

变电站预制舱围护结构建设能耗与碳排放计算及分析

文/左涛^{1,3} 李敏^{2,3} 宋英杰^{1,3} 王福明^{1,3} 邓伟^{1,3}

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

为精确计算和分析变电站预制舱围护结构在生产建设过程中的能耗与碳排放情况,以龙口110 kV模块化预制舱式变电站为研究对象,详细计算了采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱能耗与碳排放,以及满足相同要求的双层金属预制舱围护结构的建设能耗与碳排放。结果表明玄武岩纤维预制舱的生产能耗比双层金属预制舱的生产能耗节约28%,相当于减少CO₂排放5 618.6 kg,充分体现出玄武岩纤维预制舱在绿色低碳、节能减排中的突出优势,可在变电站新建、改(扩)建工程项目中大力推广应用。

变电站预制舱是承载变电站各类设备,保证设备正常运行和满足专业人员现场作业环境要求的重要部品,是实现预制舱式变电站标准化设计、工厂化加工、模块化生产、配送式运输和机械化施工的先决要素,预制舱生产行业对变电站预制舱围护结构的稳定性、安全性及可靠性等做了大量深入研究。

随着变电站建设绿色低碳、节能减排等观念的不断深化,对变电站预制舱围护结构环保性能的要求越来越高,但是鲜有文献资料对变电站预制舱围护结构生产和建设过程的能耗与碳排放进行计算和分析。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为研究对象,详细计算与分析了玄武岩纤维预制舱围护结构和满足相同要求的双层金属预制舱围护结构的建设能耗与碳排放,为预制舱生产企业生产绿色低碳环保的预制舱式电力设备产品提供了参考依据。

预制舱围护结构的分类与特点

用于变电站建设的预制舱式电力设备的围护结构有金属与非金属两种材质形式。金属材质的预制舱围护结构的常见生产工艺是用坡口焊方式将型钢焊接成主体骨架,包括舱底座、舱体立柱及舱体横梁等,预制舱体和舱顶用内、外两层优质钢板包裹型钢骨架结构,骨架空隙填充隔热防火材料(如岩棉保温板或聚氨酯)构成保温层。金属材质的预制舱具备构造简单、标准化和装配水平高、质量轻、强度高及对电磁的屏蔽性好等特点,但因为金属材料本身固有特性中存在的弱点,金属钢结构的预制舱无法克服耐腐蚀性差、低温脆断及高温传热快等缺陷和危害。

近年来,随着新技术、新材料和新工艺的出现及应用,出现了一种基于高性能纤维(如玄武岩纤维)的非金属复合材料预制件,该预制件把玄武岩纤维作为混凝土改性掺料,以低碱快硬硫铝酸盐水

基金项目:2020年四川省科学技术厅第一批省级科技计划项目:220kV环保型模块化智能变电站(No. 2020ZHC0024)

泥作为胶凝材料，与聚苯乙烯泡沫、河砂及化合物等多种集料按特定比例混合搅拌（主要集料组分配比含量见表1），经高压喷射浇筑在用槽钢、钢筋制作成型的模具内，经24 h静置形成纤维复合预制件产品。由于该预制件集中了高性能纤维、高分子材料和金属钢材的性能优势，因此以该预制件作为预制舱围护结构的非金属预制舱具有燃烧性能等级高、耐火性能长、防腐能力强及隔热性能好等良好物理性能。

表1 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

工程情况

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，由110 kV GIS组合电器预制舱、10 kV开关设备预制舱、二次组合设备预制舱、电容器成套装置预制舱和接地变压器消弧线圈预制舱等多个模块化功能预制舱组合而成，预制舱围护结构均在生产工厂内采用玄武岩纤维复合预制件（预制件厚度0.08 m），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、配线及调试等工作，以模块化预制舱形式整体配送至变电站建设现场进行吊装、组合和就位，快速完成模块化预制舱式变电站的建设。

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

表2 各预制舱表面积、厚度、体积及重量

模块化预制舱名称	预制舱 表面积/ m ²	舱体 厚度/ m	体积/ m ³	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	52 214.97
电容器成套装置预制舱	73.64	0.08	5.89	9 661.56
接地变消弧线圈预制舱	53.58	0.08	4.29	7 029.3
二次组合设备预制舱	320.44	0.08	25.64	42 041.72
合计	1 227.48		98.21	161 044.95

采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱能耗计算

智能变电站用玄武岩纤维预制舱建设能耗包括预制舱的生产能耗、预制舱的运输能耗及预制舱的施工装配能耗三部分。

1. 龙口变电站预制舱的生产能耗

龙口变电站玄武岩纤维预制舱围护结构生产能耗=快硬硫铝酸盐水泥的能耗+河砂的能耗+聚苯乙烯泡沫的能耗+玄武岩纤维的能耗+钢材的能耗+预制件生产的能耗。根据表1的配比，计算出生产各预制舱消耗的主要集料用量见表3。

