

不同退火温度下输电导线疲劳性能的实验分析

任贤达¹, 刘佳琮¹, 唐震², 武晓刚¹, 陈维毅¹

(1. 太原理工大学生物医学工程学院应用力学与生物医学工程研究所, 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 输电线路是输电网络的重要组成部分。然而, 电网输电线路山火频发, 严重威胁输电线路的安全运行, 因此研究输电导线在山火过后的力学性能特别是疲劳寿命尤为重要。考虑到导线在微风振动中的疲劳破坏主要由其拉伸力的变化引起, 为确定山火过后输电导线的力学性能特别是疲劳性能的变化情况, 利用恒温管式电阻炉模拟不同的架空输电导线(钢芯铝绞线)受到不同温度的山火烧烤, 然后对冷却后的单丝导线进行疲劳拉伸试验, 得到疲劳拉伸破坏次数随退火温度变化的规律, 并与新导线和真实山火后的导线进行对比。试验结果表明: 导线的疲劳极限随着退火温度的增加而减小; 退火温度大于 250 °C 时, 导线的拉伸循环次数急剧下降; 退火温度大于 350 °C 时, 拉伸循环次数趋于稳定。研究结果可为输电线路发生山火情况下的安全运行提供参考。

关键词: 架空导线; 疲劳; 退火温度; 山火

中图分类号: V216.3

文献标识码: A

输电线路作为发电厂、变电站和用户之间的重要环节, 主要用于输送电能。导线是传输线路的重要组成部分^[1]。近年来, 由于极端天气条件、人为因素等经常发生山火。山体火灾对输电线路的安全运行造成严重影响。山火发生后, 线路由于受到高温作用, 悬垂变大, 热稳定变差, 导线的疲劳性能发生变化, 使用寿命降低^[2]。因此, 研究输电导线在山火过后的力学性能特别是疲劳寿命就显得尤为重要。Fleming 等^[3]实验研究了直接循环张力下导线股的疲劳特性, 结果表明, 随着载荷范围的增加, 疲劳寿命降低。Loyce 等^[4]研究了亚临界退火对疲劳试样的影响, 发现当退火温度升高时, 由于相变导致再结晶, 总寿命显著下降, 当拉伸屈服应力超过临界值时发生再结晶, 表明由于储能密度不足以使新晶粒成核, 大多数疲劳样品在退火时不能重结晶。Morris 等^[5]分析了中间退火对扭转试验铝试样疲劳寿命的影响, 发现在疲劳寿命的各个阶段退火对总寿命均有显著影响, 疲劳裂纹在轴向受力、均匀试样的自由面处开始。然而, 上述研究并没有对山火后导线的疲劳性能进行分析。本研究利用恒温管式电阻炉模拟输电线路受到不同温度的山火烧烤, 然后对单丝导线进行疲劳拉伸试验, 得出疲劳拉伸破坏次数随温度变化的规律, 并与新导线、真实山火后的导线进行对比, 以期对输电线路在发生山火情况下的保护、安全运行等相关工作提供参考。

1 疲劳寿命理论分析

金属疲劳是一种在交变应力作用下金属材料发生破坏的现象, 其主要影响因素是应力幅值、平均应力大小和循环次数^[6]。本研究主要考虑循环次数对导线疲劳的影响。

工程实践表明, 机械零件在交变应力作用下, 即使其工作应力低于屈服极限, 在长期反复作用后,

* 收稿日期: 2018-06-18; 修回日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(11572213)

作者简介: 任贤达(1989—), 男, 硕士, 主要从事材料结构及力学性能研究. E-mail: 359024389@qq.com

通信作者: 陈维毅(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事生物力学研究. E-mail: 2390398408@qq.com

零件仍会突然断裂。即使对于塑性较好的材料,断裂前也不会发生明显的塑性变形^[7]。描述交变应力的基本量有:最大应力 $\sigma_{\max}$ 、最小应力 $\sigma_{\min}$ 。常用的导出量有:应力幅值 $\sigma_a=(\sigma_{\max}-\sigma_{\min})/2$,平均应力 $\sigma_m=(\sigma_{\max}+\sigma_{\min})/2$,应力比 $r=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 。对于对称循环应力, $r=-1$;应力幅值反映了交变应力在一个应力循环中变化的程度,是金属构件发生疲劳破坏的根本原因^[8-9]。

2 实 验

2.1 实验材料

实验中采用4种型号的钢芯铝绞线(JL/G1A-400/35、JL/G1A-300/25、JL/G1A-240/30、JL/G1A-300/40),如图1所示,具体参数列于表1。图2为JL/G1A-400/35导线的截面图。可见,导线共有4层结构:内层为7根钢芯,其作用是承受大部分荷载;外面3层均为铝线,由内向外分别由10、16和22根铝线组成,共48根。

