

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.225

大跨越架空输电导线铝部应力分布试验

汪峰¹, 曾超¹, 薛春林², 温作铭²

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 华东电力设计院有限公司, 上海 200063)

摘要: 为了掌握大跨越架空输电导线铝部应力空间分布特性, 以 JLHA1/G6A-500/280 型特强钢芯铝合金导线为研究对象, 采用铝股丝表面激光刻槽, 内嵌高灵敏、超大复用容量超弱光纤光栅, 搭建了大跨越输电导线铝部应力试验平台, 研究了不同张力条件下大跨越架空输电导线铝部应力分布规律, 建立了大跨越导线实体有限元模型, 分析了铝股应力分布特征, 并验证了试验结果的正确性。结果表明: 导线承受张力作用时, 外层铝股和次外层铝股应力不同, 外层铝股应力小于次外层铝股应力, 导线同层铝股应力基本相同; 铝股应力随导线张力的增大呈线性增大趋势, 张力每增大 1%, 铝股应力增大约 10%。不同导线张力作用时钢股和铝股应力均呈现环状分层特性, 铝股平均应力小于钢股平均应力, 铝部和钢股应力比约为 3:7; 外层和次外层铝合金股丝应力沿圆周向分布不均匀, 建议大跨越导线线型设计时考虑铝股丝分层特性。

关键词: 大跨越输电导线; 超弱光纤光栅; 铝部应力; 分层特性; 试验研究

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)03-066-09

Aluminum stress distribution of long-span transmission line

WANG Feng¹, ZENG Chao¹, XUE Chunlin², WEN Zuoming²

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, P. R. China; 2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200063, P. R. China)

Abstract: To analyze the spatial distribution of aluminum stress in long-span overhead transmission line, this study focused on the JLHA1/G6A-500/280 ultra strong steel cored aluminum alloy conductor. A stress test platform for aluminum in long-span conductors was established using laser grooving on the aluminum strand and embedding ultra weak fiber gratings known for their high sensitivity and super multiplexing capacity. The research investigated the aluminum stress distribution in the long-span overhead transmission conductor under various tension conditions. A finite element model of the long-span conductor was created, and the stress distribution characteristics of the aluminum strand was analyzed, with the test results validated against the model. The results show that under tension, the stress in the outer aluminum strand differs from that in the sub outer aluminum strand, with the outer aluminum strand experiencing lower stress. The stress within the same layer of the conductor remains consistent. The aluminum strand stress increases linearly with the increase of conductor tension, with a roughly 10% increase in aluminum strand stress for every 1% increase in tension. Under different

收稿日期: 2021-11-09 网络出版日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778343); 中国能源建设集团规划设计有限公司科研资助项目(GSKJ2-D03-2020)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51778343) and Scientific Research Project of China Energy Construction Group Planning and Design Co., Ltd.(GSKJ2-D03-2020).

作者简介: 汪峰(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程索类结构振动控制研究, (E-mail) wanggoody@126.com。

conductor tensions, both steel and aluminum strands show ring delamination characteristics. The average stress in the aluminum strand is less than that in the steel strand, with a stress ratio of approximately 3:7 between aluminum and steel strands. Additionally, the stress distribution of the aluminum alloy strand in the outer layer and sub outer layer is uneven along the circumferential direction. This study suggests considering the delamination characteristics of the aluminum strand in the linear design of long-span conductors.

Keywords: long-span transmission line; ultra-weak fiber grating; aluminum part stress; layer characteristics; experimental study

大跨越输电线多由高强度镀锌钢芯和外层铝合金股丝绞制而成,其钢芯和铝股层数多,螺旋形态复杂。现有导线设计时,往往忽略铝部应力或作简易的估算^[1],但随着导线跨越档距变长,输送容量增大^[2],铝部应力逐渐成为发挥导线机械性能的控制性因素。大跨越架空输电线路档距大、悬挂点高,相关张力试验研究较少^[3-4]。因此,开展大跨越架空输电线铝部应力研究具有十分重要的意义。

目前,针对架空输电线导线力学特性,国内外学者从理论、数值和试验角度进行了广泛研究,取得了丰富的研究成果。Frigerio等^[5]提出了钢丝绳内各股丝中心线的数学表示,并通过CATIA和Matlab展示了钢丝绳的建模过程。蔡斯特等^[6-7]推导了绞线各层股丝的应力分配数值计算公式;Liu等^[8]建立了2种典型导线的有限元模型,并仿真模拟了导线在张力作用下的力学性能;Kmet等^[9]建立了5层结构绞线三维模型,研究了导线受拉与受弯状态下的应力变化规律,通过拉伸与弯曲的静力试验,验证了仿真模拟结果;秦力等^[10]通过仿真模拟发现导线夹持区的应力集中部位处于U型螺栓与悬垂线夹出口处;李培生等^[11]通过建立三维实体模型和有限元模型对导线截面的应力分布情况进行了分析;卢银均等^[12]研究了弯曲状态下的导线应力与变形规律;Feyrer^[13]分析了拉伸载荷下的钢丝绳应力以及张力拉伸试验方法;周昕恺等^[14]分析了荷载一定时导线的应力-应变关系;黄欲成等^[15]建立了导线的三维有限元模型,研究了大跨越导线钢芯和铝部应力分布规律;芮晓明等^[16]构建了导线三维模型,研究了导线应力分层特性,并在导线表面粘贴强光栅,研究导线张力与应力关系;祝贺等^[17-18]分析了不同弯曲状态下导线分层应力特性,并在小截面导线粘贴钢筋应变片,测量导线在拉力作用下的铝股应力。

