

# 澳門低壓電線在過流狀態下之熱性能研究

譚立武、譚浩崑、吳華俊\*

**摘要：**本澳家家戶戶普遍都會用到低壓電線，這些在電器舖或五金舖都可以買到，但對於它的安全性，甚少本地文章會利用科學數據作出討論。因此，本研究設計並開發了一套科學實驗裝置，以測試低壓電線在過流條件下的性能反應，從而驗證本地常用電線的安全性，實驗數據亦可幫助驗證電腦模擬結果，使消防性能化模擬分析更可靠地反映電線導致火災的成因。本實驗測試了本地購買的三組PVC電線，結果顯示在同樣過流情況下電線粗幼與溫度有關，而溫升的幅度與電流強度成正比。當過流不超過電線額定電流的1.3倍，PVC絕緣表面溫度會低於70°C，外觀上仍然保持完好，亦符合技術規範的工作溫度要求。本研究最後亦綜合了溫度與電線物理變化的關係。

**關鍵詞：**電力火災 低壓電線 科學實驗

## 一、研究背景

從2016年至2020年，每年有幾十宗電線短路<sup>1</sup>，大概佔每年火災起因分類中6至8%。從數字上看，由電力導致火災的比率不算十分高，但電力火災每年都會慣常出現。最近，在本澳多處先後發生了多宗因電器設備或電線短路而引起的火災，其中，發生在2022年8月20日的提督馬路惠愛大廈火災尤其嚴重，大廈某單位起火，消防奮力將火救熄，並從大廈內救出十人，包括起火單位內的一對父子，該起火單位嚴重焚燬，消防初步調查顯示，懷疑是電器電線短路導致。在2022年11月18日早上，十月初五街的三層高電業老舖發生火警，消防初步懷疑由地舖光管電線短路引致。有見及此，此火災根源必定不能被忽視。

## 二、線材簡介及實驗設置

本地家用的低壓電線一般會使用聚氯乙烯(PVC)絕緣電線，線的組成包括PVC外層護套、銅導體及保護每條導體的PVC絕緣層，Wickson<sup>2</sup>列出了典型PVC電線/電纜的絕緣層配方包括52–63%的PVC樹脂、25–29%的增塑劑、大約16%的其他機械性填充物(但偶爾會低至5%)、2–4%的穩定劑、0.2–0.3%的蠟，以及小量的潤滑劑、着色劑或阻燃劑。當PVC受熱時，Babrauskas<sup>3</sup>指出PVC的熱降解過程可分為兩個階段，第一階段的過程被稱為“脫氯化氫”，氯化氫(HCL)分子會被釋放出來，剩下聚乙炔(CH=CH)<sub>n</sub>的聚合物材料。對於純PVC的材料，“脫氯化氫”過程會持續到250–285°C，對於有添加物的線材，此過程會持續到360°C，當繼續加熱，溫度升高超過350–500°C，此時便會到達第二階段“高溫裂解”過程，PVC材料會被燃燒分解，最後只剩下灰燼。

\* 譚立武，澳門大學科技學院機電工程系教授，美國奧克拉荷馬州立大學機械工程博士。

\* 譚浩崑，澳門大學科技學院機電工程系高級技術與行政事務主任，澳門大學科技學院機電工程系博士。

\* 吳華俊，澳門大學科技學院機電工程系碩士。

1. 《澳門年鑑》，澳門特別行政區政府新聞局，2016年至2020年。

2. Wickson, E. J., Handbook of Polyvinyl Chloride Formulating, New York: Wiley, 1993.

3. Babrauskas, V., “Mechanisms and Modes for Ignition of Low-Voltage PVC Wires, Cables, and Cords,” Fire & Materials, Interscience Communications Ltd., London, 2005, pp. 291–309.

