

鋁合金壓鑄模具失效之對策實務

Countermeasures for Failure of Aluminum Alloy Die-casting Mold

莊水旺^{1*}、馬英傑¹、許憲斌²

Shueiwan H. Juang^{1*}, Ying-Chieh Ma², Henry Shu³

¹ 先進製造工程研究中心 國立臺灣海洋大學

² 壓鑄技術產學服務聯盟 國立臺灣海洋大學

*Corresponding author: shjuang@mail.ntou.edu.tw

摘要

在壓鑄製程中，從熔湯充填模腔到鑄件完全凝固取出，再噴塗離型劑，模腔表面處於高溫與低溫及開模與關模的反覆熱負載與機械力作用，使模具承受熱疲勞與機械疲勞的衝擊。若模具在壓鑄方案設計、鋼材選用或壓鑄生產流程中稍有不慎，將加劇模具抗熱疲勞與抗機械疲勞能力的下降，進而延長模具啟裂的模次，加速裂紋的成長速率，導致模具使用壽命的低下。本論文使用之研究案例為一只生產輪圈的壓鑄模具，在壓鑄生產少於2000模次時，模具內凹角的谷底即出現嚴重的網狀裂紋，是一種典型的模具熱疲勞失效機制，同時也有空蝕、沖蝕及侵蝕等不同失效機制。針對這些模具失效缺陷，從模具壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件設定、熱處理施作歷程規劃、熱處理施作等方面，逐一分析本案例模具失效之可能成因，再研擬解決對策。最後建立一套壓鑄模具發生失效時的分析流程，供壓鑄業者分析與確認失效原因及研擬解決方案的參考。本文的輪圈案例分析結果顯示，模具失效的機理主要是熱處理過程不當，金相組織出現不同程度的變韌鐵組織析出，影響鋼材的衝擊吸收能量，其衝擊功11-14 J遠低於NADCA壓鑄模具的規範值22-26 J。

關鍵詞：壓鑄模具壽命，熱疲勞，壓鑄方案，模具失效。

Abstract

The stages of die-casting processing, the molten metal is filling the mold cavity to the complete solidification and release of the casting, this process is repeated. For the next casting, the temperature of the mold surface must be controlled by spraying lubricant, this is due to the high temperature absorbed mold during the previous casting process. The gradient thermal of surface mold cavity is from high temperature to low temperature, and the repeated thermal load and mechanical force of the mold opening and closing that causes thermal fatigue and Mechanical fatigue of casting mold. If the mold is slightly careless in the design of the mold die-casting solution, the selection of steel, or the production process, it may exacerbate the decline in anti-thermal fatigue and anti-mechanical fatigue ability, the growth rate of the accelerated crack, resulting the lifecycle of mold is low. A die-casting die is used in this paper to make rims. Die-casting production is under 2000 times can result in severe net crack at the bottom of the concave corner of the die, which is a typical thermal fatigue failure mechanism. At the same time the existence of different failure mechanisms such as cavitation and erosion and corrosion. In view of these mold failure defects, the possible causes of mold failure in this case were analyzed one by one from the aspects of design of the mold die-casting solution, the design of the cooling system, the setting of die casting conditions, the process of the heat treatment, and the surface processing of the case, and then developed countermeasures. Finally, a set of analysis

process for die-casting mold failure is established, which is a reference for die-casting industry to analyze and confirm the cause of failure and develop solutions. The analysis results of the wheel rim show that the failure mechanism of the die is mainly due to improper heat treatment process, and the metallographic structure has different degrees of ductile Bainite structure precipitation, which affects the impact energy of the steel. The impact energy 11-14 J is much lower than the normative value 22-26 J for die-casting molds specified by NADCA.

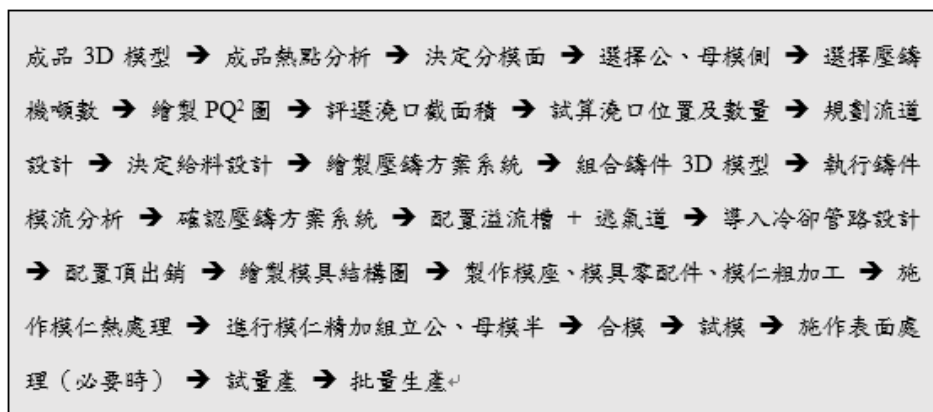
Keywords: lifecycle of die-casting mold, thermal fatigue, die-casting solution, mold failure.

