

文章编号:1672-3961(2026)01-0122-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.205

服役输电塔加固构件承载性能提升及优化研究

张亮¹,牛凯¹,徐尉豪¹,翟孟琪¹,靳庆通²,刘俊才²,田利^{2*}

(1.国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450052; 2.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061)

摘要:由于构件屈曲失效是输电塔发生连续性倒塌破坏的主要因素,提出一种十字型无损加固措施,通过静力加载试验和有限元模拟对比分析加固构件的破坏模式、承载性能以及应力分布规律。研究构件长细比、宽厚比、夹具数量和加固材规格、钢级等参数对加固构件极限受压承载力的影响规律。结果表明:本研究提出的加固方案效果良好,加固后极限承载力提升14%以上;长细比越大,加固构件极限受压承载力越小,加固构件的加固效果越显著;随着被加固主材宽厚比减小,加固构件极限承载力的提升幅度下降;当夹具增加到一定数量时,加固构件的极限受压承载力趋于稳定;加固材规格和钢级对加固构件影响较小。

关键词:输电塔;角钢构件;无损加固方案;极限承载力;参数化分析

中图分类号:TU392.1 **文献标志码:**A

引用格式:张亮,牛凯,徐尉豪,等.服役输电塔加固构件承载性能提升及优化研究[J].山东大学学报(工学版),2026,56(1):122-132.

ZHANG Liang, NIU Kai, XU Weihao, et al. Study on load carrying performance enhancement and optimization of reinforcing members for power transmission towers in service[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(1):122-132.

Study on load carrying performance enhancement and optimization of reinforcing members for power transmission towers in service

ZHANG Liang¹, NIU Kai¹, XU Weihao¹, ZHAI Mengqi¹, JIN Qingtong², LIU Juncai², TIAN Li^{2*}

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, Henan, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: This paper focused on a novel cross-type non-destructive reinforcement technique aimed at addressing member buckling failure, which was a primary cause of transmission tower collapses. Through a combination of static loading tests and finite element analysis, a comprehensive assessment was made of the damage modes, load-bearing performance, and stress distribution of the reinforced members. The research further investigated the effects of key parameters, such as member slenderness ratio, width-to-thickness ratio, number of fixtures, and the specifications and strength of the reinforcing materials on the ultimate compressive load capacity of the reinforced members. The findings revealed that the proposed reinforcement method significantly enhanced the load-bearing performance, with the ultimate load capacity increasing by over 14% after reinforcement. Additionally, it was found that higher slenderness ratios were correlated with lower ultimate compressive capacities of the reinforced members, though the reinforcing effect became more pronounced. As the width-to-thickness ratio of the main reinforcing material decreased, the improvement in ultimate load capacity also diminished. Moreover, increasing the number of fixtures to a certain threshold stabilized the ultimate compressive load capacity of the reinforced members. Lastly, while the specifications and strength of the reinforcing materials did exert some influence, their overall impact was relatively limited.

Keywords: transmission tower; angle steel components; non-destructive reinforcement program; ultimate bearing capacity; parametric analysis

收稿日期:2024-08-19

第一作者简介:张亮(1986—),男,河南新乡人,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压输电线路设计。E-mail:95650811@qq.com

*通信作者简介:田利(1982—),男,山东枣庄人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为输电线路防灾减灾。E-mail:tianli@sdu.edu.cn

0 引言

输电线路承担着远距离电力传输的责任,不可避免地穿越环境复杂地区,全寿命服役周期内会遭受自然侵蚀、材料老化、结构疲劳等影响。这些均会不同程度地削弱杆件稳定性和降低结构抗灾性能,在此情况下,如果发生极端灾害如强风、暴雨、强震等,会增加输电线路倒塌事故的概率,严重影响电力系统稳定运行^[1-3]。与直接拆除重建相比,对性能不足或有增容改造要求的输电铁塔采用杆件加固措施,不仅能够有效提升输电塔抗灾能力,也可以节省施工周期和改造费用。因此,有必要深入研究输电塔加固技术,这是保证输电塔结构安全和正常服役的关键。

考虑到杆件屈曲失效是输电塔发生连续性倒塌破坏的主要因素^[4],国内外学者基于数值模拟和加载试验等方法,对输电塔杆件受力特征及其加固方案进行大量研究。考虑到输电塔结构几何复杂性,文献[5]提出一种新型加固方法,通过抱箍使主材和辅材连接在一起,通过加载试验和有限元模拟验证有效性,并分析关键加固参数对承载性能的影响,结果表明长细比对构件承载性能影响最大。文献[6]基于角钢并联加固试验和有限元模拟得到加固后构件的承载性能影响规律以及破坏模式,分析表明:构件整体以竖向应变为主,填板夹具以剪切应变为主;均匀受压板理论的屈曲公式可以较好地计算该加固构件的极限承载力。文献[7]对十字型、Z字型和T字型3种截面形式的加固构件进行数值分析和试验研究,明确3种截面形式的加固构件均因原构件发生屈曲而被破坏,T型截面构件的承载力相对较高。文献[8]提出一种T型加固方法,对加固前、加固后的构件承载性能进行理论分析和试验验证,结果表明:次弯矩是影响极限承载状态的主要原因,加固后T形组合构件受压极限承载力较加固前提高97.06%。文献[9]提出一种Y形加固技术方案,对加固方案的破坏形态、承载力和内力传递效率等力学性能进行研究,研究发现由夹具产生的贴合面摩擦力能够将主材截面的轴力传递至加固后的组合截面,传力效率可达到40%~60%。文献[10]通过有限元分析采用并联角钢加固后整体输电塔架受力情况,验证并联角钢加固方式具有良好的荷载传递性能。文献[11]提出一种输电塔斜材加固方法,通过试验和数值模拟研究几何参数对斜材整体性能的影响。文献[12]基

于日本学者KOMATSU提出的加固形式,开展参数化分析并明确不同参数对构件承载力的影响。文献[13]针对输电塔中腹杆提出一种箱型加固方式,并开展试验研究和有限元参数化分析,结果表明提出的加固方式对构件承载力提升显著。文献[14]提出一种角钢外贴槽钢的加固方法,通过试验与数值模拟得到加固结构承载力,并提出基于弹性分析的屈曲临界承载力公式。文献[15]对采用构件并联法加固后的角钢试件展开研究,研究重点在于对加固部分与未加固部分截面变化处的荷载传递情况进行试验和有限元分析,研究结果表明试件失效是由于主材角钢靠近螺栓孔位置处的截面断裂造成。除了增大被加固构件的截面之外,文献[16]通过静力加载试验和数值模拟,研究增设横隔面对于提高结构受力性能的作用,结果发现:结构的破坏依然由主材屈曲引起,失稳模态由弯扭失稳趋向弯曲失稳;同时,交叉斜撑的面外变形得到有效控制。文献[17]通过建立输电塔-线耦联体系有限元模型,对比增设横隔面前后单塔及塔线体系的模态差异,得到采用增设横隔法结构抗风承载力的提升结果,结果表明,合理增设横隔面最高可将杆塔临界倒塌风速提高3 m/s。基于上述研究动态,目前为满足输电铁塔性能补强要求已提出了多种加固措施,然而,大多数加固措施需要在输电塔被加固构件上打孔或者焊接,不仅削弱输电塔承载能力,而且高空打孔或者焊接难度大且施工效率低,因此难以进行大规模工程应用。

