

压缩型耐张线夹钢锚传力路径失效机理实验及仿真

李昊¹, 边美华², 朱登杰¹, 何雨茵², 赵林杰¹, 彭家宁²

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院(广西电力装备智能控制与运维重点实验室), 南宁 530023)

摘要: 针对输电线路压缩型耐张线夹钢芯、钢锚多次发生断裂, 为深入研究其失效机理, 设计开展NY-400/35型压缩型耐张线夹仅压钢锚的压接和拉伸试验, 得到耐张线夹钢锚压接区的极限承载能力, 并采用Solidworks建立耐张线夹仅压钢锚侧的仿真模型。通过有限元分析的方法对耐张线夹钢锚钢芯压接区的压接以及拉伸过程进行仿真分析, 并与实验结果进行比对得出耐张线夹钢锚传力路径的危险截面和失效机理。结果表明, 仅钢锚传力的耐张线夹失效形式为钢芯断裂, 握力值仅为导线计算拉断力的50%, 钢锚钢芯压接区上有钢锚出口处钢芯和最后一模压接处以及凹槽过渡区钢锚三处危险截面, 当线夹承载超过三处截面的破坏载荷或者钢芯和钢锚之间的最大接触力时会发生相应失效, 其中危险截面的破坏载荷与强度极限和截面积呈正相关, 与应力集中水平呈反相关。

关键词: 压缩型耐张线夹; 拉伸试验; 有限元仿真; 失效机理

Experiment and Simulation on Failure Mechanism of Force Transmission Path of Compression Type Tension Clamp Steel Anchor

LI Hao¹, BIAN Meihua², ZHU Dengjie¹, HE Yuyin², ZHAO Linjie¹, PENG Jianing²

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China)

Abstract: In order to investigate the failure mechanisms of compression type tension clamp steel core and steel anchor in transmission lines that frequently fracture, the compression and tensile tests of NY-400/35 compression type tension clamp steel anchor are designed to obtain the ultimate bearing capacity of the compression area of the tension clamp steel anchor, and the simulation model of tension clamp steel anchor side is established by using Solidworks. The finite element analysis method is used to simulate the crimping and tensile process of the steel core crimping area of the tension clamp steel anchor, and the dangerous section and failure mechanism of the force transmission path of the tension clamp steel anchor are obtained by comparing with the experimental results. The results show that the failure form of the tensioning clamp of the steel anchor only is the fracture of the steel core, and the grip force value is only 50% of the calculated breaking force of the wire. There are three dangerous cross sections of the steel anchor at the exit of the steel anchor and the last die pressing joint and the steel anchor in the transition zone of the groove. Failure occurs when the clamp carries more than three sections of failure load or the maximum contact force between steel core and steel anchor. The failure load of dangerous section is positively correlated with the strength limit and cross-sectional area, and inversely correlated with the stress concentration level.

Key words: compression type tension clamp; tension tests; finite element simulation; failure mechanism

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YEE0204200); 广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20220064)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YEE0204200); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd.(GXKJXM20220064)。

0 引言

压缩型耐张线夹作为输电线路广泛应用的耐张金具在线路中起承载和通流的能力,但由于服役于恶劣大气环境中,受到风和冰等环境中的不稳定荷载与腐蚀因素影响,近年来发生过多起过热与断裂事故^[1-2],严重影响着电力系统的持续供电能力,压缩型耐张线夹的安全相关问题也因此受到了广泛关注。

压缩型耐张线夹由钢锚和铝管两条传力路径承载^[3],其中铝管由于具备通流作用,压接质量问题容易引起铝管两个接触面的接触电阻增大,引起过热或疲劳腐蚀等情况^[4-8];而钢锚与钢芯压接一方面作为主要承载部位在压接不良或者大风和雨雪等附加荷载情况下频发钢锚超载断裂事故^[9-13],另一方面钢锚压接区在非压区内部隐蔽性较高,压接状况需要采用X射线等方法进行检测,失效检测成本高。因此本文主要对耐张线夹的钢锚传力路径的失效机理进行研究。

目前也有不少针对线夹失效的研究工作,其中最多的是对线夹压接工艺参数的影响程度进行分析,文献[14-17]开展漏压、欠压情况下耐张线夹的拉伸试验,研究凹槽压接情况对线夹承载能力的影响程度,且仿真分析也被应用在线夹的承载力计算中。文献[18-19]建立了线夹三维仿真模型,并在LS-DYNA中对不同钢芯钢锚压接长度下线夹压接区承力状况以及失效变化进行仿真分析;文献[20-21]则利用ABAQUS软件对铝管导线之间的不同压接长度进行仿真分析,研究在同一承载力水平下压模长度和压模次数对铝管压接区域承载能力和钢芯受损情况的影响。然而,当前研究更多关注线夹参数的影响程度,较少对耐张线夹钢锚传力路径的失效机理进行阐述。