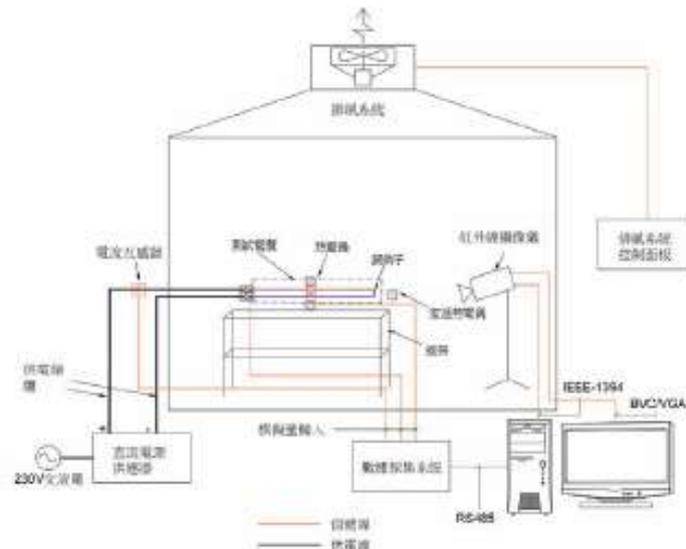


圖1 實驗設備系統圖

導致 PVC 絕緣層點燃的原因很多<sup>4</sup>，包括：(a) 製造過程中的缺陷；(b) 過大的電流；(c) 過厚的絕緣，有時因為過電流狀態而加劇；(d) 導體斷裂引起的局部加熱；(e) 由於用釘或機械切斷電線而引起的局部加熱；(f) 由於端子接觸不良導致的局部加熱等等。因為電線過流常有發生，所以本次研究會以可控的方式造成電線過流，測試低壓 PVC 電線的物理及熱性能變化。為了實驗安全，實驗設備被放置在一個不可燃且附有排煙過濾功能的實驗空間內進行（見圖 1），設備大致可分為三個部分：(I) 電線測試段、(II) 直流電源供應器及 (III) 實驗數據採集系統。

### （一）電線測試段

在工程業中，直徑較細的電纜俗稱為“電線”，本地五金店的家用低壓 PVC 電線，導體橫截面尺寸一般是  $1.5\text{mm}^2$  及  $2.5\text{mm}^2$ ， $1.5\text{mm}^2$  的電線用於照明燈具和電路控制，而  $2.5\text{mm}^2$  的電線用於供電插座，基於這兩種電線較常使用，所以本研究將針對這兩種導體尺寸的 PVC 線進行測試。按圖 2，測試電線分為三組，表 1 列出了線材的規格，電線只有 PVC 絕緣但沒有加護套代號為 V，有 PVC 絕緣及 PVC 加護套的電線代號為 VV，而數字則代表導體橫截面面積。

根據電線產品目錄顯示，本實驗所測試之 V 型電線符合國際標準 IEC 60227、國家標準 GB/T 5023.1 及 CEM 技術規範中對電線的要求，VV 型測試電線則符合英國標準 BS 6004 及內地工業標準 JB/T 8734.2。

### （二）直流電源供應器

本實驗使用的電源為兆信 KXN-15200D 直流電源，該產品電流穩定度之誤差小於 0.5%，可以為電線提供 0—200 安培 (A) 的電流，整個實驗的電流被控制在 10A 至 90A 的範圍值之間。

### （三）實驗數據採集系統

騰輝儀錶 THM12K 實驗數據採集器用於採集電線之電壓、電流和溫度數據，該設備支持模擬信號輸入，再由採集器輸送到電腦作分析處理。另外，本實驗亦設置了熱成像儀，觀察整條測試電線在升溫時表面溫度是否均勻（見圖 3），從而判斷線材的質量是否存在瑕疵。

