

國立臺灣師範大學科技與工程學院

光電工程研究所

碩士論文

Graduate Institute of Electro-Optical Engineering

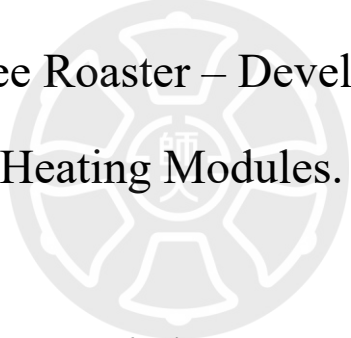
College of Technology and Engineering

National Taiwan Normal University

Master's Thesis

電池式的咖啡烘焙機-多元化加熱模組研製

Battery-operated Coffee Roaster – Development of Diversified  
Heating Modules.



羅詩凱

Shi-Kai Luo

指導教授：謝振傑 博士

中華民國 111 年 8 月

August 2022

## 致謝

碩士兩年接近尾聲，自己研究的材料有點成果，這兩年碩士的研究生涯總算是有點小成就，先給予自己一個肯定，碩士兩年總算沒有白活。研究期間，首先，最要感謝的是指導教授，謝振傑教授，您在忙碌之餘，從旁指點迷津與指導我的學術研究，最終，這項研究才能有如此這般的成果，而您總是帶領我們學生，研究最新穎的趨勢科技，讓我們自發性的思考原創、創新、自主開發與研製，使我的碩士生涯學習中充滿挑戰，多虧您的指導與尊尊教誨，我才有今天的突破與成長。

如果沒有同儕的互助與陪伴，這碩士生涯我想自己肯定無法走到最後，先感謝柏寬的種種掩護與幫助，你的聰明伶俐，與跳躍式的反應，幫我渡過不少難關，祝福你未來，職場打拼順利，且頗有一翻成就。也感謝實驗室的夥伴們，廷沅、浩瑋、宸光、玉冰、典宸、雨欣、儒凱，因為你們，在碩士期間不至於只有學術學習與實驗研究，忙碌之後，同儕的陪伴，是長途跋涉後的一片綠洲，有歡樂、也有苦有樂。



## 中文摘要

自製烘豆機整體架構，包含紅外線穿透材料、熱風、紅外線發射管，是多元化的加熱模組。紅外線發射管的熱輻射，不需熱傳介質，有著良好的熱效應，並且其本身有著極高的熱電轉換效率，可以省掉大量的功耗，是值得選用的熱電元件。

本論文研究開發的紅外線穿透材料，經過高週波加熱實驗驗證，可高過加熱源溫度的優異表現，乃因兼具蓄熱與高放射特性。光譜穿透性能驗證，此材料中的 200 度、1000 度的光譜數據顯示出中遠波長的穿透率分別達 90%、80% 以上，因此在中遠波段有良好的穿透率。咖啡豆內的水份吸收此波段的能量，達到烘焙的效果。

自製機與市售烘焙機進行烘焙結果的比較，經過色度、失重率與 NIR 進紅外光譜儀量測的比較後，其烘焙程度結果闡明，能區分出淺焙、中焙、深焙的結果。

關鍵字：紅外線、熱輻射、紅外線穿透材料、紅外線發射管、熱風、烘豆機

# Abstract

The overall structure of the self-made coffee roaster includes infrared penetrating materials, hot air, and infrared emission tubes. It is a diversified heating module. The thermal radiation of the infrared emission tube does not require a heat transfer medium, has a good thermal effect, and itself has a very high thermoelectric conversion efficiency, which can save a lot of power consumption, and is a thermoelectric element worth choosing.

The infrared penetrating material researched and developed in this paper has been verified by high-frequency heating experiments, and achieve higher temperature than a heat source due to possessing both heat storage and high emissivity. The spectral data of 200 degrees and 1000 degrees in this material shows the penetration of medium and long wavelengths. The penetration rate is over 90% and 80% respectively, so it has a good penetration rate in the mid- and long-range bands. The water in the coffee beans absorbs the energy of this band to achieve the roasting effect.

The roasting results of the homemade machine and the commercial roasting machine were compared. After comparing the chromaticity, weight loss rate and NIR into the infrared spectrometer, the roasting degree results were clarified, and the results of light roasting, medium roasting and dark roasting could be distinguished.

Keywords : Infrared 、 Thermal Radiation 、 Infrared Penetrating Material 、 Infrared Emission Tubes 、 Hot Air 、 Coffee Roasting.

# 目錄

中文摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
第一章、緒論.....	1
1-1 研究背景.....	1
1-2 咖啡烘焙.....	2
1.2.1 烘焙度-焦糖化數值(Agtron Number).....	2
1.2.2 烘焙程序.....	3
1.2.3 烘豆機熱導方式.....	4
1.2.4 家用烘豆機性能比較.....	5
1.3 紅外線穿透材料.....	6
1.3.1 不鏽鋼 304、316 簡介.....	7
1.3.2 氧化鋁簡介.....	8
1-4 研究目的.....	10
第二章、實驗原理.....	11
2.1 熱輻射簡介.....	11
2.1.2 近場與遠場之熱輻射.....	15
2.3 咖啡烘焙化學與物理反應.....	16
第三章、材料與方法.....	18
3.1 紅外線發射管.....	18
3.2 材料製備.....	19
3.3 紅外線穿透材料實驗建置與方法.....	20

3.3.1 高週波加熱實驗.....	20
3.4 烘豆機實驗建置與方法.....	22
3.4.1 自製烘豆機.....	22
3.4.2 市售烘豆機實驗建置與方法.....	25
3.5 實驗設備.....	27
第四章、結果與討論.....	30
4.1 紅外線穿透材料實驗結果與討論.....	30
4.2 熱風烘豆機綜合數據與討論.....	44
4.2.1 自製機與市售烘豆機時間溫度分佈結果與討論.....	44
4.2.2 自製機與市售烘豆機烘焙度結果與討論.....	48
第五章、結論.....	55
參考文獻.....	56



## 圖目錄

圖 1-1 咖啡豆的烘焙深淺程度[5].....	2
圖 1-2 $\alpha$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 結晶型態之結構.....	8
圖 1-3 氧化鋁熱處理過程從氫氧化物到剛玉( $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )的轉變順序[9].....	9
圖 2-1 黑體輻射之不同溫度的電磁波譜[10].....	14
圖 3-1 發射管尺寸示意圖 .....	18
圖 3-2 紅外線發射管實體圖 .....	18
圖 3-3 方片實體圖:(a)長寬、(b)厚度 .....	19
圖 3-4 高週波加熱實驗建置實體圖 .....	21
圖 3-5 高週波儀器加熱用鐵板 .....	21
圖 3-6 自製烘豆機架構解說圖 .....	22
圖 3-7 自製烘豆機架構解說圖 .....	23
圖 3-8 自製烘豆機架構解說圖 .....	24
圖 3-9 自製烘豆機實驗建置實體圖:(a)無風扇、(b)有風扇圖 .....	24
圖 3-10 氣旋式熱風家用烘豆機實體圖 .....	25
圖 3-11 氣旋式熱風家用烘豆機示意圖 .....	25
圖 3-12 氣旋式熱風實驗建置實體圖 .....	26
圖 3-13 電源供應器 .....	27
圖 3-14 熱電偶溫度計 .....	27
圖 3-15 紅外線熱顯儀 .....	28
圖 3-16 傅立葉轉換紅外光譜 Spotlight 400 FTIR.....	28
圖 3-17 手提式電感應加熱器 .....	29
圖 4-1 樣品烘烤溫度 .....	31
圖 4-2 各組樣品穿透光譜數據圖 .....	31
圖 4-3 持續煮沸實體圖：左上為 A 組、右上 B 組、左下 C 組、右下 D 組 .....	34

圖 4-4 持續煮沸實體圖：左上 E 組、右上 F 組、左下 G 組.....	34
圖 4-5 煮沸 5 分鐘後結果：左上為 A 組、右上 B 組、左下 C 組、右下 D 組.....	35
圖 4-6 煮沸 5 分鐘後結果：左上 E 組、右上 F 組、左下 G 組.....	35
圖 4-7 高週波加熱實驗後的樣品形態：(1)B 組(2)F 組(3)G 組(4)D 組.....	37
圖 4-8 高週波加熱實驗後的樣品形態：(1)B 組、(2)F 組、(3)G 組.....	39
圖 4-9 每 30 秒樣品溫度數據圖.....	41
圖 4-10 自製機與市售烘豆機 6 分鐘溫度比較.....	44
圖 4-11 自製機與市售烘豆機 9 分鐘溫度比較.....	44
圖 4-12 自製機與市售烘豆機 12 分鐘溫度比較.....	45
圖 4-13 自製機與市售烘豆機 15 分鐘溫度比較.....	45
圖 4-14 自製烘豆機 T1 區域不同時間溫度分佈.....	46
圖 4-15 自製烘豆機 T2 區域不同時間溫度分佈.....	46
圖 4-16 自製烘豆機 T3 區域不同時間溫度分佈.....	47
圖 4-17 自製烘豆機 T4 區域時間溫度分佈.....	47
圖 4-18 自製烘豆機研磨後實體圖：(a) 6 分、(b) 9 分、(c) 12 分、(d) 15 分.....	48
圖 4-19 市售烘豆機研磨後實體圖：(a) 6 分、(b) 9 分、(c) 12 分、(d) 15 分.....	49
圖 4-20 自製與市售烘豆機失重率比較圖.....	50
圖 4-21 自製與市售烘豆機 6 分鐘烘焙度的穿透光譜.....	51
圖 4-22 自製與市售烘豆機 9 分鐘烘焙度的穿透光譜.....	51
圖 4-23 自製與市售烘豆機 12 分鐘烘焙度的穿透光譜.....	52
圖 4-24 自製與市售烘豆機 15 分鐘烘焙度的穿透光譜.....	52
圖 4-25 自製烘豆機 T1 與市售機烘焙度穿透光譜比較.....	53
圖 4-26 自製烘豆機 T2 與市售機烘焙度穿透光譜比較.....	53
圖 4-27 自製烘豆機 T3 與市售機烘焙度穿透光譜比較.....	54
圖 4-28 自製烘豆機 T4 與市售機烘焙度穿透光譜比較.....	54

## 表目錄

表 1-1 家用烘豆機性能比較 .....	5
表 1-2 多種材料在接近室溫下的密度與熱性質 .....	6
表 1-3 不鏽鋼 304、316 的化學成分[6].....	7
表 1-4 各種氧化鋁之結晶型態與密度 .....	8
表 3-1 材料形狀與尺寸 .....	19
表 3-2 氣旋式熱風家用烘豆機 Ver2.0 規格表.....	26
表 4-1 樣品配方及溫度 .....	30
表 4-2 氧化鋅與氧化鋁之混合比例 .....	32
表 4-3 氧化鋁與石英砂之混和比例 .....	32
表 4-4 加熱 3 分鐘的綜合數據 .....	33
表 4-5 防水測試後再加熱 3 分鐘的綜合數據 .....	36
表 4-6 綜合數據 B、F、G 組 .....	38
表 4-7 氧化鋁與黃色料之混合比例 .....	40
表 4-8 氧化鋁與橘色料之混合比例 .....	40
表 4-9 樣品每 30 秒加熱至 5 分鐘溫度 .....	42
表 4-10 高週波加熱實驗的綜合數據 .....	43

# 第一章、緒論

## 1-1 研究背景

咖啡是全球最常消費的商品之一，具有許多豐富的風味與特徵，使其成為一種獨特的飲料。而咖啡中有一種廣為人知的化合物是咖啡因，咖啡因是一種可以提神醒腦的興奮劑，它通過提高基礎代謝率、降低血壓和改善葡萄糖調節來促進健康[1][2]。國際咖啡組織估計 2015 年，全球咖啡產量為 1.434 億噸咖啡袋（60 公斤），在俄羅斯、澳大利亞、韓國等新興市場的消費推動下，咖啡的需求正在增加，預計在不久的將來還會持續成長[3]。

近年來臺灣的咖啡經濟產業發展興盛，開始轉向精品咖啡文化。因為臺灣在消防法的用火規定較為寬鬆，也因此能允許使用明火烘豆，另外，臺灣選手在國際咖啡烘焙賽事屢獲佳績，也進而是臺灣咖啡產業蓬勃發展的證明。

臺灣咖啡市場成熟，在消費國的大力支持下，進口咖啡生豆便利、關稅也少，且網路發達、資訊傳播迅速、有多元的烘豆技術，人均飲用咖啡的人數上升、人口年輕化，因此自家烘焙能夠滿足對咖啡消費的持續需求。

## 1-2 咖啡烘焙

咖啡生豆烘焙的過程中，有多種階段和步驟，以及不同烘焙的程度。生豆烘焙的過程裡，會產生化學與物理的變化，烘焙過程中經過火、攪拌碰撞、時間等影響因素，在外觀顏色上，從生豆的綠色逐漸轉變成深褐色，也生成千種以上的香氣化合物，因此造就咖啡豆有多種不同的風味與樣貌。

### 1.2.1 烘焙度-焦糖化數值(Agtron Number)

時間和溫度對咖啡中揮發物的形成影響複雜，烘焙咖啡豆的揮發性特徵不僅取決於烘焙程度，還取決於烘焙過程中使用的溫度，這意味著咖啡風味將根據使用的時間和溫度曲線而變化[4]。由 Agtron 咖啡烘焙分析儀器所量測的焦糖化數值，是美國精品咖啡協會(SCAA)統一規範而界定的精確烘焙度指標，數值在 0-100 之間，越小則是烤得越深，因此能依據量測數值，決定烘焙深淺程度，來描述咖啡豆的烘焙度，例如極淺焙、淺焙、中淺焙、中焙、中深焙、深焙、極深焙，如圖 1-1 所示[5]。



圖 1-1 咖啡豆的烘焙深淺程度[5]

## 1.2.2 烘焙程序

### (a) 脫水階段

生豆的含水率約在 8~12%，外表堅硬，入鍋接受預熱，加熱時間約 4~8 分，水分開始流失，細胞壁因為水分汽化蒸發而變薄，阻隔水氣的排出，因此無法完全排出水氣，使生豆內部形成壓力，生豆的體積會慢慢膨脹增加。

### (b) 褐化階段

溫度升至 160 度，此升溫過程中，碳水化合物與胺基酸受熱進行梅納反應(Maillard reaction)，並飄出類似麵包或奶油的味道，咖啡豆的顏色也逐漸轉變褐色，且烘焙期間中，咖啡豆的銀皮也會脫落。

### (c) 一爆後發展階段

一爆開始到烘焙結束的這段期間，稱為發展時間，如果發展時間太短，咖啡的風味會偏酸，酸感會比較強烈，則會失去一些甜感；如果發展時間太長，則會讓咖啡鈍化，表面因焦化帶有焦碳的苦味，因此發展時間和溫度都要適度掌控。發展時間通常為總烘焙時間的 15~25%。

溫度升高加熱約 180 度，一爆開始時會聽見爆裂聲響，因生豆從脫水、褐化階段就在不斷累積熱能，豆體因承受不住內部的水氣壓力，和二氧化碳的堆積而開始放熱，體積增大密度下降，所以在端處爆裂，而一爆階段期間因梅納、焦化反應會產生大量揮發性芳香物質，也是產生大量甲酸、乙酸的階段，此階段下豆為淺焙程度，咖啡味道偏酸，色澤偏淺褐色。

