

第六章 電纜終端絕緣內部最大電場抑低方法

本章以目前廣泛應用於輸配電系統的冷縮式電纜終端為例，探討如何改善電纜終端的結構，以防範因施工不當（包括：未塗抹矽脂膏、未纏繞半導體膠帶、絕緣層未拭淨、應力錐定位不良等）惡化電纜終端的不均勻電場而致破壞絕緣，造成電纜事故，並評估改善方法的潛在問題，以及結構改變後是否會降低終端的耐壓能力。

6.1 冷縮式電纜終端結構

本研究以冷縮式套管為基礎進行改良，而該冷縮式電纜終端處理完成後之構造如圖6.1-1，套管構造包括矽橡膠製成之套管本體及內附之應力錐，此兩項構造非一體成型，而戶外型冷縮套管在矽橡膠套管表層會添加遮雨罩。

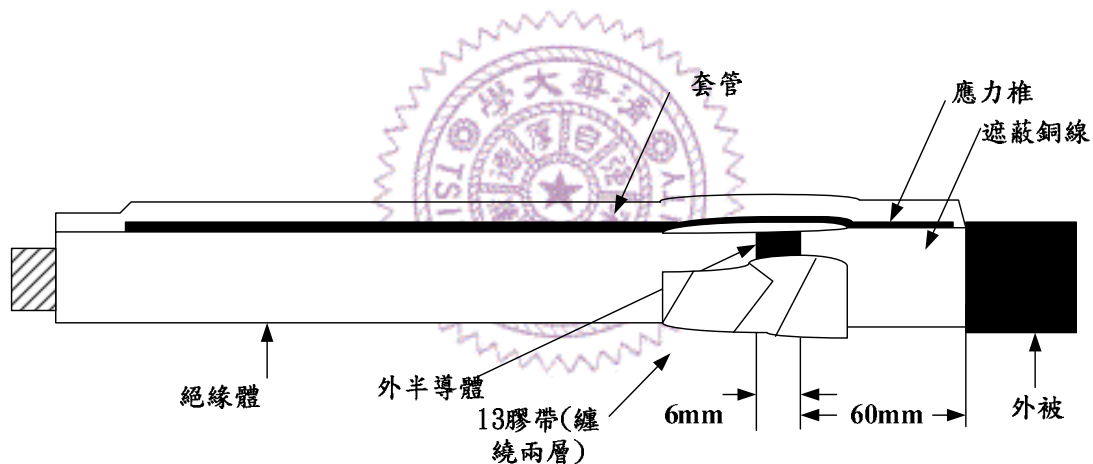


圖6.1-1 冷縮式電纜終端構造示意圖

6.2 添加半導體層前後對電場分佈之改善

由2.3.1節探討過的現行冷縮式終端電位線圖可知：電纜終端的電場皆集中於施工處，也就是外半導體層的末端，此亦為最易發生施工錯誤處，例如未塗抹矽脂膏、未添加13號半導體膠帶、安裝前未清除乾淨造成雜質殘留或應力錐定位不良等，而致原本就已偏高的電場值因施工不當電場量遽增，其中最嚴重者為殘留空氣於該處，因為空氣之絕緣強度遠不如電纜各材質之絕緣強度，施工不良之電纜終端其電場若超越空氣之放電電壓，造成電弧路徑而擊穿空氣且在電弧路徑熄滅之後會在氣隙中遺留大量電荷，而致該處的空氣更易放電，損害附近之絕緣材

質。

本論文的改善方式為：添加半導體物質於電纜終端的矽橡膠套管與應力錐之間，讓電位梯度不再集中於電纜施工處，使電應力受到紓解。茲針對此層之材質、長度、起點與終端位置，以有限元素模型進行評估。

(1) 材質

假設使用的材質為半導體特性（導電率 $0.1\sim 10\text{ S/m}$ ）之冷縮性橡膠，須配合冷縮式套管外部矽橡膠之材質特性，相對介電係數無特殊要求，因為經模擬結果推測：此層的介電係數對其效果影響有限，在此假設此層的相對介電係數與矽橡膠套管相同，基值為4。

(2) 厚度

經模擬結果顯示該層之厚度對施工處電場以及該層前端之電場無絕對之影響，在此假設該層厚度為 0.5mm 。

(3) 長度

該層延伸之長度必須限制在固定範圍內，理由是：若此層延伸過長，以至於與應力錐長度相同，會使套管與應力錐之間的氣隙電場過大如圖6.2-1，該氣隙之電場高達 $5\sim 7\times 10^6\text{V/m}$ ，已超過空氣可能的放電電場 $3\sim 4\times 10^6\text{V/m}$ ，因此該層必須比應力錐層短，以避免該處產生放電現象，但要比施工處最前端長數公分，以防止該層因過短而降低其抑低電場強度的能力。因此長度方面，最前端選定在距施工處 4cm 處，也就是距應力錐最前端約 16cm 處（此額外添加之半導體層最好與套管本體為一體成型，以避免此層最前端處產生氣隙而致放電），且末端務必延伸至冷縮式套管的最末端，並且確定該層可以接觸到中性遮蔽線以確保接地效果。

本文添加的半導體層係依據以上三項原則建立，添加後的結構如圖6.2-2。本節針對此結構的潛在問題進行探討，假設皆屬正常施工，比較改善前後的電場分佈。以作為比較，模擬所用之數據如表6.2-1。