4. 同註 3。

規格 (協調標準名稱)	組成部分	測試段長度	PVC 絕緣厚度及尺寸	生產標準
V1.5mm <sup>2</sup> (H05V-U2X1.5mm <sup>2</sup> )	銅導體, PVC 絕緣	300mm	絕緣厚度: 0.86mm	GB/T5023.1、 IEC60227
VV1.5mm <sup>2</sup> (H05V-R2G1.5mm <sup>2</sup> +1.0mm <sup>2</sup> )	銅導體, PVC 絕緣及護套	300mm	絕緣厚度: 0.86mm 護套尺寸: 4.4mm(w)*8.3mm(d)	BS6004 JB/T 8734.2
VV2.5mm <sup>2</sup> (H05V-R2G2.5mm <sup>2</sup> +1.5mm <sup>2</sup> )	銅導體, PVC 絕緣及護套	300mm	絕緣厚度: 0.96mm 護套尺寸: 5.2mm(w)*9.8mm(d)	BS6004 JB/T 8734.2

表1 測試電線的規格表



圖2 三組待測試的電線

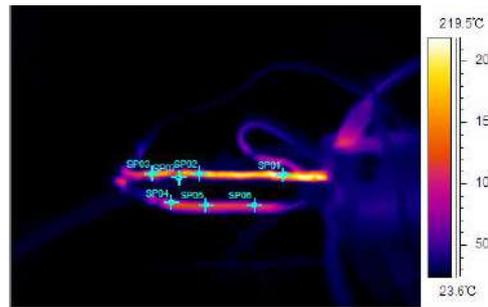


圖3 利用熱成像觀察的電線升溫狀況

### 三、實驗系統之驗證及測試結果

#### (一) 實驗系統之驗證

電線在實驗中的溫度上升，是由導體的電阻熱產生，熱量 ( $\dot{Q}$ ) 與電阻 (R) 之間的關係為：

$$\dot{Q} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

公式中，I 為電流安培值 (A)。

為求導體通過 PVC 絕緣層的傳熱量，可以利用傅立葉定律，解一維圓柱形之熱傳導公式<sup>5</sup>：

$$\dot{Q} = -k_{PVC} A \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

公式中，A 是導體的圓柱表面面積 (m<sup>2</sup>)，k<sub>PVC</sub> 為 PVC 的導熱系數 (W/m · K)， $\frac{dT}{dr}$  是通過 PVC 絕緣層的溫度梯度。

同時，一維圓柱形穩態傳熱模型中的熱阻 (R<sub>plastic</sub>) 可以由公式 (2) 推導為下式：

$$R_{Plastic} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_{plastic}} \quad (3)$$

公式中，R<sub>plastic</sub> 是絕緣層熱阻 (K/W)，r<sub>1</sub> 是電線的半徑 (mm)，r<sub>2</sub> 是由電線中心到絕緣層的半徑 (mm)。當處於穩態熱傳遞時，導體的傳熱率與絕緣層熱阻和絕緣層的溫差的關係能用以下公式表示：

$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_1}{R_{plastic}} \quad (4)$$

公式中，T<sub>1</sub> 是電線銅導體的溫度 (°C)，T<sub>2</sub> 是電線 PVC 絕緣層的外表溫度 (°C)。

5. Çengel, Y. A., and Ghajar A. J., Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications, 5th edition, New York: McGraw-Hill Education, 2015.

公式 (1) 代入公式 (4) 式，可以得出：

$$T_2 = T_1 - (I^2 \cdot R) \cdot R_{plastic} \quad (5)$$

為了驗證實驗系統的準確度，在實驗開始時，我們先對單層絕緣 PVC 電線（代號：V1.5mm<sup>2</sup>）進行通電測試，電流控制在 20 安培，參見圖 4，實驗時會測量絕緣層內部（ $T_{1, \text{量度}}$ ）與外部（ $T_{2, \text{量度}}$ ）的溫度，絕緣層的內部（ $T_{1, \text{量度}}$ ）會用作計算穩態溫度值（ $T_{2, \text{計算}}$ ）。

