—), 女, 博士生, 主要研究方向为重大工程施工装备及技术。E-mail: liang-86@tongji.edu.cn

通信作者: 卞永明(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能施工技术与装备关键技术, 大型复杂机械系统实时网络控制理论与工程应用等。E-mail: ymbianmail@163.com



论文  
拓展  
介绍

如著名的九堡大桥<sup>[7]</sup>。因此,对顶推装备自身零部件的研究显得尤为重要。

重载顶推装备主要由支撑顶升油缸、顶推移动油缸、横向调整油缸、滑动副、上部结构和下部结构等组成,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。顶推装备通过滑动副的面-面接触实现预定操作,滑移面的承载能力以及摩擦磨损性能决定了整个装备的工作状态,进而影响了施工效率和可靠性。因此,滑动副的材料及摩擦磨损机理受到了研究者们的关注。从 1960 年以来,聚四氟乙烯(PTFE)和不锈钢就被广泛用作桥梁支座<sup>[9-10]</sup>。PTFE 是一种含氟聚合物,属于热塑性材料,其低摩擦因数、高耐热和自润滑等性能已得到认可<sup>[11-12]</sup>,为顶推施工滑动副的材料提供了很好的选择性。许多研究学者通过试验方法计算了其摩擦因数。例如,Dorafshan 等<sup>[13]</sup>主要测量了在不同润滑条件下 PTFE 支座的摩擦因数,并进行了对比分析。Ala 等<sup>[14]</sup>主要分析了接触载荷和移动距离对 PTFE 材料的磨损量和摩擦因数的影响。尽管 PTFE 材料自身有很多优点,但仍有一些不足,如弹性不足,耐磨性和抗蠕变性能较差<sup>[15]</sup>。因此需要在 PTFE 里填充其余材料来改变其力学性能和抗磨损性能。对于 PTFE 的改性,二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)由于自身分子结构特征被视为有效的固体润滑剂<sup>[16]</sup>。Kawakame 和 Bressan<sup>[17]</sup>发现用玻璃纤维(GF)和 MoS<sub>2</sub>对 PTFE 改性后的复合材料在电机密封件中表现出了良好的耐磨性。大多数研究都是用摩擦因数以及磨损情况来评价 PTFE 复合材料的摩擦性能。对于顶推装备滑动副而言,了解其磨损演化过程及作用机理,进而优化材料的摩擦磨损性能,可以达到减少施工时间,提高施工效率的目的。然而,目前对这一领域的研究比较欠缺。

本文主要研究在轻载和重载无润滑条件下顶推

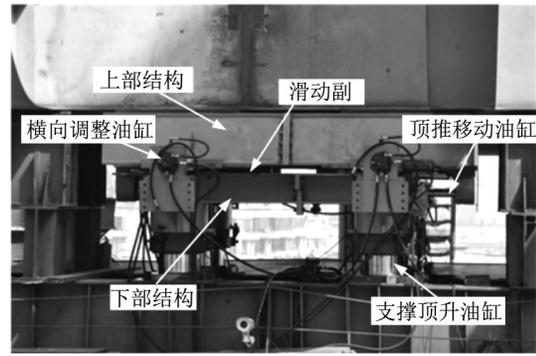


图 1 重载顶推装备结构<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Incremental launching equipment<sup>[8]</sup>

装置滑动副的摩擦学性能及磨损机理。提出了一种模拟顶推装置工作过程的试验台。以顶推装备实际使用的聚四氟乙烯(PTFE)/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)/二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)复合材料和 0Cr18Ni9 不锈钢组成的滑动副为研究对象,研究摩擦因数随滑动次数的变化情况。从微观角度观察摩擦副磨损后的表面形貌,分析摩擦副表面磨损演变过程并揭示出磨损机理,为提高重载顶推装备滑动副的使用寿命提供了试验依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

以 PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub>复合材料和 0Cr18Ni9 不锈钢作为摩擦副试件,其材料主要性能参数如表 1 所示。PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub>复合材料是以高分子材料与不同单体共聚,经各种添加剂改性和特殊合成工艺制成的自润滑复合材料。试验中,复合材料垫初始尺寸为 400 mm×200 mm×30 mm,0Cr18Ni9 不锈钢垫初始尺寸为 1 500 mm×300 mm×5 mm,0Cr18Ni9 不锈钢板的化学成分如表 2 所示。

表 1 试件的主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of material

材料	材料密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	硬度	线胀系数/(10 <sup>-5</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
不锈钢板	7.93	520	—	200HV	1.65~1.8
复合材料	1.0~1.1	≥30	≥65	60~75HD	8.0~9.1

表 2 0Cr18Ni9 不锈钢板化学成份

Tab. 2 Chemical composition of 0Cr18Ni9 stainless-steel

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
元素质量占比/%	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.00~19.00	8.00~11.00