表1 4种型号钢芯铝绞线参数

Table 1 Parameters of four types of ACSR (aluminium conductor steel reinforced)

Type of wire	Number of aluminum wire	Number of steel wire	Aluminum wire's diameter/mm	Steel wire's diameter/mm	Rated tensile force/kN
JL/G1A-400/35	48	7	3.22	2.50	103.67
JL/G1A-300/25	48	7	2.85	2.22	83.76
JL/G1A-240/30	24	7	3.60	2.40	75.19
JL/G1A-300/40	24	7	3.99	2.66	92.36



图1 4种型号的原始导线

Fig. 1 Four kinds of original wires

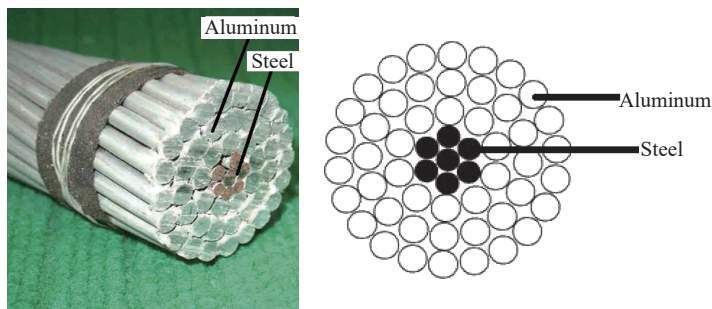


图2 JL/G1A-400/35 导线截面图

Fig. 2 Sectional view of wire JL/G1A-400/35

2.2 实验方案

截取4种型号导线各9段,每段长0.75 m;将SK2-6-12管式电阻炉加热至预设温度(150、200、250、300、350、400、450、500℃)后,恒温一段时间;再将试件放入炉腔,每根导线均保温30 min,以此模拟输电导线所处的真实山火环境。

待各段导线空冷至室温,把导线分层拆成单丝,采用SDS100电液伺服疲劳试验机,对未加热新线、电阻炉烘烤导线和真实山火烘烤后导线的单丝进行疲劳试验。考虑到导线节距问题,试样长度为20 cm。每层铝线中取5根,钢芯取3根进行试验。

根据文献^[10]所述,疲劳实验最大应力值为屈服强度的60%,交变载荷最小应力与最大应力之比为0.1^[11],由此计算出均值和幅值。实验中,测得JL/G1A-400/35导线单丝铝线的屈服强度为750 MPa,进而计算得到加载力的幅值为292.5 N,均值为357.5 N,加载频率为27 Hz^[10]。对于其他3种导线(JL/G1A-300/25、JL/G1A-240/30、JL/G1A-300/40),根据静态拉伸试验得出抗拉强度^[12],在保证导线不进入塑性的条件下,选取对应的适当幅值和均值进行疲劳实验,拟合出应力-寿命(S-N)曲线解析式,得出

不同温度导线在同一应力下的循环次数。根据苏联实验经验,此时单丝铝线的加载频率为 27 Hz,钢芯的加载频率为 10 Hz^[10]。

3 实验结果与分析

3.1 JL/G1A-400/35 导线的实验结果与分析

把钢芯铝绞线放入恒温管式电阻炉中保持设定温度 1.5 h,再将导线冷却至室温^[13-14],对不同温度(T)烘烤后的导线、新导线和真实山火烧烤后的导线进行拉伸疲劳试验。在所加热的铝导线各层中,分别取出 5 根铝单线进行测试,反复上述操作,取平均值;由于钢芯数量较少,每个温度下测试 3 根,并多次测量取平均值。若拉伸次数达到 120 000 时导线仍未发生断裂,则结束实验,认为其疲劳强度满足要求。记录单丝导线的拉伸次数 n ,得到表 2 所列数据。

表 2 JL/G1A-400/35 导线在不同温度下的疲劳拉伸次数
Table 2 Fatigue cycle number of wire JL/G1A-400/35 at different temperatures

Type of wire	$T/^{\circ}\text{C}$	n			
		Outer layer	Middle level	Inner layer	Steel core
Wire after annealing	150	120 000	120 000	120 000	9 821
	200	113 411	120 000	120 000	9 885
	250	120 000	120 000	120 000	5 065
	300	84 491	94 529	97 456	5 537
	350	9 885	7 521	4 028	4 424
	400	4 383	5 888	6 160	2 858
	450	3 736	3 928	3 722	1 495
	500	2 504	1 144	1 041	956
New wires		81 071	120 000	79 784	6 054
Wire after mountain fire		91 824	120 000	71 748	14 549

