

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.09.010

引用格式:丁翰林,晏致涛,张璞.基于分离拉伸试验的钢芯铝绞线力学性能研究[J].重庆大学学报,2025,48(9):104-112.



基于分离拉伸试验的钢芯铝绞线力学性能研究

丁翰林¹,晏致涛¹,张璞²

(1.重庆科技大学建筑工程学院,重庆 401331;2.重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

摘要:由于钢芯铝绞线不同材料之间在拉伸时滑移导致夹持困难,传统的钢芯铝绞线拉伸实验误差较大。文中采用钢绞线和铝绞线分开试验的方法,分析 20 °C 下钢芯铝绞线 ACSR-300/25 的拉伸力学性能规律,并对试验结果加以辅助验证。结果表明,铝绞线没有明显强化阶段和屈服阶段,钢绞线具有明显的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和局部颈缩阶段。铝绞线破坏部位都集中在试样 1/2~1/3 位置处,每根股线破坏部位有沿绞制方向的发展趋势。钢绞线破坏位置基本处于试样中部区域同一横截面上。分开对钢、铝绞线进行试验结果和钢芯铝绞线整体的模拟结果基本一致,证明了试验方法的可行性。

关键词:钢芯铝绞线;分离试验;力学性能;数值模拟

中图分类号:TB121

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)09-104-09

Study on the mechanical properties of aluminum cable steel reinforced conductors based on separated tensile tests

DING Hanlin¹, YAN Zhitao¹, ZHANG Pu²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Due to slippage between dissimilar materials during tensile loading, clamping aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductors presents challenges, often resulting in significant errors in conventional tensile tests. To address this, the tensile mechanical properties of ACSR-300/25 at 20 °C were studied by separate tensile tests on the steel and aluminum strands. Finite element analysis was conducted to validate the experimental findings. The results show that aluminum strands exhibit neither a distinct strengthening stage nor a clear yield point, while the steel strands show a well-defined elastic region, yield stage, strengthening phase, and localized necking. Damage in the aluminum strands predominantly occurs between 1/2 to 1/3 of the specimen length, with the failure pattern following the twisting direction. In contrast, damage in the steel strands is generally concentrated on the same cross-sectional plane near the specimen's center. The results of the separated tests for

收稿日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178458,51778097);重庆市教委项目(KJZD-M201901502)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52178458, 51778097), and Project of Chongqing Municipal Education Commission(KJZD-M201901502).

作者简介:丁翰林(1996—),男,硕士研究生,主要从事结构工程研究,(E-mail)wazjy@qq.com。

通信作者:晏致涛,男,教授,博士,博士生导师,(E-mail)zhitaoyan@qq.com。

both the steel and aluminum strands are in good agreement with the overall ACSR simulation result, confirming the feasibility and effectiveness of the proposed testing method.

Keywords: aluminum cable steel reinforced (ACSR); separated test; mechanical properties; numerical simulation

导线的张拉力学性能是研究输电线路垂度、风偏、舞动等的重要指标,是保证输电线路顺利、安全运行的关键问题。McConnell等^[1]测试出了钢芯铝绞线(aluminum cable steel reinforced, ACSR)的静态弯矩和轴力,计算出不同股线弯曲刚度,得到导线轴力和扭矩的关系。Liu等^[2]通过软件的迭代计算和 Levenberg-Marquardt方法训练出的三层神经网络模型,认为导线失效和铝线应力应变相关,建议限制钢芯铝绞线中铝绞线的应变。Azevedo等^[3]对横跨巴拉那河 460 kV 架空输电导线进行了失效分析,发现在靠近夹具区域内外铝绞线有明显的静、动力磨损痕迹,建议对钢芯铝绞线表面加润滑剂,避免金属和空气的直接接触。Rocha等^[4]和 Achiriloaiei等^[5]首先建立了架空导线 2 根接触股线的疲劳寿命预测模型,利用全新导线和运行多年的导线进行了拉伸实验,测定了其接触区的应力应变。Lalonde等^[6]通过梁接触建立导线多层有限元模型,并验证该模型的准确性。Judge等^[7]考虑弹塑性与接触条件,建立了七股钢绞线和多层螺旋导线在载荷作用下的三维有限元模型,提出了一种用于计算绞制导线受轴向力时应力状况的三维有限元建模方法。Farzaneh等^[8]通过统计学原理研究了整股钢芯铝绞线极限拉断力、单股铝绞线极限拉断力的分布,并推导了钢芯铝绞线的极限拉断力模型。

