

第二章 電纜與電纜終端構造

電纜為輸配電系統中的重要元件，負責銜接變壓器、斷路器等電力設備，並負責傳輸電力。電纜的主體包括電纜本體以及電纜終端接頭（Termination）或直線接頭（Straight Joint）及肘型端頭（Elbow Connector）等。本章概述其構造及功能。

2.1 電力電纜架構

電力電纜依據其特性以及應用的環境而有以下分類：

1. 依電纜額定電壓（Voltage Rating），分為低壓、中壓、高壓及特高壓等電纜。
2. 依電纜芯數分為單芯、雙芯、三芯等。
3. 依絕緣層種類分為交連 PE、PVC、EPR、油浸紙（Oil-paper）等絕緣電纜。
4. 依充油電纜（Oil Filled Cable）之充油型式分為封裝型（Self-Contained, OF）及管式（Pipe-Type, POF）電纜。
5. 依電纜是否有金屬遮蔽分為遮蔽式（Shielded）與非遮蔽式（Non-shielded）電纜。

交連聚乙烯（Cross-Linked Polyethylene, 交連 PE）電纜具高絕緣阻抗、低介電常數等良好的電氣特性以及化學、溫度和機械方面的優良特性，目前廣泛應用於現場。

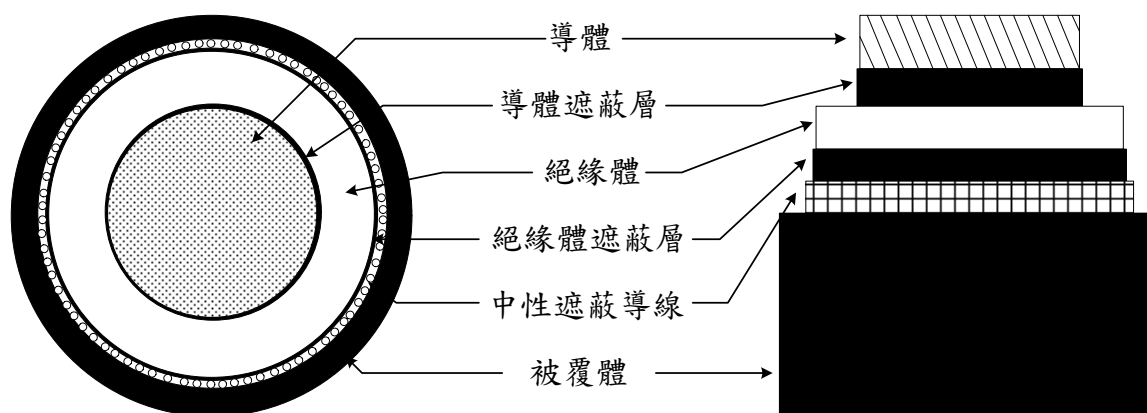


圖 2.1-1 電纜剖片與側面之構造

圖 2.1-1 係以單芯交連聚乙烯為例，說明電力電纜的結構。根據電纜的裝設位置與需求，電纜的構造略有不同，例如裝設於高溼度地區的電纜，通常會額外添加防水層，海底電纜皆加鎧甲層用來增加電纜的抗衝擊能力等。各層的材料及厚度會根據電壓等級以及裝設地點而改變。以下逐層說明其特性與功能，各層厚度係參考[3]有關 15/25kV 高壓單芯交連 PE 電纜之相關規範。

(1) 導體 (Conductors)

導體的材質多半為高純度的低電阻物質，具備抗張力強、耐侵蝕性強、材質均勻、彎曲性良好、質輕、價廉且穩定性良好等特性。表2.1-1為常見之低電阻值金屬。

表2.1-1 常見的低電阻金屬於20°C時之電阻值[2]

金屬	電阻率 ρ ($\mu \Omega\text{-cm}$)
銀	1.629
軟銅	1.793
鋁	2.83
鈉	4.68
鎳	7.8
鋼	10.2
鉛	21.5

(2) 導體遮蔽層 (Conductor Shielding)

此層位於導體與絕緣體間，或稱內半導體層，厚度規範如表2.2-2。根據[3]所述規範，額定電壓高於2kV的電纜，導體與絕緣層間須有押出型 (Extruded) 或帶紮型半導體層 (即內半導體層)。押出型半導體層須與絕緣層完全緊密貼合並確定兩層間無氣隙存在，且耐溫須高於絕緣層。

表2.1-2 導體遮蔽層厚度規範[3]

導體尺寸 (AWG或MCM)	導體遮蔽層厚度mils (mm)
	最小點
8-4/0	12(0.30)
250-500	16(0.41)
600-1000	20(0.51)

(3) 絕緣體 (Insulation)

中壓電纜絕緣層材質多為交連聚乙烯，係將電纜的電應力分佈於此，故為多數的絕緣劣化處，包括水樹及電樹等，該層厚度規範如表2.1-3。正常使用時，溫度可達90° C，緊急情況下可達130° C，但在12個月內不可以超過3次。短路時導體最高溫度可達250° C。

表2.1-3 絕緣體厚度規範[3]

電纜額定電壓	絕緣體厚度 mils (mm)	
	最小厚度	最小平均厚度
15kV	157.5(4.01)	175(4.45)
25kV	234(5.94)	260(6.60)