一爆結束後約 1~2 分鐘，溫度約 210 度，咖啡豆從放熱轉為吸熱，二氧化碳和蒸氣衝破豆體，再次發生聲響，進入二爆，此時為中深焙的階段，有機酸裂解 60% 以上，咖啡色澤偏黑，表面油亮，酸味下降且帶焦苦味。

### (e) 冷卻

咖啡豆出爐後，豆子溫度約 200 度以上，所以在出爐後，咖啡豆依然可用身的溫度持續烘焙，因此出爐後，需盡快將咖啡豆冷卻至室溫下，若冷卻到室溫的時間夠快，才能鎖住風味，並且使用密封罐保存。

### 1.2.3 烘豆機熱導方式

目前市面上有 5 種常見的烘豆機，分別為直火烘豆機、半熱風烘豆機、全熱風烘豆機、浮風烘豆機、近紅外線烘豆機，主要以火源加熱的方式來做區分。

#### (1) 直火式

有開孔的鍋爐放置在火源的上方，讓火源接觸到鍋爐，並直接加熱到咖啡豆。

#### (2) 半熱風式

沒有開孔的鍋爐放置在火源上方，讓火源接觸到鍋爐，透過鍋爐的壁熱與熱風加熱咖啡豆。

#### (3) 全熱風式

鍋爐在火源上方，但鍋爐沒有接觸到火源，只使用熱風的方式加熱，推動熱空氣造成熱風，形成對流的熱風直接加熱在咖啡豆上。

#### (4) 浮風式

熱風是直接由下往上的方式對流，利用強勁的熱風來翻滾並加熱咖啡豆。

#### (5) 近紅外線

利用鍋爐中心的加熱燈管所產生的近紅外光線，透過熱輻射傳導的方式，在咖啡豆受到近紅外光的照射下達到加熱的效果。

## 1.2.4 家用烘豆機性能比較

市售家用烘豆機百種款式，以下依據常用機型的五種熱源加熱方式，對其進行分類比對，如下表 1-1 所示：

表 1-1 家用烘豆機性能比較

烘豆機型號	QUEST M3	IKAWA Pro V3	SR540	BocaBoca250	
烘豆方式	半熱風式	全熱風式	浮風式	近紅外線	直火式
豆量	250 克	50 克	150 克	250 克	500 克
體積	大	大	大	大	中
功耗	1050W	1500W	1750W	500W	無
電源	交流(市電)	交流(市電)	交流(市電)	交流(市電)	直流(電池式)
耗材	無	無	無	無	瓦斯

### 1.3 紅外線穿透材料

任何物體表面總是不斷地自發性發射電磁波，並以非接觸的方式，傳遞遠距離的電磁波。當表面溫度高於絕對溫度 0 K，就會產生熱輻射，而表面溫度越高，熱輻射就會越強，並且可由熱傳係數快速得知物體的導熱是否良好，若是越高的熱導係數，則該物質越容易導熱。

由於在烘豆過程中需使用到實驗室開發的紅外線發射管的紅外線熱源模組之外，如何利用紅外線穿透材料的蓄熱與高放射特性，吸收紅外線發射管的紅外線熱源之外，以及讓中遠波段之紅外線穿透的輻射，所產生的 2 次輻射進而加熱咖啡豆，為本論文研究之方向。

以下將會介紹一些具有良好導熱性、電阻率亦或是熱膨脹之金屬、無機物或化合物之材料，作為材料的紅外線穿透性之探討方向。

表 1-2 多種材料在接近室溫下的密度與熱性質

Material	Density(g/m <sup>3</sup> )	Melting Point(°C)	Thermal Conductivity(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Gold	19.32	1064.18	318
Silver	10.49	961.78	420
Copper	8.96	1084.62	401
Iron	7.874	1538	80
Aluminum	2.7	660.32	237
Diamond	3.5	3815	2300
Quarter	2.6	1610	1.34

### 1.3.1 不鏽鋼 304、316 簡介

不鏽鋼是一種鐵碳合金，含有不同百分比的其他元素，如 Ni、Cr、Mo、As、Cd、Pb、Sn、Mn、Cu、Zn、Al、S 和 Si，如表 1-3 所示[6]。這種合金中，鉻的存在是基本的，確保最小百分比（~6.5%）的形成，且覆蓋整個表面，並保護其免受腐蝕；將鉻含量增加到超過 10.5% 會進一步提高耐腐蝕性。

添加其他金屬（例如 Ni 和 Mo）可提高抗腐蝕性並額外賦予鋼的性能[7]。因此能從化學成份中分辨不同類型的不鏽鋼，304 不鏽鋼中的含鉻量達 10.5% 以上，而 316 不鏽鋼則多了鉬 (Mo) 元素。

不鏽鋼通常被認為沒有危害人體健康，並且被認為用於食品炊具、醫療衛生等，皆是重要的應用，例如廚具。

表 1-3 不鏽鋼 304、316 的化學成分[6]

Chemical Composition (%by mass)		
Element	Steel Designation(Number)	
	304	316
C	0.07	0.07
Cr	17.00-19.50	16.50-18.50
Ni	8.00-10.50	10.00-13.00
Mo		2.00-2.50
Mn	2.00	2.00
Si	1.00	1.00
P	0.045	0.045
S	0.015	0.015

### 1.3.2 氧化鋁簡介

氧化鋁 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 含有鋁和氧的化合物(無機化合物)，其熔點為  $2054^\circ\text{C}$ 、沸點為  $2980^\circ\text{C}$ ；氧化鋁具有導熱性 ( $30\text{ W/mK}$ ) 和高電阻率 ( $>10^{14}\Omega\text{cm}$ )，被認為是一種實用的導熱材料[8]；氧化鋁存在於許多晶相或多晶型物 ( $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $\delta$ 、 $\kappa$ 、 $\chi$  等) 中，因而有著許多種類的同素異形體。如表 1-4 所示。而  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  因每一層為 6 層組合而成的的單位晶格，屬六方晶系，如圖 1-2 所示，氧化鋁有著高硬度的特性，其因是氧原子與鋁原子之間所形成的強烈離子鍵。

表 1-4 各種氧化鋁之結晶型態與密度

Type	$\alpha$	$\chi$	$\eta$	$\delta$ 、 $\gamma$
crystal system	hexagonal	Cubic	Cubic	Tetragonal
Specific Weight	4.0	3.0	2.5-3.6	3.2

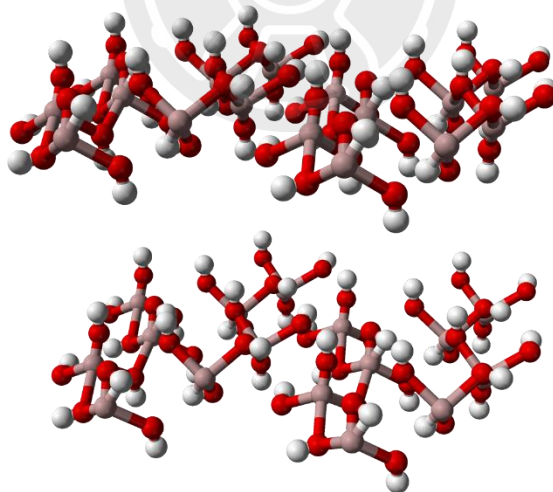


圖 1-2  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  結晶型態之結構

所有氧化鋁相（ $\alpha$ 相除外）都有一個相變序列，它們的共同特點是，在高溫下都轉變為 $\alpha$ 相，因為 $\alpha$ 相是氧化鋁唯一的熱力學穩定型態。如圖 1-3 所示[9]，從其他亞穩相到相的轉變溫度，通常都發生在 1000°C 以上，並且都是不可逆。因此 $\alpha$ 相在氧化鋁的所有形態中具有最高的密度、彈性模量、硬度和帶隙，這些特性使其成為許多工業應用的首選材料。

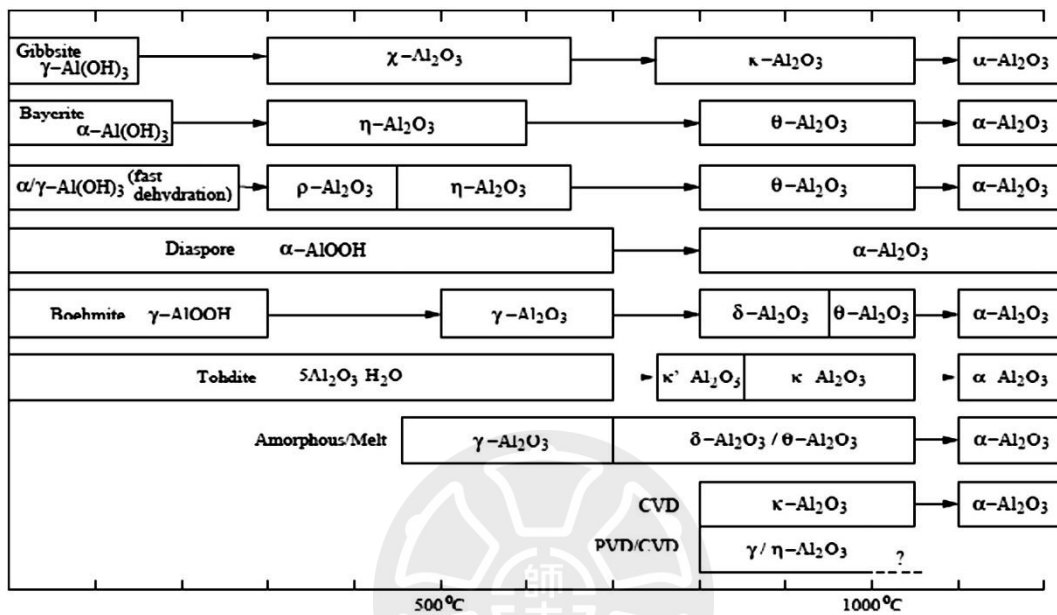


圖 1-3 氧化鋁熱處理過程從氫氧化物到剛玉( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的轉變順序[9]

## 1-4 研究目的

目前市售中的紅外線烘豆機，是將燈管發出的近紅外線照射在咖啡豆上，並且利用旋轉機構攪拌咖啡豆，使咖啡豆均勻受熱；相較於上述的烘豆機，本研究目的主要是，開發具有紅外線發射管的熱輻射熱源，與熱風的多元化加熱模組，加上紅外線穿透材料的特性，為本論文研究之方向。

紅外線穿透材料的中遠波長穿透特性，豆體水份吸收中遠波長的能量，帶走更多水份，最後比較咖啡豆烘焙前後之失重率，分析其烘豆的效果，達到淺焙、中焙、深焙之結果，作為此研究的可行性之探討，進而開發出低功率、快速加熱、體積小，不插電的多元化加熱模組烘豆機

因此，此論文所要研究之探討的方向主要有以下：

1. 開發具有多元化熱模組之紅外線發射管以及熱風
2. 開發具紅外線穿透的材料
3. 自製烘豆機比較市售烘豆機之咖啡烘焙度的可行性驗證

## 第二章、實驗原理

### 2.1 熱輻射簡介

熱傳導和熱輻射是兩種基本的導熱方式，任何物體表面總是不斷地自發性發射電磁波，並以非接觸的方式，因熱生成而傳遞遠距電磁波。其熱能傳遞表示式為：

$$Q_r = A\varepsilon\delta(T_r^4 - T_s^4)$$

其中， $Q_r$  是輻射熱傳量[W]

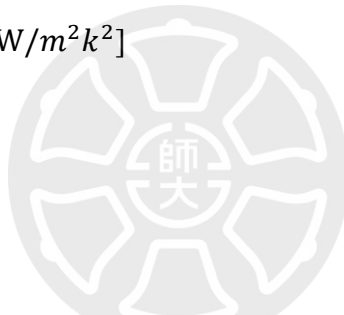
$A$  是輻射的熱傳面積[m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  是物體的散射率，而一般物體的散射率都少於 1

$\delta$  是熱輻射散射常數[5.676×10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>k<sup>2</sup>]

$T_r$  是紅外線放射體表面溫度[K]

$T_s$  是被加熱物質的表面溫度[K]



當表面溫度高於絕對溫度 0 K，就會產生熱輻射，而表面溫度越高，熱輻射就會越強。

任何物體在大於對溫度可以就會輻射出熱輻射，也能吸受熱輻射，因此物體在吸收能量的同時，也會反射剩餘的能量，若溫度下降，則表示吸收的輻射小於放出的輻射，相反地，吸收的輻射大於放出的輻射，則溫度會上升。因此依據克希荷夫熱輻射定律(Kirchhoff's law of thermal radiation) 其表示式為：

吸收率：

$$\alpha = \frac{M}{M_b}$$

發射率：

$$\varepsilon = \frac{M}{M_b}$$

$M_b$ 是相同溫度下的黑體輻射量

$M$ 是物體輻射量

在已知熱平衡的條件中，相同溫度下的發射率恆等於吸收率。因此實際物體不會反射輻射，並能將外來輻射完整吸收，便可稱之為黑體。



基於經典的熱輻射理論之普朗克的黑體輻射定律 (Planck's blackbody radiation law) 概念中，在給定溫度下由黑體輻射的電磁能量分佈 (或光子密度分佈)，作為波長的函數，描繪出其溫度函數的頻譜分佈，透過其定律在任意溫度下，從一個黑體中發射出的電磁輻射的輻射率與頻率彼此之間的關係，當輻射率是頻率的函數則表示為：

$$I_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

其中， $I_{\nu}$ 是輻射率

$\nu$ 是頻率

T 是黑體的溫度

h 是普朗克常數

c 是光速

k 是波茲曼常數



黑體的概念是一種理想化，因為自然界中不存在完美的黑體。例如黑色的石墨材料，發射率大於 0.95。

實驗上，環境中達到熱力學平衡狀態，黑體輻射可以最好地建立為剛體空腔中最終穩定的穩態平衡輻射，溫度均勻，且完全不透明，僅部分反射，在一側位置有一個小孔，可以很好地從近似於開口處，發出理想的黑體輻射，且物體的內部或周圍產生的熱電磁輻射，也由黑體 (非反射體、理想透明化) 發射。常見的例子，包括烤麵包機的加熱元件、燈泡的燈絲。

黑體輻射的光譜強度在隨發射體溫度增加的頻率處達到峰值，因此，依據維恩位移定律 (Wien's displacement law) 的證明，表示式為:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

其中， $\lambda_{\max}$  為輻射的峰值波長(單位奈米)

T 為黑體的絕對溫度

b 為維恩位移常數

隨著黑體溫度越高熱輻射越大，光譜達到較高的峰值，物體溫度越低，光譜強度也會降低，光譜值會移動到更長的波長，由圖 1-4 所示[10]。

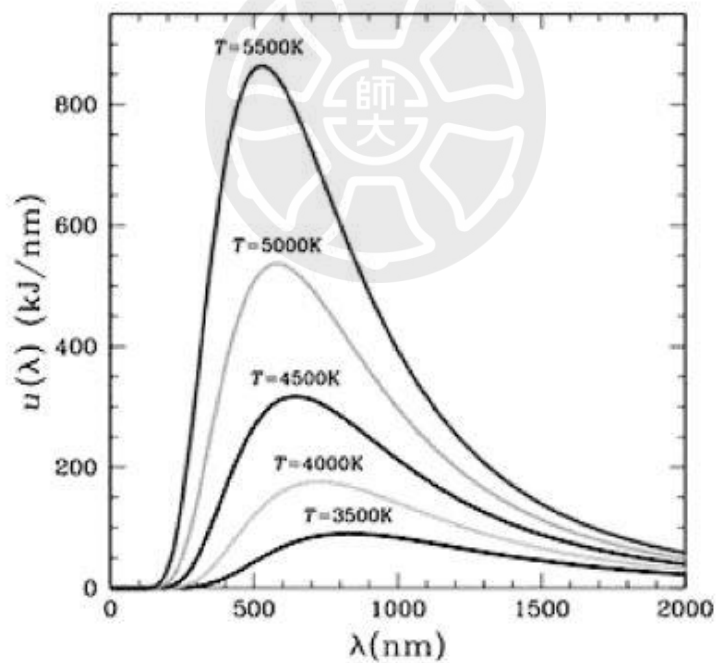


圖 2-1 黑體輻射之不同溫度的電磁波譜[10]