针对上述问题,本研究提出一种十字型无损加固措施,该措施可以对输电塔主材进行原位加固,不需损坏原构件且构造简单。随后开展加载试验和数值模拟,验证该措施对提升输电塔主材承载性能的有效性;进一步选取多个参数进行敏感性分析,明确影响组合加固构件提升效果的关键参数,为输电塔性能补强技术的优化提供参考。

1 加载试验概况

1.1 试验目的

考虑输电塔构件的实际受力特点以及变形模式,本研究提出一种十字型无损加固方案,主要包括十字加固板、夹具、加固材、高强螺栓以及两端的加载板。十字加固板长边贴在主材的背面,并在局部预留螺栓孔;加固材放置与被加固主材的背面且肢尖相对,并与被加固主材形成组合截面;加固材上预留螺栓孔,与十字加固板和夹具上的螺栓孔相

匹配,通过高强螺栓将整个构件连接起来。该加固方案的具体构造如图1所示。

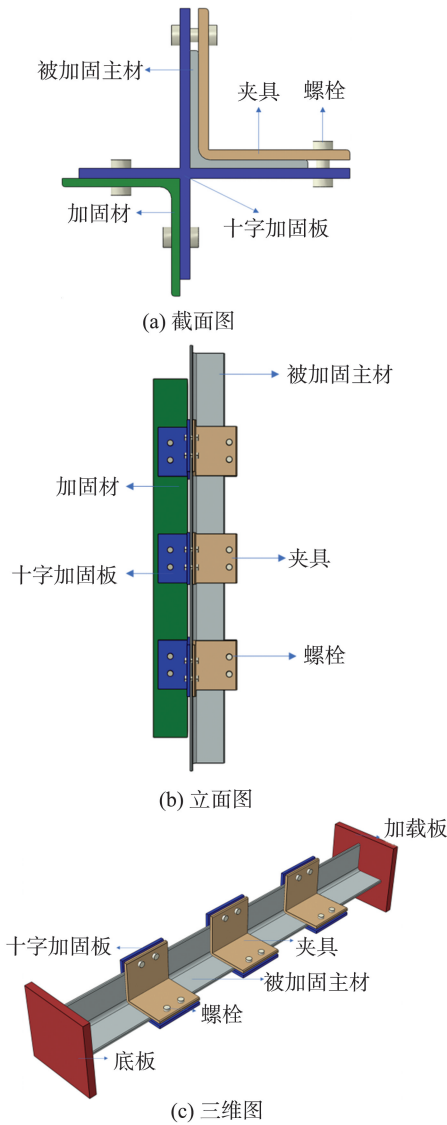


图1 无损加固方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of the non-destructive reinforcement programme

与传统的加固方法相比,本研究提出的加固方案可以有效避免在被加固主材上打孔或焊接,保证被加固主材的承载能力;当被加固主材受到外力作用时,通过高强螺栓、十字加固板和夹具将力传递给加固材,实现组合截面均匀受力,增加组合构件的承载性能并提高受压稳定性;通过灵活布置夹具,可以有效避开输电塔复杂的节点部位,实现对输电塔的通长加固。

1.2 试验模型与工况设计

对上述提出的主材十字型无损加固方案开展加载试验,明确加固后构件的承载力提升效果。本研究共设计10种构件,分别是原构件SPE1-1~SPE1-4和加固构件SPE-2~SPE-7,试验构件的尺

寸信息如表1所示。原构件由主材与底板、加载板焊接而成,如图2所示。加固构件由被加固主材、加固材、十字加固板、夹具和螺栓组合而成。被加固主材和加固材均采用Q420钢材,且被加固主材和加固材型号相同,夹具和十字加固板采用Q420钢板制作而成,夹具高度200 mm,距两端各300 mm,等距布置,加固材两端距底板和加载板各100 mm。螺栓的型号为M16,性能等级为8.8级,工作时螺栓预紧力为80 kN。通过长柱试验机对力传感器进行标定后,将高强螺栓穿过标定好的力传感器,并采用扭矩扳手拧紧螺栓,当力传感器度数为80 kN,用此时的扭矩作为试验中螺栓的拧紧力矩。