综上所述,大部分研究从理论和有限元模拟角度,开展了输电导线的结构特性以及股丝应力研究,但从试验角度研究大跨越输电导线铝部应力较少。以往的试验多采用传统的表贴式应变计测量外层铝股应力,大跨越输电线由于钢芯和铝股层数多,螺旋形态复杂,在运行张力作用下次外层和外层铝股应力如何分布,尚未有明确结论。因此,文中以JLHA1/G6A-500/280型特强钢芯铝合金导线为对象,通过在次外层和外层铝股表面激光刻槽,内嵌超弱分布式光纤光栅方法,开展大跨越架空输电导线铝部应力试验研究,并与数值模拟结果进行对比验证,揭示大跨越架空输电导线铝部应力空间分布规律。研究结果为大跨越输电导线的铝部应力设计提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验对象为JLHA1/G6A-500/280型特强钢芯铝合金大跨越输电导线,该导线共6层股丝,额定拉断力(rated tensile strength, RTS) $F_{RTS}=676.2$ kN,详细结构参数如表1所示。为了测试导线铝部应力分布,选择2根铝合金股丝,首先对铝合金表层进行刻槽处理,为避免影响铝合金股丝的强度,刻槽深度取1 mm,然后将直径0.25 mm超弱光纤光栅封装填充到刻槽内,制成复合光纤光栅的铝合金股丝。最后将复合光纤光栅的铝合金股丝、普通的铝合金股丝和钢股丝,按照导线结构组成捻制成300 m长导线,截取2段导线作为试验样品。

试验平台由固定端、张拉端和光纤测试系统组成,试验平台布置图,如图1所示。根据GB/T1179-2017建议^[19],考虑实际情况,试验档距取13 m。平台两端采用预绞丝固定导线,张拉端采用拉力试验机进行张拉,光

纤波长采用大容量超弱光纤光栅分析仪进行数据采集。试验导线安装完毕后,进行张拉,采集不同张力条件下铝合金股丝应力应变。

表1 导线参数表
Table 1 Parameters of wires

第 <i>i</i> 层/根数	股线直径 <i>d</i> /mm	节圆直径 <i>D</i> /mm	外径 D_w /mm	节径比	节距 <i>h</i> /mm	捻角 α /(°)	弹性模量/ GPa	泊松比 ν
中心层/1根	3.12		3.12				210	0.28
第1层/6根	3.12	6.24	9.36	22.19	207.70	5.39	210	0.28
第2层/12根	3.12	12.48	15.60	20.60	321.36	6.96	210	0.28
第3层/18根	3.12	18.72	21.84	16.48	359.92	9.28	210	0.28
第4层/21根	3.64	25.48	29.12	14.82	431.56	10.51	55	0.30
第5层/27根	3.64	32.76	36.40	11.04	401.86	14.37	55	0.30

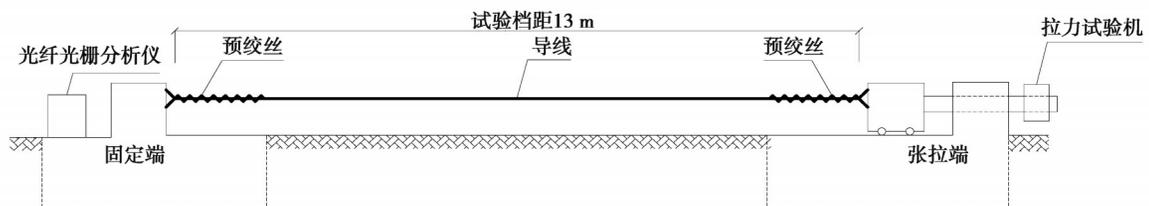
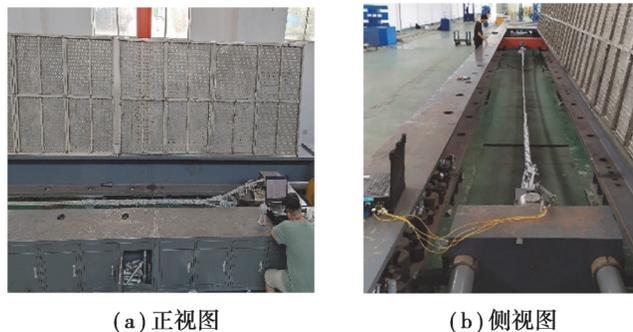


