

## ±525 kV 直流海底电缆绝缘厚度设计与校核

康 鑫<sup>1,2</sup>, 赵远涛<sup>2</sup>, 夏 峰<sup>2</sup>, 阮 武<sup>2</sup>, 马修水<sup>3</sup>, 侯 帅<sup>4</sup>

(1. 浙江理工大学 信息科学与工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 宁波东方电缆股份有限公司, 浙江 宁波 315801; 3. 宁波理工学院 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315042; 4. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

**摘 要:** 本文以±525 kV 柔性直流输电工程中的直流海底电缆为研究对象, 开展了直流耐压试验、冲击耐压试验、梯度耐压试验, 分析了绝缘材料的击穿场强、老化寿命指数、Bahder 系数等关键参数, 设计并计算了不同耐压条件下±525 kV 直流电缆的绝缘厚度。基于直流电缆的电场分布和温度分布, 对绝缘设计厚度进行校核。结果表明: 直流电缆中电场分布的畸变程度主要由绝缘层温差决定, 绝缘层温差主要由电缆导体通过的电流大小决定。综合考虑研究结果以及电缆长期安全可靠, 建议±525 kV 直流电缆绝缘厚度设计按 28 mm 选取。

**关键词:** ±525 kV 直流海底电缆; 绝缘厚度; 电场分布; 温度分布

## Insulation thickness design and verification of ±525 kV DC submarine cable

KANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuantao<sup>2</sup>, XIA Feng<sup>2</sup>, RUAN Wu<sup>2</sup>, MA Xiushui<sup>3</sup>, HOU Shuai<sup>4</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;  
2. Ningbo Oriental Cable Co., Ltd., Ningbo 315801, China;  
3. School of Information Science and Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo 315042, China;  
4. Southern Power Grid Scientific Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Taking the DC submarine cable in ±525 kV DC transmission project as the research object, we conducted DC voltage withstand test, impact voltage withstand test, and gradient voltage withstand test. The breakdown strength, ageing life index, Bahder's coefficient and other key parameters of the insulation material were analyzed. The insulation thickness of the ±525 kV DC cable under different voltage withstand condition was designed and calculated. The insulation design thickness was calibrated on the basis of the electric field distribution and temperature distribution of DC cable. The results show that the distortion degree of electric field distribution in DC cables is mainly determined by the temperature difference of insulation layer, and the insulation temperature difference is mainly determined by the magnitude of current passing through the cable conductor. Taking into account the research results and the long-term safety and reliability of cable, it is recommended that the insulation thickness of ±525 kV DC cables is designed to be 28 mm.

**Key words:** ±525 kV DC submarine cable; insulation thickness; electric field distribution; temperature distribution

### 0 引言

海上风电具有发电效率高、不占用土地资源、适合大规模开发等优势, 但受地理条件的影响, 海上风电在技术上的要求更高<sup>[1]</sup>。柔性直流输电技术可以有效解决波动性高、稳定性差的新能源供电问题, 并减少系统占用空间, 增加系统传输能力, 非常适合深远海、大规模的海上风电场输电和并网<sup>[2-5]</sup>。

作为柔性直流输电系统中的关键设备, 交联聚乙烯 (cross-linked polyethylene, XLPE) 挤出绝缘高

压直流电缆在过去十年中得到了广泛应用<sup>[6-7]</sup>。近年来, 中国挤出绝缘高压直流电缆的设计、制造、试验和运行技术取得了跨越式发展, 已实现±160、±200、±320、±400 kV 直流电缆“四级跳”的技术突破, 该领域技术实力已跻身世界前列<sup>[8-9]</sup>, 并成功应用于南澳<sup>[10]</sup>、舟山<sup>[11]</sup>、厦门<sup>[12]</sup>的柔性直流输电工程中<sup>[13-14]</sup>。

海缆绝缘材料中的绝缘厚度与电缆的输电效率及安全性息息相关。直流海底电缆绝缘厚度的设计主要依据厚度设计公式计算, 同时需要根据海

底电缆制造企业采用的绝缘材料和生产工艺,结合实际项目需求,校验最大场强是否超过绝缘材料所允许的长期工作电场强度后,最终确定绝缘层厚度。但直流电缆在运行过程中易存在直流叠加冲击电压,以及型式试验时电缆承受电压超过额定电压的问题,若仅考虑长期运行条件,则不利于所设计出的海底电缆在极端工况下和型式试验中的运行。此外,设计直流海底电缆还需考虑最高运行温度以及绝缘层温差的限制,否则当绝缘层温差过大时,会导致绝缘层内出现场强反转的情况。

综合上述直流海底电缆需考虑的问题,本文提出±525 kV 直流海底电缆绝缘厚度的设计和校验方法,并根据海缆型式试验的标准与额定运行条件,分别计算±525 kV 直流海底电缆在直流叠加冲击电压、型式试验电压、额定电压条件下的电场分布,计算海底电缆在设计载流量、已知电缆导体温度、已知绝缘外屏蔽层温度条件下的温度分布,最终验证本文的海底电缆绝缘厚度设计方法在产品试验到运行工况等条件下的可行性。

