

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

工輓在完成熱軋製程後之熱分析  
Thermal Analysis of Work Roll after Hot Rolling Process

研究生：林武伸  
指導教授：楊文美 博士

中華民國九十六年七月

工輓在完成熱軋製程後之熱分析

Thermal Analysis of Work Roll after Hot Rolling Processes

研究生：林武伸

Student：Wu-Shen Lin

指導教授：楊文美

Adviser：Wen-Mei Yang

國立交通大學

機械工程學系



A Thesis

**Submitted to Institute of Mechanical Engineering**

**College of Engineering**

**National Chiao Tung University**

**in Partial Fulfillment of The Requirements**

**for the Degree of**

**Master of Science**

**in**

**Mechanical Engineering**

**July 2007**

**Hsinchu, Taiwan, Republic in China**

中華民國九十六年七月

## 摘 要

本文探討工作輓輪於熱軋結束後，輓體在空氣冷卻及噴水冷卻過程中的熱分析，並利用實驗量測與數值方法比較，估算出所對應熱對流係數。首先以實驗方式量測工作輓體之表面溫度及徑向熱膨脹量，再建立一個二維軸對稱工作輓體的暫態物理模型，使用隱性(implicit)有限體積法，並對未知的熱對流係數進行猜值，給定一固定常數，模擬工輓在冷卻過程中輓溫分佈及輓徑變化。之後再利用數值模擬結果與實驗數據比較，估算出工輓在空氣冷卻及噴水冷卻時，所對應熱對流係數，此熱對流係數可做為日後發展冷卻系統之重要依據。

在空氣冷卻過程中，由於空氣對流係數相當的小，因此需要非常久的冷卻時間，工輓溫度才能趨於穩態。且輓面熱對流效應遠小於工輓內部熱傳效應，因此可將工輓徑向溫度分佈視為塊狀系統(lumped system)。相較於工輓在噴水冷卻過程中，表面熱對流效應大於工輓內部熱傳效應，此時工輓內部溫度變化會有延遲的現象。且若冷卻時間不夠久，工輓內部熱量無法完全移除而往外傳遞，造成輓面溫度有回溫現象的發生。

## 誌 謝

首先感謝指導教授楊文美博士兩年來的悉心指導與諄諄教誨，使本論文能順利的完成。恩師治學嚴謹之態度，使我培養出獨立思考的能力，並給予在為人處事上的潛移默化及正確的研究方法與態度，使學生受益良多，浩瀚師恩，非筆墨難以形容，永銘於心，謹誌於此，以表由衷感謝與敬意。

口試期間承蒙胡毓仁博士、傅武雄教授及游明輝教授等不吝賜教，並提供諸多寶貴意見，使本文更加完備，深表謝意。

感謝實驗室學長豪傑、立杰，同學文山以及學弟榮豐、梓源及國元在生活上的熱情幫忙與大力支持，使得兩年的研究生活更為充實平順，並且感謝在交通大學求學期間所有教導過我的師長，使我在學識的領域上有所成長與突破，在此謹致上我最誠摯的謝意。

最後謹以本論文獻給我的父母及親友，感謝你們對我的生活無止境的關懷與照顧，並在精神上全力的支持與鼓勵，此恩此情銘記於心。

# 目 錄

摘要.....	i
誌謝.....	ii
目錄.....	iii
表目錄.....	v
圖目錄.....	vi
符號說明.....	viii
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 研究目的.....	6
第二章 物理模式.....	7
2-1 輓體溫度及熱膨脹量量測實驗.....	7
2-1-1 實驗設備.....	8
2-1-2 實驗方法.....	8
2-1-3 實驗量測結果.....	9
2-2 數學模型.....	9
2-2-1 統御方程式.....	9
2-2-2 初始條件.....	10
2-2-3 邊界條件.....	10
第三章 數值方法.....	12
3-1 輓體的離散方程式.....	12
3-2 計算輓體熱膨脹.....	14
3-3 熱對流係數估算過程.....	15
3-4 初始條件之模擬.....	16

第四章 結果與討論 .....	18
4-1 實驗量測數據 .....	18
4-2 估算熱對流係數 .....	19
4-2-1 空冷熱對流係數 .....	20
4-2-2 水冷熱對流係數 .....	21
4-3 初始條件模擬結果 .....	21
第五章 結論 .....	24
參考文獻 .....	26



## 表 目 錄

表一	輓體格點類型係數表 .....	29
表二	工作輓體之熱物性質表 .....	31



## 圖 目 錄

圖一	工作輓體噴水冷卻圖 .....	32
圖二	輓徑量測器 .....	33
圖三	實際量測輓徑及溫度圖 .....	34
圖四	工輓量測時間點之流程圖 (a)空氣冷卻 (b)噴水冷卻 ...	35
圖五	軸對稱工輓示意圖 .....	36
圖六	輓體格點類型圖 .....	37
圖七	輓體內部格點取控制體積示意圖 .....	38
圖八	輓體內部格點取控制體積之熱膨脹模型 .....	39
圖九	第二基座 F2 H1041 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b) 徑向熱膨脹量測圖 .....	40
圖十	第四基座 F4 52008 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b) 徑向熱膨脹量測圖 .....	41
圖十一	第五基座 F5 B2739 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b)徑向熱膨脹量測圖 .....	42
圖十二	第二基座 F2 H1037 之上工輓輓面溫度分佈量測圖 .....	43
圖十三	第二基座 F2 H1044 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b) 徑向熱膨脹量測圖 .....	44
圖十四	第二基座 F2 U1034 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b) 徑向熱膨脹量測圖 .....	45
圖十五	第二基座 F2 H1041 之上工輓 空冷狀態下 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈 .....	46
圖十六	第二基座 F4 52008 之上工輓空冷狀態下 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈 .....	47



圖十七	第二基座 F5 B2739 之上工輓空冷狀態下 (a)熱對流係數 與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈.....	48
圖十八	第二基座 F2 H1044 之上工輓水冷 21 分後 (a)熱對流係數 與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈( $h_w = 1800W/m^2K$ )...	49
圖十九	第二基座 F2 U1034 之上工輓水冷 50 分後 (a)熱對流係數 與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈( $h_w = 2000W/m^2K$ )...	50
圖二十	第二基座 F2 H1044 之上工輓軋延結束後輓體溫度分佈圖 .....	51
圖二十一	第二基座 F2 H1044 之上工輓徑向溫度曲線黏合與數值計 算比較 .....	52
圖二十二	第二基座 F2 H1044 之上工輓 4 輓面中心( $Z = 0\text{ mm}$ )溫度 變化圖 .....	53
圖二十三	第二基座 F2 H1044 之上工輓軋延結束後工輓中心( $Z = 0$ $\text{mm}$ )徑向溫度變化圖.....	54



# 符 號 說 明

## 符 號

$A$	表面積
$c_p$	比熱
$C_m$	多項式之係數
$D$	輓體直徑
$D'$	輓體直徑熱膨脹量
$h$	對流熱傳係數
$k$	熱傳導係數
$L$	工輓長度
$L_b$	輓體長度
$M, N$	$z, r$ 方向取的格點數
$q$	熱通量
$R$	輓體半徑
$R'$	輓體半徑熱膨脹量
$R_n$	工輓頸部半徑
$r, z$	輓體座標
$T$	溫度
$T_0$	初始溫度
$T_\infty$	流體溫度
$t$	時間

$V$	控制體積
$\alpha$	熱擴散係數
$\Delta r$	內部格點之控制體積徑向長度
$\Delta r'$	內部格點之控制體積徑向熱膨脹量
$\Delta t$	時間步階
$\Delta z$	內部格點之控制體積軸向長度
$\varepsilon$	熱膨脹係數
$\nu$	運動黏滯係數
$\sigma$	均方根誤差
$\rho$	密度

#### 下標說明

$est$	估計值
$mea$	量測值
$P$	主格點
$W$	主格點之左邊界
$E$	主格點之右邊界
$N$	主格點之上邊界
$S$	主格點之下邊界

#### 上標說明

$n$	數值計算時階
-----	--------



# 第一章

## 緒論

### 1-1 前言

軋軋(rolling)製程為機械製造中常見的加工程序，發展已有四百多年的歷史，其利用鋼胚通過兩個轉動軋軋，受連續軋延壓力而伸展成形，產生之成品謂之軋製鋼材。因軋製法產量高，加工容易，平均成本低，故軋製鋼材佔全部鋼成品的百分之九十以上。鋼材的軋製可分為熱軋和冷軋兩種，熱軋是指在鋼胚送進軋延機軋製之前，先將其加熱至高溫；冷軋則是指被軋延材料未預先加熱，在常溫下即送進軋延機軋製，不同的軋製過程生產出不同物性的鋼品。

在軋軋製程後，工作軋輪內部會累積大量的熱，此熱量必須能被適當移除，方能確保下次軋軋製程順利進行，以避免熱量累積造成軋輪損壞。因此為了延長工作軋輪的使用壽命，必須發展一套快速反應且控溫精確的冷卻系統，噴水冷卻系統是最廣泛被使用的一種方法，是將噴嘴置於工作軋輪兩側，以大量冷卻水均勻噴灑至工作軋輪表面，快速帶走熱量來達到冷卻的目的。

## 1-2 文獻回顧

一直以來，許多學者進行關於軋軋製程的相關研究，依照研究內容不同，大致可分為兩類：

### 1. 工作軋輪於軋延過程

Cerni(1961)建立一個二維暫態軋輪模型，假設軋體僅以熱對流方式冷卻，且軋體受熱僅由均一線熱源供給之前提下，分析軋體的表面溫度分佈，Cerni 的結果為後來的研究提供了一個參考的基準。

Hogshead(1967)將 Cerni 的方法加以簡化，進行溫度分佈解析，得到軋體表面溫度分佈的穩態解。繼 Hogshead 之後 Stevens、Ivens 和 Harper(1971)以實驗方式量測軋體在熱軋製程中受鋼胚傳入熱量及外加散熱機構作用下的暫態溫度分佈數據。Parke 和 Baker(1972)發展一個二維暫態模型，使用有限差分法探討軋體在熱軋製程中的暫態溫度變化，此種模型後來被廣泛的使用與改進。

Haubitzer(1974)研究二維軋體模型，徑向以 Kelvin functions 表示，圓周方向以 Fourier series 展開，以控制表面溫度為前提，解得軋體溫度分佈的穩態解。Patula(1981)以 Haubitzer 的研究為基礎，研究軋體在熱軋製程中，軋體的受熱表面有固定的熱量傳入，其餘面積則以對流方式冷卻，分析出軋體的溫度分佈。但 Patula 在對流冷卻表面，以不同區域進行不同程度的散熱條件，相較於 Cerni 以均一對流冷卻條件來進行散熱有更準確的結果，在 Patula 的研究中也得到相對於不同轉速之軋體，熱傳滲透的深度也會不同，高轉速會

有較薄的滲透深度。

Yuen(1984)亦以 Haubitzer 的研究為基礎，作深入的探討，將輓體分別以固定及不定的熱源和對流冷卻之熱傳條件，分析輓體的溫度分佈。Tseng(1984)以有限差分法求解一個高速轉動輓體的模型，因為輓體轉動的速度很快，故溫度變化僅限於接近輓體表面的一薄層內。此外，Tseng 分析不同的  $Pe$  數，對輓體溫度分佈的影響，得到較小的  $Pe$  數對於溫度分佈變化會有較大的影響。

Van Steden 與 Tellman(1984)分別就軸向與圓周方向以及軸向與徑向為發展模型，並且加入了冷卻水噴灑角度、輓體表面溫度、噴嘴與輓體之間的距離、冷卻水流率與噴灑水壓等參考因素，求得暫態溫度分佈。

Hwang(1993)發展一個徑向與圓周方向的物理模型，使用有限元素法分析輓體於穩態時的溫度分佈，並探討鋼帶和輓體間的磨擦條件、熱傳係數、輓體轉動速度、潤滑劑種類與噴灑位置等不同操作參數對模擬結果的影響。

江勝文(2005)建立一個二維暫態數值模型，使用有限體積法模擬輓體在熱軋製程中的熱傳行為，分析出在不同情況下輓體的溫度分佈及變化。結果顯示由於軋延製程中輓體與熱鋼胚接觸的面積不大且轉動快速，因此輓體溫度變化僅限於接近外側表面的一定厚度內。在進行軋延製程中，輓體受到各參數的影響，當  $Pe$  和  $Bi$  增加時，輓體的溫度分佈會隨之下降。

周弘仁(2005)將圓周方向視為一等效溫度場，僅考慮徑向與軸向之二維軸對稱暫態模型，且亦使用有限體積法分析模擬輓體在熱



軋製程中的熱傳行為。結果得到各參數對於軋體溫度分佈的影響，軋體溫度隨  $Bi$  增加會降低，且當鋼帶經過軋面正中央時，軋體的溫度分佈會有對稱的情況，若鋼帶有所偏移時，軋體的溫度分佈也隨之偏移。

## 2. 工作軋輪於冷卻過程

Tseng(1989)建立一個二維暫態模型，以實驗方式量測軋輪表面溫度當作邊界條件，再以有限差分法來估算在噴水冷卻的狀態下軋輪內溫度分佈與熱對流係數。並藉由有限元素分析軟體 ANSYS，模擬工作軋輪於軋延製程中之熱應力及熱膨脹量。

Huang 與 Tseng(1994)以實驗方式測量軋輪內部溫度，並利用共軋梯度法(conjugate gradient method)計算出表面溫度及表面熱通量，結果顯示利用此方法所估算出表面溫度之精確度會因測量軋輪內部溫度的位置所影響。

Lin 與 Chen(1995)亦建立數值模擬模型，假設軋延製程為二維以簡化問題和減少電腦計算時間，並基於三維控制體積模型下使用有限差分法，來預測工作軋輪於軋延製程中的溫度分佈及其熱膨脹狀況。對此三維非穩態熱傳模擬模型，在熱軋延製程中所考慮的邊界條件包含工作軋輪分別與空氣和冷卻水的對流冷卻、冷卻水的沸騰現象、工作軋輪的熱輻射現象，以及工作軋輪與鋼帶接觸區域因摩擦所產生的熱等，其所有的邊界條件皆假設為可控制的，而此模擬結果與實驗所得之結果極為吻合，並且比較前人所建立之二維模型，其結果也是極相近的。

