

DOI: 10.3901/JME.2021.11.228

悬索桥主缆平行钢丝动态接触与滑移机理研究*

王大刚¹ 朱辉龙¹ 高文丽¹ 张德坤¹ 谭佃龙² 赵 霞²

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116;

2. 法尔胜泓昇集团有限公司 江阴 214433)

摘要: 为揭示悬索桥主缆钢丝动态接触与滑移机理, 运用自制钢丝动态接触与滑移试验台开展单摩擦周期中平行钢丝间动态接触与滑移试验, 通过高速度数码显微系统原位观测、扫描电子显微镜、能谱仪和有限元仿真揭示了平行钢丝间动态接触和滑移特性(横向滑移、纵向变形、接触状态、摩擦力、摩擦因数、应力分布)及磨损机理(磨痕形貌和元素分布)及其受到横向和纵向接触位置、循环周次、滑移幅值和接触载荷的影响规律。结果表明: 在单摩擦周期中, 钢丝间动态接触状态均为黏着-完全滑移-黏着-完全滑移, 钢丝横向滑移和摩擦力均呈增加-稳定-减小-稳定-增加的变化趋势, 上、下钢丝纵向变形总体呈相反变化趋势。固定的下钢丝沿上钢丝运行方向的横向位置及与接触面距离增大方向的纵向位置的横向滑移和纵向变形均降低。循环周次增加导致下钢丝的横向滑移和纵向变形均增加, 摩擦因数呈增加-减小-增加-稳定变化趋势, 磨损机理包括黏着磨损、磨粒磨损、挤压磨损、疲劳磨损。滑移幅值和接触载荷的增加均导致冲程第2阶段下钢丝横向变形均值增大, 分别导致上、下钢丝纵向变形波动幅值增大、纵向变形差异性变化, 摩擦因数分别增大和降低, 磨损机理包括黏着磨损、挤压磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

关键词: 悬索桥主缆; 平行钢丝; 动态接触与滑移; 原位观测

中图分类号: TH117

Research on Dynamic Contact and Slip Mechanisms of Parallel Steel Wires in the Main Cable of Suspension Bridge

WANG Dagang¹ ZHU Huilong¹ GAO Wenli¹ ZHANG Dekun¹TAN Dianlong² ZHAO Xia²

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116;

2. Fasten Group Co., Ltd, Jiangyin 214433)

Abstract: In order to reveal dynamic contact and slip mechanisms of steel wires in the main cable of suspension bridge, a self-made dynamic contact and slip test rig of steel wires is employed to carry out dynamic contact and slip tests between parallel steel wires in a single friction cycle. The in-situ observation by high-speed digital microscope system, scanning electron microscope, energy spectrometer and finite element simulation were employed to reveal effects of transverse and longitudinal contact locations, number of cycles, slip amplitude and contact load on dynamic contact and slip characteristics between parallel steel wires (transverse slip, longitudinal deformation, contact state, friction force, coefficient of friction, and stress distribution) and wear mechanisms (wear scar morphology and element distribution). The results show that in a single cycle, dynamic contact states between steel wires are adhesion, gross slip, adhesion and gross slip, respectively. The transverse slip and friction force of steel wire both exhibit change trends of an increase, the stabilization, a decrease and the the stabilization. Longitudinal deformations of upper and lower steel wires present the overall reverse change trends. Increases of fatigue cycles cause both increases in the transverse slip and longitudinal deformation of lower steel wire. The coefficient of friction shows the change trends of an increase at first, then a decrease, afterwards an increase and the final stabilization with increasing fatigue cycles. Increases of displacement amplitude and contact load cause increases in the average value of transverse deformation at stage 2 of the stroke, and the fluctuation amplitudes of longitudinal deformations of upper

* 国家自然科学基金面上(51875565)、中国博士后科学基金(2020T130695, 2019M652001)、江苏高校优势学科建设工程和江苏省高校品牌专业建设工程资助项目。20201021 收到初稿, 20210226 收到修改稿

and lower steel wires. The coefficient of friction presents an increase and a decrease with increasing displacement amplitude and contact load, respectively. Wear mechanisms consist of adhesive wear, abrasive wear, extrusion wear and fatigue wear in all cases.

Key words: main cable of suspension bridge; parallel steel wire; dynamic contact and slip; in-situ observation

0 前言

主缆(由平行高强度镀锌钢丝和平行索股组成)是跨越江海的多塔连跨悬索桥关键承载构件^[1-2],一旦失效将严重危及悬索桥结构安全性,甚至造成重大经济损失和危害人民生命财产安全。风荷载、恒载(桥面系、加劲梁、主缆、吊索等载荷)和活载(汽车、铁路列车等载荷)的耦合作用^[3-4]引起悬索桥主鞍座两侧主缆的时变动载荷^[5],导致弯曲绕于主索鞍鞍槽内主缆索股间和钢丝间的动态接触和“分层滑移”现象^[6],进而引起主缆内部钢丝的摩擦磨损和疲劳断丝,降低主缆有效截面积和承载能力,进而影响主缆承载安全性。因此,研究主缆钢丝动态接触和滑移行为对保障悬索桥主缆承载安全性具有重要意义。

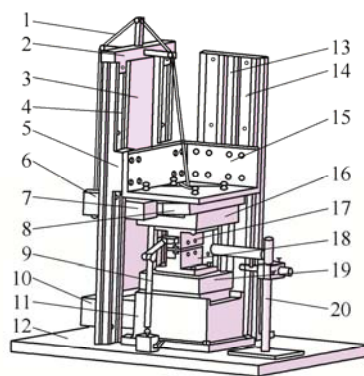
MONTOYA 等^[7]、张清华等^[8]和 CHENG 等^[9]研究了大气环境中主缆钢丝间、主缆-主鞍座的摩擦特性;齐东春等^[10]、严琨等^[11-12]和季申增^[13]计算了主缆-主鞍座侧向力和主缆二次应力;肖伟等^[14]和张卓杰^[6]研究了主缆与主鞍座的脱开、接触和滑移行为以及主缆-主鞍座接触过程中主缆内部丝股分离和滑移特性;季申增^[13]和 CHUNG 等^[15]考察了主缆与主索鞍之间静滑移特性和判别依据及其受到摩擦因数、隔板和索股排列方式的影响规律。然而,主缆内部钢丝之间的动态接触和滑移行为研究几乎未见报道。本文运用自制钢丝动态接触与滑移试验台开展了单个摩擦循环周次以及不同的接触位置、摩擦循环周次、滑移幅值和接触载荷时钢丝间动态接触与滑移试验,揭示了钢丝间动态接触和滑移特性(横向滑移、纵向变形、接触状态、摩擦因数、磨损机理等)。

1 试验设备和试验方法

1.1 钢丝动态接触与滑移试验台

钢丝动态接触与滑移试验台(图 1)包括支撑系统、加载系统、滑移系统、高速摄像系统、数据采集系统和控制系统。上钢丝、下钢丝分别固定于上夹具 17 和下夹具 18 上,上夹具 17 随上滑台 8 往复移动,能实现钢丝之间的相对滑移;通过调整砝码 6 悬挂数量,对上、下钢丝之间施加恒定接触载

荷 F_n ;通过高速数码显微系统 20 和动态追踪软件原位观察试验过程中上、下钢丝接触界面的横向和纵向变形规律;分别通过压力传感器 16、切向力传感器 19 和激光位移传感器 9 测量上、下钢丝之间的接触载荷、切向力和钢丝相对滑移,进而获得钢丝间摩擦因数。



(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 1 钢丝动态接触与滑移试验台

1. 绳 2. 绳轮架 3. 后支撑板 4. 后导轨 5. 后滑块
6. 砝码 7. 上电动机 8. 上滑台 9. 位移传感器
10. 下电动机 11. 下滑台 12. 底板 13. 右支撑板
14. 右导轨 15. 连接块 16. 压力传感器 17. 上夹具
18. 下夹具 19. 切向力传感器;
20. 高速度数码显微系统

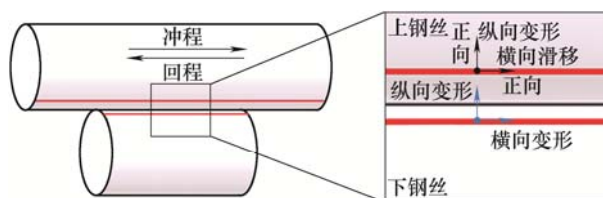
1.2 试验参数和方法

选用悬索桥主缆用镀锌钢丝开展钢丝动态接触与滑移试验,钢丝直径 5.5 mm,钢丝抗拉强度和屈服强度分别为 2 050 MPa 和 1 350 MPa,镀锌层厚度为 85 μm ,钢丝基体和镀锌层的弹性模量分别为 $E_1=2.1 \times 10^5$ MPa 和 $E_2=8.2 \times 10^4$ MPa,泊松比分别为 $\nu_1=0.31$ 和 $\nu_2=0.28$ 。试验前,通过砂纸打磨和酒精擦拭钢丝试样;钢丝动态接触与滑移试验参数见表 1^[16-18],其中频率为 0.3 Hz。图 2 为钢丝间动态

接触与滑移原位观察示意图。

表 1 钢丝动态接触与滑移试验参数

接触载荷 F_n/N	滑移幅值 $D/\mu\text{m}$	循环周次 N
80	1 000	1, 100, 300, 500
80	60, 400, 700, 1 000	1
60, 80, 100, 120	1 000	1