### 1.2 工作原理与试验装置

重载顶推装备如图 1 所示,装备的上部结构将

与需要架设的钢箱梁接触,下部结构固定在支撑桥墩上。滑动副布置在上部结构和下部结构之间,其

中 PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub> 复合材料板置于上部结构底面,而不锈钢板置于下部结构顶面。顶推装备的基本工作原理包括顶升、前进、下降和回缩4个步骤,如图2所示<sup>[18]</sup>,主要由支撑顶升油缸和顶推移动油缸两个执行部件完成,在此过程中,PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub> 复合材料板在不锈钢板上做往复移动。具体

工作步骤为:①多个支撑顶升油缸将钢箱梁整体托起;②顶推移动油缸推动钢箱梁与装备上部结构一同向前移动;③降低支撑顶升油缸,使钢箱梁搁置在临时桥墩上,而与顶推装备分离;④顶推移动油缸回缩,顶推装备上部结构回到初始位置,再进行下一工作循环过程。

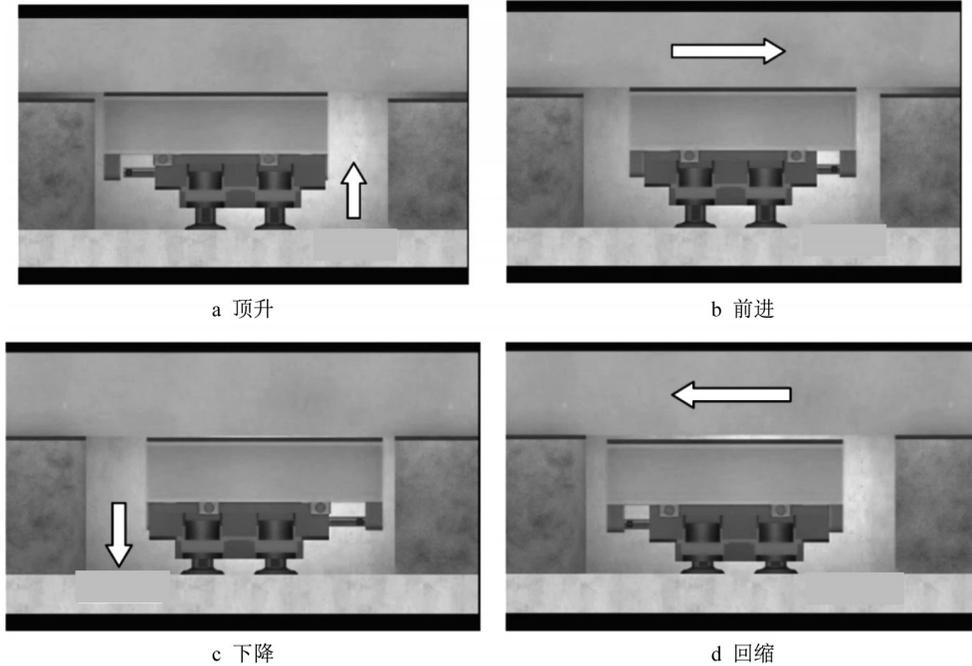


图2 重载顶推装备基本工作原理<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Basic principle of incremental launching equipment<sup>[18]</sup>

根据重载顶推装备的基本工作原理,将滑动副的工作流程简化,如图3所示。 $F$ 为PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub> 复合材料板与不锈钢板承受的法向载荷;复合材料板在水平外力 $F_{1f}$ 和 $F_{2f}$ 作用下在不锈钢板上往复运动。

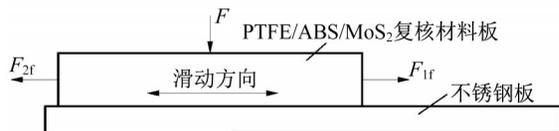


图3 滑动副的工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of operating principle of sliding pair

为了研究滑动副的摩擦磨损性能,根据其工作原理提出了一个摩擦磨损试验装置,其三维示意图如图4所示。该试验装置主要由加载系统、驱动系统、滑动副和固定装置等组成,其中不锈钢板焊接在可往复移动的钢梁上,复合材料板放置在加载系统下面的固定装置中;加载系统主要包括一个液压油

缸为滑动副提供法向载荷;驱动系统主要包括一个水平液压油缸为滑动副提供水平驱动力,使复合材料板可以在不锈钢板上做连续往复水平滑动。在滑动过程中,水平方向唯一阻力来自PTFE/ABS/MoS<sub>2</sub> 复合材料板与不锈钢板之间的摩擦力。

### 1.3 试验过程

利用自行设计的试验装置进行滑动副的摩擦磨损机理分析。试验条件为:①在室温下无润滑;②复合材料板在不锈钢板上单次滑行距离为1 m,滑动速度为0.05 m·s<sup>-1</sup>;③试件在轻载10 MPa和重载30 MPa条件下,分别做三组滑动试验,每组滑动次数为1 000、2 000和3 000。

试验过程如下:

(1)搭建试验装置,如图5所示。所有试验装置零部件均固定在混凝土地板上的钢制反作用框架中;

(2)将驱动系统和加载系统中的液压油缸分别与动力泵站用油管连接;

(3)调试泵站中的溢流阀、调速阀以及试验装置

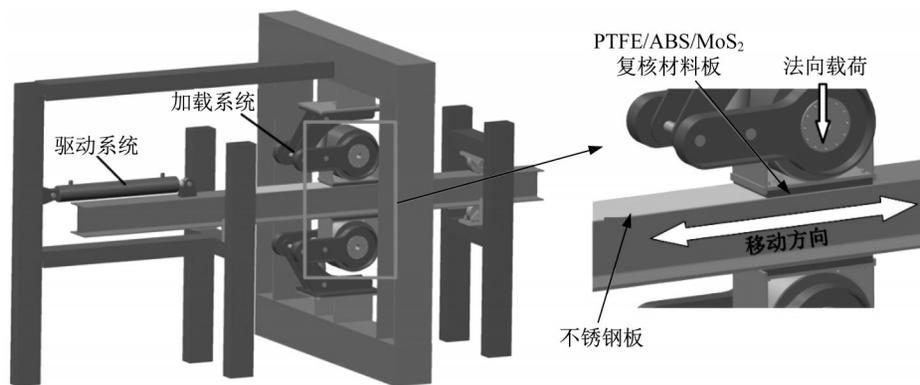


Fig. 4 Schematic diagram of wear test-bed

中的各个传感器,以满足试验条件;

(4) 每组试验过程中,记录水平液压缸进油口和回油口处的油压值,用于计算分析摩擦因数变化趋势,并记录滑动副表面的摩擦温升。为保证试验结果的真实性和可靠性,每组试验均重复3遍以上。



Fig. 5 Actual image of wear test-bed

#### 1.4 试件处理

所有试验组完成后,将复合材料板和0Cr18Ni9不锈钢板分别切割成尺寸为30 mm×30 mm×30 mm和30 mm×30 mm×5 mm的试样。利用FEG-250扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)对试件磨损表面进行观察并分析了磨损区域化学元素的组成成分。由于复合材料属于不导电的塑料合金,在利用扫描电镜观察之前,需对复合材料表面进行镀金处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 摩擦因数

摩擦因数是摩擦磨损研究的重要参数之一,可以反映特定条件下滑动副的摩擦磨损特性<sup>[19]</sup>。图6

给出了滑动副承受不同法向载荷时摩擦因数和摩擦表面温升随滑动次数的变化曲线。从图6中可以看出,在一定法向载荷下,摩擦因数呈先增大后减小的变化趋势。在试验初始阶段,摩擦因数随着滑动次数的增加先增大,达到最大值后开始快速下降,最终趋于稳定值。初始阶段摩擦因数的增加是因为属于聚合物的复合材料具有一定的弹性特性,导致在施加法向载荷的情况下,复合材料板与对偶表面之间的实际接触面积增加。随着干摩擦次数的增加,复合材料表面上的接触峰点发生塑性变形而从基体脱离,黏附在对偶表面不锈钢板上或形成自由磨粒存在于摩擦副表面之间,这使得接触表面上表面粗糙度增加,从而减小摩擦副的实际接触面积,使摩擦因数降低。同时,在干摩擦过程中,由于无法及时释放摩擦产生的热量,复合材料表面发生软化现象,复合材料被转移到对偶表面而形成了转移膜<sup>[20-21]</sup>。随着转移膜的增加,滑动副的表面接触转变为复合材料与其同质表层之间的接触,使得滑动表面的摩擦因数趋于稳定。除此之外,对于不同法向载荷下的摩擦因数而言,30 MPa接触载荷下的初始值高于10 MPa接触载荷的初始值,但30 MPa法向载荷的最终值低于10 MPa接触载荷的最终值。出现这种现象的原因是,随着滑动副承受法向载荷的增加,表面上实际接触峰点增多,即复合材料与不锈钢之间的实际接触面积增加,因此在干摩擦的初始阶段,轻载下摩擦因数小于重载下的摩擦因数。随滑动次数的增加,重载下滑动副表面温度升高得更快(图6),这导致不锈钢表面会更早地形成连续且较均匀的转移膜,且接触表面磨损更加严重,最终在30 MPa法向载荷下摩擦因数下降得更快,也将得到更低的稳定值。

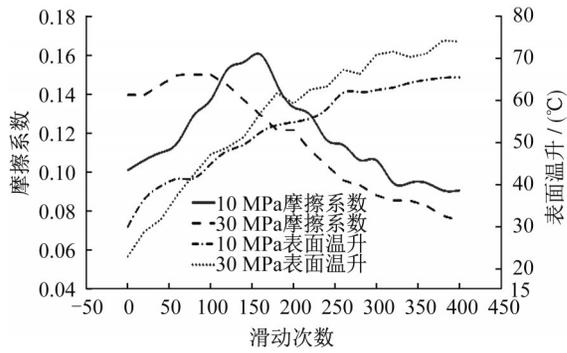


图6 不同载荷下摩擦因数及摩擦表面温升随滑动次数的变化

Fig. 6 Friction coefficient and temperature rising of friction surface versus sliding times at different loads