## 1 绝缘厚度设计原理

直流电缆绝缘厚度设计考虑的基本参数有:①绝缘的直流耐受电压;②绝缘的暂态耐受电压;③绝缘外表面的最大温度;④导体线芯的可耐受最高温度<sup>[15-17]</sup>。一般地,通常由直流耐受电压和冲击耐受电压决定绝缘厚度,相应的绝缘厚度计算公式如式(1)~(2)所示<sup>[18]</sup>。

$$d_{dc} = \frac{U_{dc}}{E_{dc}} = \frac{U_0 k_1 k_2 k_3}{E_{dc}} \quad (1)$$

$$d_{imp} = \frac{U_{imp}}{E_{imp}} = \frac{(U_p M + U_0 K) k_1 k_2 k_3}{E_{imp}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $d_{dc}$ 、 $d_{imp}$ 分别表示直流耐受电压和冲击电压下的绝缘设计厚度; $U_{dc}$ 为直流耐受电压; $U_{imp}$ 为冲击电压; $U_0$ 为额定电压; $U_p$ 为避雷器残压; $E_{dc}$ 为最大直流设计场强; $E_{imp}$ 为最大允许冲击设计场强; $M$ 为避雷器安全水平; $K$ 为 Bahder 系数; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 分别表示电压系数(试验电压与额定电压之比)、老化系数( $k_2 = \sqrt{t_1/t_2}$ ,电缆设计寿命( $t_1$ )与试验时间之比( $t_2$ )与寿命指数( $n$ )的关系)、安全系数。

## 2 绝缘厚度分析与计算

由式(1)~(2)可知,±525 kV 直流电缆绝缘结构设计,需要确定绝缘材料的寿命指数  $n$  和 Bahder

系数  $K$ 。

### 2.1 寿命指数

本文采用阶梯升压法获取绝缘材料的寿命指数  $n$ 。考虑到该试验最大运行温度为 70℃,所以试验温度取 20、40、60℃,并设定以 10 kV 为起始电压,5 kV 为电压步长,升压速率为 1 kV/s。每个温度条件下均以 1、5、25 min 为时间步长,对 0.2 mm 绝缘试样进行测试,测得 20、40、60℃ 下的寿命指数分别为 13.0、13.6、14.0。现有研究表明直流电缆绝缘寿命指数在 13~20<sup>[19]</sup>,CIGRE TB 496 技术手册中推荐值为 10<sup>[20]</sup>。结合测试结果,本文取寿命指数  $n=13$ ,以此进行±525 kV 直流电缆的绝缘厚度设计。

### 2.2 Bahder 系数

Bahder 系数是直流电缆设计中的一个重要参数,可以有效地从宏观上估计空间电荷的影响,其定义式为式(3)。

$$K = (V_{imp} - V_r)/V_{dc} \quad (3)$$

式(3)中: $V_{imp}$ 表示击穿电压; $V_r$ 表示叠加反极性电压时的冲击击穿电压; $V_{dc}$ 表示直流击穿电压。

为获取绝缘材料的 Bahder 系数,在 70 kV/mm 直流预加电压下,对绝缘试样进行叠加冲击测试和直流耐压测试,并将试验结果代入式(3),得到 Bahder 系数约为 0.3。考虑实际电缆的直流电场分布范围以及绝缘厚度的增加,Bahder 系数应相应增大,因此取 Bahder 系数为 0.5 进行±525 kV 直流电缆的绝缘厚度设计。

## 3 厚度设计

### 3.1 直流耐受电压下的绝缘厚度设计

针对柔性直流输电工程中应用的挤出绝缘高压直流电缆,根据 CIGRE TB 496 中的要求进行型式试验时,需要满足两个直流耐压试验:①正、负试验电压 1.85 $U_0$  下 12 个 24 h 的负荷循环;②正电压 1.85 $U_0$  下 3 个 48 h 的负荷循环。为确定直流耐受电压下的电缆绝缘厚度,需要按照型式试验电压下 30 天以及额定运行电压下 40 年的要求分别进行计算,选择两者中较大值作为直流耐受电压下的绝缘厚度设计值。

(1)按照型式试验要求进行设计

型式试验中直流耐受电压可描述为式(4)。

$$U_{dc} = U_0 k_1 k_2 k_3 \quad (4)$$

式(4)中: $k_1$ 的取值为 1.85;根据 CIGRE TB 496 中型式试验 1.85 $U_0$ 、30 天的要求与测量击穿场强时

电压耐受时间为 0.5 h, 可得  $k_2 = \sqrt[n]{t_1/t_2} = \sqrt[13]{24 \times 30 \div 0.5} = 1.75$ ;  $k_3$  通常取 1.2。

上述各参数代入公式(4), 可得  $U_{dc} = U_0 k_1 k_2 k_3 = 525 \times 1.85 \times 1.75 \times 1.2 = 2039.625$  kV。

(2)按照长期运行要求进行设计

长期运行要求中的直流耐受电压( $U'_{dc}$ )沿用公式(4)形式进行计算, 电压系数  $k_1'$  取 1; 老化系数  $k_2'$  按照电缆设计寿命要求 40 年进行计算, 可得  $k_2' = \sqrt[n]{t_1/t_2} = \sqrt[13]{40 \times 365 \times 24 \div 0.5} = 2.82$