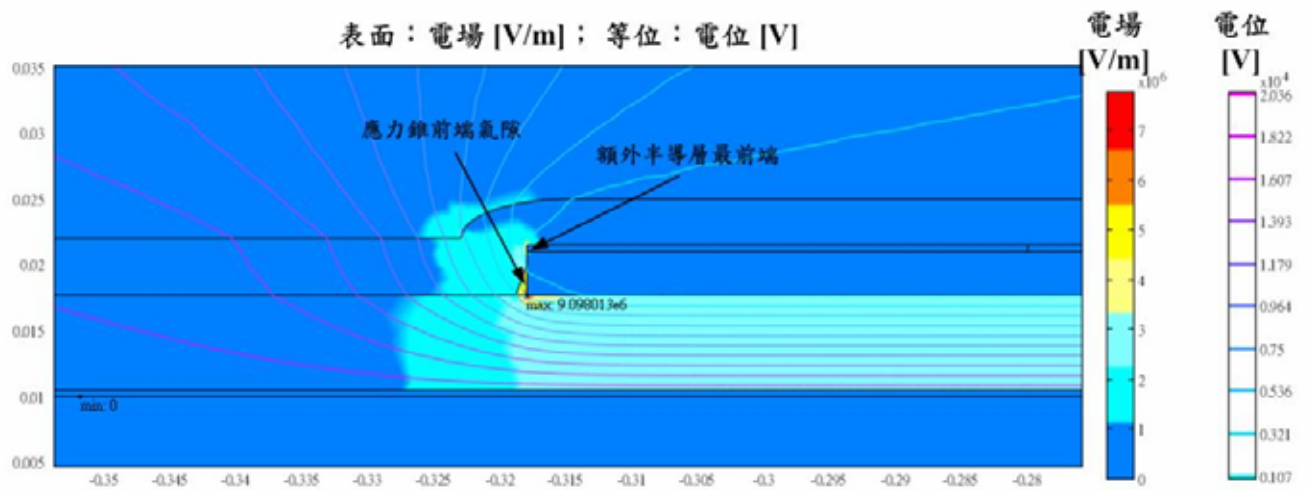


圖6.2-1 半導體層過長時應力錐前端的氣隙電場與電位

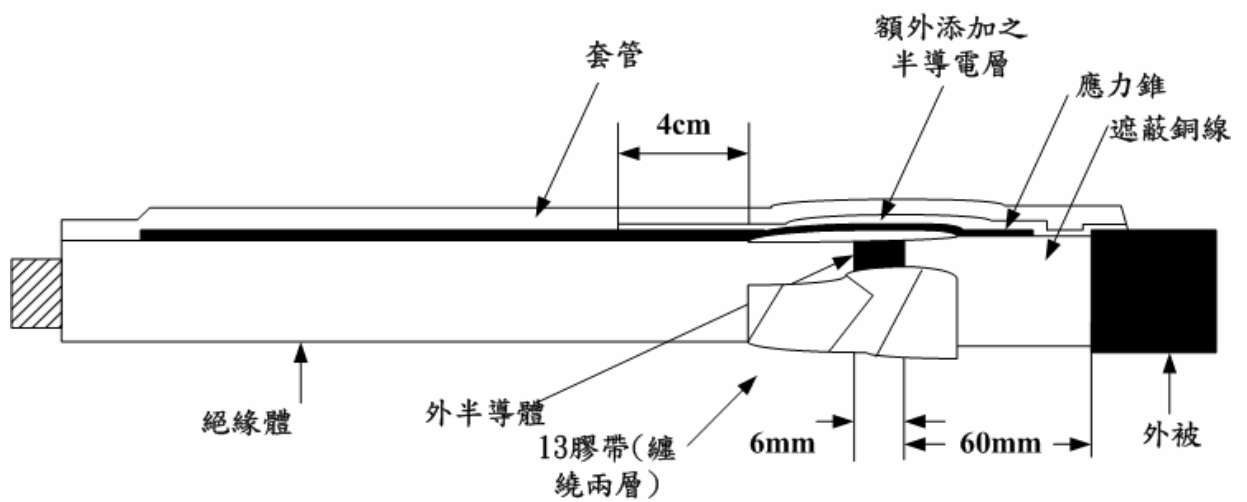


圖6.2-2 添加半導體層後冷縮式結構

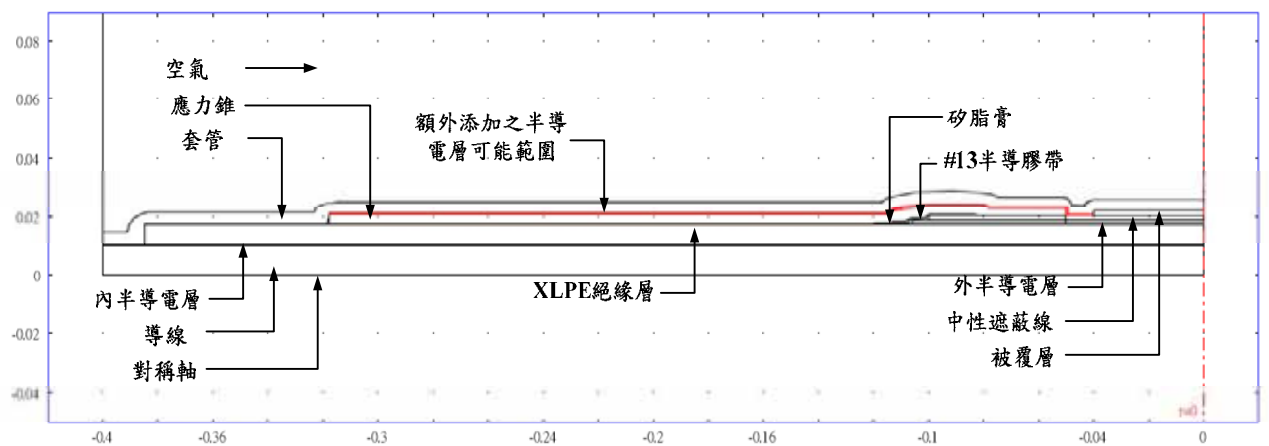


圖6.2-3 冷縮式套管模型

表6.2-1 500MCM之25kV單芯交連PE電纜與冷縮式套管之相關參數

構造	半徑 (mm)	外徑 (mm)	厚度 (mm)	材料種類	導電率 (S/m)	相對介電係 數
導體層	10.02	20.04	10.02	銅	5.998×10^7	1
內外半導體層	10.48	20.96	0.46	半導體材質	2	30
絕緣層	17.68	35.36	7.2	交連 PE	10^{-15}	2.3
遮蔽層	20.38	40.76	1.45	銅	5.998×10^7	1
被覆層	22.41	44.82	2.03	PVC	10^{-16}	2.9
冷縮式套管	-	-	4	矽橡膠	10^{-15}	4
應力錐	-	-	3.5	高介電物質	10^{-16}	25
額外半導體層	-	-	0.5	半導體材料	2	4
矽脂膏	-	-	-	-	10^{-15}	5
13 號膠帶	-	-	-	半導體 EPR	2	4

此處模擬兩型常見的應力錐材質所造成的電場分佈，所使用的模型如圖

6.2-3，相關參數如表6.2-1，假設在正常施工下，比較添加半導體層前後之電場

分佈，模擬時所施加的電壓為 $25kV * 1.05 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 21.433kV$ ，頻率60Hz。

(1) 絕緣等級應力錐

此為最常見的應力錐材質，為高介電係數（20~30）的絕緣（ $10^{-15}S/m$ 以下）物質。

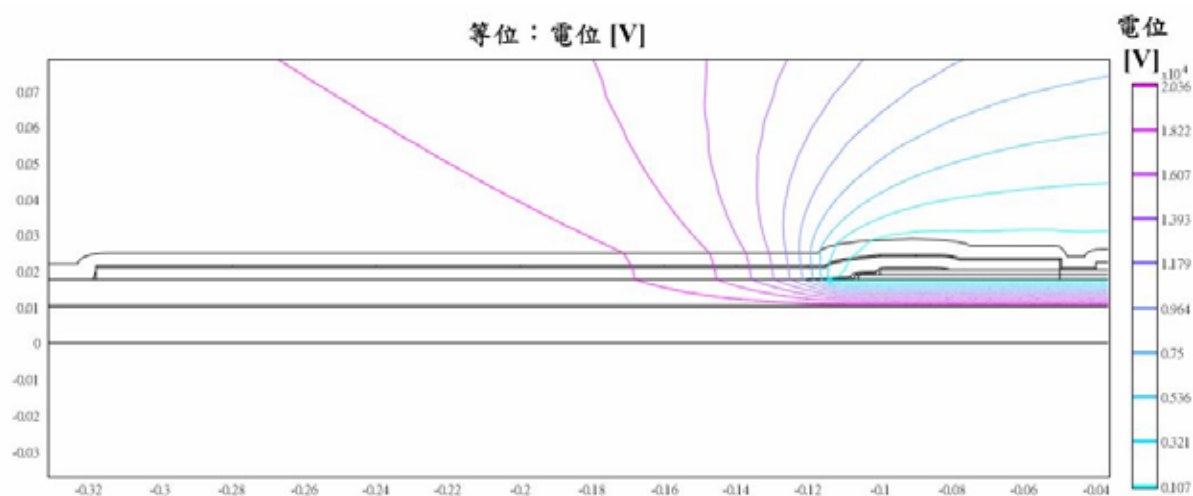


圖6.2-4 正常施工下絕緣應力錐電位分佈

(2) 非絕緣等級應力錐

利用較高的導電率（約 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ S/m}$ 左右）紓緩電應力，模擬結果得知：此設計確實可以有效紓緩電應力，亦即在施工處前端的電應力得以紓緩，但施工處附近的電應力變得更加曲折，對整體電應力的抑低成效尚待評估。

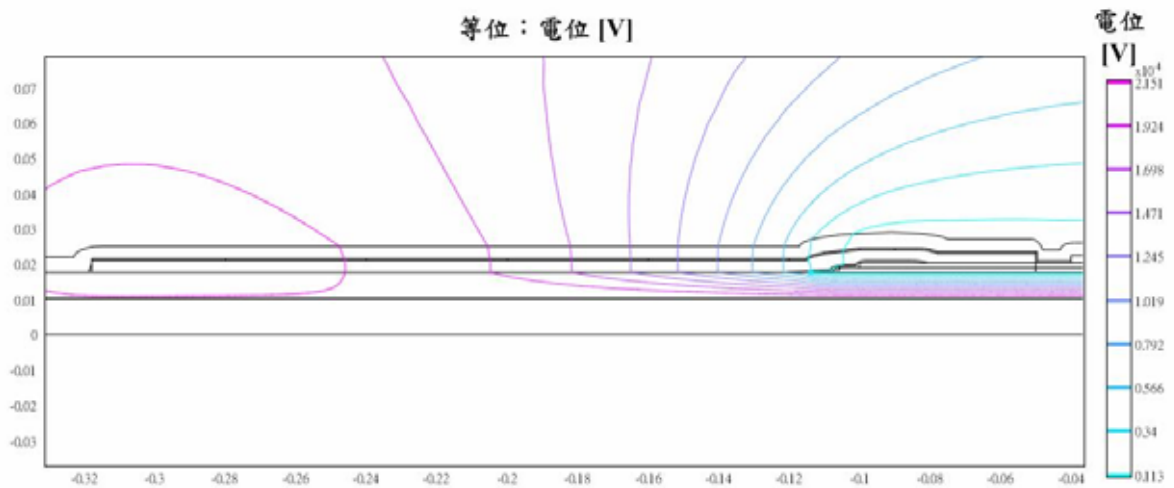


圖6.2-5 正常施工情況下非絕緣應力錐電位能分佈情況

(3) 添加半導體層

應力錐材質與(1)相同，皆為絕緣等級物質，根據前述條件添加半導體層，讓電位梯度不致集中在易失誤的施工處，而集中在不會發生施工失誤的添加半導體層的前端。

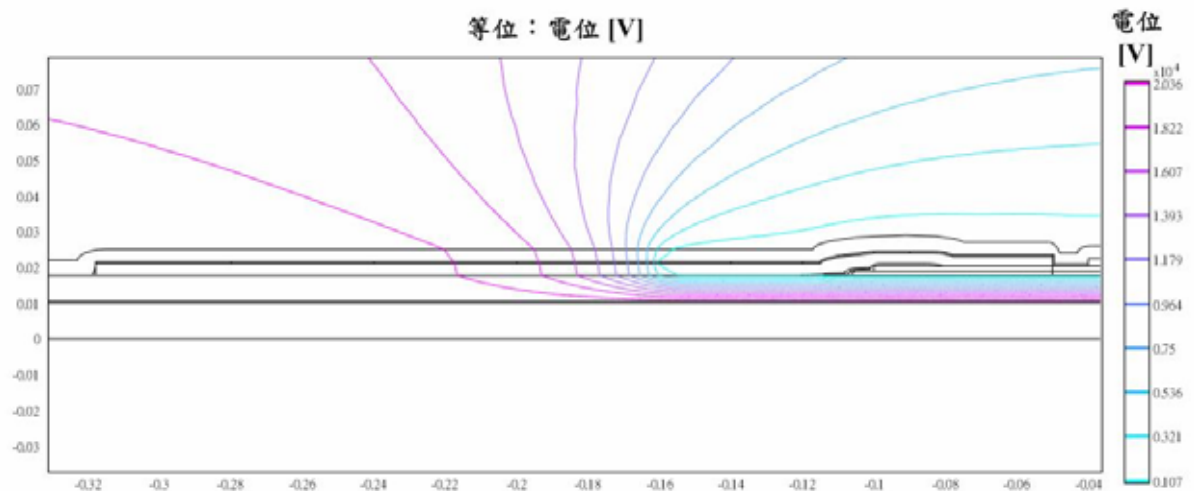


圖6.2-6 正常施工添加半導體層後應力錐電位分佈

圖6.2-7比較前述三種情況之電場分佈，由13號半導電膠帶末端延伸至矽脂膏末端之絕緣層的表面與矽脂膏的介面，模擬結果可知：這三類情況的最高電位點都發生在13號半導電膠帶末端處。而在使用非絕緣等級應力錐的情況下，介面間的最高電場高達 $1.83 \times 10^7 \text{ V/m}$ 甚至高於一般絕緣應力錐的 $1.56 \times 10^7 \text{ V/m}$ ，可見其導電性使得施工處電位梯度增加；反而對電纜危害；反觀在添加半導電層後，該處電場則抑低在 $4.6 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，約莫只有原本電場的25~30%，可見此層的添加的確可以達到抑低施工處電場的功效。