本文将通过实验探究耐张线夹钢芯传力路径的极限承载力与失效情况,并构建耐张线夹压接和仿真的仿真模型,通过有限元对耐张线夹钢芯钢锚压接区的危险截面进行仿真分析,并从理论角度揭示其失效机理。

1 实验研究

1.1 耐张线夹压接实验

根据输电线路导线的实际运用,如图1选用一条JL/G1A 400/35型号钢芯铝绞线及其配套两组

NY-400/35压缩型耐张线夹。

按照《输变电工程架空导线(800 mm²以下)及地线液压压接工艺规程》^[22]的规定,如图2所示对导线两端进行切割标记,并在不损伤钢芯前提下逐层切掉导线外层铝股,露出钢芯,穿入钢锚套管中。

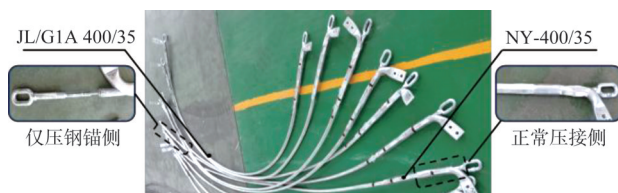


图1 耐张线夹试件图

Fig. 1 Tension clamp specimen diagram



(a) 剥线后导线



(b) 钢锚钢芯组装



(c) 钢锚与钢芯压接



(d) 铝管与导线压接

图2 耐张线夹试件压接过程

Fig. 2 Tension clamp specimen crimping process

在进行液压操作时,使用G16模具将导线两端裸露钢芯与钢锚压接,同时为进行对照,将其中一侧导线与铝管在液压机上完成压接,制成一端仅压钢芯一端正常压接试件。

1.2 耐张线夹拉伸实验

参考国家标准《GB/T 2317.1—2008 电力金具试验方法 第1部分:机械试验》^[23]首先规定耐张线夹拉伸实验的加载制度如图3所示,设置20%、50%、75%以及100%4个载荷节点在100%规定的导线拉断力(rated tensile strength, RTS)之前,从0开始进行加载,每两个载荷节点之间的加载时间为2 min,同时每个载荷节点设置1 min的保载段,在试件握力值达到100% RTS后持续加载直至试件断裂。

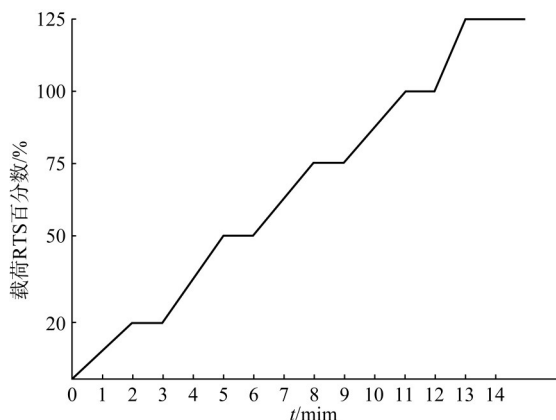


图3 拉伸实验加载过程图

Fig. 3 Diagram of the loading process for a tensile experiment

将试件固定在拉伸试验机上,按照加载制度设置试验机参数,并在线夹出口处喷漆记录,实际实验布置图如图4所示,并在实验中记录整个试件的载荷位移曲线。

1.3 实验结果

JL/G1A 400/35 型钢芯铝绞线的计算拉断力为103.7 kN,在整个拉伸过程中,由于0~20% RTS时期将试件进行拉直,不计入位移数据,将20% RTS作为加载起始点,试件的载荷位移曲线如图5所示。从20% RTS直至失效,试件存在较大的轴向变形,位移达到90 mm,且由于铝股没有压接,钢芯和铝股之间存在明显的相对位移,并在载荷达到51.53 kN时(即导线计算拉断力的50%)发出一声巨响,仅压钢锚侧的钢锚出口处钢芯出现断裂。



