

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

工輓在熱軋製程及冷卻過程中之熱分析

Thermal Analysis of Work Roll in Hot Rolling and Cooling Processes

研究生：謝秋傑

指導教授：楊文美 博士

中華民國九十五年七月

工輓在熱軋製程及冷卻過程中之熱分析

Thermal Analysis of Work Roll in Hot Rolling and Cooling Processes

研究生：謝秋傑

Student: Chiu-Chieh Hsieh

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 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic in China

中華民國九十五年七月

摘要

本文以數值方法探討工輓在熱軋製程及冷卻過程中之熱傳現象，首先建立一個二維軸對稱工作輓體的暫態物理模型，然後以隱性(implicit)有限體積法模擬工輓於中鋼實際操作環境中，包括週期性軋延過程及研磨前冷卻過程的溫度變化與直徑熱膨脹量大小，並探討不同參數對模擬結果的影響。

在週期性軋延過程部分，本文模擬工輓經過實際軋延過程的狀況。結果發現由於鋼帶在軋延過程中不會保持一固定位置，因此輓體溫度分佈會有平移的現象，且輓體於不同軋延週期中受到的加熱及冷卻條件均會有所變化，故輓體表面溫度分佈受不同邊界條件所影響，而直徑熱膨脹量所得結果大小受溫度分佈所決定，即整體溫度分佈高則熱膨脹量大，且結果會隨加熱週期數增加而成長。

在研磨前冷卻過程方面，本文分析不同對流熱傳係數對模擬結果的影響。結果發現因空氣的對流熱傳係數值相差不大，所得出輓體表面溫度分佈與直徑熱膨脹量大小結果相當接近，而水的對流熱傳係數值範圍較大，但因水冷時間足夠長，所以不同冷卻條件下的輓體表面溫度分佈及直徑熱膨脹量大小差距亦相當有限。

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、盧定昶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，同學啟豪以及學弟武伸、文山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.....	iv
圖目錄.....	v
符號說明.....	vii
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 研究目的.....	5
第二章 物理模式.....	7
2-1 統御方程式.....	7
2-2 初始條件.....	8
2-3 邊界條件.....	8
第三章 數值方法.....	11
3-1 軋體的離散方程式.....	11
3-2 數值計算過程.....	13
3-3 計算軋體熱膨脹.....	14
第四章 結果與討論.....	15
4-1 週期性軋延過程.....	15
4-1-1 溫度分析.....	16
4-1-2 熱膨脹變形量.....	17
4-2 研磨前冷卻過程.....	17
4-2-1 溫度分析.....	18
4-2-2 熱膨脹變形量.....	19
第五章 結論.....	20
參考文獻.....	21

表 目 錄

表 1	輓體格點類型係數表	24
表 2	中鋼 thermal 程式基本輸入參數	26
表 3	中鋼 thermal 程式輸出結果	28
表 4	冷卻流體之熱物性質表	30
表 5	不同冷卻條件之對流熱傳係數表	30



圖 目 錄

圖 1	熱軋輓輪組示意圖	31
圖 2	軸對稱工輓模型示意圖	32
圖 3	輓體格點類型圖	33
圖 4	輓體內部格點取控制體積示意圖	34
圖 5	輓體內部格點取控制體積之熱膨脹模型	35
圖 6	工輓基本幾何尺寸示意圖	36
圖 7	121805b 組軋延過程，每座軋鋼輓體於第 40 軋延週期中加熱 結束後之軸向溫度分佈圖	37
圖 8	輓體於第 10 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度 分佈圖.....	38
圖 9	輓體於第 20 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度 分佈圖.....	39
圖 10	輓體於第 40 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度 分佈圖.....	40
圖 11	輓體於最後第 47 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向 溫度分佈圖.....	41
圖 12	輓體表面中心點處(z=0)溫度隨軋延週期個數變化圖	42
圖 13	輓體於第 10 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖	43
圖 14	輓體於第 20 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖	44
圖 15	輓體於第 40 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖	45
圖 16	輓體於最後第 47 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖	46
圖 17	輓體於不同軋延週期中加熱結束後，直徑熱膨脹量分佈圖	47
圖 18	輓體表面中心點處(z=0)於每個軋延週期中加熱結束時，直徑 熱膨脹量變化圖	48
圖 19	輓體分別於空冷($h_a=3W/m^2K$)、水冷($h_w=6000W/m^2K$)結束時的 表面溫度分佈圖.....	49
圖 20	輓體於不同空氣冷卻條件下之表面溫度分佈圖	50

圖 21	輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之表面溫度分佈圖	51
圖 22	輓體中心表面處溫度及徑向平均溫度隨冷卻時間變化圖，其中固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{W/m}^2\text{K}$)..	52
圖 23	輓體分別於空冷($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)、水冷($h_w=6000\text{W/m}^2\text{K}$)結束時的直徑熱膨脹量分佈圖	53
圖 24	輓體於不同空氣冷卻條件下之直徑熱膨脹量分佈圖	54
圖 25	輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之直徑熱膨脹量分佈圖	55
圖 26	不同計算方式之輓體中心直徑熱膨脹量隨冷卻時間變化圖，其中固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{W/m}^2\text{K}$)	56



符 號 說 明

符 號

A	表面積
c_p	比熱
D	輓體直徑
D'	輓體直徑熱膨脹量
h	對流熱傳係數
g	重力加速度
k	熱傳導係數
M, N	z, r 方向取的格點數
Nu_D	Nusselt number
Pr	Prandtl number
R	輓體半徑
R'	輓體半徑熱膨脹量
Ra_D	Rayleigh number
Re_D	Reynolds number
r, z	輓體座標
T	溫度
T_0	初始溫度
T_f	輓體表面與流體之平均溫度
T_∞	流體溫度
t	時間
t_c	冷卻時間

t_R	加熱時間
t_P	軋延週期
V	控制體積
α	熱擴散係數
β	體積膨脹係數
Δr	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
Δt	時間步階
Δz	內部格點之控制體積軸向長度
ε	熱膨脹係數
ν	運動黏滯係數
ρ	密度



下 標

$surr$	周遭環境
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

n	數值計算第 n 個時階
-----	---------------

第一章

緒論

1-1 前言

在鋼鐵工業中，鋼品生產過程可細分為許多程序，每一個程序的操作，都足以成為影響產品品質的重要因素。其中鋼材的主要成形法有軋延、鍛造、擠出、抽伸和深沖等五種方法。將鋼胚通過兩個轉動軋輥，受連續軋延壓力而伸展成形，其產品謂之軋製鋼材。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九十五以上。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；而冷軋則是指被軋延材料不預先加熱，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。

本文就熱軋的程序來對工作軋輪做溫度及徑向熱變形量的分析與討論。當高熱的鋼材進入熱軋生產線時，熱量經由其與工作軋體的接觸區域，迅速地傳輸進入軋體，軋體因受熱而膨脹，為避免軋體的膨脹尺寸過大，導致軋延鋼帶的厚度產生不均或是發生邊波的情形，故於軋製的同時會在軋體周圍噴灑冷卻水做對流散熱。因此為了控制鋼帶熱軋的精準度與延長軋輪的使用壽命，必須發展一個快速反應且精確的即時模擬系統，以清楚了解軋體的溫度分佈及其因受熱而產生的徑向變形量大小。

1-2 文獻回顧

Cerni[1]建立一個輓輪的二維暫態模型，假設輓體僅以對流方式冷卻，且輓體受熱僅由均一熱源供給之前提下，分析輓體的表面溫度分佈，Cerni 的結果也為後來的研究提供了一個參考的基準。

Hogshead[2]將 Cerni 的方法加以簡化，且以穩態為條件進行溫度分佈解析，得到輓體表面溫度分佈的穩態解。繼 Hogshead 之後 Stevens、Ivens 和 Harper[3]以實驗方式量測輓體在熱軋過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[4]發展一個二維暫態模型，使用有限差分法探討輓體在熱軋過程中的暫態溫度變化，此種模型後來被廣泛的使用與改進。如 Poplawski 和 Seccombe[5]以 Parke 和 Baker 的研究為基礎，建立分析輓體溫度的三維模型。Wilmott 與 Mignon[6]亦發展了包含軸向與徑向的二維模型，一樣使用有限差分法，假設邊界條件皆為等效，並考慮輓體冷卻時的水壓、流率與噴頭角度等因素，分析出輓體的暫態溫度分佈。

Haubitzer[7]研究輓體的二維模型，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，解得輓體溫度分佈的穩態解。Patula[8]以 Haubitzer 的研究為基礎，研究輓體在熱軋過程中，輓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，分析出輓體的溫度分佈。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

之輓體，熱傳滲透的深度也會不同，高轉速會有較薄的滲透深度。

Yuen[9]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[10]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。

Pallone[11]使用拉普拉斯積分，並控制冷卻水噴頭的角度，求出輓體暫態的軸向溫度分佈。Ye 與 Samarasekera[12]建立一個考慮徑向和軸向的二維熱傳模型，以有限差分法得出輓體的暫態溫度分佈，並計算相對的輓體變形量，進一步探討冷卻水流率、表面濕潤角度、冷卻水噴頭擺放位置及潤滑劑種類對分析結果的影響。

Van Steden 與 Tellman[13]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[14]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。

Ryu 與 Lee[15]使用有限體積法求解二維輓體模型，研究模型在經過多次的熱軋及空冷後，輓體的溫度變化。結果發現經過越多次的循環，熱量越往輓體的中心傳遞，且整體的溫度也會逐漸的升高。他

們也模擬了僅有空冷的條件下，未加任何強制對流進行散熱，即輓體只藉由自然對流散熱，得出輓體在不同時間點的溫度分佈。

Guo[16]使用各種不同方法分析輓體溫度，研究中以有限元素法和 Runge-Kutta 法求解輓體一維及二維模型。在電腦計算時間中，求得二維正合解所花的時間最多。研究中指出每一種方法都有其優缺點，分析二維系統會比一維系統更加精確，但是相對所耗費的電腦計算時間也更多。

Lin 與 Chen[17]亦建立數值模擬模型，假設軋延過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，來預測工作輓輪於軋延過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，在熱軋延過程中所考慮的邊界條件包含工作輓輪分別與空氣和冷卻水的對流冷卻、冷卻水的沸騰現象、工作輓輪的熱輻射現象，以及工作輓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。

Garcia-Gil 與 Colas[18]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的變形量，研究提供了解不同機制對軋延產品外形的影響。

江勝文[19]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過程中的熱傳行為，分析出在不同情況下輓體的溫度分佈及

變化。結果顯示由於軋延過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。在進行軋延過程中，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[20]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過程中的熱傳行為。結果得到各參數對於輓體溫度分佈的影響，輓體溫度隨 Bi 增加會降低，且當鋼帶經過輓面正中央時，輓體的溫度分佈會有對稱的情況，若鋼帶有所偏移時，輓體的溫度分佈也隨之偏移。

熱軋製程是由數個不同的熱傳機構所組成，其物理現象相當複雜，文獻中考慮輓體模型多為二維，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至下次安裝繼續軋延之間的狀態，如能發展一套系統，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複雜的零組件，且焊接性良好，易與其他金屬構架組合，因此被廣泛使用於車架、橋樑、建築、道路護欄、鋼管、壓力容器及園藝工具等產品用途。若無法達到中下游各產業的對高品級熱軋鋼品的用料需求，將導致產品競爭力下降。

本研究的目的是在於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。此外，本文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，將其當做外形研磨參考曲線，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，且提高鋼材熱軋廠的生產率。



第二章

物理模式

本文中研究熱軋工作輓體溫度分佈之物理模型如圖 1 所示，熱軋廠中單座軋延輓輪組共有四根輓輪，由上而下分別為上背輓、上工輓、下工輓及下背輓，受熱軋延鋼帶由兩工作輓輪中通過，達到軋延鋼材的目的。其中上下背輓的功用在於能夠提供上下工輓垂直應力，避免工作輓輪因受熱而嚴重變形導致鋼材受力不均造成產物的厚薄誤差。

由於輓輪組的物理模型具有上下對稱的特性，故本研究中僅考慮上工輓的效應，且輓體在軋延過程中處於高速運轉，可將圓周方向視為一等效溫度場，忽略其圓周方向的溫度變化，而又為了符合中鋼所提供的資料型態，建立一個軸對稱的輓體模型如圖 2。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 $T = T(r, z, t)$ ，並以此為基礎，建構本研究之物理模式。

2-1 統御方程式

本研究中工輓的物理模型如圖 2 所示，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)， ρ 為密度(density)， c_p 為比熱(specific heat)， k 為熱傳導係數(thermal conductivity)。

2-2 初始條件

當尚未進行軋延製程之前，輓體暴露於空氣之中並沒有接觸鋼胚，因此無熱量之進出，其溫度與室溫 T_{surr} 相同，故初始條件(initial condition)如下：

$$T(r, z, 0) = T_{surr} \quad (2.2)$$



2-3 邊界條件

為符合中鋼所提供之資料型態，因此考慮輓體表面($r = R$)的邊界條件(boundary conditions)均為對流效應，包含受熱區域與受對流冷卻區域，其中 h 及 T_∞ 值隨輓面位置不同而改變，依軋延操作條件可分述如下：