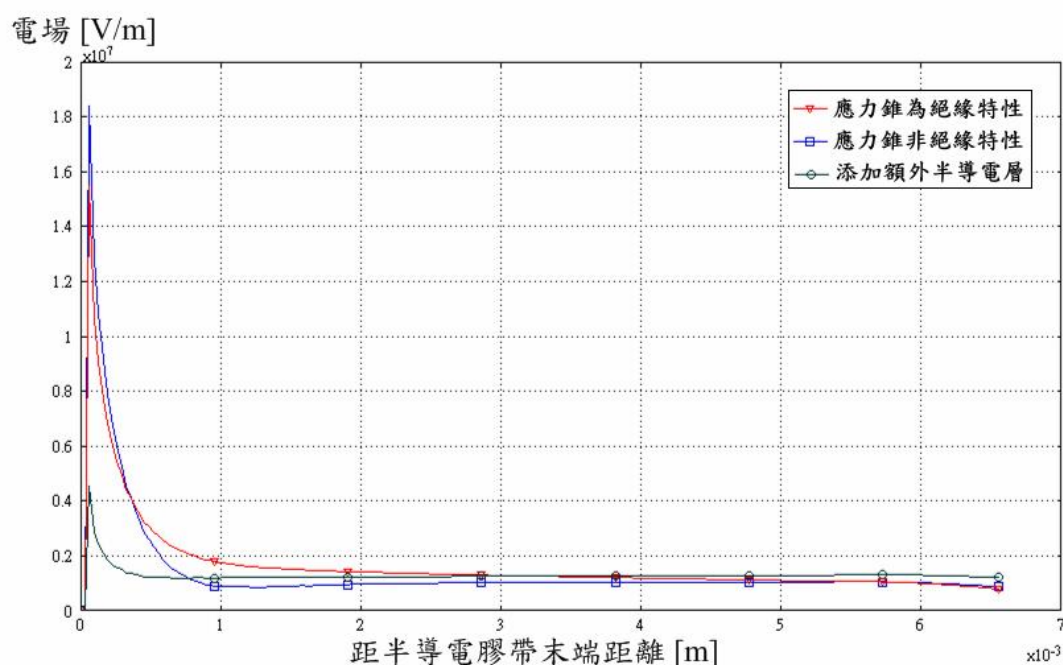


圖6.2-7 三類狀況下絕緣層表面的電場

添加半導電層後，原本集中在施工處的電位梯度，改為集中在添加的半導層前端，因此應考慮此處的電場，模擬結果如圖6.2-8。由於此層位於絕緣應力錐上方，因此電位線在此轉折前就已得到紓解，使得該層終端的電場僅維持在 $3.6 \times 10^6 \text{ V/m}$ 到 $4.3 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，遠低於該承受此電場的套管矽橡膠材質絕緣耐壓（ $16 \times 10^6 \text{ V/m}$ 到 $39 \times 10^6 \text{ V/m}$ ）。因此添加此層不但可以將電位梯度集中處遠離施工處，且也不會讓新的電位梯度的集中處電場過高。

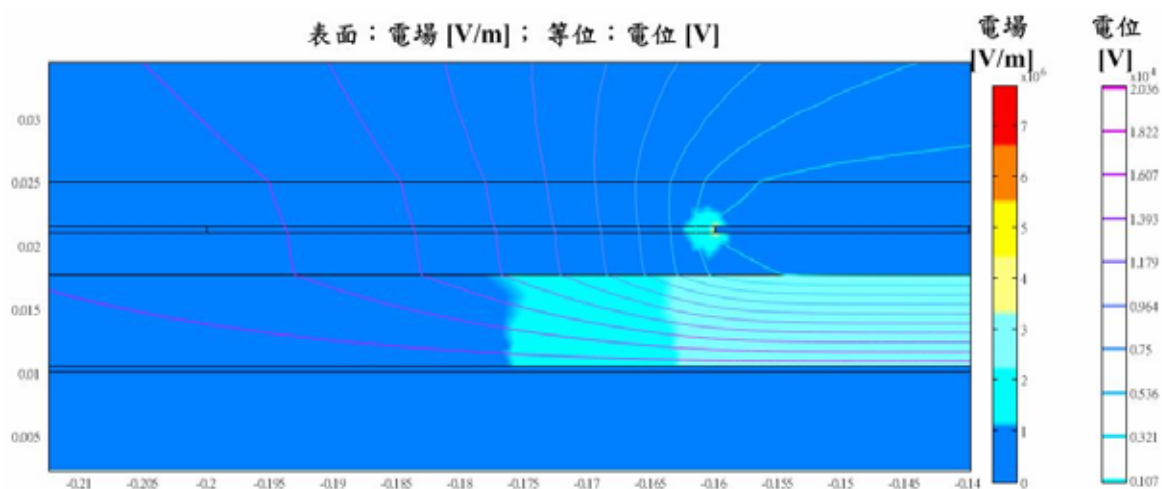


圖6.2-8 添加的半導層前端電位線與電場狀況

6.3 施工缺陷評估

本節針對常見的施工缺失進行模擬，比較各型缺陷下，一般的冷縮式電纜終端與添加半導層後的電纜終端在施工處的電場，評估該層對於施工缺陷造成之最大電場是否能有效抑低。

6.3.1 未塗抹矽脂膏

施工後塗抹的矽脂膏於絕緣層與13號半導電膠帶附近，用於填補在外半導電層終端由於切割造成的高度落差產生之氣隙，矽脂膏具有弱侵蝕性也可用來填補切割過深在絕緣層上造成的刀痕，在預鑄式及滑入式終端更扮演潤滑的效果，因此塗抹矽脂膏是十分重要的施工程序。由於目前部份的冷縮型電纜終端已良改成不須要塗抹矽脂膏，此不同的施工法往往造成施工人員對於冷縮式電纜終端施工時，忽略此程序，造成氣隙殘留。圖6.3-1為模型在施工處的放大圖，該模型假設若未塗抹矽脂膏，在13號半導電膠帶末端處留下大小不一的三個氣隙，模擬時除該施工處以外，其餘的參數設定與模型皆與圖6.2-3相同。

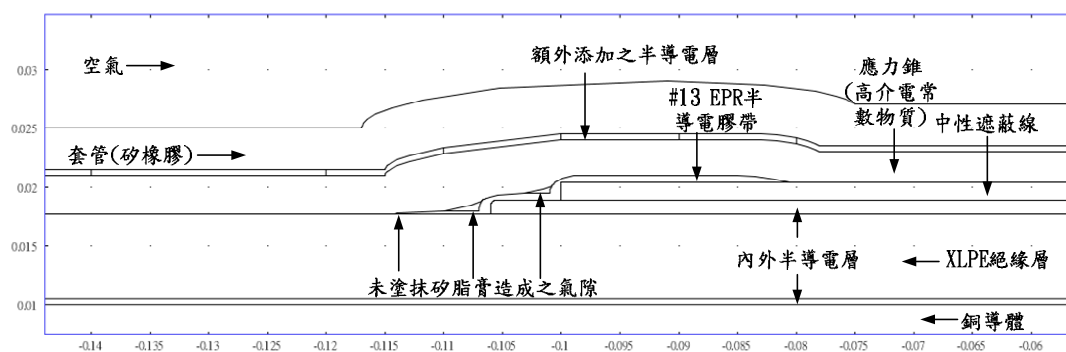


圖6.3-1 未塗抹矽脂膏時施工處模型

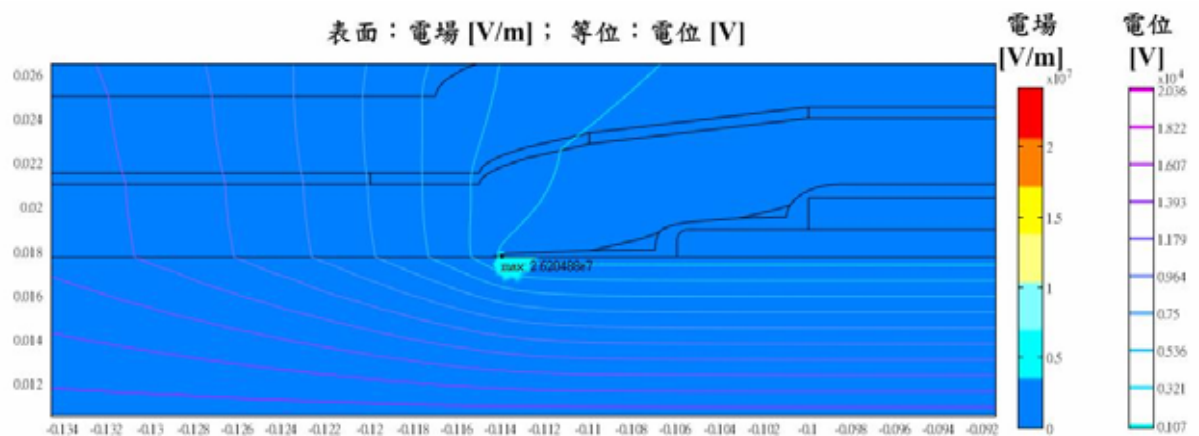


圖6.3-2 未塗抹矽脂膏(A案)的電場電位

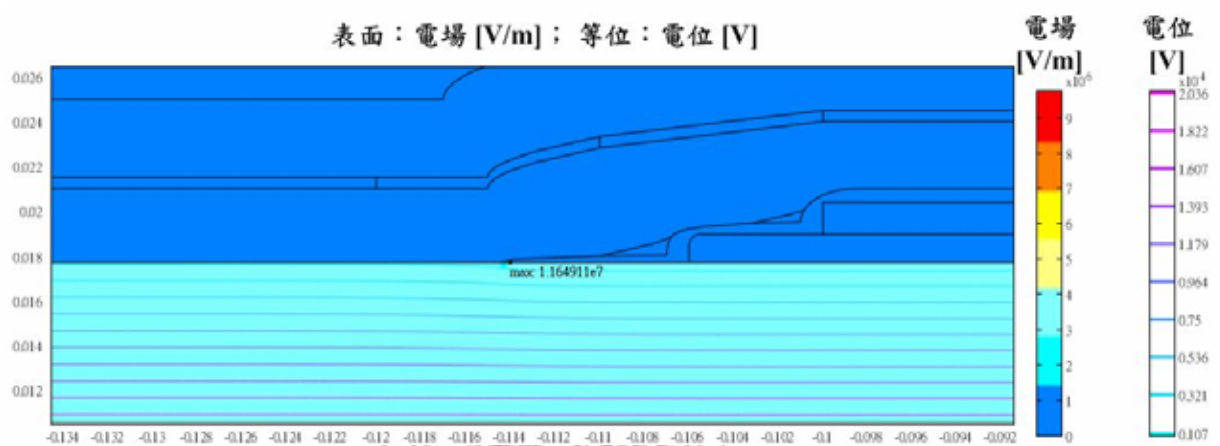


圖6.3-3 未塗抹矽脂膏但添加半導體層(B案)後的電場電位

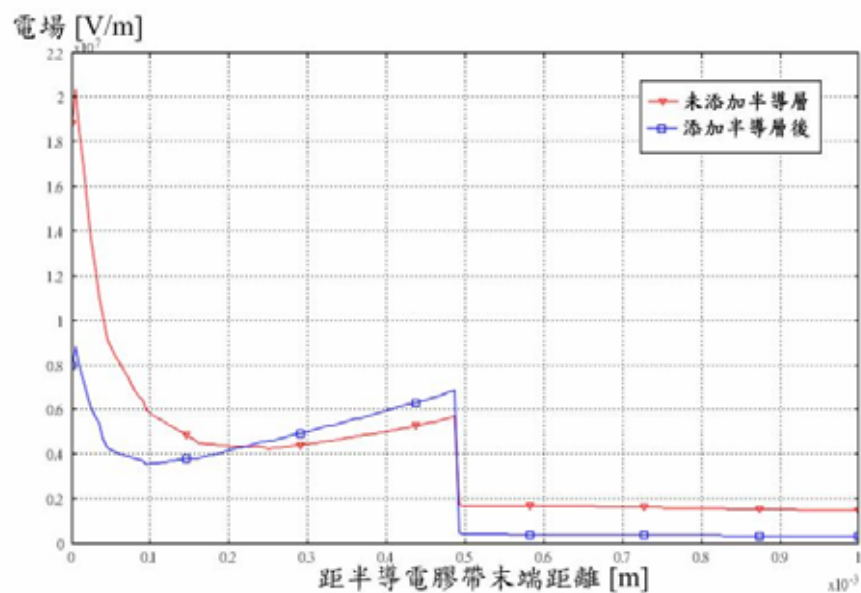


圖6.3-4 未塗抹矽脂膏情況下兩案(A,B案)的絕緣層表面電場

圖6.3-2與6.3-3分別為添加半導體層前後之電場狀況，最大電場皆發生在13號半導體膠帶末端的絕緣層內，由結果可知：電場由 $2.62 \times 10^7 \text{ V/m}$ 降至

