

竹炭窯溫度自動控制模組專利介紹

◎林業試驗所森林利用組·林裕仁

前言

竹炭燒製設備主要有土窯與機械窯兩種，土窯與機械窯相較下，建造價格較便宜，不需使用電力或石化燃料等外加能源，能源消耗較節約，精煉溫度可較高，每窯次所燒製之竹炭產量較大，竹炭之機能性質與品質較佳，適合臺灣地區竹炭業之長期發展，因此，目前國內竹炭生產業者以使用土窯生產竹炭所佔比例較高。然以土窯生產竹炭之製程中仍有耗費人力過多，生產成本始終居高與人為操作無法避免操作者之主觀差異等缺點。因而，如何節省人力，降低生產成本，同時提高製程溫度控制之客觀與準確性，提昇製程效率與竹炭品質是採用土窯燒製竹炭業者亟需面對改善之課題。

土窯生產竹炭製程簡述

圖1係竹炭與竹醋液生產之基本流程圖。竹材原料在經選料購入後，進行相同長度之裁切，以配合炭窯尺寸，利於進窯及窯內排列，以滿足窯體內最大容納量。竹徑較大之竹材(如孟宗竹)，每段竹材需再經過縱向剖切成片，剖切後竹片須網綁成束，以增加竹材進窯量，增加生產量，而製炭完成之竹炭成品將成片炭形式。若竹徑較小，則無需縱向剖切即網綁成束進窯(如桂竹)，所燒製完成之竹炭成品將

成筒炭形式。竹材網綁成束後，須先經煙燻及氣乾處理，降低竹材含水率，通常進窯時含水率在14~16%。竹材進窯後開始點火暖窯，後升溫攻火進行炭化及精煉過程，炭化達到產品所要之最高溫度後，即將窯門進氣口與排煙口全面封住予以封窯，空氣經阻隔後窯內升溫停止，並開始降溫，待溫度降至常溫才拆卸窯門，將窯內之原竹炭成品搬運出窯，進行檢視、切鋸、分級等包裝前之加工流程。土窯生產竹炭製程所需時間約12~14日。

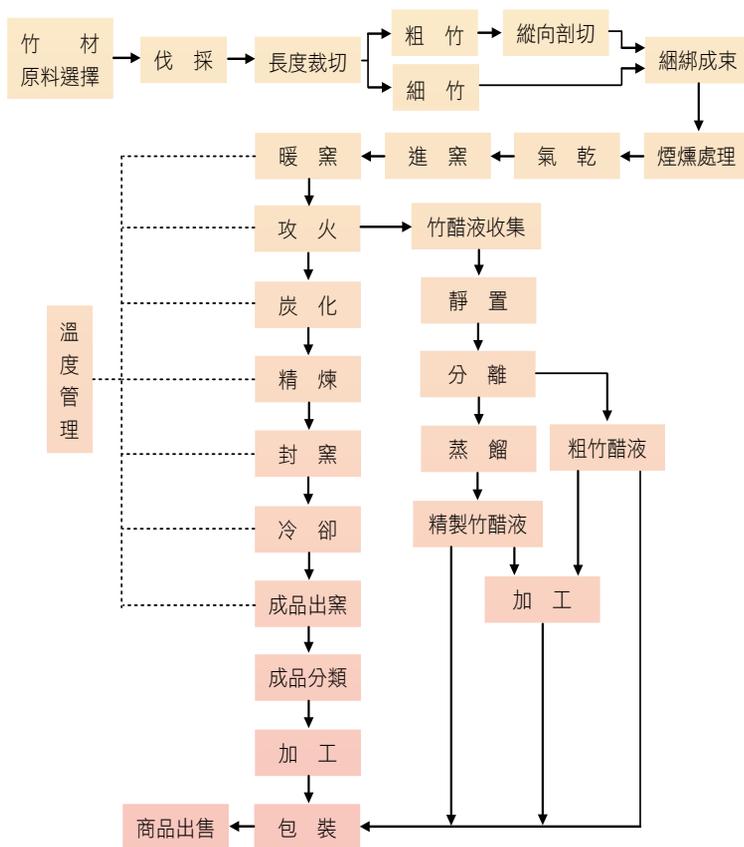


圖1 竹炭、竹醋液之生產流程圖

表1 不同炭化溫度燒製竹炭與木炭工業分析與元素分析(藤原 敏等，2003)