依據斯特凡-波茲曼定律指出一個黑體表面單位面積在單位時間內輻射出的總能量（稱為物體的輻射度或能量通量密度） $j^*$ 與黑體本身的熱力學溫度  $T$ （又稱絕對溫度）的四次方成正比，其表示式為：

$$j^* = \epsilon\sigma T^4$$

其中， $j^*$ 為輻射度

$T$ 為黑體的絕對溫度

若為絕對黑體，則 $\epsilon$ 為 1

比例係數 $\sigma$ 又稱為斯特凡波茲曼常數其值為  $5.67 \times 10^{-8} \text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$

### 2.1.2 近場與遠場之熱輻射

當兩個不同溫度的物體在真空間被隔開時，它們只能通過輻射進行熱交換，在較大的分離距離(遠場狀態)下，在空間中自由傳遞的熱通量受到斯特凡-波茲曼定律 (Stefan-Boltzmann law) 黑體極限的限制；相比之下，兩物體的間距若小於熱輻射電磁波的波長時，由於在亞波長距離(近場區域)，物體表面會有漸逝的電磁波，對熱輻射的傳遞有著很大的幫助[11]，因此，兩物體間的熱輻射速率隨著距離縮小而迅速增高，而克服黑體極限的限制，並且超過這個限制多個數量級。

## 2.3 咖啡烘焙化學與物理反應

咖啡生豆的含水率約 8~12%，室溫中是堅硬的玻璃化狀態，在烘豆過程中，玻璃會有多樣的化學與物理反應，因為加熱生豆使豆體的水分揮發，形成水蒸氣及其他氣體，進而造成玻璃轉化溫度，先是玻璃化進入橡膠化（軟化且有彈性的型態），持續加熱水分流失的更多，又會回到玻璃化型態。使豆體的體積膨脹的物理反應之簡要說明：

### 玻璃型態之轉化溫度（glass transition temperature-Tg）

為非結晶態物質在橡膠態(rubbery state)與玻璃態(glassy state)之間所轉變的溫度型態。

#### 玻璃化

當溫度低於玻璃轉移溫度（Tg）時，分子鏈結的運動因低溫，大部分會被凍結（frozen），而呈現出較多的晶格狀排列，呈現出剛性具硬脆（brittle）特性之玻璃態(glassy state)，類似玻璃的特性，堅硬但容易脆裂。

#### 橡膠化

溫度高於玻璃轉移溫度（Tg）時，分子鏈節則會有更多的自由度可以運動，呈現出柔軟可繞曲的橡膠態（Rubbery state）。

生豆經過烘焙，產生的各式芬芳香氣與風味，過程中有水活性、加溫（烘焙的高溫）、加壓（豆體的膨脹）等，其過程有重要之化學反應有：

### 梅納德反應

是一種非酶褐變，它涉及食物中羰基化合物（尤其是還原糖）與具有游離氨基的化合物（如氨基酸、胺和蛋白質）在常溫或加熱時發生的複雜反應。其反應主要結果生成大分子的棕黑色物質，例如擬黑素或是類黑精等。另外，以及成千百種的芬芳香味之中間體分子物質（還原酮、醛等化合物），因此造就了食物多樣的色澤以及風味。在熱處理或保存過程中，除了導致營養損害外，溫度若過高，也可能導致潛在有毒化合物（丙烯醯胺）的形成，影響健康[12]。

### 焦糖化反應

是糖的氧化，這是一種廣泛用於烹飪的過程，以產生堅果味和棕色。焦糖化是一種非酶促褐變反應。隨著烘焙咖啡生豆過程的進行，揮發性化學物質會釋放出來，產生特有的焦糖味。該反應涉及去除水（作為蒸汽）和分解糖。焦糖化反應取決於糖的類型；蔗糖和葡萄糖在 160°C 左右焦糖化，果糖在 110°C 焦糖化[13]。

### 熱裂解

是一種不可逆的反應，有機物質在惰性氣體中（低氧或無氧）高溫分解，過程中同時產生物理與化學的多樣變化，咖啡豆經過高溫反應在 200-300 度的最終型態就是焦炭[14]。

## 第三章、材料與方法

### 3.1 紅外線發射管

本論文研究之烘豆機內部使用加熱元件，是使用本實驗室開發的紅外線發射管，作為其內部熱源，如圖 3-1 所示。將奈米材料填充至陶瓷管內部後，並在陶瓷管兩端製作電極，如圖 3-2 所示。通電後的奈米材料以優異的電子遷移速度，透過高效率的熱電轉換之產熱，再藉由陶瓷管釋放出熱能。

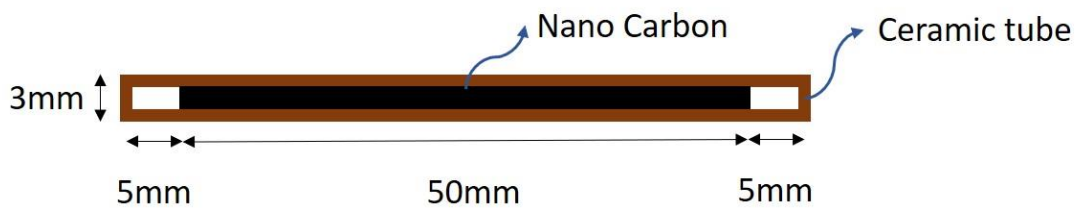


圖 3-1 發射管尺寸示意圖



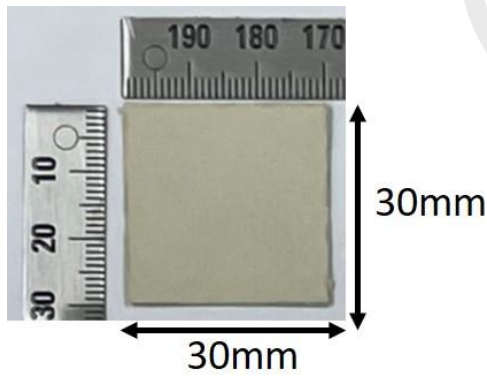
圖 3-2 紅外線發射管實體圖

### 3.2 材料製備

本論文研製的烘豆機內部使用的加熱元件之外，加上應用於烘豆機內部的紅外線穿透材料，利用材料之穿透的特性，提升咖啡豆之受熱均勻度，為此論文探討方向之一。材料混合成形後，方片尺寸為 30\*30\*1 (mm)，方管尺寸為 10\*10\*80 (mm)，如表 3-1 所示。經過兩小時 1000 度高溫烤爐烘烤及退火，製備成方片以及方管，如圖 3-3 所示。

表 3-1 材料形狀與尺寸

材料形狀與尺寸			
組別	尺寸(mm)		
	長	寬	高(厚)
方片	30	30	1



圖(a)



圖(b)

圖 3-3 方片實體圖:(a)長寬、(b)厚度

### 3.3 紅外線穿透材料實驗建置與方法

#### 3.3.1 高週波加熱實驗

##### 實驗方法

此實驗方法，主要是對樣品進行加熱 3 分鐘後，比較樣品在固定時間內所提升的溫度，過程中使用紅外線熱顯儀觀測，並且記錄每 30 秒的溫度熱顯像。比較多個樣品的兩端溫差優異性後，分析其溫差率。

##### 實驗建置

高週波加熱實驗的建置，如圖 3-4 所示。是用高週波加熱儀器，透過線圈感應加熱金屬鐵板的方式當作熱源，樣品尺寸為 30\*30\*1 (mm)，將樣品放在金屬鐵板上升溫，紅外線熱顯儀在樣品上方 30cm 處觀測，分析不同樣品在相同時間中的升溫情形；因為考慮加熱時，底部金屬鐵板的熱源造成過多的游離輻射，而影響樣品溫度，因此將金屬鐵板的尺寸定為 20\*20\*1 (mm)，如圖 3-5 所示。進而讓樣品可以完全覆蓋金屬鐵板。

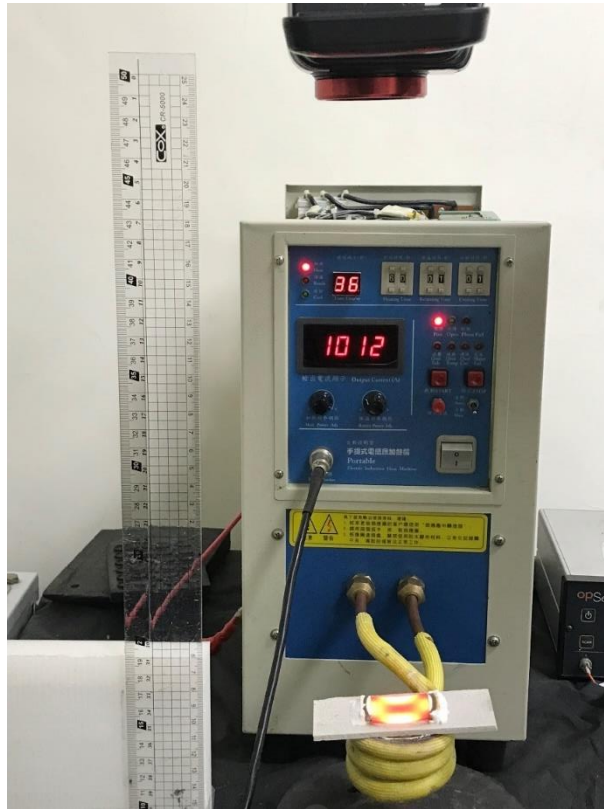


圖 3-4 高週波加熱實驗建置實體圖



圖 3-5 高週波儀器加熱用鐵板

### 3.4 烘豆機實驗建置與方法

#### 3.4.1 自製烘豆機

自製烘豆機架構示意圖，如圖 3-6 所示。烘豆機內部的重要架構由紅外線穿透材料、紅外線發射管、風扇等部件組合而成。

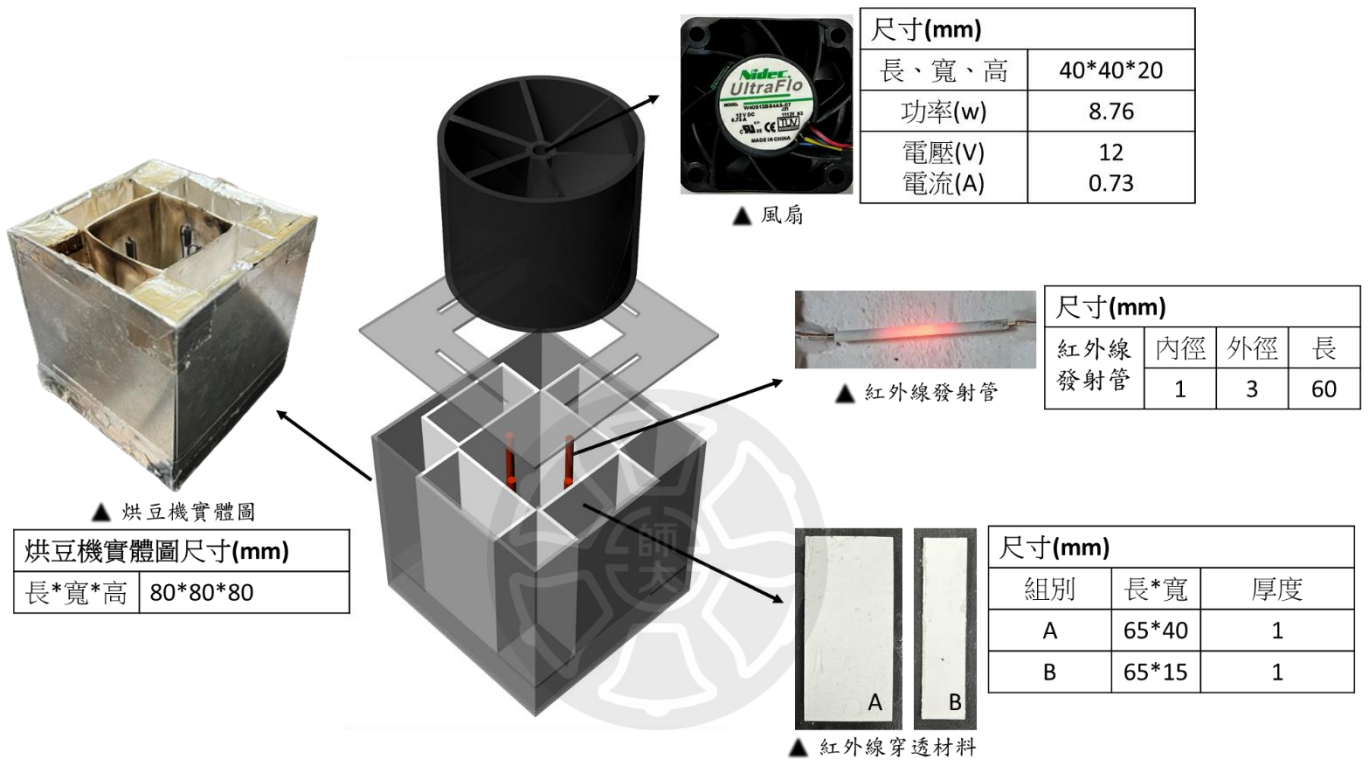


圖 3-6 自製烘豆機架構解說圖

## 實驗方法

自製烘豆機實驗，是運用紅外線發射管升溫到 600 度以上產生的高溫烘豆之外，其功率約 120~150 瓦特，且透過紅外線穿透材料之 2 次熱輻射的傳遞，在上方加裝風扇，運用熱對流的方式，使整體溫度均勻的烘焙咖啡豆。過程中使用 LUTRON TM-947SD 熱電偶溫度計，作為量測烘豆機咖啡豆槽(T1~T4)的溫度，如圖 3-8 所示，比較烘焙前與烘焙後的重量，為水分流失的失重率，並且將烘製好的咖啡豆樣品研磨成粉，使用 NIR 近紅外光譜儀分析。比較兩種烘豆機烘焙後的咖啡豆失重率與烘焙度。

