

顯微組織對壓鑄式鋁合金A356疲勞性能影響之研究

Effect of Microstructure on Fatigue Behavior of Die Casting A356 Alloy

洪榮德¹ 徐宇彤² 劉正賢³ 徐永富² 林昆明⁴ 林新智^{3*}
Steven Hong Y.T. Hsu C.H. Liu Y.F. Hsu K.M. Lin H.C. Lin

¹振鋒企業有限公司

²台北科大材料科學與工程研究所

³台灣大學材料科學與工程研究所

⁴逢甲大學材料科學與工程研究所

* 連絡作者 e-mail: hclinntu@ntu.edu.tw

摘要

在現今節能減碳的行銷時代裡，減重成為製造工業的重要目標之一。而 A356 鋁合金材料的良好流動性、氣密性、耐磨耗性及抗腐蝕性等特色，為廣泛應用在工業上的壓鑄式鋁合金材料。而材料疲勞破裂是屬於一種低應力破裂，構件在承受遠低於材料降伏強度的外力狀況下，最終仍然發生破裂的現象，其中疲勞破裂更是大多數鋁合金產品破裂的主因。本實驗針對商用 A356 鋁合金進行疲勞測試，在不同應力下(60 MPa ~ 150MPa)分別進行疲勞試驗，紀錄破斷時的循環次數，製作應力-循環曲線。並且針對試片的破斷面進行檢查，與材料顯微組織進行比對，以了解疲勞裂縫起始的機制及裂縫成長的機構，進而可以評估材料的鑄造缺陷對於疲勞性質的影響。

關鍵詞：鋁合金、A356、壓鑄、疲勞、顯微組織

Abstract

In the era of carbon reduction, weight loss has become one of the most important goals in the manufacturing industry. Because of the good fluidity, air tightness, wear resistance and corrosion resistance, die casting A356 aluminum alloy were widely used in industrial. Material fatigue fracture is a low stress fracture. Component will still fracture even when the loading force is lower than its yielding stress. Fatigue failure is the main reason of most aluminum alloys fracture. This research is carried out by doing fatigue test under different loading (60 MPa ~ 150MPa), record the breaking cycles and fits out the S-N curves. Then the fracture surfaces were investigated, in order to find out the mechanism of fatigue crack initiation and crack growth behavior. In turn to assess how casting defects affect material fatigue properties.

Key words: Aluminum alloy, A356 alloy, Die casting, Fatigue, Microstructure

一、前言

鋁合金具高比強度（比重 2.67 g/cm^3 ，為鋼鐵之 $1/3$ ）、抗腐蝕性佳、導熱及導電性佳且為非鐵磁性材料、外觀及表面容易加工處理等特性，符合現今工業產品輕量化兼具美觀之需求，相較於鋼鐵用於許多工業產品上有許多的優點，近年來已普遍應用於各個領域的產品設計上。

A356是屬於Al-Si-Mg合金，其鑄造性良好，具有強度、韌性，耐蝕性、焊接性優良等特性，更被廣泛應用於機械、汽車、航空、國防等工業上。此合金內含鎂元素能與銅、矽、鋅等元素化合，藉由適當的熱處理產生析出硬化，大幅增加比強度(強度/密度)、疲勞壽命，並增加切削性。其中矽會改善鑄造流動性、提升鑄造品質，減少縮孔等缺陷的產生，並增加耐磨耗和耐腐蝕性[1]。A356為亞共晶系鋁合金，所以凝固會先生成初晶相鋁，待冷卻至共晶溫度（大約 577°C ）時，形成鋁矽共晶相。鋁矽共晶相的生長形態受到調質合金（Sr或Na等）或是顆粒細化劑的影響[2-7]。

