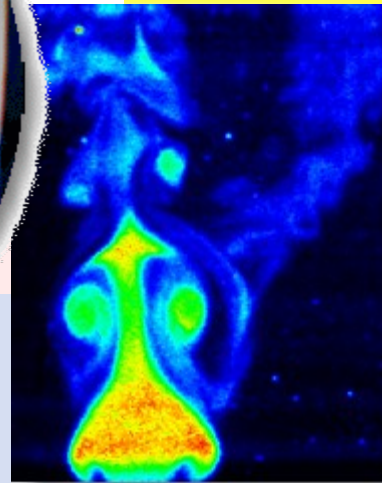
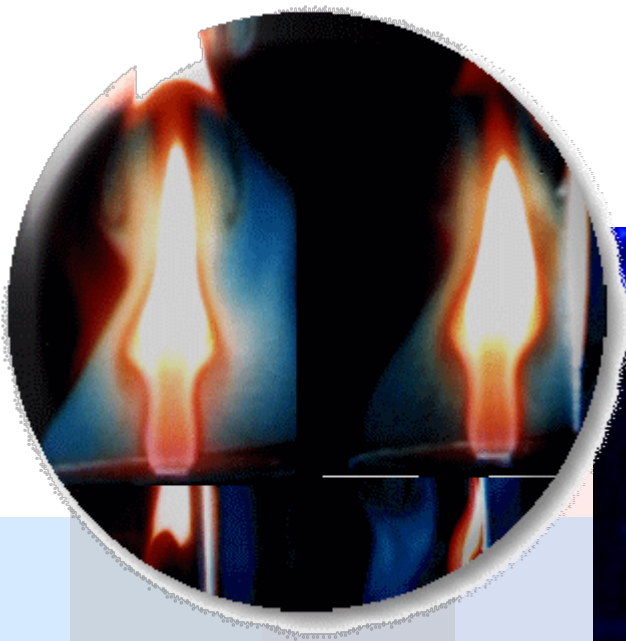




中華民國燃燒學會
The Combustion Institute of R.O.C

季刊

Combustion Quarterly 87



中華民國一百零三年十一月

Vol. 23, No. 4

燃燒季刊

Combustion Quarterly

第二十三卷 第三期 中華民國一百零三年十一月出版

Vol. 23, No.4

Nov. 2014

目 錄

CONTENTS

編輯札記	3
	侯順雄、陳維新
工業輻射廢熱特性與可回收潛力之介紹	4
	莊瑞誠、張秉宏、李天源、林育立
不同球粉比對 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 燒結合金微觀結構與熱電性質之影響	13
	葉建弦、林育立、陳嫻如
熱電發電技術應用現況與發展	26
	宋柏毅、陳光耀、林育立
熱電模組發電量之模擬與實驗	38
	陳奕瑞、宋柏毅、林育立
應用小功率發光二極體於內燃機以降低污染並節省能源	51
	鄭景亮
噴流風機位置對隧道內煙氣結構之影響	57
	張金龍、朱信宇、那奎、梁智創
富氫燃氣對加熱爐能源效益之影響	68
	李建利、周志儒
徵稿說明	78

編輯札記

「燃燒季刊」是我國燃燒/能源領域的代表性刊物，也成功地扮演著實務應用及學術理論交流之平臺，廣受產官學研相關領域專業人士之重視。本期共刊登七篇專業論文，分別來自工業技術研究院和大專院校等單位之研究成果。工業技術研究院綠能與環境研究所莊瑞誠資深研究員、張秉宏副研究員、李天源副研究員及林育立資深研究員共同發表「工業輻射廢熱特性與可回收潛力之介紹」，文中主要分析工業製程中具有輻射廢熱的廠域，探討輻射廢熱的特性與回收的可行性。工業技術研究院綠能與環境研究所葉建弦研究員、林育立資深研究員和明志科技大學材料工程系陳嫻如同學共同發表「不同球粉比對 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 燒結合金微觀結構與熱電性質之影響」，研究中藉由改變球磨時的磨球與合金粉體比例，探討粉體不同細化程度對燒結合金微觀結構與熱電性質之影響。工業技術研究院綠能與環境研究所宋柏毅副研究員、陳光耀研究員、林育立資深研究員發表「熱電發電技術應用現況與發展」，闡述熱電發電系統在各領域的應用方式以及其目前進展。工業技術研究院綠能與環境研究所陳奕瑞研究員、宋柏毅副研究員、林育立資深研究員發表「熱電模組發電量之模擬與實驗」，結果顯示溫差變大時，模組的最大發電量與最大發電效率均會隨之增加；而當晶粒高度變短時，模組的發電量會隨之增加。工研院綠能所產業發展推動組鄭景亮研究員發表「應用小功率發光二極體於內燃機以降低污染並節省能源」，文中介紹發光二極體應用於內燃機，以提升其燃燒效率及馬力的技術。國立屏東科技大學車輛工程系張金龍教授、朱信宇研究生、那奎研究生和梁智創教授探討「噴流風機位置對隧道內煙氣結構之影響」，以作為日後隧道煙控系統設計之參考。國立高雄第一科技大學水資源保育及發展研究中心李建利博士和環境與安全衛生工程系周志儒教授探討「富氫燃氣對加熱爐能源效益之影響」，建立加熱爐節能且降低溫室氣體排放之操作模式，並評估對經濟及環境效益之影響。

整體而言，本期內容涵蓋工業輻射廢熱回收潛力分析、燒結合金熱電技術研究、熱電發電技術應用現況與發展、熱電模組發電量之模擬與實驗、發光二極體於內燃機之應用、隧道煙控系統設計、富氫尾氣應用於加熱爐之能源效益等多元題材，內容相當精彩且多元化，閱讀過程絕對是一場知識的饗宴，也請本刊讀者繼續支持及踴躍投稿本期刊，共同推動燃燒與能源科技之知識分享及研究交流。

副總編輯 侯順雄

總編輯 陳維新

工業輻射廢熱特性與可回收潛力之介紹

Thermal radiation recovery for industrial waste heat

莊瑞誠¹、張秉宏²、李天源³、林育立⁴

Rei-Cheng Juang, Bing-Hung Chang, Tien-Yuan Li, Yu-Li Lin

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy & Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research
Institute

摘要

我國在工業廢熱回收的相關工作已經進行了許多年，而且有相當顯著的成績。但是金屬冶煉廠、水泥廠、石化煉油廠、造紙廠和玻璃等製造廠，在生產過程中有許多高溫的製程，會釋放出輻射廢熱。然而長久以來一直沒有合適的作法來回收再利用，而把它視為無法回收的廢熱。其實，若能透過一個特殊的取熱界面，在沒有接觸工廠產品的條件下，可直接收集輻射廢熱，並轉換成有利用價值的熱能或電能，將可回收工廠燃料的部分成本。本文主要是分析工業製程中具有輻射廢熱的廠域，探討輻射廢熱的特性與回收的可行性。經過評估，許多工業熱輻射強度可達 $2\sim 20\text{ kW/m}^2$ ，大於太陽在正中午時的最大強度 1 kW/m^2 。而且許多工業製程為全天候運轉、不受天氣影響，可以回收的輻射熱量效益大。

關鍵字：工業熱輻射、鋼鐵鑄造、水泥旋窯

Abstract

The recovery of industrial waste heat has established for many years and gained a lot of outstanding efforts. However, there are some factories still released the waste radiation heat during the high temperature operation and without adaptive measures for the waste radiation heat. Actually, the radiation heat can be collected by a thermal absorber coatings and transfer into the high grade thermal energy or electricity without contacting the products during the operation. This article focused on the analysis of thermal radiation intensities in a variety of industrial operations and

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員，E-mail: RCJuang@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員，E-mail: csw92@itri.org.tw

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員，E-mail: Li690365@itri.org.tw

⁴ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員，E-mail: yllin@itri.org.tw

discussed the recovery possibilities. In the real cases of industrial process, the radiation intensity reaches 2 to 20 kW/m² which are depended on distance and temperature of heat source. Therefore, the industrial thermal radiation intensity is larger than solar thermal flux as well as few times at most cases. To recover the thermal radiation will benefit the factories and economy.

Keywords: Industrial thermal radiation, Steel casting, Cement rotary kilns

一、前言

在工業廢熱回收的方法中，常見的大型廢熱回收方式如：汽電共生、蒸汽渦輪廢熱發電。然而近年來油、電持續朝向高漲的趨勢，因此更多的製程領域開始延伸至中小型的廢熱回收方法。如有機朗肯循環(Organic Rankine Cycle, ORC)[1]、固態熱電(Thermoelectric)[2]等方式，即從集中式的廢熱回收，拓展到分散式的廢熱回收發電。目前國內工業具有輻射熱廢熱源的廠域分別為金屬冶煉廠、水泥廠、造紙廠、玻璃面板廠、石化廠，由於製程操作在高溫條件下，大量的廢熱則以熱輻射方式向外釋放傳遞。但由於過去有許多製程的輻射廢熱並沒有進行回收再利用，因此被視為無法回收之廢熱。以金屬冶煉廠為例，連續鑄造產線上的鋼液從模具澆鑄成型後，從輸送帶上移動進行下一個加工程序。由於高溫金屬物件的溫度均勻性及降溫速率都會影響金屬成品的品質，因此無法透過傳統的熱交換器進行接觸方式進行取熱。此時，由於物件溫度高，熱傳的方式以熱輻射形式傳遞的效應就更為顯著。以一貫的金屬鑄造程序來分析，如圖 1 所示，上游為煉鋼製程，溫度達 1500°C；中游為鑄造製程，溫度達 1000°C；下游為熱軋製程，盤捲時溫度仍可達 500°C，製程中的操作環境皆釋放尚未回收的高輻射廢熱量。因此，回收輻射熱不僅可捕獲大量的能量，同時也可改善製程的操作環境，達到節能減碳效益。本研究針對工業輻射廢熱的特性與回收的可行性進行探討，並初步評估回收效益。

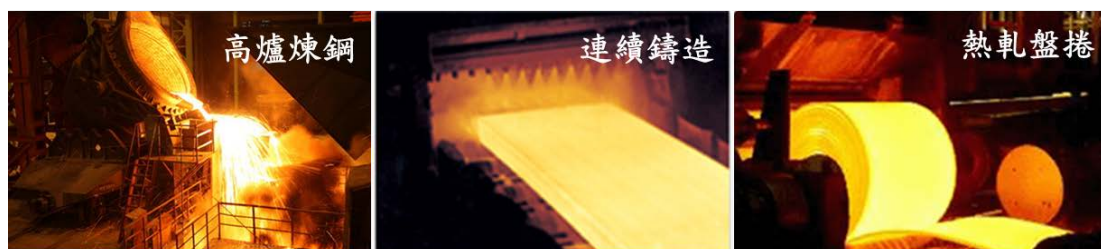


圖 1、鋼鐵冶煉製程的現場環境

二、工業輻射廢熱特性

根據維恩位移定律 (Wien's displacement law) [3]，可初步計算一般黑體所傳遞的最強熱輻射主峰波長位置。表 1 整理熱輻射製程領域與相對應的熱源溫度，可分成高溫(1000°C)、中溫(500°C)、低溫(300°C)輻射廢熱源。首先，計算高溫的金屬連鑄製程的熱輻射強度，假設鋼胚尺寸為長 10m、寬 1m，溫度以 900°C 計算，可得圖 2，結果顯示隨著熱輻射接收面與熱源的距離越近，輻射強度驟昇。當輻射體表面放射率為 0.7 且距離為 1~2 m 時，輻射強度可達 $15\sim 60\text{ kW/m}^2$ 。另一方面，若計算低溫的輻射熱源強度，如水泥的旋窯製程。假設旋窯直徑為 5m、長度為 50m，旋窯表面溫度以 300°C 計算，可得圖 3，結果顯示當旋窯表面放射率為 0.7 且距離為 0.5~1 m 時，輻射強度可達 $3\sim 4\text{ kW/m}^2$ 。以上的初步計算結果可得到兩個定性上的結論：首先，由於輻射強度與熱源溫度成四次方正比關係，所以當熱源溫度屬高溫段時，輻射強度甚高，極具回收價值。再者，雖然理論上太陽的溫度高達 6000°C ，但由於距離地球位置甚遠，因此照射到地球陸地表面約計 1 kW/m^2 熱通量，許多太陽熱能發電元件為提高集熱溫度，則需採取聚焦方式來收集太陽熱輻射[4]。這意謂著，若工業熱輻射接受面可縮短與輻射源的距離，則熱輻射強度則可遠高於太陽照射到地球的熱輻射強度。因此，在無需光學聚焦等附屬元件下，即可捕獲極高的輻射廢熱，可降低熱回收系統成本，提升熱輻射回收效益。另外，雖然當熱源溫度屬低溫段時，如水泥旋窯外表面，若能拉近熱輻射接受面與熱源的距離時，該熱輻射強度仍高於太陽光強度。同時工廠不受天候影響，且多為連續操作之製程，因此仍具有較高的回收效益。

表 1、熱輻射製程領域與相對應的熱源溫度

熱輻射 製程領域	熱源溫度 (°C)	輻射波長峰值 (μm)
太陽熱輻射	~6000	0.446
鋼鐵鑄造	1000	2.27
鋼鐵熱軋	500	3.75
水泥窯業	300	5.05

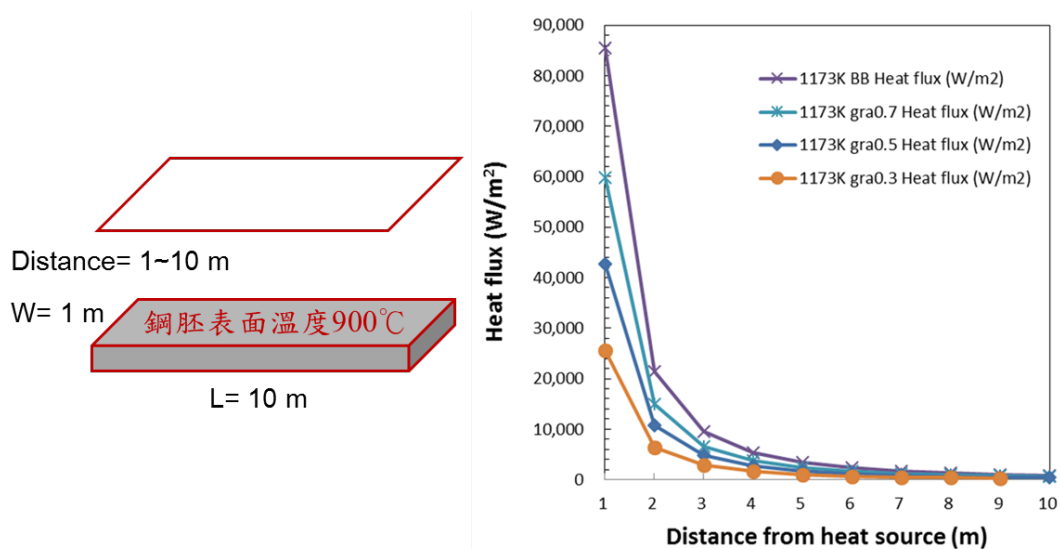


圖 2、鋼鐵連鑄的熱輻射強度計算

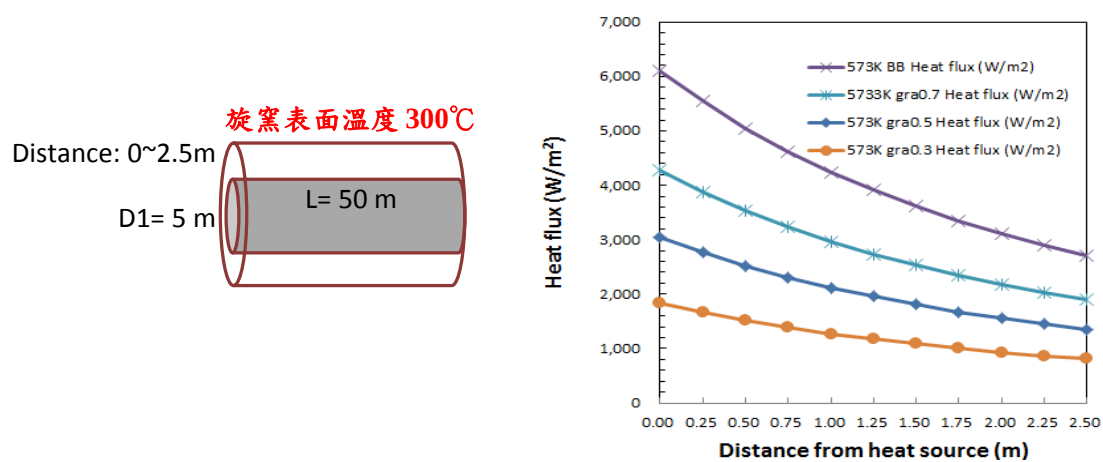


圖 3、水泥旋窯的熱輻射強度計算

三、工業輻射廢熱回收之方法與效益評估

由於工業熱輻射強度與可接收的面積等相關資和工廠的操作環境有關，無法像太陽熱輻射資訊容易取得，因此工業熱輻射的相關研究鮮少有公開探討。然而近年來，能源成本逐年增漲似乎是當前的國際趨勢[5]。因此，是否可有效回收工業熱輻射，亦儼然成為工業節能的探討範疇之一。工研院綠能所已在許多工業現場進行勘查，並製作輻射廢熱回收測試系統，同時至現場進行輻射強度的取熱試驗並持續與廠家進行合作關係，探討輻射熱回收的可行性驗證與經濟效益分析。

3.1 非接觸式輻射廢熱回收測試系統

此系統主要由熱輻射收集器、幫浦循環管路、訊號管線、溫度感測器、儲水桶與數據收集器所組成，其測試系統管線配置如圖 4 所示。其中，熱輻射收集器主要用來回收工業輻射廢熱，而熱輻射收集器中最重要的關鍵元件為紅外光吸收膜，此紅外光吸收膜利用多層光學膜堆疊控制使紅外光吸收膜特性為對不同熱源溫度下的熱輻射具有高吸收。以鋼鐵廠的工業輻射廢熱為例，當鋼鐵熱壓軋熱源溫度為 $1,000^{\circ}\text{C}$ 時，根據上述的維恩位移定律計算，最強的輻射波長落在 $2,270\text{nm}$ ，此與太陽光熱輻射的可見光波段 $300\text{nm}\sim 1,100\text{nm}$ 大不相同。因此若要吸收煉鋼製程的熱輻射能量波段，需選用可對應吸收該紅外光波長的吸收膜才可發揮最大集熱效果。

在幫浦循環管路的部分，非接觸式輻射廢熱回收測試系統為一封閉式循環系統，利用循環幫浦抽取儲水桶內之水，並經由過濾器過濾雜質後，水會進入熱輻射收集器，此經過熱交換的水最後會通過流量計並流回到儲水桶。同時在儲水桶內、儲水桶出口、儲水桶入口、熱輻射收集器入口、出口裝置溫度感測棒，經由數據收集器連接至電腦來紀錄溫度與流量。而非接觸式輻射廢熱回收測試系統在計算取熱能力時，是設定一固定流量，經由電腦收集之熱輻射收集器入口與出口溫度數據，計算出溫度差，在得知流量與溫度差候就可以計算出非接觸式輻射廢熱回收測試系統之取熱量。另外，由於水在一大氣壓下的沸點為 100°C ，若以水為熱交換流體，為了提高熱輻射收集器的操作溫度，管路、閥件可選用耐壓材質

9

3.2 輻射廢熱回收測試結果

目前在工業熱輻射現場所安裝的是單片的集熱板測試系統，單片面積為 1.8 m^2 ，本階段測試主要是以水作為熱交換流體，透過改變水流量，經過集熱板的溫差量測，並利用熱交換計算式（式 1）來實際求得回收熱量值。其中， Q 為取熱量； $\dot{m}$ 為質量流率； C_p 為熱容； T_2 為集熱板出口溫度； T_1 為集熱板入口溫度。上述方式可計算集熱板瞬時的取熱量。另外，若監測儲熱桶出水口溫度，則可計算取熱系統的累積取熱量。

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (1)$$

以鋼鐵連鑄現場為例，當通入流量為 13.5 L/min 時，集熱板瞬時的取熱結果如圖 6 所示。取熱測試可分別區分為高溫與低溫取熱，當流體溫度為 $60^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 區間時，取熱能力高達 $17,000\text{W/片}$ 。當集熱系統為密閉循環，控制管路在 10 kgf/cm^2 的耐壓力條件下，則可取得流體溫度為 $100^\circ\text{C} \sim 170^\circ\text{C}$ 區間時的取熱能力，可達 $14,000\text{W/片}$ 。一般而言，低溫下的取熱量會比高溫下的取熱量大，主要的原因是，當高溫時，取熱流體與熱源的溫差較小，且集熱器在高溫下的熱損失也較大。然而當出口溫度高達 170°C ，則可增加應用範疇，如串接廢熱發電機組（如ORC或固態熱電）時可提高發電效率。在目前的測試資料中，鋼鐵連鑄製程是目前工業製程中，具有最高熱輻射強度且驗證可回收的製程。

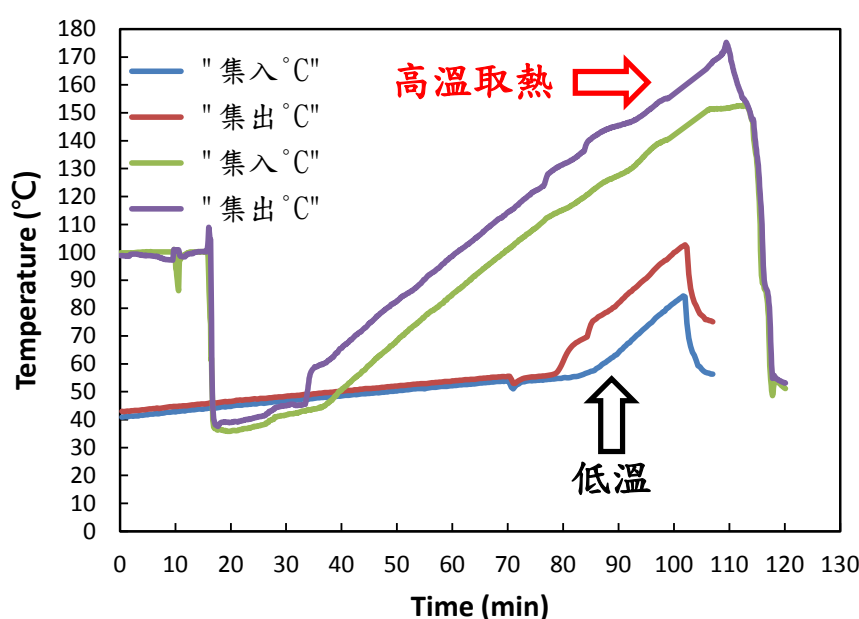


圖 6、鋼鐵連鑄輻射廢熱回收測試結果（東和鋼鐵）

3.3 輻射廢熱回收效益評估

以鋼鐵連鑄為例子來計算輻射廢熱回收效益，根據目前的測試結果顯示，每片集熱器約 1.8 m^2 ，平均取熱量達 10 kW/片 以上，若以熱量為單位，每天運轉 16 小時，約可回收 137,000 kcal。若工廠每年運轉 330 天，每升燃油熱值以 9900 kcal/L 計算，則每片集熱器每年約可回收油當量 4500 L。目前研究團隊已分別在水泥業與鋼鐵業建置輻射廢熱回收驗證系統，包括：水泥旋窯、鋼鐵鑄造、鋼捲熱軋處理。估計若未來擴大建置輻射廢熱回收系統，每年可節省 10,000 公秉油當量，可為國內此三種產業能源成本節省超過 2.2 億元/每年。

輻射廢熱回收除了以熱的型態被使用以外，也可在後端的應用上連接發電組件，例如 ORC 系統或固態熱電發電系統。可將回收的熱能轉成電力使用，增加應用範疇；甚至也可已串接吸收式冰水機組，將輻射熱能直接轉成冰水使用，可提供現場製程的冰水需求，或是降低現場人員操作環境的溫度。以目前國際能源成本逐年增漲的趨勢來觀察，工業熱輻射的回收效益將隨之增加。