$1.16 \times 10^7 \text{ V/m}$ ，僅原本的40%。而圖6.3-4是由13號半導體膠帶前端往前延伸1mm的絕緣層表面之電場，前0.5mm為絕緣層與空氣交界處、後0.5mm為絕緣層與應力錐交界處，氣隙的兩端是電場集中處，但是可以看出：添加半導體層後，最大電場由原本的 $2.03 \times 10^7 \text{ V/m}$ 降至 $8.6 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，整體電場也較為均勻，雖然此電場依然超過空氣的絕緣耐壓而有放電之虞，但此設計有助於延長劣化時間，且可避免過高的電場在短時間內直接造成電樹劣化擊穿絕緣層，以期可以在下次歲修時檢出，進行修復。

6.3.2 未塗抹矽脂膏且未纏繞半導體膠帶

此狀況與6.3.1節類似，施工者在完成各層的拆除後，沒有細綁外半導體膠帶也未塗抹矽脂膏就直接安裝冷縮式套管，造成比6.3.1節更大的氣隙（寬2.5mm）存在於外半導體層切除處終前端。模型如圖6.3-5，但整體狀況與前節類似，此模擬比較在施工處氣隙的差異對電場的影響，並比較添加半導體層後的改善程度。

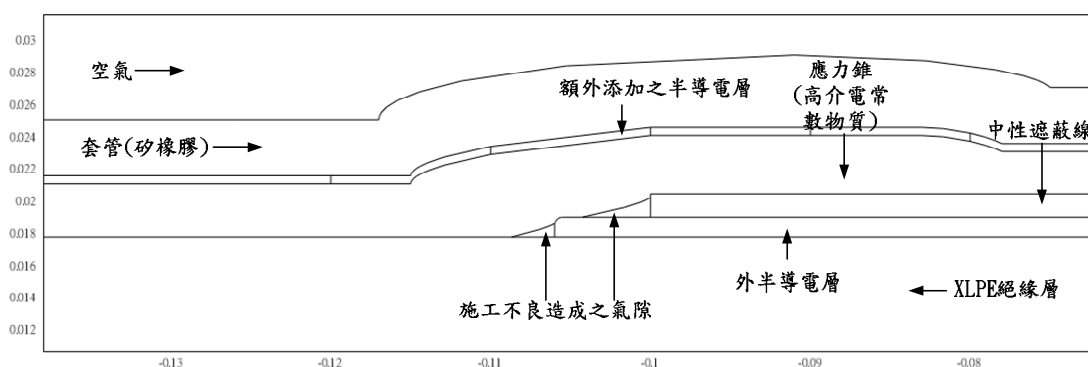


圖6.3-5 未塗抹矽脂膏且未纏繞半導體膠帶時施工處模型

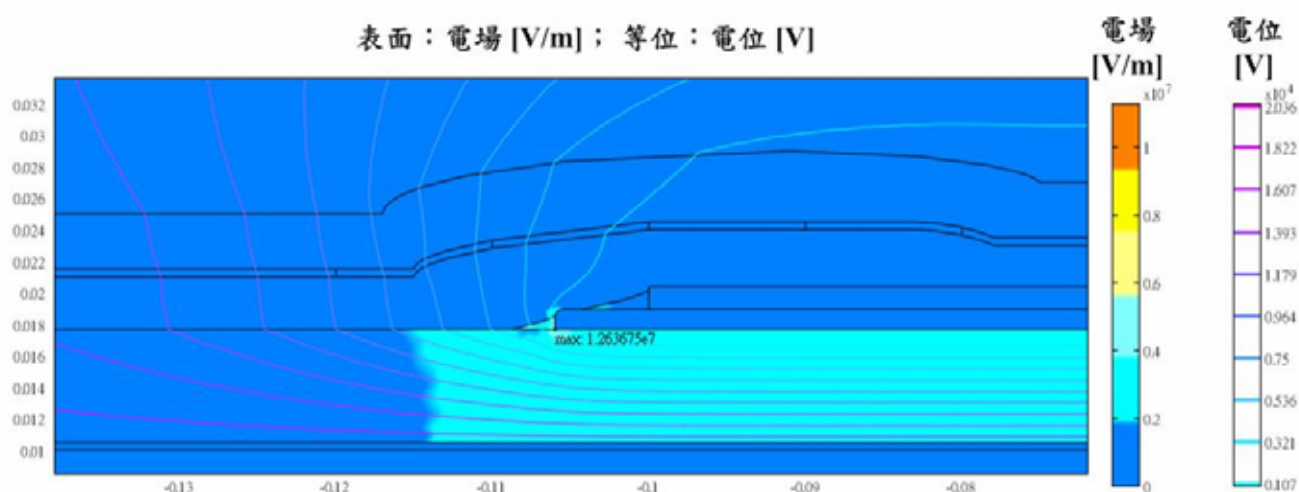


圖6.3-6 未塗抹矽脂膏且未纏繞半導體膠帶時的電場電位

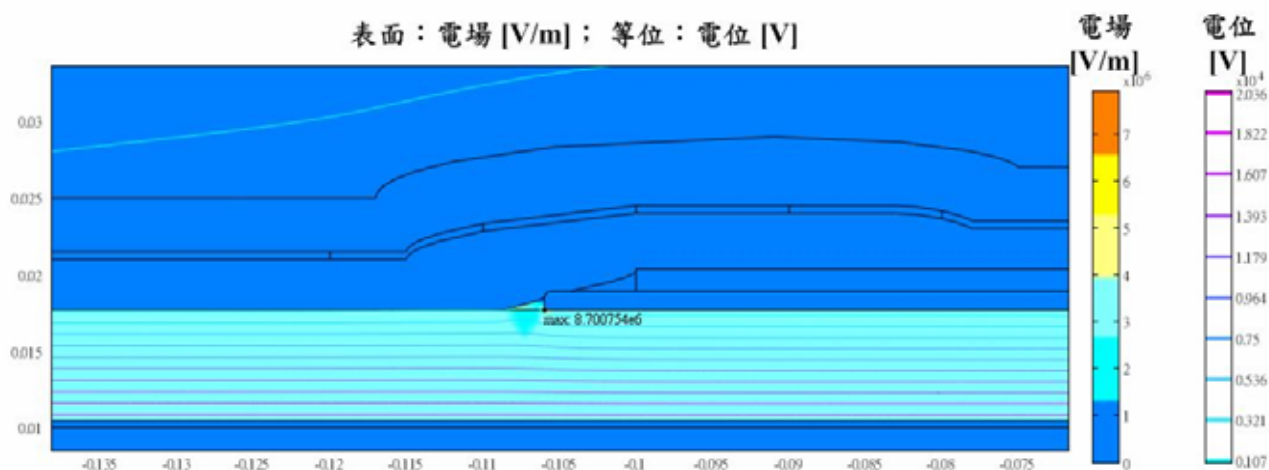


圖6.3-7 未塗抹矽脂膏且未纏繞半導體膠帶時添加半導體層後的電場電位

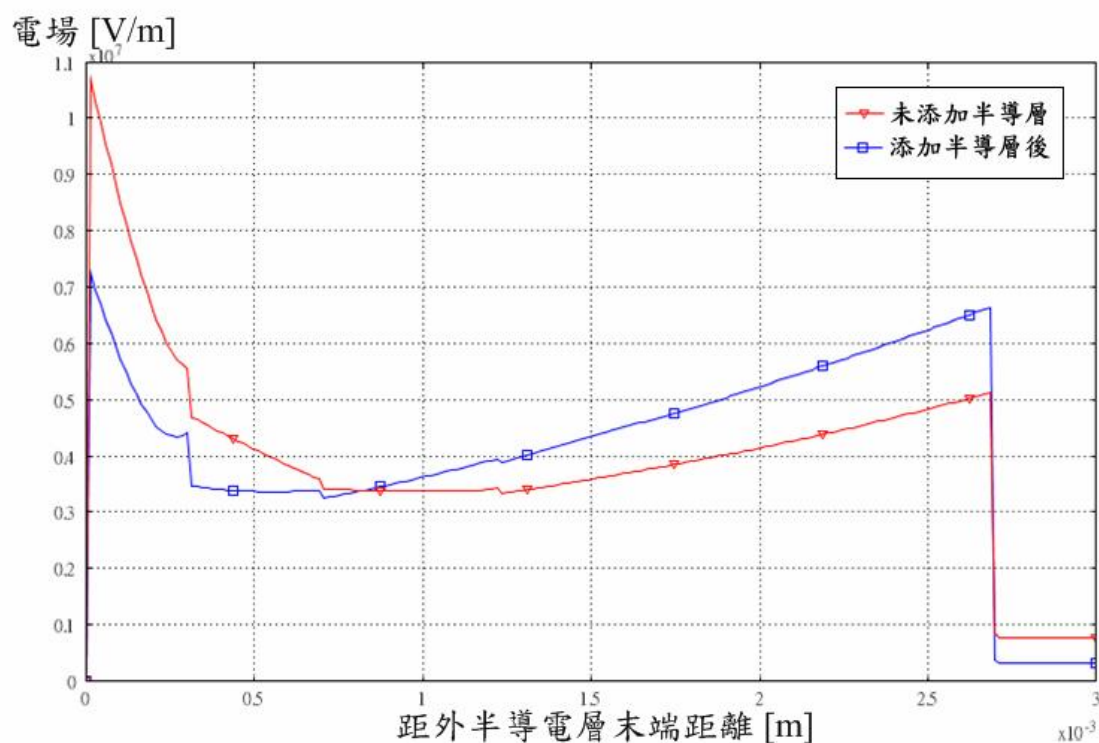


圖6.3-8 未塗抹矽脂膏且未纏繞半導體膠帶時的絕緣層表面電場狀況

比較添加半導體層前後的電場電位圖（圖6.3-6與6.3-7）：添加前後的最大電場都集中在空氣、外半導體層與絕緣層三材質的交界點，而添加後該電場由 $1.26 \times 10^7 \text{ V/m}$ 降至 $8.7 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，為原本的70%。而空氣與絕緣層的交界處電場如圖6.3-8，可知：雖然此層仍能抑低氣隙電場的最大值並使之均勻，但是效果比第6.3.1節差，可能是氣隙過大導致。此法的抑低原理是將電位線藉由與中性遮蔽線銜接