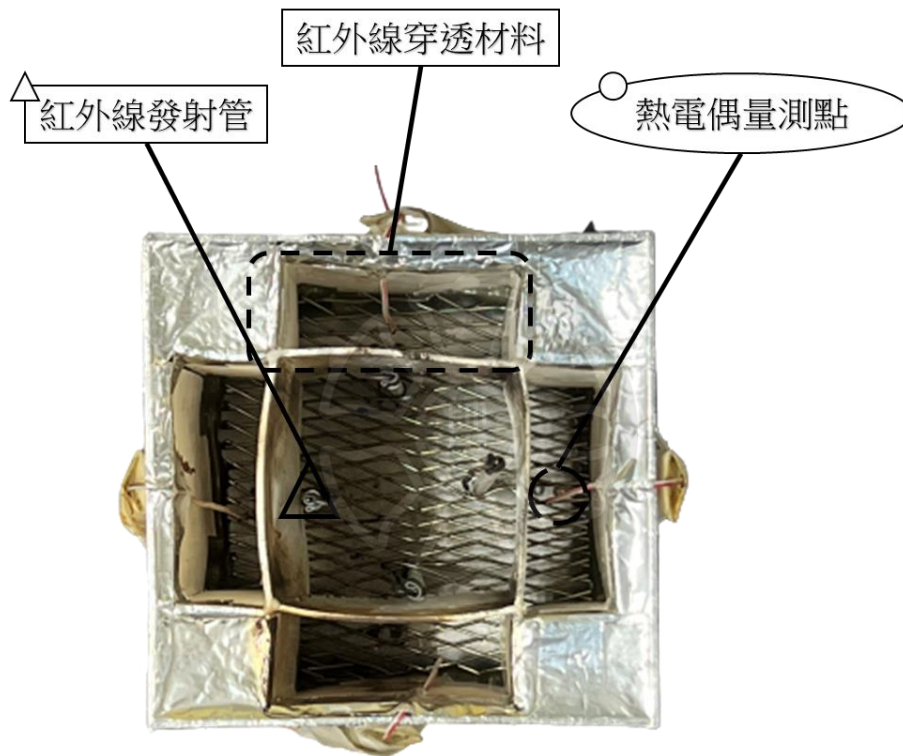


圖 3-7 自製烘豆機架構解說圖

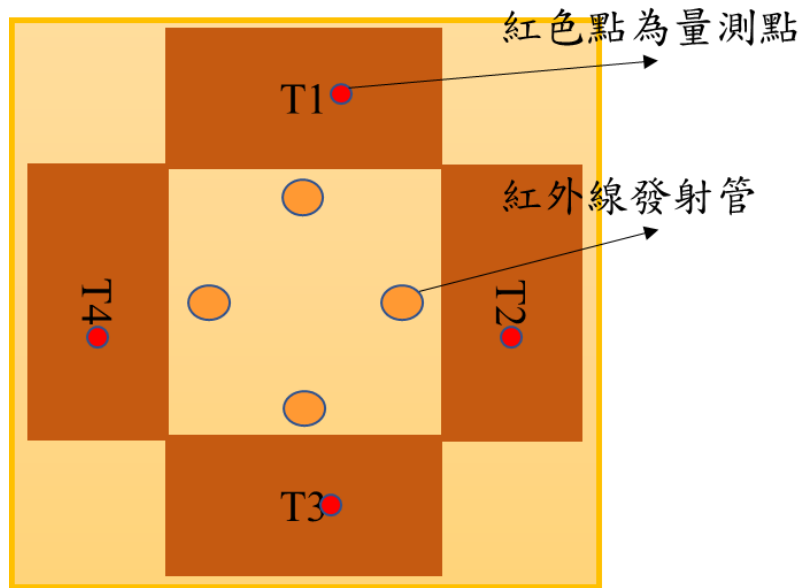


圖 3-8 自製烘豆機架構解說圖

### 實驗建置

此實驗建置實體圖，如圖 3-9 所示。內部主要是用紅外線穿透材料拼裝而成的方管，做為咖啡管，圍繞四個方向後，中間形成四方空間作為風扇入風口，並在對流室回彈進入咖啡管。在四個方向的咖啡管內部都裝有自製的紅外線發射管，當作其烘豆熱源，並且有紅外線穿透材料吸收熱輻射傳遞，以及具有能讓遠紅外波段穿透的特性，進而讓紅外線發射管的熱輻射，穿透其材料，讓 2 次輻射進入風口，使整體空間形成熱對流。

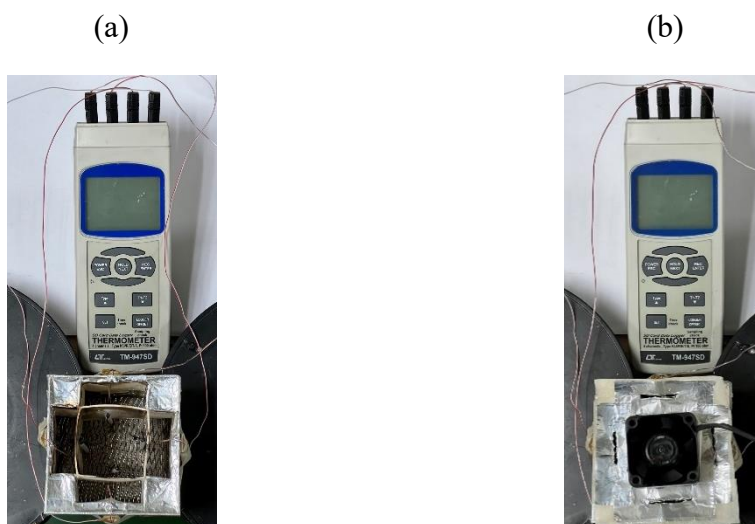


圖 3-9 自製烘豆機實驗建置實體圖：(a)無風扇、(b)有風扇圖

### 3.4.2 市售烘豆機實驗建置與方法

市售烘豆機，如圖 3-10、3-11 所示。選用的是氣旋式熱風家用烘豆機，其規格如表 3-2 所示。來做為比較自製烘豆機的烘焙效果。



圖 3-10 氣旋式熱風家用烘豆機實體圖



圖 3-11 氣旋式熱風家用烘豆機示意圖

表 3-2 氣旋式熱風家用烘豆機 Ver2.0 規格表

氣旋式熱風家用烘豆機	
規格	
使用電壓	110V 60Hz
消耗功率	1100W
烘焙方式	氣旋式熱風
最大烘焙量	100 克生豆

## 實驗建置與方法

氣旋式熱風家用烘豆機 Ver2.0，是使用氣旋式熱風來烘焙咖啡豆，過程中使用 LUTRON TM-947SD 熱電偶溫度計，作為量測烘豆機內部的溫度，如圖 3-9 所示。比較烘焙前與烘焙後的重量，為水分流失的失重率，並且將烘製好的咖啡豆樣品研磨成粉，使用 NIR 近紅外光譜儀分析。比較兩種烘豆機烘焙後的咖啡豆失重率與烘焙度。



圖 3-12 氣旋式熱風實驗建置實體圖

### 3.5 實驗設備

#### 1. 電源供應器 (Power Supply)

使用 GWINSTEK SPD-36065 電源供應器，如圖 3-13 所示。每單一通道可提供最大功率為 180W，為提供自製奈米碳電熱陶瓷管及風扇測試之電源，透過改變電壓及電流輸出功率，以此調整電熱管溫度和風扇轉速。



圖 3-13 電源供應器

#### 2. 熱電偶溫度計 (Thermo Meter)

使用型號為 LUTRON TM-947SD 溫度計，如圖 3-14 所示。主要目的作為烘豆機的溫度量測。

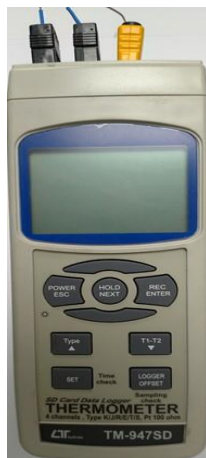


圖 3-14 熱電偶溫度計

### 3. 紅外線熱顯儀

使用 Thermo GEAR-G100 紅外線熱顯儀，如圖 3-15 所示。高週波線圈會對金屬感磁生熱，而無法使用熱電偶金屬探頭量測，因此使用紅外線熱顯儀作為導熱材料之表面熱輻射溫度的觀測。



圖 3-15 紅外線熱顯儀

### 4. 傅立葉轉換紅外光譜 FTIR

傅立葉轉換紅外光譜 Spotlight 400 FTIR，如圖 3-16 所示，是一種用來獲得固體，液體或氣體的紅外線吸收光譜，紅外光譜範圍  $7800-600\text{ cm}^{-1}$ ，量測不同配方樣品穿透率變化，分析其特徵波段。



圖 3-16 傅立葉轉換紅外光譜 Spotlight 400 FTIR

## 5. 手提式電感應加熱器

高頻感應加熱儀器，如圖 3-17 所示，三相 380v 電源，使用電磁感應方式加熱金屬（導體），因電阻使金屬生熱，產生渦電流加熱。



圖 3-17 手提式電感應加熱器

## 第四章、結果與討論

### 4.1 紅外線穿透材料實驗結果與討論

#### 4.1.1 傅立葉轉換紅外光譜穿透量測結果

依據表 4-6 實驗結果，將氧化鋁添加石英砂與氧化鋯不同比例混合製成，如表 4-1 所示，使用 200 度、1000 度烘烤製備，量測 FTIR 的穿透模組，觀察在中遠波長是否具有穿透強度的反應特徵。

表 4-1 樣品配方及溫度

合成比例				
組別	成分(g)、溫度(°C)			烘烤溫度
	氧化鋁	石英砂	結合液	
A	2		2	200
B				1000
	氧化鋁	石英砂	結合液	烘烤溫度
C	2	1	2	200
D				1000
	氧化鋁	氧化鋯	結合液	烘烤溫度
E	1	2	1	200
F				1000

樣品烘烤溫度，如圖 4-1 所示。以下 FTIR 穿透模組數據圖量測結果顯示，如圖 4-2 所示，在近 15000nm 長波長有明顯的區別，A、B 組有較高的穿透率。驗證材料在中遠波長具有穿透的效果，A 組烘烤 200 度穿透率維持在 90% 以上，B 組烘烤 1000 度還有 80% 以上。





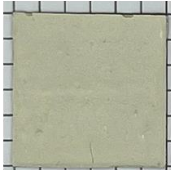
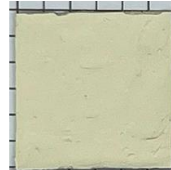
組別	A	B	C	D	E	F
烤爐溫度 (°C)	200	1000	200	1000	200	1000
樣品						

圖 4-1 樣品烘烤溫度

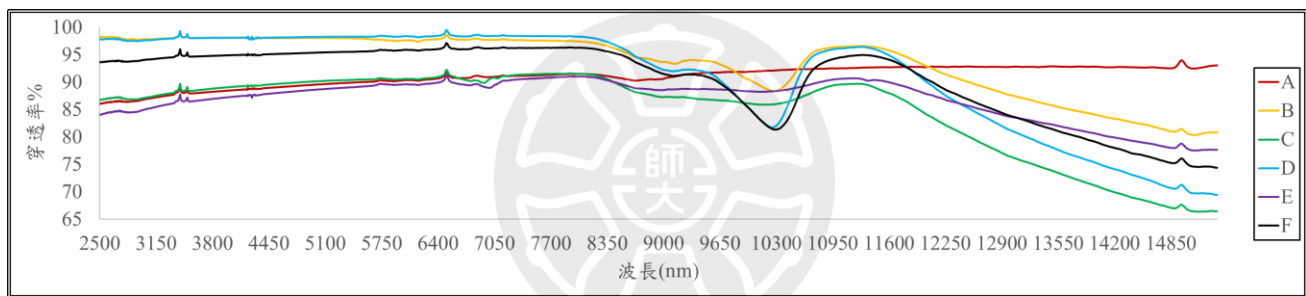


圖 4-2 各組樣品穿透光譜數據圖

#### 4.1.2 高週波加熱實驗及防水測試結果與討論

以下為氧化鋁、氧化鋇、石英砂不同比例混合成方片型的實驗組，如表 4-2、4-3 所示。經過混合方片形狀後，進入 60 度 6 小時後從模具下取出。

表 4-2 氧化鋇與氧化鋁之混合比例

合成比例			
組別	成分(g)		
	氧化鋇	氧化鋁	結合液
A	3	0.5	2
B	2	1	2
C	3	X	1
D	3	X	2

表 4-3 氧化鋁與石英砂之混和比例

合成比例			
組別	成分(g)		
	氧化鋁	石英砂	結合液
E	2	0.5	1
F	2	1	1
G	3		1

以下為脫模後，經過烤爐升溫燒結至 200 度，持續烘烤 200 度，烘烤 2 小時後，進行加熱 3 分鐘的綜合數據分析。如表 4-4 所示。

表 4-4 加熱 3 分鐘的綜合數據

高週波加熱實驗綜合數據					
組別	樣品平均(°C)/標準差±	熱源平均(°C)/標準差±	兩端溫差(°C)	兩端溫差率(%)	樣品狀態
A	516.33/5.04	740.38±2.76	224.05	70	形變
B	578.21/8.93	743.93±5.31	165.72	78	無變化
C	538.28/18.49	716.68±3.08	178.40	75	形變
D	494.6/3.22	678.78±2.17	184.18	73	形變
E	526.57/7.04	709.39±1.93	182.82	74	無變化
F	533.15/2.94	703.11±3.00	169.96	76	無變化
G	586.80/11.84	740.91±12.30	154.11	79	無變化

經過高週波加熱測試後的樣品，再經烤爐升溫燒結至 1000 度，持續烘烤 2 小時後，將材料浸泡於熱水中，並且持續加溫煮沸，如圖 4-3、4-4 所示。持續煮沸 5 分鐘後的結果，如圖 4-5、4-6 所示，無溶解或是形變的變化。



圖 4-3 持續煮沸實體圖：左上為 A 組、右上 B 組、左下 C 組、右下 D 組



圖 4-4 持續煮沸實體圖：左上 E 組、右上 F 組、左下 G 組

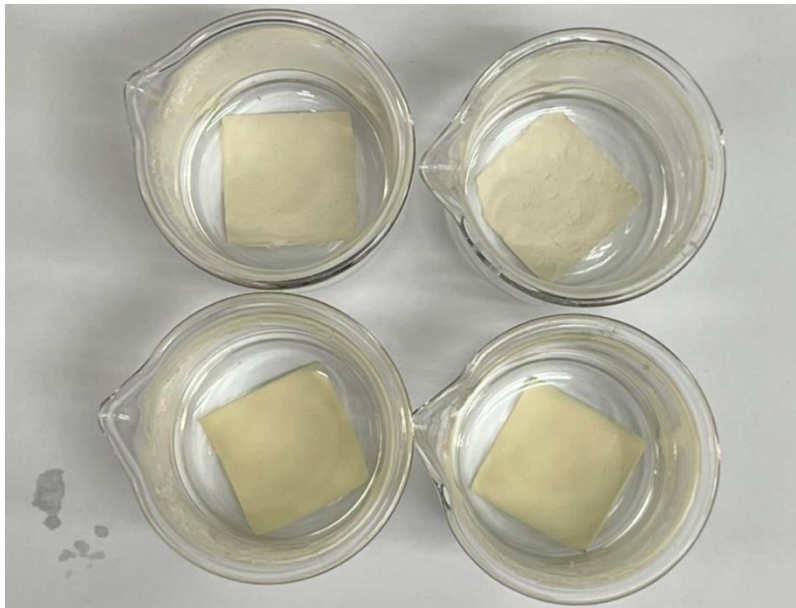


圖 4-5 煮沸 5 分鐘後結果：左上為 A 組、右上 B 組、左下 C 組、右下 D 組



圖 4-6 煮沸 5 分鐘後結果：左上 E 組、右上 F 組、左下 G 組

以下為對防水測試實驗後的樣品，再進行一次高週波加熱實驗，目的是測試在水下實驗後，溫差率有無變化，如表 4-5 所示，為防水測試後進行 3 分鐘的高週波加熱實驗的綜合數據。