周昕恺等^[9]以导线有限元模型为基础,研究节径比、钢铝比等关键结构参数对钢芯铝绞线在拉伸荷载下力学性能的影响。于春蕾^[10]根据单股钢丝绳几何结构和钢丝接触特点,建立了单股钢丝绳力学性能预测的梁单元有限元模型。祝贺等^[11]在提出理论计算方法的同时,结合有限元仿真、试验测量 2 种手段,对比分析了输电线路钢芯铝绞线承受张拉荷载作用下的分层力学特性。芮晓明等^[12]提出了简化有效的有限元建模与仿真分析方法,较好地预测在张拉荷载作用下导线的应力状态。秦力等^[13]分析了输电线路钢芯铝绞线股线力学特性,对钢芯铝绞线进行建模,研究绞线应力的分布和应变的位置,发现钢芯铝绞线最外层的铝股线承担更多的压力,最先进入塑性应变阶段。

综上所述,导线 2 种材料中的拉伸特性各有不同,且每一层都有较大差异,目前还未有学者对此类差别进一步的量化分析。在较大荷载作用下,大直径导线在试验机上容易打滑,导致传统的单股钢芯铝绞线夹持实验很难实现。由于钢芯铝绞线为不同材料组成,为了防止不同材料变形造成的滑移,文中提出将钢芯铝绞线进行分离,单独进行钢芯和铝绞线试验,并运用有限元软件进行数值模拟以验证实验的准确性,最后得到钢芯铝绞线力学性能。

1 钢芯铝绞线轴向力学拉伸试验

1.1 试验方案

试验于中国兵器工业第五九研究所进行,钢芯铝绞线试件的型号为 ACSR-300/25,温度为 20 °C。试验设备如图 1 所示,采用 MTS322 万能试验机,与万能拉力试验机配套的保温箱 MTS651,具有良好的保温性能,能够保持温度 20 °C 恒定不变。

1.2 试件制作

由于钢芯铝绞线是由很多股绞线共同组成的特殊结构,用合适的夹具来辅助试验可以减小误差,防止应力集中,因

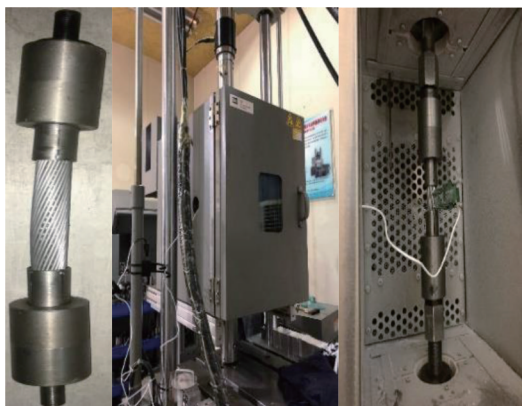


图 1 拉伸试验现场图片

Fig. 1 Tensile tests of aluminum strand

此设计相关夹具来辅助试验。根据规范《圆线同心绞架空导线》^[14]对钢芯铝绞线应力-应变试验要求,分别制作了钢绞线以及铝绞线的夹具,如图2和图3所示。由图可知,此套夹具由4部分组成。1号试件主要由内螺纹和外螺杆构成,内螺纹连接4号组件,外螺杆连接万能试验机拉伸螺纹夹具。2号试件为代替钢芯铝绞线内部钢芯部分,即填补抽去钢芯的空隙,为了使铝绞线端部充分“抱死”,2号试件上部设计为楔形。3号试件为固定铝绞线的楔形夹具部分,上部70 mm与2号试件上部70 mm相对应,通过外部和内部2组楔形结构充分与铝线压接;下部40 mm为过渡段,通过摩擦力与铝线紧密接触,能有效防止拉伸过程局部应力集中。4号试件为外层套筒部分,上部30 mm连接1号试件,下部70 mm与3号试件楔形部分紧密相连,在拉伸过程中,1号试件首先受力再传力到外层套筒4号试件,外层套筒下部通过与3号试件的有效接触,使得3号试件能与铝线达到越拉越紧的压接效果,保证铝绞线和3号试件不会发生打滑现象。



图2 铝绞线拉伸夹具实物图

Fig. 2 Tensile clamp of aluminum strands

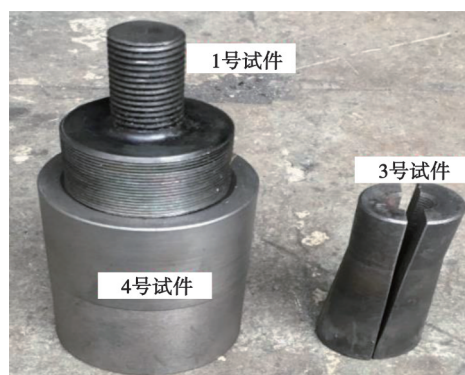


图3 钢绞线拉伸夹具实物图

Fig. 3 Tensile clamp of steel strands

钢绞线夹的夹持原理与铝绞线类似,只需改变3号试件尺寸大小和去掉2号试件即可,其中,3号试件同样配合外层套筒4号试件,与其紧密相连,能使得3号试件与钢绞线在拉伸过程中起到越拉越紧的压接效果。同时,3号试件依然设有40 mm过渡段,有效避免了端部应力集中。