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

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.3)$$

(2) 週期性軋延過程

熱軋過程中，鋼胚經由傳輸線分段輸送至軋輪組，當軋輪接觸到鋼胚時，熱量由鋼胚傳入工軋，軋延結束後，鋼胚離開軋輪組，至下一段鋼胚到達之前，工軋僅有冷卻水做對流散熱，整個流程週而復始，最後完成包含多個週期的製程。在此定義單一週期內軋體的加熱時間為 t_R 、冷卻時間為 t_C ，此兩段時間和為一個週期 t_p 。不同軋延過程包含不同軋延週期數，其中每個軋延週期時間長短不一且操作條件不同，即軋體表面 ($r=R$) 於每個不同軋延週期中受到的加熱及冷卻條件均會有所變化，一個時段使用一組不同的邊界條件，如下所示：

$$-\frac{L_b}{2} \leq z \leq +\frac{L_b}{2} \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = h(z,t)[T - T_\infty(z,t)] \quad (2.4)$$

除軋體表面 ($r=R$) 外，其他區域邊界條件依據實際操作條件分述如下：

$$0 \leq r \leq R_n \quad T(r, \pm L, t) = \text{const.} \quad (2.5)$$

$$\pm \frac{L_b}{2} \leq z \leq \pm \frac{L}{2} \quad T(R_n, z, t) = \text{const.} \quad (2.6)$$

其中 const. 為一固定溫度。

$$R_n < r \leq R \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(\pm L_b, t)[T - T_\infty(\pm L_b, t)] \quad (2.7)$$

上式中 h 及 T_∞ 值為軋面兩端點處之對流條件。

(3) 研磨前冷卻過程

工軋於熱軋結束後，會從軋鋼機座取下依序經過空冷、水冷的冷卻流程，再送至磨床上研磨修正軋體變形量，然後才再安裝回軋鋼機

座上繼續軋延，使其軋延厚度更加均勻。考慮兩段時間內的冷卻條件均為固定，其中空冷、水冷的冷卻條件使用經驗公式[21]估算，分別如下所示：

空冷(Free convection)

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \leq 10^{12} \quad (2.8)$$

水冷(Forced convection)

$$\overline{Nu}_D = 0.30 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4 / Pr)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad Re_D Pr > 0.2 \quad (2.9)$$



第三章

數值方法

本研究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 3，對每一個格點取控制體積，每個控制體積內每一時刻皆必須保持能量守恆[22]，如圖 4 所示，由此可以推導出各個格點的溫度離散方程式。將所有離散後的方程式依格點位置列成矩陣後，利用 LU 法分解求得出下一個時階的溫度分佈。本章就各個不同型態的格點做出分類，並列出其控制體積、表面積、格點溫度及矩陣排列方式與求解方法，最後建立計算輓體熱膨脹的模型。

3-1 輓體的離散方程式

分割格點完成後，對每一點取控制體積，再引用有限體積法，則可推導得離散方程式。以圖 4 之內部點 P 為來討論，首先列出其控制體積與各表面積：

$$\begin{aligned}A_N &= 2\pi \cdot \left(r + \frac{\Delta r}{2}\right) \cdot \Delta z \\A_S &= 2\pi \cdot \left(r - \frac{\Delta r}{2}\right) \cdot \Delta z \\A_W &= A_E = \pi \cdot \left(r + \frac{\Delta r}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(r - \frac{\Delta r}{2}\right)^2 = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r \\V &= A_W \cdot \Delta z = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r \cdot \Delta z\end{aligned}\tag{3.1}$$

根據熱傳導傅力葉定律(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

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

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

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

而其他邊界點，參照前一章節所列之邊界條件可推導得所有格點類型

的離散方程式，如表 1 所列。其中為節省計算時間，邊界部份則以顯性(explicit)法來處理。

3-2 數值計算過程

當所有點的離散方程式皆被推導出後，建立一係數矩陣 A 、由前一時階溫度計算所得之矩陣 B 以及下一時階的溫度矩陣 X ，寫成 $AX = B$ 的形式，使用矩陣運算來解出各時間的溫度分佈，其求解步驟如下：

(1) 輸入基本數據及定義初始條件。

(2) 矩陣排列規則

令輓體 z 方向切割點數為 M ， r 方向切割點數為 N ，則總共切割點數為 $M \times N$ ，矩陣 A 的維度為 $(M \times N) \times (M \times N)$ ，矩陣 X 和 B 為 $(M \times N) \times 1$ ，其第 K 點的各係數在矩陣中位置如下

$$\begin{aligned} A_{K,K} &= a_K & A_{K,K-1} &= b_K & A_{K,K+1} &= c_K \\ A_{K,K+M} &= d_K & A_{K,K-M} &= e_K & B_K &= f_K \end{aligned} \quad (3.8)$$

(3) 使用 LU 法分解 A 矩陣，求解下一時階的溫度分佈，其原理如下

$$AX = B \text{ 使用 LU 法分解得 } LUX = B$$

$$\text{令 } UX = y \text{ 得 } Ly = B, \text{ 求解 } y$$

$$\text{再代回 } UX = y \text{ 求得 } X$$

(4) 進行反覆疊代計算各格點溫度直到輓延過程結束，可得任一時間點的輓體溫度分佈。

3-3 計算軋體熱膨脹

在鋼鐵熱軋過程中，熱量經由鋼帶與工作軋體的接觸區域迅速地傳輸進入軋體，軋體因受熱而膨脹，其熱變形量受軋體內部的溫度分佈所控制，進而影響軋延鋼帶的品質，故設法控制軋體熱膨脹尺寸為提高產品良率的重要因素之一。

考慮軋體內部格點之控制體積如圖 5，工軋徑向熱膨脹量為從軋體中心到表面由於溫度變異產生的變形量之總和，其計算步驟如下：

(1) 軋體內部位置 r ，控制體積徑向的變形量

$$\Delta r' = \Delta r \cdot (T - T_0) \cdot \varepsilon \quad (3.9)$$

其中 T_0 為初始溫度， ε 為熱膨脹係數(thermal expansion coefficient)。

(2) 軋體徑向總熱膨脹量

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

其中 n 為軋體內部控制體積數目。又軋體的物理模型具有軸對稱的特性，故軋體直徑總熱膨脹量可以下式來表示

$$D' = 2R' = 2 \sum_{i=1}^n \Delta r \cdot (T - T_0) \cdot \varepsilon \quad (3.11)$$

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

$$T_{bulk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3.12)$$

則軋體直徑總熱膨脹量可表示如下

$$D' = 2R' = 2R \cdot (T_{bulk} - T_0) \cdot \varepsilon \quad (3.13)$$

第四章

結果與討論

本章將討論工作輓體於中鋼實際操作環境中，經過週期性軋延過程，溫度分佈的變化及直徑熱膨脹量大小。此外，本文亦計算工輓於熱軋結束後，從軋鋼機座取下冷卻的溫度分佈與直徑熱膨脹量，並分析不同對流熱傳係數對結果的影響。

4-1 週期性軋延過程



實際的熱軋過程並非一直持續著軋延的動作，持續軋延將會使得輓體過度膨脹造成軋延鋼帶厚度不均或是導致工輓毀損，因此熱軋過程為一個連續進行軋延、冷卻循環的週期性製程。在週期性軋延過程中，鋼鐵廠中工作人員可以調整鋼帶的長度與冷卻時間的長短來對輓體的溫度作更精確的控制，故不同軋延過程包含不同軋延週期數，其中每個軋延週期時間長短不一且操作條件不同，即輓體於每個不同軋延週期中受到的加熱及冷卻條件均會有所變化，相較於周弘仁[20]考慮單一固定週期更能符合實際上操作狀況。

考慮工輓幾何尺寸如圖 6，輓體表面所有邊界條件均以(2.4)的形式所示，一個時段使用一組不同的邊界條件，其中 h 及 T_0 隨輓面位置不同而改變，此二值均由中鋼所提供之程式計算得出，且本文配合中鋼所提供的資料，對輓體 z 方向取 117 個計算格點數， r 方向取 16 個。

程式計算每條生產線所需輸入資料內容均包含 7 座軋輪組之相關參數，以 121805b 組之輸入資料為例，每座軋輪組均需經過 47 個不同軋延週期數，而每個不同軋延週期中加熱段或冷卻段之輸入參數形式均如表 2 所列，故每座軋輪組會有 94 段不同輸入條件，而表 3 為首座軋輪組於第一個軋延週期中的加熱條件輸出結果。

4-1-1 溫度分析

圖 7 為 121805b 組軋延過程，每座軋鋼軋體於第 40 軋延週期中加熱結束後之軸向溫度分佈圖，由圖可知鋼帶在軋延過程中不會保持一固定位置，因此軋體溫度分佈會有平移的現象，且隨鋼帶依序經過七座軋鋼機，其含有的熱量會逐漸散失，故從第一到七座軋鋼軋體的最高表面溫度會依序遞減。

由於輸入數據繁多，故在此以 121805b 組之首座軋輪組做為分析範本。圖 8~11 為軋體分別於第 10、20、40 及最後第 47 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度分佈圖，由圖 8~11 可觀察出不同軋延週期中的軋體表面溫度分佈受不同時段邊界條件所影響，其中每個時段的 h 及 T_0 隨軋面位置不同而變化，而不同 r 位置軸向溫度分佈隨其距離軋體中心越接近則越趨平緩。圖 12 為軋體表面中心點處溫度隨軋延週期個數變化圖，由圖可知軋體反覆經過加熱、冷卻循環週期製程時，其中心點溫度變化會有震盪的現象。

圖 13~16 為軋體分別於第 10、20、40 及最後第 47 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖，由圖 13~16 可發現軋體整體的溫度分佈隨經

過軋延週期數越多而越趨於均勻，顯示軋延時間越久，熱量經由傳導進入軋體內部的效果越明顯。

4-1-2 熱膨脹變形量

工軋徑向熱膨脹量為從軋體中心到表面由於溫度變異產生的變形量之總和，其計算步驟如 3-3 所列。圖 17 為軋體分別於第 10、20、40 及最後第 47 軋延週期中加熱結束後，直徑熱膨脹量分佈圖，其計算所需溫度場分別來自於圖 13~16，所得結果大小受溫度分佈所決定，即整體溫度分佈高則熱膨脹量大。圖 18 為軋體表面中心點處於每個軋延週期中加熱結束時，直徑熱膨脹量變化圖，由圖可知軋體表面中心點處之直徑熱膨脹量會隨加熱週期數增加而成長。

4-2 研磨前冷卻過程

工軋於熱軋結束後，會從軋鋼機座取下依序經過空冷、水冷的冷卻流程，再送至磨床上研磨修正軋體外形，然後才再安裝回軋鋼機座上繼續軋延，使其軋延厚度更加均勻。

本文單純考慮軋體於上述冷卻流程中，因溫度變異而產生的熱膨脹量，將其當做外形修正曲線，修正熱軋結束後的變形量，包含熱軋過程中黏附於軋體表面的雜質，其中空冷與水冷的條件分別如(2.5)和(2.6)式所示，計算所需流體之熱物性質如表 4 所列，而表 5 為不同冷卻條件之對流熱傳係數(convection heat transfer coefficient)估算結

果。在此固定整個冷卻流程時間為 135 分鐘，其中空冷時間為 45 分鐘，水冷時間為 90 分鐘，分析不同對流熱傳係數對輓體溫度分佈及熱膨脹量的影響。

4-2-1 溫度分析

圖 19 為輓體分別於空冷、水冷結束時的表面溫度分佈圖，其中空氣的對流熱傳係數取表 5 所列之中間值($h_a=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)，而水的對流熱傳係數亦取自於表 5 所列之中間值($h_w=6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)，藉此當做之後分析的參考基準。圖 20 為輓體於不同空氣冷卻條件下之表面溫度分佈圖，由圖可知因對流熱傳係數相差不大，故得出表面溫度分佈結果相當接近，最大差量為 0.39°C 。圖 21 為輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之表面溫度分佈圖，從圖中可發現因水冷時間足夠長，所以冷卻後的表面溫度分佈差距亦相當有限，最大差量為 0.28°C 。圖 22 為輓體中心表面處溫度及徑向平均溫度隨冷卻時間變化圖，其中固定空冷條件($h_a=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)，由圖中實線部份可觀察出空冷前段溫度會有上升的現象，這是因為輓體於軋延結束後，內部溫度比表面高，加上空氣冷卻效果不佳，所以熱量會逐漸透過傳導至表面造成溫度上升，當空冷結束後，水冷的 h 值較大使得溫度迅速下降，然後隨冷卻時間增加而越趨於一穩態結果，而圖中虛線部份代表輓體中心徑向平均溫度，其定義如(3.12)所示。