四、結論

我國在工業廢熱回收的相關工作已經進行了許多年，而且有相當顯著的成績。但是金屬冶煉廠、水泥廠、石化煉油廠、造紙廠和玻璃等製造廠，在生產過程中有許多高溫的製程，會釋放出輻射廢熱。然而，有些工廠的生產線是連續傳輸移動的，例如高溫的煉鋼程序，高溫發紅的半成品，是不能直接與傳統的熱交換器接觸，因此長久以來一直沒有合適的作法來回收再利用，而把它視為無法回收的廢熱。其實，若能透過一個特殊的取熱界面，在沒有接觸工廠產品的條件下，直接收集輻射廢熱，並轉換成有利利用價值的熱能，則可以回收工廠燃料的部分成本。同時可以透過其他節能技術的整合，將輻射廢熱轉換成電力或冷氣，大幅提升利用價值。經過評估，許多工業熱輻射強度可達 $2\sim 20 \text{ kW/m}^2$ ，大於太陽在正中午時的最大強度 1 kW/m^2 。而且許多工業製程為全天候運轉、不受天氣影響，因此可以回收的輻射熱量效益大。目前已分別在水泥業與鋼鐵業建置輻射廢熱回收驗證系統，包括：水泥旋窯、鋼鐵鑄造、鋼捲熱軋處理。估計若未來擴大建置輻射廢熱回收系統，每年可節省 10,000 公秉油當量，可為國內此三種產業能源成本節省超過 2.2 億元/每年。另外，開發工業熱輻射回收機制也可為國內的集熱器製造商加值了全新的產品應用市場。未來此技術將推展到更多的工廠製程使

用，可開創台灣工業輻射廢熱回收節能嶄新的一頁，獲得工業節能減碳的豐盛果實。

五、致謝

本研究工作承蒙經濟部能源局能源研究發展基金委辦計畫 103-E0207 經費資助，謹此誌謝。

六、參考文獻

- [1] T.C. Hung et al. A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat, Energy. 1997, 22, 661-667.
- [2] Takashi Kuroki et al. Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, Journal of Electronic Materials. 2014, 43, 2405-2410.
- [3] <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>, National Institute of Standards and Technology. 2011 June.
- [4] R. Amatya and R. J. Ram, Journal of Electronic Materials. 2010, 39, 1735-1740.
- [5] 莊瑞誠、張秉宏、林育立 選擇性吸收膜在工業輻射熱回收的應用，燃燒季刊第二十二卷 第四期，民國 102 年。

不同球粉比對 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 燒結合金微觀結構與熱電性質之影響

Effect of different ball to powder ratio on the microstructures and thermoelectric properties of $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ sintered alloys

葉建弦¹、林育立²

Chien-Hsuan Yeh, Yu-Li Lin, Yan-Ru Chen

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology

Research Institute, Hsinchu, Taiwan

陳嫻如³

明志科技大學材料工程系

Department of Materials Engineering, Ming Chi University of Technology, New

Taipei City, Taiwan

摘 要

碲化鉍銻($\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$)合金具有良好的導電性及低熱傳導率，為目前低溫(室溫~500 K)區間最佳熱電轉換性能的熱電材料。本研究利用高溫熔煉、行星式球磨以及火花電漿燒結製程製作奈米結構 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金。實驗中藉由改變球磨時的磨球與合金粉體比例，探討粉體不同細化程度對燒結合金微觀結構與熱電性質之影響。由相鑑定結果得知，經由球磨及燒結後所得塊材樣品是以 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ 單一結晶相為主，並且呈現緻密層狀結構。熱電性質量測結果顯示導電率隨球粉比例增加而降低，而Seebeck係數則隨之增加。合金結構由於存在奈米析出物及微小空洞，有助於降低熱傳導率至 $1.00 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。綜合功率因子與熱傳導率結果，高球粉比例條件下所製備的 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金在 350 K可獲得最高ZT值為 1.19。

關鍵詞：碲化鉍銻、球粉比、熱傳導率、微觀結構、熱電性質

Abstract

Bismuth antimony telluride ($\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$) is the low temperature thermoelectric material with the excellent thermoelectric properties because of high electrical conductivity and low thermal conductivity. Alloy melting, ball milling and spark

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: chien-hsuan@itri.org.tw

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員，E-mail: yllin@itri.org.tw

³ 明志科技大學材料工程系，學生，E-mail: u00187038@mail2.mcut.edu.tw

plasma sintering were used to prepare the nanostructure $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ thermoelectric materials in this study. Effect of the ball to powder ratio on the microstructures and thermoelectric properties of $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ alloys were investigated at temperature from 300 K to 500 K. The XRD results show the phase structure of all sintered alloys was the $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ single phase and no second phase was observed. The sintered alloys exhibited the considerably dense structure with the fine laminar grains. The electrical conductivity decreased and Seebeck coefficient increased with the ball to powder ratio. The low thermal conductivity was about 1.00 W/m-K resulted from the nano-precipitations and small holes inside the microstructure. As the results, higher ZT value was obtained for $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ alloys with a maximum ZT value of 1.19 at 350 K.

Keywords: bismuth antimony telluride, ball to powder ratio, thermal conductivity, microstructures, thermoelectric properties

一、前言

2014 年初核四廠存廢議題引起政府單位、環保團體與民間團體對於國內能源現況的重大關注，同時也讓相關單位重新檢視國內整體能源供給及能源消費情形。由「我國電力需求零成長可行性評估報告」指出國內電力消費將逐年增加，而電力供給隨核能發電比例降低而可能出現電力缺口。對於此一電力缺口，雖然可以藉由增加燃氣及燃煤發電比例來因應，但是增加燃燒石化能源將使得能源成本及排碳量增加，加大溫室氣體排放，也有違政府減碳政策及國際環保趨勢。為解決國內電力供給不足問題，除調整適當能源供給結構及加速再生能源進展外，提升國內能源使用效率及推動各式不同節能技術，不失為更有效益之作法。目前工業製程餘熱回收措施，常見使用復熱器、節煤器或是汽渦輪機的熱能回收技術。然而以製程熱回收現況來看，縱使實施熱回收措施，目前仍還有約 60% 以上的低溫廢熱(溫度低於 300°C)不易被回收而排放至環境中，形成能源浪費與熱污染，因此開發高效率低溫熱能發電技術，是提升工業節能成效的重要方向。

熱電效應主要是藉由控制熱電材料內之載子(電洞、電子)移動來直接進行熱能與電能間的轉換，轉換時不需利用任何機械動件，因而具有無噪音、無振動、低維修及環保的特點，所以適合應用於工業廢熱、汽車廢熱、環境廢熱等熱回收領域[1-3]。評估熱電材料的熱電轉換效率可以熱電優值(Thermoelectric figure of

merit) ZT 值表示[4]：

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S^2}{\kappa} T \quad (1)$$

其中 S 為 Seebeck 係數、 σ 為電傳導率、 T 為絕對溫度及 κ 為熱傳導率。欲得到高 ZT 值的熱電材料，可以藉由增加材料的導電率與 Seebeck 係數或減少熱傳導率來達到。

碲化鉍銻(Bismuth Antimony Telluride)合金為在室溫至 500 K溫度區間最常被使用的p型熱電材料。由於 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ 合金具有較佳的導電特性，因此近年來諸多研究聚焦於降低 $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ 合金之熱傳導率[5-7]。合金的熱傳導主要受到載子(carrier)及聲子(phonon)的傳輸影響，並且一般以(2)式表示熱傳導率(κ)：

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_L + \kappa_{am} \quad (2)$$

其中 κ_e 為載子熱傳導率， κ_L 為晶格熱傳導率， κ_{am} 為 ambipolar 效應貢獻[8]。 κ_e 又與導電率成正比關係，若欲使熱傳導率降低的具體作法則為減少晶格熱傳導率，所以許多研究中就以材料的奈米結構或是複雜晶體結構來使傳遞熱的介質-聲子產生散射，進而使熱電材料熱傳導率降低，並有助於提高熱電性能。

本研究利用行星式球磨製程，並改變球磨球與粉體的比例，以得到微細的合金粉體，同時利用具有快速燒結特性的火花電漿燒結法(Spark plasma sintering method)得到奈米結構 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電塊材，並探討不同球粉比例對合金微觀結構與熱電性能之影響。

二、實驗方法

本研究首先將Bi、Sb與Te元素以 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 之成分配比稱重混合，並利用高溫熔煉得到 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金棒材。接著合金棒搗碎後，將相同重量的球磨珠分別與 70g、50g、35g及 30g的合金粉體一起放入球磨罐並利用行星式球磨在 300 rpm轉速下進行球磨。球磨所得合金粉體再經火花電漿燒結法快速燒結出熱電塊材。本文內容以代號P1、P2、P3 及P4，分別表示粉量為 70g、50g、35g及 30g的燒結合金樣品。

經過球磨與快速燒結所得之 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電塊材的導電率及Seebeck係數利用ULVAV-RIKO公司型號為ZEM-3 導電率及Seebeck係數量測機台進行量測，

量測溫度範圍為 300 K 至 500 K。以 ECOPIA 公司的 HMS-3000 霍爾效應量測儀器量測熱電材料的載子濃度及遷移率。利用 ULVAV-RIKO 公司型號為 TC-9000 熱擴散係數量測設備，進行樣品的熱擴散係數(α)量測，並搭配示差掃描熱分析儀(Different scanning calorimetry, DSC)量測的定壓熱容數據(C_p)。利用阿基米德法量測樣品密度(D)。之後利用 $\kappa = C_p \cdot \alpha \cdot D$ 公式計算得到合金的熱傳導率(κ)。最後將所得到性能數據代入(1)式求得 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材合金之熱電優值。另外在材料晶體結構上則利用 X 光繞射儀(X-Ray Diffractometer, XRD)來分析，分析所使用的靶材為銅(Cu)靶，X 光波長為 1.54056 Å，分析角度為 $10^\circ \sim 70^\circ$ ，而顯微組織結構則利用場發射掃描式電子顯微鏡(Field Emission Scanning electron microscope, FESEM)來觀察。

三、結果與討論

1. $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金微觀結構

初熔煉製作之 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金棒材可藉由行星式球磨的高速運轉使球磨球之間產生撞擊及研磨作用，使粉體達到細化的效果，同時也由於高能量的互相撞擊，使粉體內部產生奈米尺度晶粒。之後再搭配火花電漿燒結使粉體快速緻密化形成塊材。由於燒結時間很短且為粉體接面快速燒結，因此燒結塊材常能保有奈米結構[9]。圖 1 為不同球粉比條件下所得粉體經燒結後的塊材結晶結構圖。由圖中可以看到不同球粉比所得 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 燒結塊材皆屬於多晶結構，其中以(0 1 5)、(1 0 10)、(1 1 0)及(2 0 5)為主要晶面成長方向。同時比對 JCPDS card 資料庫(卡號：72-1836)，結果顯示燒結塊材合金呈現單一 $(\text{Bi}_{0.2}\text{Sb}_{0.8})_2\text{Te}_3$ 相，並無其他第二相的繞射峰被觀察到。而在燒結密度部分(表 1)，可以看到密度隨著球粉比例增加而略微減少，由 99.5% 降低至 97.9%，其原因應是因為微細粉體容易在堆積時形成很多的微小空洞，當粉體快速燒結時，少部分的小空洞沒有完全消失，因此造成燒結密度降低。

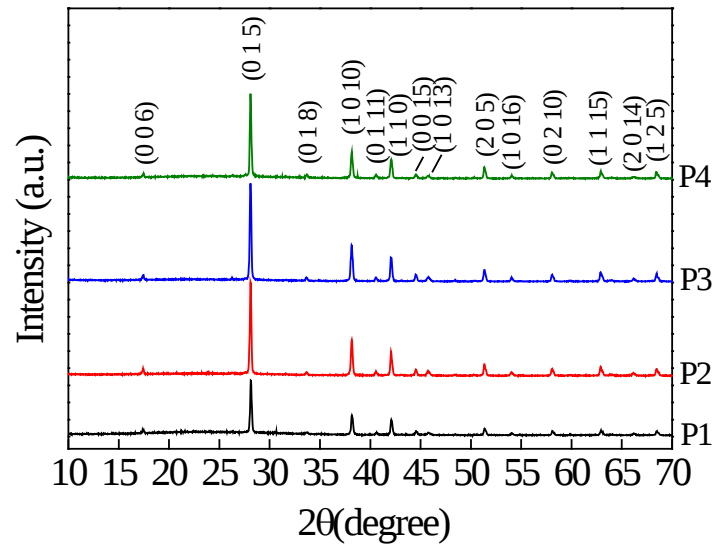


圖 1. 不同球粉比所製得 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金塊材之晶體結構XRD分析圖。

表 1. 不同球粉比所得 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材密度(理論密度： 6.793 g/cm^3)。

樣品	P1	P2	P3	P4
密度 (g/cm^3)	6.76	6.73	6.69	6.65
相對密度 (%)	99.5	99.0	98.5	97.9

圖 2 為不同球粉比所得粉體經燒結後之合金塊材破斷面 SEM 圖。從圖中可以看到在外加壓力下高溫燒結，球磨粉體逐漸變形並彼此擴散接合，形成緻密的層狀結構，同時不同球粉比所得到的粉體燒結結構並無明顯差異。此外，在部分結構平面上可以觀察到微小的奈米析出物及孔洞存在於結構中，此奈米析出物由先前研究發現為富 Sb 的合金成分。這些奈米或次微米尺度的析出物及空孔在聲子傳遞過程中都能造成散射現象，有助於減少合金的熱傳導率。

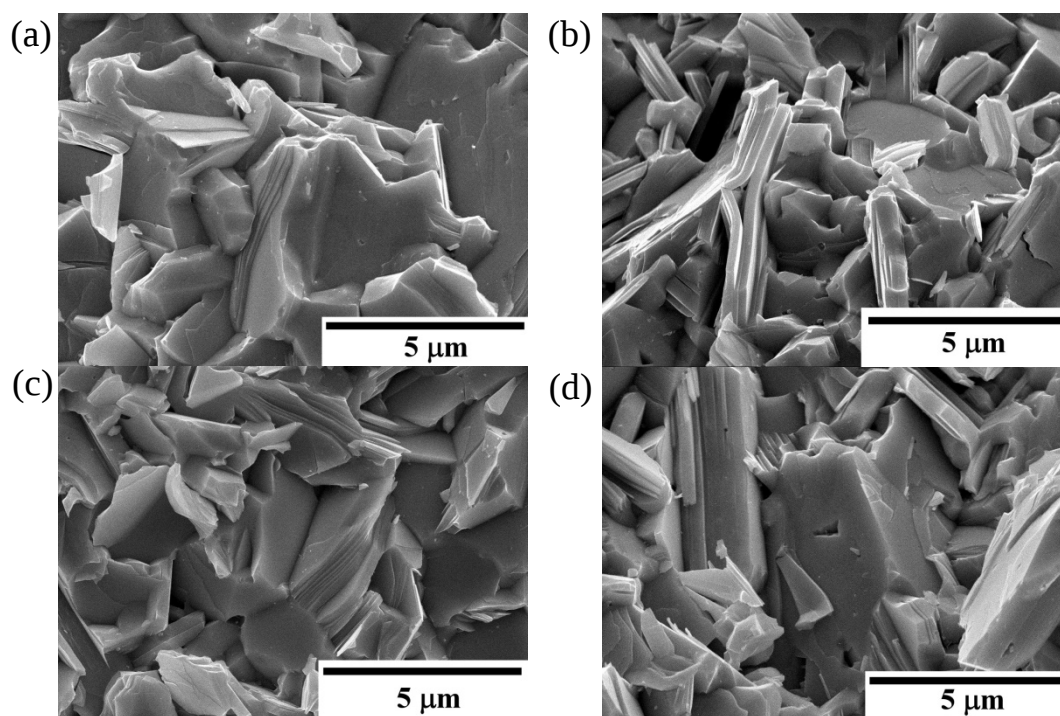


圖 2. $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 燒結合金塊材之破斷面SEM圖，圖片編號分別為(a)P1、(b)P2、(c)P3 及(d)P4 樣品。

2. $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金熱電性能

不同球粉比所得粉體經火花電漿燒結製備的 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材熱電性能表現如圖 3 所示。所有燒結塊材導電率都隨量測溫度增加而降低，呈現類似金屬導電性之行為，屬於退化型的半導體。導電率數據在室溫時分別為 1,004 S/cm (P1)、977 S/cm(P2)、975 S/cm(P3)及 955 S/cm (P4)，顯示隨著球磨時的球粉比增加，導電率逐漸降低，這主要是由於合金塊材的內部缺陷增加，使電洞濃度由 $2.31 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 降低至 $2.13 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (表 2)，且密度亦同時隨球粉比增加而降低所致，因此 P1 合金樣品有最佳的導電率表現。在 Seebeck 係數方面，由圖中可以看出 Seebeck 係數皆為正數，屬於 p 型半導體材料。低球粉比例的 P1 樣品在室溫下所測得 Seebeck 係數為 194 $\mu\text{V/K}$ ，而高球粉比例的 P4 樣品 Seebeck 係數則為 199 $\mu\text{V/K}$ 。熱電材料的 Seebeck 係數與合金載子特性關係可以如下式表示[10]：

$$S = \frac{\kappa_B}{e} \left[\lambda + \frac{5}{2} + \ln \frac{2(2\pi m^* \kappa_B T)^{3/2}}{nh^3} \right] \quad (3)$$

S 為Seebeck係數， κ_B 為波茲曼常數， e 為電子電量， m^* 為有效質量， h 為蒲朗克常數， n 為載子濃度， λ 為散射因子，可以由(3)式得知Seebeck係數與載子濃度成反比關係，因此P4 樣品之電洞濃度 $2.13 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 比P1 樣品電洞濃度為 $2.31 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 來的低，所以高球粉比例所得 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金擁有較高的Seebeck係數。此外，所有塊材樣品的Seebeck係數曲線都是隨量測溫度增加並呈現先升後降趨勢。在溫度高於 450 K時，由於 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金的本質載子受到溫度激發，使得載子得到能量可由能階中價電帶跳至傳導帶，大幅增加載子濃度，因而造成Seebeck係數明顯降低。Seebeck係數在 400 K有最佳值約 $223 \mu\text{V/K}$ ，並隨量測溫度增加係數差異亦逐漸縮小。功率因子為Seebeck係數之二次方與導電率的乘積，若想以功率因子為主要提升熱電材料ZT值，必須有較高之Seebeck係數與導電率。綜合導電率及Seebeck係數數據計算後可得到功率因子(Power factor)結果，其曲線圖如圖 3(c)所示。 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電塊材功率因子隨著量測溫度增加而減少。當量測溫度為 300 K時，塊材樣品功率因子分別為 $3.78 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ (P1)、 $3.89 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ (P2)、 $3.90 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ (P3)及 $3.79 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ (P4)，樣品功率因子差異並不大。

表 2、 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電合金之載子濃度與載子遷移率。

樣品	載子濃度(cm^{-3})	載子遷移率(cm^2/V)
P1	2.31×10^{19}	300
P2	2.18×10^{19}	284
P3	2.19×10^{19}	280
P4	2.13×10^{19}	292

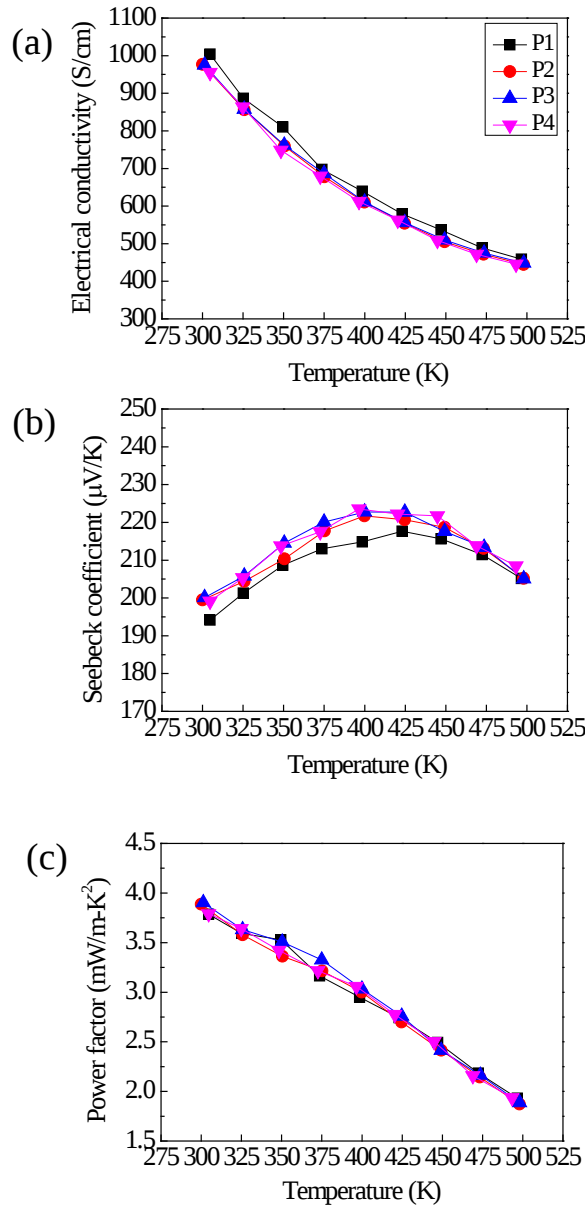


圖 3、 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金之熱電性能(a)導電率、(b)Seebeck係數及(c)功率因子與量測溫度關係圖。

圖 4(a)為熱傳導率隨量測溫度變化曲線圖。圖中顯示熱傳導率隨著量測溫度增加呈現先小幅降低再上升的趨勢，這是由於熱電塊材內的微細結構能有效增加傳熱聲子的散射現象，使得熱傳導率能降低，之後約在溫度 400 K 以上，材料本身之Bipolar效應出現造成整體導熱率的上升。從圖中可以看到在高球粉比例的P4塊材樣品在 350 K 時具有最低的熱傳導率，約為 $1.00 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，較P1 樣品約降低 15%。由於合金熱傳導率(κ)為載子熱傳導(κ_e)、晶格熱傳導率(κ_L)及ambipolar

效應(κ_{am})之和，又載子熱傳導率可以利用 Wiedemann - Franz 定律求得[8]， $\kappa_e = L \cdot \sigma \cdot T$ ， L 為the Lorenz number，本實驗 L 值為 $2.45 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$ 、 σ 為導電率及 T 為絕對溫度。當合金導電率差異不大時，合金的載子熱傳導率亦不會有太大差異，此時合金熱傳導率高低取決於 $\kappa - \kappa_e$ 。圖 4(b)為 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材合金 $\kappa - \kappa_e$ 與量測溫度關係圖，從圖中可以發現 $\kappa - \kappa_e$ 隨著球粉比例增加而逐漸降低，其原因應是高球粉比例條件下所得到的合金粉體細化程度較高。微細粉體經快速燒結後，塊材內部結構存在奈米析出物及許多微小空洞，微小空洞的存在雖然造成密度的略為下降，但是可以有效阻礙聲子傳遞，使得晶格熱傳導率明顯降低，進而降低合金整體熱傳導率，所以在熱傳導率表現上，P4 合金樣品具有最低值。將上述功率因子與熱傳導率數據代入(1)式計算後求得 ZT 值，其結果如圖 4(c)。經合金熔煉、行星式球磨及快速燒結的 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電塊材最佳 ZT 值出現在測量溫度為 350 K時，其值為 1.19。