(a) 动态接触与滑移示意图



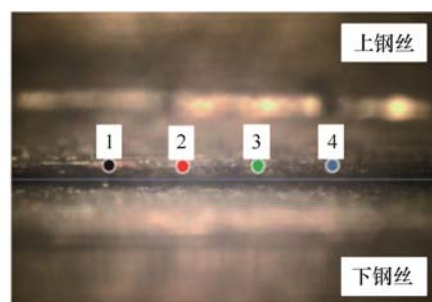
(b) 原位观察参考点

图 2 上、下钢丝间动态接触与滑移原位观察示意图

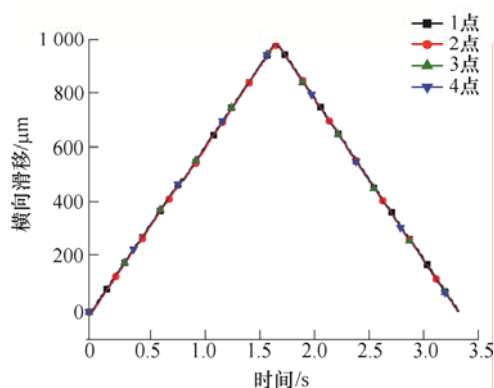
由图 2 可知, 上钢丝先后向右、向左运动为一个运行周期; 选取图 2a 矩形区域为高速度数码显微系统原位观察区域, 在上、下钢丝两条红线位置分别取一参考点(两参考点位于同一横向位置)用于追踪其位移轨迹; 图 2b 为上、下钢丝原位观察参考点。上、下钢丝位移轨迹可分解为横向变形(向右为正, 向左为负)和纵向变形(向上为正, 向下为负), 横向变形和纵向变形的曲线斜率对应钢丝变形速率; 因下钢丝固定, 故其横向变形即为横向滑移。因此, 通过上、下钢丝横向滑移和纵向变形曲线解析钢丝间动态接触和滑移行为, 通过扫描电子显微镜和能谱仪分析试验后钢丝磨损机理和钢丝表面元素分布。

2 试验结果与分析

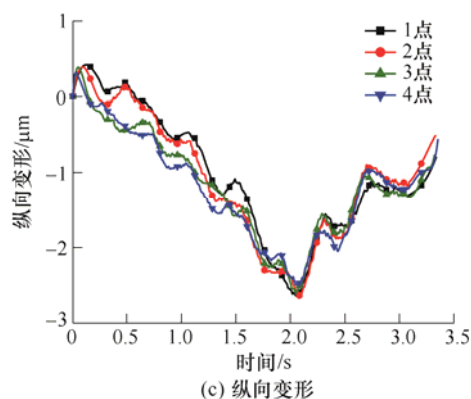
选择图 3a 所示上钢丝接触界面附近 4 个追踪点, 获得图 3b 和 3c 所示的各追踪点横向滑移和纵向变形曲线。由图发现, 上钢丝不同点的横向滑移和纵向变形均基本重合, 故选追踪点 1 表示上钢丝各点滑移信息。



(a) 追踪点



(b) 横向滑移



(c) 纵向变形

图 3 上钢丝不同位置横向滑移和纵向变形特性

2.1 单摩擦周期钢丝动态接触与滑移特性

2.1.1 钢丝横向动态滑移

图 4a 为上、下钢丝横向滑移曲线, 上钢丝横向滑移包括电机施加位移量和接触位置变形量; 因下钢丝固定, 故其横向滑移为摩擦力导致的横向滑移。由图 3 可知, 上钢丝不同位置横向滑移曲线基本一致, 故将上钢丝横向滑移曲线下移至下钢丝横向滑移曲线位置, 表示此时与下钢丝参考点正上方对应的上钢丝参考点横向滑移曲线。由图 4 可知, 上钢丝横向滑移曲线先增加后减小, 下钢丝横向滑移曲线呈增加-稳定-减小-稳定-增加的变化趋势。

由图 4b 可知, 一个运行周期分为六个阶段, 1~3 阶段为冲程, 4~6 阶段为回程。在第 1 阶段, 上钢丝横向正向运动(图 2), 下钢丝横向滑移量逐渐增

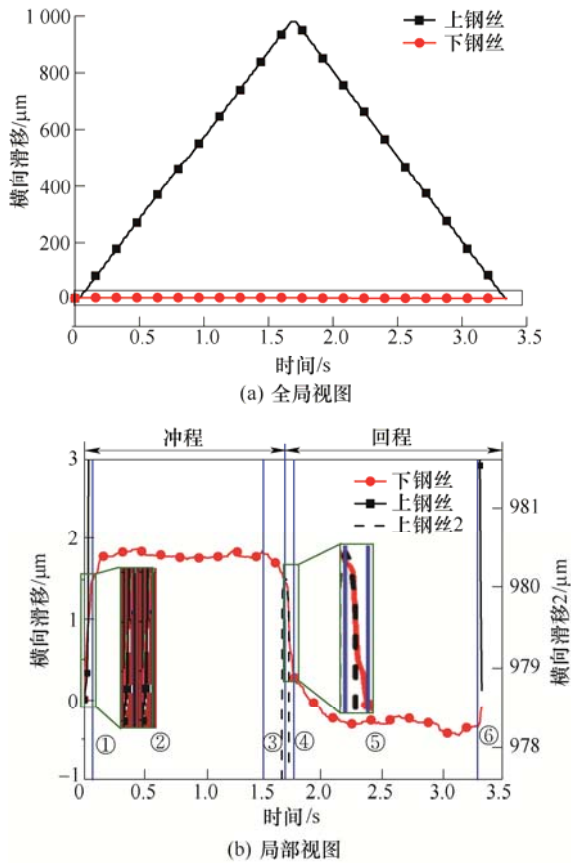


图4 上、下钢丝横向滑移曲线

大,且二者滑移曲线斜率基本一致,即变形速率相同,上、下钢丝相对滑移为零,即二者处于黏着状态。这是因为摩擦力导致下钢丝接触点随上钢丝正向变形,而初始阶段钢丝接触面的微凸体之间产生黏着力,黏着力大于上钢丝运动驱动力,导致上、下钢丝之间呈黏着摩擦^[19-20]。在第2阶段,上钢丝匀速正向运动,下钢丝横向滑移基本处于稳定状态;在此阶段,与下钢丝参考点接触的上钢丝位置发生变化,即原上、下钢丝参考点存在位移差,旧的黏着点分离,下钢丝参考点与上钢丝新的接触位置建立新的黏着点,故此阶段下钢丝的变形量保持不变;由图5可知,此阶段摩擦力基本保持不变,上钢丝运动驱动力大于钢丝间摩擦力,导致上、下钢丝之间产生相对滑动^[19],故此阶段上、下钢丝间为滑动摩擦。在第3阶段,上钢丝正向运动且速度逐渐减小,下钢丝横向滑移量降低;由图5可知,该阶段钢丝间摩擦力减小并反向,反向摩擦力作用导致下钢丝变形逐渐恢复、横向滑移量开始逐渐减小,故此阶段钢丝之间为滑动摩擦。回程阶段与冲程阶段的钢丝间横向滑移特性类似,在第4阶段,上钢丝反向运动,下钢丝反向变形、横向滑移量继续减小,二者滑移曲线斜率基本一致,即变形速率基本一致,故此时上、下钢丝相对滑移基本为零,即二者处于

黏着状态;由图5可知,该阶段摩擦力逐渐增加,下钢丝接触点在摩擦力作用下随上钢丝接触点反向运动,即1~3阶段的正向横向滑移逐渐恢复并反向变形,此阶段上、下钢丝呈黏着摩擦状态。在第5阶段,上钢丝匀速反向运动,下钢丝横向滑移(横向滑移)先增大、后保持稳定状态;由图5可知,在运行至中部位置时,摩擦力达到最大,该阶段上钢丝运动驱动力大于钢丝间摩擦力,上、下钢丝之间发生相对滑动,故该阶段为滑动摩擦状态。在第6阶段,上钢丝反向运动速度逐渐减小,下钢丝产生正向变形,由图5可知,正向摩擦力导致下钢丝横向滑移量逐渐增大,即下钢丝产生的反向变形逐渐恢复,故此阶段上、下钢丝为滑动摩擦状态。由图6可知,钢丝磨痕呈现明显的材料黏着和轻微的犁沟现象,同时存在微凸体剥落的磨屑在接触载荷作用下被压入钢丝表面而形成压痕^[21],这验证了钢丝横向动态滑移分析正确性。

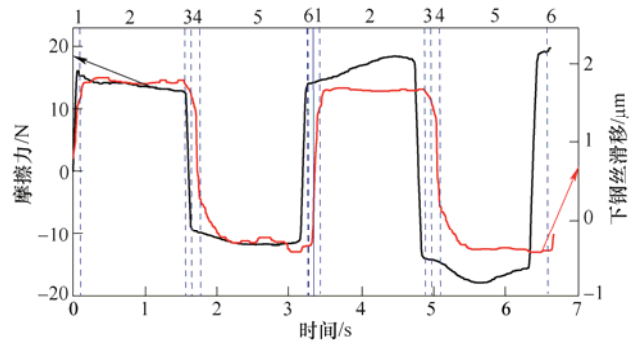


图5 摩擦力和下钢丝横向滑移曲线

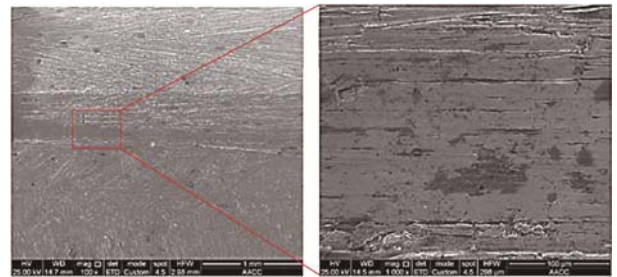


图6 钢丝磨痕扫描电子显微镜照片

2.1.2 钢丝纵向变形

由图7可知,在冲程中,在第1阶段,接触载荷导致上、下钢丝产生初始变形,在摩擦运行过程中,接触界面材料搓削导致上、下钢丝表面微凸体挤压向上变形,由第3.1.1节可知该阶段钢丝间呈黏着摩擦状态,故上、下钢丝参考点纵向变形增加,且变形量一致。在第2阶段,上、下钢丝材料挤压作用增强,钢丝接触界面微凸体发生断裂,导致上钢丝参考点下移,下钢丝因摩擦搓削和磨屑堆积等

