

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.006

电缆支架全生命周期碳排放计算与分析

张宇娇¹, 李宏松¹, 郭 垚², 孙青松², 董广广², 黄雄峰¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 河北电力工程监理有限公司, 石家庄 050081)

摘要:“双碳”背景下,碳排放量是电缆线路支架材料选择的重要评价标准之一,然而目前针对电缆支架的碳排放量计算缺乏相关模型。文中构建了一种基于碳排放因子法的电缆支架全生命周期碳排放计算模型,其中考虑电缆支架耗材量和涡流损耗的碳排放活动影响。针对不同材料支架的承重性能及腐蚀速率,计算支架在全生命周期内的总耗材量,针对不同材料支架的感应电流能力,计算支架上的涡流损耗,并结合碳排放因子计算出对应的碳排放量。最后以雄东—簪西 220 kV 电缆线路为例,计算了该线路采用两种不同材料支架的全生命周期碳排放量,结果表明 304L 不锈钢支架碳排放量远小于 Q235 碳钢支架,304L 不锈钢作为新材料电缆支架具有较好的节能减排效果。

关键词: 碳排放; 全生命周期; 电缆支架; 碳钢; 不锈钢

Calculation and Analysis of Carbon Emission of Cable Bracket During Its Whole Life Cycle

ZHANG Yujiao¹, LI Hongsong¹, GUO Yao², SUN Qingsong², DONG Guangguang²,
HUANG Xiongfeng¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hebei Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Under the background of ‘Dual Carbon’, carbon emission is one of the important evaluation criteria for the material selection of cable bracket. However, there is currently a lack of relevant models for calculating carbon emission of cable bracket. In this paper, a carbon emission calculation model for the whole life cycle of cable bracket based on the carbon emission factor method is constructed, in which the impact of brackets’ material consumption and eddy current losses on carbon emission activities is considered. The total consumable material of cable bracket in the whole life cycle is calculated considering the load-bearing performance and corrosion rate of different material, and the eddy current loss is calculated considering the induced current capability of different material and the corresponding carbon emission is calculated in combination with carbon emission factor. Finally, the Xiongdong-Zanxi 220 kV cable project in China is taken as an example, the whole life cycle carbon emission of the line using two different material brackets is calculated. The results show that the carbon emission of 304L stainless steel bracket is much lower than that of Q235 carbon steel bracket. While, 304L stainless steel as a new material for cable bracket has good energy-saving and emission reduction effects.

Key words: carbon emission; life cycle; cable bracket; carbon steel; stainless steel

0 引言

电缆支架是支撑电缆的部件,在电缆沟和电缆隧道中广泛应用。Q235 普通碳素结构钢(碳钢)具有强度高、可设计性好、耐腐蚀性好的优点,电缆支架

普遍采用 Q235 碳钢。但是大交变电流流过电缆时,碳钢支架的涡流损耗不容忽视^[1]。为了降低涡流损耗,部分电缆隧道工程中开始采用 304L 奥氏体不锈钢材质(不锈钢)的电缆支架^[2-3]。在中国大力实施“碳达峰”和“碳中和”战略背景下,电缆支架的材料

收稿日期:2023-12-28; 修回日期:2024-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077048)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52077048).

选型不仅要考虑机械性能、抗腐蚀能力、涡流损耗,还应考虑二氧化碳排放(碳排放)的影响。电缆支架在原料获取阶段、加工生产阶段、运输阶段、使用阶段和废弃阶段直接或间接的产生不同程度的碳排放,因此需要考虑以上5个阶段建立电缆支架全生命周期碳排放模型^[14-6]。

输电线路包括电缆线路和架空线路,电缆线路支架的研究集中在力学性能、涡流损耗和经济成本^[11-3,7],架空线路的研究涵盖了设计、施工、维护、优化和可靠性等多个方面^[8-10],部分学者还对架空—电缆混合线路的特殊场景进行了研究^[11-12]。碳排放方面,文[13]研究了架空线路的铁塔和基础的碳排放,文[14-15]分别研究了12、40.5 kV箱式气体绝缘金属封闭开关设备的碳排放,文[16]通过潮流分析和碳排放因子法研究了特高压交流工程的减碳效益,文[17]研究了在几种典型场景下腐蚀防护对钢铁材料降低碳排放的影响,文[18]总结当前实现电力行业低碳主要方法是高比例新能源接入和多种低碳技术组合使用。当前,碳排放研究对象未考虑电缆支架,缺乏电缆支架的碳排放理论指导。

文中首先建立了基于碳排放因子法的电缆支架全生命周期碳排放模型,并引入钢铁行业碳排放强度的概念简化碳排放计算,确定全生命周期内各阶段的碳排放因子。其次,电缆支架的钢铁耗材量和涡流损耗是重要的碳排放活动数据,基于结构力学有限元分析和电化学腐蚀试验分析,给出了电缆支架总耗材质量计算方法,基于电磁场有限元分析,给出了电缆支架涡流损耗电量计算方法。最后,以雄东—胙西220 kV电缆线路工程为例,给定电缆支架生命周期年限为100年(电缆隧道设计年限),计算和分析了碳钢和不锈钢电缆支架的全生命周期碳排放,为电缆支架的材料选择提供碳排放参考。

1 电缆支架全生命周期碳排放核算模型

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是目前国际上认可度很高的一种环境影响评价方法,同时PAS2050规定在评价产品温室气体排放时应当采用LCA技术^[19]。研究框架见图1。