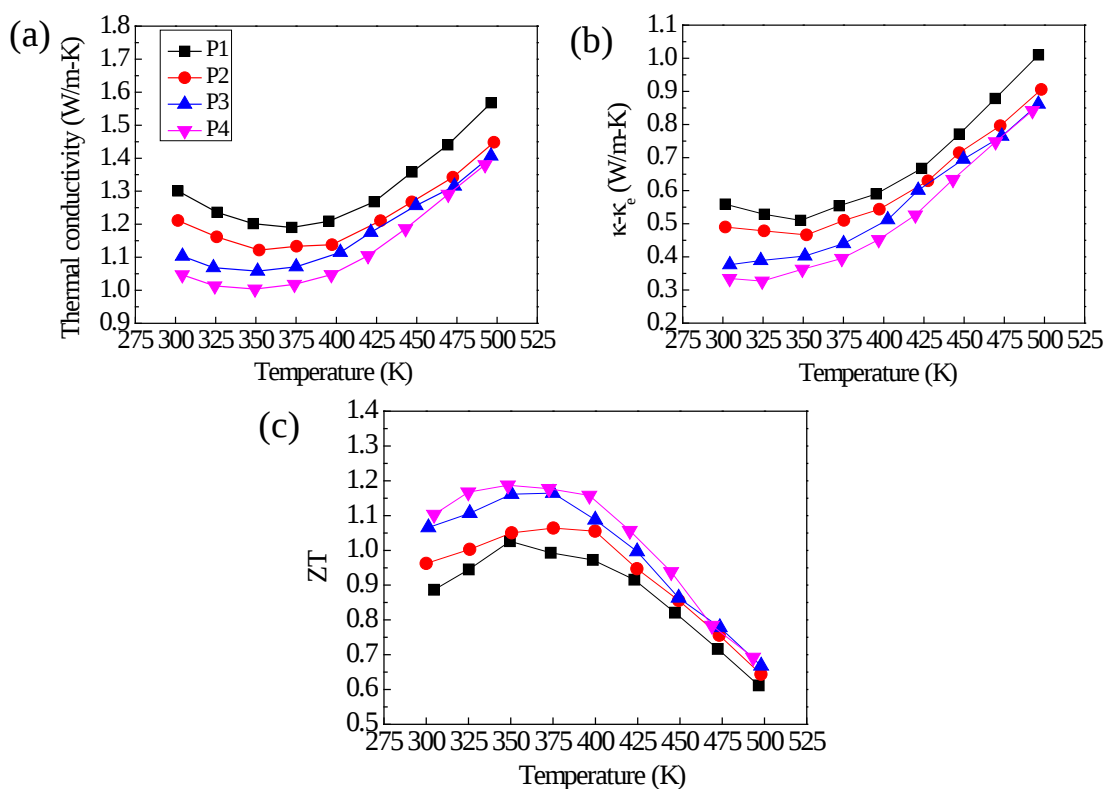


圖 4. $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金之熱電性能(a)熱傳導率、(b) $\kappa - \kappa_e$ 及(c) ZT 值與量測溫度關係圖。

3. 製程重複性驗證

根據上述p型 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電材料開發結果，本研究採用相同最佳製程參數進行5次的樣品製作及性能測試，以確認 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金塊材製程重複性。

圖5為 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 粉體經相同參數的合金熔煉、球磨及燒結重複製作5次所得到塊材的熱電性能圖。所有樣品導電率都隨量測溫度增加而降低，屬於退化型半導體的導電行為。導電率數據在室溫時約為 $948 \pm 96 \text{ S/cm}$ ，並隨溫度增加導電率差異逐漸縮小。在Seebeck係數方面，所有Seebeck係數曲線都是隨量測溫度增加呈現先升後降趨勢。Seebeck係數在425 K有最佳值約 $221 \pm 4.9 \mu\text{V/K}$ ，並隨溫度增加係數差異亦逐漸縮小。將導電率及Seebeck係數整合計算後得到材料之功率因子，其曲線圖如圖5(c)所示。 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電材料功率因子隨著量測溫度增加亦隨之減少。當量測溫度為300 K時，其最佳功率因子約為 $3.76 \pm 0.19 \text{ mW/m}\cdot\text{K}^2$ 。圖6(a)為熱傳導率與量測溫度之曲線圖。圖中顯示熱傳導率隨著測量溫度呈現先降低再上升的趨勢，這主要是由於熱電材料中的微細缺陷及析出物有效增加傳熱聲子的散射現象，使得熱傳導率能降低，之後約在溫度400 K以上，材料本身之bipolar效應出現造成整體熱傳導率逐漸上升。 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電合金最低熱傳導率在375 K為 $0.96 \pm 0.08 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。將功率因子與熱傳導率數據計算後求得ZT值，其結果如圖6(b)。 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金經球磨及快速燒結所得的熱電塊材最高ZT值出現在量測溫度為375 K時，其值為 1.24 ± 0.08 。

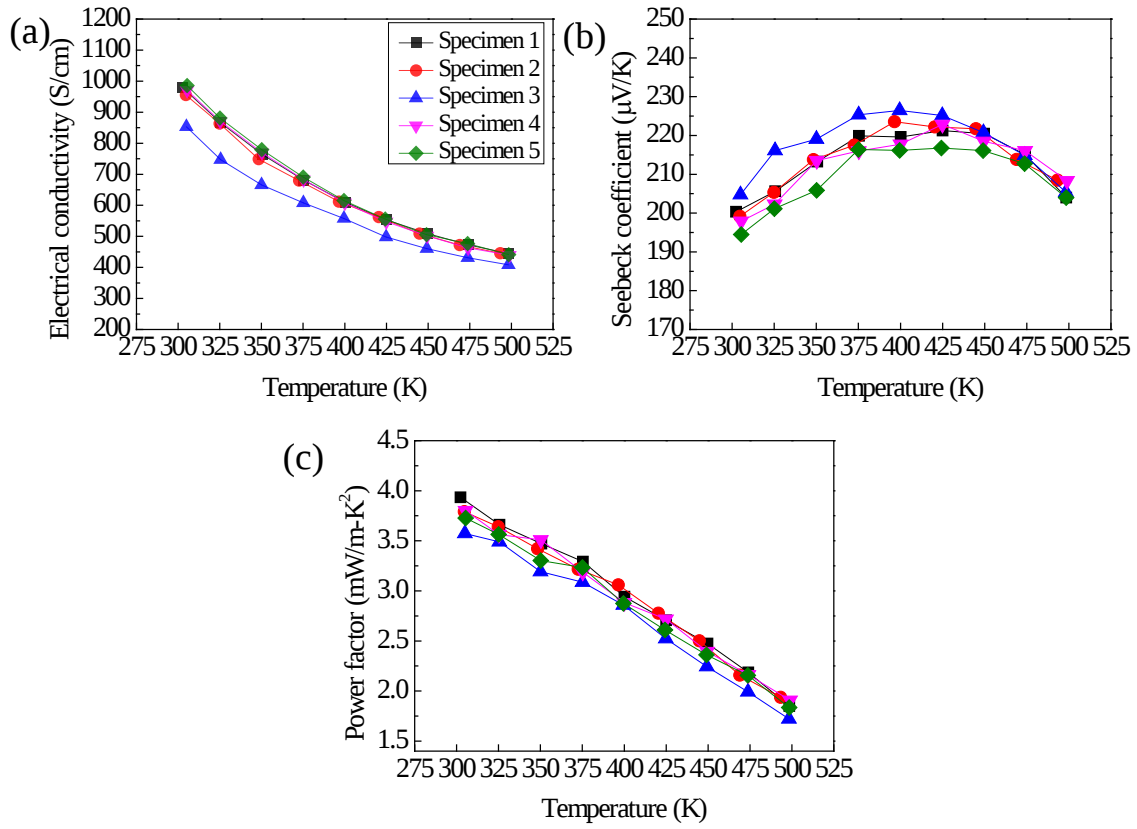


圖 5. 經相同參數的合金熔煉、球磨及燒結重複製作 5 次所得到 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材的熱電性能(a)導電率、(b)Seebeck係數及(c)功率因子與量測溫度關係圖。

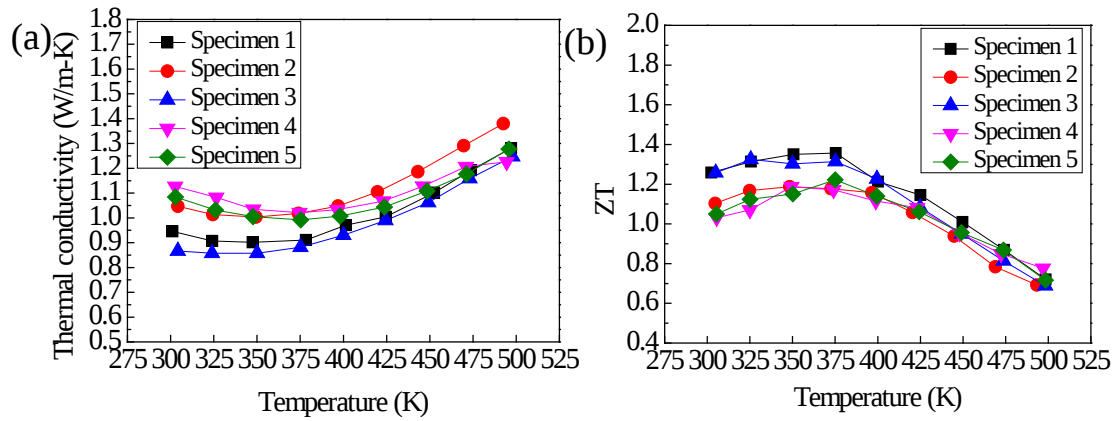


圖 6. 經相同參數的合金熔煉、球磨及燒結重複製作 5 次所得到 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 塊材的熱電性能(a)熱傳導率及(b)ZT值與量測溫度關係圖。

四、結論

本研究利用不同球粉比的球磨製程所得粉體搭配火花電漿燒結製得緻密層狀結構的 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 熱電合金。燒結合金結構中存在奈米析出物及微小空洞，能有效散射傳熱聲子，使合金熱傳導率降低至 $1.00 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。在相近合金功率因子表現時，高球粉比條件下所製備的 $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金可得到最佳的ZT值為1.19。同時在相同製程參數條件下，本研究所開發之材料製程亦具有重複性， $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ 合金在 375 K時平均 ZT_{max} 值約為 1.24 ± 0.08 。

五、致謝

本研究承蒙經濟部能源局提供研究經費(計畫編號:103-E0207)，謹表誌謝。

六、參考文獻

1. T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kajihara, H. Kaibe, H. Hachiuma, H. Matsuno, A. Fujibayashi, Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, *Journal of Electronic Materials*. 2014; 43: 2405-2410.
2. N. Baatar, S. Kim, A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles, *Telkomnika*. 2011; 9: 523-530.
3. 新藤尊彦、中谷祐二郎、大石高志， Thermoelectric Generating System for Effective Use of Unutilized Energy，東芝評論，Vol. 6, No.2, pp. 7~10, 2008。
4. D. M Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectric*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, pp. 7-25, 1995.
5. Y. Ma, Q. Hao, B. Poudel, Y. Lan, B. Yu, D. Wang, G. Chen, Z. Ren, Enhanced Thermoelectric Figure-of-Merit in p-Type Nanostructured Bismuth Antimony Tellurium Alloys Made from Elemental Chunks, *Nano Letters*. 2008; 8: 2580-2584.
6. Y. Q. Cao, T. J. Zhu, X. B. Zhao, X. B. Zhang, J. P. Tu, Nanostructuring and improved performance of ternary Bi-Sb-Te thermoelectric materials, *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2008; 92: 321-324.
7. T. Zhang, Q. Zhang, J. Jiang, Z. Xiong, J. Chen, Y. Zhang, W. Li, G. Xu, Enhanced thermoelectric performance in p-type BiSbTe bulk alloy with

- nanoinclusion of ZnAlO, *Applied Physics Letters*. 2011; 98: 022104-1-022104-3.
8. J. Jiang, L. Chen, S. Bai, Q. Yao, Thermoelectric performance of p-type Bi-Sb-Te materials prepared by spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*. 2005; 390: 208-211.
 9. M. Tokita, “Mechanism of spark plasma sintering,” Sumitomo Coal Mining Company, Ltd., East Bldg. 108, Kanagawa Science Park KSP.
 10. S. S. Kim, S. Yamamoto, T. Aizawa, Thermoelectric properties of anisotropy-controlled p-type Bi-Te-Sb system via bulk mechanical alloying and shear extrusion, *Journal of Alloys and Compounds*. 2004; 375: 107–113.

熱電發電技術應用現況與發展

Recent Development of Thermoelectric Generation Application

宋柏毅¹、陳光耀²、林育立³

Bo-Yi Sung、Kuang-Yao Chen、Yu-Li Lin

工業技術研究院 綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology

Research Institute, Hsinchu, Taiwan

摘要

因應現今世界面臨到的石油短缺及環境汙染的問題，人類開創的綠色能源最受矚目的往往是太陽光電、風力發電、潮汐發電、以及地熱發電，但許多工業製程及汽機車引擎產生的廢熱，則是無法有效利用。本論文乃闡述熱電發電系統在各領域的應用方式，以及其目前進展。根據過去的一些研究結果及實際應用顯示出，熱電材料轉換率大部分位於 10% 以下，而實際組裝成熱電發電系統後，因為有著接合技術以及裝置成本的考量，使得整體系統轉換效率更低。但產業上的利用價值，是建立在轉換出的可利用電總量，以及其在特殊環境時的不可取代性。以 Toshiba 的草津溫泉發電系統為例，其每天產生的電量可儲存後做為急難時附近地區的備用電力來源。BMW 利用汽車排氣管的廢熱回收的電，則可以回充至電瓶內，減少所需的燃油並提高燃油使用效率。而在太空計劃中，放射性同位素熱電發電則是在外星球探險時的必要電力來源。

關鍵字：熱電發電、太陽能、廢熱回收、轉換效率、太空計畫

Abstract

To solve the problem of petroleum shortage and environment pollution, the most popular green energy research is solar energy, wind power generator, and tidal energy, etc. On the other hand, the waste heat emitted by factories and vehicles can not be properly. This paper demonstrates the application and development of thermoelectric generation system in different situation. According to some recent papers, thermoelectric transform rate is about 10%, and the generation system of it is even lower. Although it is true, the value of thermoelectric generation is based on the total

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員

² 工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員

³ 工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員，E-mail: yllin@itri.org.tw

amount of power, and the irreplaceable in special condition. For instance, the generator in Kusatsu Hot Spring, run by Toshiba Corp., has become a back-up power source in neighbor area. BMW use vehicle waste heat harvest system to enhance fuel efficiency. Space Venturing Program also uses it as an irreplaceable power source when spacecrafts travel to the other planet.

Keywords: thermoelectric generation、solar energy、waste heat recycle、transform efficiency、space program

一、前言

目前世界上使用的能源大多來自石化能源(石油、天然氣等)，而在其中能源轉換過程中，大約 40%的比例以熱的形式散失在環境中。石化能源轉換後的大量廢氣造成空氣汙染，也是全球暖化的原因。故使用較環保的再生能源，以替代傳統的石化能源，並達到減少環境汙染及廢熱排放，是許多學者專家的期待，以及研究目標。但現今的再生能源，雖已達到友善環境(Environment-friendly)的目標，但其轉換效率及開發成本均高於石化能源，所以有效提升轉換效率，以及降低成本至可接受程度，是研究綠色能源的主要方向。

在眾多綠色能源的研究中，熱電效應是最熱門的研究領域之一，其中更以熱電發電為最常見研究主題。其最先起源於法國物理學家席貝克(Seebeck)在 1821 年時，發現兩種不同材料接在一起並且有溫度差異時，兩接點即產生電位差。到 1834 年時，帕爾地(Peltier)發現通電流於兩種相異材料時接點處會產生加熱及冷卻的現象，此為熱電致冷器的工作原理。熱電材料可以因為席貝克效應而產生電能，也可因帕爾地效應產生溫度差，可以作為發電機及冷機使用。其優點在於無汙染、無噪音、節省空間、壽命長，可應用在太空科技、LED 封裝冷卻、光電耦合器等用途，應用範圍相當廣泛。

因地球上的石油及煤的產量有限，近十幾年來科學家致力於開發再生能源，常見的再生能源有太陽光電、風力發電、潮汐發電，以及地熱發電，但工廠排放出的低階廢熱，則是普遍不知如何回收利用，使得這些在工廠生產時必定會產生的熱能，直接排放到大氣中。如今因世界各國的高度經濟及工業發展，能源的短缺顯而易見，能源浪費的問題至此不得不重視。因著其特性及優點，熱電發電技術再次受到重視。

二、熱電基本特性

熱電模組可將熱能轉換成電能，以及把電能轉換為熱能型式，即為席貝克效應(熱轉電)以及帕爾地效應(電轉熱)。在 1911 年時，Altenkirch 定義出熱電優值，並將此優值承上絕對溫度以無因次參數呈現，而成為所謂的 ZT 值。其定義為：

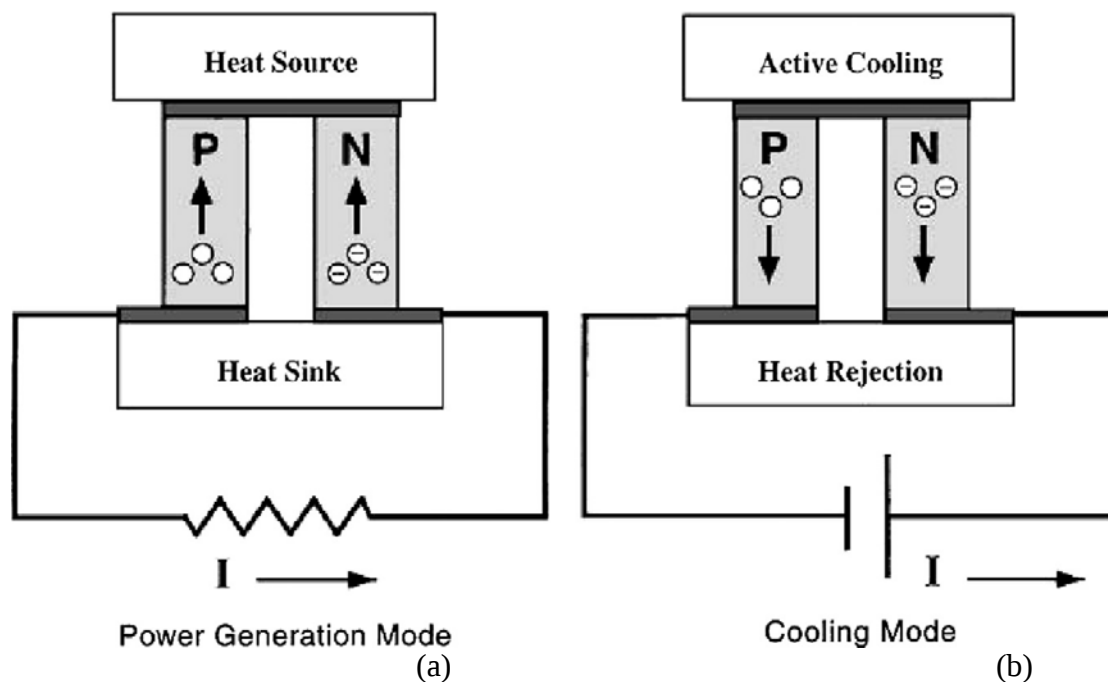
$$ZT = \alpha^2 \sigma T / k \quad (1)$$

其中 α 為席貝克係數， σ 為電傳導率， k 為熱傳導率。由於在材料開發過程中，電傳導率的增加往往伴隨熱傳導率的增加，使得 ZT 值的增加幅度有限。早期的研究中皆以金屬材料為主要研究對象，導致製作出的材料 ZT 都偏低。而近年來由於奈米結構及超晶格結構(Superlattice Structure)的研究出色，使得材料的 ZT 值有突破性的成長。而在數十年來的研究中可得知，ZT 值成為描述熱電材料性能的重要參數，不論是熱電轉換效率或是熱電致冷性能(Coefficient of Performance)皆以此為主要性能指標。

熱電轉換效率與 ZT 的關係為：

$$\eta = (T_h - T_c) / T_h \cdot (\sqrt{1 + ZT} - 1) / (\sqrt{1 + ZT} + T_c / T_h) \quad (2)$$

由此關係式可看出，若要增加轉換出的電能，除了材料的 ZT 值要高，材料兩端的溫差越大，可以使得轉換效率越佳。當 $ZT \ll 1$ 時，轉換效率會幾乎等於 0。當 $ZT \gg 1$ 時，轉換效率會近似於理想效率。從此式子也可看出，在現今的使用溫度範圍及材料種類，可使轉換效率到達理想效率的四分之一。



圖一 熱電轉換示意圖 (a) 熱電發電模式 (b)熱電致冷

三、熱電發電應用實例

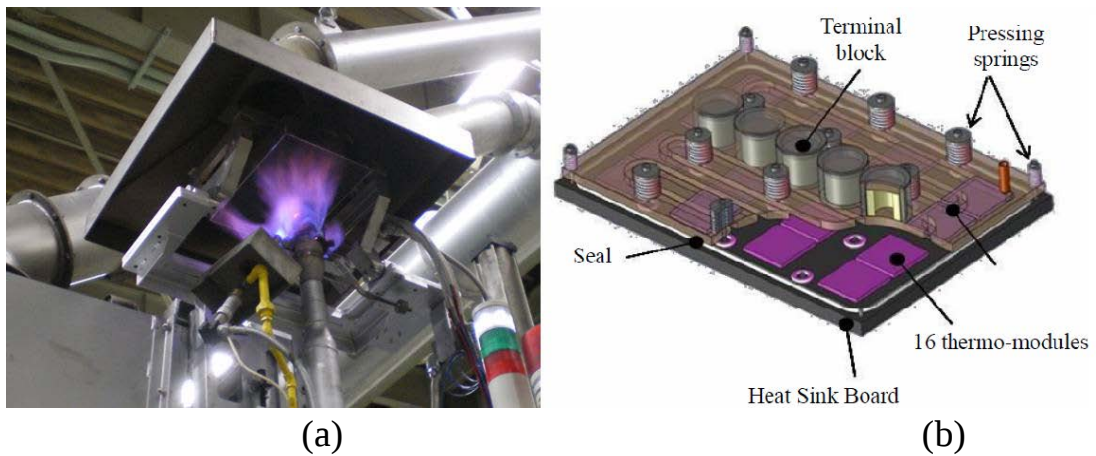
利用席貝克效應將熱能產生電能的發電模組，其轉換效率約在 5~10%，可利用在不同的熱源，達到將廢熱回收再利用。以下介紹幾個常用的熱源及回收發電應用方式。

3.1 製程廢熱及溫泉熱回收發電

現今人類利用的能源，以熱能居多，而其中產生的廢熱量也相當龐大，使得廢熱回收技術受到相當的重視。一些傳統加工廠，在製程上往往會用到大量的熱能，其中有很大一部分是散失在空氣中。由於熱能為低階能源，直接利用率較低，若能轉換至較高階的電能，將可提高其能量利用便利性。

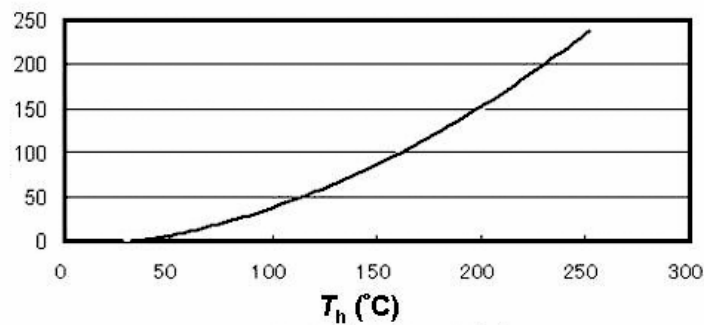
日本的KELK公司在 2009 年時，開始了在Awazu工廠內的發電系統測試[1]，其利用 16 個Bi-Te材料模組，以四行四列的排列形式安裝在集熱盤及冷卻水回路中。此模組[2]在操作溫度 $T_h=280^{\circ}\text{C}$ 、 $T_c=30^{\circ}\text{C}$ 時可達到最大發電量 24W，此時的轉換效率約為 7.2%。在操作時，利用一燃燒器直接給予集熱盤約 4kW的熱量，使集熱盤的溫度控制在 120~250 $^{\circ}\text{C}$ ，冷卻水端的溫度則是 40 $^{\circ}\text{C}$ 左右的操作溫度。此發電模組發出的電先以最大功率點跟蹤器(Maximum Power Point Tracking, MPPT)找出其最大功率，再連接一個鉛酸電池將發出的電儲存起來，最後再經由