上述各参数代入公式(4), 可得  $U_{dc}' = U_0 k_1' k_2' k_3' = 525 \times 1 \times 2.82 \times 1.2 = 1776.6$  kV

### 3.2 冲击耐受电压下绝缘厚度设计

直流电缆中各种暂态内部过电压, 可能比实际线路中的雷电冲击电压还要高。针对各种形式的内部暂态过电压, 最高的操作冲击电压(同极性)为  $2.1U_0$ (即避雷器残压为  $2.1U_0$ ), 采用该值对直流冲击耐受电压的绝缘厚度进行设计。

直流电缆的冲击耐受电压( $U_{imp}$ )可描述为式(5)。

$$U_{imp} = (U_p M + U_0 K) k_1 k_2 k_3 \quad (5)$$

式(5)中:  $M$  取 1.15;  $K$  取 0.5;  $k_1$  取 1;  $k_2$  取 1;  $k_3$  取 1.2;

上述各参数代入公式(5), 可得  $U_{imp} = (525 \times 2.1 \times 1.15 + 525 \times 0.5) \times 1 \times 1 \times 1.2 = 1836.45$  kV

基于上述  $\pm 525$  kV 直流海缆需要满足的各类测试条件和厚度计算公式, 各要求下的直流电缆绝缘厚度设计公式如式(6)~(8)所示, 计算结果如表 1 所示。

(1)按型式试验要求进行厚度设计, 如式(6)所示。

$$d = \frac{U_{dc}}{E_{dc(70)}} = \frac{2039.625}{80} = 25.5 \text{ mm} \quad (6)$$

(2)按长期运行要求进行厚度设计, 如式(7)所示。

$$d = \frac{U_{dc}}{E_{dc(70)}} = \frac{1776.6}{80} = 22.21 \text{ mm} \quad (7)$$

(3)按冲击耐受水平进行厚度设计, 如式(8)所示。

$$d = \frac{U_{imp}}{E_{imp(70)}} = \frac{1836.45}{70} = 26.24 \text{ mm} \quad (8)$$

式(6)~(8)中,  $E_{dc(70)}$ 、 $E_{imp(70)}$  分别表示最大允许直流设计场强和最大允许冲击设计场强, 由绝缘材料的短时击穿测试与雷电冲击击穿测试获取。本文在绝缘厚度设计前, 对  $\pm 525$  kV 直流海缆的绝缘材

料进行预实验, 测得最大允许直流设计场强  $E_{dc(70)} = 80$  kV/mm, 最大允许冲击设计场强  $E_{imp(70)} = 70$  kV/mm。

表 1 各种工况下的承受电压以及设计绝缘厚度

Table 1 Withstand voltage and design insulation thickness under various working conditions

设计温度	设计电压	耐受电压 /kV	耐受场强 /(kV/mm)	所需绝缘厚度/mm
	直流电压(型式试验)	2 039.625	80	25.50
70℃	直流电压(长期运行)	1 776.6	80	22.21
	内部过电压	1 836.45	70	26.24

由表 1 可知, 选择最大的绝缘厚度计算值作为本工程  $\pm 525$  kV 单芯直流电缆的设计厚度, 即  $d = 26.24$  mm。考虑 10% 安全裕度, 电缆的绝缘厚度设计按 28 mm 选取。

## 4 $\pm 525$ kV 直流电缆绝缘厚度的设计校核

为验证  $\pm 525$  kV 直流电缆绝缘设计方法和绝缘设计厚度的合理性, 需对设计厚度下的直流电缆在不同工况下的电场分布、温度场分布进行计算, 以验证直流电缆绝缘中的最大电场强度是否处于安全范围。

### 4.1 高压直流电缆的电场分布

直流电缆在稳态下绝缘层的电场强度( $E(r)$ )如式(9)~(11)所示<sup>[21-22]</sup>。

$$E(r) = \frac{\delta U_0}{r_s^\delta - r_c^\delta} r^{\delta-1} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\beta + k}{\beta + 1} \quad (10)$$

$$k = \frac{\alpha(T_c - T_s)}{\ln r_s/r_c} \quad (11)$$

式(9)~(11)中:  $\alpha$  为温度系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\beta$  为场强系数, mm/kV;  $\lambda$  为绝缘层导热系数, W/(K·m);  $T_s$  为绝缘层外屏蔽处温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  为绝缘层内屏蔽处温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $r_c$ 、 $r_s$  分别为内外屏蔽层的半径, mm;  $r$  表示电缆横截面上绝缘层中某一点到电缆中心的半径, mm;  $\delta$  无实际含义, 用于简化公式。

#### 4.1.1 额定电压长期运行条件下的电场分布

根据式(9)计算绝缘厚度为 28 mm、导体温度为 70℃时,  $\pm 525$  kV 直流电缆电场分布随绝缘层温差( $T_1$ )的变化如图 1 所示。从图 1 可以发现在绝缘层温差达到 20℃后电场分布翻转, 若取式(9)中场强系数  $\beta = 1$ (电缆绝缘场强处处相等), 可计算出电缆