2.2 轻载时滑动副的磨损机理分析

摩擦因数不足以完全表征摩擦副的摩擦磨损行为,利用扫描电镜观察并分析了滑动副磨损后的微观表面形貌。图7为在施加10 MPa法向载荷时,经过1 000、2 000和3 000次干摩擦试验后滑动副磨损表面的微观形貌,其中复合材料的磨损表面形貌为图7a、7b和7c,不锈钢板的磨损表面形貌为图7d、7e和7f。

轻载下经过1 000次滑动后,滑动副表面没有出

现明显的磨损现象。在复合材料的磨损表面上仅仅发现了一些较浅的沟槽(图7a),并且在不锈钢表面上观察到了一些块状较薄的转移膜(图7d)。除此以外,不锈钢板表面原始的垂直于滑动方向的表面纹理变得更加清晰可见,这也说明转移膜的形成并嵌入到不锈钢粗糙表面中。从图7b可以看出,当滑动次数达2 000次时,复合材料表面出现大量的犁沟现象,且在沟槽内有些许微小的颗粒。这是由于经多次滑动接触后,界面间的剪切力使复合材料表面上发生塑性变形的接触峰点从基体表面脱落,脱落后部分成为自由颗粒存在于摩擦副表面之间,且有些经过多次碾压附着在对偶不锈钢板表面上形成块状的转移膜。图7e显示出不锈钢表面上存在了少量的沟槽,这是因为随着滑动次数的增加,不锈钢表面上转移膜厚度增加,存在于滑动副表面之间的自由磨粒对转移膜进行切割,而产生了犁沟现象。除此之外,通过对图7e中的点A亮白色磨粒进行能谱分析(图8),检测出元素C和Mo的含量很高,这也再次证实了黏附在不锈钢表面上的磨粒是从复合材料板上剥离下来的。3 000次滑动磨损试验后,复合材料表面出现明显的磨损现象(图7c)。可以观察到从复合材料表面有脱落痕迹的边界处发生明显塑性变形,并出现清晰的分层现象。这是由于随着滑动次

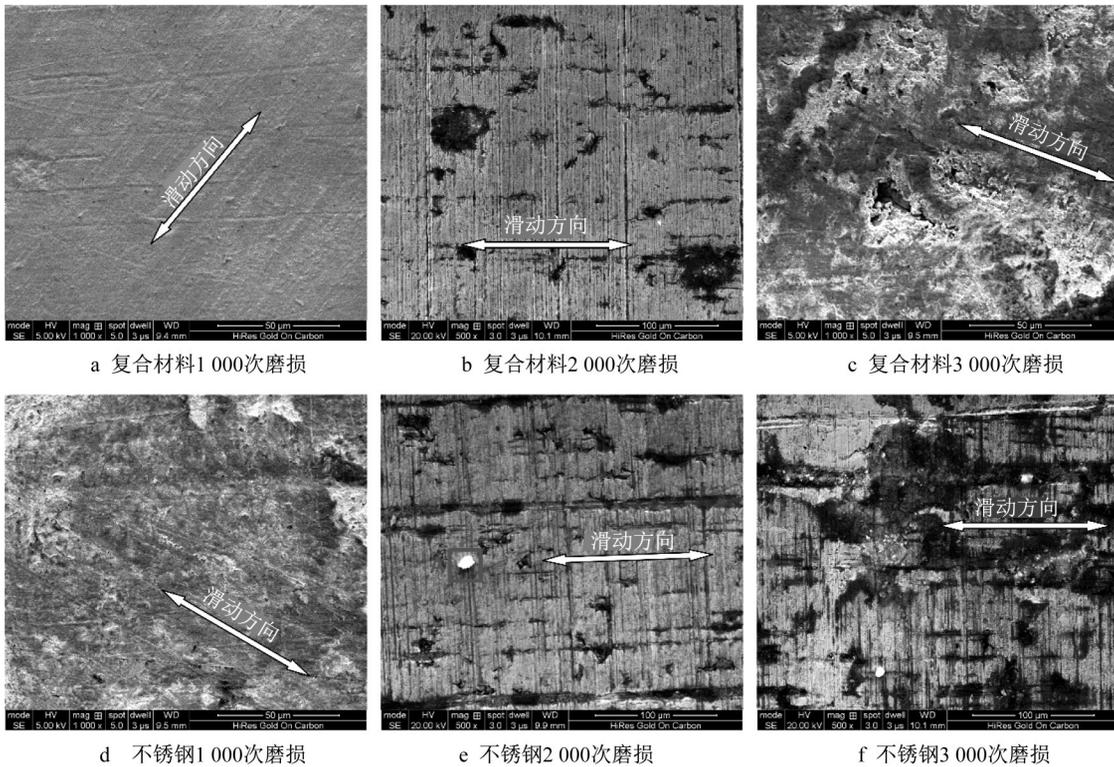


图7 轻载下滑动副磨损表面的扫描电镜图像(10 Mpa)