4-2-2 熱膨脹變形量

如 4-1-2 所述，熱膨脹變形量所得結果大小受溫度分佈所決定，即整體溫度分佈高則熱膨脹量大。圖 23 為輓體分別於空冷($h_a=3\text{ W/m}^2\text{K}$)、水冷($h_w=6000\text{ W/m}^2\text{K}$)結束時的直徑熱膨脹量分佈圖，由圖可知輓體於空冷結束至水冷結束間直徑熱膨脹量之變化範圍。圖 24 為輓體於不同空氣冷卻條件下之直徑熱膨脹量分佈圖，結果顯示相當接近，最大差量為 $1.36\times 10^{-6}\text{ m}$ 。圖 25 為輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{ W/m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之直徑熱膨脹量分佈圖，結果差距亦相當有限，最大差量為 $4.47\times 10^{-6}\text{ m}$ 。圖 26 為不同計算方式之輓體中心直徑熱膨脹量隨冷卻時間變化圖，其中固定空冷條件($h_a=3\text{ W/m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{ W/m}^2\text{K}$)，實線部份計算式子為(3.11)，虛線部份則為(3.13)，由圖可知此二者之結果相當接近，故可將徑向平均溫度當做衡量直徑熱膨脹量大小的參考基準，而從圖 22 的溫度分析中可觀察出輓體中心徑向平均溫度在空冷前段均會有上升的現象，接著緩慢下降至空冷結束，當水冷開始後，較大的 h 值使得溫度迅速下降，然後隨冷卻時間增加而持續下降，故其熱膨脹量變化在空冷前段會有上升的情形，接著緩慢下降至空冷結束，當水冷開始後，下降的幅度就明顯變大，然後隨冷卻時間增加而繼續降低。

第五章

結論

本文藉由數值模擬探討輓體在實際熱軋過程中的溫度分佈變化與直徑熱膨脹量大小，並計算工輓於熱軋結束後，從軋鋼機座取下冷卻的溫度分佈及熱膨脹量，分析使用不同對流熱傳係數對結果的影響。綜合前一章所得到的結果，可得以下結論。

1. 週期性軋延過程：鋼帶在軋延過程中不會保持一固定位置，因此輓體溫度分佈會有平移的現象。因輓體於每個不同軋延週期中受到的加熱及冷卻條件均會有所變化，故輓體表面溫度分佈受不同邊界條件所影響，而不同 r 位置軸向溫度分佈隨距離輓體中心越接近則越趨平緩。此外，直徑熱膨脹量所得結果大小受溫度分佈所控制，即整體溫度分佈高則熱膨脹量大，且結果會隨加熱週期數增加而成長。
2. 研磨前冷卻過程：因空氣的對流熱傳係數值相差不大，故得出輓體表面溫度分佈與直徑熱膨脹量大小結果相當接近，而水的對流熱傳係數值範圍較大，但因水冷時間足夠長，所以不同冷卻條件下的輓體表面溫度分佈及直徑熱膨脹量大小差距亦相當有限。

參 考 文 獻

1. Cerni, S., 1961, "The temperature and thermal stress in the rolling of metal strip", Iron and Steel Engineer Year Book, pp. 717.
2. Hogshead, T. H., 1967, "Temperature distribution in the rolling of metal", Ph. D. thesis, Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, Pa.
3. Stevens, P. G., Ivens, K. P. and Harper, P., 1971, "Increasing work-roll life by improved roll-cooling practice", Journal Iron Steel Institute, vol. 209, pp. 1-11.
4. Parke, D. M. and Baker, J. L. L., 1972, "Temperature effects of cooling work roll", Iron Steel Eng., vol. 49, pp. 83-88.
5. Poplawski, J. V. and Seccombe, D. A., 1980, "Bethlehem's contribution to the mathematical modeling of cold rolling tandem mills", Iron Steel Eng., vol. 57, pp. 47-58.
6. Wilmott, S. and Mignon, J., 1973, "Thermal variations of the camber of the working rolls during hot rolling", C.R.M. Report, No. 34, March, pp. 17-34.
7. Haubitzer, W., 1974, "Steady-state temperature distribution in rolls", Arch. Eisenhuettenwes., vol. 46, pp. 635-638.
8. 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.

9. 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.
10. Tseng, A. A., 1984, "Finite-difference solution for heat transfer in roll rotating at high speed", Numerical Heat Transfer, vol. 7, pp. 113-125.
11. Pallone, G. T., 1983, "Transient temperature distribution in work rolls during hot rolling of sheet and strip", Iron and Steel Engineer, Dec. pp. 21-26.
12. Ye, X. and Samarasekera, I.V., 1994, "The role of spray cooling on thermal behavior and crown development in hot strip mill work rolls", Iron and Steelmaker, vol. 13, pp. 49-60.
13. 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.
14. 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.
15. Ryu, H. and Lee, H. B., 1999, "Thermal behavior of work roll in hot

- strip rolling”, Posco Technical Report, vol. 4, pp. 103-109.
16. Guo, R. M., 2001, “Evaluation of thermal profile models using various solution methods”, AISE Conference Cleveland, pp. 23-26.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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。
 20. 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。
 21. Incropera, F. and Dewitt, D., “Fundamentals of heat and mass transfer”, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc.
 22. Hwu, Y. J., 1999, “The theorem of finite difference method for an axial symmetrical heat transfer problem” China Steel Co. inner data, pp. 1-7.
 23. Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T., 1993, “Computational fluid dynamics for engineers volume I”.

表 1 軛體格點類型係數表

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

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

續表 1

表 2 中鋼 thermal 程式基本輸入參數

1. nrstr_brch : number of strip rolled since last backup roll changed	2470
2. flagmain : index of intration in main program	2
3. calcmode : calculation mode	0
4. nriter : number of iteration	1
5. ist : index of stand	1
6. iocheck : number of i/o check	32768
7. ndimrad : dimension of array in radial direction	11
8. dywr : distance of work roll segment [mm]	20
9. ndimwr : dimension of array in width direction	200
10. idrive : index of the roll segment on the drive side edge	42
11. imiddle : index of the roll segment on the center	100
12. ioper : index of the roll segment on the operate side edge	158
13. flagrch : index of work roll change (>0 indicates roll changed)	0
14. ncoolwr : number of roll cooling spray bar	4
15. lcoolwid(1) : width of narrow spray bar [mm]	2050.0
16. lcoolwid(2) : width of wider spray bar [mm]	1000.0
17. lcoolwid(3) : width of narrow spray bar [mm]	0
18. lcoolwid(4) : width of wider spray bar [mm]	0
19. lbr : barrel length of backup roll [mm]	2100.0
20. lchwr : distance between center of work roll chocks [mm]	3320.0
21. lwr : barrel length of work roll [mm]	2350.0
22. dbr : diameter of backup roll [mm]	1416.8
23. dwr : diameter of work roll [mm]	796.4
24. ewr : elastic modulus of work roll [N/mm**2]	204.41
25. rocpbr : ($\rho * c_p$) of backup roll [Ws/(m**3°C)]	4057100.0
26. rocpwr : ($\rho * c_p$) of work roll [Ws/(m**3°C)]	4061200.0
27. lambr : thermal conductivity of backup roll [W/(m*°C)]	37.70
28. lamwr : thermal conductivity of work roll [W/(m*°C)]	22.28
29. alphawr : thermal expansion coeff. of work roll	1.14E-05
30. pfefak : efficiency factor of heat transfer by water (tuned constant)	1933.4
31. flagthe : index of rolling (=1 rolling, =0 idling)	1
32. dtime : duration time of rolling or idling [s]	53.0
33. vr : roll speed [m/s]	1360.0

34. sft : work roll shift distance [mm]	0.0
35. flowbr : flow rate of coolant for backup roll [m**3/h]	50.0
36. flowwr(1,0) : entry flow rate of coolant in narrow bar for work roll	120.0
37. flowwr(1,1) : exit flow rate of coolant in narrow bar for work roll	75.0
38. flowwr(2,0) : entry flow rate of coolant in wide bar for work roll	0.0
39. flowwr(2,1) : entry flow rate of coolant in wide bar for work roll	0.0
40. flowwr(3,0) : entry flow rate of coolant in narrow bar for work roll	170.0
41. flowwr(3,1) : exit flow rate of coolant in narrow bar for work roll	125.0
42. flowwr(4,0) : entry flow rate of coolant in wide bar for work roll	0.0
43. flowwr(4,1) : entry flow rate of coolant in wide bar for work roll	0.0
44. temair : air temperature [°C] (0~50)	25.0
45. temcool : coolant temperature [°C] (0~50)	28.9
46. temneck : roll neck temperature [°C] (<200)	35.0
47. temstr : strip temperature [°C] (0~1200)	904.0
48. wid : width of strip [mm]	1260.3
49. h0 : stand entry thickness [mm] (0~100)	36.77
50. h1 : stand exit thickness [mm]	24.26
51. fr : roll force [N] (0~1e6)	16073.5
52. rocpstr : ($\rho * c_p$) of strip [Ws/(m**3°C)]	5230000.0
53. lamstr : thermal conductivity of strip [W/(m*°C)]	27.88
54. oxidlay : thickness of oxide layer on the surface of strip [mm] (0~0.1)	0.007
55. tembr : backup roll temperature [°C]	30.9
56. brtsrc : time since work roll change [s]	53.0

續表 2

表 3 中鋼 thermal 程式輸出結果

No.	z_axial (m)	T_{∞} (°C)	h (W/m ² K)
1.	-1.1600	28.90	2570.00 ← Min
2.	-1.1400	28.90	2570.00 ← Min
3.	-1.1200	28.90	2570.00 ← Min
4.	-1.1000	28.90	2570.00 ← Min
5.	-1.0800	28.90	2570.00 ← Min
6.	-1.0600	28.90	2570.00 ← Min
7.	-1.0400	29.88	3191.00
8.	-1.0200	29.26	8612.00
9.	-1.0000	29.26	8612.00
10.	-0.9800	29.26	8612.00
11.	-0.9600	29.26	8612.00
12.	-0.9400	29.26	8612.00
13.	-0.9200	29.26	8612.00
14.	-0.9000	29.26	8612.00
15.	-0.8800	29.26	8612.00
16.	-0.8600	29.26	8612.00
17.	-0.8400	29.26	8612.00
18.	-0.8200	29.26	8612.00
19.	-0.8000	29.26	8612.00
20.	-0.7800	29.26	8612.00
21.	-0.7600	29.26	8612.00
22.	-0.7400	29.26	8612.00
23.	-0.7200	29.26	8612.00
24.	-0.7000	29.26	8612.00
25.	-0.6800	29.26	8612.00
26.	-0.6600	29.26	8612.00
27.	-0.6400	29.87	8607.00
28.	-0.6200	108.90	7956.00
29.	-0.6000	108.90	7956.00
30.	-0.5800	108.90	7956.00
31.	-0.5600	108.90	7956.00
32.	-0.5400	108.90	7956.00
33.	-0.5200	108.90	7956.00
34.	-0.5000	91.22	9816.00
35.	-0.4800	91.22	9816.00
36.	-0.4600	91.22	9816.00
37.	-0.4400	91.22	9816.00
38.	-0.4200	91.22	9816.00
39.	-0.4000	91.22	9816.00
40.	-0.3800	91.22	9816.00
41.	-0.3600	91.22	9816.00
42.	-0.3400	91.22	9816.00
43.	-0.3200	91.22	9816.00
44.	-0.3000	91.22	9816.00
45.	-0.2800	91.22	9816.00
46.	-0.2600	91.22	9816.00
47.	-0.2400	91.22	9816.00
48.	-0.2200	91.22	9816.00
49.	-0.2000	91.22	9816.00
50.	-0.1800	91.22	9816.00
51.	-0.1600	91.22	9816.00
52.	-0.1400	91.22	9816.00
53.	-0.1200	91.22	9816.00
54.	-0.1000	91.22	9816.00
55.	-0.0800	91.22	9816.00
56.	-0.0600	91.22	9816.00
57.	-0.0400	91.22	9816.00
58.	-0.0200	91.22	9816.00
59.	0.0000	91.22	9816.00
60.	0.0200	91.22	9816.00
61.	0.0400	91.22	9816.00
62.	0.0600	91.22	9816.00
63.	0.0800	91.22	9816.00

64.	0.1000	91.22	9816.00
65.	0.1200	91.22	9816.00
66.	0.1400	91.22	9816.00
67.	0.1600	91.22	9816.00
68.	0.1800	91.22	9816.00
69.	0.2000	91.22	9816.00
70.	0.2200	91.22	9816.00
71.	0.2400	91.22	9816.00
72.	0.2600	91.22	9816.00
73.	0.2800	91.22	9816.00
74.	0.3000	91.22	9816.00
75.	0.3200	91.22	9816.00
76.	0.3400	91.22	9816.00
77.	0.3600	91.22	9816.00
78.	0.3800	91.22	9816.00
79.	0.4000	91.22	9816.00
80.	0.4200	91.22	9816.00
81.	0.4400	91.22	9816.00
82.	0.4600	91.22	9816.00
83.	0.4800	91.22	9816.00
84.	0.5000	91.22	9816.00
85.	0.5200	108.90	7956.00
86.	0.5400	108.90	7956.00
87.	0.5600	108.90	7956.00
88.	0.5800	108.90	7956.00
89.	0.6000	108.90	7956.00
90.	0.6200	108.90	7956.00
91.	0.6400	29.87	8607.00
92.	0.6600	29.26	8612.00
93.	0.6800	29.26	8612.00
94.	0.7000	29.26	8612.00
95.	0.7200	29.26	8612.00
96.	0.7400	29.26	8612.00
97.	0.7600	29.26	8612.00
98.	0.7800	29.26	8612.00
99.	0.8000	29.26	8612.00
100.	0.8200	29.26	8612.00
101.	0.8400	29.26	8612.00
102.	0.8600	29.26	8612.00
103.	0.8800	29.26	8612.00
104.	0.9000	29.26	8612.00
105.	0.9200	29.26	8612.00
106.	0.9400	29.26	8612.00
107.	0.9600	29.26	8612.00
108.	0.9800	29.26	8612.00
109.	1.0000	29.26	8612.00
110.	1.0200	29.26	8612.00
111.	1.0400	29.88	3191.00
112.	1.0600	28.90	2570.00 ← Min
113.	1.0800	28.90	2570.00 ← Min
114.	1.1000	28.90	2570.00 ← Min
115.	1.1200	28.90	2570.00 ← Min
116.	1.1400	28.90	2570.00 ← Min
117.	1.1600	28.90	2570.00 ← Min

