

铝包钢芯铝绞线拉断力影响因素研究

王文辉¹, 王 玉², 康小龙¹, 周 聪¹, 蔡炎烽², 尤新祥²

(1.江苏中天科技股份有限公司,南通 226463; 2.中天电力光缆有限公司,南通 226463)

摘要:铝包钢芯铝绞线是电能输送的主要渠道,但在出厂检验及施工验收时经常遇到拉断力实测值小于设计值的情况,困扰着厂家及施工验收方。以标准规定的铝包钢芯铝绞线设计值计算方法为依据,通过试验验证的方式分析各因素对铝包钢芯铝绞线拉断力实测值的影响。通过试验分析发现,铝包钢单线的抗拉强度、伸长率及拉断力测试时配套金具的选择是影响铝包钢芯铝绞线拉断力实测值的主要因素。其中,铝包钢单线的伸长率和配套金具对拉断力实测值的影响更大,结果可对铝包钢芯铝绞线的生产、检验和验收提供参考和指导。

关键词:铝包钢芯铝绞线; 拉断力; 伸长率; 压接管; 预绞丝

中图分类号:TM752

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2022)01-0029-05

Study on the Influence Factors of ACSR/AS Cable Breaking Force

WANG Wenhui¹, WANG Yu², KANG Xiaolong¹, ZHOU Cong¹, CAI Yanfeng², YOU Xinxiang²

(1.Jiangsu Zhongtian Technology Co., Ltd., Nantong 226463, China;

2.Zhongtian Power Optical Cable Co., Ltd., Nantong 226463, China)

Abstract: ACSR/AS is the electric energy transmission channel mainly, but in factory inspection and construction acceptance, the measured value of tensile force is often less than design value, which troubles manufacturers and construction acceptance party. Based on the ACSR/AS design value calculation method in the standard, the influence of various factors on the ACSR/AS breaking force was analyzed by means of test verification. It is found that the tensile strength of AS wire, the elongation of AS wire and the choice of fittings in test are main factors that affect breaking force measured value of ACSR/AS. Among them, AS wire elongation and fittings have greater influence on the measured value of breaking force, which can provide reference and guidance for the production, inspection and acceptance of ACSR/AS.

Key words: ACSR/AS; breaking force; elongation; press-connect-tube; preformed armor rod

0 引言

铝包钢线是采用双金属同步拉拔变形工艺制备的一种复合材料^[1],钢芯保证线材具有较好的机械性能,而外层包覆的铝层赋予线材较好的电气性能^[2]。同时由于铝层的存在,保证了线材具备较好的耐腐蚀性能^[3]。采用铝及铝合金线与铝包线同步绞合生产的铝包钢芯铝绞线主要应用于架空导线^[4],它广泛适用于各种电压等级和防腐要求较高的各类架空输电线路中,尤其是在沿海地区、盐碱滩和三、四级工业污染区的输电线路中应用更为广泛^[5-6]。

对于架空导线而言,拉断力是保证线路安全运行的关键技术指标^[7-10]。而实际生产检验及施工验收时经常会遇到拉断力实测值低于理论设计值的不

合格现象,但追溯原材料各项力学性能时均合格,这一问题一直困扰着整个行业。本工作针对这一问题进行深入分析,对铝包钢芯铝绞线拉断力的影响因素进行讨论,确定影响铝包钢芯铝绞线拉断力实测值的关键因素,对铝包钢芯铝绞线的生产、检验和验收提供参考和指导。以确保铝包钢芯铝绞线的拉断力能够满足国家标准及行业标准的要求,并预留一定的安全富余度。

1 铝包钢芯铝绞线的拉断力标准要求及潜在影响因素

以国家标准 GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》^[11]为例,5.7.2 条款规定:铝包钢芯铝绞线的额定拉断力(*RTS*)为铝或铝合金部分的拉断力与对应铝(铝合金)部分在断裂负荷下钢或铝包钢部分伸长时的拉力的总和。在理论计算时,铝包钢线部分对导线拉断力的贡献按其 1% 伸长时的应力来确定(250 mm 标距样品)。

收稿日期:2021-03-09

作者简介:王文辉(1990—),男,工程师。

E-mail:wangwh@chinaztt.com

当铝或铝合金单线的绞合层数为4层时,导线的额定拉断力按计算值乘以0.95来确定。当导线的任意1根或多根单线出现断裂时,其对应的载荷确定为导线的实测拉断力,但当单线断裂位置距离端头小于1 cm且拉断力小于额定拉断力时,可以重新测试。