绝缘层内部场强均为 18.75 kV/mm, 此时电缆中内外屏蔽层绝缘层温差  $\Delta T = T_c - T_s = 14.9^\circ\text{C}$ 。由于内屏蔽层较薄, 温度对其影响较小,  $T_c$  等于导体温度。根据图 1 直流电缆绝缘电场分布反转特性可知, 当绝缘层温差小于  $14.9^\circ\text{C}$  时, 直流电缆绝缘中电场未发生反转, 最大电场位于导体侧, 当绝缘层温差大于  $14.9^\circ\text{C}$  时, 直流电缆绝缘中电场会发生反转, 最大场强位于绝缘屏蔽侧。

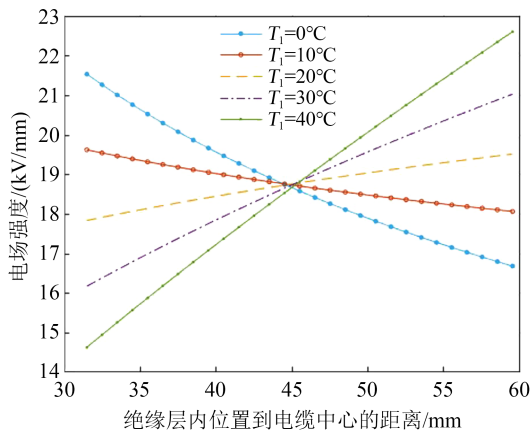


图 1 ±525 kV 直流电缆绝缘在不同温差下的电场分布  
Fig.1 Electric field distribution of 525kV DC cable under different temperature difference

当绝缘层温差为 0、10、20、30、 $40^\circ\text{C}$ , 绝缘厚度分别为 26、27、28 mm 时, 电缆内外屏蔽层最大电场强度的计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 绝缘厚度为 26、27、28 mm 时, 电场强度最大值均出现在绝缘层温差为  $40^\circ\text{C}$  的条件下, 分别为 24.44、23.46、22.54 kV/mm。上述值均远低于直流电缆绝缘材料的设计最大允许场强 (80 kV/mm), 因此仅考虑长期运行条件时, 3 种绝缘厚度设计均满足要求。

表 2 ±525 kV 直流电缆绝缘内外屏蔽层在不同绝缘层温差和绝缘厚度条件下的最大场强计算值

Table 2 The maximum calculation value of electric field strength of ±525 kV DC cable insulation inner and outer screens layer under different insulation temperature differences and insulation thicknesses

绝缘层温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	kV/mm				
	0	10	20	30	40
$d=26$ mm	23.00	20.98	21.12	22.75	24.44
$d=27$ mm	22.24	20.28	20.27	21.83	23.46
$d=28$ mm	21.53	19.63	19.49	20.99	22.54

#### 4.1.2 型式试验 1.85 倍额定电压条件下的电场分布

计算方法及设定条件参照本文 4.1.1 节, 仅将施加电压更改为 1.85 倍额定电压, 可计算型式试验时直流电缆绝缘中最大电场分布, 结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 在 1.85 倍额定电压下, 3 种绝缘厚度的 ±525 kV 直流电缆最大场强同样远小于设计最大允许电场强度 (80 kV/mm), 满足运行要求。

表 3 ±525 kV 直流电缆在 1.85 倍额定电压下的最大值场强计算值

Table 3 The maximum calculation value of electric field strength of ±525kV DC cable at 1.85 times rated voltage

绝缘层温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	kV/mm				
	0	10	20	30	40
$d=26$ mm	42.55	38.81	39.07	42.09	45.22
$d=27$ mm	41.14	37.52	37.51	40.39	43.40
$d=28$ mm	39.82	36.32	36.05	38.82	41.71

#### 4.1.3 直流叠加冲击电压下的电场分布

运行中的高压直流电缆除了承受直流电压外, 还可能承受暂态过电压, 如电缆系统关断时的操作过电压或电缆-架空混合线路上的雷电过电压。当直流电压叠加冲击脉冲过电压时, 电缆绝缘中电场分布既不同于交流电缆, 又不同于直流电缆, 而是两者的结合, 如式 (12) 所示。

$$E = E_{dc} + E_{ac} = E_{dc} + \frac{U_p - U_{dc}}{r \ln(r_o/r_i)} \quad (12)$$

式 (12) 中:  $E_{dc}$  为直流工作电压下的稳态电场强度;  $E_{ac}$  为叠加冲击脉冲下的暂态电场强度;  $U_{dc}$  为直流电缆运行电压;  $U_p$  为叠加冲击电压后电缆绝缘上的电压;  $r_o$ 、 $r_i$  分别表示绝缘层外径和内径。

本工程要求叠加同极性操作过电压  $2.1U_0$ , 叠加异极性操作过电压为  $1.2U_0$ , 叠加异极性雷电冲击电压为  $2.1U_0$ 。因此, 对设计绝缘厚度分别为 26、27、28 mm 的电缆在直流叠加同极性及其极性 ( $\pm 2.1U_0$ ) 情况下的电场进行校核计算, 结果如表 4 所示。绝缘厚度为 28 mm 时, 电场分布随叠加电压变化规律如图 2 所示。

