

蓄熱式連續加熱爐對工件之影響研究分析

徐愷呈¹ 方泰翔² 許聖彥^{3*} 唐紹文¹ 陳建成¹

摘要

本研究探討連續爐之熱流場，分析不同操作條件下對爐溫、熱流場分布及NO_x排放的影響，並探討工件隨著板車從爐內低溫處送至高溫處的過程中，在爐內不同區段的溫度變化。研究結果顯示爐內無工件的部分，爐內溫度要達成至少要有300公分持溫段(1,050°C)的需求是一大挑戰。在工件的加熱模擬中，發現在預熱、加熱段工件受屏蔽影響其溫度分布落差大，但加熱完的工件則不受屏蔽的影響，所有工件溫度差距10°C內，但要符合工件表面完全持溫(1,040°C)的需求仍有努力空間。

關鍵詞：工業連續爐，數值模擬，蓄熱式燃燒

1. 前言

自從十八世紀末開啟工業革命後，帶來更快速、便捷的生活，卻大量使用石化燃料與產生許多污染源，導致能源耗盡與溫室效應等問題出現，對於人類生活重大威脅，故節約能源提升能源效率同時減少污染源排放，是現代社會所需面對的課題。

工業為滿足人類生活的基礎產業從建築、鋼鐵、高科技乃至製造產業皆可以看到工業的影子，據我國經濟部能源局(以下簡稱能源局)統計，工業是臺灣地區最耗能的產業之一，每年約占全國總能源用量的37%，且熱工設備(工業爐體、蒸汽及發電鍋爐)是主要消耗工業燃料項目來源之一，做為最耗能的來源，工業爐已經成為多項研究的重點(Hasanuzzaman *et al.*, 2012)。

傳統的工業爐需消耗大量天然氣與空氣進行燃燒，製程結束後廢氣也沒有被妥善利用

排至大氣，造成環境汙染與燃料的浪費。故Tanaka and Hasegawa利用法國人馬丁(P. Martin)所提出的蓄熱式爐原理加以改良，提出蓄熱式燃燒技術(High temperature air combustion system, HiTAC)，該系統的特點是大量運用高溫廢氣轉化為預熱空氣進行2次燃燒，有節省約30%的燃料、火焰穩定性增強和NO_x排放量減半的成果，故近年來我國經濟部能源局極力推展此技術至相關產業(Tanaka and Hasegawa, 1997；Sugiyama *et al.*, 2005；Weber *et al.*, 2005)。

圖1為蓄熱式燃燒技術的示意圖，蓄熱式燃燒技術的燃燒系統主要包括燃燒室、燒嘴座、陶瓷蜂窩體或蓄熱球做成的蓄熱體、空氣和煙氣的切換裝置(即換向閥)及控制系統(劉偉娜, 2008)。其原理是利用陶瓷材料作為蓄熱艙進行熱交換的介質，將燃燒後的高溫煙氣熱能回收並用來預熱燃燒所需的空氣；藉由陶瓷材料的高蓄熱能力特性，可將燃燒空氣預熱至

¹財團法人金屬工業研究發展中心 工程師

²國立中山大學機械與機械工程學系 碩士

³國立中山大學機械與機械工程學系 副教授

*通訊作者電話: 07-5252-000#4286, E-mail: syhsu@mail.nsysu.edu.tw

收到日期: 2019年11月15日

修正日期: 2020年07月02日

接受日期: 2020年07月30日

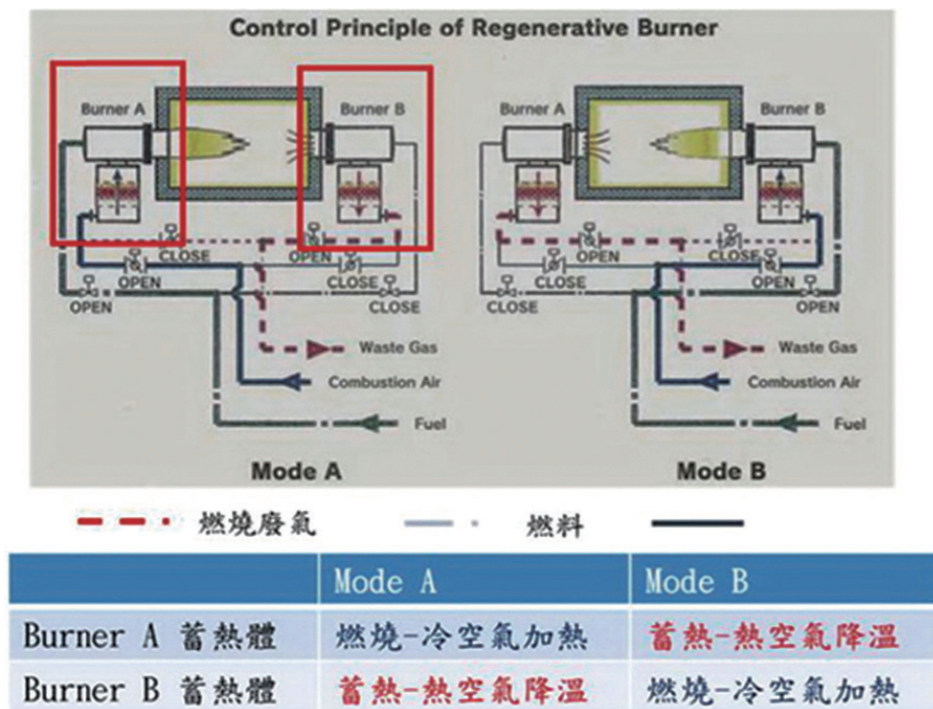


圖1 蓄熱式燃燒系統操作示意圖(Nippon Steel Engineering, 2016)

800°C以上，因此使得火焰的穩定區域擴大，有助於火焰穩定性提升。此外，蓄熱燃燒技術是採用交替式的燃燒方式，此交替式的燃燒方式，不但可促進加熱爐內熱流場的均勻化，更可大幅提高加熱爐內的平均熱通量，而獲致高效率的熱傳目的(羅國民，2011；Tsuji *et al.*, 2002)。

目前蓄熱式燃燒系統已普遍運用於各式金屬加熱爐、熱處理爐、固溶化爐、鍋爐、焚化爐等需要高溫環境且須做有效廢熱回收的場合，目前臺灣地區導入蓄熱式燃燒的爐體，其節能率約可達30% (焦鴻文等，2010)。影響蓄熱式燃燒效率的因素非常多，包括預熱空氣溫度、燃燒器切換時間、蓄熱體設計等(張先珍與戴德彥，2005；郭亮吾等，2010)，本研究將置重點於預熱空氣溫度的探討。

工業爐在工業中扮演重要的角色，主要透過燃燒或電能轉熱能的方式，將物料或工件加熱的熱工設備。工業爐又可依操作模式區分為間斷式爐(週期式爐)與連續式爐，間斷式爐的特點是爐子間斷生產，在每一加熱週期內爐溫是變化的，如室式爐、台車式爐；連續式爐的

特點是爐子連續生產，並在爐膛內劃分溫度區段，在加熱過程中每一區段的溫度是不變的，工件由低溫的預熱區逐步進入高溫的加熱區，如連續式加熱爐和熱處理爐、步進式爐等(工業技術研究院，2005)。

本研究探討的工業爐體為連續式加熱爐，此爐體有3個特性說明如下：

- (1) 連續式加熱爐製程是工件連續穿爐運行，其爐型大多是狹長型的設計。
- (2) 連續式加熱爐可依現場需求，在爐內不同區段設定不同爐溫，並保持不變。
- (3) 連續式加熱爐在產量、能耗量、自動化性能皆比間斷式爐優越。

連續式加熱爐在舊爐製程中，燃燒系統是屬於傳統式燃燒系統，爐溫與燃料(天然氣)流量調配皆是現場作業人員經驗判定進行，導致能耗量較大。故財團法人金屬工業研究發展中心(以下簡稱金屬中心)利用現場環境設備與過往經驗設計連續式加熱爐(新爐)，並將燃燒系統設計成能源局近年極力推展的蓄熱式燃燒系統，初步估計燃料節省率可達30%，其示意圖如圖2所示。



圖2 連續式加熱爐實體示意圖(金屬中心現場爐體圖)

連續式加熱爐在舊爐製程中，是使用310不鏽鋼的鏈條運送工件進入爐內加熱，但鏈條時常有燒毀的情形，推測原因為高溫空氣快速傳至鏈條上所導致的。故金屬中心為了避免熱快速傳至爐體底部與現場製程需求，將不鏽鋼

鏈條改為具有吸熱能力佳、比熱低的陶瓷纖維板車，作為運送工件的媒介。目前設計兩種不同款式的板車，一種為板車材料全為陶瓷纖維，另一種為板車材料為陶瓷纖維與上方鋪有的不鏽鋼板的板車，如圖3所示。

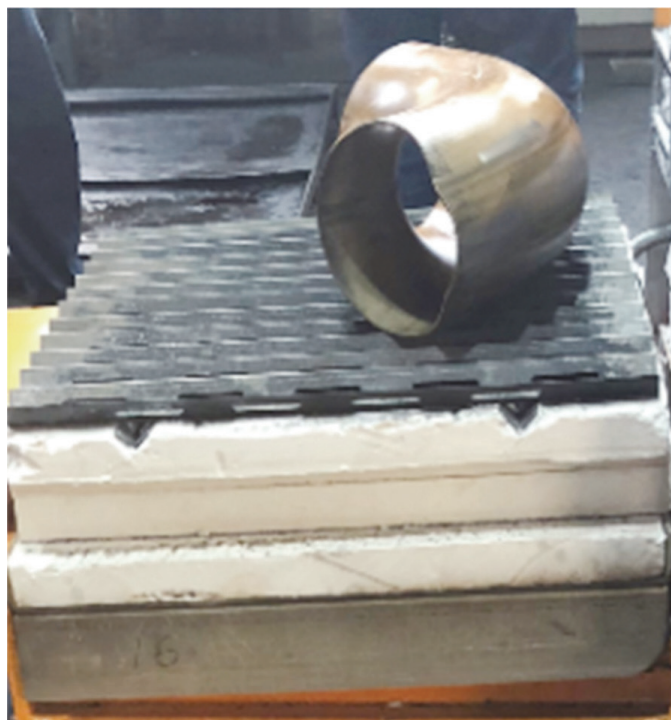


圖3 連續式加熱爐-板車示意圖(金屬中心現場爐體圖)