由表 2 中数据可以看出:当退火温度 T 小于 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,导线基本不被拉断;退火温度在 250~500 $^{\circ}\text{C}$ 之间时,导线的拉伸次数 n 随着退火温度的升高而减小;当退火温度小于 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,拉伸次数达到 120 000 时导线仍未发生断裂,说明 250 $^{\circ}\text{C}$ 烧烤后单丝外层铝导线的抗疲劳强度较强;当温度超过 300 $^{\circ}\text{C}$ 时,导线的疲劳拉伸次数明显减少,特别是 500 $^{\circ}\text{C}$ 时,拉伸次数最少,此时导线的抗疲劳性能较弱。由此可以推断,在 500 $^{\circ}\text{C}$ 或更高温度烧烤后,整根导线外层铝线的抗疲劳性能较弱。

对比外、中、内 3 层铝线可以发现:退火温度小于 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,其对 3 层铝线的疲劳性能影响不大;退火温度高于 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,随着退火温度的增加,导线的疲劳性能急剧下降。同时,在同一退火温度下,3 层导线的拉伸次数差异不大,因此对于其他 3 种型号导线,不必再对外层导线分组,可统一处理。

3.2 真实山火烧过导线、新线和 300 $^{\circ}\text{C}$ 烧过导线的单丝疲劳对比

JL/G1A-400/35 真实山火烧后导线和新线的各铝线层及钢芯层拉伸疲劳强度的对比如图 3 所示。可见,真实山火烧过导线在抗疲劳特性方面与新导线的差异并不大。对于不同温度烧烤后的导线,300 $^{\circ}\text{C}$ 烧烤下的导线最接近真实山火烧过的导线。

3.3 不同型号导线的实验结果与分析

对 JL/G1A-300/25、JL/G1A-240/30、JL/G1A-300/40 3 种导线的实验数据进行处理,拟合得到循环次数与处理温度的关系曲线,如图 4 所示。根据国家标准《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》,进行疲劳试验时一般选取屈服强度的 60% 作为开始试验时设定的最大应力值,然后根据疲劳情况适当增加或减小最大应力值^[15]。本实验中,根据静态拉伸试验得出铝线的屈服强度为 (168.0 ± 18.5) MPa,钢芯的屈服强度为 (1427.0 ± 139.3) MPa^[10]。

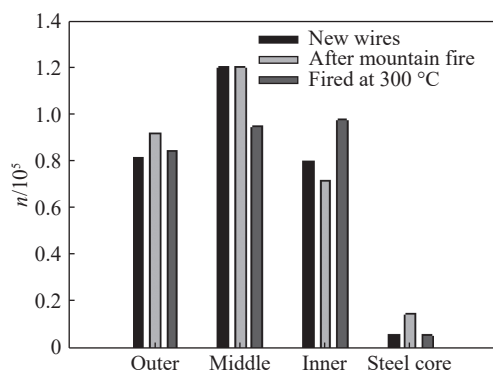


图3 新导线、真实山火和300℃烧过导线的单丝疲劳对比

Fig. 3 Comparison of monofilament fatigue of new wire and the wires burned by mountain fire and at 300 °C

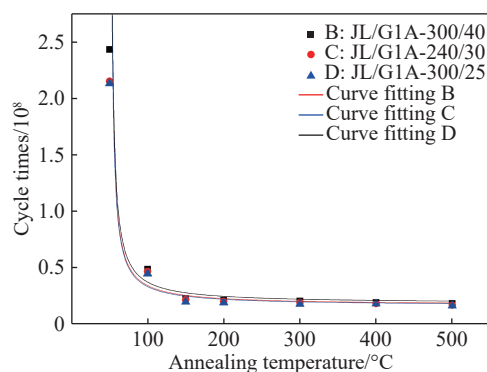


图4 不同处理温度下3种导线的循环次数

Fig. 4 Cycle times of three wires at different annealing temperatures

在拉伸次数超过50 000次的情况下导线的断裂大部分发生在端部,这是由于拉伸试验机固定试样时其端部出现应力集中,这是本研究的不足之处。实验过程出现了差异较大的数据,除去这些离散性较大的数据,再取试验的平均水平。另外,部分试件在拉伸疲劳破坏时,断口有明显的颈缩现象,属于正常的拉伸破坏断口。综合考虑这些不足,导线的真实疲劳水平应该较实验结果整体偏高^[16]。因此,导线山火疲劳破坏实验有待改进。