(4) 絕緣體遮蔽層 (Insulation Shielding)

此層位於絕緣體上方，或稱為外半導體層，為一層押出型 (Extruded) 的熱固性 (Thermosetting) 之黑色半導體層，厚度規範如表2.1-4。在平滑度方面，由於該層貼近中性遮蔽導線，因此可能會隨著中性遮蔽導線上的凹陷處而凹陷；另一種凹陷則為製造或品管不佳引起的凹陷。兩類凹陷分別有其規範。

表2.1-4 絕緣體遮蔽層厚度規範[3]

經計算之最小絕緣體外徑 吋 (mm)	絕緣體遮蔽層厚度mils (mm)		
	最小點	最大點	最大凹陷深度
0-1.000(0-25.4)	30(0.76)	60(1.52)	15(0.38)
1.001-1.500(25.5-38.1)	40(1.02)	75(1.91)	15(0.38)
1.501-2.000(38.2-50.8)	55(1.40)	90(2.29)	20(0.51)
2.001以上(50.8)	55(1.40)	105(2.67)	20(0.51)

(5) 中性遮蔽導線 (Concentric Shielding Copper Wire)

中性遮蔽導線位於外半導電層外，為一層鍍錫軟銅線 (Coated Copper Concentric Conductor)，以往以鉛作為材質，由於鉛膨脹係數與其他電纜材質不同，受熱後材質膨脹不均而產生空隙，目前電纜已不使用鉛為材料。主要功能係作為外半導電層的接地或作為系統中性點。如此，介質內的電位梯度成同心圓狀均勻分佈於絕緣層；若無此遮蔽層則電場分佈會如圖2.1-2，圖2.1-2的電場過度集中於電纜與地之間的電纜絕緣介質，加速絕緣之老劣化。

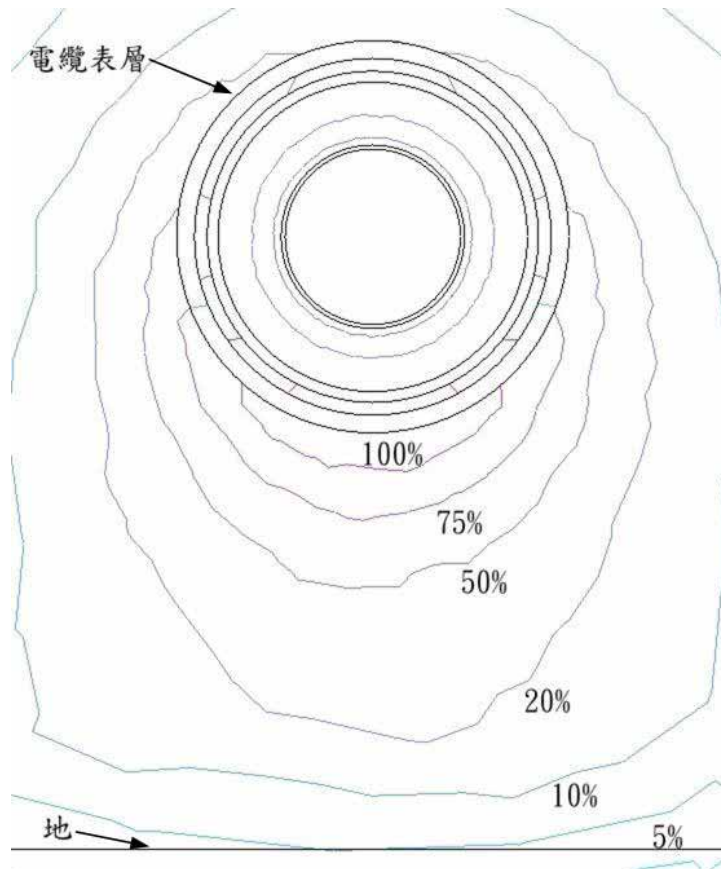


圖2.1-2 若電纜未設中性遮蔽導線的電位線分佈不均狀況

表2.1-5 中性遮蔽導線構成規定[3]

電纜線徑 (AWG 或 MCM)	中性遮蔽導線直徑 (mm)	數目
#2	1.29	16
#1	1.29	18
1/0	1.29	21
2/0	1.45	21
3/0	1.45	26
4/0	1.63	26
250	1.29	18
350	1.45	19
500	1.45	27
750	2.05	20
1000	2.05	26

(6) 被覆體 (Jacket)

位於導線的最外層，用於保護電纜，原料為尼龍材料或PVC (Polyvinyl Chloride)，必須完全填滿中性遮蔽導線之空隙。

表2.1-6 25kV 單芯交連PE電纜構造尺寸表(待續)[3]

線 徑 (AWG 或 MCM)	截面 積 (mm ²)	股 數	絞線 外徑 (mm)	導線 重量 (kg/km)	PVC 被覆層 平均厚 度 (mm)	絕緣體 外徑 (mm)	外半導 體 外徑 (mm)	直流電阻 Ω/km at 25°C (容許誤差 為+2%)	標 準 長 度 (m)
1	42.41	19	8.18	385	2.03	22.86±0.76	24.89± 1.27	0.423	600
1/0	53.49	19	9.19	485	2.03	23.87±0.76	25.91± 1.27	0.335	600
2/0	67.43	19	10.29	611	2.03	25.01±0.76	27.05± 1.27	0.266	600