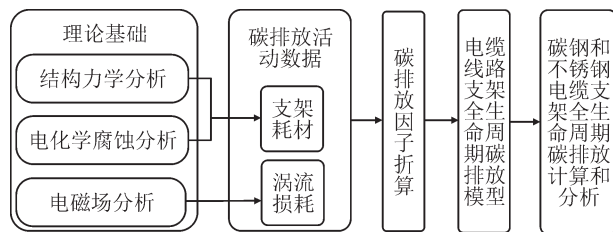


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

1.1 碳排放系统核算边界

原料获取阶段的碳排放包括铁矿石、石灰石和白云石等原料开采所产生的碳排放,以及大宗物料运输到钢铁生产厂的碳排放。加工生产阶段的碳排放包括生产钢铁所需能源的燃烧、工艺过程、以及外购电力和热力的碳排放。运输阶段的碳排放是指钢铁运输到工程项目中交通工具产生的碳排放。使用阶段的碳排放主要包括电缆支架涡流损耗电量折算的间接碳排放。废弃阶段的碳排放包括废钢铁从产生地运输到废钢铁加工厂能源燃烧的碳排放,以及废钢剪切加工过程中设备运行所消耗的电量的碳排放。

1.2 碳排放模型建立

排放因子法(emission-factor approach)是联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的对碳排放进行估算的第一种方法,同时也是目前国内外应用最为广泛的对碳排放进行核算的方法^[19-20]。排放因子法计算碳排放是用活动数据 AD (active data)与相应的碳排放因子 EF (emission factor)的乘积进行碳排放估算^[20],计算公式为

$$Emissions = AD \times EF \quad (1)$$

原料获取、加工生产、运输、废弃阶段的碳排放计算公式为^[21]

$$\left\{ \begin{aligned} E_{\text{原料获取}} &= \sum_{j=1}^{\alpha} O_j \times m_j + \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{j=1}^{\alpha} A_{ji} \times m_{ji} \times D_i \times t \\ E_{\text{加工生产}} &= \sum_{j=1}^n E_j \times F_j + \sum_{j=1}^{\beta} U_j \times V_j - B \times b + H_{\text{电}} \times h_{\text{电}} + H_{\text{热}} \times h_{\text{热}} \\ E_{\text{运输}} &= \sum_{i=1}^{\gamma} G_i \times J_i \times D_i \times 1.67 \\ E_{\text{废弃}} &= \sum_{i=1}^{\gamma} M_i \times K_i \times D_i \times 1.67 + M \times P_{\text{电}} \times h_{\text{电}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式(2)中: α 为原材料种类; O_j 为原材料碳排放因子; m_j 为原料消耗量; μ 为大宗物料运输方式; A_{ji} 为第 j 类物料用 i 种运输方式的运输距离; m_{ji} 为第 j 类物料用 i 种运输方式的运输量; D_i 为所选运输工具的碳排放因子; t 为空车修正系数,取1.67; n 为化石能源种类; E_j 、 F_j 分别为能源 j 的用量和碳排放因子; β 为熔剂种类; U_j 、 V_j 分别为溶剂 j 的用量和对应溶剂的碳排放因子; B 为粗钢产量; b 为固碳产品的碳排放因子; $H_{\text{电}}$ 、 $h_{\text{电}}$ 分别为外购电量和电量碳排放因子; $H_{\text{热}}$ 、 $h_{\text{热}}$ 分别为外购热量和热量碳排放因子; γ 为运输方式类别; G_i 、 J_i 、 D_i 分别为第 i 类运输方式钢材运输量、运输距离和所选运输方式的碳排放因子; M_i 、

K_i 分别为第 i 类运输方式废钢运输量和对应的运输距离; M 为废钢量; $P_{\text{电}}/h_{\text{电}}$ 分别为加工废钢消耗的电量 and 电量碳排放因子。

使用式(2)进行电缆支架碳排放计算结果准确度较高,但需要收集的数据众多。在精度要求不高时,近似认为每吨钢铁在原料获取、加工生产、运输、废弃过程中的碳排放量是相同的,因此可选取钢铁行业的碳排放强度作为碳排放因子,单位为 $(\text{CO}_2)\text{t}/(\text{钢铁})\text{t}$ (吨二氧化碳/吨钢铁)^[22]。碳排放强度计算公式为^[22]

$$EF_k = E_k / M_{\text{total}} \quad (3)$$

式(3)中: k 分别为原料获取、加工生产、运输、废弃阶段; E_k 为对于钢铁行业在 k 阶段的碳排放量, $(\text{CO}_2)\text{t}$; M_{total} 为钢铁行业生产钢铁的总质量, t 。

简化后,原料获取、加工生产、运输、废弃阶段的碳排放计算公式为

$$\begin{cases} E_{\text{原料获取}} = AD_{\text{钢铁}} \times EF_{\text{原料获取}} \\ E_{\text{加工生产}} = AD_{\text{钢铁}} \times EF_{\text{加工生产}} \\ E_{\text{运输}} = AD_{\text{钢铁}} \times EF_{\text{运输}} \\ E_{\text{废弃}} = AD_{\text{钢铁}} \times EF_{\text{废弃}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $AD_{\text{钢铁}}$ 为钢铁的消耗量, t ; $EF_{\text{原料获取}}$ 、 $EF_{\text{加工生产}}$ 、 $EF_{\text{运输}}$ 、 $EF_{\text{废弃}}$ 分别为钢铁原材料获取阶段、加工阶段、运输阶段、废弃阶段的碳排放强度, $(\text{CO}_2)\text{t}/(\text{钢铁})\text{t}$ 。