图1 试验平台布置图

Fig. 1 Test platform layout

1.2 加载装置与加载制度

加载设备选用微机控制的拉力试验机,最大载荷为300 kN,在整个试验过程中,张力变化小于0.5%,现场加载装置如图2所示。试验采用荷载控制的加载制度,分成预加载阶段、加载阶段和卸载阶段。预载阶段施加 $F_{RTS}=13.5$ kN(约2%的导线额断张拉力)导线张力,并持荷10 min消除非弹性变形,同时采集导线应变初始数据。加载阶段的荷载施加步长为800 N/s,采用逐级加载,加载至每一级后,持荷12 min保证荷载值达到稳定。卸载阶段采取分级卸载至张力为零。



(a) 正视图

(b) 侧视图

图2 现场试验平台

Fig. 2 Test platform

1.3 试验测点布置和试验工况

为了获得导线纵向不同位置的铝合金股丝应力变化,试验采用栅距为0.3 m的高密度超弱光纤光栅uwFBG(ultra-weak fiber bragg grating),超弱光纤光栅测点纵向布置和横截面布置如图3所示。超弱光纤光栅的结构与传统光纤光栅(反射率一般在90%)类似,但反射率一般低于0.1%,极低的反射率可以大幅提高

超弱光栅的复用性能,也使光栅阵列具备了一些新的传感机制,符合本次试验需求。

试验采用RS-HFBGA-04型大容量超弱光纤光栅分析仪,监测不同导线张力条件下导线铝部应力应变。导线处于加载阶段时,采集仪自动记录每个荷载工况下光纤波长变化值。大跨越导线运行张力一般取 F_{RTS} 为18%~25%^[20],考虑张拉条件,并适当加密张力区间,试验张力 F_{RTS} 从15%开始施加,到40%结束。在 F_{RTS} 为20%~25%张力区间内进行工况加密,张力间隔 $F_{RTS}=0.5%$,总共25个工况。

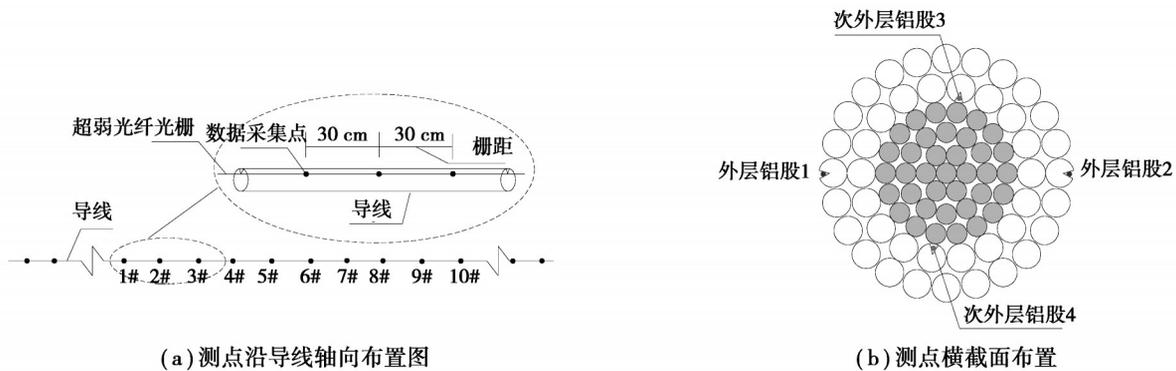


图3 光纤光栅测点布置图

Fig. 3 Layout of fiber grating measuring points

试验前选取内嵌光纤光栅的铝合金股丝进行张拉标定,以便根据光纤光栅的波长,计算铝股应力值,通过标定,测量波长与张力斜率 K ,标定结果 K 为1.076。

2 试验结果分析

目前,大跨越导线铝部应力简易理论计算值^[1]为

$$\sigma_a = \frac{T - (\alpha_a - \alpha_s) \cdot t A_s \cdot E_s \cdot E_a}{A_s \cdot E_s + A_a \cdot E_a} \cdot E_a, \quad (1)$$

式中: σ_a 为铝合金股丝轴向应力,MPa; T 为导线张力,N; α_a 为铝合金股丝膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; α_s 为钢股丝膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$; t 为使用温度与制造温度差值, $^\circ\text{C}$; A_s 为钢股总面积, mm^2 ; A_a 为铝股总面积, mm^2 ; E_s 为钢芯弹性模量,MPa; E_a 为铝合金弹性模量,MPa。

依据公式(1)计算导线铝股平均应力时,实际上忽略导线分层特性,即内外层铝股受力的差异。

2.1 铝股轴力分布

导线张力 $F_{RTS}=15\%$ 、20%、25%时,试验档距的档中10个测点的铝部轴力测试结果以及与理论值的对比如图4所示。

由图4可知,同一导线张力作用下,外层铝股和次外层铝股轴力不同,外层铝股轴力小于次外层铝股轴力,但同层铝股轴力基本相同。在 $F_{RTS}=15\%$ 张力作用下,外层铝股轴力平均值约为0.60 kN,次外层铝股轴力平均值约为1.30 kN。另外,导线张力 $F_{RTS}=15\%$ 增大到25%时,外层铝股和次外层铝股轴力逐渐增大。张力 $F_{RTS}=15\%$ 时外层铝股轴力平均值在0.60 kN,张力 F_{RTS} 增大到25%时,外层铝股轴力平均值增大到1.22 kN左右。由此可见,张力 F_{RTS} 每增大1%时,外层铝股轴力增大约0.06 kN,增长率约为10.3%。同样条件下,次外层铝股轴力增大约0.11 kN,增长率约为8.5%。由此可得,张力 F_{RTS} 每增大1%,外层铝股和次外层铝股轴力平均增大约为9.4%。