1. 前言

汽機車零組件除要追求輕量化，亦需要具有強度佳、韌性好的特性，基於此發展趨勢，近年來機車輪圈多使用鋁合金材料，其中以壓鑄生產居多。壓鑄模具的使用壽命與其使用的模具鋼材、表面硬度、熱處理相態組織、表面處理方式、鑄件的造型、壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件選擇、模具的應力分布等要素相關。另外，模具的流動平衡與熱平衡，也是影響模具壽命的重要因素，熱應力是由溫度變化產生的，隨著時間的推移可能會損壞模具材料的結構[1]，所以壓鑄模具在高速熔湯沖刷下需具有耐熱性和耐侵蝕性[2]，在管理上必須考慮。本文從模具壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件設定、模具鋼材選用、模具加工參數選擇、熱處理施作歷程規劃、表面處理施作等方面，進行系統化的深入研究，建立一套壓鑄模具設計與製造的作業規範，以延遲模具發生啟裂的模次，同時延緩裂紋的成長，達到提高模具的使用壽命，使量產作業得於順利進行。本文分析也將模具的破損分析列入研究項目，詳細分析模具的失效機制，歸納出模具設計與製作的最佳化模式，如適合模具材料、熱處理條件、硬度、冷卻設計、壓鑄條件等的設計[3]。

2. 研究方法

圖(1)表示壓鑄模具的開發流程。成品素材或其3D模型圖，利用PQ²圖決定總澆口截面積，依序規劃壓鑄方案系統，並以模流分析確認壓鑄方案系統之可行性，接著再配置溢流槽、逃氣道、冷卻系統、頂出銷等，準備模具零配件及製作公、母模仁，並施作必要之熱處理，將公、母模半組立進行試模，確認鑄件的幾何與機械性質符合要求，隨之進行批量生產。此開發流程步驟並非一成不變，可視實際需要做適當的調整或部分步驟省略。下面針對壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件設定、模具鋼材選用之重點做介紹，至於如何繪製PQ²圖及其相關計算不在本文討論範圍內。



圖(1) 壓鑄模具的開發流程。

2.1 壓鑄方案設計

壓鑄方案設計包含選擇澆口截面積、配置澆口位置及數量、規劃流道設計和決定給料設計。最佳的壓鑄方案應該依據 PQ^2 原理決定，除了決定成形鑄件所需的澆口總截面積，同時提供流道沿射口至澆口的截面配置，也一併確定壓鑄機成形參數的設定。流道的軌跡及澆口位置需要參考其它資訊予以決定，其中流道軌跡是依據壓鑄機的固定和可動模板的可用範圍、射口位置、模腔配置等資料進行規劃；澆口位置及給料方向的決定，參考零部件的熱點分析結果，澆口應該盡可能配置在素材最後凝固的位置，確保後續增壓之施作效果，方能解決縮孔之疑慮。