图4 拉伸实验布置图

Fig. 4 Layout of the tensile experiment

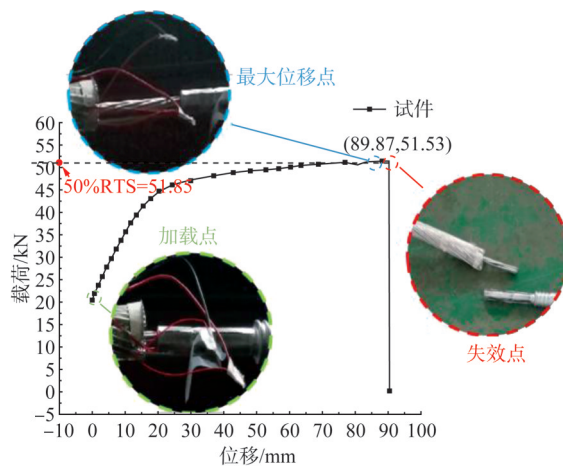


图5 拉伸实验载荷位移曲线

Fig. 5 Tensile test load displacement curve

2 有限元分析

受限于实验装置以及压缩型耐张线夹的内部隐蔽性,型式实验中仅能得到整个试件的位移数据和外部的失效现象,本节采用有限元方法对仅压钢锚侧进行仿真分析。

2.1 模型建立

在Solidworks中建立包括导线、模具以及钢芯的实体模型如图6所示,导入到仿真软件中。由于涉及到破坏,在仿真模型中采用大变形的相关设置,且对所有实体均采用三维八节点六面体C3D8R单元进行划分,能够在破坏等变形剧烈仿真分析中

具有较好的收敛性和稳定性。

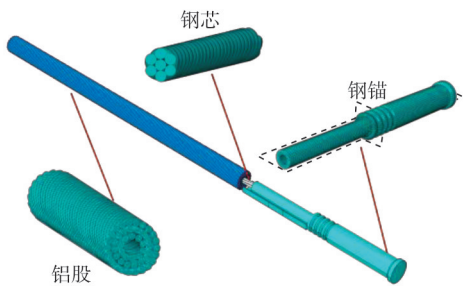


图6 耐张线夹仿真模型

Fig. 6 Simulation model of tension clamps

此外, 根据实际的材料运用情况对实体模型进行属性设置如表 1 所示。设置不同材料之间共 4 对接触类型, 同时为了更好地模拟钢锚处的失效过程, 将钢锚与钢芯压接处的网格进行加密。

表 1 部件材料参数

Tab. 1 Part material parameters

部件	弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa	切线模量 /MPa	抗拉强度 /MPa
铝股	7×10^4	0.31	125	6 100	187
钢芯	2.1×10^5	0.3	1210	6 100	1 558
钢锚	2.1×10^5	0.3	235	6 100	400

整个仿真过程分为压接和拉伸两步, 压接过程如图 7 所示, 因为从钢锚端部向导线端压接, 共三模压接, 采用位移加载方式来保证上下模具合模, 其中上下两模之间的距离分别为 4.34 mm, 压接时上下两模各自位移 2.17 mm 后合模, 同时由于压接具体实施过程中存在施工人员固定钢锚端部, 因此该过程中边界条件为在钢锚端部设置固定约束。

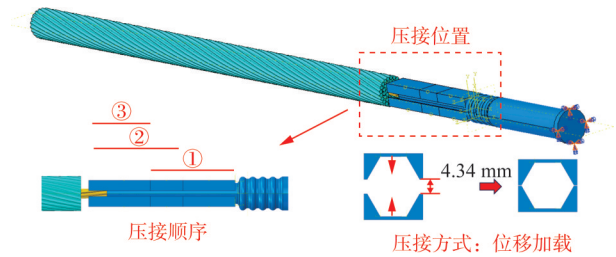


图7 耐张线夹压接过程仿真

Fig. 7 Simulation of tension clamp crimping process

拉伸过程如图 8 所示, 在钢锚端部设置固定端, 而在导线端部设置耦合点, 在耦合点上设置轴向载荷, 加载制度依据拉伸试验, 同时考虑仅压钢锚试件的试验结果, 包括 0~20 % RTS 和 20 %