| Raw Mater. | Temp. (°C) | Proximate analysis (%) | | | Elemental analysis (%) | | | | | | | | pH | |
|------------|------------|------------------------|---------------|------|------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|----------------|
| | | Ash | Volatile Fix. | Car. | C | H | N | O | Na | K | Mg | Ca | Air | N ₂ |
| Mo | 400 | 4.2 | 21.6 | 74.2 | 75.8 | 3.3 | 0.5 | 16.2 | 0.01 | 1.57 | 0.18 | 0.06 | 9.12 | 9.01 |
| | 600 | 5.7 | 8.9 | 85.4 | 84.3 | 2.1 | 0.5 | 7.4 | 0.02 | 0.79 | 0.16 | 0.06 | 9.56 | 8.98 |
| | 800 | 5.3 | 4.2 | 90.5 | 86.5 | 0.9 | 0.7 | 6.6 | 0.02 | 1.91 | 0.19 | 0.06 | 9.38 | 9.24 |
| Ma | 400 | 3.8 | 19.9 | 76.3 | 76.1 | 3.3 | 0.4 | 16.4 | 0.02 | 0.21 | 0.13 | 0.08 | 8.31 | 8.86 |
| | 600 | 4.5 | 6.4 | 89.1 | 84.5 | 2.1 | 0.6 | 8.3 | 0.02 | 0.54 | 0.14 | 0.09 | 9.53 | 8.88 |
| | 800 | 4.6 | 2.2 | 93.2 | 86.3 | 1.1 | 0.6 | 7.4 | 0.01 | 1.61 | 0.23 | 0.06 | 9.61 | 8.92 |
| Hi | 400 | 0.9 | 27.8 | 72.2 | 78.2 | 3.8 | 0.2 | 16.9 | 0.03 | 0.19 | 0.05 | 0.29 | 5.29 | 4.52 |
| | 600 | 1.3 | 10.2 | 88.5 | 85.1 | 2.3 | 0.2 | 11.1 | 0.02 | 0.28 | 0.06 | 0.39 | 7.46 | 9.01 |
| | 800 | 1.2 | 4.2 | 94.6 | 87.3 | 1.4 | 0.2 | 9.9 | 0.02 | 0.35 | 0.06 | 0.25 | 9.15 | 9.11 |
| Ak | 400 | 1.3 | 24.9 | 73.8 | 74.5 | 3.6 | 0.3 | 20.3 | 0.01 | 0.07 | 0.05 | 0.17 | 4.54 | 4.83 |
| | 600 | 1.2 | 7.9 | 90.9 | 84.6 | 2.1 | 0.2 | 11.9 | 0.01 | 0.14 | 0.08 | 0.26 | 5.84 | 6.76 |
| | 800 | 0.9 | 2.8 | 96.3 | 87.2 | 1.2 | 0.2 | 10.5 | 0.01 | 0.19 | 0.08 | 0.27 | 8.62 | 8.05 |
| Ko | 400 | 2.3 | 29.3 | 68.4 | 73.5 | 3.5 | 0.2 | 20.5 | 0.01 | 0.48 | 0.05 | 0.27 | 6.42 | 8.78 |
| | 600 | 2.5 | 7.7 | 89.8 | 83.1 | 2.1 | 0.2 | 12.1 | 0.01 | 0.55 | 0.06 | 0.33 | 8.71 | 9.21 |
| | 800 | 2.2 | 4.3 | 93.5 | 86.2 | 1.2 | 0.2 | 10.2 | 0.02 | 0.58 | 0.06 | 0.37 | 9.46 | 8.99 |

Legend: Mo: Mousouchiku (孟宗竹), Ma: Madake (麻竹), Hi: Hinoki (日本扁柏), Ak: Akamatsu (日本赤松), Ko: Konara (青栲櫟)

炭化溫度與竹炭性質之關係

影響竹炭性質之重要因素除竹材種類與竹材含水率外，尚有升溫速率、炭化最高溫度及持溫時間等因素。各因素影響竹炭之性質說明如下：

一、竹材種類

不同原料所含之組成份不同，經炭化後之成份也會不同。例如孟宗竹炭在相同炭化溫度比較下，其灰分(ash)含量均比麻竹炭為高；另其鉀(K)含量在相同炭化溫度比較下亦均較麻竹炭為高(如表1)。

二、竹材含水率

在竹材結構內之結合水在窯內高溫狀態下會產生汽化現象，其結合水比例若太高，將

影響窯內水氣蒸發時間，延後自發性炭化之開始，因而延長其炭化時間，影響燒製竹炭效率。此外，若含水率太高，升溫速率又未適當掌握，竹炭表面會起皺褶、氣泡突、無光澤等瑕疵現象，大大降低竹炭成品賣相。