的半導體層，將電場曲折處轉移至別處，但此法對於殘存空氣過大的情況改善有限，原因是電場會向介電係數較低處集中；由電位線的觀點，介電物質的電位線分佈會因另一個介電係數更低的物質之貼近，而在該近轉折，由圖6.3-9外半導體層最前端的電位分佈為例，該處電位線因空氣的介電係數較低（空氣介電係數為1），而使分佈於交連PE絕緣層（交連PE介電係數為2.3）的電位線向空氣曲折，造成該氣隙的空氣電場過強，雖然由圖6.3-8可知：電場還是得到抑低與紓緩，但效果比起較小的氣隙差，改善程度亦較為有限。

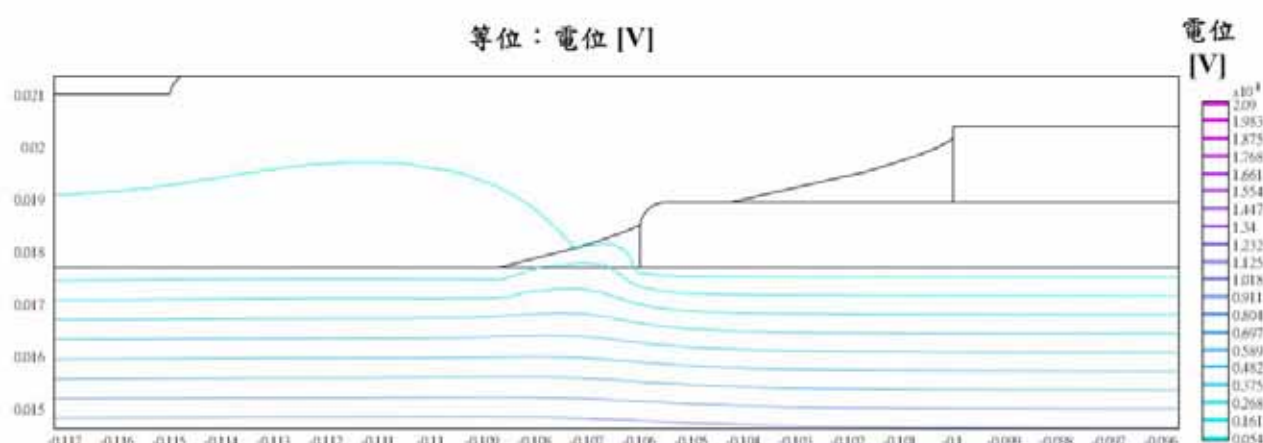


圖6.3-9 外半導體層最前端電位線曲折狀況

6.3.3 絕緣層未拭淨

電纜終端在施工處理時必須先截斷電纜最尾端的一部份，再進行施工，以防止電纜尾端受潮或品質不良，此截斷作業往往引起大量粉塵殘留於施工附近，而使得一些無法目視的粉塵殘存在施工處，第 2.3.3 節中電纜施工流程的第一步驟為：以專用之電纜油污清潔劑，將電纜絕緣層擦拭乾淨。目的就是為清除絕緣層上可能殘存的油污與粉塵。本節的模擬就是以殘存粉塵中危害最嚴重的銅粉塵（導體材料）為例，建立模型評其危害與改善後的情況。模型如圖 6.3-10，假設 13 號半導體膠帶前殘存長寬各 0.5mm 的銅粉塵數顆，假設其餘施工程序皆屬正常，這些銅粉塵分佈於矽脂膏底部的絕緣層上，其餘各項設定皆與正常施工相同。