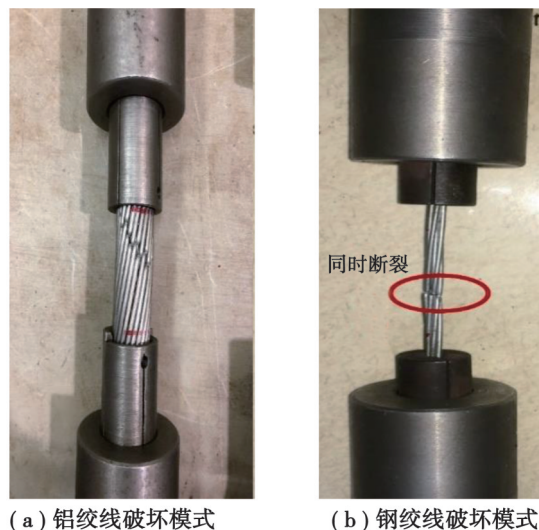
1.3 试验过程

首先,连接试验机等装置,打开电源进行预热,并在预热之后连接保温箱和液氮罐,同时保证整套装置的气密性,再将试件放置在保温箱中间位置,并将引伸计安装在试件中部,将温度调到20℃,待温度稳定5 min后,再开始实验。观察股线现象,直到拉断系统自动停止,针对相同温度重复进行2次试验,以保证结果的准确性。

1.4 实验结果

在铝绞线拉力试验中发现,铝绞线没有明显强化阶段和屈服阶段,当弹性模量变接近0后,立刻就进入局部颈缩破坏阶段,整根铝绞线迅速失去承受能力。外层铝股首先发生断裂破坏,再逐步向内层发展。铝股线破坏部位都集中在1/2~1/3位置处,每根股线破坏部位并不在同一个横截面内,而是呈现出沿绞制方向发展趋势。所有铝股线断口形状为典型拉伸锥形断口,有较明显颈缩现象,断口区域铝线较其他部位明显变软,如图4所示。

在钢绞线拉力试验中发现,钢绞线具有明显的4个阶段:弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和局部颈缩阶段。钢股线破



(a) 铝绞线破坏模式

(b) 钢绞线破坏模式

图4 钢绞线和铝绞线破坏模式

Fig. 4 Failure mode of steel and aluminum strand

坏位置基本处于试样中部区域,并且每根钢丝断裂位置都在同一横截面上。随着载荷逐步增加,7根钢股线均有较大伸长,钢线表面镀锌层逐渐脱落,伴随明显的断裂声,7根股线同时断裂。钢股线断口形状为典型杯锥形拉伸断口,颈缩现象明显,如图4(b)所示。

实验过程中,应力为0.03 GPa之前都处于压接终端存在松动导致的误差范围内,当应力为0.03 GPa之后,应力-应变曲线开始趋于稳定,从0.03 GPa到30%拉断力之间,应力-应变曲线可视为直线。在去掉试件端部的压接误差之后,便可得到钢绞线与铝绞线的弹性模量。由图5和图6可知,常温下铝绞线的弹性模量为41.3 GPa,钢绞线为166.3 GPa。