表3 各预制舱体主要集料用量

(单位: kg)

模块化预制舱名称	钢筋	水泥	河砂	泡沫	纤维
110 kV GIS组合电器预制舱	3 360.19	22 910.4	22 910.4	305.47	610.94
10 kV开关设备预制舱	3 502.22	23 878.8	23 878.8	318.38	636.77
电容器成套装置预制舱	648.03	4 418.4	4 418.4	58.91	117.82
接地变消弧线圈预制舱	471.48	3 214.62	3 214.62	42.86	85.72
二次组合设备预制舱	2 819.87	19 226.4	19 226.4	256.35	512.70
合计	10 801.79	73 648.62	73 648.62	981.97	1 963.95

各主要集料均通过公路运输至预制舱生产企业，快硬硫铝酸盐水泥运输距离设为100 km，河砂的运输距离设为50 km，玄武岩纤维的运输距离设为100 km，聚苯乙烯泡沫的运输距离设为100 km，钢材的运输距离设为100 km。运输车辆的运载量以公路管理要求的不超过30 t计算，百公里油耗38 L。此外，水泥的综合电耗为91.94 (kW·h) /t。

根据以上数据计算出各主要集料的生产和运输能耗，以及预制件工厂生产需要的能耗，从而得出龙口变电站用玄武岩纤维预制舱围护结构的生产能耗。

(1) 快硬硫铝酸盐水泥的能耗

快硬硫铝酸盐水泥的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按下式进行计算

快硬硫铝酸盐水泥的能耗=水泥的用量×（1 t水泥的综合电耗×电力折标准煤系数+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标煤的热值×距离÷100）

(1)

依据GB/T 2589—2020《综合能耗计算通则》的相关规定，式中电力折标准煤系数为0.123 kgce/(kW·h)，0号柴油标准热值为10 200 kcal/kg，标准煤热值为7 000 kcal/kg。

可得快硬硫铝酸盐水泥的能耗=73.65×(91.94×0.123+38÷30×10 200÷7 000×100÷100)=968.82 kgce。

(2) 河砂的能耗

河砂为天然物质，其能耗仅为运输需要的能耗。可按下式进行计算

河砂的能耗=河砂的用量×(百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标准煤的热值×距离÷100)

可得河砂的能耗=73.65×(38÷30×10 200÷7 000×50÷100)=67.97 kgce。

(3) 聚苯乙烯泡沫的能耗

聚苯乙烯泡沫的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按下式进行计算

聚苯乙烯泡沫的能耗=聚苯乙烯泡沫的用量×(1 t聚苯乙烯泡沫的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标准煤的热值×距离÷100)

根据DB12/046.84—2011《产品单位产量综合能耗计算方法及限额》，聚苯乙烯发泡制品单位产量综合能耗应不大于3 100 kgce/t。此处取综合能耗的最大值3 100 kgce/t。

可得聚苯乙烯泡沫的能耗=0.98×(3 100+38÷30×10 200÷7 000×100÷100)=3 039.81 kgce。

(4) 玄武岩纤维的能耗

玄武岩纤维的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按下式进行计算

玄武岩纤维的能耗=玄武岩纤维的需求量×(1 t玄武岩纤维的生产能耗+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标准煤的热值×距离÷100)

根据DB33/683—2019《涤纶（长、短）纤维单位综合能耗限额及计算方法》，玄武岩纤维单位产品能耗为370 kgce/t。

可得玄武岩纤维的能耗=1.96×(370+38÷30×10 200÷7 000×100÷100)=728.82 kgce。

(5) 钢材的能耗

钢材的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按

下式进行计算

钢材的能耗=钢材的需求量×(1 t钢材的综合电耗×电力折标准煤系数+百公里油耗÷每车运载量×0号柴油标准热值÷标准煤的热值×距离÷100)

根据中国联合钢铁网发布的消息，每吨钢的生产电耗为463 kW·h，可得

钢材的能耗=10.8×(463×0.123+38÷30×10 200÷7 000×100÷100)=634.98 kgce。

(6) 预制件生产的能耗

各主要集料通过混合搅拌后高压喷射在钢制模具后形成玄武岩纤维复合预制件，再通过干式工法拼装形成预制舱围护结构，其生产能耗主要是搅拌、喷射和拼装过程中相关生产设备所消耗的电能，可按下式进行计算