熱處理會影響後續製程與工件品質，並決定工件最終的機械性質(Kang and Rong, 2006)。工件熱處理的品質，取決於爐內的均溫性(Gao *et al.*, 2000)，故了解工業爐對工件的熱傳機制十分重要(Hosseini *et al.*, 2012)，如圖4所示。一般而言，高溫的燃燒火焰應避免直接接觸工件表面而造成加熱不均，而工業爐對工件加熱的均溫性，輻射熱傳機制扮演著非常重要的角色(Kim, 2007)。

爐溫與工件在製程中的溫度變化非常重要，韓小良(2001)建立了單一工件於間歇式熱處理爐內的一維加熱模型，表明爐溫提升對於工件的溫度影響很大，王俊升等(2005)成功建立連續熱處理爐的鋼坯二維傳熱模型，王妮妮等(2004)建立連續退火爐內鋼管的加熱模型，指出鋼管厚度與鋼管移動速度是影響鋼管溫度的主要因素。考慮爐體結構、工件運動速度等，建立連續爐內的傳熱模型(Kang *et al.*, 2004)。有別於以往連續爐的研究只探討爐內某區段的影響，劉義平等(2011)根據連續熱處理爐的製程，建立一套連續加熱模型，並指出不同爐溫的控制對工件的影響非常大。

熱應力主要是加熱不均造成，溫度差越大造成之熱應力也越大，若超過降伏應力(Yield stress)時，會有變形的危險，變形量過大則無法進行後續的製程。王衛華等人(2008)為了解決加熱爐方型鋼胚的斷裂現象，建立方胚的三維模型，進行溫度與熱應力場的計算，結果表明減低鋼胚的溫差可有效降低熱應力值。

過去已有研究利用計算流體力學(CFD, Computational Fluid Dynamics)對連續工業爐的製程進行模擬分析(Wong *et al.*, 2007；Oba *et al.*, 2014)，並與製程現場量測數據比較(Han and Chang, 2012；Rad *et al.*, 2017)。然而，對於結合蓄熱式燃燒的工業連續爐製程，目前研究分析仍然有限。

蓄熱式燃燒系統的應用可有效地節能減碳，然而目前臺灣工業的應用仍不普及，其主要原因在於對製程操作與工件加熱特性的不瞭解。故本研究將以套裝軟體ANASYS/FLUENT為工具，針對應用蓄熱式燃燒系統的工業連續爐製程，進行模擬分析，進一步了解爐內的均溫性及工件加熱過程的熱應力變化，提供蓄熱式燃燒連續工業爐的爐體設計與製程操作之參

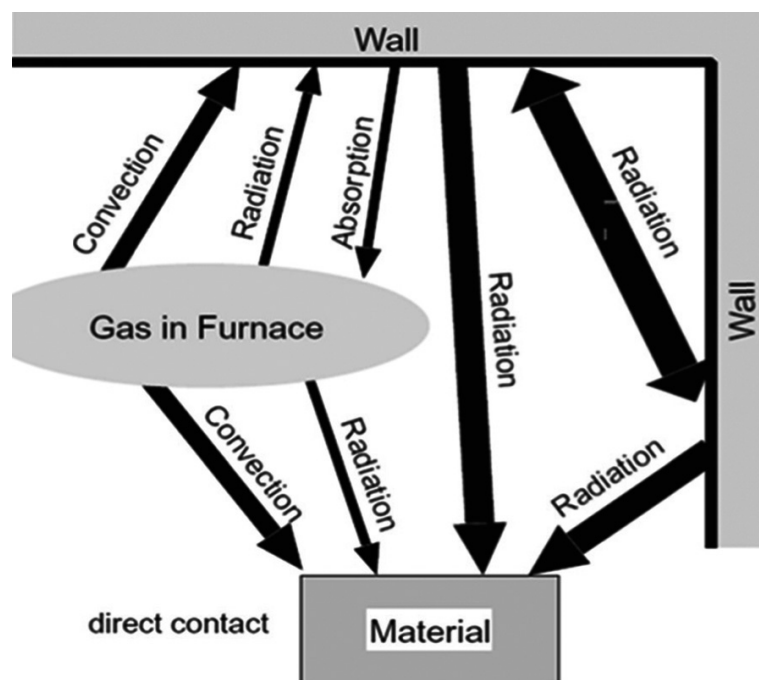


圖4 工業爐內熱傳機制示意圖(Hosseini *et al.*, 2012)

考，藉以推廣蓄熱式燃燒系統於工業燃燒爐的應用，達到節能減碳之目的。

2. 研究方法

在研究中，將使用計算流體力學套裝軟體 ANSYS/FLUENT 建立工業連續爐模型，分析爐內熱流場分布及 NO_x 濃度評估，並探討工件隨著板車從爐子低溫處運至高溫處的過程中，在不同區段時的升溫及熱應力變化，作為連續工業燃燒爐之設計及操作參考。

2.1 模型介紹

蓄熱式燃燒系統包含燃燒室、燒嘴座、蓄熱體、換向閥等，由於蓄熱體與換向閥等結構是較為複雜的，故本研究僅探討從蓄熱體流出來的高溫廢氣與燃料(天然氣)混合的預熱空氣進行探討，而真實製程中從燒嘴座噴出的高溫廢氣會存入蓄熱體中，此過程亦是較複雜的，故本研究僅探討從燒嘴座出來的高溫氣體與氮氧化物濃度，在模型設置上僅考慮燃燒室與燒嘴座。

本研究根據圖2的現場示意圖與金屬中心所提供的爐體數據，建置三維連續爐(無工件)

模型，其示意圖如圖5所示，此模型之尺寸大約長6,800毫米、寬850毫米、高814毫米；為了不讓燒嘴座噴出的火焰直接碰到工件與達成爐內不同區段爐溫的目的，在此將燒嘴座設計成傾斜30度的角度並設置在爐體上方，共有6根，其尺寸為圓截面積約9,160平方毫米、長435毫米，其中藍色處的燒嘴座為從蓄熱體排出的高溫廢氣與燃料(天然氣)混合的預熱空氣噴入口，紅色處的燒嘴座為高溫廢氣噴出口。

本研究根據過往文獻與現場製程需求規劃出爐體結構圖，如圖6所示，主要平均分為預熱段、升溫段、持溫段三大區塊，其中預熱段的爐溫要求為840°C、升溫段的爐溫要求為920°C、持溫段的爐溫要求為1,050°C，本研究將以此結構做為基礎並進行探討。

在模擬中要達成真實工件在爐體中移動的行為是較難達成的，且根據現場的過往經驗與文獻認為影響工件的主要因素為高溫爐壁對工件的輻射加熱，故本研究將連續爐(有工件)簡化模型，並置重點於高溫爐壁對工件的影響進行探討，其示意圖如圖7所示。

此模型主要包含長方體(爐壁)、工件、板車3部分，其中工件尺寸為外徑101.6毫米、長400毫米、厚度3毫米的304不鏽鋼管；板車依

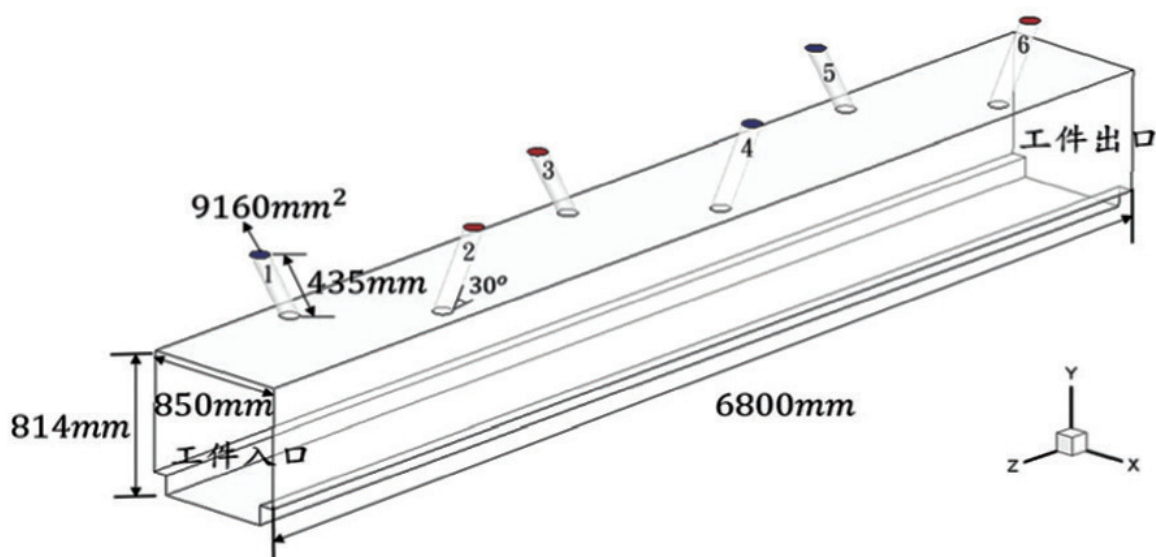


圖5 連續式加熱爐(無工件)示意圖(本研究繪製)