由图4还可知,沿着导线轴向,同层铝股轴力基本一致,但并不完全相同。例如, $F_{RTS}=15\%$ 张力条件下,次外层铝股3的轴力在1.40 kN左右变化,而次外层铝股4的轴力在1.21 kN左右变化,两股丝的平均轴力约为1.30 kN。其原因是,导线绞制后,次外层铝股3和次外层铝股4中的光纤光栅所处位置存在偏差。

由式(1)可计算 $F_{RTS}=15\%$ 、20%、25%时3种导线张力,导线铝部应力分别为0.67、0.89、1.14 kN。对比理论值和试验结果发现,铝股轴力理论计算值和外层铝股轴力值比较接近,但是明显小于次外层铝股轴力值。由此可知,大跨越导线各层铝股受力并不相同,外层铝股轴力小于次外层。建议大跨越导线设计时考虑导线铝

股分层特性。

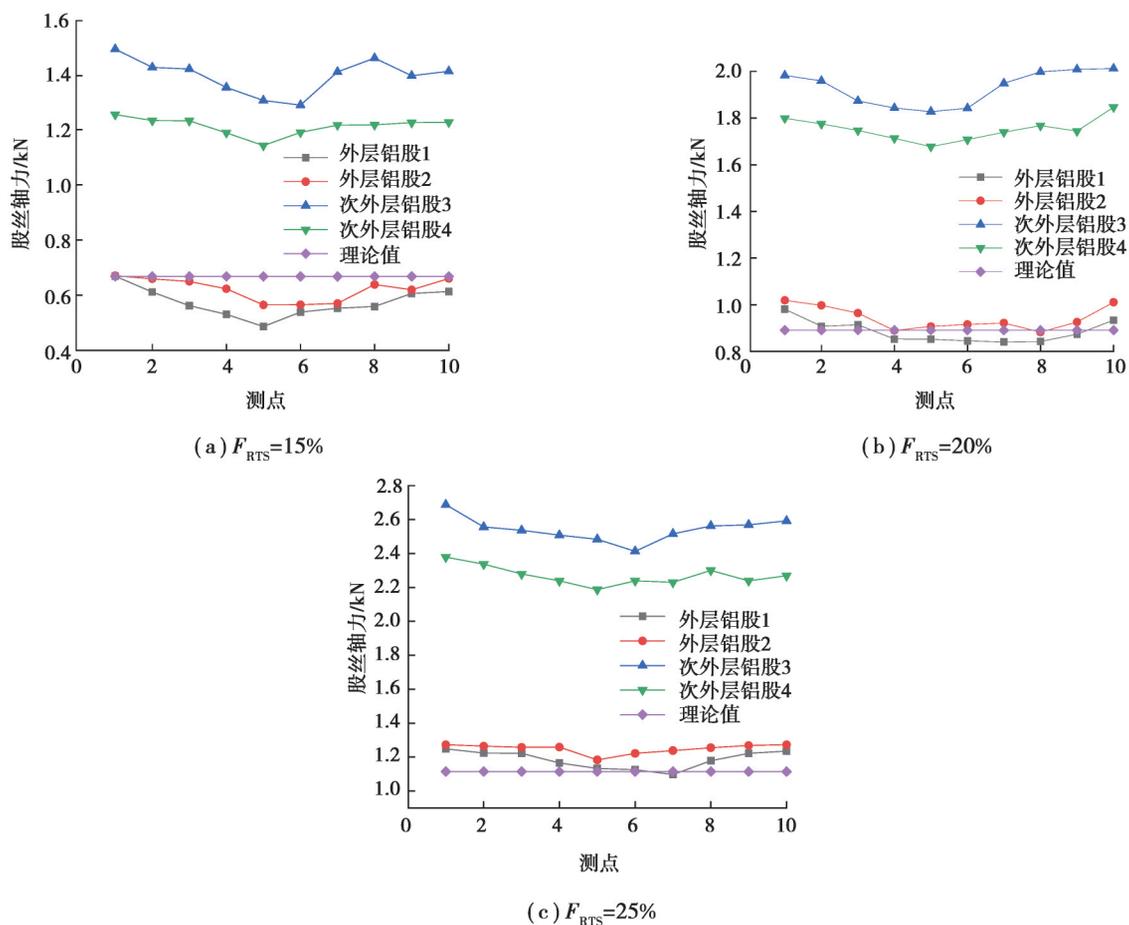


图4 不同张力作用下铝合金股丝轴力变化

Fig. 4 Axial force changes of aluminum strands under different tensions

2.2 铝股轴应力分布

导线张力从101.43 kN ($F_{RTS}=15\%$)逐步增加到270.48 kN ($F_{RTS}=40\%$)时,对于样品导线1,试验档距的档中10个测点的轴应力测试结果如图5所示。对于样品导线2,试验档距的档中10个测点的轴应力测试结果如图6所示。图5和图6的纵坐标铝股丝应力均为档中10个测点应力的平均值。