通过分析标准中对铝包钢芯铝绞线拉断力的计算及测试结果的判定依据可知,影响其拉断力实测值的主要因素包括:单线的抗拉强度、单线的1%伸长的应力、单线的伸长率、配套接续金具的匹配性等。本工作结合实际试验,从上述3个方面分析验证各因素对铝包钢芯铝绞线拉断力的影响。

2 试验内容及试验方法

用于分析验证拉断力影响因素的铝包钢芯铝绞线规格选用型号为JL/LB20-400/35-48/7,由48根外径3.22 mm的L型硬铝线和7根外径2.50 mm的20.3% IACS导电率的铝包钢线绞合而成。

各因素对铝包钢芯铝绞线拉断力影响的分析验证试验方案见表1。由于铝包钢线的力学性能与硬铝线存在显著差异,仅考虑铝包钢线的抗拉强度、伸长率为1%时的应力和伸长率对铝包钢芯铝绞线拉断力的影响,A、B、C 3种钢芯材料可以生产出不同强度等级的铝包钢线,相同工艺条件下,使用A、B、C 3种钢芯材料所生产的铝包钢线强度由高到低的顺序为C、B、A。对上述3种同规格的铝包钢线分别按不同工艺生产,可以得到6种具备不同伸长率等级、不同强度等级的铝包钢线材,将上述6种铝包钢线与硬铝线绞合制备6种导线样品,编号见表1。

表1 分析拉断力影响因素的试验验证方案

钢芯材料	伸长率等级	样品编号	接续金具类型
A	普通级	A-C	压接式
			预绞丝式
	大伸长	A-L	压接式
			预绞丝式
B	普通级	B-C	压接式
			预绞丝式
	大伸长	B-L	压接式
			预绞丝式
C	普通级	C-C	压接式
			预绞丝式
	大伸长	C-L	压接式
			预绞丝式

3 结果与讨论

3.1 铝包钢单线性能对比

6种导线样品分别使用压接管和预绞丝进行拉断力测试。

6种铝包钢单线的力学性能平均值见表2。GB/T 17937—2009《电工用铝包钢线》中抗拉强度、1%伸长应力、断时伸长率、断后伸长率允许的最小值依次为1 340 MPa,1 200 MPa,1.5%,1.0%。

表2 铝包钢单线力学性能平均值

钢芯材料	伸长率等级	抗拉强度/MPa	1%伸长的应力/%	断时伸长率/%	断后伸长率/%
A	普通级	1 467	1 377	1.8	1.2
	大伸长	1 407	1 301	2.8	2.4
B	普通级	1 607	1 361	2.4	2.0
	大伸长	1 560	1 396	3.0	2.6
C	普通级	1 703	1 395	2.0	1.6
	大伸长	1 603	1 422	2.8	2.0

对于导电率为20% IACS的2.5 mm外径铝包钢线,标准要求抗拉强度不小于1 340 MPa,1%伸长的应力不小于1 200 MPa^[12]。采用A钢芯材料生产的铝包钢线即可满足标准要求,而采用C钢芯材料生产的该规格铝包钢线抗拉强度可达1 703 MPa,其1%伸长的应力值亦同步提高,对铝包钢芯铝绞线的拉断力贡献值也同步增加。采用不同生产工艺,3种不同钢芯材料铝包钢线的伸长率显著提高,断时伸长率及断后伸长率均可达到2.0%以上,虽然具备大伸长特性的铝包钢线抗拉强度有所下降,但对于B、C两种钢芯材料的大伸长铝包钢线,其1%伸长的应力值得到提高。按国家标准GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》规定的计算方法,1%伸长的应力值越大,其对铝包钢芯铝绞线的拉断力贡献值越大。

3.2 绞合后单线性能对比

按表1所示的验证方案生产编号为A-C、A-L、B-C、B-L、C-C、C-L的铝包钢芯铝绞线(JL/LB20-400/35-48/7)。对各编号的导线样品分别拆股,获得绞合后的铝包钢单线样品,绞后铝包钢单线的力学性能测试结果平均值见表3。绞合前后力学性能变化对比见图1、图2。

