

干燥和酸性条件下钢芯铝绞线磨损特性研究

赵新泽*, 高 伟, 赵美云, 张少庆

(三峡大学 机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 在自制导线微动磨损试验机上考察了钢芯铝绞线在干燥和酸性 2 种典型气候条件下的微动磨损行为, 利用扫描电子显微镜和铁谱显微镜分析了试样导线内外层线股接触区的表面形貌和磨损微粒的形貌、尺寸等. 结果表明: 2 种试验条件下靠近线夹处的导线磨损机理主要为黏着和疲劳剥落, 中间导线段的磨损机理主要为黏着和磨粒磨损, 酸性条件下导线内还存在明显的腐蚀磨损.

关键词: 钢芯铝绞线; 典型气候条件; 磨损机理

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2011)06-0616-06

Wear Characteristics of Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) under Dry and Acidic Conditions

ZHAO Xin-ze*, GAO Wei, ZHAO Mei-yun, ZHANG Shao-qing

(College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: On a self-manufactured overhead line Aeolian Vibration simulation tester, micro-vibration wear characteristics of aluminum cable steel reinforced (ACSR) under dry and acidic conditions were investigated. The surface topography of contact area between inner and outer layer stranded wire was analyzed by using scanning electronic microscopy. Morphology and size of wear particle were analyzed by ferrographic microscope. The results show that in both experiment conditions, wear mechanism of stranded wire near the cable clamp mainly included adhesive wear and fatigue wear, while near the middle section mainly there were adhesive wear and grain-abrasion. In acidic experiment conditions, the main wear mechanism was corrosive wear in stranded wire.

Key words: aluminum cable steel reinforced (ACSR), typical climatic condition, wear mechanism

钢芯铝绞线是目前高压架空输电线路中最常用的导线之一. 在风载和气候等因素的作用下, 导线与线夹、导线线股之间会出现磨损现象^[1-2]. 这种磨损会造成导线表面的损伤, 影响送电质量, 严重时导致线夹损坏、导线断股断线, 极大地缩短其使用寿命^[3-4].

近年来, Zhou 及其研究组^[5-6]、陈荐等^[1,7]分别完成了导线常规试验条件下微动磨损及微动疲劳断

裂机理的研究. 于萍等^[8]为分析工业大气环境下导线表面腐蚀行为, 采用全浸腐蚀模拟试验, 研究了导线表面氧化膜微观形貌的构成、腐蚀行为、腐蚀速率及电化学性能. 施忠良等^[9]单独研究了导线材料磨损机理. 本文作者^[10]曾通过微振动模拟磨损试验, 研究了不同振动循环次数下导线的磨损及磨粒分布规律. 对于具有与钢芯铝绞线相同绕制结构的钢丝绳于不同条件下的微动磨损也有学者进行了较为深

Received 16 July 2011, revised 31 August 2011, accepted 30 October 2011, available online 28 November 2011.

* Corresponding author. E-mail: xzzhao@ctgu.edu.cn, Tel: +86-717-6392636.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(51075235) and Science and Technology Key Projects of Yichang (A2010-302-03).

国家自然科学基金项目(51075235)和宜昌市科技攻关计划项目(A2010-302-03)资助.

入研究^[11-12]. 以上研究结果为本文的研究工作提供了参考. 然而,服役导线的磨损往往受不同大气条件的影响^[13-14],本文分别在干燥和酸性 2 种典型大气条件对钢芯铝绞线的磨损特性进行了对比研究,力求揭示导线在实际工况下的磨损破坏机理,为其减磨措施提供试验依据.

1 实验部分

1.1 试验材料

试验选用 35 kV 输电线路中的 LGJ150/25 型钢芯铝绞线,此绞线由中心 2 层共 7 根钢芯线和外部 2 层共 26 根铝单线分层同轴绕制而成. 导线的标称截面为铝/钢 = 150/25 mm²;结构根数/直径为铝 = 26/2.7 (mm),钢 = 7/2.1;计算截面为 173.11 mm²;外径为 17.1 mm;计算拉断力为 54 110 N;计算质量为 601 kg/km;铝线中铝的质量百分数不小于 99.7%,杂质(硅、铁、铜)的质量百分数不大于 0.3%.