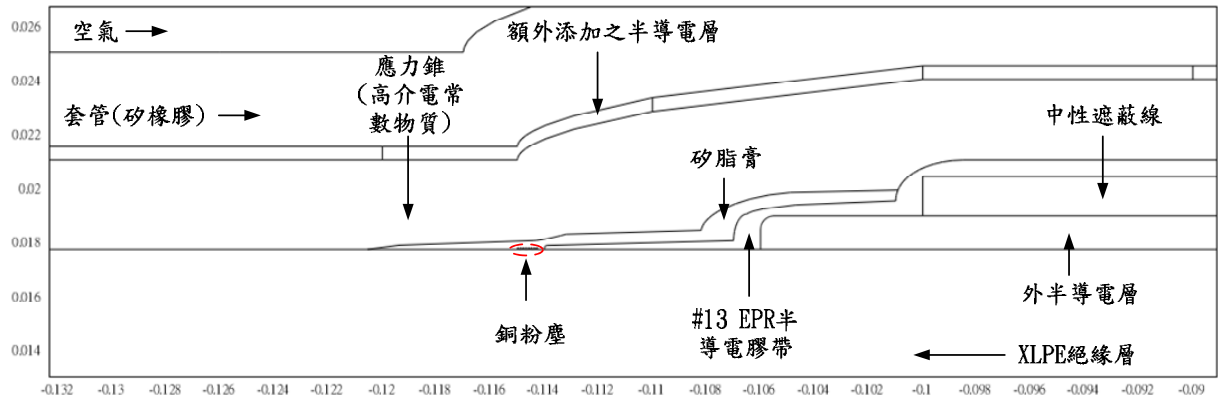


圖 6.3-10 絕緣層未拭淨時施工處模型

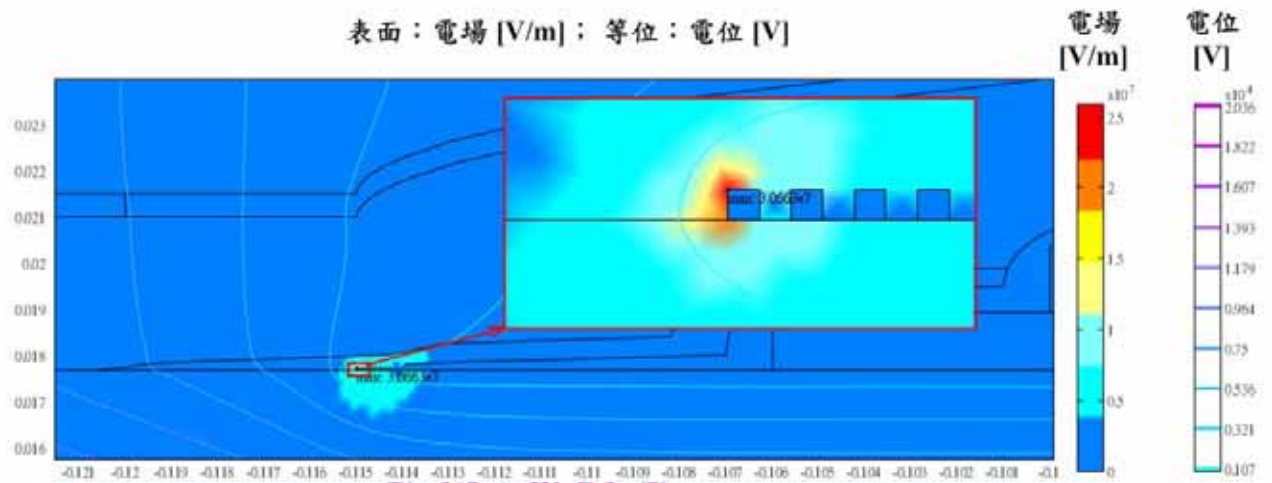


圖 6.3-11 絕緣層未拭淨時的電場、電位

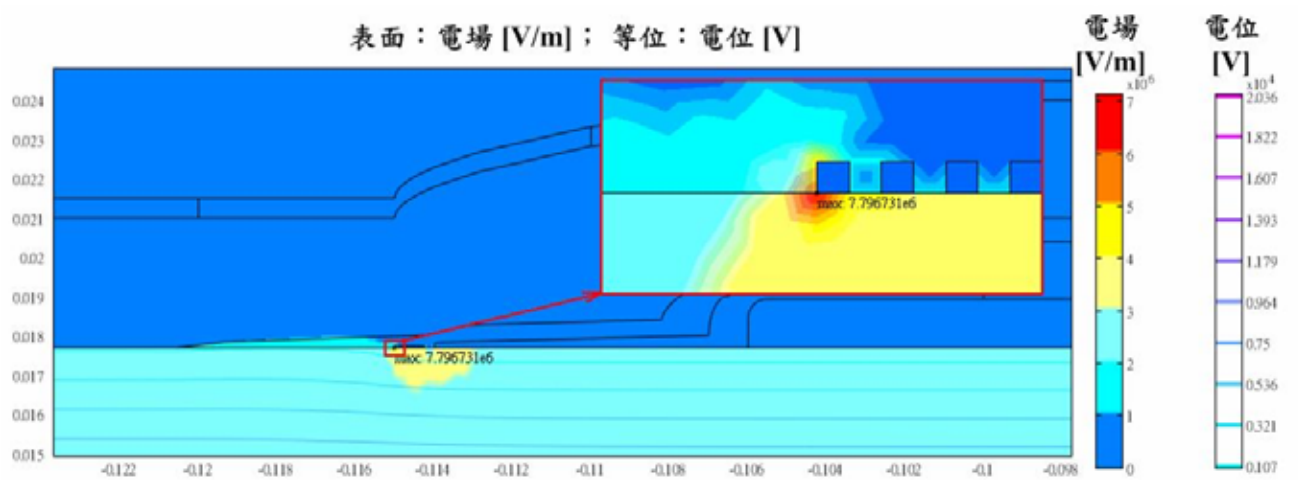


圖 6.3-12 絕緣層未拭淨時添加半導體層後的電場、電位

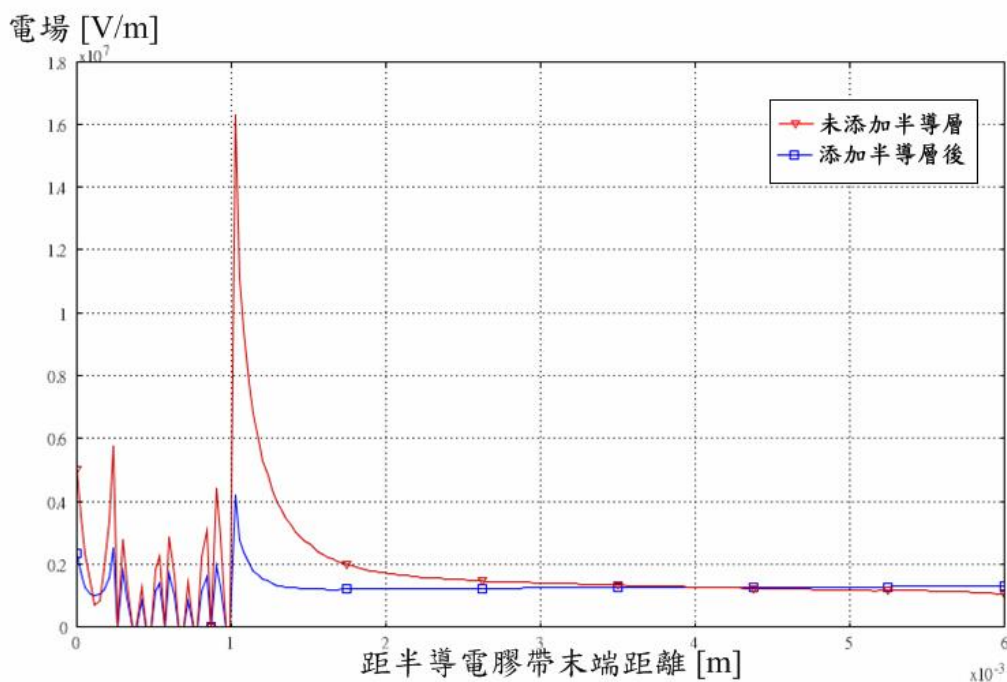


圖 6.3-13 絕緣層未拭淨之兩情況下的絕緣層表面電場狀況

未添加半導體層的電纜如圖 6.3-11，在正常施工狀況下，電場集中在最前端一顆銅顆粒頂端且高達 $3.066 \times 10^7 \text{V/m}$ ，雖然矽脂膏之絕緣耐壓並無詳細資料，此電場的大小就算是 PVC、EP 橡膠或矽橡膠等常見的絕緣物亦有擊穿之虞（各物質之絕緣耐壓見附錄 A），其危害顯而易見。而在添加半導體層後，整體電場電位分佈改變如圖 6.3-12，最大電場發生處由金屬粉塵頂端改成金屬粉塵底部的絕緣層處，降到 $7.8 \times 10^6 \text{V/m}$ ，而有著顯著的改善。

交連 PE 表層與矽脂膏介面處的電場分佈比較如圖 6.3-13 前方曲折處為銅粉塵分佈區，原本電場的最大值在添加半導體層後被抑低到原本的 25%，得到顯著的改善。

6.3.4 應力錐定位不良

施工人員在收縮冷縮式套管終端時，因定位不良所造成，為實際發生過的案例，模型建立如圖 6.3-14，假設應力錐最末端被定位在矽脂膏末端約 1cm 前，其舒緩電應力的效果完全喪失，還在施工處附近留下大量氣隙，其餘各項設定皆與正常施工狀況相同。

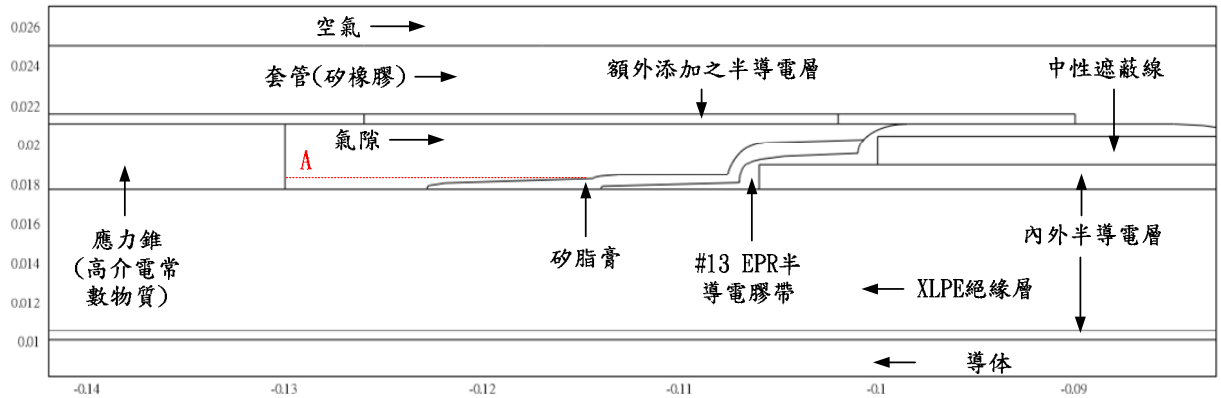


圖 6.3-14 應力錐定位不良時施工處模型

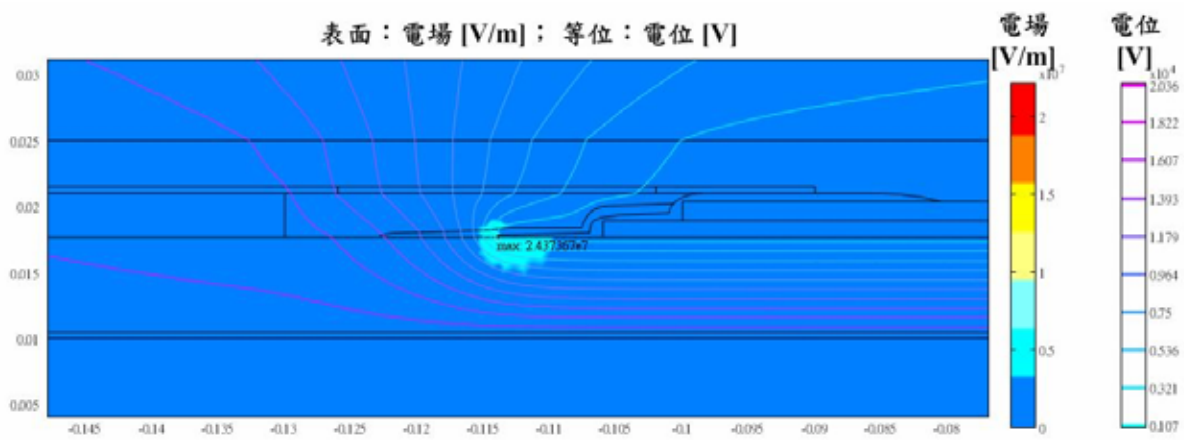


圖 6.3-15 應力錐定位不良時電場、電位

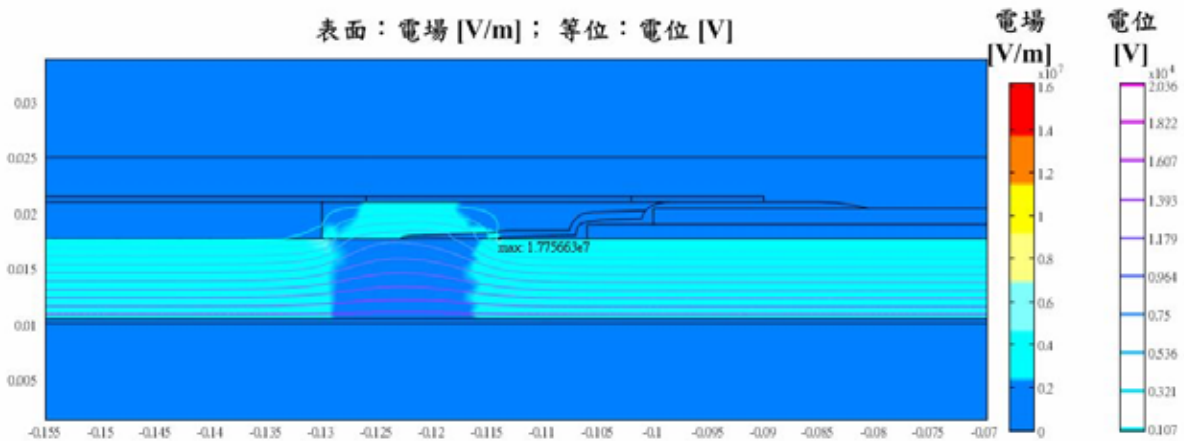


圖 6.3-16 應力錐定位不良時添加半導層後的電場、電位

添加半導層前後之電場如圖 6.3-15~6.3-16，可知：位於 13 號半導電膠帶末端的矽脂膏上方空氣，其電場約為 $3.5 \sim 4.9 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，已達空氣的放電電壓。添加後雖然空氣電場分佈範圍變廣，但其大小抑低在 $3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，如圖 6.3-17，為圖 6.3-14 氣隙紅色切線 A 的電場，改善後氣隙整體電場較為均勻，且無放電疑慮。

