

角钢输电塔外贴槽钢并联加固承载能力研究

黎景辉¹, 刘向宏², 王嘉琪², 孙清^{2,✉}, 章东鸿¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: [目的] 现有角钢输电塔已持续运行多年, 结构损伤导致使用性能降低, 同时老旧输电塔设计承载力已不满足现有规范设计要求。为了解决老旧输电塔承载力不足的问题, 提出了1种角钢外贴槽钢并联加固方法, 通过试验研究与有限元分析获得了加固结构承载力, 并提出了基于弹性分析的屈曲临界荷载公式。[方法] 为了获得构件的承载力, 设置了2组试件的轴压试验, 开展了2种构件轴压有限元数值模拟: 未加固角钢、角钢贴合槽钢; 根据破坏形式推导了基于弹性分析的薄板屈曲临界荷载计算公式。[结果] 轴压试验结果表明: 未加固角钢试件发生弯扭破坏, 角钢贴合槽钢试件发生局部屈曲破坏, 加固构件承载力可有效提高。[结论] 角钢贴合槽钢改变了原有角钢的失稳破坏状态提高了角钢承载力, 建立的有限元模型可真实反映加固构件破坏状态, 理论计算公式可准确计算加固构件的轴压承载力。

关键词: 角钢; 输电塔; 并联加固; 轴压试验; 数值模拟; 局部屈曲承载力计算方法

中图分类号: TM7; TU391

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0119-10

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Bearing Capacity of Angle Steel Transmission Tower Subject to Parallel Reinforcement by Fitting Channel Steel

LI Jinghui¹, LIU Xianghong², WANG Jiaqi², SUN Qing^{2,✉}, ZHANG Donghong¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: [Introduction] The existing angle steel transmission tower has been running for many years, and the structural damage leads to the reduction of service performance. At the same time, the design bearing capacity of the old transmission tower ceases to meet the design requirements of the existing specifications. In order to address the insufficient bearing capacity of the old transmission tower, a parallel reinforcement method of angle steel fitted with channel steel is proposed. The bearing capacity of the reinforced structure is obtained through experimental research and finite element analysis (FEM), and the critical buckling load is proposed based on elastic analysis. [Method] In order to obtain the bearing capacity of members, two groups of axial compression tests on test specimens were set up. Two kinds of finite element numerical simulation include unreinforced angle steel and angle steel fitted with channel steel were conducted under axial compression. According to the failure mode, the calculation formula of buckling load of thin plate based on elastic analysis was deduced. [Result] The axial compression test results show the bending failure of the unreinforced angle steel specimen and the local buckling failure of the angle steel fitted with channel steel. The results also show that the bearing capacity of the reinforced members could be effectively improved. [Conclusion] Angle steel fitted with channel steel changes the instability failure state of the original angle steel and improves the bearing capacity of the angle steel. The established FEM can reflect the true failure state of the reinforced members, and the theoretical calculation formula can accurately calculate the axial compression bearing capacity of the reinforced members.

Key words: angle steel; transmission tower; parallel reinforcement; axial compression test; numerical simulation; calculation method of local buckling bearing capacity

收稿日期: 2022-05-08 修回日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“高强钢管输电塔风振损伤演化机理及其抗强风设计理论研究”(51978570)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来工业生产与居民生活对输电需求逐步提高,而现有角钢输电塔已持续运行多年,在原老旧输电塔设备上更换大功率输电设备超过原有输电塔设计荷载要求^[1-3];由于沿海地区受热带气旋所引发风灾导致大量输电设备损坏、倒塌^[4-6],我国将抗风设计规范提高以适应不同地区建筑抗风设计要求,原有老旧输电塔已不满足设计使用要求^[7],将之推倒重建周期长、代价大,因此采用辅助构件对原有角钢输电塔加固成为提高结构承载行之有效的措施^[8-9]。

角钢塔并联加固技术近年来引起国内外学者的广泛关注,祝凯等^[10]通过十字填板连接件在原角钢外侧并联加固角钢构成双角钢十字组合截面构件,并通过有限元分析确定了填板厚度、角钢壁厚、长细比、填板间距等参数对加固结构承载力的影响。苏子威等^[11]通过十字填板与角形夹具将副主材角钢并联在原角钢外侧形成十字形组合截面对角钢进行加固,并对加固后的组合构件进行了轴压试验,确定了夹具数量、布置方式、螺栓预紧力等对构件传力效率和承载力的影响。姚瑶等^[9]通过角形填板夹具在原角钢内侧并联同尺寸加固角钢构成组合构件对原结构进行加固,通过轴压试验确定了试件的受力机理、应变变化规律等,并运用数值分析探讨了设计参数对构件承载力的影响。Yang等^[10]通过角形夹具并联加固角钢对格构式输电塔塔腿进行加固,提出了用于模拟连接螺栓转动的三维模型,并通过有限元分析验证了三维螺栓连接模型的通用性和关键设计参数对加固构件承载力的影响。

现有研究中角钢输电塔塔腿加固多采用并联加固角钢构成十字组合截面的方式^[11-13],但外部并联同尺寸角钢增大了构件的迎风面积,在受风灾影响严重区域其加固效果远不如预期,因此在不过分增大原有迎风面积的前提下,本文提出在角钢肢外侧并联加固槽钢构成组合截面的加固方式。

1 试验方案

被加固角钢尺寸为 L140×10,通过单轴拉伸试验确定钢材的屈服强度、抗拉强度与弹性模量等参

数,如表 1 所示。

表 1 钢材性能参数

Tab. 1 Steel performance parameter

试件类别	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
L140×10(角钢)	2.06×10^5	379.70	562.60
L63×5(角钢)	2.06×10^5	388.48	569.23
[12(槽钢)	2.06×10^5	487.32	615.92