表 4-5 防水測試後再加熱 3 分鐘的綜合數據

高週波加熱實驗綜合數據					
組別	上層平均(°C)/標準差±	下層平均(°C)/標準差±	兩端溫度差(°C)	兩端溫差率(%)	防水測試
A	553.79/6.33	749.01/14.81	195.22	74	無變化
B	556.75/5.70	722.51/5.06	165.76	77	
C	535.13/6.18	712.41/11.70	177.28	75	
D	547.84/11.88	7058.49/4.78	157.65	78	
E	530.16/4.57	703.28/10.37	173.12	75	
F	530.97/9.60	683.17/3.14	152.20	78	
G	552.67/9.07	708.20/6.89	155.53	78	

比較防水測試前後樣品的高週波加熱實驗結果，其導熱效果並無受到防水實驗的影響。防水實驗後的高週波加熱實驗結果中，B、F、G 組依舊有 77、78%的穿透率，且樣品型態並無受到影響，如圖 4-7 所示，圖(1)、(2)、(3)較為平整。而 D 組穿透率雖有 78%，但是在觀察樣品形態下，圖(4)所示，經過高週波加熱實驗後已經產生些許上翹變形。

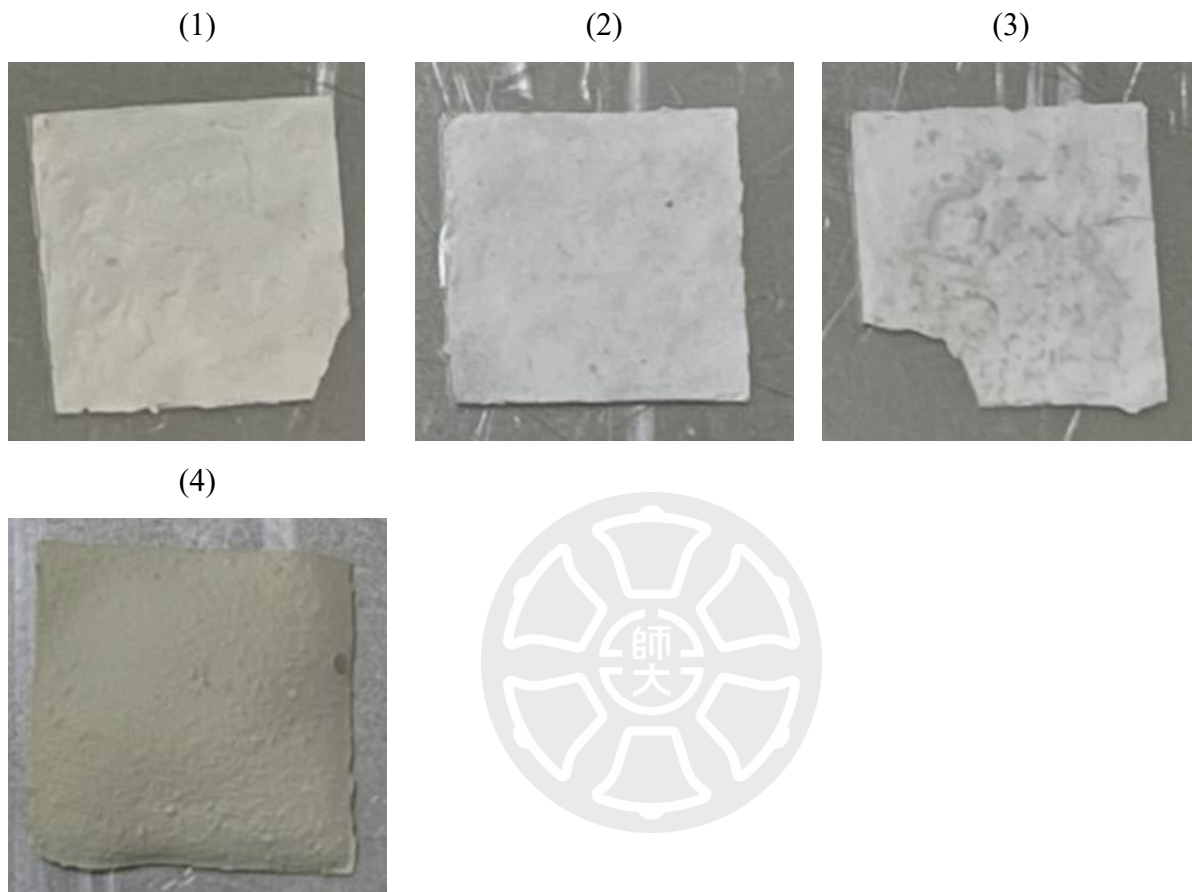


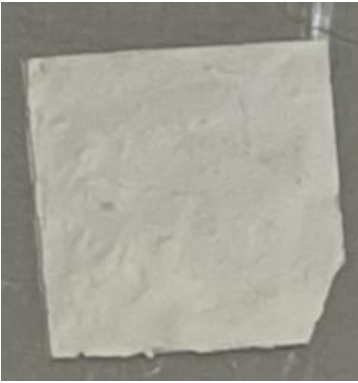
圖 4-7 高週波加熱實驗後的樣品形態：(1)B 組(2)F 組(3)G 組(4)D 組

依據以上三項測試後的數據結果，取前 3 組有較高的溫差率，以及形狀無變化的樣品，如表 4-6 所示。B 組樣品為為氧化鋁與氧化鋯的混合，F 組樣品為氧化鋁與石英砂的混合，G 組樣品為氧化鋁，3 組樣品都有良好的穿透率，經過高週波加熱、防水測試後還能保持形狀不變，如圖 4-8 所示。在氧化鋁較多的組別情況下，溫差率都有不錯的效果，接續氧化鋁混合橘、黃色彩釉，利用添加釉彩增加色溫的方式，測試此方法能否增加溫差率。

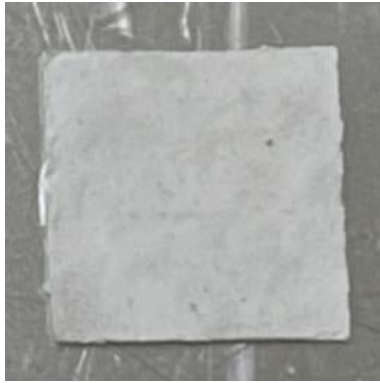
表 4-6 綜合數據 B、F、G 組

高週波加熱實驗綜合數據					
組別	上層平均(°C)/標準差±	下層平均(°C)/標準差±	兩端溫度差(°C)	兩端溫差率(%)	防水測試
B	556.75/5.70	722.51/5.06	165.76	77	無變化
F	530.97/9.60	683.17/3.14	152.20	78	
G	552.67/9.07	708.20/6.89	155.53	78	

(1)



(2)



(3)

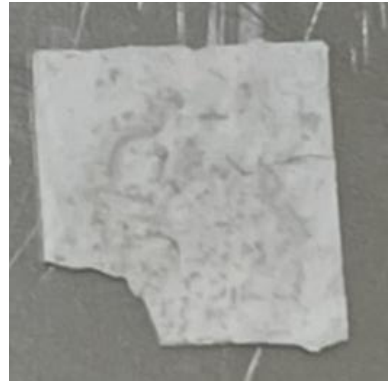


圖 4-8 高週波加熱實驗後的樣品形態：(1)B 組、(2)F 組、(3)G 組



以下進行使用添加釉彩增加色溫的方式，測試此方法能否增加溫差率。此實驗為氧化鋁和黃、橘釉料不同比例混合成方片形的實驗組，如表 4-7、4-8 所示。進行高週波加熱實驗，並與石英玻璃、銅片比較溫差率。

表 4-7 氧化鋁與黃色料之混合比例

合成比例			
組別	成分(g)		
	氧化鋁	黃色料	結合液
A	3		2
B	3	0.5	2
C	3	2	3

表 4-8 氧化鋁與橘色料之混合比例

合成比例			
組別	成分(g)		
	氧化鋁	橘色料	結合液
D	3	0.5	2
E	3	2	3

高週波加熱實驗，加熱樣品至穩定溫度的時間為 5 分鐘，如圖 4-9 所示。並使用紅外線熱顯儀觀測，如表 4-9、4-10 所示，實驗在 5 分鐘溫度穩定後，使用紅外線熱顯儀觀測樣品情形。

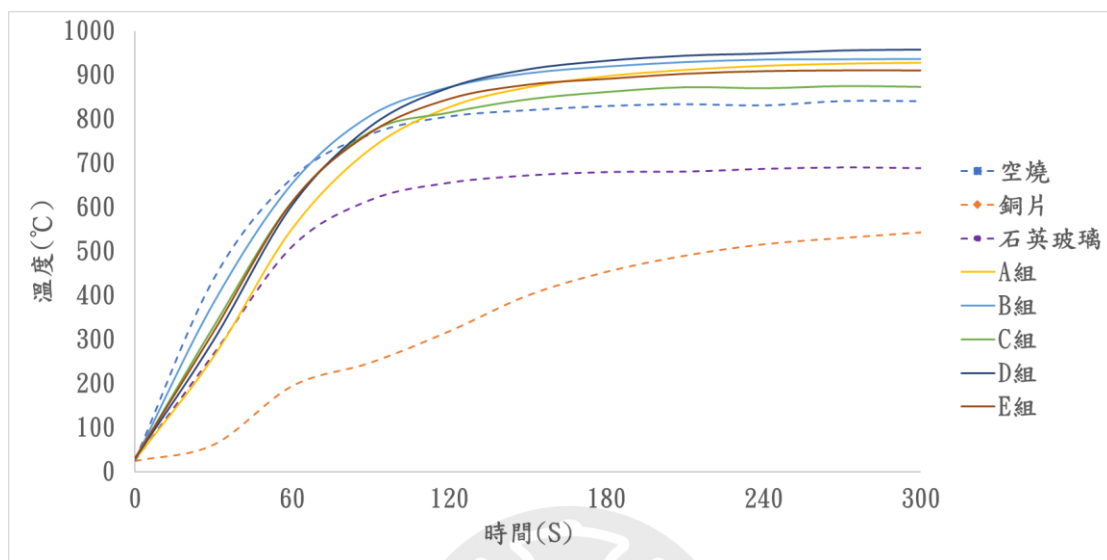


圖 4-9 每 30 秒樣品溫度數據圖

以下為每 30 秒使用紅外線熱顯儀觀測，至 5 分鐘穩定溫度，各類材料與不同比例釉料的溫度數據，如表 4-9 所示。

表 4-9 樣品每 30 秒加熱至 5 分鐘溫度

每 30 秒觀測至穩定溫度(°C)										
組別	時間(s)									
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
空燒	438.3	667.6	766.9	807	821.1	830.6	834.8	831.9	841.9	841.6
銅片	62.6	195.6	248.6	319.7	400.9	454.3	491	516.7	531	543.6
石英玻璃	268.7	512.3	618	656.6	673.1	680.8	681.8	688.1	691.3	689.7
A 組	262.0	552.5	733.4	827.7	872.5	897.6	912.0	921.1	926.0	928.2
B 組	385.1	655.5	810.1	874.0	905.2	920.5	930.6	936.3	936.9	937.7
C 組	330.7	614.3	772.8	815.9	845.9	862.5	873.3	871.0	875.8	874.1
D 組	299.5	605.7	784.5	871.8	913	932.5	944	948.9	955.7	957.8
E 組	319.1	613.8	771	847	879.2	892.3	903.9	909.8	911.6	911.5

以下為高週波加熱實驗時間 5 分鐘的綜合數據，如表 4-11 所示。氧化鋁混合不同比例的釉料結果顯示，添加橘、黃釉料在溫差率上都沒有顯著的差異性。

表 4-10 高週波加熱實驗的綜合數據

高週波加熱實驗的綜合數據					
組別	下層平均(°C)	上層平均(°C)/標準差±	兩端溫度差(°C)	兩端穿透率 (%)	測後狀態
銅片		578.33/3.67	248.8	70	
石英玻璃		685.98/2.38	141.15	85	
A		928.17/1.47	-101.04	112	無變化
B	827.13	937.72/4.14	-110.59	113	
C		874.06/3.57	-46.93	106	
D		934.76/8.48	-107.63	113	
E		909.08/2.29	-81.95	110	

綜合以上實驗數據，依據表 4-5 數據結果，B、F、G 組樣品有良好溫差率，以及加熱、防水實驗後無形狀的變化。

## 4.2 熱風烘豆機綜合數據與討論

### 4.2.1 自製機與市售烘豆機時間溫度分佈結果與討論

以下為重量 15 克的咖啡生豆，兩種烘豆機的時間溫度分佈與烘焙度。如圖 4-10~4-13 所示，可以看出自製烘豆機溫度有達到 200 度並與市售溫度相近，在不同時間下，T1~T4 區域溫度都有相近或超越市售溫度的情形。