Hsu、Chen 與 Yang(2000)以 Tseng 的實驗數據為基礎，建立一

個三維物理模型，由已知之工輓內部溫度數據，以循序算則(sequential algorithms)及最小平方誤差法(Least-squares error method)求得工輓表面溫度及表面熱通量之最佳解，此方法可以快速且精確分析工作輓輪的熱傳行為。

Garcia-Gil 與 Colas(2000)以實驗量測工輓於軋延結束後，從軋延機座上取出至空氣中冷卻的表面溫度分佈，再以一個二階多項式曲線修正量測數據，並建立一個數學模型，將修正後的表面溫度數據導入，使用有限差分法，分析計算輓體暫態溫度分佈及相對變形量，研究提供了解不同機制對軋延產品外形的影響。

謝秋傑(2006)建立一個工作輓體的暫態熱傳模型，以數值模擬工輓於中鋼公司實際操作環境中的溫度變化和直徑熱膨脹量大小，並分析各參數對輓體溫度及直徑熱膨脹量的影響。亦計算工輓於熱軋結束後，從軋鋼機座取下冷卻的熱膨脹量，當作外形研磨參考曲線，修正熱軋結束後的變形量，並分析使用不同對流熱傳係數對結果的影響，以達成較佳控制方法，使其軋延厚度更加均勻，提高鋼材熱軋的生產率。

輓軋製程中，輓輪表面承受高溫、高壓作用，其物理現象相當複雜。在文獻中考慮之輓體模型多為二維，且經由許多假設以簡化模型的複雜度。此外，這方面的研究很少探討工輓於軋延結束後，從軋延機座取出冷卻並研磨輓體尺寸至下次安裝繼續軋延之間的狀態，如能發展一套模擬系統，提供冷卻中任意時間點的輓體變形修正曲線，則可大大節省需達到完全冷卻的時間，提高軋製鋼品生產量。



### 1-3 研究目的

熱軋鋼品強度足、韌性佳、容易加工成各種形狀規則的零組件，且焊接性良好，易與其他金屬構架組合，因此軋製鋼材被廣泛地使用於車架、橋樑、建築、道路護欄、鋼管、壓力容器及園藝工具等產品。由於軋延鋼材用途廣泛，若無法提供中下游產業的用料需求，將導致產品競爭力下降。

本研究目的在於建立工作輓輪於熱軋結束後的熱傳模型，首先以實驗方式量測工作輓輪的表面溫度及徑向熱膨脹量，並建立一個徑向與軸向的二維暫態模型，利用有限體積法配合均方根誤差估算輓體於空氣冷卻及噴水冷卻下的熱對流係數，建立一個較佳的冷卻模擬系統，以利於在進行下次軋延製程前，精確修正工作輓輪因高溫造成之變形量，確保軋延製程中受軋延鋼帶之精準度。此外，本文亦探討工作輓輪於輓軋製程後，分別在空氣冷卻及噴水冷卻狀態下之熱傳行為，以達到更有效且快速的控制方法。

## 第二章

### 物理模式

在熱軋製程中，工作輓輪因高溫鋼帶傳入大量的熱，使得工輓內部在軋延製程後累積相當大的熱量，造成工輓因高溫而變形，此時須將內部之熱量適當的移除。本研究探討在熱軋製程結束後，將工輓分別以空氣及噴水方式冷卻後之熱分析。其中工作輓輪置於冷卻槽進行噴水冷卻之實體如圖一，工輓於兩側設置噴頭將大量冷卻水以霧狀方式均勻噴灑於輓面上達到快速冷卻的目的。

由於熱對流係數無法直接量測，本研究則利用數值方法與實驗量測數據比較，以獲得工輓置於空氣冷卻及噴水冷卻時所對應之熱對流係數。在進行工作輓輪之熱分析之前，需先量測工作輓輪之表面溫度及徑向熱膨脹量數據。

#### 2-1 輓體溫度及熱膨脹量量測實驗

本實驗的主要目的在於利用熱電偶計及輓徑測量器測量輓體分別在空氣冷卻及噴水冷卻的狀態下，輓面溫度及徑向熱膨脹量於各時間的變化，以作為本研究之重要參數依據。

## 2-1-1 實驗設備

### 熱電偶計

以工軋軋面中心為原點，在軸向取每 100 公釐間距為一量測點，依照工軋之長度不同分別取 17~20 個量測點，利用熱電偶計量測並紀錄工軋表面溫度。

### 軋徑測量器

此量測儀器為中鋼公司自行設計組裝，如圖二所示，圖中包含之主要零件為(1) 主機本體 (2) 量測器 (3) 懸臂裝置 (4) 數據擷取系統。實際操作方法如圖三所示，將本體架設於工軋一端後，懸臂裝置正確固定於工軋兩側，調整懸臂裝置兩端間距至工軋進行熱軋前之軋徑，並在懸臂裝置端點安裝量測計，輕推測量器至工軋另一端，便可量測並紀錄工軋徑向熱膨脹量之變化。

## 2-1-2 實驗方法

### (1) 空氣冷卻

待熱軋製程結束後，將軋延機組中的第二、四、五號基座之上工軋取出，放置空氣中 26 小時使之自然冷卻，在此期間取五個時間點，以熱電偶計及軋徑量測器量測工軋之軋面溫度分佈及徑向膨脹量，圖四(a)為工軋進行空冷所取量測時間點之流程。

## (2) 噴水冷卻

同空氣冷卻之量測方法，待熱軋製程結束後，選取三個不同軋延製程中的第二號基座之上工輓取出，並量測工輓之輓面溫度及熱膨脹量，隨即將工輓安置於冷卻槽進行噴水冷卻，之後從冷卻槽移出置於軋延現場的環境中再次進行空氣冷卻，並進行量測實驗。圖四(b)為工輓進行水冷所取量測時間點之流程。

### 2-1-3 實驗量測結果

在空氣冷卻方面已獲得第二、四及五號機座之上工輓在五個時間點的輓面溫度及徑向熱膨脹量數據，而噴水冷卻方面已獲得第二號機座之上工輓分別在冷卻槽進行噴水冷卻 15、21、50 分鐘後，上工輓之輓面溫度及徑向熱膨脹量之歷史紀錄，以作為本文估算熱對流係數及工輓溫度分佈之重要參考數據。

## 2-2 數學模型

### 2-2-1 統御方程式

由於工作輓輪於冷卻槽進行冷卻時處於高速運轉狀態，因此將圓周方向視為一等效溫度場，忽略圓周方向的溫度變化，可建立一個軸對稱的輓體模型如圖五。模型中定義座標起點於輓體中心， $L$  為工輓長度， $L_b$  為輓面長度(barrel length)， $R$  為輓體半徑， $R_n$  為工輓頸部半徑(roll neck radius)。考慮工作輓體溫度函數  $T$  為徑向  $r$ 、軸向  $z$  與時

間  $t$  的函數  $T = T(r, z, t)$ ，以此建構本研究之物理模式。考慮二維輓體溫度函數  $T = T(r, z, t)$  的統御方程式可表示如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

上式中  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  為輓體的熱擴散係數(thermal diffusivity)， $\rho$  為密度(density)， $c_p$  為比熱(specific heat)， $k$  為熱傳導係數(thermal conductivity)。

## 2-2-2 初始條件

以中鋼所提供軋延製程之相關數據，利用謝秋傑(2006)所發展之模擬程式，計算出熱軋結束後工作輓輪之溫度分佈  $T_0(r, z)$ ，故初始條件(initial condition)如下：

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z) \quad (2.2a)$$

## 2-2-3 邊界條件

假設輓體溫度分佈為軸對稱，故在輓體中心( $r = 0$ )處為絕熱，其邊界條件如下：

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (2.2b)$$

考慮工作輓體表面的邊界條件(boundary conditions)均為對流效

應，且熱對流係數為一固定常數  $h$ ，則依工輓位置可分述如下：

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty) \quad -\frac{L_b}{2} \leq z \leq +\frac{L_b}{2} \quad (2.2c)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty) \quad 0 \leq z \leq \frac{L}{2}, \quad 0 < r \leq R \quad (2.2d)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty) \quad \frac{L_b}{2} \leq |z| \leq \frac{L}{2} \quad (2.2e)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty) \quad -\frac{L}{2} \leq z \leq 0, \quad 0 < r \leq R \quad (2.2f)$$

而後，以有限體積法來處理(2.1)式與(2.2)式，其中熱對流係數  $h$  以猜值的方式代入，計算出工輓於量測時間點之溫度分佈，再配合最小均方根誤差與所量測之數據進行比對，便可估算出所對應熱對流係數。



## 第三章

### 數值方法

本研究所採用的數值方法為隱性(implicit)有限體積法，將輓體切割為若干格點如圖六。對每一個格點取控制體積，且每一時刻皆必須保持能量守恆，如圖七所示，由此可以推導出各個格點的溫度離散方程式。將未知熱對流係數進行猜值，並將所有離散方程式列成矩陣形式後，利用 LU 分解求得出下一時階的溫度分佈。再配合均方根誤差，將所計算出數值與實驗量測數據進行比對，以修正待求之熱對流係數。



#### 3-1 輓體的離散方程式

將格點分割完成後，對每一格點取控制體積，使用有限體積法，便可推導得離散方程式。以圖七之內部 P 點來討論，列出其控制體積與各表面積：

$$A_N = 2\pi \cdot \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z$$

$$A_S = 2\pi \cdot \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z$$

$$A_W = A_E = \pi \cdot \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r$$

$$V = A_W \cdot \Delta z = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta z \quad (3.1)$$

根據熱傳導傅立葉定律(Fourier's law)

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.2)$$

故對控制體積每個表面積進入的能量分別為

$$\begin{aligned} q_W &= k \cdot A_W \cdot \frac{T_W^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} = 2\pi \cdot k \cdot r \cdot \Delta r \cdot \frac{T_W^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} \\ q_E &= k \cdot A_E \cdot \frac{T_E^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} = 2\pi \cdot k \cdot r \cdot \Delta r \cdot \frac{T_E^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} \\ q_N &= k \cdot A_N \cdot \frac{T_N^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} = 2\pi \cdot k \cdot \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z \cdot \frac{T_N^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} \\ q_S &= k \cdot A_S \cdot \frac{T_S^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} = 2\pi \cdot k \cdot \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta z \cdot \frac{T_S^{n+1} - T_P^{n+1}}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.3)$$

而儲存在控制體積中的能量為

$$E_{st} = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \left( \frac{T_P^{n+1} - T_P^n}{\Delta t} \right) = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta z \cdot \rho \cdot c_p \cdot \left( \frac{T_P^{n+1} - T_P^n}{\Delta t} \right) \quad (3.4)$$

由能量平衡得

$$q_W + q_E + q_N + q_S = E_{st} \quad (3.5)$$

將(3.3)及(3.4)帶入(3.5)式中得

$$\begin{aligned} &\left[ 1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F}{(\Delta r)^2} \right] \cdot T_P^{n+1} - \frac{F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2} \cdot T_N^{n+1} - \frac{F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2} \cdot T_S^{n+1} \\ &- \frac{F}{(\Delta z)^2} \cdot T_W^{n+1} - \frac{F}{(\Delta z)^2} \cdot T_E^{n+1} = T_P^n \end{aligned} \quad (3.6)$$



其中  $F = \frac{k \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p} = \alpha \cdot \Delta t$ 。將方程程式進一步簡化為

$$a \cdot T_P^{n+1} + b \cdot T_W^{n+1} + c \cdot T_E^{n+1} + d \cdot T_N^{n+1} + e \cdot T_S^{n+1} = f \quad (3.7)$$

參照此方法可推導得所有格點類型的離散方程式，而其他邊界點之離散方程式之係數如表一所示，而邊界部份則以顯性(explicit)法來處理。

### 3-2 計算輓體熱膨脹

計算輓體熱膨脹是由各格點因溫度差異而造成的變形量總和，考慮輓體內部格點之控制體積如圖八，控制體積之徑向熱膨脹量為下式所示：

$$\Delta r' = \varepsilon \cdot \Delta r \cdot (T - T_0) \quad (3.8)$$

其中  $T_0$  為初始溫度， $\varepsilon$  為熱膨脹係數(thermal expansion coefficient)。而輓體徑向總熱膨脹量可由各格點之變形量總和而得，如下式所示：

$$R' = \sum_{i=1}^n \Delta r' = \sum_{i=1}^n \varepsilon \cdot \Delta r \cdot (T - T_0) \quad (3.9)$$

其中  $n$  為輓體內部控制體積數目。

輓體的物理模型具有軸對稱的特性，故輓體直徑總熱膨脹量可以下式來表示：

$$D' = 2R' = 2 \sum_{i=1}^n \varepsilon \cdot \Delta r \cdot (T - T_0) \quad (3.10)$$

在此定義徑向平均溫度(bulk temperature)如下式，藉此當作代表整體溫度分佈的參考值

$$T_{bulk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.11)$$

則輓體直徑總熱膨脹量可表示如下

$$D' = 2R' = 2\varepsilon \cdot R \cdot (T_{bulk} - T_0) \quad (3.12)$$

### 3-3 熱對流係數估算過程

由於熱對流係數無法直接測量，因此本研究是利用數值方法與實驗量測數據比較，以獲得所對應之熱對流係數。在數值計算的過程，假設工輓在冷卻的過程中，冷卻水以霧狀形式均勻噴灑至輓面上，故可將熱對流係數假設成一固定常數，而其求解步驟如下：