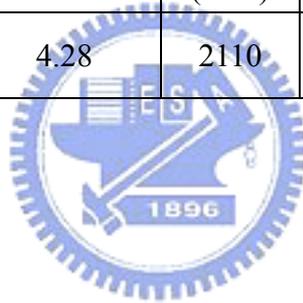
續表 3

表 4 冷卻流體之熱物性質表

Thermophysical properties	Air ($T_\infty = 25^\circ\text{C}$)		Water ($T_\infty = 30^\circ\text{C}$)	
	$T_f = 300\text{K}$	$T_f = 315\text{K}$	$T_f = 305\text{K}$	$T_f = 315\text{K}$
k (W/mK)	0.0263	0.0274	0.62	0.634
ν (m^2/s)	1.59×10^{-5}	1.74×10^{-5}	7.73×10^{-7}	6.37×10^{-7}
Pr	0.707	0.705	5.2	4.16
α (m^2/s)	2.25×10^{-5}	2.47×10^{-5}	1.49×10^{-4}	1.53×10^{-4}

表 5 不同冷卻條件之對流熱傳係數表

	Air		Water			
	$T_f = 300\text{K}$	$T_f = 315\text{K}$	$T_f = 305\text{K}$		$T_f = 315\text{K}$	
			$V = 1$ (m/s)	$V = 5$ (m/s)	$V = 1$ (m/s)	$V = 5$ (m/s)
h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	2.27	4.28	2110	8819	2346	9967