Fig. 7 SEM images of worn surfaces at light load (10 Mpa)

数的增加,接触界面间温度升高,复合材料表层发生软化并与对偶表面发生黏着现象,使更多接触峰点从基体脱落下来。与此同时,大量脱落的碎屑黏着在不锈钢表面(如图 7f),且一些碎屑会在表面发生团聚现象。由此可以看出,在轻载下摩擦副主要发生了磨粒磨损和黏着磨损。

黏着磨损意味着在发生滑动接触过程中,耐磨

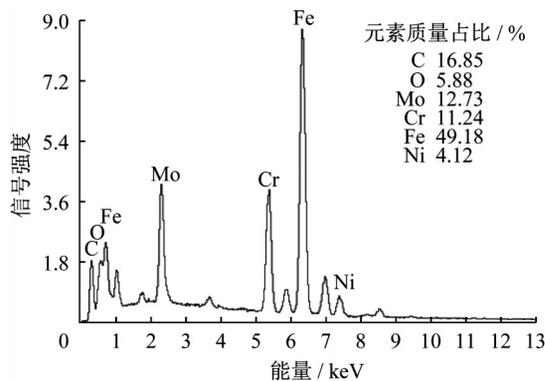


图 8 2 000 次磨损后不锈钢表面图像中 A 点能谱分析  
Fig. 8 EDS analysis of zone A in the image of stainless-steel after 2000 wear times

性较差材料表面上的接触峰点由于受到剪切作用被剥离并黏着在对偶表面上,这也将改变对偶表面上的化学成分<sup>[22]</sup>。因此,利用能谱分析可以验证轻载下复合材料与不锈钢板在干摩擦过程中发生了黏着磨损。

图 9 是对轻载下不锈钢板经不同滑动接触次数后磨损表面的能谱分析,其中检测到的主要元素含量占比如表 3 所示。可以清楚地看出,与不锈钢板原始化学成分(表 1)相比,表面 C 含量明显增加,这证实了摩擦副表面之间已发生黏着磨损。而且随着滑动接触次数的增加,检测到表面磨损区域中 C 含量也逐渐增大。经 3 000 次试验后,不锈钢磨损表面 C 含量最高达 6.49%。该结果表明,随着滑动次数增加,复合材料表面有更多的接触峰点剥落并黏附在对偶面上,产生严重的黏着磨损。此外,磨损表面还含有大量的 Fe 和 O 元素,这说明不锈钢表面存在氧化层<sup>[23]</sup>。是因为在长时间摩擦过程中,滑动副表面温度会逐渐升高,致使 Fe 元素与大气中的 O 元素结合生成氧化膜覆盖在不锈钢表面。

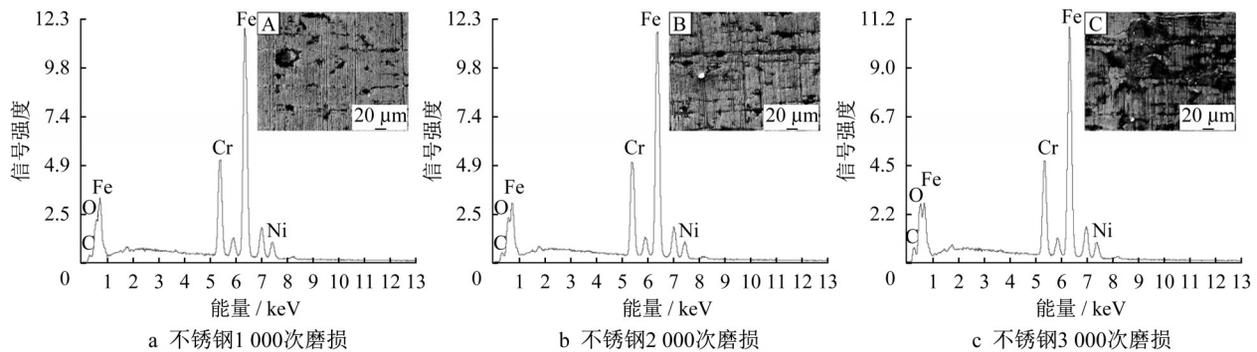


图 9 轻载下不锈钢磨损表面能谱分析(10 MPa)

Fig. 9 EDS analysis of the whole micro-area for stainless-steel at light load (10 MPa)

表 3 轻载时不同滑动次数下不锈钢磨损区域的化学成分  
Tab. 3 Microcomponent analysis of stainless-steel with different micro-areas at light load (10 MPa)