三、炭化最高溫度

炭化最高溫度將影響竹炭之pH、真密度(true density)、電阻係數(electric resistivity)、比表面積(BET)及碳含量(carbon content)比例，另說明如下：

1. pH：竹炭pH值皆呈現鹼性，然在600°C以下通常低於9.0，在600°C以上通常高於9.0，與炭化溫度之關係並非很明顯。然木炭之pH值則隨炭化溫度之升高而由酸性變為鹼性，其關係非常明顯，通常600°C以上較高炭化溫

度之木炭pH值 > 9.0，在400~500°C較低碳化溫度之木炭化物pH值 < 6.0，呈微酸性。

2. 真密度(true density)：不同竹材之竹炭之真密度均隨炭化溫度之升高而明顯增大(如表2)。
3. 電阻係數(electric resistivity)：不同竹材之竹炭之電阻係數隨炭化溫度之升高而明顯降低(如表3)。
4. 比表面積(BET)：不同竹材之竹炭比表面積隨炭化溫度之升高也明顯增大(如表4)。
5. 碳含量(carbon content)：竹炭之碳含量隨炭化溫度之升高明顯增大(如表1)。

四、升溫速率

竹炭土窯內炭化時溫度分佈通常係由上層往下層移動，上層溫度往往比下層溫度高且較快抵達高溫，因此上下層間有溫度差。由於窯內溫度分佈有此特性，為降低窯內上下層溫

度差異，且為進行二次炭化達到精煉效應，炭化過程必須於不同溫度階段調配不同之升溫速率，方能生產品質佳之竹炭。例如在暖窯作業排煙口之孔隙維持在小隙縫，控制其升溫速率在1°C/hr以下；當溫度達到開始攻火作業時排煙口之孔隙須全開，以迅速提昇其升溫速率。升溫速率若太快，即使炭化溫度有達到高溫目標，竹炭表面將會產生龜裂、氣泡突、細砂點等瑕疵現象，無法獲得具光澤之平滑表面。升溫速率若過慢，窯內竹材損耗將增加，同時延長炭化時間，將降低生產效益。

五、持溫時間

持溫時間需根據窯內炭化溫度做適時調整，若持溫時間過短，炭化時間不足，將無法降低其電阻係數，無法提高其導電性。持溫時間過長，將增加竹材之耗損量，降低其收炭率。

表2 不同竹材於不同炭化溫度之竹炭真密度測試結果

| 炭化溫度 (°C) | 真密度 g/cc | | |
|-----------|----------|------|------|
| | 孟宗竹 | 桂竹 | 麻竹 |
| 774 | 1.95 | 1.96 | 2.04 |
| 745 | 1.87 | 1.90 | 1.91 |
| 695 | 1.76 | 1.77 | 1.79 |
| 609 | 1.58 | 1.61 | 1.62 |
| 537 | 1.51 | 1.52 | 1.52 |

表4 不同竹材於不同炭化溫度之竹炭比表面積測試結果

| 炭化溫度 (°C) | 比表面積 (m ² /g) | | |
|-----------|--------------------------|-------|-------|
| | 孟宗竹 | 桂竹 | 麻竹 |
| 774 | 451.5 | 453.3 | 514.9 |
| 745 | 362.4 | 347.7 | 385.9 |
| 695 | 353.4 | 226.9 | 350.9 |
| 609 | - | 194.1 | - |
| 537 | 120.8 | - | 150.2 |

表3 不同竹材於不同炭化溫度之竹炭電阻係數測試結果

| 炭化溫度 (°C) | 電阻係數 (Ω · cm) | | |
|-----------|---|---|--|
| | 孟宗竹 | 桂竹 | 麻竹 |
| 774 | 1.2 × 10 ⁰ (0.95~1.89 × 10 ⁰) | 0.8 × 10 ⁰ (0.64~1.41 × 10 ⁰) | 1.6 × 10 ⁰ (0.97~2.27 × 10 ⁰) |
| 745 | 1.3 × 10 ⁰ (0.88~1.94 × 10 ⁰) | 1.1 × 10 ⁰ (0.87~1.30 × 10 ⁰) | 2.2 × 10 ⁰ (1.58~2.31 × 10 ⁰) |
| 695 | 3.2 × 10 ¹ (2.33~4.12 × 10 ¹) | 1.9 × 10 ¹ (0.07~3.80 × 10 ¹) | 3.7 × 10 ¹ (2.00~5.80 × 10 ¹) |
| 609 | 9.0 × 10 ⁴ (0.86~26.96 × 10 ⁴) | 8.3 × 10 ³ (4.60~14.40 × 10 ³) | 1.1 × 10 ⁴ (0.18~2.70 × 10 ⁴) |
| 537 | 1.4 × 10 ⁶ (0.54~2.38 × 10 ⁶) | 8.9 × 10 ⁵ (3.20~14.02 × 10 ⁵) | 1.0 × 10 ⁶ (0.36~1.90 × 10 ⁶) |

