

[变电站]

# 基于三种变电站建设模式的建站期能耗与碳排放计算及分析

文/左涛<sup>1,3</sup> 李敏<sup>2,3</sup> 王福明<sup>1,3</sup> 邓伟<sup>1,3</sup> 宋英杰<sup>1,3</sup>

1. 乐山一拉得电网自动化有限公司; 2. 乐山师范学院; 3. 四川省预制舱式电力设备工程技术研究中心

详细计算分析三种变电站建设模式在建站期间的能耗与碳排放, 结果表明模块化预制舱式建站模式相较于土建结构建站模式和钢结构建站模式分别减少能源消耗和CO<sub>2</sub>排放90%和76%以上, 充分体现出模块化预制舱式变电站尤其是以玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的模块化预制舱式变电站在绿色低碳、减污减排和节能降耗方面的突出优势。

电力变电站是支撑国民经济发展的重要基础能源设施, 目前电力变电站建设主要有土建结构建站模式、钢结构建站模式和模块化预制舱式建站模式三种。随着我国“双碳”战略目标的不断推进实施, 对电力变电站环保建设的理念也不断深化, 要求建站期间实现绿色低碳、减污减排、节能降耗, 因此深入分析研究三种变电站建设模式在建站期间的能耗与碳排放很有必要<sup>[1-4]</sup>。本文以在四川省乐山市建成投运的龙口110 kV模块化预制舱式变电站, 以及满足同样要求的土建结构变电站和钢结构变电站为研究对象, 详细计算分析了三种变电站建设模式在建站期间的能耗与碳排放, 通过对比分析, 展示了模块化预制舱式变电站尤其是以玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的模块化预制舱式变电站建站期间突出的环保节能低碳优势, 为该建站模式的广泛应用提供了科学数据支撑。

## 模块化预制舱式变电站建站方案

四川乐山龙口110 kV模块化预制舱式变电站位于乐山高新区, 该变电站建设规模为: 主变压器SZ11-50000/110 110±8×1.25%/10.5 kV YND11,

$U_K=17\%$ 含中性点、电流互感器 1台; 110 kV间隔7个; 10 kV间隔单母线分段18个; 10 kV无功补偿装置2×4 800 kvar; 10 kV接地变压器兼站用变压器1×700 kV·A (站用变压器100 kV·A)。

建站方案采用环保型非金属模块化预制舱式变电站, 将全站设备划分为110 kV GIS组合电器预制舱、10 kV开关设备预制舱、电容器成套装置预制舱、接地变压器消弧线圈预制舱、二次组合设备预制舱等多个模块化功能预制舱。舱体及舱顶围护结构均在生产工厂内采用玄武岩纤维复合预制件, 通过干式工法拼装而成。预制舱内部电力设备在工厂内完成制作、组装、配线、调试等工作, 以模块化预制舱形式整体配送至变电站建设现场吊装、组合、就位, 从而快速完成电力变电站的建设。

围护结构采用的玄武岩纤维复合预制件是一种将玄武岩纤维作为混凝土改性掺料, 以低碱快硬硫铝酸盐水泥作为胶凝材料, 与聚苯乙烯泡沫、河砂、化合物等多种集料按特定比例混合搅拌后 (其主要集料组分配比含量见表1<sup>[5]</sup>), 高压喷射浇筑在用槽钢、钢筋制作成型的模具内, 经24 h静置形成的纤维复合预制件制品。由于该预制件集中了高性

基金项目: 四川省科学技术厅2022年第四批省级科技计划项目 (2022ZYGX005)

能纤维、高分子材料和金属钢材的性能优势，使得以该预制件作为预制舱围护结构的非金属预制舱具有抗冲击能力强、燃烧性能等级高、耐火性能长、防腐能力强、隔热性能好、抗冻性能好等良好物理性能<sup>[6]</sup>。

表1 玄武岩纤维复合预制件主要集料组分配比含量

| 序号 | 主要集料     | 所占比例 (%) |
|----|----------|----------|
| 1  | 快硬硫铝酸盐水泥 | 45.73    |
| 2  | 河砂       | 45.73    |
| 3  | 聚苯乙烯泡沫   | 0.61     |
| 4  | 玄武岩纤维丝   | 1.22     |
| 5  | 钢材       | 6.71     |