继续上移(图 6), 故上、下钢丝纵向变形分别呈反向、正向运动。在第 3 阶段, 上、下钢丝接触界面微凸体持续摩擦磨损, 钢丝间实际接触面积增大、接触应力降低, 故上钢丝参考点继续下移、下钢丝纵向变形减小。在回程运行过程中, 在第 4 阶段, 上钢丝开始反向运动, 部分磨屑从接触位置逸出, 由第 3.3.1 节可知该阶段钢丝间呈黏着摩擦状态, 故上钢丝参考点继续下移、下钢丝纵向变形量减小。在第 5 阶段, 上、下钢丝间挤压作用变弱, 钢丝接触界面微凸峰变形逐渐恢复, 上钢丝纵向变形正向增加, 下钢丝纵向变形反向减小。在第 6 阶段, 上、下钢丝纵向变形均增加, 但上钢丝纵向变形相对较大。

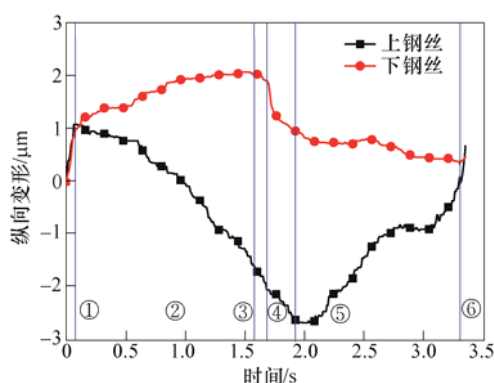
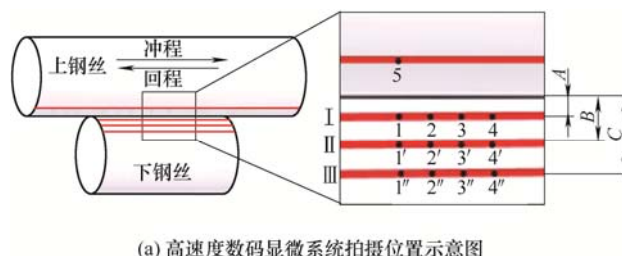


图 7 上、下钢丝纵向变形曲线

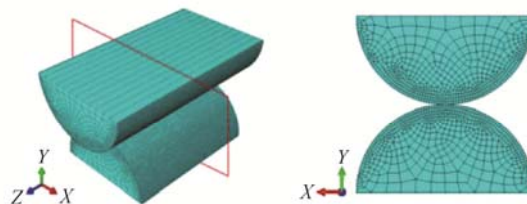
2.2 接触位置对钢丝间动态接触与滑移特性的影响规律

选取下钢丝试样接触区附近不同横向和纵向位置处的标记点进行追踪, 揭示不同位置处下钢丝试样的横向滑移和纵向变形规律。各标记点见图 8a, 纵向不同位置 I、II 和 III 到接触面的距离分别为 $A=70\ \mu\text{m}$ 、 $B=110\ \mu\text{m}$ 、 $C=150\ \mu\text{m}$; 横向不同位置(1-4、1'-4'、1''-4'')的间距均为 $300\ \mu\text{m}$ 。本节试验载荷为 $80\ \text{N}$, 滑动频率为 $0.3\ \text{Hz}$, 滑移幅值 $1000\ \mu\text{m}$, 循环周次 $N=1$ 次。为定量揭示不同接触位置上、下钢丝应力状态, 开展平行镀锌钢丝动态接触与滑移的有限元仿真。依据第 2 节试验参数, 运用有限元软件 MSC.MARC 构建平行镀锌钢丝动态接触与滑移有限元模型(图 8b), 由第 3.3 节可知循环次数 $N=1$ 次时钢丝镀锌层尚未磨穿, 主要为镀锌层之间的接触和滑移特性, 依据图 5 可得钢丝间平均摩擦因数为 0.17 , 钢丝间接触采用库伦摩擦接触属性; 钢丝基体与镀锌层之间采用粘结接触方式; 上、下钢丝底面为刚性平面, 约束下钢丝刚性底面上节点的六个自由度, 对下钢丝约束 Z 向外所有自由度, 通过上钢丝施加钢丝间接触载荷 $80\ \text{N}$, 保持钢丝间接触

载荷不变, 对上钢丝横向施加 $0\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ 位移值(图 4a)。采用 C3D8R(三维八节点减缩积分实体单元)单元对有限元模型网格划分, 接触区进行局部网格细化; 上钢丝基体和镀锌层、下钢丝基体和镀锌层的单元数分别为 37 118、6 700、28 100 和 5 000。



(a) 高速度数码显微系统拍摄位置示意图

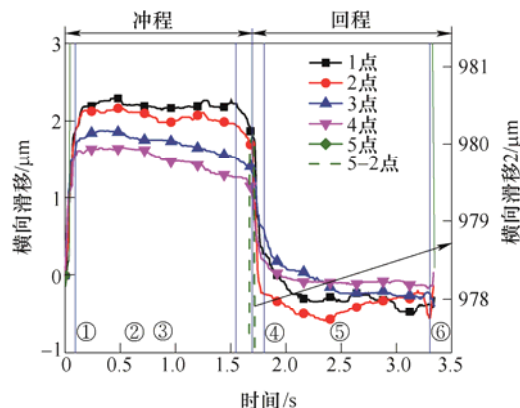


(b) 有限元模型及其中间截面图

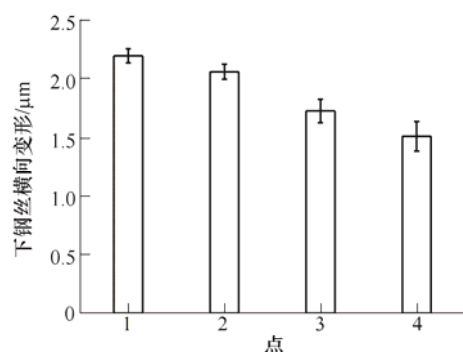
图 8 钢丝间动态接触和滑移原位观察位置和有限元模型

(1) 横向不同位置钢丝动态接触与滑移特性。

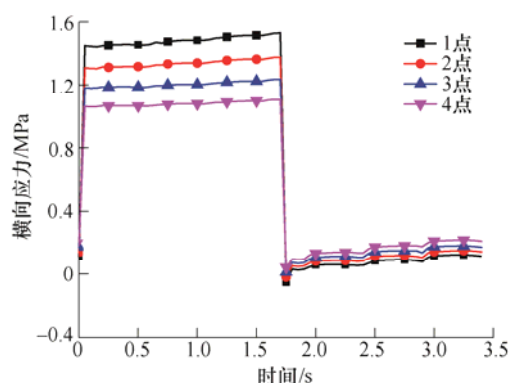
由图 9a 可知, 下钢丝各点位置横向滑移变化曲线均呈迅速增加-基本稳定-缓慢降低-迅速降低-基本稳定-缓慢增加的变化趋势, 上、下钢丝之间呈黏着-完全滑移-黏着-完全滑移的接触状态。由图 9b 发现, 下钢丝 1 点到 4 点位置(沿上钢丝运行方向)的横向滑移逐渐降低, 这可能是由于沿上钢丝运行方向下钢丝各节点横向切应力逐渐减小引起的(图 9c)。由图 10a 可知, 下钢丝各点位置纵向变形曲线均呈快速增加-缓慢增加-缓慢减小-快速减小-保持稳定-快速增加的变化趋势, 由图 10b 可知, 下钢丝 1 点到 4 点位置的纵向变形均值逐渐减小, 这可能是由于沿上钢丝运行方向下钢丝各节点纵向应力逐渐减小造成的(图 10c)。



