

# 第一章 序論

## 1.1 前言

將熔融金屬液澆入鑄模，冷卻後成形的製造方法稱為鑄造。經由鑄造所得的成品稱為鑄件。鑄件，或經過機械加工後的鑄件，即組成機械主要機構，因此鑄件在機械結構中佔有重要地位。

人類的歷史裡，鑄造這種製造方法很早就出現。根據考古學上的證據，早在五千年前人類就已經懂得使用鑄造了。直到目前，考古學家發現世界上最早的鑄造品是在美索布達米亞平原所發現的鑄銅蛙，其年代估計為公元前三千年左右。中國人使用鑄造的時間也極早，最著名的即為商周時代的鐘鼎銅器，如圖 1-1，其年代推測為約為公元前一千七百年左右。由此可知在早在數千年前，鑄造便與人類的的生活發生關係。



圖 1-1 春秋時期使用之青銅鼎

三、四千年前鑄造品的主要用途大多作為武器、宮廷日常用具或祭祀器具之用。那時的鑄造方法以現在的標準來看，多為技術簡單的鑄造方式。但隨著工業技術不斷進步，鑄造的方法也不斷多樣化，像澆入熔融金屬方式的改良，如壓鑄，離心鑄造，或是模具的更新，如金屬模鑄造、脫蠟鑄造等，使得鑄物的品質不斷提高，也使得鑄造品更常出現在一般人日常生活。現今各種交通工具的多項零件便是以鑄造方法製作，像汽車引擎、傳動機構、火車車輪、連結器與船舶甲板機械、起錨設備等等。除了大型鑄件，日常鐘錶零件、醫療用具、假牙、3C 產品外殼、甚至高爾夫球具與藝術品也屬於鑄造範疇。鑄造技術雖然是在數千年前即被人類所使用，但它的應用範圍並不隨時間發展而慢慢萎縮；相反的，隨著新的材料與鑄造技術擴展，鑄造品在人類生活中使用的層面有越來越廣的趨勢。



## 1.2 研究動機

本研究的構想是來自於技術成形實驗室一系列鎂鋁鋅合金(AZ91D)的壓鑄(Die Casting)條件模擬研究。鎂合金較一般的工程塑膠材料有高強度、散熱性佳、耐衝擊性、耐高溫性、耐蝕性等特性，同時是實用性合金中質量最輕(比重=1.81)的，具有優良的電磁波干擾(EMI)防護等特性。鎂合金與常用工程材料做比較，圖 1-2、1-3、1-4 分別為比強度、比剛性及相對腐蝕率相關比較圖，表 1-1 與表 1-2 為與工程塑膠的比較及機械性質的比較表格。由於鎂合金有上述多項優異的機械性質，政府於民國八十七年還將「鎂合金」列入十大新興產業。

鎂合金的結晶結構屬六方最密堆積(HCP, Hexagonal Close Packed)結晶結構，因此延展性不佳，即展伸材(如板/片、棒/線、管類)的製造不易，難以塑性成形的方​​式大量且快速的生產薄工件。目前業界發展了許多種生產鎂合金薄壁件的方法，其中最常用的方法即為鑄造方法中的壓鑄法。現今鎂合金的壓鑄產品大多應用於電腦資訊 3C 產品上。由於科技不斷進步，電子產品更新淘汰速度加快，加上消費者對高科技產品外型要求不斷提升，設計趨勢也朝輕、薄、短、小的方向來發展。因此對於鎂合金薄件需求量極大，品質要求也日益提高。

本實驗室過去曾就鎂合金壓鑄射出條件進行系列的相關研究，這些研究大多以壓鑄熔湯射出流動情形作為判斷標準。以業界現今的使用情形來說，這樣的角​​度，只能針對壓鑄熔湯流動引起的問題進行改善。但針對後續成品因自由收縮所引起的變形、翹曲與殘留應力方面的問題，並未探討。

而現今針對自由收縮所引起的變形相關的研究資料也不多。本研究主要探討的重點即是鑄造成品因冷卻自由收縮所發生的變形現象。由於壓鑄設備不易取得，因此改用沙模鑄造方法，使用含碳量較高，流動性良好的灰鑄鐵熔湯，替代高壓高速的壓鑄製程。在實驗部分，搭配不同的鑄物厚度與澆口流道位置之變化，設計了五種鑄造條件，量測在這五種條件下薄鑄件最終變形數據，探討鑄件外型與澆口流道位置之變化對最終變形的影響。在數值模擬部分，使用模擬流動能力強大的有限差分軟體 FLOW-3D 來計算模穴填充後的溫度分布，再利用 FEM 軟體 ABAQUS 模擬該溫度分布下，薄鑄物冷卻至室溫時產生的變形分布，比較模擬結果與實驗結果來驗證此種模擬方式的可靠性。

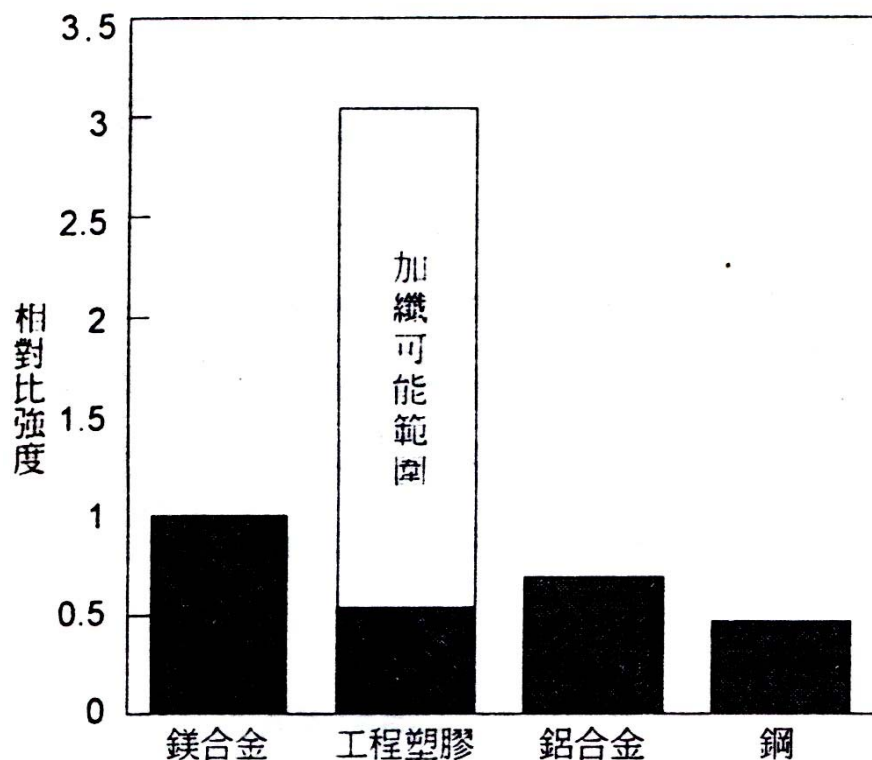


圖 1-2 鎂合金與其他材料之比強度 (鎂合金=1) [1]

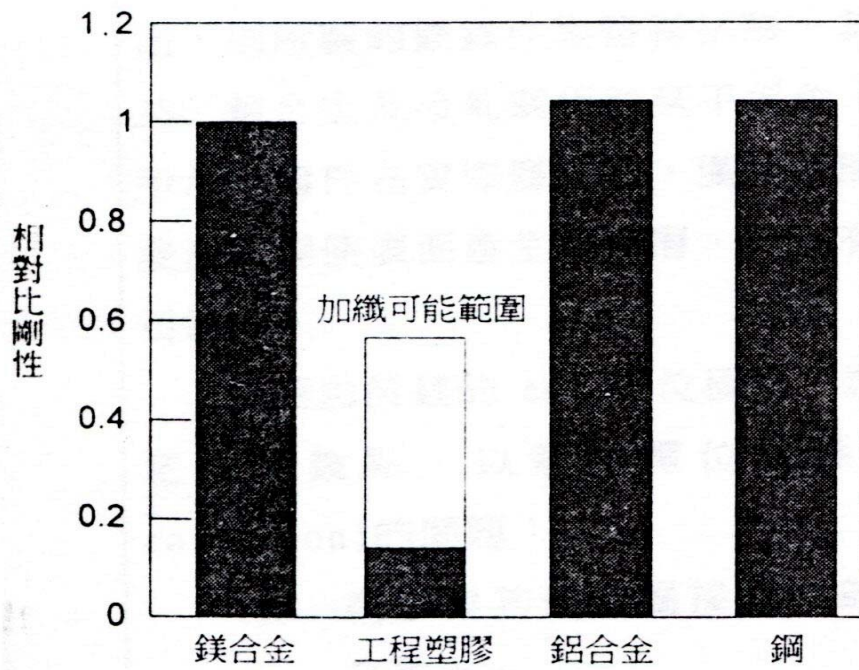
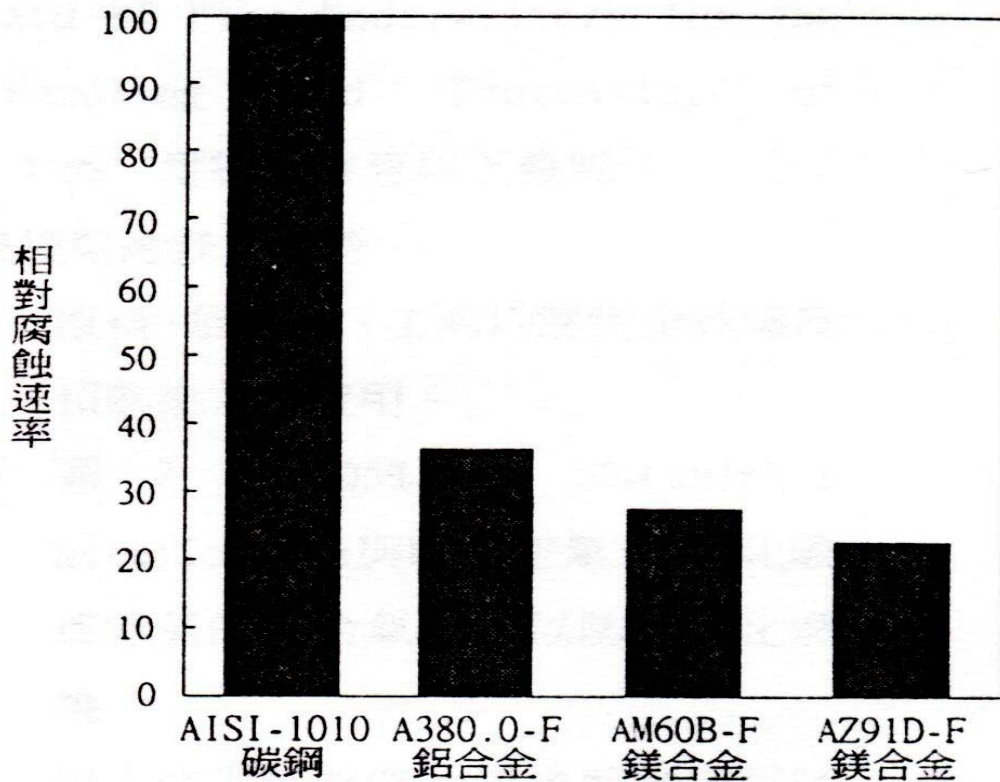