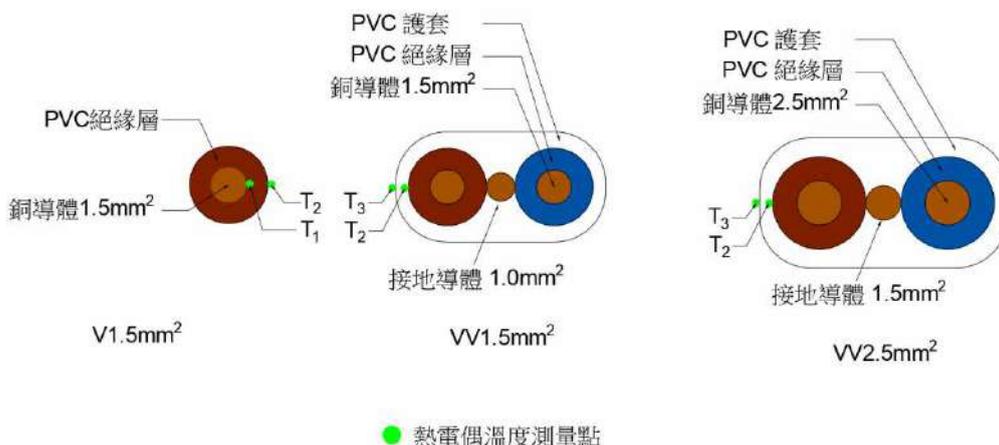


圖4 測試電線的橫截面示意圖

圖 5 繪製出絕緣層的外部表面溫度測量值（ $T_{2, \text{量度}}$ ）及利用公式 (5) 計算的穩態溫度值（ $T_{2, \text{計算}}$ ）的曲線，當電線被加熱，圖中的測量溫度（ $T_{2, \text{量度}}$ ）會由室溫開始升高，大概 200 秒，會升到一個穩定的溫度值，該穩定的測量溫度與理論計算的結果相差不超過 6.2%，由於誤差不大，證明了實驗系統是可靠的。

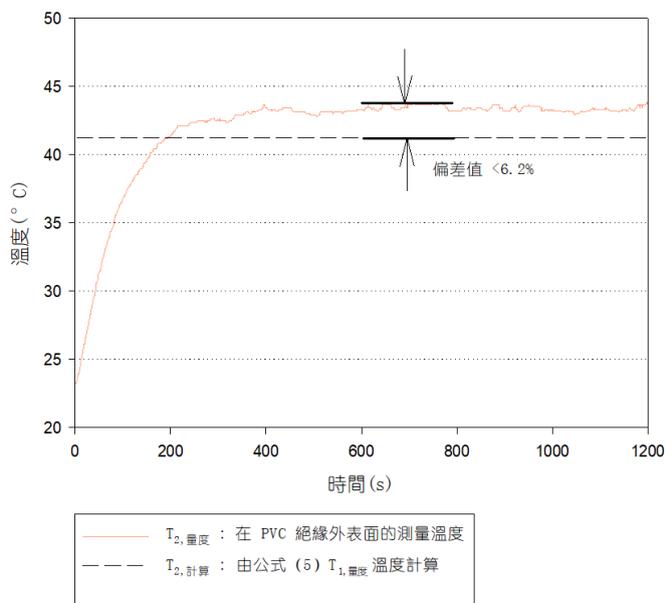


圖5 實際測量的溫度與理論計算的結果的比較

## (二) 測試結果

### 1. 物理變化

對於單層 PVC 絕緣單芯電線 (V1.5mm<sup>2</sup>)，提供的電流範圍為 20A 至 60A，根據 CEM 的 NCEM C14-100 技術規範中的附件 6 和附件 7，VV1.5mm<sup>2</sup> 和 VV2.5mm<sup>2</sup> 電線的允許可載電流最大值分別為 22A 及 30A<sup>6</sup>。因此，本實驗施加於 VV1.5mm<sup>2</sup> 及 VV2.5mm<sup>2</sup> 電線的最小電流值分別設定為 20A 及 30A。當施加於 VV1.5mm<sup>2</sup> 及 VV2.5mm<sup>2</sup> 電線的電流超過 60A 及 90A 時，絕緣層很快便會被破壞掉，因此，對那兩組電線 (VV1.5mm<sup>2</sup> 及 VV2.5mm<sup>2</sup>) 只測試到 60A 及 90A。

