

12 kV 开关柜产品碳足迹比较分析

陈慎言, 钱立骁, 李宏伟

(上海平高天灵开关有限公司, 上海 201808)

摘要: 鉴于产品碳足迹 (CFP) 正成为新的产品评价维度, 文中以两家公司公开的 6 种 12 kV 开关柜 CFP 为基础, 比较分析具有代表性的空气绝缘、SF₆ 气体绝缘和环保气体绝缘 3 种绝缘方式, 在不同系统边界和阶段的碳足迹, 表明 CFP 主要集中在原材料获取和产品使用阶段共约占 80%~92.5%, 并受产品结构、绝缘方式及气体介质影响, 其中 SF₆ 和环保气体绝缘开关柜 CFP 仅为空气绝缘开关柜的 31%~35%, 环保气体开关柜比 SF₆ 气体绝缘开关柜低 8%~12.5%; 通过这两主要阶段碳足迹和主要构成材料的简化比较分析, 指出产品设计基本决定原材料获取和产品使用阶段碳足迹, 也基本决定 CFP, 因此产品设计需要平衡和优化好这两个主要阶段才能降低 CFP, 并指出国内产品的材料使用效率仍需提高, 并进一步指出要通过 CFP 更好实现产品的比较、评价和选择, 建议建立符合 GB/T 24067—2024 附录 B 要求的相对统一的比较评价模型。

关键词: 产品碳足迹; 空气绝缘开关柜; SF₆ 气体绝缘开关柜; 环保气体绝缘开关柜; 产品设计

Comparison and Analysis of Carbon Footprint for 12 kV Voltage Switchgear

CHEN Shenyan, QIAN Lixiao, LI Hongwei

(Shanghai Pinggao Tianling Switchgear Co., Ltd., Shanghai 201808, China)

Abstract: Given that product carbon footprint (CFP) is becoming a new dimension for product evaluation, this article compares and analyzes the CFP of six publicly available 12 kV switchgears from two companies, at different boundaries and stages for three representative insulation methods, namely air-insulated, SF₆-insulated, and environmentally-friendly gas-insulated, the comparison shows that CFP is mainly concentrated in the stages of raw material acquisition and product use approximately 80%-92.5% in total, and is influenced by product structure, insulation method and gas dielectric, among them the environmentally-friendly gas-insulated and SF₆-insulated are 31%-35% of than air-insulated, while environmentally-friendly gas-insulated is lower than SF₆-insulated 8%-12.5%; a simplified method is used by the comparison and analysis of the two main stages and constituted material of the product, and points out that the CFP during the raw material acquisition and product use stage are basically determined by the product design, and also the CFP of the product, therefore the product design needs to balance and optimize these two main stages in order to reduce the CFP; and also pointed out that the material efficiency of domestic products still needs to be improved, furthermore it is necessary to better compare, evaluate and select products through CFP, which requires the establishment of a relatively unified CFP evaluation model which complied with appendix B of GB/T 24067—2024.

Key words: carbon footprint of a product (CFP); Air-insulated switchgear; SF₆ gas-insulated switchgear; environmentally-friendly gas-insulated switchgear; product design

0 引言

全球资源、环境问题的凸显和公众环境意识的提高, 特别是中国“双碳目标”的确定, 产品碳足迹(CFP)正在成为新的产品评价维度; 中压开关柜面广量大, 在以新能源为主体的新型电力

系统建设中至关重要, 分析和了解开关柜的产品碳足迹无疑对制造厂和用户都具有现实意义。

文中以两家公司公开的 12 kV 开关柜产品碳足迹数据为基础, 比较分析了具有代表性的空气绝缘、SF₆ 绝缘和环保气体绝缘 3 种绝缘方式, 在不同系统边界和阶段的碳足迹, 从中了解 CFP

的主要阶段、主要影响因素以及对产品设计、产品选用等的启示。

1 产品碳足迹简介

CFP 是基于生命周期评价方法量化产品生命周期中温室气体排放量和温室气体清除量的总和，以全球变暖潜势(GWP)二氧化碳当量(CO₂e)表征；生命周期(摇篮到坟墓)包括原材料获取到期末处置各阶段；温室气体(GHG)是指二氧化碳(CO₂)、六氟化硫(SF₆)等气体；根据目的不同也可选择摇篮到大门，即原材料获取到产品配送的产品部分碳足迹核算边界。

CFP 一般需通过第三方认证，既帮助制造厂规范信息、有效应对绿色贸易壁垒，也有助于用户选择低碳产品展示社会责任；目前第三方认证主要有产品碳足迹和环境产品声明(EPD)等。

2 摇篮到大门的碳足迹

分别引用 A 公司摇篮到大门、在某工厂生产的 3 种产品碳足迹报告^[1-2](不含产品包装)；分别是空气绝缘柜 KYN28A-12/1250-31.5 进/出线柜(KYN28A)、SF₆ 绝缘柜(SF₆ 充气柜)N2X-12/1250-31.5 进/出线柜(N2X SF₆)和环保气体柜(环保充气柜)N2X-12/1250-31.5 进/出线柜(N2X

N₂)，3 种产品示意图见图 1，其产品类别、功能参数基本相同，具有一定的可比性。

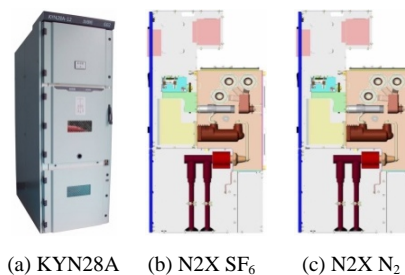


图 1 12 kV 开关柜-A 公司

Fig. 1 12 kV switchgear -A company

3 种产品碳足迹的比较见图 2，其碳足迹数据参见表 1；其中因为 N2X SF₆、N2X N₂ 结构相同、仅绝缘气体有所差别^[3]，因此 N2X SF₆ 在原材料获取阶段碳足迹仅比 N2X N₂ 多 SF₆ 气体与氮气(N₂)原材料获取碳足迹的增量(按 6 kg CO₂e/kg 排放因子增量估算)。可以看到，碳足迹从低到高是 KYN28A、N2X N₂、N2X SF₆，其中 KYN28A 的碳足迹是 N2X SF₆、N2X N₂ 的 0.95 倍，N2X SF₆ 比 N2X N₂ 高 1.03 倍，表明用摇篮到大门碳足迹是产品部分碳足迹并不适合不同产品比较；从阶段碳足迹看，3 种产品摇篮到大门碳足迹都主要集中在原材料获取阶段，平均占到总额的 80%，而生产阶段仅占到 2.8%、配送阶段因为运输距离较远占到 15%。