1.2 试验方案

采用自制导线微动磨损试验装置模拟导线在风载作用下的微振动,干燥条件为实验室常规大气环境,酸性溶液采用浓硫酸稀释而成,参考宜昌地区近年来降雨 pH 值的平均值^[14-15],试验中采用加速腐蚀的方法,对激振点至右端金具夹持处导线表面喷

洒 pH 值为 4.0 的酸性溶液. 2 种条件下试验参数相同,试验导线张力为 2.5 kN、档距 5 m、中心激振振幅 2 mm、频率 20 Hz、振动周次 107 次. 为真实反映实际工况下导线振动的间歇性,振动试验每次持续 120 min,每天振动 480 min,连续振动直至达到确定的振动周次.

为对比分析,以中心激振点为对称中心,导线左端为干燥条件,右端为酸性条件,对称获取分析试样. 试样段长均取 100 mm,共 2 组 10 根. 图 1 为振动频率为 20 Hz 时导线取样点位置及对应的振动幅值.

按图 1 所示坐标位置截取共 10 根导线试样,首先对其表面进行观察,之后对所有试样段进行解股,然后分别用分析纯(丙酮)清洗,收集磨损微粒用于磨粒分析;同时将内外层铝线接触处的内层铝线股作为导线试样,用于接触区域微观分析. 利用 OLYMPUS BX51 型铁谱显微镜和 S-570 型扫描电子显微镜对导线线股磨痕、磨粒进行尺寸、形貌等的检测分析.

2 结果与讨论

2.1 磨损导线表面整体特性分析

图 2 为 2 种试验条件下导线外表面图片. 2 种试验条件下在导线的外层铝线的绞缝中存在明显的

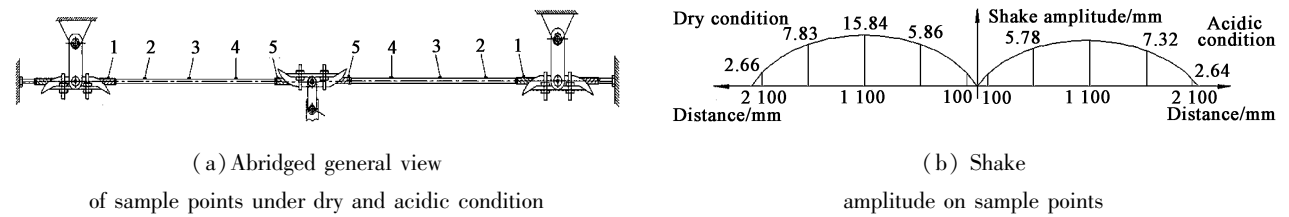


Fig. 1 Sample point and corresponding shake amplitude of the wire

图 1 导线取样点位置及振动幅值



(a) Dry condition (b) Acidic condition

Fig. 2 Surface character of strand wire under both conditions

图 2 干燥和酸性试验条件下导线表面特征

金属磨屑,表明试验导线在微动磨损过程中存在磨粒的外溢.比较图 2(a)和(b)可知:干燥条件下导线表面颜色为银白色,磨损前后无明显变化,酸性条件下导线表面呈暗灰色,磨损前后产生了明显变化.

图 3 为 2 种试验条件下导线内层表面图片.可见 2 种条件下导线内层铝线股表面存在明显的斑点状磨痕,表明其均发生了严重的磨损.由图 3(b)可知:酸性条件下导线中出现了内层铝线的断股现象,断裂处存在更为明显的磨痕,表明该线股在断裂前发生了更为严重的磨损.