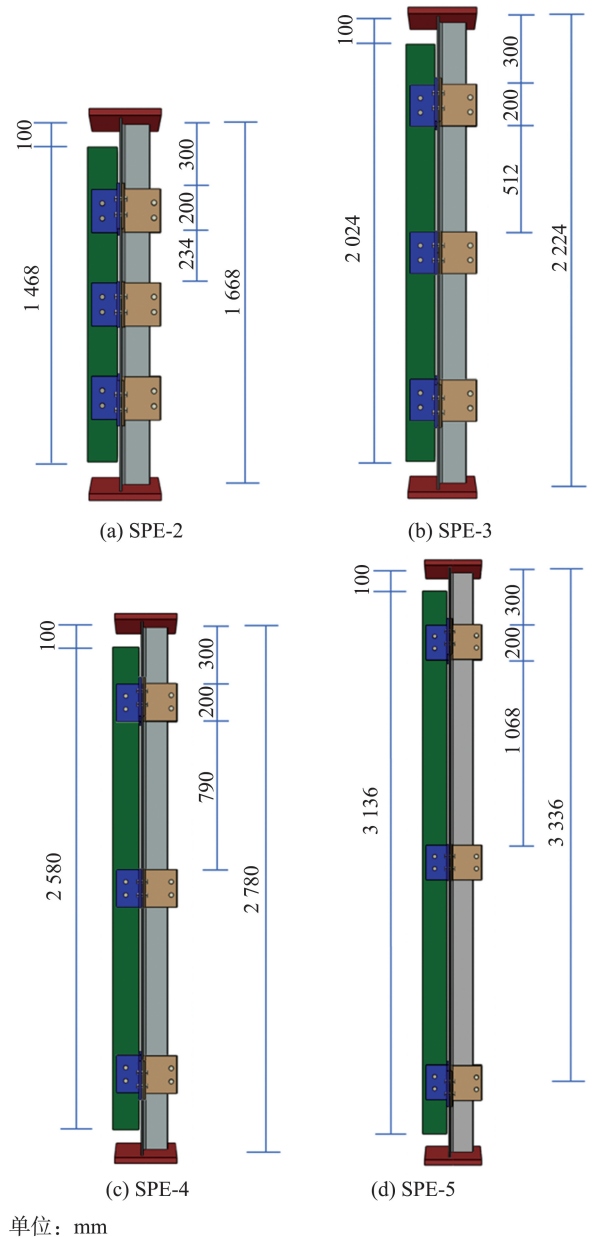


图2 部分试验构件示意图
Fig.2 Schematic diagram of some test components

表 1 试件尺寸信息表
Table 1 Specimen size information table

构件编号	被加固主材型号	被加固主材长度/mm	加固材长度/mm	夹具数量	长细比	质量/kg
SPE1-1	L140×10	1 668			30	35.8
SPE1-2	L140×10	2 224			40	47.8
SPE1-3	L140×10	2 780			50	59.7
SPE1-4	L140×10	3 336			60	71.7
SPE-2	L140×10	1 668	1 468	3	30	67.4
SPE-3	L140×10	2 224	2 024	3	40	91.3
SPE-4	L140×10	2 780	2 580	3	50	115.2
SPE-5	L140×10	3 336	3 136	3	60	139.1
SPE-6	L140×10	3 336	3 136	4	60	139.1
SPE-7	L140×10	3 336	3 136	5	60	139.1

注:表中空白处为不布置加固材和夹具。

构件 SPE1-1~SPE1-4 为对照组,得到加固前角钢构件的极限承载能力和变形模式。SPE-2~SPE-7 为加固后组合构件,进而评估加固方案的有效性。此外,SPE-2~SPE-5 的长细比变化范围为 30~60,以研究长细比对加固构件极限承载力的影响;SPE-5~SPE-7 选用长细比为 60,通过改变夹具数量为 3、4、5,进一步明确组合构件极限受压承载力与夹具数量的变化规律。

1.3 加载方案

试验采用长柱试验机进行加载,加载装置如图 3 所示。长柱试验机的加载端和铰接端处的连接构造均采用球型铰支座,将构件竖直放置在 2 个球型铰支座之间。为更好地模拟实际使用场景,在构件制作时,主材端部焊接加载板,加载板形心与主材角钢的形心重合,实际加载过程中使球铰对准加载板形心的位置以模拟主材轴心受压、加固后组合截面构件偏心受压的情况。试验整个加载过程采用位移控制的方式,加载速率为 0.15~0.2 mm/min,试验将在构件荷载降至峰值的 80%或试件发生破坏时终止。

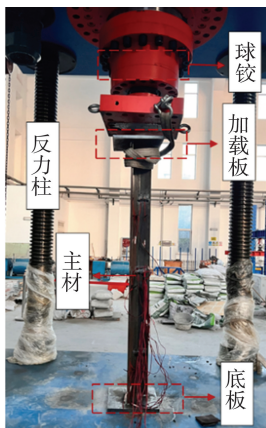


图 3 试验安装图

Fig.3 Diagram of test installation

1.4 材料特性

试件采用 Q420 钢级的钢材,根据试验角钢构

件的不同厚度,在同一批钢材中截取材性试验试件。沿角钢轴线方向从角钢母材中截取编号为 Q10 的试件,该试件代表被加固主材、加固材;从钢板母材中截取编号为 T12 的试件,该试件代表夹具、十字加固板。试件尺寸根据文献[18]中厚度大于等于 4 mm 型材比例试样进行设计,材性试验破坏现象如图 4 所示。材性试验结果如表 2 所示,表中 f_y 为钢材的屈服强度; f_u 为钢材的抗拉强度; δ_l 为钢材的断后伸长率; E 为钢材的弹性模量。



图 4 材性试验断裂图

Fig.4 Fracture diagram of material property test

表 2 材性试验结果

Table 2 Test results of material properties

试件编号	f_y /MPa	f_u /MPa	δ_l /%	E /GPa
Q10-1	473.76	651.89	22.7	206.21
Q10-2	464.39	672.90	26.3	201.32
Q10-3	491.37	693.81	27.1	202.51
平均	476.51	672.87	25.4	203.35
T12-1	474.77	624.38	23.3	207.95
T12-2	494.83	705.13	24.7	204.63
T12-3	497.34	694.84	21.4	202.79
平均	488.98	674.78	23.1	205.12

2 试验与模拟结果对比分析

2.1 建立数值模型

在数值软件 ABAQUS 中采用实体单元 C3D8R 建立所有试件的有限元模型,模型如图 5 所示。采

用双折线材料本构模型,所需参数均采用材性试验结果。采用结构化网格进行网格划分,为保证计算精度的同时降低时间成本,网格尺寸选取 20 mm,厚度方向划分为 3 层。设计构件时,被加固主材与底板、加载板通过焊接相连,十字加固板、夹具通过施加螺栓预紧力和被加固主材与加固材紧密接触在一起。在建模时,焊接在模型中用绑定约束模拟,其他存在相互接触的部位定义相互作用,切向接触类型选用罚函数并设置摩擦系数为 0.3,法向接触类型为硬接触。构件加载板设置有耦合点,即 RP-1。RP-1 约束 x 、 y 两个方向的自由度 U_1 和 U_2 ($U_1=U_2=0$),释放 z 方向的自由度 U_3 便于施加位移荷载,底板约束 x 、 y 、 z 三个方向的自由度 ($U_1=U_2=U_3=0$)。为了模拟螺栓预紧力对组合构件的影响,在模型中共设置 4 个分析步:分析步 1,施加螺栓预紧力,确保模型之间建立接触关系,设置预紧力为 1 kN;分析步 2,将螺栓预紧力调整到工作状态 (80 kN);分析步 3,将螺栓预紧力的施加方式修改为固定在当前长度;分析步 4,计算组合构件的极限承载力。考虑构件初始缺陷的影响,进行屈曲分析得到构件的一阶屈曲模态,并取构件长度的 1/1 000 作为初始缺陷^[19]。