表2.1-6 25kV 單芯交連PE電纜構造尺寸表(續) [3]

線 徑 (AWG 或 MCM)	截面 積 (mm ²)	股 數	絞線 外徑 (mm)	導線 重量 (kg/km)	PVC 被覆層 平均厚 度 (mm)	絕緣體 外徑 (mm)	外半導 體 外徑 (mm)	直流電阻 $\Omega/\text{km at}$ 25°C (容許誤差 為+2%)	標 準 長 度 (m)
4/0	107.2	19	13.00	972	2.03	27.68±0.76	30.23± 1.27	0.16	600
250	127	37	14.17	1150	2.03	29.46±0.76	32.00± 1.27	0.141	600
350	177	37	16.76	1610	2.03	32.00±0.76	34.54± 1.27	0.101	600
500	253	37	20.04	2300	2.03	35.31±0.76	37.85± 1.27	0.0708	600
750	380	61	24.59	3450	2.79	40.13±0.76	43.18± 1.27	0.0472	600
1000	507	61	28.37	4590	2.79	43.81±0.76	46.86± 1.27	0.0354	600

2.2 交流電纜輸電之特性

交流輸電與直流輸電相比，缺點在於：輸電時產生感抗及容抗且電磁場變化產生集膚效應 (Skin Effect) 和鄰近效應 (Proximity effect) 等，以下針對後兩項效應說明之。

(1) 集膚效應 (Skin Effect)

當導體內的交流電流通過時，導體會產生自感電動勢來抵抗，此電動勢大小與導體單位時間內之磁通量呈正比。以圓形導體為例愈靠近導體中心其自感電動勢愈大，因此靠近導體表面的電流密度比導體中心大，因而電流流經之有效面積變小，電阻值相對增高。

假設導體為無限深之平面，則電流密度 J 隨著深度 δ 成指數性降低[2]

$$J=J_s e^{-\delta/d} \quad (2.2-1)$$

其中， d 為表面深度 (Skin Depth)。茲將平板表面的電流密度 J_s 定義為 1.0 然後垂直往下直至電流密度衰退到表面電流密度的 $1.0/e$ (約 0.368) 倍的深度定義為 d 。其值可由下式計算之：

$$d = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu}} \quad (2.2-1)$$

其中， σ 為導體的導電率 (Conductivity, sigma/m)、 ω 為角頻率 (Angular Frequency, rad/sec)、 μ 為導磁率 (H/m)。

圖 2.2-1 為模擬 60Hz 情形下無限長圓形銅導體的等電流密度分佈線圖。圖 2.2-2 則為由導體中心至表面之電流密度分佈狀況，由兩圖可知：整個導體的電流量幾乎集中於導體表層，而此電流量亦隨頻率增加而更為集中。