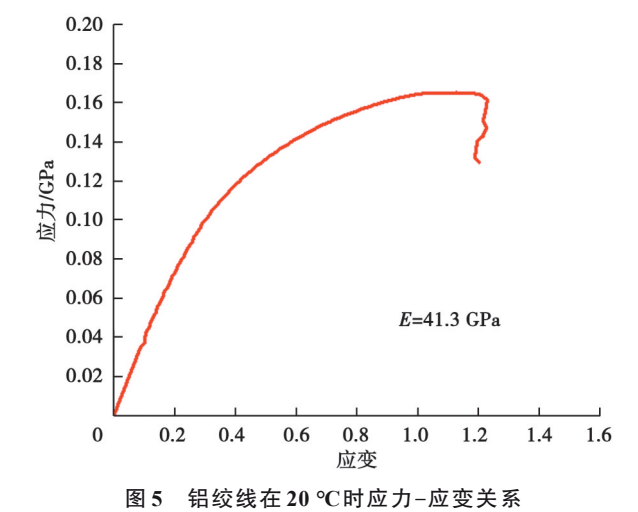


Fig.5 Aluminum strands' stress strain relationship at 20 °C

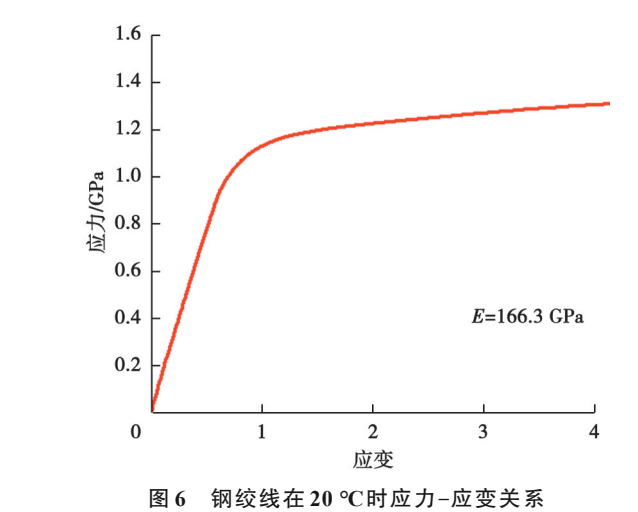


Fig.6 Steel strands' stress strain relationship at 20 °C

2 钢芯铝绞线力学性能数值模拟

对ACSR300/25型号钢芯铝绞线进行建模,考虑钢芯铝绞线材料的非线性,分析钢芯铝绞线拉伸试验的规律,为钢芯铝绞线拉伸力学性能的计算和设计提供理论基础,并与上述试验结果进行对比。

2.1 模型建立

分别用双线性随动强化模型BKIN和多线性随动强化模型KINH定义钢绞线以及铝绞线的材料属性。建立的钢芯铝绞线和钢绞线模型分别如图7和图8所示。

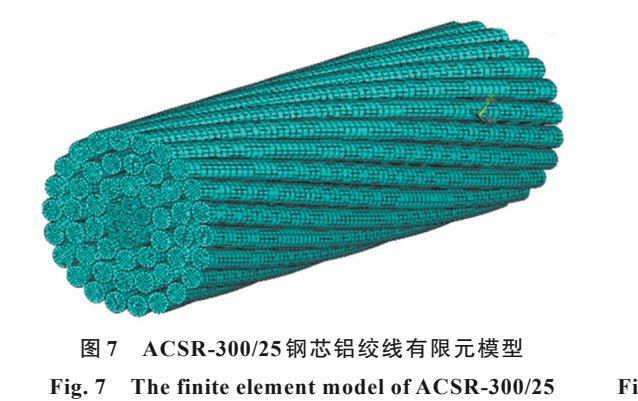


Fig. 7 The finite element model of ACSR-300/25

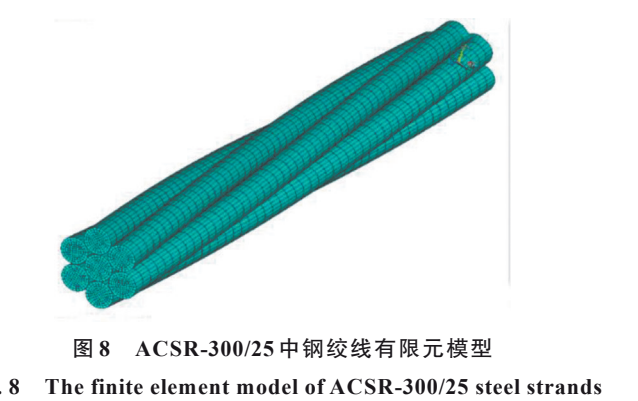


Fig. 8 The finite element model of ACSR-300/25 steel strands

2.2 钢绞线受力特性

由规范《架空绞线用镀锌钢线》^[15]可知,钢绞线的主要化学成分为碳素钢,外部镀锌,常称镀锌钢绞线,密度为7.8 g/cm³,常温下弹性模量为196~206 N/mm²,屈服强度为1 100~1 770 N/mm²。为了方便计算,在数值模拟时钢绞线的屈服强度均设置为1 280 N/mm²,再进行非线性计算,最终得到钢绞线的应力-应变分布。

图9为外层钢股线等效应力分布。由图可知,两端靠近10 mm为弹性加载段,可以忽略加载段由于端部受力集中产生的最大应力。在位移荷载作用下,内层导线除两端受力较大之外,其余部分受力较均匀,而外层钢股线等效应力最大值出现在与相邻层股线相接触且靠中间区域,相比于内层钢股线,外层钢股线所受应力最大。

由图10可知,外层钢线的等效塑性应变分布较均匀,内层应变分布与其相似,但是相比于内层钢线的应变外层钢绞线的等效塑性应变更集中于中部,且绞制的钢绞线等效应力等值线是沿着绞制的方向分布,外层绞线的应变大于内层绞线。