本试验试件共分两组:试件 1 为未加固角钢试件,计 3 根试样;试件 4 为本文拟提出的贴合槽钢加固方案,计 3 根试样。试件 1 中单角钢长度为 3 m,试件中部两侧对称设置侧向支撑模拟角钢输电塔实际杆系受力机制,单角钢与侧向支撑间采用螺栓连接,如图 1(a) 所示;试件 4 为角钢贴合槽钢试件,被加固角钢(单角钢)两肋通过螺栓连接槽钢,两者通过螺栓预紧力固定,侧向支撑两侧贴合槽钢通过桥接板连接,桥接间距为 300 mm,如图 1(c) 所示。为便于轴向加载,被加固角钢上、下端设有边长为 300 mm、厚度为 40 mm 的方形加载板。

1.1 试验加载设备

本文试验采用 500 t 液压伺服机控制千斤顶加载,角钢长边方向与反力架长边方向平行,铰接端与加载端处连接构造采用球型铰;为满足外侧贴合槽钢不与端板相接触,二者间距设置为 70 mm,以避免加固材直接承力;侧向支撑对称设置于被加固角钢中点两侧,二者间采用螺栓连接,使被加固角钢与侧向支撑间可发生转动;侧向支撑与反力支架连接梁间采用螺栓连接,如图 2 所示。

1.2 试验加载制度

试验采用四阶段加载:第一阶段为预加载,采用 1 kN/s 的速度加载至 50 kN 并持荷 15 s,以消除试验装置间隙,确保加载装置与试件充分接触;第二阶段为轴压力控制加载,每 20 kN 为单位加载步,当轴压荷载值达到 500 kN 时持荷 15 s;第三阶段采用位移控制加载,每 0.2 mm 为单位加载步;当轴压荷载临近 850 kN 时,减半加载步,采用 0.1 mm 为单位加载步,直至构件到达极限承载力,当轴压荷载下降至峰值荷载的 85% 时停止试验。

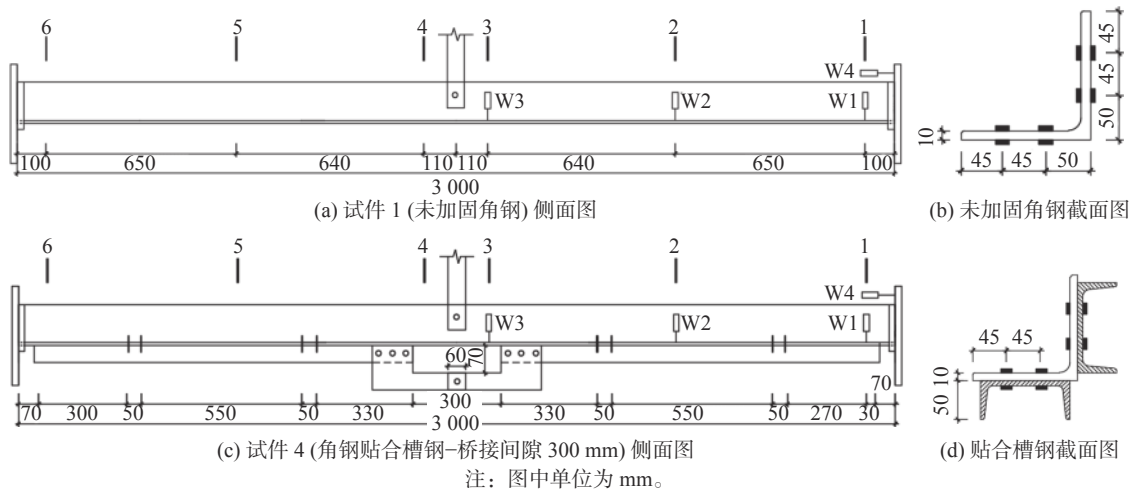


图 1 试件示意图

Fig. 1 Diagram of test specimen

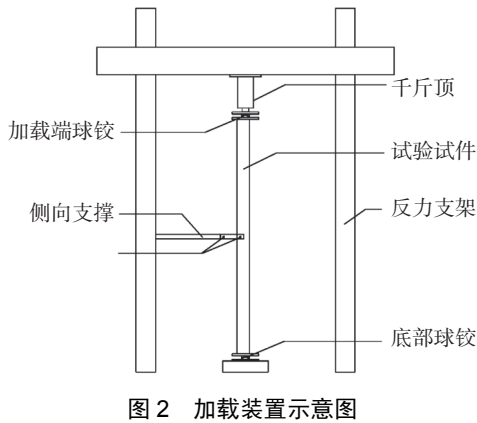


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Diagram of loading device

转动现象, 失稳位置处构件的侧向变形明显, 角钢两肢扭转方向一致, 试件 1 的 3 根同工况试样的破坏现象如图 3 所示。

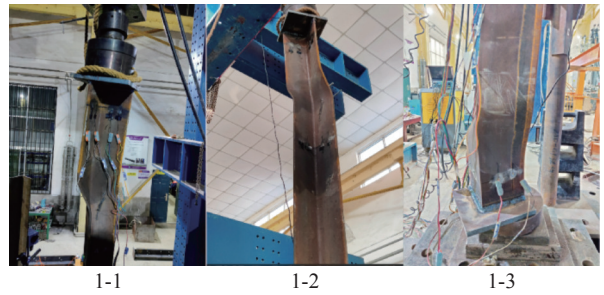


图 3 试件 1 弯扭破坏

Fig. 3 Flexural-torsional failure of test specimen 1

1.3 试验测点布置

位移计沿试件长度方向依次顺序布置, 加载端沿轴向布置 W1, 自加载端至侧向支撑沿横向依次布置 3 个位移计: W2、W3、W4, 如图 1(a) 所示; 为准确量测轴力作用下试件 1 和试件 4 的应力分布, 分别沿试件长度方向的 1~6 截面设置应变测点, 如图 1(a)、图 1(c) 所示, 试件 1 和试件 4 截面应变测定布置如图 1(b)、图 1(d) 所示。