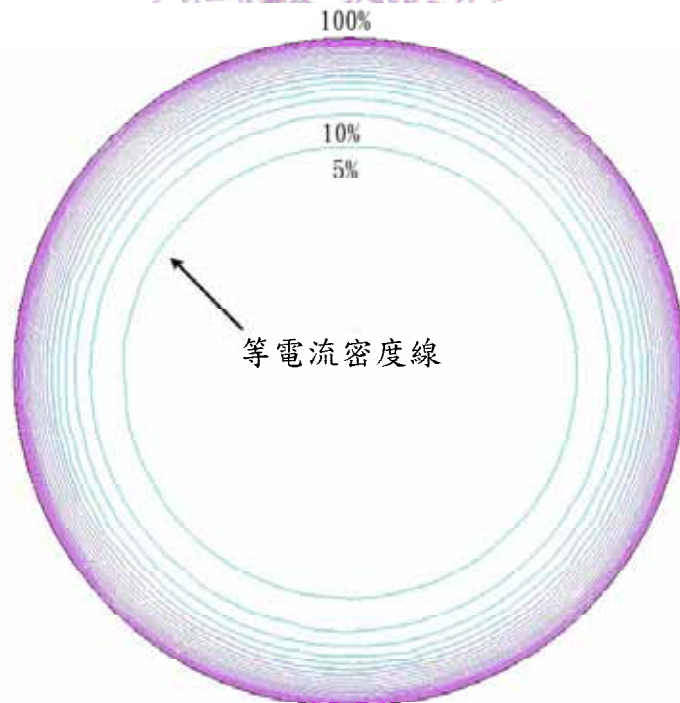


圖 2.2-1 交流電導體內的等電流密度線

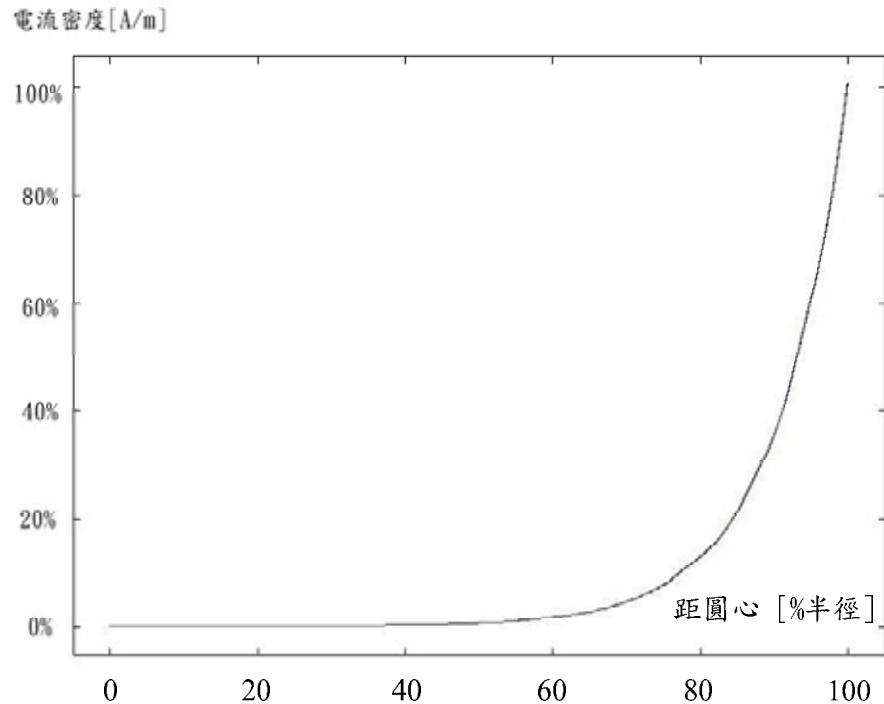


圖 2.2-2 交流電導體內電流密度與位置關係圖

(2) 鄰近效應 (Proximity effect)

兩個以上的載流導體過於靠近時，會造成交流磁場之間相互影響而致導體的電流密度分佈不均，由於此效應常與集膚效應同時發生，會使導體的有效面積變得更小，電阻值增高，導線的交流電阻可達到直流電阻的十數倍。

2.3 電纜的直線接頭與終端

電纜在連接到電力設備時，須剝除外半導電層、中性遮蔽線及被覆層以便安裝接續頭，此動作導致電應力或電位梯度集中於剝除處，而終端接頭，就是用來抑低該處之電場大小與電位梯度。而直線接頭則是為接續兩條電纜之用，亦可抑低在接續處的電場大小及電位梯度。

2.3.1 電纜終端架構

電纜在剝除外半導電層、中性遮蔽層及被覆層時，由於電位梯度集中於絕緣層與外半導電層的剝除終端附近，如圖2.3-1，可以明顯察覺電位梯度過度集中於外半導電層的剝除終端，此現象會造成該處電場值偏高，若未適當處理，會使絕緣層及外半導電層老劣化，也會讓周遭空氣電離，嚴重時會放電損害附近的電纜

絕緣。為此，在電纜裝設時，會針對此處進行施工，以控制電場並防止水氣入侵。圖2.3-2為裝設預張式（或稱冷縮式）套管之電纜終端施工完成後的電位線，與施工前相比，電位線過度集中之狀況已予改善；至於電應力的控制，是以一層高介電係數的應力錐來降低電位梯度，此法係利用材料的電氣特性來紓緩電應力，常見於冷縮式電纜終端，此外也有利用電纜終端的形狀來紓緩電應力，常見於預鑄式及滑入式電纜終端。