每次實驗會用一條新的電線為測試段，系統每次只設定一個特定電流值並維持 1,200 秒，在實驗過程中，研究員會目測電線的物理變化（出煙、分解、碳化等等）及用電腦記錄溫度數據。對於單層 PVC 絕緣單芯電線 (V1.5mm<sup>2</sup>) 的物理變化，當電流小於 40A，電線表面沒有任何變化。當電流升到 50A 時，PVC 絕緣開始產生煙霧，並發生輕微分解。參見表 2，當電流升到 60A 時，電線的 PVC 絕緣層在整個過程會冒煙、劇烈分解及輕度碳化。

對於 VV1.5mm<sup>2</sup> 電線的物理變化，當電流小於 40A 時，電線表面沒有任何變化。當電流升到 50A 時，PVC 絕緣層開始產生煙霧和輕微分解。參見表 3，當電流升到 60A 時，電線的 PVC 絕緣層在整個過程會冒煙、劇烈分解及輕度碳化。雙層 PVC 絕緣多芯電線 (VV1.5mm<sup>2</sup>) 內裡是兩條單層 PVC 絕緣單芯電線 (V1.5mm<sup>2</sup>)，因為內部的單層電線的絕緣層會在 60A 時才產生分解甚至碳化（見表 2），所以雙層 PVC 絕緣多芯電線 (VV1.5mm<sup>2</sup>) 要在同樣的電流值才產生外皮絕緣分解，屬可理解。

物理變化	能觀察到煙霧，溫度為 112° C	在 145° C 下觀察到絕緣出現分解	觀察到絕緣出現分解，溫度約為 199° C	實驗結束時，絕緣發生輕微碳化，溫度約為 260° C
實驗時間 (分:秒)	1:30	2:10	4:18	20:00
圖片				

表2 單層PVC絕緣單芯電線(V1.5mm<sup>2</sup>)在60安培過流下的物理變化

6. 《NCEM C14-100 建築物電氣裝置低壓供電一般技術規範》，澳門電力股份有限公司，2019 年。

對於  $VV2.5\text{mm}^2$  電線的物理變化，當電流小於 70A 時，電線表面沒有任何變化。當電流升到 80A 時，PVC 絕緣層開始產生煙霧並發生輕微分解。參見表 4，當電流升到 90A 時，電線的 PVC 絕緣層在整個過程會冒煙、劇烈分解及碳化。

綜合三組電線結果，當電流升到 60A 時，電能才會顯著破壞單層 PVC 絕緣單芯電線 ( $V1.5\text{mm}^2$ ) 及雙層 PVC 絕緣多芯電線 ( $VV1.5\text{mm}^2$ ) 的絕緣層；而電流要達到 90A 時，電流才會顯著破壞雙層 PVC 絕緣多芯電線 ( $VV1.5\text{mm}^2$ ) 的絕緣層。另外，綜合全部實驗，都未發現有火花、燃燒及電線斷開的現象。

物理變化	能觀察到絕緣軟化 溫度為 $121^\circ\text{C}$	觀察到出現煙霧 溫度為 $143^\circ\text{C}$	觀察到劇烈分解 溫度為 $185^\circ\text{C}$	20 分鐘後，溫度為 $230^\circ\text{C}$ 情況持續可達到約 $260^\circ\text{C}$
實驗時間 (分:秒)	4:26	5:56	14:00	20:00
圖片				

表3 雙層PVC絕緣多芯電線( $VV1.5\text{mm}^2$ )在60安培過流下的物理變化

物理變化	能觀察到煙霧，溫度 為 $204^\circ\text{C}$	在 $227^\circ\text{C}$ 時觀察到 絕緣分解	在 $240^\circ\text{C}$ 時，護套 劇烈冒煙並分解	實驗結束時，護套 出現碳化，溫度約在 $290^\circ\text{C}$
實驗時間 (分:秒)	6:33	7:28	9:54	20:00
圖片				