表3 铝包钢单线绞合后力学性能测试平均值

样品编号	抗拉强度/MPa	1%伸长应力/MPa	断时伸长率/%	断后伸长率/%
A-C	1 428	1 185	1.5	1.2
A-L	1 407	1 214	3.0	2.5
B-C	1 550	1 230	2.0	1.8
B-L	1 568	1 316	2.8	2.5
C-C	1 634	1 422	1.8	1.5
C-L	1 610	1 343	2.8	2.0

由图1可知:普通伸长率等级的铝包钢线在绞合后抗拉强度会出现一定程度的下降,但大伸长率的铝包钢线在绞合后抗拉强度基本没有损失。由表3及图2可知,绞合后6种铝包钢线的1%伸长应力、断时及断后伸长率均有不同程度的下降。

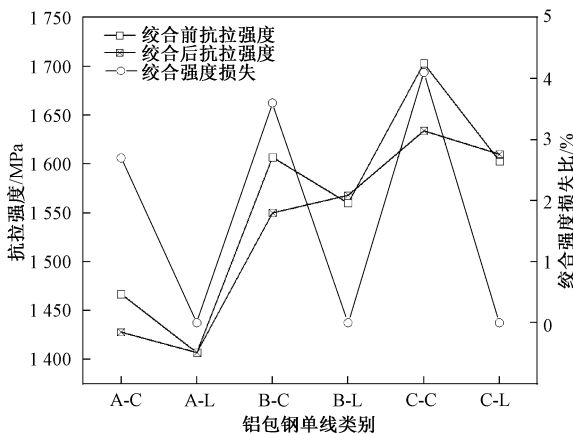


图1 绞合前后单线抗拉强度变化

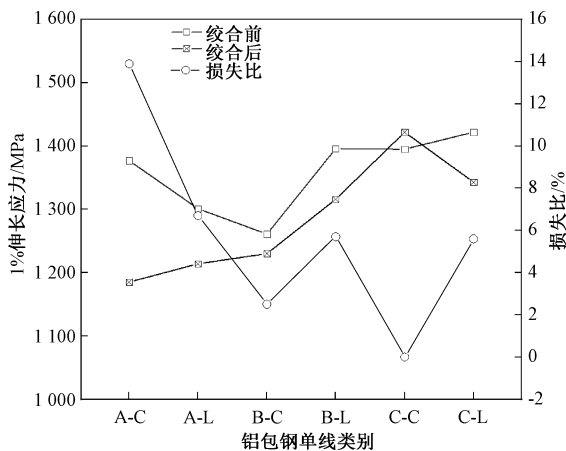


图2 绞合前后单线1%伸长的应力变化

3.3 理论拉断力

JL/LB 20-400/35-48/7型导线的结构示意图见图3,其设计拉断力(RTS)为105.7 kN^[10]。拆股后,L型硬铝线的绞后抗拉强度为177 MPa,绞合前抗拉强度均值为185 MPa。按国家标准GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》规定的算法,由绞合前单线力学性能计算铝包钢芯铝绞线的标准拉断力为 $F_{标准}$,由绞合后单线力学性能反向推导的铝包钢芯铝绞线理论拉断力为 $F_{理论}$ ($F_{理论}$ =绞后铝包钢线抗拉强度均值×铝包钢线总截面积+绞合硬铝线抗拉强度均值×硬铝线总截面积), $F_{理论}$ 的计算参考了FARZANEH M等^[13]在其发表的论文中提及的方法。基于反向推导的 $F_{理论}$ 得到拉断力的理论富余度(η), η 的计算方法如下:

$$\eta = \frac{F_{理论} - RTS}{RTS} \times 100\% \quad (1)$$

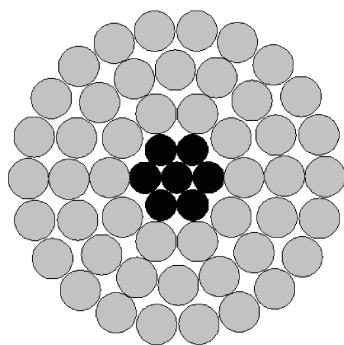


图3 JL/LB20-400/35-48/7型导线结构示意图

$F_{标准}$ 、 $F_{理论}$ 、 η 三者之间的比较关系见图4。

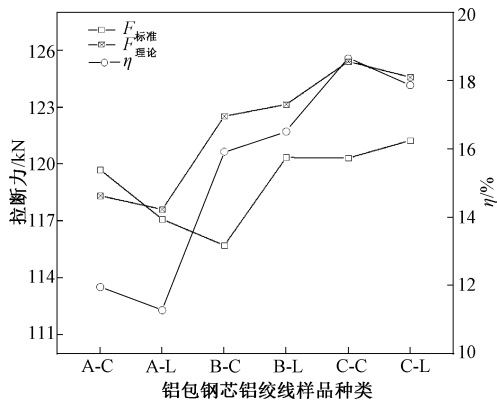


图4 理论计算拉断力比较

由图4可知:对于JL/LB20-400/35-48/7型铝包钢芯铝绞线的6种样品,由绞合前单线的1%的伸长应力值、绞合后单线的抗拉强度推算的拉断力值均可满足GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》的要求。采用不同力学性能的铝包钢线生产的导线样品,按国家标准计算的标准拉断力 $F_{标准}$ 相差不大,但由绞合后单线力学性能推算的理论拉断力 $F_{理论}$ 相差较大, $F_{理论}$ 相对于 RTS 的理论富余度 η 随着铝包钢单线的抗拉强度、1%伸长的应力的增加而增加,相同钢芯材料条件下,伸长率的差异对理论拉断力 $F_{理论}$ 影响不大。

3.4 实测拉断力

JL/LB20-400/35-48/7型铝包钢芯铝绞线拉断力测试时分别采用压接管和预绞丝两种类型的配套金具,用以比较配套金具类型对铝包钢芯铝绞线拉断力的影响。其中,预绞丝分为二层式和三层式。配套金具与导线的匹配方式及现场测试装置见图5。

拉断力测试结果合格与否的判断依据为: $F_{实测}$ 大于 RTS (105.7 kN)时,测试结果合格,否则不合格。采用拉断力保留率(γ)来评价配套金具与导线连接方式对拉断力实测值影响的大小。 γ 的计算方法见式(2)。 γ 越大表明因配套金具而导致的拉断力损耗越小。

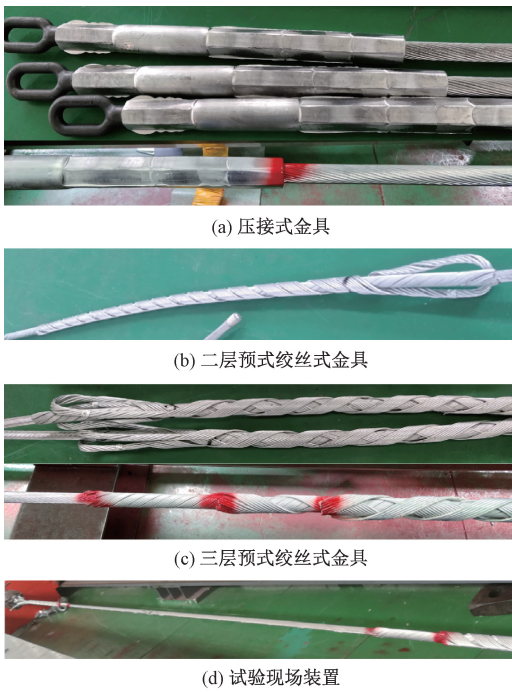


图5 配套金具与导线的匹配方式及现场测试装置

$$\gamma = \frac{F_{\text{实测}}}{F_{\text{理论}}} \times 100\% \quad (2)$$

3.4.1 基于压接式金具的拉断力测试

采用压接管测试6种铝包钢芯铝绞线样品的拉断力,每种样品测试6次,其平均值结果见表4、图6。

表4 基于压接式金具的拉断力实测值与理论值比较

样品编号	$F_{\text{理论}}/\text{kN}$	$F_{\text{实测}}/\text{kN}$	$\gamma/\%$	判定结果
A-C	118.33	102.11	86.29	不合格
A-L	117.61	105.03	89.31	不合格
B-C	122.53	101.52	82.86	不合格
B-L	123.15	107.93	87.64	合格
C-C	125.42	104.24	83.11	不合格
C-L	124.59	109.05	87.53	合格