预制件生产的能耗=生产设备总功率×工作时间×电力折标准煤系数

据统计，生产龙口变电站预制件的生产设备总功率是12 kW，每天工作8 h，连续工作30天，可得预制件生产的能耗=12×8×30×0.123=354.24 kgce。

可得预制舱的生产能耗=968.82+67.97+3 039.81+728.82+634.98+354.24=5794.63 kgce。

2. 龙口变电站预制舱的运输能耗

龙口变电站距离生产地点的运输距离为20 km，受运输条件限制，预制舱不能整体运输至变电站现场，需要分割成多个拼接单元，并采用38辆6.8 m长的平板运输车，汽车百公里油耗为25 L。忽略预制舱拼接单元装卸车的能耗，运输能耗可按下式进行计算

预制舱的运输能耗=所需车辆数×(百公里油耗×0号柴油标准热值÷标准煤的热值×距离÷100)

可得预制舱的运输能耗=38×(25×10 200÷7 000×20÷100)=276.86 kgce。

3. 龙口变电站预制舱的施工能耗

龙口变电站预制舱采用配送式运输、机械化施工的方式，预制舱拼接单元运送至变电站现场后，通过吊装作业将各拼接单元拼接为完整的预制舱。现场吊装拼接采用1台25 t的起重机，起重机每天工作8 h，连续工作5天，每小时油耗为10 L。忽略预制构件现场运输能耗及其他辅助操作能耗，只计算

起重机的能耗。预制舱吊装拼接的施工能耗可按下式进行计算

$$\text{预制舱的施工能耗} = \text{时间} \times \text{每小时的油耗} \times \text{起重数量} \times 0 \text{号柴油标准热值} \div \text{标准煤热值} \quad (8)$$

可得预制舱的施工能耗 = $8 \times 5 \times 10 \times 1 \times 10\,200 \div 7\,000 = 582.86 \text{ kgce}$ 。

采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱能耗为以上三部分能耗之和，即预制舱总能耗 = 预制舱的生产能耗 + 预制舱的运输能耗 + 预制舱的施工装配能耗 = $5\,794.63 + 276.86 + 582.86 = 6\,654.35 \text{ kgce}$ 。

因 1 kg 标准煤相当于排放 2.49 kgCO_2 ，故采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱建设方式产生的 CO_2 排放为 $16.57 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。

采用双层金属作为围护结构的预制舱能耗计算

如果龙口 110 kV 模块化预制舱式变电站舱体围护结构采用双层金属，其建设能耗也包括预制舱的生产能耗、预制舱的运输能耗及预制舱的施工装配能耗三部分。

1. 双层金属预制舱的生产能耗

双层金属预制舱围护结构的生产能耗为：钢材的能耗 + 岩棉板的能耗 + 油漆的能耗 + 稀料的能耗 + 辅件的能耗。表4列出了双层金属预制舱与玄武岩纤维预制舱在预制舱表面积、舱体厚度、各舱体积均相同的情况下的各材料的用量情况。

表4 双层金属预制舱体各材料用量

(单位: kg)

模块化预制舱名称	钢材	岩棉板	油漆	稀料	辅件
110 kV GIS 组合电器预制舱	14 387.730	3 054.72	305.472	30.5472	134.77
10 kV 开关设备预制舱	14 995.890	3 183.84	318.384	31.8384	140.46
电容器成套装置预制舱	2 774.755	589.12	58.912	5.8912	25.99
接地变消弧线圈预制舱	2 018.894	428.64	42.864	4.2864	18.91
二次组合设备预制舱	12 074.180	2 563.52	256.352	25.6352	113.10
合计	46 251.450	9 819.84	981.980	98.2000	433.23

各材料均通过公路运输至预制舱生产企业，其中岩棉板的运输距离设为 100 km ，油漆、稀料、辅

件的运输距离也均为 100 km ，钢材数据与玄武岩纤维预制舱相关数据一致。

(1) 钢材的能耗

参考式(5)可计算出钢材的能耗为 $2\,719.26 \text{ kgce}$ 。

(2) 岩棉板的能耗

岩棉板的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按式(8)进行计算

$$\text{岩棉板的能耗} = \text{岩棉板的用量} \times (\text{1t岩棉板的生产能耗} + \text{百公里油耗} \div \text{每车运载量} \times 0 \text{号柴油标准热值} \div \text{标准煤的热值} \times \text{距离} \div 100) \quad (9)$$

根据 GB30183—2013《岩棉、矿渣棉及其制品单位产品能源消耗限额》，岩棉及其制品单位产品可比综合能耗应不大于 450 kgce/t 。此处取综合能耗的最大值 450 kgce/t 。

$$\text{可得岩棉板的能耗} = 9.82 \times (450 + 38 \div 30 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 100 \div 100) = 4\,428.06 \text{ kgce} \quad (10)$$