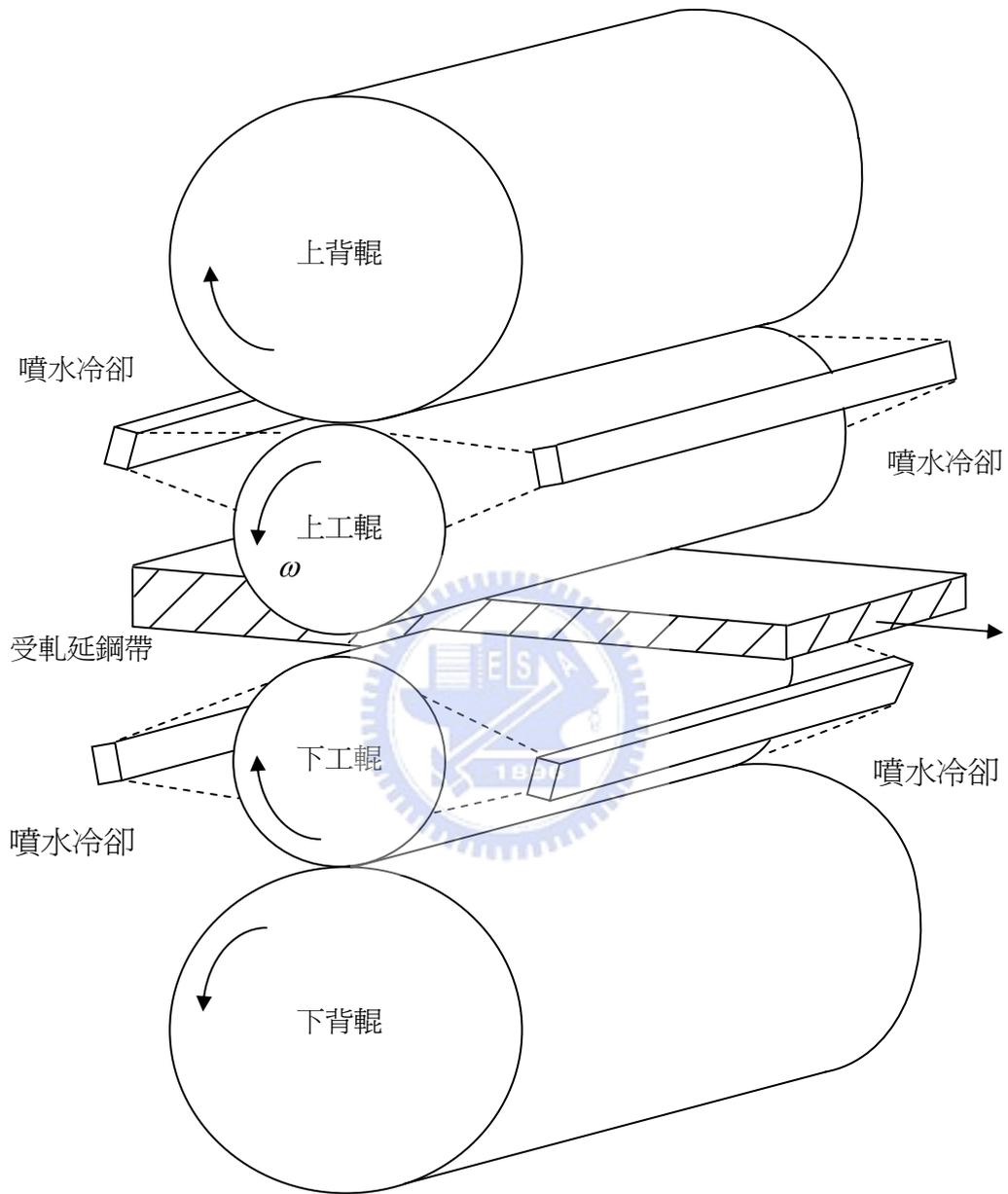


圖 1 熱軋輥輪組示意圖

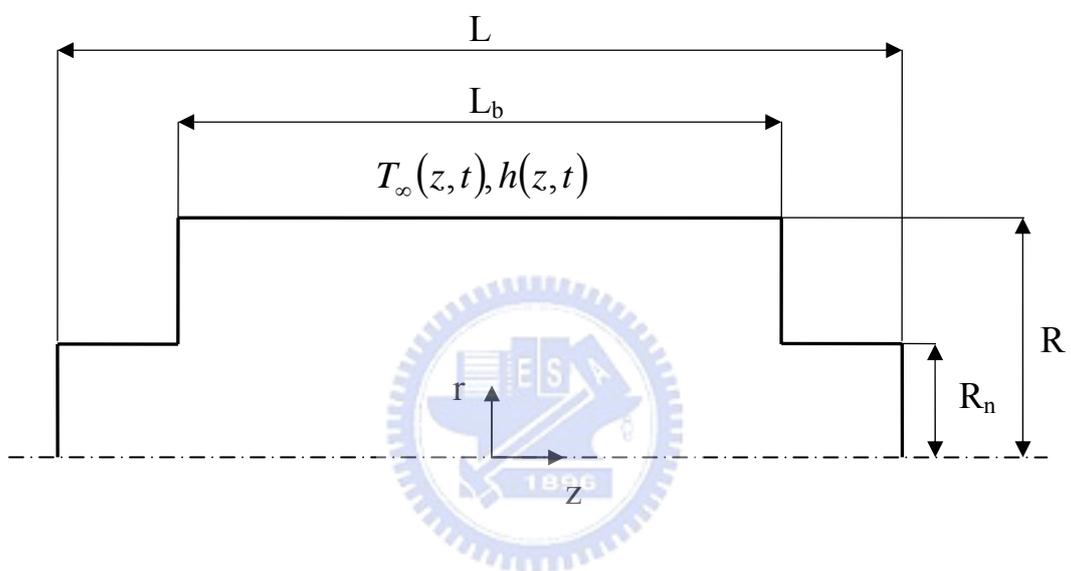


圖 2 軸對稱工輓模型示意圖

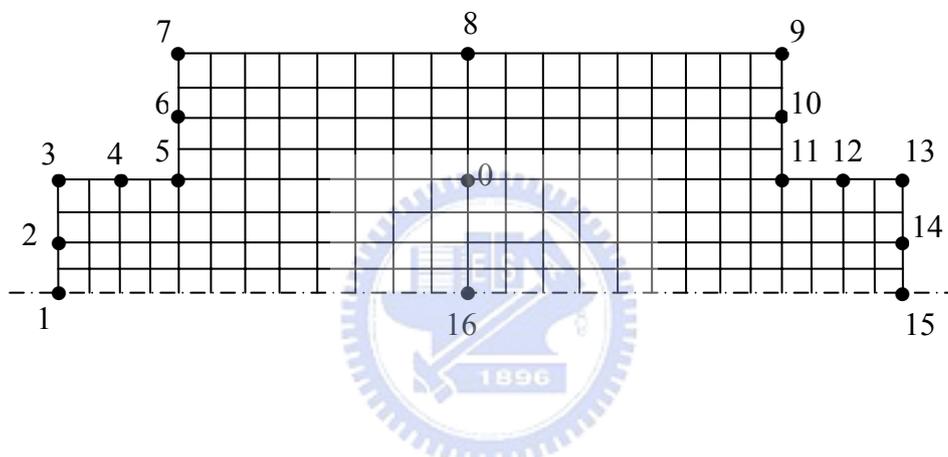


圖 3 鞞體格點類型圖

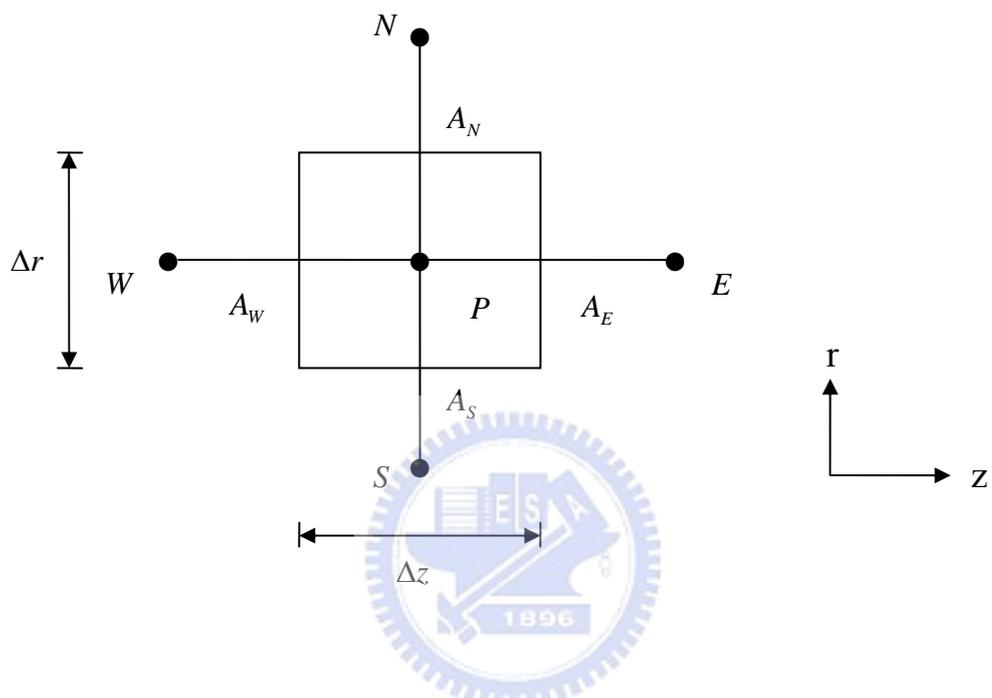


圖 4 軛體內部格點取控制體積示意圖

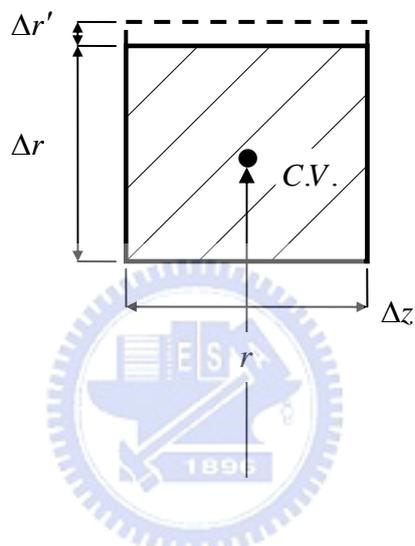


圖 5 輥體內部格點取控制體積之熱膨脹模型

單位：mm

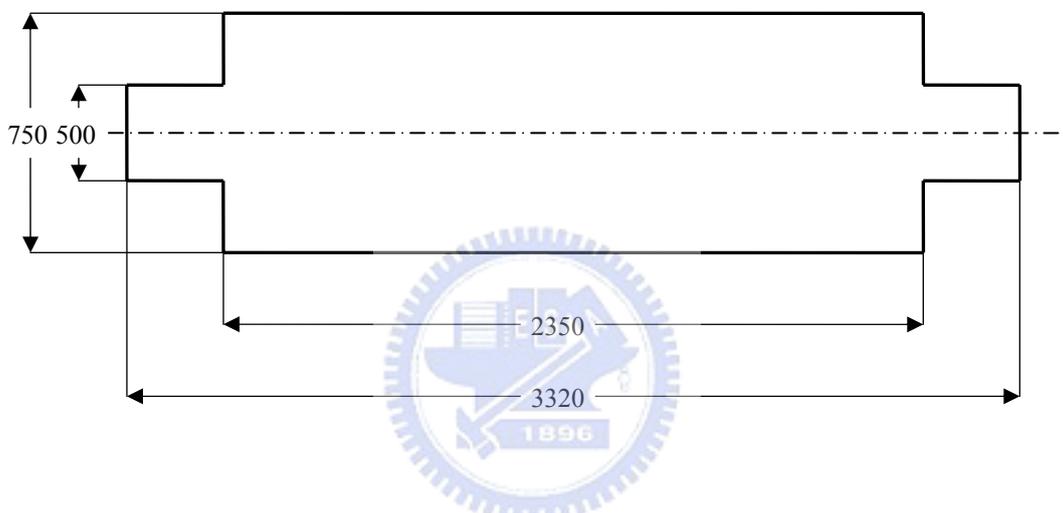


圖 6 工輥基本幾何尺寸示意圖

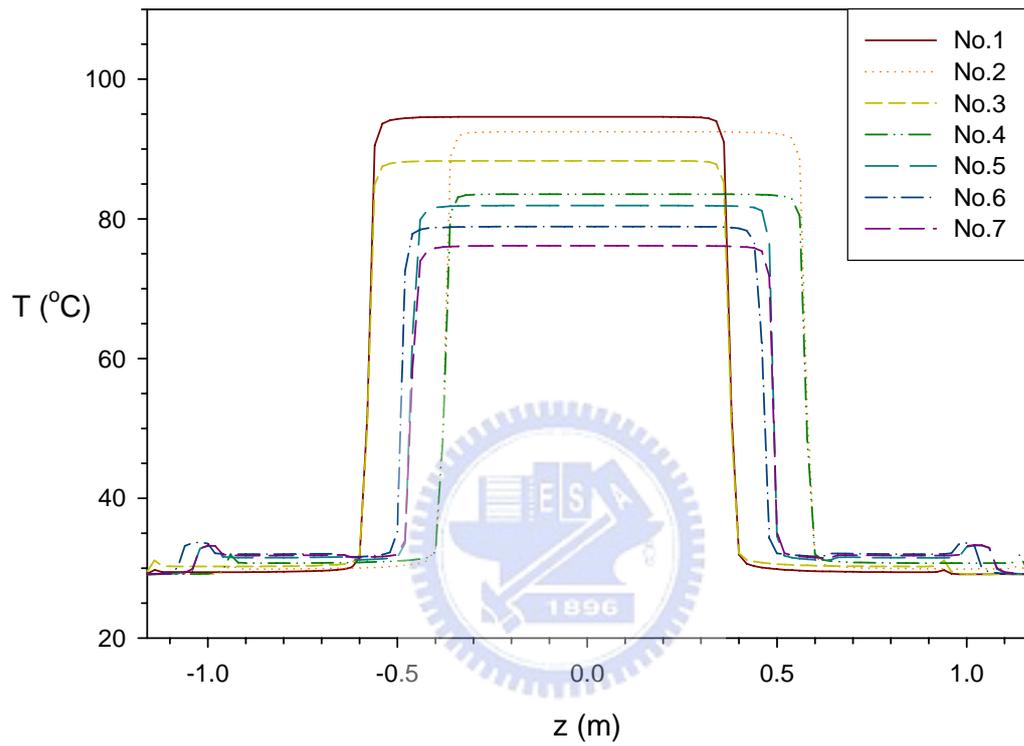


圖 7 121805b 組軋延過程，每座軋鋼軋體於第 40 軋延週期中加熱結束後之軸向溫度分佈圖

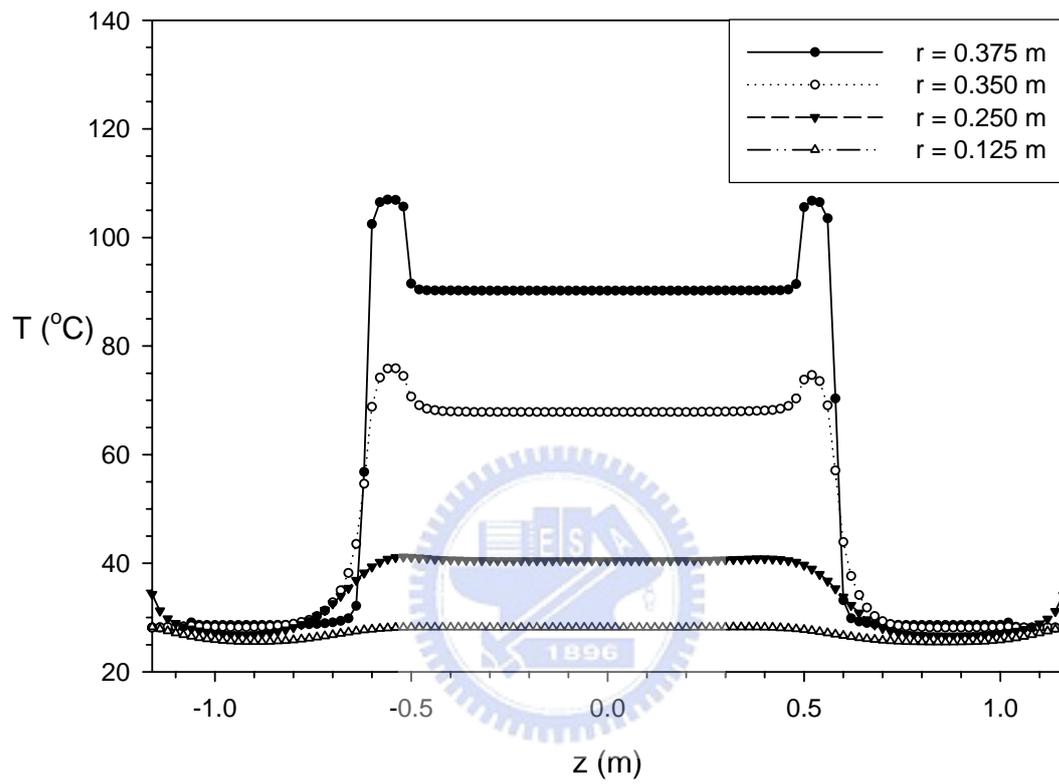


圖 8 輓體於第 10 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度分佈圖