2 试验破坏分析

2.1 试件 1 —— 未加固角钢 (单角钢)

在轴压荷载作用下, 未加固角钢失稳发生于四分点与上(下)端中点截面, 角钢出现绕弱轴的整体弯曲变形并伴随截面扭转, 呈现既弯又扭的失稳形式; 角钢发生失稳破坏时端部球铰支座出现明显的

2.2 试件 4 —— 角钢贴合槽钢

在轴压荷载作用下, 试件 4 于加载端部发生局部屈曲, 主材角钢在轴压荷载作用下出现波浪形屈曲变形, 随着轴压荷载不断增大, 试件呈现较好的延性, 当轴压荷载临近屈曲临界荷载时, 随着试件变形增大, 荷载-位移曲线呈现陡降趋势, 得到了明显的下降段曲线, 加载端球铰支座因主材发生显著的局部屈曲变形而出现明显的倾斜, 加载过程中 3 根试样均未出现整体失稳, 试件 4 的 3 根同工况试样的破坏现象如图 4 所示。

2.3 受力机理分析

通过实测未加固角钢试件(单角钢)、角钢贴合槽钢试件轴压承载力, 可得各试件的荷载-位移曲线如图 5 所示。



图 4 试件 4 局部屈曲破坏

Fig. 4 Local buckling failure of test specimen 4

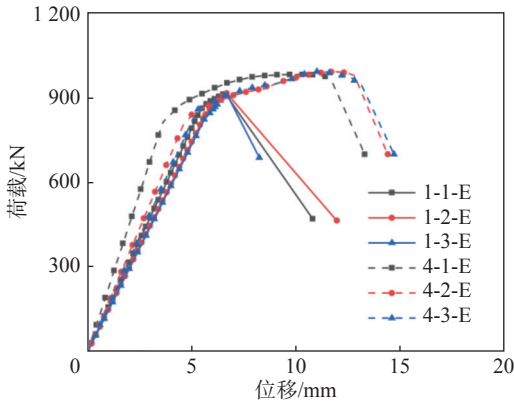


图 5 试验荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of test

由图 5 可知, 试件 1 的 3 根同工况试样的荷载-位移曲线弹性段刚度基本相同, 荷载-位移曲线未出现明显的非线性特征, 当轴压荷载到达峰值荷载后, 承载力迅速下降; 试件 4 的 3 根同工况试样的荷载-位移曲线弹性段刚度基本相同, 且弹性段刚度略大于试件 1, 荷载-位移曲线临近峰值荷载时呈现明显的非线性, 轴压荷载增长速度缓慢, 轴向变形发展较快, 试件 4 在承载力降低前具有良好的变形性能, 当构件变形发展过大已无法继续承载时, 承载力迅速下降。角钢贴合槽钢平均峰值承载力为 978.60 kN, 对比未加固角钢提高 6.87%。

通过试件 1 和试件 4 的荷载-位移曲线所得峰值承载力与峰值荷载对应轴向位移可知, 角钢贴合槽钢试件可有效提高主材角钢轴压承载力, 同时可明显改善主材角钢的延性, 使角钢由四分点截面处的弯扭失稳(试件 1 破坏现象)转变为角钢端部的局部屈曲(试件 4 破坏现象)。

图 6 所示为试件 4 的 2-2 截面(CH34、CH35、CH38 和 CH39)荷载-竖向应变曲线, 由此可知, 随着

轴压荷载增大, 主材角钢测点压应变始终呈增大趋势, 贴合槽钢测点在加载初期竖向应变保持不变, 当轴压荷载达 800 kN 时, 贴合槽钢压应变呈增大趋势, 在临近峰值荷载时协同主材受力。

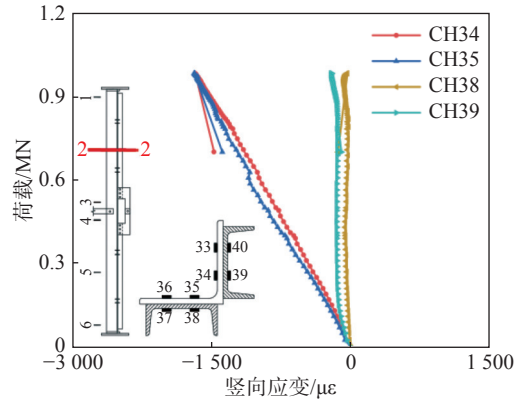


图 6 试件 4 截面 2-2 近肢背荷载-竖向应变曲线

Fig. 6 Load-vertical strain curve of test specimen 4 on section 2-2 near limb back

图 7 所示为试件 4 的 2-2 截面(CH33、CH36、CH37 和 CH40)荷载-竖向应变曲线, 由此可知, 随着轴压荷载增大, 主材角钢测点压应变始终呈增大趋势, 因加载初期螺栓与试件间存在空隙且随轴压力增加逐渐压紧从而导致测点 36 荷载-应变曲线出现突然增大的刚度变化; 贴合槽钢测点在加载初期竖向应变保持不变, 当轴压荷载达 800 kN 时, 贴合槽钢压应变呈增大趋势, 近肢背处荷载-应变变化规律与近肢尖处保持一致, 证明主材角钢受力较为均匀。