RTS~50 % RTS 两个加载段。

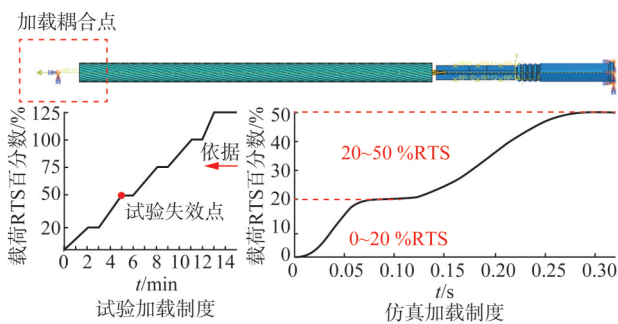


图8 耐张线夹拉伸过程仿真设置

Fig. 8 Tension clamp tensile process simulation setup

2.2 仿真结果比较

在压接过程中, 仿真模型和试件模型的钢锚压接区相关变形如图 9 所示, 其中具体压接参数压接后的比较结果如表 2 所示。

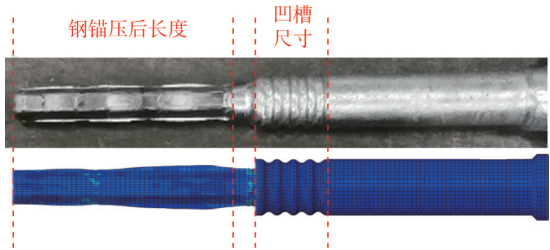


图9 压接仿真对比图

Fig. 9 Crimp simulation comparison diagram

表 2 压接参数比较结果

Tab. 2 Crimp parameter comparison results mm

压接参数	实验	仿真	差值
对边距	14.22	13.85	0.37
压接长度	108.23	111.77	-3.57

在拉伸过程中, 仅压钢锚线夹的有限元分析分析结果如图 10 所示, 仿真模型在加载到 49.56 kN 时钢锚出口处发生断裂, 从整个拉伸过程来看, 除了仿真模型和实验模型斜率突变点处存在约 2 kN 的数值差以及位移上存在差异外, 其余阶段的载荷位移曲线吻合程度较好; 同时由于材料在破坏前采用双线性弹塑性模型, 仿真模型的位移随载荷的斜率变化会出现图 10 所示的突变, 实验过程的载荷位移曲线的斜率变化会更加平滑, 这也是仿真模型和实验的差异形成的原因。

除此之外, 由于试验中没有考虑钢芯钢锚压接质量差的情况, 在仿真中通过将钢芯和钢锚之间的

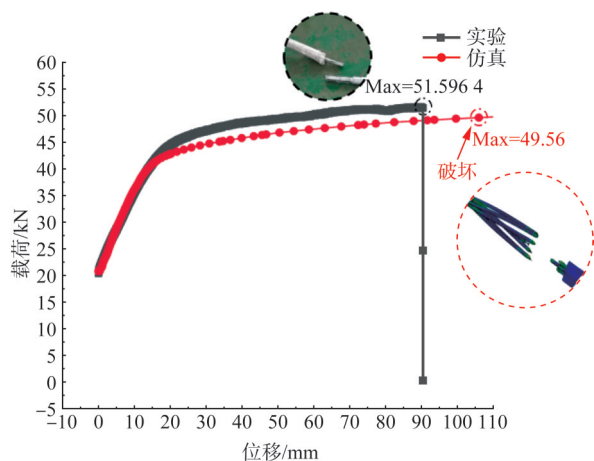


图 10 仿真结果对比图

Fig. 10 Comparison of simulation results

摩擦系数降低为 0.1 来模拟接触面之间接触力不足的情况, 仿真结果如图 11 所示, 钢芯在载荷达到 44.5 kN 时开始出现从钢锚向导线的滑移, 最终滑脱失效。