使用阶段的碳排放计算公式为

$$E_{\text{使用}} = AD_{\text{涡流损耗电量}} \times EF_{\text{电}} \quad (5)$$

式(5)中: $AD_{\text{涡流损耗电量}}$ 为支架涡流损耗的总电量, MWh ; $EF_{\text{电}}$ 为电量碳排放因子, $(\text{CO}_2)\text{t}/\text{MWh}$ 。

电缆支架全生命周期碳排放核算模型为

$$E_{\text{LC}} = E_{\text{原料获取}} + E_{\text{加工生产}} + E_{\text{运输}} + E_{\text{使用}} + E_{\text{废弃}} \quad (6)$$

式(6)中: E_{LC} 为全生命周期碳排放量, $(\text{CO}_2)\text{t}$;右式分别为原料获取、加工生产、运输、使用、废弃阶段的碳排放量, $(\text{CO}_2)\text{t}$ 。

式(4)–(6)构成完整的电缆支架全生命周期碳排放模型。

1.3 碳排放因子确定

碳排放因子是碳排放计算的重要参数,碳排放因子见表1^[21–25],文中选取方法如下:

- 1)国家部门公布的全国电网碳排放因子。
- 2)中国近几年钢铁行业碳排放强度的平均值作为碳排放因子,不锈钢的碳排放因子取碳钢的1.2倍。

2 电缆支架碳排放活动数据计算方法

由式(4)可知,钢铁在原料获取、加工生产、运输、废弃阶段中的二氧化碳排放,此4个阶段的碳排

表1 碳排放因子

Table 1 Carbon Emission Factors

阶段	碳排放因子	
	碳钢	不锈钢
原料获取阶段 $[(\text{CO}_2)\text{t} \cdot (\text{钢铁})\text{t}^{-1}]$	0.200	0.200
加工生产阶段 $[(\text{CO}_2)\text{t} \cdot (\text{钢铁})\text{t}^{-1}]$	1.970	2.364
运输阶段 $[(\text{CO}_2)\text{t} \cdot (\text{钢铁})\text{t}^{-1}]$	0.020	0.020
废弃处置阶段 $[(\text{CO}_2)\text{t} \cdot (\text{钢铁})\text{t}^{-1}]$	0.010	0.010
使用阶段 $[(\text{CO}_2)\text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}]$	0.581	0.581

放主要由电缆支架消耗的耗材质量决定;由式(5)可知,电缆支架在使用阶段中,由电缆钢支架涡流损耗造成的电能损耗折算成的二氧化碳排放,由支架的涡流损耗电量决定。

电缆支架碳排放活动数据主要包括:电缆支架总耗材质量、电缆支架涡流损耗电量。因此,本章基于结构力学有限元分析和电化学腐蚀试验,给出了电缆支架总耗材质量计算方法,基于电磁场有限元分析,给出了电缆支架涡流损耗电量计算方法。

2.1 电缆支架总耗材质量

电缆隧道设计年限较长,电缆支架的横担会因为大气腐蚀的影响而变薄,导致支架承重能力下降,因此,需要考虑电缆支架因大气腐蚀发生破坏的情形。更换电缆支架导致支架耗材质量增加,电缆支架在生命周期内的总耗材质量,与电缆支架的力学性能、腐蚀特性密切相关,力学性能优异的支架材料可以使用更少原料,抗腐蚀能力更好的材料可以减少全生命周期内更换支架的次数。

电缆支架全生命周期消耗的总钢铁质量计算公式为

$$AD_{\text{钢铁}} = \rho \times V \times \text{Num} \times (1 + T_s) \times 10^{-3} \quad (7)$$

式(7)中: $AD_{\text{钢铁}}$ 为电缆支架消耗的总钢铁质量, t ; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; V 为支架的体积, m^3 ; Num 为支架数量; T_s 为全生命周期内更换支架的次数。

T_s 的计算公式为

$$T_s = \lceil N/Y \rceil - 1 \quad (8)$$

式(8)中: N 为电缆支架的生命周期年限,取电缆隧道的设计年限, a ; Y 为电缆支架使用寿命, a ; $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数。

$$Y = \lfloor (T_0 - T_1)/d \rfloor \quad (9)$$

式(9)中: T_0 为电缆支架截面的初始厚度; T_1 为电缆支架的发生破坏的截面厚度, mm ; d 为腐蚀速率, mm/a ; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数。

为了得到电缆支架发生破坏的截面厚度,需要对电缆支架进行结构力学有限元分析;为了得到支

架在大气中的腐蚀速率,需要对电缆支架材料进行电化学腐蚀特性分析。

2.1.1 电缆支架结构力学有限元分析

在电缆支架的受力分析中,电磁力的影响可以忽略不计,电缆支架主要受到电缆的静力载荷的作用,因此需要采用静力学理论。结构力学分析的常用方法是有限元法,电缆支架结构力学有限元分析的步骤包括:几何建模、物理场选择、边界条件和载荷设置、网格剖分以及结果后处理。评价结构设计的指标主要有强度、刚度。在有限元结果后处理中,应力指标对应着强度,位移和应变这两个指标对应着刚度。如果超过了许用值,就意味着产品或零件已经失效并需要进行结构修改和优化。

Mises 应力,又称等效应力,随着计算机数值计算技术的发展,在工程设计领域广泛应用,计算公式为

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (10)$$

式(10)中: σ_e 为 Mises 应力,是一个标量; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第 1、2、3 主应力。