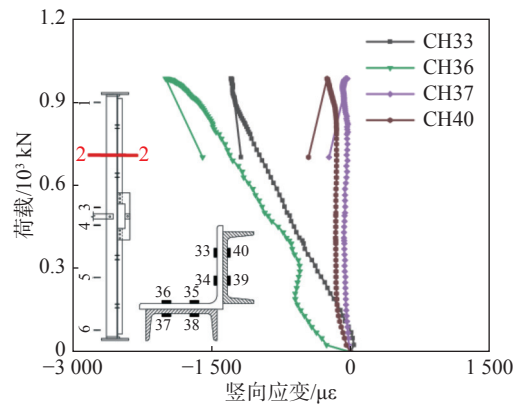


图 7 试件 4 截面 2-2 近肢尖荷载-竖向应变曲线

Fig. 7 Load-vertical strain curve of test specimen 4 on section 2-2 near limb tip

综上所述, 当轴压荷载达 800 kN 以上时, 贴合槽钢与主材协同受压, 截面应力出现重分布现象。角钢外侧贴合槽钢有效增大了构件抗弯、扭转、翘

曲刚度,使构件由整体弯扭失稳转变为主材板件的局部稳定问题,根本上改变了构件的破坏形式,同时有效提高了构件的承载力和延性。

3 数值仿真分析

3.1 有限元模型建立

本文采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立有限元仿真模型,主材角钢与贴合槽钢均采用三维实体线性缩减积分单元 C3D8R 模拟,采用双折线模型模拟钢材屈服后的应力-应变关系^[13],如图 8 所示。

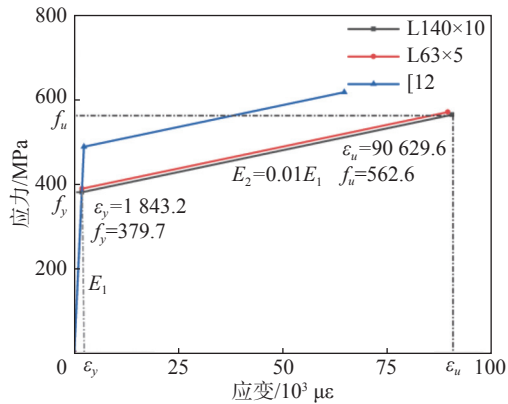
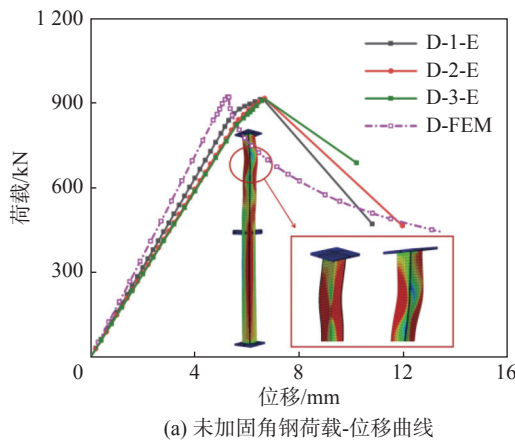
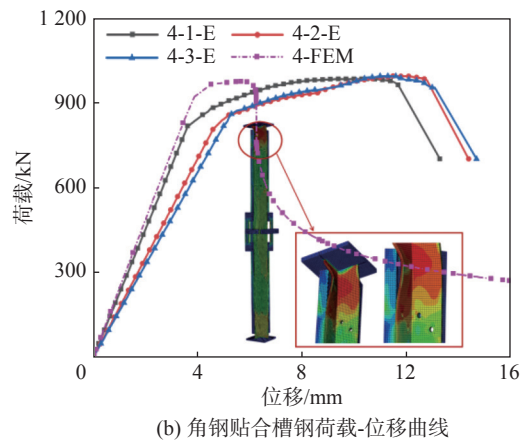


图 8 角钢/槽钢钢材应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of angle steel and channel steel



(a) 未加固角钢荷载-位移曲线



(b) 角钢贴合槽钢荷载-位移曲线

图 9 试验与有限元荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of test and finite element

3.2 参数分析

以未加固角钢、角钢贴合槽钢完整结构有限元模型作为分析基础,分析构件长细比对加固构件承载力的影响,判断角钢贴合槽钢对各长细比构件的加固有效性。

参数化模型信息如下:角钢贴合槽钢构件变长

进行网格划分时采用结构化网格划分技术,将各构件划分为规则的六面体单元,加载端与底部铰支端采用 MPC 刚性梁耦合参考点施加位移约束,底部采用铰接边界条件,加载端约束 x 、 y 方向平动自由度, z 方向设置加载位移。侧向支撑端部与反力架连接螺栓外表面设置约束并使侧向支撑可发生绕连接螺栓的有限转动,贴合槽钢与主材角钢间连接螺栓采用 MPC 刚性梁模拟。采用有限元进行静力分析前导入最低阶屈曲模态作为构件的初始缺陷,导入屈曲模态的比例系数取为 $L/1000$, L 为构件长度,各组件间接触关系为硬接触,摩擦系数为 0.25。

如图 9(a) 所示,单角钢有限元模拟所得荷载-位移曲线与试验荷载-位移曲线符合良好,有限元分析所得构件破坏现象与试验保持一致,均为四分点截面处的弯扭失稳;数值模型峰值荷载为 921.78 kN,对比试验峰值承载力平均值误差为 0.67%。

如图 9(b) 所示,角钢贴合槽钢有限元模拟所得荷载-位移曲线与试验荷载-位移曲线符合良好,有限元分析所得构件破坏现象与试验保持一致均为端部加载端主材角钢局部屈曲;数值模型峰值荷载为 973.10 kN,对比试验峰值承载力平均值误差为 0.56%。