2.2 冷卻系統設計

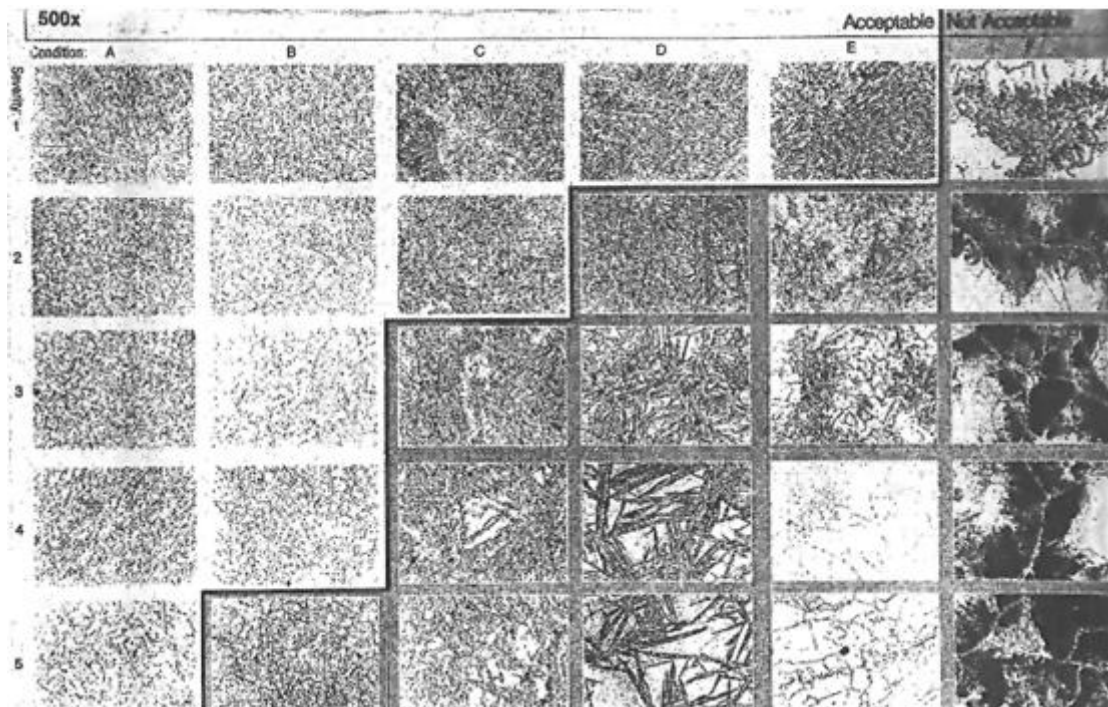
冷卻系統設計的好壞直接影響模具溫度分布的均勻性，進而反應在壓鑄件的溫度分布上。若鑄件的溫度分布不均，不僅造成鑄件的變形，鑄件內部形成的殘留應力亦會釀成鑄件缺陷的產生，甚至出現熱裂的問題，尤其在模具熱收斂區更需注意此現象的發生；同樣的，模具溫度分布不均，也會在溫度梯度較大的區域，使模具產生局部應力，甚至造成龜裂的現象。因此，模具冷卻水路的配置必須依據鑄件的熱含量分佈、幾何特徵形成的熱傳機制及其介面熱傳性質等，選擇適當的冷卻媒介、管路直徑和長度及離模腔表面距離的配置。必要時，使用點冷卻，甚至異形冷卻管路設計，以期鑄件和模具均可獲得均勻的溫度分布。以上設計資料可參考一維熱傳導理論計算或利用熱傳分析軟體模擬取得相關數據。

2.3 壓鑄條件設定

鑄機作業參數的設定，如射缸壓力、柱塞低射速及其行程、柱塞高射速及其行程、低射速轉高射速位置、增壓啟動位置、柱塞直徑、開模時間等，可依據 PQ^2 原理決定之，讓設定的參數和鑄件的鑄造模數、壓鑄合金的物理性質、模具與鑄件的介面熱傳性質等匹配，以期在澆口處獲得合理的成形熔湯壓力和流量、高速終了時的鑄造壓力和射出壓力（即鑄造壓力*增壓比）、高射速期間的充填時間、澆口速度等。另外，柱塞低射速的設定必須視壓鑄機的性能而定，若壓鑄機具有低速多段射出功能，必須善用此性能，正確設定低速段的速度對位置曲線；若壓鑄機僅有低速單段功能，柱塞的低速應為臨界低速速度（critical low shot speed），其由料管直徑及熔湯充填率決定，以免除或減少熔湯在料管內捲氣量，使得鑄件內部出現氣孔之疑慮。

2.4 模具鋼材選用

為確保熱作模具鋼退火材沒有偏析現象，最好在加工前取一小塊施作金相組織檢驗，確定鋼材是否適合製作模具。圖（2）表示 5%鉻系熱作模具鋼退火狀態的各種金相組織，左上方的金相組織較為細緻且均勻，表示偏析程度較輕，以左上角的金相組織（1-A）最為優異；而右下方的金相組織不僅晶粒粗大，且偏析程度嚴重，以右下角的金相組織（5-F）顯示的偏析程度最為嚴重。適合製作模具的退火材金相組織必須如圖（2）的左上方部分，例如 1-A~1-E、2-A~2-C、3-A、3-B、4-A、4-B 和 5-A。另外，根據成品的熱點分析結果，若模具存在散熱困難或是熔湯直接衝擊之處（例如澆口），為克服模具的沖刷（washout）問題，延長其使用壽命，鋼材需具有良好的高溫延展性。因此，模具鋼材的合金元素組成及重量百分比含量必須適當的管理，尤其是鉬和鈷，此兩種元素可提高模具抗高溫熱熔蝕能力。



圖（2）熱作工具鋼退火狀態的各種金相組織[4]。

2.5 施作模仁熱處理

在實作熱處理時，為確保模具的熱處理品質，若有併爐之需要，不同模塊的重量及其尺寸應盡可能一致。模具鋼材之熱處理著重於每一階段施作的溫度與時間的合理配置。理論上，熱處理施作應該包含下述幾個階段，即機械加工應力消除回火、三階段升溫加熱、階段式淬火、相變態應力消除回火、主要回火、殘留沃斯氏體轉變為麻田散體回火和穩定麻田散體回火等，以確保模具鋼材的熱處理品質。至於施作的溫度與時間配置，須參酌鋼材的種類、合金元素的重量百分比及鋼材最後需求的機械性質而定。另外，在熱處理過程中，應避免出現延遲回火的現象，以免殘留在麻田散鐵組織中的沃斯田鐵無法得到適當的相變態，致使模具的強度和韌性無法達到需求的機械性質。