从表 4 计算结果和图 2 中电场变化规律可以发现, 直流叠加冲击电压时电缆最大场强均发生在直流电压叠加异极性电压的情况下, 且随着绝缘层温差的增大而增大。当绝缘厚度为 26 mm 时, 直流叠加异极性冲击电压时的最大场强高于该直流电缆绝缘材料设计允许的最大冲击场强 (70 kV/mm)。

当绝缘厚度分别为27 mm、28 mm时则满足设计要求,但安全裕度较小。

表4 不同绝缘厚度和绝缘层温差下直流叠加冲击电压时的最大场强

Table 4 Maximum electric field strength under DC superomposed impulse voltage with different insulation thicknesses and insulation layer temperature difference

		kV/mm				
绝缘厚度/mm	绝缘层温差/ $\Delta T/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40
d=26	直流叠加同极性冲击电压	53.51	51.49	49.61	47.85	46.21
	直流叠加异极性冲击电压	63.03	65.05	66.94	68.70	70.33
d=27	直流叠加同极性冲击电压	51.90	49.94	48.11	46.42	44.84
	直流叠加异极性冲击电压	61.41	63.36	65.19	66.89	68.47
d=28	直流叠加同极性冲击电压	50.40	48.51	46.74	45.09	43.56
	直流叠加异极性冲击电压	59.89	61.78	63.55	65.20	66.73

### 4.2 高压直流电缆的温度场分布

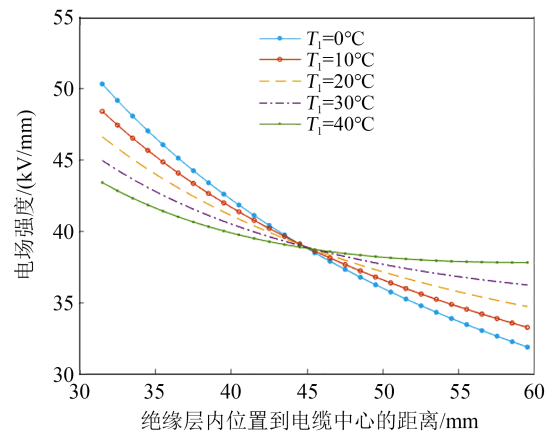
若电缆的线芯电流为 $I_c$ ,单位长度电阻为 $R$ ,那么线芯的焦耳热损耗功率为 $W_c = I_c^2 R$ 。当边界条件为绝缘层外屏蔽层的温度 $T_{|r=r_s} = T_s$ 和绝缘层内屏蔽层的温度梯度 $\frac{dT}{dr}|_{r=r_c} = -\frac{W_c}{2\pi r_c \lambda}$ 时,可得电缆绝缘层中任意半径为 $r$ 时的温度 $(T(r))$ 分布如式(13)所示<sup>[23-25]</sup>。

$$T(r) = T_s + \frac{W_c}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_s}{r} \quad (13)$$

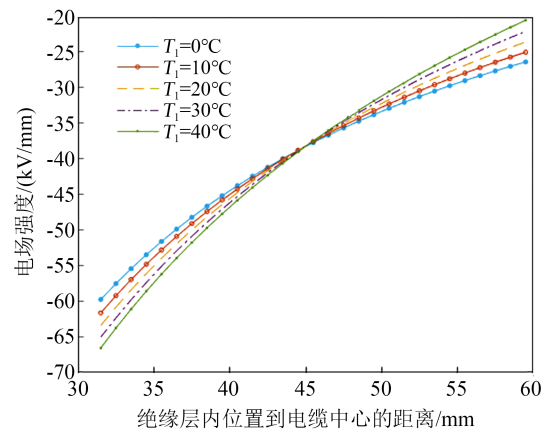
式(13)中: $\lambda$ 为绝缘层导热系数, $W/(\text{K}\cdot\text{m})$ ;  $r$ 为绝缘层中某点到电缆中心的半径, $\text{mm}$ ;  $T_s$ 为绝缘层外屏蔽处温度, $^\circ\text{C}$ 。

#### 4.2.1 设计载流量下 $\pm 525$ kV 直流电缆的温度场分布

工程载流量计算报告要求电缆设计载流量为2 300 A。假设导体温度为 $70^\circ\text{C}$ (即 $T_c=70^\circ\text{C}$ ),设计绝缘厚度为26、27、28 mm的直流电缆绝缘层温差如表5所示。从表5可以看出,3种绝缘厚度下,绝缘层温差基本相近,约为 $15^\circ\text{C}$ 。以绝缘厚度等于28 mm为例,当导体电流约为2 300 A时,绝缘层温差为 $15.43^\circ\text{C}$ ,根据本文4.1.1中绝缘层温差对电场强度分布规律,基本可认为在该情况下直流电缆绝缘中电场处处相同。



(a) 同极性



(b) 异极性

图2 不同绝缘层温差下直流电压叠加冲击电压时的电场分布

Fig.2 electric field distribution under DC superomposed impulse voltage with different insulation layer temperature difference

表5 设计载流量下 $\pm 525$  kV 直流电缆的温度分布

Table 5 Temperature distribution of  $\pm 525$  kV DC cable under designed current carrying capacity