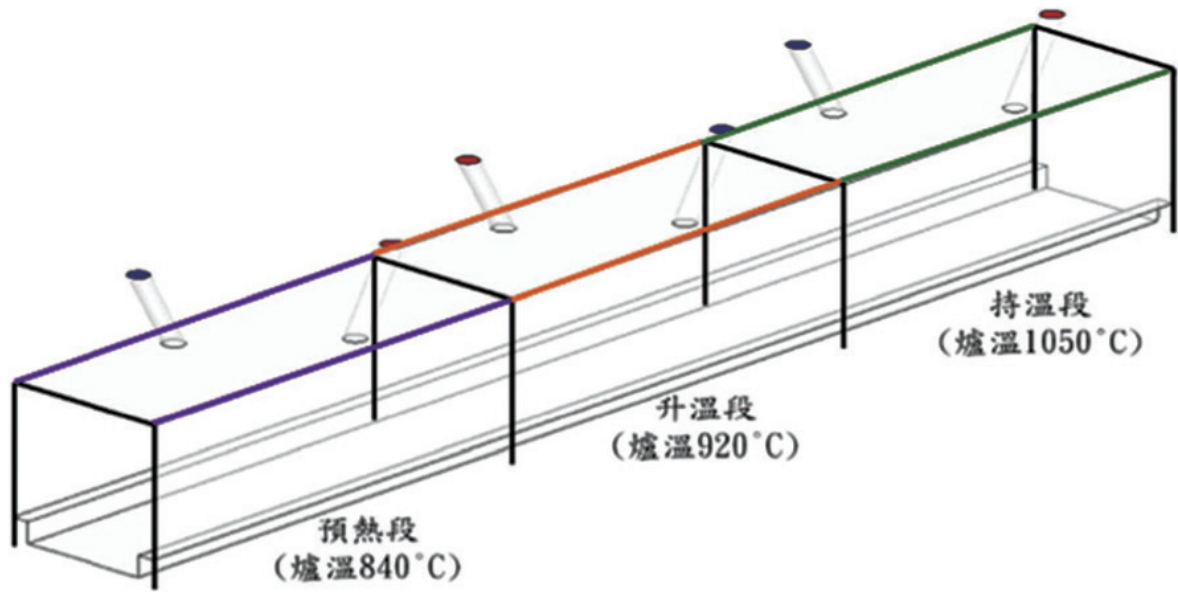


圖6 連續式加熱爐結構示意圖(本研究繪製)

現場需求分為總厚度約為長500毫米、寬400毫米、高175毫米的棉板板車，與板車上方有鋪厚度約10毫米的310不鏽鋼鋼板，下方約有165毫米厚的板車；長方體被視為連續爐在不同區段的範圍，其尺寸為長700毫米、寬600毫米、高600毫米；真實爐子的運作方式為混合空氣會從爐子正上方噴向工件進行加熱，故模擬中長方體上方的面設定為高溫空氣噴入口，而工件與板車部分設置為加熱表面。

2.2 理論模型

在使用數值模擬的方式對爐內工件的流場進行分析之前，必須先建立起相關的統御方程式，其統御方程式包括連續、動量、能量、組分守恆方程式、紊流模型方程式、氮氧化物反應式、熱輻射方程式、工件加熱方程式，說明如下。

2.2.1 統御方程式

研究中採用之分方程式主要是分析流場中的質傳及熱傳的統御方程式，也就是Navier-Stokes方程式，包含連續(Continuity)、動量(Momentum)、能量(Energy)及組分(Species)等四個方程式。

連續方程式(Continuity equation):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

動量方程式(Momentum equation):

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \vec{B}_f \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

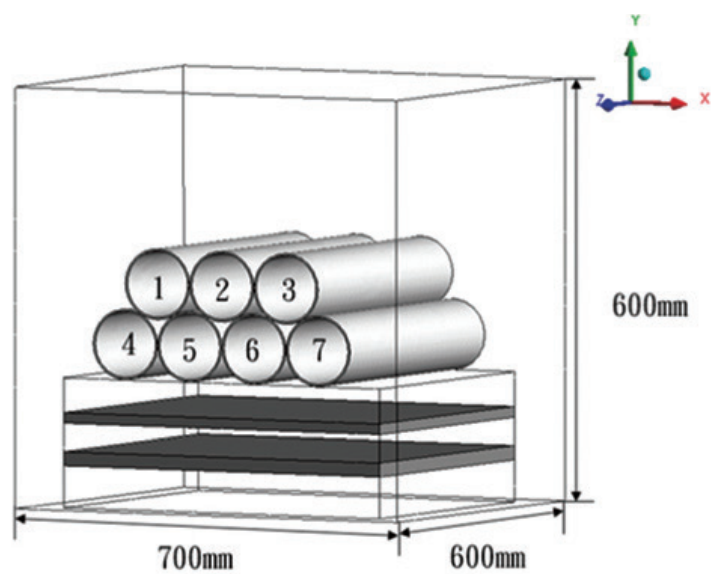
ρ 為理想氣體密度(kg/m^3)， P 為流場壓力， \vec{V} 為速度向量， \vec{B}_f 為浮力(N/m^2)， μ_{eff} 為紊流渦流黏度， μ_t 為紊流黏度， C_μ 為紊流常數， k 為紊流動能， ε 為紊流動能擴散率。

能量方程式(Energy equation):

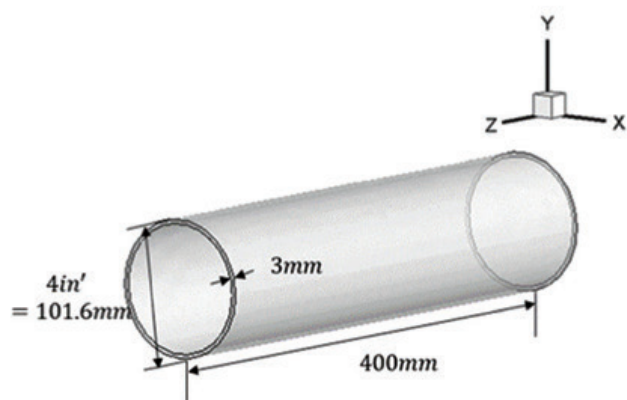
$$\nabla \cdot \left(k_{eff} \Delta T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{V}) \right) + Q_v = \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E) + \rho) = \quad (5)$$

$\vec{\tau}_{eff}$ 為有效紊流熱傳係數， \vec{J}_i 為各種之擴散量， $\vec{\tau}_{eff}$ 為微流體有效紊流剪應力， h_i 為各物種熱焓值， Q_v 為化學反應熱和其他體積熱源。

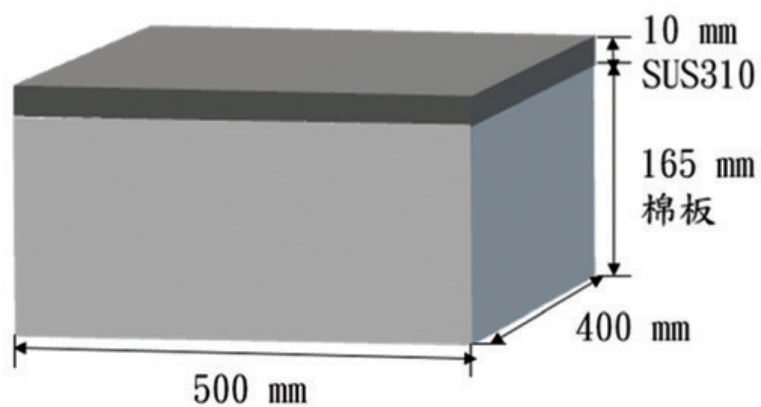
組份方程式(Species equation):



(a)



(b)



(c)

圖7 連續式加熱爐(有工件)簡化模型(a)加熱模型(b)工件尺寸(c)板車尺寸(本研究繪製)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \bar{Y}_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i \quad (6)$$

Y_i 為各物種之質量分率， R_i 為各物種化學反應之產物淨量。

2.2.2 紊流模型

自Launder和Spalding提出後，就變成計算流體力學中計算紊流的主要工具，主要的優點在於適用範圍廣、經濟效益大、且具有一定合理的精度，其中方程式中的係數值如表1所示。其相關的方程式如下：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &+ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

其中 G_k 為平均速度梯度所產生的湍流動能； G_b 為浮力所產生的紊流動能； Y_M 為可壓縮中紊流的擴張耗散率； σ_k 和 σ_ε 則為方程式中的紊流普朗特(Prandtl)數； S_k 和 S_ε 是用戶定義的源項； μ_t 為渦流黏度。

表1 k - ε 紊流方程式參數值(本研究整理)

參數名稱	參數值
渦流黏度關係式常數(C_μ)	0.09
k 方程式紊流普朗特數(σ_k)	1.00
ε 方程式紊流普朗特數(σ_ε)	1.30
方程式常數($C_{1\varepsilon}$)	1.44
方程式常數($C_{2\varepsilon}$)	1.92
方程式常數($C_{3\varepsilon}$)	0.8

2.2.3 熱輻射方程式

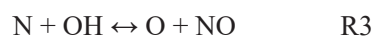
本研究選擇其中DO輻射模組，主要涵蓋整個熱輻射功能最廣的範圍，其適用於較複雜之模型、任何光學厚度、散射率與放射率、可調整半透明或不透明的處理、灰體或非灰體、參入熱輻射條件等多項條件，因此成為輻射計算中被經常使用的一個模型。

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (10)$$

其中 I 為輻射強度，取決於位置(\vec{r})與方向(\vec{s})； \vec{r} 為位置向量； \vec{s} 為方向向量； \vec{s}' 為散射方向向量； a 為吸收係數； n 為折射率； σ 為斯蒂芬-波茲曼常數($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)； σ_s 為散射係數； T 為地方溫度； Φ 為相位函數； Ω' 為立體角。

2.2.4 氮氧化物反應式

在氮氧化物生成中，Thermal NO_x為最主要生成來源，所以在模擬中主要會是用該模型進行模擬，而氮氧化物主要為NO，其化學反應方程式如下：



$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] * \frac{\left(1 - \frac{k_{r,1}k_{r,2}[\text{NO}]^2}{k_{f,1}[\text{N}_2]k_{f,2}[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{r,1}[\text{NO}]}{k_{f,2}[\text{O}_2] + k_{f,3}[\text{OH}]}\right)} \quad (11)$$

其中[NO]為NO濃度；[O]為O濃度；[N₂]為N₂濃度；[O₂]為O₂濃度；[OH]為OH濃度； $k_{f,1} \sim k_{f,3}$ 以及 $k_{r,1} \sim k_{r,3}$ 分別為化學反應式的正逆反應速率常數。

2.2.5 工件熱傳方程式

以ANASYS/FLUENT計算的熱流場，會以輻射和傳導(對流)方式加熱工件。模擬中工件

受到爐內熱流場的加熱量，即為固體加熱的邊界條件，其內部的變化是使用熱傳導方程式來計算，方程式如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

k 為導熱係數(W/m K)； ρ 為密度(kg/m³)； c_p 為比熱(kJ/kg K)，這些係數為工件材料的性質，影響工件內部的升溫速度及溫差變化。

2.2.6 應力應變關係式

獲得工件內部的溫度變化後，本研究利用套裝軟體ANSYS/MECHANICAL來分析工件所受之熱應力。楊氏係數(Young's modulus)、蒲松比(Poisson's ratio)以及膨脹係數皆會影響熱應力變化，需給定工件材料的性質參數。