圖 1-3 鎂合金與其他材料之比剛性 (鎂合金=1) [1]



(碳鋼=100, 越低表示耐腐蝕性越佳) [1]

圖 1-4 一般金屬材料之相對腐蝕率

表 1-1 鑄造用鎂合金 AZ91D 與常見工程塑膠材料的比較[2]

特性	單位	Magnesium AZ91D	ABS Hi-Heat	PET 30%Glass	PBT 30%Glass	Nylon 30%Glass
伸長率	%	3	16.5	4.5	3	6
降伏強度	MPa	160	39	152	117	172
拉伸強度	MPa	240	43	193	172	193
楊氏係數	GPa	45	2.1	8.3	10.3	8.9
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.81	1.07	1.61	1.72	1.38
吸水率	%	-	0.33	0.05	0.07	0.7
熱傳導率	W/m-k	51	0.28	0.28	0.29	0.33
熔點	°C	598	260	260	260	300
熱膨脹係數	μm/m-k	26.0	76.5	27	25	34.5

表 1-2 鑄造用鎂合金與常見合金和鋼鐵之機械性質比較[3]

種類		比重	拉伸強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	伸長率 (%)	楊氏模數 (MPa)	比強度
鎂 合 金	AZ91D	1.81	230	160	3	45000	127
	AM60B	1.79	220	130	8	43500	122
	AS41A	1.77	210	140	6	45000	118
鋁合金	ADC12	2.68	295	185	2	71000	110
鋅合金	ZDC2	6.6	283	--	10	--	42
鋼鐵	不鏽鋼	8.02	1220	1080	15	--	152
	碳鋼	7.86	630	430	22	--	80.2
	鑄鋼	7.84	630	420	25	--	80.4

### 1.3 文獻回顧

由於科技的發展，現今模具製作前，可以先進行模流分析，藉由模擬的結果，預測出金屬熔液在模穴中的充填模式及在鑄造過程中可能會發生的問題及狀況，如此便可以降低開模的成本，提升模具設計的效率，與鑄造產品本身的品質。

趙隆山等人[4]針對濕砂模鑄造，以不同尺寸大小的圓柱與圓球作為鑄件模型，使用鋁金屬進行鑄造實驗，探討砂模與模穴中的金屬間之等效熱傳係數。

陳炤彰等人[5]引用電腦輔助工程的技術在鋅合金壓鑄模具設計上，並結合技術較成熟的鋅合金壓鑄技術來驗證模擬結果。

B. H. Hu等人[6]針對薄壁鎂合金行動電話機殼鑄件，做流道與澆口系統的最佳化設計，在研究中採用錐形澆流道系統的設計，鑄件的平均壁厚為0.6mm，分別以22.5mm<sup>2</sup> (45mm×0.5mm)、澆口速度100m/s與30mm<sup>2</sup> (60mm×0.5mm)、澆口速度80m/s兩種的條件設計做模擬，結果發現使用連貫的澆流道系統及較大的流道尺寸，來增加澆口面積與減低澆口速度，可以得到均勻的充填模式。藉由這些設計使最後充填的部位在於鑄件的表面邊緣，進而可以利用逃氣道的設計，得到品質精良的鑄件。

劉展光[7]對針對薄壁筆記型電腦上蓋，使用鎂合金(AZ91D)作為材料，進行澆流道系統的流動模式分析。其研究共採取了扇形澆口與錐形澆流道兩類型的澆流道系統。扇形澆口的部分採取了不同的扇形長度對澆口寬度比與截面積減縮率，討論這兩項因子對充填模式的影響。錐形澆流道

則探討澆口是否連續對充填模式的關係，並比較分析這兩類型澆流道設計對大平面薄壁壓鑄件熔湯充填之優缺點。

曾重誌[8]針對大平面薄壁鎂合金(AZ91D)，結合 Flow-3D 與田口實驗設計法規劃實驗分析條件進行模流分析。選擇射出壓力、射出速度、射出溫度與模具溫度為控制因子，每一因子皆選擇三個實驗水準，品質目標設定在最小壓力差、最小溫度差與最少固融率，得到一組最佳條件。

蔡定江[9][10]針對於鎂合金薄件壓鑄變形條件進行分析，並提出改進對策。以實驗方法量測一大平板溫度下降數據，求出各量測點上單位時間內最大溫度變化，並以此作為基礎，以 Ansys 進行變形模擬。結果說明當鑄件完成取出後，立即將澆道支架切斷可以有效斷絕翹曲變形。





## 1.4 論文大綱

### 1. 第一章序論：

介紹本論文研究的前言，研究動機與文獻回顧。

### 2. 第二章鑄造與變形：

本章節內容包括鑄造法簡介、鑄造基本簡介、使用材料、成分影響及冷卻與變形關係。

### 3. 第三章實驗方法與步驟：

本章節內容主要介紹沙模鑄造實驗架設流程與變鑄造後薄板變形分析方法。

### 4. 第四章數值模擬方法與步驟：

本章節內容主要針對本論文的模擬假設、方法與步驟做詳細的介紹，說明 FLOW-3D 模擬條件設定與 ABAQUS 熱變形模擬條件設定。

### 5. 第五章研究結果與討論：

本章節針對研究所得到的結果，做一系列的分析並討論。

### 6. 第六章結論與未來展望：

本章節將研究的結果做最後的結論，並規劃未來的展望。

## 第二章 鑄造與變形

### 2.1 鑄造法簡介

鑄造就是將熔融的金屬液體注入預先做好的鑄模內，等金屬溶液凝固後取出，除去澆口冒口，即獲得所需的鑄件。鑄造的分類法有許多種：依照鑄入金屬液體的動力來源可分為壓力鑄造與澆鑄等。依照模具的種類又可分為沙模鑄造，石膏模鑄造，永久模鑄造等。

鑄造是數十種金屬加工方法中的一種，依每年生產數量而言排名名列前茅，在日常用品中應用於炊具、烤爐、手工具與馬達罩等；在大型機具中如飛機、輪船的引擎、推進器，飛機、電廠的渦輪葉片等都是鑄造的產品。然而，金屬加工方法那麼多種，鑄造這種機械製造方式卻仍還佔有那麼重要的地位，主要因為它有下列數種優點：

#### 1. 應用性高：

許多複雜形狀的鑄件，不管是內部或外形均可用鑄造方法生產，其他鑄造方法均會受到加工方向的限制，而侷限了加工能力。

#### 2. 製造過程簡單：

一個鑄件只須一次鑄造，而且為整體的鑄件。其他製造方法大多需要經過多次加工才可獲得，且由很多零件配合而成。

#### 3. 可以大量生產：

同一模型可以生產數萬件相同的鑄件，一個模具有時可以重複澆鑄數十件產品，脫蠟鑄造可以一次鑄得數百件小零件，而且可用自動化設備從事生產。

#### 4. 可製作大而且重的金屬製品：

如重二百噸以上的發電機或船用引擎。如果用其他製造方法，不但不經濟而且難以製造。

#### 5. 可獲得良好的機械材料性質：

如切削性、耐震性；亦可應用在方向性凝固或單晶的渦輪葉片製作。

雖然鑄造的優點很多，但是不可諱言，它仍存在一些缺點，加上人力成本提高，廠房自動化機械的使用，故許多工業國家的鑄造工廠數量與勞動人口漸漸減少。撇開工作環境不佳等等缺點，鑄造仍有下列製程上的困難：

##### 1. 鑄造品質難以控制：

鑄造是在金屬熔融狀態下進行，因此雜質，氣孔，縮孔容易夾在鑄件內部，而且金屬成分會隨著溫度高低與時間而改變。因此若想得到優良鑄件，必須採取嚴密的品管措施。

##### 2. 物理現象相當複雜：

鑄造過程包括了流體的流動，流體的熱傳遞，凝固的體積收縮等等現象。若想有系統的進行電腦分析並非易事。除此之外，模擬過程的各項物理常數不易取得，均增加了其分析上的困難。