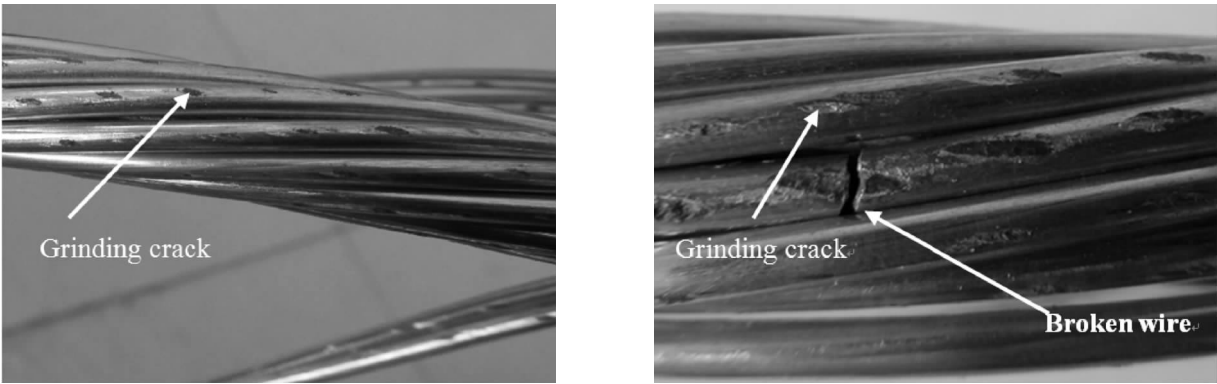
2.2 磨痕尺寸特性分析

图 4 为试样段 1 内层铝线股表面接触区的典型磨痕.由图 4 可知:导线邻层铝线股之间的磨痕呈椭圆形,其长轴的方向与线股的绞制方向一致.将 2 种试验条件下对应截取的 5 个试样段中的内层铝线股磨痕分别在铁谱显微镜下观察,发现其磨痕均为椭圆形,只是尺寸大小和深度不同.

图 5 为各试样段内层铝线股磨痕的长轴、短轴测量获得的平均值与中心线夹相对位置间关系.由图 5 可知:2 种试验条件下内层铝线股磨痕的长轴和短轴尺寸以中部试样段 3 为最小,并呈对称形式向两端对称增大.表明中部试样段 3 所在导线区域其内层铝线股磨损最小,而靠近线夹的试样段 1 和 5 磨损程度最为严重.受线夹的加持作用,试样段 1 和 5 的振幅较小,线股间的接触应力较大,磨损严重,试样段 3 尽管振幅最大,但磨损程度较弱,表明相对于振幅条件,线夹的夹持带来的附加应力在磨损过程中起着更大作用.酸性条件下,除试样段 3 的磨痕短轴值外,各试样段的磨痕尺寸均比干燥条件对应试样段的磨痕尺寸大,表明腐蚀,特别是存在的电偶腐蚀对磨痕的扩展起到重要作用.

2.3 磨痕形貌特性分析

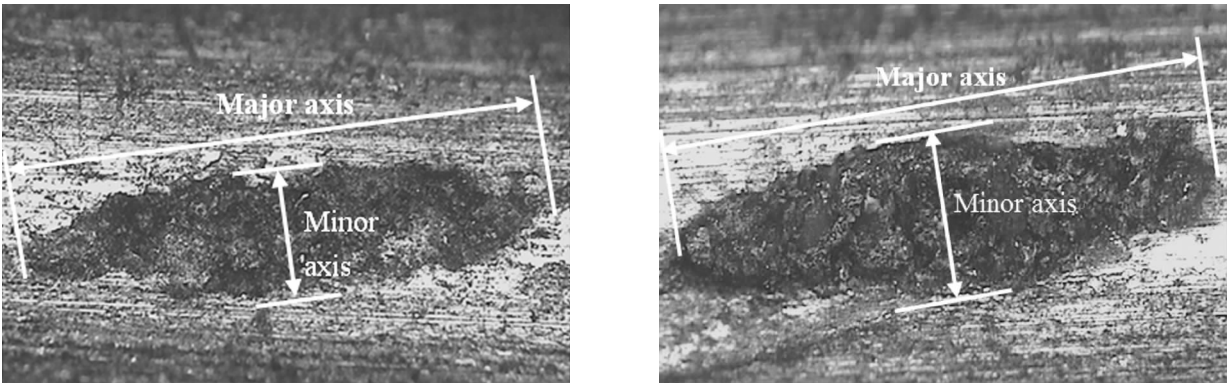
考虑试验导线的对称性,选取 3、4、5 试样段进行分析.图 6~8 分别为对应 3、4、5 试样段上内层铝



(a) Dry condition (b) Acidic condition

Fig. 3 Surface character of inner layer strand wire under both condition

图 3 干燥和酸性试验条件下导线内层表面特征



(a) Dry condition(Opt. ×50) (b) Acidic condition(Opt. ×50)