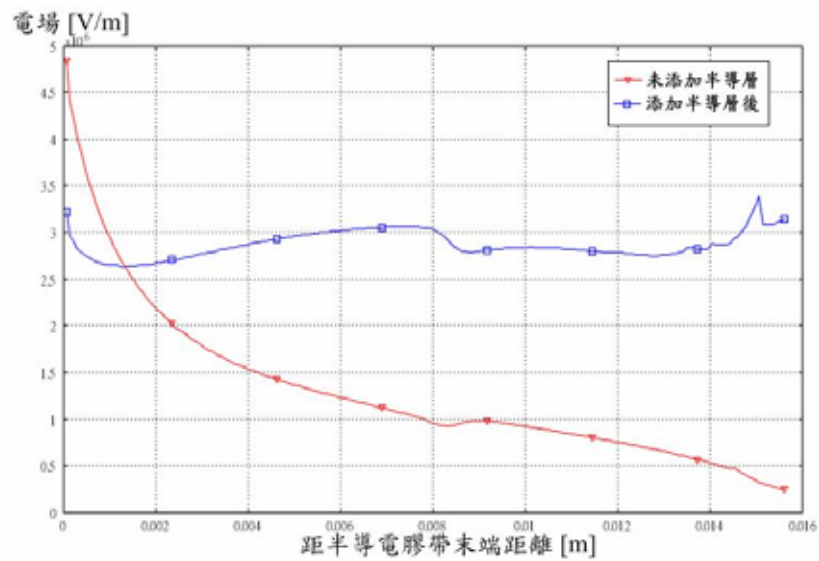


圖 6.3-17 應力錐定位不良造成之氣隙電位圖

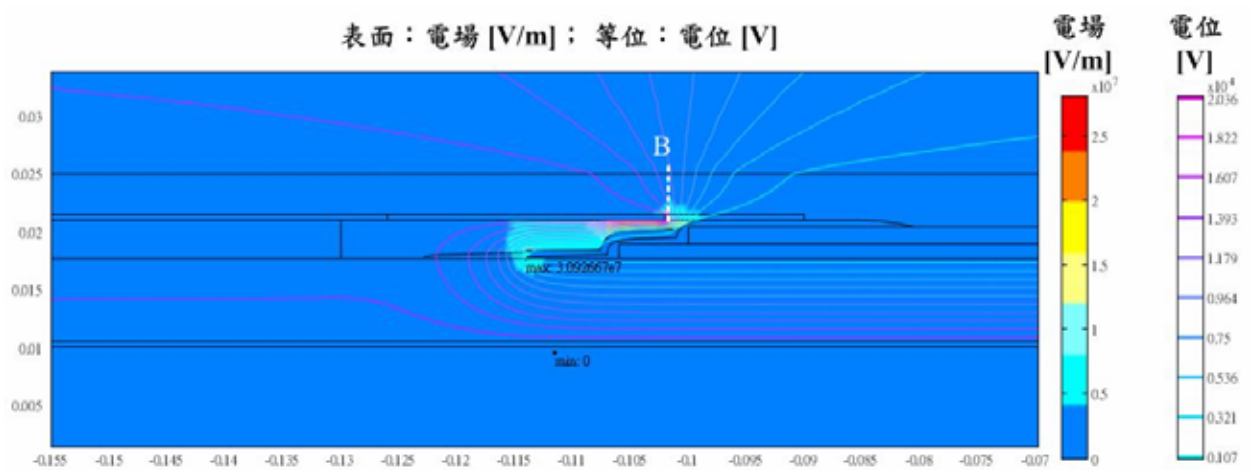


圖 6.3-18 應力錐定位不良且半導體層沒有延伸至末端的電場電位圖

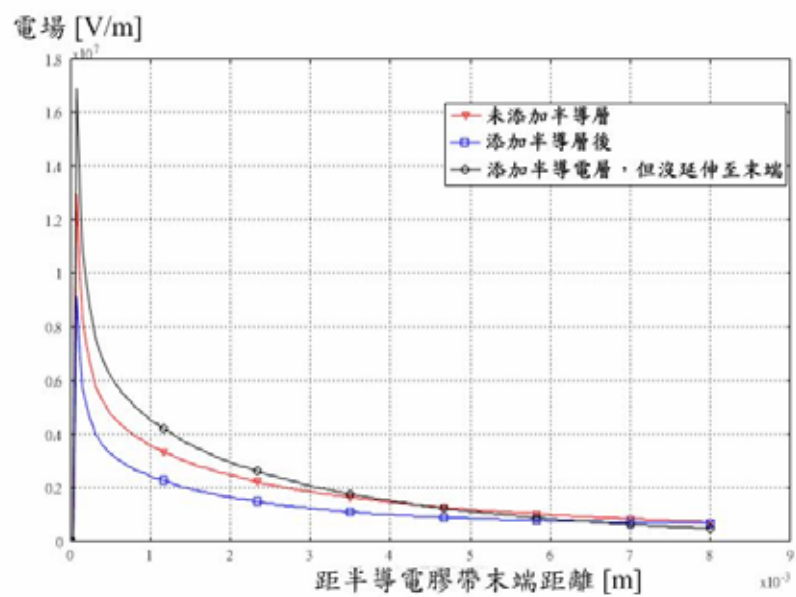


圖 6.3-19 絕緣層未拭淨時三類情況下的絕緣層表面電場狀況

本模擬考慮另一狀況：就是第 6.2 節為何此添加的半導體層應延伸至套管最末端，若未延伸，會發生如圖 6.3-18 的電場狀況。該圖的半導體層未延伸至末端只延伸到 B 處，應力錐定位不良造成半導體沒有接觸到外半導體層，不僅失去地電位的功效，更讓電位線沿 13 號半導體膠帶與此半導體層彎曲，在 B 處附近氣隙電場提升至 $2.0\sim 2.6\times 10^7\text{V/m}$ ，此電場超過空氣耐壓 4 倍，因而會嚴重的放電，導致故障，因此半導體必須確實延伸到套管末端，以防止如圖 6.3-18 的狀況。

6.4 耐壓試驗評估

本節評估改變電纜構造後能否承受耐壓試驗，根據第 2.3.1 節，電纜終端必須通過一連串的耐壓試驗以確保品質。耐壓試驗中有些加壓情況較難以有限元素法評估，因此僅針對（1）交流耐壓試驗（2）直流耐壓試驗兩類試驗進行模擬。交流試驗方面直接模擬一分鐘乾式交流耐壓試驗，所加的試驗電壓為 65kV，求其在電壓峰值時的電場分佈，而直流耐壓則是直接模擬 105kV 直流電壓加壓 15 分鐘的狀況，模擬所用的模型為第 6.2 節圖 6.2-3 的正常施工狀況。

（1）交流耐壓試驗

模擬結果如圖 6.4-1~6.4-2，圖 6.4-1 為在一般正常施工狀況下，冷縮式電纜終端加諸一分鐘乾式交流耐壓試驗，試驗電壓 65kV 時的電場狀況，電場最大處為施工處的 13 號半導體膠帶末端下的絕緣層，高達 $1.11\times 10^8\text{V/m}$ 且終端附近的矽脂膏電場也高達 $5\sim 6\times 10^7\text{V/m}$ ；反觀在添加半導體後，13 號半導體膠帶末端下的絕緣層最大電場僅約 $3.7\times 10^7\text{V/m}$ ，為原本值的 1/3，借在交連 PE 絕緣耐壓附近（交連 PE 絕緣耐壓 $3\sim 5\times 10^7\text{V/m}$ ），且矽脂膏內的電場更降到 $5\sim 5.5\times 10^6\text{V/m}$ ，僅原本的 1/10。另觀察位於半導體前端的應力錐與矽橡膠套管交界處，該處的電場分佈於半導體末端的矽橡膠處，大小為 $1.5\sim 1.65\times 10^7\text{V/m}$ ，也無擊穿之虞（矽橡膠絕緣耐壓 $1.6\sim 3.2\times 10^7\text{V/m}$ ），模擬結果可知：此構造不會造成該電纜終端耐壓之不足，反而有效降低其電場。根據模擬結果得知該設計在交流耐壓試驗時應無擊穿疑慮。