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon = E \frac{\Delta L}{L}$$

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| \quad (13)$$

其中 σ 為應力(Pa)； F 為受力大小(N)； A 為受力面積(m²)； E 為楊氏係數(Pa)； ε 為應變； ν 為蒲松比； ε_x 為軸向應變量； ε_y 為橫向應變量。最後，吾人將使用Equivalent stress來分析等效應力，藉此找出等效熱應力來與工件材料的降伏強度進行比較

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (14)$$

其中 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ ：三個方向的熱應力； σ_e ：等效熱應力。

2.3 邊界條件設定

在連續爐無工件模擬的部分，過程中假設從初始狀態進行加熱，其燃燒器輸入參數如表2所示。

加熱工件模擬部分，工件與板車的初始值

表2 連續爐(無工件)輸入之參數(本研究整理)

操作條件	參數值
預熱空氣溫度(°C) 1號管/4號管/5號管	730/780/825
冷空氣溫度/燃料 (天然氣)溫度(°C)	27/27
空燃比	11
1號管燃料流量(Nm ³ /hr)	64.1
4號管燃料流量(Nm ³ /hr)	69.06
5號管燃料流量(Nm ³ /hr)	146.09

皆為27°C，工件與板車的材料性質如表3所示。

在現場製程中連續爐在不同區段會有不同的爐溫，故本研究根據舊有輸送帶數據換算工件在爐內不同區段所需的時間，並將所得數據進行模擬，輸入參數如表4所示。

表3 工件與板車材料性質(本研究整理)

	304不銹鋼 (工件)	棉版 (板車)	310不銹鋼 (板車)
密度 (kg/m ³)	7850	250	7750
熱傳導係數 (W/mK)	16	0.15	14.2
比熱容 (J/kgK)	480	800	500

表4 爐內有工件操作參數(本研究整理)

操作條件	參數值
預熱段爐溫(°C)	840
升溫段爐溫(°C)	920
持溫段爐溫(°C)	1050
工件總加熱時間(min)	21
預熱段停留時間(min)	7
升溫段停留時間(min)	7
持溫段停留時間(min)	14

3. 結果與討論

3.1 連續爐(無工件)的溫度與氮氧化物濃度模擬結果

研究中使用表2之參數設定，模擬連續爐內部溫度分布與氮氧化物濃度分布。圖8為連續

爐在不同平面處的溫度分布，可發現受燒嘴傾斜30度的影響，導致最高溫處並未在燒嘴正下方，而是出現在偏移30度的位置，溫度依據流場變化逐漸往旁邊擴散；也可發現爐內溫度低溫與高溫分布分明，推估傾斜的角度與燃料流量對於爐內溫度分布有著很大的影響。

圖9為連續爐不同平面處氮氧化物濃度分

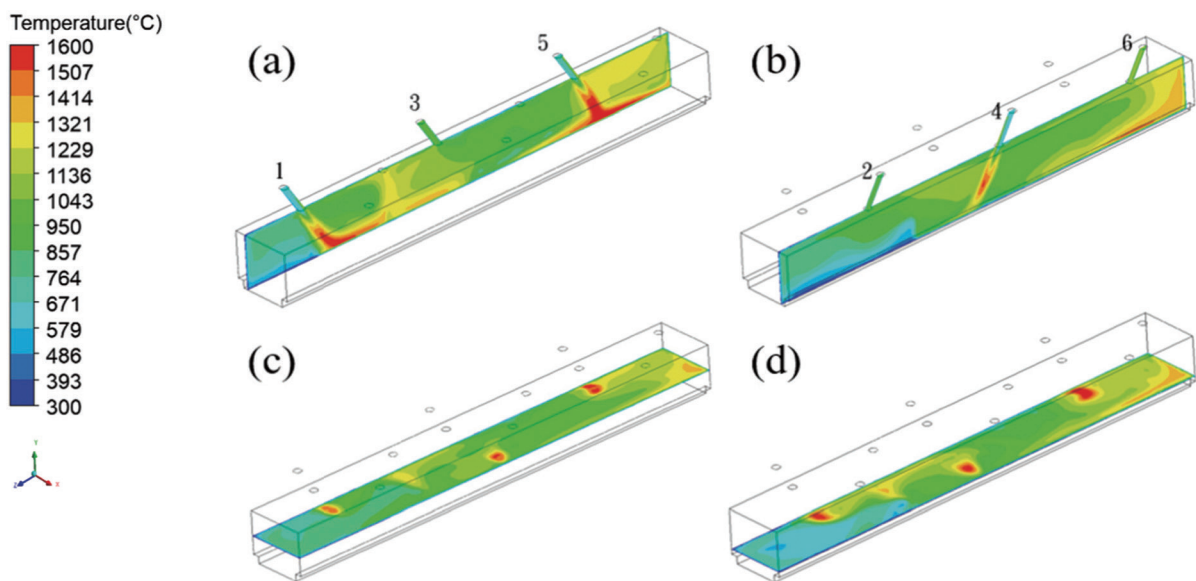


圖8 連續式加熱爐(無工件)在不同平面處的溫度分布圖 (a) 奇數號燒嘴截面300 (b) 偶數號燒嘴截面 (c) 爐體中間截面 (d) 板車附近截面(本研究繪製)

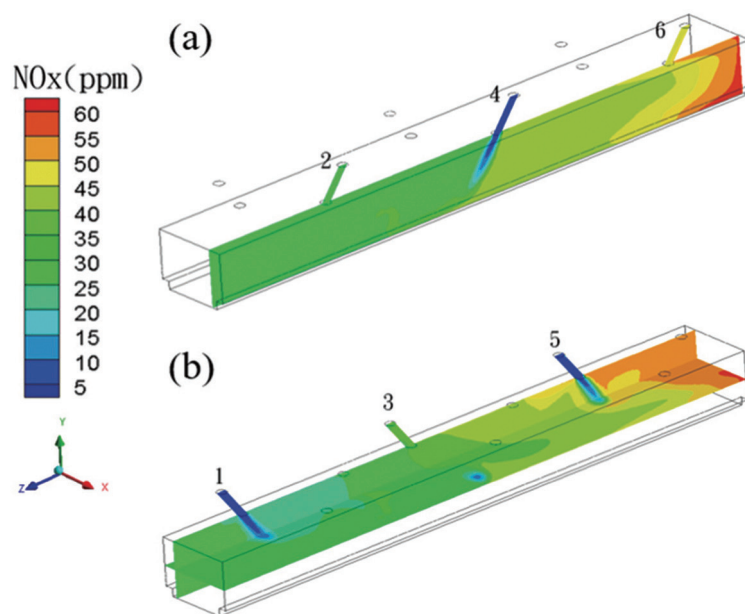


圖9 連續式加熱爐在不同平面處的氮氧化物濃度分布圖 (a) 偶數號燒嘴截面 (b) 奇數號燒嘴與爐體中間截面(本研究繪製)

布，可以發現爐體後段噴入較多燃料，導致氮氧化物濃度急遽的上升，隨後依流場的趨勢擴散至爐體前段，最後呈現前半段保持低濃度、爐內後半段保持高濃度的氮氧化物濃度，但爐內整體的氮氧化物濃度約在60 ppm皆小於環保法規標準150 ppm，推測原因為燃燒器流量偏低且爐體為狹長型設計流體相互流動的地方大，導致氮氧化物濃度有偏低的傾向。

為了達成現場需求，模擬中將爐體的部分分成6大段，並在每一段的正中間並從爐壁往內算約15公分處設立觀測點，爐內共設置6個觀測點，觀測點設立位置示意圖如圖10所示。由圖10可發現要完全均溫是較困難的，故以觀測點溫度與目標值的差距小於10%為判定標準，表5為空爐運作下，6個觀測點溫度與目標溫度兩者之間的差距，可發現所有的差距皆小於10%的誤差，故達成需求。

3.2 工件溫度與熱應力分析－板車頂面為棉板

目前現場使用連續爐加熱工件需耗時21分鐘，故模擬中使用表4之參數設定，根據爐內不同區段設置不同的爐溫對工件進行加熱。

圖11為工件在板車頂面為棉板下進行輻射加熱7分鐘後的溫度分布，可發現未受屏蔽的工件表面已被加熱至700~800°C左右，而被埋在裡面的工件則因為板車材質是棉板的緣故與輻射熱回流尚未對工件溫度造成影響，導致整體溫度仍變低；圖12為其熱應力的分布結果，可觀察到2號、5號、6號工件的交界面有應力集中的問題發生，應力值遠超過304不銹鋼的降伏應力(210 mpa)，推測原因為這3支工件因彼此間的溫度差太大所導致的，而其他工件也因溫差仍偏大的緣故，導致交界面的應力值超過降伏應

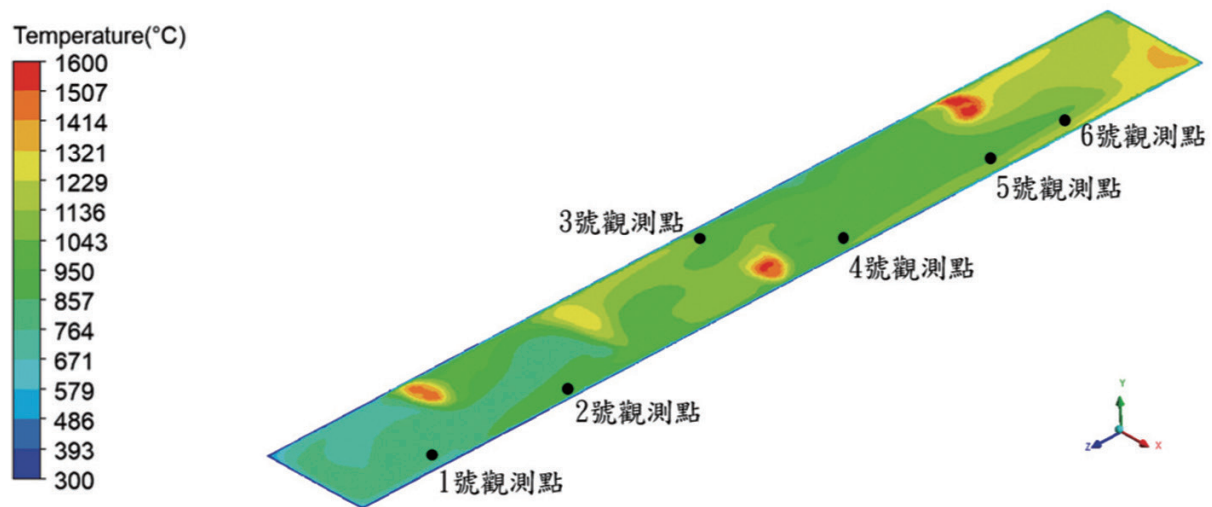


圖10 連續式加熱爐(無工件)內觀測點設立位置示意圖(本研究繪製)