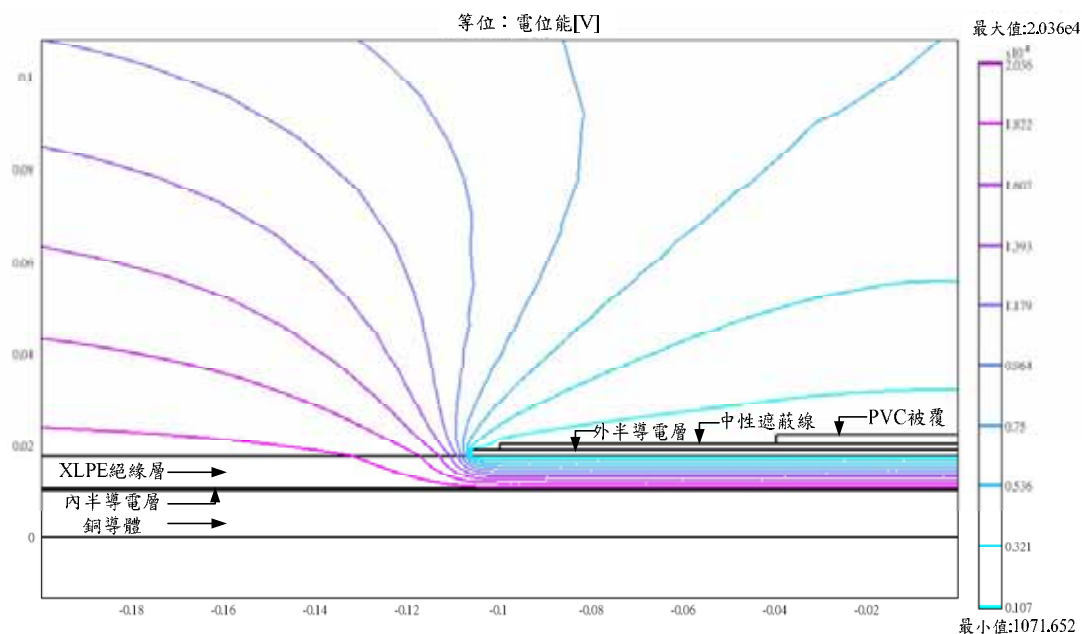


圖2.3-1 未處理之電纜終端的電位分佈

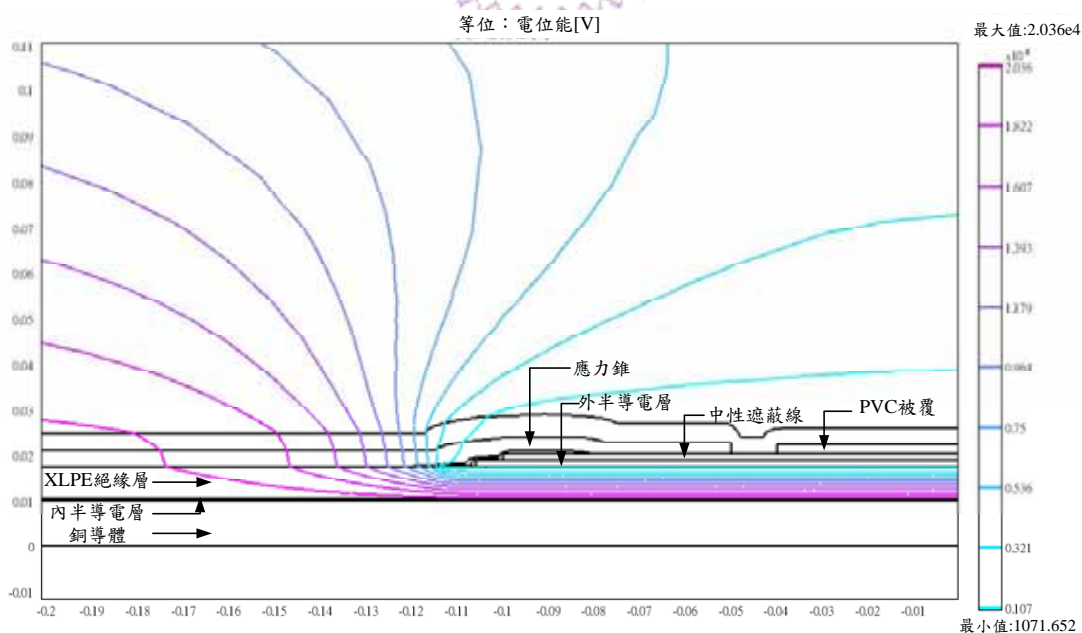


圖2.3-2 添加冷縮式套管後電纜終端的電位分佈

(1) 預張式 (Prestretched Type) 高壓電纜終端接頭

預張式高壓電纜終端接頭的結構如圖2.3-3，或稱為冷縮式 (Cold-Shrink Terminator) 電纜終端接頭，由高介電係數的橡皮套管和矽橡膠材質組成，而此套管的內層係由受拉力後會逐層分離之塑膠內管所支撐，當塑膠內管被剝離後，套管即會與電纜緊密結合。不過仍須注意是否有空氣被壓縮於套管與電纜間，若有殘餘空氣，應將其擠壓出套管，以避免留存氣隙。

文獻[3]所規範的電纜終端，適用於額定電壓15kV以及25kV和線徑500MCM及#1AWG之交連PE電纜，接頭構造須符合以下條件：

- (1) 須為單體式。
- (2) 須具有適當的防閃絡距離 (Creepage Distance)，以避免塵害。
- (3) 須採用高介電常數材料及內建應力控制膠泥，以控制外半導剝除後之電應力的分佈。
- (4) 其矽橡膠絕緣體須能防止沿面破壞。
- (5) 須具有優良的防水性 (含內建防水膠泥)。
- (6) 須與交連PE電纜具有相容性 (Compatibility)。
- (7) 須具有不同尺寸之矽膠絕緣罩以防止大雨時形成水滴路徑引起閃絡。

在驗收時，根據[6]的描述：樣品必須通過電暈試驗、一分鐘乾式交流耐壓試驗、六小時乾式交流耐壓試驗、十秒鐘濕式交流耐壓試驗、衝擊波試驗及直流耐壓試驗等，而各試驗所施加之電壓值不可低於表2.3-1所標示之電壓。