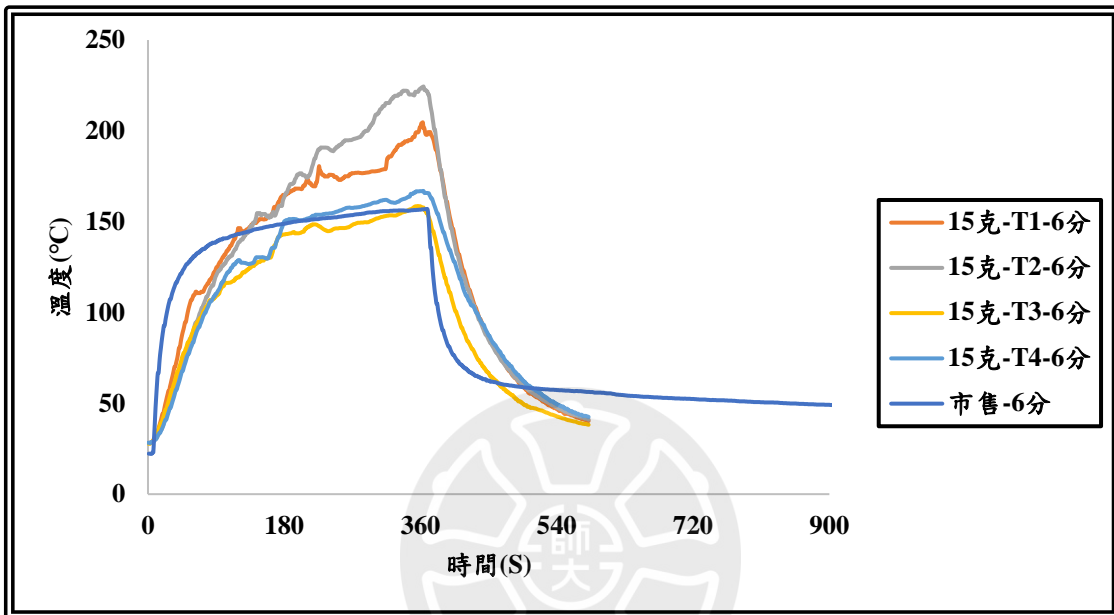


圖 4-10 自製機與市售烘豆機 6 分鐘溫度比較

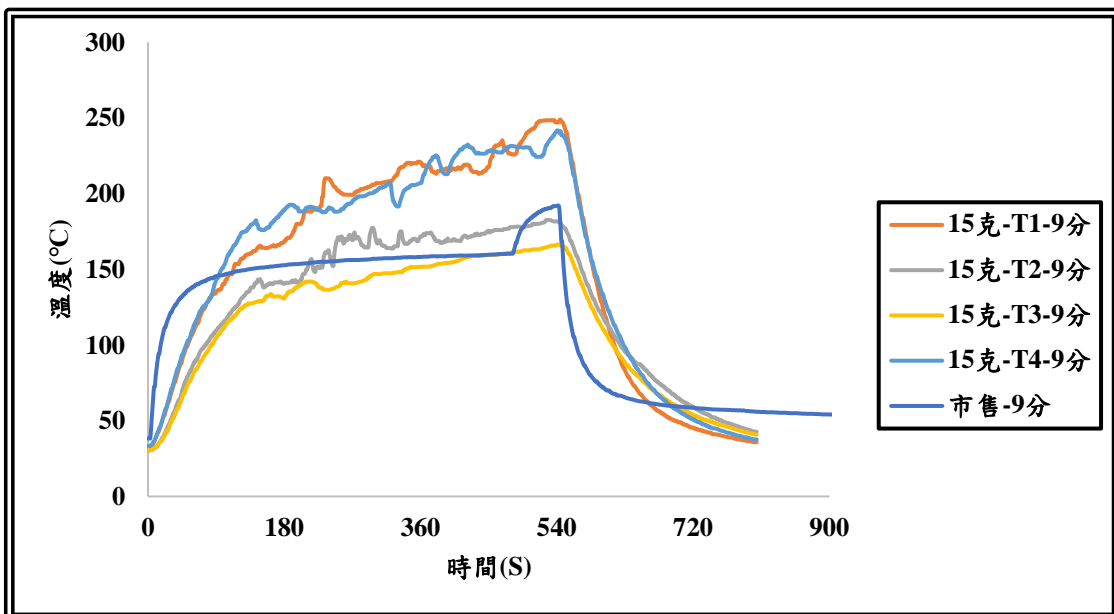


圖 4-11 自製機與市售烘豆機 9 分鐘溫度比較

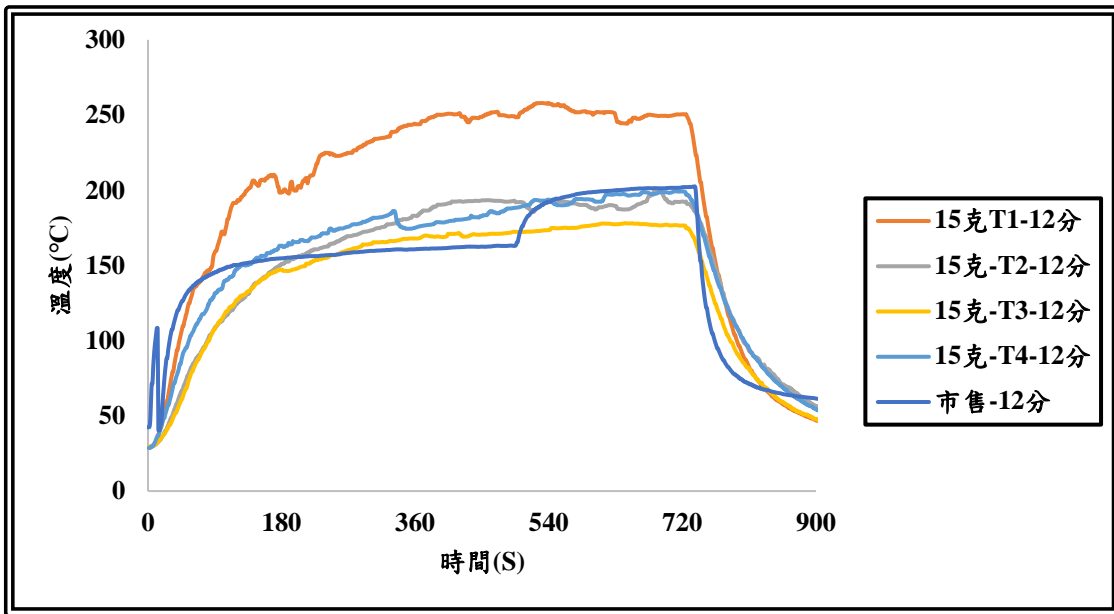


圖 4-12 自製機與市售烘豆機 12 分鐘溫度比較

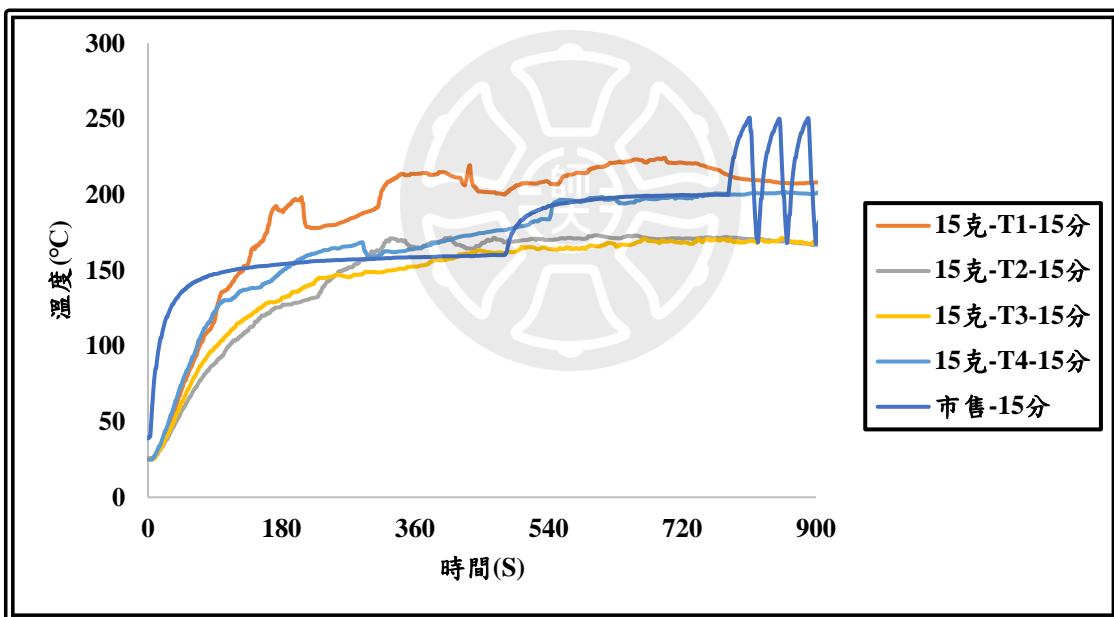


圖 4-13 自製機與市售烘豆機 15 分鐘溫度比較

以下為自製烘豆機中 T1~T4 區域中不同時間溫度分佈，如圖 4-14~4-17 所示。在 T1 的區域溫度比其他區域來的高。熱源的熱輻射經過穿透材料，讓咖啡豆更快的帶走水分。如圖 4-14 所示，可看出 T1 區域的失重率高出其他區域。

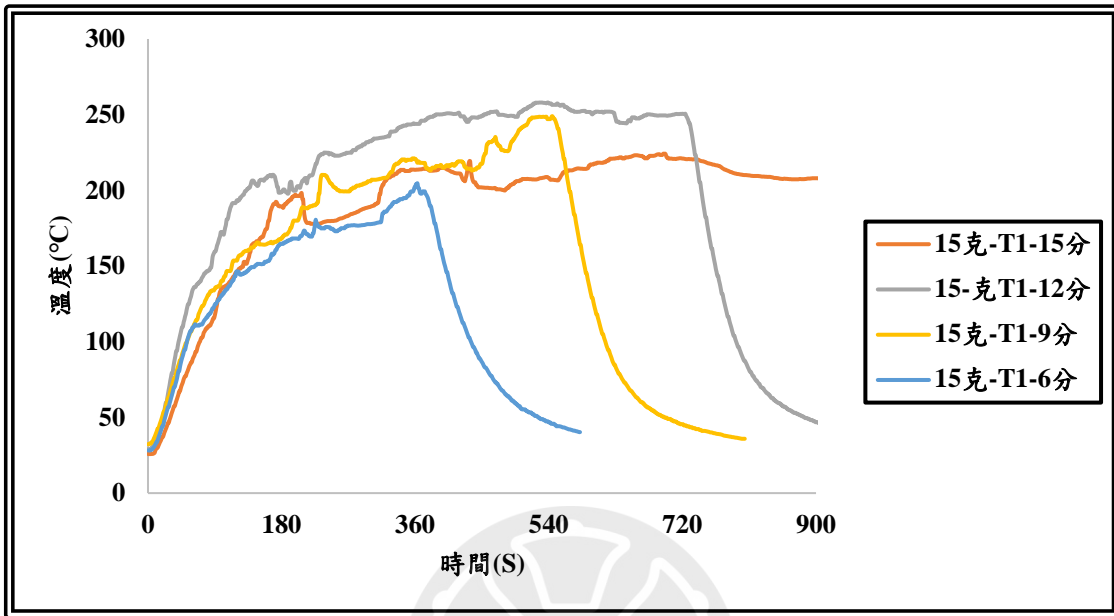


圖 4-14 自製烘豆機 T1 區域不同時間溫度分佈

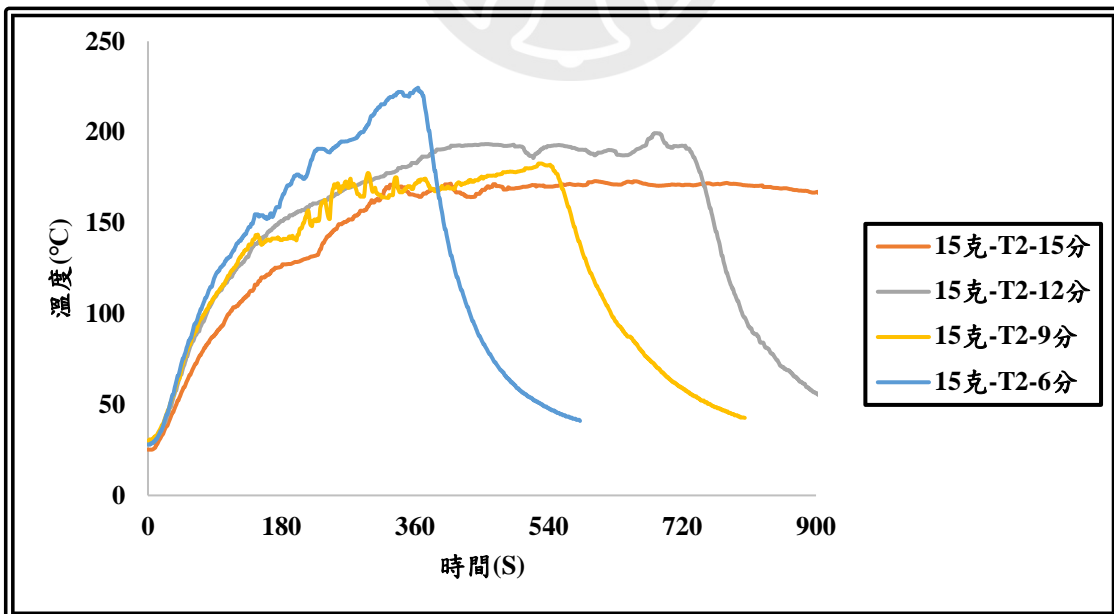


圖 4-15 自製烘豆機 T2 區域不同時間溫度分佈

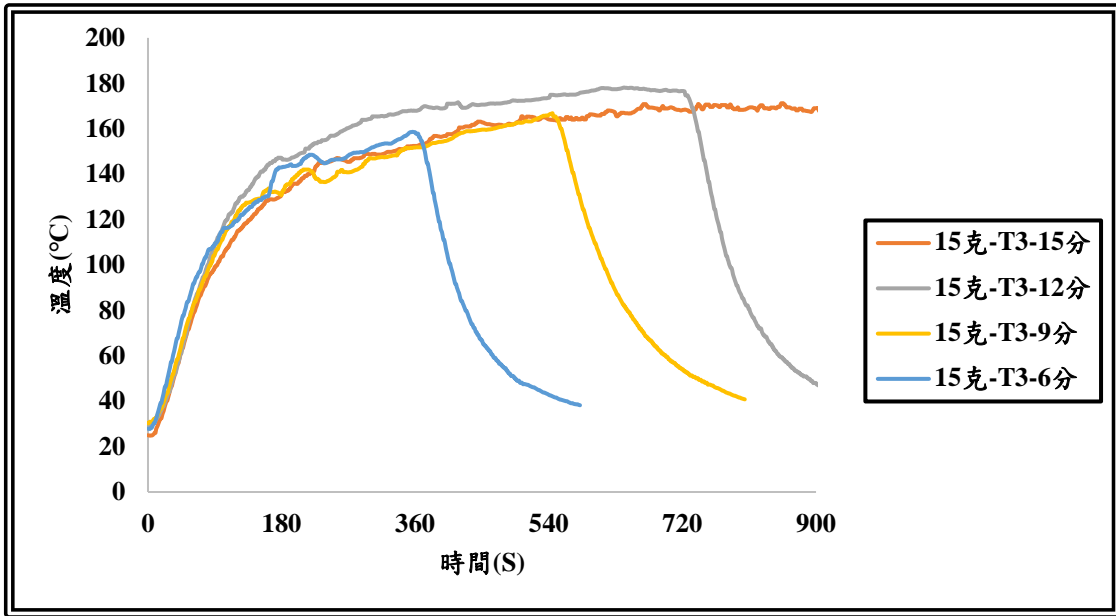


圖 4-16 自製烘豆機 T3 區域不同時間溫度分佈

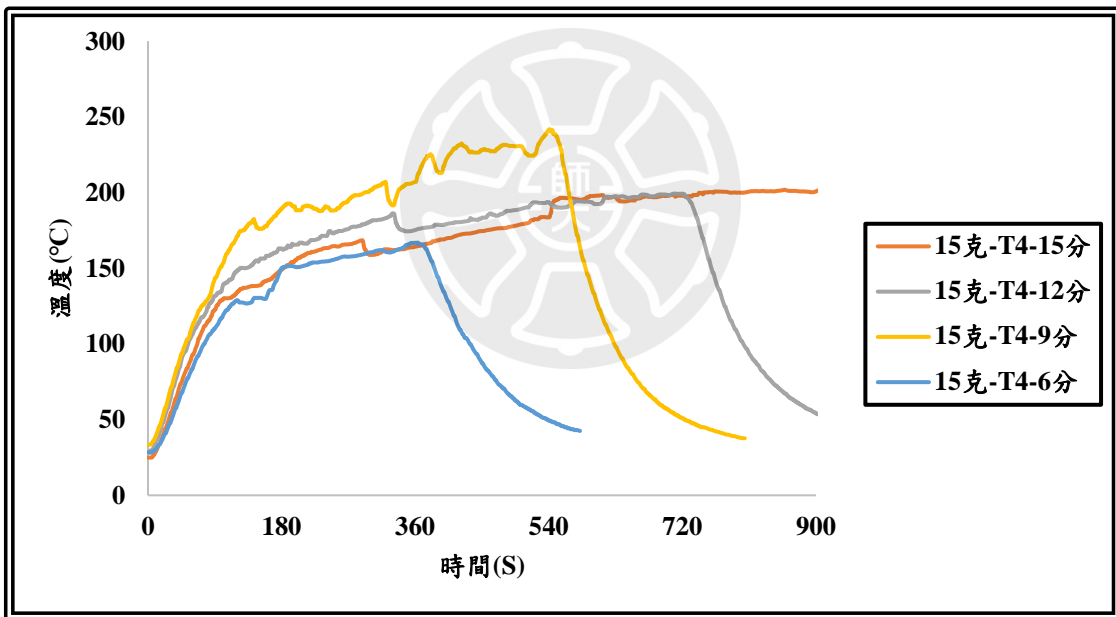


圖 4-17 自製烘豆機 T4 區域時間溫度分佈

#### 4.2.2 自製機與市售烘豆機烘焙度結果與討論

以下為重量 15 克、烘焙時間 6、9、12、15 分鐘，自製烘豆機是依序：左上為 T1、右上為 T2、左下為 T3、右下為 T4，將咖啡豆分開，分別研磨成粉，如圖 4-20 所示。市售烘豆機則是依序：左上為 6 分、右上為 9 分、左下為 12 分、右下為 15 分，如圖 4-21 所示。從烘焙時間 9 分鐘後開始，可以看出自製烘豆機有淺焙、中焙、深培的結果。