许用应力强度,又称设计应力强度,记为 $[\sigma]$

$$[\sigma] = \sigma_s / n \quad (11)$$

式(11)中: σ_s 为材料的屈服强度; n 为安全系数,取值范围为 1.5 到 2.5。

电缆支架正常工作时,为保证输电线路的安全稳定运行,Mises 应力的最大值应小于许用应力强度,满足式(12)

$$\sigma_e \leq [\sigma] \quad (12)$$

电缆支架发生破坏时,Mises 应力大于等于许用强度,满足式(13)。维护人员需要在电缆支架截面厚度降低到 T_1 时,及时更换电缆支架。

$$\sigma_e \geq [\sigma] \quad (13)$$

为了确定电缆支架在不同截面厚度的支架工作状态,需要改变电缆支架的截面厚度 T ,进行结构力学有限元分析。在电缆支架边界条件和载荷相同时,可以得到电缆支架不同截面厚度 T 所对应的 Mises 应力 σ_e 。 T 和 σ_e 形成一一对应的关系,然后根据式可确定电缆支架的初始截面厚度 T_0 ,根据式(13)可以确定电缆支架发生破坏的截面厚度 T_1 。

2.1.2 电缆支架电化学腐蚀特性分析

金属材料在大气中的腐蚀是一个复杂的过程,大气腐蚀速率主要取决于金属表面电解液膜中的电化学反应,大气腐蚀主要与温度、湿度以及大气污染物中的 SO_2 和 Cl^- 有关^[26],金属在潮湿空气中的腐蚀本质为电化学腐蚀,金属铁腐蚀的极化曲线图

见图 2。图 2 中①、②分别表示阴极极化曲线和阳极极化曲线的线性区域。电化学测量技术能深入分析腐蚀机理,且具有快速、准确、价格低的特点,广泛用于金属材料的腐蚀测量^[27]。

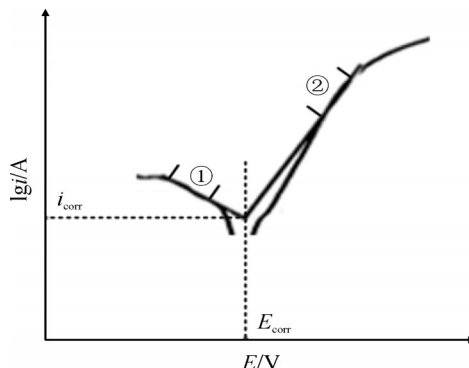


图 2 金属铁腐蚀的极化曲线

Fig. 2 Polarization curve of metal iron corrosion

Tafel 曲线外推法^[28-29]是将阴、阳极极化曲线的直线部分延长,在交点处,金属阳极溶解的速度和阴极去极化反应速度相等,金属腐蚀达到相对稳定的状态,交点对应的横坐标为腐蚀电位 E_{corr} ,对应的纵坐标为腐蚀电流的对数值 $\lg(i_{\text{corr}})$,由腐蚀电流 i_{corr} 除以事先精确测量的样品面积,即得腐蚀电流密度。

法拉第定律将腐蚀电流密度和腐蚀速率联系在一起,计算公式为

$$v = \frac{M}{nF} i_{\text{corr}} = 3.73 \times 10^{-4} \frac{M}{n} i_{\text{corr}} \quad (14)$$

式(14)中: v 为腐蚀速度, $\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$; i_{corr} 为腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; M 为金属的相对原子质量; n 为金属的原子价; F 为法拉第常数。

若以腐蚀深度 d 表示腐蚀速率,单位为 mm/a ,更便于计算设备的使用寿命,计算公式为

$$d = \frac{v}{\rho} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{M}{n\rho} i_{\text{corr}} \quad (15)$$

式(15)中, ρ 为金属的密度, g/cm^3 。

将 T_0 、 T_1 、 d 3 个参数代入式(7)–(9),便可计算电缆支架在全生命周期内的总耗材质量。

2.2 电缆支架涡流损耗电量

电缆支架上的涡流损耗与电缆电流大小、电缆排列方式、支架与导线间距、支架电磁参数(电导率、相对磁导率)有关。电缆支架涡流损耗问题可以由 Maxwell 方程组进行分析,常用的数值求解方法是有限元法。电缆周围的磁场主要由电缆流过的 50 Hz 工频电流产生,其余谐波频率可忽略不计,因此,电缆支架涡流损耗问题可使用时谐场进行简化分析^[30]。

对于一般时谐场,Maxwell 方程的微分形式可以写成

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = \nabla \cdot (\epsilon E) = \rho \\ \nabla \cdot B = \nabla \cdot (\mu H) = 0 \\ \nabla \times E = -j\omega B = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = J + j\omega D = J + j\omega\epsilon E \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中, ω 为角频率,公式采用的时间变化因子形式为 $e^{j\omega t}$ [30]。

时谐场中,单个电缆支架上的涡流损耗功率 P_{loss} (W) 计算式 [30] 为

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{2} \int_{V \in \Omega} \text{Re}(J \cdot E^*) dV = \frac{1}{2} \int_{V \in \Omega} \frac{1}{\sigma} \times |J|^2 dV \quad (17)$$

式(17)中: Ω 为支架区域; * 为共轭函数; σ 为材料的电导率; $|J|$ 为电流密度模。

在电缆支架的全生命周期内,电缆支架的涡流损耗电量计算公式为

$$AD_{\text{涡流损耗电量}} = P_{\text{loss}} \times \text{Num} \times 8\,760 \times N \times 10^{-6} \quad (18)$$

式(18)中: P_{loss} 为涡流损耗功率, W; Num 为支架数量, 8 760 为一年的运行时长; N 为电缆支架的全生命周期年限,取电缆隧道设计年限。