各模块化预制舱表面积、舱体厚度、体积、重量见表2（预制舱表面积为含舱顶，不含窗）。

表2 各预制舱表面积、厚度、体积、重量表

| 模块化预制舱名称          | 预制舱表面积 /m <sup>2</sup> | 舱体厚度 /m | 体积 /m <sup>3</sup> | 重量/kg      |
|-------------------|------------------------|---------|--------------------|------------|
| 110 kV GIS组合电器预制舱 | 381.84                 | 0.08    | 30.55              | 50 097.4   |
| 10 kV开关设备预制舱      | 397.98                 | 0.08    | 31.84              | 52 213.97  |
| 电容器成套装置预制舱        | 72.64                  | 0.08    | 4.89               | 9 661.56   |
| 接地变消弧线圈预制舱        | 52.58                  | 0.08    | 3.29               | 7 029.3    |
| 二次组合设备预制舱         | 320.44                 | 0.08    | 24.64              | 42 041.72  |
| 合计                | 1 227.48               |         | 98.21              | 161 043.95 |

### 模块化预制舱式变电站建设能耗与碳排放计算

文献[7]已计算出龙口110 kV模块化预制舱式变电站的生产能耗为5 794.63 kgce，运输能耗为276.86 kgce，施工能耗为582.86 kgce。据此，可得出模块化预制舱式变电站建站期间的能耗与碳排放。

#### 1. 变电站预制舱单位生产能耗

龙口变电站预制舱的单位生产能耗为预制舱的生产能耗与舱体面积的比值，可得

$$\begin{aligned} \text{变电站预制舱单位生产能耗} &= 5\,794.63 \div 1\,227.48 \\ &= 4.72 \text{ kgce/m}^2 \end{aligned}$$

#### 2. 变电站预制舱单位运输施工能耗

龙口变电站预制舱的单位运输施工能耗为预制舱的运输施工能耗与舱体面积的比值，可得

$$\begin{aligned} \text{预制舱单位运输施工能耗} &= (276.86 + 582.86) \div \\ &1\,227.48 = 0.7 \text{ kgce/m}^2 \end{aligned}$$

#### 3. 变电站预制舱建站期单位建设能耗

龙口预制舱式变电站建站期能耗=预制舱的生

产能耗+预制舱的运输能耗+预制舱的施工能耗

$$\begin{aligned} \text{龙口模块化预制舱式变电站建站期能耗} &= \\ &5\,794.63 + 276.86 + 582.86 = 6\,654.35 \text{ kgce} \end{aligned}$$

因1 kg标准煤相当于排放2.49 kg CO<sub>2</sub>，故采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的模块化预制舱式变电站建设模式产生的CO<sub>2</sub>排放为16.57 t CO<sub>2</sub>e。

龙口模块化预制舱式变电站建站期单位建设能耗=变电站建站期能耗÷舱体面积=（预制舱的生产能耗+预制舱的运输能耗+预制舱的施工能耗）÷舱体面积

模块化预制舱式变电站建站期的单位建设能耗=

$$\begin{aligned} &(5\,794.63 + 276.86 + 582.86) \div 1\,227.48 = \\ &5.42 \text{ kgce/m}^2 \text{ (约0.013 t CO}_2\text{e/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

### 土建结构变电站建设能耗与碳排放计算

如果乐山龙口110 kV变电站采用混凝土土建结构形式，按照国网常规做法是修建一栋砖混结构的综合楼，根据龙口变电站的建设规模，综合楼长41 m，宽22 m，分两层，一层布置主变压器室、35 kV及10 kV配电室、电容器室、站用变压器室、资料室、工器具及卫生间。一层建筑面积902 m<sup>2</sup>，层高约3.5 m；二层布置110 kV配电装置室、控制室及吊装平台。二层建筑面积564.05 m<sup>2</sup>，层高约8 m，建筑总高度约12.5 m，总建筑面积1467.05 m<sup>2</sup>，混凝土外墙总面积1 474.2 m<sup>2</sup>（不含窗）。