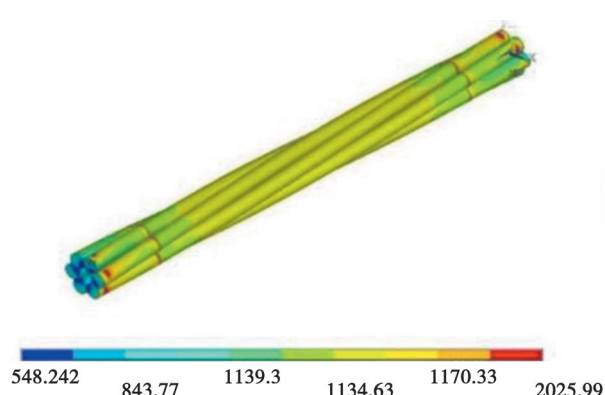


图9 外层钢股线等效应力分布

Fig. 9 Equivalent stress distribution of outer steel strands

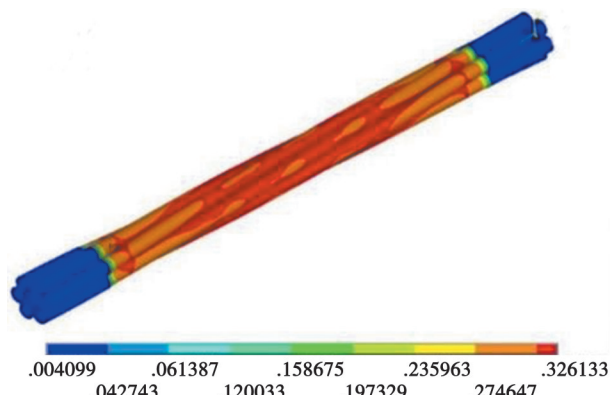


图10 外层钢股线等效塑性应变分布

Fig. 10 Equivalent plastic strain distribution of outer steel strands

2.3 铝绞线受力特性

ACSR型号的钢芯铝绞线中的铝绞线采用的材质为硬铝绞线。《架空绞线用硬铝线》^[16]中对硬铝线的材料进行了说明:硬铝线应用纯度的铝制成,其中铝的含量不应小于99%。由于铝合金的应力-应变曲线为多线性的应力-应变曲线,在进行数值模拟时,采用多线性随动强化模型KINH,需要定义多个应力应变点。参考王礼立等^[17]对纯铝L4R的应力-应变关系拟合的 $\sigma=1.82\varepsilon^{0.283}$ (10^3 kg/cm^2),对常温下铝绞线的应力-应变点进行设置,并将设置好的应力-应变关系代入铝绞线有限元模型,即可得到其应力-应变分布。

在位移荷载的作用下,各层铝绞线等效应力的分布较均匀,等效应力等值线的方向均沿着绞制的方向,不考虑加载端的应力分布,铝绞线中部最大应力出现在最外层铝绞线,其值达到303.5 kN,如图11所示。

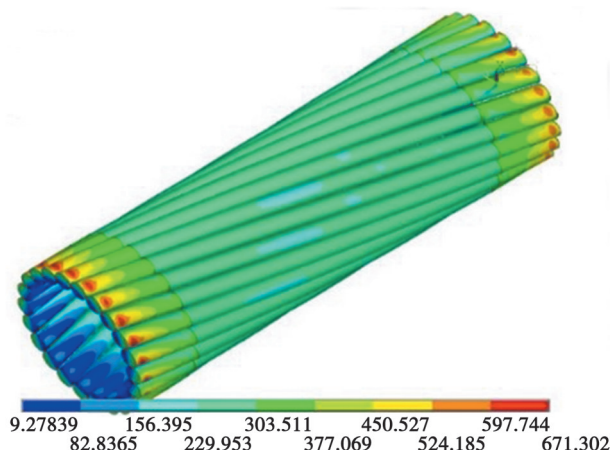


图11 最外层铝股线等效应力分布

Fig.11 Equivalent stress distribution of the outermost aluminum strands

在轴向位移荷载的作用下,各层铝绞线等效塑性应变的分布也呈现出明显的规律。最内层的铝绞线产生的等效塑性应变值最大,达到0.169。每层铝绞线的等效塑性应变的最大值均出现在1/2~1/3位置处,如图12所示。