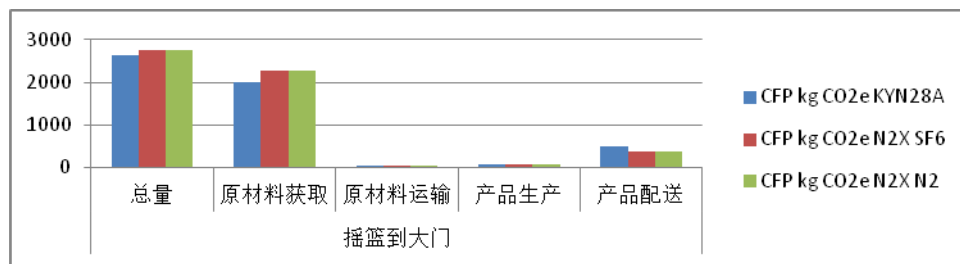


图 2 摇篮到大门产品碳足迹比较-A 公司

Fig. 2 Comparison of cradle-to-gate CFP - A company

表 1 产品碳足迹数据-A 公司

Table 1 Data of cradle-to-gate CFP - A company

kgCO₂e

参数	KYN28A	N2X SF ₆	N2X N ₂
总量	2 624	2 757.4	2 751.4

原材料获取	2 009.2	2 275	2 269
原材料运输	45.5	33.8	33.8
产品生产	75.7	75.7	75.7
产品配送	493.6	372.9	372.9

3 种产品构成材料的比较见图 3，其产品构成材料数据参见表 2；其中由于缺乏各种元器件和线缆等的碳足迹报告，因此构成材料的分解和排放因子不够精确。从图 3 和表 2 可以看到，3 种产品的总重量从低到高是 N2X N₂、N2X SF₆、KYN28A，其中 N2X N₂、N2X SF₆的总重量相差不足 0.2%，并均比 KYN28A 低 24%；主要构成

材料分别是钢材、铜材和环氧树脂，其中 KYN28A 的钢材比 N2X N₂、N2X SF₆多 48.8%，铜材少 36%，环氧树脂多 400%；表明碳足迹与总重量不成比例，产品结构、绝缘方式对材料用量影响较大，相比钢材铜材用量的增加不仅易加大产品成本也易加大产品碳足迹。

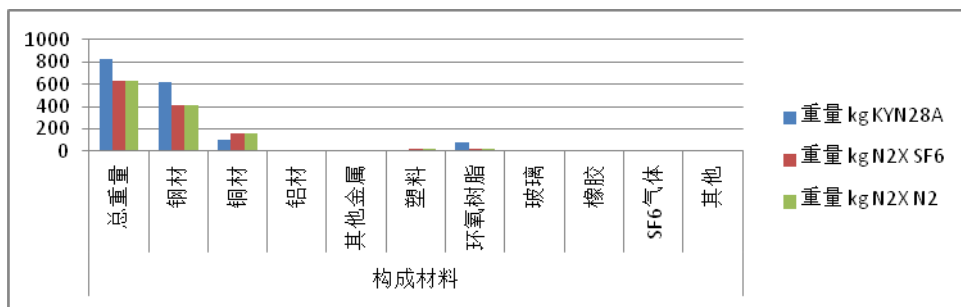


图 3 产品构成材料比较-A 公司

Fig. 3 Comparison of product constituent material -A company

表 2 产品构成材料数据-A 公司

Table 2 Data of product constituent material

kg

型号	总重量	钢材	铜材	铝材	其他金属	塑料	环氧树脂	玻璃	橡胶	SF ₆ 气体	其他
KYN28A	824.0	613.7	102.8	4.1	6.1	6.6	81.5	0.9	2.1	0.0	6.2
N2X SF6	631.3	412.0	161.0	11.8	2.5	18.9	16.2	1.2	1.3	1.3	5.1
N2X N2	630.0	412.0	161.0	11.8	2.5	18.9	16.2	1.2	1.3	0.0	5.1

3 摇篮到坟墓的产品碳足迹

为进一步理解 CFP，分别引用 B 公司摇篮到坟墓、在相关国际工厂生产的 3 种产品 EPD^[4](含产品包装)；分别是空气绝缘柜 ZS1-12/1250-31.5 进/出线柜(ZS1)、SF₆ 绝缘柜(SF₆ 充气柜)ZX0-12/1250-31.5 进/出线柜(ZX0)和环保气体柜(环保充气柜)ZX0-12/1250-31.5 进/出线柜(ZX0 Air)，3 种产品示意图见图 4，其产品类别、功能参数基本相同具有可比性，并与 A 公司产品相对应。



图 4 12 kV 开关柜-B 公司

Fig. 4 12 kV switchgear - B company

3 种产品碳足迹的比较见图 5，其产品碳足迹数据参见表 3；其中均包含产品包装的碳足迹；同时因没有直接的 ZX0、ZX0 Air 碳足迹，根据产品资料^[5-6]24kV ZX0 与 ZX0 除真空开断单

元不同外，其余基本相同，故 ZX0 的数据引自 SF₆ 绝缘柜 24 kV ZX0 进/出线柜^[7]；同时 ZX0 Air 与 ZX0 的主要差异是用干燥空气替换 SF₆，