一個變壓器將電能轉換為 100V 的交流電，以供工廠區內的照明燈光使用。



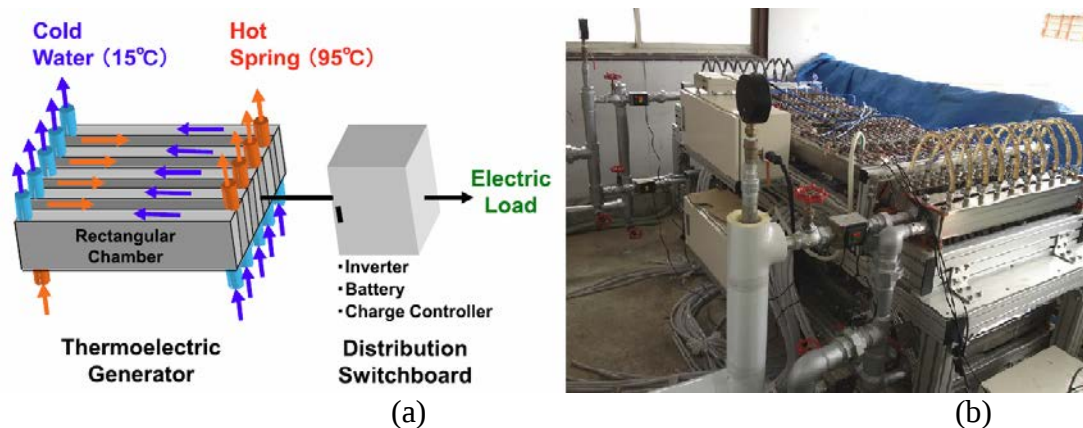
圖二 KELK 公司工廠熱回收發電器 (a)實際架設圖 (b)模組與冷熱端交換器

將上述模組實際裝置在廠區內後，發現在熱端 250°C 時，約可產生 240W 的轉換電能，也就是每片模組約產生 15W 的功率。此模組在熱端 250°C 時原本預估可產生 20W 的功率，但由於熱交換器到模組間有著散熱膏、基板等的介面熱阻，使得模組兩端溫差低於原先的預期溫差，造成模組產生功率有些掉落的情形。

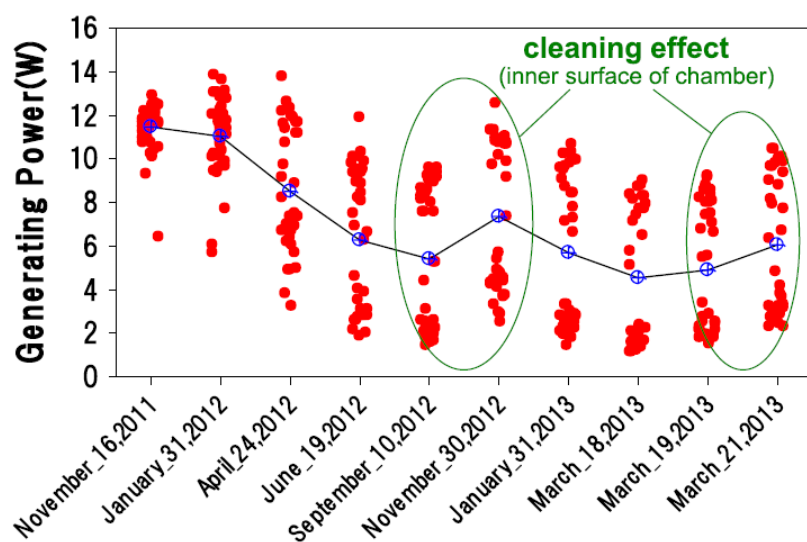


圖三 發電器熱端溫度與發電量關係圖

除了利用工廠的製程熱能發電，日本 Toshiba 公司則是利用草津溫泉為熱源作發電測試[3]，此為利用地熱發電的形式，以作為當地的備份電力來源。此發電組是利用 95°C 的溫泉水作為熱端，以及 15°C 的冷水作為冷端，模組則夾在冷熱端的水套中間。



圖四 溫泉發電器 (a)裝置示意圖 (b)草津溫泉實際架設圖



圖五 不同日期之單組發電器平均產生電力

測試結果發現，溫泉水 95°C 及冷卻水 15°C 時，約可產生 900W 左右的發電量，但每一天的發電量有著些許差異。這些差異來自於：每日溫泉水的用量、氣溫的不同，以及管路內的髒污影響到熱交換效率。由圖五可看出，管內的髒污清洗掉之後，由於髒污造成的熱阻已去除了，對於發電量有些助益。截至 2013 年 3 月，此發電機已發出 1927kWh 的電量，運轉時間約 9000 小時。

此溫泉發電機組，由於其熱源來自於溫泉水，屬於自然熱源，在能源取得上

較為環保，若周圍地區停電，也不乏是一個備份電力來源。但由於其受到上述因素使其發電量產生變異，故需要電力儲存裝備，將所發的電力儲存後再取出利用，方可得到穩定的電力輸出。

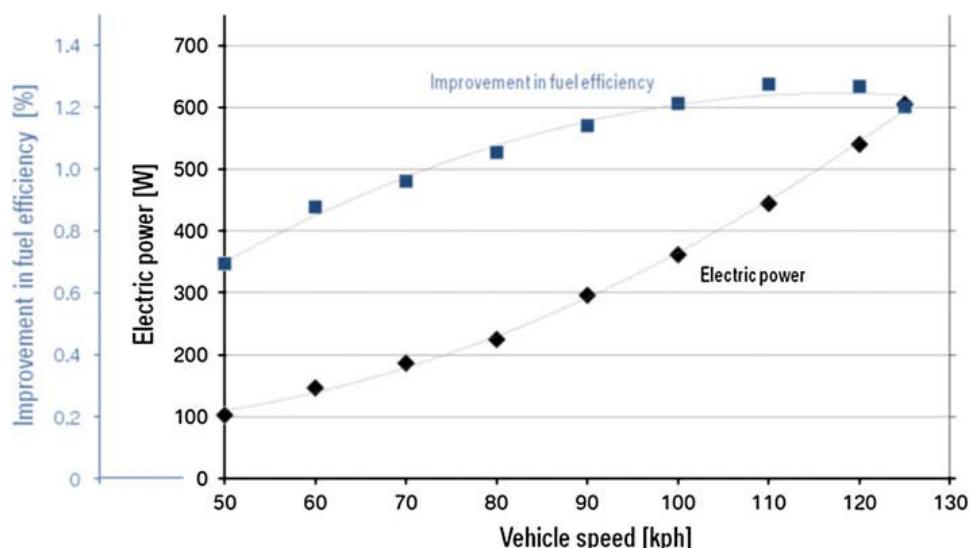
3.2 汽機車排氣廢熱回收發電

目前包含美國、歐盟國家及日本，熱電系統研發主力著重在汽車廢熱發電應用，因為對汽車系統而言，廢熱值約成固定比例，有利於開發目標的設定。另外由於現今的汽車具有較複雜的電力電子系統，因此對電力的需求日益增加，同時在汽車中經由汽油發電產生電力的成本，遠高於家用電力的發電成本，因此若能回收廢熱進行發電，將可大幅降低汽車電力需求所造成的耗油現況。

德國的 Gentherm 公司利用圓柱形的發電模組[4]與汽車排氣管結合[5]，以方便連接排氣管作熱氣回收。結果發現，當通入的汽車廢氣(熱源)溫度為 620°C 、冷卻水 20°C 時，可發出約 600W 的電力。但實際安裝在 BMW X6 上的測試結果可看出，當汽車的行駛速度越快時，排氣量也越多，更多的熱源進入發電模組後，使得模組發電功率也越來越高，也相對提升燃油的使用效率。



圖六 BMW X6 實際裝設熱電發電模組圖

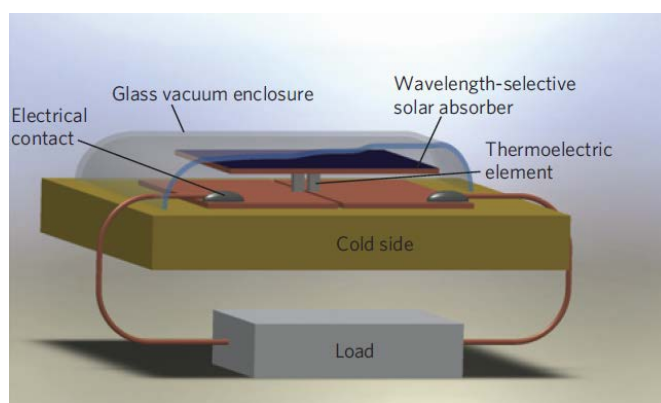


圖七 BMW X6 測試結果

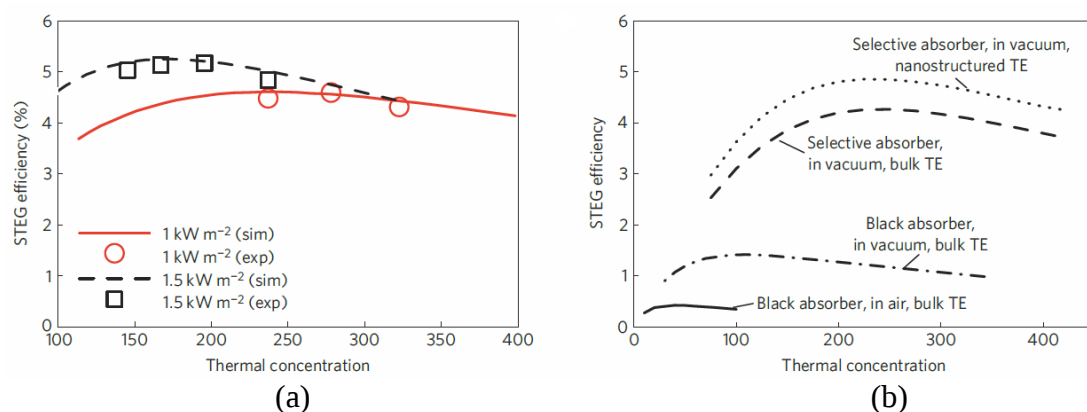
3.3 太陽熱電整合系統

由於太陽熱能一直是替代能源的首選之一，太陽光電轉換技術已為大眾所熟知，但熱電技術主要還是在研究階段。由於太陽除了發出光也會產生熱，這部分的輻射熱如何吸收利用，則是以往研究的重點項目，於是提出了太陽-熱電整合技術(Photovoltaic – Thermoelectric Technology)。

在太陽熱電技術領域中，主要的集熱方式有兩種形式。由於太陽能板為平板型式，一開始發展的太陽熱電技術也是以平板式(Flat-Panel)為主要構型。在Kraemer[6]提出的模型中，利用以光譜式選擇性吸收膜(Spectrally-selective solar absorbers)作為吸收太陽輻射作為模組熱端的熱源，並搭配熱電發電模組，再一起封裝至一個玻璃製的真空腔體內。結果顯示出，與表面利用黑體吸收膜(Black Absorber)相比，利用真空中的選擇吸收膜可大幅增加模組的轉換效率。

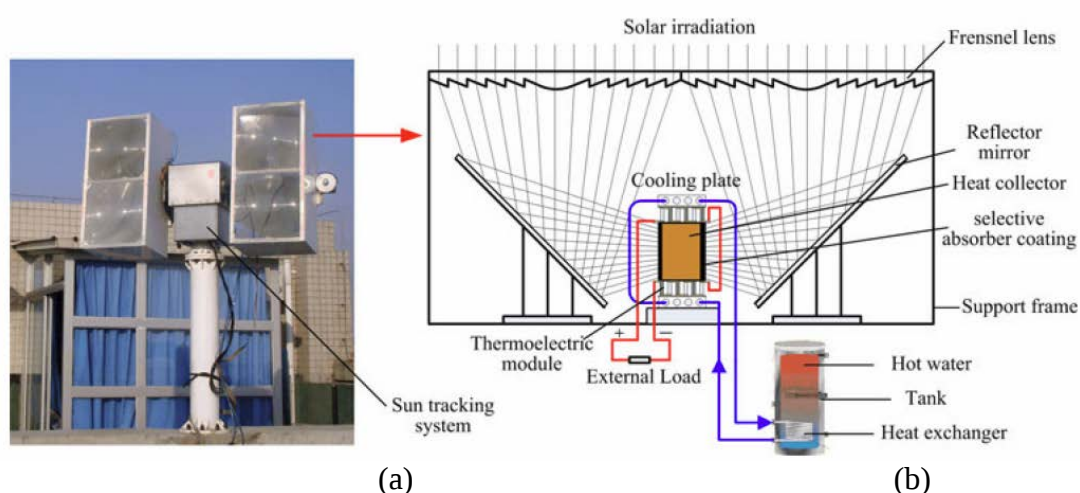


圖八 平板式太陽輻射集熱器



圖九 PV-TE 測試結果 (a)不同照度模擬與實驗轉換效率 (b)黑體吸收膜及選擇性吸收膜轉換效率的結果差異

另一種形式的太陽熱電集熱技術，則是利用鏡面反射光的特性將太陽輻射聚集在同一個區域，稱為集中式熱電發電器(Concentration Solar Thermoelectric Generator)[7]。與平板式的差異在於，由於將太陽光集中在一個小區域內，所需要的模組面積則是比平板式小得多，可達到較小空間、較小安裝費用的優點，在實際運用上更可被接受。而其將光集中的另一個優點，則是可提高模組熱端的溫度，亦即使模組單位面積通過的熱量更多，使得可達到的轉換效率更高(~10%)。



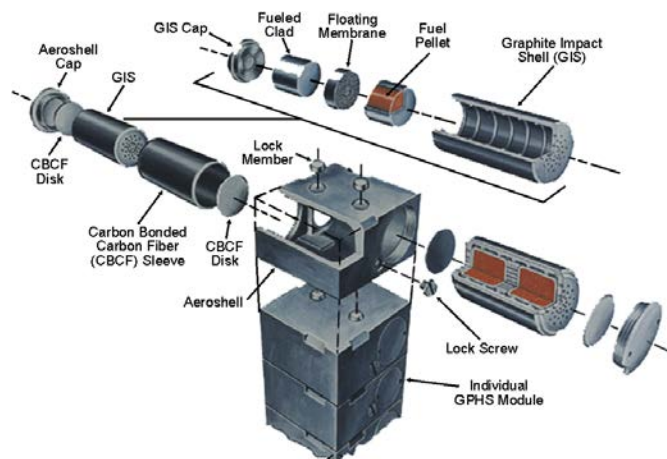
圖十 集中式 PV-TE (a) 實體架設圖 (b)內部架構示意圖

3.4 太空發電應用

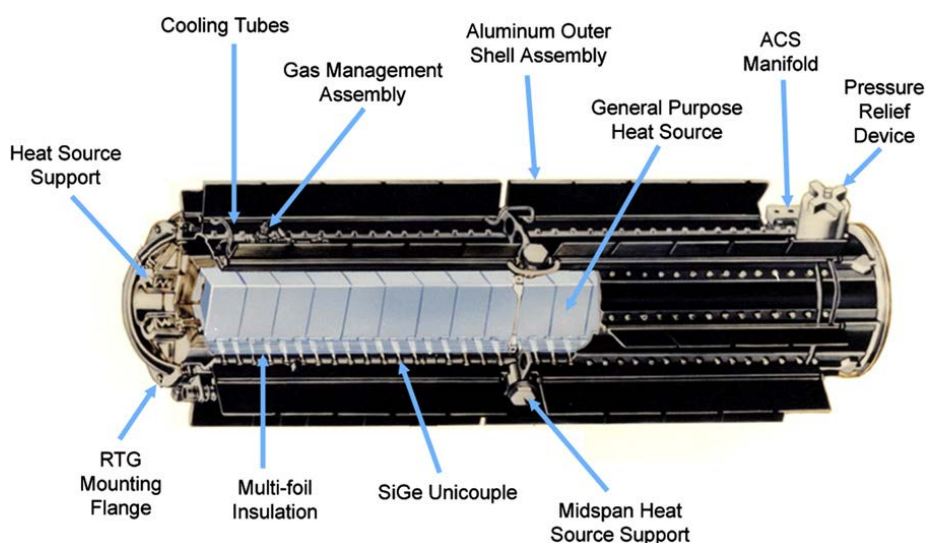
由於在太空此種極端環境時，取得電力的方式相當有限，若考慮到未來太空

梭要航行到其他星球的可能性，太陽能發電可能會因為離恆星位置一直改變而不適用，熱電在此情況中的優點則展現出來。美國在 1950 年左右時開啟了核能電力計畫(Nuclear Power Sources)，並在 1961 年第一次將放射性同位素熱電模組(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)送至太空。

放射性同位素熱電模組的發電方式，是利用 ^{238}Pu 同位素作為熱源發熱，再將發出的熱利用熱電模組轉換成電能。將 ^{238}Pu 作為燃料再封進一個腔體後，即成為所謂的一般用途熱源模組(General Purpose Heat Source, GPHS)[8]。數個GPHS再堆疊後，旁邊安裝數百個矽鍺熱電材料，即可發出約 285W 的熱量，並被矽鍺熱電材料轉換為輸出電壓 28-30V 的直流電源，以供給太空任務以及航行至附近星球的能源。



圖十一 GPHS 架構圖



圖十二 GPHS-RTG 架構圖

到 2008 年止，已有七座 GPHS-RTG 執行太空任務，其中最近的一次啟用，是在 2006 年發射，預計在 2015 年時可到達冥王星(Pluto)。

四、展望

熱電材料的 ZT 值在 1990 年之前無法突破 1.0，因此當時預計 $ZT=1$ 為熱電材料的極限值。近年來材料奈米科技的進步，使得 ZT 值有所突破，也使其可帶來的產業效應開始受到重視。

由轉換效率與 ZT 值的關係式得知，ZT 無限大時可到達理想轉換效率，而以目前的材料 ZT 值，其所對應到的轉換效率尚不足以與傳統發電方式相提並論。但其高可靠度、無噪音、無廢氣排放、體積小等優點，使其在特定領域成為不可忽視的替代性能源。從自然界的能源，例如太陽熱能及地熱，到汽機車的排氣管廢熱回收，甚至太空計畫中，處處皆有可佔的一席之地。

由於其體積小，以及可與其他技術的可利用性，使得過去從未想過或只於理論中存在的裝置，得以成為現實。一些身上的配件，比如說手錶，可以人的體溫作為能量來源而供其運作。轉換出的電能，不再是數字大與小的差別，而是馬上可使用的能量來源，熱電技術有機會發展至過去從未實用過的技術領域，並成為寡佔或獨佔市場。

五、致謝

本研究承蒙經濟部能源局提供研究經費(計畫編號:103-E0207)，謹表誌謝。

六、參考文獻

1. Kaibe, H., Kajihara, T., Fujimoto, S., Makino, K., & Hachiuma, H. (2011). Recovery of Plant Waste Heat by a Thermoelectric Generating System. *Rep. Tech. Komatsu*, 57, 26-30.
2. Kaibe, H. T., Rauscher, L., Fujimoto, S., Kurosawa, T., Kanda, T., Mukoujima, M., ... & Sano, S. (2004). Development of thermoelectric generating cascade modules using silicide and Bi-Te. In *Proc. 23 rd International Conference on Thermoelectrics.-Australia* (p. 13).
3. Sasaki, K., Horikawa, D., & Goto, K. (2014). Consideration of Thermoelectric Power Generation by Using Hot Spring Thermal Energy or Industrial Waste

Heat. *Journal of Electronic Materials*, 1-8.

4. Crane, D. T., Koripella, C. R., & Jovovic, V. (2012). Validating steady-state and transient modeling tools for high-power-density thermoelectric generators. *Journal of electronic materials*, 41(6), 1524-1534.
5. Crane, D., LaGrandeur, J., Jovovic, V., Ranalli, M., Adldinger, M., Poliquin, E., ... & Maranville, C. (2013). TEG on-vehicle performance and model validation and what it means for further TEG development. *Journal of electronic materials*, 42(7), 1582-1591.
6. Kraemer, D., Poudel, B., Feng, H. P., Caylor, J. C., Yu, B., Yan, X., ... & Chen, G. (2011). High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. *Nature materials*, 10(7), 532-538.
7. Li, P., Cai, L., Zhai, P., Tang, X., Zhang, Q., & Niino, M. (2010). Design of a concentration solar thermoelectric generator. *Journal of electronic materials*, 39(9), 1522-1530.
8. Lange, R. G., & Carroll, W. P. (2008). Review of recent advances of radioisotope power systems. *Energy Conversion and Management*, 49(3), 393-401.

熱電模組發電量之模擬與實驗

Simulation and experiment of power capacity in thermoelectric generator

陳奕瑞¹、宋柏毅²、林育立³

Yi-Ray Chen, Bo-Yi Sung, Yu-Li Lin

工業技術研究院綠能與環境研究所

Green Energy and Environment Research Laboratorie, Industrial Technology
Research Institute

摘要

本研究採用模擬與實驗的方式進行熱電模組發電量之探討，由模擬結果得知晶粒高度越低時，熱電模組的發電量會隨之增大。配合實際封裝測試結果與模擬結果相互驗證，封裝測試結果與模擬結果兩者趨勢相同，但發電量增加比例卻比模擬得來的小，主要原因在於實際量測時，晶粒高度較低之模組，上下機板間之熱損失較嚴重。此外，在模組兩端溫差相同時，且受基板之影響，晶粒兩端之實際溫差較低所致。

關鍵字：熱電模組、發電量、晶粒高度

Abstract

The study uses simulation and experiment to investigate the power capacity of thermoelectric generator modules. The result shows that the power capacity increases with reducing the leg height. Compare with the results of simulation and packaging test, they have the same trend. However, the ratio of power capacity increases with leg height reduce in packaging test is smaller than them in simulation. In the packaging test, the main reason is that the heat loss between the top and bottom substrate is more serious in the shorter the legs. In addition, the shorter legs have the lower temperature difference that influence by the substrate at the same temperature difference between two ends of the module.