细比分析时始终保持贴合槽钢与角钢端部间距为 70 mm,以满足加固材不直接承受轴压荷载的要求,侧向支撑处槽钢断开间距为 300 mm,以满足侧向构件安装空间的要求;桥接板长度与试验模型一致为 600 mm,角钢与外贴槽钢第一连接螺栓安装位置始终距外贴槽钢端部(铰接段)300 mm,第二连接螺栓

安装位置距侧向支撑中截面 330 mm, 以上参数均不随长细比变化而改变。

如图 10(a) 所示, 随着构件长细比增大, 未加固角钢荷载-位移曲线弹性段刚度随长细比增大而逐渐降低, 构件发生由弯扭失稳到弯曲失稳形式的转变; 如图 10(b) 所示, 随着构件长细比增大, 角钢外贴槽钢荷载-位移曲线弹性段刚度随长细比增大而逐渐降低, 刚度下降幅度明显弱于未加固角钢构件, 原因在于外贴槽钢与角钢构成组合截面, 大幅提高了原有截面的抗弯刚度, 使其截面的强弱轴发生转变, 构件失效模式由未加固前的弯扭失稳转变为加固后

主材角钢的局部屈曲, 采用贴合槽钢加固后, 长细比增大未能改变加固构件的破坏形式。

由图 11 可知, 随着角钢长细比增大, 角钢贴合槽钢加固效率显著提升。未加固角钢随长细比增大, 试件破坏形式由整体弯扭失稳转变为绕截面弱轴的整体弯曲失稳, 试件承载力随长细比增大下降迅速; 角钢贴合槽钢试件失稳模式随长细比变化不显著, 均为加载端部主材角钢的波浪状薄板局部失稳, 试件承载力随长细比增大未出现大幅下降趋势, 因此采用角钢贴合槽钢所得试件的加固承载力随长细比变化较为可控, 可有效提高构件的极限承载力。

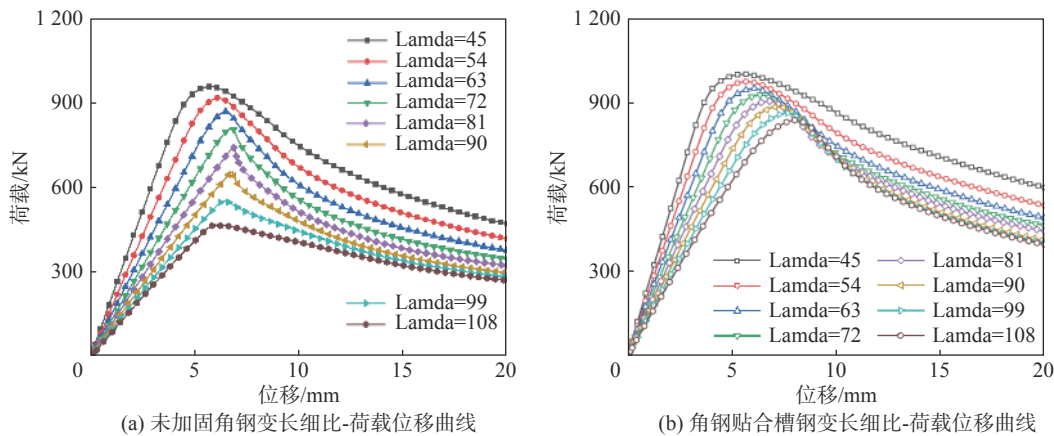


图 10 变长细比-荷载位移曲线

Fig. 10 Variable slenderness ratio - load displacement curve

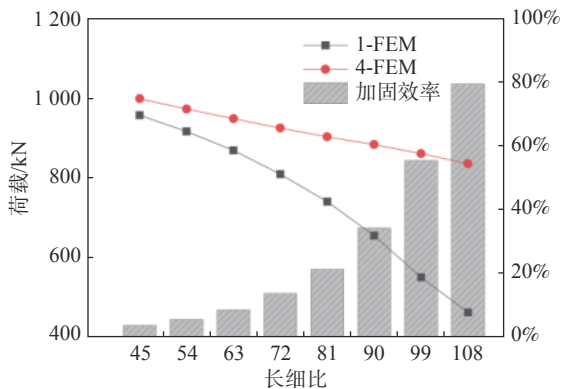


图 11 构件承载力-长细比曲线

Fig. 11 Bearing capacity - slenderness ratio curve of member

4 加固理论分析

角钢属于单轴对称构件, 当所采用的加固措施对改善角钢弱轴抗弯刚度效果较强时, 加固后构件已不易发生整体性的弯扭失稳, 转而在主材角钢某

一枝发生局部稳定问题^[14-15]。

4.1 局部屈曲方程推导

根据试件 4 最终破坏形态, 可将加固后构件失稳问题归结为主材角钢局部屈曲, 由于所采用的角钢截面宽厚比超限不满足截面局部稳定性要求^[16-18], 当截面受压时同一截面各测点荷载-应变速率不同, 因而截面应力分布并不均匀, 角钢肢尖边缘处将会产生明显的集中应力问题, 当角钢肢尖截面应力达到屈服, 试件将因角钢肢局部屈曲而丧失承载力。

由于角钢翼缘厚度与翼缘幅面宽度之比介于 $\left(\frac{1}{80} \sim \frac{1}{100}\right) < \frac{t}{b} = \frac{1}{14} < \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{8}\right)$, 板的剪切变形与弯曲

变形可忽略, 可采用均匀受压板理论计算角钢肢翼缘的弹性屈曲承载力^[19-21]。局部稳定计算简图如图 12 所示, 所分析的轴压板边界条件为两加载边固定, 非加载边一边自由一边固定。 a 和 b 分别为板受力方向的长度和垂直受力方向边的长度, P_x 为轴向压