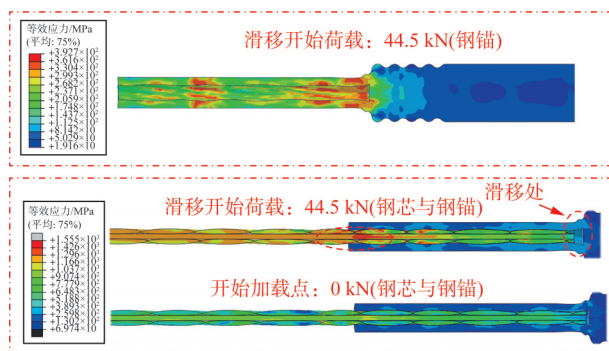


图 11 接触力不足情况仿真结果

Fig. 11 Simulation results of insufficient contact force

3 结果分析与讨论

无论是压接过程还是拉伸过程, 仿真模型和实验试件吻合程度较高, 因此本节从仿真模型分析耐张线夹钢芯传力路径失效机理。

3.1 失效危险截面分析

钢芯-钢锚传力路径上钢锚和钢芯都是经常失效的部件, 拉伸过程中两个部件的等效应力情况如图 12 所示。从钢芯和钢锚的位置关系看, 在对边距正常情况下, 钢芯钢锚之间的接触力足够, 两者之间不会出现相对滑动。将拉伸过程看成两个阶段, 在拉伸初期由于载荷较小, 大部分区域应力值还在屈服应力之下, 该阶段为弹性变形区, 在这个阶段外层钢芯在钢锚出口处出现明显的应力集中, 内部钢芯在钢锚出口处以及最后一模压接处均的应力水平都较高; 随着载荷增加到斜率突变点时, 钢芯整体的应力达到屈服极限, 钢芯部分上应力和应变的关系在仿真模型中由切线模量描述, 该阶段为刚度衰减区, 在这个阶段上钢芯在钢锚出口处的应力集中情况加剧, 钢锚在第一模压接位置和凹槽的阶梯处的应力水平高于 Q235 材料的屈服极限; 逐步加载到靠近失效点, 第二层钢芯处应力先达到强度极限, 该处钢芯刚度持续下降出现断裂。

而在考虑钢芯钢锚之间接触力不足情况时, 由图 11 可知, 钢芯和钢锚的应力集中区与接触力充足情况下没有差异, 但失效形式由于接触力下降变为了钢芯滑移失效。

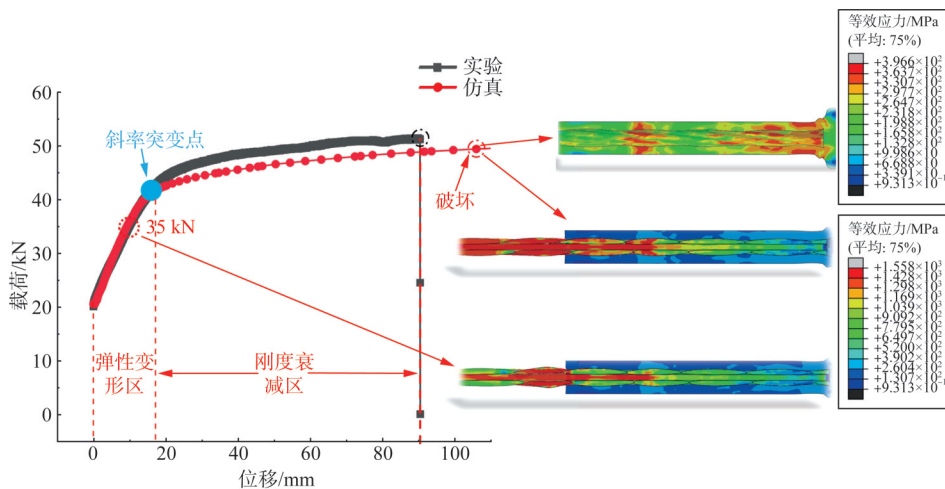


图 12 钢锚传力路径等效应力图

Fig. 12 Equivalent effect force diagram of the force transmission path of the steel anchor

综上所述, 在考虑钢芯-钢锚压接区压接质量时, 在钢芯-钢锚压接区在三处危险截面和接触面上均有失效可能, 其中危险截面为钢锚出口处的钢芯, 最后一模压接处以及凹槽阶梯处的钢锚。

3.2 失效机理分析

钢芯传力路径上三处危险截面的失效依据分别为: 钢芯压后抗拉强度 $\sigma_b^{GX'}$ 、钢锚压前和压后的抗拉强度分别为 σ_b^{GM} 和 $\sigma_b^{GM'}$, 而接触面上的失效依据为钢芯和钢锚接触力最大值 $F_{\max}^{GX-GM}$ 。

如图 13 所示耐张线夹在承受轴向荷载 F 时, 假设钢芯和钢锚的接触力在轴向上满足 $f = f(x)$ (f 为接触力; x 为接触点位置; $f(\cdot)$ 为接触力变化函数), 当钢芯压接区钢芯钢锚之间不发生滑动时, 钢芯和钢锚可以看为一个整体, 钢锚出口处钢芯承受的载荷 F_{GX} 满足式(1)。