3. 模具失效分析

在確認過壓鑄方案設計及冷卻系統設計後，接著分析模具鋼材及熱處理。此案例使用的模具在生產約 10,000 模次時，輪幅與輪緣交接之 R 角處開始出現燒付（soldering）現象，且在第 32,476 模次時，該處發生嚴重的裂痕，幾乎接近不堪使用的狀態，而輪幅與輪緣的交接處恰好也是此鑄件的獨立非凝固區域，如圖（3）所示。圖（3）表示鑄件之熱點分析結果，在設計壓鑄方案時，除了可參考鑄件的熱點分布以確保鑄件的熱平衡外，也可了解模具較難散熱之區域，作為冷卻系統布置的參考依據。

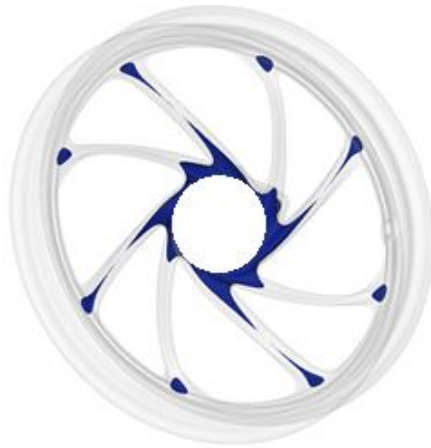


圖 (3) 輪圈非凝固獨立區域示意圖。

3.1 模具材料

模具的是使用鋼材 A 製作，其化學成份組成，如表 (1) 所示。表 (2) 列出欲進行熱處理之鋼材重量。

表 (1) 鋼材 A 的化學成分組成的重量百分比。

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
鋼材 A	0.35	0.5	0.6	5.5	2.5	0.8	-

表 (2) 本案例熱處理使用鋼材之重量。

模仁尺寸 (mm)		重量 (kg)
可動側	(A) 158 * 590 * 590	271.6
	(B) 160 * 590 * 590	273.0
固定側	(A) 160 * 591 * 591	271.5
	(B) 155 * 590 * 590	268.0

3.2 爐腔負荷

一般熱處理的爐腔為 600 * 600 * 900 mm，其最大荷重額度是 600 公斤。參考北美壓鑄協會 (NADCA) 之壓鑄模具熱處理規範的要求，實際入爐的模具荷重以不超過爐腔額度的 60% 為宜，否則可能影響爐內全部模具鋼材的冷卻速率，使得鋼材在相變態過程析出變韌鐵 (Bainite)，甚至波來鐵 (Pearlite)。此析出的組織容易導致模具表面發生鋁合金熔湯的侵蝕 (corrosion)、沖蝕 (erosion)、空蝕 (cavitation) 及燒付 (soldering) 等現象，進而衍生模具沖刷 (washout) 失效問題。

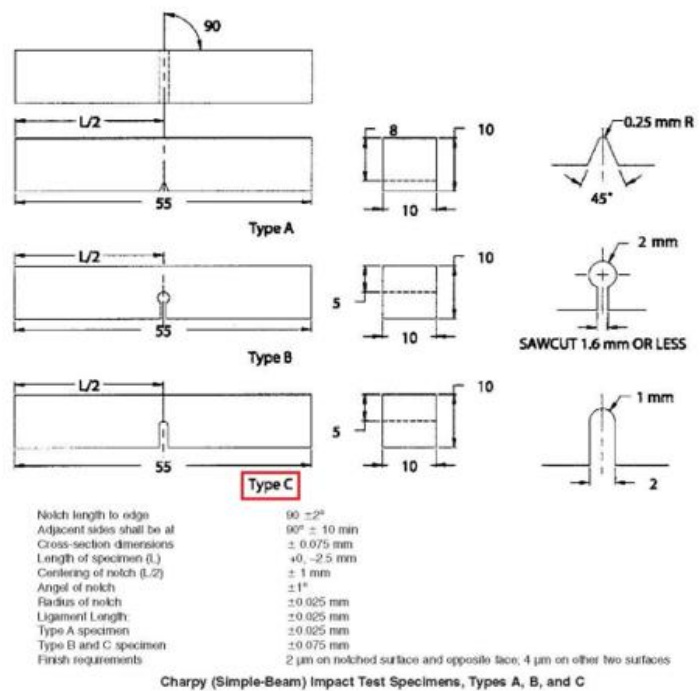
因此，本案例模具發生龜裂的失效原因應該是熱處理重量未依規範要求，導致模具部份區域析出變韌鐵或波來鐵，使得其抗高溫、高速鋁湯的侵蝕、沖蝕、空蝕及燒付的能力下降所致。為確定模具失效的確切成因，需要進行下述檢驗予以確定。