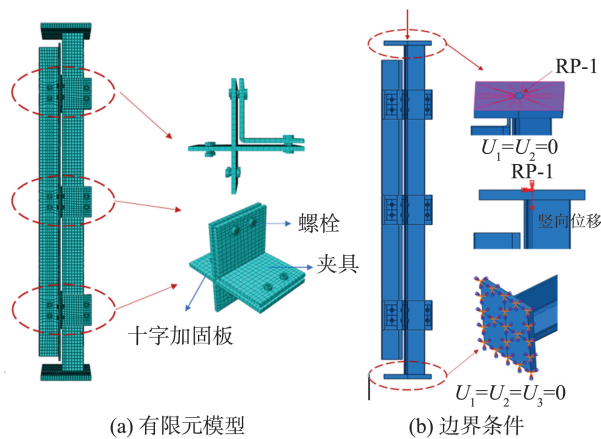


图 5 加固构件有限元模型

Fig.5 Finite element model of reinforced component

2.2 对比分析

对照组构件的破坏形态如图 6 所示。由图 6 可知,未加固构件有限元模拟得到的变形模式与试验吻合较好。SPE1-1 ~ SPE1-4 为轴心受压构件,SPE1-1 和 SPE1-2 构件的破坏现象为主材角钢一股发生局部屈曲,整体呈现弯扭变形;SPE1-3 发生绕主材弱轴的整体弯曲和中部局部屈曲的混合破坏模式;SPE1-4 发生绕主材弱轴的整体弯曲破坏,有限元模型较好地模拟了这一非线性变形过程。同时,有限元模拟也呈现了加载结束后构件的应力分

布情况,即在主材角钢屈曲区域、加载板和底板连接区域应力较大,局部达到了屈服强度。

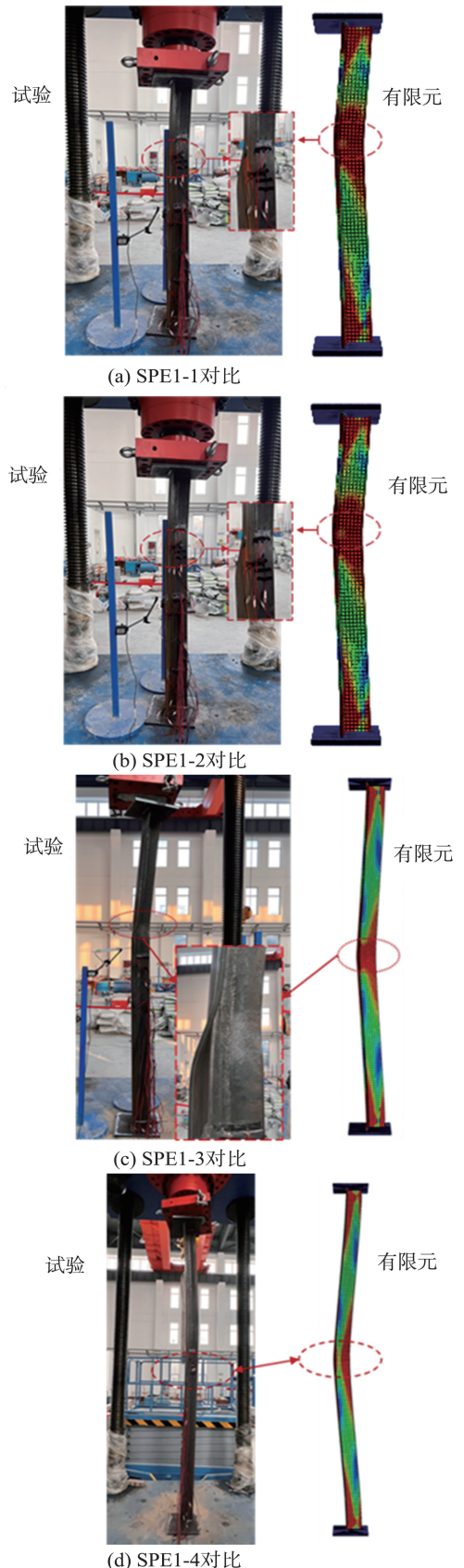


图 6 对照组有限元模拟与试验对比

Fig.6 Comparison of failure modes between test and finite element model

加固构件试验和有限元模拟的破坏情况如图 7 所示,可以发现,加固构件有限元模拟得到的变形模式与试验同样吻合较好。主材主要承受压应力作用,加固材承受拉弯作用,当长细比较小,加固构件主要发生局部屈曲破坏;当长细比较大时,加固构件主要发生整体弯曲与局部屈曲的混合破坏模式。对于构件 SPE-2 和 SPE-3,有限元与试验破坏模式均为局部屈曲破坏,加载初期,被加固主材和加固材未观察到明显变化。随着轴向位移不断增大,被加固主材出现局部变形,轴向位移继续增大,被加固主材局部变形迅速增大,整个加固构件的受压承载力降低并最终发生破坏,破坏位置在加

载板与第一夹具之间。与对照组 SPE1-1 和 SPE1-2 不同的是,加固后主材角钢在夹具范围内应力变化较为均匀,这是因为部分应力通过夹具传递给加固角钢,最大应力出现在主材角钢屈曲变形区域。对于长细比较大的 SPE-4、SPE-5、SPE-6 和 SPE-7 构件均发生了混合破坏,变形过程与 SPE-2、SPE-3 相似,不同之处为加载结束后主材整体呈现微弯状态,并且在夹具之间出现了主材的局部屈曲破坏。加固材未观察到明显变形,有限元模拟也验证了这一现象。最大应力出现在加载板和底板连接处以及屈曲位置处,与屈曲位置靠近的加固材应力也较大。