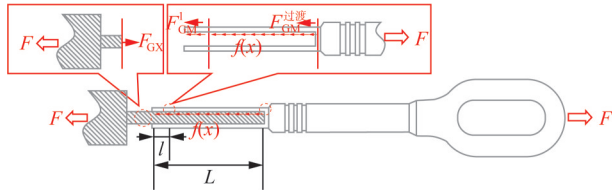


图 13 钢锚传力路径失效机理图

Fig. 13 Failure mechanism diagram of steel anchor force transmission path

$$F_{GX} = \int_0^L f(x) dx = F \quad (1)$$

式中 L 为钢锚压接区的压接长度。

在仅钢芯压接区承载时 F_{GX} 与 F 相等, 该处钢芯的应力值可由式(2)近似求解。

$$\sigma_{GX} = F_{GX} \times a / A'_{GX} \quad (2)$$

式中: a 为钢锚出口处钢芯应力集中系数; A'_{GX} 为压后钢芯截面积。

最后一模压接处的钢锚承载 F_{GM}^1 满足式(3)。

$$F_{GM}^1 = F - \int_0^l f(x) dx \quad (3)$$

式中 l 为钢锚出口处至最后一模的距离。

最后一模钢锚应力值可由式(4)近似求解。

$$\sigma_{GM}^1 = F_{GM}^1 / A'_{GM} \quad (4)$$

式中: b 为钢锚最后一模压接处应力集中系数; A'_{GM} 为压后钢锚的截面积。

而钢锚的过渡区由于不进行压接操作, 其承载值 $F_{GM}^{过渡}$ 和应力值 $\sigma_{过渡}$ 分别可由式(5)和式(6)求得。

$$F_{GM}^{过渡} = F = \int_0^L f(x) dx \quad (5)$$

$$\sigma_{过渡} = \int_0^L f(x) dx \cdot c / A_{GX}^{过渡} \quad (6)$$

式中: $A_{GX}^{过渡}$ 为钢锚过渡区的截面积; c 为钢锚过渡区应力集中系数。

因此钢锚钢芯传力路径上危险截面的最大载荷值即破坏载荷如式(7)所示, 可由相应的强度极限算出。由式(7)可知, 3个危险截面的破坏载荷均与强度极限、应力集中系数以及截面积相关, 其中与截面积和强度极限呈正相关, 与应力集中水平呈反相关。

$$\begin{cases} \max(F_{GX}) = \sigma_b^{GX'} \cdot A'_{GX} / a \\ \max(F_{GM}^1) = \sigma_b^{GM'} \cdot A'_{GM} / b \\ \max(F_{过渡}) = \sigma_b^{GM} \cdot A_{GX}^{过渡} / c \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F_{过渡}$ 为钢锚过渡区承载力; $A_{GX}^{过渡}$ 为钢锚过渡区截面积。

而当钢芯和钢锚之间压接质量差时, 钢芯出现滑移的载荷值如式(8)所示为钢芯和钢锚之间接触力的最大值。

$$\max(F_{GX-GM}) = F_{\max}^{GX-GM} \quad (8)$$

式中 F_{GX-GM} 为钢芯和钢锚接触力。

在仅压钢锚试件的握力实验中钢锚出口处存在应力集中现象, 且该处对应的破坏载荷 $\max(F_{GX})$ 为4个危险截面破坏载荷中的最小值, 因此在载荷逐渐上升后出现钢芯断裂。

依据式(1)、式(3)、式(5)、式(7)和式(8)可得, 仅压钢锚的试件轴向上承载应该满足式(9)。

$$F \leq \min(\max(F_{GX}), \max(F_{GM}^1) + \int_0^l f(x) dx, \max(F_{过渡}), F_{\max}^{GX-GM}) \quad (9)$$

考虑到钢锚钢芯接触区轴向的接触情况不同, 提取仿真模型中钢芯与钢锚接触面上的接触应力水平如图 14 所示。在危险截面至钢锚端口的接触应力水平较低, $f(x)$ 可以忽略不计, 因此式(9)可以写为式(10)。

$$F \leq \min(\max(F_{GX}), \max(F_{GM}^1), \max(F_{过渡}), F_{\max}^{GX-GM}) \quad (10)$$

综上可知, 钢锚传力路径在钢锚出口处、最后一模压接位置以及凹槽过渡区应力水平最高, 该路径的极限承载力为3个危险截面中强度极限下的破坏载荷和接触面最大接触力中的最小值。

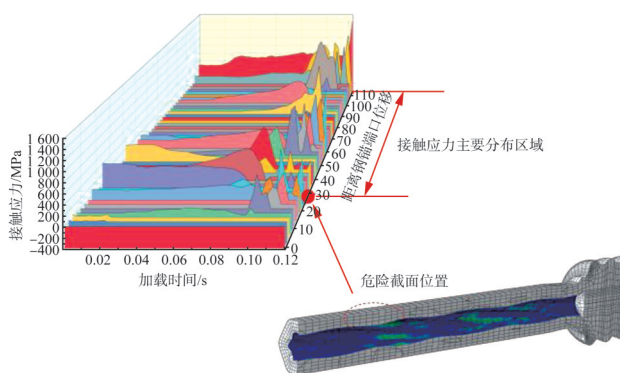


图 14 钢锚压接区接触应力

Fig. 14 Contact stress in the crimp zone of the steel anchor

4 结论

本文采用了拉伸实验和有限元仿真的方法对耐张线夹钢锚传力路径的失效机理展开研究, 结论如下。

1) 在拉伸实验中, 仅钢锚传力的耐张线夹握力值仅为导线计算拉断力的 50 %, 试件的失效形式为钢锚出口处钢芯断裂, 试件的位移达到 90 mm, 且钢芯和铝股之间有明显的相对滑动。