## 2.2 沙模鑄造的基本程序

普通鑄造廠所採用的鑄模是砂模，主要是因為砂模的經濟性、再生性、可塑性等非常優越。以下簡單說明砂模鑄造的基本五個步驟[11]：

### 1. 模型製作：

首先根據工作圖製作一組模型，模型尺寸較鑄件所需尺寸稍微放大，以備金屬液的凝固收縮與加工裕量等，且應考慮起模斜度以便造模；如果鑄件中空的話，必要時製作砂心盒來做砂心，因此模型不但是實心的，且應增加突出的砂心頭，以便在砂模中形成砂心座來支撐砂心，如此在澆鑄時才可製作中空的鑄件。

### 2. 砂心的製作：

砂模和砂心的製作是分開的，由於砂模的佔地較廣，一般砂模製作完成後，應儘快澆注，以免浪費空間，故砂心最好先存放，以便及時安置砂心、合模、澆鑄；且砂心沒有砂箱保護，應注意他的強度，以免存放或安置時破損。另外，澆注時砂心被高溫的金屬液長期罩住，故應特別考慮他的耐火性與通氣性。

### 3. 造模：

造模就是指砂模的製作，一般砂模分成上模與下模兩層，也有多層砂模者。造模時，除了應將模型安放在兩層砂模間的適當位置外，應特別注意澆冒口等流路系統之開設，當模型起出後，必要時應修模、安置砂心，然後合模，準備澆鑄。

### 4. 熔化與澆鑄：

為了能及時澆鑄，一般在砂模製作時，熔化部門的工作人員應同時進行金屬的熔化作業。金屬的熔化依照材料種類的不同，選用適當的熔化爐。熔化作業除了應注意配料的計算外，溫度的控制、除渣、除氣及爐前試驗都是不可鬆懈的。金屬熔化完成後，即可進行澆鑄工作，澆鑄過程中應注意的是速度的控制、高度的調整及流量的控制。

#### 5. 清砂：

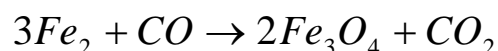
鑄件澆鑄完成後，必須要拆箱，清砂，以便將黏附在鑄件表面的沙模除去，使鑄件表面光潔。清砂的方法很多，可用敲擊，噴砂，珠擊或酸洗等方式清砂。鑄件上多餘的金屬，如澆冒口，飛邊等應予以清除，如果鑄件上有不礙功能的缺失，可以焊補或其他方法予以修補，清砂完成即可出貨或進一步的處理，如機械加工，熱處理等。

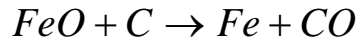
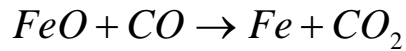
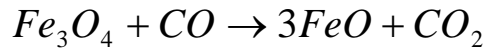
### 2.3 鑄件材料與砂模種類

鑄件的一般材質可分為鐵類合金與非鐵類合金。鐵合金又可分為鑄鐵及鑄鋼兩大類。本論文使用的是含碳量高的鐵碳合金，即為鑄鐵。在鑄造鑄鐵類物件時，主要使用的原料有鑄錠、廢料與配料用合金。以下分類說明[12]。

#### 1. 鑄錠：

鑄錠指的是各種礦砂原料經冶煉後得到的產品。以製造鑄鐵來說，使用的鑄錠為生鐵(pig iron)鑄錠。煉製生鐵的基本原理，就是將鐵礦砂中的氧化鐵內的氧還原除去。其反應式如下所示：





## 2. 廢料：

鑄鐵原料內，除生鐵鑄錠外，廢料常佔很大的份量。一般廢料的來源為廢鐵、廢鋼。

## 3. 配料用合金原料：

加入配料用的合金目的是改善鑄件物性或降低熔點，使易於熔化。

如矽鐵、錳鐵、矽鋁等等。

砂模是各種鑄模中最普遍應用的一種。鑄模材質的選擇主要根據鑄件的材質，精密度與成本等因素而選定。砂模的成分主要以矽砂為基本材料，再混合粘接劑與添加劑後混合而成，且有多種的分類方法。以下依照砂模粘著材料之不同分為兩大類，一是用黏土製作的普通砂模，二是利用其他特殊黏著劑製作的砂模，於此將就只介紹一般常見的普通砂模。

普通砂模是以黏土為粘接劑，再添加水分及其他添加劑。普通砂模一般常見的是濕砂模，乾砂模，表面乾砂模等三種。

### 1. 濕砂模：

濕砂模可用天然砂或合成砂製作，砂模中的主要成份為矽砂，黏土、水分及其他添加劑，濕砂模製作完成後，不必烘乾，在潮濕狀態下即可進行合模澆鑄，因而得名。因無需烘乾故較乾砂模方便，製造

費用最便宜，應用也最廣泛，一般應用在尺寸不需太精確的中小型鑄件。

## 2. 乾砂模：

當鑄件形狀複雜，斷面和體積較大，或需特別光滑表面，尺寸需要較精確時，常用乾砂模鑄造。砂模是用濕砂製成，放入烘乾爐或就地烘乾，待水分完全蒸發，砂模確實乾燥硬化為止。所用砂箱必須是鐵製或其他金屬製成，以免燒毀。

砂模烘乾後若能維持乾燥，則可擱置若干時日才澆鑄；乾砂模內既不含水分，高溫金屬液注入砂模內時，所產生的水蒸氣較少。因此鑄件內的氣孔較不容易發生；而且乾砂模較濕砂模堅硬，不易被注入的金屬液沖毀。金屬的砂孔減少，鐵水流動性較佳，滯留現象可以改善。

## 3. 表面乾砂模：

當無須完全使用乾砂模，又使用濕砂模也不妥當，則可將濕砂模模穴表面烘乾使用，這種砂模叫做表面乾砂模。表面乾砂模適合鑄造大型鑄件或形狀需要精確的鑄件，鑄造效果則介於濕砂模與乾砂模間。需要注意的是砂模表面經烘乾後需迅速進行合模澆鑄，以免乾燥硬化的內表面從砂模中或空氣吸取水分，復變成濕砂模。

## 2.4 鑄鐵成份與影響

鑄鐵為一普通名詞，泛指含碳量 2.0~6.67% 的鐵碳合金[10]。普通鑄鐵所含的元素，除鐵外，至少尚包含有碳、矽、錳、磷，硫等五種元素。至於合金鑄鐵，則尚有其他元素，如鎳、鉻、鉬等，以改善鑄鐵的性質一般成分的影響

### 1. 碳：

鑄鐵中的碳，均以化合碳或自由碳的形式出現。所謂的化合碳多以硬脆的雪明碳鐵(Cementite,  $Fe_3C$ )形式存在。當碳的含量超過某一限度，則碳不再與鐵結合而單獨存在，即所謂的自由碳，自由碳多以石墨碳的形式存在。化合碳使鑄鐵的組織細密，硬而脆，其量越多時，鑄鐵的剖面越成白色，熔化時流動性差、收縮性大，但熔點低。

相反的，石墨碳使鑄鐵組織粗，結晶大，斷面成灰色，量越多時組織越軟，流動性增加，收縮率減少，並使熔點較高。

### 2. 矽：

矽在鑄鐵中主要影響的是對碳的石墨化影響，它可使碳化鐵分解為石墨。舉例來說，若矽的含量低，則雪明碳鐵轉化為石墨的比例較低，因此形成的鑄鐵斷面較亮、白，具有難以車削的性質；若矽的含量較高，則碳多轉為石墨的形式存在，形成的鑄鐵斷面則較灰暗，具有易於車削的性質。

### 3. 硫：

硫扮演的角色是石墨的抑制劑，即化合碳的穩定性，它的作用與矽



相反。一般來說，一份硫可以抵銷十份矽的作用。若鑄鐵的含硫量太多，會使鑄鐵有過高硬度，降低機械加工性。

#### 4. 錳：

硫對錳的化合性高於硫對鐵，因此可以用來抵銷硫對矽的作用，增加石墨的成長。硫化錳可以單獨存在於鐵中不與鐵結合，浮出於鐵水的表面隨著熔渣被排除。但錳的含量不可過高，若錳含量超過硫化作用的量時，反而和碳作用生成碳化錳，使鑄件變硬。

#### 5. 磷：

磷常與鐵結合成磷化鐵，磷化鐵具有堅硬的性質。因此磷可以增高鐵的硬度，降低熔解溫度，增進流動性。一般來說，高強度與車削性好的鑄鐵，磷含量不能太高；相反的，若是斷面薄，形狀較複雜的鑄件，磷含量可稍微增高，使鐵水的流動性提高。

一般而言，鑄鐵的性質除了受到化學成分影響外，基地組織與冷卻速度對鑄鐵的機械強度，化學性質與熱性質有重大的影響。本研究希望以鑄造件模擬鎂鋁鋅系合金(AZ)凝固時的變形趨勢。鎂鋁鋅合金具有流動性良好，材料堅硬的特性。因此在薄鑄件實驗材料的選擇上，偏向流動性良好，質地又較為堅硬的合金材料。實驗部分所使用的是含碳量較高的鑄鐵，其流動性較佳，從斷面來看色澤灰量，可知含有較多的石墨。由於又屬薄件鑄造，因此有極快的冷卻速率，具有較高硬度。而在實驗部分，選用灰鑄鐵當作模擬材料的選擇。

## 2.5 變形與冷卻

造成鑄物變形的原因歸納有兩點，一部份是由於液體轉化為固體時，材料的不均勻冷卻造成不同的金相組織，材料間的彼此擠壓形成內應力(或是殘餘應力)而造成變形。另一部份是由於冷卻過程中熔湯和鑄物的體積改變所造成，冷卻造成體積變化，不均勻的冷卻造成了不均勻體積改變，這也就是造成鑄物變形的另一原因。如圖 2-1 所示。