金屬疲勞破裂問題主要還是應力集中(Stress Concentration)的問題。其構件形狀、表面的微細加工缺陷或是裂縫等因素皆有可能造成應力集中，但其中表面殘留應力對疲勞壽命的影響最大，而表面處理常會產生殘留應力或對原有殘留應力有重大的影響。就鋁合金材料內部組織而言，出現應力集中而影響疲勞強度的最主要因素為硬顆粒相(Hard Particles)及孔洞缺陷

的數量與分佈狀況[8]。硬顆粒相泛指夾雜物(Inclusion)以及大尺寸組成介金屬顆粒相 (Coarse Constituent intermetallic particles)。其中在A356鋁合金中常見一些不可溶介金屬化合物(ex. $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$ 、 Al_3Fe 、 $\alpha\text{-Al}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})$ 及 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$)，這類的顆粒相無法利用熱處理將其溶回基地，最多只能利用均質化將其外觀鈍化，以降低應力集中因素[9]，所以一般鋁合金對鐵含量要求嚴格。這些硬顆粒相的熱膨脹係數與基地鋁固溶體差異極大，因此在凝固的過程，極易在兩者的界面出現裂縫。此外在製成成品承受外力使用時，也會因兩者機械性質不同，界面會因為應變的不連續而導致裂縫的出現，這些都會劣化疲勞壽命。

鋁合金鑄件內部影響疲勞壽命的另一個關鍵就是孔洞，常見的孔洞有氣孔(Porosity)及縮孔(Shrinkage)。鋁合金在室溫對氫的固溶度，遠低於在熔化溫度時的溶解度，因此當鋁合金凝固時，若鋁液的前處理未完善，則極易在鋁合金鑄件中找到氣孔。縮孔則是鋁合金在凝固之際，因鑄造方案設計的問題造成某些局部區域被封閉，亦即鋁液無法繼續補充，造成鋁合金凝固收縮所留下來的空間，因而造成縮孔的出現。

二、實驗方法

本實驗利用商用 Al-Si-Mg 鋁合金 A356 進行相關分析。經 ICP-AES 分析本實驗使用之 A356 化學成分如表 1 所示。實驗使用之 A356 材料鑄造後經 T6 熱處理(固溶化處理後水淬再行人工時效處理)。將材料部分加工成符合 ASTM E466-96 R02 規範[10]之疲勞標

準試片進行疲勞試驗，其他則加工成適當規格以便進行相關試驗。利用 X 光繞射儀鑑定晶體結構，以光學顯微鏡 (OM) 及掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察顯微組織，以 X 光能譜儀 (EDS) 分析其析出相及夾雜物的成分。此外，利用微硬度機量測使用材料之硬度，並以拉伸試驗機量測抗拉強度、降伏強度及延伸率。

Table 1 The ICP-AES measured chemical composition of A356 Al alloy used in this study.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Bal.	6.53	0.036	0.000	0.002	0.31	0.005	0.13

三、結果與討論

1.XRD結構分析

圖 1 為 A356 之 XRD Pattern，為 Al-6.5Si-0.3Mg 合金之壓鑄材料。圖 1 顯示 A356 合金含 FCC 的 α -Al 相及 diamond structure 的純 Si 相，為 Al-Si 之雙相結構。此外，pattern 中顯示部分的 α -Al 峰有寬化的現象，經過慢速掃描後可以發現有 Al_3Si 化合物出現。