2) 仅钢锚进行承载时耐张线夹试件在钢锚出口处发生断裂, 根据仿真结果可知, 该处发生断裂的原因为钢芯在钢锚出口处有明显的应力集中现象, 且除了钢芯在钢锚出口处存在应力集中外, 钢锚在最后一模压接位置和凹槽阶梯处两处也存在应力集中现象, 因此钢芯传力路径上存在 3 个可能发生断裂的危险截面, 分别为钢锚出口处的钢芯, 最后一模压接处以及凹槽阶梯处的钢锚, 在考虑接触面接触力时钢芯还存在脱出钢锚的可能。

3) 钢芯传力路径上的极限承载力为 3 个危险截面在强度极限下的破坏载荷以及钢芯与钢锚之间的最大接触力中的最小值, 其中破坏载荷与强度极限和截面积呈正相关, 与应力集中水平呈反相关。

参考文献

- [1] 安利强, 罗益鑫, 李渊, 等. 输电线路压缩型耐张线夹工程失效研究进展[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 152 – 161.
AN Liqiang, LUO Yixin, LI Yuan, et al. Progress in engineering failure research of hydraulic strain clamp for transmission line [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 152 – 161.
- [2] 潘浩, 周仿荣, 马仪, 等. 输电线路覆冰情势与气象要素关联模型研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 75 – 82.
PAN Hao, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Association model

for icing situation with meteorological factors for transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 75 – 82.

- [3] 朱登杰, 赵林杰, 李昊, 等. 耐张线夹失效过程和传力特性[J]. 南方电网技术, 2022, 16(7): 61 – 66.
ZHU Dengjie, ZHAO Linjie, LI Hao, et al. Failure process and load transfer characteristic of strain clamp [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 61 – 66.
- [4] 董选昌, 曲烽瑞, 李艳飞, 等. 架空线路耐张线夹三维温度场仿真分析及验证[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 997 – 1004.
DONG Xuanchang, QU Fengrui, LI Yanfei, et al. Simulation analysis and verification on three-dimensional temperature field of strain clamps for overhead lines [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 997 – 1004.
- [5] 张勋, 刘植坚, 杨旭, 等. 110 kV 输电线路耐张线夹过热引起的故障分析[J]. 电工技术, 2018(1): 128 – 129.
ZHANG Xun, LIU Zhijian, YANG Xu, et al. Analysis on failure caused by strain clamps overheating in 110 kV transmission line [J]. Electric Engineering, 2018(1): 128 – 129.
- [6] 王若民, 詹马骥, 季坤, 等. 高压输电用耐张线夹失效的原因[J]. 机械工程材料, 2017, 41(3): 112 – 116.
WANG Ruoming, ZHAN Maji, JI Kun, et al. Failure reason of tension clamp for high voltage electricity transmission [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(3): 112 – 116.
- [7] 葛猛, 姜大宇, 梁之林. 220 kV 输电线路耐张线夹过热原因分析[J]. 吉林电力, 2005(1): 49 – 50.
GE Meng, JIANG Dayu, LIANG Zhilin. Analysis on superheat for anchor clamp of 220 kV transmission line [J]. Jilin Electric Power, 2005(1): 49 – 50.
- [8] 冯强强, 何宁安, 樊长海. 南方区域超、特高压输电线路耐张引流板发热原因分析及对策[J]. 红水河, 2023, 42(1): 105 – 108, 117.
FENG Qiangqiang, HE Ning'an, FAN Changhai. Cause analysis and countermeasures of heating of tension drainage plate of EHV and UHV transmission lines in southern region [J]. Hongshui River, 2023, 42(1): 105 – 108, 117.
- [9] 陈家慧, 赵兴虹, 刘曦, 等. 500 kV 输电导线耐张线夹断裂失效分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(2): 70 – 73.
CHEN Jiahui, ZHAO Xinghong, LIU Xi, et al. Failure analysis on fracture of strain clamp in 500 kV transmission line [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(2): 70 – 73.
- [10] 姚贵娇, 高剑凌, 陈作新, 等. ± 500 kV 直流线路耐张线夹断裂原因分析[J]. 机电信息, 2018(12): 120 – 121.
YAO Guijiao, GAO Jianling, CHEN Zuoxin, et al. Analysis of the causes of fracture of tension clamps of ± 500 kV DC lines [J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(12): 120 – 121.
- [11] 邓明亮. 架空输电线路耐张管压接缺陷分析与质量检查[J]. 湖南电力, 2018, 38(3): 34 – 37.
DENG Mingliang. Defect analysis and quality inspection of strain clamps crimping in overhead transmission line [J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(3): 34 – 37.
- [12] 王鹏宇, 白耀鹏, 王元君. 220 kV 线路耐张线夹断裂原因分析及建议[J]. 山西电力, 2019(3): 69 – 72.
WANG Pengyu, BAI Yaopeng, WANG Yuanjun. Fracture analysis and suggestions of strain clamp on 220 kV transmission line [J]. Shanxi Electric Power, 2019(3): 69 – 72.