3.3 失效檢驗

為確定模具失效的適切成因，需要進行鋼材的化學成份組成分析、模面下方不同深度的硬度分析、及使用不同倍率（500x 和 1000x）觀察其顯微組織等。由模具截取 3 個不同地方之試塊，每個試塊的尺寸為 30 * 30 * 30 mm，分別在上、下兩個面量測其洛氏硬度（HRC）。至於拍攝金相組織的位置分別以 A、B、C、D、E 和 F 表示之。另外，為檢視模具鋼材之韌性，再從入子型芯下方部位，截取 3 個不同位置的試塊，尺寸為 10 * 10 * 55 mm，如圖（4）所示。此三個試塊需切割一個 U 型凹槽，半徑 R 為 1 mm，其凹口寬度為 2 mm，開口方向為 L 方向，以便進行衝擊試驗，量測鋼材的衝擊值，檢驗其衝擊功是否達到 NADCA 規範值，即 20-25 J，或衝擊值是否達到 ASTM 規範值，即 40-50 J/cm²，衝擊試片規範如圖（5）所示。



圖（4）自模具取樣之試片取樣位置及其檢驗面之示意圖。



圖（5）衝擊試片規範。

4. 結果與討論

本論文在執行硬度、金相組織、化學成分及衝擊試驗使用之試片，係直接取自失效模具，表（3）表示硬度試驗結果。硬度測試結果顯示，試片 1（B 面）、試片 2（C 面和 D 面）、試片 3（E 面和 F 面）的硬度值均在 HRC 47-48，這些硬度值都是壓鑄模具可以接受的工作硬度 [5]；但試片 1（A 面）的硬度卻僅有 HRC 44，造成 A 面硬度下降的成因可能是模具表面受到 740°C 鋁熔湯高溫的回火軟化。模具取樣的試片 1（A 面和 B 面）、試片 2（C 面和 D 面）和試片 3（E 面和 F 面）之熱處理數據顯示，這六個面的原始熱處理硬度均在 HRC 48~50 之間，但因試片 1 的 A 面接觸高溫熔湯的時間較長，發生嚴重的熱熔蝕作用，導致 A 面處出現嚴重的回火軟化現象。

表 (3) 不同試片的硬度試驗值。

試片編號	硬度值 (HRC)
試片 1-A 面	44
試片 1-B 面	48
試片 2-C 面	48
試片 2-D 面	48
試片 3-E 面	47
試片 3-F 面	48

衝擊試驗係測定試片受到衝擊作用力而發生斷裂時吸收的能量，通常以衝擊功 (J) 或衝擊值 (J/cm^2) 表示之。本研究使用之衝擊試片是試片 4、試片 5 和試片 6，為確保鋼材在衝擊試驗時能發生斷裂的狀況，分別在試片中間加工一個 2 mm 的 U-notch，試驗的施作溫度為 21°C。衝擊試驗結果顯示試片 4、試片 5 和試片 6 的衝擊功分別為 13 J、11 J 和 14 J 及衝擊值分別是 $26 J/cm^2$ 、 $22 J/cm^2$ 和 $28 J/cm^2$ ，如表 (4) 所示。本次衝擊試驗獲得的衝擊功均低於 NADCA 規範值，即 20-25 J，或衝擊值均低於 ASTM 規範值，即 $40-50 J/cm^2$ ，而當模具吸收能量的能力不足，就會啟裂產生裂紋，此類失效取決於模具抵抗脆性破裂的能力，稱為斷裂韌性[6]。

表 (4) 不同 U 槽試片的測試衝擊值。

試片編號	樣品尺寸 (mm)	測試溫度 (°C)	衝擊功(J, N-m)	衝擊值 (J/cm^2)
試片 4	10 x 10 x 55	21°C	13	26
試片 5	10 x 10 x 55	21°C	11	22
試片 6	10 x 10 x 55	21°C	14	28

表 (5) 顯示不同試片之化學元素成分檢驗結果，試片 1 (A 面和 B 面)、試片 2 (C 面和 D 面)、試片 3 (E 面和 F 面) 之主要化學成分的重量百分比都符合 NADCA 對 H13 熱作工具鋼的質量要求，適用於鋁合金壓鑄模具。在個別合金成分方面，硫 (S) 含量均是 0.002%，表示其純淨度很高，屬於 E.S.R. 精煉級的鋼材。