- (1) 輸入基本參數及定義初始條件。
- (2) 以猜值的方式給定熱對流係數為一固定常數  $h$ 。
- (3) 將(3.7)式以矩陣形式排列如下：

$$AX^{n+1} = B^n \quad (3.13)$$

使用 LU 法分解  $A$  矩陣，求解下一時階的溫度分佈，進行反覆疊代直到計算出量測時間點的輓體溫度分佈。

(4) 將數值計算之輓面溫度與實驗量測數據進行比對，計算其均方根誤差，定義如下：

$$\sigma = \sum_{i=1}^P \sqrt{\frac{(T_{mea} - T_{est})_i^2}{P}} \quad (3.14)$$

其中  $P$  為量測溫度數據之數目， $T_{mea}$  為測量溫度， $T_{est}$  為數值計算溫度。

(5) 重複步驟(2)直到獲得最小均方根誤差所對應之最佳熱對流係數。

### 3-4 初始條件之模擬



在熱傳問題中，若有一邊界條件或初始條件未知，則該問題便無法直接求解。由於中鋼熱軋製程計算程式相當費時，為了建立有效且快速的冷卻反應系統，故不使用中鋼熱軋製程計算程式進行模擬，此時便無法得知熱軋後工輓之輓溫分佈以當作初始條件，因此吾人嘗試藉由曲線擬合(Curving Fitting)之方法，將所計算出工輓在熱軋製程結束後之溫度分佈，於各量測位置之  $r$  方向輓溫分佈以多項式形式取代，由量測輓體表面溫度，便可得知工輓  $r$  方向輓溫分佈，如(3.15)式所示：

$$T_i(r_n) = T_{0,i} + \sum_{m=1}^P C_{m,i} (r_n - R)^m \quad (3.15)$$

其中  $i$  為軸向量測溫度數據之數目， $T_0$  為量測之輓面溫度， $r_n$  為徑向所取格點位置， $R$  為輓體半徑， $C_{m,i}$  為多項式之係數， $P$  為多項式之項數。



# 第四章

## 結果與討論

本章討論熱軋製程結束後，工作輓體從基座拆卸下，分別經過空氣冷卻以及噴水冷卻的過程後，內部溫度變化以及熱傳現象，並利用實驗量測數據與數值方法來估算各冷卻過程所對應之熱對流係數。此外，吾人利用曲線擬合(Curve Fitting)方法模擬工輓軋延結束後之輓溫分佈，作為模擬冷卻過程中之初始條件，以節省程式計算時間。



### 4-1 實驗量測數據

中鋼公司在實際的熱軋製程結束後，必須將 7 座輓輪組全部取下置於冷卻槽進行噴水冷卻，以避免工輓因高溫膨脹而毀損。本實驗於熱軋製程結束後，同時選取第二、四及五基座之上工輓作為空冷實驗之量測目標。圖九~十一為各量測時間點工輓的(a)輓面溫度及(b)徑向熱膨脹量變化，由圖可觀察出工輓於軋延結束後，大量的熱集中在中央鋼帶接觸區域，在冷卻約三小時後，熱量逐漸往兩側方向傳遞，造成工輓頸部溫度些微上升，之後輓面溫度隨時間增加而緩慢下降；且在空氣冷卻的狀態下，工輓需要相當久的冷卻時間

溫度才能趨於穩態。由圖九~十一(b)可觀察出工輓在熱軋過程中，輓面與鋼帶接觸區域受高壓變形及磨耗已造成凹陷。第五基座之上工輓(圖十一(b))因材質及硬度的不同，其耗損程度較第二、四基座之上工輓(圖九~十(b))更為嚴重。

在水冷實驗方面，選取在三個不同熱軋製程中，第二基座之上工輓作為量測目標，量測的輓面溫度分佈結果依照冷卻時間不同如圖十二、十三~十四(a)所示，而工輓的徑向熱膨脹量變化如圖十三~十四(b)所示。由圖可知工輓在噴水冷卻進行 15 分鐘(圖十二)及 21 分鐘(圖十三(a))後，冷卻水並無法完全將內部的熱量移除，因此工輓從冷卻槽移出放置軋延現場的環境中再次進行空氣冷卻時，內部的熱量逐漸向外傳遞，造成表面有回溫現象發生。而噴水冷卻進行 50 分鐘(圖十四(a))後，可觀察出工輓溫度已趨於穩態。

## 4-2 估算熱對流係數

考慮工輓之幾何模型如圖二所示，散熱方式僅考慮熱對流效應，配合中鋼公司所提供的資料，對輓體  $z$  方向依照尺寸不同分別取 89~113 個計算格點， $r$  方向取 16 個格點。所需輸入工輓之基本物理參數如表二所列，將未知熱對流係數進行猜值，以獲得數值方法所模擬出工作輓體之溫度分佈；再將計算出之數值與實驗數據比對，計算最小均方根誤差，以估算所對應的熱對流係數。

#### 4-2-1 空冷熱對流係數

考慮工輓在空氣中冷卻約 26 小時，其中取五個時間點之輓溫分佈來進行估算所對應熱對流係數。圖十五(a)為第二基座之上工輓在四個時間點所猜值熱對流係數與均方根誤差之關係，而圖十五(b)為量測數據與所對應熱對流係數計算出之輓面溫度比較。由圖十五可知所對應熱對流係數大約分佈在  $9\sim 12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  的範圍之間。

圖十六(a)為第四基座之上工輓在四個時間點所猜值熱對流係數與均方根誤差之關係，圖十六(b)為量測數據與所對應熱對流係數計算出之輓面溫度比較。由圖十六可知所對應之熱對流係數大約分佈於  $9\sim 12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  的範圍之間。

圖十七(a)為第五基座之上工輓在四個時間點所猜值熱對流係數與均方根誤差之關係，圖十七(b)為量測數據與所對應熱對流係數計算出之輓面溫度比較，由圖十七(b)可知所對應熱對流係數大約分佈在  $15\sim 19\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  之間。第五基座之上工輓由於擺放位置靠近通風口處，故熱對流係數會略高於第二及四基座之熱對流係數。

綜合以上結果顯示，工作輓體在空氣自然對流冷卻過程中，熱對流係數大約分佈在  $9\sim 12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  或  $15\sim 19\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  之間，此結果可作為日後模擬工輓在空氣自然對流冷卻的狀態下，熱對流係數採用範圍之依據。



## 4-2-2 水冷熱對流係數

工輓於熱軋製程結束後，經過之冷卻程序依序為空冷、水冷及再次空冷，因此在估算水冷熱對流係數前，空冷過程之熱對流係數採用先前所估算之最佳值，再利用猜值方法估算水冷熱對流係數，其結果可由圖十八(a)及十九(a)所示。圖十八(a)及圖十九(a)分別表示為編號 H1044 之上工輓噴水冷卻 21 分鐘後，編號 U1034 之上工輓噴水冷卻 50 分鐘後，所猜值熱對流係數與均方根誤差之關係，圖十八(b)及十九(b)分別表示為量測數據與所對應熱對流係數計算出之輓面溫度比較，由圖中可知所對應之熱對流係數大約分佈於  $1800\sim 2000\text{ W/m}^2\text{ K}$  之間。Tseng *et al.*(1989)所得之研究成果中，工輓在非噴嘴直接噴灑區域內，且無核沸騰現象發生時，其熱對流係數大約分佈於  $1000\sim 2000\text{ W/m}^2\text{ K}$  的範圍之間，結果一致。

## 4-3 初始條件模擬結果

由於中鋼公司使用之軋延製程計算程式相當耗時，且在數值模擬過程中，初始條件對於整個暫態熱傳問題之影響會逐漸減弱，基於此特性，吾人嘗試利用曲線擬合方法，並配合(3.15)式之形式以量測軋延結束後之輓面溫度，估算出軋延製程後之輓溫分佈，當作模擬冷卻過程時的初始條件，大量節省程式計算時間。



圖二十為利用軋延製程計算程式，配合中鋼所提供之軋延數據，所模擬出熱軋結束後工輓內部溫度分佈。由於工輓在熱軋製程結束前，會經歷一小段時間的水冷過程，因此由圖可知在工輓表面與內部之間存在相當大的溫度梯度，此現象在高溫鋼帶與工輓之接觸面更加明顯。故工輓與高溫鋼帶接觸面溫度變化較劇烈區域，(3.15)式之多項式取至 16 項，而非鋼帶接觸面區域，多項式則選取至 8 項來進行模擬。圖二十一為編號 H1044 之上工輓溫度曲線模擬結果，圖中線條代表曲線擬合模擬之溫度曲線，符號代表程式所計算出之輓溫分佈，由圖可知利用曲線擬合可非常精確的模擬工輓溫度分佈。

此外，考慮工作人員在量測表面溫度時，因儀器或人為因素造成量測誤差，此時利用此方法所計算出之初始溫度分佈便不夠準確。以第二基座中編號 H1044 之上工輓為例，在此假設在輓面中心位置因量測溫度所產生之誤差為正負 5 度及正負 10 度，將誤差之初始條件載入進行模擬。圖二十二表示工輓置於空氣冷卻 15 分鐘後，輓面中心位置溫度分佈之誤差值，由圖可知，初始條件產生之溫度誤差隨著冷卻時間之增加而快速下降。故即使在量測時造成誤差，對之後進行模擬工輓冷卻過程之影響會隨著時間增加而減少。

此外，圖二十三(a)為工輓在熱軋製程結束後，置於空氣冷卻 50 分鐘，輓面中心位置在  $r$  方向之溫度變化圖，由圖可觀察出工輓於空氣冷卻約 10 分鐘後，徑向溫度並無明顯變化，實際計算其比爾特數( $Bi$ )，亦非常接近塊狀系統之條件。圖二十三(b)為最初 10 分鐘，以時間間隔每 100 秒觀察  $r$  方向之溫度變化，由圖可知在空氣冷卻

時，因為工輓內部熱傳導效應遠大於表面空氣熱對流效應，即為外部的熱對流熱阻遠大於內部的熱傳導熱阻，故在 $r$ 方向之溫度分佈可視為塊狀系統(lumped system)。根據此原理，在空氣冷卻約 200~300 秒之後，量測輓面溫度即可得知工輓內部溫度分佈，以作為模擬工輓在冷卻過程中的初始條件。



# 第五章

## 結論

本文藉由實驗量測數據與數值模擬的比較，估算工輓在實際熱軋製程結束後，從軋鋼機座取下置於空氣及噴水冷卻時的熱對流係數，並探討工輓在不同冷卻過程中的溫度分佈變化及熱傳行為。綜合前一章的結果，可得以下結論：

1. 空氣熱對流係數：將第二、四及五基座之上工輓置於中鋼公司實際軋延環境中進行空氣冷卻 26 小時後，以數值模擬工輓冷卻時之溫度變化並與量測數據比較，估算出空氣熱對流係數大約介於  $9\sim 12\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  或  $15\sim 19\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  之間。
2. 工輓在熱軋製程結束後，置於空氣冷卻的過程中，由於空氣熱對流係數相當小，造成表面熱對流效應遠小於工輓內部熱傳導效應，因此工輓置於空氣冷卻約 200~300 秒後，可將  $r$  方向溫度分佈視為塊狀系統(lumped system)。
3. 水熱對流係數：以數值模擬與量測數據進行比較，其冷卻水熱對流係數大約介於  $1800\sim 2000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  之間，與 Tseng *et al.*(1989)所得結果一致。
4. 工輓進行噴水冷卻 15 及 21 分鐘後，從冷卻槽移至軋延現場的環境中再次進行空氣冷卻時，因冷卻水無法完全將內部的熱量移除，

此時內部的熱量向外傳遞，造成輓面溫度有回溫的現象發生，Garcia-Gil 與 Colas(2000)亦發現此現象。而噴水冷卻進行 50 分鐘後，工輓溫度已趨近於室溫。



## 參 考 文 獻

- Cerni, S., 1961, “The temperature and thermal stress in the rolling of metal strip”, *Iron and Steel Engineer Year Book*, pp. 717.
- Garcia-Gil, G. and Colas, R., 2000, “Calculation of thermal crowning in work rolls from their cooling curves”, *International Journal of Tools and Manufacture*, vol. **40**, pp. 1977-1991.
- Haubitzer, W., 1974, “Steady-state temperature distribution in rolls”, *Arch. Eisenhuettenwes.*, vol. **46**, pp. 635-638
- Hogshead, T. H., 1967, “Temperature distribution in the rolling of metal”, *Ph. D. thesis, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, Pa.*
- Hsu, P. T., Chen, C. K. and Yang Y. T., 2000, “A three-dimensional inverse problem of estimating the surface thermal behavior of the working roll in rolling process”, *Trans. ASME journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. **122**, pp. 76-82
- Huang, C. H., and Tseng, A. A., 1995, “The estimation of surface thermal behavior of the working roll in hot rolling process”, *Int. J. heat Mass Transfer*, vol. **38**, No. **6**, pp.1019-1031
- Hwang, S. M., Joun, M. S. and Kang, Y. H., 1993, “Finite element analysis of temperature, metal flow, and roll pressure in hot strip rolling”, *Journal of Engineering for Industry, Tran. of the ASME*, vol. **115**, pp. 290-298.