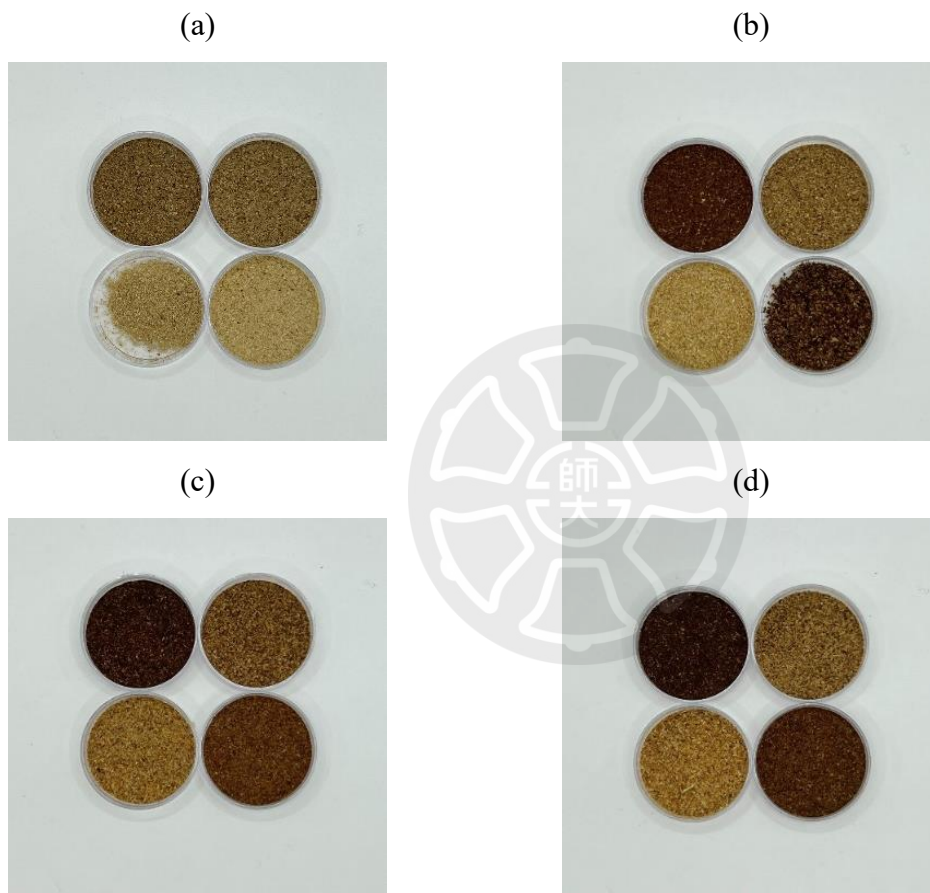


圖 4-18 自製烘豆機研磨後實體圖：(a) 6 分、(b) 9 分、(c) 12 分、(d) 15 分

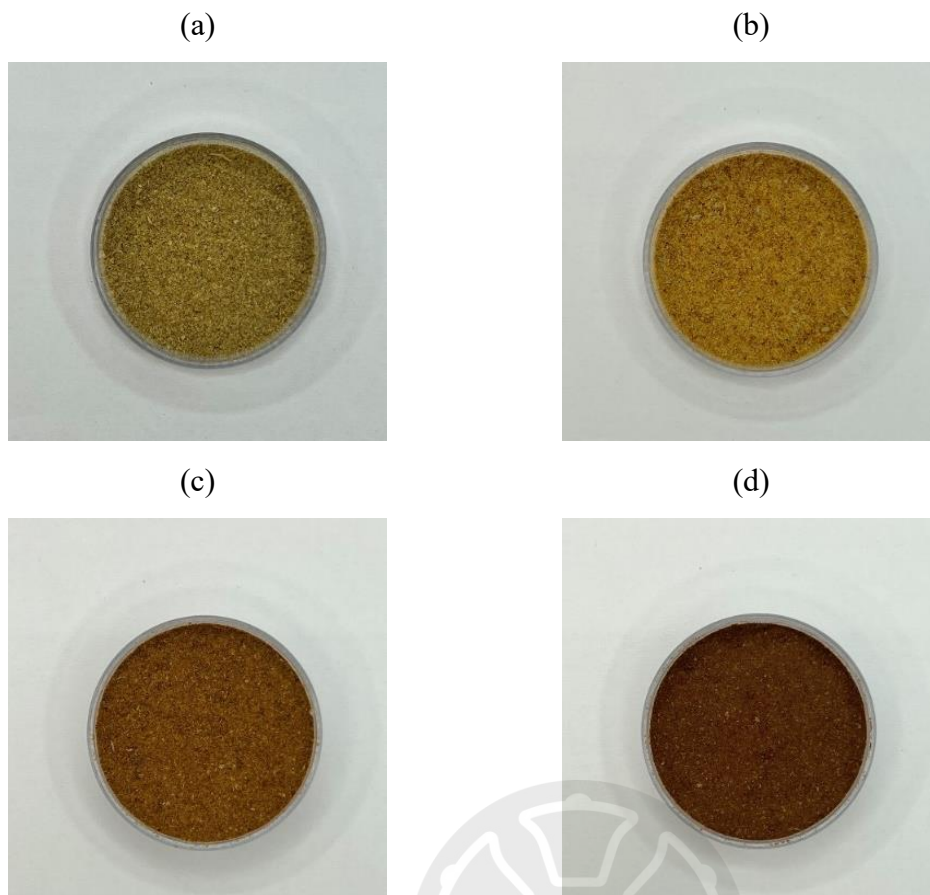


圖 4-19 市售烘豆機研磨後實體圖：(a) 6 分、(b) 9 分、(c) 12 分、(d) 15 分

以下為比較自製與市售烘豆機的失重率數據圖，如圖 4-22 所示，在烘焙時間 15 分鐘，T1、T4 失重率 16%，比市售高，其烘焙效果達到近中深焙；在烘焙時間 9-12 分鐘的淺中焙、中焙程度裡，T1、T2 失重率 16%、11%，相近市售為 13%；在 6 分鐘的淺焙程度裡，T2、T3 失重率與市售約 7%相近。T1、T4 在 15 分鐘有和市售相近的失重率，由圖 4-20-(d)與 4-21-(d)中，可看出色澤度非常相近。