力,计算局部屈曲临界应力取决于 a 、 b 和板的厚 t 以及加载边和非加载边的约束条件等。

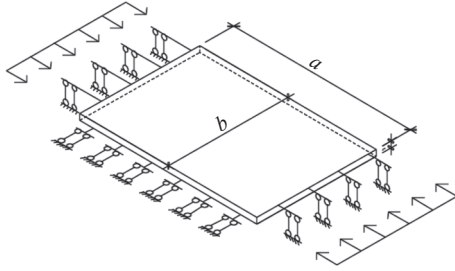


图 12 受压板受力示意图

Fig. 12 Stress diagram of pressure plate

根据单向均匀受压矩形板建立平衡方程:

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + p_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

式中:

x —受压方向的长度变量(mm);

y —沿垂直于受压方向的长度变量(mm);

D —单位宽度板的抗弯刚度($\text{N} \cdot \text{mm}^3$), $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$;

w —矩形板任意点的挠度(mm)。

根据四边简支矩形板边界条件:

$$\text{当 } x=0 \text{ 和 } x=b \text{ 时, } \omega = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0;$$

$$\text{当 } y=0 \text{ 和 } y=b \text{ 时, } \omega = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0。$$

可得四边简支板弹性屈曲条件:

$$\frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^2}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} - \frac{p_x}{D} \times \frac{m^2 \pi^2}{a^2} = 0 \quad (2)$$

式中:

$$p_x \text{—屈曲荷载, } p_x = \frac{a^2 \pi^2 D}{m^2} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)。$$

板屈曲时垂直受力方向仅产生一个半波,而此时受力方向产生半波数 m 需使对应的屈曲荷载为最小值,将 m 视作弹性屈曲荷载的连续函数,求导得到其极值点 P_{crx} 所对应 $m = \frac{a}{b}$, 因 m 的物理意义为受力方向对应的半波数,而 $\frac{a}{b}$ 通常并不为整数,因此计算时 m 取值为与 $\frac{a}{b}$ 接近且使 P_{crx} 最小的整数,因此弹性屈曲临界公式可表达为:

$$p_x = k \cdot \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (3)$$

式中:

$$k \text{—屈曲系数, } k = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2。$$

现有研究发现,当加载边为固定边界时, k 值有所提高,因此将加载边固定,非加载边一边固定,一边自由所得 k 值曲线拟合,如图 13 所示。

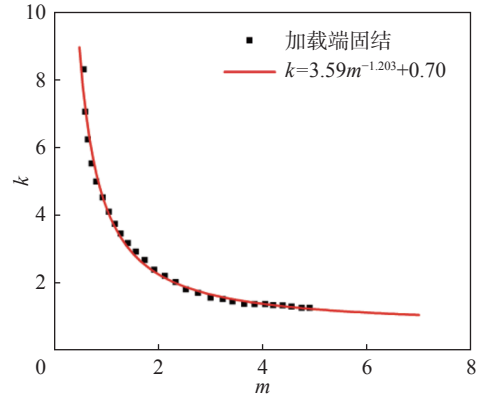


图 13 k - m 关系曲线

Fig. 13 k - m relation curve

4.2 修正局部稳定承载力计算理论

由于主材角钢存在初始缺陷,理想薄板弹性屈曲理论计算得到的承载力偏大。基于验证的有限元分析结果与理想薄板弹性局部失稳承载力之比确定修正的局部稳定承载力计算方法,如表 2 所示,得到以构件长细比为自变量的修正局部稳定承载力 $P_{\text{max,C}}$ 计算公式:

$$\eta = \frac{\ln \lambda}{10} \quad (4)$$

$$\xi = -3\eta^2 + 1.8\eta + 0.165 \quad (5)$$

$$P_{\text{max,C}} = \xi \cdot k \cdot \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (6)$$

式中:

λ —角钢长细比, $\lambda = \frac{l}{i}$;

i —角钢截面回转半径(mm), $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$;

k —屈曲系数, $k = 3.59m^{-1.203} + 0.70$, $m = \frac{a}{b}$;

a —受压方向加载端至屈曲位置最近螺栓的距离(mm),针对本文具体可取 370 mm;

b —角钢肢宽(mm),针对本文具体可取 140 mm。

4.3 计算理论验证与小结

根据上述得出的修正局部稳定承载力计算公式采用有限元计算承载力进行验证,验证模型构件分别为 Test-Rein4-1、Test-Rein4-2 和 Test-Rein4-3,如

表 2 理想弹性局部稳定承载力计算表

Tab. 2 Calculation table of ideal elastic local stability bearing capacity

试件编号	$d \times t / (\text{mm} \times \text{mm})$	长度/mm	长细比	ξ	m	k	$P_{\max, C} / \text{kN}$	$P_{\max, \text{FEM}} / \text{kN}$	$\frac{P_{\max, C}}{P_{\max, \text{FEM}}}$
Rein4-1	L140×10	2500	45.05	0.42	2.64	1.81	1000.71	1000.80	1.00
Rein4-2	L140×10	3000	54.06	0.41	2.64	1.81	977.02	974.91	1.00
Rein4-3	L140×10	3500	63.07	0.40	2.64	1.81	953.24	950.79	1.00
Rein4-4	L140×10	4000	72.08	0.39	2.64	1.81	929.87	927.20	1.00
Rein4-5	L140×10	4500	81.10	0.38	2.64	1.81	907.11	905.34	1.00
Rein4-6	L140×10	5000	90.11	0.37	2.64	1.81	885.06	886.20	1.00
Rein4-7	L140×10	5500	99.12	0.36	2.64	1.81	863.73	863.38	1.00
Rein4-8	L140×10	6000	108.13	0.35	2.64	1.81	843.10	838.25	1.01
Test-Rein4-1	L140×10	2750	49.56	0.41	2.64	1.81	988.93	988.97	1.00
Test-Rein4-2	L140×10	3750	67.58	0.39	2.64	1.81	941.49	938.85	1.00
Test-Rein4-3	L140×10	4250	76.59	0.38	2.64	1.81	918.41	918.42	1.00