表4 雙層PVC絕緣多芯電線( $VV2.5\text{mm}^2$ )在90安培過流下的物理變化

## 2. 溫度變化

由於要分析過流對電線升溫的影響，見圖 4，熱電偶被安排在 PVC 絕緣層 ( $T_2$ ) 和 PVC 外護套 ( $T_3$ ) 的位置。

圖 6 顯示了雙層 PVC 絕緣多芯電線 (VV1.5mm<sup>2</sup>) 在 20 安培至 60 安培過流下的溫度曲線，所有的溫度曲線先呈拋物線形上升，然後在 300 秒後逐漸趨向穩定，溫升的幅度與電流強度成正比。當過流控制在 30A (額定電流的 136%) 時，PVC 絕緣表面溫度仍低於 70°C，符合 NCEM 技術規範<sup>7</sup> 和 BS 6004:2012 表 C.1 的工作溫度要求<sup>8</sup>。當電流增加到 60A 時，最高溫度可以上升到 230°C。當比較在相同電流下 PVC 內部絕緣層的溫度 ( $T_2$ ) 和 PVC 外護套的溫度 ( $T_3$ )，明顯可以看到  $T_2$  的溫升比  $T_3$  快，因為銅線的能量先傳到內部絕緣層，再利用導熱的方式把熱傳到外護套，內外溫度所以有落差，但最後會到達穩態，穩態下  $T_2$  與  $T_3$  的溫度不會有太大的分別。

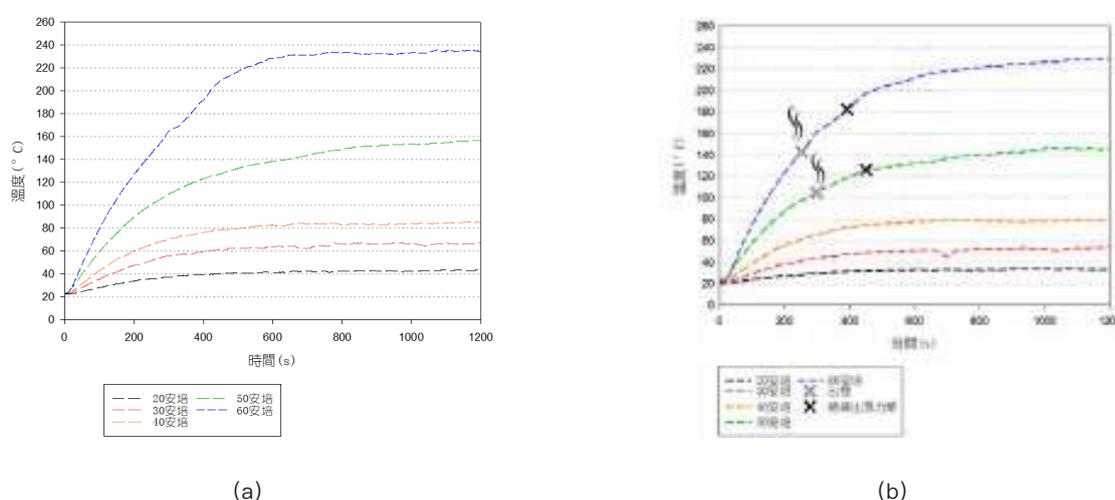


圖6 雙層PVC絕緣多芯電線(VV1.5mm<sup>2</sup>)在20安培至60安培過流下的溫度曲線: (a) PVC絕緣層溫度,  $T_2$ ; (b) PVC外護套溫度,  $T_3$ 。