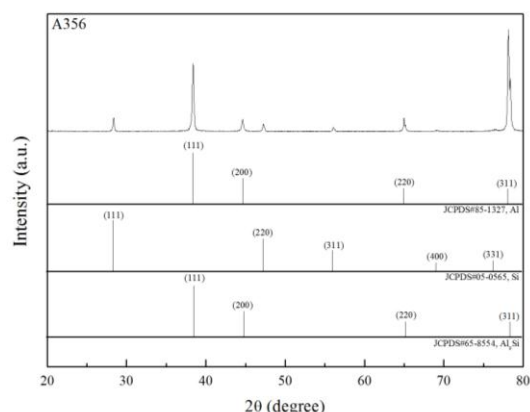


Fig.1 XRD pattern for A356 alloy

2.原材分析

2-1.顯微組織觀察

由 Al-Si 合金相圖可估算 A356 合金約含有 60% 的 α -Al 相和 40% Al-Si 共晶相。A356 合金壓鑄原材之 OM 如圖 2(a) 所示，淺灰色樹枝狀區域為 α -Al 基地相，深灰色顆粒狀組織為 Si 析出相形成 Al-Si 之共晶相組織。由顯微組織可計算 α -Al 之樹枝狀結構的 SDAS (Secondary dendrite arm spacing) 來推估鑄件的冷卻速率及預期強度 [11]。

圖 2(b) 為原材高倍率之 OM 圖。可以發現共晶相中的矽顆粒呈現短纖狀，證明材料調質狀況良好。但在基地中可找到少量介金屬化合物的存在 圖中淺灰色的針狀組織。

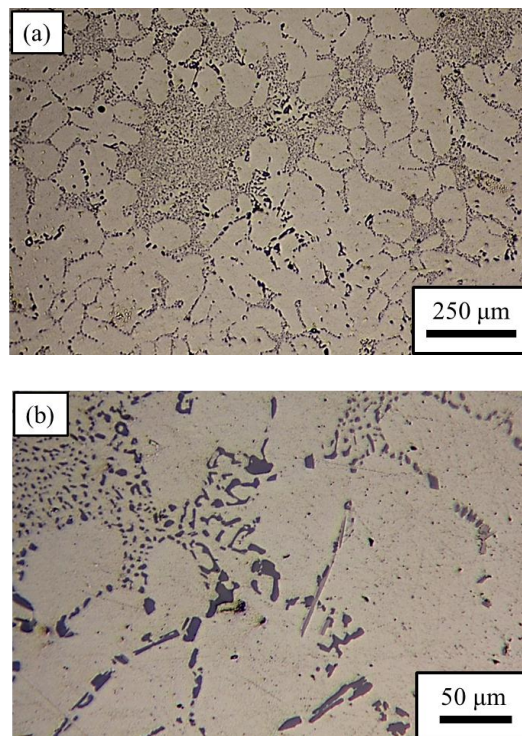


Fig.2 (a), (b) A356 alloy OM

由於這些不可溶介金屬相形貌通常為針狀，如圖 2(c) 所示，尖端處容易造成應力集中，加上熱膨脹係數等問題造成介面處的微裂縫，皆會影響材料的機械性質。

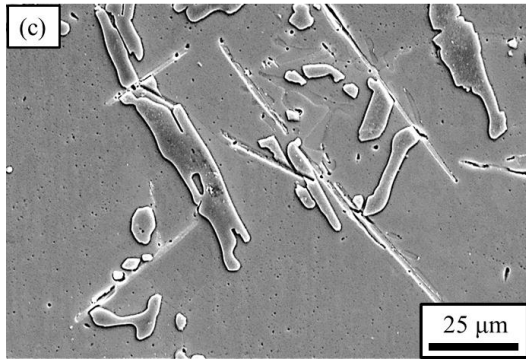


Fig.2 (c) Intermetallic in A356 alloy (SEM observation)

另外由顯微組織觀察，發現了許多在鑄造過程中難以避免的縮孔產生，如圖2(d)。縮孔形貌屬於不規則狀，尺寸可達200μm，對於材料的機械性質有絕對性的影響。另外如圖2(e)，可見到連續且集中的小縮孔，這些鑄造缺陷時常為材料疲勞裂縫的起始原因，導致疲勞性能降低。