注: Rein4-1中, “Rein4”代表试件类型为角钢贴合槽钢(加固试件), “1、2……8”表示变长细比试件编号; $P_{\max, C}$ 表示公式计算承载力; $P_{\max, \text{FEM}}$ 表示有限元计算承载力; Test-Rein4-1中 “Test-Rein4”代表验证试件, 其类型为角钢贴合槽钢(加固试件), “1、2、3”表示验证试件编号。

表 2 所示。验证模型与计算公式所得承载力一致, 证明修正局部稳定承载力计算公式可有效计算大长细比角钢贴合槽钢构件的极限承载力。

5 结论

1) 轴压荷载作用下, 未加固角钢试件出现绕弱轴的整体弯曲并伴随截面扭转, 呈现弯扭失稳破坏形式, 荷载-位移曲线上段未出现明显的非线性特征, 达到失稳临界荷载后承载力迅速下降, 构件发生弹性失稳。

2) 轴压荷载作用下, 角钢贴合槽钢试件主材角钢在端部加载区发生波浪形局部屈曲, 荷载-位移曲线可划分为线性段与非线性段, 临近失稳荷载时曲线具有明显的非线性, 构件延性较好。

3) 考虑构件侧向支撑结构建立有限元模型所反映构件的破坏形式与试验基本相同, 所得荷载-位移曲线与试验符合良好, 采用的模拟方法具有良好的准确性。

4) 角钢贴合槽钢失稳模式随长细比变化不显著, 均为加载端部区域主材角钢发生波浪状薄板局部失稳, 试件承载力随长细比增大未出现大幅下降, 该加固措施可有效提高大长细比构件的极限承载力。

5) 基于理想薄板弹性失稳理论推导的、以构件长细比为自变量的修正局部失稳承载力计算公式具有良好的计算精度, 可用于计算贴合槽钢加固措施

下不同长细比角钢的极限承载力。

参考文献:

- [1] 薛晓敏, 袁红丽, 饶翼, 等. 输电铁塔单变双拼角钢转换节点承载力研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 11-19. DOI: 10.7652/xjtub202008002.
- [2] 杨风利, 黄国, 牛华伟, 等. 输电塔角钢杆件阻力系数及背风面遮挡效应研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 25-36. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2019.11.003.
- [3] 邵帅, 杨风利, 程永锋, 等. 大跨越输电高塔发展历程及其结构承载性能研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊1): 313-331. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221479.
- [4] SHAO S, YANG F L, CHENG Y F, et al. Development of long-span high-rise transmission towers and research on structural bearing capacity: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Supp. 1): 313-331. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221479.
- [5] 王荣鹏, 王干军, 吴毅江. 侧向横风作用下角钢输电塔的动力响应研究 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 88-91. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017.
- [6] WANG R P, WANG G J, WU Y J. Research on dynamic responses of a transmission tower with angle section members under lateral wind loadings [J]. Energy Construction, 2015, 2(1):