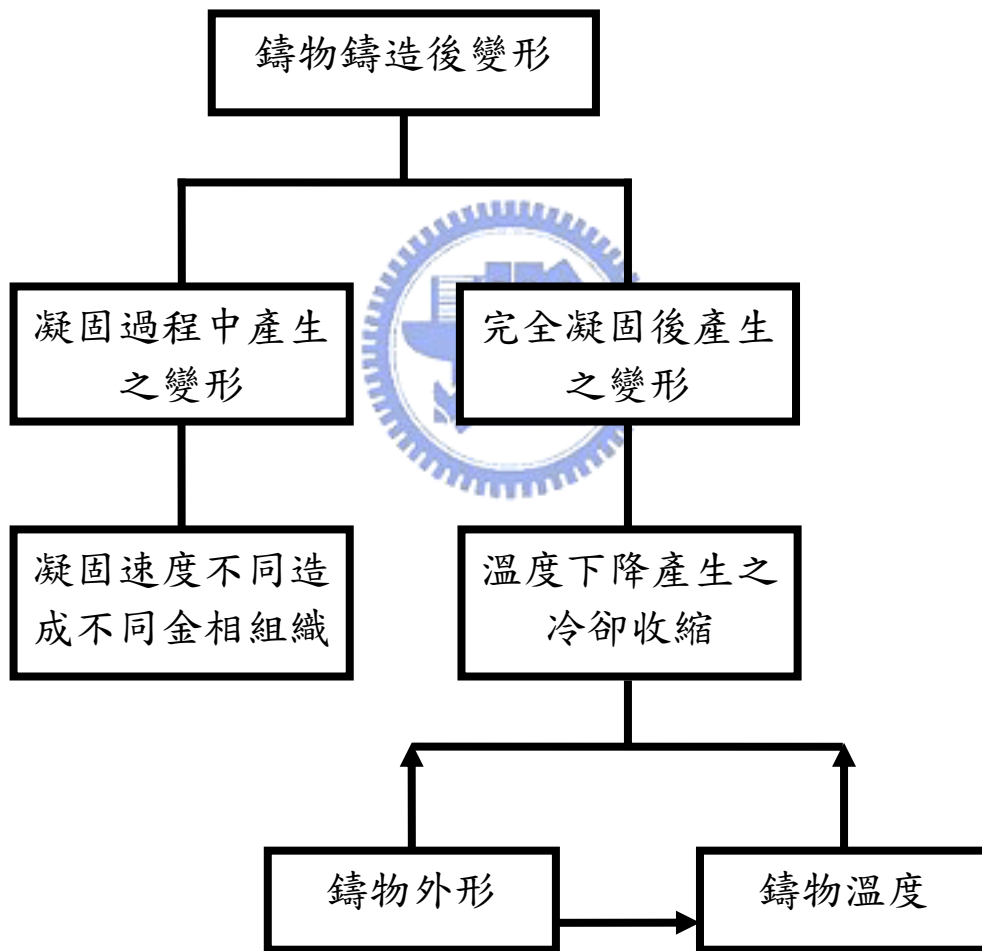


圖 2-1 鑄造後變形原因分析圖

這裡先就溫度下降之冷卻收縮進行討論。事實上當溫度開始下降時，首先發生的是熔湯體積收縮導致體積減少。這時熔湯收縮的體積和溫度的下降成一近似線性的關係。這樣熔湯液體的體積減少不會影響完全固化後鑄物的變形，可以直接增加熔湯來補償減少的體積。而在固化之後所發生的體積收縮卻完全不同。在自由收縮的情形下，我們用溫度變化，原始長度，線膨脹率可以定義出物體熱漲冷縮的關係。

一維熱膨脹(收縮)公式：

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T \quad (2-1)$$

三維熱膨脹(收縮)公式：

$$\Delta V = 3\alpha \times V \times \Delta T \quad (2-2)$$

其中 L 和 V 分別代表物體的長度與體積，而  $\Delta L$  和  $\Delta V$  分別代表物體的長度變化與體積變化。兩者都與溫度變化  $\Delta T$  成一線性關係。

除了考慮鑄物的自由收縮外，完全凝固之後鑄物冷卻的過程中，因為體積的減少導致鑄物與鑄模的相互拉扯。這樣的拉扯限制鑄物的自由收縮，使得受鑄模限制的鑄物比其單純自由收縮的體積要複雜。鑄模對鑄物的拘束不但增加預測鑄物形狀的困難，也還導致鑄物的其他的缺陷，像是熱撕裂或是裂痕。

總括來說，鑄物在收縮的過程裡，可能受到外界(鑄模)的拘束限制，或是就是本身(鑄物)外型的拘束限制(幾何條件不對稱造成不均勻冷卻)，而產生變形或斷裂，如圖 2-2 所示。在非自由收縮條件下，受限於鑄物與鑄模的幾何限制與不均勻冷卻，鑄物變形的關係變的更難預測。因此在本

論文中，選用外形簡單的鑄模鑄件設計，以排除冷卻收縮時鑄模對鑄物的拉扯影響，只考慮不均勻冷卻對鑄物的影響。

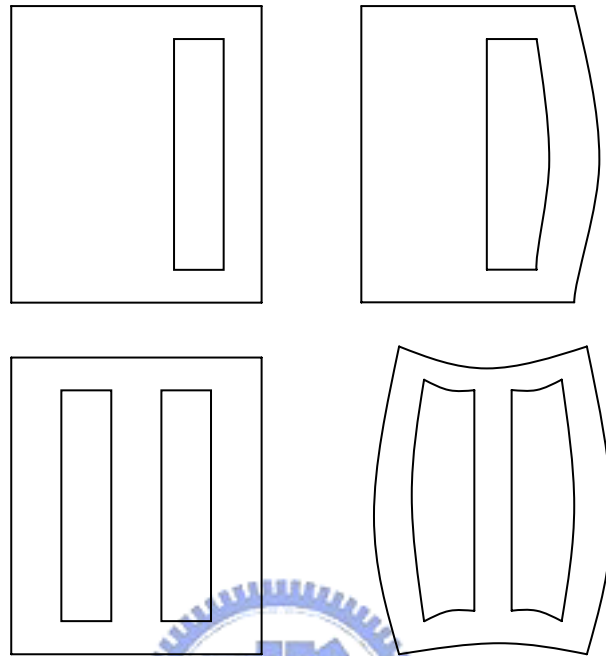


圖 2-2 鑄件不均勻收縮圖[13]

在考慮鑄物的變形問題時，必須將固化時金相變化所造成的變形效應與不均勻冷卻收縮的變形效應考慮一起考慮。但以現今的模擬軟體的發展來說，固化冷卻時金相變化造成的變形尚未發展完全。因此本論文只考慮整個熔湯已達完全固化後，鑄物冷卻所造成的變形。

冷卻時，主要的機制是熱的散失。因此需要注意的，便是鑄造過程裡熱傳的機制，包括鑄件內的熱傳導與鑄件與模壁的熱對流。又因模壁完整的包覆出模穴，因此熔湯或鑄件表面熱輻射所散發出的熱能馬上被模壁吸收，這裡把這樣的熱交換歸在熱傳導及熱對流中。

一維熱傳導公式：

$$q = -k \times A \times \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2-3)$$

一維熱對流公式：

$$q = h \times A \times (T_m - T_w) \quad (2-4)$$

其中  $q$  為傳遞熱量， $A$  為截面積， $k$  和  $h$  分別為熱傳導係數與熱對流係數， $\frac{\partial T}{\partial X}$  為固態材料的溫度梯度， $T_m$  為熔湯溫度， $T_w$  為模壁溫度。傳遞的熱能和溫度分布成一線性關係。

大多壓鑄件缺陷的產生都和合金熔液固化、冷卻速度有關。根據熱傳公式，無論是熱傳導或是熱對流，溫度的分布都大大的影響熱傳的速度。當鑄件由高溫冷卻凝固成形時，其溫度分布並不為均一數值。而本研究主要就在探討這樣的不均勻溫度場配合鑄物不同的外型特徵，冷卻時會產生何種的變形。先將焦點放在成型鑄件的溫度分布模擬。再給予冷卻的邊界條件，模擬鑄件冷卻後的變形，以期望能進一步解決鑄件製造過程中有可能發生的變形所引起的其他缺陷。

### 第三章 實驗方法與步驟

#### 3.1 實驗目的

透過薄件的砂模澆鑄，觀測出不同澆口位址與不同鑄件厚薄變化的條件下，對最終鑄件成品變形與殘餘應力的影響。因此設計了三種不同的試片，分別配合不同澆口位置，得出五種不同的砂模澆鑄條件，觀測各條件下鑄物於鑄造後隨時間變化的變形量，並分別予以討論。