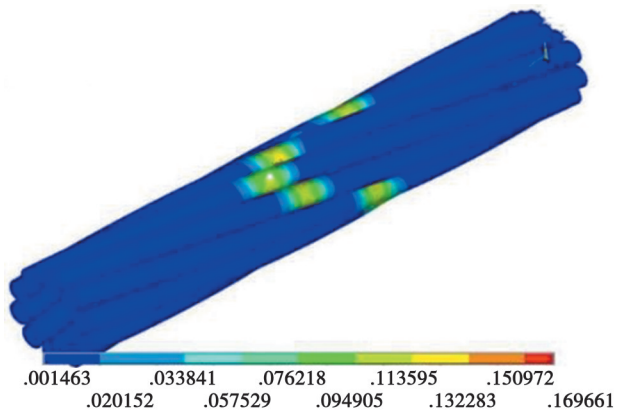


图 12 最内层铝股线等效塑性应变分布

Fig. 12 Equivalent plastic strain distribution of the innermost aluminum strands

3 模拟与试验结果对比

3.1 钢绞线力学性能对比分析

钢绞线在 20 °C下试验和数值模拟分别得到的应力-应变曲线,如图 13 所示。由图可知,在 20 °C时钢绞线在弹性阶段的应力-应变曲线和试验的数据吻合较好,发现数值模拟中钢绞线的塑性应变相对集中在中部,而试验中钢绞线的破坏位置也集在中部,可见塑性变形位置是相吻合的,可以证明钢绞线数值模型的建立是正确的,其设置的数据也是合理的。

3.2 铝绞线力学性能对比分析

铝绞线在 20 °C试验和数值模拟分别得到的应力-应变曲线,如图 14 所示。由图可知,铝绞线试验和模拟得到的应力-应变曲线吻合较好,两者之间的误差不超过 5%,由图 12 与图 4(b)所示数值模拟得到的铝绞线塑性应变值最大处出现位置和实验中铝绞线的破坏位置均集中在 1/2~1/3 处,且塑性应变分布与破坏位置均沿着绞制方向分布,说明铝绞线的模型建立是合理的,也说明设置铝绞线应力-应变点的方法是正确的。

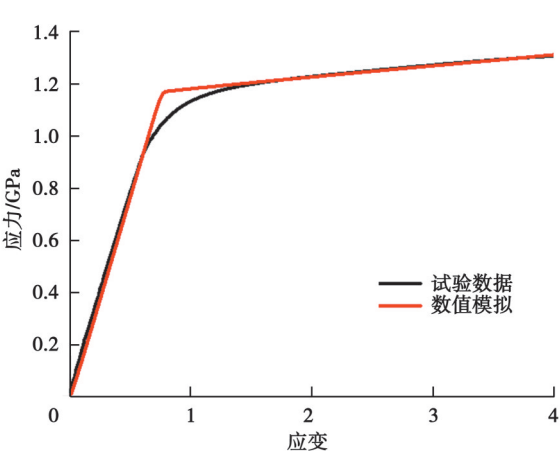


图 13 钢绞线在 20 °C时试验和数值模拟曲线对比图

Fig. 13 Comparison of testing and numerical simulation curves of steel strands at 20 °C

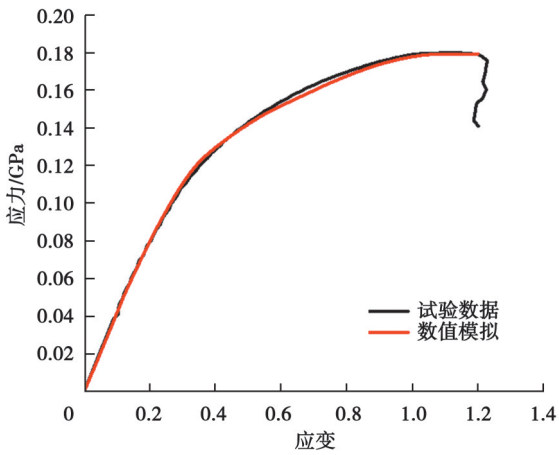


图 14 铝绞线在 20 °C时试验和数值模拟曲线对比图

Fig. 14 Comparison of testing and numerical simulation curves of aluminum strands at 20°C

4 分离与整体对比分析

由于夹持困难,并未做整根钢芯铝绞线的拉伸试验,利用有限元软件对整股钢芯铝绞线的拉伸过程进行数值模拟,以弥补试验未完成的空缺。

为了更好地对钢芯铝绞线拉伸试验进行仿真,防止两端局部应力过于集中,设置导线一段为固定端;另一端除轴线方向外,约束其余方向自由度,以此来模拟导线的加载端,轴向按位移加载。添加了约束和荷载后的钢芯铝绞线模型,如图15所示。钢芯铝绞线由不同材料绞制而成,将钢绞线和铝绞线的本构关系分开定义,得到的钢芯铝绞线应力-应变曲线,如图16所示。

由图16可知,钢芯铝绞线的应力-应变曲线的变化趋势同铝绞线相似,曲线没有明显强化阶段和屈服阶段,在承受30%屈服力后,弹性模量随荷载的增大而减小,应力-应变曲线的斜率逐渐减小。