4 结 论

通过管式电阻炉将4种钢芯铝绞线加热到不同温度后空冷至室温,对其施加交变激励,测试导线的疲劳性能。试验结果显示,当导线受到山火烧烤时,其疲劳强度随着烧烤温度的增加而减小,超过250℃时导线的拉伸循环次数急剧下降,超过350℃后趋于稳定。这种现象是由导线材料内部晶体发生变化引起的,退火过程中材料发生结晶现象,从而使导线的疲劳强度变小。研究结果在一定程度上反映了退火温度与导线疲劳性能的变化规律,为工程应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] MCCONNELL K G, ZEMKE W P. A model to predict the coupled axial torsion properties of ACSR electrical conductors [J]. *Experimental Mechanics*, 1982, 22(7): 237–244.
- [2] 狐冠宇. 节能导线在输电工程中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [3] 刘佳琼, 唐震, 郑清丽, 等. 大型山火发生时输电导线温度及力学参数的计算分析 [J]. *太原理工大学学报*, 2017, 48(5): 854–860.
LIU J Q, TANG Z, ZHENG Q L, et al. Calculation and analysis of temperature and mechanical parameters of transmission lines when large wildfires take place [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2017, 48(5): 854–860.
- [4] FLEMING J F, ATKINS R S, MOZER J D. A program for longitudinal load analysis of electric transmission lines [J]. *Computers & Structures*, 1978, 9(3): 237–253.
- [5] JOYCE V, ABELL J S, GREENOUGH R D, et al. Magnetisation and magnetostriction in rare earth-iron alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(10): 5414–5416.
- [6] MORRIS D G, HARRIES D R. Recovery of a creep-deformed Type 316 stainless steel [J]. *Journal of Materials Science*, 1979, 14(11): 2625–2636.
- [7] 关志成, 张福增, 王国利, 等. 我国特高压的特有技术问题 [J]. *电力设备*, 2006, 7(1): 1–4.
GUAN Z C, ZHANG F Z, WANG G L, et al. Peculiar technology problems of UHV in China [J]. *Electrical Equipment*, 2006, 7(1): 1–4.
- [8] FONSECA J R, TAN A L, SILVA R P, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines [J].

- IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687–694.
- [9] 张洁. 输电线路缺陷在线监控系统设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] 窦飞, 乔黎伟. 架空线路输电能力计算 [J]. 电力建设, 2010, 31(12): 23–25.
DOU F, QIAO L W. Transmission capability calculation of overhead transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(12): 23–25.
- [11] 上海电缆研究所. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179-2008 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- [12] 曹建安, 文雨松. 锈蚀钢筋的疲劳试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 1998(4): 15–18.
CAO J A, WEN Y S. Fatigue experimental study on corrosion reinforcement [J]. Journal of Changsha Railway University, 1998(4): 15–18.
- [13] 刘佳琼, 李建宾, 秦浩, 等. 山火过后 JL/G1A-400/35 高压线的力学性能测试研究 [C]//力学与工程应用. 2016.
- [14] ZHANG P, YAN H, XU P, et al. Influence of different annealing temperatures and cooling rates on amorphous and crystalline composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(23): 4981–4987.
- [15] LEE D D, SHIM J M, KIM Y D, et al. Mechanical and electrical characteristics analysis of the ACSR affected by high temperature [J]. Rare Metals, 2011, 30(1): 311–315.
- [16] WANG T, TANG Z, WANG X, et al. Experimental research on mechanical properties of high voltage transmission lines after the simulated wildfires [C]//2nd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering. 2015, 34: 06003.

Experimental Analysis of Fatigue Performance in Transmission Lines at Different Annealing Temperatures

REN Xianda¹, LIU Jiaqiong¹, TANG Zhen², WU Xiaogang¹, CHEN Weiyi¹

(1. Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, School of Biomedical Engineering,

Taiyuan Polytechnic University, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Transmission line is the important equipment to transport electrical energy through power grid. Mountain fires are frequent events in recent years, which severely damages the safe operation of the high voltage transmission lines. Therefore, it is very important to study the mechanical characteristics of transmission lines after mountain fire. Based on the simulation test of transmission lines in the mountain fire, we studied the effects of the annealing temperature on the fatigue of overhead transmission lines. The fatigue failure of the transmission lines in aeolian vibration was reflected in the continuous axial fatigue tensile state. First, we conducted an experiment by the thermostatic tube X resistance furnaces to stimulate different transmission lines (JL/G1A-400/35, JL/G1A-300/25, JL/G1A-240/30, JL/G1A-300/40) burned in the mountain fire at different temperatures. Then, we carried out a fatigue tensile test on the single transmission line, and found that the frequency of fatigue tensile failure was correlated with temperature. Furthermore, we compared the data between new transmission lines and those burned in an actual mountain fire. Finally, we proposed reference for the protection of transmission lines in a mountain fire and prevention against being burned. The results showed that the fatigue limit of wires was reduced with the rise of the temperature. When the temperature was between 250 °C and 300 °C, the tensile cycle times decreases sharply; when the temperature is above 300 °C, it tended to be stable.

Keywords: overhead line conductors; fatigue; annealing temperature; mountain fire