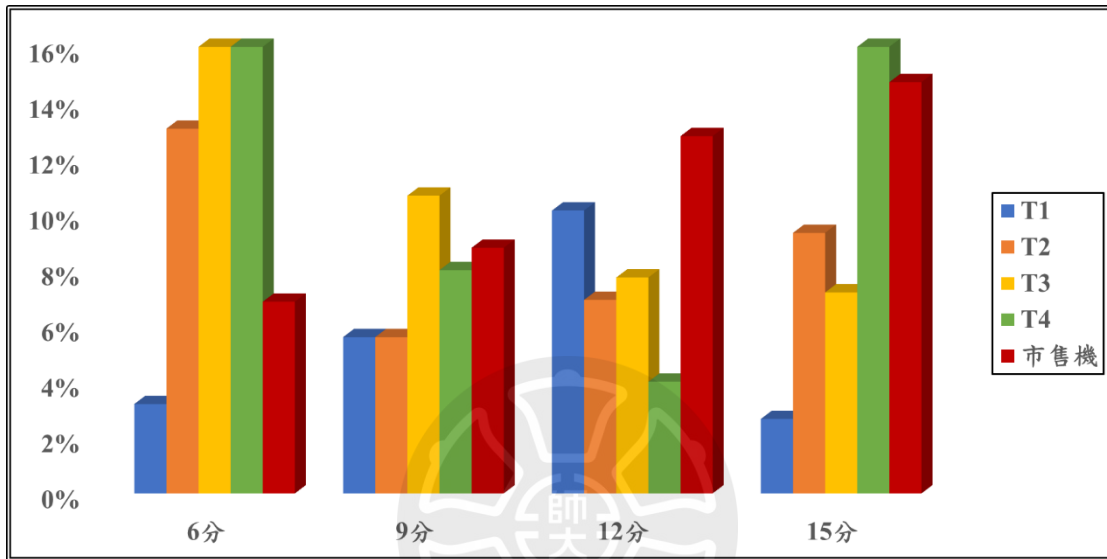


圖 4-20 自製與市售烘豆機失重率比較圖

以下為自製機與市售烘豆機 6、9、12、15 分鐘光譜圖比較，如圖 4-21~4-24 所示：

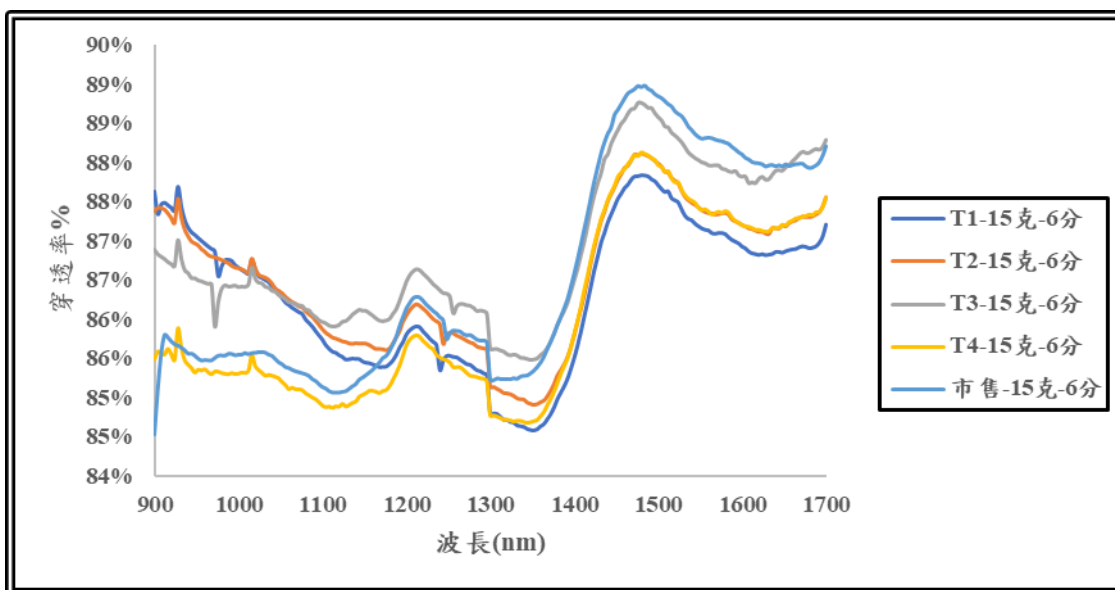


圖 4-21 自製與市售烘豆機 6 分鐘烘焙度的穿透光譜

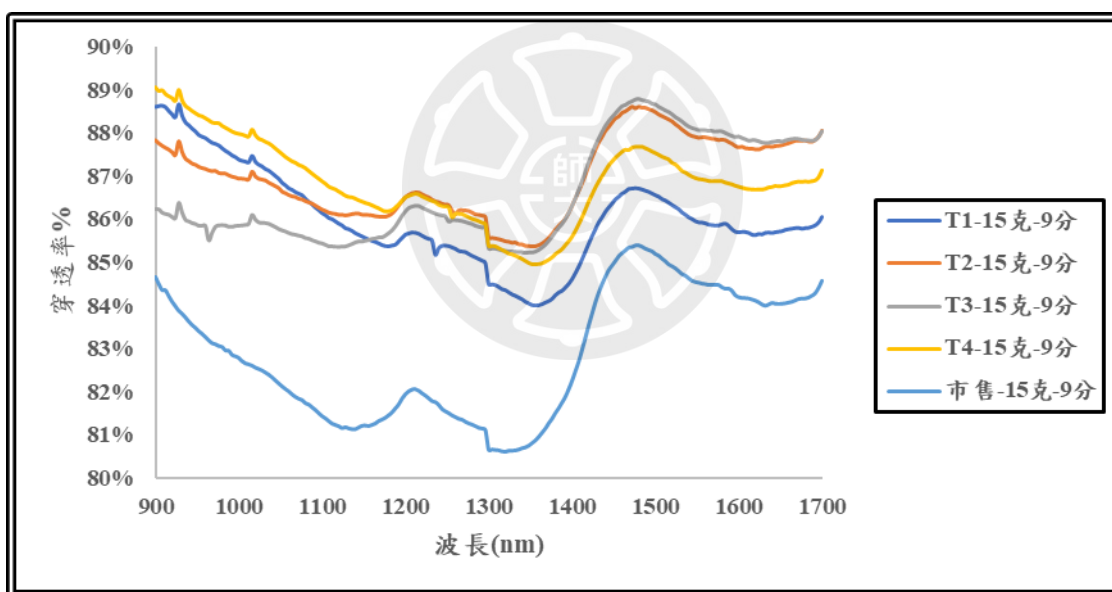


圖 4-22 自製與市售烘豆機 9 分鐘烘焙度的穿透光譜

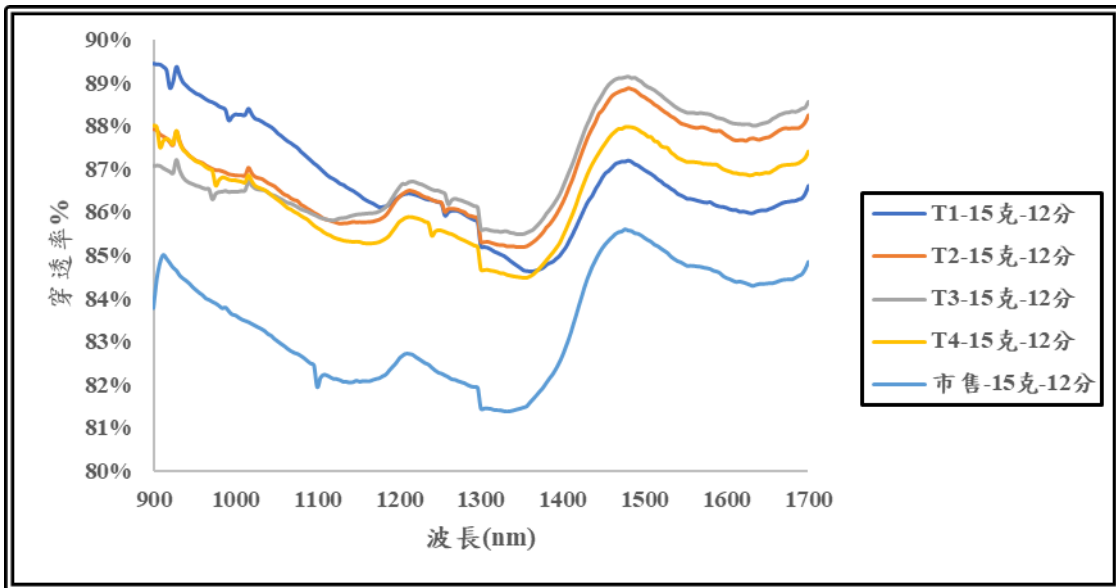


圖 4-23 自製與市售烘豆機 12 分鐘烘焙度的穿透光譜

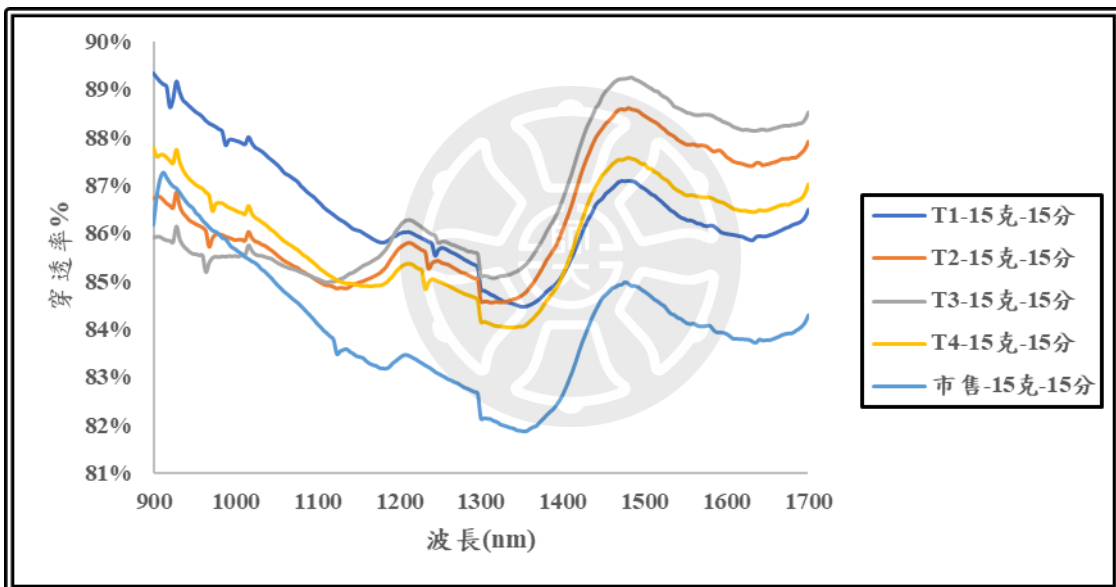


圖 4-24 自製與市售烘豆機 15 分鐘烘焙度的穿透光譜

以下為自製機 T1~T4 區域，4 種區域分別與市售機做比較，不同時間與市售烘豆機的光譜，如圖 4-25~4-28 所示：

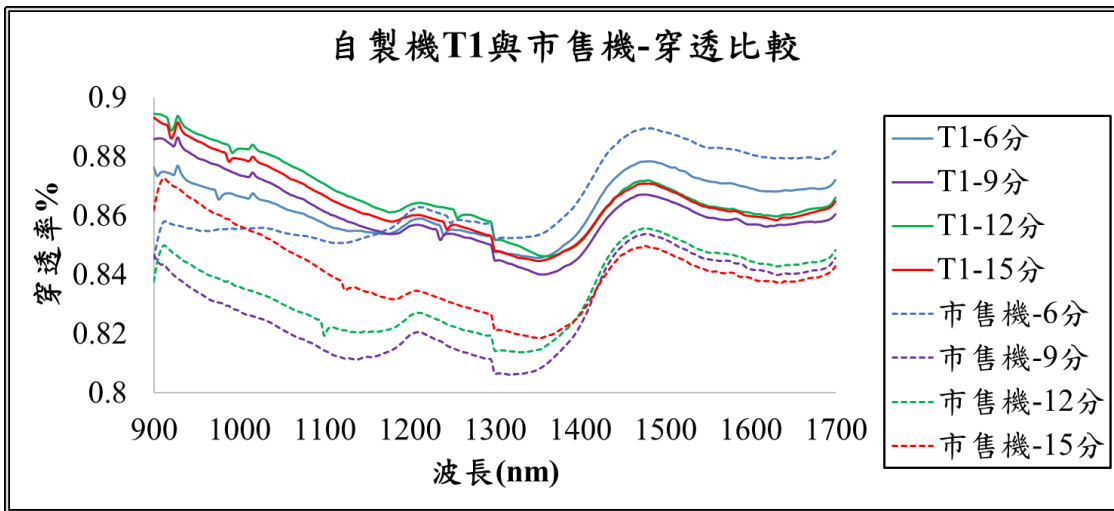


圖 4-25 自製烘豆機 T1 與市售機烘焙度穿透光譜比較

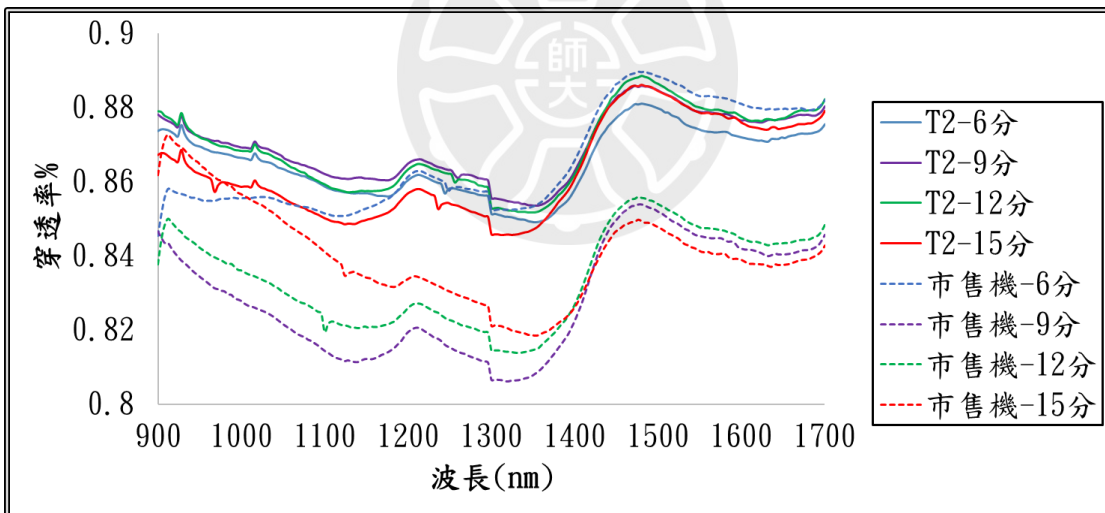


圖 4-26 自製烘豆機 T2 與市售機烘焙度穿透光譜比較

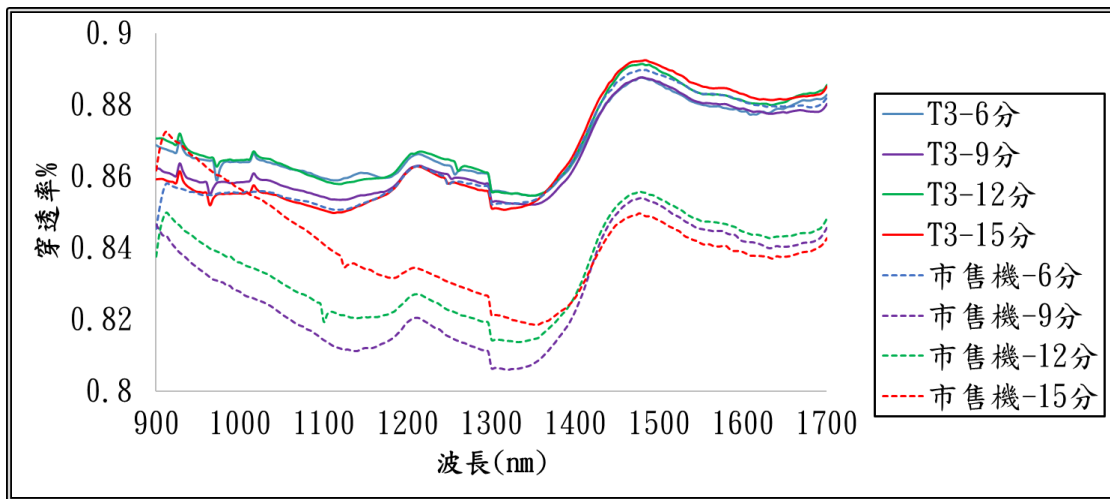


圖 4-27 自製烘豆機 T3 與市售機烘焙度穿透光譜比較

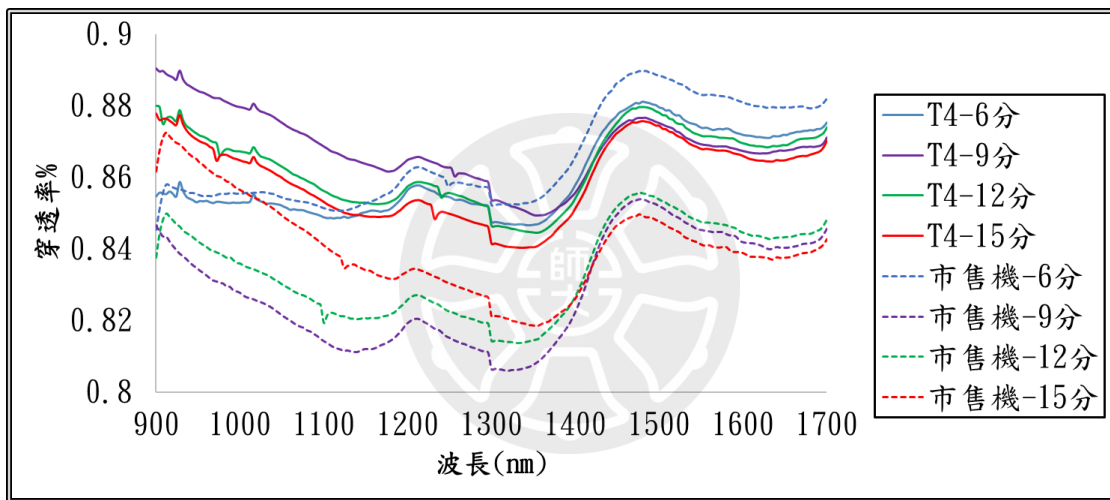


圖 4-28 自製烘豆機 T4 與市售機烘焙度穿透光譜比較

## 第五章、結論

本論文開發的紅外線穿透材料，經過高週波加熱實驗驗證，可高過加熱源溫度的優異表現，乃因兼具蓄熱與高放射特性，能夠有效吸收紅外先發射管的熱輻射能量進行加熱。接著，在光譜穿透模組驗證中，紅外線穿透材料的 200 度、1000 度光譜數據顯示出，中遠波長的能量穿透率分別達 90%、80% 以上，驗證此材料在中遠波段有較強的穿透率；紅外線發射管所發出的紅外線熱源經過材料後，其中，較多的中遠波長能量穿透此材料，咖啡豆內的水份吸收此波段的能量，產生梅納反應，達到烘焙的效果。

自製機與市售烘焙機進行烘焙結果的比較，經過色度、失重率與 NIR 進紅外光譜儀量測的比較後，其烘焙程度結果闡明，能區分出淺焙、中焙、深焙的結果。但也顯現出自製烘豆機，受熱溫度不均的情況，因此自製烘豆機目前架構中，紅外線發射管與紅外線穿透材料與熱對流架構還需精進與改良。

自製烘豆機整體架構，包含電熱管兼具低功耗、低成本特點，因其小體積的特性，能夠方便直接對烘豆機電熱裝置中熱電元件做更換，以及紅外線穿透材料、熱風，達到多元化加熱模組化的效果。紅外線發射管因其穿透特性，不需熱傳介質，有著良好的熱效應，並且其本身有著極高的熱電轉換效率，可以省掉大量的功耗，是值得選用的熱電元件。

綜合以上實驗結果闡明，自製開發的紅外線發射管熱源與熱風，搭配紅外線穿透材料，因兼具蓄熱與高放射特性，能夠有效吸收紅外先發射管的熱輻射能量進行加熱，可以有效的使用熱源的中遠波段能量對咖啡豆水份加熱，達到咖啡烘焙的淺焙、中焙、深焙的結果。

## 參考文獻

- [1] Dulloo AG, Geissler CA, Horton T, Collins A and Miller DS. (1989). Normal caffeine consumption: influence on thermogenesis and daily energy expenditure in lean and postobese human volunteers. *Am J Clin Nutr* 49:44–50.
- [2] Mubarak A, Bondonno CP, Liu AH, Considine MJ, Rich L, Mas E et al,. (2012). Acute effects of chlorogenic acid on nitric oxide status, endothelial function, and blood pressure in healthy volunteers: a randomized trial. *J Agric Food Chem* 60:9130–9136.
- [3] ICO, International Coffee Organization. (2016).<http://www.ico.org/>.
- [4] Xiuju Wang and Loong-Tak Lim. (2014). A Kinetics and Modeling Study of Coffee Roasting Under Isothermal Conditions. *Food and Bioprocess Technology* volume 7, pages621–632.
- [5] Fabiana de CarvalhoPires, et al,. (2021). Near-infrared spectroscopy and multivariate calibration as an alternative to the Agron to predict roasting degrees in coffee beans and ground coffees. *Food Chemistry Volume* 365.
- [6] Gardner, L. (2005), The use of stainless steel in structures. *Prog. Struct. Engng Mater.*, 7: 45-55.
- [7] Guarneri, F., Costa, C., Cannavò, S.P., Catania, S., Bua, G.D., Fenga, C. and Dugo, G. (2017), Release of nickel and chromium in common foods during cooking in 18/10 (grade 316) stainless steel pots. *Contact Dermatitis*, 76: 40-48.

- [8] Roshni, S., Sebastian, M. & Surendran, K. (2017). Can zinc aluminate-titania composite be an alternative for alumina as microelectronic substrate?. *Sci Rep* 7, 40839.
- [9] Yui Lun Wu, Jungmi Hong, David Peterson, Jeffrey Zhou, Tae S. Cho, D.N. Ruzic. (2013). Deposition of aluminum oxide by evaporative coating at atmospheric pressure (ECAP), *Surface and Coatings Technology*. Volume 237, Pages 369-378, ISSN 0257-8972.
- [10] Subhash Kumar Batra, Behnam Pourdeyhimi. Introduction to Nonwovens Technology *Engineering with fibers*. 2012.
- [11] 刘扬,潘登,陈文,王文强,沈昊,徐红星. 纳米光学辐射传热: 从热辐射增强理论到辐射制冷应用. *物理学报 Acta Phys. Sin.* Vol.69, No. 3 (2020) 036501.
- [12] G.P. Ellis. 1959. The Maillard Reaction. *Advances in Carbohydrate Chemistry*, Volume 14, Pages 63-134.
- [13] Chindapan et al., 2019 N. Chindapan, S. Soydok, S. Devahastin Roasting kinetics and chemical composition changes of robusta coffee beans during hot air and superheated steam roasting. *Journal of Food Science*, 84 (2) (2019), pp. 292-30.
- [14] Jiawei Fu et al., Torrefaction, temperature, and heating rate dependencies of pyrolysis of coffee grounds: Its performances, bio-oils, and emissions, *Bioresource Technology*, Volume 345, February 2022, 126346.