(a) 上、下钢丝横向滑移曲线

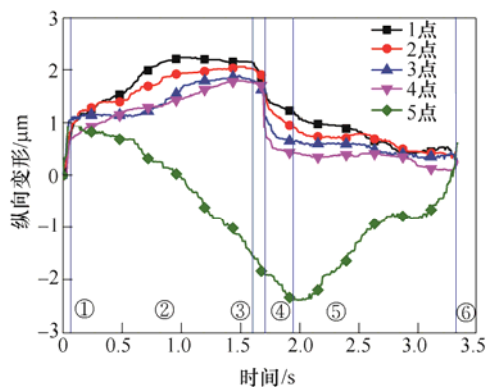


(b) 第2阶段下钢丝横向变形均值

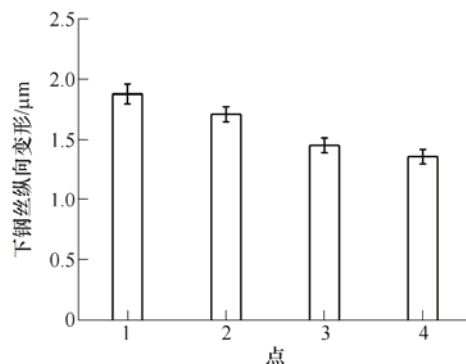


(c) 下钢丝不同横向位置横向应力计算值

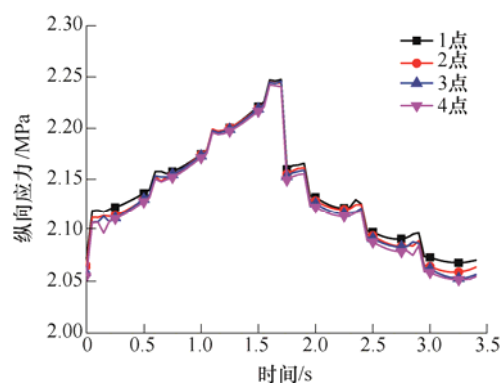
图9 上、下钢丝横向滑移和变形特性



(a) 上、下钢丝纵向变形曲线



(b) 第2阶段下钢丝纵向变形均值

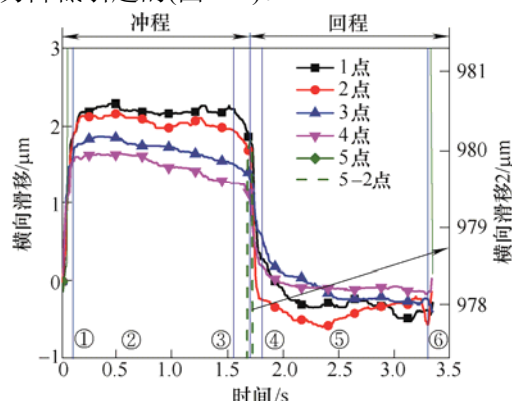


(c) 下钢丝不同横向位置纵向应力计算值

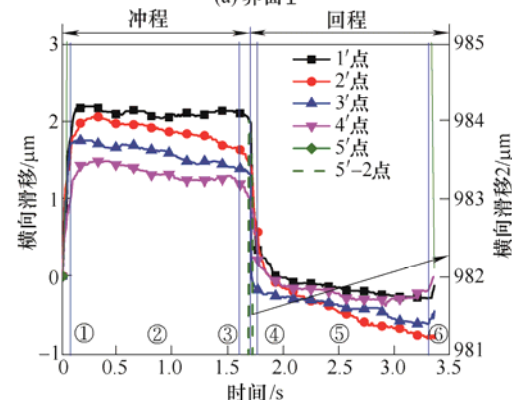
图10 上、下钢丝纵向变形特性

(2) 纵向不同位置钢丝的动态接触与滑移特性。

由图 11a~11c 可知, 下钢丝不同纵向位置横向滑移变化曲线均总体呈迅速增加-基本稳定-缓慢降低-迅速降低-基本稳定-缓慢增加的变化趋势, 上、下钢丝间接触状态为黏着-完全滑移-黏着-完全滑移; 由图 11d 可知, 随着与接触界面距离的增大, 下钢丝不同纵向位置的横向滑移减小, 这可能是由于随着与接触界面距离增加下钢丝横向切应力减小造成的(图 11e)。由图 12a~12c 可知, 下钢丝不同纵向位置处各点纵向变化曲线均呈快速增加-缓慢增加-缓慢减小-快速减小-保持稳定-快速增加的变化趋势; 由图 12d 可知, 随着与接触界面距离的增加, 下钢丝纵向变形减小, 这可能是由于下钢丝纵向应力降低引起的(图 12e)。



(a) 界面I



(b) 界面II

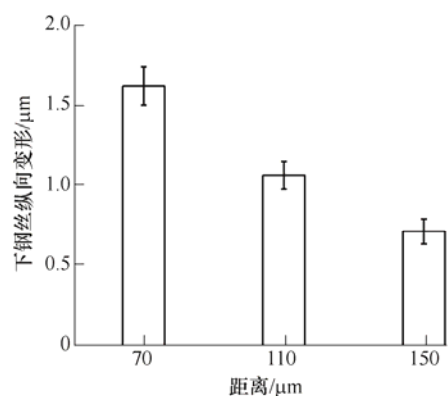
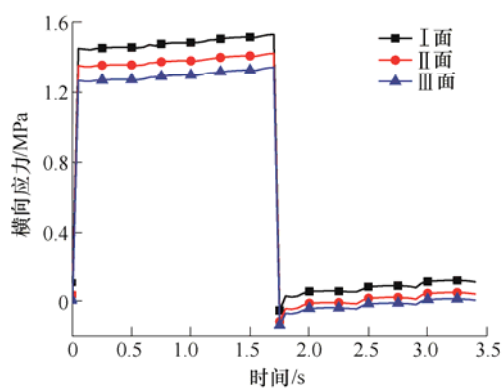
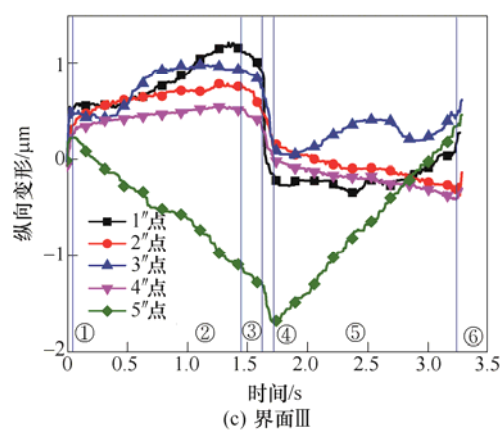
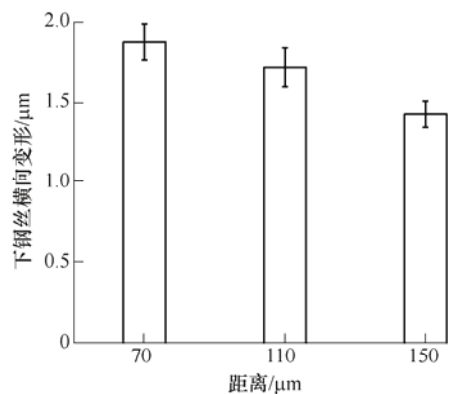
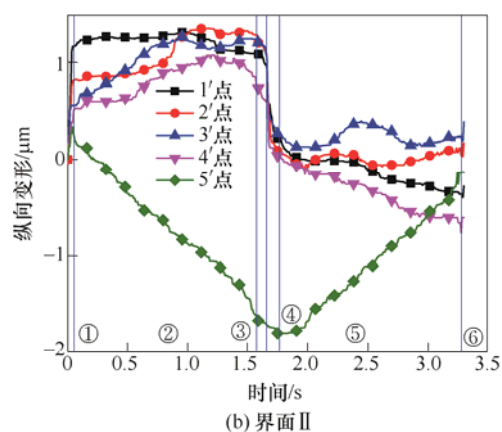
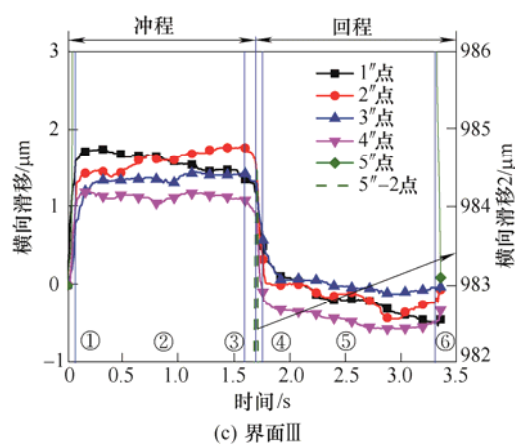


图11 下钢丝不同纵向位置横向滑移特性

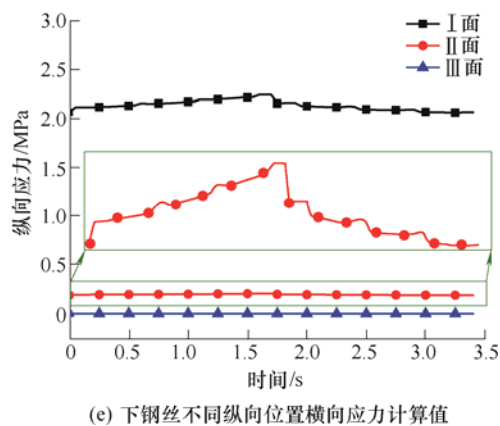
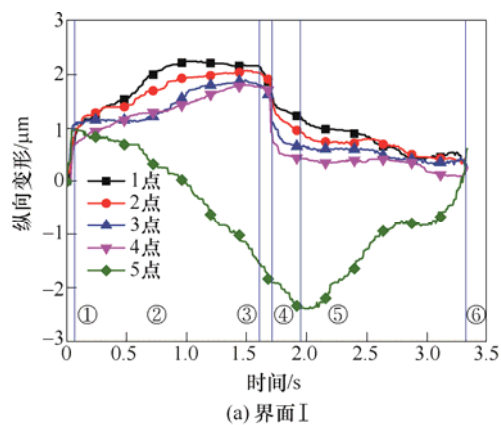


图12 上、下钢丝纵向变形特性

2.3 循环周次对钢丝间动态接触与滑移特性的影响规律

由图 13a~13c 可知, 不同循环周次时下钢丝横向滑移曲线均总体呈迅速增加-基本稳定-迅速降低-基本稳定的变化趋势, 上、下钢丝间接触状态均总体呈黏着-完全滑移-黏着-完全滑移状态。由图 14a 可知, 下钢丝磨痕呈现材料黏着、凹坑、大量微裂纹; 由图 14b 可知, 下钢丝磨痕呈现明显的材料黏着、挤压和剥层、轻微的犁沟、点蚀坑和凹坑、微裂纹; 由图 14c 可知, 下钢丝磨痕呈现大面积凹坑和点蚀坑、明显的材料黏着、大尺寸微裂纹和犁沟现象, 这验证了上、下钢丝间动态黏着和滑移状态。

由图 13a~13c 冲程第 2 阶段发现, 不同周次对应的下钢丝横向滑移呈现差异的波动状变化, 且横向滑移波动幅值总体呈增大趋势。这是由于不同循环周次对应下钢丝表面磨痕轮廓和实际接触面积有所差异, 且下钢丝表面磨痕轮廓和实际接触面积及表面损伤均随循环周次的增加而总体呈增大趋势(图 14a~14c)。

由图 13a~13c 第 1 阶段和第 4 阶段可知, 循环周次增加导致钢丝间黏着接触状态对应时间增加, 这可能是由于钢丝表面微凸峰和镀锌层被磨削掉而导致实际接触面积和摩擦力增加引起的(图 15a)。由图 15a 可知, 钢丝间摩擦因数开始迅速增加是因为摩擦作用导致钢丝表面保护膜和氧化膜破裂, 钢丝镀锌层材料直接接触, 钢丝表面接触凸峰被磨掉致使接触面积增加; 之后, 摩擦因数小幅降低是由于材料剥落形成的表面第三体参与承载和调节引起的^[22-24]; 然后, 摩擦因数随循环次数增加而呈持续增加状态, 这可能是由于镀锌层被磨掉、钢丝基体间发生摩擦引起的(图 15b 和图 15c 的钢丝磨痕表面 Fe 元素分布表明钢丝镀锌层已磨破、钢丝基体暴露); 最后, 接触界面磨屑的产生和溢出保持动态平衡^[25], 摩擦因数基本保持稳定。因此, 循环次数增加导致钢丝间摩擦力先增加后保持稳定。

由图 13d 冲程第 2 阶段可知, 下钢丝横向滑移均值随循环周次的增加而呈先增加后稳定的变化趋势。下钢丝横向滑移均值增加导致钢丝间摩擦损伤加剧, 这与图 14 的结论吻合; 当循环周次达到一定周次时, 钢丝接触界面磨屑的产生和溢出保持动态平衡, 钢丝间摩擦力趋于稳定(图 15a), 故下钢丝横向滑移均值保持稳定。