区域	元素质量占比 / %				
	C	O	Cr	Fe	Ni
A	2.51	4.95	17.27	67.79	7.48
B	4.12	5.44	16.88	66.43	7.13
C	6.49	7.70	16.08	63.21	6.53

### 2.3 重载时滑动副的磨损机理分析

图 10 为在重载下(30 MPa 法向载荷),经 1 000、2 000 和 3 000 次干摩擦试验后,通过扫描电镜观察的滑动副磨损表面微观形貌。其中图 10a、10b 和 10c 是复合材料的磨损表面形貌,很明显地观察到其

表面有严重磨损现象;图 10d、10e 和 10f 是不锈钢板的磨损表面形貌。

与轻载下呈现磨损现象不同,重载经 1 000 次干摩擦试验后,复合材料的磨损表面出现些许小磨粒和细小裂纹(图 10a)。这是因为在重载作用下,从复合材料板上剥落的大磨屑在往复运动过程中又被碾压成更小的磨粒黏附在摩擦副表面。同时,在对偶面不锈钢上也看到了黏附在表面的磨损碎片,且由于往复运动过程中的剪切作用,附着在不锈钢表面上的碎屑出现了沿着滑动方向被“拉起”的现象(图 10d)。此时滑动副主要表现的磨损机理是黏着磨损。经 2 000 次滑动接触后,复合材料板和不锈钢板的磨损表面微观形貌如图 10b 和 10e 所示。可以清

晰地看出复合材料表面发生严重塑性变形,而且表面出现很多更宽更深的磨损裂纹,这意味着表面细小裂纹已开始扩散,磨损加剧。随着磨损次数的增加,不锈钢板表面的转移膜变厚,在往复滑动过程中摩擦副之间的自由磨屑对转移膜进行切割使得不锈钢表面出现少量浅沟槽痕迹(图10e)。

试验增加至3000次时,通过扫描电镜观察到的复合材料和不锈钢磨损表面微观形貌如图10c、图10f所示。随着滑动次数的增加,复合材料的磨损表面变得越来越严重,可以观察到表面出现大量较深的垂直于滑动方向的裂缝。这是由于长时间反复接触,滑动副表面温度连续升高,复合材料表层区域成为主要能量聚集、耗散处,使表层材料发生软化的同时强度也有所降低,进而表面磨损加剧。因此,裂纹

的萌生和扩展在复合材料表面上连续不断地发生。同时,通过观察不锈钢的磨损表面形貌,发现磨粒切割转移膜引起的犁沟数量变多且深度增加。此外,相比于轻载下的磨损表面,不锈钢表面呈现出连续而均匀的转移膜,而不是黏附在表面上的大块磨屑。这是由于重载下反复摩擦过程中,滑动副之间的切向作用力大于磨屑在不锈钢表面上的附着力,从而使磨屑再次从不锈钢板表面上剥落。也正是因为不锈钢表面上的这层较厚、连续且均匀的转移膜,使摩擦副不同材料的滑动接触转变为复合材料与其同质表层之间的接触,使其具有较低的摩擦因数。这同时也验证了30 MPa法向载荷下的摩擦因数最终稳定值低于10 MPa法向载荷下的摩擦因数稳定值(图6)。