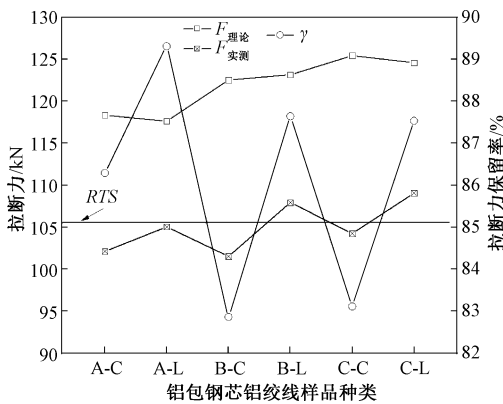


图6 基于压接式金具的拉断力实测值及拉断力保留率

由表4可知:采用压接管测的拉断力多数不合格,只有B-L和C-L样品的实测拉断力合格($F_{\text{实测}} > RTS$)。该两种样品均是采用大伸长等级的铝包钢线生产,且其单线的抗拉强度均得到了大幅度提升,说明提升铝包钢单线的抗拉强度和伸长率有利于提升铝包钢芯铝绞线的实测拉断力。这与文献[14]、文献[15]的研究结果一致。

由图6可知:基于压接管的6种铝包钢芯铝绞线拉断力保留率 γ 在80%~90%之间。相同钢芯材料铝包钢单线生产的导线提升其伸长率可以显著提高拉断力保留率 γ ,而其抗拉强度和1%伸长的应力的提高对拉断力保留率的改善效果较小。

3.4.2 基于预绞丝式金具的拉断力测试

预绞丝金具最初由美国PLP公司发明^[16]。预绞丝金具的特点是握力均匀,可以避免导线与金具接触部位产生应力集中^[17]。为验证预绞丝金具对导线拉断力测试结果的影响,分别采用二层式预绞丝和三层式预绞丝金具测试6种铝包钢芯铝绞线样品的拉断力,每种样品及金具的组合测试6组,测得的拉断力平均值见表5、图7所示。

表5 基于预绞丝式金具的拉断力实测值与理论值比较

样品编号	$F_{\text{理论}}/\text{kN}$	二层式预绞丝金具			三层式预绞丝金具		
		$F_{\text{实测}}/\text{kN}$	$\gamma/\%$	判定结果	$F_{\text{实测}}/\text{kN}$	$\gamma/\%$	判定结果
A-C	118.33	100.84	85.22	不合格	111.21	93.98	合格
A-L	117.61	103.39	87.91	不合格	112.56	95.71	合格
B-C	122.53	100.51	82.03	不合格	112.56	91.87	合格
B-L	123.15	103.63	84.15	不合格	116.73	94.79	合格
C-C	125.42	102.37	81.62	不合格	115.67	92.23	合格
C-L	124.59	103.73	83.26	不合格	117.74	94.50	合格

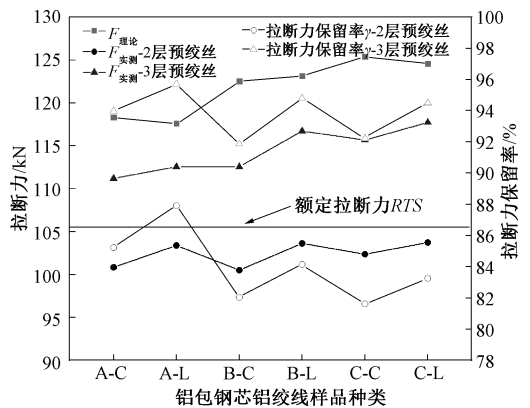


图7 基于预绞丝式金具的拉断力实测值及拉断力保留率

由表5可知:采用二层式预绞丝进行拉断力测试时,测试结果均不理想,6种导线样品的实测拉断力(图7中 $F_{\text{实测}}$ -二层式预绞丝曲线对应结果)均小

于 RTS , 拉断力测试结果不合格 ($F_{\text{实测}} < RTS$)。采用三层预绞丝进行拉断力测试时, 6种导线样品的拉断力值均大于 RTS (图7中 $F_{\text{实测}}$ -三层预绞丝曲线对应结果), 拉断力测试结果合格 ($F_{\text{实测}} > RTS$), 且其拉断力保留率 (图7中拉断力保留率 γ -3层式预绞丝对应结果) 均大于 90%。