- 88-91. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.017).
- [5] 肖凯,付兴,雷旭,等.输电线路风致倒塌失效分析及监测方案[J].*建筑科学与工程学报*,2019,36(4):71-79. DOI: [10.3969/j.issn.1673-2049.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2049.2019.04.009).
XIAO K, FU X, LEI X, et al. Failure analysis of transmission line subjected to wind loading and monitoring scheme [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(4): 71-79. DOI: [10.3969/j.issn.1673-2049.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2049.2019.04.009).
- [6] 雷旭,付兴,肖凯,等.强风作用下输电塔结构不确定性倒塌分析[J].*中国电机工程学报*,2018,38(增刊1):266-274. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665).
LEI X, FU X, XIAO K, et al. Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(Supp. 1): 266-274. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665).
- [7] 陈城,许海源,王晨,等.500 kV输电塔线体系强风荷载倒塌分析[J].*工业建筑*,2019,49(12):36-41. DOI: [10.13204/j.gyjz201912007](https://doi.org/10.13204/j.gyjz201912007).
CHEN C, XU H Y, WANG C, et al. Collapse analysis of 500 kilovolts transmission tower line system under strong wind load [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(12): 36-41. DOI: [10.13204/j.gyjz201912007](https://doi.org/10.13204/j.gyjz201912007).
- [8] 杨正,谢强,张骥,等.输电塔T形组合角钢加固试验及理论分析[J].*电力电容器与无功补偿*,2020,41(3):147-155. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.024](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.024).
YANG Z, XIE Q, ZHANG J, et al. Test and theoretical analysis of T-section combined angles retrofitting scheme for transmission tower [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(3): 147-155. DOI: [10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.024](https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.03.024).
- [9] 刘翔,庄志伟,江巴彦,等.输电铁塔新型加固方式的试验研究[J].*钢结构*,2018,33(11):113-116. DOI: [10.13206/j.gjg201811020](https://doi.org/10.13206/j.gjg201811020).
LIU X, ZHUANG Z W, JIANG S Y, et al. Experimental research on new strengthening method for transmission tower [J]. *Steel Construction*, 2018, 33(11): 113-116. DOI: [10.13206/j.gjg201811020](https://doi.org/10.13206/j.gjg201811020).
- [10] 祝凯,郭耀杰,孙云,等.Q420大规格双角钢十字组合截面构件受力性能[J].*科学技术与工程*,2021,21(30):13016-13023. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.30.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.30.031).
ZHU K, GUO Y J, SUN Y, et al. Mechanical performance of Q420 large-size double-angle steel cross sectional members [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(30): 13016-13023. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2021.30.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2021.30.031).
- [11] 苏子威,李敏生,严斌,等.新型构件并联法加固角钢输电塔试验研究及设计建议[J].*建筑结构*,2020,50(6):95-98. DOI: [10.19701/j.jzjg.2020.06.018](https://doi.org/10.19701/j.jzjg.2020.06.018).
SU Z W, LI M S, YAN B, et al. Tests and design suggestion on a new type of paralleling component method in reinforcing angle steel transmission tower [J]. *Building Structure*, 2020, 50(6): 95-98. DOI: [10.19701/j.jzjg.2020.06.018](https://doi.org/10.19701/j.jzjg.2020.06.018).
- [12] 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. DOI: [10.3969/j.issn.0258-2724.20190370](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20190370).
YAO Y, WANG L X, ZHANG Y J. Axial bearing capacity of angle parallel reinforcement for high voltage transmission towers [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(3): 561-569. DOI: [10.3969/j.issn.0258-2724.20190370](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20190370).
- [13] ZHUGE Y, MILLS J E, MA X. Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity [J]. *Engineering Structures*, 2012, 43: 160-168. DOI: [10.1016/j.engstruct.2012.05.017](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.017).
- [14] 刘洪义,李正良,黄祖林.输电塔角钢构件受压稳定承载力研究[J].*建筑钢结构进展*,2021,23(12):47-55. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.005](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.005).
LIU H Y, LI Z L, HUANG Z L. A study on the bearing capacity of angle steel members in transmission towers [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(12): 47-55. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.005](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.005).
- [15] 顾伟华,张大长,曹世山.输电铁塔单角钢轴压承载力计算公式及试验研究[J].*建筑钢结构进展*,2020,22(1):78-84. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.009](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.009).
GU W H, ZHANG D S, CAO S S. Analytical and experimental investigation on axial compression capacity of single angle steel for transmission line tower [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2020, 22(1): 78-84. DOI: [10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.009](https://doi.org/10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.01.009).
- [16] 孙立建,刘云贺,王媛,等.Q420等边角钢输电塔腿轴压试验研究及数值分析[J].*西安理工大学学报*,2015,31(2):225-230. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4710.2015.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4710.2015.02.019).
SUN L J, LIU Y H, WANG Y, et al. Experimental and numerical investigation of axial compression Q420 equal angle steel legs for transmission tower [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(2): 225-230. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4710.2015.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4710.2015.02.019).
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017 [S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [18] 郭宏超,郝际平,简政,等.Q460高强角钢极限承载力的试验研究[J].*工业建筑*,2014,44(1):118-123. DOI: [10.13204/j.gyjz201401026](https://doi.org/10.13204/j.gyjz201401026).
GUO H C, HE J P, JIAN Z, et al. Experimental study on ultimate bearing capacity of Q460 high strength angle [J]. *Industrial*

Construction, 2014, 44(1): 118-123. DOI: 10.13204/j.gyjz201401026.

- [19] 张爱林, 张庆芳. 单角钢构件稳定承载力设计方法与研究综述 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(8): 1199-1207. DOI: 10.11936/bjutxb2015100015.

ZHANG A L, ZHANG Q F. Review of steel single angles subject to compression and bending [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(8): 1199-1207. DOI: 10.11936/bjutxb2015100015.

- [20] 李清扬, 冯圆圆, 刘远鹏, 等. 高强等边角钢轴压杆局部-整体相关屈曲分析 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 61-65, 71. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2016.06.013.

LI Q Y, FENG Y Y, LIU Y P, et al. Local-overall interaction buckling analysis of high-strength steel equal angle members under axial compression [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(6): 61-65, 71. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2016.06.013.

- [21] 陈绍蕃. 钢结构设计原理(2版) [M]. 北京: 科学出版社, 1998. CHEN S F. Principles of steel structure design (2nd ed.) [M]. Beijing: Science Press, 1998.

作者简介:



黎景辉

黎景辉(第一作者)

1987-, 男, 广东梅州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事输电线路结构研究工作(e-mail) 295015356@qq.com。

刘向宏

1998-, 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事钢结构、钢管混凝土组合结构等研究工作(e-mail) 1739570565@qq.com。

王嘉琪

1997-, 男, 陕西神木人, 博士研究生, 主要从事钢结构、输电塔倒塌等研究工作(e-mail) 282947554@qq.com。

孙清(通信作者)

1970-, 男, 山东莱芜人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事钢结构、型钢混凝土组合结构、结构抗震、减震与控制等研究工作(e-mail) sunq@mail.xjtu.edu.cn。

章东鸿

1972-, 男, 广东汕头人, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电力工程结构设计与研究(e-mail) zhangdonghong@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)

广 告

《南方能源建设》本期封面——绿穹之下, 深蓝之上, 净零未来: 从减碳到脱碳, 从浅蓝到深蓝

----- 封面

中国能建广东院有序推进 16 MW 级漂浮式海上风电技术研发----- 封二

新书推荐: 《燃煤机组智慧供热与灵活调峰》----- p54

新书推荐: 《火电机组烟气污染物协同脱除技术》----- p109

《南方能源建设》入选首届科创中国“科技期刊双语传播工程”----- p150

《南方能源建设》被 Elsevier Scopus 数据库收录----- 封三

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司----- 封底