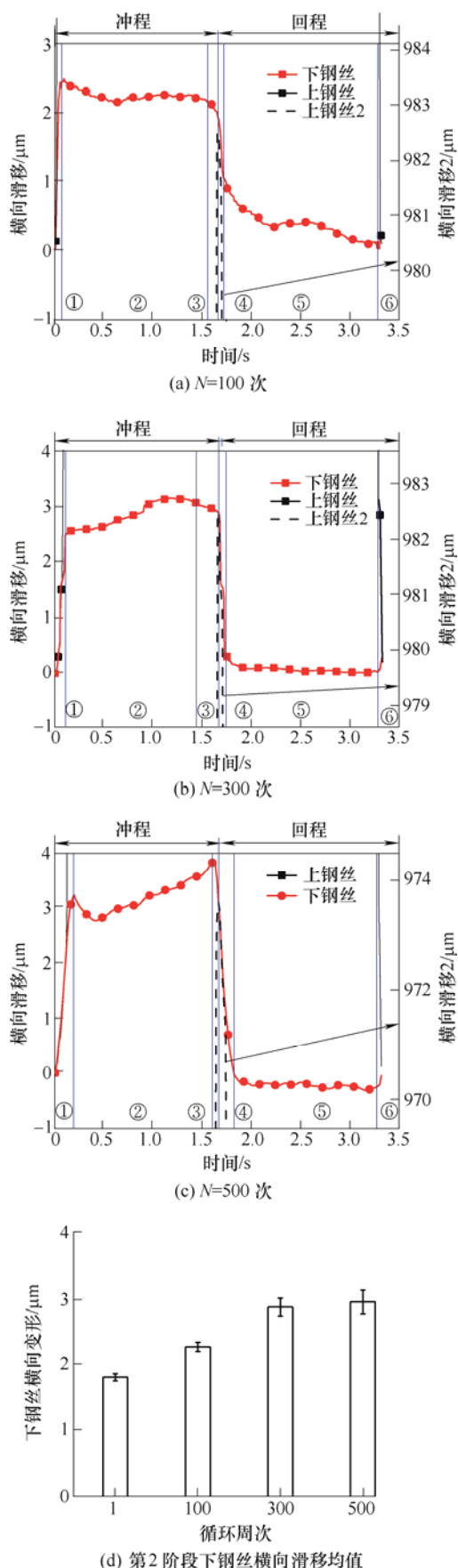


图 13 上、下钢丝横向滑移曲线

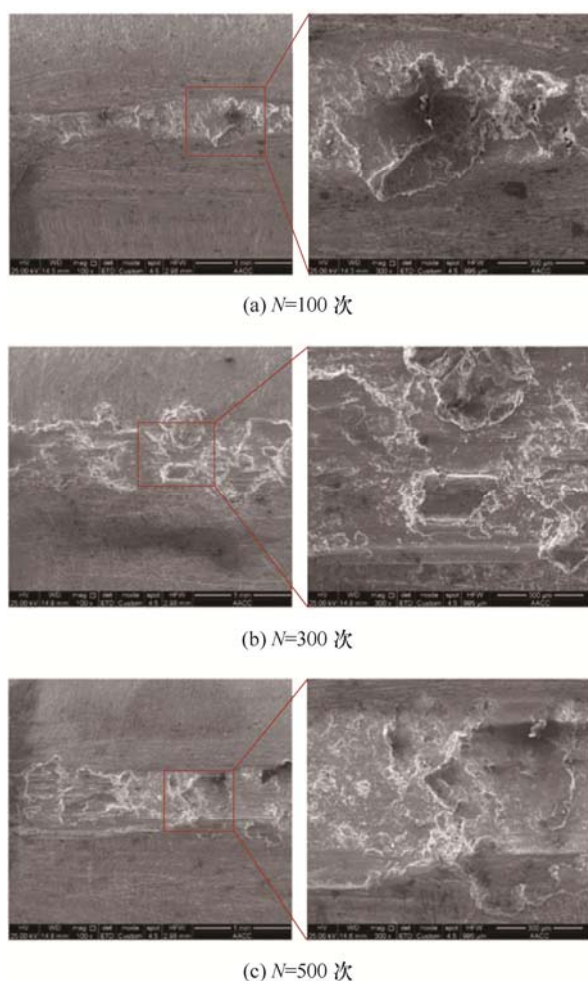
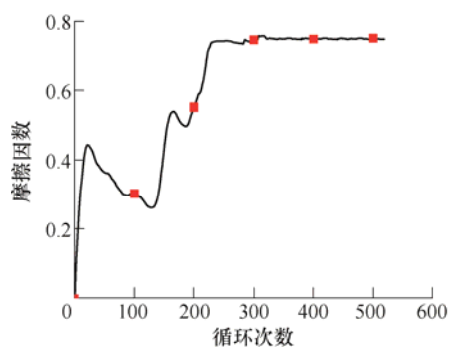


图 14 下钢丝磨痕形貌



(a) 摩擦因数演化曲线

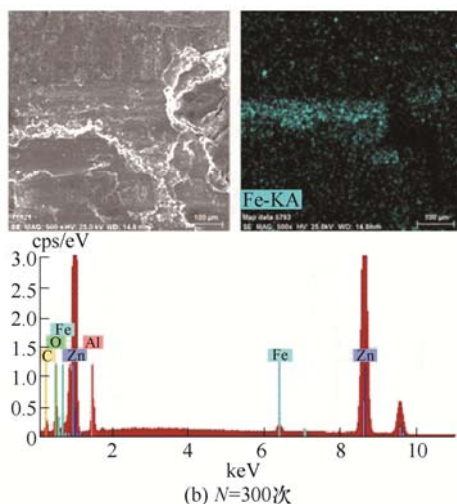
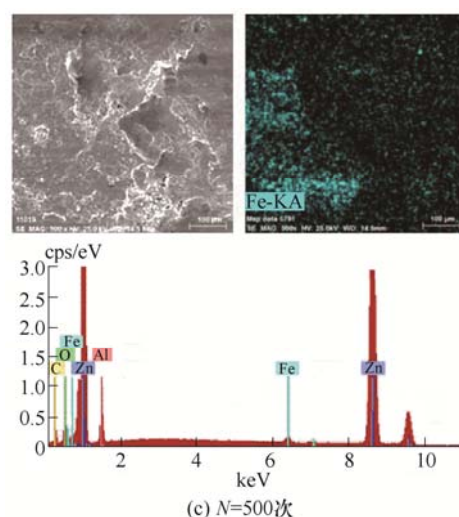
(b) $N=300$ 次

图 15 摩擦因数和钢丝磨痕 EDS 分析

由图 16 可知,不同循环次数时,上、下钢丝纵向变形分别呈快速增加-缓慢降低-快速降低-缓慢增加、快速增加-基本稳定-快速降低-基本稳定的变化趋势。在冲程第 2 阶段,循环次数增加导致下钢丝纵向变形均值增加,这表明下钢丝摩擦挤压现象加剧,这与图 14a~14c 的结论吻合。

2.4 滑移幅值对钢丝间动态接触与滑移特性的影响规律

由图 17a~17d 可知,不同滑移幅值对应下钢丝横向滑移曲线均总体呈增加-基本稳定-降低-基本稳定的变化趋势,上、下钢丝的接触状态为黏着-完全滑移-黏着-完全滑移。由图 18a、18b 可知,下钢丝磨痕表面均呈材料黏着、微裂纹、犁沟现象;由图 18c、18d 可知,磨痕呈现较深磨坑、材料挤压变形、犁沟、微裂纹和四处凹坑。因此,磨损机理均为黏着磨损、疲劳磨损和磨粒磨损,这与上、下钢丝之间的动态黏着和滑移状态是吻合的。

由图 17a~17d 的第 1 阶段和第 4 阶段可知,上、下钢丝横向滑移曲线均存在重合区域,表明钢丝接触面黏着现象;滑移幅值增加导致钢丝间黏着接触状态持续时间差异性变化。在滑移幅值为 $60\ \mu\text{m}$ 时,黏着接触状态持续时间较长,这可能是因为钢丝接触面呈微动磨损机理,钢丝微动接触面总体呈凸峰-凸峰之间的名义接触状态,且磨屑逸出困难造成的接触面三体摩擦磨损状态^[21],下钢丝表面黏着现象明显、摩擦损伤轻微(图 18a);也可能是冲程阶段钢丝接触面变形尚未及时恢复引起的。在滑移幅值为 $400\sim 1000\ \mu\text{m}$ 时,黏着接触状态持续时间较短,可能是因为滑移幅值大磨屑易于逸出、接触面变形能够及时恢复,