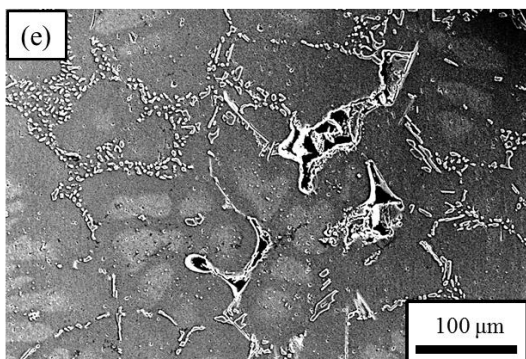
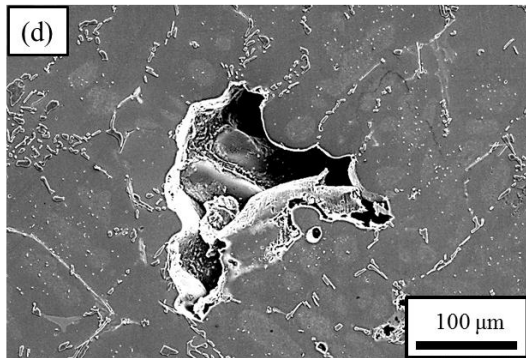


Fig.2 (d), (e) Shrinkage in A356 alloy (SEM observation)

3.機械性質

3-1.硬度量測

利用 Vicker's 硬度測試機，荷重 1kg 下量測 A356 材料硬度如表 2 所示。測試結果平均硬度為 94.6HV，符合 ASTM B108/B108M-08 之規範 [12]，可見 T6 處理對此材料有達到改有的析出硬化效果。

Table 2 The Vicker's hardness for A356 alloy.

Vicker's Hardness Test (HV)					
1.	2.	3.	4.	5.	Avg.
96.9	96.6	92.3	92.8	94.5	94.6

3-2.拉伸試驗

圖 3 為 A356 材料的應力-應變曲線。由圖 3 顯示，此材料之抗拉強度為 225MPa，降伏強度 185MPa，延伸率則只有 1.75%。根據 ASTM B108/B108M-08 規範本實驗使用的 A356 材料在抗拉強度及延伸率上都偏低。主要因素為材料內部的鑄造缺陷偏多，大量的縮孔造成本材料在抗拉強度及延伸率上的表現較差。

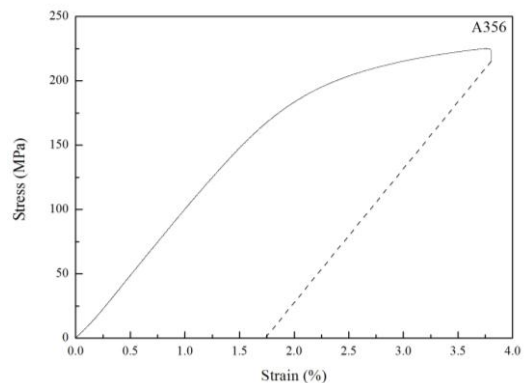


Fig.3 Stress-Strain curve of A356 alloy

3-3.疲勞試驗

圖 4 為 A356 材料的疲勞壽命曲線(S-N Curve)。A356-T6 原材經加工成符合 ASTM 規範的薄板狀試片後，進行疲勞實驗。應力範圍從 150MPa 到 60MPa，其中因 60MPa 應力下因疲勞壽命已超過設定的上限 (10^7 cycles)，圖中以紅點表示。

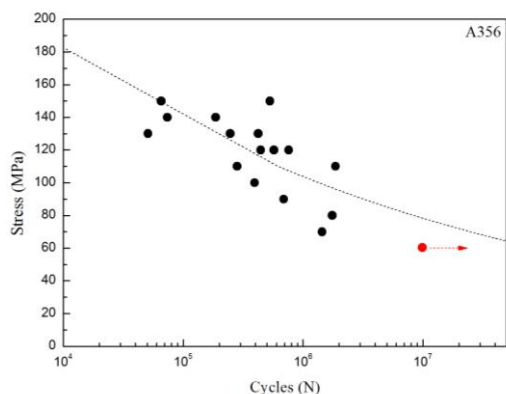


Fig.4 S-N curve of A356 alloy

4. 斷面分析

在本實驗的破斷試片中，可觀察到以下三中不同形貌的顯微組織。分別為裂縫擴展區、中介區、塑性變形區，如圖 5(a),(b),(c)所示。圖(a)為材料受力產生滑移後所留下的階梯狀組織，為裂縫成長擴展區域的特徵。圖(c)為典型的酒窩狀組織(Dimple)，即為塑性變形區域的特徵。圖(b)則為裂縫擴展區域及塑性變形區域的交界處。