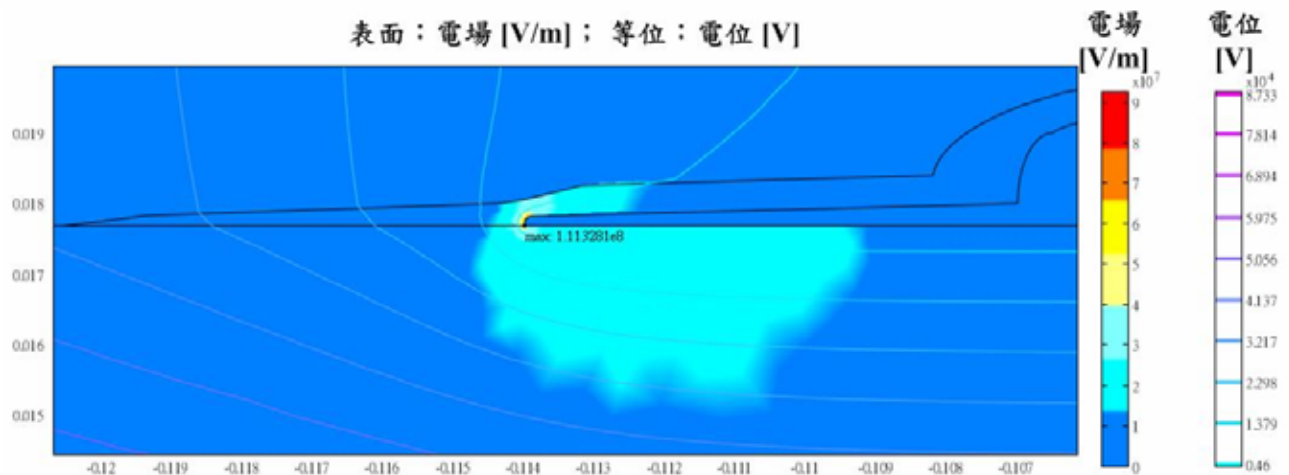


圖 6.4-1 交流耐壓試驗時施工處電場、電位

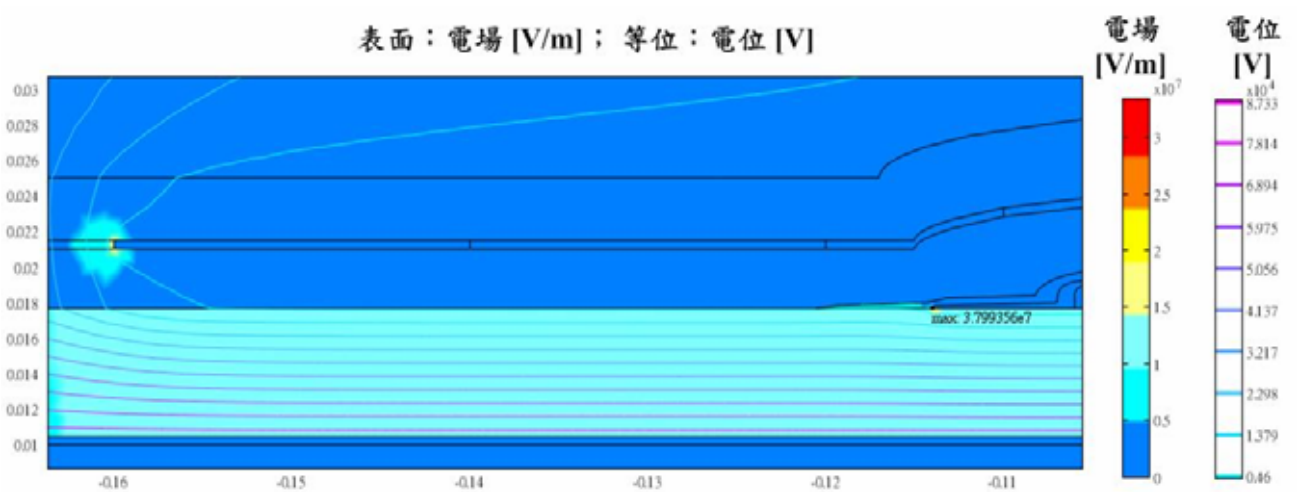


圖 6.4-2 交流耐壓試驗時添加半導體層後電場、電位

(2) 直流耐壓試驗

此處用與交流耐壓試驗相同的模型進行直流評估，並以 105kV 加壓 15 分鐘觀察其電場狀況，評估是否有因添加半導體層導致弱化的區域。

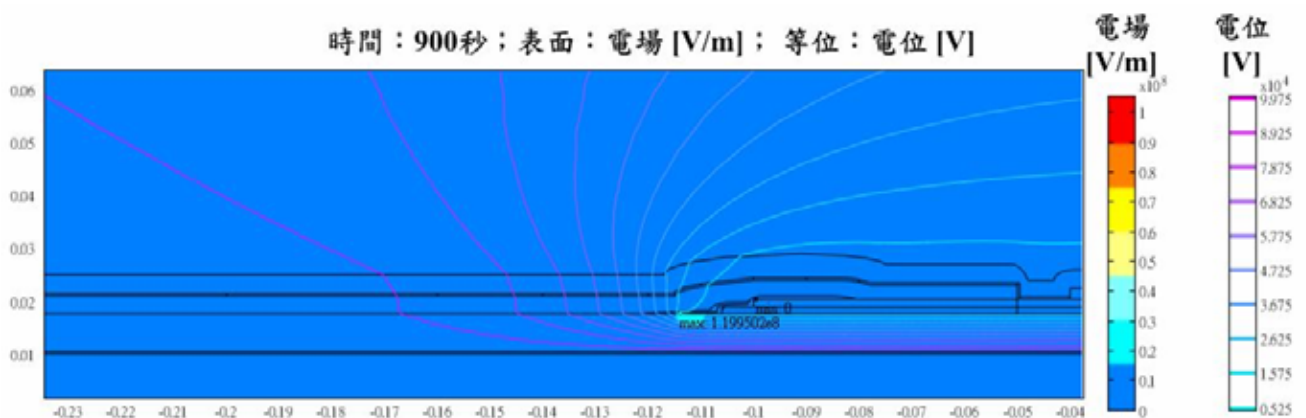


圖 6.4-3 直流耐壓試驗時施工處最終的電場、電位

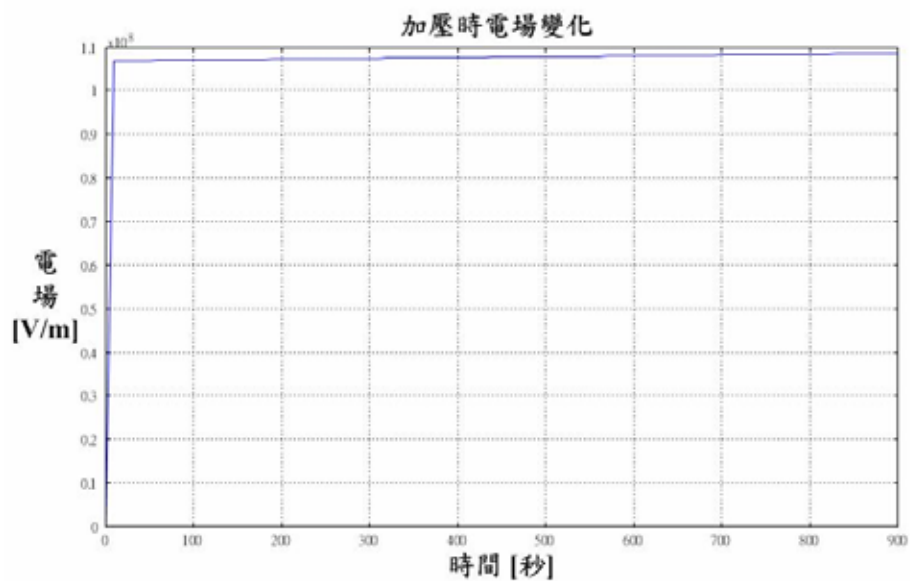


圖 6.4-4 直流耐壓試驗時電場最高處的電場與時間關係

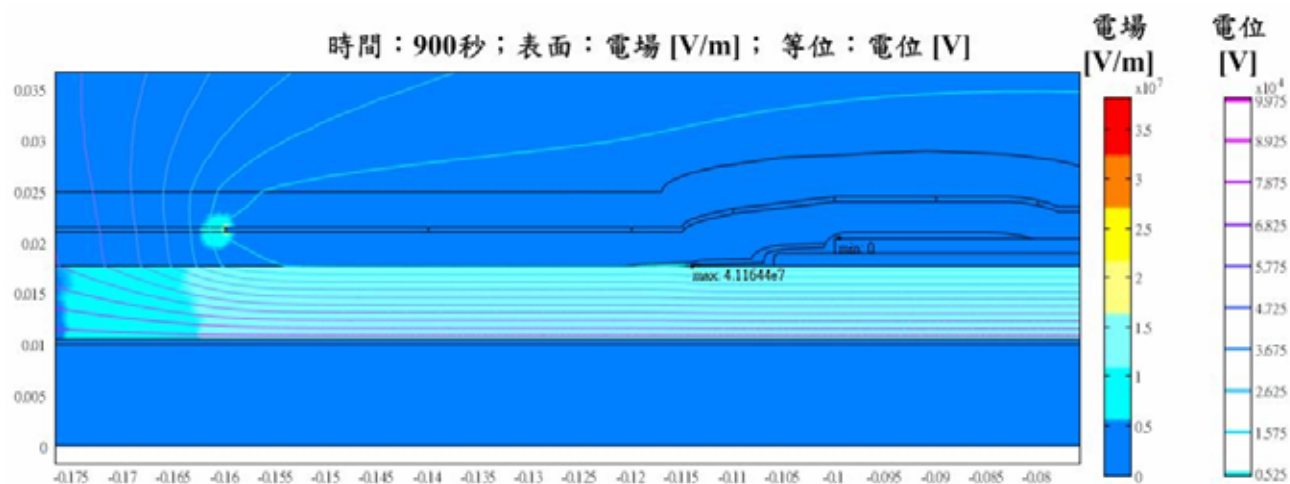


圖 6.4-5 直流耐壓試驗時添加半導體層後最終的電場、電位

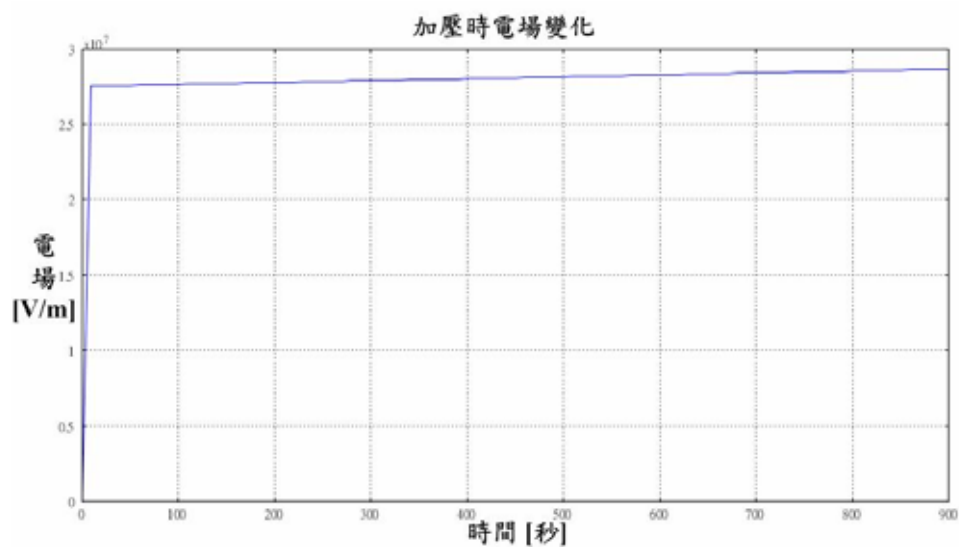


圖 6.4-6 添加半導體層後原電場最高處的電場與時間關係

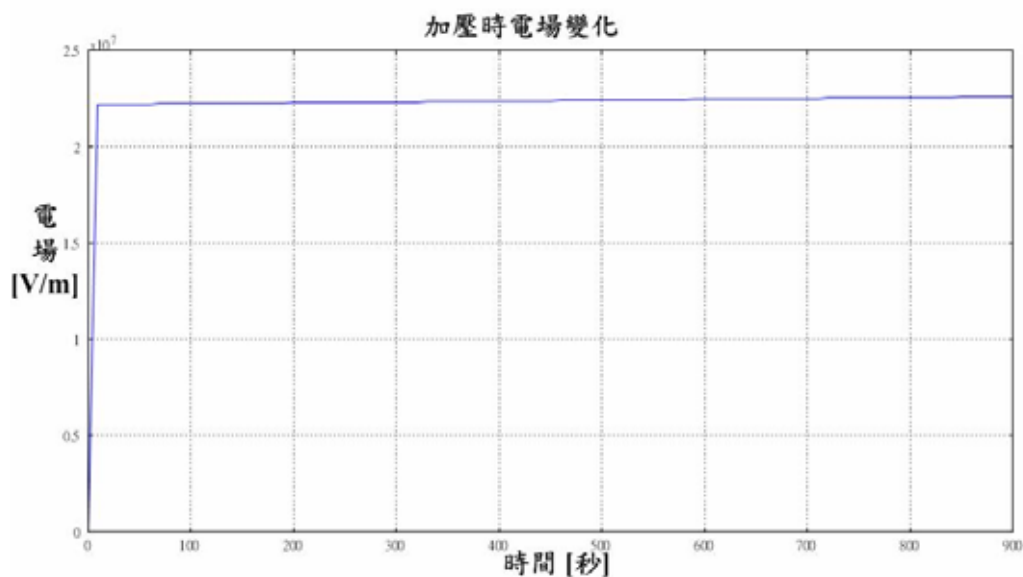


圖 6.4-7 添加半導體後半導體最前端電場與時間關係圖

由圖 6.4-3 的正常電纜終端觀察：在直流耐壓試驗中最大電場值依然集中在 13 號半導體膠帶末端下的絕緣層且高達 $1.2 \times 10^8 \text{ V/m}$ ，該點在加壓過程中的電場與時間關係如圖 6.4-4，在改善後最大電場抑低為 $4.1 \times 10^7 \text{ V/m}$ ，該點改善後的電場與時間關係則為圖 6.4-6，最大電場值抑低至 1/3，且額外添加的半導體末端的電場也控制在 $2 \sim 2.5 \times 10^7 \text{ V/m}$ 左右。

綜合以上模擬結果可知，此層結構並不會造成並不會造成該電纜終端於耐壓試驗中結構弱化，更抑低了其最大電場值，增強其耐電壓能力。