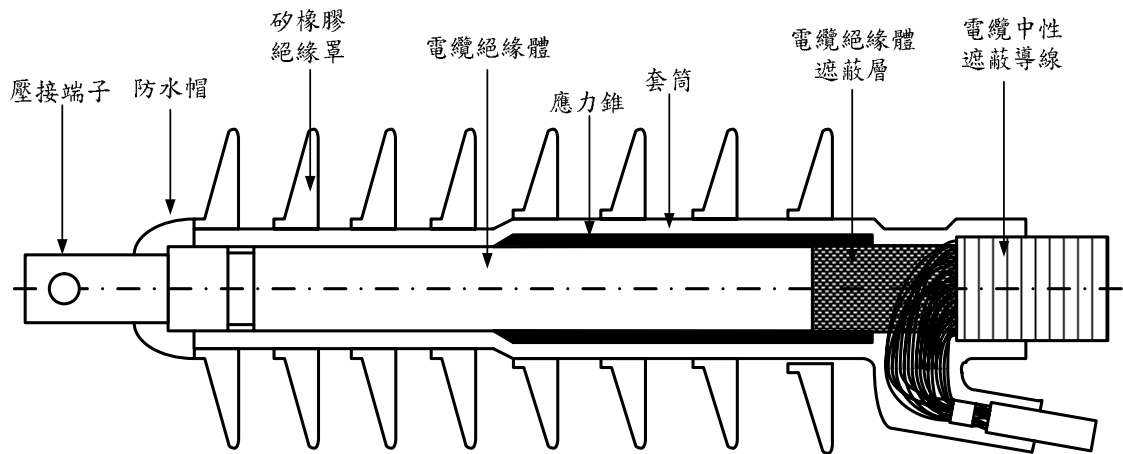


圖2.3-3 預張式高壓電纜終端接頭示意圖

表2.3-1 預張式高壓電纜終端接頭特性試驗額定值[6]

額定 電壓	電暈試驗	交流耐壓試驗			衝擊波試驗 $1.2*50\mu s$	直流耐壓試驗 (15分鐘)
		一分鐘 (乾式)	六小時 (乾式)	10秒 (濕式)		
15kV	13kV/5pc	50kV	35kV	45kV	110kV	75kV
25kV	21.5kV	65kV	55kV	60kV	150kV	105kV

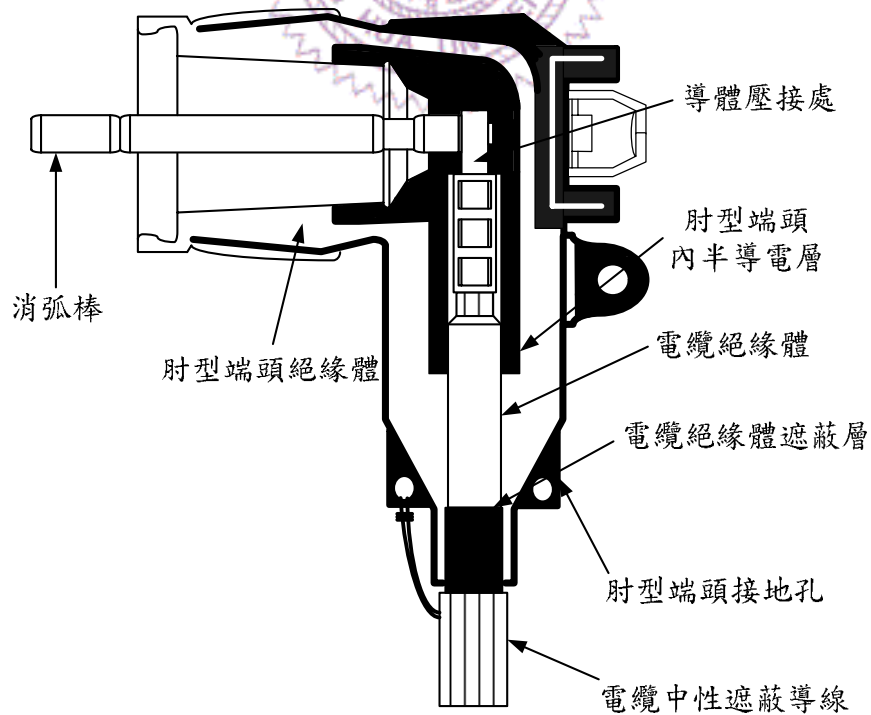


圖2.3-4 肘型端頭示意圖

(2) 肘型端頭 (Elbow Connector)

肘型端頭的結構圖如圖2.3-4，其結構為由聚乙烯化合物 (EPDM) 製成的絕緣層以及由具有半導體性之EPDM製成之外半導體層一體鑄模成型，並有接地孔及電容性電壓測試點，此型電纜終端分為一般的可切接頭以及不可切接頭 (Dead-Break)，分別適用於200A或600A以上的負載。

2.3.2 電纜直線接頭架構

直線接頭的結構如圖2.3-5，包括由聚乙烯化合物 (EPDM) 製成之絕緣層與半導體性EPDM製成之內、外半導體層，一體鑄模成型，並有完善的電氣以及防水設計，主體與組件通常為預鑄成形，一般情況是於廠內測試完成後再於現場組裝，組裝時不須要包紮補膠。