以下針對圖 6(a)~(h)為疲勞破斷試片的一系列分析。其中圖(a)為應力 110MPa -壽命 2.8×10^5 Cycles 試片的外觀，可發現在圖(a)片下方側有明顯的塑性變形，再由圖(b)觀察斷面的色澤，可發現靠近試片段面右下方有一平整的扇型區，即為疲勞起始的區域。再利用 SEM 景深較深的特點，拍攝多張斷面相片後，加以組合成圖

(c)，配合高倍率的觀察可發現裂縫由一在試片表面處的縮孔(Shrinkage)起始，而後從右向左擴展，但由破斷表面可以觀察到許多縮孔等鑄造缺陷存在，加速了裂縫的延伸，也使得裂縫擴展的方式不是很連續，最後在因截面積縮小應力過大而瞬間破斷。圖(d)為造成裂縫起始的縮孔在較高倍率的觀察，可發現縮孔內部有典型的樹枝狀組織，而縮孔的左側有許多階梯狀組織，皆是裂縫由此延伸的證據。

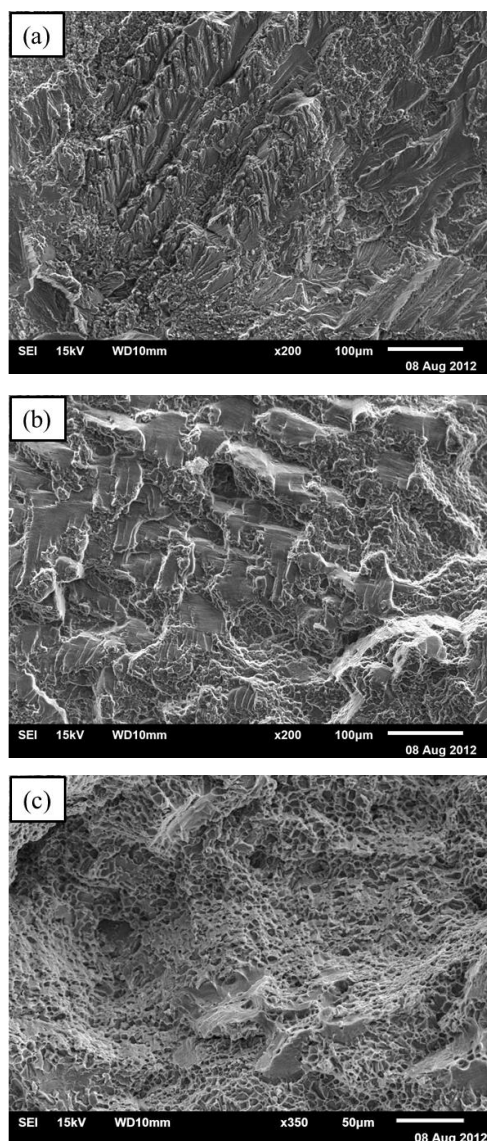


Fig.5 (a) Fatigue crack growth zone, (b) middle region, (c) plastic deformation zone