圖 7 顯示了雙層 PVC 絕緣多芯電線 (VV2.5mm<sup>2</sup>) 在 30 安培至 90 安培過流下的溫度曲線，所有的溫度曲線先呈拋物線形上升，然後在 400 秒後逐漸趨向穩定，升溫的幅度與電流強度成正比。當過流控制在 40A (額定電流的 133%) 時，PVC 絕緣表面溫度仍低於 70°C，符合 NCEM 技術規範和 BS 6004:2012 表 C.1 的工作溫度要求<sup>9</sup>。當電流增加到 60A 時，PVC 外護套溫度 ( $T_3$ ) 上升至 100°C，與電線 (VV1.5mm<sup>2</sup>) 作比較 (見圖 6)，當電流同樣增加到 60A 時，PVC 外護套溫度 ( $T_3$ ) 的溫升會達到 230°C，因此，電流過大確實會對較細的電線造成損壞的影響。

看圖 7，當電流增加到 90A 時，PVC 外護套溫度 ( $T_3$ ) 溫度上升到大約 300°C，遠遠超過 80A 以下電流所產生溫度。根據 Babrauskas 所編寫的點燃手冊<sup>10</sup>，PVC 絕緣的自動初始點燃溫度界於在 263°C 至 454°C 之間，因此，90A 的過流已經到達了 PVC 絕緣的起火範圍。當比較 PVC 內部絕緣層 ( $T_2$ ) 和 PVC 外護套 ( $T_3$ ) 在相同電流下的溫度， $T_2$  與  $T_3$  的溫升速度相約，最後在穩態下，在 60 安

7. 同註 6。

8. BS 6004:2012, Electric cables – PVC insulated and PVC sheathed cables for voltages up to and including 300/500 V, for electric power and lighting, London: BSI, 2012.

9. 同註 8。

10. Babrauskas, V., Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science, Washington: Fire Science Publishers, 2003.

培以下， $T_2$  與  $T_3$  的溫度不會有太大的分別，但在 80 安培與 90 安培的過流下， $T_2$  較  $T_3$  的溫度為高，由於實驗時間還未夠長，內部的熱量還未完全傳到外護套，所以內部溫度較外部的溫度高。

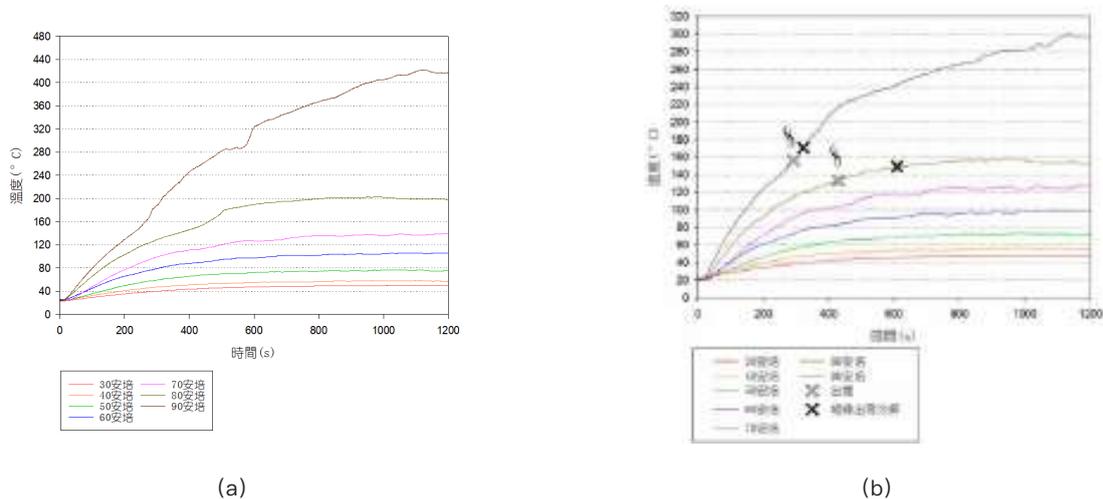


圖7 雙層PVC絕緣多芯電線(VV2.5mm<sup>2</sup>)在30安培至90安培過流下的溫度曲線: (a) PVC絕緣層溫度,  $T_2$ ; (b) PVC外護套溫度,  $T_3$ 。