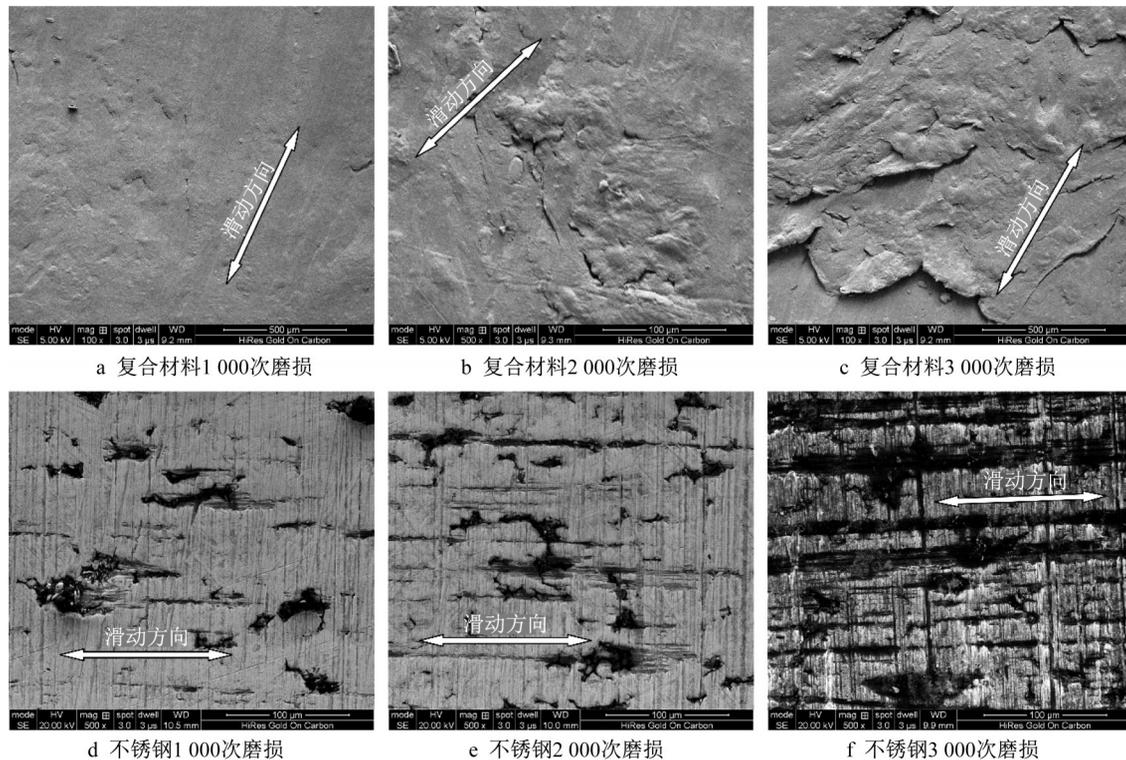


图10 重载下滑动副磨损表面的扫描电镜图像(30 MPa)

Fig. 10 SEM images of worn surfaces at heavy load (30 MPa)

通过观察并分析滑动副磨损表面微观形貌,可以发现在无润滑的30 MPa法向载荷下的摩擦磨损试验中,滑动副主要表现出的磨损机理是疲劳磨损和黏着磨损。

不锈钢表面的能谱分析如图11所示,其中图11a、图11b、图11c分别是对图10d、图10e、图10f磨损表面整个区域进行的能谱分析。表4列出了不同测试区域的主要元素含量。同样地,发现不锈钢板表面元素C的含量远远大于其原始含量,这证实了

不锈钢板表面存在转移膜现象,以及摩擦副之间发生了黏着磨损。此外,随着滑动次数的增加,元素C含量也会升高。从表3、表4的对比可以看出,在相同滑动次数下,承受30 MPa法向载荷的不锈钢板磨损表面元素C含量会相对低一些,这是由于重载下磨损表面黏附的从复合材料表面剥离的块状碎屑较少。在相同滑动次数下,30 MPa法向载荷的不锈钢板磨损表面上元素O和Fe含量占比会高于10 MPa法向载荷的不锈钢板磨损表面上元素O和Fe含量

占比。这是由于重载会产生更高的表面温升,在大气条件下,较高的温度导致氧气更容易与不锈钢磨

损表面中的元素结合形成氧化层。

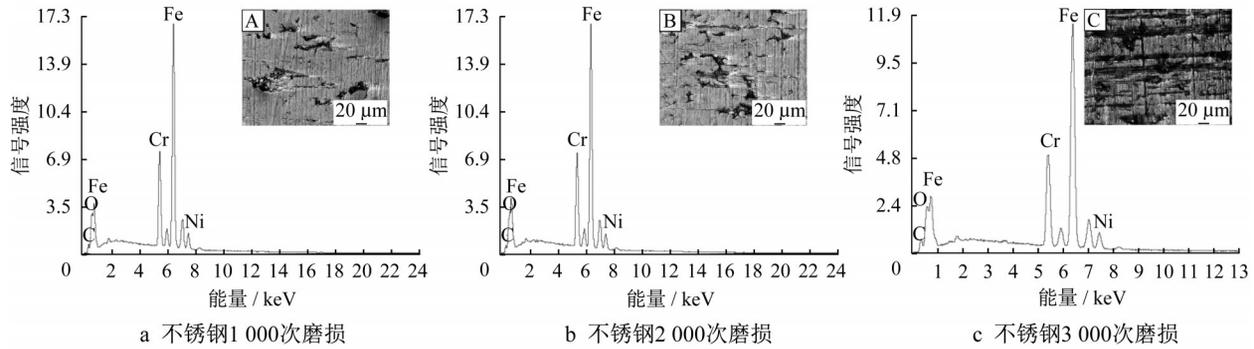


图 11 重载下不锈钢磨损表面能谱分析(30 MPa)

Fig. 11 EDS analysis of the whole micro-area of stainless-steel at heavy load (30 MPa)

表 4 重载时不同滑动次数下不锈钢磨损区域的化学成分  
Tab. 4 Microcomponent analysis of stainless-steel with different micro-areas at heavy load (30 MPa)

区域	元素质量占比/%				
	C	O	Cr	Fe	Ni
A	2.96	5.36	16.75	68.18	6.81
B	3.40	5.46	16.60	67.41	7.13
C	5.84	6.12	16.37	64.79	6.87

### 3 结论

(1)重载顶推装备滑动副在承受相同法向载荷下,随着滑动接触次数的增加,摩擦因数呈先增大再减小最后趋于稳定的变化趋势。且重载下摩擦因数的起始值高于轻载下摩擦因数的起始值,但最终稳定值比轻载下最终稳定值低。