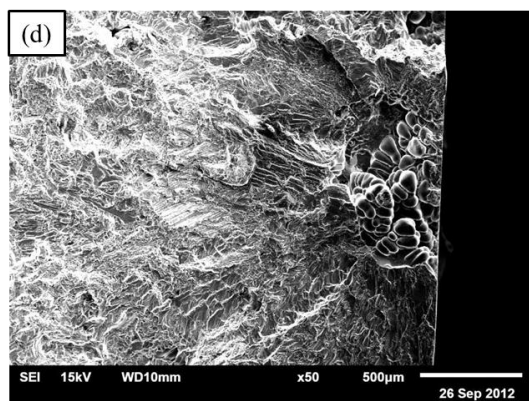
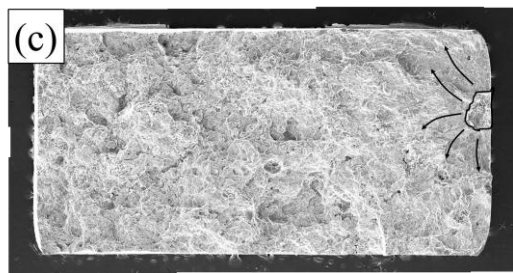


Fig.6 (a) Fracture specimen, (b) fracture surface by digital camera, (c) fracture surface by SEM, (d) shrinkage where the crack initiate

圖 5(e)為另一在應力 110MPa -壽

命 1.8×10^6 Cycles 試片的外觀，同樣的可以觀察到在圖(e)的上放，試片有出現塑性變形，而如圖(f)也同樣觀察到有一扇型光亮區，由下往上延伸。

疲勞破裂的過程，一般分為三個階段：裂縫孕核(Nucleation)、裂縫延伸(Propagation)及快速破斷(Sudden rupture)。在 high-cycle 疲勞破裂中，裂縫孕核的週數為影響疲勞壽命的關鍵因素；而在 low-cycle 疲勞破裂中，裂縫延伸的週數為影響疲勞壽命的關鍵因素。利用 SEM 組合出圖(g)，可發現此試片的裂縫是由三個連續且靠近試片表面之縮孔起始，但因為縮孔尺寸較小，且在裂縫起始後周圍的鑄造缺陷較圖(c)中的明顯較少，因此扇形區域較大，即裂縫擴展區需較大，相對疲勞壽命也越長。由較高倍率的圖(h)觀察可發現，裂縫由最左邊的縮孔開始向右擴展至另一縮孔後又產生新的裂縫源頭，繼續向右側以輻射狀的方式擴展。由此可見在本實驗所使用的 A356 材料當中，鑄造過程所產生的縮孔為影響其疲勞性能的主要角色，而其大小及分布情形也會直接影響到疲勞的壽命。因此如何有效地控制鑄造過程中縮孔的形成，將會是改善此材料疲勞性能的重要關鍵。



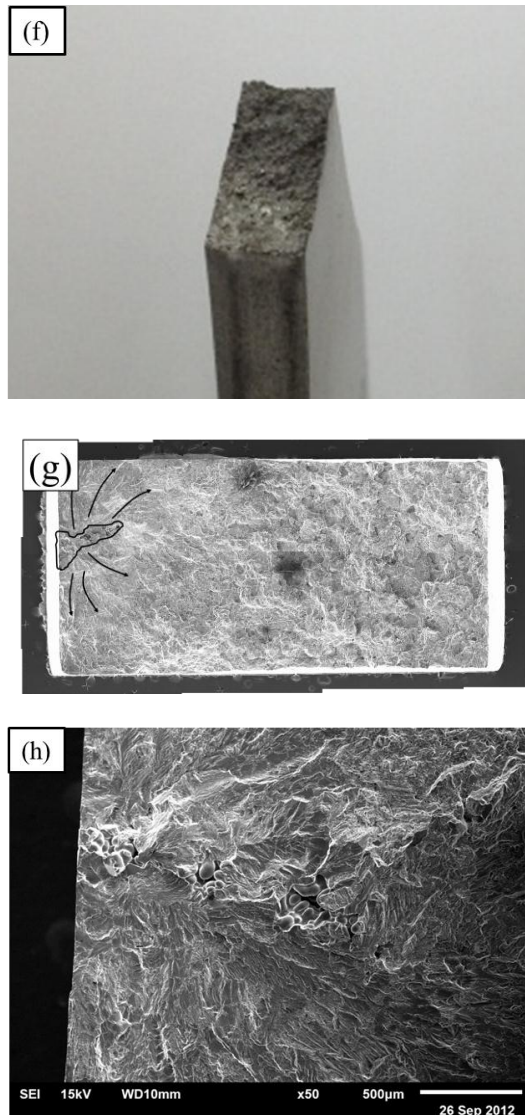


Fig.6 (e) Fracture specimen, (f) fracture surface by digital camera, (g) fracture surface by SEM, (g) shrinkage where the crack initiates and how it propagates