因此 ZX0 Air 碳足迹是在 ZX0 数据基础上对原材料获取和产品使用阶段碳足迹修正获得，具体可参见文中 4.2 节。

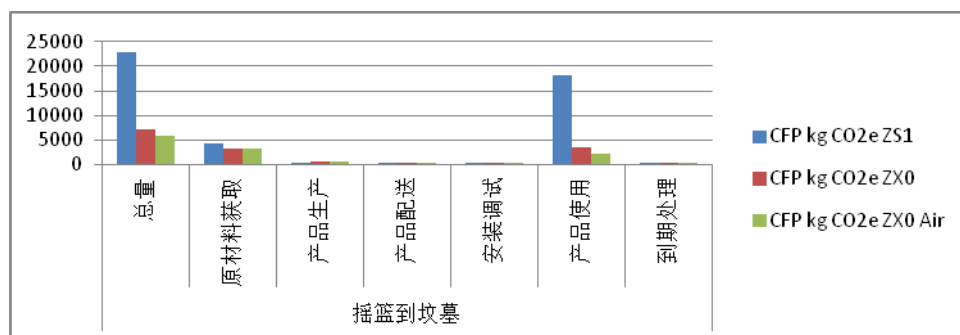


图 5 摇篮到坟墓产品碳足迹比较-B 公司

Fig. 5 Comparison of cradle-to-grave CFP -B company

表 3 摇篮到坟墓产品碳足迹数据-B 公司

Table 3 Data of cradle-to-grave CFP-B company

kg CO₂e

参数		ZS1	ZX0	ZX0 Air
摇篮到坟墓	总量	22 900	7 180	5 964
	原材料获取	4 250	3 100	3 100
	产品生产	235	518	518
	产品配送	40.8	31.9	31.9
	安装调试	70.3	65.2	65.2
	产品使用	18 200	3 390	2 180
	到期处理	148.0	69.1	69.1

从图 5 和表 3 可以看到，3 种产品碳足迹从高到低是 ZS1、ZX0、ZX0 Air，ZS1 的碳足迹是 ZX0、ZX0 Air 的 3.2、3.8 倍，并且 ZX0 是 ZX0 Air 的 1.19 倍，这与图 2 的结果完全不同；从阶段碳足迹比较看，都集中在原材料获取和产品使用阶段，平均共占 92.4%，产品生产平均只占 5.64%；其中原材料获取阶段，ZX0、ZX0 Air 相差不足 0.5%，并均比 ZS1 低 37%；在产品使用阶段，ZS1 是 ZX0、ZX0 Air 的 5.38、8.35 倍，ZX0 是 ZX0 Air 的 1.56 倍；表明与空气绝缘 ZS1 相比，ZX0、ZX0 Air 可以大幅降低产品碳足迹，而且环保气体柜 ZX0 Air 产品碳足迹最低。

3 种产品构成材料的比较见图 6，其产品构成材料数据参见表 4；由于上游的主要元器件都

有各自的 EPD，因此构成材料分类汇总相对比较方便和准确。从图 6 和表 4 可以看到，3 种产品的重量从低到高是 ZX0 Air、ZX0、ZS1，其中 ZX0 Air、ZX0 的总重量相差不足 0.2%，并均比 ZS1 低 37%；主要构成材料从高到低也是钢材、铜材、环氧树脂，其中 ZS1 的钢材比 ZX0 Air、ZX0 多 44.9%，铜材多 44.7%，环氧树脂多 513%；也表明产品碳足迹与产品总重量不成比例，产品结构、绝缘方式对材料用量影响较大，相比空气绝缘 ZS1 气体绝缘 ZX0 Air、ZX0 可大幅节约主要用料。

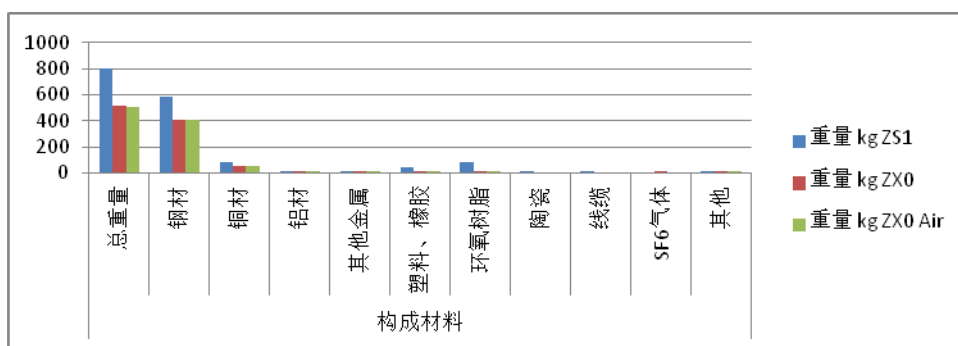


图 6 产品构成材料比较-B 公司

Fig. 6 Comparison of product constituent material -B company

表 4 产品构成材料数据-B 公司

Table 4 Data of product constituent material-B company

Xinghao	总重量	钢材	铜材	铝材	其他金属	塑料、橡胶	环氧树脂	陶瓷	线缆	SF ₆ 气体	其他
ZS1	805.0	584.85	82.21	4.34	5.86	38.04	78.53	1.98	3.52	0.0	5.65
ZX0	508.8	403.50	56.80	8.80	3.00	15.10	12.80	0.00	0.00	2.4	4.20
ZX0 Air	506.6	403.50	56.80	8.80	3.00	15.10	12.80	0.00	0.00	0.0	4.20

kg

4 核算背景信息

上述比较分析表明，产品碳足迹包含原材料获取和产品使用两个重要阶段，需要进行产品碳足迹比较必须至少包含这两个阶段，因此采用摇篮到坟墓的系统边界是合适选择，而其他边界，如上述摇篮到大门，主要适于量化分析而不适于产品比较，否则易产生以偏概全的结果；同时，不同绝缘方式和气体、不同制造厂产品和阶段碳足迹差别很大，而且影响数据的因素很多，以下主要探讨核算背景信息和取值对原材料获取、产品使用两个重要阶段碳足迹的影响。

4.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段碳足迹是制造厂为生产产品所需全部上游材料的碳足迹，不仅包括原材料上游加工和运输的碳足迹，还包括所有选用元器件的碳足迹。

4.1.1 碳排放因子

各种材料和活动碳足迹(CFP)都可按式(1)计算

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

式(1)中：AD 指产生 GHG 排放的活动水平，如燃煤、用电、材料的用量；EF 是单位活动产生的碳排放因子。但 EF，包括能源、材料等受到诸多因素影响，与所在区域、上游矿源、开采工艺、冶炼技术、生产过程等相关，难有统一的数据库；而且虽然像上述 A、B 公司产品碳足迹核算都是基于 Ecoinvent v3.8(2021)数据库，但选择的路径不同 EF 也会不同。