- [13] 徐望圣,孙志林,谢亿,等.500 kV输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J].矿冶工程,2020,40(2):144-146,153.
XU Wangsheng, SUN Zhilin, XIE Yi, et al. Analysis of steel anchor fracture of tension strain clamp on 500 kV transmission line [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(2): 144-146, 153.
- [14] 陈家慧,王方强,兰贵天,等.耐张线夹防滑槽漏压的失效分析与机理研究[J].热加工工艺,2022,51(12):146-150,155.
CHEN Jiahui, WANG Fangqiang, LAN Guitian, et al. Failure analysis and mechanism investigation on neglected crimping for anti-skid grooves in strain clamps [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(12): 146-150, 155.
- [15] SUN Mingcheng, TAN Che, ZHANG Chaoqun, et al. Analysis of strain clamp failure on 500 kV transmission line [J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2018, 6(4): 47-56.
- [16] 王元军,刘宝龙,王闯.基于特高压输电线路耐张线夹钢锚凹槽漏压影响分析[J].红水河,2022,41(2):100-105,116.
WANG Yuanjun, LIU Baolong, WANG Chuang. Analysis on influence of leakage pressure in steel anchor groove of tension clamp based on UHV transmission line [J]. Hongshui River, 2022, 41(2): 100-105, 116.
- [17] 周立宪,孙涛,顾建.大截面导线用耐张线夹压接性能评价[J].中国电机工程学报,2020,40(S1):149-154.
ZHOU Lixian, SUN Tao, GU Jian. Evaluation of strain clamp crimping property for large cross-section conductor [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 149-154.
- [18] 黄绍.液压型耐张线夹-导线系统抗拉力学性能仿真分析[D].郑州:郑州大学,2019.
- [19] 庞锴,吕中宾,都元祥,等.输电线路耐张线夹压接长度对其抗拉承载力及失效模式的影响分析[J].科学技术与工程,2020,20(23):9384-9392.
- PANG Kai, LÜ Zhongbin, DU Yuanxiang, et al. Tension capacity and failure mode of strain clamp under different clamping lengths between the steel anchor and steel core [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9384-9392.
- [20] 吕东泽,骆文杰,熊杰,等.输电线钢芯铝绞线精密压接成形的有限元分析[J].精密成形工程,2022,14(5):75-82.
LÜ Dongze, LUO Wenjie, XIONG Jie, et al. Finite element analysis of precision crimping forming of aluminum conductors steel reinforced (ACSR) for transmission line [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(5): 75-82.
- [21] 马恒,陈庆吟,谈佳栋,等.输变电架空导线压接断裂有限元分析[J].塑性工程学报,2021,28(10):206-214.
MA Heng, CHEN Qingyin, TAN Jiadong, et al. Finite element analysis on crimping fracture of overhead transmission line [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(10): 206-214.
- [22] 国家能源局.输变电工程架空导线及地线液压压接工艺规程(800 mm²以下):DL/T 5285—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.电力金具试验方法第1部分:机械试验 GB/T 2317.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

收稿日期:2024-03-08;网络首发日期:2024-07-30

作者简介:

李昊(1987),男,高级工程师,硕士,研究方向为输变电设备安全评估及其智能技术,lihao@csg.cn;

边美华(1980),男,高级工程师,硕士,研究方向为电网设备材料无损检测及失效分析、腐蚀与防护,27250060@qq.com;

朱登杰(1987),男,通信作者,高级工程师,硕士,研究方向为输变电设备安全评估及其智能技术,zhudj@csg.cn。