综合楼建设采用钢筋混凝土砖混结构，其中立柱、梁、二层楼板、二层屋顶、楼梯选用强度等级为C30商砼，为满足8度抗震要求，沿建筑高度每隔200 mm设2φ6拉结筋，墙体选用红砖堆砌，砖墙厚度240 mm，砖块外层抹灰砂浆的厚度为20 mm，瓷砖粘结剂的厚度为10 mm。

因此，整个混凝土体系的建设能耗包括：红砖的生产及运输能耗、商砼的生产及运输能耗、抹面砂浆的生产及运输能耗、瓷砖粘结剂的生产及运输能耗、构造筋的生产及运输能耗以及混凝土外墙的施工能耗。

#### 1. 红砖的生产及运输能耗

##### （1）红砖的生产能耗

根据文献GB 55007—2021《砌体结构通用规范》，1 m<sup>3</sup>砖墙的砖净用量可按式进行计算

$$1 \text{ m}^3 \text{ 砖墙的砖净用量} = 1 / (\text{墙厚} \times (\text{砖长} + \text{灰缝})) \times$$

$$(\text{砖厚}+\text{灰缝})) \times K$$

式中,  $K$ 为墙厚的砖数, 取值2; 灰缝取0.1m, 砖墙厚度为0.24 m, 砖长+灰缝为0.25 m, 砖厚+灰缝为0.063 m。可得

$$1\text{m}^3\text{的240砖墙的砖净用量}=1/$$

$$(0.24 \times 0.25 \times 0.063) \times 2 = 529\text{块}$$

$$\text{综合楼红砖总量}=\text{砖墙表面积} \times \text{砖墙厚度} \times$$

$$529\text{块}=1\,474.2 \times 0.24 \times 529=187\,164\text{块}$$

由于现在都是内燃砖, 即将煤矸石、煤炭或别的合适的料样和土按一定比例配成约250~350大卡的生料进行焙烧, 焙烧1万块红砖需要的能耗为2 400 kgce/万块, 因此综合楼红砖的生产能耗为

$$\text{综合楼红砖的生产能耗}=\text{万块红砖单位能耗} \times$$

$$187\,164 \div 10\,000=2\,400 \times 187\,164 \div 10\,000$$

$$=44\,919.46\text{ kgce}$$

## (2) 红砖的运输能耗

根据实际运输的要求, 每车运输红砖54m<sup>3</sup>, 运输距离为50 km。

$$\begin{aligned} \text{综合楼红砖的运输能耗} &= \text{所需红砖的总体积} \div \text{每车} \\ &\text{运送量} \times \text{百公里油耗} \times 0\text{号柴油标准热值} \div \text{标煤的} \\ &\text{热值} \times \text{运输距离} \div 100 \end{aligned}$$

$$\text{红砖的运输能耗}=1\,474.2 \times 0.24 \div 54 \times$$

$$38 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 50 \div 100=181.4\text{ kgce}$$

$$\begin{aligned} \text{综合楼红砖的总能耗} &= \text{红砖的生产能耗} + \text{红砖的运输} \\ &\text{能耗}=44\,919.46+181.4=45\,100.86\text{ kgce} \end{aligned}$$

## 2. 商砼的生产及运输能耗

根据乐山市某商砼企业提供的资料, 每立方C30商砼的生产及运输能耗为30 kgce, 则

$$\begin{aligned} \text{商砼的生产及运输能耗} &= \text{所用商砼的总体积} \times \text{每立} \\ &\text{方商砼的生产及运输能耗} \end{aligned}$$

所用商砼主要为现浇立柱、梁、二层楼板、二层屋顶、楼梯等, 统计得出商砼用量为438.65m<sup>3</sup>。

$$\text{商砼的生产及运输能耗}=438.65 \times 30=$$

$$13\,159.50\text{ kgce}$$

## 3. 抹面砂浆的生产及运输能耗

根据乐山市某商品砂浆企业提供的资料, 每吨抹面砂浆的生产及运输能耗为30 kgce, 则

$$\begin{aligned} \text{抹面砂浆生产及运输能耗} &= \text{抹面砂浆总需求量} \times \text{每} \\ &\text{立方砂浆的生产及运输能耗} \end{aligned}$$