3 案例分析

3.1 案例简介

在雄东—晋西 220 kV 线路工程中,电缆隧道环境见图 3。电缆隧道设计年限为 100 年,工程使用的电缆型号为 ZC-YJLW03-Z-127/220-1×2500 mm², 支架托臂的几何参数包括长度 685 mm, 宽度 130 mm,

厚度 6 mm, 螺栓直径 15.5 mm。根据设计要求,电缆隧道内的空气温度应控制在 40 ℃ 以下,相对湿度不超过 95%。经过计算,铺设一回线路需要大约 2 693 个支架托臂,每个支架托臂的力学载荷约为 7 229 N。此外,电缆的电流约为 1 984 A。



图 3 电缆隧道环境

Fig. 3 Cable tunnel environment

3.1.1 支架总耗材质量计算

1) 结构力学分析。电缆支架立柱已完成安装,因此不再对其力学性能进行分析,而仅对支架托臂进行力学分析。为此,使用 Comsol Multiphysics® 有限元软件,建立电缆支架和电缆的几何模型,并在直角处增加半径为 0.5 mm 的圆倒角,网格剖分后的几何模型见图 4。电缆支架初始截面厚度为 6 mm 时,通过有限元软件的测量功能,单个电缆支架的体积为 $1.217\,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

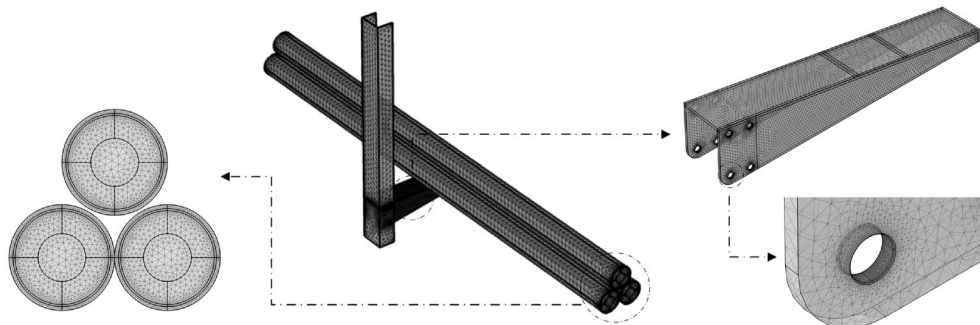


图 4 电缆支架网格剖分

Fig. 4 Grid splitting of cable bracket

在 Comsol Multiphysics® 有限元软件中,选择结构力学物理场,研究区域仅选择支架托臂,添加材料属性,包括杨氏模量、泊松比和密度,具体数值见表 2 [31]。为了避免螺栓位置出现应力奇异点,使用弹簧基础边界条件对 8 个螺栓孔施加弹性约束,在托臂与电缆的接触面上施加向下的 7 229 N 力学载荷。

碳钢支架截面厚度为 3.8 mm 时,不锈钢支架截面厚度为 4.3 mm 时,电缆支架的 Mises 应力接近材料的许用应力强度,支架会发生破坏, Mises 应力分

表 2 电缆支架结构力学分析所需材料参数

Table 2 Material parameters required for structural mechanics analysis of cable bracket

参数	碳钢	不锈钢
杨氏模量/GPa	200	193
泊松比	0.3	0.3
密度/(kg·m ⁻³)	7 850	7 900
屈服强度/MPa	235	205
安全系数	1.5	1.5

布见图 5(形变比例因子为 100)。两种材料的支架在力学载荷均为 7 229 N 的情况下,不同截面厚度的电缆支架结构力学分析结果见表 3。

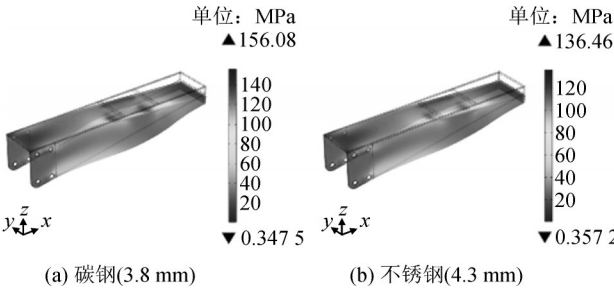


图 5 电缆支架 Mises 应力分布

Fig. 5 Mises stress distribution of cable bracket

表 3 电缆支架结构力学分析结果

Table 3 Structural mechanics analysis results of cable bracket

材料	截面厚度/mm	Mises 应力最大值/MPa	许用应力强度/MPa	位移最大值/mm	支架状态
碳钢	6.0	94.40	156.67	0.506	有效
	3.8	156.08	156.67	—	破坏
	3.7	164.87	156.67	—	破坏
不锈钢	6.0	95.50	136.67	0.518	有效
	4.3	136.46	136.67	—	破坏
	4.2	139.14	136.67	—	破坏

2)电化学腐蚀分析。在环境温度为 40 ℃,相对湿度为 95%±3%,表面液膜厚度为 0.1 mm 的 0.35% NaCl 溶液情况下,加工直径 5 mm,高度 20 mm 的柱状碳钢和不锈钢工作电极,采用三电极体系进行电化学试验^[32],试验装置见图 6,测得碳钢和不锈钢材料的极化曲线见图 7。