(3) 油漆和稀料的能耗

油漆和稀料的能耗为生产能耗与运输能耗之和，可按式(8)进行计算

$$\text{油漆和稀料的能耗} = \text{油漆和稀料的用量} \times (\text{1t油漆和稀料的生产能耗} + \text{百公里油耗} \div \text{每车运载量} \times 0 \text{号柴油标准热值} \div \text{标准煤的热值} \times \text{距离} \div 100) \quad (11)$$

根据 DB12/046.80—2011《产品单位产量综合能耗计算方法及限额 第80部分：油漆》，油漆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 。

$$\text{可得油漆和稀料的能耗} = 1.08 \times (800 + 38 \div 30 \times 10\,200 \div 7\,000 \times 100 \div 100) = 865.99 \text{ kgce}。$$

(4) 辅件的能耗

双层金属预制舱采用的辅件是指 M8、M6 和 M10 等类型的镀锌螺丝（配平垫），其能耗为镀锌螺丝的生产能耗与运输能耗之和，可按式(8)进行计算

$$\text{辅件的能耗} = \text{辅件的用量} \times (\text{1t辅件的生产电耗} \times \text{辅件精加工系数} \times \text{电力折标准煤系数} + \text{百公里油耗} \div \text{每车运载量} \times 0 \text{号柴油标准热值} \div \text{标准煤的热值} \times \text{距离} \div 100) \quad (12)$$

辅件的生产电耗可以按照每吨钢的生产电耗 ($463 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$)，考虑镀锌螺丝精加工过程中也需

要消耗电能，此处引入辅件精加工系数，取值1.5。

可得辅件的能耗= $0.433 \times (463 \times 1.5 \times 0.123 + 38 \div 30 \times 10 \ 200 \div 7 \ 000 \times 100 \div 100) = 37.79 \text{ kgce}$ 。

可得双层金属预制舱的生产能耗= $2 \ 719.26 + 4 \ 428.06 + 865.99 + 37.79 = 8 \ 051.1 \text{ kgce}$ 。

2. 双层金属预制舱的运输能耗

由于采用双层金属作为围护结构的预制舱与采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱的体积尺寸一致，同样需要分割成多个拼接单元，故而运输至变电站现场所需的车辆数也为38辆6.8 m长的平板运输车。因此，双层金属预制舱的运输能耗与玄武岩纤维预制舱的一致，为276.86 kgce。

3. 双层金属预制舱的施工能耗

同理，采用双层金属作为围护结构的预制舱的施工能耗与玄武岩纤维预制舱的一致，为582.86 kgce。

采用双层金属作为围护结构的预制舱能耗为以上三部分能耗之和，即双层金属预制舱总能耗=双层金属预制舱的生产能耗+双层金属预制舱的运输能耗+双层金属预制舱的施工装配能耗= $8 \ 051.1 + 276.86 + 582.86 = 8 \ 910.82 \text{ kgce}$ 。

因1 kg标准煤相当于排放2.49 kg CO₂，故采用双层金属作为围护结构的预制舱建设方式产生的CO₂排放为22.19 t。

结束语

由上述计算可知，在同一个工程项目中，采用玄武岩纤维复合预制件作为围护结构的预制舱能耗（6 654.35 kgce）比采用双层金属作为围护结构的预制舱能耗（8 910.82 kgce）节约2 256.47 kg标准

煤，相当于减少5 618.6 kg CO₂排放，主要是因为玄武岩纤维预制舱的生产比双层金属预制舱的生产节能28%，充分体现出玄武岩纤维预制舱在绿色低碳、节能减排中的突出优势，值得在变电站新建、改（扩）建工程项目中大力推广应用。

同时，值得注意的是，玄武岩纤维预制舱围护结构中的聚苯乙烯泡沫的能耗为3 039.81 kgce，占整个围护结构生产能耗的45.68%，因此采用低能耗的高分子材料制品替代聚苯乙烯泡沫将是进一步降低玄武岩纤维预制舱生产能耗的重点研究方向。EA

（收稿日期：2023-07-14）

参考文献

- [1] 马云飞，刘文平．智能变电站预制舱技术应用[J]．中国电力企业管理，2022(21)：42-43．
- [2] 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．
- [3] 赵璐，王友辉．预制舱式全金属密封变电站在城市中心变电站中的应用[J]．东北电力技术，2015，36(12)：51-53．
- [4] 左涛，张新太．高性能纤维预制舱式智能变电站研究与应用[J]．高电压技术，2021，47(ZK1)：7-12．
- [5] 左涛，朱西平，蒋强，等．全模块化预制舱式变电站技术经济指标分析[J]．电气时代，2023(6)：98-102．
- [6] 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．