根据设计要求, 外墙抹面砂浆厚度为2 cm, 则抹面砂浆总需求量=抹面面积×砂浆层厚度×砂浆

$$\text{容量}=5\,471.8 \times 0.02 \times 1.8=196.98\text{ t}$$

$$\text{抹面砂浆生产及运输能耗}=196.98 \times 30=$$

$$5\,909.54\text{ kgce}$$

## 4. 瓷砖粘结剂的生产与运输能耗

根据乐山市某商品砂浆企业提供的资料, 每吨瓷砖粘结剂的生产与运输能耗为53.2 kgce, 则

$$\begin{aligned} \text{瓷砖粘结剂的生产与运输能耗} &= \text{每吨瓷砖粘结剂生} \\ &\text{产与运输能耗} \times \text{粘结剂需求量} \end{aligned}$$

根据设计要求, 瓷砖粘结剂厚度为10 mm, 则瓷砖粘结剂的总需求量=外墙表面积×砂浆层厚度×瓷砖粘结剂的容重=1 474.2×0.01×1.8=26.54 t

$$\text{瓷砖粘结剂的生产及运输能耗}=53.2 \times$$

$$26.54=1\,438.47\text{ kgce}$$

## 5. 构造用钢材的生产及运输能耗

根据设计要求, 拉结筋采用HRB235级2×Φ6钢筋, 与柱交接处, 沿柱全高每隔200 mm按照8度抗震要求, 拉结筋沿墙全长贯通。

$$\begin{aligned} \text{经测算, 构造用钢材重量为} &87.78\text{t, 可计算构造用} \\ &\text{钢材的生产能耗}=\text{钢材的需求量} \times 1\text{t钢材的综合电耗} \\ &\times \text{电力折标准煤系数}=87.78 \times 463 \times 0.123= \end{aligned}$$

$$4\,998.98\text{ kgce}$$

$$\begin{aligned} \text{构造用钢材的运输能耗} &= \text{钢材的需求量} \times \text{百公里油} \\ &\text{耗} \div \text{每车运量} \times 0\text{号柴油标准热值} \div \text{标煤的热值} \\ &\times \text{运输距离} \div 100=87.78 \times 38 \div 30 \times 10\,200 \div \\ &7\,000 \times 100 \div 100=162.02\text{ kgce} \end{aligned}$$

## 6. 混凝土外墙的施工能耗

为简化计算, 仅考虑红砖运送楼上时的设备能耗。以卷扬机每次装运3 m<sup>3</sup>, 卷扬机功率为3 kW·h, 往返运送一次的平均时间为2 min, 则往返运送一次的耗电量为3 kW·h×2÷60=0.1 kW·h。

$$\begin{aligned} \text{混凝土外墙的施工能耗} &= \text{所需红砖的总体积} \div \text{每次} \\ &\text{运装量} \times \text{往返运送一次的耗电量} \times \text{电力折标准煤系数} \\ \text{混凝土外墙的施工能耗} &= 1\,474.2 \times \end{aligned}$$

$$0.24 \div 3 \times 0.1 \times 0.123=1.45\text{ kgce}$$

## 7. 土建结构变电站建站期间的能耗与碳排放

### (1) 土建结构变电站单位生产能耗

为简化计算土建结构变电站单位生产能耗=(红砖的生产能耗+构造用钢材的生产能耗)÷外墙总面积

$$\text{土建结构变电站单位生产能} =$$

$$(44\ 919.46+4\ 998.98) \div 1474.2=33.86\ \text{kgce/m}^2$$

#### (2) 土建结构变电站单位运输施工能耗

土建结构变电站单位运输施工能耗=(红砖的运输能耗+商砼的生产及运输能耗+抹面砂浆的生产及运输能耗+瓷砖粘结剂的生产与运输能耗+构造用钢材的运输能耗+土建变电站的施工能耗)÷外墙围护面积

$$\text{土建结构变电站单位运输施工能耗}=(181.4+13$$

$$159.5+5\ 909.54+1\ 438.47+162.02+1.45) \div$$

$$1\ 474.2=14.14\ \text{kgce/m}^2$$

#### (3) 土建结构变电站建站期单位建设能耗

土建结构变电站建站期能耗=综合楼红砖的总能耗+商砼生产及运输能耗+抹面砂浆生产及运输能耗+瓷砖粘结剂的生产与运输能耗+构造用钢材的生产及运输能耗+混凝土外墙的施工能耗

$$\text{土建结构变电站建站期能耗}=45\ 100.86+$$

$$13\ 159.50+5\ 909.54+1\ 438.47+5\ 161+1.45=$$

$$70\ 770.82\ \text{kgce}\ (\text{产生的CO}_2\text{排放为}176.22\ \text{t CO}_2\text{e})$$