表 (5) 不同試片之化學元素成分的重量百分比。

試片編號	元素組成 (wt.%)								
	C (碳)	Si (矽)	Mn (錳)	P (磷)	S (硫)	Ni (鎳)	Cr (鉻)	Mo (鉬)	V (鈮)
試片 1 (A 面)	0.33	0.06	0.51	0.009	0.002	0.08	5.56	2.61	0.82
試片 1 (B 面)	0.33	0.06	0.50	0.009	0.002	0.08	5.53	2.63	0.81
試片 2 (C 面)	0.34	0.06	0.49	0.010	0.002	0.08	5.54	2.63	0.80
試片 2 (D 面)	0.35	0.07	0.49	0.010	0.002	0.08	5.61	2.51	0.80

試片 3 (E 面)	0.34	0.06	0.50	0.010	0.002	0.08	5.59	2.63	0.81
試片 3 (F 面)	0.34	0.06	0.49	0.010	0.002	0.08	5.55	2.68	0.81

金相組織試驗的試片經研磨後，以 2% Nital 浸蝕液予以腐蝕，進而觀察試片的基地組織。檢驗結果顯示試片 1 的 A、B 兩面近乎相同，500x 和 1000x 的金相圖可清楚看到晶界，此乃因為在熱處理過程之淬火階段的持溫時間偏長，導致晶界偏粗所致；另外，晶粒中也發現有白色塊狀與變韌鐵 (Bainite) 的析出，如圖 (6) 所示。試片 2 的 C、D 兩面的結果也相當相近，倍率 500x 和 1000x 的金相圖可清楚發現白色的變韌鐵組織，但在 1000x 金相圖中的晶界並不明顯，因為此部位的尺寸較大，在熱處理過程的淬火階段之持溫時間沒有超過規範建議值；相對地，其變韌鐵 (Bainite) 組織析出量較多，表示其冷卻速率較試片 1 (A 面和 B 面) 的冷卻速率更慢，如圖 (7) 所示。試片 3 之 E、F 兩面結果類似，500x 的金相圖晶界可清楚觀察到白色塊狀及變韌鐵 (Bainite) 組織析出；在 1000x 金相圖中，其晶界更為明顯，如圖 (8) 所示。