- Lin, Z. C. and Chen, C. C., 1995, “Three-dimension heat-transfer and thermal-expansion analysis of the work roll during rolling”, *Journal of Material Processing Technology*, vol. **49**, pp. 125-147.
- Parke, D. M. and Baker, J. L. L., 1972, “Temperature effects of cooling work roll”, *Iron Steel Eng.*, vol. **49**, pp. 83-88.
- Patula, E. H., 1981, “Steady-state temperature distribution in a rotation roll subject to surface heat fluxes and convective cooling”, *J. Heat Transfer, Tran. ASME*, vol. **03**, pp. 36-41.
- Tseng, A. A., 1984, “Finite-difference solution for heat transfer in roll rotating at high speed”, *Numerical Heat Transfer*, vol. **7**, pp. 113-125.
- Tseng, A. A., Lin, F. H., Gunderia, A. S., and Ni, D. S., 1989, “Roll Cooling and Its Relationship to Roll Life”, *Metall. Trans. A*, Vol. **20**, pp. 2305-2320.
- Van Steden, C. and Tellman, J. G. M., 1984, “A new method of designing a work roll cooling system for improved productivity and strip quality”, *Proc. 4th Intl. Steel Rolling Conference: The Science and Technology of Flat Rolling*.
- Yuen, W. Y. D., 1984, “On the steady-state temperature distribution in a rotating cylinder subject to heating and cooling over its surface”, *submitted to J. Heat Transfer, Tran. ASME*, vol. **06**, pp. 578-585

江勝文，「熱軋製程中工輓之二維熱分析」，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，民國 94 年。

周弘仁，「熱軋鋼帶製程中工輓的熱分析」，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，民國 94 年。

謝秋傑，「工輓在熱軋製程及冷卻過程之熱分析」，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，民國 95 年。



表一 鞅體格點類型係數表

Point	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
0	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$T_P^n$
1	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{4F}{(\Delta r)^2}$	0	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{4F}{(\Delta r)^2}$	0	$\left(1 - \frac{2H}{\Delta z}\right) \cdot T_P^n + \frac{2H \cdot T_\infty(z, t)}{\Delta z}$
2、6	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F}{(\Delta r)^2}$	0	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$\left(1 - \frac{2H}{\Delta z}\right) \cdot T_P^n + \frac{2H \cdot T_\infty(z, t)}{\Delta z}$
3、7	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	0	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	0	$-\frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$\left[1 - 2H \cdot \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right)\right] \cdot T_P^n$ $+ 2H \cdot \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right) \cdot T_\infty(z, t)$
4、8、12	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	0	$-\frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$\left(1 - \frac{2H}{\Delta r}\right) \cdot T_P^n + \frac{2H \cdot T_\infty(z, t)}{\Delta r}$
5	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F \cdot (3 - \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$-\frac{2F}{3(\Delta z)^2}$	$-\frac{4F}{3(\Delta z)^2}$	$-\frac{2F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$-\frac{4F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$\left[1 - \frac{2H}{3} \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right)\right] \cdot T_P^n$ $+ \frac{2H}{3} \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right) \cdot T_\infty(z, t)$



9、13	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	0	0	$-\frac{2F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$\left[1 - 2H \cdot \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right)\right] \cdot T_P^n$ $+ 2H \cdot \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right) \cdot T_\infty(z, t)$
10、14	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	0	$-\frac{F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{(\Delta r)^2}$	$\left(1 - \frac{2H}{\Delta z}\right) \cdot T_P^n + \frac{2H \cdot T_\infty(z, t)}{\Delta z}$
11	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{2F \cdot (3 - \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$-\frac{4F}{3(\Delta z)^2}$	$-\frac{2F}{3(\Delta z)^2}$	$-\frac{2F \cdot (1 + \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$-\frac{4F \cdot (1 - \Delta r / 2r)}{3(\Delta r)^2}$	$\left[1 - \frac{2H}{3} \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right)\right] \cdot T_P^n$ $+ \frac{2H}{3} \left(\frac{1}{\Delta z} + \frac{1}{\Delta r}\right) \cdot T_\infty(z, t)$
15	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{4F}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{2F}{(\Delta z)^2}$	0	$-\frac{4F}{(\Delta r)^2}$	0	$\left(1 - \frac{2H}{\Delta z}\right) \cdot T_P^n + \frac{2H \cdot T_\infty(z, t)}{\Delta z}$
16	$1 + \frac{2F}{(\Delta z)^2} + \frac{4F}{(\Delta r)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{F}{(\Delta z)^2}$	$-\frac{4F}{(\Delta r)^2}$	0	$T_P^n$

續表一

其中  $H = \frac{h(z, t) \cdot \Delta t}{\rho \cdot c_p}$

表二 工作輓體之熱物性質表

Thermal conductivity ( $k$ )	29.82 $W / mK$
Volumetric heat capacity ( $\rho \cdot C_p$ )	39661000 $J / m^3 K$
Thermal diffusivity ( $\alpha$ )	$7.5187 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / s$
Coefficient of thermal expansion ( $\varepsilon$ )	$1.211 \times 10^{-5} \text{ 1} / K$





圖一 工作輥輪噴水冷卻圖

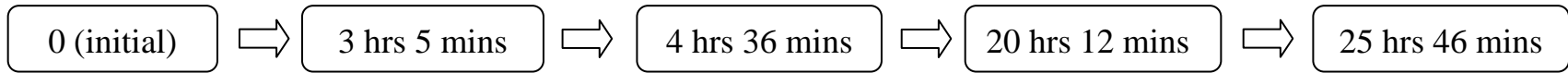


圖二 輓徑量測器

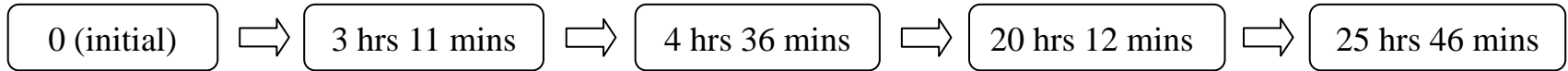


圖三 實際量測輥徑及溫度圖

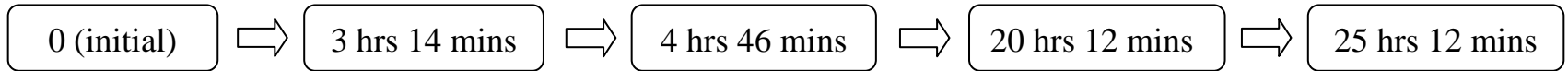
F2 H1041



F4 52008



F5 B2739



量測時間點

量測時間點

量測時間點

量測時間點

量測時間點

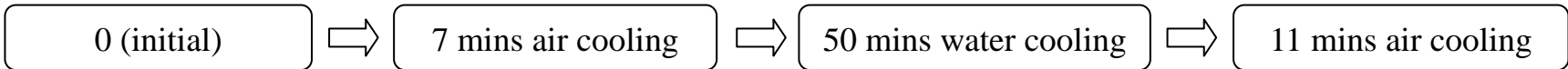


(a)

F2 H1044



F2 U1034

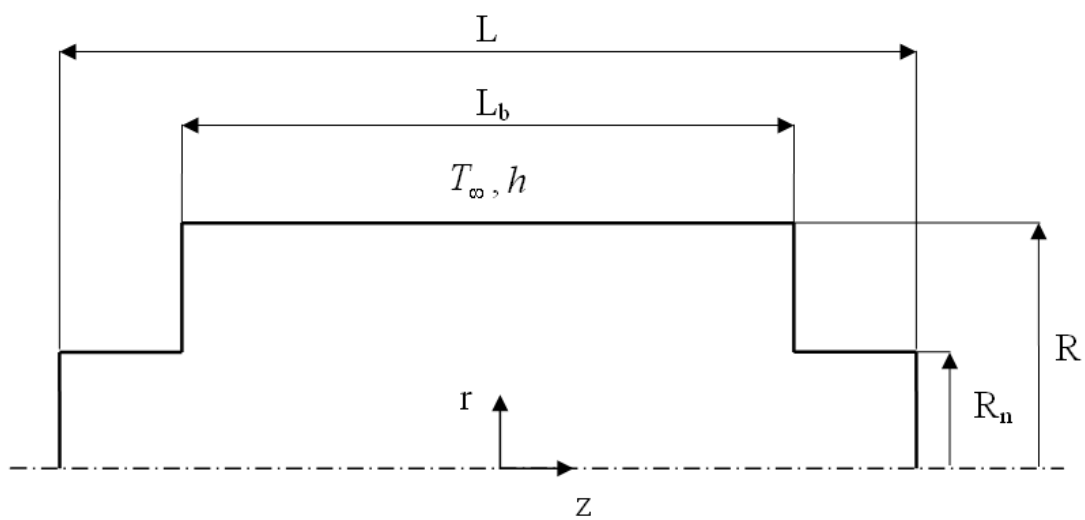


量測時間點

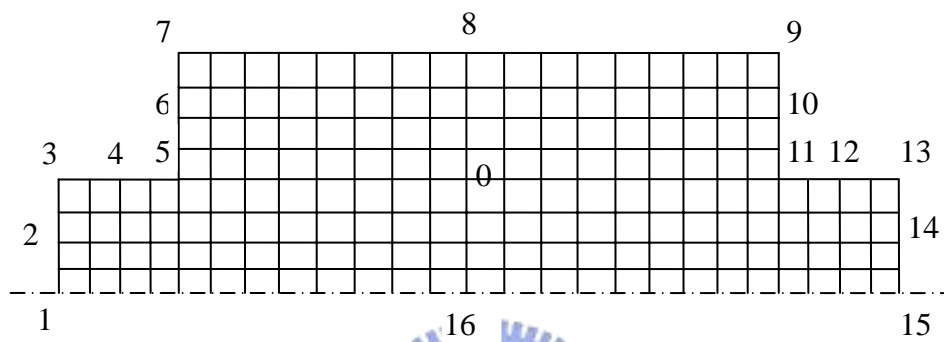
量測時間點

(b)