Fig. 4 Surface grinding scar of inner layer strand wire of first sample unit

图 4 试样段 1 内层铝线股表面磨痕

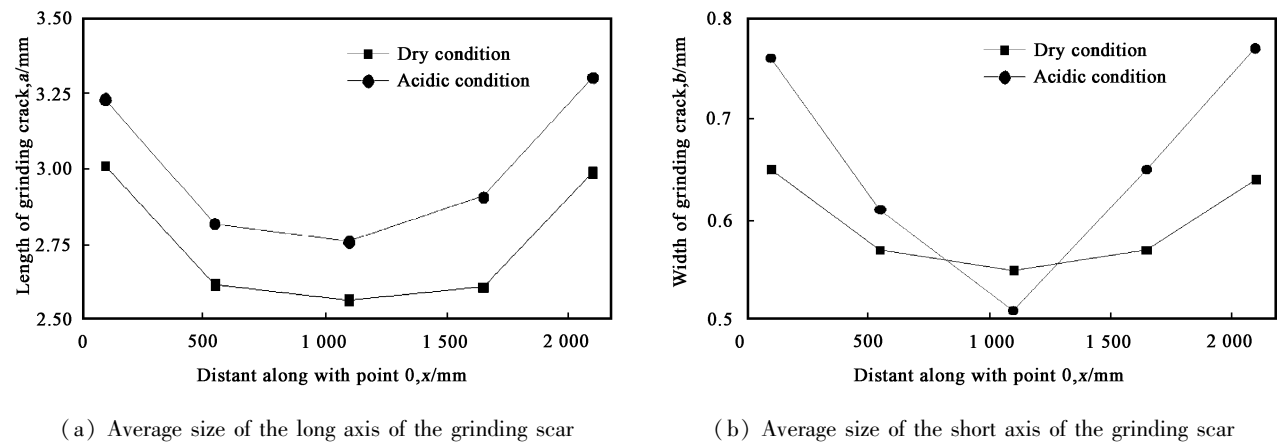


Fig. 5 Grinding scar size of every sample unit under both conditions
图 5 2 种条件下各试样段内层铝线股磨损尺寸