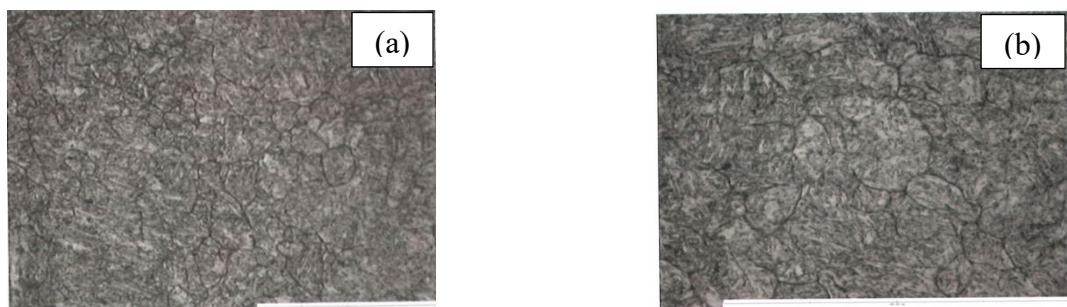


圖 (6) 試片 1 (A 面) 的金相組織，(a) 500x；(b) 1000x。

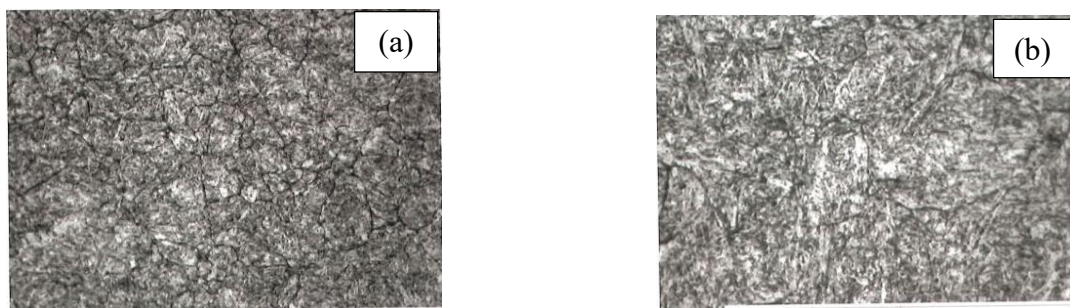


圖 (7) 試片 2 (C 面) 的金相組織，(a) 500x；(b) 1000x。

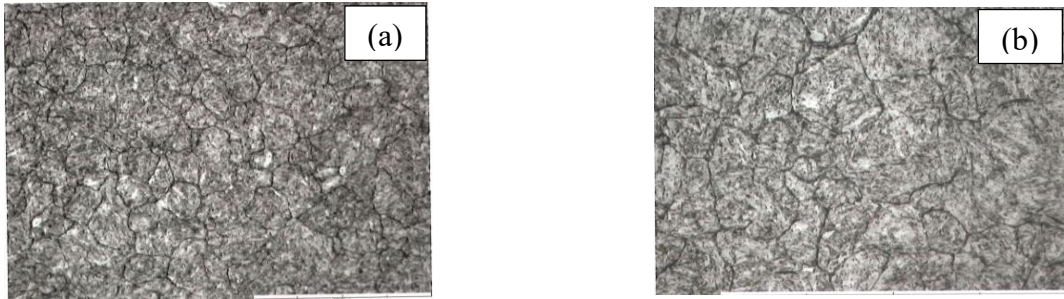
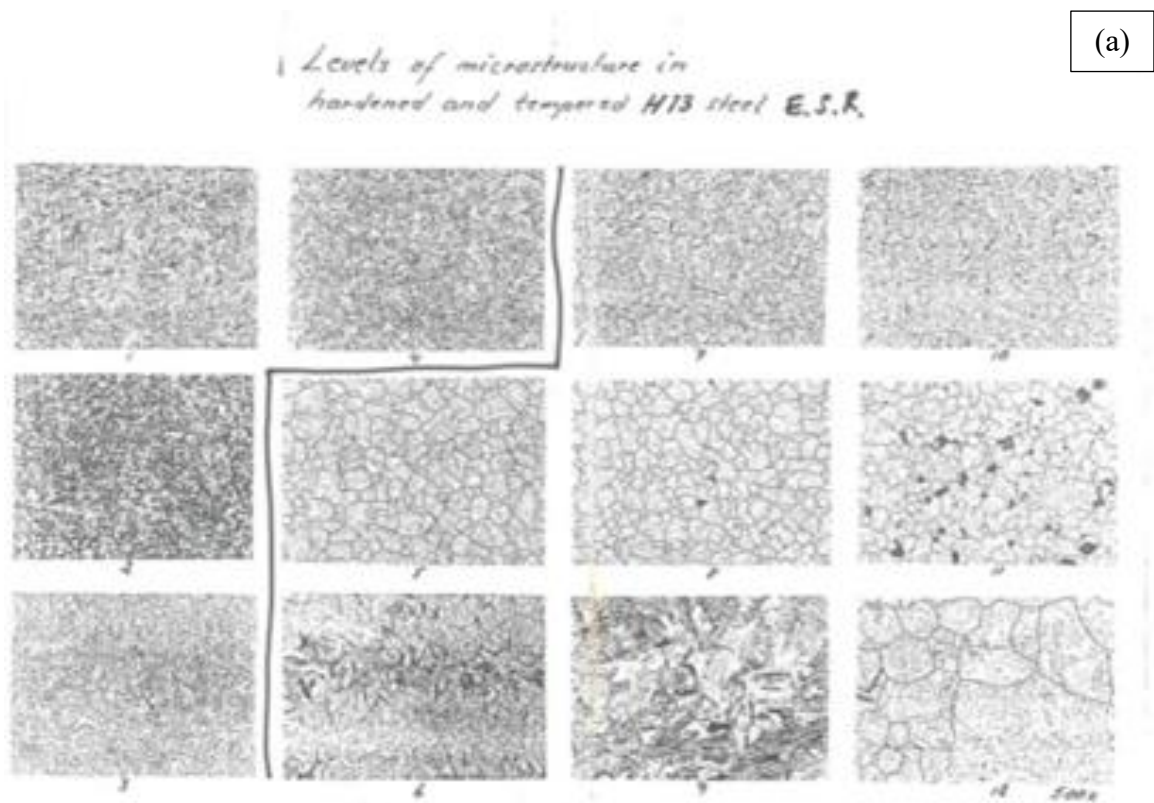


圖 (8) 試片 3 (E 面) 的金相組織，(a) 500x；(b) 1000x。

圖 (9) 表示 5% 鉻系熱作模具鋼利用 E.S.R. 熔煉的優質鋼材 (H13 系列)，經熱處理 (硬化 + 回火) 後，放大 500 倍之各種等級的金相組織圖，如圖 (9.a) 所示，其中以實線區隔為兩個部分，左上部分表示壓鑄模具鋼材可接受的金相組織，即以 1、2、3 和 4 標示之金相組織；而右下部分則是不適合做為模具鋼材的金相組織，以 5—12 標示之。圖 (9.b) 表示在熱處理過程中淬火階段的冷卻速率對韌性的影響，若冷卻速率得宜的話，則沃斯田鐵組織將以麻田散鐵組織析出；惟當冷卻速率低下時，可能出現變韌鐵組織析出，甚至波來鐵組織的析出。不同的金相組織對鋼材的韌性 (衝擊吸收能) 影響甚鉅，其中以麻田散鐵組織的韌性最好，變韌鐵組織次之，而波來鐵組織的衝擊吸收能最低。