土建结构变电站建站期间的单位建设能耗=建站期能耗÷外墙围护面积

$$\text{土建结构变电站建站期间的单位建设能耗}=\frac{70\ 770.82}{1\ 474.2}=48.01\ \text{kgce/m}^2\ (\text{约}0.12\ \text{t CO}_2\text{e/m}^2)$$

### 钢结构变电站建设能耗与碳排放计算

如果乐山龙口110 kV变电站采用钢结构形式,其建筑物规模与土建变电站一致,但是具体建设方式则为修建一栋轻钢结构的综合楼,主体框架为钢横梁、钢立柱构成的框架结构,屋顶、楼板采用钢筋桁架支撑式现浇商砼,屋顶、楼板的钢筋桁架及主要钢筋工程均在工厂预制、现场拼装。墙体围护结构的墙板龙骨架采用铝合金型材,由内向外结构为3 mm铝塑扣板、10 mm耐火纸面石膏板、50 mm岩棉板、10 mm耐火纸面石膏板、8 mm纤维水泥板。同时,为了满足建筑防火的要求,钢结构需涂装防火涂料。

各材料均通过公路运输至变电站建设现场,其中耐火纸面石膏板的运输距离设为50 km,岩棉板的运输距离设为100 km,防火涂料的运输距离设为100 km,纤维水泥板的运输距离设为50 km。

因此,整个钢结构体系的建设能耗包括:构造用钢材的生产及运输能耗、商砼生产及运输能耗、铝塑扣板生产及运输能耗、耐火纸面石膏板的生产

及运输能耗、岩棉板的生产及运输能耗、纤维水泥板生产及运输能耗以及钢结构现场施工能耗。

#### 1. 构造用钢材的生产及运输能耗

经测算,钢材的总用量为176.51 t,可计算出构造用钢材的生产能耗=钢材的需求量×1t钢材的综合电耗×电力折标准煤系数=176.51×463×0.123=

$$10\ 052.07\ \text{kgce}$$

构造用钢材的运输能耗=钢材的需求量×百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标煤的热值×运输距离÷100=176.51×38÷30×10 200÷

$$7\ 000 \times 100 \div 100=325.79\ \text{kgce}$$

#### 2. 商砼的生产及运输能耗

经测算,商砼的用量为162.36 m<sup>3</sup>。可计算出商砼的生产及运输能耗为4 870.8 kgce。

#### 3. 铝塑扣板的生产及运输能耗

经测算,所用铝塑扣板的面积为1 362.5 m<sup>2</sup>。

根据文献[11],铝塑板单位产品能耗准入值应不大于3 700 kgce/(10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>),此处取单位产品能耗准入值的最大值3 700 kgce/(10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>)。

可得铝塑扣板的生产能耗为504.13 kgce

由于所用铝塑扣板体积较小,其运输能耗相较于生产能耗予以忽略。

#### 4. 耐火纸面石膏板的生产及运输能耗

耐火纸面石膏板的能耗=耐火纸面石膏板的体积×(1m<sup>3</sup>耐火纸面石膏板的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标煤的热值×运输距离÷100)

经测算,所用耐火纸面石膏板的面积为2 731 m<sup>2</sup>,体积为27.31 m<sup>3</sup>。

根据文献[12],耐火纸面石膏板单位产品能耗消耗限额及格值为1.5 kgce/m<sup>3</sup>;根据实际运输的要求,每车可运输耐火纸面石膏板的体积不超过50 m<sup>3</sup>。

$$\text{耐火纸面石膏板的能耗}=27.31 \times (1.5+38 \div$$

$$27.31 \times 10\ 200 \div 7\ 000 \times 100 \div 100)=96.34\ \text{kgce}$$

#### 5. 岩棉板的生产及运输能耗

岩棉板的能耗=岩棉板的用量×(1t岩棉板的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×柴油标准热值÷标煤的热值×距离÷100)