表5 觀測點溫度與目標溫度誤差表(本研究整理)

觀測點	模擬溫度	目標溫度	誤差
1號	807°C	840°C	3.90%
2號	916°C	920°C	0.36%
3號	1077°C	1050°C	2.64%
4號	988°C	1050°C	5.89%
5號	1010°C	1050°C	3.73%
6號	1058°C	1050°C	0.76%

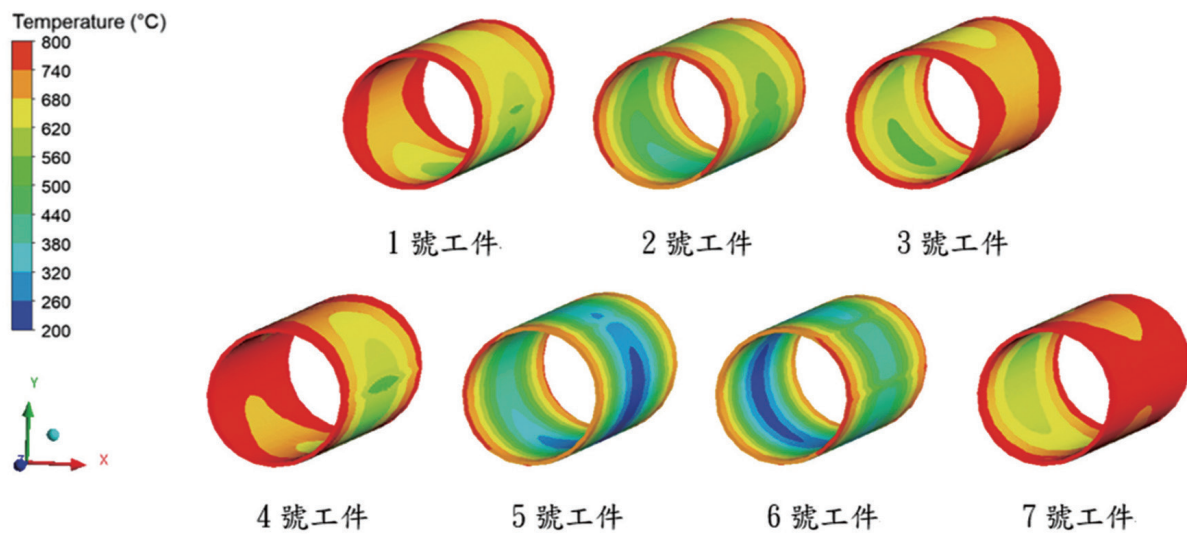


圖11 加熱7分鐘後工件溫度分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

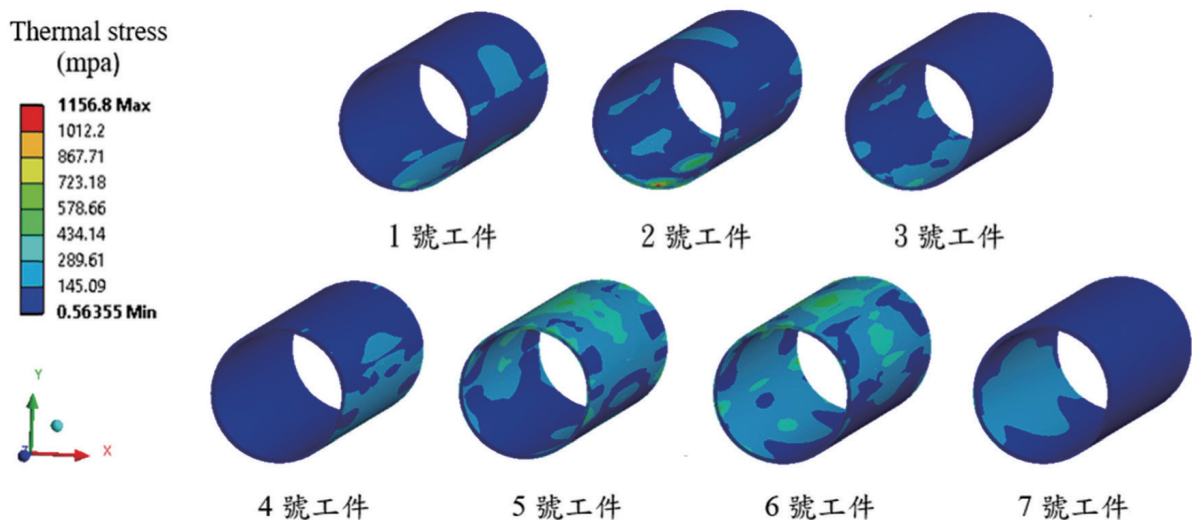


圖12 加熱7分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

力。

圖13為工件在板車頂面為棉板下進行輻射加熱14分鐘後的溫度分布，可發現此時的工件在爐內已加熱14分鐘，並受輻射熱回流與工件間的熱傳量提升的影響，溫度差距已縮小至100度，5號與6號工件則因為屏蔽影響溫度稍微偏低，但整體來說溫度已有均溫的趨勢產生；圖14為熱應力的分布結果，可發現最大熱應力值出現在工件與工件的交界處，是因為工件間的溫差偏高所導致的，但也能發現最大熱應力值已壓在降伏應力下，屬於安全的範圍。

圖15為工件在板車頂面為棉板下進行輻射加熱21分鐘後的溫度分布，此時工件已加熱完成，可發現溫度分布已趨於均溫，但仍有20度的溫差，是數值誤差所引起的，工件加熱完成後其溫度要完全一致，是比較難達成的；圖16為其熱應力的分布結果，可觀察到工件間的熱應力值仍偏高，但整體的熱應力分布也隨著溫度達成均溫，使得分布較為前面加溫段還來得均勻且最大熱應力值有變小的趨勢。圖17為工件的升溫曲線圖，可發現1號工件與3號工件平均溫度變化一致，4號工件與7號工件平均溫度