Keywords: Thermoelectric module, Power capacity, Leg height

¹工業技術研究院綠能與環境研究所，研究員，E-mail: chenyray@itri.org.tw

²工業技術研究院綠能與環境研究所，副研究員

³工業技術研究院綠能與環境研究所，資深研究員兼室經理

一、前言

由於全球氣候變遷與化石燃料使用年限僅剩 40 ~ 60 年，因此全球各國均開始重視能源使用的議題，其中包含：如何有效率的使用現有的能源與開發再生能源，而熱電則屬於更有效的使用能源的部份，其發電規模可由 mW 等級大致 kW 等級。

在 1990 年以前熱電材料之 ZT 值均在 1 以下，直到 1995 年以後由於奈米技術（超晶格與量子點等）與製程技術（高能球磨與火花電將放電燒結等技術）的進步，因此近一、二十年來熱電材料特性有顯著的提昇[1]，如圖 1.3 所示，在 1995 年以後熱電材料之 ZT 值已由原本 1.0 左右提昇到 3.5，因此熱電模組的使用量可以有效的減少，材料的成本也會隨之降低，所以應用範圍由原本的小功率致冷已經轉變為溫差廢熱發電。

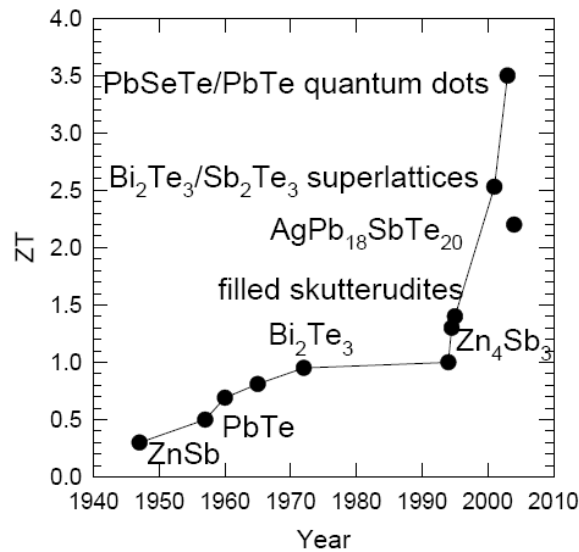


圖 1.3：近年來熱電材料性能提昇圖[1]。

模組發電的應用範圍包含：(a) 汽車廢熱發電：在 RTI 與 GM 公司合作的計畫中，單層 PbTe/TAGS 熱電轉換系統安裝於商用貨車的排氣管處，工作溫度為高溫端 $T_h = 375\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，低溫端 $T_c = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時，其轉換效率為 7 %。RTI 並同時研究將熱電發電系統應用於可攜式柴油發電機，探討廢熱回收效率，目前此項由美國軍方經費支援的研究正在進行中。(b) 在 PV-TE 組成的系統：Ning 等人[2]實驗的結果顯示，利用吸收膜與熱電模組的系統中發電效率會明顯的提升，整體的發電效率由 9 % 提升至 13 %，主要原因是加入熱電模組後可將原本太陽能電池無法使用

的紅外線波段加以應用，以提昇整體之效率。(c) 熱電模組進行太陽能轉換為電能：2011 年Kraemer等人[3]研究證實利用Bi₂Te₃製作TEG在AM 1.5G的狀況下進行熱電轉換，其轉換效率可達 4.6 %，其效率提升的主要原因在於吸收膜的熱聚焦與真空狀態下使熱損失降到最低，因此使效率得以提升。

至目前為止已有許多學術研究單位在熱電的領域投入相當大的研究能量，希望熱電模組能夠有著更多的應用領域與發展空間，以下將針對理論分析部份進行回顧。在熱電發電模組方面，許多學者針對熱電能源產生器進行分析，其中 Min G. and Rowe D.M.團隊於 1991 年後陸續發表了一系列的論文[4-6]，對熱電能源產生模組進行分析，並提出設計熱電能源產生模組首先必須考慮模組兩端之溫差、產生的電流與電壓，接著再考慮材料的特性、接觸電阻與接觸熱阻，最後再進行模組的設計(包含：熱電晶粒的高度、熱電晶粒的截面積與串聯的 P-N 對數)。研究中針對接觸電阻與接觸熱阻進行分析，並探討這些變數對於熱電能源產生器之產生電能與轉換效率之影響，研究之結果顯示熱電晶粒高度對於產生之電能與轉換效率具有相當大的影響，轉換效率會隨著晶粒高度增加而增加，然而產生的電能卻會隨著熱電晶粒的增加而變小。

由以上結果顯示，在熱電電源產生模組方面，熱電晶粒的尺寸與封裝密度對於模組的性能與特性均扮演著相當重要的因素，因此在模組的設計上佔相當關鍵性的地位。

二、實驗方法

在進行實驗前先以模擬方式來了解各種參數對發電效率與發電量之影響，接著再以實驗的方式來加以驗證。而單一 P-N 對晶粒之效率 η 可以表示為輸入之熱量 Q_h 與輸出之功率 P_o 之比值：

$$\eta = P_o / Q_h \quad (1)$$

而輸出之功率 P_o 則可寫為 $P_o = I^2 R_{out}$ ，其中 R_{out} 代表負載之電阻，而電流 I 則為迴路之電流，則輸入之熱量 Q_h 可寫為：

$$Q_h = G\Delta T + ST_h I - \frac{1}{2} I^2 R_{TE} \quad (2)$$

其中，第一項代表熱電材料本身所回傳的熱量，由於與載子移動熱的方向相

同，因此以正號表示。而第二項則代表熱電材料施加電流後，經由電子所移動的熱。第三項則為熱電材料本身的焦耳熱部分。式中 S 與 G 分別代表材料的 Seebeck 係數 (V/K) 與熱導率 (W/K)， R_{TE} 代表熱電發電模組之內電阻， ΔT 則代表高溫端 (T_h) 與低溫端 (T_c) 之溫差。而電流 I 可以表示為：

$$I = V / (R_{TE} + R_{out}) \quad (3)$$

而熱導率 G 可以寫為：

$$G = (k_n + k_p) A / L \quad (4)$$

單一 P-N 對晶粒之總電阻 R_{TE} 可寫為：

$$\begin{aligned} R_{TE} &= R_n + R_p \\ &= (\rho_n + \rho_p) \frac{L}{A} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， R_n 與 R_p 分別代表 N 型與 P 型晶粒之電阻，而 ρ_n 與 ρ_p 分別代表 N 型與 P 型晶粒之電阻係數，而 k_n 與 k_p 分別代表 N 型與 P 型晶粒之熱傳導係數。此外， L 與 A 則分別表示晶粒之高度與面積，由於 N 型與 P 型晶粒之長度與面積設為一致，因此在此僅用 L 與 A 表示。電壓可以寫為：

$$V = S \Delta T \quad (6)$$

由以上之公式可以推得：

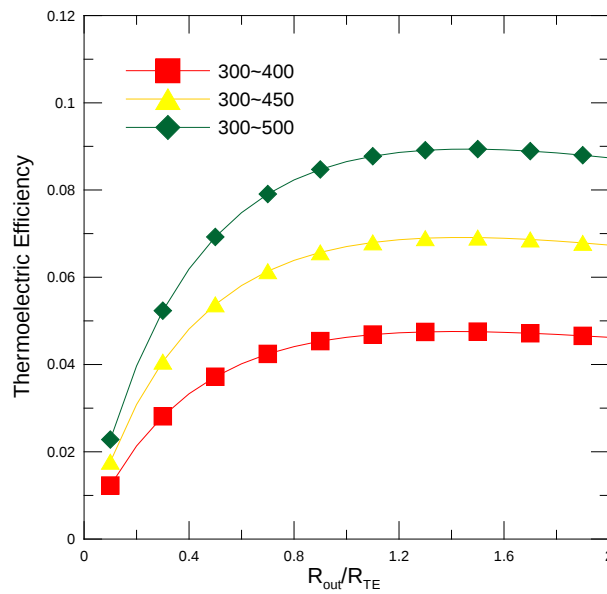
$$\eta = \left[\frac{\mu \eta_c}{GR_{TE}(\mu + 1)^2 / ST_h + (\mu + 1) - \eta_c / 2} \right] \quad (7)$$

其中，卡諾效率 $\eta_c = \Delta T / T_h$ ，而電阻比 $\mu = R_{out} / R_{TE}$ 。

模擬之熱電發電模組為 127 對 (P 型晶粒與 N 型晶粒各 127 顆) 之模組，晶粒之高度與面積分別為 0.28 cm 與 0.04 cm²，晶粒之其餘參數如表一所示。利用上面的程式可以求出在不同溫差下電阻比與發電效率之關係圖 (如圖一所示)，圖中低溫端 (T_c) 的溫度設定為 300 K，紅色線則代表高溫端 (T_h) 為 400 K，由圖中亦可以發現電阻比約在 1.4 倍時會有最佳的熱電發電效率，且可以發現當溫差變大時發電效率也會隨之變大，由圖中可得知溫差在 100 K 時最大發電效率約為 4.8%，但溫差增加到 150 K 與 200 K 時，發電效率會分別增加到 6.9% 與 9.9%，因此增加模組兩端之溫差可以有效提高模組之發電效率。

表一：晶粒之尺寸與熱電相關物理特性

N type leg			
變數	$\rho_n(\Omega \cdot cm)$	$S_n\left(\frac{V}{K}\right)$	$\kappa_n\left(\frac{W}{cm \cdot K}\right)$
數值	0.00170	0.000213	0.00962
P type leg			
變數	$\rho_n(\Omega \cdot cm)$	$S_n\left(\frac{V}{K}\right)$	$\kappa_n\left(\frac{W}{cm \cdot K}\right)$
數值	0.00148	-0.00022	0.0112

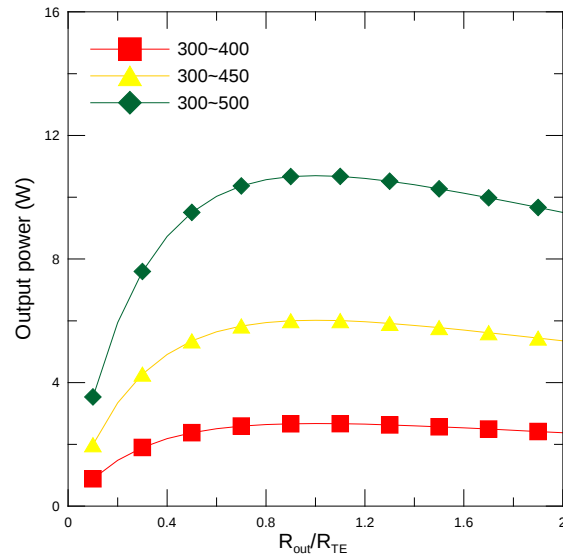


圖一：不同溫差下電阻比與熱電發電效率之關係圖。

利用功率之公式與 (3) 式及電阻比 $\mu = R_{out}/R_{TE}$ 便可以推算出：

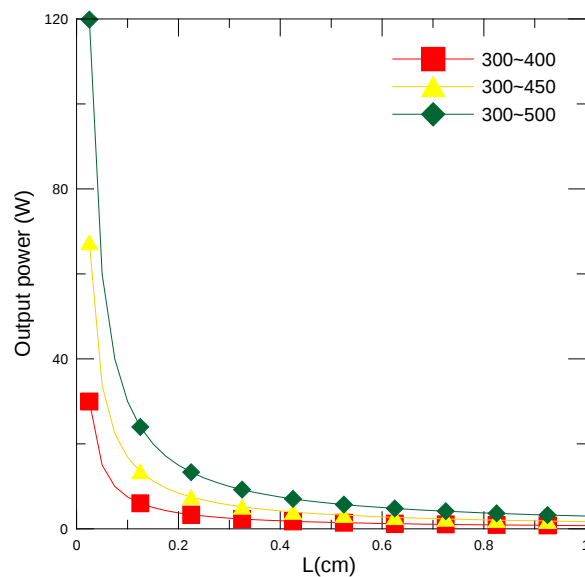
$$P_o = I^2 R_{out} = V^2 \mu / R_{out} (\mu + 1)^2 \quad (8)$$

接著利用上面的公式可以求出不同溫差下電阻比與熱電發電功率之關係圖 (如圖二所示)，由圖中可以發現最大輸出功率約在電阻比約為 1.0 倍時，且可以發現當溫差變大時發電功率也會隨之變大，由圖中可以得知溫差在 100 K 時，最大發電功率約為 2.6 W，但溫差增加到 150 K 與 200 K 時，功率會分別增加到 6.0 W 與 10.8 W。由此可見雖然溫度增加 0.5 倍與 1 倍，但輸出功率卻會增加約 2.31 倍與 4.15 倍，也就是說溫差變大時輸出功率會快速的增加。



圖二：不同溫差下電阻比與熱電發電功率之關係圖。

由圖二中可以得知，當外加負載之電阻與熱電模組相同時會有最大的輸出功率，因此假設熱電模組之電阻與外加負載之電阻相同時，來探討晶粒高度對於輸出功率之影響。由圖三中可以發現，在不同溫差下，熱電模組之發電功率均會隨熱電晶粒之高度變短而變大，以溫差 200 K 為例，晶粒高度由 0.4 cm 降低為 0.2 cm 時，熱電模組的發電量增加大約 1 倍，因此熱源熱量很大時可以利用較低高度的模組來提高總發電量。會造成這現象的原因是： $J = \kappa \times dT/dx$ ，當熱電模組兩端的溫差 (dT) 固定時，如果晶粒高度 (dx) 變短時，流經熱電晶粒之熱流量會隨之增加，因此會造成發電量的增加。

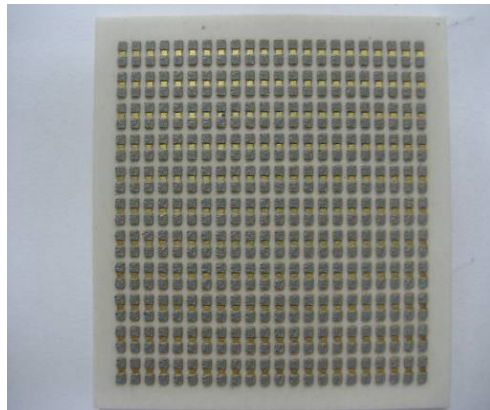


圖三：不同溫差下晶粒高度與熱電發電功率之關係圖。

三、結果與討論

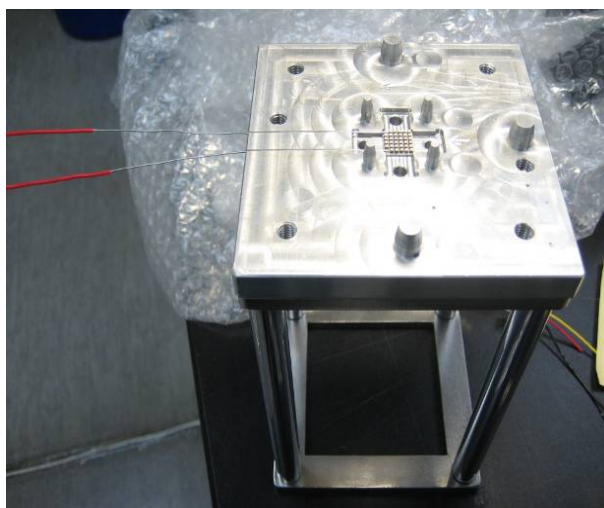
在利用熱電晶粒封裝時，常常發現電路會有斷路的現象，經分析結果顯示最主要的原因有兩個：(a) 焊錫厚度不一致與 (b) 晶粒高度落差過大所造成，為了改善模組封裝之可靠度，因此在焊錫塗附電極部分改以網版印刷(如圖四所示)方式來進行，如此可使焊接後焊錫的厚度一致，以增加模組之可靠度，除改善焊錫厚度外，晶粒高度長短不一亦會影響熱電模組之封裝品質，因此必須將興利進行篩選與分類，將高度接近的晶粒至於同一模組中進行封裝。熱電模組封裝過程如下所示：

以網版印刷機均勻塗覆錫膏：為使模組在封裝後的可靠度增加，因此在封裝時必須控制焊錫的厚度，而一般業界常使用網版印刷的方式，可提供快速與穩定之錫膏塗覆製程，本研究所採用之網版，其之厚度為 $100\ \mu\text{m}$ ，經過網版印刷後之基板如圖四所示，由圖中可以看出焊錫與電極的位置十分準確，且錫膏呈現平坦與均勻的塗附在電極上，且經過厚度量測結果顯示，錫膏厚度均落在 $80\sim 100\ \mu\text{m}$ 之範圍，已符合一般商用之水準。



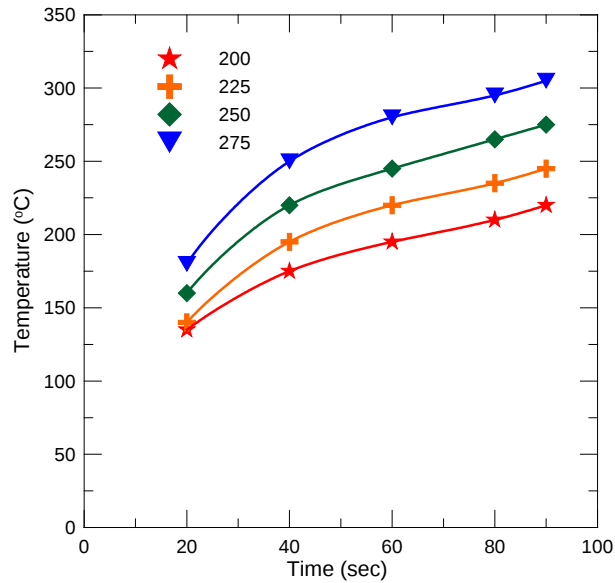
圖四：網版印刷製程印刷後之基板。

將晶粒擺放至夾製具中：為使擺放晶粒的準確性增加與配合後續的封裝製程，因此本研究採用方形陣列之方形孔洞來作為擺放晶粒之輔具，當晶粒擺放完成後，利用製具將輔具移除。圖五為移除輔具後之圖片，最後藉由定位銷將上基板與上夾製具蓋上，並將四個角落之螺絲鎖上便可進行雙面熱壓。

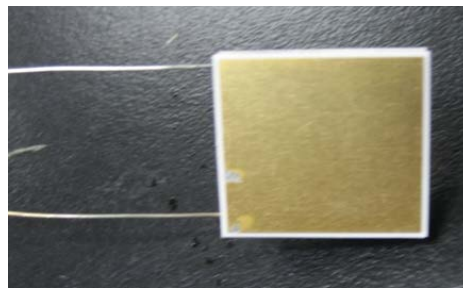


圖五：熱電模組晶粒擺放之夾製具。

利用雙面熱壓機進行模組封裝：為提升模組封裝之穩定性，因此本研究設計晶粒擺放夾製具，並在擺放晶粒完成後，為了同時進行上、下兩基板之焊接，因此特地與廠商客製”雙面”熱壓機，熱壓機之壓力、溫度與時間均為可控制之參數，可更精準的控制模組封裝之溫度與時間，藉此封裝過程以降低模組之變異量，藉由雙面熱壓機設定溫度與加溫時間之測試，以確認夾製具內部之溫度，測試之結果如圖六所示，由圖中之結果顯示在設定溫度 250 °C 時，熱壓時間在 70 sec 後，夾製具內部之溫度變會到達 250 °C，而設定溫度 275 °C 時，熱壓時間在 40 sec 後，夾製具內部之溫度變會到達 250 °C，因此若希望在較短時間內進行焊接，以減少擴散之行為，則可以設定較高之溫度以減少焊接之時間。本計劃使用之錫膏為錫銀銅無鉛錫膏，其焊接溫度為 227 °C，為確保焊錫完全熔融，因此溫度設定為 250 °C，熱壓時間為 90 sec。封裝後之熱電模組相片如圖七所示。



圖六：雙面熱壓機熱壓溫度測試。



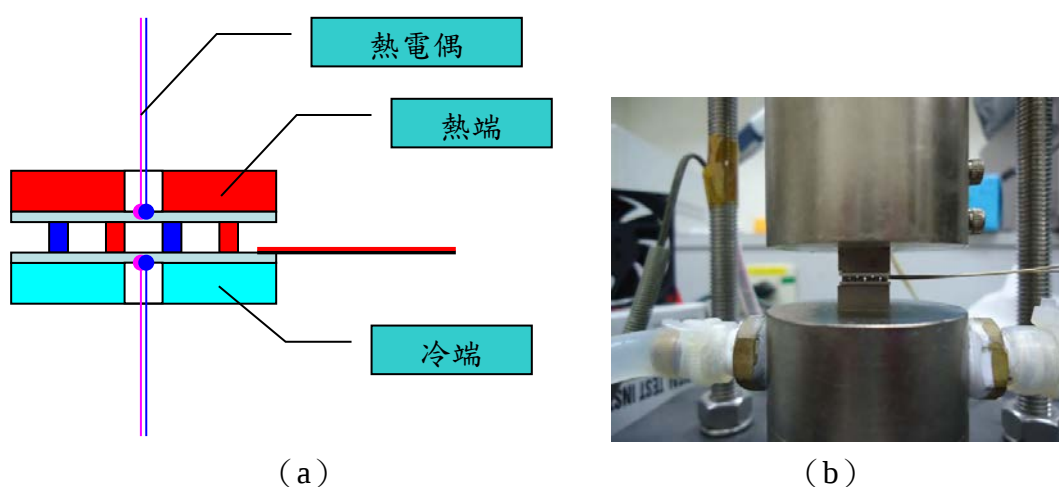
圖七：封裝後熱電模組之相片。

為確認模組封裝之變異量，因此製作 8 片相同規格之熱電模組來加以驗證。由雙面熱壓機封裝之模組，經 Z-meter 量測之結果如表二所示，由表中可以發現，模組之電阻均落在 $0.28 \sim 0.29 \Omega$ 間，其電阻變異量為 2.32 %。而模組之最大溫差落在 $65.4 \sim 67.8 ^\circ\text{C}$ 間，其變異量為 3.66 %。而模組之 ZT 值落在 $0.76 \sim 0.80$ 間，其 ZT 值變異量為 5.57 %，因此利用 Z-meter 量測之結果顯示電阻，最大溫差與 ZT 值之變異量均 $< 6 \%$ 。

表二：利用 Z-meter 量測之模組特性。

ID	I (mA)	R (Ω)	DT _{max} ($^{\circ}$ C)	ZT
BI01	50	0.283	66.967	0.787
BI02	50	0.287	67.833	0.803
BI03	50	0.290	66.600	0.780
BI04	50	0.283	66.900	0.783
BI05	50	0.290	66.033	0.770
BI06	50	0.290	65.400	0.760
BI07	50	0.290	65.633	0.760
BI08	50	0.290	66.567	0.777
變異量		2.32%	3.66%	5.57%

利用相同之製程封裝不同晶粒高度之模組，並進行熱電模組發電量之量測，圖八為熱電模組發電功率量測架構之示意圖與實際測試之相片，上載台內有加熱管提供熱源，下載台則以水路連接至恆溫水槽，以提供穩定之冷端溫度。接著在兩載台中間鑽孔，並穿入熱電偶以量測模組之溫差，當溫度達平衡時，調整可變電阻大小（外加負載），並利用電壓計與電阻計量得電壓值（ V ）與電阻值（ R ），以計算輸出之功率（ $P_o = V^2/R$ ），量測之結果如表三所示。表三為利用兩種不同高度晶粒進行封裝之結果，模組的面積為 10×10 mm，共有 17 對 P-N 熱電晶粒所組成，在量測過程中可以發現在較短的晶粒確實具有較大的發電量，且晶粒高度為 0.8 mm 之模組大約比 1.6 mm 之模組發電量大約 50 %。



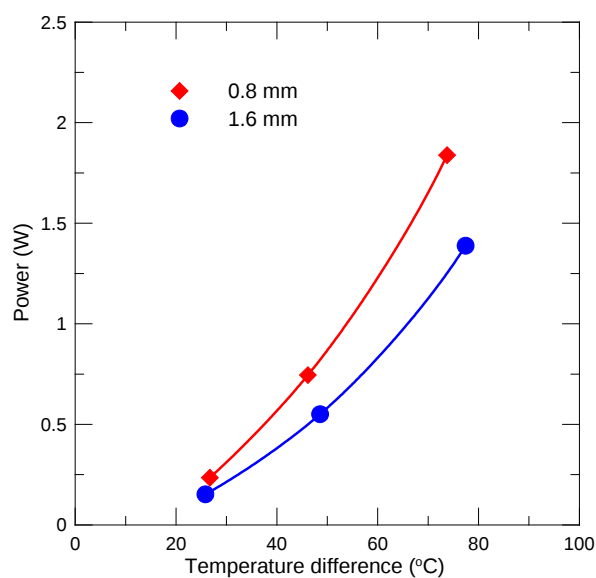
圖八：熱電模組發電量量測：(a) 量測示意圖；(b) 量測裝置相片。

表三：不同高度晶粒封裝之比較。

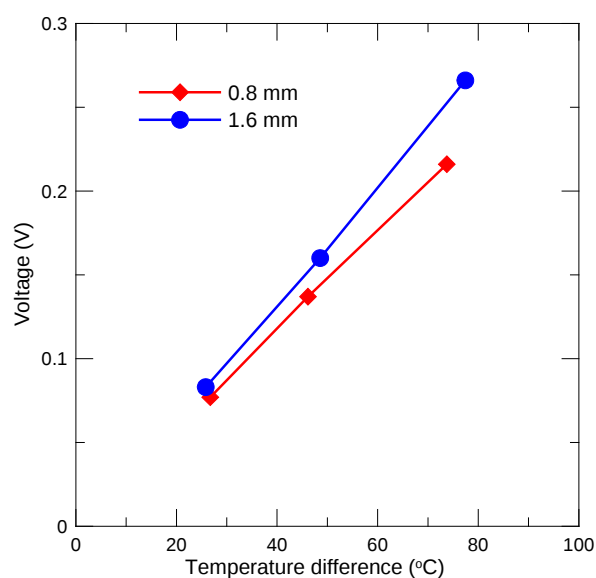
晶粒尺寸 (mm)	溫差 ($^{\circ}\text{C}$)	電壓 (V)	電阻 (Ω)	功率 (mW)
1 × 1 × 0.8	26.21	0.066	0.316	13.785
	26.71	0.077	0.404	14.676
	26.67	0.084	0.499	14.140
	46.16	0.116	0.307	43.831
	46.15	0.137	0.403	46.573
	46.25	0.149	0.508	43.703
	73.82	0.185	0.307	111.482
	73.75	0.216	0.406	114.916
	73.64	0.241	0.520	111.694
1 × 1 × 1.6	25.95	0.077	0.634	9.398
	25.82	0.083	0.723	9.517
	25.88	0.088	0.818	9.405
	48.72	0.147	0.629	34.219
	48.57	0.160	0.740	34.413
	48.57	0.173	0.869	34.242
	77.33	0.248	0.723	84.862
	77.44	0.266	0.818	86.759
	77.65	0.283	0.936	85.517