優質竹炭之表面平滑具光澤，且沒有裂縫或凹陷，以手觸摸時不會有黑灰屑沾污，以金屬棒或竹炭相互敲擊時發出鏗鏘之清脆金屬聲。經高溫所燒製之竹炭質地密緻多孔、比表面積大、吸附力強、具釋放遠紅外線等特性，是具有吸附性、調濕性及蓄熱保溫等機能性之天然素材。因此，在原料炭之生產外，相關產業利用竹炭諸等特性已開發出百餘種應市產品，分別應用於空氣淨化、水質改善、居家保健、蔬果防腐保鮮、工藝飾品材料、美容清潔、紡織品等日常生活領域，尤其與紡織產業所開發之竹炭纖維相關商品具有高產值之潛力。

設置溫度控制管理自動化之必要性

目前國內以土窯燒製竹炭製程對溫度之控制管理，一般均採用直徑3.2 mm K type之測溫棒及溫度顯示器，監測窯內與煙囪口等土窯7個點之溫度變化。此方式雖已具客觀科學性，不再沿用昔日依賴生產操作者觀察煙囪口之排煙濃密及色澤之主觀經驗，然從暖窯開始、攻火至封窯作業結束通常需時96~120 hrs間，過程中對升溫速率之控制與調整，仍採用人工每小時定時檢視、記錄溫度及觀察，並根據操作步驟，以人工調整其排煙口與窯門進氣口之孔隙大小(係以不同尺寸之耐火磚做調整)，專注調控升溫速率、窯內溫度及操作目標最高溫度抵達後之封窯作業。雖然封窯後至溫度降至常溫期間，就無需再全程監控，然該等升溫

期間之記錄與監測工作除白天時段外，夜間時段亦須持續，因為炭化過程中常受窯內炭化條件與窯外氣候環境等差異與變化，窯內溫度抵達各階段溫度控制點之時間難於精確推測，經常在深夜時段抵達，對操作人員之操控工作而言備常辛苦，尤在寒冬深夜更加艱辛。

此外，由於係以紙本每小時定時記錄溫度變化，無法於現場即時轉換為溫度曲線與變化趨勢，因而無法提供現場人員之即時判讀分析與操作調整。目前，其溫度變化曲線圖往往係整個製程結束，方才利用繪圖軟體Excel加以繪製進行事後分析(如圖2)，無法即時於燒製過程中達到預警功能，進行適時應變調節操作。

基於竹炭生產製程各階段之溫度管理對竹炭品質影響至劇，且在製程中所耗人力比例過高，因此，如何改善土窯生產竹炭製程效率，提高製程溫度控制之準確性，同時節省人力，降低生產成本，以提昇竹炭品質與產品市場競爭力，對生產者之經營管理而言有其必要性。

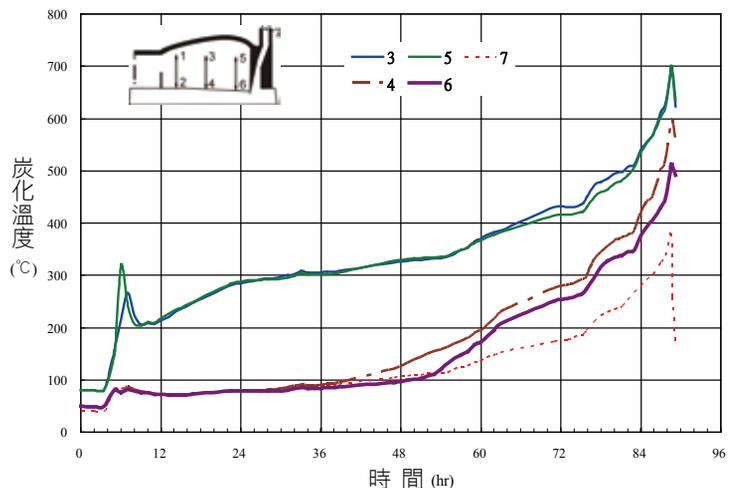


圖2 三義A窯桂竹炭化溫度變化圖

竹炭窯溫度自動控制系統模組 專利構想緣起

林業試驗所自2002年以來，透過產學合作方式輔導國內多家業者生產品質優良之竹炭與其相關產品，對土窯燒製竹炭之技術已累積無數經驗並趨成熟，然仍為降低業者生產成本、提昇製程效率與產品品質持續進行研發。