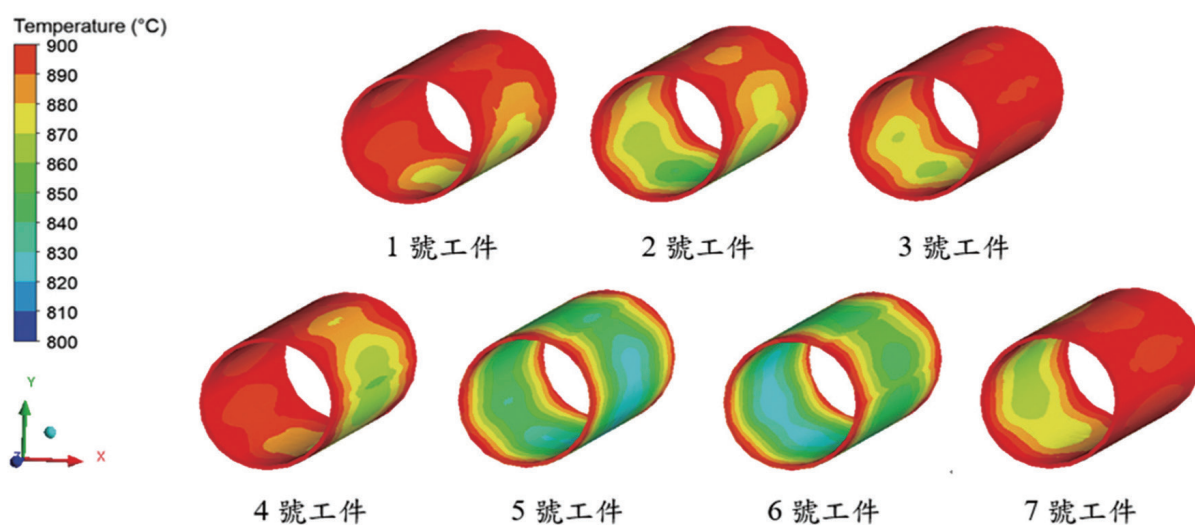


圖13 加熱14分鐘後工件溫度分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

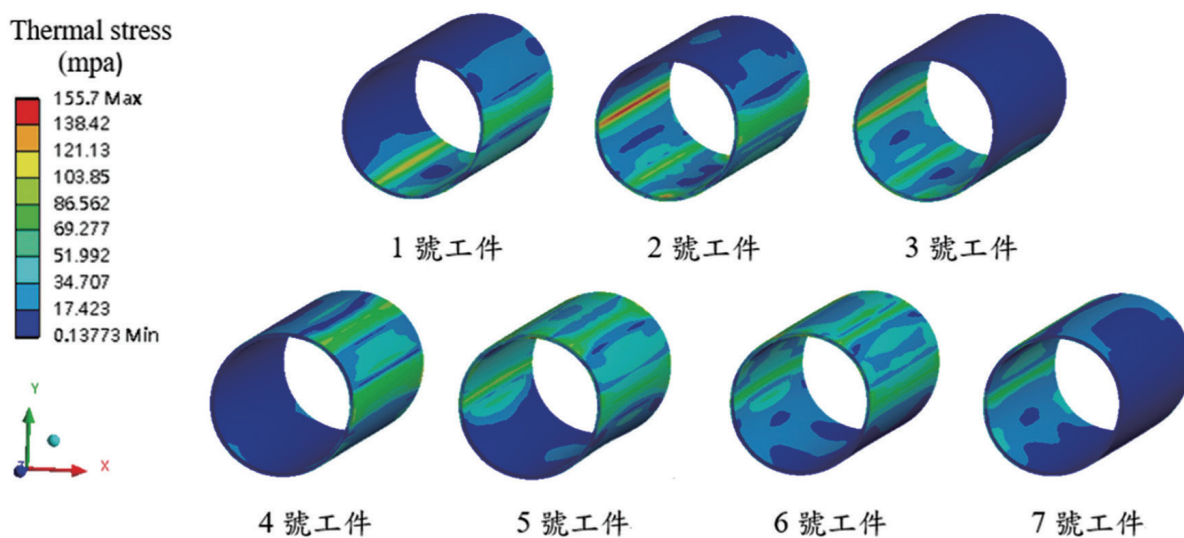


圖14 加熱14分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

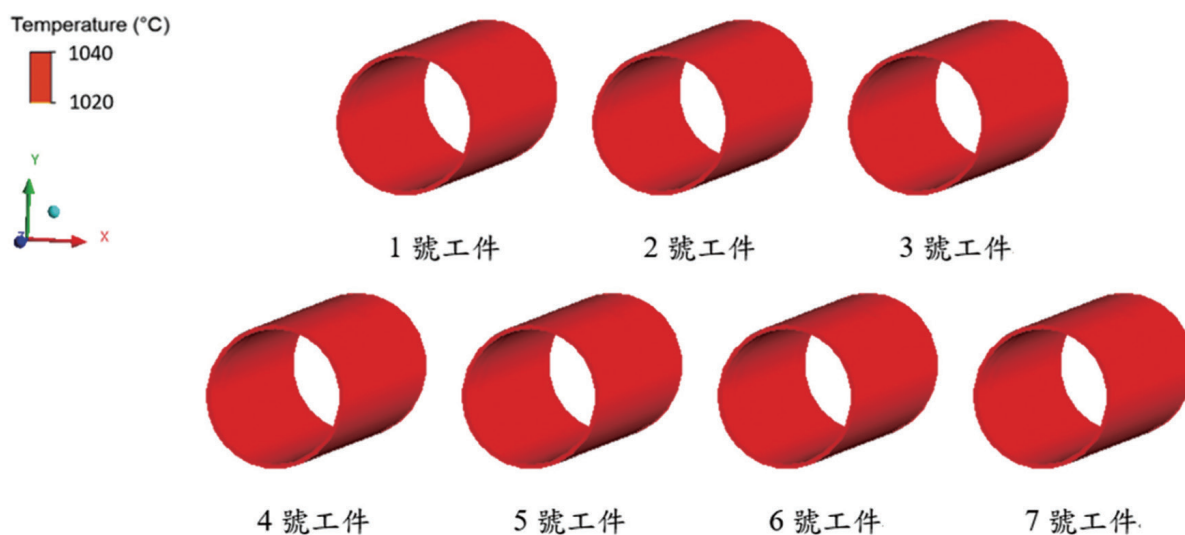


圖15 加熱21分鐘後工件溫度分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

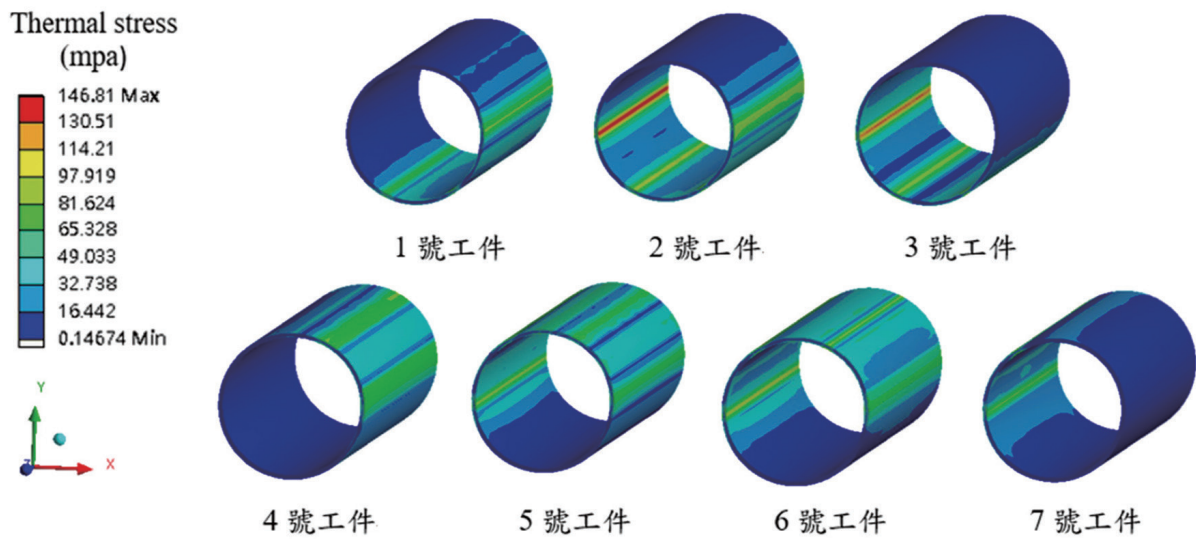


圖16 加熱21分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為棉板)(本研究繪製)

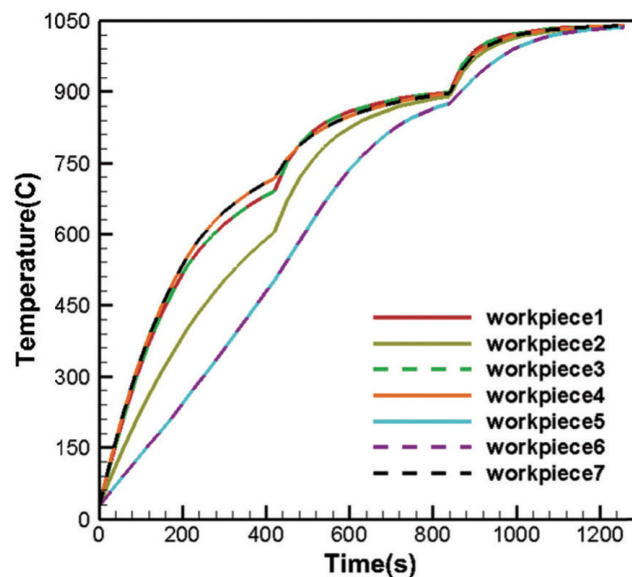


圖17 工件溫度隨時間變化圖(本研究繪製)

變化一致，5號工件與6號工件平均溫度因受屏蔽影響在預熱與升溫段溫度偏低，但到了爐溫較高的持溫段受工件與工件間的熱傳導使溫度快速提升，也可發現加熱時間到約18分鐘後基本上工件已達熱平衡，熱傳難以再對工件溫度產生較大的變化。

3.3 工件溫度與熱應力分析－板車頂面為金屬

圖18為將板車頂面上鋪一層10 mm金屬(SUS310)後，工件進行輻射加熱7分鐘後的溫

度分布，可發現因板車材質有金屬的緣故，導致整體的溫差較板車材質是棉板的案例還來的低一些，但5號與6號工件受屏蔽與此時加溫時間較短的原因，使得溫度仍偏低許多，但也能觀察到其他未受屏蔽工件其溫度較前面案例的溫度還來得高，推測亦是板車材質有金属材料所導致；圖19為其熱應力分布圖，可觀察到因整體工件的溫差仍偏大，亦有應力集中的問題發生，最大熱應力出現在2號、5號、6號工件之間，但最大熱應力值由前面案例的1,156 mpa降至797 mpa左右，推測是板車有金屬材質讓整體

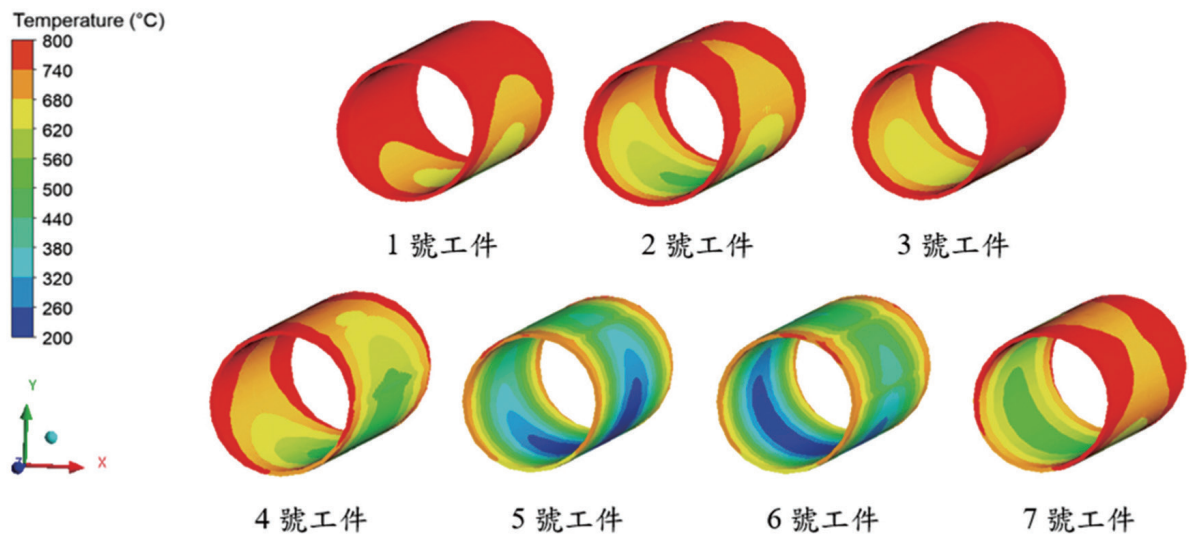


圖18 加熱7分鐘後工件溫度分布圖(頂面為金屬)(本研究繪製)