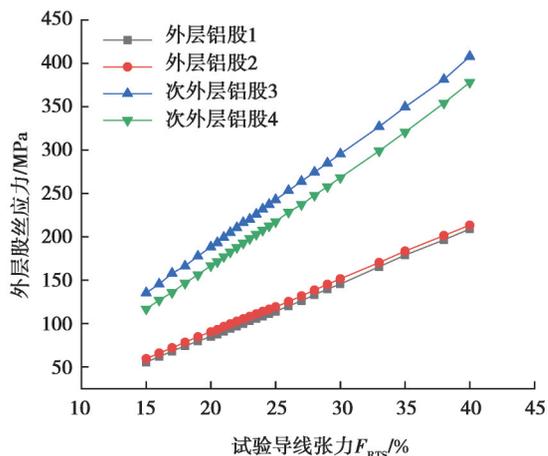


图5 样品导线1铝股应力变化

Fig.5 Aluminum strand stress of the first wire

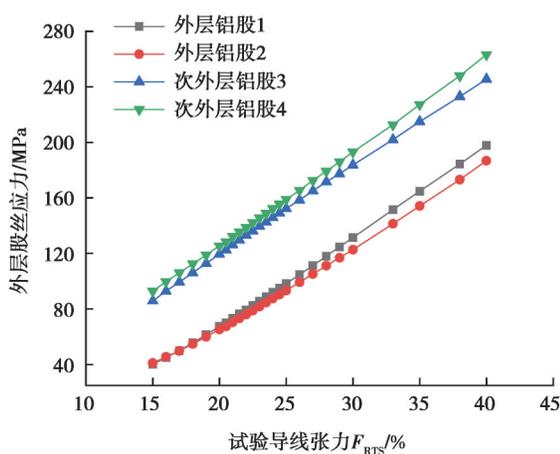


图6 样品导线2铝股应力变化

Fig.6 Aluminum strand stress of the second wire

由图5可知,随着导线张力增大,外层铝股应力与次外层铝股应力均呈现线性增大趋势,且外层铝股应力小于次外层铝股应力。导线张力 F_{RTS} 从15%,外层铝股应力是57.36 MPa,内层铝股应力是125.06 MPa,导线张力 F_{RTS} 增大到40%,外层铝股应力是211.34 MPa,内层铝股应力是392.86 MPa。外层铝股的轴向应力增大10.7%,次外层铝股轴向应力值相对增大8.6%。由此可见,铝股应力随导线张力线性增大,导线张力 F_{RTS} 每增加1%,外层和次外层铝股应力平均增大约9.7%。

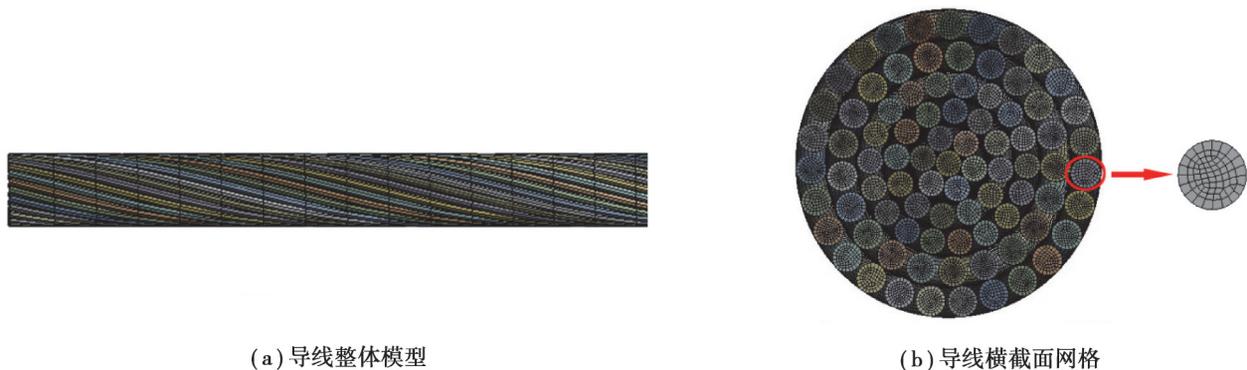
由图6可知,样品导线2的铝部应力分布规律和样品导线1相似,铝股应力随导线张力线性增大。导线张力 F_{RTS} 每增加1%,外层和次外层铝股应力平均增大10.9%。

由图5和图6可知,铝股应力随导线张力呈现线性增大的趋势,张力 F_{RTS} 每增大1%,铝股轴向应力增大约10%。但在相同导线张力条件下,样品导线1和样品导线2铝股应力值不完全相同,其原因是股丝绞制过程中,由于股丝较长,产生了扭转现象,光纤的相对位置发生了变化,最终导致2个样品的测试值存在差异。