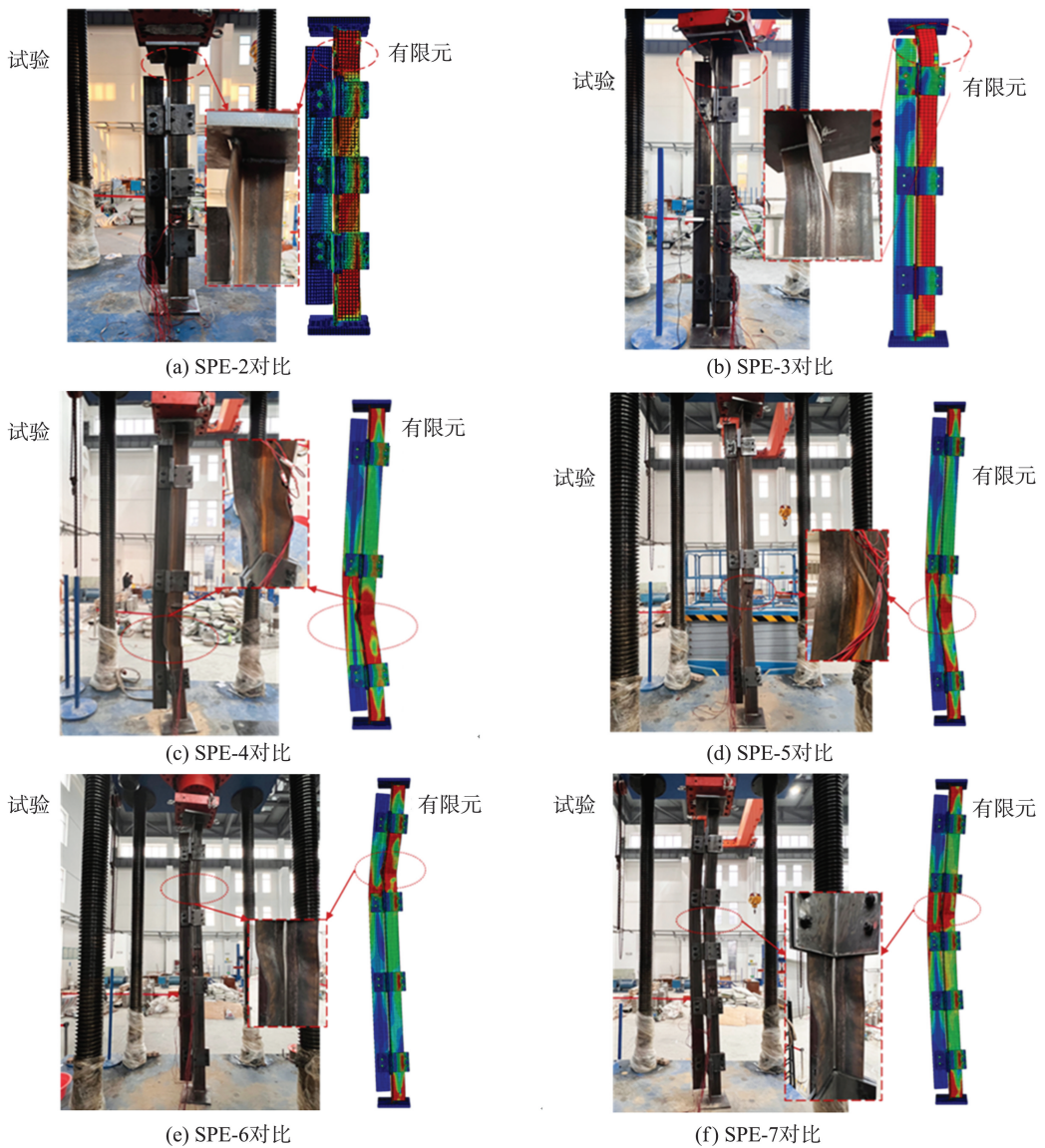


图 7 加固构件有限元模拟与试验对比

Fig.7 Comparison of finite element model and test for reinforced members

图 8 对比分析了部分典型构件试验和有限元加载全过程的荷载-位移曲线。由图 8 可以看出,试验和模拟得到的荷载-位移曲线的整体变化趋势基

本一致:加载初期,随着位移增加,构件承载力近似呈线性逐渐增大;当加载到一定时期,位移达到临界值,构件承载力逐渐下降,表明构件发生受压破

坏。从荷载-位移曲线下降段可以看出,加固构件的下降段斜率比未加固构件稍大,表明采用加固措施可以适当地提升构件的延性。通过试验得到原构件 SPE1-1、SPE1-2、SPE1-3 和 SPE1-4 极限受压承载力分别为 1 072.74 kN、977.57 kN、901.76 kN 和

807.83 kN;加固构件 SPE-2、SPE-3、SPE-4 和 SPE-5 极限受压承载力分别为 1 225.75 kN、1 201.37 kN、1 115.10 kN和 1 048.66 kN。加固后承载力分别提升 14.3%、22.9%、23.7%和 29.8%,表明该加固措施对构件承载力提升显著。

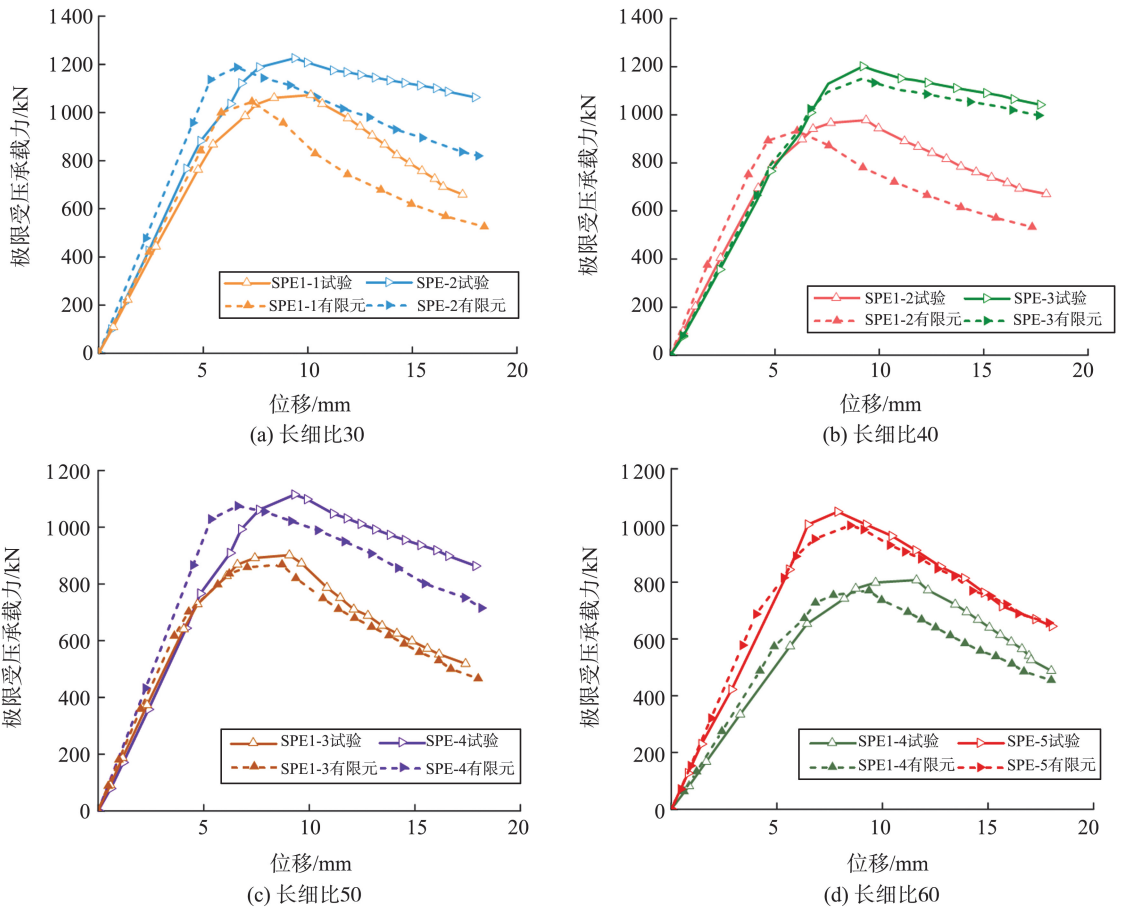


图8 典型构件承载力-位移曲线

Fig.8 Typical member bearing capacity-displacement curves

构件试验与有限元模拟的具体误差如图9所示,可以看出,试验和模拟结果吻合较好,最大误差为4.59%,最小误差为2.63%,误差均在5%以内,表明有限元模型具有良好精度,为后续开展参数化分析奠定基础。