#### 3.2 實驗流程圖

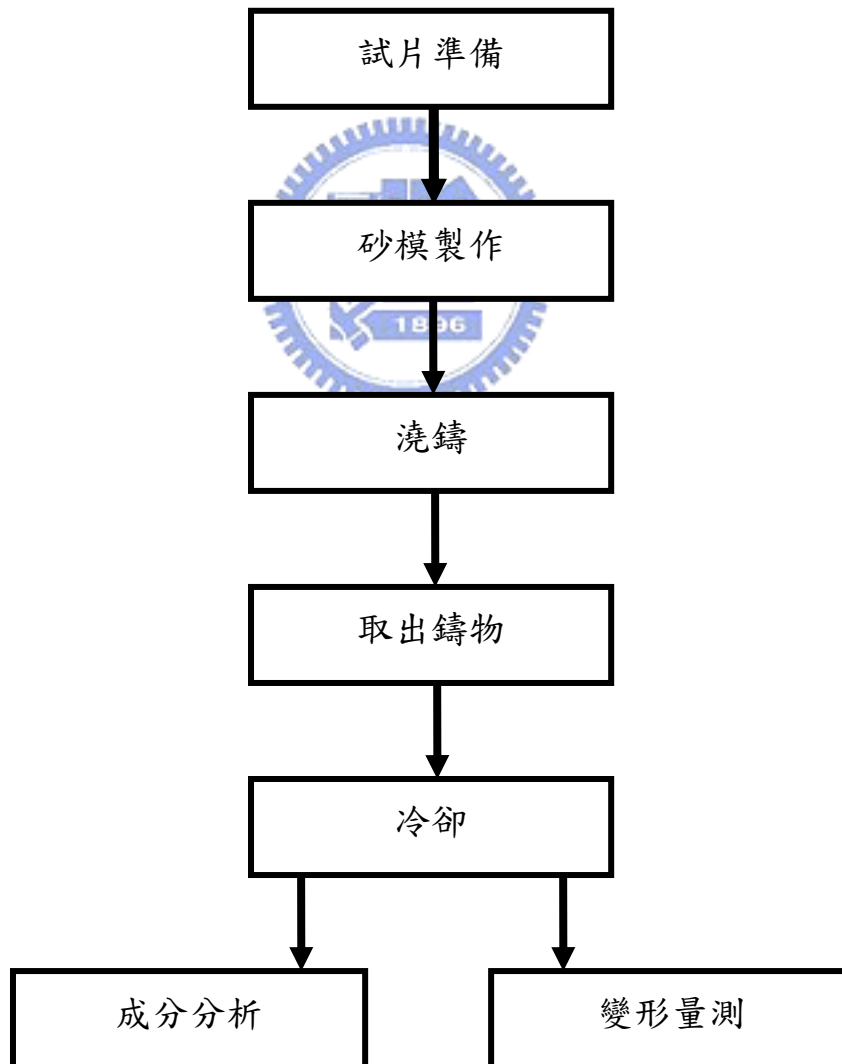


圖 3-1 實驗流程圖

### 3.3 試片外形與澆道外形

實驗利用壓克力木型共設計了三種不同外型的鑄物形狀。木型尺寸圖如圖 3-2。在最初設計實驗時決定這樣的設計有兩個原因。第一、三種試片有相似的幾何外型、再搭配上中間澆口與左側澆口、右側澆口三種不同的澆口位址，組合出五組符合實際鑄造情形的不同澆鑄條件，其條件組合表與示意圖於 3.4 節說明。第二、試片的外形簡單，沒有內部孔洞設計，可以降低模具對鑄物的拘束效應。

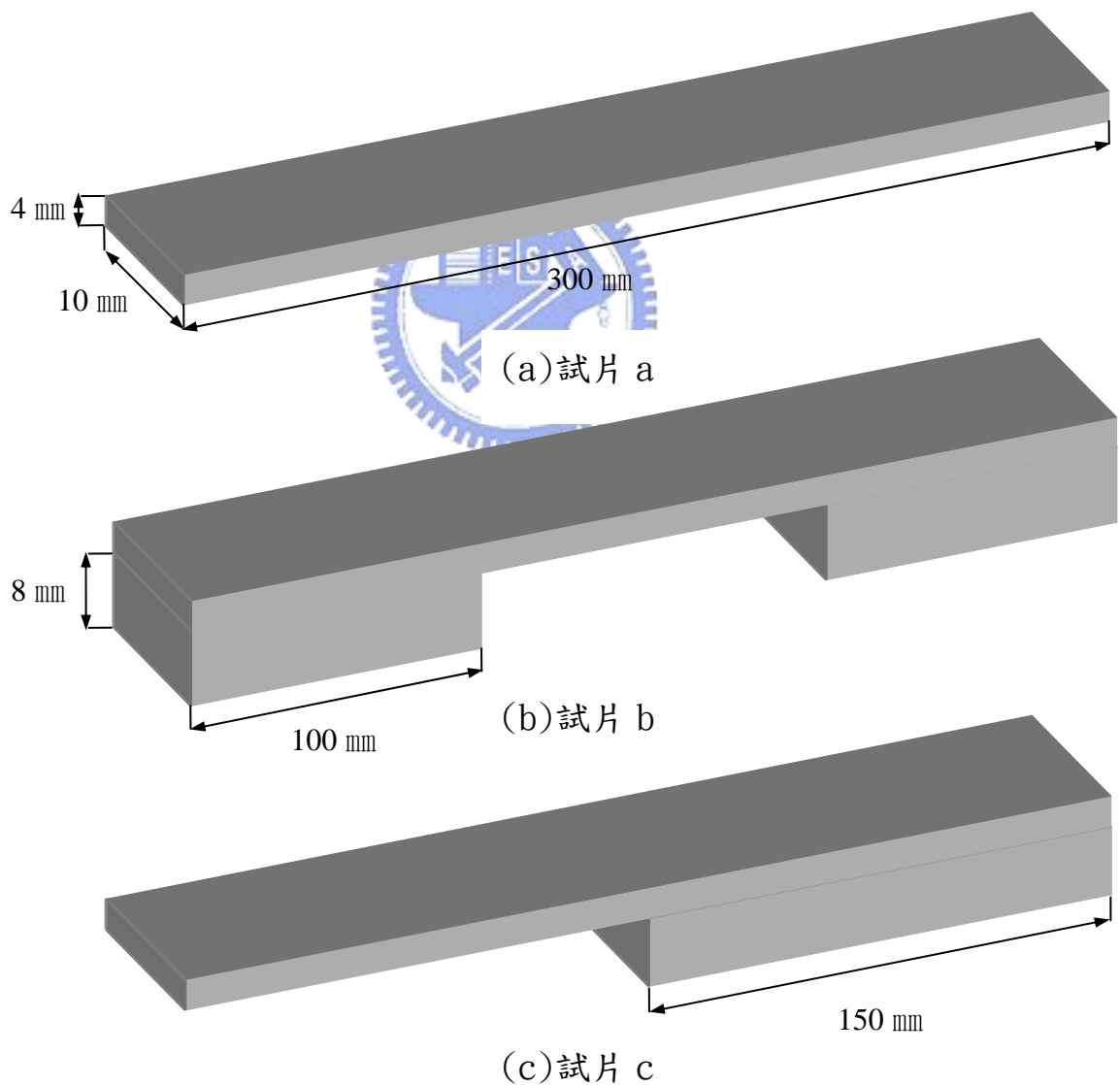


圖 3-2 鑄物試片外形示意圖

五種不同的澆鑄情形採用同樣的澆道尺寸。使用這樣外形的澆道有兩個原因：第一、外形簡單，便於使用手工具於砂模上作出澆道。第二、橫澆道三角形截面設計可將雜質與氧化物留在橫澆道內。下澆道與橫澆道的尺寸如圖 3-3 所示。

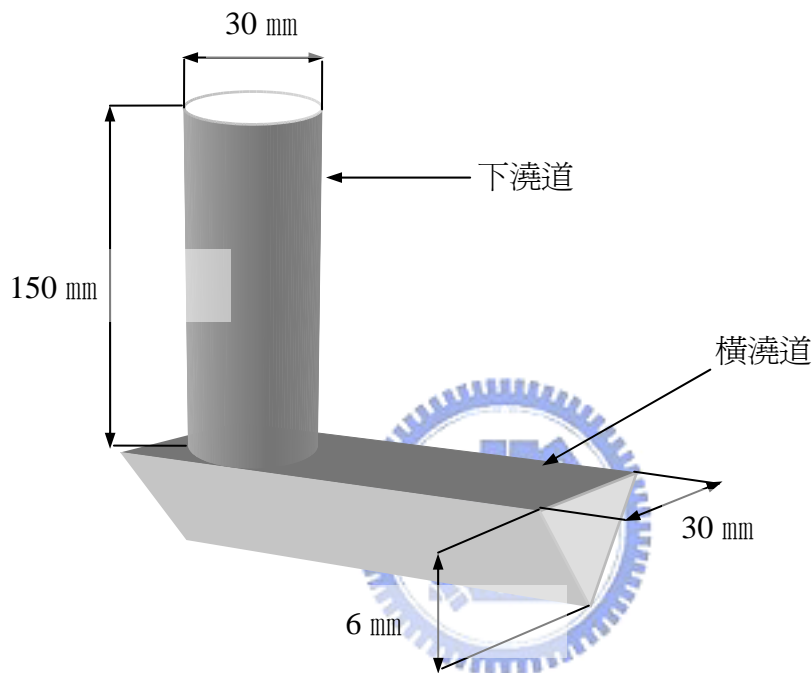


圖 3-3 澆道模型示意圖

#### 3.4 澆鑄使用材料之選定

實驗的進行是在汐止的一間澆鑄場進行。所有使用的設備與原料都由工場提供。因為算是屬於較為傳統的工廠，對於使用模砂名稱與一般鑄造書籍上的並不相同，而且模砂與熔煉金屬的調配並不精確，都憑師傅的經驗選擇材料的比例。這增加了對於材料量化描述與之後模擬參數選定的困難。在這裡先假設熔煉的金屬為一般使用技術最簡單也最常見的灰鑄鐵。