由图7可知: 在导线绞合用铝包钢单线钢芯材料相同、预绞丝相同的条件下, 具备大伸长铝包钢单线的导线样品, 拉断力测试时其拉断力保留率 γ 值更大。

3.4.3 金具对拉断力测试结果的影响

文献[18]的研究结果指出, 采用不同厂家同一规格压接金具测试 JL/LB20A-400/35 型导线拉断力时, 其测试结果存在较大差异。即使采用同一厂家同一规格的压接金具, 因压接工艺的差异也会导致拉断力测试结果的大幅度波动。结果表明: 金具与导线的配合会显著影响导线拉断力的实测值。本工作分别选用压接管和预绞丝两种金具进行了铝包钢芯铝绞线拉断力测试, 测试结果表明配套金具的种类会显著影响导线拉断力的实测值。

采用压接式金具测试导线拉断力时, 部分种类导线样品实测拉断力小于 RTS , 即前面所提及的、困扰行业的难题。由图6的结果表明, 仅提高铝包钢单线的抗拉强度或伸长率不足以解决拉断力小于 RTS 这一问题, 而同步提升铝包钢单线的伸长率及抗拉强度使得实测拉断力小于 RTS 这一问题得到改善。

采用三层式预绞丝测试导线拉断力时所有样品的实测拉断力均大于 RTS , 满足 GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》要求。说明除铝包钢单线性能外, 拉断力测试时, 配套金具的选择同样影响拉断力的测试结果。三层式预绞丝金具与铝包钢芯铝绞线的配合更好, 更能发挥其本身的抗拉水平。

4 结论

本工作结合标准规定的拉断力计算方法和实际测试验证分析, 研究了铝包钢芯铝绞线拉断力的影响因素, 并得出了如下结论:

(1) 铝包钢单线的抗拉强度和伸长率均会影响铝包钢芯铝绞线的拉断力实测值, 但铝包钢单线伸长率的影响更大, 提高铝包钢单线伸长率可以提升拉断力保留率。

(2) 采用压接管金属拉断力测试时, 需要同步

提高铝包钢单线的抗拉强度和伸长率才能确保拉断力实测值大于 RTS 。

(3) 配套金具的选择显著影响拉断力的测试结果, 本工作采用三层预绞丝进行拉断力测试时, 可以获得较高的拉断力保留率 ($\gamma > 90\%$), 测得的拉断力较高, 因此, 可以保证各类样品的拉断力实测值均大于 RTS 。

参考文献:

- [1] 田嘉治, 郑成明, 江泽超, 等. LB27 和 LB20 铝包钢芯线的拉伸行为[J]. 机械工程材料, 2019, 43(9): 23-27.
- [2] 宋志良, 周建华, 孙光进, 等. 特高强度铝包钢线生产工艺研究[J]. 电线电缆, 2012(5): 20-21.
- [3] 张强, 陈保安, 祝志祥. 架空导线用芯线材料综述[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 20-22.
- [4] 王凌凯. 新型特种导线在输电线路中的应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [5] 李斌, 刘磊, 党朋, 等. 高防腐导线的防腐性钢芯腐蚀试验研究[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 64-69.
- [6] 王煦, 黄国飞. 架空导线不同防腐措施的耐腐蚀性能比较[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(2): 169-173.
- [7] 麻闯政, 潘春平. 铝包钢芯高导铝绞线的技术特点及应用研究[J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 47-53.
- [8] 顾孙望, 尤伟任, 徐一峰, 等. 高强度铝包钢芯高导铝绞线在架空输电线路的应用[J]. 电线电缆, 2016(4): 19-22.
- [9] 李云玲, 钟振前, 司红, 等. 10 kV 架空钢芯铝绞线断裂原因分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(11): 231-236.
- [10] 周静波, 许宏伟, 李志翔, 等. 输电导线断裂原因分析[J]. 理化检验-物理分册, 2018, 54(5): 343-347.
- [11] 中华人民共和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. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [12] 中华人民共和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. 电工用铝包钢线: GB/T 17937—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Evaluation of tensile strength of ACSR conductors based on test data for individual strands [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007 (22): 627-633.
- [14] 杨立军. 铝包钢芯铝绞线拉断力的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(5): 25-27.
- [15] 郭锦锦, 门磊磊, 刘运锋. 铝包钢芯铝绞线综合拉断力的试验研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(2): 32-34.
- [16] 张玲. 全金属预绞式金具[J]. 电力建设, 2007, 28(10): 95-96.
- [17] 李兴宁, 杨胜平. 预绞式电力金具的设计与特点分析[J]. 科技信息, 2011(1): 516-523.
- [18] 王春红. 压接金具对铝包钢芯铝绞线拉断力试验的影响[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2018(4): 42-43.