圖九為將表二中之數據之功率密度換算成常見之 40 × 40 mm 之熱電模組時之發電功率，由圖中可得知當溫差變大時，發電量呈現二次曲線的方式上升，在晶粒為 1 × 1 × 0.8 mm 晶粒之模組中顯示，溫差 40 $^{\circ}\text{C}$ 時發電量可以到達 0.5 W，當溫差到達 80 $^{\circ}\text{C}$ 時發電量可以到達將近 2 W，當溫差由 40 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 80 $^{\circ}\text{C}$ 時，幾乎增加了 4 倍的發電量，因此提高溫差確實可以有效的增加發電量。此外亦可由兩曲線中發現當晶粒高度變低時發電量會隨之增加，這主要是因為在模組兩端溫差固定時，晶粒高度變低時熱通量會增加，但發電效率卻會略微降低，且實際熱通量並非增加一倍，因此發電量僅增加約 50 %。與模擬之趨勢相符，但發電量上卻出現了不小的差距，這主要的原因包含：(1) 晶粒高度較低時，上下機板間之熱傳量（熱傳導，熱對流與熱輻射）較高，導致熱損失較嚴重；(2) 模組兩端溫差相同時，晶粒高度較低之模組，晶粒兩端之實際溫差較低，因此 8 mm 晶粒高度模組實際熱流量並非為 1.6 mm 晶粒高度模組之兩倍。此現象可以由圖十

中之電壓曲線得到證實，由於電壓 $V = S\Delta T$ ，在溫度變化不大的狀況下 Seebeck 係數可以視為常數，因此電壓差便正比於溫差，故由圖中之結果可發現晶粒較低之模組最大發電量時之溫差較小，因此導致理論模擬與實驗結果之差距。



圖九：不同高度晶粒之熱電模組溫差與發電功率之關係圖。



圖十：不同高度晶粒之熱電模組溫差與最大發電功率電壓之關係圖。

四、結論

本研究採用理論模擬的方式研究不同溫差對熱電模組發電量之影響，模擬結果顯示溫差變大時，模組的最大發電量與最大發電效率均會隨之增加。而當晶粒

高度變短時，模組的發電量會隨之增加。接著，利用封裝與發電測試探討模組晶粒高度與發電量之關係，由實驗之結果證實晶粒高度越低時，熱電模組的發電量會隨之增大。因此實驗測試結果與模擬結果兩者趨勢相同，但發電量增加比例卻比模擬得來的小，主要原因在於實際量測時，晶粒高度較低時，上下機板間之熱損失較嚴重。此外，在模組兩端溫差相同時，且受基板厚度之影響，晶粒兩端之實際溫差較低，導致晶粒高度減半時，發電量未提升一倍的主要原因。因此未來可以將模組封裝於中空環境中，以降低基板間之熱損失，以提高模組之發電量與發電效率。

五、致謝

感謝經濟部能源局經費支持，使得本研究得以順利完成。

六、參考文獻

- [1] J. Yang, Potential Applications of thermo- electric waste heat recovery in the automotive industry, 2005 International Conference on Thermoelectrics, pp. 155-159, 2005.
- [2] Ning Wang, Li Han, Hongcai He, Nam-Hee Park and Kunihiro Koumoto, A novel high-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid device, Energy & Environmental Science, vol. 4, pp. 3676–3679, 2011.
- [3] D. Kraemer, B. Poudel, H.P. Feng, J.C. Caylor, B. Yu, X. Yan, Y. Ma, X.W. Wang, D.Z. Wang, A. Muto, K. McEnaney, M. Chiesa, Z.F. Ren, G. Chen, High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration, Nature Materials, vol. 10, pp. 532–538, 2011.
- [4] G. Min and D.M. Rowe, Optimization of thermoelectric module geometry for ‘waste heat’ electric power generation, Journal of Power Source, vol. 38, pp. 253-259, 1992.
- [5] Rowe D.M. and Min G., Evaluation of thermoelectric modules for power generation, Journal of Power Source., vol. 73, pp. 193-198, 1998.
- [6] Rowe D.M. and Min G., Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation, IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, vol. 143, pp. 351-356, 1996.

應用小功率發光二極體於內燃機以降低污染並節省能源

Application of small power LED on the internal combustion engine to reduce pollution and save energy

鄭景亮

Jing-Lyang Jeng

工研院綠能所產業發展推動組產業節能服務室

Energy Conservation Services Department, Green Energy Initiative Division, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

隨著全球對地球暖化及氣候變遷的逐漸重視，節能減碳已成為全人類生活及經濟發展必須時時關注的重大課題。在所有可行的節能減碳方式中，發光二極體除了在照明方面的應用有了初步的成果外，國外的研究者也朝其它的方向進行努力，例如內燃機上的應用。

本文即針對此技術為何能夠提升內燃機燃燒效率、降低汙染排放及節省燃料的原因進行說明，以便做為對此主題有興趣者之參考。

關鍵字：發光二極體、內燃機、臭氧

Abstract

With the world's increasing emphasis on global warming and climate change, energy conservation and carbon reduction has become a major issue for all mankind life and economic development must always be concerned about. Within all possible ways of saving energy and reducing carbon, light-emitting diodes in addition to applications in lighting and with the preliminary effects, the researchers abroad committed to other direction efforts, such as applied it into the internal combustion engine.

This paper described the reasons for why this technology can enhance the internal combustion engine combustion efficiency, reduce pollution emissions and save fuel, and hope to be the reference for those who are interest this topic.

Keyword: light emitting diode, internal combustion engine, ozone

一、前言

自 1962 年由美國通用電器公司的 Nick Holonyak, Jr. 成功開發出第一種可實際應用的可見光發光二極體（紅光）以來[1]，由於它獨特的光學特性，且電能轉換成光能的效率佳，隨著產品的發展，此項技術及產品遂逐步被應用於顯示器、信號指示器及各式照明；ITIS 的資料顯示[2]，民國 96 年至 100 年期間，我國與發光二極體相關的產值由約 894 億元成長至 1,861 億元，5 年間成長了兩倍以上。在特殊的應用方面，則另有將發光二極體應用於醫療、農漁畜牧、光通訊、及光學感測器等，以擴展此項技術的用途。

隨著全球對地球暖化及氣候變遷的逐漸重視，節能減碳成為全人類生活及經濟發展必須時時關注的重大課題。在所有可行的節能減碳方式中，發光二極體除了在照明方面的應用有了初步的成果外，國外的研究者也朝其它的方向進行努力，例如工業上的應用。透過美國專利局專利資料庫[3]的檢索即可發現已有人將發光二極體應用於內燃機，以增加引擎的扭力及馬力。

民國 100 年，承包台北捷運地下工程之某日商公司，於其履帶式吊車及油壓單元之內燃機試用某日本技術提供者之技術（於空氣入口端以 0.0426W 小功率藍光或紅光 LED 照射），發現有提升燃燒效率並產生節能的效果，且分別經該公司於施工現場及日本某大學測試證實；惟該日商及測試單位並不瞭解產生此效果的原因，故請工研院協助分析及說明。

本文即針對此技術為何能夠提升內燃機燃燒效率、降低汙染排放及節省燃料的原因進行說明，以便做為對此主題有興趣者之參考。

二、技術內容說明

2-1 廠商的資料說明

該廠商在內燃機進氣口加裝一組「能量產生器」，於空氣入口端以 0.0426 W 小功率藍光或紅光 LED 照射，燃燒空氣經過該「能量產生器」時將被離子化；「能量產生器」之前曾被應用於肉類與泡菜，能達到除臭與保鮮的效果。此「能量產生器」應用於內燃機引擎及其載具，經該公司於台北捷運地下工程施工現場及日本某大學進行測試，證實具有以下的效果：

1. 施工現場安裝於履帶式吊車及油壓單元

(1)煙氣排放：依環保署排放廢氣測定標準進行測試，黑煙減少 70.4%，碳氫化合物（HC）減少 46.8%，一氧化碳減少 53.6%。

(2)引擎噪音：無負載時噪音降低 6.5 db，作業時噪音降低 3.3 db。

2. 日本某大學安裝於內燃機進行燃料耗用測試

(1)全載運轉條件下，節省燃料約 5%。

(2)低轉速，高扭力；例如 1000 rpm 時產生原 1500 rpm 的扭力，此部份亦產生節油效果（未計入前項）。

2.2 技術原理說明

根據廠商所提供的資訊，依序解析為何在內燃機進氣口加裝一組「能量產生器」便可以提升內燃機的燃燒並產生節能的效果。

1. 廠商提供的資料宣稱，該公司所安裝之「能量產生器」之前曾應用於肉類與泡菜，且能達到除臭與保鮮的效果。此與能量產生器照射空氣可能產生臭氧(O₃)有關，而臭氧確實具有除臭、保鮮、殺菌、除氯之功能[4]。

2. 順著前項的思路，接下來要說明的是：為甚麼該日商公司使用功率只有 0.0426 W(約 0.0366 kcal/hr)的藍光或紅光LED照射到空氣時會產生臭氧(O₃)。由於空氣中含有約 21%的氧及 78%的氮，由於不同的物質(如O₂)對於光有特定的吸收帶；其中氧分子的強烈吸收帶多在紫外線(UV)波段，幸運的是在光波長 538~771 nm有一弱吸收帶[5,6]（另參圖 2.1），因此以紅光LED(波長約 620~750 nm[7,8]照射時（另參圖 2.2），氧分子可以吸收這個波段的光能。由於氧分子的鍵能(Bond energy)單鍵是 35 Kcal/mole，雙鍵是 119 Kcal/mole[9]（另參表 2.1），而每一mole約有 6.22×10^{23} 個氧分子；因此，從機率上來講，部份的氧分子在吸收足夠的光能後，有機會打斷鍵結，形成兩個氧原子。不穩定的氧原子在空氣流中會與氧分子結合，形成臭氧(O₃)。

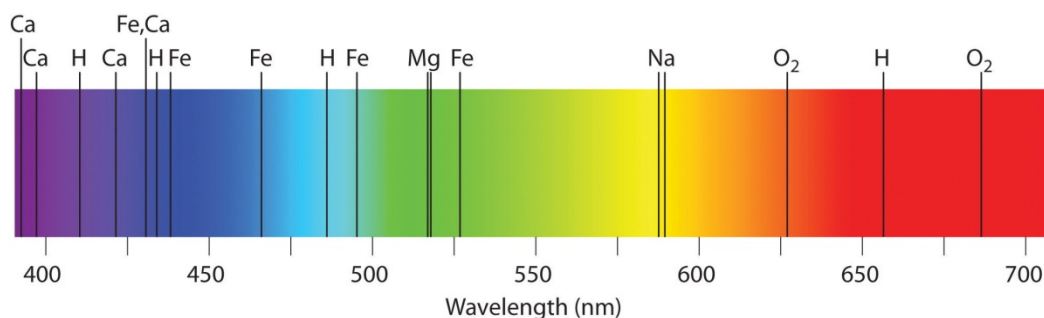


圖 2.1、 O_2 在 628nm及 687nm的兩條吸收帶[6]

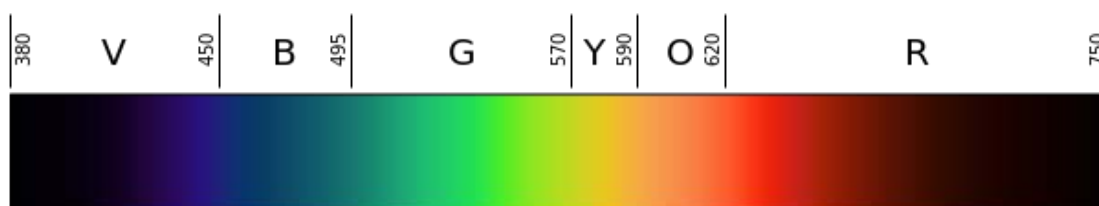


圖 2.2、可見光的頻譜[8]

3. 臭氧(O_3)形成後也是處在不穩定態，它的半衰期 (half life time) 約 30 分鐘[4]。所幸它在形成後隨即與其它空氣流進入引擎(diesel engine)與燃料混合燃燒。

4. 臭氧(O_3)分子隨著空氣流進入內燃機，由於臭氧較一般的空氣有較大的分子量，在相同的誘導機構及進氣速度下，提升了燃燒空氣流的密度及質量流率；在進氣門開度及燃料供給不變的情況下，由於氧原子數及空氣質量流率較高，燃料燃燒更完全，形成更強的氣體膨脹作用，可以使內燃機產生更大的扭力及馬力，從而產生節省燃料的效果[10]。

2.3 國內發展現況

以下列方式檢索，分別發現：(1) 以論文名稱「發光二極體」檢索台灣博碩士論文系統[11]，得 21 篇博碩士論文，但與本文探討的主題無關。(2) 在台灣期刊論文索引系統[12]以篇名「發光二極體」分別與「內燃機」、「燃燒」、「臭氧」組合檢索，未發現相關論文。(3) 透過中華民國專利資訊檢索系統[13]以專利名稱「發光二極體」分別與「內燃機」、「引擎」、「燃燒」、「臭氧」組合檢索，則發現一件專利，其專利公告號為 I326329 (申請日為 2007/06/01)。

表 2.1、標準鍵能[9]（單位：kcal/mole）

單鍵	平均鍵 解離能	單鍵	平均鍵 解離能	多鍵	平均鍵 解離能
H-H	104.2	B-F	154	C=C	146
C-C	83	B-O	123	N=N	109
N-N	38.4	C-N	73	O=O	119
O-O	35	N-CO	86	C=N	147
F-F	36.6	C-O	85.5	C=O (CO ₂)	192
Si-Si	52	O-CO	110	C=O (aldehyde)	177
P-P	51	C-S	65	C=O (ketone)	178
S-S	54	C-F	116	C=O (ester)	179
Cl-Cl	58	C-Cl	81	C=O (amide)	179
Br-Br	46	C-Br	68	C=O (halide)	177
I-I	36.	C-I	51	C=S (CS ₂)	138
H-C	99	C-B	94	N=O (HONO ₂)	143
H-N	93	C-Si	83	P=O (POCl ₃)	110
H-O	111	C-P	73	P=S (PSCl ₃)	70
H-F	135	N-O	55	S=O (SO ₂)	128
H-Cl	103	S-O	87	S=O (DMSO)	93
H-Br	87.5	Si-F	132	P=P	84
H-I	71	Si-Cl	86	P≡P	117
H-B	90	Si-O	110	C≡O	258
H-S	81	P-Cl	79	C≡C	200
H-Si	70	P-Br	65	N≡N	226
H-P	77	P-O	96	C≡N	213

因此，連同之前透過美國專利局資料庫檢索得到之 5,487,874 號專利（申請日為 1994/03/30），我們發現國內仍未注意到可以將發光二極體應用於內燃機，以提升其燃燒效率及馬力；而國外則已有少數的發明及應用，如 I326329 及 US

5,487,874 號專利等，前後的申請人分別屬於日本及白俄羅斯。

三、結論與建議

對於承包台北捷運地下工程之日商的這個有趣的問題，經過收集資料及依序分析後，結果摘述如下：

1. 廠商提到的「能量產生器」實際上就是一個臭氧(O_3)產生器。使用只有 0.0426W(約 0.0366 kcal/hr)的小功率藍光或紅光LED照射空氣時，部份氧分子可以吸收這個波段的光能而打斷鍵結，產生臭氧(O_3)。
2. 臭氧(O_3)分子隨著空氣流進入內燃機，由於氧原子數及空氣質量流率較高，燃料燃燒更完全，形成更強的氣體膨脹作用，可以使內燃機產生更大的扭力及馬力，從而產生節省燃料的效果。
3. 國內仍未注意到可以將發光二極體應用於內燃機，以提升其燃燒效率及馬力；而國外則已有少數的發明及應用。

四、誌謝

本文感謝經濟部能源局於『工業部門能源查核與節能減碳輔導計畫』給予本研究經費的補助與行政事務之協助。

五、參考文獻

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
2. ITIS 資料庫，http://itisweb2.itis.org.tw/ITISPSS2/ITISPSS_Search_Result.aspx
3. 美國專利局，<http://patft.uspto.gov/>
4. <http://en.wikipedia.org/wiki/Ozone>
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Absorption_band
6. http://catalog.flatworldknowledge.com/bookhub/4309?e=averill_1.0-ch06_s03
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum
8. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Linear_visible_spectrum.svg
9. <http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/react2.htm>
10. 美國專利 5,487,874 號。
11. <http://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gsweb.cgi/ccd=Xtvbst/webmge?Geticket=1>
12. <http://readopac.ncl.edu.tw/nclJournal/>

13. <http://twpat2.tipo.gov.tw/tipotwoc/tipotwkm?@@440143927>

噴流風機位置對隧道內煙氣結構之影響

Effect of Jet Fan Location on Smoke Structure in Tunnel

張金龍¹、朱信宇²、那奎²、梁智創³

C.L. Chang, H.Y. Chu, K. Na, J.C. Leong

國立屏東科技大學車輛工程系

Vehicle Engineering Department, National Pingtung University of Science and
Technology

摘要

本文主要進行縱向式通風短隧道火災模擬之研究，以作為日後隧道煙控系統設計之參考。當隧道內發生火災時，濃煙是影響人員逃生時最大的阻礙，也是致命的主要元凶。它的危害比火還嚴重，原因是它降低了能見度影響逃生速度和逃生方向的判別，加上逃生人員吸入過多的濃煙導致昏迷。本模擬就是為了有效的將高溫有毒濃煙排出隧道外，探討分別開啟不同噴流風機組的影響。模擬結果發現當隧道內發生火災時，起火點上游處的風機不應該全開，原因是上述風機過多的推力會導致煙柱傾斜過大，下游煙層混亂，而是在適當的通風速度下，保持適當煙柱角度，避免破壞下游處煙層的結構，以利人員逃生或消防隊救火。

關鍵字：縱向式通風、短隧道、風機、煙流、計算流體力學方法

Abstract.

This work simulates a fire in a longitudinally ventilated short tunnel to serve as a reference design for future tunnel smoke control system. When a fire breaks out in a tunnel, smoke is one of the key factors preventing effective evacuation leading to serious casualty. It is more deadly than a fire because it reduces the visibility in the tunnel slowing down the speed of evacuation and causing confusion in the direction of evacuation. Moreover, excessive smoke inhalation may cause the people be in a coma. Current simulation studies the effectiveness of discharging the high temperature toxic smoke from the tunnel through the activation of different jet fan units. It was found that the jet fan units upstream of the spot of fire should not be

¹ 國立屏東科技大學車輛工程系，教授

² 國立屏東科技大學機械工程系，學生

³ 國立屏東科技大學機械工程系，教授，email: jcleong@npust.edu.tw

totally activated. This is because the upstream jet fans may produce too much momentum resulting in an excessive tilted column of smoke. This eventually causes the smoke layer downstream of the fire to be chaotic. At an appropriate ventilation rate, a proper fire plume angle can be maintained. This avoid the destruction of the smoke structure downstream of the fire and thus more favorable to personnel evacuation and fire fighting.

Keywords: longitudinal ventilation, short tunnel, jet fan, smoke flow, computational fluid dynamics

一、前言

台灣因為地理環境極為特殊，西半部以平原和盆地為主，東半部多則為險山大峻，城市鄉間的往來多靠縱貫路和快速道路，在開闢道路時因為地形上的阻隔，又想縮短用路人的時間，通常會建高架橋或隧道來達成目的。兩者所產生的危險問題以公路隧道較為棘手，因為隧道內空間類似於密閉的空間，空氣流通欠佳。一旦裡面發生火災，煙氣無法自然排出，所產生的濃煙及有毒高溫氣體聚集在隧道中，嚴重威脅用路人的生命安全和影響救援的進度。根據美、英、日等先進國家的火災死亡調查統計，各約 70%、80%、25%之火災死亡者是因火場中吸入有毒氣體而中毒死亡[1]。火場中有許多高分子材料因受到高溫而分解及燃燒後產生有毒氣體，伴隨著大量的高密度濃煙常被視為火場中的頭號殺手，另一方面，燃燒過程中所產生的懸浮微粒和有毒濃煙阻礙了避難者和救火人員的行進路線。這時就必須啟動額外隧道通風系統來解決此問題，藉由通風系統多加的推力將它排放出去而吸入新鮮空氣，對逃生者和救援者有很大的幫助。不只公路隧道使用通風系統，鐵路隧道也是使用者之一，如：英法海底隧道、澳洲的雪梨海港隧道、日本的青函隧道、地下化捷運系統等。除了在火災發生時啟動額外通風系統，另一項因素是高速火車或慢速列車經過隧道時排放熱能以及污染氣體，經過長時間的累積隧道內的壁溫會逐漸升高，而使隧道內的空氣不但溫度跟著升高而且空氣品質惡劣。因此通風系統可以從隧道外引入適量的空氣來吸收隧道內的熱能並排出隧道。如此不只可以降低隧道內的溫度以及改善空氣品質，還可以讓車內的乘客感到舒適，隧道的維修人員也可以順利的在隧道內進行修復的工作。

基本上隧道通風可分為自然通風、行車活塞效應通風及機械通風三種。自然通風之效果因受限於氣象、地形等條件之影響而不穩定。活塞效應通風則是利用

車子在隧道內移動去改變隧道內的流場，它所產生之壓差則與行車速度及車輛所佔的空間面積比例有關。機械通風效果是最可靠的，因為它是屬於強制性的通風。

國內目前有 2 條長公路隧道，分別是八卦山隧道快速道路和雪山隧道高速公路，前者的長度為 4.9 公里，後者的長度為 12.9 公里，它們皆有自己的通風設計系統。因為兩者皆屬於長隧道，政府開放八卦山隧道快速道路可通行大貨車以及雪山隧道高速公路可行駛遊覽車，這對隧道安全災害所產生的影響將大幅的提高，所以駕駛人行駛在隧道內要更加的注意四周來車的情況。

其實，隧道是採用噴流式風機，靠著噴流風機所產生的高速衝力空氣噴射氣流在隧道內產生移動，通常都是兩個或兩個以上為一組裝置在隧道內。然而，以往學者對於隧道內通風的方式的研究皆是採用在隧道下游出口處裝設一個大風扇，當風扇開啟時產生類似於風洞般的通風方式來探討回流層與臨界速度的關係。本研究之目的是模擬噴流式風機對煙氣的局部影響。

二、研究方法

本文的研究方法是依據一個縮小尺寸的短隧道模型，進行數值模擬探討煙流情況。該隧道模型如圖 1 所示。



圖 1. 隧道模型圖

數值模擬部分可分為 3 大步驟：(一)收集隧道形狀及尺寸等資料，再利用 Gambit 繪製出隧道幾何圖形和其網格的建立，最後給予邊界條件設定；(二)流場解析數學模式，此模擬使用的工具是計算流體力學(CFD)套裝軟體 Fluent，以求

解連續、動量、能量、Species、紊流動能、紊流動能消散率等方程式，以求得隧道內速度、壓力、溫度之分佈情形；(三)將所得到的流場數據整理且會製成圖表，以進一步分析。