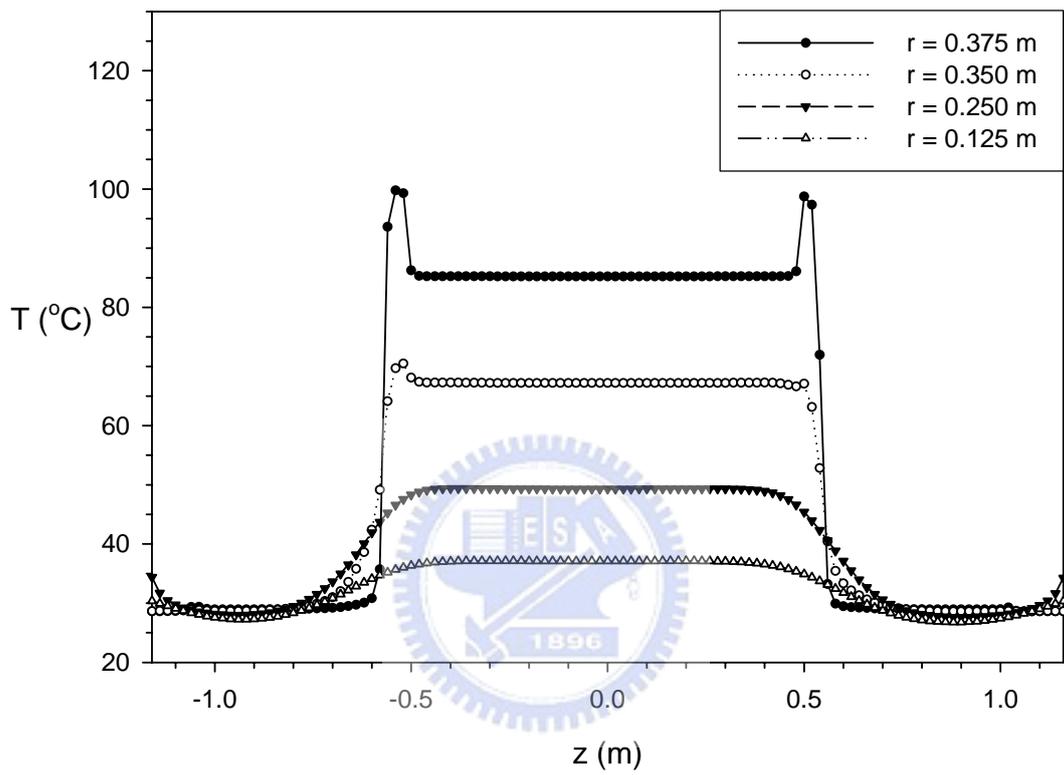


圖 9 輓體於第 20 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度分佈圖

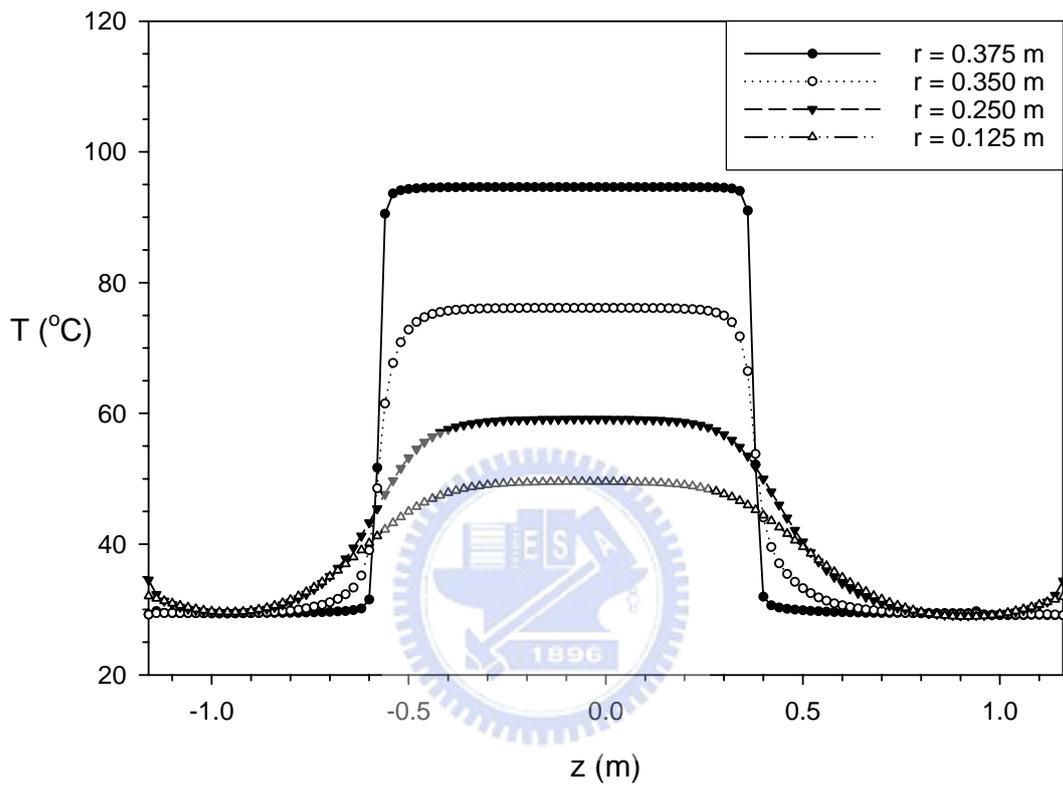


圖 10 軋體於第 40 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度分佈圖

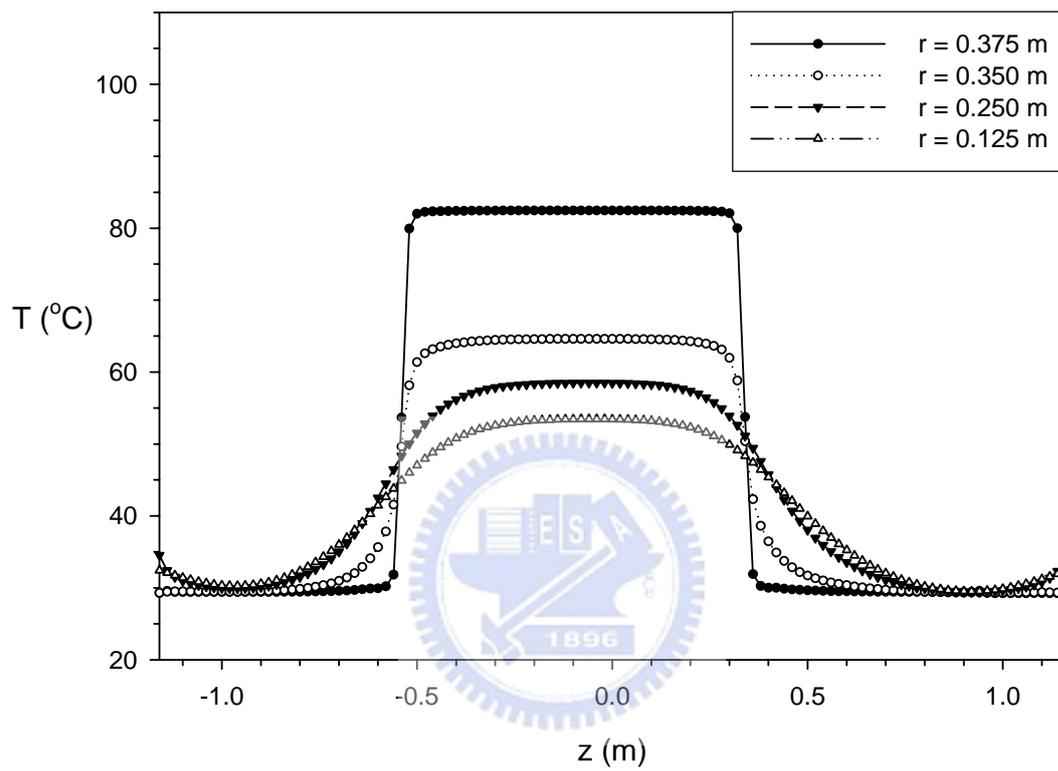


圖 11 軋體於最後第 47 軋延週期中加熱結束後，不同 r 位置之軸向溫度分佈圖

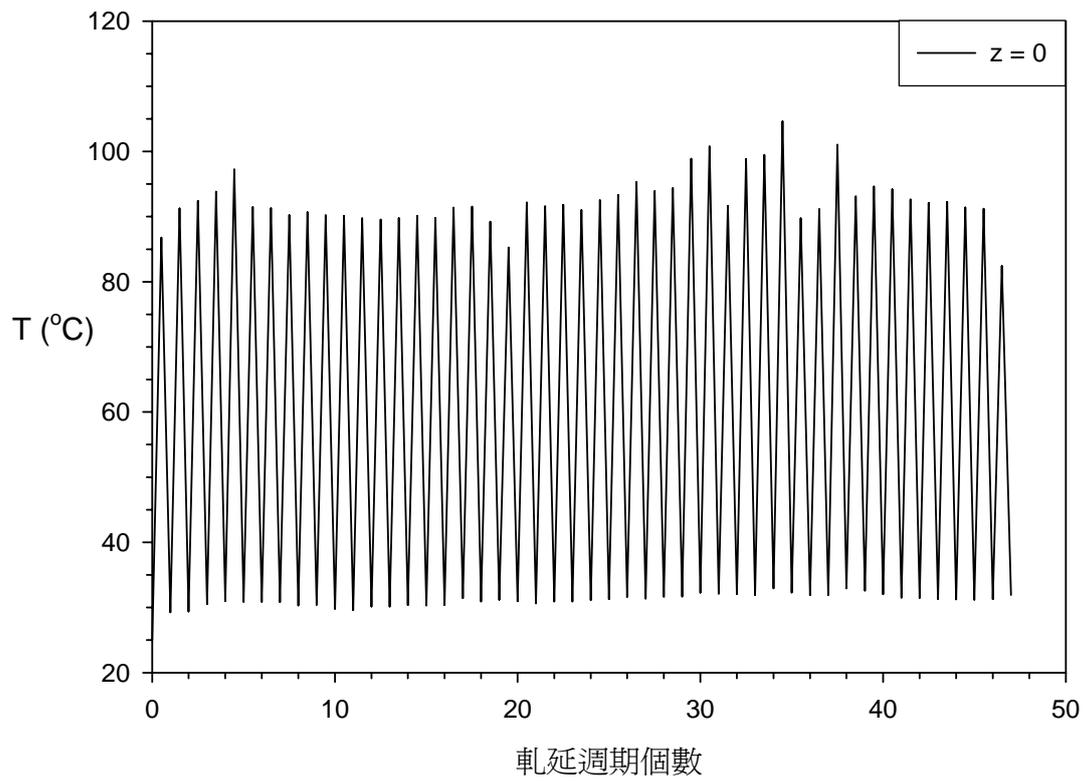


圖 12 輓體表面中心點處($z=0$)溫度隨輓延週期個數變化圖

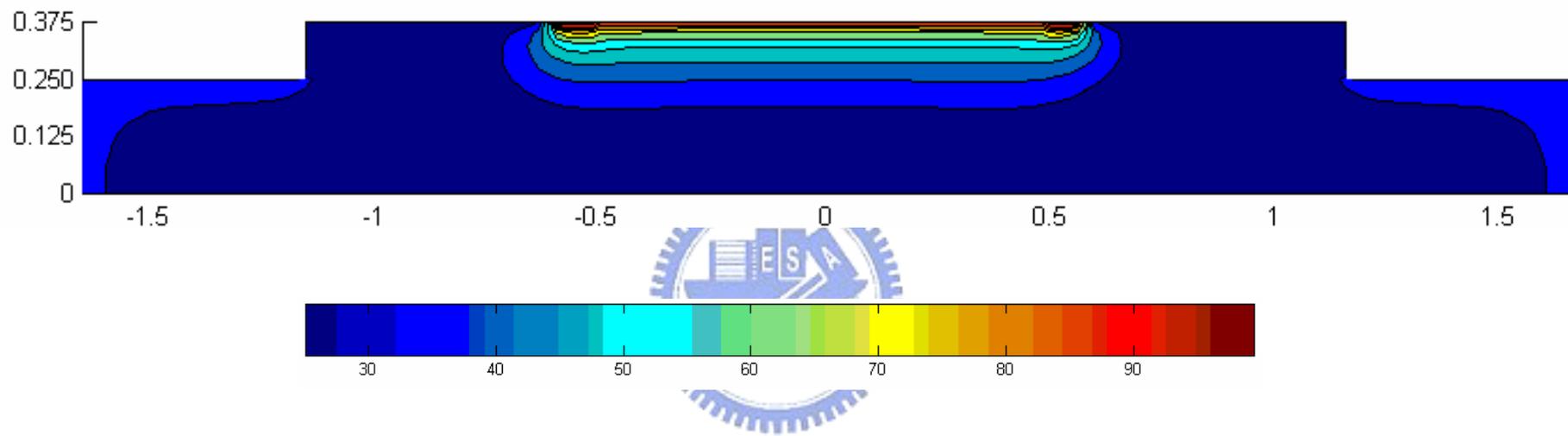


圖 13 軋體於第 10 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖

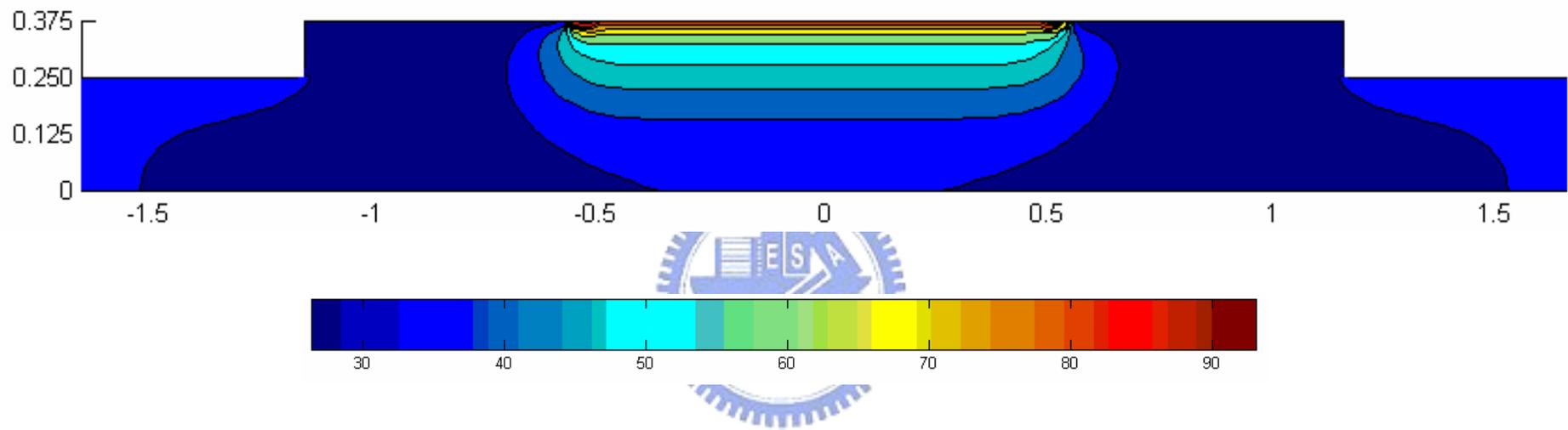