以中国生态环境部的碳排放系数集^[8]为例，对钢(铁)、铜等金属材料，矿石铁平均 EF 为 1.1 kg CO₂e/kg，其中最高 2.1、最低 0.07，压延压钢(铁)制品 2.1，铜—镍共生的铜材平均 10.3、金峰工艺 27.2、电解铜—镍共生 53.1 kg CO₂e/kg；平均来说金属铁的 EF 约为金属铜的 10%、约为铝金属的 12%；原生金属的 EF 高于再生金属，如原生铝比再生铝高约 20 倍，可见不同来源和工艺的 EF 相差很大，必须进行溯源选择才符合实际情况，而要进行溯源必须建立上下游产业链完善的核算体系。

类似的情况还有电能碳排放因子(EEF)，是各种构成电能加权平均后的综合因子，包括了电

能生产、传输、变电、配电等环节；如水电或其他清洁能源占比高 *EEF* 就低；因此 *EEF* 也具有区域性，政府会定期更新发布 *EEF*；也因此产品生产和使用阶段的电能消耗可能在不同区域应选取相应区域的 *EEF*。上述 A 公司生产阶段核算采用上海市的 *EEF* 0.42 kg CO₂e/kWh，B 公司生产阶段采用工厂所在地、产品使用阶段选用欧洲各地 *EEF* 为 0.374~0.51 kg CO₂e/kWh。

4.1.2 主要元器件

开关柜的元器件很多，小件可按取舍原则忽略，但主要元器件，如断路器、电流互感器及其他控制保护元器件等的碳足迹必须核算；如果这些元器件已有产品碳足迹，可方便核算但仍需注意背景信息和进行必要的修正，否则可将元器件也分解成原材料并采用相应 *EF* 来核算。

上述 B 公司 ZS1 开关柜的主要元器件有断路器 VD4^[9]、电流互感器 CT^[10]和电压互感器 VT^[11]。由于 ZS1 核算的功能单元包含一台 VD4、3 台 CT 和 3 台 VT，因此 ZS1 应与一台 VD4、3 台 CT 和 3 台 VT 三个部分(分别称为 VD4 部分、CT 部分和 VT 部分)的 *CFP*(未统一负载率)和构成材料的比较为：VT 部分的碳足迹约占 ZS1 碳足迹的 3.1%，VD4 部分约占 5.6%，CT 部分约占 37.7%；从阶段分布来看，三部分碳足迹主要也来自于原材料获取和产品使用阶段，约占各自产品碳足迹的 73%、97%、97.5%，其中 CT 部分在产品使用阶段约为原材料获取阶段的 30 倍；从重量及构成材料看，三部分重量分别约占 ZS1 的 8.83%、15.12%、8.52%，主要材料也是钢、铜和环氧；表明这些主要元器件的碳足迹和材料用量都有较高占比，也主要来自原材料获取和产品使用阶段，特别是 CT 在产品使用阶段碳足迹很高。

4.2 产品使用阶段

产品使用阶段是开关柜生命周期中的主要阶段，因为安装、调试和维护产生的能耗和时长相对全生命周期占比很小而且难以估算，因此将安装、调试、使用、维护阶段统称为产品使用阶段并主要考虑 GHG 泄漏和产品使用能耗的碳足迹；同时，由于生命周期跨度对产品使用碳足迹影响较大(下文可看到呈线性关系)，虽然产品设计和预期寿命可达 40 年，但在核算时，如 B 公司的上述产品，均采用参考使用寿命(*RSL*)20 年计算^[4-7, 9-11]，但仍应注意 *RSL* 对 *CFP* 的影响。

4.2.1 SF₆ 气体泄漏

气体绝缘开关柜必然产生气体泄漏；但环保气体柜，泄漏的环保气体不会显著增加碳足迹，而 SF₆ 绝缘柜按照相关规程要求必须有效管理并不允许直接排放，因此需核算 SF₆ 泄漏产生的碳足迹；同时，SF₆ 绝缘柜因充气压力较低(常接近零表压)，因此按年泄漏率 0.1%核算，如 B 公司产品；这与 GB/T 11022—2020 第 6.16.4 注 2 认为密封的 SF₆ 气体开关设备和控制设备在其预期工作寿命期间具有不明显的 SF₆ 气体损失(小于每年 0.1%)是一致的。

以上述 24 kV ZX0^[5]为例，SF₆ 总量为 2.4 kg、排放因子 25 200 kg CO₂e/kg，按年泄漏率 0.1%计算 20 年泄漏气体 0.048 kg、碳足迹为 1 210 kg CO₂e，图 5 中 ZX0 Air、N2X SF₆的碳足迹就按此修正或计算；相反，如果 SF₆ 气体没有得到有效管理而被全部排放到大气中，碳足迹将达到灾难性的 60 480 kg CO₂e。

4.2.2 使用能耗

产品的使用能耗 E_{use} 为

$$E_{\text{use}}=P_{\text{use}}\times 8\ 760\times RSL\times \phi\div 1\ 000 \quad (2)$$

式(2)中： ϕ 为使用率，一般取 100%；8 760 为一年的小时数； RSL 为参考使用寿命；1 000 为将 W 转化成 kW； P_{use} 为总能耗功率，主要包括产品导电回路电阻能耗功率 P_{loop} 、回路中 CT、VT 的附加能耗功率 $P_{trans}^{[1]}$ 和其他配套控制保护设备的能耗功率 P_{acce} 。在获得 E_{use} 后，就可根据产品使用地的 EEF 计算能耗碳足迹。

但由于 P_{loop} 与回路电阻和负载电流相关，用额定电流 I_r 为基准的平均负载率 L_f 表征变化的负载电流；如 24 kV ZX0 的额定电流 1 250 A、负载率 L_f 取 0.35 时 P_{loop} 为 30.2 W， E_{use} 为 5 291.7 kWh，使用地欧洲的 EEF 取 0.4 kg CO₂e/kWh 碳足迹为 2 116.7 kg CO₂e。上述 ZX0 Air、N2X N₂、N2X SF₆ 在产品使用阶段的碳足迹均按此获得；可见产品回路电阻以及使用系数、负载系数