绝缘设计厚度/mm	绝缘外屏蔽层温度/ $^\circ\text{C}$	绝缘层温差/ $^\circ\text{C}$
d=26	55.40	14.60
d=27	54.98	15.02
d=28	54.57	15.43

#### 4.2.2 已知电缆导体温度下 $\pm 525$ kV 直流电缆的温度场分布

为了解不同设计厚度下直流电缆的通流能力,有必要对不同导体施加电流下的绝缘层温差进行分析计算。假设电缆导体温度为 $70^\circ\text{C}$ (即 $T_c=70^\circ\text{C}$ )。在此条件下,分别计算绝缘厚度为26、27、28 mm及施加电流为0、1 000、2 000、3 000、4 000 A下的 $\pm 525$  kV 直流电缆的绝缘层温差分布,结果如

图3所示,具体数值如表6所示。图4为绝缘设计厚度为28 mm在不同施加电流下的绝缘层内的温度分布曲线。

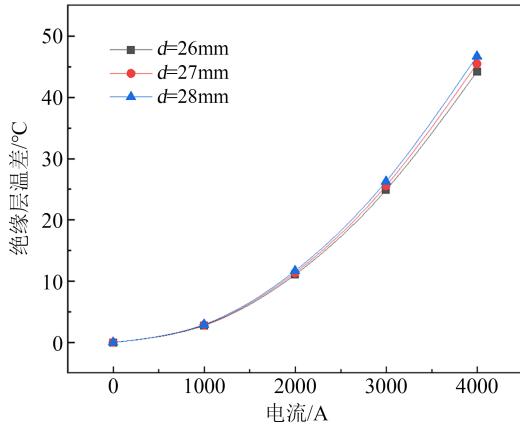


图3 ±525 kV 直流电缆在不同施加电流下的绝缘层温差  
Fig.3 Insulation layer temperature difference of ±525 kV DC cable under different applied current

表6 ±525 kV 直流电缆在不同施加电流下的绝缘层温差  
Table 6 Insulation layer temperature difference of ±525 kV DC cable under different applied current

施加电流/A	1 000	2 000	3 000	4 000
d=26 mm	2.76	11.04	24.84	44.15
d=27 mm	2.84	11.35	25.55	45.42
d=28 mm	2.92	11.67	26.25	46.66

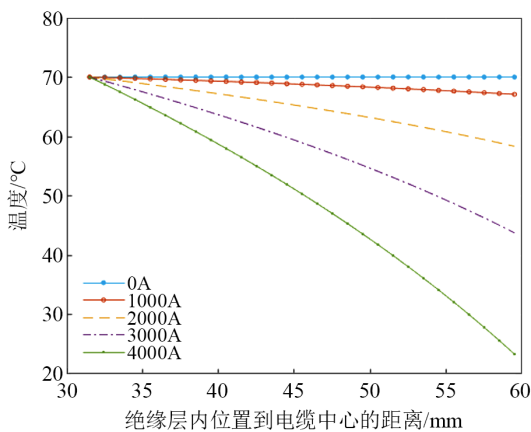


图4 ±525 kV 直流电缆在不同施加电流下的绝缘层内温度分布

Fig.4 Temperature distribution inside the insulation layer of ±525 kV DC cable under different applied current

从表6和图4可以看出,当3种设计厚度的电缆通入相同电流,绝缘层温差互相间不超过1.5°C,可见直流电缆绝缘层温差受绝缘厚度影响较小,受施加电流影响较大。此外,随着线芯导体中施加的电

流增加,绝缘层温差也显著增加,当设计绝缘厚度为28 mm,直流电缆导体电流从1 000 A增加至4 000 A时,绝缘层温差从2.92°C上升到了46.66°C。

#### 4.2.3 已知电缆绝缘外屏蔽层温度下±525 kV 直流电缆的温度场分布

实际工况中通常由于电缆敷设环境或敷设方式的不同,导致绝缘外屏蔽层温度差异较大,进而影响导体线芯温度。因此有必要研究绝缘外屏蔽处温度带来的影响。假设电缆绝缘外屏蔽层温度为10、20、30、40°C,在4种条件下,分别计算设计绝缘厚度为26、27、28 mm的直流电缆在不同导体电流(1 000、2 000、3 000、4 000 A)下的绝缘层温差,其中外屏蔽层温度为40°C时的计算结果如表7所示。

表7 ±525 kV 直流电缆在不同施加电流下的绝缘层温差  
Table 7 Insulation layer temperature difference of ±525 kV DC cable under different applied current

施加电流/A	1 000	2 000	3 000	4 000
d=26 mm	2.49	10.04	23.21	43.17
d=27 mm	2.56	10.33	23.90	44.51
d=28 mm	2.63	10.62	24.58	45.83

从表7可知,绝缘屏蔽层的温度除了与施加电流相关外,也与电缆绝缘屏蔽层外部结构、电缆敷设方式、环境温度等有密切关系。当电流为3 000 A时,直流电缆在不同绝缘外屏蔽层温度下(可等效不同环境或敷设方式)的绝缘层温差,如图5所示。从图5可知,不同绝缘厚度下的绝缘屏蔽层温度从