3 参数化分析

3.1 长细比影响

由图8可知,当长细比由30增大到40、50和60时,加固构件的极限承载力由1 225.75 kN分别下降到1 201.37 kN、1 115.11 kN和1 048.66 kN,加固构件的极限受压承载力分别降低5.1%、10.7%和15.6%。长细比与加固构件承载力关系曲线如图10所示,可以看出,加固构件极限承载力随长细比近似呈现线性变化趋势,加固构件的极限受压承载力与长细比呈明显的负相关关系,试验值和拟合值吻合较好,拟合优度 $R^2 = 0.975$ 。

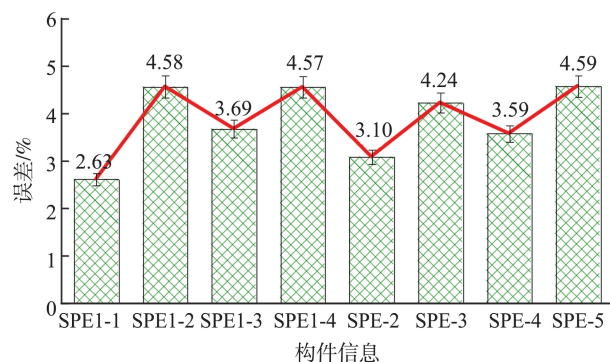


图9 典型构件极限受压承载力误差

Fig.9 Typical member ultimate compressive bearing capacity error

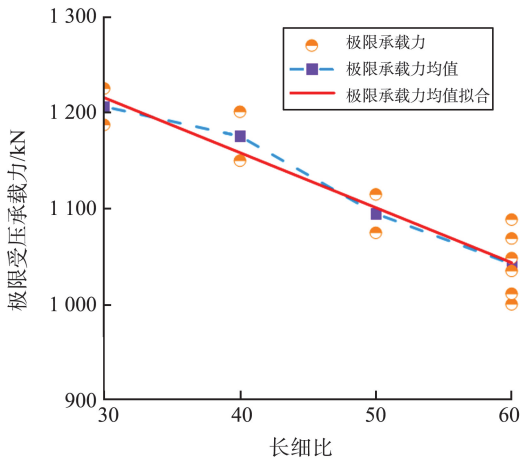


图 10 长细比对构件承载力的影响

Fig.10 Influence of slenderness ratio on the bearing capacity of members

为了保证输电塔具有良好的承载能力,输电塔主材的长细比通常较小,为了进一步明确长细比的影响,本研究采用验证后的数值模型研究了长细比 80、100 和 120 三种情况。不同长细比下构件承载力变化如图 11 所示。由图 11 可知,随着长细比从 30 增加到 120,加固构件承载力呈现下降趋势,承载能力从 1225.75 kN 降低到 513.66 kN,降低 58.1%。然而,加固后角钢承载力提升率随长细比增加而增大,当长细比为 120 时,提升率达到 67.3%。因此,长细比越大,加固效果越显著,承载力提升率越高。

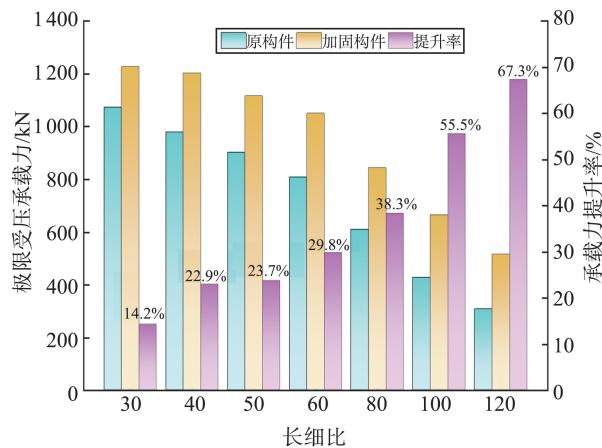


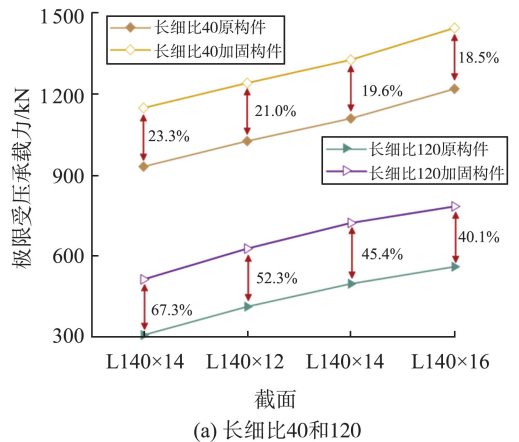
图 11 不同长细比下的构件承载力

Fig.11 Bearing capacity of members under different slenderness ratio

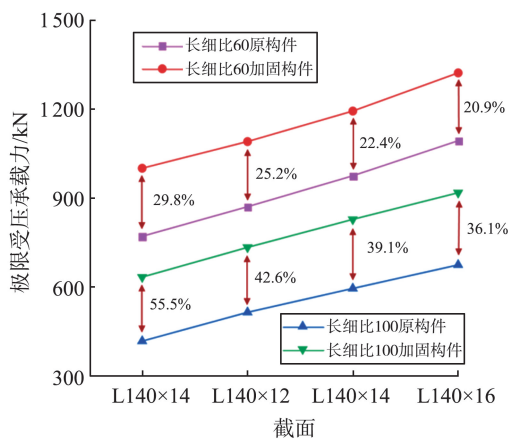
3.2 宽厚比影响

为了探究主材构件宽厚比对加固效果的影响,建立不同宽厚比的组合构件模型进行有限元分析。选取被加固主材规格 L140×10、L140×12、L140×14 和 L140×16 四种不同截面,四种截面分别对应被加固主材宽厚比 14、11.67、10 和 8.75。建立长细比 40、60、100 和 120 的加固构件有限元模型。不同被

加固主材宽厚比对加固构件的承载力提升效果如图 12 所示。从图 12 可以看出,随着被加固主材宽厚比的减小,原构件和加固构件的极限承载力均呈现增大趋势,但加固构件极限承载力的提升幅度均下降。这是由于宽厚比较大的构件,抗弯刚度较小,构件更容易发生面外变形,随着宽厚比减小,抗弯刚度增大,加固方案发挥作用的空间相对变小。对于长细比较小的加固构件,随着被加固主材宽厚比减小,承载力提升率略有下降;对于长细比较大的加固构件,随着被加固主材宽厚比减小,承载力提升率下降较显著,极限受压承载力对于角钢宽厚比变化更敏感。