等运行参数和 EEF 等都影响到产品使用阶段的碳足迹。

如果开关柜装有 CT、VT，则还要计算 CT、VT 的附加能耗 P_{trans} ，包括 CT(不含一次侧电阻损耗)附加损耗功率和 VT 附加损耗功率。以 ZS1、KYN28A 为例，所安装的 CT^[10]附加损耗功率为 38.33 W、VT^[11]附加损耗功率为 0.9 W，附加能耗 P_{trans} 为 39.23 W；可见，相比主回路电阻能耗，CT 的使用能耗很高；比较图 7 ZS1 和 ZX0 的使用碳足迹，两者相差很大的原因之一是 ZS1 的 CT 能耗，因为 ZX0 采用穿芯式 CT 其能耗较小碳足迹较低。

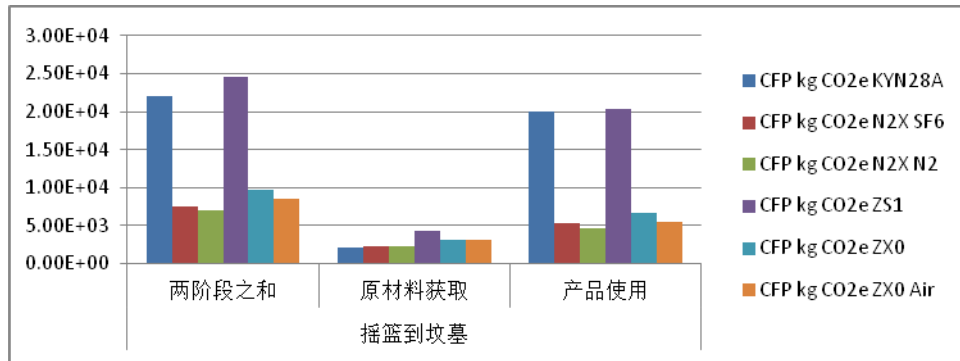


图 7 主要阶段产品碳足迹比较-A、B 公司

Fig. 7 Comparison of the main stages CFP –A, B company

另外，如果在产品使用中还有长期带电的控制设备和继电保护设备也会产生能耗 P_{acce} ，包括控制设备能耗功率和保护设备能耗功率。以 KYN28A 为例，国内常在多个部位加装防凝露加热器，而且部分采用常投运行；即使只计算两个常投加热器、每个加热器 50 W 的情况，20 年的能耗就达 17 520 kWh，按中国 2024 年生态环境部发布的全国电能平均碳排放因子 EEF 0.556 8 kg CO₂e/kWh 计算增加产品碳足迹 9 755 kg CO₂e。可见，产品使用中要求长期带电的控制设

备和继电保护设备的能耗，并不能像 B 公司核算中那样可以忽略，否则与实际情况差别较大。

5 两公司产品碳足迹比较

上述两个主要阶段背景信息分析表明，碳排放因子 EF 和元器件选配对产品原材料获取阶段碳足迹有决定性影响，产品参考使用寿命 RSL 、产品使用率 ϕ 、使用地电能排放因子 EEF 等与产品使用阶段碳足迹成线性关系，与负载率 L_f 成平方关系，因此 GB/T 24067—2024^[12]附录 B 要求用同等系统边界对相同产品类别、功能、参数

和使用场景的不同产品才能进行比较，但在进行各产品 CFP 核算时，各公司、产品的材料获取、制造和预设使用场景等可能不相同，B 公司 6 种产品 CFP 核算时的相关背景信息取值见表 5，显然各产品的预设使用场景并不完全相同，

表 5 产品碳足迹核算的相关背景信息-B 公司

Table 5 Background information of CFP assessment-B company

B 公司产品原 EPD 核算值	ZS1	ZX0	ZX0 Air	VD4/P	CT	VT
参考使用寿命 RSL	20	20	20	20	20	20
使用率 $\phi/\%$	100	100	100	30	100	100
负载率 L_f	0.61	0.35	0.35	0.50	1.00	1.00
使用地电能排放因子 EEF	0.374	0.400	0.400	0.406	0.406	0.406

为比较两公司的产品，考虑到产品碳足迹主要集中在原材料获取和产品使用阶段，其中虽然原材料获取阶段各材料 EF 难以获知和统一修正，但可以比较产品主要材料的用量加以辅助，产品使用阶段碳足迹数据则可以按文中 4.2 统一修正，这样使不同产品 CFP 比较简化为两个主要阶段碳足迹和产品主要材料用量的比较。

A、B 两公司 6 种产品在原材料获取和产品使用阶段碳足迹的比较见图 7，其相关数据见表 6；其中在原材料获取阶段，将 A 公司原材料运

这样其核算的主要阶段碳足迹也会有所不同并影响到 CFP，因此不统一背景信息(预设场景)等比较前提直接引用各产品 CFP 数据进行比较并不一定能反映出产品实际情况。

输碳足迹合并到原材料获取中以与 B 公司核算口径一致；在产品使用阶段，A 公司产品碳足迹按照文中 4.2 节所述方法计算气体泄漏和使用能耗的碳足迹，且 KYN28A 采用与 ZS1 相同的 CT、VT 损耗值，并统一背景信息将 A、B 两公司产品的使用率 ϕ 、负载率 L_f 和电能排放因子 EEF 统一为 100%、0.5 和 0.5 kg CO₂e/kWh。

表 6 统一修正后的碳足迹数据-A、B 公司

Table 6 Unified CFP of product use stage-A, B company

参数		kg CO ₂ e					
		KYN28A	N2X SF ₆	N2X N ₂	ZS1	ZX0	ZX0 Air
摇篮到坟墓	两阶段之和	2.21×10 ⁴	7.58×10 ³	6.92×10 ³	2.46×10 ⁴	9.71×10 ³	8.50×10 ³
	原材料获取	2.05×10 ³	2.31×10 ³	2.30×10 ³	4.25×10 ³	3.11×10 ³	3.10×10 ³
	产品使用	2.01×10 ⁴	5.27×10 ³	4.62×10 ³	2.03×10 ⁴	6.61×10 ³	5.40×10 ³