隧道的模型如圖 2 和圖 3 所示，分別是模型尺寸前視圖和側視圖。隧道長度為 530 cm、寬度為 30 cm、高度為 30 cm，隧道天花板下方 2 cm 處裝有 6 組 Jet-Fan(如圖 4 所示)。每組間隔 90 cm，噴流風機是由電腦 CPU 風扇直徑 4 cm 和外徑 4.4 cm、長度 10 cm 的 PVC 管所構成(如圖 5 所示)。驅動風扇的方式是外接一組 12V 的電源供應器，控制方式分別有驅動單顆或雙顆風扇。隧道模型中安裝之風扇，其型號為 SUNON KD1204PKB2，風扇轉速每分鐘可達到 6200 rpm，產生的靜壓是 0.16 吋-水柱，噴流風機的流量為 7.7 CFM。

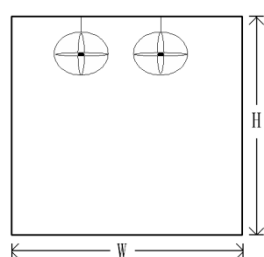


圖 2. 模型尺寸前視圖

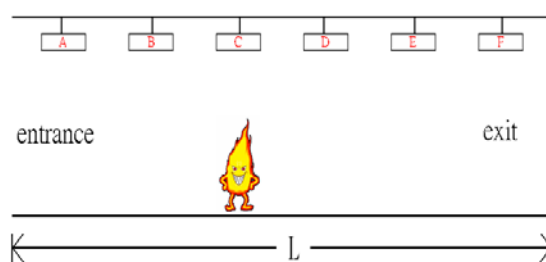


圖 3. 模型尺寸側視圖



圖 4. 隧道模型前視圖

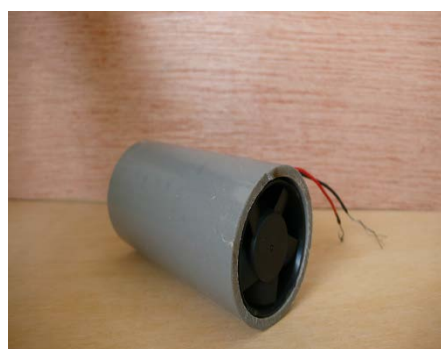


圖 5. 風扇實體圖

隧道的幾何外形繪製完畢之後，本研究便開始建構隧道網格。此隧道完全使用正交網格，網格數約 130 萬。圖 6 是網格分佈圖。從圖中可明顯看出網格分佈稍作設計。在物理量變化大的區域網格分佈比較密集，而變化小的區域則網格可

以比較稀疏。由於靠近起火點和風扇的區域，速度、溫度、煙的濃度之變化必定比較明顯，所以在這些區域附近的網格設計得比較密集一些。圖 7 是燃燒時從側向觀察隧道中煙氣流動的示意圖，可知在建構網格分佈時，在煙氣流動的路線中都應該將它設為比較密集，如圖 8 所示。

此模擬在火源處給予不同的入口速度，來調整火源熱釋率的大小，本研究使用的燃料是甲烷(錯誤! 尚未定義書籤。CH₄)，其比重為 0.55，特性是無色無味，燃點為 537°C。甲烷噴入時，其溫度設定為其燃點(537°C)，其完全氧化之化學反應為[2]

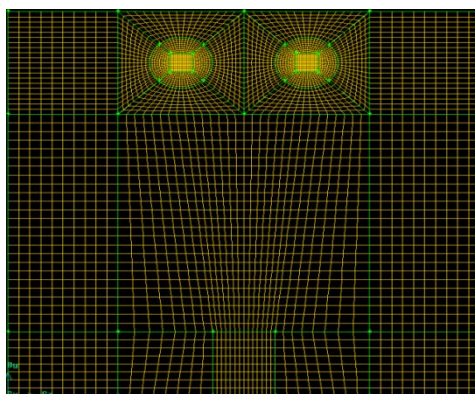


圖 6. 隧道截面格點分佈圖

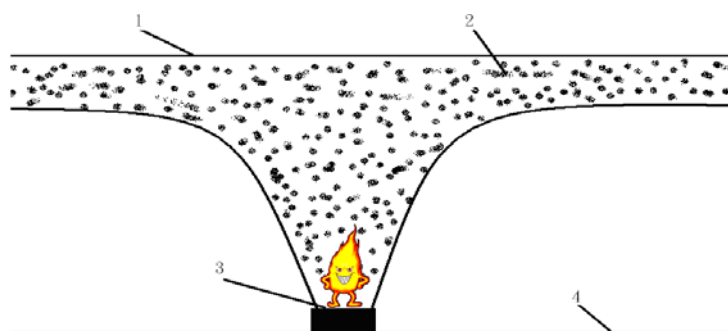


圖 7. 煙氣流動示意圖：(1)天花板、(2)濃煙、(3)起火點、(4)地板

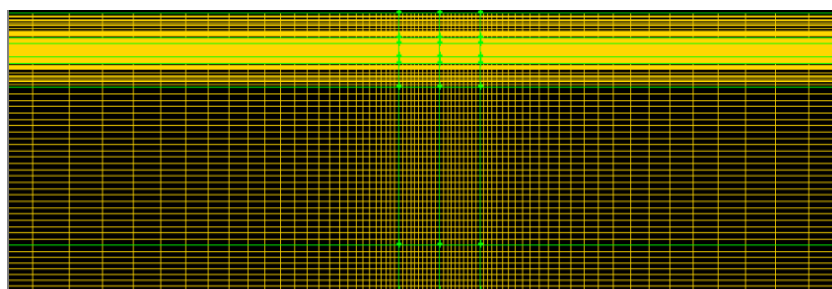


圖 8. 隧道縱向網格分佈圖

本研究之流場空間為三維穩態紊流，其主要統御方程式由連續方程式、動量方程式、能量方程式、質量方程式、紊流動能、紊流動能消散率等方程式所組成，以下將分別描述：

連續方程式(Continuity Equation):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

動量方程式(Momentum Equation):

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3a)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3b)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3c)$$

能量方程式(Energy Equation):

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

化學物種傳遞方程式(Species Transport Equation):

$$\frac{\partial}{\partial y} (\rho v Y_i) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w Y_i) = D \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial z^2} \right) + R_i + S_i \quad (5)$$

紊流動能 κ 之方程式:

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial x} (\kappa u) + \frac{\partial}{\partial y} (\kappa v) + \frac{\partial}{\partial z} (\kappa w) \right] = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \left(\frac{\partial^2 \kappa}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \kappa}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \kappa}{\partial z^2} \right) + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_\kappa \quad (6)$$

紊流動能消散率 ε 之方程式:

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon u) + \frac{\partial}{\partial y}(\varepsilon v) + \frac{\partial}{\partial z}(\varepsilon w) \right] = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \quad (7)$$

四、結果與討論

本研究利用數值模擬方法探討當短隧道內發生火災時，在自然通風下和開啟噴流風機時，隧道內溫度場的分布與煙柱傾斜的情況。首先本文探討在自然通風下才會發生的情形。圖 9 是隧道內發生火災時溫度場之分佈圖。火災地點位於 C 組風扇正下方，採自然通風情形，噴流風機全關。圖 9(a)的甲烷入口速度為 0.5 m/s，代表火源熱釋率的量為 0.03 MW，燃燒時的高溫氣體沿著隧道頂端往兩邊流出。若將甲烷入口速度加大為 1.5 m/s，火源熱釋率將變大為 0.1 MW，火場高溫氣體與濃煙分佈範圍也將隨之擴大，如圖 9(b)所示。

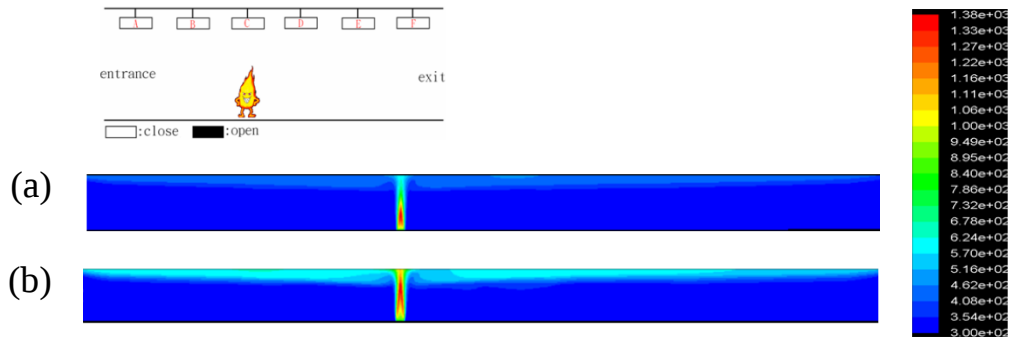


圖 9. 溫度分佈圖: 甲烷入口速度為(a) 0.5 m/s; (b) 1.5 m/s

燃燒時，氣體溫度越高，其密度約低。所以，密度低的高溫氣體相對與密度較高的低溫氣體會形成浮力(熱壓)而往上移動。由於隧道的型狀類似於長廊，當高溫濃煙飄到隧道頂端受到天花板的阻礙後就改向水平流動。而流動過程中，最終會因天花板、兩側內壁的低溫影響，煙氣的溫度逐漸下降，加上跟冷空氣的混合，最後完全迷失在隧道中，形成一條濃煙長巷，只在中層流有一圈較冷的空氣流如圖 10 所示[3]。

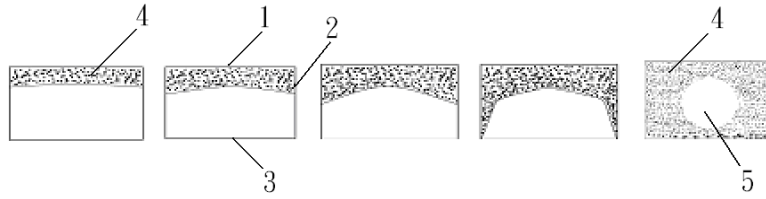


圖 10. 煙氣在長廊流動過程中的下降狀況：(1)天花板、(2)牆壁、
(3)地板、(4)煙氣、(5)空氣

本文從模擬的結果中擷取了一張隧道截面的 CO_2 濃煙分佈圖(圖 11(a))與實驗燃燒時所產生的煙流狀況(圖 11(b))作比較。由於實驗燃燒的物體是檀香，並非真正的有火災情形發生，故在比較上會有些微的差異。然而，從圖中明顯可看出當濃煙到達隧道頂端後，煙流呈軸對稱的方式流向兩邊。此時隧道天花板下方產生渦流的現象，而在隧道縱向則產生 internal jump[4]的現象，如圖 12 所示。當火源越大時所產生的 internal jump 現象就越明顯，不過隨著濃煙飄離起火點越遠現象就會變成如圖 10 所示，最後隧道內煙霧瀰漫。

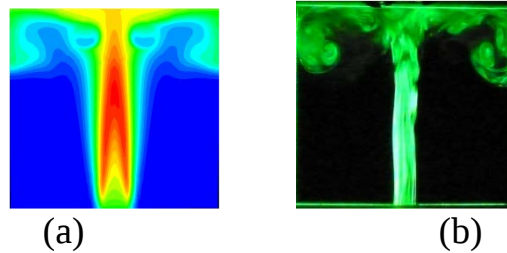


圖 11. CO_2 濃煙分佈圖：(a)模擬圖;(b)實驗圖

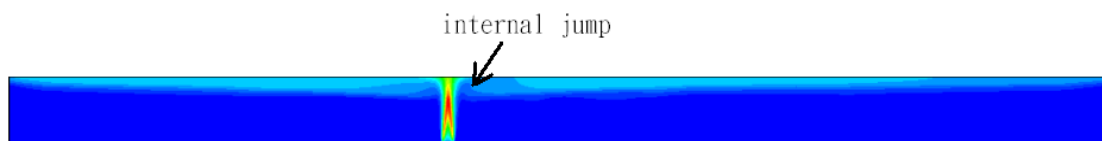


圖 12. 自然通風時 CO_2 濃煙分佈圖

若開啟噴流風機後，隧道內煙流的情況將跟自然通風的完全不一樣。在模擬過程中開啟不同組的噴流風機比較，首先將隧道內噴流風機全開，隧道內溫度場的分佈在起火點上游處相當安全，下游處因為受到縱向風速影響，溫度由起火點往下游處漸漸降低，但在煙柱的傾斜度情況不大理想。如圖 13 所示，在火源下游的煙氣因為受到噴流風機過大推力的影響，造成煙柱傾斜度過大，所產生的濃煙將更貼近地面，以致對消防隊逆向駛入隧道救援不易，甚至可能帶來額外的危

險。這種排煙控制並不適當，本模擬在經過多次的分析後，選定其中排煙效果較佳的情形來探討。

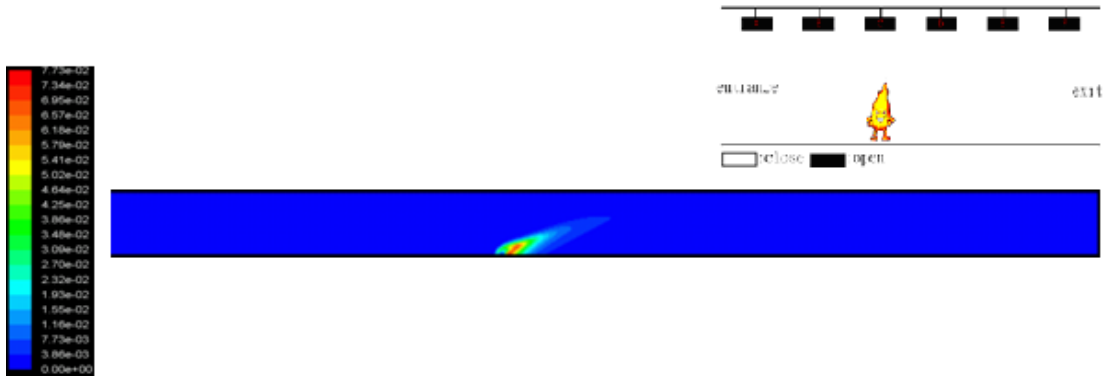


圖 13. 風機全開時煙柱濃煙傾斜分佈

本模擬之所以選擇 CO_2 來代表濃煙是因為在燃燒時以 CO_2 的產量最多，佔汽油燃燒產物裡較高的比例，燃燒後不易與其它物體產生化學反應較為穩定。此外，它跟一氧化碳皆是致命的，二氧化碳在空氣中其濃度達到 3~5% 時，人們就會感到呼吸吃力出現噁心，達 8.5% 時，血壓降低、呼吸困難、肺部充血，達 7~10% 時，短期內即可致命[5]。表 1 則顯示人體只要吸入少量的一氧化碳，就會產生不同程度的生理反應。

表 1. 一氧化碳對人體影響程度

一氧化碳含量 (%)	對人體的影響程度
0.01	數小時對人體影響不大
0.05	一小時內對人體影響不大
0.1	一小時後頭痛，不舒服，嘔吐
0.5	引起劇烈頭暈，經 20~30 分鐘有死亡危險
1.0	呼吸數次失去知覺，經 1~2 分鐘即可能死亡

圖 14 是開啟噴流風機 A、E、F 三組，從圖中明顯可看出煙柱傾斜度並不像全開時來的大，相對的濃煙的分佈比較不會貼近地面，原因是全開的情形下，隧道內縱向速度大於了濃煙的浮力，所以煙柱的傾斜度會特別的大。圖 14 煙柱分佈的情形是因為起火點上游處 B 組風機、正上方 C 組風機、下游處 D 組風機不開所產生的結果，降低了隧道內縱向速度，增加了煙柱回正的角度，以減少對煙層之擾動。接著增開 D 組風機如圖 15 所示，結果顯示煙柱傾斜度明顯大於前者，

原因是下游處噴流風機吸力變大所造成的結果，將使的煙層擴散較為混亂。根據文獻資料，有專家表示位於起火點上游 500 公尺處和下游 250 公尺處噴流風機不開(此數據在各國有不同的規定)會有最好的煙控，原因是適當的通風速度下，不應該完全的消除回流層而是使煙流保持適當的回流層，以維持隧道下游處煙層的結構[6]。

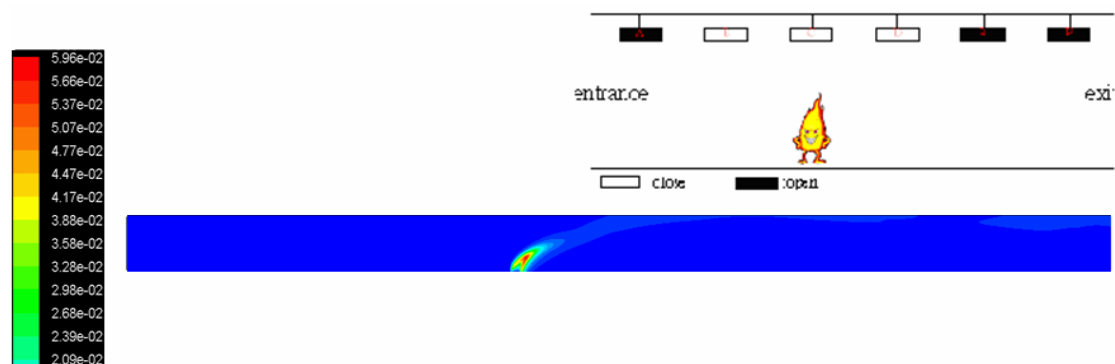


圖 14. 開啟 A、E、F 三組風機時煙柱傾斜分佈

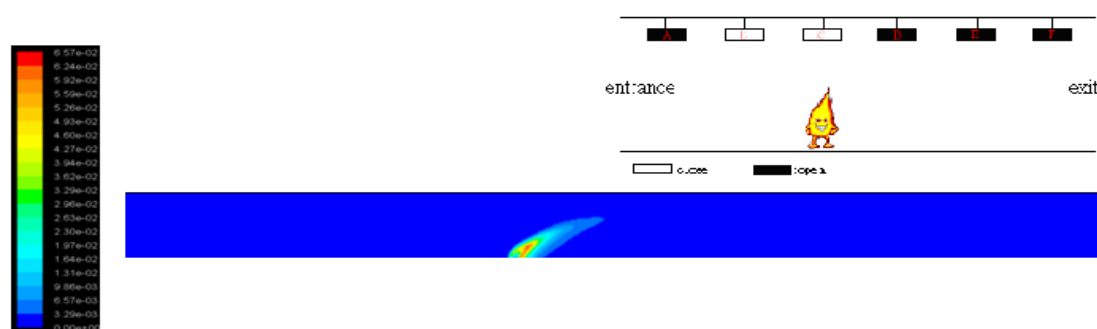


圖 15. 開啟 A、D、E、F 四組風機時煙柱傾斜分佈

當隧道內發生火災時，濃煙和高溫氣體的分佈跟火源熱釋率的大小有關。當熱釋率越大時，濃煙和高溫氣體的分佈也就越廣，對人員逃生過程也就越不利。此時煙控人員扮演著極為重要的角色，必須經謹慎考慮後方可以最適當的風機組合啟動，否則整個隧道內煙流可能變得更混亂。

五、結論

隧道火災問題多年來一直是個攸關生命安全的問題。如今，許多西方國家都已經積極的對這方面不斷地投入研究。本研究製作一個全長 530cm 的縮小尺寸短隧道作為電腦數值模擬的對象，以探討隧道內發生火災時，在自然通風下和開啟噴流風機時煙柱傾斜分佈的情形，針對本模擬的結果，本文歸納出下列幾點結論：

1. 在自然通風情況下，高溫煙層均分佈在隧道頂端向外流出，當熱釋率變大時，濃煙和溫度擴散範圍也隨之加大。
2. 當噴流風機全開時，起火點上游處的風機造成過大的推力，而下游處風機造成過大的吸力影響，造成煙柱傾斜度過大導致起火點下游處煙層較為貼近地面更為混亂。
3. 當起火點在風機正下方時，正上方、前一組與後一組風機不開，會有最好的排煙效果，原因是在適當的通風速度下，保持最佳的煙柱傾斜角度，避免破壞下游處煙層的結構為主要目的。

七、參考文獻

1. 鍾基強，性能式煙控與避難系統設計，全華科技圖書股份有限公司，第 3-13 頁，2001。
2. 何泰源，隧道施工遭遇可燃性氣體之調查與處理對策，中華技術期刊 7 月號第 63 季 2-2 節，2004。
3. 李希聖，防排煙工程設計，徐氏文教基金會出版，第 67-68 頁，2001。
4. Hu LH, Huo R, Wang HB, Li YZ, Yang RX. Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling. Building and Environment 2007; 42: 3905-3915.
5. 李希聖，防排煙工程設計，徐氏文教基金會出版，第 5-6 頁，2001。
6. 楊淳盛，縱流式通風隧道火災煙流可視化模擬實驗，國立屏東科技大學車輛工程系碩士論文，2007。

富氫燃氣對加熱爐能源效益之影響

Influence of Hydrogen-Rich Fuel Gas on Furnace Efficiency

李建利¹、周志儒²

Chien-Li Lee, YChih-Ju G. Jou

¹國立高雄第一科技大學水資源保育及發展研究中心

²國立第一科技大學環境與安全衛生工程系

¹ Research and Development Center for Water Resource and Conservation, National Kaohsiung First University of Science and Technology

² Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology

摘要

本研究以回收石化製程單元(如觸媒重組及觸媒裂解)產生之富氫尾氣(tail gas) 能源，採漸進式添加以取代天然氣使用量，實際應用於蒸餾程序中之加熱爐進行現場實測。結果顯示，火焰長度(flame length)及橙黃色明亮度隨著FG進入燃料(天然氣)中添加量的增加而明顯降低，絕熱火焰溫度大於 1800 °C，其thermal NO_x是優勢形成機制。氮氧化物形成量平均增加 36.8 ppm，二氧化碳排放量每年平均可減少 3.5×10^4 tons，減少率為 53.4 %及平均可節省 5.8×10^6 m³/yr天然氣使用量。因此以富氫廢氣能源回收作為一種燃料選擇，就整體經濟效益評估，將可節省相當可觀燃料成本及有效降低二氧化碳排放量。

關鍵字：富氫燃氣；加熱爐；二氧化碳

Abstract

The hydrogen-rich tail gas (FG) emitted from petrochemical operations (e.g. catalytic reforming unit and catalytic cracking unit) was recovered and reused as a supplementary fuel. It was slowly added to the fuel stream of a furnace to replace natural gas gradually for powering a full-scale distillation process. The results show that both the flame length and orange-yellowish brightness decrease with more proportion of FG in the natural gas. However, the adiabatic temperature is greater than

¹ 國立高雄第一科技大學水資源保育及發展研究中心，博士後研究員

² 國立第一科技大學環境與安全衛生工程系，特聘教授兼水資源中心主任
E-mail:george@ccms.nkfust.edu.tw

1800 °C. With natural gas replaced by FG, $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ natural gas can be saved annually. Because the thermal NO_x is the dominant formation mechanism, NO_x increases 36.8 ppmv in the emission and CO_2 is reduced by 3.5×10^4 tons annually or 53.4% reduction. Recovering and reusing the hydrogen-rich waste fuel gas as natural gas supplement will achieve tremendous savings of natural gas usage and effectively lower the emission of carbon dioxide.