根据文献[13],岩棉及其制品单位产品可比综合能耗准入值应不大于450 kgce/t,此处取综合能耗准入值的最大值450 kgce/t。

经测算,所需岩棉板的用量为6.81t,可得:岩棉板

$$\text{的能耗} = 6.81 \times (450 + 38 \div 30 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 100 \div 100) = 3\,077.1 \text{ kgce}$$

#### 6. 防火涂料的生产及运输能耗

防火涂料的能耗=防火涂料的用量×(1t防火涂料的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×柴油标准热值÷标煤的热值×距离÷100)

根据文献[14],防火涂料单位产量综合能耗应不大于800 kgce/t,此处取综合能耗的最大值800 kgce/t。

经测算,所需防火涂料的用量为4.84 t。

$$\text{防火涂料的能耗} = 4.84 \times (800 + 38 \div 30 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 100 \div 100) = 3\,880.95 \text{ kgce}$$

#### 7. 水泥纤维板的生产及运输能耗

水泥纤维板的能耗=水泥纤维板的体积×(1 m³水泥纤维板的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标煤的热值×运输距离÷100)

经测算,所用水泥纤维板的面积为1 362.5 m²,体积为10.9 m³。

根据文献[15],水泥纤维板单位产品综合能耗限额为3级(即不超过131 kgce/m³,此处取最大值);根据实际运输的要求,每车可运输水泥纤维板的体积不超过50 m³。

$$\text{水泥纤维板的能耗} = 10.9 \times (131 + 38 \div 10.9 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 50 \div 100) = 1\,454.59 \text{ kgce}$$

#### 8. 钢结构变电站现场施工能耗

钢结构主体框架施工采用1台30 t的吊车,吊车每天工作8 h,连续工作10天,每小时油耗为10 L;屋顶、墙体围护结构施工采用2台自行走直臂式高空作业平台车,平台车每天工作8 h,连续工作20天,每小时油耗为5 L;

忽略钢结构组建现场运输能耗以及其他辅助操作能耗,只计算吊车和作业平台车的能耗。

$$\text{钢结构现场施工能耗} = (\text{吊车数量} \times \text{时间} \times \text{每小时的油耗} + \text{平台车数量} \times \text{时间} \times \text{每小时的油耗}) \times \text{柴油标准热值} \div \text{标煤热值}$$

$$\text{钢结构现场施工能耗} = (1 \times 8 \times 10 \times 10 + 2 \times 8 \times 20 \times 5) \times 10\,200 \div 7\,000 = 3\,497.14 \text{ kgce}$$

#### 9. 钢结构变电站建站期间的能耗与碳排放

##### (1) 钢结构变电站单位生产能耗

钢结构变电站单位生产能耗=(钢材、岩棉板、防火涂料、纤维水泥板生产能耗的总和)÷外墙围护

面积

$$\text{钢结构变电站单位生产能耗} = (10\,052.07 + 3\,064.5 + 3\,872 + 1\,427.9) \div 1\,474.2 = 12.5 \text{ kgce/m}^2$$

##### (2) 钢结构变电站单位运输施工能耗

$$\text{钢结构变电站单位运输施工能耗} = (\text{各材料的运输能耗} + \text{钢结构现场施工能耗}) \div \text{外墙围护面积} = (325.79 + 4\,870.8 + 504.13 + 55.37 + 12.57 + 8.93 + 27.69 + 3\,497.14) \div 1\,474.2 = 6.31 \text{ kgce/m}^2$$