圖四 工輓量測時間點之流程圖 (a)空氣冷卻 (b)噴水冷卻



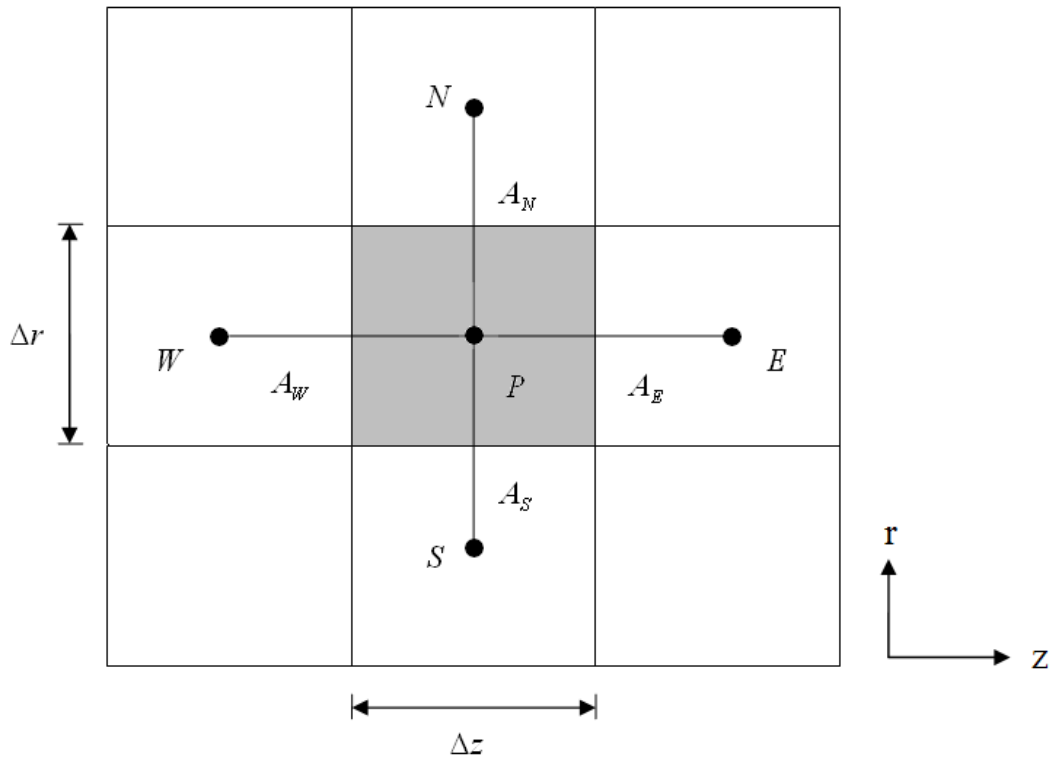
圖五 軸對稱工軋模型示意圖



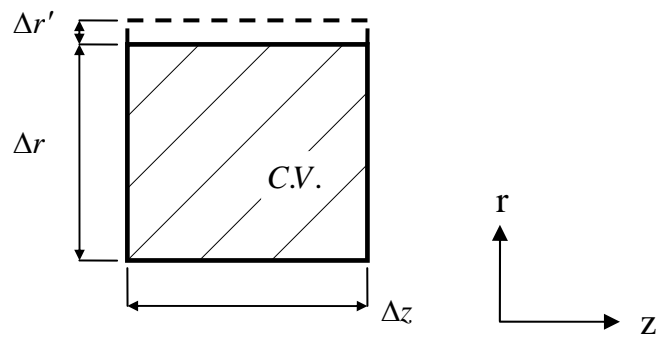
圖六 報體格點類型圖





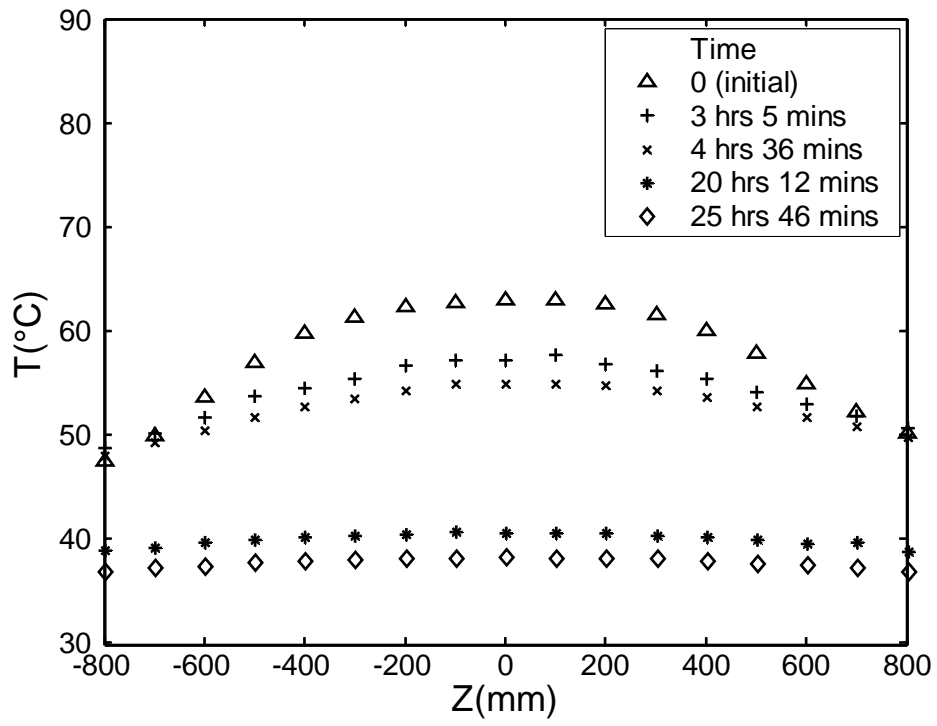


圖七 輓體內部格點取控制體積示意圖

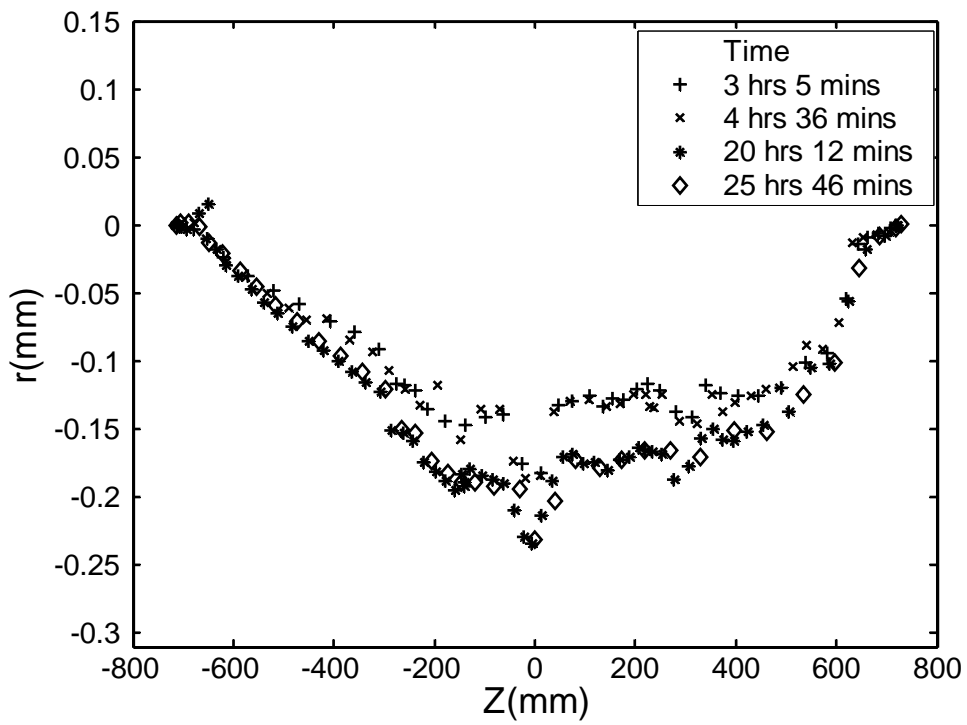


圖八 軛體內部格點取控制體積之熱膨脹模型



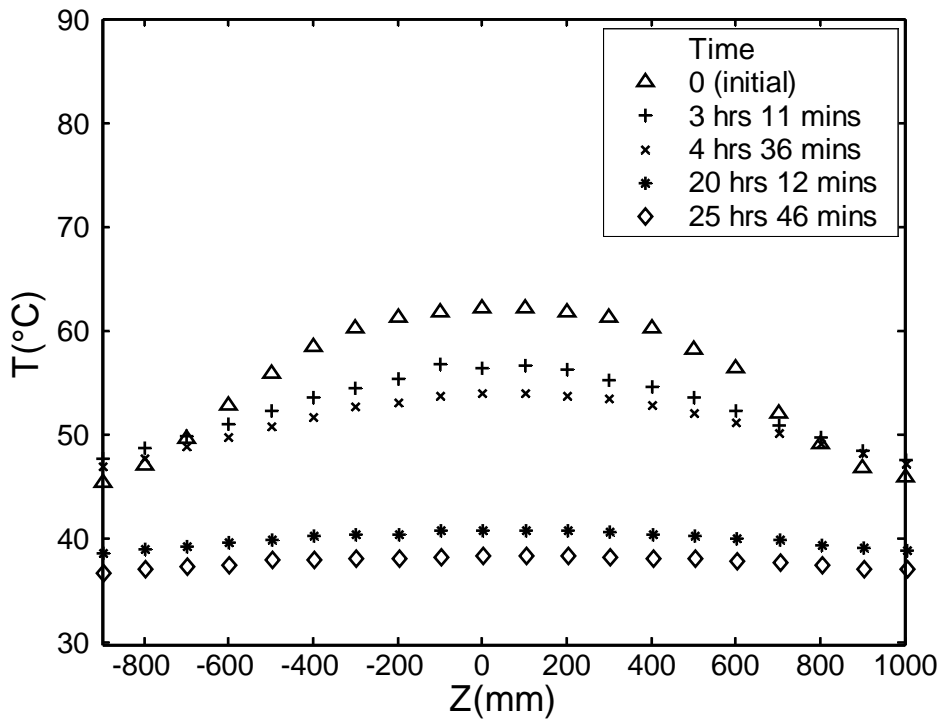


(a)

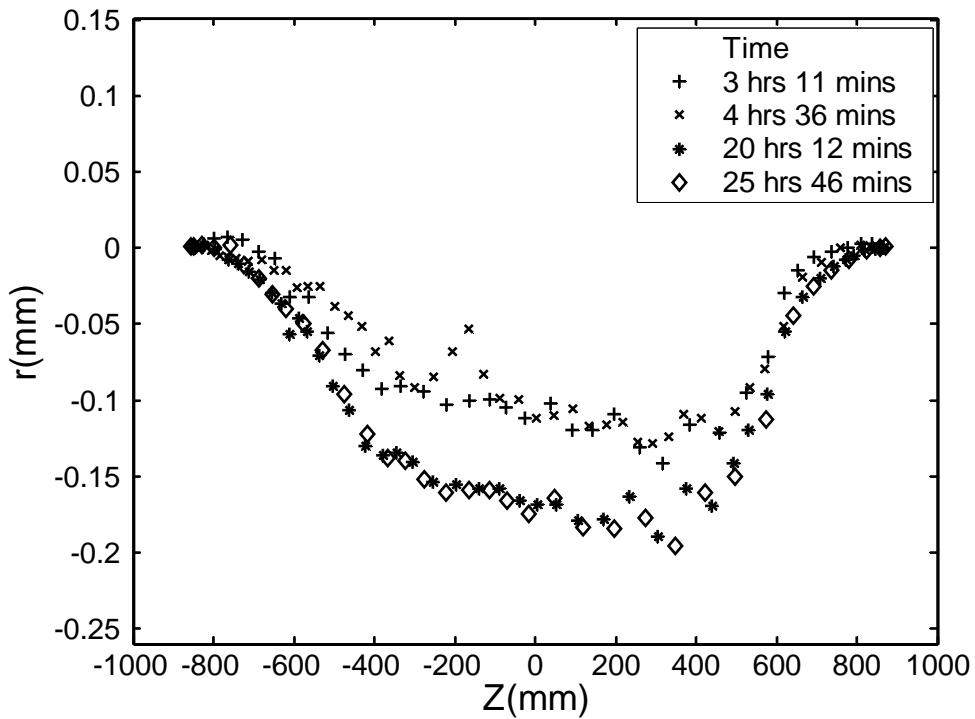


(b)

圖九 第二基座 F2 H1041 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b) 徑向熱膨脹量測圖

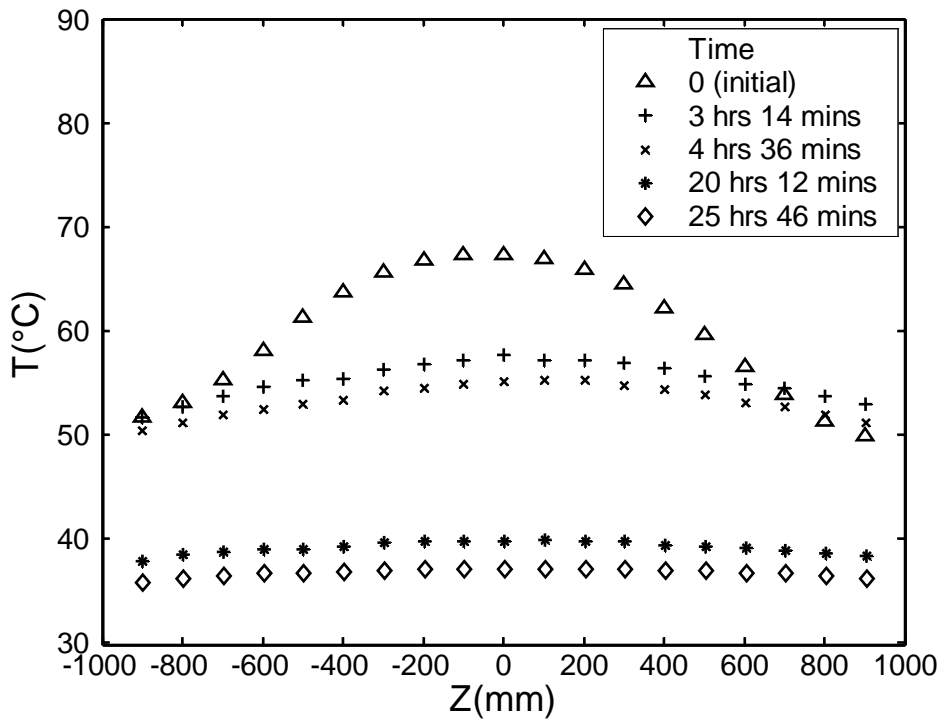


(a)

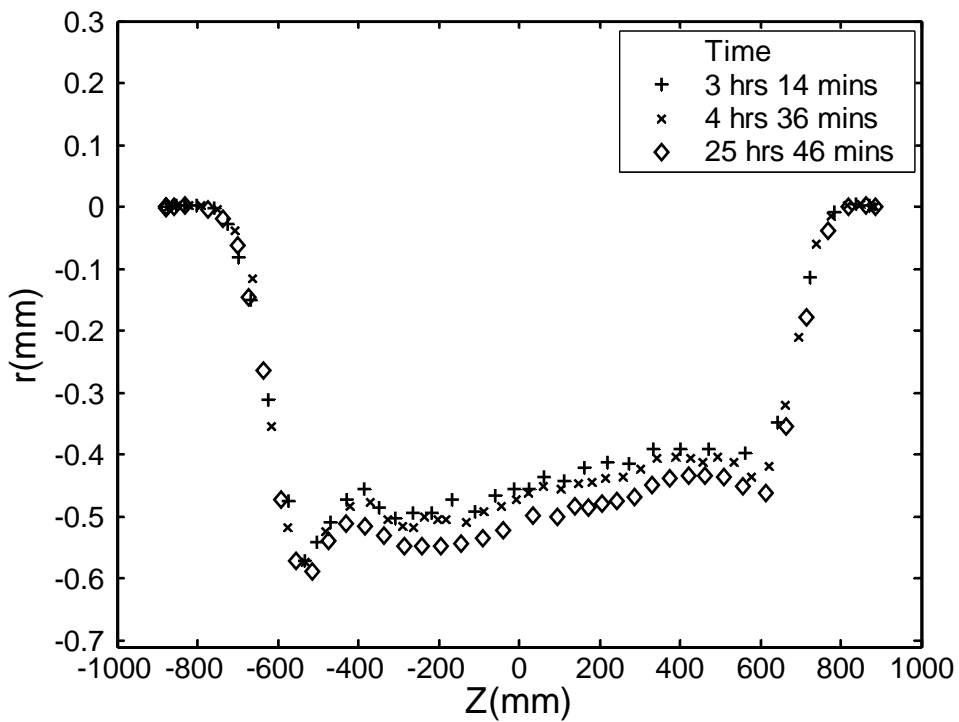


(b)

圖十 第四基座 F4 52008 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b)徑向熱膨脹量測圖

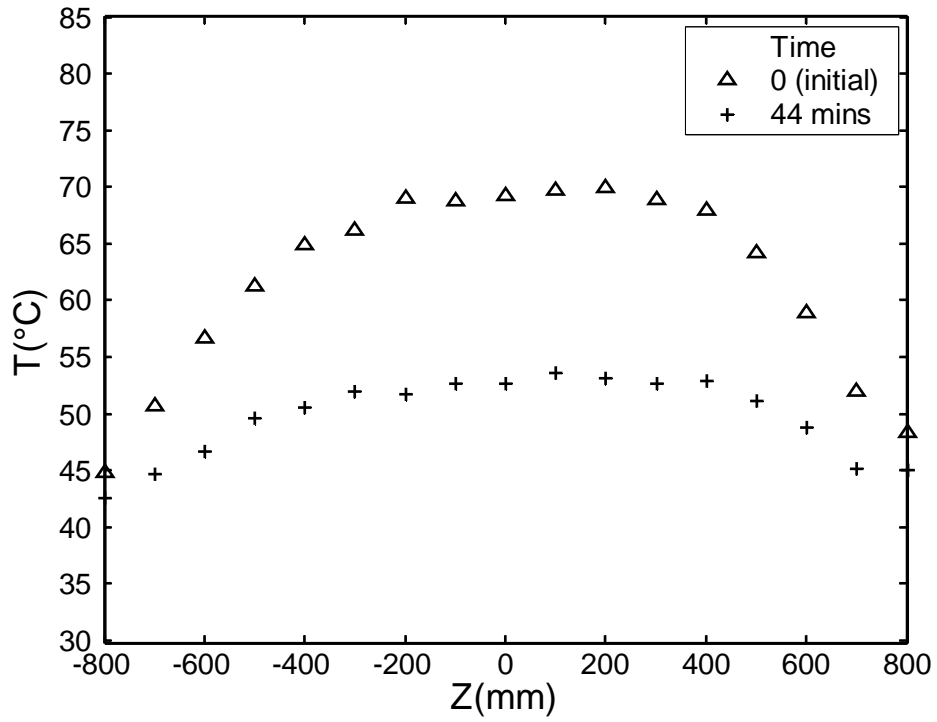


(a)