Keyword: Hydrogen-Rich Fuel Gas; Furnace; Carbon Dioxide

一、前言

當前全球大約 90%總能量產生是來自於化石燃料燃燒所提供，如石化工業加熱爐與鍋爐、發電廠及運輸用以產生熱能、電能及動能的主要燃料來源[1-3]。然而、隨著化石燃料存量逐漸地減少及全球對能源需求日益增加，因此對於關鍵性能源與能源再生顯得格外重要。

氫氣燃燒時僅會形成 NO_x 排放，不會生成 CO_2 、 CO 、 SO_x 、未燃燒碳氫化合物與微粒，是替代化石燃料的一種非常乾淨燃料 [4, 5]，然而、氫氣燃料使用上有些許困難必須克服包括：高燃燒能力、低燃點、高火焰溫度及較高的能量輸入 (high energy input)。先前有許多學者研究，將不同比例的氫氣(H_2)添加於氣態燃料(NG 、 C_3H_8)中，發現能改善低閃火點、火焰的穩定度、降低火焰長度與輻射熱損失、加速碳氫燃料反應速率、降低了火焰中 C/H 的供給及降低 CO_2 、 CO 、 NO_x 、soot 等氣體之排放 [6-11]。

現有製程中有很多方法可提升能源使用效率，其中包括了加強能源管理、改進鍋爐操作、改變能源來源、使用高效率設備、廢熱及資源之回收及再利用等，其中以製程節能改善及廢氣能源、廢熱能回收再利用最為有效率。石化製程中觸媒重組及觸媒裂解等單元產生之廢氣能源，成分組成複雜(包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_3H_6 、 $i\text{-C}_4$ 、 $i\text{-C}_5$ 、 H_2S 與 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$)其中氫氣含量為 30~80 mole%，此富氫燃料(hydrogen-rich fuel gas, FG)廢氣能源仍有回收價值，所以將其回收作為一種低成本燃料選擇，將可節省相當可觀燃料成本。

本研究以回收富氫尾氣(hydrogen-rich tail gas, FG)實際應用於蒸餾程序加熱爐進行現場實測，採漸進式添加富氫燃氣(FG) 用量以取代天然氣使用量。建立加熱爐節能且降低溫室氣體排放之操作模式，評估對經濟及環境效益之影響。

二、實驗設備與研究方法

2.1 實驗設備

研究實驗設備為蒸餾製程之加熱爐，加熱爐結合兩座燃燒爐膛，每座爐膛內有 12 支燃燒器，合計總共有 24 支燃燒器，每一燃燒器中含有五個燃氣噴嘴為典型多噴口燃燒器(Multi-Port Burner)[16]，實驗測試設備示意圖如圖 1 所示。使用之燃料來自於製程單元(如觸媒重組及觸媒裂解)產生之富氫尾氣，其平均成份為 $H_2 = 60.2 \text{ mole\%}$ 、 $CH_4 = 12.1 \text{ mole\%}$ 、 $C_2H_6 = 9.4 \text{ mole\%}$ 、 $C_2H_4 = 0.4 \text{ mole\%}$ 、 $C_3H_8 = 7.0 \text{ mole\%}$ 、 $C_3H_6 = 0.2 \text{ mole\%}$ 、 $n-C_4^+ = 1.8 \text{ mole\%}$ 、 $i-C_4^+ = 1.9 \text{ mole\%}$ 、 $i-C_5^+ = 0.8 \text{ mole\%}$ 、 $n-C_5^+ = 0.4$ and $n-C_6^+ = 0.8 \text{ mole\%}$ 等組成、熱值 $6,700 \text{ kcal/m}^3$ 。

2.2 實驗方法

操作方式採自動燃燒控制系統(Automatic Combustion Control, ACC)。以加熱爐的加熱流體之出口溫度作為燃料進入加熱爐燃燒量控制的準則，FG/NG添加比率為 0:100 (pure NG), 20:80, 40:60, 60:40, 80:20 and 100:0 (pure FG)。煙道氣分析以固定污染源連續自動監測系統(continuing emission monitor system, CEMS, E.S.A., MIR 900)進行線上監測分析，排放量測量數據相對準確度為 5.9%、信賴水準為 95，溫度誤差值為 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。煙道氣監測系統分析校正每月一次，校正標準方法分別依據；CO為A704.03C， NO_x 為NIEA A411.72C， O_2 為NIEA A442.70C， CO_2 為NIEA A415.70A。

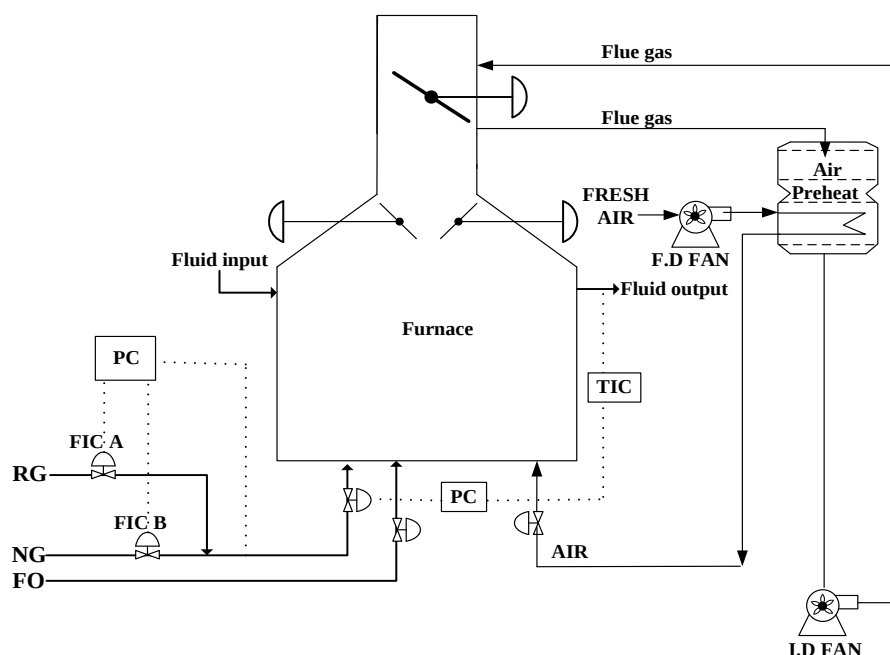


圖 1. 加熱爐系統

三、實驗結果與討論

3.1 添加FG對火焰形態(flame appearance)之影響

燃料的組成成份對火焰形態(flame appearance)會有重大的影響[12, 13]。添加 FG 進入天然氣燃料中，觀察火焰顏色變化，由圖 2 結果顯示，火焰長度(flame length)及橙黃色明亮度隨著 FG 進入燃料(天然氣)中添加量的增加而明顯降低，此乃因火焰中 C/H 的供給降低之緣故。純 NG 燃燒火焰呈現明亮橙黃色，形成區域從中間火焰區域到遠燃燒區域，而在近燃燒器區域為藍色火焰，而於中間區域呈現明亮橙黃火焰，這是因為在中間火焰及遠燃燒區域灰煙(soot)形成、成長及氧化(soot formation, growth and oxidation)。當燃氣為 50-50% FG-NG 混合氣時，由於燃料組成中氫氣含量相對增加，橙黃色火焰被一個藍色區域光環繞著，其火焰長度及明亮度呈現明顯減弱，純 FG 燃燒火焰呈現藍色，僅於燃燒器內側火焰區域略帶一點橙色。

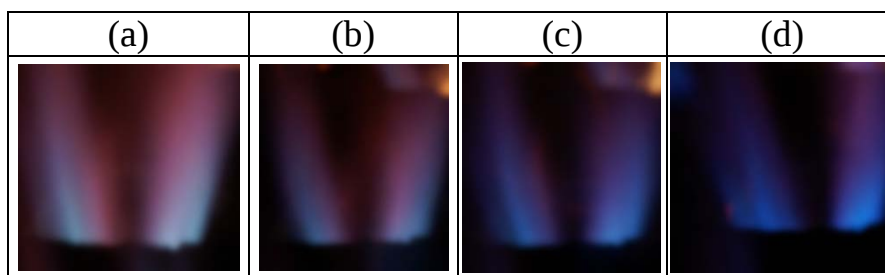


圖 2 火焰顏色: (a) NG; (b) 40-60% NG -FG; (c) 20-80% NG -FG; (d) FG

3.2 添加FG對NO_x 生成量之影響

碳氫化合物混合燃料燃燒，NO_x形成可以歸因兩個化學動力程序，是thermal NO_x及prompt NO_x。thermal NO_x是經由周圍N₂在高溫條件氧化形成 [4, 5]，而Prompt NO_x發生於rich combustion區域，經由化學中間物種HCN產生，而HCN是來自於碳氫燃料分解過程所產生的CH [7, 10, 14-17]。

由於FG燃料中氫氣含量相對增高，其絕熱火焰溫度大於 1800⁰C以上。依FG燃氣燃料實際組成推估FG燃燒之絕熱火焰溫度。當在高溫區域NO_x形成優勢機制為Thermal-Zeldovich's路徑。

當燃氣中FG添加量增加，相對增加燃氣中氫氣含量，其火焰輻射降低而有效的火焰溫度提高，因而逐漸增加火焰中間區域溫度尖峰與火焰寬度，其轉換結果thermal NO_x形成量是升高。雖然提高FG添加量燃料中氫氣含量增加，會降低燃料中之CH濃度，低CH濃度使所形成HCN具有較低濃度，降低Prompt NO_x形成量，但其所減少的量對總NO_x量而言是可忽略，結果總 NO_x形成量是增加。由圖 3 結果顯示，純NG燃燒時NO_x形成量 22.0~23.0 ppm，當FG添加為 20%其NO_x形成量提高到 32.5~35.0 ppm，FG添加量由提升至 60%，NO_x形成量提高到 42.3~42.9 ppm，若FG完全取代NG用量，NO_x形成量增加至 58.9~59.6 ppm。因此當FG完全取代NG，NO_x形成量平均增加 36.8 ppm。

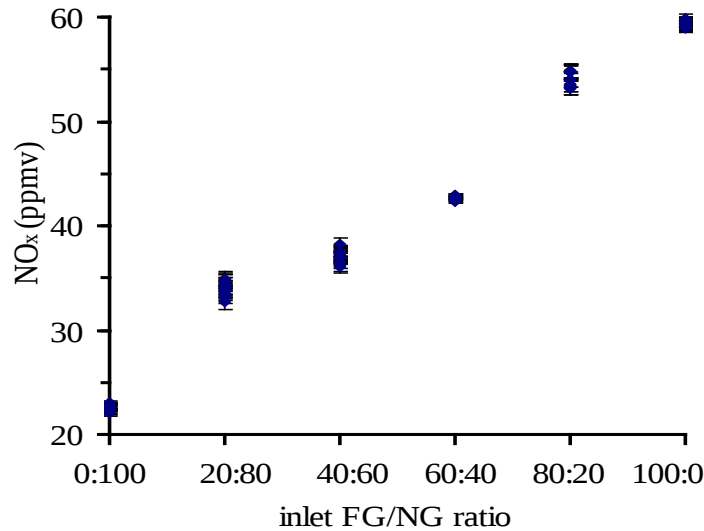
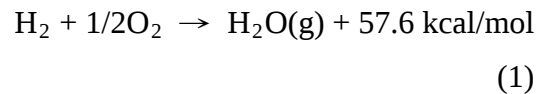


圖 3 FG/NG添加比率與NO_x 生成量之關係

3.3 添加FG對過剩空氣之影響

由於 FG 燃料其中氫氣含量相當高由 30~80 mole %不等。氫氣及元素碳的理論燃燒反應式(1) and (2):



$$A_o = \frac{1}{0.21} (0.5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 3.5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6.5\text{C}_4\text{H}_{10}) \quad (3)$$

由反應式(1) and (2)可知氫氣完全燃燒只需 0.5 moel O₂，而C完全燃燒需 1 moel O₂。以Eq (3)計算NG燃燒所需理論空氣量為 10.4 (Nm³)，而FG所需之理論空氣量為 6.5 Nm³。

由圖 4 結果顯示，過剩空氣量隨著 FG 添加量增加呈現相對顯著升高，純 NG 燃燒時過剩空氣量 2.6~2.7 Vol. %，當 FG 添加量為 40%過剩空氣量增加到 3.16~3.18 Vol. %，FG 添加量由提升至 80%過剩空氣量增加到 3.67~3.68 Vol. %，若 FG 完全取代 NG 用量，則過剩空氣量增加到 4.28~4.36 Vol. %。當過量空氣過高時，因反應區域內氧原子濃度的可用率增加，使爐膛輻射區之溫度下降，而降低加熱爐效率 [10]，然而操作於低的過量空氣比率會伴隨著增加燃燒熱損失不良結果。

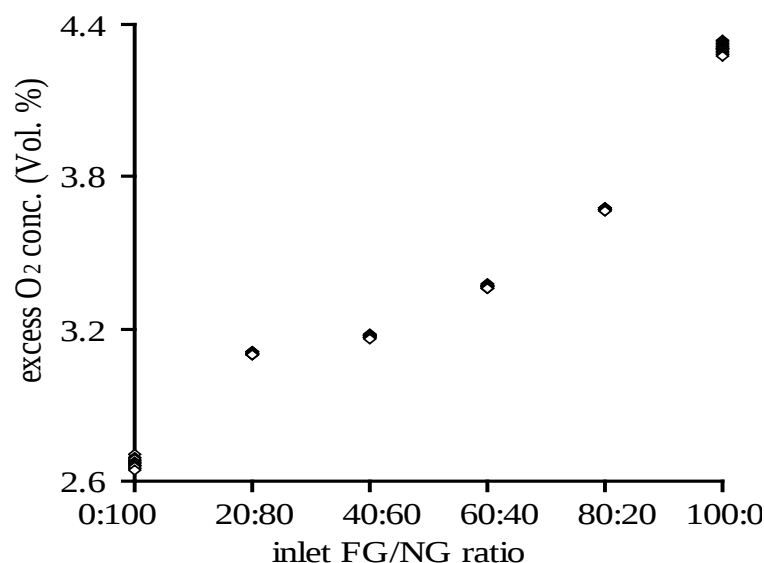


圖 4 FG/NG 添加比率與過剩空氣量之關係

另由反應式(1)得知 H_2 完全燃燒產生水蒸氣，因此FG燃燒後將會生成較多水蒸氣吸收一部分潛熱。另因氫氣燃燒具有高能量輸入及低火焰輻射[10]，當燃氣中氫氣含量增加時，碳氫燃料燃燒速度更快速，而使火焰溫度相對增加，減少爐膛內整體對流區域的停留時間[12]，因而降低了爐膛的吸熱以致使輻射區域熱量傳遞相對降低及使火焰寬度增加，而火焰降低長度，提高了adiabatic flame temperature。

圖 5 所示為 FG/NG 添加比率與加熱爐效率之關係圖。由圖 5 結果可發現，加熱爐效率隨著 FG 添加量增加呈現下降趨勢，純 NG 燃燒時加熱爐效率大約 91.4%，當 FG 添加量為 40%加熱爐效率下降到 91.2%，FG 添加量由提升至 80%加熱爐效率下降到 90.9%，若 FG 完全取代 NG 用量，則加熱爐效率下降到 90.7%。因此以 FG 取代天然氣成為主要燃氣時可進一步調降空氣之注入量，經由空氣注入量之調降將有助於維持加熱爐之效益。

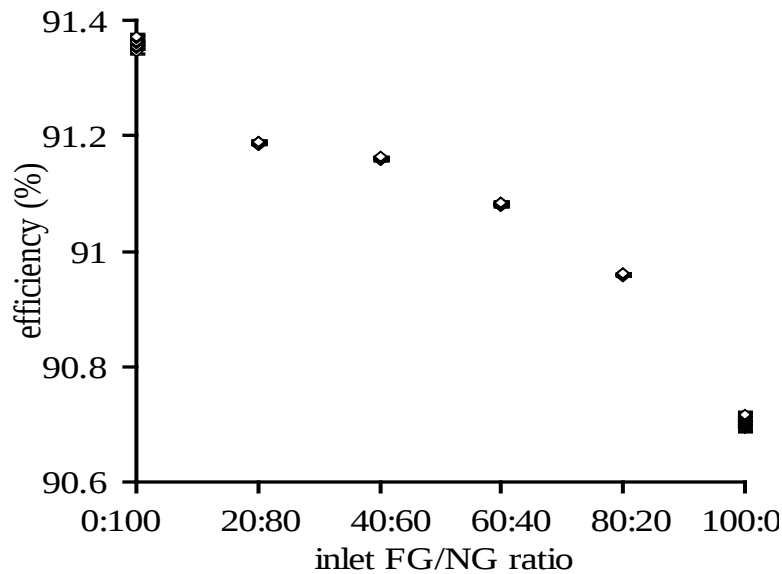


圖 5 FG/NG 添加比率與加熱爐效率之關係

四、結論

本研究以漸進式調整富氫複燃料(hydrogen-rich tail gas, FG) 用量以取代天然氣使用量，實際應用於蒸餾製程程序中之加熱爐進行現場實測。由於FG燃料中氫氣含量 30~80 mole % (平均 60%)，火焰長度(flame length)及橙黃色明亮度隨著FG進入燃料(天然氣)中的添加量增加而明顯降低。而thermal NO_x是優勢形成機制，結果顯示，氮氧化物形成量平均增加 36.8 ppm，二氧化碳排放量平均每年可減少 3.5×10^4 tons，減少率為 53.4 %及平均可節省 5.8×10^6 m³/yr天然氣使用量。因此以富氫複廢氣能源回收作為一種燃料選擇，就整體經濟效益評估，將可節省相當可觀燃料成本及有效降低二氧化碳排放量。

五、參考文獻

1. Barroso, J., Barreras, F., and Ballester, J., Behavior of a high-capacity steam boiler using heavy fuel oil Part I. High-temperature corrosion, Fuel Process Technol, Vol. 86 (2), pp.89-105, 2004.
2. Ozdemir, E., Energy conservation opportunities with a variable speed controller in a boiler house, Appl Therm Eng, Vol. 24 (7), pp.981-993, 2004.
3. Xue, H., and Aggarwal, S.K., NO Emission in n-heptane/air Premixed Flames, Combust. Flame, Vol. 132 (4), pp.723-741, 2003.
4. ilbas, M., Yilmaz, i., and Kaplan, Y., Investigations of hydrogen and

- hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 30 (10), pp.1139-1147, 2005.
5. Rørtveit, G. J., Hustad, J.E., Li, S.C., Willams, F.A., Effects of diluents on NO_x formation in hydrogen counterflow flames, *Combust. Flame*, Vol. 130 (1-2), pp.48-61, 2002.
 6. Guo, H., Smallwood, G.J., Liu, F., Ju, Y., and Gülder, Ö.L., The effect of hydrogen addition on flammability limit and NO_x emission in ultra-lean counterflow CH_4/air premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30 (1), pp.303-311, 2005.
 7. Jenkin, M.E., and Clemitshaw, K.C., Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer, *Atmos Environ*, Vol. 34 (16), pp.2499-2527, 2000.
 8. Ozalp, N., and Hyman, B., Calibrated models of on-site power and steam production in US manufacturing industries, *Appl Therm Eng*, Vol. 26 (5), pp.530-539, 2006.
 9. Tseng, C.J., Effect of hydrogen addition on methane combustion in a porous medium burner, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 27 (6), pp.699-707, 2002.
 10. Naha, S., and Aggarwal, S.K., Fuel effect on NO_x emission in partially premixed flames, *Combust. Flame*, Vol. 139 (1-2), pp.90-105, 2004.
 11. Konnov, A.A., Colson, G., and Ruyck, J.D., NO formation rates for hydrogen combustion in stirred reactors, *Fuel*, Vol. 80 (1), pp.49-65, 2001.
 12. Choudhuria, A.R., and Gollahalli, S.R., Characteristics of hydrogen-hydrocarbon composite fuel turbulent jet flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 28 (4), pp.445-454, 2003.
 13. Ko, Y.C., Hou, S.S.; and Lin, T.H., Laminar diffusion flames in a multi-port burner, *Combustion Science and Technology*, Vol. 177 (8), pp.1463-1484, 2005.
 14. Ko, Y.C., Hou, S.S., and Lin, T.H., Incineration of oil gas at various compositions and supply rates, *Proceedings of 14th International Symposium on Transport Phenomena*, pp.445-449, 2003.
 15. Bebar, L., Kermes, V., Stehlik, P., Canek, J., and Oral, J., Low NO_x burners-prediction of emissions concentration based on design, measurements and

- modeling, Waste Manage, Vol. 22 (4), 443-451, 2002.
16. Shudo, T., and Mizuide, T., NO_x Emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen, JSAE Rev, Vol. 23 (1), pp.9-14, 2002.
 17. Ilbas, M., The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modeling, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 30 (10), 1113-1126, 2005.

徵稿說明

下列專欄，歡迎大家耕耘：

1. 專題研究--分為五大方向，分別為「能源發展與應用」、「動力設施與燃燒」、「防火與消防」、「燃燒科技發展」、「空污控制與生物效應」。
2. 燃燒科技交流--燃燒應用技術、新技術或新產品介紹、疑難討論與經驗交流、國內外相關研究機構介紹、國內外相關學會、機構、團體之動態等，相關研討會論文摘要或全文、燃燒現象照片等。
3. 燃燒論壇--開放討論基本燃燒現象、基本燃燒原理及燃燒詞彙定義等。
4. 即時資訊--政府相關政策、國內外相關科技資訊、研討會或相關活動訊息等即時之動態資訊。能源委員會、環保署、國科會、消防署等相關機構委託執行計畫之研究成果介紹等。
5. 其他--讀者意見迴響交流與燃燒相關之其他任何訊息或稿件。

來稿請寄本會【[電子信箱](#)】或

【70101 台南市大學路 1 號，航空太空工程學系 陳維新 教授 收

E-mail：vwhchen@gmail.com；Tel：(06) 2757575 ext. 63600】

投稿須知

1. 文字：稿件應以中文或英文撰寫，中文文字之字型應為標楷體字，英文文字字型應為Times New Rome。
 2. 題目：應力求簡潔且能充分表達論文之重要概念，請附中、英文題目各一式，英文題目請附於中文題目之後。
 3. 作者：請附上中、英文之作者姓名、服務單位及職稱。作者之服務單位及職稱請以附註之方式書寫同一頁之末端，若作者為兩個人以上者，請以不同之符號標示之。
 4. 摘要：以簡明扼要之方式表達論文之內容。無論以中文或英文撰寫，一律附上500 字以內之中、英文摘要各一份。英文摘要請置於中文摘要之後。
 5. 字型大小：題目以16pt 黑體字，摘要、前言、文章內容之標題請以14pt 黑體字，作者介紹及文章內容以12pt 標楷體字書寫之。
 6. 關鍵字：中英對照關鍵字，最多以5 個為限。
 7. 圖表說明：圖說與表說應統一使用中文或英文，圖標題應在圖之下方；表標題應在表之上方。
 8. 參考文獻：（列於正文之後，書寫時請依於文章中出現之先後順序排列）
Combustion Quarterly Vol. 52 17 No. 2 May 2008
- (1) 書籍：作者，書名，出版社，出版地，頁數，年。
中文如：柯清水，*石油化學概論*，正文書局，臺北，pp. 183-191，1992。
英文如：Owen K, Coley T. *Automotive Fuel Reference Book*, 2nd ed., Society of Automotive Engineers, pp. 551-587, 1997.
 - (2) 期刊論文：作者，篇名，期刊名稱，年，卷期，頁數。

中文如：葉江榮，鍋爐高溫腐蝕，*台電工程月刊*，第276期，pp. 10-18，1979。

英文如：Kummer JT. Catalysts for Automobile Emission Control, *Progress in Energy and Combustion Science*. 1981;6:177-199.

(3) 研討會：作者，篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。

中文如：萬皓鵬，汽電共生系統效率提升技術，2002 *汽電共生系統技術研討會論文集*，經濟部能源委員會，pp. 84-91，91年4月。

英文如：Law CK. Dynamics of Stretched Flames, Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1381-1402, 1988.

燃燒季刊 2014年十一月

發行單位：中華民國燃燒學會

發行人：林大惠

總編輯：陳維新

副總編輯：江金龍、江鴻龍、侯順雄、蔡建雄（依姓氏筆畫排列）

編輯：石心怡、朱力民、吳志勇、吳明勳、吳耿東、李灝銘、林育立、洪榮芳、姜庭隆、郭振坤、黃俊賢、陳建中、梁智創、楊授印、楊進丁、管衍德、趙裕、蔡欣倫、劉昭忠、劉國基、蘇崇輝（依姓氏筆畫排列）

秘書：曾久珍

發行地址：701臺南市大學路1號
國立成功大學機械工程學系

電話：(06) 2369715

中華民國八十一年十二月創刊

中華民國一百零三年十一月出版

局版台誌號第玖玖零捌號