圖 14 軋體於第 20 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖

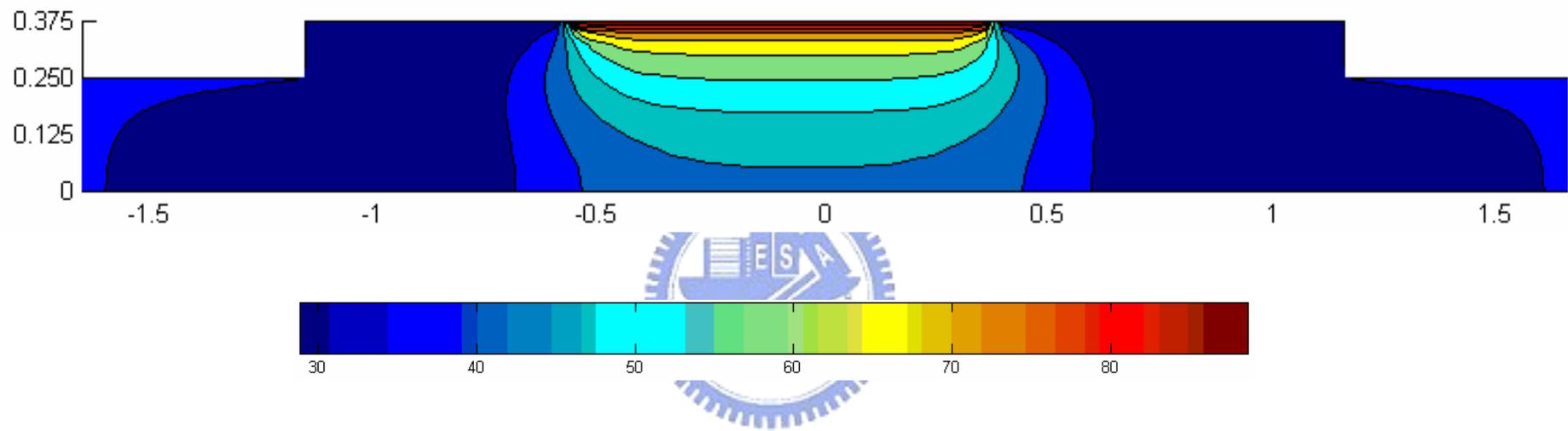


圖 15 軋體於第 40 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖

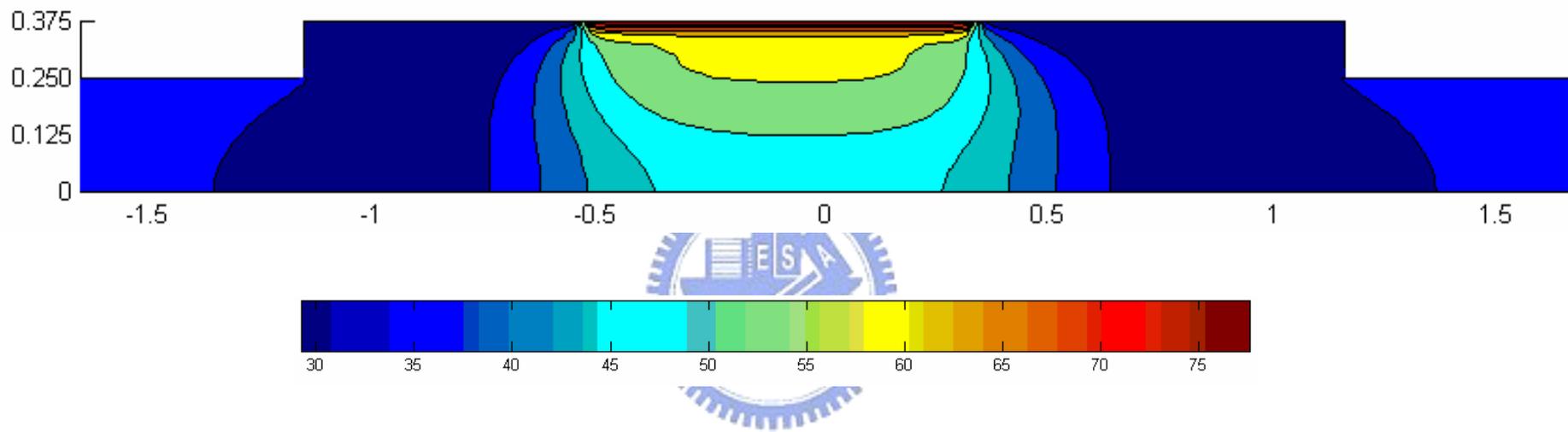


圖 16 軋體於最後第 47 軋延週期中加熱結束後之等溫分佈圖

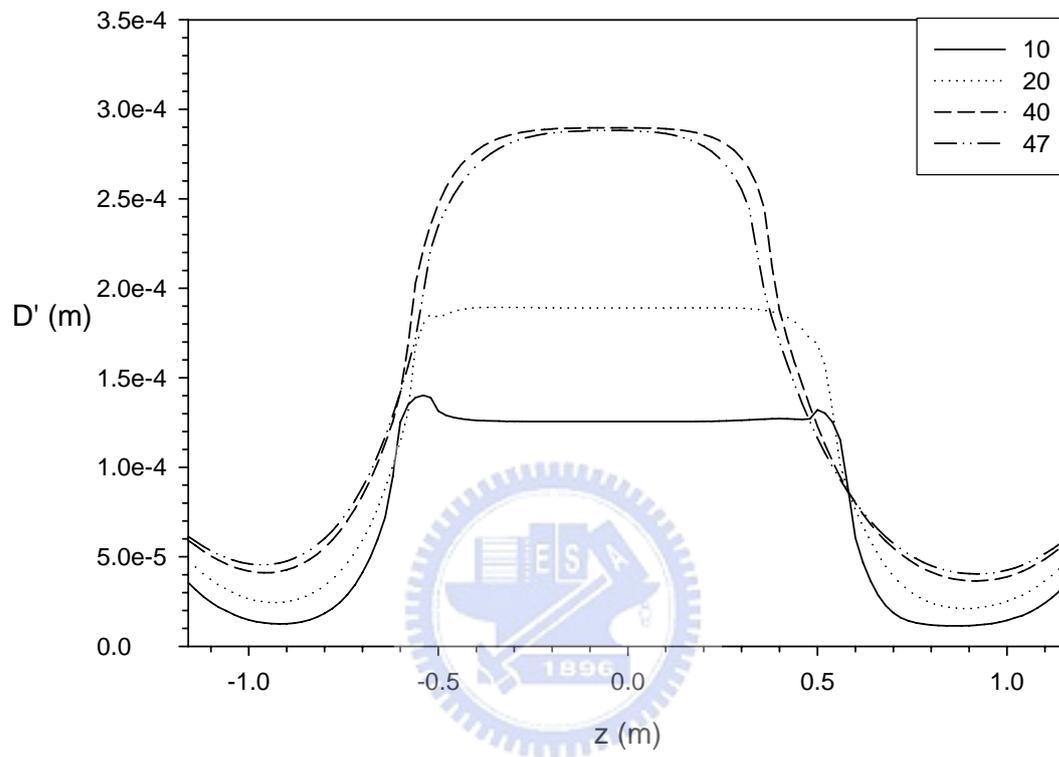


圖 17 輓體於不同軋延週期中加熱結束後，直徑熱膨脹量分佈圖

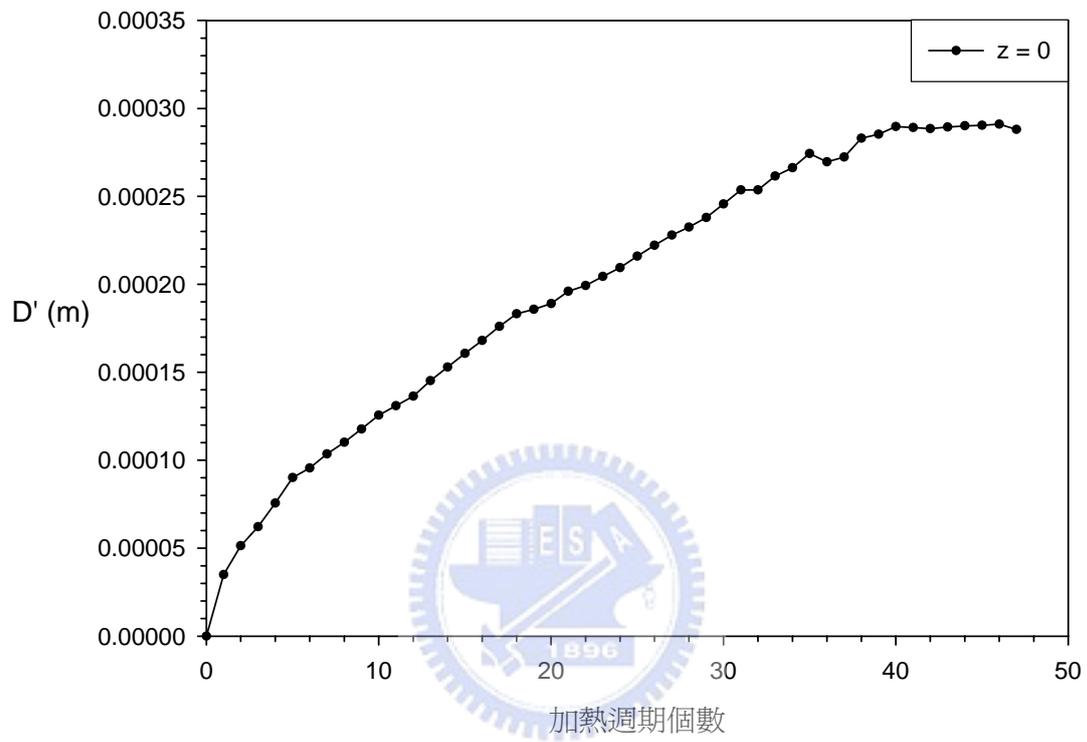


圖 18 輓體表面中心點處($z=0$)於每個軋延週期中加熱結束時，直徑熱膨脹量變化圖

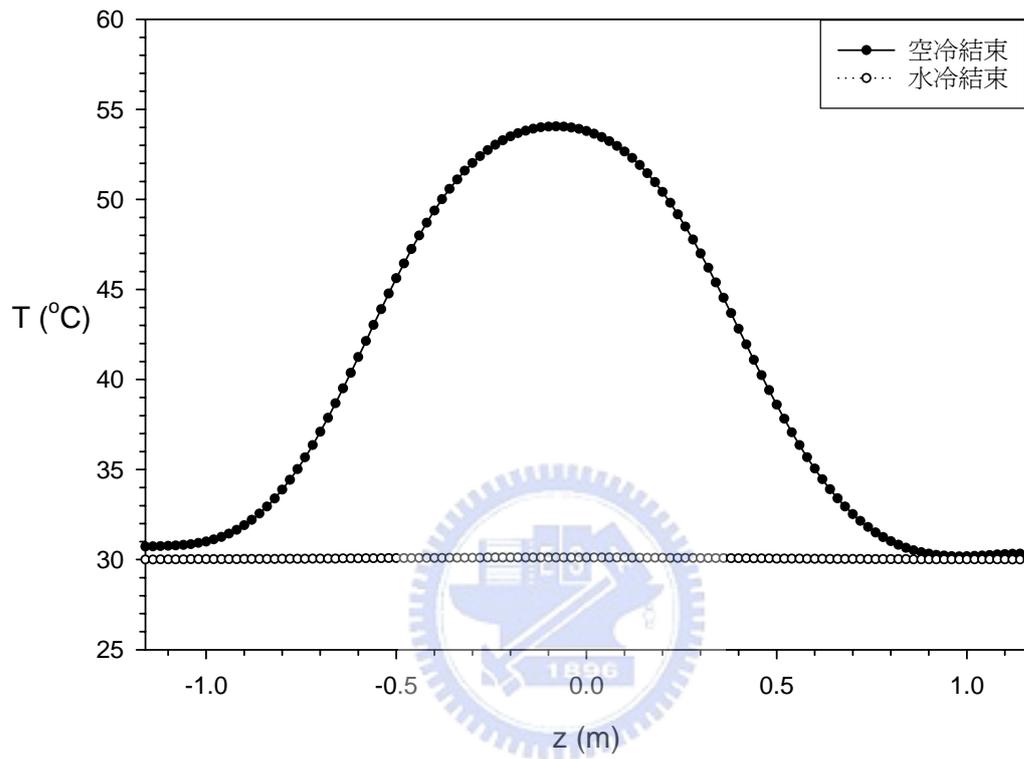


圖 19 輓體分別於空冷($h_a=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)、水冷($h_w=6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)結束時的表面溫度分佈圖