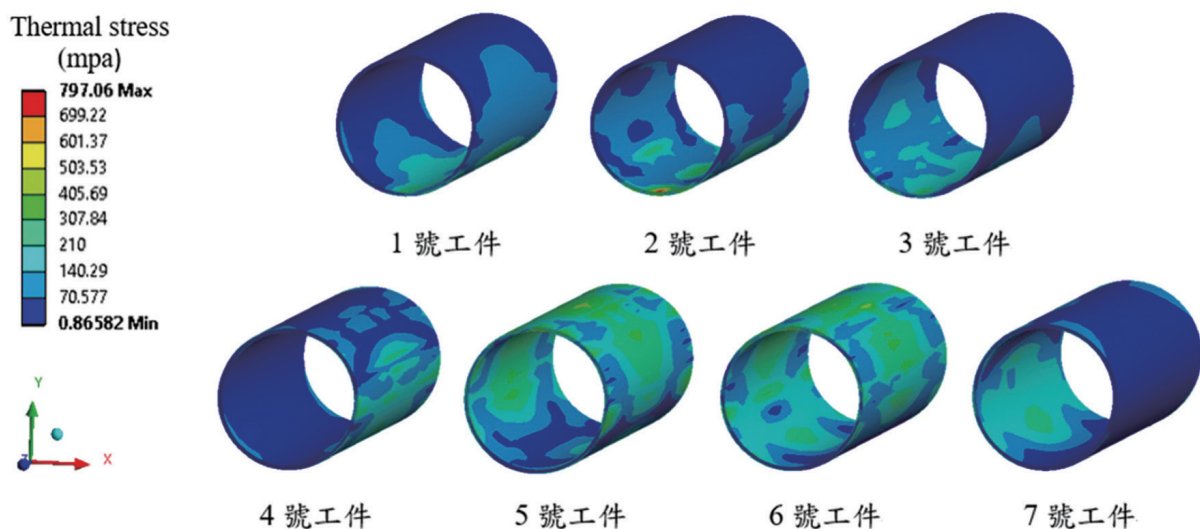


圖19 加熱7分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為金屬)(本研究繪製)

溫差偏低所導致的。

圖20為將板車上鋪一層金屬後，工件在進行加熱14分鐘後的溫度分布，可發現整體溫差較板車是全棉板的案例還來的高，推測是金屬板的比熱比棉板的比熱還來的低(吸熱能力較低)，故即便金屬有較高的熱傳導能力，也難以對工件溫度變化產生較大的影響，也因為此原因導致5號與6號工件的溫度差距仍偏大；圖21為其熱應力分布圖，因溫差較全棉板的案例還來的高，故其最大熱應力也較高並出現在2號工件下方，稍微超過降伏應力，仍有變形的危

險，也能觀察到5號與6號工件因溫差較大，導致此處的熱應力偏高。

圖22為將板車上鋪一層金屬後，工件加熱完成後的溫度分布，可發現此時的溫度分布仍有約100度的差距，推測原因是板車材質所導致的，也可發現5號與6號工件溫度偏低，如增加在爐內時間則可降低溫差；圖23為其熱應力分布圖，可發現最大熱應力出現在工件間的交界處，是由於溫差較大所引起的，但其值已低於降伏應力，已屬於安全範圍內。圖24為工件最大熱應力隨時間變化圖，可發現在預熱段時，

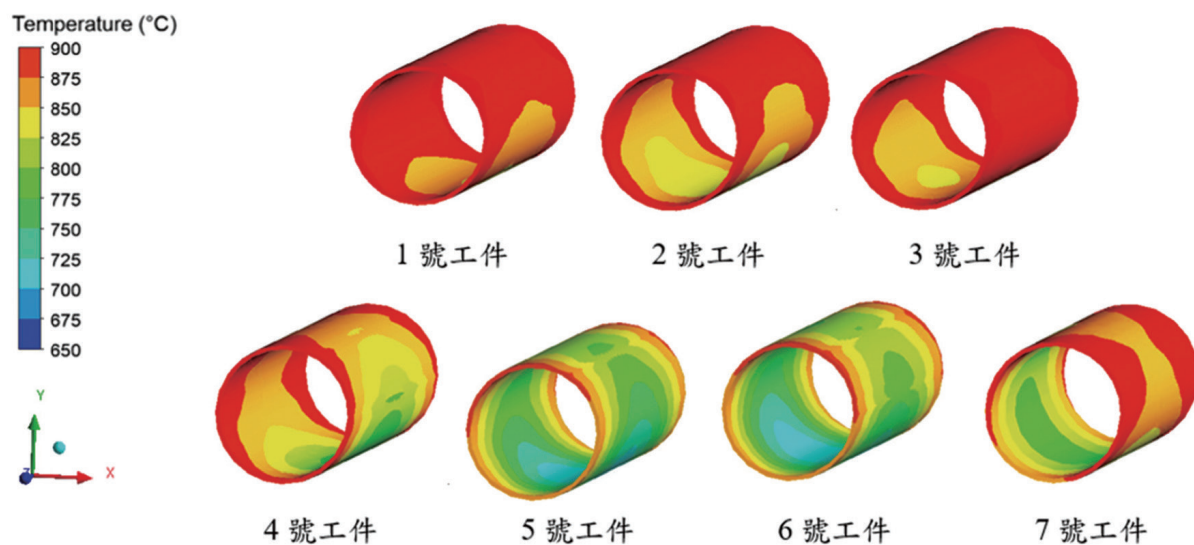


圖20 加熱14分鐘後工件溫度分布圖(頂面為金屬)(本研究繪製)

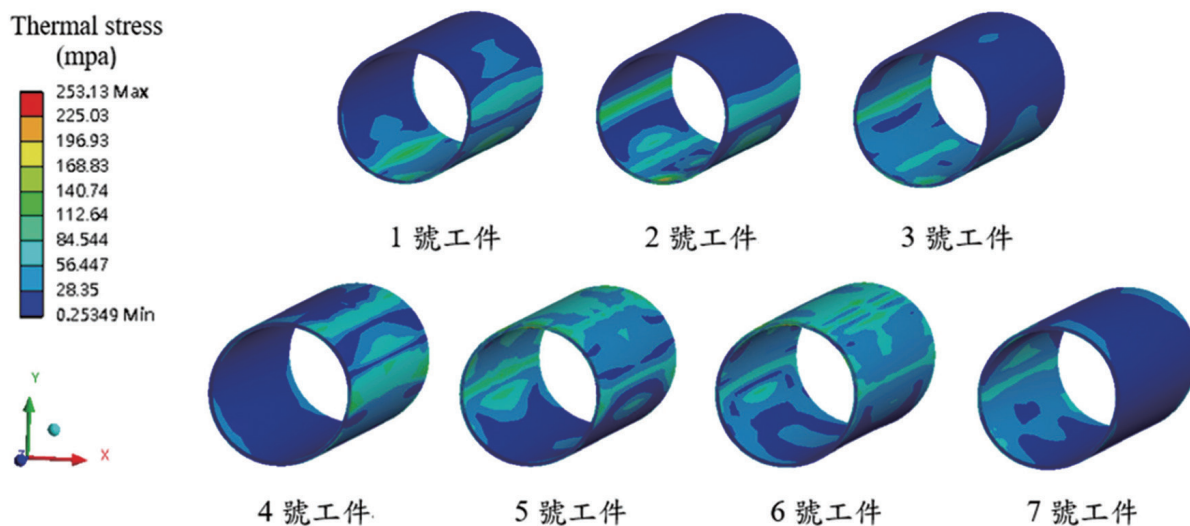


圖21 加熱14分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為金屬)(本研究繪製)

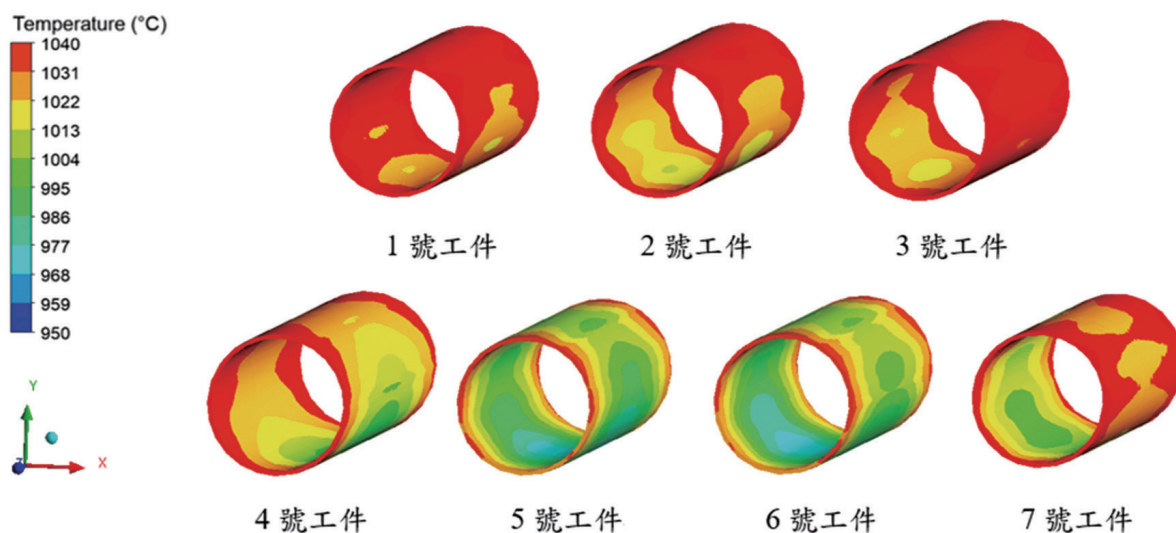


圖22 加熱21分鐘後工件溫度分布圖(頂面為金屬)(本研究繪製)

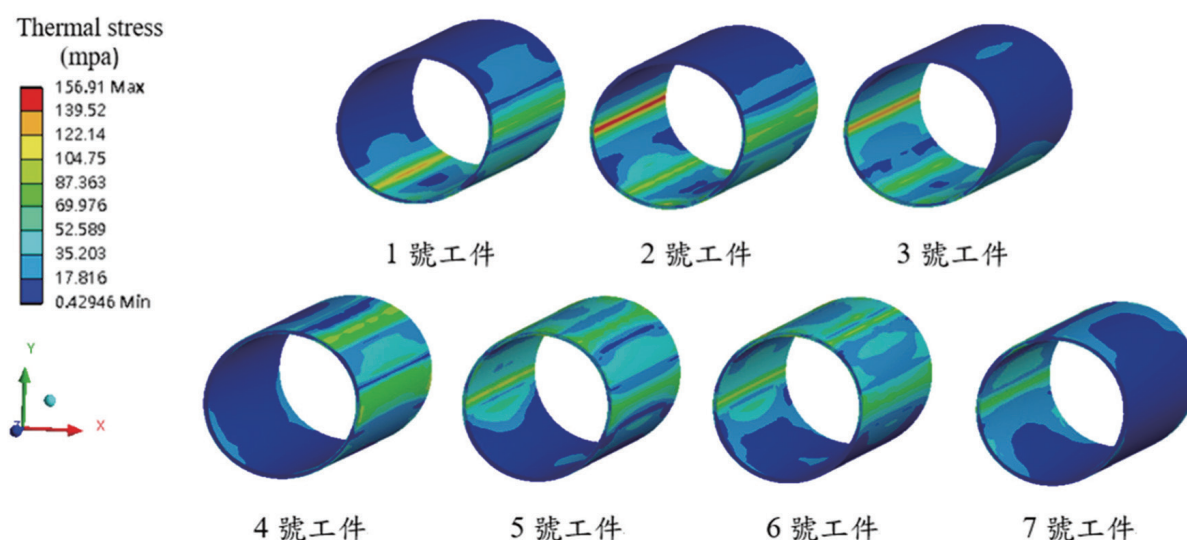


圖23 加熱21分鐘後工件熱應力分布圖(頂面為金屬)