3 数值模拟分析

导线虽然布置了分布式光纤光栅,可测量沿导线纵向不同位置处的外层、次外层铝股应力,但铝股丝沿圆周方向的应力分布需要借助有限元方法获取,同时借助有限元模拟可对验证试验测试结果。因此,文中采用有限元软件构建了相同型号导线的三维有限元模型。

考虑计算机时间和计算效率,导线模型长度取50 mm。采用Solid186实体单元,构建导线实体有限元模型,考虑股丝相邻层的摩擦接触作用。导线模型沿导线纵向分为20等份,共1 556 499个节点,262 880个单元。模型一端固定约束,另一端面外设置刚性点,将此端面的节点和刚性点进行耦合处理,以便通过该刚性点施加导线张力。导线有限元模型如图7所示。



(a) 导线整体模型

(b) 导线横截面网格

图7 导线有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the wire

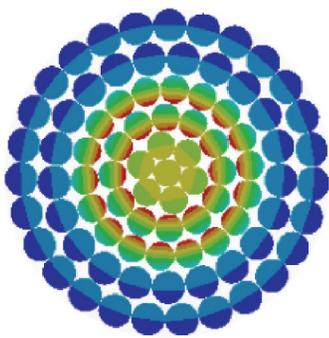
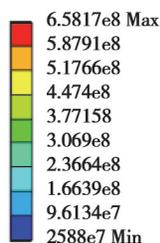
3.1 导线截面分层应力

利用有限元模型,分别计算导线张力 F_{RTS} 为15%、20%、25%、30%、35%、40%额断张力时铝股应力。限于篇幅,仅列出了张力 $F_{RTS}=25\%$ 时,导线档中截面应力分布结果如图8所示。图8(b)中的轴向平均应力值,通过对单根股丝截面各个不同应力位置进行应力积分,最后再平均分布到整个股丝截面。

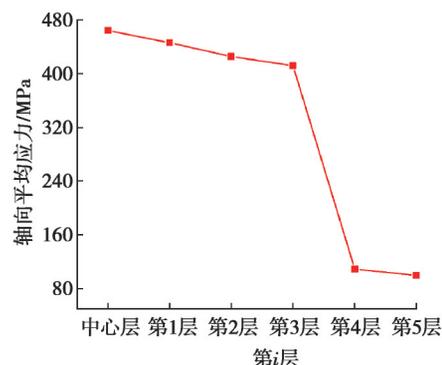
由图8(a)可知,对导线整体截面而言,张力 F_{RTS} 为25%额断张力时,导线钢股和铝股应力呈现环状分层分布,各层钢股、铝股轴向应力变化呈由内至外逐渐变小的趋势。由图8(b)可知,对于钢股丝而言,第3层钢股丝平均应力小于中心层钢股丝平均应力,说明从内到外钢股应力逐渐减小。对于铝股而言,第5层铝股丝的平均应力小于第4层铝股丝的平均应力,说明铝股次外层应力大于铝股外层应力,铝部应力分布规律与试验结果基本吻合。

由图8(b)还可知,外层铝股应力最大值为109.05 MPa,内层钢股应力最大值为464.17 MPa。计算统计导线所有铝股和钢股丝应力,可得该导线的铝部和钢股应力比约为3:7。说明该大跨越JLHA1/G6A-500/280型导线的钢股层承担了较大张力作用,铝股主要是传输电能。

C: shiyan0.25-500280middle
Equivalent Stress 7
Type: Equivalent (von-ises) Stress
Unit: Pa
Time: 1



(a) 导线档中截面应力云图



(b) 导线各层股丝轴向平均应力

图8 $F_{RTS}=25\%$ 时导线各层股丝应力Fig.8 Strand stress of each layer of wire under $F_{RTS}=25\%$