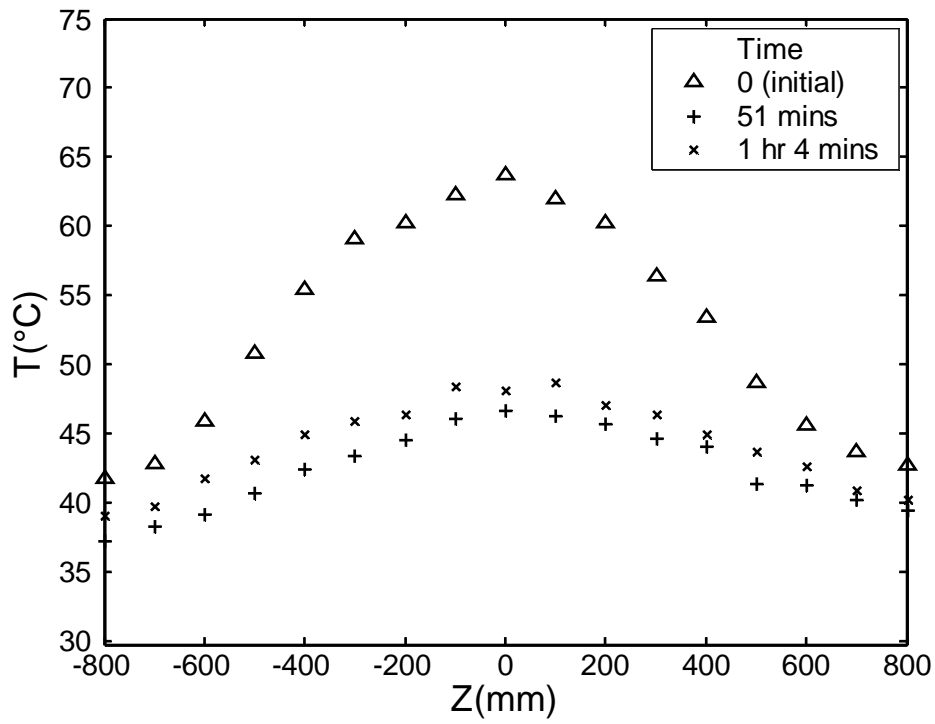


(b)

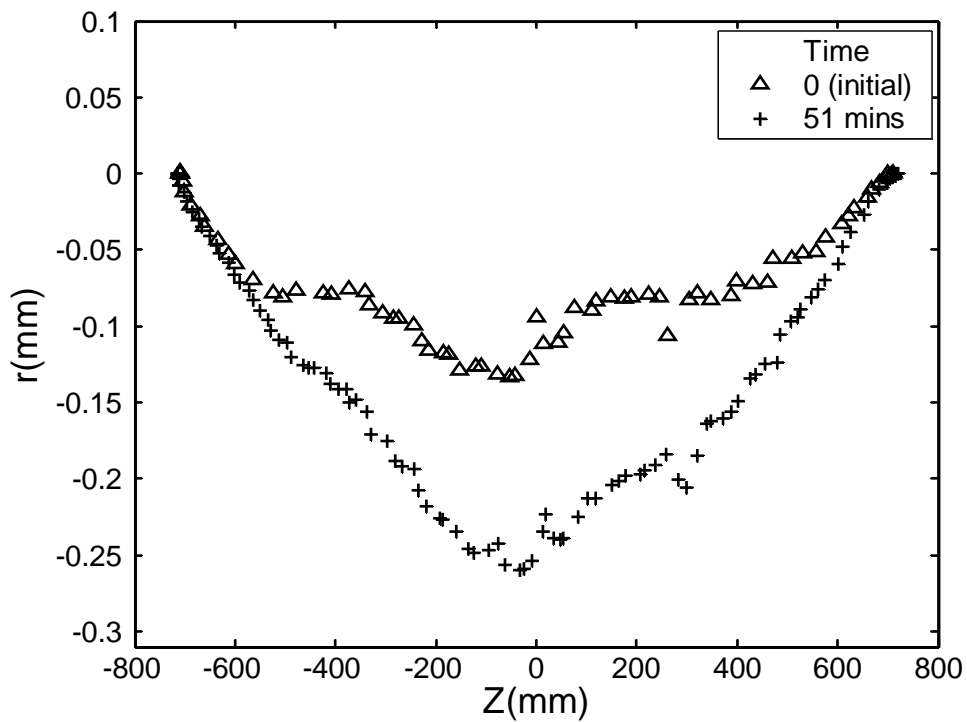
圖十一 第五基座 F5 B2739 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b)徑向熱膨脹量測圖



圖十二 第二基座 F2 H1037 之上工輓輓面溫度分佈量測圖(軋延結束後依序經過空冷 9 分鐘，水冷 15 分鐘，空冷 20 分鐘)

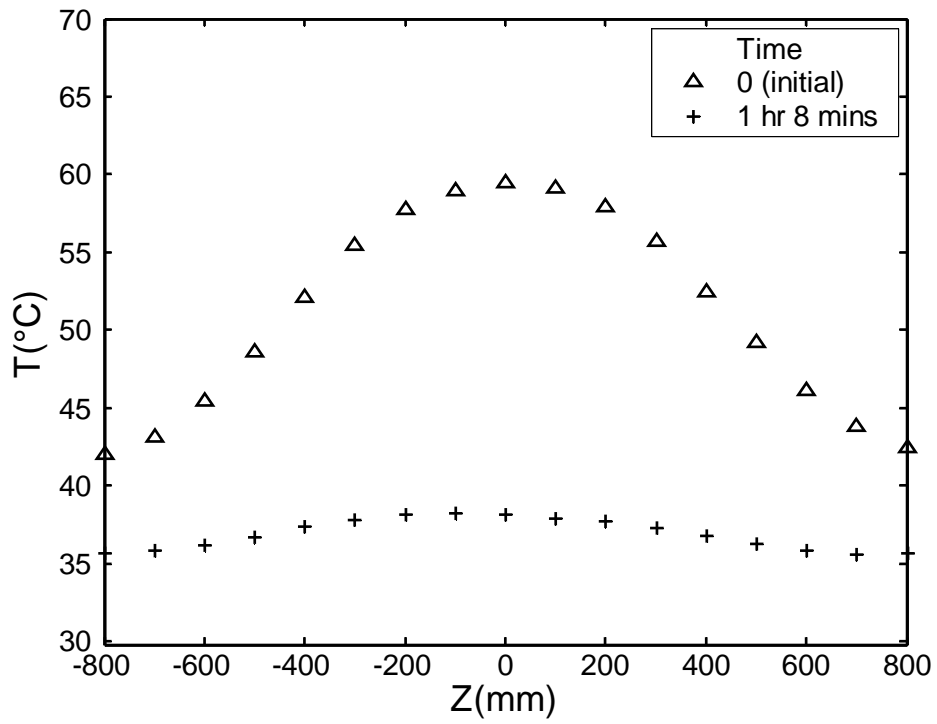


(a)

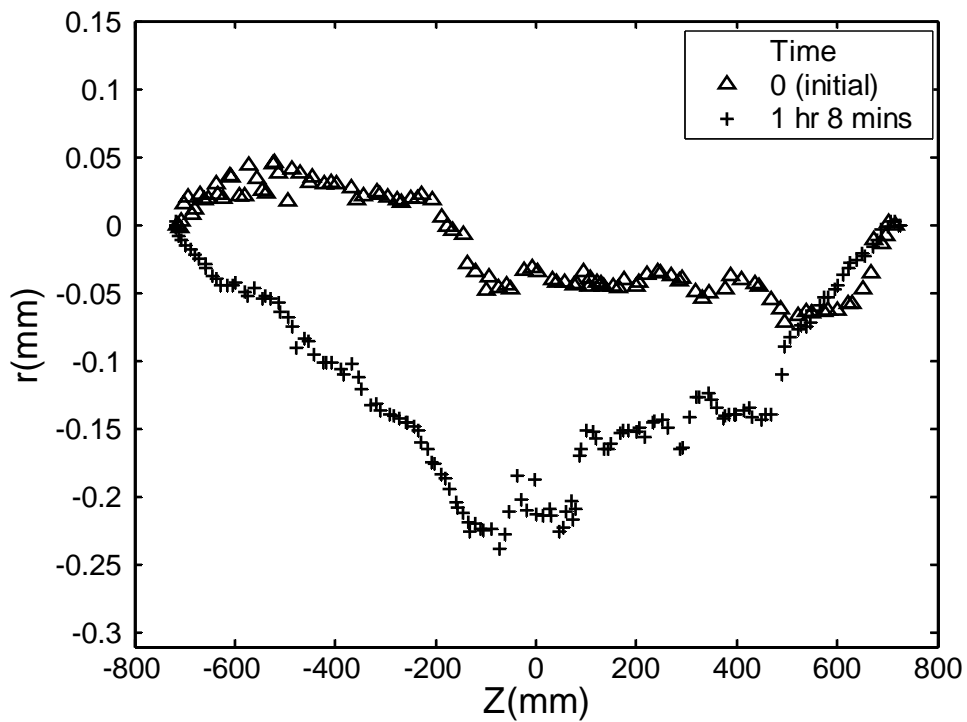


(b)

圖十三 第二基座 F2 H1044 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b)徑向熱膨脹量測圖 (輓延結束後依序經過空冷 15 分鐘，水冷 21 分鐘，空冷 15 分鐘)



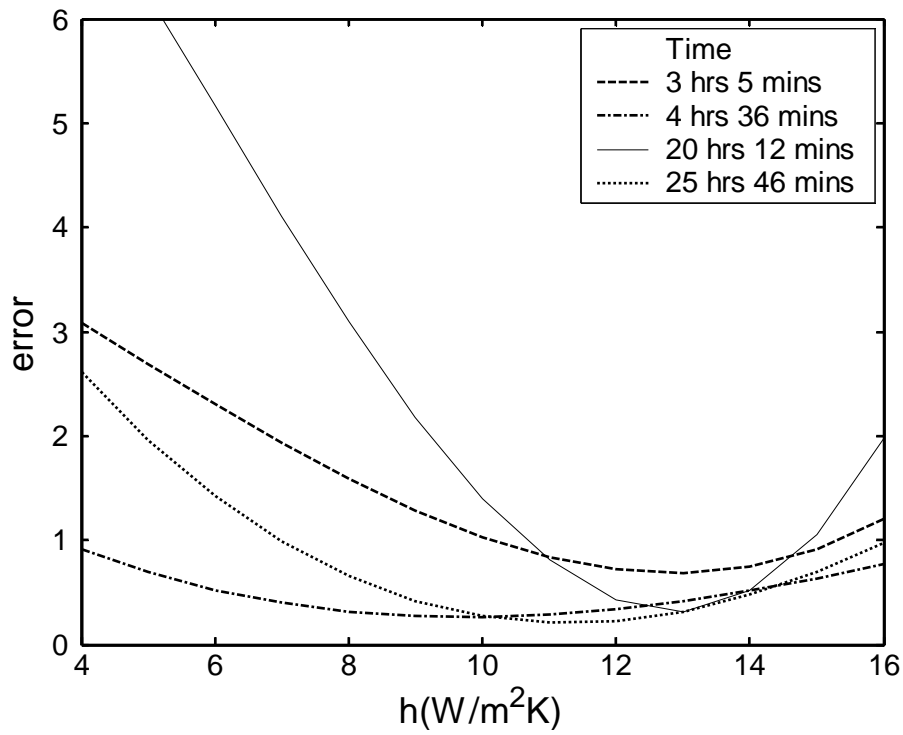
(a)



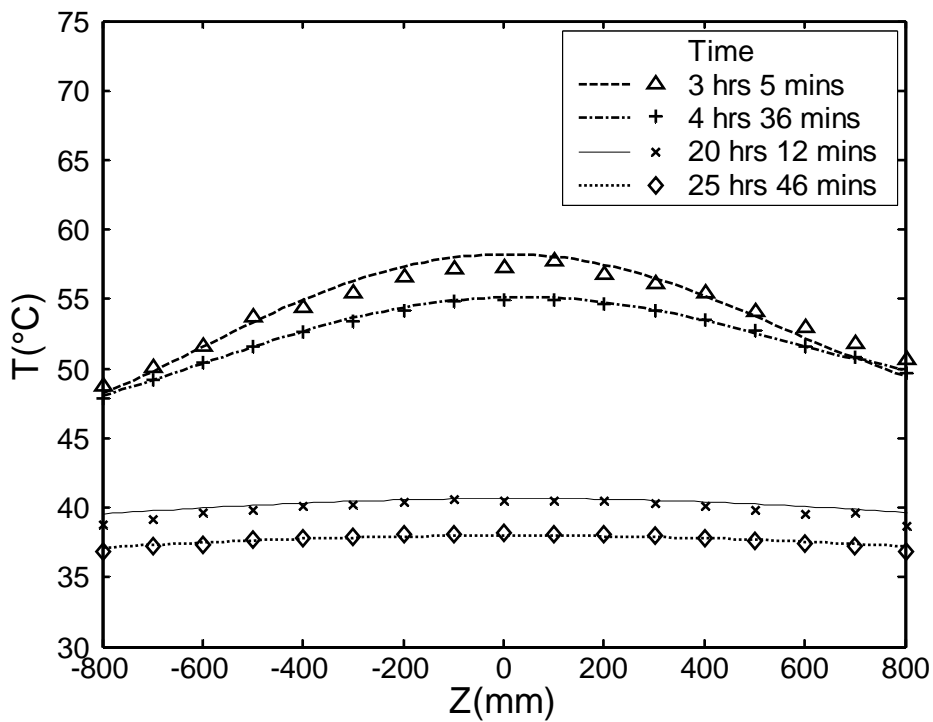
(b)

圖十四 第二基座 F2 U1034 之上工輓 (a)輓面溫度分佈量測圖 (b)徑向熱膨脹量測圖 (軋延結束後依序經過空冷 7 分鐘，水冷 50 分鐘，空冷 11 分鐘)