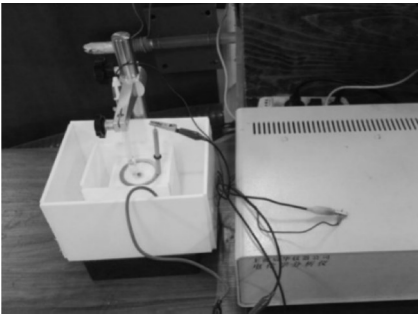


图 6 电化学试验装置

Fig. 6 Electrochemical test device

采用 Tafel 曲线外推法,碳钢和不锈钢腐蚀电流密度的对数值 $\lg(i_{\text{corr}})$ 分别为 -5.698、-6.2 A。转换为 i_{corr} 后除以样品面积(0.196 25 cm²)得到腐蚀电流密度分别为 10.206、3.213 mA/cm²。根据法拉第定律,即式(15),代入 $M=56, n=2$ 和表 2 的材料密度参数,碳钢和不锈钢支架在电缆隧道环境下的电化学腐蚀速率分别为 0.119 4、0.037 3 mm/a。

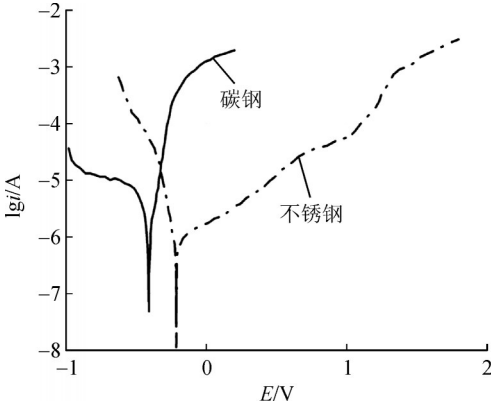


图 7 极化曲线

Fig. 7 Polarization curve

根据式(8)、(9),碳钢和不锈钢支架的寿命分别为 18、45 a,在全生命周期为 100 a 时分别需要更换 5 次和 2 次。

根据式(7), $Num=2\ 693$,代入前文的计算结果,在全生命周期年限为 100 a 时,考虑支架更换的情况,碳钢和不锈钢电缆支架耗材质量分别为 154.40 t 和 77.69 t。

3.1.2 涡流损耗电量计算

在 Comsol Multiphysics®有限元软件中,建立电缆和电缆支架的几何模型,网格剖分见图 4,电缆几何参数见表 4,模型中电缆的长度为 3 m,选择磁场物理场,研究域选择支架托臂、立柱和电缆,添加材料属性,包括电导率、相对磁导率和相对介电常数,具体数值见表 5。

表 4 电缆几何参数

Table 4 Geometric parameters of cables

结构	厚度/mm	直径/mm
铜芯	30.4	60.8
半导体特多龙带、导体屏蔽、XLPE 绝缘、绝缘屏蔽、半导体缓冲阻水带(简化为一层)	29.0	118.8
皱纹铝护套	2.6	124.0
半硬质阻燃聚氯乙烯护套	5.0	134.0

表 5 电磁场涡流损耗分析所需材料参数

Table 5 Material parameters required for electromagnetic field eddy current loss analysis

结构	电导率/(S·m ⁻¹)	相对磁导率	相对介电常数
导体(铜芯)	5.71×10 ⁷	1.000	1
XLPE 绝缘	0.01	1.000	4
皱纹铝护套	3.53×10 ⁷	1.000	1
半硬质阻燃聚氯乙烯护套	0.01	1.000	4
碳钢	5.00×10 ⁶	200.000	1
不锈钢	1.45×10 ⁶	1.008	1
空气	0.01	1.000	1

设定空气域外表面的边界条件为磁绝缘,加载的三相对称的正弦交流电,电流有效值为1 984 A,频率为50 Hz,相位差为120°,设置矢量磁位初始值 $A_x=0$ 、 $A_y=0$ 、 $A_z=0$ 。通过电磁场分析得到电缆线路碳钢和不锈钢支架托臂的电流密度模分布见图8。

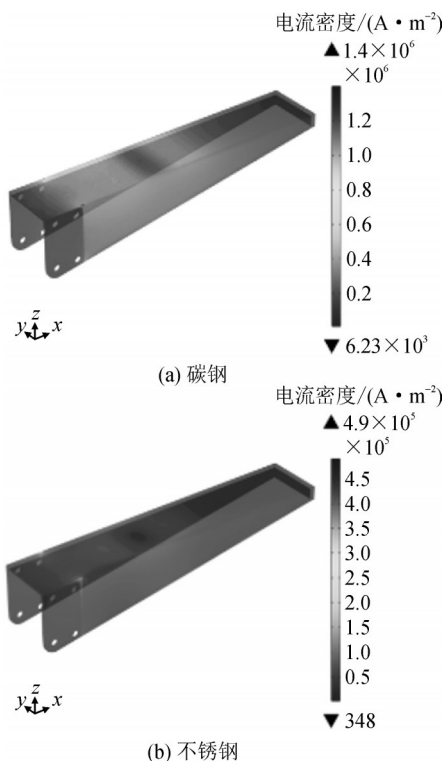


图8 电流密度分布

Fig. 8 Current density distribution

根据式(18),使用 Comsol Multiphysics®有限元

软件的体积积分功能,得到单个碳钢和不锈钢支架托臂的涡流损耗功率分别为3.336 9 W和0.516 6 W。

根据式(19),碳钢和不锈钢支架在全生命周期内涡流损耗电量分别为7 871.97 MWh和1 218.69 MWh。

3.2 全生命周期碳排放计算

根据式(6),代入本章计算的电缆支架碳排放活动数据,在电缆支架全生命周期年限为100 a时,得到碳钢和不锈钢电缆支架在全生命周期内各阶段的碳排放见表6。

4 结论

文中建立了电缆线路支架全生命周期碳排放模型,给出了电缆支架碳排放活动数据计算方法,并计算了雄东—笄西220 kV输电线路工程的电缆支架碳排放活动数据,进一步计算了电缆支架全生命周期碳排放,结果表明:

1)在全生命周期为100 a时,Q235碳钢和304L不锈钢电缆支架碳排放总量分别为4 913.30 (CO₂)t和909.60 (CO₂)t,304L不锈钢电缆支架碳排放量远小于Q235碳钢支架,304L不锈钢电缆支架减少碳排放量4 003.71 (CO₂)t,降低81.48%,具有较好的节能减排效果。

2)Q235碳钢和304L不锈钢电缆支架在使用阶段的碳排放占比分别为93.09%和77.84%,降低电缆支架全生命周期碳排放应主要考虑降低支架的涡流损耗。

表6 电缆支架生命周期内各阶段碳排放

Table 6 Carbon emissions at each stage of the cable bracket lifecycle

项目		原料获取	加工生产阶段	运输阶段	废弃阶段	使用阶段	全生命周期
Q235 碳钢	碳排放/(CO ₂)t	30.88	304.17	3.09	1.54	4573.62	4913.30
	百分比/%	0.63	6.19	0.06	0.03	93.09	100.00
304L 不锈钢	碳排放/(CO ₂)t	15.54	183.67	1.55	0.78	708.06	909.60
	百分比/%	1.71	20.19	0.17	0.09	77.84	100.00

3)Q235碳钢和304L不锈钢电缆支架在加工生产阶段中的碳排放量分别为304.17 (CO₂)t和183.67 (CO₂)t,可采取合适的腐蚀防护技术减少更换支架次数,进而减低加工生产阶段的碳排放,但对降低电缆支架碳排放比例小于20.19%。

参考文献:

- [1] 张宇娇,郭桔炜,汪振亮,等. 基于电磁场—流场—温度场耦合分析的电缆支架温升计算及实验验证[J]. 高压电器,2019,55(8):143-148.
ZHANG Yujiao, GUO Zhiwei, WANG Zhenliang, et al.

Calculation and experimental verification of cable support's temperature rise based on electromagnetic - fluid - thermal fields[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 143-148.

- [2] 詹源. 330 kV超高压电缆支架荷载分析及结构精细化设计研究[J]. 建筑结构,2020,50(s2):600-604.
ZHAN Yuan. Load analysis and structure precise design of the stainless steel support for the 330 kV cables[J]. Building Structure, 2020, 50(s2): 600-604.
- [3] 周辉,方浩,张永隆. 新型电缆支架在长距离500 kV电力隧道中的应用[J]. 华东电力,2010,38(4):549-551.
ZHOU Hui, FANG Hao, ZHANG Yonglong. Application of new cable bracket in long-distance 500 kV power tunnel[J].

- East China Electric Power, 2010, 38(4): 549-551.
- [4] 招景明, 李经儒, 潘 峰, 等. 电力碳排放计量技术现状及展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 1-8.
ZHAO Jingming, LI Jingru, PAN Feng, et al. Current status and future prospects of electricity carbon emission measurement technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 1-8.
- [5] 刘广一, 申彦红, 杨 维, 等. 电力碳排放强度的基本概念及其研究进展[J]. 供用电, 2022, 39(10): 2-9.
LIU Guangyi, SHEN Yanhong, YANG Wei, et al. Carbon emission intensity of electricity: Basic concepts, key technologies, and research progress[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 2-9.
- [6] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风—碳捕集—电转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 14-21.
YAN Zhonghua, WANG Jiangong, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-Carbon capture-P2G combined system considering Carbon emission flow theory[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 14-21.
- [7] 黄 政. 高压电缆线路钢支架全寿命周期成本计算[J]. 大众用电, 2020, 35(10): 34-35.
HUANG Zheng. Life cycle cost calculation of steel support for high voltage cable lines[J]. Popular Utilization of Electricity, 2020, 35(10): 34-35.
- [8] 苏 超, 杨 强. 基于多视图稀疏特征选择的架空输电线路故障原因判别[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 96-103.
SU Chao, YANG Qiang. Fault cause identification of overhead transmission line based on multi-view sparse feature selection[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 96-103.
- [9] 郭 亮, 杜 欢, 王晓卫, 等. 基于磁场检测与多判据融合的架空线路接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 24-34.
GUO Liang, DU Huan, WANG Xiaowei, et al. Single phase to ground fault location method of an overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 24-34.
- [10] 朱永胜, 张世博, 徐其迎, 等. 计及LCA碳排放的源荷双侧合作博弈调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 48-58.
ZHU Yongsheng, ZHANG Shibo, XU Qiyang, et al. Source load bilateral cooperative game scheduling considering LCA carbon emissions[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 48-58.
- [11] 梁振锋, 李天婷, 张怿宁. 高压架空—电缆混合线路电容电流补偿方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 16-21.
LIANG Zhenfeng, LI Tianting, ZHANG Yining. Research on capacitive current compensation method for high voltage overhead-cable hybrid line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6): 16-21.
- [12] 张宇飞, 罗日成, 田迪凯, 等. 10 kV海底电缆—架空线雷击过电压分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 14-19.
ZHANG Yufei, LUO Richeng, TIAN Dikai, et al. Lightning overvoltage on 10 kV submarine cable-overhead line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 14-19.
- [13] 柏丹丹, 戴雨剑, 李奇峰, 等. 电线路金具的全寿命选型[J]. 中国电力, 2016, 49(4): 188-192.
BAI Dandan, DAI Yujian, LI Qifeng, et al. Life cycle type-selection for electric power transmission line fittings[J]. Electric Power, 2016, 49(4): 188-192.
- [14] 付鲁军, 骆 虎, 贾一凡, 等. 12 kV气体绝缘断路器柜在原材料获取阶段和制造阶段碳排放计算与对比分析[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 17-23.
FU Lujun, LUO Hu, JIA Yifan, et al. Carbon emission calculation and comparative analysis of 12 kV gas insulated circuit breaker cabinet in raw material acquisition and manufacturing stage[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 17-23.
- [15] 游一民, 彭振搏, 戴冬云, 等. 40.5 kV C-GIS全生命周期内碳排放计算与分析[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 13-19.
YOU Yimin, PENG Zhenbo, DAI Dongyun, et al. Calculation and analysis of Carbon emission in the whole life cycle of 40.5 kV C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 13-19.
- [16] 王 硕, 霍慧娟, 徐 丹, 等. 计及特高压交流工程建设的区域碳减排测算及分摊[J/OL]. 中国电力: 1-11[2023-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.M.20231213.1114.004.html>.
WANG Shuo, HUO Huijuan, XU Dan, et al. Calculation and sharing of regional carbon emission reduction considering the construction of ultra high voltage AC projects[J/OL]. Electric Power: 1-11[2023-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20231213.1114.004.html>.
- [17] 唐磊磊, 颜 安, 张海龙, 等. 腐蚀防护对钢铁材料降低碳排放的重要影响: 以钢管道全生命周期碳排放计量研究为例[J]. 中国科学(技术科学), 2023, 53(1): 53-70.
TANG Yunlei, YAN An, ZHANG Hailong, et al. Importance of corrosion protection on steel materials in reducing Carbon emissions: Carbon emission measurement throughout the life cycle of steel pipeline as an example[J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(1): 53-70.
- [18] 李 政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4000.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low Carbon transition pathway of power sector under Carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000.
- [19] 李小娇. 山区大跨悬索桥全生命周期碳排放核算研究