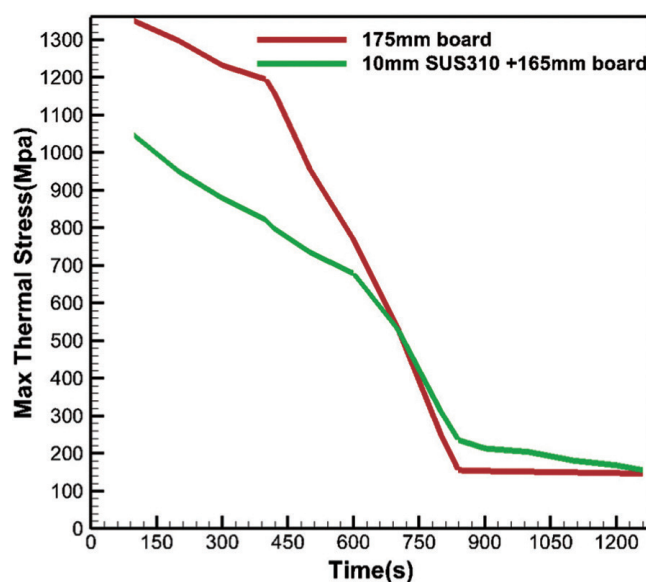


圖24 工件最大熱應力隨時間變化圖(本研究繪製)

有鋪金屬板的案例其應力值皆小於板車全棉板的案例，但兩者皆大於304不銹鋼的降伏應力 (210 mpa)，到了加溫段與持溫段的應力值皆小於降伏應力值，其中有鋪金屬板的案例其應力值皆大於板車全棉板約10~20 mpa左右，推估板車材質有鋪金屬板的狀況，雖於可大幅度降低應力集中的問題但效果有限。

4. 結 論

從模擬結果分析，本研究可得到以下結

論：

- (1) 連續爐(無工件)的部分，爐內持溫段溫度要達全持溫(1,050°C)的需求是一大挑戰；模擬中在爐內所設置觀測點溫度與目標溫度的誤差均在10%以內，不過數據仍有待後續實驗驗證之。
- (2) 工件在加熱模擬中，發現在預熱、加溫段工件受屏蔽影響其溫度分布落差大，但加熱完的工件則不受屏蔽的影響，所有工件溫度差距20°C內，但受數值模型考慮紊流模型的影響，導致工件溫度會有數值誤差的影響，要

使全部工件達到目標溫度(1,040°C)仍有努力空間。

- (3) 不同工件擺放方式與不同板車材質對於工件的溫度與熱應力分布的影響非常大。在板車有鋪金屬版的模擬中發現應力變化較小，但溫度分布與現場的需求仍有段差距。因此，在預熱段的加熱功率不可太大，尤其在工件擺設有遮蔽效應時。
- (4) 從模擬中可發現，當移動速度快時，工件溫度可上升快速，但溫差偏大，導致熱應力值過高；若調慢移動速度時，可增加工件在爐內停留時間，使溫差偏小，則可降低工件應力集中的危險。

誌 謝

本論文為經濟部能源局一〇八年度科技研究發展專案合作研究計畫，「智慧型可重組蓄熱燃燒系統開發計畫(1/3)」(108-E0205)，由於經濟部能源局及金屬工業研究發展中心的支持，使本研究得以順利進行致上感謝之意。

參考文獻

- 工業技術研究院，2005。能源查核與節約能源案例手冊-工業爐節能技術手冊，工業技術研究院。
- 王衛華、解家英、王鳳琴、張延平、李占營與張豔萍，2008。方坯在加熱爐升溫過程中的熱應力分析，中國製造業信息化，第24期，第88-91頁。
- 王俊升、牛壓、溫治、王京與蔡慶伍，2005。「輥底式連續熱處理爐鋼胚二維傳熱過程數學模型的研究」，工業加熱，第1期，第34卷。
- 王妮妮、姜澤毅、張欣欣、楊寅、張海燕與惠景山，2004。鋼管光亮退火爐數學模型及主要影響因素分析，工業加熱，第1期，第33卷。
- 郭亮吾、余春陽、劉訓良、溫治、張欣、程奇伯與陳婉，2010。蜂窩蓄熱箱內高溫煙氣流動過程的數值模擬，北京科技大學，第29卷，第6期。
- 張先珍與戴德彥，2005。換向時間對蓄熱式燃燒的影響，瀋陽化工學院，第24卷，第4期。
- 焦鴻文、張育誠與吳國光，2010。燃燒新技術蓄熱式燃燒原理與應用，經濟部能源局。
- 劉偉娜，2008。蓄熱式燃燒技術的應用研究，碩士論文，東北大學，工程熱物理研究所。
- 韓小良，2001。間歇式熱處理爐傳熱計算與分析，工業加熱，第5期，第12-15頁。
- 羅國民，2011。蓄熱式高溫空氣燃燒技術，冶金工業出版社。
- 劉義平、溫治、周鋼與豆瑞鋒，2011。不鏽鋼帶鋼臥式連續熱處理爐內傳熱過程數學模型，冶金能源，第30卷第6期。
- Gao, M., C. N. Reid, M. Jahedi and Y. Li, 2000. "Estimating equilibration times and heating/cooling rates in heat treatment of workpieces with arbitrary geometry", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, pp.62-71.
- Han, S. H. and D. Chang, 2012. "Optimum residence time analysis for a walking beam type reheating furnace", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 4079-4087.
- Hasanuzzaman, M., N. A. Rahim, M. Hosenuzzaman, R. Saidur, I. M. Mahbubul and M. M. Rashid, 2012. "Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No 7, pp. 4527-4536.
- Hosseini, S. E., M. Wahid and A. Abuelnuor, 2012. "High Temperature Air Combustion: Sustainable Technology to lowNox Formation,

- International Review of Mechanical Engineering, Vol. 6, No. 5.
- Kang, J. W. and Y. I. Rong, 2006. "Modeling and simulation of load heating in heat treatment furnace", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, pp.109-114.
- Kang, J. W., T. Y. Huang, P. Radhakrishnan, W. W. Wang and Y. M. Rong, 2004. "Modeling and Simulation of Heat Transfer in Loaded Continuous Heat Treatment Furnace", Transactions of materials and heat treatment proceedings of the 14th Ifhtse Congress, Vol. 25, No. 5.
- Kim, M. Y., 2007. "A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 3740-3748.
- Nippon Steel Engineering, 2016. <https://www.eng.nipponsteel.com/>. Operating principle of regenerative burner system, 2016.
- Oba, R., T. S. Possamai, V. P. Nicolau, 2014. "Thermal analysis of a tunnel kiln used to produce roof tiles", Applied Thermal Engineering, Vol. 63, pp. 59-65.
- Rad, S. D., A. Ashrafizadeh and M. Nickaeen, 2017. "Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in an industrial continuous furnace", Applied Thermal Engineering, Vol. 117, pp. 263-274.
- Sugiyama, S., N. Suzuki, Y. Kato, K. Yoshikawa, A. Omino, T. Ishii, K. Yoshikawa and T. Kiga, 2005. "Gasification performance of coals using high temperature air", Energy, Vol. 30, pp. 399-413.
- Tanaka, R. and T. Hasegawa, 1997. "Innovative technology to change flame characteristics with highly preheated air combustion", Proceeding of Japanese Flame Days, pp. 129-150.
- Tsuji, H, A. K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki and K. K. M. Morita, 2002. "High Temperature air combustion". CRC Press LLC.
- Weber, R, J. P. Smart and W. Kamp, 2005. "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid ,and solid fuels in high temperature preheated air", Proc.Combust.Inst., Vol. 30, pp. 2623-2629.
- Wong, S. Y., W. Zhou and J. Hua, 2007. "Designing process controller for a continuous bread baking process based on CFD modeling", Journal of Food Engineering, Vol. 81, pp. 523-534.

The Influence of the Workpiece in Regenerative Combustion Industrial Continuous Furnace

Kai-Cheng Hsu¹ Tai-Hsiang Fang² Sheng-Yen Hsu^{3*}
Shao-Wen Tang¹ Jian-Cheng Chen¹

ABSTRACT

This study explores the thermal flow field of continuous furnace, and analyzes the effects of furnace temperature, heat flow field distribution and NO_x emissions under different operating conditions. This research also discusses the temperature changes of the workpieces in different sections of the furnace as the workpieces are sent from the low temperature to the high temperature. The results of the study show that it is a huge challenge to reach 1,050°C in temperature soaking zone at least 300 cm when there is no any workpiece in the furnace. In the workpiece-heating simulation, it is found that the temperature distribution of the workpieces is affected significantly by shielding during the preheating and heating stages. However, the heated workpieces are not affected by the shielding. The temperature difference of all workpieces is within 10°C, but there is little improvement for work to meet the requirements which the workpieces' surface is fully maintain temperature (1,040°C).

Keywords: Continuous Furnace, Numerical Simulation, Heat Regenerative Combustion.

¹ Engineer, Metal Industries Research & Development Centre.

² Master, Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering, National Sun Yet-Sen university, NSYSU.

³ Associate Professor, Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering, NSYSU.

* Corresponding Author, Phone: +886-7-5252000#4286, E-mail: syhsu@mail.nsysu.edu.tw

Received Date: November 15, 2019

Revised Date: July 2, 2020

Accepted Date: July 30, 2020