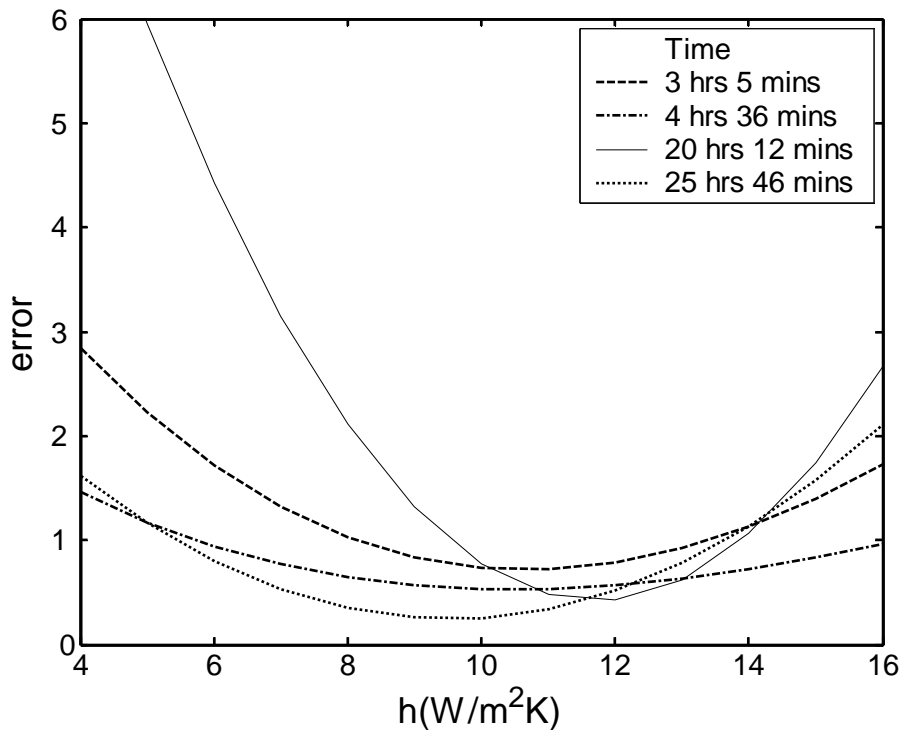


(a)

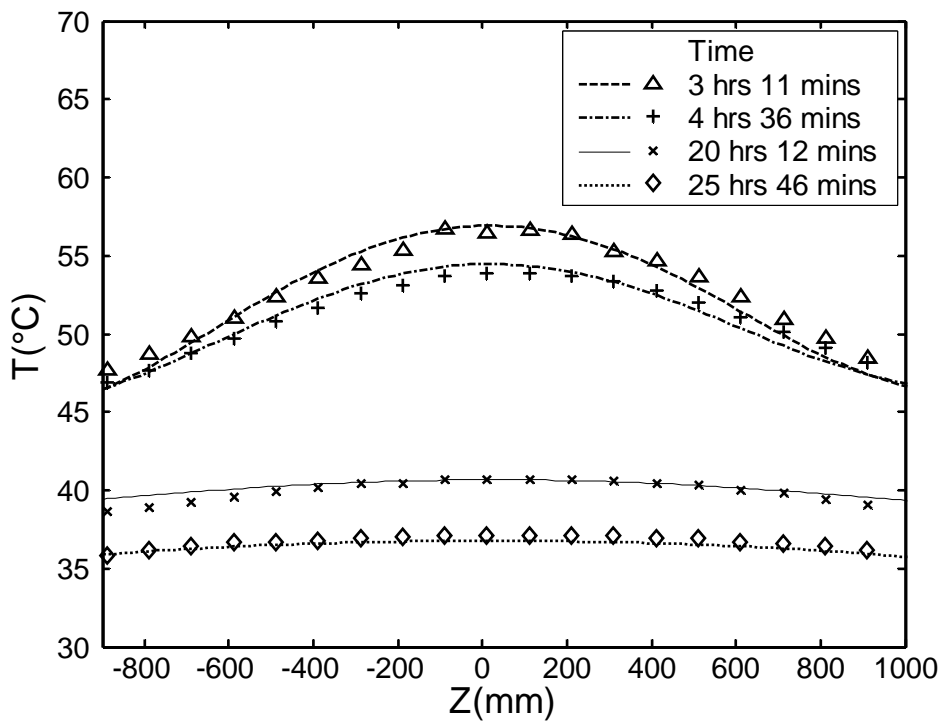


(b)

圖十五 第二基座 F2 H1041 之上工輓空冷狀態下 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈

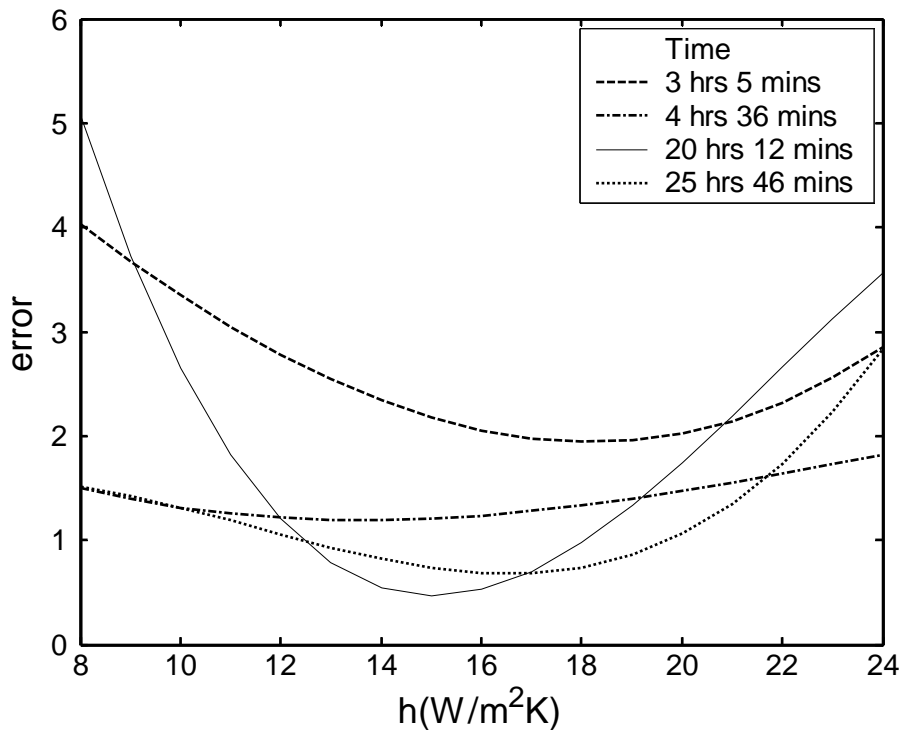


(a)

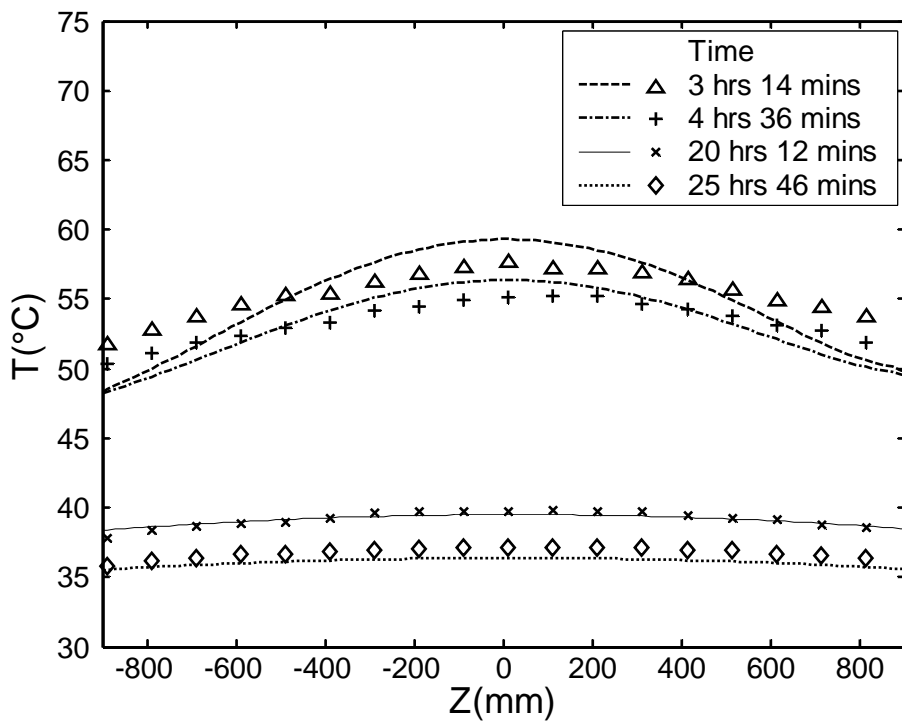


(b)

圖十六 第四基座 F4 52008 之上工輓空冷狀態下 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈

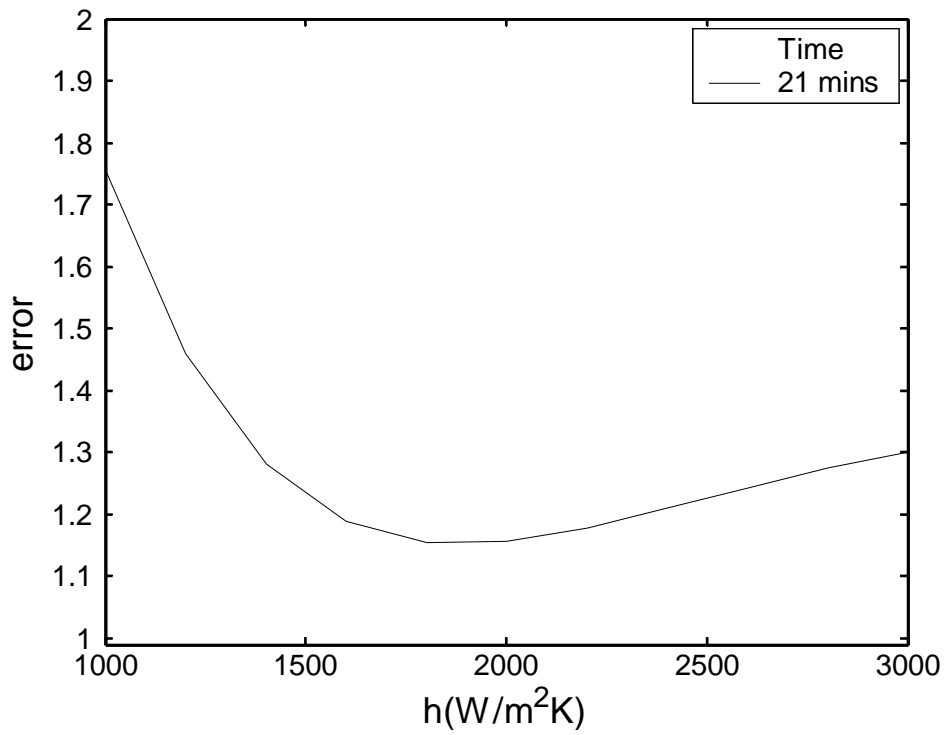


(a)

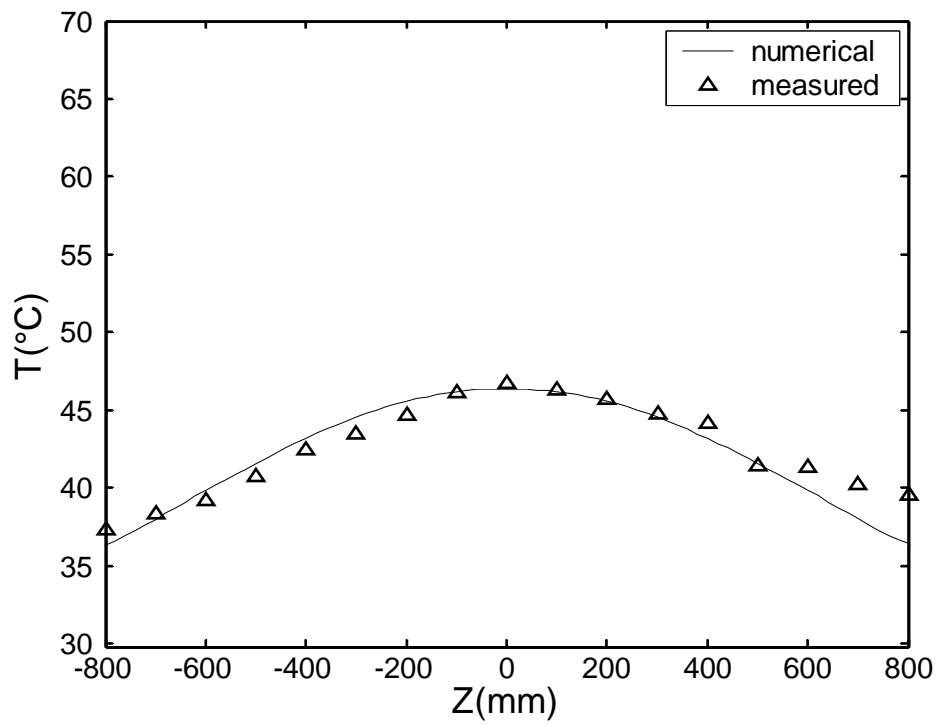


(b)

圖十七 第五基座 F5 B2739 之上工輓空冷狀態下 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈

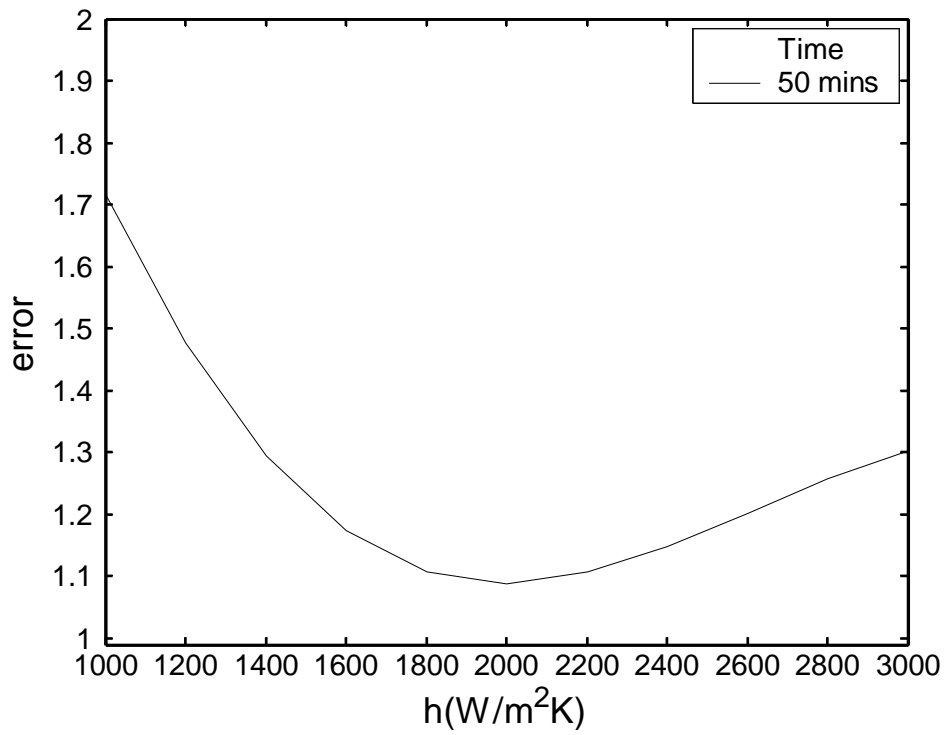


(a)