- [D]. 成都:西南交通大学,2019.
- LI Xiaojiao. Research on life cycle Carbon emissions calculation of long-span suspension bridges in mountainous areas[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [20] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
- LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of Carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.
- [21] 宋晓聪, 杜 帅, 邓陈宁, 等. 钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6630-6642.
- SONG Xiaocong, DU Shuai, DENG Chenning, et al. Life cycle carbon emission accounting and emission reduction potential assessment of steel industry[J]. Environmental Science, 2023, 44(12): 6630-6642.
- [22] 张天赋, 马光宇, 李卫东, 等. 高炉—转炉钢铁生产流程碳排放强度分析[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届钢学术年会. 上海: 中国金属学会, 2015: 1-5.
- ZHANG Tianfu, MA Guangyu, LI Weidong, et al. Carbon emission intensity analysis of blast furnace converter steel production process[C]//Proceedings of the 10th CSM Steel Congress & the 6th Baosteel Biennial Academic Conference. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2015: 1-5.
- [23] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 33-38.
- GAO Chunyan, NIU Jianguang, WANG Feiran. Review of Carbon emission accounting methods and Carbon emission factor in steel production[J]. Contemporary Economy & Management, 2021, 43(8): 33-38.
- [24] 企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施(2022年修订版)[S]. 2022.
- Guidelines for accounting methods and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises power generation facilities(revised in 2022)[S]. 2022.
- [25] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. [2023-12-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/2023/t20220315_971468.html.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on key work related to the management of greenhouse gas emission reports for enterprises in 2022[EB/OL]. [2023-12-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
- [26] 赵悦彤, 丁红蕾, 邱凯娜, 等. 金属大气腐蚀影响因素及实验方法研究综述[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(6): 527-532.
- ZHAO Yuetong, DING Honglei, QIU Kaina, et al. Research progress on influencing factors and test methods of atmospheric corrosion of metals[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(6): 527-532.
- [27] 严新巧. 电化学工作站伏安测试技术研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- YAN Xinqiao. Research and implementation on the voltammetry testing technology of electrochemical workstation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [28] MCCAFFERTY E. Tafel外推法测定腐蚀速率的验证[J]. 腐蚀科学, 2005, 47(12): 3202-3215.
- MCCAFFERTY E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 3202-3215.
- [29] RAVEENDRAN A, CHANDRAN M, DHANUSURAMAN R. A comprehensive review on the electrochemical parameters and recent material development of electrochemical water splitting electrocatalysts[J]. RSC Advances, 2023, 13(6): 3843-3876.
- [30] 刘国强, 刘 婧. 电磁场理论及数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- LIU Guoqiang, LIU Jing. Electromagnetic field theory and numerical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [31] 不锈钢结构技术规程: CECS 410: 2015[S]. 2015.
- Technical specification for stainless steel structures: CECS 410: 2015[S]. 2015.
- [32] 刘永辉. 电化学测试技术[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
- LIU Yonghui. Electrochemical testing technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 1987.
- 张宇娇(1979—), 女, 博士, 教授, 研究方向为输电线路先进技术(E-mail: zhangyujiao@hfut.edu.cn)。
- 李宏松(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电工理论与新技术(E-mail: cqkz52@163.com)。
- 郭 垚(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电工程建设。
- 孙青松(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电工程建设。
- 董广广(1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输变电工程建设。
- 黄雄峰(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为超/特高压输电线路先进设计、施工及智能运维(通信作者)(E-mail: hfut_huangxf@hfut.edu.cn)。