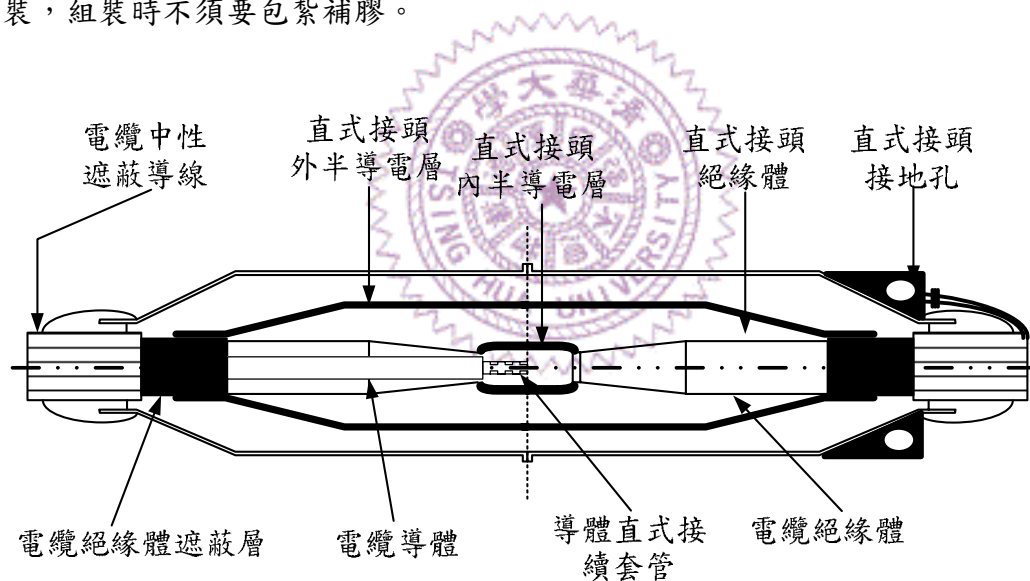


圖2.3-5 電纜直線接頭示意圖

2.3.3 電纜終端施工流程

以冷縮式電纜終端為例，說明施工流程，係參考文獻[24]的25kV電纜施工法。施工時必須額外準備13號半導體膠帶、防水矽橡膠膠帶、矽脂膏、PVC膠帶、接地銅環組件（接地編織銅網、銅環及接地用端子）、黑色自融防水膠帶及施工說明書。

表2.3-2 冷縮式電纜終端施工時各層切除標準

電纜線徑	A	B	半導體	外被剝除長度
25V:35~100mm ²	315mm	55mm	6mm	A+端子深度
25V:125~325mm ²	345mm	60mm	6mm	A+端子深度

- (1) 根據圖2.3-6及表2.3-2標示尺寸逐層剝除電纜，並使用專用的電纜油污清潔劑，將電纜絕緣層擦拭乾淨，但此清潔劑不可接觸到外半導體層。

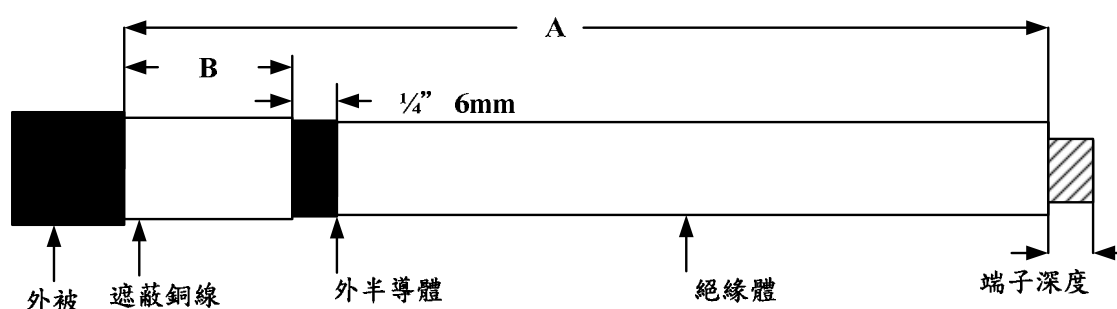


圖2.3-6 冷縮式電纜終端施工步驟 (1)：逐層剝除外被 (參考表2.3-2)

- (2) 以13號半導體膠帶拉長延伸纏繞，膠帶間交疊1/2，包覆2層於遮蔽銅線上距外半導體層6mm處如圖2.3-7，沿電纜纏繞至絕緣層距外半導體層13mm處，膠帶最後1公分不須拉長，直接貼上壓緊即可。

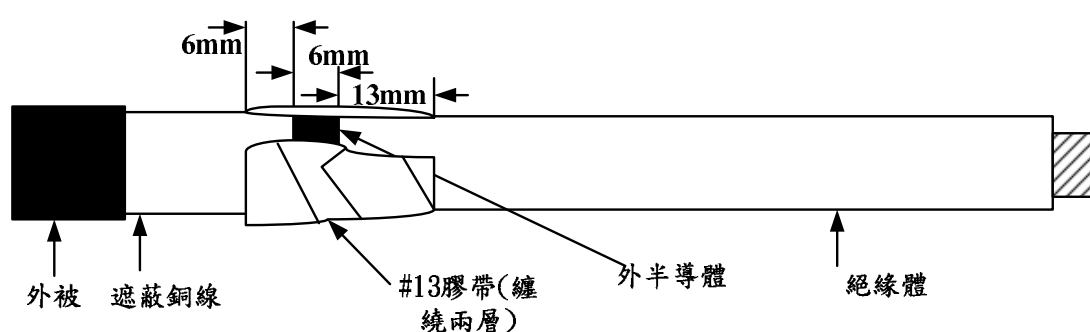


圖2.3-7 冷縮式電纜終端施工步驟 (2)：纏繞#13膠帶

- (3) 以PVC膠帶將接地編織銅網的一端固定於電纜外被上，接地編織銅網的另一端緊貼至電纜遮蔽銅帶表面約4公分，以銅環面朝下環繞於接近外被切除處之遮蔽銅帶上一圈後，反折接地編織銅網在將銅環全部環繞於遮蔽銅帶上，以PVC