(2)轻载时顶推装备滑动副在干摩擦条件下,随着滑动接触次数的增加,有大量碎屑不断从复合材料表面剥离并黏附在对摩面上,同时对摩面上形成转移膜,磨损机制主要表现为磨粒磨损和黏着磨损。

(3)重载时顶推装备滑动副在干摩擦条件下,随着滑动接触次数的增加,复合材料表面出现大量较深的垂直于滑动方向的裂缝,同时对摩面上出现连续且均匀的转移膜,由不同材料之间的滑动摩擦磨损逐渐转变成同种材料的对摩,磨损机制主要表现为疲劳磨损和黏着磨损。

#### 作者贡献声明:

梁敖:负责实验方案制定及实施,论文撰写及修改。  
卞永明:负责指导整体研究方案及文章审阅。

邵杰:负责实验数据记录与处理,论文修改。  
杨继翔:负责论文修改。  
刘广军:负责指导实验方案及论文撰写。

#### 参考文献:

- [1] HU Z, WU D, SUN L Z. Integrated investigation of an incremental launching method for the construction of long-span bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 130.
- [2] GRANATA M F, MARGIOTTA P, ARICI M. A parametric study of curved incrementally launched bridges [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 373.
- [3] CHACON R, URIBE N, OLLER S. Numerical validation of the incremental launching method of a steel bridge through a small-scale experimental study [J]. Experimental Techniques, 2016, 40(1): 333.
- [4] WU X, WU T, CHEN W. Analysis of height difference between three trusses of a steel truss bridge during incremental launching [J]. Stahlbau, 2018, 87(9): 910.
- [5] GRANATA M F. Adjustable prestressing for construction stages of incrementally launched bridges [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015, 19(3): 327.
- [6] WANG J F, LIN J P, XU R Q. Incremental launching construction control of long multispan composite bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(11): 4015006 -1.
- [7] SHAO C. Innovative structure design and construction—Jiubao Bridge, China [J]. Structural Engineering International, 2015, 25(1): 102.
- [8] BIAN Y, JIANG J, JING Z, et al. Design and application of hydraulic-walking incremental launching equipment [J]. Open Construction & Building Technology Journal, 2013, 7(1): 1.
- [9] MOKHA A, CONSTANTINOU M, REINHORN A. Teflon bearings in base isolation I: testing [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(2): 438.

- [10] CONSTANTINO M, MOKHA A, REINHORN A. Teflon bearings in base isolation II: modeling[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(2): 455.
- [11] LV Y, WANG W, XIE G, *et al.* Self-Lubricating PTFE-Based composites with black phosphorus nanosheets [J]. *Tribology Letters*, 2018, 66(2): 61.
- [12] IMNS A, DGE A, HC B, *et al.* Towards a plastic engine: Low-temperature tribology of polymers in reciprocating sliding [J]. *Wear*, 2019, 430/431: 25.
- [13] DORAFSHAN S, JOHNSON K R, MAGUIRE M, *et al.* Friction coefficients for slide-in bridge construction using PTFE and steel sliding bearings [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6): 04019045-1.
- [14] ALA N, EDWARD H, ATOROD A. Experimental evaluation of high-performance sliding surfaces for bridge bearings [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(2): 04015034-1.
- [15] TAN B, STEPHENS L S. Evaluation of viscoelastic characteristics of PTFE-based materials [J]. *Tribology International*, 2019, 140: 105870.
- [16] GONG K, WU X, ZHAO G, *et al.* Nanosized MoS<sub>2</sub> deposited on graphene as lubricant additive in polyalkylene glycol for steel/steel contact at elevated temperature [J]. *Tribology International*, 2017, 110: 1.
- [17] KAWAKAME M, BRESSAN J D. Study of wear in self-lubricating composites for application in seals of electric motors [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 179(1/3): 74.
- [18] 卞永明, 刘广军. 桥梁结构现代施工技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2017.
- BIAN Yongming, LIU Guangjun. Modern construction technology of bridge structures [M]. Shanghai: Shanghai Science and technology Publishing house, 2017.
- [19] TIAN H, WANG C, GUO M, *et al.* Study of the frictional-wear performance and abrasion resistance mechanism of a high-speed arc-sprayed FeNiCrAl coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 370: 320.
- [20] BAHADUR S. The development of transfer layers and their role in Polymer tribology [J]. *Wear*, 2000, 245(1/2): 92.
- [21] ZHANG L, QI H, LI G, *et al.* Impact of reinforcing fillers' properties on transfer film structure and tribological performance of POM-based materials [J]. *Tribology International*, 2017, 109: 58.
- [22] BHUSHAN B. Tribology and mechanics of magnetic storage devices [J]. *Journal of Tribology*, 1996, 58: 278.
- [23] CHEN S, WANG H, MA G, *et al.* Fractal properties of worn surface of Fe-based alloy coatings during rolling contact process [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 364: 96.