### 3.5 五種澆鑄條件：

三種不同試片配合不同澆口位置，得出條件一、二、三、四和五共五種不同的砂模澆鑄情形。箭頭代表澆鑄方向。條件組合如表 3-1 所示，示意圖如圖 3-4 所示：

表 3-1 澆鑄條件組合表

	中間澆口	左側澆口	右側澆口
試片 a	條件一	條件三	X
試片 b	條件二	X	X
試片 c	X	條件四	條件五

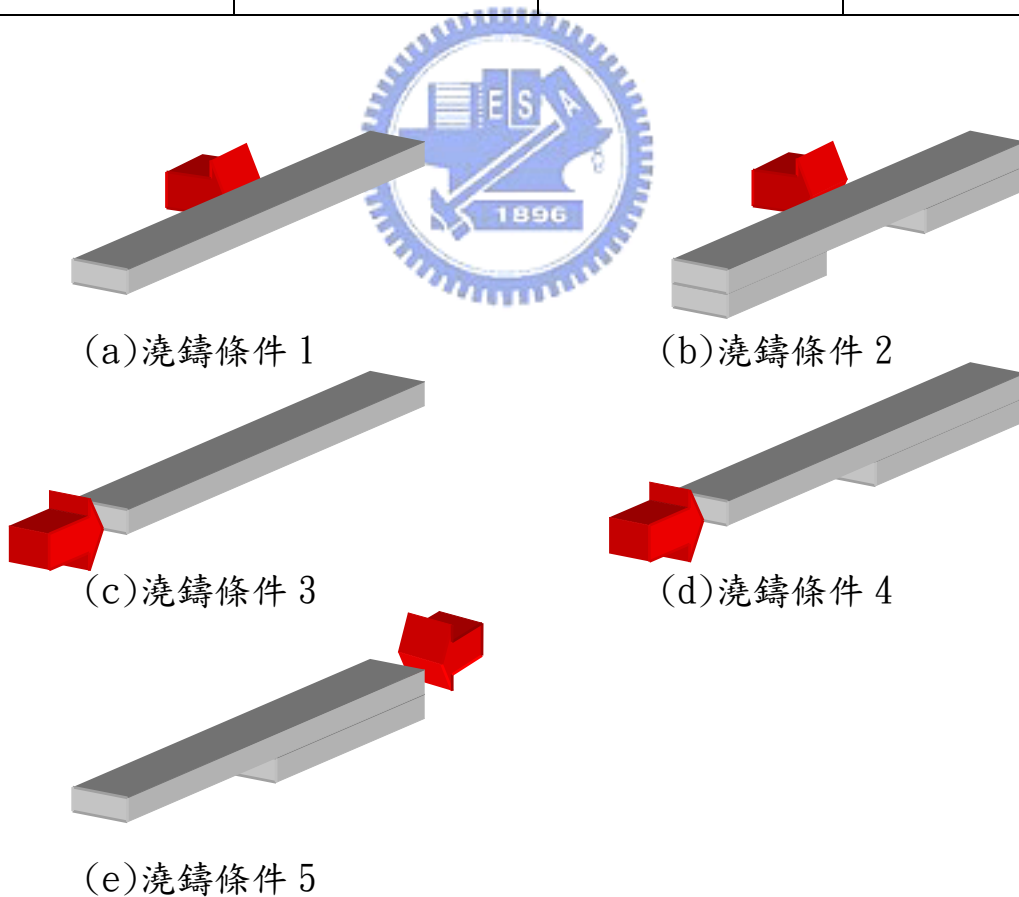


圖 3-4 五種不同澆鑄條件示意圖

### 3.6 澆鑄流程

#### 1. 砂模製作：

將試片放入無銷砂箱，置於造模板上，先鋪入一層細緻面砂，等到完全覆蓋試片時，將面砂搗實。再大量倒入裏砂，再次搗實裏砂，並用刮板刮去多餘的裏砂，使砂面高度與砂箱同高。將砂箱反轉 180 度。用小刮刀作出一寬約 30 mm，深約 6 mm 之橫澆道。將另一無銷砂箱置於造模板上，填滿裏砂並搗實，用半徑約 30 mm 鐵圓管挖出一下澆道。將上下模合模。此即完成砂模製作。如圖 3-5。



圖 3-5 砂模圖

#### 2. 材料融煉與澆鑄：

冲天爐中將生鐵、焦炭、廢鑄鐵料等熔解，如圖 3-6。等到鐵水開始流出，用澆桶盛滿鐵水進行澆鑄。每個砂模鑄滿時間約 1~2 秒不等，

澆鑄完成冷卻約五分鐘後，開始破模清砂。



圖 3-6 鐵水熔解圖

3. 取出鑄物：

破砂後，先切斷澆道，置於砂地上使之冷卻。並同時用鉗子手動清砂。

### 3.7 成分分析

本實驗是在一般的小型鑄造工廠完成，為了模擬出良好的鐵水流動性，因此使用灰鑄鐵作為實驗原料，配料計算與鐵水成分控制是依照師父的經驗調配出來。為求實驗的精準，在鑄件完成後仍送交 EDX 分析以確定各元素成分的含量。

SEM(Scanning Electron Microscope，掃描式電子顯微鏡)的成像原理是利用一束具有 5~30 KeV 之電子束掃描試片的表面，並將表面產生之訊號（包括二次電子、背向反射電子、吸收電子、X 射線等）加以收集經放大處理後，輸入到同步掃描之陰極射線管 (CRT)，以顯現試片圖形之影像。EDX(Energy Dispersive X-ray Analysis，能量散射光譜儀)為其附件設備，可作化學元素定性、定量和分佈影像分析。本分析使用的是清大工科所內的電子顯微鏡，型號 JEOL JSM-6330F。如圖 3-7 所示。



圖 3-7 掃描式電子顯微鏡

### 3.8 鑄造後之薄板變形分析

每個試片長度都為 300 mm，以 30 mm 為一單位，將試片分為 10 等份，共計有 11 個端點。取中間九點做為量測位置。所有的量測設備皆使用實習工場設備。高度量測規的最小刻度為 0.01 mm。實際量測操作步驟如下：校正應變規，設定三角椎的最高點為基準零點。在操作平台上用三角椎將試片撐起，三角錐與試片的接觸點作上計號，每次量測皆使用相同的接觸位置。使用應變規量測中間九個節點的高度變化與厚度。量測設備如圖 3-8 所示。



圖 3-8 高度量測設備

## 第四章 數值模擬方法與步驟

### 4.1 模擬目的

本章將針對金屬熔湯流動至凝固後，溫度下降引起的變形進行模擬研究。這樣模擬的特點包含了兩種不同觀點模擬間的資料轉換。目前在解決流動問題領域，多是以固定於空間中的絕對座標作為研究問題的觀點，也就是 Euler 網格。但在固體力學裡，模擬計算所使用的有限單元法，使用的網格跟隨著物體形狀建立，也就是所謂 Lagrange 網格。這兩種網格間資料的交換來模擬鑄物冷卻所造成的變形，是本研究模擬的重點。

本研究的對象是物件的鑄造，當熔湯倒入下澆道起至填滿模穴完全凝固為止，這段過程中發生的物理現象包含液體流動與熱傳遞，使用模流分析軟體模擬至模穴填滿後，可計算得出模穴內部溫度分布。將此模穴內部一溫度分布當成初始條件，固定物件表面節點溫度始終為室溫，採用有限單元法模擬從凝固完成到最終物件到達與外界溫度平衡，得到物件的變形分布。

本論文模擬過程中，前後共使用兩套 CAE 軟體：一是模擬流動情形使用的 Flow-3D，這套軟體在海洋工程，一般流動與鑄造相關模擬問題被許多人所採用。另一套軟體是固力分析中常使用的 ABAQUS。ABAQUS 是一套功能強大的工程模擬軟體，對於任何的幾何外形與典型的工程常用材料，皆可作線性與非線性分析，可模擬領域也相當廣泛，如熱傳、結構或質量擴散等等。於大部分模擬中，使用者只需提供所需模擬的工程資料，包括幾何結構、材料性質、邊界條件或初始條件，ABAQUS 將會自動連續調整負載增量

(Increment)與收斂誤差，計算出結果。

## 4.2 模擬流程圖

圖 4-1 是模擬流程圖。詳細步驟後面詳加說明。

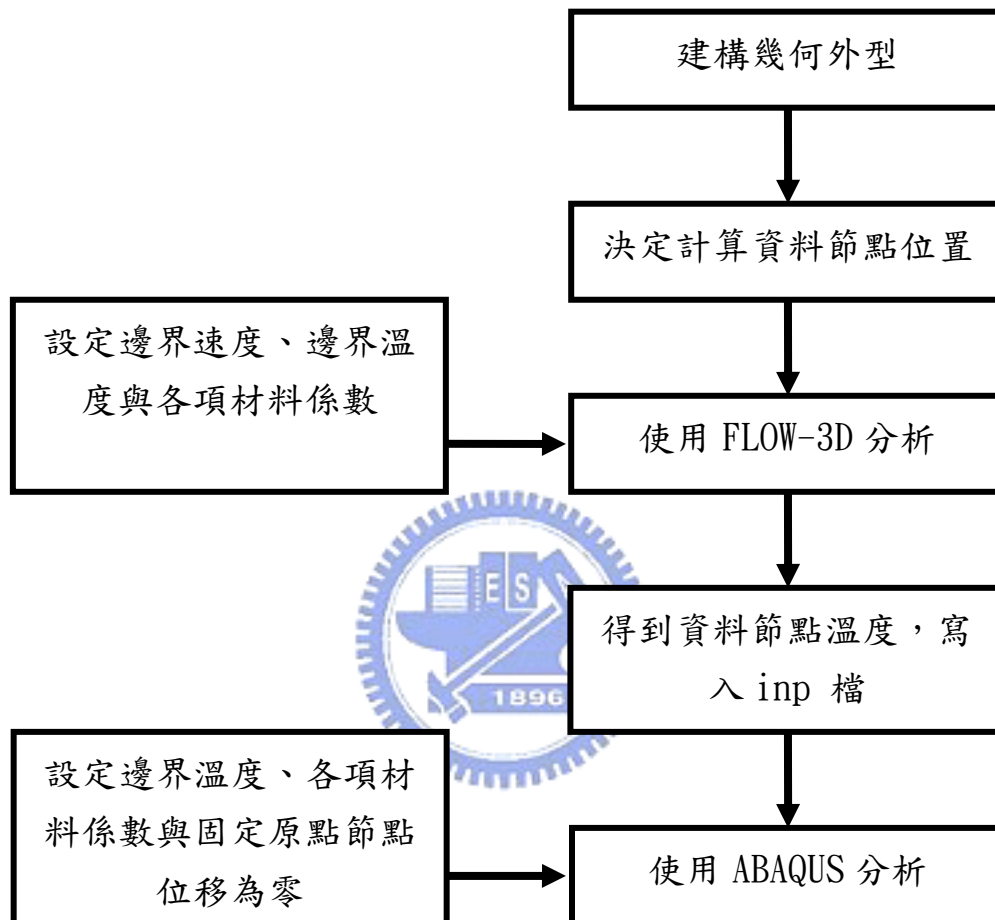


圖 4-1 模擬流程圖

## 4.3 模擬步驟

### 1. 建構幾何外型：

先用 Solid Work 將模擬物件的外型繪出，並分別輸出 stl 檔及 iges 檔。

### 2. 決定計算資料點：

用 ABAQUS 讀入 iges 檔，使用磚頭元素 C3D8T 對物件建立 mesh。之後寫出 inp 檔，並記下每個內部節點的座標值。在這裡知道每個節點的位置，下一步就可以使用 FLOW-3D 算出這些位置裡的溫度資料。