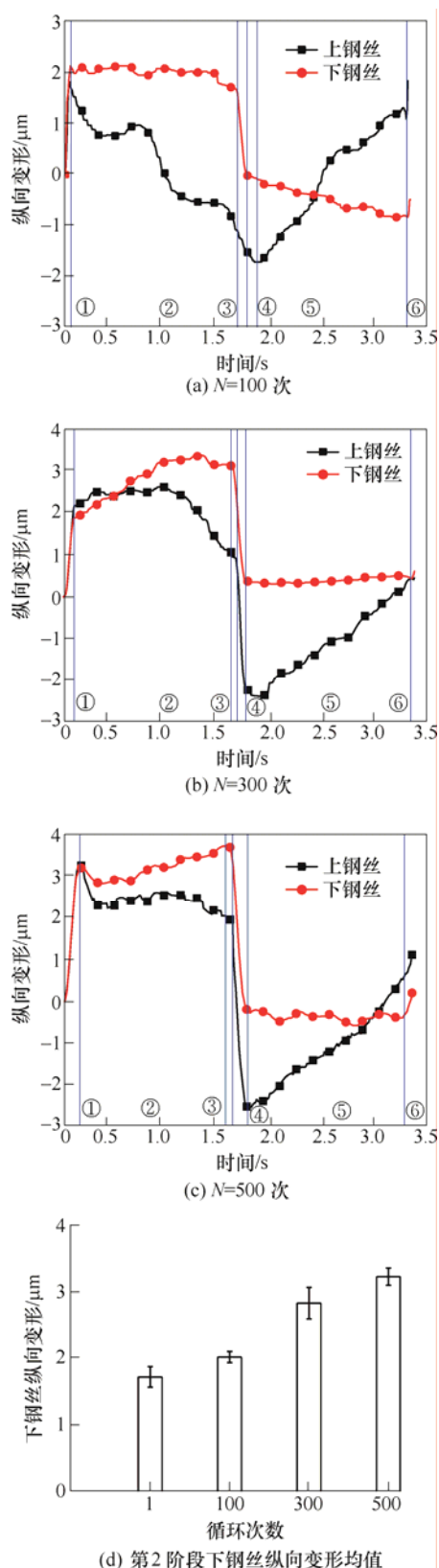
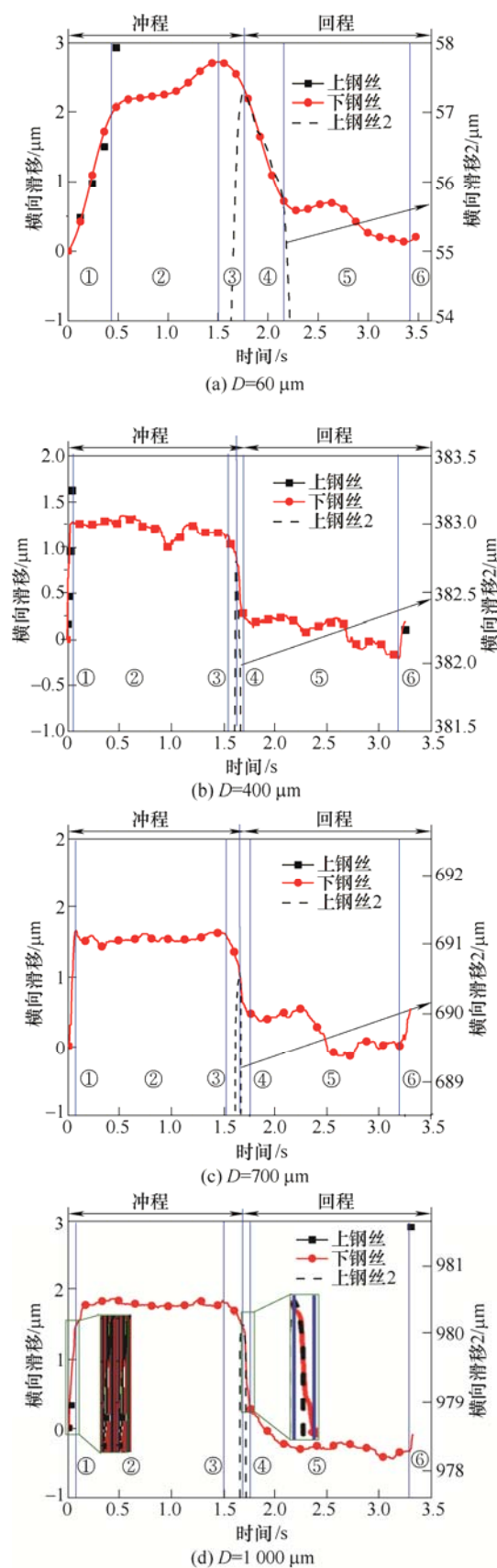


图 16 上、下钢丝纵向变形曲线

故下钢丝表面磨屑黏着现象较轻微(图 18b~18d)。由图 17a~17d 的第 5 阶段可知,下钢丝横向滑移呈现差异性波动状,这主要是由于接触区磨痕轮

廓平整度和表面损伤状态差异引起的(图 18a~18d)。由图 17e 可知,在冲程第 2 阶段,下钢丝横向变形均值随滑移幅值增加总体呈增大趋势(除滑移幅值 $60\text{ }\mu\text{m}$ 外)。



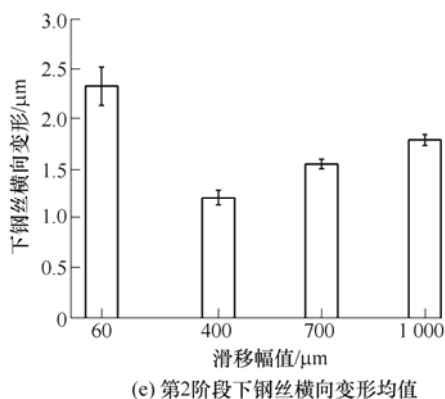


图 17 上、下钢丝横向滑移曲线

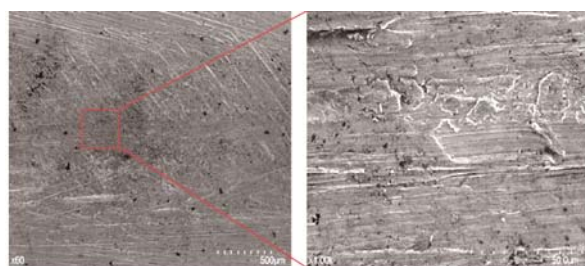
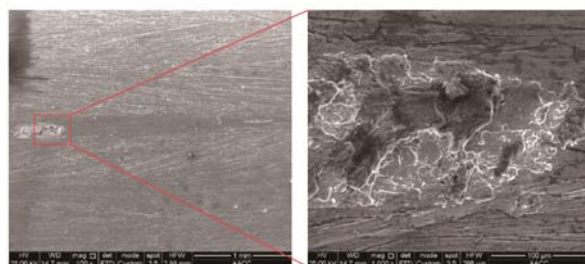
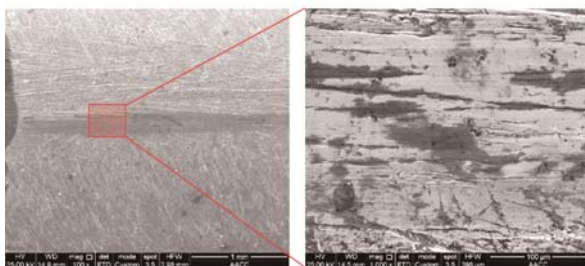
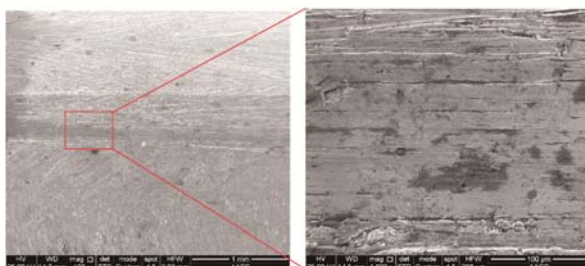
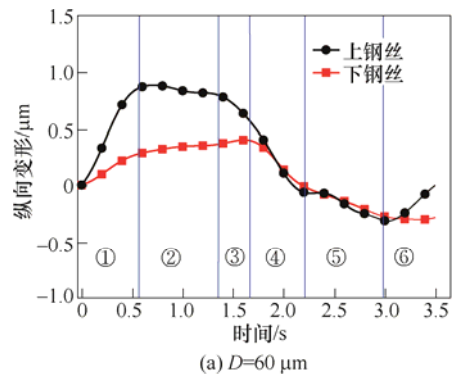
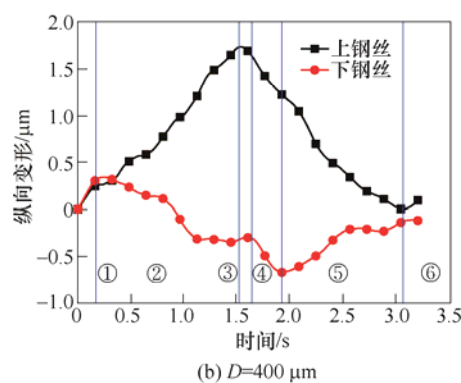
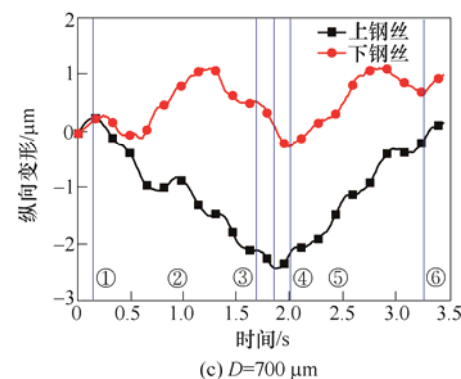
(a) $D=60\ \mu\text{m}$ (b) $D=400\ \mu\text{m}$ (c) $D=700\ \mu\text{m}$ (d) $D=1000\ \mu\text{m}$

图 18 不同滑移幅值时下钢丝磨痕形貌

由图 19 可知, 上、下钢丝在第 1、4 和 6 阶段纵向变形曲线均相似, 这可能是因为冲程或回程开始和结束时刻上、下钢丝接触状态保持一致, 钢丝接触面发生材料黏着和挤压现象(接触面微凸体被挤压和摩擦搓削造成的^[26-27]); 在第 2、3 和 5 阶段, 上、下钢丝变形曲线差异可能是由于不同滑移幅值造成接触界面磨痕轮廓差异性引起的(图 18a~18d); 随着滑移幅值的增加, 上、下钢丝纵向变形波动幅值均呈增大趋势, 这可能是因为滑移幅值越大, 钢丝相对滑移速率增加, 致使钢丝间摩擦振动较大。

因此, 滑移幅值增加导致下钢丝横向、纵向滑移量均总体增大, 钢丝间摩擦力增加(由图 20 可知, 滑移幅值由 $60\ \mu\text{m}$ 增至 $1000\ \mu\text{m}$ 时, 稳定阶段钢丝间摩擦因数平均值由 0.44 增至 0.75), 钢丝间接触状态由弹性变形协调的部分滑移向塑性变形参与的部分滑移和完全滑移转变^[26], 加剧钢丝表面损伤(图 18a~18d)。