基於上段章節述及之理由，本所乃利用於2007~2008年間與臺中市岳紘實業股份有限公司之產學合作機會，於苗栗縣三義鄉近觀光景點龍騰斷橋附近覓地協助興建竹炭土窯之際，應用自動控制概念，結合感溫元件裝置、數位溫度顯示器、PLC (programable logic controller) 控制器及具自動調節功能之PID開關閥(proportional; integral; derivative controller)，設計竹炭土窯溫度自動控制系統模組之研發。

目的在應用自動控制模組取代從暖窯、攻火至封窯作業間於各溫度階段控制點之人力操作，利用控制模組精確調整土窯進氣口與排煙口之孔隙大小，以降低生產成本中之人工成本比例，提高製程溫度控制之準確性，提昇製程品質與竹炭品質。本構想於2008年8月向中華民國經濟部智慧財產局提出新型專利申請，於2009年3月11日獲得中華民國新型專利第352666號證書，專利權歸屬林業試驗所，專利期至2018年8月26日。

竹炭窯溫度自動控制系統模組專利說明

本專利之概念設計示意圖如圖3、4所示，該自動控制系統模組各單元元件說明如下：

一、感溫元件

以直徑3.2 mm之K type或R type感溫棒及

輔助導線構成，其溫度測定需達1300℃。在窯內測量點基本上為窯前、窯中央及窯後三處之上(離窯底90 cm)、下(離窯底10 cm)共6點，加上排煙口測量點，共計7點。窯內測量點可擴充至12點，以更精確瞭解窯內溫度之分佈情形。

二、數位溫度顯示記錄器

具彩色螢幕、資料數位顯示、即時分析繪圖功能、警報設定提醒功能、數位傳輸通信介面、內部記憶及外部儲存功能、擴充網路寬頻遠端傳輸介面、可移動性及操作簡易性等功能。

三、PLC控制器

為可程式邏輯控制器，其內部包括程式輸入器、中央處理器(CPU)、程式記憶體、資料記憶體、輸入模組及輸出模組等單元。經感溫元件所產生溫度訊號經由輸入模組傳至資料記憶體，CPU再從程式記憶體中取出原先以程式輸入器中輸入之控制指令，將輸入之溫度訊號進行邏輯演算後，再將演算結果透過輸出模組加以驅動外在之輸出元件，即進氣口及排煙口之自動開關閥。