四、結論

1. 由XRD pattern及OM的檢視，可發現A356合金為 α -Al + Si之雙相合金，在 α -Al的樹枝狀組織間有Al-Si的共晶相存在。
2. 經由OM及SEM顯微組織觀察，本材料的共晶相中的Si呈現短纖或是顆粒狀，證明調質狀況良好。但同時可以觀察到少量的介金屬化合

物析出在共晶組織當中，而介金屬相與 α -Al的介面整合不佳，常有微裂縫產生，進而影響機械性質。

3. 由Vicker's硬度測試顯示，本實驗使用之A356材料硬度為94.6 HV，表示Mg的添加有效的與Si結合為 Mg_2Si 析出在基相當中，達到析出硬化的效應。
4. 根據拉伸試驗結果，本材料抗拉強度225 MPa，降伏強度185 MPa，延伸率卻只有1.75%。配合顯微組織的觀察，可估計因材料內部縮孔等缺陷過多導致材料延性不佳、強度不足。
5. 由A356材料的S-N Curve可以回歸出一條趨勢線，與測試出來的數據配合可以畫圖一個Fatigue Band，作為材料疲勞性能評估的參考依據。
6. 由疲勞破斷試片的斷面分析，可發現在A356材料的疲勞破壞，多半是由鑄造缺陷-縮孔造成裂縫起始，而大尺寸的縮孔更會加速裂縫的成長擴展。因此如何控制縮孔在鑄造過程中的形成及分布將有效的改善材料的疲勞性能。

參考文獻

1. G. L. Armstrong, R.D. Luckett, "Aluminum Die Casting Alloys", Die casting engineer, January-February 1984, pp. 10-16
2. B. Closset, J. E. Gruzleski, "Mechanical Properties of A356.0 Alloys Modified with Pure Strontium", AFS Transactions, Vol.31, 1982, pp. 453~464.
3. G. K. Sigworth, M. M. Guzowski, "Grain Refining of Hypoeutectic

- Al-Si Alloys", AFS Transactions, 1985, pp.907-912.
4. D. Apelian, G. K. Sigworth, K. R. Whaler, "Assessment of Grain Refinement and Modification Of Al-Si Foundry Alloys By Thermal Analysis", AFS Transactions, 1984, pp.297-307.
 5. D. Apelian, J. J. A. Cheng, "Al-Si Processing Variables: Effect on Grain Refinement and Eutectic Modification", AFS Transactions, 1986, pp.797-808.
 6. T. J. Hurley, R. G. Atkinson, "Effect of Modification Practice on Aluminum A356 Alloys", AFS Transactions, 1985, pp.291-296.
 7. R. D. Kassing, J. N. Schweitzer, F. L. Wuetig, "Sodium Versus Strontium for the Modification of Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloys", AFS Transactions, 1979, pp.359-366.
 8. H. Ye, "An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications", Journal of Materials Engineering and Performance.
 9. J. A. Taylor, "The Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys", 35th Australian Foundry Institute National Conference, 2004, pp. 148-157.
 10. "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials", ASTM Int'l, E 466 – 96.
 11. M. O. Shabani and A. Mazahery, Prediction of mechanical properties of cast A356 alloy as a function of microstructure and cooling rate, Archives of metallurgy and materials, vol. 56, Issue 3.
 12. "Standard Practice for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings", ASTM Int'l, B108/B108M – 08.