(a) 长细比40和120



(b) 长细比60和100

图 12 不同宽厚比影响下的构件承载力

Fig.12 Influence of width-to-thickness ratios on ultimate bearing capacity

3.3 夹具数量影响

沿加固构件纵向均匀布置多个夹具并改变夹具数量,以探究夹具数量对加固构件承载性能的影响,选取长细比 60、80、100 和 120 的情况进行参数化分析。表 3 给出了不同夹具数量的加固构件极限受压承载力对比。对于长细比 60 和 80 的构件,夹具数量的变化对构件承载力的影响较小。随着长

细比增大,夹具数量的变化对构件承载力的影响较为显著,当长细比为100时,夹具数量为3、4、5和6时,加固构件承载力提升率分别为55.5%、69.4%、77.8%和80.8%;当长细比为120时,夹具数量为3、4、5、6和7时,加固构件承载力提升率分别为

67.3%、93.5%、105.5%、109.3%和112.3%。可以看出,当夹具数量较少时,增加夹具数量可以显著提升加固构件的极限受压承载力,当夹具增加到一定数量后,继续增加个数对加固构件极限受压承载力影响不大。

表3 不同夹具数量极限承载力对比

Table 3 Comparison of ultimate bearing capacity for different number of fixtures

构件编号	长细比	夹具数量	夹具间距/mm	未加固极限承载力/kN	加固后极限承载力/kN	承载力提升率/%
F60-3	60	3	1 068	770.89	1 000.48	29.8
F60-4		4	645		1 011.41	31.2
F60-5		5	434		1 035.30	34.3
F80-3	80	3	1 623	609.00	842.25	38.3
F80-4		4	1 015		876.35	43.9
F80-5		5	712		906.19	48.8
F100-3	100	3	2 180	426.90	663.83	55.5
F100-4		4	1 387		723.17	69.4
F100-5		5	990		759.03	77.8
F100-6		6	752		772.90	80.8
F120-3	120	3	2 736	307.03	513.66	67.3
F120-4		4	1 757		594.10	93.5
F120-5		5	1 268		630.95	105.5
F120-6		6	974		642.70	109.3
F120-7		7	779		651.90	112.3

3.4 加固材规格、钢级的影响

为了研究加固材规格和钢级对加固构件极限受压承载力的影响,本节对长细比60、80、100和120四种情况下开展不同加固材规格的承载性能分析,同时研究上述四种长细比下不同加固材的强

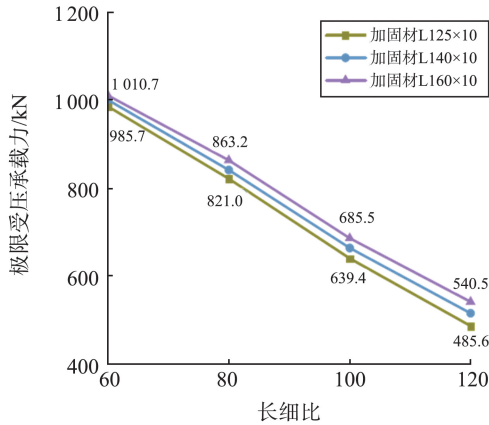
度,被加固主材钢级为Q420,加固材钢级分别为Q235、Q355和Q420,构件信息如表4所示。以加固构件F60-L12-Q4为例,对构件编号进行说明:F60表示加固构件长细比60,L12表示加固材型号L125×10,Q4表示加固材钢级采用Q420的钢材。

表4 加固材规格

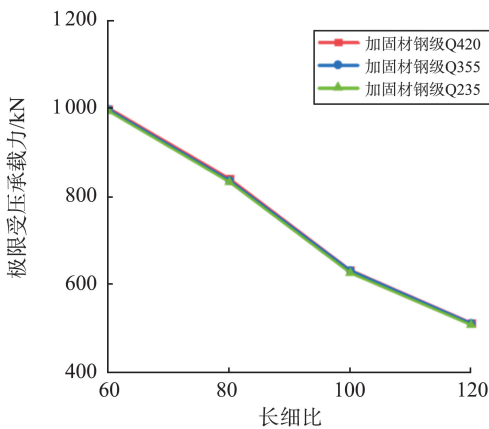
Table 4 Reinforcement specification

构件编号	长细比	夹具数量	被加固主材型号	加固材型号	加固材钢级
F60-L12-Q4	60	3	L140×10	L125×10	Q420
F60-L14-Q2					Q235
F60-L14-Q3				L140×10	Q355
F60-L14-Q4					Q420
F60-L16-Q4	60	3	L140×10	L160×10	Q420
F80-L12-Q4	80	3	L140×10	L125×10	Q420
F80-L14-Q2					Q235
F80-L14-Q3				L140×10	Q355
F80-L14-Q4					Q420
F80-L16-Q4	80	3	L140×10	L160×10	Q420
F100-L12-Q4	100	3	L140×10	L125×10	Q420
F100-L14-Q2					Q235
F100-L14-Q3				L140×10	Q355
F100-L14-Q4					Q420
F100-L16-Q4	100	3	L140×10	L160×10	Q420
F120-L12-Q4	120	3	L140×10	L125×10	Q420
F120-L14-Q2					Q235
F120-L14-Q3				L140×10	Q355
F120-L14-Q4					Q420
F120-L16-Q4	120	3	L140×10	L160×10	Q420

不同加固材规格和钢级下构件的承载性能状况如图 13 所示,由图 13 可以看出,当加固材规格为 L125×10 时,相对于加固材为 L140×10 的构件,在长细比 60、80、100 和 120 工况下,极限受压承载力分别降低 1.47%、2.52%、3.6%和 5.62%;当加固材规格为 L160×10 时,相对于加固材为 L140×10 的构件极限受压承载力分别增加了 1.02%、2.49%、3.26%和 5.22%。加固材规格的变化对承载性能有一定的影响,并且随着长细比的增大,加固材规格对承载性能的影响有增大趋势,但总体上影响并不大。加固材钢级对加固构件承载性能几乎没影响。在实际工程中当长细比较小时,加固材规格可小于被加固主材,当长细比较大时可选用与被加固主材同等规格的加固材,加固材的钢级可选择低标号的 Q235 钢材。



(a) 不同加固材规格



(b) 不同加固材钢级

图 13 不同加固材影响下构件承载力

Fig.13 Bearing capacity of members under the influence of different reinforcements