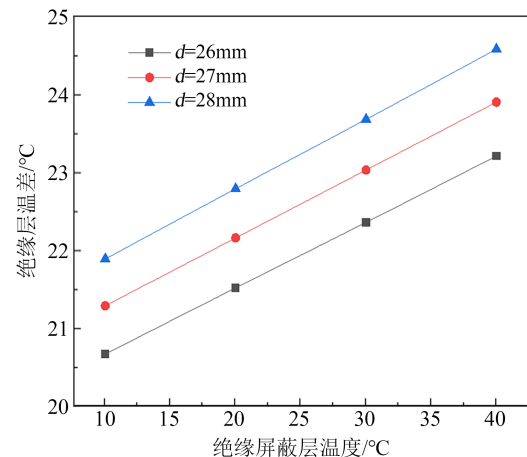


图5 ±525 kV 直流电缆绝缘层温差与绝缘屏蔽层温度的关系

Fig.5 Relationship between insulation layer temperature difference and insulation screen layer temperature for ±525 kV DC cable

10℃增至40℃时,绝缘层温差增大约2.6℃,结合表7相比导体电流从1 000 A增至4 000 A时,绝缘层温差增大了约40℃,因此,绝缘层温差主要由电缆导体电流决定。同时,高压直流电缆中电场畸变程度与绝缘层温差相关,推断认为直流电缆电场分布主要由通过导体的电流决定。

## 5 结论

(1)在直流电缆绝缘厚度设计中,综合考虑了电缆不同运行工况、材料老化特性及空间电荷对电缆的影响,选取老化系数 $n=13$ ,Bahder系数 $k=0.5$ 作为重要设计参数。通过考虑电缆的最大直流耐受电压和暂态耐受电压、导体线芯的可耐受最高温度(70℃)和最大绝缘层温差(40℃)、40年使用寿命的要求,得到电缆设计绝缘厚度不应小于26.24 mm。考虑安全裕度,建议设计厚度为28 mm。

(2)当绝缘层温差大于14.9℃时,直流电缆绝缘中电场会发生反转,最大场强位于绝缘屏蔽侧;不同绝缘厚度下电场最大值均发生于绝缘层温差为40℃的条件下;直流叠加冲击电压时电缆最大场强均发生在直流电压叠加异极性电压的情况下,且随着绝缘层温差的增大而增大,绝缘厚度分别为27 mm、28 mm时满足设计要求。

(3)在电缆导体载流量相同的情况下,三种厚度绝缘层对应的外屏蔽层温度差距很小;当绝缘层厚度一定,绝缘层温差随着载流量的增加而显著增加,绝缘层温差主要由电缆导体电流(载流量)决定。

## 参考文献 References

- [1] 孙艳霞,方是文,李震.海上风电经交流电缆汇集送出系统暂态无功电压建模及特性分析[J].中国电力,2022,55(4):166-174.  
SUN Y X, FANG S W, LI Z. Transient voltage-reactive power modeling of offshore wind power collection and transmission system with ac cables and characteristic analysis[J]. Electric Power,2022,55(4):166-174.
- [2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D, et al. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(3):592-602.
- [3] WANG T, XIANG W M, LIU Y W. Switching stabilising control of VSC-HVDC transmission systems[J]. IET Control Theory & Applications,2020,14(16):2280-2290.
- [4] 乐波,梅念,刘思源,等.柔性直流输电技术综述[J].中国电机(技术版),2014,4(5):43-47.  
YUE B, MEI N, LIU S Y, et al. Overview of HVDC flexible[J]. China Electric Power(Technology Edition),2014,4(5):43-47.
- [5] 马人凤,朱永华,吴建东,等.超高压直流电缆的国产化研究进展[J].绝缘材料,2016,49(11):1-8.  
MA R F, ZHU Y H, WU J D, et al. Localization research progress of ultra-high voltage direct current cable[J]. Insulating Materials,2016,49(11):1-8.
- [6] 张洪亮,肖晋宇,侯金鸣,等.提高XLPE高压直流海缆经济性的研究展望[J].绝缘材料,2021,54(3):1-9.  
ZHANG H L, XIAO J Y, HOU J M, et al. Research prospect on improving economy of XLPE HVDC submarine cable[J]. Insulating Materials,2021,54(3):1-9.
- [7] 肖世杰,胡列翔,周自强,等.交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J].绝缘材料,2018,51(1):1-9.  
XIAO S J, HU L X, ZHOU Z Q, et al. Applications and test monitoring technology of cross-linked polyethylene insulated submarine cable[J]. Insulating Materials,2018,51(1):1-9.
- [8] 安婷,ANDERSEN B, MACLEOD N,等.中欧高压直流电网技术论坛综述[J].电网技术,2017,41(8):2407-2416.  
AN T, ANDERSEN B, MACLEOD N, et al. Overview of sino-european hvdc grid technical forum[J]. Power System Technology, 2017,41(8):2407-2416.
- [9] 李兴源,曾琦,王渝红,等.柔性直流输电系统控制研究综述[J].高电压技术,2016,42(10):3025-3037.  
LI X Y, ZENG Q, WANG Y H, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering,2016,42(10):3025-3037.
- [10] 赵林杰,赵晓斌,厉天威,等.多端柔性直流输电系统中±160 kV XLPE绝缘电缆系统设计与选型[J].高电压技术,2014,40(9):2635-2643.  
ZHAO L J, ZHAO X B, LI T W, et al. Design and selection of ±160 kV XLPE insulated cable system for multi-terminal VSC HVDC power transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014,40(9):2635-2643.
- [11] 李炼炼,蔡炜,杨黎明,等.舟山柔性直流输电工程的直流电缆操作过电压计算与分析[J].高电压技术,2017,43(11):3645-3652.  
LI L L, CAI W, YANG L M, et al. Switching overvoltage calculation and analysis of DC cables for Zhoushan flexible DC transmission project[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3645-3652.
- [12] 赵洋,魏思芸,马宪伟,等.±320 kV直流电缆终端界面气隙缺陷的直流局放试验电压确定方法[J].绝缘材料,2023,56(3):61-69.  
ZHAO Y, WEI S Y, MA X W, et al. Determination method of DC partial discharge test voltage for air gap defects at interface of ±320 kV DC cable termination[J]. Insulating Materials,2023, 56(3):61-69.
- [13] 钟力生,任海洋,曹亮,等.挤包绝缘高压直流电缆的发展[J].高电压技术,2017,43(11):3473-3489.  
ZHONG L S, REN H Y, CAO L. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017,43(11):3473-3489.
- [14] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等.中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从160 kV到200 kV再到320 kV[J].南方电网