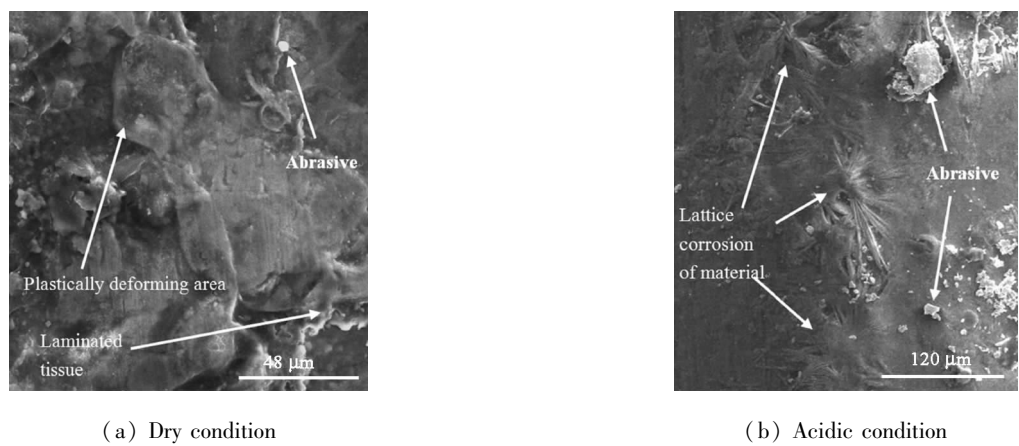


Fig. 6 Pattern of grinding scar on third sample unit
图 6 试样段 3 磨痕表面形貌

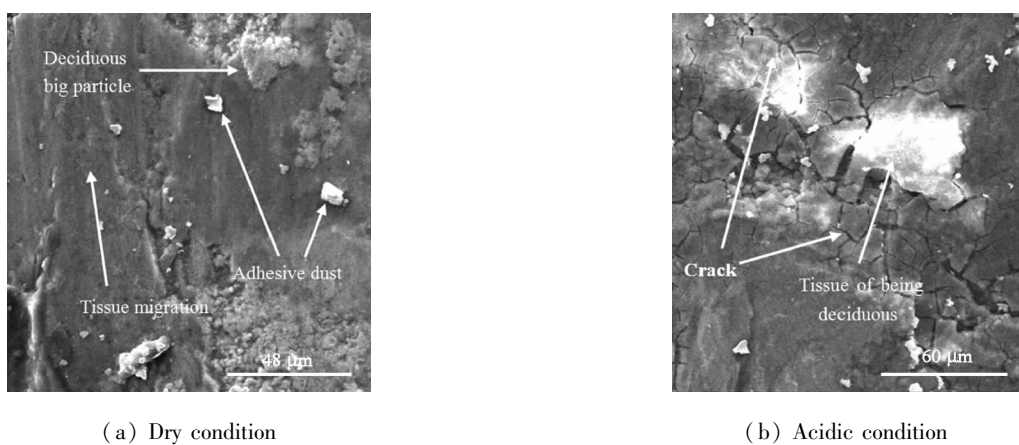


Fig. 7 Pattern of grinding scar on fourth sample unit
图 7 试样段 4 磨痕表面形貌

线股磨痕表面形貌. 由图 8 可知: 2 种试验条件下试样段 5 中均存在严重的裂纹现象, 组织层以片状的形式剥离基体, 为典型的疲劳鳞剥现象, 且酸性条件下的磨痕表面存在磨粒的粘附现象, 表面也较干燥条件的平滑, 试样段 1 中也可观察到同样现象, 表明

此条件下位于试样段 1 和 5 区的导线内层铝线股磨损机理主要为黏着磨损和疲劳剥落. 由于试样段 5 靠近线夹, 振幅较小, 线股间的接触应力较大, 线股间的相对错位运动不显著, 为导线黏着磨损和严重的组织疲劳剥落提供了外部条件.

对比图 6~8,可知试样段 3、4 上磨痕处裂纹的扩展现象不及试样段 5 的明显,但其磨痕处组织的迁移、层积、磨粒的粘附现象明显,表面的凹凸度明显增强,且酸性条件下同一试样段的磨痕表面裂纹的萌生和扩展现象比干燥条件下明显,表面更光滑,表明此试验条件下位于试样段 3、4 区的导线内层铝线股的磨损机理主要为磨粒磨损和黏着磨损. 由于试样段 3 和 4 位于导线的中部,线股间的接触应力相对较小,振幅较大,距离线夹较远,内层铝线股间较大的相对运动,便于磨粒的产生和参与磨损行为,因而磨粒磨损现象显著.

从图 6~8 中,还可发现酸性条件下导线的表面

形貌与干燥条件下的有着明显的不同,酸性物质对接触表面的腐蚀磨损以及相应的电偶腐蚀作用一方面腐蚀了表面细小的毛刺和粗糙峰,另一方面酸性溶液中的水份对磨损区域起到了一定的润滑作用,促进了磨粒随振动排出接触区,减弱了磨粒磨损行为,因此磨损表面比干燥条件下要光滑. 同时酸性液体加速了铝组织的疲劳破坏,使得酸性条件下,对应各试样段接触区的疲劳裂纹显著增多,甚至引起了如图 6(b)所示材料的晶间腐蚀现象.