(a) $D=60\ \mu\text{m}$ (b) $D=400\ \mu\text{m}$ (c) $D=700\ \mu\text{m}$

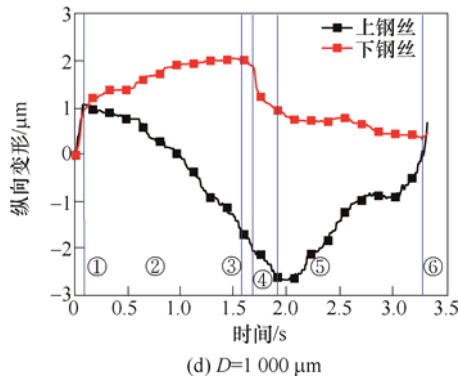


图 19 上、下钢丝纵向变形曲线

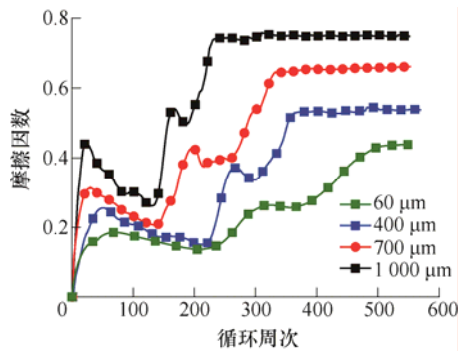


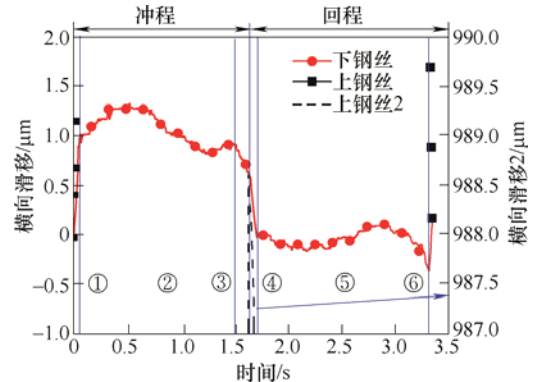
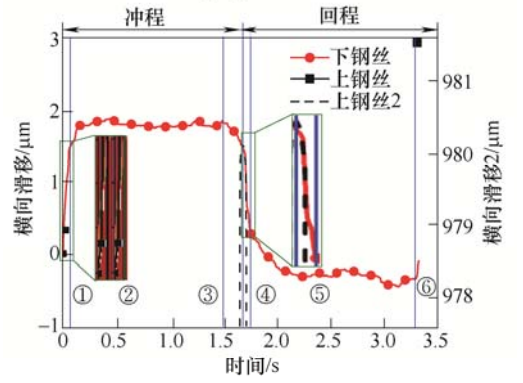
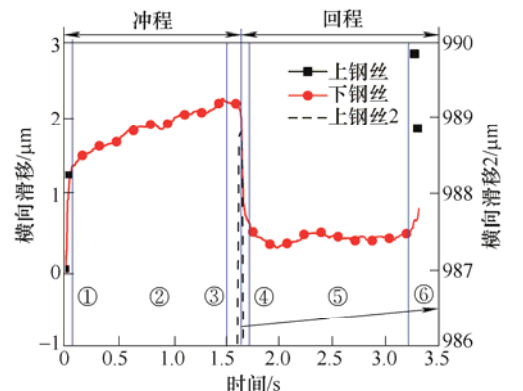
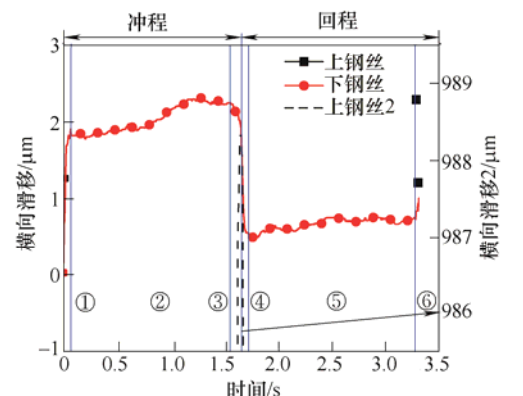
图 20 摩擦因数演化曲线

2.5 接触载荷对钢丝间动态接触与滑移特性的影响规律

由图 21 可知,不同接触载荷时下钢丝横向滑移曲线均总体呈迅速增加-基本稳定-迅速降低-基本稳定-增加的变化趋势;上、下钢丝之间接触状态均为黏着-完全滑移-黏着-完全滑移。由图 22 a 可知,下钢丝磨痕呈涂抹以及轻微的材料黏着和犁沟现象,故磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损;由图 6 可知(接触载荷 80 N),下钢丝磨痕呈明显的材料黏着和犁沟现象,同时存在微凸体剥落的磨屑在接触载荷作用下被压入钢丝表面而形成压痕,故磨损机理为黏着磨损、磨粒磨损和挤压磨损;由图 22b 可知,下钢丝磨痕呈现明显的材料黏着、剥层和犁沟现象以及许多微裂纹和磨屑颗粒,故磨损机理为黏着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损;由图 22c 可知,下钢丝磨痕呈现明显的犁沟、材料剥落和剥层现象以及许多微裂纹,故磨损机理为磨粒磨损和疲劳磨损。因此,钢丝间磨损机理包括黏着磨损、磨粒磨损、挤压磨损和疲劳磨损,这验证了钢丝间的动态黏着和滑移接触状态。同时,接触载荷增加导致钢丝接触界面损伤和磨损加剧。

由图 21 可知,在不同接触载荷时,下钢丝横向滑移曲线呈现一定差异。在冲程第 2 阶段,下钢丝横向滑移虽然趋于基本稳定,但变化趋势不同,接

触载荷增加导致黏着接触状态时间增加和下钢丝横向滑移均值增加(图 21e),这可能是由于接触载荷增加导致接触压力增大和黏着现象加剧^[28-29](图 22a~22d),进而引起钢丝间黏着接触状态时间增加;由

(a) $F_n=60\text{ N}$ (b) $F_n=80\text{ N}$ (c) $F_n=100\text{ N}$ (d) $F_n=120\text{ N}$

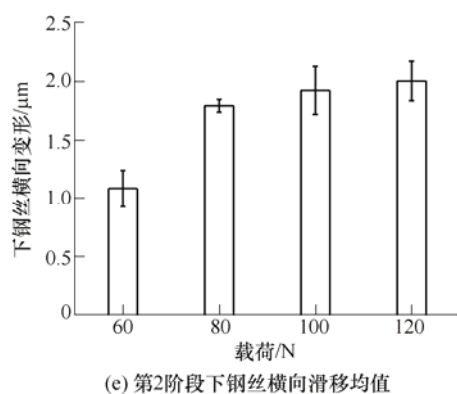


图 21 不同接触载荷时上、下钢丝横向滑移特性

图 23 可知,当接触载荷增加时,钢丝间摩擦因数总体呈降低趋势,这表明钢丝间接触面积与接触载荷不成比例增加,接触面积增加速率较接触载荷增加速率慢,故接触载荷增加导致钢丝间摩擦因数降低(接触载荷由 60 N 增至 120 N 时,稳定阶段钢丝间摩擦因数由 0.78 降为 0.61),然而,接触载荷增加引起钢丝间摩擦力增大,故下钢丝横向滑移增加。在回程第 5 阶段,接触载荷增加导致下钢丝横向滑移曲线波动幅值的总体下降趋势,这是因为接触载荷增加导致实际接触面积增大,进而提高钢丝间接触稳定性。

由图 24 可知,接触载荷不同导致差异的上、下钢丝纵向变形特性,这主要是由于不同的磨痕轮廓形貌特征以及接触界面微凸体接触机制和磨屑颗粒作用机制造成的^[30];上、下钢丝纵向变形曲线幅值大小表征钢丝纵向变形程度大小,下钢丝纵向变形幅值大小次序为接触载荷分别为 80 N、100 N、120 N、60 N,这与图 22 和图 6 磨痕起伏形貌特性吻合。

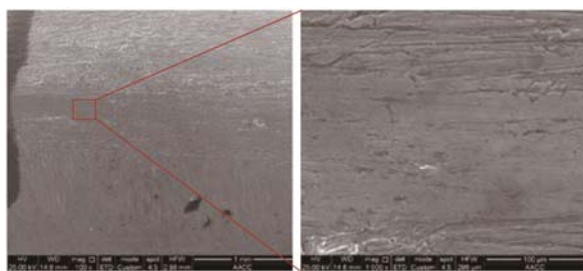
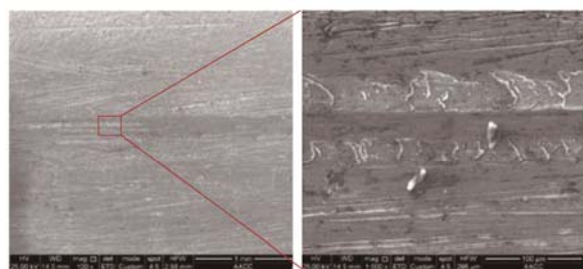
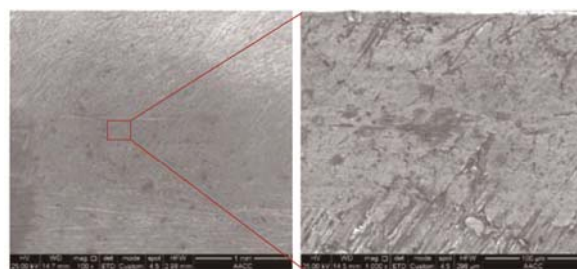
(a) $F_n=60$ N(b) $F_n=100$ N(c) $F_n=120$ N

图 22 不同接触载荷时下钢丝磨痕形貌

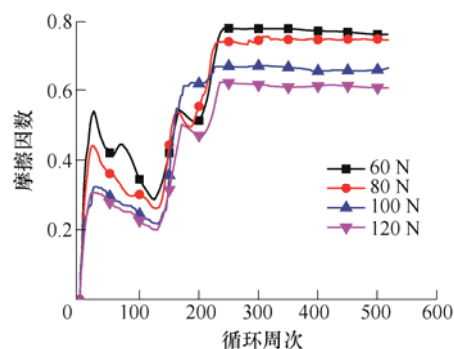
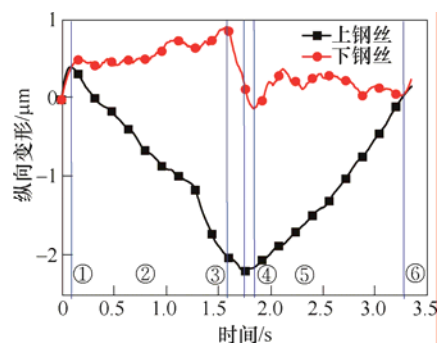
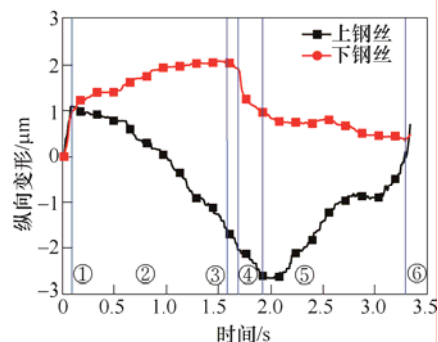
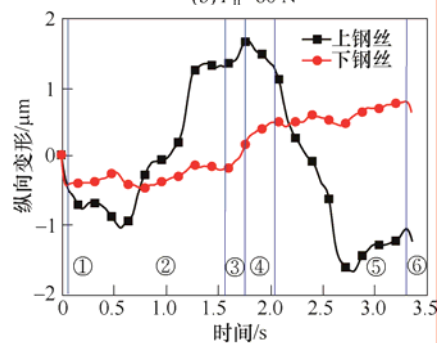