### 3. 使用 FLOW-3D 分析：

Flow-3D 已經提供圖形介面供使用者操作。依序填入所需要的參數資料。完成相關設定後，點選 prepin 檔以手動寫入方式填寫各 node 的座標值。待計算完成後，即可讀取這些位置上的溫度資料。

### 4. 資料轉換：

Flow-3D 計算結果，可以得到這些內部節點最終溫度。用手動方式紀錄，並寫入 ABAQUS inp 檔案內當作固化的初始條件。

### 5. 使用 ABAQUS 分析：

填入相關材料性質，邊界條件，即可得出最終溫度穩態時的變形分布。

## 4.4 材料特性設定

Flow-3D 軟體有內建的流體與模穴材質庫，論文裡流體採用的是 Class40 Gray Iron，模穴採用的是 generic silica sand at 1000K。有限單元分析中，進行的是冷卻收縮分析，因此除了材料的機械性質外，熱傳性質也是必需留意之重點。關於灰鑄鐵的材料係數參照 ASM Handbook Vol1 及 <http://www.matweb.com/> 材料網頁數據。模擬過程裡，Flow-3D 中使用的單位為 CGS 制，ABAQUS 模擬所使用的單位為 MKS 制。本研究中所使用到的材料性質參數如表 4-1，表 4-2 所示。



表 4-1 FLOW-3D 內建材料庫參數表

Properties of Fluid from Flow-3D Fluid Database	
Class 40 Gray Iron, Auburn data	
Units: CGS	
Viscosity: $\mu$ 0.04516	
Density	6.436
Thermal expansion coefficient	0.0
Specific heat	8.97e6
Thermal conductivity	3.35e6
Reference temperature	3.73e2
Power Output of Fluid	0.0
Surface Tension Constant	0.0
Temperature Dependence	0.0
Liquidus temperature	1518.
Solidus temperature	1273.
Specific energy	211000
Solidified properties:	
Density	6.856.
Thermal conductivity	3.43e6
Specific heat	1.88e9
Coefficient of solidification drag	1.0
Niyama temperature	-1.0
Critical solid fraction	1.0
Properties of Material from Flow-3D Solids Database	
Generic Silica Sand at 1000 K	
Units: CGS	
Thermal Conductivity: kobs	6.1e4
Density * Specific Heat: rcobs	1.7e7
Heat Transfer Coefficient: hobs1 to Fluid 1	0.0
Heat Transfer Coefficient: hobs2 to Fluid 2	0.0
Contact Angle: ocang	-90
Initial Temperature: twobs	1000

表 4-2 ABAQUS 使用材料參數表

ABAQUS 使用材料係數		
Gray Iron GA-50		
	數值	單位
熱傳導係數	50.435	W/m-K
密度	7310	Kg/m <sup>3</sup>
楊式係數	141-162e9	Pa
波松比	0.29	無因次
熱膨脹係數	11.16e-6	/°C
比熱	770	J/kg · K

#### 4.5 網格設定

FLOW-3D 軟體是建立在有限差分法上所寫的數值計算軟體，在 3D 空間中使用的網格均為長方體。為了適應計算物件的複雜幾何外形，且節省記憶體、提高計算效率。首先必須將欲解決的流場問題外形切割成數個區塊 (block)，針對不同區塊再去進行網格(mesh)的設定。在本研究模擬的五個澆鑄情形，每個例子都設定了三個區塊，分別針對的是下澆道，橫澆道與實際鑄造物件。在每一個區塊中，針對不同的流動狀況，需要設定網格的疏密程度也不完全相同，一般來說，下列幾個重點在劃分網格時是必須注意的：

1. 每一個網格的長、寬、高比例必需儘量接近，也就是每個網格儘量接近正方形。原始程式所給的建議值是長、寬、高任兩參數比值不要超過 1.5。
2. 雖然 FLOW-3D 能自動計算區塊間結合情形，不必刻意設定區塊交界處的網格大小與格點位址相同。但仍然建議區塊交界處的網格差異變化不能太大，尤其是在流場的上游處，或流場劇烈改變處，像有回流發生的區域。
3. 受限於軟體設計，安排需要計算溫度的資料點必須位於同一個區塊中。

綜合上述原則，在計算效率與精準度中取得一個平衡，即為一個良好的網格。

本研究中 ABAQUS 軟體僅使用於計算物件的冷卻變形，不需考慮下澆道與橫澆道。因此在考慮網格設定時，只需單純考慮鑄物的幾何外形限制即可。此處各物件均使用相同大小的網格，長、寬、高分別為 50mm、10mm、2mm。網格分割如圖 4-2 所示。在此必需注意的是，FLOW-3D 軟體設定內部計算資料點數不能超過兩百點，因此在最初規劃有限單元網格大小時必須控制內部的節點數不要超過兩百點，這樣可以一次得出全部欲求的溫度資料。模擬時使用的元素為溫度位移耦合元素(Coupled Temperature-Displacement Element)的三維線性原素 C3D8T。

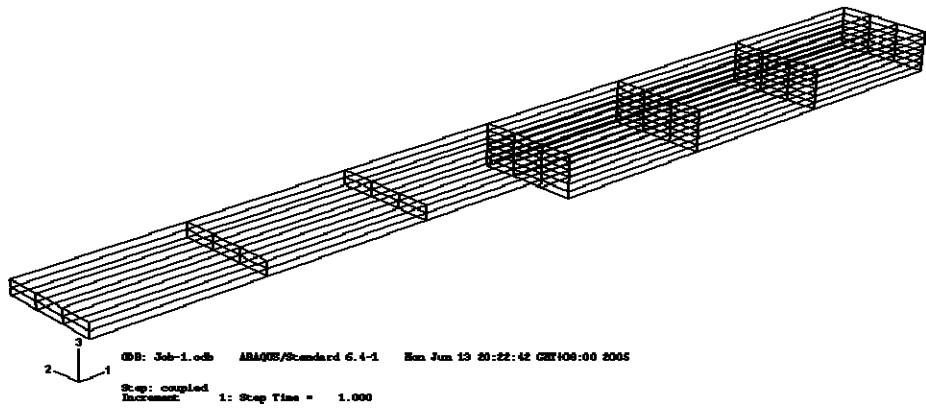
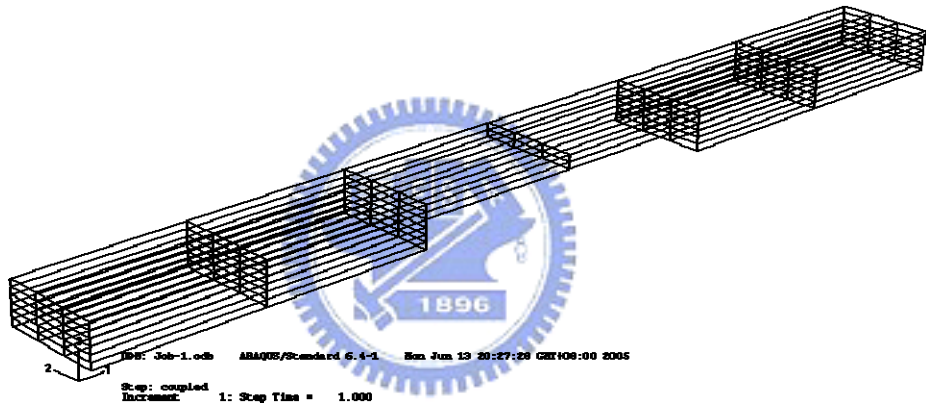
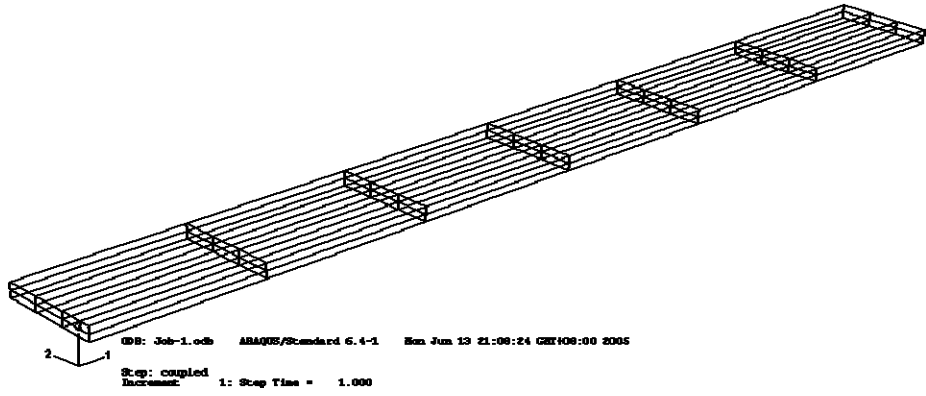