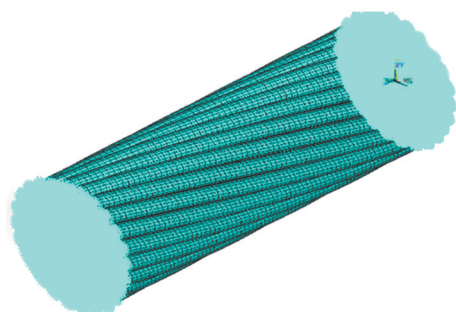


图15 约束及荷载施加后的有限元模型图

Fig.15 The finite element model of boundary conditions and load application

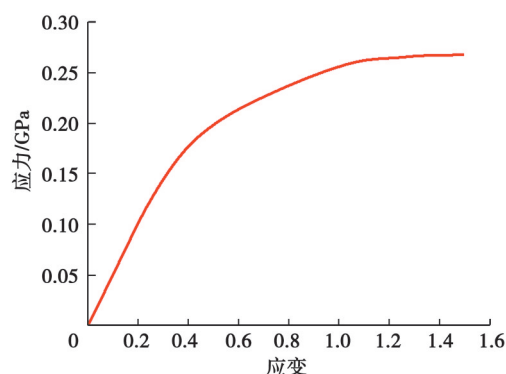


图16 整体钢芯铝绞线在20 °C时应力-应变曲线示意图

Fig. 16 Stress-strain curve of integral steel-cored aluminum strands at 20 °C

《架空送电线路的电线力学计算》^[13]所提到的导线综合弹性模量计算公式 $EA=EsAs+EaAa$,其中, E 为整根导线的弹性模量; Es 为钢芯的弹性模量; Ea 为铝绞线的弹性模量。假设,在应变相同的情况下,可得到 $F=EsAs$,最终可推导出 $F=F_s+F_a$,式中, F_s 为铝绞线受到的拉力; F_a 为钢芯受到的拉力。将钢芯和铝绞线所受到的力叠加就可以得到整根钢芯铝绞线所能承受的力。钢芯和铝绞线的拉力-应变曲线,如图17所示。将钢芯、铝绞线所受到的力通过公式进行叠加后,叠加的拉力-应变曲线和通过有限元软件进行运算后得到的拉力-应变曲线进行对比。同时,也加入了Liu等^[18]对ACSR-300/40型钢芯铝绞线进行仿真之后等到的导线在弹性阶段的拉力-应变曲线,并对曲线进行拟合,结果如图18所示。

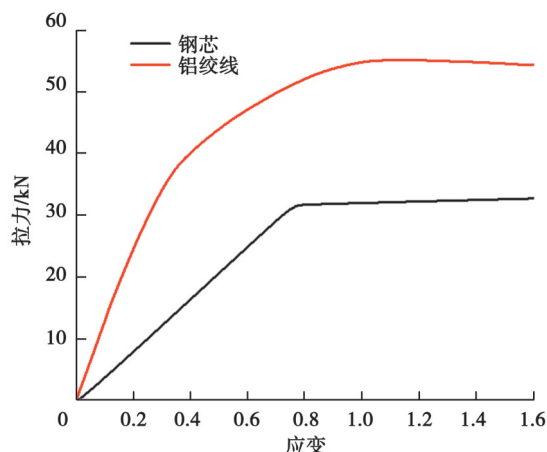


图17 钢绞线和铝绞线在20 °C时拉力-应变关系

Fig. 17 Stress-strain relationship of steel and aluminum strands at 20 °C

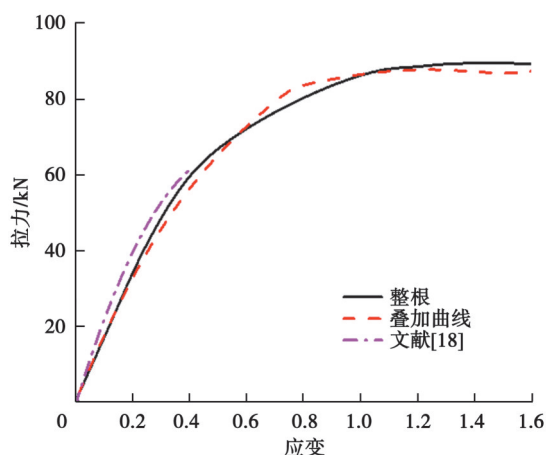


图18 钢芯铝绞线整体拉力-应变曲线对比图

Fig. 18 Overall stress-strain curve of ACSR

由图18可知,钢芯铝绞线分开计算后进行叠加的曲线和整体计算得到的拉力-应变曲线吻合很好,特别是屈服力30%之前的曲线完全吻合。证明了将钢芯和铝绞线分开进行测试的实验方法是可行的。同时,可以看出,文献[18]仅仅能得到小拉力下的拉力-应变曲线,而文中采用的分离试验,由于夹持的有效性,能够得到在大拉力作用下更加完整的曲线。