- 技术,2015,9(10):5-12.
- XIE S H, FU M L, YIN Y, et al. Triple jumps of XLPE insulated HVDC cable development in China: from 160 kV to 200 kV and then to 320 kV[J]. Southern Power System Technology,2015,9(10):5-12.
- [15] 王泽瑞,赵学童,赵远涛,等. 66 kV 交联聚乙烯海底电缆绝缘厚度设计[J]. 高电压技术,2023,49(6):2634-2643.
- WANG Z R, ZHAO X T, ZHAO Y T, et al. Insulation thickness design of 66 kV XLPE submarine cable[J]. High Voltage Engineering,2023,49(6):2634-2643.
- [16] 李栋,朱智恩,杨黎明,等.  $\pm 535$  kV 直流电缆绝缘厚度理论与验证[J]. 电力工程技术,2020,39(1):151-156.
- LI D, ZHU Z E, YANG L M, et al. Theoretical design and verification of  $\pm 535$  kV DC cable insulation thickness[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(1):151-156.
- [17] 李栋,王宇,朱智恩,等.  $\pm 400$  kV 高压直流电缆绝缘厚度设计与验证[J]. 绝缘材料,2021,54(6):91-95.
- LI D, WANG Y, ZHU Z E, et al. Thickness design and verification for  $\pm 400$  kV HVDC cable insulation[J]. Insulating Materials,2021,54(6):91-95.
- [18] 王春江. 电线电缆手册:第1册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- WANG C J. Wire and cable handbook: volume 1[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2001.
- [19] 刘霞,于钦学,钟力生,等. 高压 XLPE 电缆绝缘  $V-t$  特性研究综述[J]. 南方电网技术,2015,9(10):57-63.
- LIU X, YU Q X, ZHONG L S, et al. Review on research of  $V-t$  characteristics of HV XLPE cables[J]. Southern Power System Technology,2015,9(10):57-63.
- [20] SANDEN B. Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV [M]. Berlin:Springer International Publishing,2023.
- [21] BOGGS S, DAMON D H, HJERRILD J. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(4):456-461.
- [22] 何淼,CHEN G. 描述高压直流电缆绝缘材料电导率的公式比较[J]. 南方电网技术,2016,10(4):78-84.
- HE M, CHEN G. Comparison between electrical conductivity equations in describing HVDC cable insulating materials[J]. Southern Power System Technology,2016,10(4):78-84.
- [23] 李昭红,阳林,田野,等. 高压直流电缆接头稳态温度场分布及其影响因素[J]. 中国电力,2016,49(2):48-53.
- LI Z H, YANG L, TIAN Y, et al. Steady-state temperature field of HVDC cable joint and its influencing factors[J]. Electric Power,2016,49(2):48-53.
- [24] 魏艳慧,郑元浩,龙海泳,等. 绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J]. 电工技术学报,2022,37(15):3932-3940.
- WEI Y H, ZHENG Y H, LONG H Y, et al. Influence of insulation layer thickness on electric field and temperature field of HVDC cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(15):3932-3940.
- [25] 吴晶晶,陈丽安,严有祥,等.  $\pm 500$  kV 高压直流 XLPE 电缆温度分布及其影响因素研究[J]. 高压电器,2021,59(2):113-119.
- WU J J, CHEN L A, YAN Y X, et al. Study on temperature distribution of  $\pm 500$  kV HVDC XLPE cable and its influencing factors [J]. High Voltage Apparatus,2021,59(2):113-119.

收稿日期:2023-08-25;修回日期:2023-11-29。

作者简介:

康鑫(1999-),男(汉族),四川成都人,工程师,主要从事海底电缆设计寿命的研究。