圖 4-2 有限單元網格分割圖

#### 4.6 模擬假設

使用 Flow-3D 模擬金屬熔湯的流動有下述幾項假設：

1. 為牛頓流體。
2. 流體體積不可壓縮。
3. 各相的材料性質常數均為定值，不隨溫度下降改變。
4. 忽略空氣的流動影響。使用 ABAQUS 進行變形模擬時，也同樣設定材料性質常數均為定值，不隨溫度下降改變。各項邊界條件均不隨時間改變。

本研究模擬的對象，是凝固後的鑄件由於溫度的下降所引起的變形。所以未包含凝固過程中變形的模擬。希望利用 FLOW-3D 所提供的固化模組，來模擬凝各鑄件完全凝固後的溫度分布。但配合實驗的模型與相關參數設定後，模擬結果所得到的狀況均為模穴尚未填滿即凝固。因此後續的模擬便再作進一步簡化，假設熔湯填滿後的模穴溫度分布與固化完成後的溫度分布相同，因此改為單純熱傳模擬，詳細的初始條件與邊界條件的設定如下節所示。

#### 4.7 初始條件與邊界條件設定

FLOW-3D 軟體之邊界條件的設定方式，是以各個區塊為單元，分別建立其六個主要方向 Xmax、Xmin、Ymax、Ymin、Zmax 及 Zmin 的邊界條件，溫度，速度或是與其他區塊相連接。操作介面如圖 4-3 所示。速度方面，設定下澆道入口的速度為 z 方向-99cm/s，其餘澆口壁與模穴壁均設定邊界速度為零。在溫度方面，設定倒入的熔湯溫度與各澆道壁溫度為 1800K，模穴壁溫度為 300K。各區塊邊界條件操作介面設定如圖 4-4 所示。

在使用 ABAQUS 進行變形模擬時，初始條件為設定之物件內部節點溫度，邊界條件為設定表面節點的溫度為室溫，並固定原點上的節點位移為零。再利用熱傳與變形耦合分析(Fully Coupled Thermal-Displacement Analysis)，得出最終平衡溫度穩態(Steady State)時的變形情形。

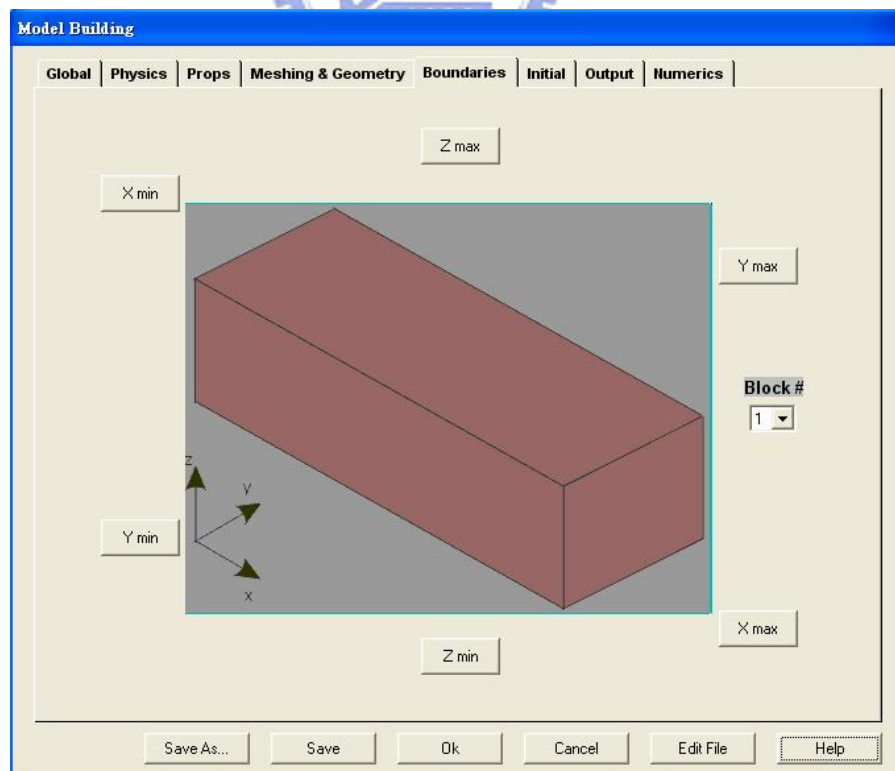
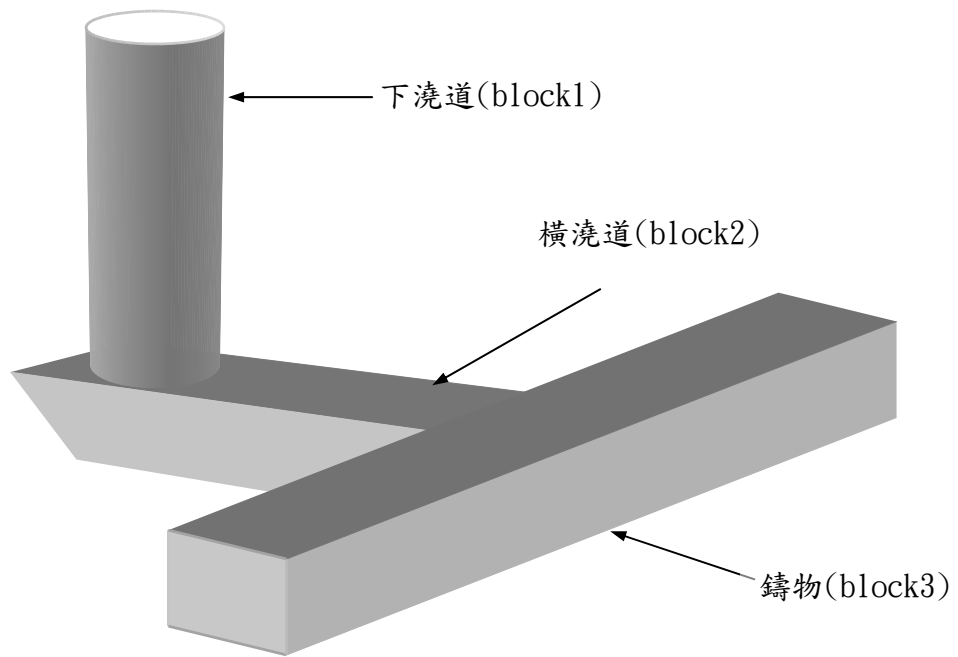
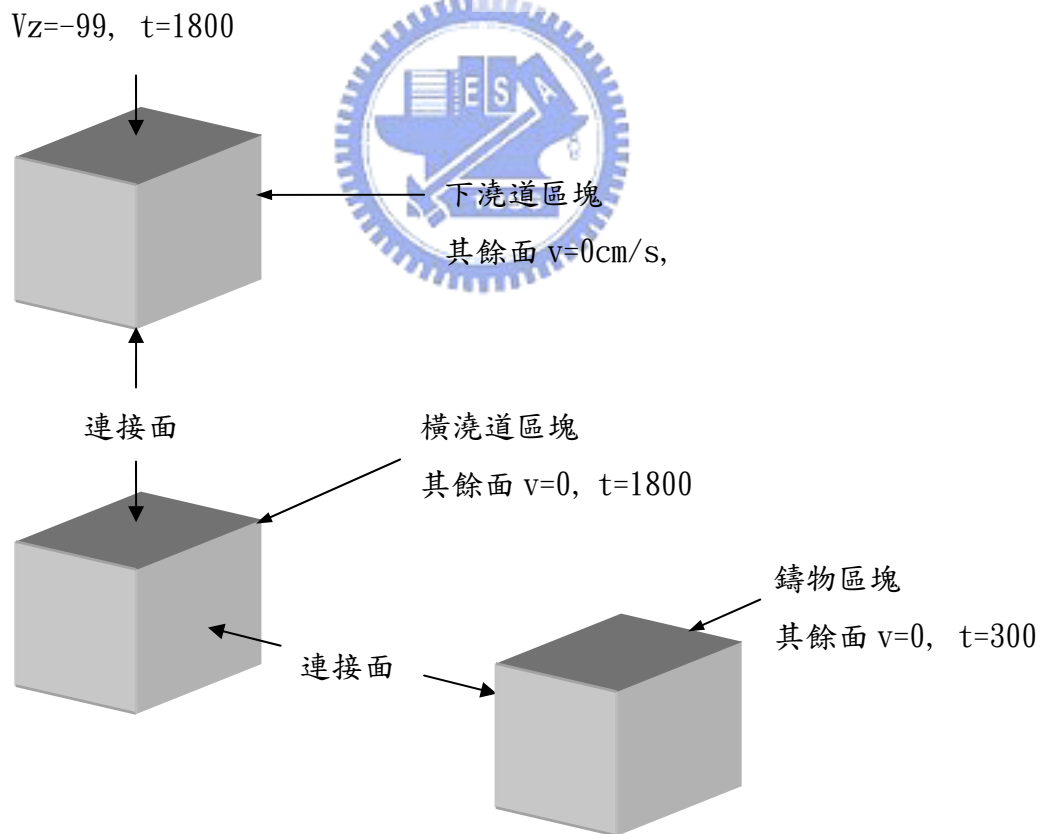


圖 4-3 區塊邊界條件設定操作介面圖



(a) 模擬物件示意



(b) 各區塊邊界條件設定

圖 4-4 各區塊邊界條件設定圖