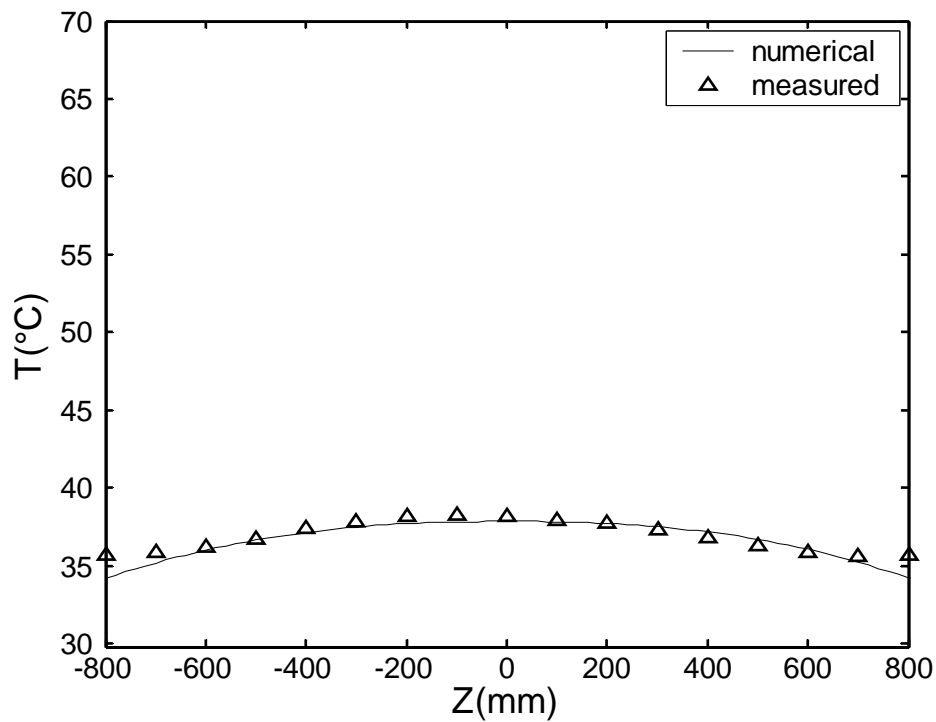


(b)

圖十八 第二基座 F2 H1044 之上工輓水冷 21 分後 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈( $h_w = 1800W / m^2 K$ )

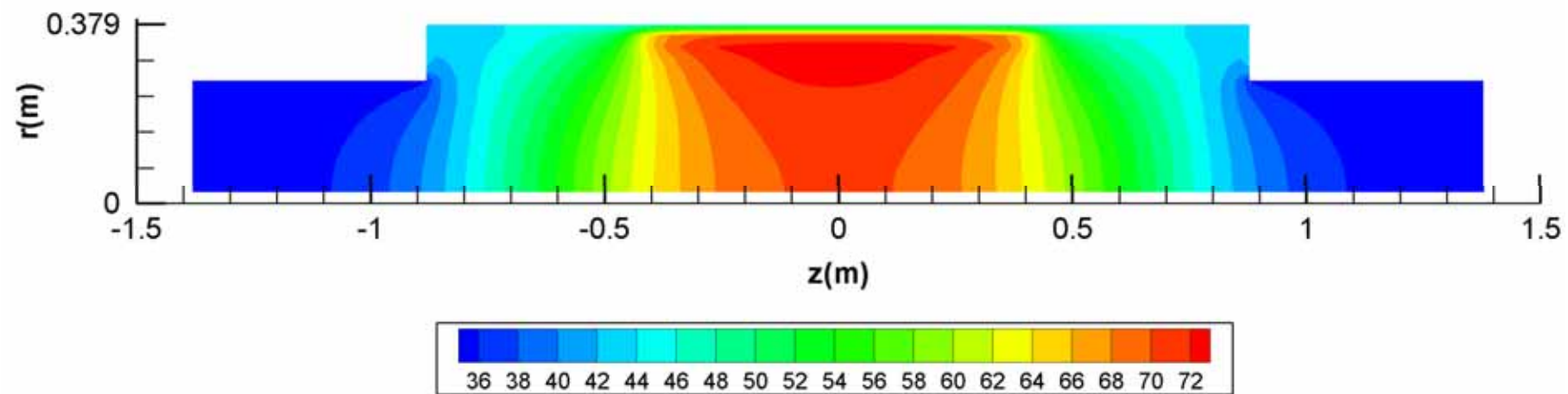


(a)

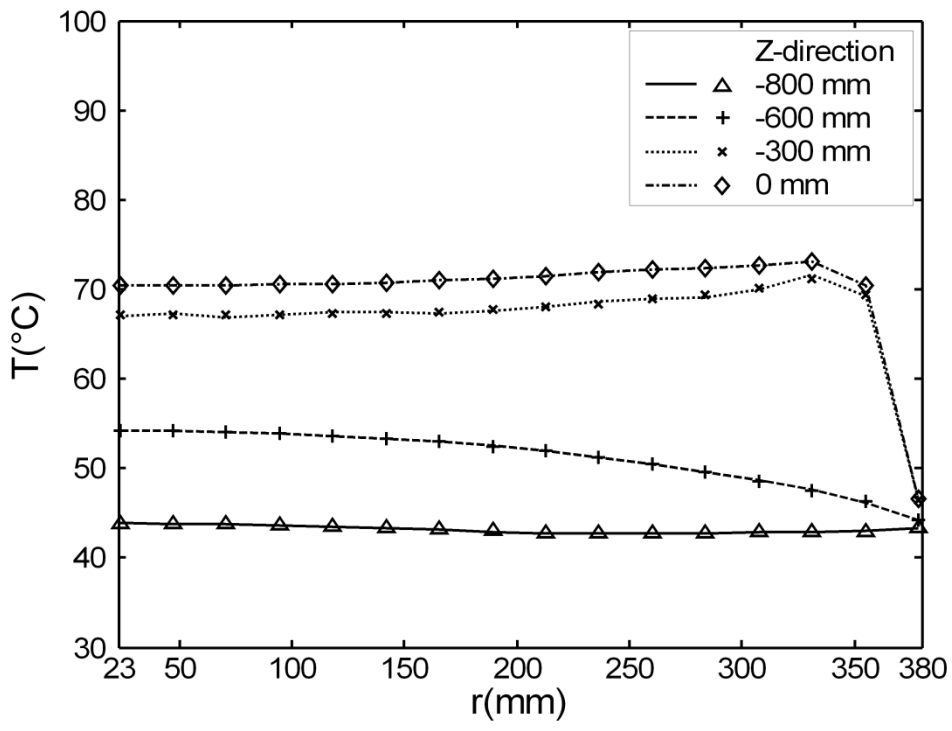


(b)

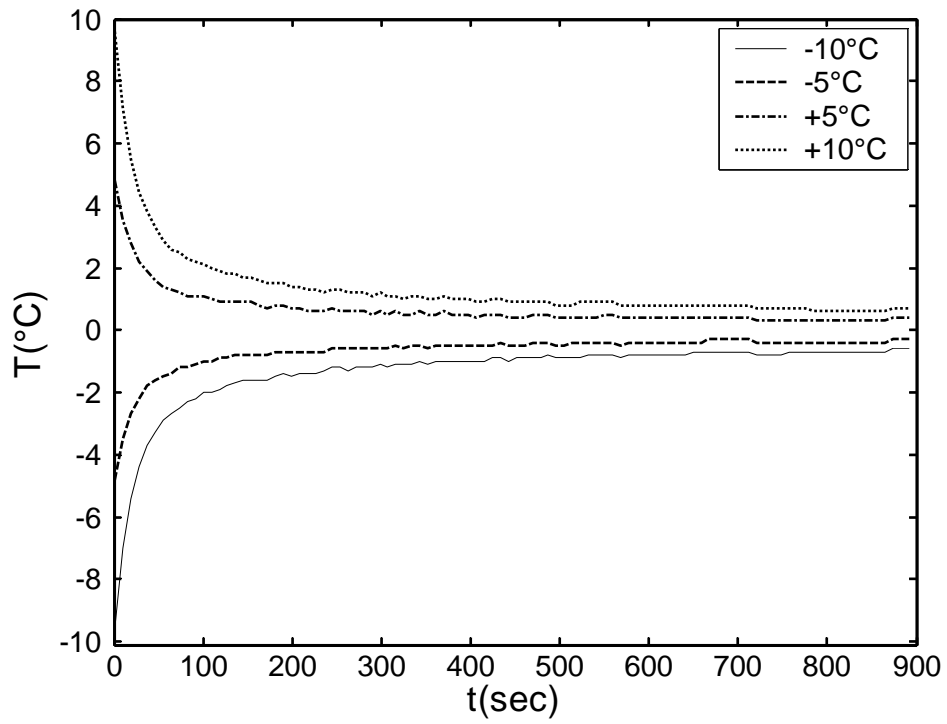
圖十九 第二基座 F2 U1034 之上工輓水冷 50 分後 (a)熱對流係數與均方根誤差關係 (b)輓面溫度分佈( $h_w = 2000W / m^2 K$ )



圖二十 第二基座 F2 H1044 之上工軋軋延結束後軋體溫度分佈圖

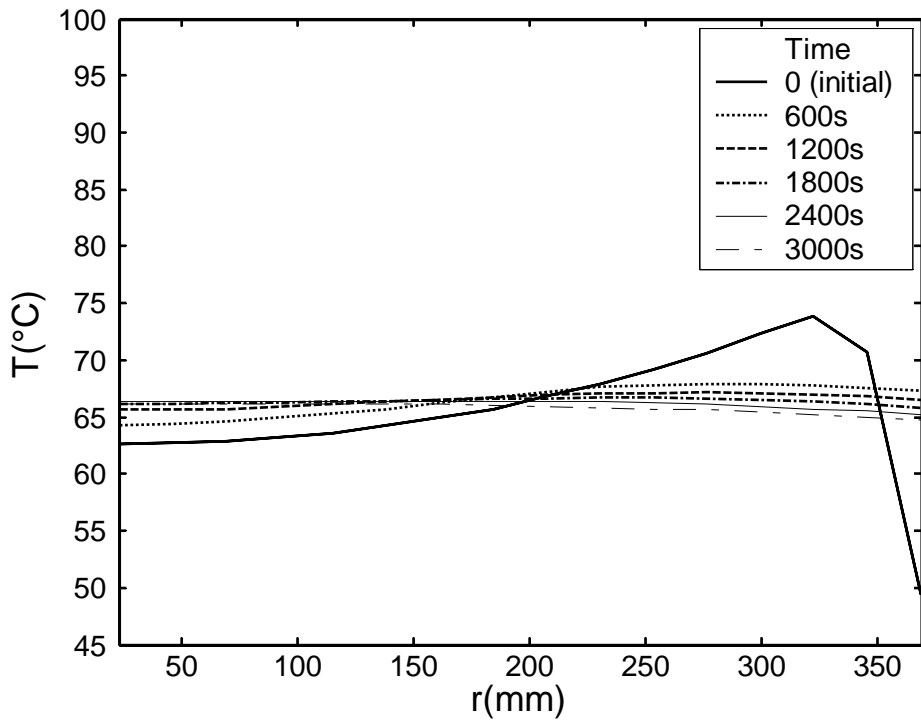


圖二十一 第二基座 F2 H1044 之上工輓徑向溫度曲線擬合與數值計算比較圖

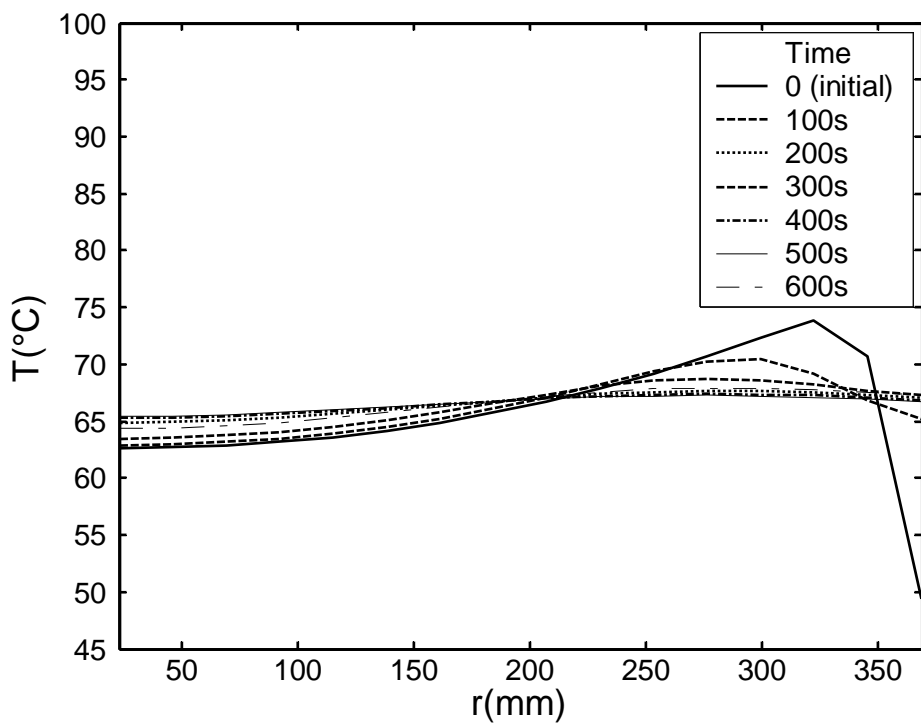


圖二十二 第二基座 F2 H1044 之上工輓輓面中心( $Z = 0 \text{ mm}$ )溫度變化圖





(a)



(b)

圖二十三 第二基座 F2 H1044 之上工輥軋延結束後工輥中心( $Z = 0$  mm)徑向溫度變化圖 空冷時間 (a)50 分鐘 (b)10 分鐘