3.2 铝合金股丝圆周方向应力

单根铝合金股丝圆周方向应力划分为46等份,将截面圆周最大应力值点设为 0° ,逆时针方向为角度增大的方向,计算导线铝股圆周方向应力变化,如图9所示。

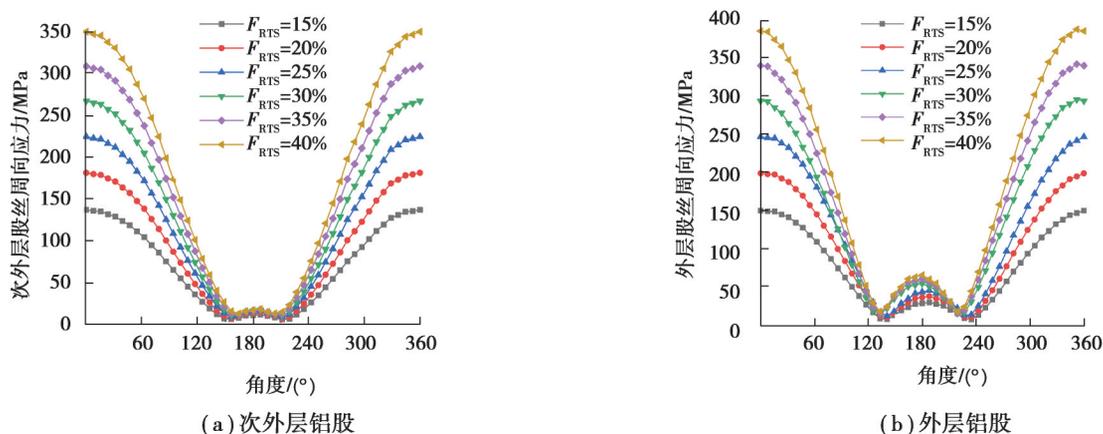


图9 铝股周向应力变化

Fig.9 Circumferential stress variation of aluminum strand

由图9可知,不同导线张力条件下,铝合金股丝沿圆周方向应力分布不均匀。导线张力越大,相同圆周角度的铝合金股丝单元应力呈现增大趋势。外层和次外层铝股均在 0° 时圆周应力最大,外层铝股大约在 130° 位置时圆周应力最小,而次外层铝股大约在 150° 位置时圆周应力最小,2层铝股出现最小应力位置存在相位差。其原因是外层和次外层铝股捻制角度不同,外层捻角为 10.51° ,而内层捻角为 14.37° 。

3.3 试验结果与仿真对比

不同导线张力条件下,2根样品导线的外层与次外层铝股应力试验测试值和有限元模拟计算值对比如图10所示。图中导线1-1代表样品导线1的外层铝股1,导线1-2代表导线1的外层铝股2,导线1-3代表导线1的次外层铝股3,导线1-4代表导线1的次外层铝股4,导线2-1、2-2、2-3和2-4分别代表样品2的外层和次外层铝股。

由图10可知,整体而言,不同导线张力条件下,样品导线1和样品导线2的铝股应力试验值处于有限元模拟计算最大值和最小值之间,说明了试验结果的正确性。由图10(b)可知,样品导线1的次外层铝股应力大于模拟值,个别数据有偏差,其原因是股丝刻槽嵌入光纤后,绞制成导线过程中出现扭转偏差,导致测试所得的应力值大于模拟值。

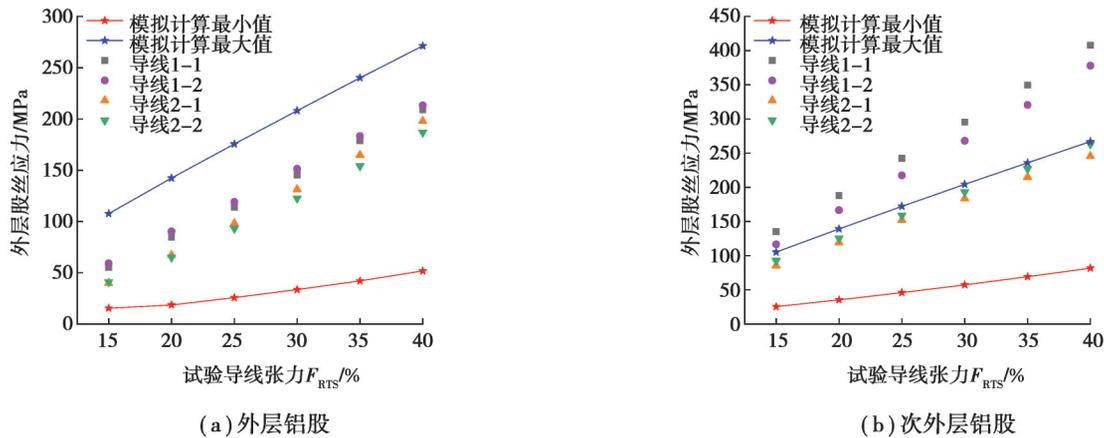


图10 铝股应力模拟计算值与试验值对比

Fig.10 Comparison of simulation and experimental values

4 结论

文中采用对大跨越架空导线铝合金股丝内嵌超弱光纤光栅的方法,测试了导线外层与次外层铝股的应力随导线张力变化而变化的规律。并通过有限元仿真计算对比了试验结果,得出如下结论:

1)相同导线张力作用下,外层铝股和次外层铝股轴力不同,外层铝股轴力小于次外层铝股轴力,导线同层铝股轴力基本相同。大跨越导线铝部应力计算建议考虑导线铝股分层特性。

2)随着导线张力的增大,外层铝股应力与次外层铝股应力均呈线性增大趋势,外层铝股轴向应力小于次外层铝股轴向应力。铝股应力随导线张力线性增大,导线张力 F_{RTS} 每增加1%,外层和次外层铝股应力平均增大大约10%。