从图 7 和表 6 可见，两阶段之和碳足迹，空气绝缘 KYN28A 是气体绝缘 N2X SF₆、N2X N₂ 的 2.9、3.2 倍、空气绝缘 ZS1 是气体绝缘 ZX0、ZX0 Air 的 2.5、2.9 倍，与图 2、4 结果不同而且相差较大，说明产品间比较统一背景信息的必要性和 GB/T 24067—2024 附录 B 产品比较要求的重要性；同时产品使用阶段碳足迹平均分别是

4.1 和 3.4 倍，说明差异增大的主要来源是产品使用阶段，而 SF₆ 气体的用量也是重要因素；而且由于这两阶段是产品碳足迹的主要组成部分，基本代表产品碳足迹水平，也说明气体绝缘柜产品碳足迹仅为空气绝缘柜的 31%~35%，即使采用了 SF₆ 气体，而环保气体柜碳足迹可比 SF₆ 气体柜进一步降低 8%~12.5%。

同时注意到，两阶段之和与原材料获取阶段碳足迹，A 公司产品均比 B 公司产品平均低 16.8% 和 34.4%；而产品使用阶段碳足迹却比原材料获取阶段高达 3.8 倍，且此阶段碳足迹 KYN28A、N2X SF₆、N2X N₂ 比 ZS1、ZX0、ZX0 Air 分别低 1.4%、20.2%、14.4%，为此需作以下进一步分析。

图 3、6 的两公司 6 种产品主要材料构成的比较见图 8，其相关数据见表 7；A 公司产品总重量 KYN28A 比 ZS1 高 2.4%、N2X SF₆、N2X N₂ 却比 ZX0、ZX0 Air 高 25%，其中钢材分别高

4.9%、2.1%，铜材高 25%、183%，环氧树脂高 3.8%、27%；可见为实现同样的产品功能 A 公司产品使用了更多的材料，特别是铜材；由于原材料获取阶段碳足迹主要由材料用量和材料 EF 决定，可知 A 公司产品比 B 公司产品在原材料获取阶段碳足迹低是 A 公司产品材料 EF 较低造成，也说明产品比较时 EF 的影响和统一修正的意义。

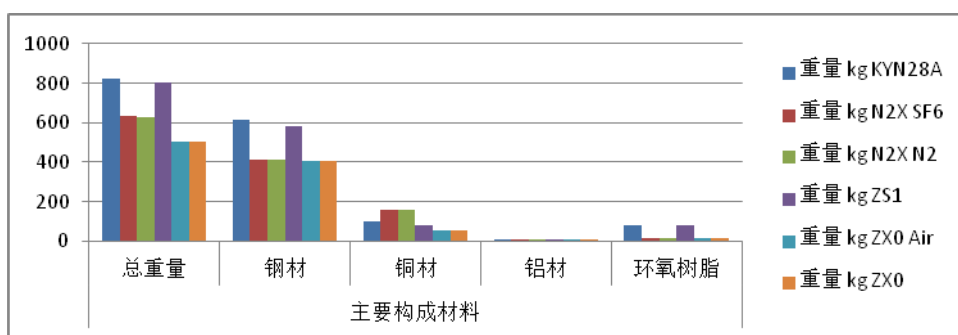


图 8 产品主要构成材料比较-A、B 公司

Fig. 8 Comparison of product main constituent material-A,B company

表 7 产品主要构成材料数据-A、B 公司

Table 7 Data of product main constituent material-A,B company

kg

参数	KYN28A	N2X SF ₆	N2X N ₂	ZS1	ZX0 Air	ZX0
主要构成材料	总重量	824.0	631.5	630.0	805.00	508.8
	钢材	613.7	412.0	412.0	584.85	403.5
	铜材	102.8	161.0	161.0	82.21	56.8
	铝材	4.1	11.8	11.8	4.34	8.8
	环氧树脂	81.5	16.2	16.2	78.53	12.8

同时，A 公司产品的总重量、钢材、铜材以及环氧树脂用量都高于 B 公司产品，特别是气体绝缘柜 N2X SF₆、N2X N₂ 的铜材用量高达 183%，不仅会提高产品碳足迹和产品成本，还说明 A 公司产品的材料使用效率较低；而在产品使用阶段 A 公司产品的碳足迹却比 B 公司产品较接近，气体绝缘柜 N2X SF₆、N2X N₂ 平均也只低 17%，因为铜材的用量为满足产品温升要求通常与回路电阻、回路能耗反向相关，说明更多

材料没有取得较低使用碳足迹，也说明材料使用效果不好。

并且注意到 A 公司的 KYN28A 是符合国家电网标准化定制要求^[13]的产品，N2X N₂ 也基本符合正在制定的环保气体绝缘开关柜的标准化定制要求，这表明国内产品使用了较多的材料，但并未使产品的回路电阻、能耗得到有效降低并使产品使用阶段碳足迹降低，即产品的材料使用效率、使用效果仍都有差距。

6 几点分析讨论

产品碳足迹及其阶段的量化,增加了考察产品的时间跨度和维度,因而可以获得一些重要启示。

6.1 产品设计

由于产品设计决定了产品结构(如箱式、筒式)、绝缘方式和气体介质(如空气绝缘、环保气体绝缘、 SF_6 气体绝缘、低压力、高压力)等不同技术路线的选择,不仅基本决定材料选择、用量及其组合(如钢材、铜材、环氧树脂等),也基本决定了材料的加工要求(如形状、表面、硬度等)及其 EF ,从而基本决定了原材料获取阶段碳足迹;同时为满足产品功能要求(如断路器、CT、VT 等元器件的接入)、产品技术要求(如温升要求对主回路电阻和元器件发热的限制)和使用环境要求(如为防凝露对加热器的要求)等,也基本决定了产品使用阶段碳足迹;前述分析表明原材料获取和产品使用是 CFP 的两个主要阶段,因而产品设计基本决定了产品碳足迹,也表明要降低 CFP 必须从产品设计开始,重点把控好这两个主要阶段。

同时,这两个主要阶段也是相互影响的。材料的选用和要求是为满足产品功能要求,如钢材主要为产品结构功能服务,铜材主要为导电回路服务,环氧树脂主要为绝缘服务,但受到产品结构、绝缘方式和绝缘气体的影响,不同绝缘方式,如空气绝缘、气体绝缘,产品结构会不同,各种材料的用量就不同,不仅影响原材料获取阶段碳足迹,也影响产品使用阶段碳足迹。以铜材为例,通常增加导电回路的铜材用量有利于降低回路电阻和满足产品温升要求,即增加原材料获取阶段碳足迹来减少产品使用阶段碳足迹,但一增一减是否能降低整体产品碳足迹就与产品设计