图 23 不同接触载荷时摩擦因数演化

(a) $F_n=60$ N(b) $F_n=80$ N(c) $F_n=100$ N

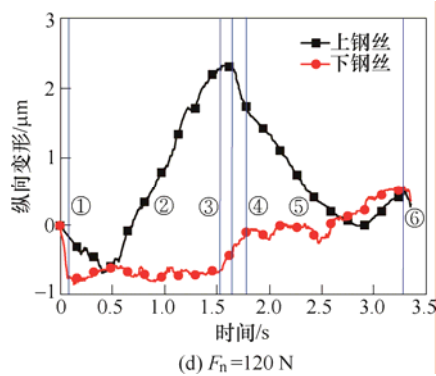


图 24 上下钢丝纵向变形曲线

3 结论

(1) 一个摩擦周期中, 钢丝间动态接触状态为黏着-完全滑移-黏着-完全滑移, 下钢丝横向滑移和摩擦力均总体呈增加-稳定-减小-稳定-增加的变化趋势, 上、下钢丝纵向变形总体呈相反的变化趋势; 沿上钢丝运行方向, 下钢丝不同横向位置的纵向变形均值逐渐减小; 与接触界面距离越大, 下钢丝纵向变形越小。

(2) 随着循环周次的增加, 钢丝横向滑移和纵向变形均增加, 摩擦因数呈增加-减小-增加-稳定变化趋势; 滑移幅值导致冲程第 2 阶段下钢丝横向变形均值增大, 上、下钢丝纵向变形波动幅值增大, 钢丝间摩擦因数增大; 接触载荷增加导致冲程第 2 阶段下钢丝横向变形均值增大, 上、下钢丝纵向变形特性的差异性, 摩擦因数降低。在不同工况下, 磨损机理包括黏着磨损、挤压磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

参 考 文 献

- [1] 李万恒. 千米级多塔连跨悬索桥中间塔适宜刚度及连跨效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI Wanheng. Suitable middle-pylon stiffness and mechanical transmission effect in kilometer level multi-pylon continuous suspension bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [2] 孟凡超, 王仁贵, 徐国平. 悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
MENG Fanchao, WANG Rengui, XU Guoping. Suspension bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [3] 张家男. 桥梁拉吊索用高强镀锌钢丝锈蚀与疲劳性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHANG Jianan. Study on corrosion and fatigue properties of high-strength galvanized steel wire used for cable of bridge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] 刘海涛. 强风作用下列车-汽车-桥梁时变系统的动力响

- 应及行车安全性、舒适性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- LIU Haitao. Dynamic responses of coupled train, automobile and bridge system under strong wind and analysis of running safety and riding comfort of vehicles[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [5] 王少钦, 马骏, 任艳荣, 杨淳. 主跨 1120 m 铁路悬索桥风-车-桥耦合振动响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(6): 1241-1248.
WANG Shaoqin, MA Li, REN Yanrong, et al. Dynamic interaction analysis on wind-train-bridge system of long-span railway suspension bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(6): 1241-1248.
- [6] 张卓杰. 大跨度桥梁索结构丝股分离与滑移机理及其力学行为的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
ZHANG Zhuojie. Mechanism and mechanical behavior of delamination and slippage between wires or strands of cables for large-span bridges[D]. Guangzhou: South China University of technology, 2016.
- [7] MONTOYA A, WAISMAN H, BETTI R. A simplified contact-friction methodology for modeling wire breaks in parallel wire strands[J]. Computers and Structures, 2012, 100-101: 39-53.
- [8] 张清华, 李乔, 周凌远. 悬索桥主缆与鞍座摩擦特性理论分析方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 44-50.
ZHANG Qinghua, LI Qiao, ZHOU Lingyuan. Theoretical analysis of cable-saddle friction characteristics for suspension bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 44-50.
- [9] CHENG Zhenyu, ZHANG Qinghua, BAO Yi, et al. Analytical models of frictional resistance between cable and saddle equipped with friction plates for multispan suspension bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(1): 1-13.
- [10] 齐东春, 沈锐利, 刘章军, 等. 悬索桥有限元计算的三节点空间鞍座单元[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6): 942-947.
QI Dongchun, SHEN Ruili, LIU Zhangjun, et al. 3-Node spatial saddle element for finite element calculation of suspension bridge[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6): 942-947.
- [11] 严琨, 沈锐利, 闫勇. 大跨度悬索桥鞍座出口处主缆的二次应力[J]. 重庆交通大学学报, 2012, 31(2): 191-194+288.
YAN Kun, SHEN Ruili, YAN Yong. Secondary stress of the first segment main cable near the saddles in long-span suspension bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2012, 31(2): 191-194+288.
- [12] 严琨. 大跨度悬索桥主缆弯曲刚度效应及二次应力研

- 究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- YAN Kun. Study on bending stiffness effect and secondary stress of main cable of long span suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [13] 季申增. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力及摩擦滑移特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- Ji Shenzeng. Character analysis of lateral force and slip friction between main cable and saddle in suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 肖伟, 王志强, 魏红一. 考虑缆索滑移的精细化索鞍模型[J]. 石家庄铁道大学学报, 2016, 29(2): 22-27.
- XIAO Wei, WANG Zhiqiang, Wei HONGYI. Detailed saddle model considering stick-slip of the cable[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2016, 29(2): 22-27.
- [15] CHUNG K S, CHO J Y, PARK J, et al. Three-dimensional elastic catenary cable element considering sliding effect [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(4): 276-283.
- [16] 常大宝. 泰州长江大桥主缆架设施工技术与控制指标 [J]. 中外公路, 2011, 31(5): 145-148.
- CHANG Dabao. Construction technology and control index of main cable erection of Taizhou Yangtze River Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5): 145-148
- [17] 谢雪峰, 罗喜恒. 多塔连跨悬索桥受力特性分析[J]. 渤海大学学报, 2018, 39(2): 182-187.
- XIE Xuefeng, LUO Xiheng. Analysis of mechanical characteristics of multi tower continuous span suspension bridge[J]. Journal of Bohai University, 2018, 39(2): 182-187.
- [18] 郭永波. 柔性钢丝绳的动态摩擦传动理论建模及试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- GUO Yongbo. Theoretical modeling and experimental research on dynamic friction transmission of flexible wire rope[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [19] 冯存傲, 张德坤, 郭永波, 等. 基于弧面法的摩擦式提升机衬垫摩擦性能测定[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1899-1905.
- FENG Cunao, ZHANG Dekun, GUO Yongbo, et al. A measurement to study on the frictional properties of friction hoist's liner based on arc method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1899-1905.
- [20] FENG Cunao, ZHANG Dekun, CHEN Kai, et al. Study on viscoelastic friction and wear between friction linings and wire rope[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 142-143: 140-152.
- [21] 王振廷, 孟君晟. 摩擦磨损与耐磨材料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.
- WANG Zhenyan, MENG Junsheng. Frictional wear and wear resistant materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013.
- [22] WANG Dagang, ZHANG Dekun, GE Shirong. Fretting-fatigue behavior of steel wires in low cycle fatigue[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 4986-4993.
- [23] WANG Dagang, ZHANG Dekun, GE Shirong. Effect of displacement amplitude on fretting fatigue behavior of hoisting rope wires in low cycle fatigue[J]. Tribology International, 2012, 52: 178-189.
- [24] 王大刚, 张德坤. 提升钢丝绳力学建模与微动疲劳损伤行为研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015.
- WANG Dagang, ZHANG Dekun. Study on mechanical modeling and fretting fatigue damage behavior of lifting wire rope [M]. Changsha: Central South University Press, 2015.
- [25] 王祥如. 钢丝多轴微动腐蚀疲劳损伤机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- WANG Xiangru. Study on multiaxial fretting corrosion fatigue damage mechanism of steel wires[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [26] 郑健锋. 车轴钢不同模式微动磨损行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- ZHENG Jianfeng. Studies on fretting wear behaviors of axle steels under varied modes[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [27] 张德坤, 葛世荣, 熊党生. 矿井提升机用提升钢丝绳的微动磨损行为研究[J]. 摩擦学学报, 2001(5): 43-46.
- ZHANG Dekun, GE Shirong, XIONG Dangsheng. Fretting wear behavior of hoisting rope in mining hoister[J]. Journal of Tribology, 2001(5): 43-46.
- [28] 张德坤. 钢丝绳的微动磨损及其损伤疲劳行为研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- ZHANG Dekun. Fretting wear and damage fatigue behavior of steel wire[M]. Xuzhou: China University of mining and Technology Press, 2005.
- [29] 沈燕, 张德坤, 王大刚, 等. 接触载荷对钢丝微动磨损行为影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 404-408.
- SHEN Yan, ZHANG Dekun, WANG Dagang, et al. Effect of contact load on the fretting wear behavior of steel wire[J]. Journal of Tribology, 2010, 30(4): 404-408.
- [30] 刘源. 摩擦衬垫的动态接触与微观摩擦机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- LIU Yuan. Study on dynamic contact and microscopic friction mechanism of friction lining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

作者简介: 王大刚(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为摩擦疲劳学理论及应用。
E-mail: wangdg@cumt.edu.cn