3)从导线整体截面而言,导线张力作用下,导线钢股和铝股应力呈现环状分层,且外层铝股平均应力小于内层钢股平均应力。导线铝部和钢股应力比约为3:7。

4)导线张力作用下,铝合金股丝应力沿圆周向应力分布不均匀。试验测得的导线铝股应力处于模拟计算最大值和最小值之间,说明试验结果是正确的。

参考文献

- [1] 温作铭,叶鸿声,王彬,等. 1 000 kV 苏通长江大跨越输电线路导线选择[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 70-75.
Wen Z M, Ye H S, Wang B, et al. Conductor selection of 1 000 kV sutong power transmission line large crossing over Yangtze River[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4): 70-75. (in Chinese)
- [2] 林锐,张礼朝,张培勇,等. 1 000 kV 特高压交流输电线路大跨越导线选型[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 91-98.
Lin R, Zhang L C, Zhang P Y, et al. Large-crossing conductor selection of 1 000 kV UHVAC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 91-98. (in Chinese)
- [3] 王洪,柳亦兵,王景朝,等. 大跨越架空线路防振辅助设计专家系统及应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 99-104.
Wang H, Liu Y B, Wang J C, et al. Application of anti-vibration aid-design expert system for long-span overhead line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 99-104. (in Chinese)
- [4] 汪峰,王丰,黄欲成,等. 大跨越输电导线自阻尼特性分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5646-5652, 5922.
Wang F, Wang F, Huang Y C, et al. Experimental study on self-damping characteristics of large span transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5646-5652, 5922. (in Chinese)
- [5] Frigerio M, Buehlmann P B, Buchheim J, et al. Analysis of the tensile response of a stranded conductor using a 3D finite element model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 106: 176-183.
- [6] 蔡斯特,倪海云,芮晓明. 张力分层特性在架空导线强度上的应用研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(S1): 49-51.
Cai S T, Ni H Y, Rui X M. Application of the layer characteristics to the intensity of overhead conductors[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(S1): 49-51. (in Chinese)

- [7] 蔡斯特, 芮晓明, 倪海云. 架空线路导线分层力学模型及应用[J]. 电力建设, 2009, 30(11): 8-12.
Cai S T, Rui X M, Ni H Y. Application and study on stratified mechanical model of overhead conductors[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(11): 8-12. (in Chinese)
- [8] Liu J Q, Yan B, Huang G Z, et al. Study on mechanical characteristics of conductors with three-dimensional finite-element models[J]. Royal Society Open Science, 2020, 7(5): 200309.
- [9] Kmet S, Stanova E, Fedorko G, et al. Experimental investigation and finite element analysis of a four-layered spiral strand bent over a curved support[J]. Engineering Structures, 2013, 57: 475-483.
- [10] 秦力, 刘芳卉, 宋阳. 碳纤维复合芯导线股线应力有限元分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 182-186.
Qin L, Liu F H, Song Y. Finite element analysis of ACCC strands stress[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(5): 182-186. (in Chinese)
- [11] 李培生, 熊捷, 刘国平, 等. 架空裸导线截面应力分析[J]. 机械设计与制造, 2020(7): 146-149, 155.
Li P S, Xiong J, Liu G P, et al. Section stress analysis of overhead conducting wires[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020 (7): 146-149, 155. (in Chinese)
- [12] 卢银均, 刘闯, 孟遂民. 钢芯铝绞线弯曲状态受力分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 66-69.
Lu Y J, Liu C, Meng S M. Stress analysis of bended state aluminum cable steel reinforced conductor[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(3): 66-69. (in Chinese)
- [13] Feyrer K. Wire ropes: tension, endurance, reliability[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [14] 周昕恺, 瞿畅, 刘苏苏, 等. 拉伸载荷下钢芯铝绞线的力学特性仿真分析[J]. 图学学报, 2020, 41(2): 288-294.
Zhou X K, Qu C, Liu S S, et al. Simulation analysis on mechanical properties of aluminium cable steel reinforced under tensile load[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(2): 288-294. (in Chinese)
- [15] 黄欲成, 陈池, 汪峰, 等. 大跨越架空输电导线钢芯铝股应力分布特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 76-81.
Huang Y C, Chen C, Wang F, et al. Stress distribution characteristics of steel core and aluminum strand of large span overhead transmission line[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(4): 76-81. (in Chinese)
- [16] 芮晓明, 赵国良, 赵泽中, 等. 输电导线新型模型的应力分层特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 57-64, 107.
Rui X M, Zhao G L, Zhao Z Z, et al. Research on stress layering characteristics of new transmission conductor model[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(3): 57-64, 107. (in Chinese)
- [17] 祝贺, 刘雨菲, 张瑾, 等. 输电线路导线分层力学特性仿真及试验研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1812-1817, 1878.
Zhu H, Liu Y F, Zhang J, et al. Simulation and experimental study on layered mechanical characteristics of transmission lines [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1812-1817, 1878. (in Chinese)
- [18] 祝贺, 刘雨菲, 张瑾, 等. 输电线路弯曲导线分层力学特性模型及仿真分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 162-166.
Zhu H, Liu Y F, Zhang J, et al. Modeling and simulation analysis of layered mechanical characteristics of bending wires in transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 162-166. (in Chinese)
- [19] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 圆线同心架空导线: GB/T1179-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 5-10.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Administration Standardization. Round wire concentric overhead wire: GB/T1179-2017[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd, 2017: 5-10.
- [20] 黄欲成, 汪峰, 刘鸿琳, 等. 张力对大跨越输电导线Bate阻尼线防振影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 869-878.
Huang Y C, Wang F, Liu H L, et al. Effect of tension on vibration resistance of long-span transmission line with Bate damping line[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(5): 869-878. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)