##### (3) 钢结构变电站建站期单位建设能耗

$$\begin{aligned} \text{钢结构变电站建站期能耗} &= \text{各材料的生产能耗} + \text{运输能耗} + \text{钢结构现场施工能耗} \\ \text{钢结构变电站建站期能耗} &= 18\,457.43 + 5\,805.27 + 3\,497.14 = 27\,759.84 \text{ kgce} \quad (\text{产生的CO}_2\text{排放为} 69.12 \text{ t CO}_2\text{e}) \end{aligned}$$

$$\text{钢结构变电站建站期间的单位建设能耗} = \text{钢结构变电站建站期能耗} \div \text{外墙围护面积}$$

$$\text{钢结构变电站建站期间的单位建设能耗} = 27\,759.84 \div 1\,474.2 = 18.83 \text{ kgce/m}^2 \quad (\text{约} 0.047 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2)$$

## 结束语

由上述计算及分析可得出以下结论。

1) 在同一个电力变电站建设工程项目中,采用模块化预制舱式变电站建站模式的建设期能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是6654.35 kgce和16.57 t CO<sub>2</sub>e,建设期单位建设能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是5.42 kgce/m²和0.013 t CO<sub>2</sub>e/m²;采用土建结构建站模式的建设期能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是70 770.82 kgce和176.22 t CO<sub>2</sub>e,建设期单位建设能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是48.01 kgce/m²和0.12 t CO<sub>2</sub>e/m²;采用钢结构建站模式的建设期能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是27 759.84 kgce和69.12 t CO<sub>2</sub>e,建设期单位建设能耗和CO<sub>2</sub>排放分别是18.83 kgce/m²和0.047 t CO<sub>2</sub>e/m²。

2) 模块化预制舱式建站模式相较于土建结构建站模式和钢结构建站模式可以分别减少能源消耗和CO<sub>2</sub>排放90%和76%以上。

3) 通过数据对比分析,模块化预制舱式变电站尤其是以玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的模块化预制舱式变电站在建站期间的绿色低碳、减污减排和节能降耗方面的优势非常明显,值得在变电

站新建、改（扩）建工程项目中大力推广应用。EA

（收稿日期：2024-07-30）

### 参考文献

- [1] 李俊, 苟旭丹, 李松涛, 等. 智能变电站新型复合材料预制舱技术研究[J]. 智能制造, 2016, (12): 54-56.
- [2] 左涛, 张新太. 智能变电站高性能纤维预制舱防凝露设计[J]. 宁夏电力, 2022(2): 24-30.
- [3] 郭红斌, 马驰, 文正其. 预制舱式模块化变电站关键技术及展望[J]. 电气技术, 2023, 24(9): 1-10, 19.
- [4] 白瑜. 模块化预制舱在变电站建设中的应用[C]. 2022年电力科技管理论坛. 2022: 146-148.
- [5] 220 kV及以下智能变电站用玄武岩纤维预制舱生产技术规范: DB51/T 3079—2023 [S]. 成都: 四川省市场监督管理局, 2023.
- [6] 左涛, 刘建涛, 蒋强, 等. 非金属模块化预制舱式变电站节能环保关键技术[J]. 电气技术, 2024, 25(4): 59-65+76.
- [7] 左涛, 李敏, 宋英杰, 等. 变电站预制舱围护结构建设能耗与碳排放计算及分析[J]. 电气时代, 2024(3): 88-92.
- [8] 徐振宁, 潘超平, 刘东莱. 新型干法水泥厂电耗评述[J]. 水泥工程, 2008(4): 1-9.
- [9] 产品单位产量综合能耗计算方法及限额 第84部分: 聚苯乙烯发泡制品: DB 12/046. 84—2011[S]. 天津: 天津市质量技术监督局, 2011.
- [10] 涤纶（长、短）纤维单位综合能耗限额及计算方法: DB 33/683—2019[S]. 成都: 浙江省市场监督管理局, 2019.
- [11] 铝塑板单位产品能源消耗限额: GB 30185—2013[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2014.
- [12] 纸面石膏板单位产量能源消耗限额: JC/T 523—2010[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2010.
- [13] 岩棉、矿渣棉及其制品单位产品能源消耗限额: GB 30183—2013[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2013.
- [14] 产品单位产量综合能耗计算方法及限额 第80部分: 油漆: DB 12/046. 80—2011[S]. 天津: 天津市质量技术监督局, 2011.
- [15] 水泥制品单位产品能源消耗限额: GB 38263—2019[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2019.