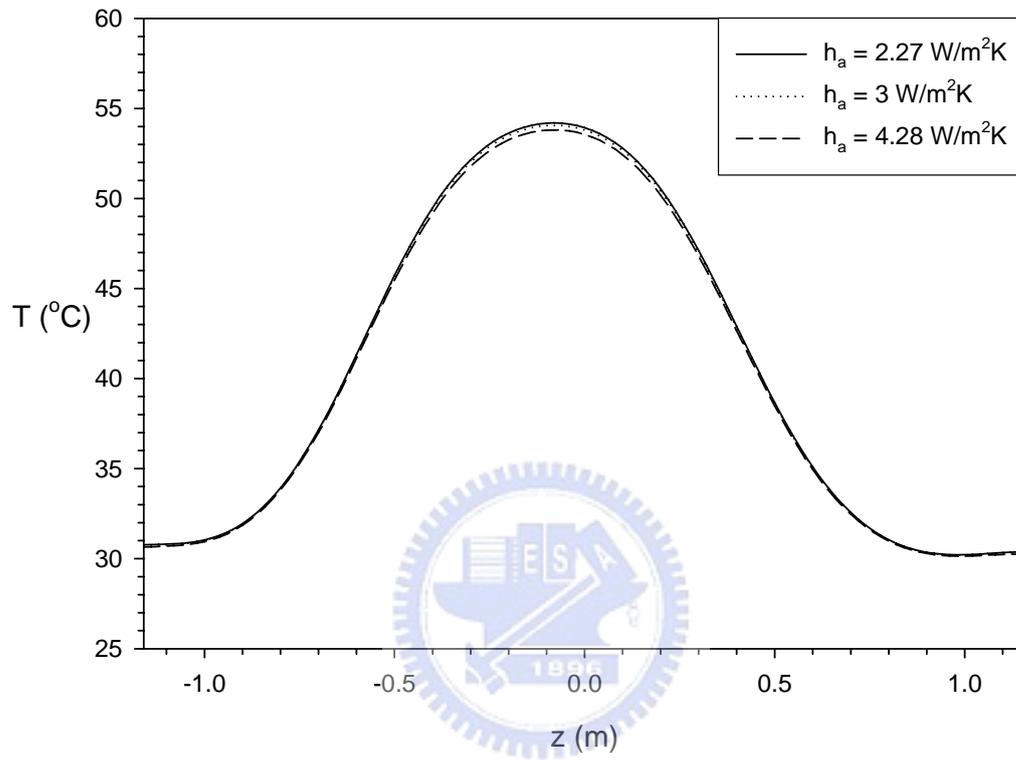


圖 20 輓體於不同空氣冷卻條件下之表面溫度分佈圖

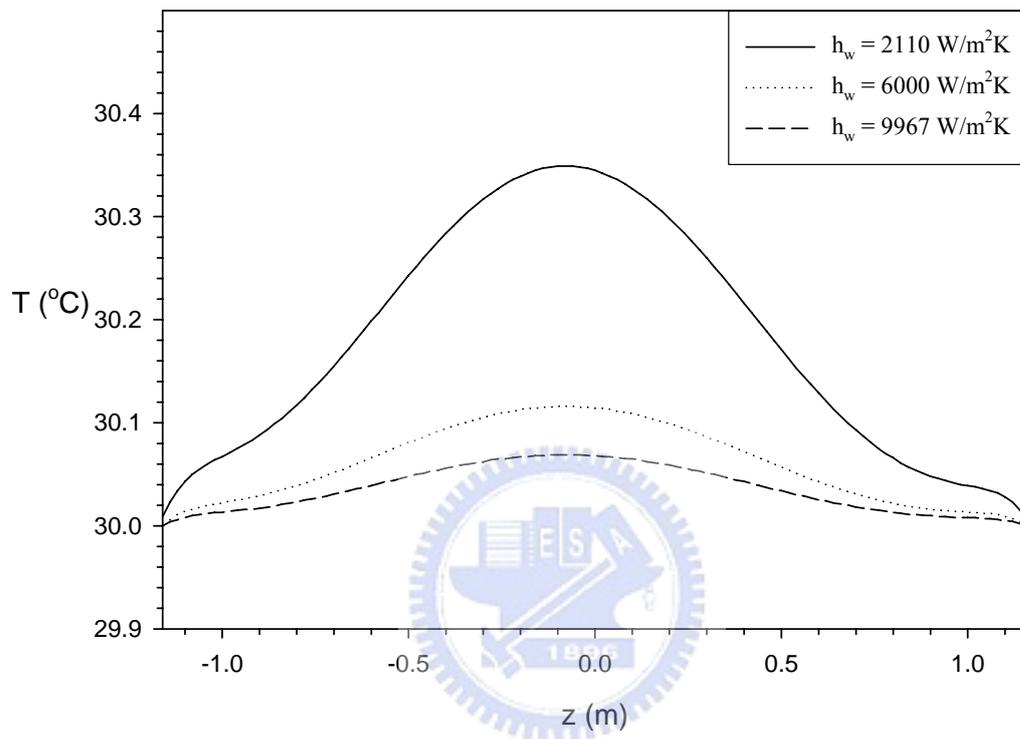


圖 21 輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之表面溫度分佈圖

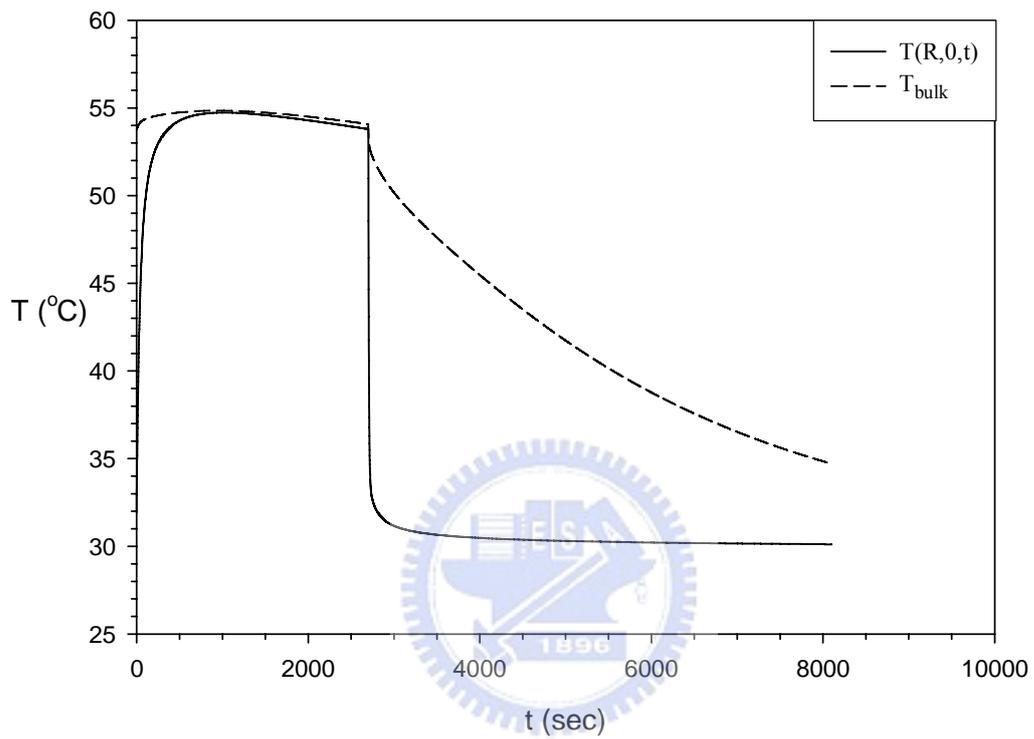


圖 22 輓體中心表面處溫度及徑向平均溫度隨冷卻時間變化圖，其中固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{W/m}^2\text{K}$)

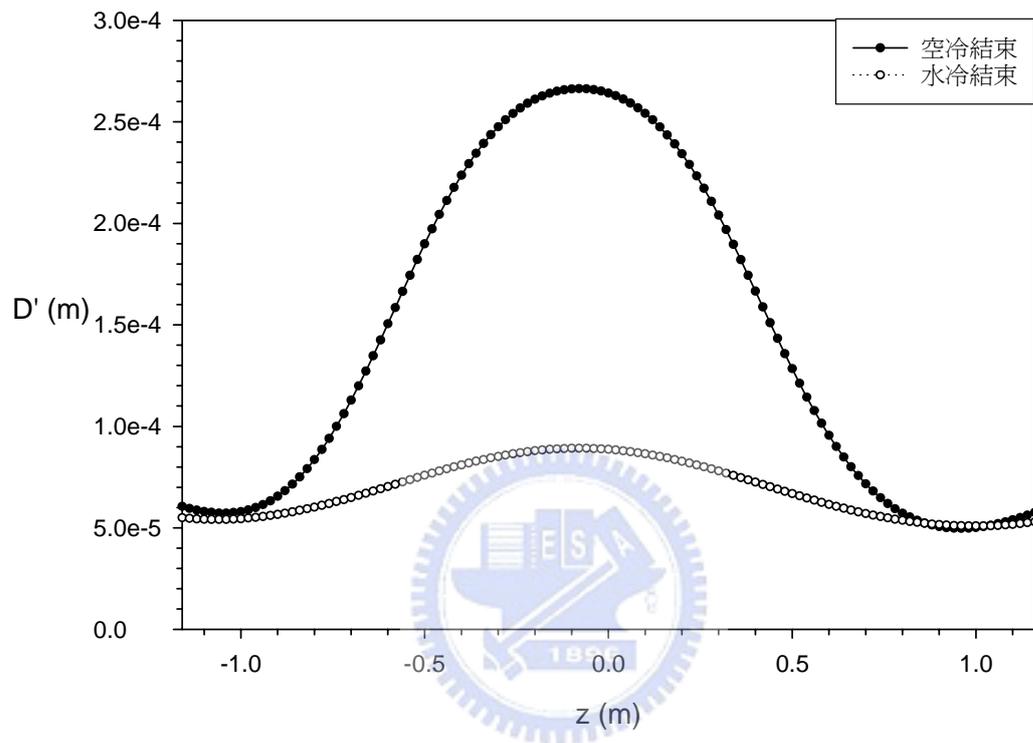


圖 23 輓體分別於空冷($h_a=3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)、水冷($h_w=6000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)結束時的直徑熱膨脹量分佈圖

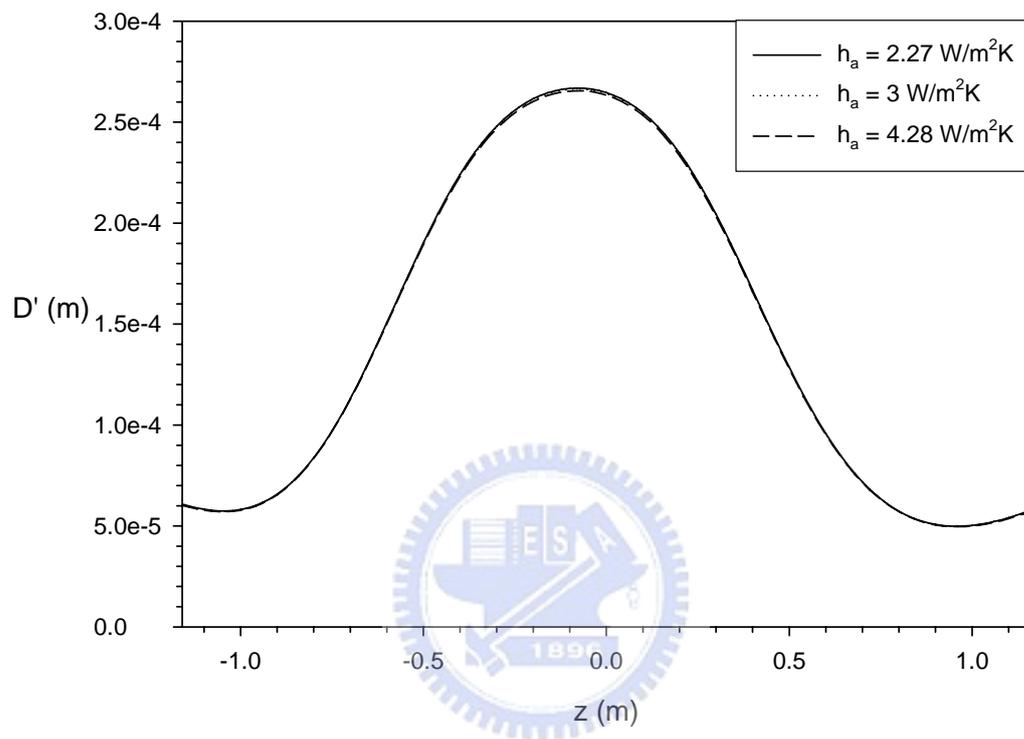


圖 24 輓體於不同空氣冷卻條件下之直徑熱膨脹量分佈圖

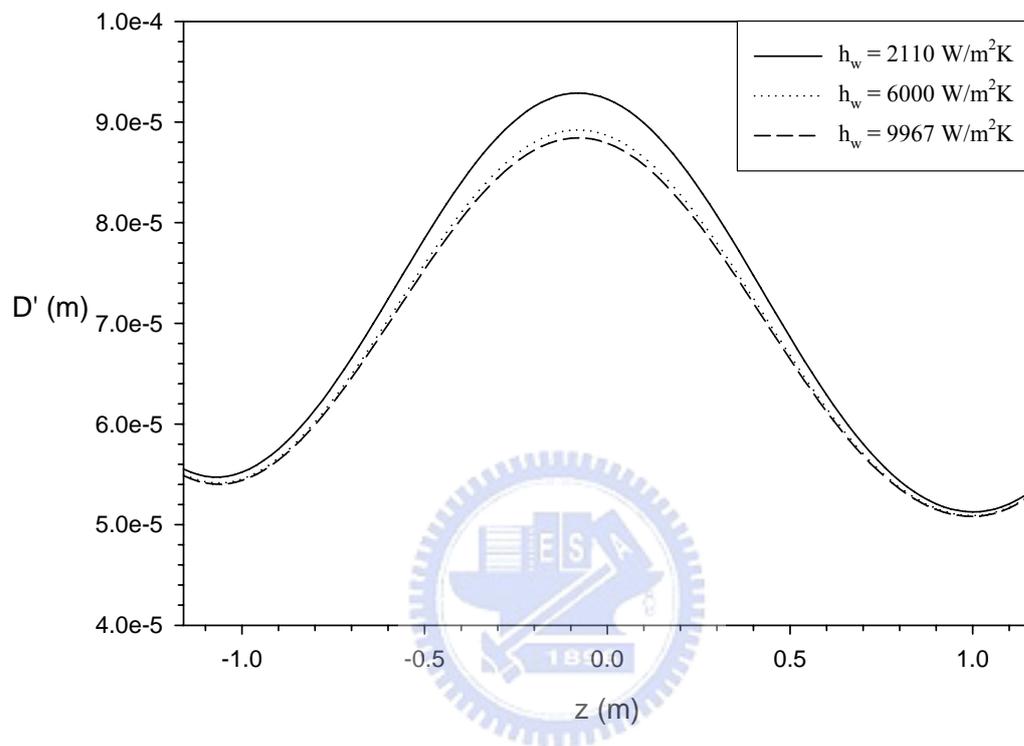


圖 25 輓體於固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，不同水冷條件下之直徑熱膨脹量分佈圖

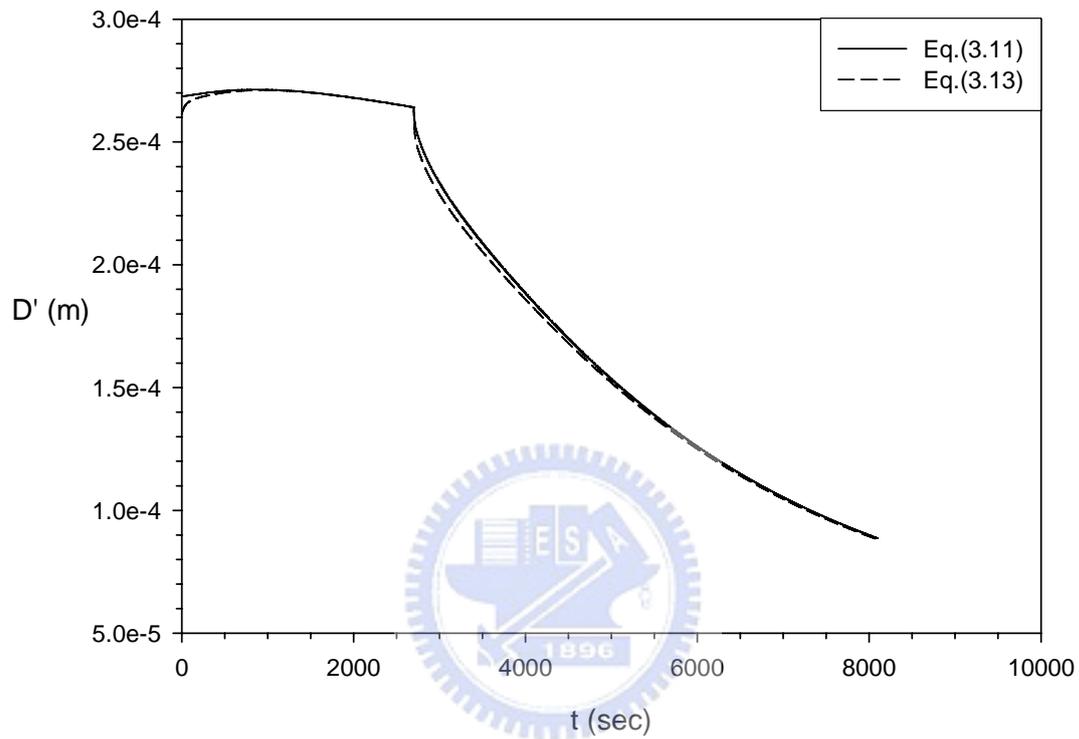


圖 26 不同計算方式之輓體中心直徑熱膨脹量隨冷卻時間變化圖，
其中固定空冷條件($h_a=3\text{W/m}^2\text{K}$)，水冷條件($h_w=6000\text{W/m}^2\text{K}$)