综合平衡和优化有关。同样的情况也出现在产品结构、绝缘方式和气体等不同技术路线的选择方面。因此产品设计不仅要把控好这两个主要阶段,还要平衡和优化好这两个主要阶段;要在满足产品技术要求基础上,采用尽量少的材料或 EF 尽量低的材料获得产品尽量小的能耗,包含配套元器件的能耗,才是优质、低碳、有竞争力的产品,这使产品设计的考虑范围从原来的上、中游扩展到上、中、下游的全生命周期,特别是铜材用量和产品能耗的平衡和优化不再仅为满足产品温升要求,从产品本身扩展到产品和其配套元器件,特别是 CT 及防凝露加热器等,需要综合平衡全面优化。

以前述 $\text{N}_2\text{X N}_2$ 产品为例,由于采用环保气体(氮气或干燥空气)绝缘,其绝缘能力与空气基本相同但约为 SF_6 的三分之一,既采用零表压原则提高可靠性,又减小产品尺寸实现紧凑设计,通过优化电场,包括电极形状和相对位置以满足绝缘要求^[14],虽然优化电场提高了加工生产要求和 EF ,但原材料获取阶段碳足迹却得到降低;与此同时氮气的散热性能比 SF_6 差,而且发热导体又密封在不锈钢箱体内,热量只能通过气箱外壁的对流和辐射传到大气中,因此同等条件下环保气体绝缘柜的温升状况不仅比空气绝缘柜差很多,也可能比 SF_6 气体绝缘柜温升增高 12 K ^[15]左右,为满足产品温升要求,产品设计不仅要努力增加散热面积、提高对流和辐射效率,还要降低发热功率^[16],如加大导电截面、增加散热材料、优化接触结构减小接触电阻、优化散热结构提高散热功率等,同样影响材料用量和 EF ,但虽然提高了原材料获取阶段碳足迹,却相应地降低了产品使用阶段碳足迹,从而达到了降低 CFP 的

目的。从图 2、7 看到，N2X N₂ 展现出较好的产品碳足迹和产品设计水平。

6.2 产品碳足迹比较

目前 CFP 核算是实际和预设场景相结合下的量化，即使 CFP 核算过程符合 GB/T 24067—2024 要求，也难以确保相同产品类别、相同功能和参数的 CFP 能满足 GB/T 24067—2024 附录 B 的比较要求，因为 CFP 核算是针对预设场景进行的，而各产品的预设场景并非一定一致，正如表 3 所示 B 公司的 5 种产品，因为产品使用场景和参数预设的产品使用率 ϕ 、使用地电能排放因子 EEF 、负载率 L_f 等不同，就使 ZS1、ZX0、ZX0 Air 三种产品比较前必须修正到统一预设场景，而不能进行直接比较；基于同样原因，VD4/P 产品使用阶段碳足迹也不能直接计入 ZS1 的产品使用阶段；因此在各产品 CFP 比较前必须先检查和统一相关背景信息使之符合比较要求，否则不能准确比较，更不能用来准确评价和选择。

在难以进行 CFP 全面比较或无法确定是否符合比较要求时，结合 CFP 主要集中在原材料获取和产品使用阶段特点，文中采用的对原材料获取阶段碳足迹不做修正、对产品使用阶段碳足迹进行统一修正，主要比较原材料获取和产品使用阶段碳足迹，但辅以产品构成材料用量比较的方法，虽是 CFP 的部分和近似比较，但也是可行的简化方法，而且统一修正后产品使用阶段碳足迹是符合 GB/T 24067—2024 附录 B 要求的，因而对制造厂、用户都有参考意义。

要更好实现相同类别、功能、参数不同产品 CFP 比较，可以建立相对统一的产品碳足迹比较评价模型。在比较模型中，影响 CFP 的外部背景信息和影响因素应是统一预设并符合 GB/T

24067—2024 附录 B 要求，如前述的参考使用寿命 RSL 、产品使用率 ϕ 、负载率 L_f 、使用地电能排放因子 EEF 等，而涉及产品本身的数据是实际的，如产品各种材料用量、加工要求和加工 EF 、产品使用能耗、GHG 用量等，以突出展现产品的特质和要求；在此基础上再结合产品各自的 CFP 数据，既可展示出制造厂在产品的设计、生产组织过程中努力的效率和效果，又可方便制造厂和用户对产品进行比较、评价和选择。

7 结论

1)两公司产品碳足迹比较表明，产品碳足迹主要集中在原材料获取和产品使用阶段，两者共约占到 80%~92.5%，主要元器件也如此；其中原材料获取阶段碳足迹主要受到钢材、铜材和环氧树脂等主要材料用量及其生产工艺决定的 EF 影响，产品使用阶段主要受到气体泄漏、使用能耗以及负载率、电能碳排放因子等背景信息影响。

2)产品结构、绝缘方式和气体介质等不同技术路线对产品碳足迹和使用材料有较大影响，环保气体柜和 SF₆ 绝缘柜的碳足迹约为空气绝缘柜 31%~35%，环保气体柜比 SF₆ 绝缘柜低 8%~12.5%，气体绝缘柜总重量约比空气绝缘柜低 24%~37%；而且还影响到主要元器件和配备的控制保护装置的选用，特别是 CT、防凝露加热器等，使空气绝缘柜的能耗和碳足迹大幅增加。

3)两公司产品比较还表明，A 公司产品重量和主要构成材料用量都高于 B 公司，特别是铜材用量高达 183%，说明为满足产品技术要求 A 公司产品使用了更多铜材，但没有取得更低能耗碳足迹，也说明 A 公司乃至国内 12 kV 开关柜产品设计的材料使用效率和使用效果仍需提升。

4)分析表明,产品设计基本决定原材料获取和产品使用阶段碳足迹,从而基本决定产品碳足迹,因而产品碳足迹也反映产品设计水平;因此产品设计不仅要重点降低这两个主要阶段碳足迹,还要平衡和优化好这两个主要阶段才能获得较低的产品碳足迹。