5 结 论

对ACSR-300/25钢芯铝绞线进行了拉伸试验。为了避免不同材料之间滑移产生的误差,采用钢绞线和铝绞线分开实验的方法。针对相同类型导线建立分离、整体有限元模型,得到导线应力-应变关系,分析其受力特点,以达到相互验证的目的。

1)试验表明,当铝绞线弹性模量变接近0后立刻就进入局部颈缩破坏阶段,整根铝绞线迅速失去承受能力,铝股线破坏部位都集中在试样1/2~1/3位置处,每根股线破坏部位并不在同一个横截面内,而是呈现出沿绞制方向发展趋势。钢绞线具有明显的弹性、屈服、强化、局部颈缩4个阶段,其破坏位置基本处于试样中部区域,并且每根钢丝断裂位置都在同一横截面上。

2)数值模拟结果显示,在轴向位移荷载的作用下,各层铝绞线等效塑性应变的分布呈现出明显的规律,每层的等效塑性应变的最大值均出现在1/2~1/3位置处。同时,内层钢线的等效塑性应变分布较均匀,外层钢绞线等效塑性应变分布也较均匀,外层绞线的应变大于内层绞线。

3)将试验与数值模拟结果进行对比发现,钢绞线应力-应变曲线在弹性阶段吻合良好,数值模拟得到的钢绞线塑性应变分布与试验中塑性变形位置相吻合。铝绞线应力-应变曲线吻合较好,误差未超过5%,而铝绞线塑性应变值最大处出现位置和实验中铝绞线的破坏位置均集中在1/2~1/3处。对比结果表明,导线模型建立以及应变点设置的正确性。

4)整根导线与分离部分的对比发现,将导线分开计算并叠加后得到的曲线与整体计算得到的应力-应变曲线吻合情况良好,特别是屈服力前30%部分,达到完全吻合,并且导线在达到屈服力之前与其他仿真结果的拉力-应变曲线规律也接近,表明了分离进行拉伸试验和数值模拟方法的可行性。

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] Liu F, Findlay R D, Song Q. Discussion and prediction of mechanical properties for single layer ACSR[C]//First International Conference on Innovative Computing, Information and Control: Volume I (ICICIC'06). August 30-September 1, 2006, Beijing. IEEE, 2006: 138-141.
- [3] Azevedo C R F, Cescon T. Failure analysis of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductor of the transmission line crossing the Paraná River[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2002, 9(6): 645-664.
- [4] Rocha P H C, Díaz J I M, Silva C R M, et al. Fatigue of two contacting wires of the ACSR Ibis 397.5 MCM conductor: Experiments and life prediction[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 127: 25-35.
- [5] Achiriloaiei D, Galatanu S V, Vetres I. Stress and strain determination occurring in contact area of the 450/75 ACSR conductor [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 416: 012071.
- [6] Lalonde S, Guilbault R, Légeron F. Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3D finite element beam-to-beam contacts - Part I: Model formulation and validation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 126: 281-296.
- [7] Judge R, Yang Z, Jones S W, et al. Full 3D finite element modelling of spiral strand cables[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 452-459.
- [8] Farzaneh M, Savadjevi K. Evaluation of tensile strength of ACSR conductors based on test data for individual strands[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(1): 627-633.
- [9] 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)

- [10] 于春蕾. 单股钢丝绳力学性能高效数值模拟技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
Yu C L. Research on high-efficiency numerical simulation technology of single-strand wire rope mechanical properties[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 秦力, 李军阔, 付强. 输电线路钢芯铝绞线股线力学特性研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 194-197.
Qin L, Li J K, Fu Q. Research on aluminum conductor steel-reinforced mechanical characteristics of transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(5): 194-197. (in Chinese)
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 架空绞线用镀锌钢线: GB/T 3428—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Zinc-coated steel wires for stranded conductors: GB/T 3428—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 架空绞线用硬铝线: GB/T 17048—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Hard-drawn aluminium wire for overhead line conductors: GB/T 17048—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [17] 王礼立, 胡时胜. 铝合金 LF6R 和纯铝 L4R 在高应变率下的动态应力应变关系[J]. 固体力学学报, 1986, 7(2): 163-166.
Wang L L, Hu S S. Dynamic stress-strain relations of al alloy lf6r and al l4r under high strain rates[J]. Acta Mechanica Sinica, 1986, 7(2): 163-166. (in Chinese)
- [18] 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.

(编辑 陈移峰)