四、PID自動開關閥

主要位於進氣口與排煙口兩處，包括阻隔材料、支撐阻隔材料之框架、訊號接收模組及啟閉驅動器。該等零件因安裝於高溫區，均須具備耐高溫特性。

目前本專利原型機組已初步組裝完成並試俾成功，如圖5及6所示。惟軟體操作人員之訓練尚在規劃中，以期能與硬體設備運作順暢。

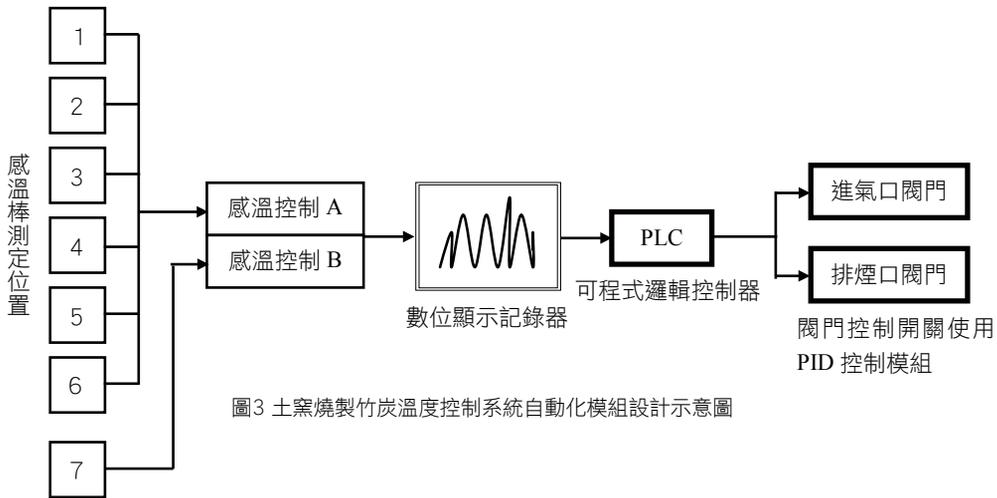


圖3 土窯燒製竹炭溫度控制系統自動化模組設計示意圖

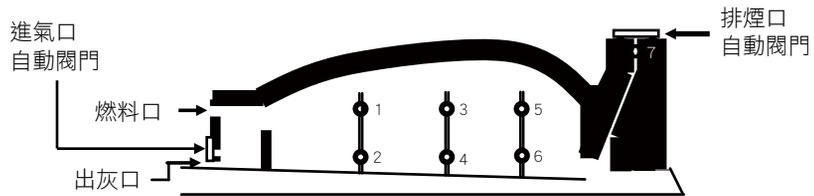


圖4 感溫棒量測暨自動閥門於竹炭窯位置剖面示意圖

土窯燒製木竹炭之溫度管理 自動控制模組特點

本「竹炭窯溫度自動控制系統模組」專利與人工操作溫度管理比較具備以下特點：

一、提高製程品質

應用自動控制元件進行製程溫度控制可靠度與精確度高，避免人為主觀、疏忽、鬆散等因素造成製程差異而直接影響產品品質。製程精確度提高，將減少產品耗損，進而降低成本損失。

二、降低人工成本

自動控制模組將取代製程中運用人力最

多之溫度管理部分。整個溫度管理製程若採用人工操作從暖窯、攻火至封窯作業結束，以雇用1技術工120 hrs計算，須另將夜間監測加班計入，所耗費人力計需10工。而採用自動控制模組之製程，若與林業試驗所曾調查國內竹炭業之竹炭直接生產成本進行比較，其降低比例佔竹炭直接生產成本可達40%以上，整體而言，有效降低竹炭生產成本。

三、具移動性功能

自動模組之所有控制元件均非固定式，均設計為可攜帶式組合，易於運輸與裝配，可配合窯場位置與窯型調整安裝使用。

四、具調整性功能

因自動模組配備可程式離邏輯控制器，可依據材料、窯型及產品類別，結合操作經驗，透過程式編輯進行各項製程調整與變動，包括亦可使用於傳統土窯之木炭生產，提高自動模組之應用範圍與使用效率。

五、具重覆使用功能

自動模組零組件均採用耐高溫之材料設計製造，且易於裝配與拆卸，若非遭受惡易損害，均可重覆使用，提高使用效益，降低重覆購置成本。

六、具功能擴充機能

配備通訊擴充介面，可架設遠端通訊傳輸功能，達到透過數位通訊網路進行遠端遙控功能，提昇生產管理效率。

七、結合農產品產銷履歷制度

目前國內通過CAS驗證之竹炭業者，未來規劃均將進一步納入農產品產銷履歷系統(TAP)及優良農產品系統(TGAP)，竹炭生產製程在最重要之溫度管理部分採用自動控制模



圖6 具資料數位顯示、即時分析繪圖功能與擴充網路寬頻遠端傳輸介面等功能之數位溫度顯示記錄器(黃國雄 攝)

組將有助於與TAP及TGAP系統之實質連結。

結語

面對來自大陸及東南亞進口之低廉竹炭相關產品競爭，國內竹炭業者目前雖能透過取得臺灣優良農產品CAS驗證標章作為標明優良產品品質，提昇市場競爭優勢，然因生產製程中無法全部自動化，人工成本佔直接生產成本之比例達50%以上，因此，竹炭之總生產成本仍猶過高，相較下仍為大陸及東南亞進口竹炭之4~5倍之多，此不只是目前臺灣竹炭業者因價格居高面臨行銷競爭力之困難，也面臨進行二次加工進行產品研發後無法加以廣泛應用之阻礙與挑戰。

本專利研發目的即在改善土窯生產竹炭製程效率，降低生產成本，藉以提昇國產竹炭品質與產品市場競爭力，應用於國內竹炭生產廠商將對其經營管理與利潤有實質助益，並可擴大竹炭與其他產業進行二次加工之結合，發揮竹炭與竹醋液之多功能性，研發新用途新產品，對提高竹炭與竹醋液之附加經濟價值之擴展空間有極大助益。☼



圖5 置於煙囪口調控排煙孔隙之PID自動開關閥(黃國雄 攝)