4 结论

本研究提出一种输电塔结构主材十字型无损加固方案,基于静力加载试验和有限元模拟研究了该

加固方案对角钢构件受压性能的提升效果,通过参数化分析研究了构件极限承载力的影响因素。通过上述研究,得到以下结论。

(1)通过静力加载试验可以发现,加固后构件的破坏模式会发生改变:对于长细比较小的构件,原构件整体弯扭破坏模式改变为加固后局部受压屈曲破坏;而对于长细比较大的构件,原构件整体弯曲破坏模式改变为加固后整体弯曲和局部屈曲的组合破坏模式。

(2)有限元模拟与加载试验得到的荷载-位移曲线、变形模式以及极限承载力基本一致,验证了有限元模拟具有良好的精度,与原构件相比,加固后构件受压承载力提升了 14%以上,具有良好的应用潜力。

(3)通过参数化分析发现长细比对构件极限受压承载力影响最显著,随着长细比的增大,构件极限承载力呈减小趋势,但极限承载力提升率随长细比增大而增大,说明长细比越大加固效果越好。主材宽厚比的变化会影响加固构件的承载性能,被加固主材宽厚比越大,加固效果越好。

(4)随着夹具数量增多,加固构件极限受压承载力增大。当夹具间距≤1 000 mm 时,构件极限承载力趋于平稳。加固材规格对加固构件极限受压承载力有一定影响,但影响不大,加固材钢级对极限受压承载力几乎没有影响。

参考文献:

[1] MENG X R, TIAN L, LI C, et al. Copula-based wind-induced failure prediction of overhead transmission line considering multiple temperature factors [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 247: 110138.

[2] 张亮,牛凯,罗贤超,等. 风冰荷载作用下输电塔-线体系参数敏感性分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(3): 132-140.
ZHANG Liang, NIU Kai, LUO Xianchao, et al. Sensitivity analysis of transmission tower-line system parameters under wind and ice loads [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(3): 132-140.

[3] 张思祥,张勇,姜伟国,等. 四分裂导线舞动特性及线路磨损规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(4): 120-127.
ZHANG Sixiang, ZHANG Yong, JIANG Weiguo, et al. The galloping characteristics and mechanism of wire wear of quad-bundled conductor[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(4): 120-127.

[4] 李士锋,李宏男,张卓群,等. 强风荷载作用下输电线路的连续倒塌破坏分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017,

- 37(5): 835-841.
- LI Shifeng, LI Hongnan, ZHANG Zhuoqun, et al. Power transmission line progressive collapsed analysis under strong wind load[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(5): 835-841.
- [5] 高伟, 豆河伟, 张明, 等. 基于主材防屈曲的输电塔新型抗风加固方法研究[J]. *建筑结构*, 2024, 54(3): 147-153.
- GAO Wei, DOU Hwei, ZHANG Ming, et al. Research on new wind-resistance strengthening method of power transmission tower by preventing main material buckling[J]. *Building Structure*, 2024, 54(3): 147-153.
- [6] 姚瑶, 王凌旭, 张有佳. 高压输电塔主材的角钢并联加固轴压承载力[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(3): 561-569.
- YAO Yao, WANG Lingxu, ZHANG Youjia. Axial bearing capacity of angle parallel reinforcement for high voltage transmission towers[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(3): 561-569.
- [7] 刘学武, 夏开全, 高燕, 等. 构件并联法加固输电塔的试验研究及设计建议[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 43(6): 838-844.
- LIU Xuewu, XIA Kaiquan, GAO Yan, et al. Study on strengthening the structure and its design for the transmission tower[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 43(6): 838-844.
- [8] 孙启刚, 吴健, 刘海涛, 等. 输电塔 T 形组合角钢加固构件承载性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2018, 48(12): 181-186.
- SUN Qigang, WU Jian, LIU Haitao, et al. Experimental research on bearing capacity of t-section retrofitting angles of transmission tower[J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(12): 181-186.
- [9] 李文斌, 邱智育, 马池, 等. 输电线路杆塔非焊接 Y 字形加固技术试验研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(8): 120-127.
- LI Wenbin, QIU Zhiyu, MA Chi, et al. Experimental research on a non-welding Y-shaped strengthening technique of power transmission towers[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(8): 120-127.
- [10] LU C H, MA X, MILLS J E. Modeling of retrofitted steel transmission towers[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 112: 138-154.
- [11] 张翼飞, 曾聪, 潘天林, 等. 输电塔斜材防屈曲加固的试验与数值研究[J]. *东北电力大学学报*, 2021, 41(1): 124-129.
- ZHANG Yifei, ZENG Cong, PAN Tianlin, et al. Experimental study and finite element analysis of buckling restrained reinforcement of diagonal member for transmission tower[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2021, 41(1): 124-129.
- [12] 刘树堂, 熊国文, 刘启华, 等. 基于 ANSYS 的输电铁塔抗风加固研究[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2017, 16(2): 51-57.
- LIU Shutang, XIONG Guowen, LIU Qihua, et al. Study on the strengthening of wind-resistant for transmission tower based on ANSYS[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, 16(2): 51-57.
- [13] 代紫兰. 输电塔加固腹杆角钢构件承载能力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- DAI Zilan. The load-bearing capacity study of reinforced web angle members in the transmission tower[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [14] 黎景辉, 刘向宏, 王嘉琪, 等. 角钢输电塔外贴槽钢并联加固承载力研究[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 119-128.
- LI Jinghui, LIU Xianghong, WANG Jiaqi, et al. Research on bearing capacity of angle steel transmission tower subject to parallel reinforcement by fitting channel steel[J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(2): 119-128.
- [15] BARAN E, AKIS T, SEN G, et al. Experimental and numerical analysis of a bolted connection in steel transmission towers[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 253-260.
- [16] 谢强, 孙力, 林韩, 等. 500 kV 输电杆塔结构抗风极限承载力试验研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(3): 712-719.
- XIE Qiang, SUN Li, LIN Han, et al. Experimental study on wind-resistant ultimate load-carrying capacity of 500 kV transmission tower[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(3): 712-719.
- [17] 李钰睿, 谢强, 李悦. 强风作用下带横隔面输电塔动力响应及破坏机理研究[J]. *四川电力技术*, 2024, 47(1): 1-9.
- LI Yurui, XIE Qiang, LI Yue. Research on dynamic response and failure mechanism of transmission tower with diaphragm under strong wind[J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2024, 47(1): 1-9.
- [18] 中国钢铁工业协会. 钢及钢产品——力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [19] FASOULAKIS Z C, LIGNOS X A, AVRAAM T P, et al. Investigation on single-bolted cold-formed steel angles with geometric imperfections under compression[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 162: 105733.