利用實驗的溫度與物理變化的結果，可以綜合成表 5，電線的 PVC 絕緣層從  $105^{\circ}\text{C}$  到  $120^{\circ}\text{C}$  開始冒煙，電線在  $120^{\circ}\text{C}$  軟化，電線絕緣在  $150^{\circ}\text{C}$  左右開始分解，而超過  $200^{\circ}\text{C}$  就會出現碳化。根據國際文獻的研究結果<sup>11-13</sup>，PVC 絕緣材料會在  $200^{\circ}\text{C}$  到  $240^{\circ}\text{C}$  之間分解，在本研究中的分解溫度亦相對接近。除了過流會出現碳化，Babrauskas<sup>14</sup> 的研究指出在連接不良或短路的情況下亦可能導致局部熱點，繼而令電線的絕緣材料產生碳化，因為碳化的絕緣面可以導電並與外界金屬產生電弧，釀成火災的危險。另一點需要注意的是，本文實驗中電線是暴露於空間中，若電線是藏喉或藏於隔牆內，由於散熱問題，在同一過流的條件下，電線的溫度會較高，所以在相同載流的情況下，藏喉的電線應選擇較大截面積以減低電線的溫升。

PVC 絕緣的表面溫度	物理現象
$105^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$	冒煙
$120^{\circ}\text{C}$	軟化收縮
$150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$	分解
超過 $200^{\circ}\text{C}$	碳化

表5 過流實驗中的測試電線在不同溫度下的物理變化

- Keski-Rahkonen, O. and Mangs, J., "Electrical ignition sources in nuclear power plants: Statistical, modeling and experimental studies," Nuclear Engineering and Design – NUCL ENG DES, vol. 213, 2002, pp. 209–221.
- Kök, M., Demirelli, K., and Aydogdu, Y., "Thermophysical Properties Of Blend Of Poly (Vinyl Chloride) With Poly (Isononyl Acrylate)," International Journal of Science and Technology, vol. 3, no. 1, 2008, pp.37–42.
- Armstrong, R. W., Mason, J., Kumar, A., and Hall, J. E., "Thermally Induced Failure of Low-Voltage Electrical Nonmetallic-Sheathed Cable Insulation," Fire Technology, vol. 35, no. 3, 1999, pp. 263–275.
- 同註 3。

#### 四、總結

本研究通過電線過流實驗，測試了本地購買的三組電線，結果可綜合如下：

- 在同樣電流下，較幼電線(VV1.5mm<sup>2</sup>)的溫度會較較粗電線(VV2.5mm<sup>2</sup>)的溫度為高。
- 所有電線的升溫曲線都是先呈拋物線上升，然後在5分鐘後便逐漸趨向穩定，溫升的幅度與電流強度成正比。
- 當過流不超過電線額定電流的1.3倍，PVC絕緣表面溫度會低於70°C，外觀上仍然保持完好，亦符合技術規範的工作溫度要求。
- 本研究得出了溫度與電線物理變化的關係：105°C到120°C開始冒煙；120°C開始軟化；150°C左右開始分解；而超過200°C會出現碳化。

隨着智慧城市的發展，本地的電力設施將會逐步增加，筆者期望通過本研究之電線評估，讓讀者瞭解多一些電力火災的理論，以及為提升本地消防安全提供一些確實的科學數據作參考之用。

#### 參考文獻

1. 《澳門年鑑》，澳門特別行政區政府新聞局，2016年至2020年。
2. Babrauskas, V., “Mechanisms and Modes for Ignition of Low-Voltage PVC Wires, Cables, and Cords,” Fire & Materials, Interscience Communications Ltd., London, 2005, pp. 291–309.
3. Çengel, Y. A., and Ghajar A. J., Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications, 5th edition, New York: McGraw–Hill Education, 2015.
4. 《NCEM C14–100 建築物電氣裝置低壓供電一般技術規範》，澳門電力股份有限公司，2019年。
5. Babrauskas, V., Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science, Washington: Fire Science Publishers, 2003.