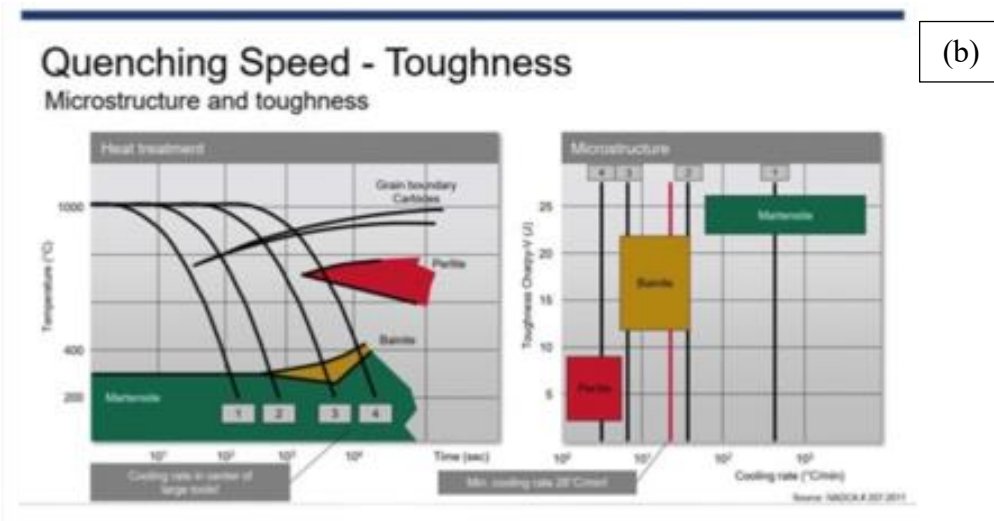


圖 (9) H13 鋼材：(a)金相圖；(b)冷卻速率對析出組織之關係[4]。

5. 結論

本文針對模具失效之原因分別從模具壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件設定、熱處理施作歷程規劃及模具鋼材選用等方面逐一分析可能成因，再針對一副真實壓鑄模具進行失效分析，作為壓鑄模具製作的參考。具體的分析結果摘要如下。

1. 透過硬度、金相組織、化學成分及衝擊等試驗，分析壓鑄模具失效的成因，進而提出製作一副優質模具的流程，包含壓鑄方案設計、冷卻系統設計、壓鑄條件設定、模具鋼材選用及熱處理，每一步驟均須審慎處理，尤其是模具鋼的熱處理最好能有完整的施作過程，即機械加工應力消除回火、三階段升溫加熱、階段式淬火、相變態應力消除回火、主要回火、殘留沃氏體轉變為麻田散體回火和穩定麻田散體回火等，以確保模具鋼材的熱處理品質。
2. 根據 NADCA 的規範，一般壓鑄模具的正常工作硬度是在 HRC 50-52，而其衝擊功應該介於 22-26 J 之間。
3. 本研究取自失效模具的試片金相組織分析顯示，其顯微組織內部出現白色塊扁狀與變韌組織析出，表示模具的冷卻速率較慢所致，影響鋼材的衝擊吸收能量（即韌性），其衝擊功均落在 11—14 J，遠低於 NADCA 對壓鑄模具的規範值。
4. 試驗分析結果顯示，不適當的熱處理施作過程可能出現不良的金相組織，例如變韌鐵（Bainite）或波來鐵（Pearlite），導致硬度或抗熱衝擊能力下降，進而影響合理的模具使用壽命。
5. 鈷（Co）和鎳（Ni）可提高模具抗高溫熱熔蝕性質的能力，為提升壓鑄模具抗熱龜裂的能力，除選擇適當的生產條件及熱處理條件外，模具鋼材應該選用含有鈷和鎳的熱作優質工具鋼材為佳。

6. 參考文獻

- [1] Ferencz, P., Lucian, G., “Analyze of the possible causes of porosity type deffects in aluminium high pressure diecast parts,” Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Targu Mures, vol. 8, no. 1, p. 41, 2011.
- [2] Brunhuber, E. , Ernest Praxis Der Druckgussfertigung, 1991.
- [3] 莊水旺，智慧型壓鑄模具生產技術 *Fabrication Technology if Intelligent Die Casting Molds*，五南圖書出版股份有限公司出版，2013。
- [4] 許憲斌，壓鑄模具材料的新進發展，2021 壓鑄合金設計及模具維運技術研習會。
- [5] Hansson, P. , “Modern prehardened tool steels in die-casting applications,” Materials and Manufacturing Processes, vol. 24, no. 7–8, pp. 824–827, 2009.
- [6] Schwam, D., Wallace, J. F., and Birceanu, S. , “Die Materials for Critical Applications and Increased Production Rates,” Case Western Reserve University, 2002.