5)要实现通过产品碳足迹进行产品的比较、评价和选择,必须符合 GB/T 24067—2024 附录 B 要求,但不同公司、不同产品的 CFP 的背景信息并不一定统一,在无法全面比较 CFP 或难以确定是否符合比较要求时,可以采用原材料获取和产品使用这两个主要阶段碳足迹和主要构成材料的简化比较方法,或者建立相对统一的产品碳足迹比较评价模型,使需比较的产品 CFP 统一符合附录 B 的比较场景,就能更好评价和比较产品碳足迹和设计水平。

参考文献:

- [1] 上海平高天灵开关有限公司.KYN28A 开关柜产品碳足迹证书(2022 年度,证书编号:TILVA202416010002)[EB/OL].[2024-10-23].http://www.tilva.com.
Shanghai Pinggao Tianling Switchgear Co., Ltd. Product carbon footprint certification: Medium-voltage air-insulated switchgear KYN28A(2022, ID : TILVA202416010002)[EB/OL].[2024-10-23].http://www.tilva.com.
- [2] 上海平高天灵开关有限公司.N2X 充气柜产品碳足迹证书(2022 年度,证书编号:TILVA202416010003)[EB/OL].[2024-10-23].http://www.tilva.com.
Shanghai Pinggao Tianling Switchgear Co., Ltd. Product carbon footprint certification: Medium-voltage environment-friendly gas-insulated switchgear N2X(2022, ID : TILVA202416010003)[EB/OL].[2024-10-23].http://www.tilva.com.
- [3] 上海平高天灵开关有限公司.N2X 气体绝缘金属封闭开关设备 [EB/OL]. [2024-10-23].http :

- [//www.pinggao.com/html/pinggao/gb/cpgc/cpxl/pdwcy/20200426135620671910480.shtml](http://www.pinggao.com/html/pinggao/gb/cpgc/cpxl/pdwcy/20200426135620671910480.shtml).
Shanghai Pinggao Tianling Switchgear Co., Ltd. N2X metal enclosed gas-insulated switchgear[EB/OL].[2024-10-23].http :
[//www.pinggao.com/html/pinggao/gb/cpgc/cpxl/pdwcy/20200426135620671910480.shtml](http://www.pinggao.com/html/pinggao/gb/cpgc/cpxl/pdwcy/20200426135620671910480.shtml).
- [4] ABB Switzerland Ltd. Group Technology Management. Environmental product declaration: Medium-voltage air-insulated switchgear UniGear ZS1-12 kV, 1 250 A, 31.5 kA _EPD_CZ[EB/OL].[2024-10-23].https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VLG101073&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=C.
- [5] ABB Switzerland Ltd.ZX0 air gas-insulated switchgear [EB/OL].[2024-10-23].https://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/primegear-zx0.
- [6] ABB Switzerland Ltd.ZX0 gas-insulated switchgear[EB/OL].[2024-10-23].https :
[//new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/primegear-zx0](http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/primegear-zx0).
- [7] ABB Switzerland Ltd. PrimeGear ZX0 24.12.25[EB/OL].[2024-10-23].https :
[//search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3XAA014789&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A](http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3XAA014789&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A).
- [8] 中国城市温室气体工作组.中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)[M].北京:中国环境出版集团,2022.
Working Team on China City Greenhouse Gas. China products carbon footprint factors database(2022)[M]. Beijing, China Environment Press Group, 2022.
- [9] ABB Switzerland Ltd.VD4 vacuum circuit breakers p.210 family[EB/OL].[2024-10-23].https :
[//search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VCD601913R0001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A](http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VCD601913R0001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A).
- [10] ABB Switzerland Ltd.TPU 43.13[EB/OL].[2024-10-23].https :
[//search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID](http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID)

=1VCP001010&LanguageCode=en&DocumentPartId=
&Action=Launch&DocumentRevisionId=A.

Engineering , Jiangsu Society for Electrical
Engineering, 2009: 107-111.

[11] ABB Switzerland Ltd.TJC 4 Indoor voltage
transformers[EB/OL].[2024-10-23].https :
//search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID
=1VCP001009&LanguageCode=en&DocumentPartId=
&Action=Launch&DocumentRevisionId=A.

陈慎言(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事
气体绝缘中压开关设备研发工作 (E-mail :
13818984703@163.com)。

[12] 温升气体 产品碳足迹量化要求和指南: GB/T 24067
—2024[S].2024.

钱立骁(1972—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事
气体绝缘中压开关设备研发工作。

Greenhouse gases-carbon footprint of products-
requirements and guidelines for quantification(ISO
14067: 2018, MOD); GB/T 24067—2024[S].2024.

李宏伟(1970—), 男, 本科, 高级经济师, 主要从事
气体绝缘中压开关设备管理工作。

[13] 国家电网公司.12 kV 手车式开关柜标准化设计定制
方案(2020版)[Z]. 北京: 国家电网公司, 2020.

China State Grid Corporation.Standardization
specification for 12kV air-insulated withdrawable
switchgear(2020) [Z]. Beijing: China State Grid
Corporation, 2020.

[14] 严璋, 朱德恒.高电压绝缘技术[M]. 第三版.北京:
中国电力出版社, 2015.

YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation
technology[M]. 3rd ed.Beijing : China Electrical
Power Press, 2015.

[15] 兰剑, 冯英, 李向阳, 等. 干燥空气、N₂和SF₆
种气体绝缘环网柜温升性能的试验对比研究[J]. 高
压电器, 2019, 55(1): 64-71.

LAN Jian , FENG Ying , LI Xiangyang , et al.
Experimental comparative study of the temperature
rise performance of dry air, N₂ and SF₆ gas-insulated
RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1):
64-71.

[16] 陈慎言, 钱立骁.N2X-24 kV 环保型充气柜的研发
[C]//2008年20 kV电压供电专题研讨会会议论文集.
苏州, 中国: 中国电机工程学会, 江苏省电机工程
学会, 2009: 107-111.

CHEN Shenyao , QIAN Lixiao. Research and
development of 24 kV N2X green C-GIS[C]//Seminar
proceedings of 20 kV Power Supply in
2008.Suzhou, China: Chinese Society for Electrical