膠帶纏繞包覆2層於銅環表面及編織銅網上，如圖2.3-8。

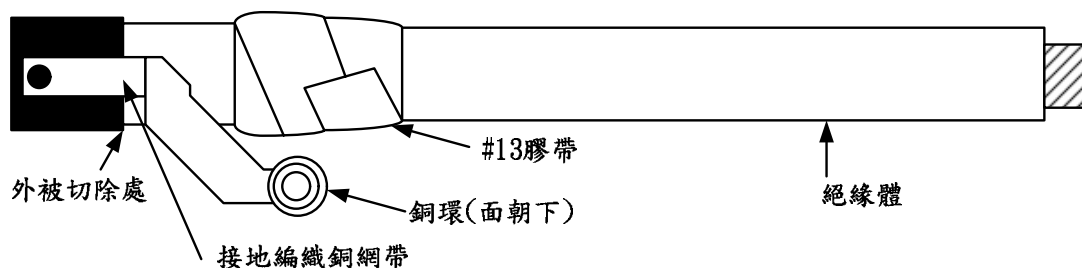


圖2.3-8 冷縮式電纜終端施工步驟(3)：接地編織銅網之處理

(4) 以所附之矽脂充分塗抹於13號半導體膠帶纏繞於絕緣體末端處，如圖2.3-9。

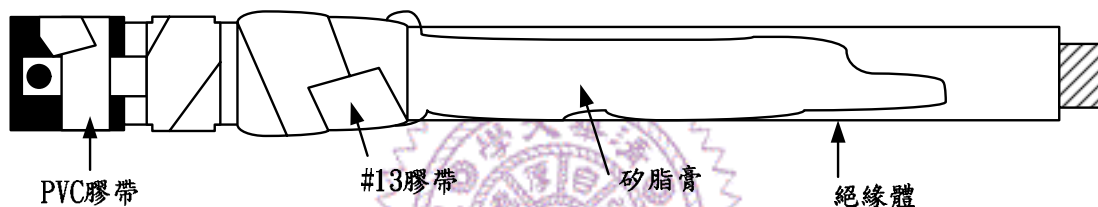


圖2.3-9 冷縮式電纜終端施工步驟(4)：塗抹矽脂膏

(5) 將冷縮式套管處理頭套入電纜，將拉帶朝外，處理頭末端頂住接地銅環，再將預張用之塑膠帶以反時針方向慢慢拉出完成施工，以黑色自融防水膠帶1/2互相重疊，自套管底端後纏繞至電纜外被約3公分處完成施工底部之防水處理，如圖2.3-10。

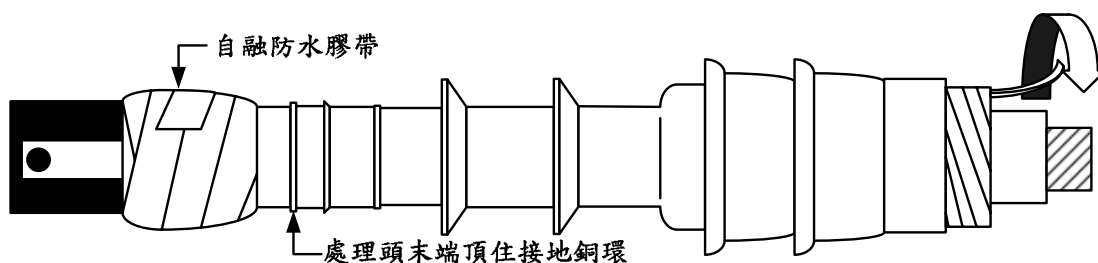


圖2.3-10 冷縮式電纜終端施工步驟(5)：底部之防水處理

(6) 利用壓接工具壓接端子後，以防水矽橡膠膠帶拉長延伸 $1/2$ ，並相互交疊自壓接端子末端纏繞至冷縮式矽橡膠處理頭約25mm處以完成防水處理，將接地編織銅網以電纜束線帶固定並連接至接地端，整體施工即算完成，如圖2.3-11。

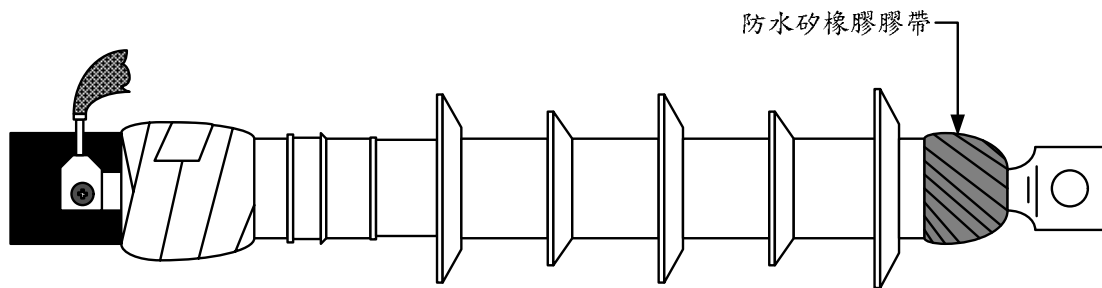


圖2.3-11 冷縮式電纜終端施工步驟(6)：頭部之防水處理