2.4 磨粒尺寸特性分析

图 9 为各试样段内所收集磨粒的粒径统计分布图,是通过铁谱仪收集磨粒于谱片上,再分别利用铁

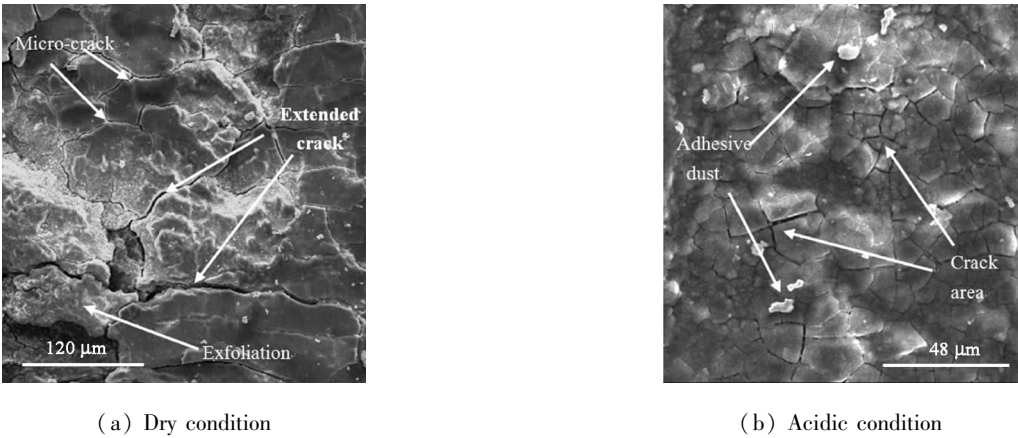


Fig. 8 Pattern of grinding scar on fifth sample unit

图 8 试样段 5 磨痕表面形貌

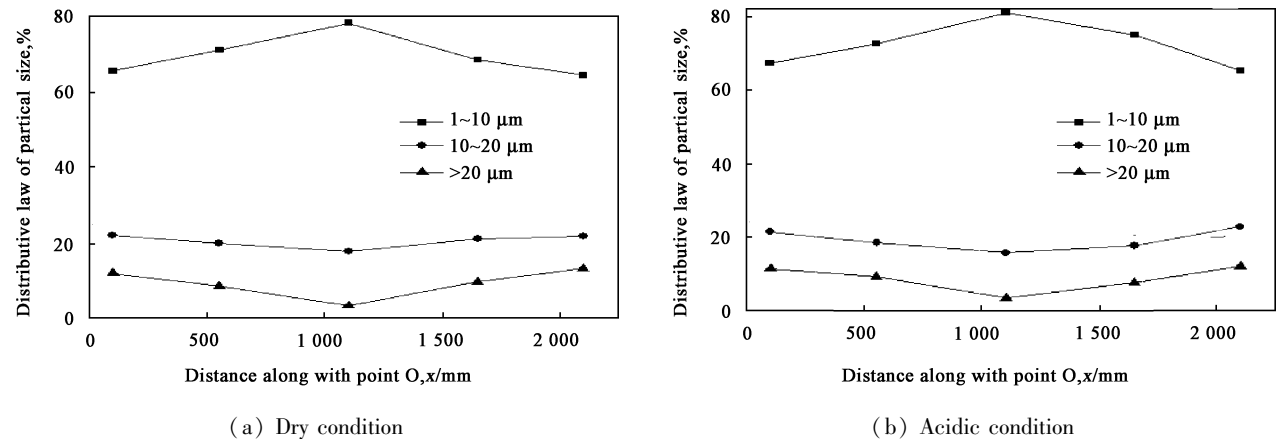


Fig. 9 Distribution of abrasive particle in sample units

图 9 各试样段内磨粒粒径统计分布

谱显微镜对磨粒进行测量获得.

从图 9 中可知:2 种试验条件下,5 个试样段的磨粒大部分粒径都在几个至几十个微米之间,其中在 1~10 μm 的尺寸范围内分布最多,所有情况下

均超过了 65%,最高达 80%. 相比干燥条件,酸性条件下各试样段的磨粒在 1~10 μm 范围内分布所占的比例更高一些. 大尺寸比例在各试样段的分布与导线内层铝线股磨痕的尺寸分布形式类似,以中间

试样段3为中心呈对称形式分布,两端粒径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 内的磨粒所占比例逐渐减小, $10 \mu\text{m}$ 以上的大粒径磨粒逐渐增多。这些与各试样段所处区域的振幅有关,振幅越小,内层铝线股间磨粒参与磨损行为机会少,磨粒粒径相对会大些;反之,线股接触区的相对运动显著,磨粒会再次参与磨损,小粒径的磨粒分布比例高。对比图9(a)和(b)可以看出2种试验条件下各对应试样段区域的磨粒尺寸分布比例变化不大,表明气候对内层铝线股间磨粒的影响不及振幅影响大。

3 结论

a. 钢芯铝绞线在干燥和酸性2种典型条件下发生微动磨损时,导线与线夹之间、导线内层线股之间均发生了不同程度的磨损,磨损过程中均存在磨粒外溢现象,酸性条件下振动周次为 10^7 次时,导线内层铝线出现了断股现象。

b. 试验导线内层线股间的磨痕均呈椭圆状,靠近线夹处的磨痕尺寸要大于中间段的磨痕尺寸,酸性条件下对应各试样段上的磨痕尺寸较干燥条件下为大。

c. 2种试验条件下,靠近线夹处的导线内层线股间的磨损机理主要为黏着磨损和疲劳剥落,中间区域为黏着磨损和磨粒磨损。酸性条件下,导线各试样段中存在酸性腐蚀磨损。

d. 钢芯铝绞线磨损产生的磨粒粒径尺寸主要分布在 $1 \sim 20 \mu\text{m}$ 的范围内。

参考文献:

- [1] Chen J, Huang Z J, Li L P, *et al.* Study on damage characteristics of overhead electrical conductors [J]. *Electric Power*, 2004, 31(10): 31–33 (in Chinese) [陈荐, 黄志杰, 李录平等. 架空输电导线的微动损伤特性研究[J]. *中国电力*, 2004, 31(10): 31–33].
- [2] Wu G, Zhao X Z, Zhao C H. Research progresses on friction and wear of overhead electrical conductors [J]. *Lubrication Engineering*, 2008(10): 103–106 (in Chinese) [吴刚, 赵新泽, 赵春华. 架空导线的摩擦磨损研究进展[J]. *润滑与密封*, 2008(10): 103–106].
- [3] R K Aggarwal, A T Johns, J A S B Jayasinghe, *et al.* An overview of the condition monitoring of overhead lines [J]. *Electric Power Systems Research*, 2000(53): 15–22.
- [4] Zhang H T. Instance about harmfulness of aeolian vibration and importance of field vibration measure on overhead electrical conductors [J]. *Electric Power Construction*, 1999(09): 38–44 (in Chinese) [张会韬. 架空输电线路微风振动危害的实例及现场测振的重要性[J]. *电力建设*, 1999(09): 38–44].

- [5] Zhou Z R, Goudreau S, Fiset M, *et al.* Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation [J]. *Wear*, 1995, 181: 537–543.
- [6] Z R Zhou, A Cardout, S Goudreau, *et al.* Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue [J]. *Tribology International*, 1996(10): 221–232.
- [7] Chen J, Huang Z J, Li L P, *et al.* Microanalysis on fretting wear surface of overhead electrical conductors [J]. *Lubrication Engineering*, 2004(11): 24–26 (in Chinese) [陈荐, 黄志杰, 李录平, 等. 架空导线微动磨损表面的微观分析[J]. *润滑与密封*, 2004(11): 24–26].
- [8] Yu P, Zhang J L, Xu H, *et al.* Study on corrosion of ACSR covered by inhomogeneous dark coating immersed in simulated ocean environment for 5 years [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010(3): 46–55 (in Chinese) [于萍, 张金岭, 许红, 等. 表面不均匀性黑斑的钢芯铝绞线模拟海洋环境5年腐蚀行为的研究[J]. *材料工程*, 2010(3): 46–55].
- [9] Shi Z, Wu B Y, Lin P H, *et al.* Study on friction – wear properties and wear mechanism of high aluminum zinc based alloy [J]. *Tribology*, 1994, 14(2): 134–144 (in Chinese) [施忠良, 吴炳尧, 林萍华, 等. 高铝锌基合金的摩擦磨损性能与磨损机制[J]. *摩擦学学报*, 1994, 14(2): 134–144].
- [10] Zhao Xinze, Gao Wei, Lao Haijun. Wear Characteristics of ACSR under the Aeolian Vibration in Different Vibration Times. The 6th International symposium on fretting fatigue [C], April 19–21, 2010.
- [11] Shen Y, Zhang D K, Wang S Q, *et al.* Fretting behaviors of steel wires as hoisting ropes for coal mine in corrosive media [J]. *Tribology*, 2011, 31(1): 66–71 (in Chinese) [沈燕, 张德坤, 王崧全, 等. 矿用钢丝在腐蚀介质环境下的微动行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(1): 66–71].
- [12] Zhang D K, Ge S R. Frettingwear behavior of steel wire and the effect of fretting on its fatigue fracture behavior [J]. *Tribology*, 2004, 24(4): 355–359 (in Chinese) [张德坤, 葛世荣. 钢丝的微动磨损及其对疲劳断裂行为的影响研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, 24(4): 355–359].
- [13] Ren P D, Chen G X, Zhou Z R. Fretting wear behavior of GCr15 steel under lubrication of various aqueous mediums [J]. *Tribology*, 2003, 23(4): 331–335 (in Chinese) [任平弟, 陈光雄, 周仲荣. 不同水介质下 GCr15 钢的微动磨损特性[J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(4): 331–335].
- [14] Tang M H, Cai J X. The calculation of acid rain pH value in city with using the gaussian model [J]. *The Environmental Science & Technology*, 1999, 84(1): 1–18 (in Chinese) [汤民淮, 蔡俊雄. 利用高斯烟柱模式计算城市酸雨 pH 值[J]. *环境科学与技术*, 1999, 84(1): 1–18].
- [15] Chen L M. The Environment quality monthly report in september this year——eight cities have been detected to have acid rain in whole province [N]. *Three Gorges Evening*, 2008–10–22 (A07) (in Chinese) [陈凌墨. 今年9月环境质量月报发布—全省八个城市检出酸雨[N]. *三峡晚报*, 2008–10–22 (A07)].