



高真空壓鑄用高強韌鋁合金 發展與應用

劉文海

一、前言

近年由於汽車工業的要求，鋁合金壓鑄零組件需具有高吸收衝擊能量、可銲接性、耐應力腐蝕及高塑性等特性，這樣的要求推升了開發新的壓鑄合金之契機。高真空壓鑄的目標產品是汽機車結構件，對伸長率十分要求，而傳統的壓鑄鋁合金如ADC10、ADC12伸長率不高，不能獲得高強韌的壓鑄件，故不能滿足高真空壓鑄件的性要求，亦不適用在保安結構件。國外已開發了一系列高真空壓鑄專用鋁合金，高真空壓鑄件從材料就會跟一般的壓鑄件不同，而且為了要達到可銲接和熱處理的目的，壓鑄的每個步驟都要很注意。

二、壓鑄鋁合金特點及主要合金元素作用

1. 傳統壓鑄鋁合金特點

壓鑄鋁合金在保證順利壓鑄及滿足所製造零件的工作性能要求外，還應具備較好的塑性流變性能、較小的線收縮率、較窄的結晶溫度範圍、一定的高溫固態強度、容易脫模及不易吸氣氧化等。常見的壓鑄鋁合金主要集中於Al-Si-Cu、Al-Si-Mg及Al-Mg幾個系列，其典型的牌號、主要合金成分及機械性能見表1，其中Al-Si-Cu系合金應用最為廣泛，如ADC10（A380）和ADC12（A383）。

表1 常用壓鑄鋁合金成分及機械性能

Alloys group	GB	ASTM	JIS	Main elements composition	Mechanical properties
Al-Si	YL101	A360	ADC3	AlSi10Mg(Fe)	$\sigma \geq 220$ MPa; $\delta \geq 2\%$
	YL102	A413	ADC2	AlSi12(Fe)	$\sigma \geq 279$ MPa; $\delta \geq 2.7\%$
	YL112	A380	ADC10	AlSi9Cu3(Fe)	$\sigma \geq 320$ MPa; $\delta \geq 3.5\%$
Al-Si-Cu	YL113	A383	ADC12	AlSi11Cu3	$\sigma \geq 230$ MPa; $\delta \geq 1\%$
	YL117	B390	ADC14	AlSi17Cu5Mg	$\sigma \geq 220$ MPa; $\delta \leq 1\%$
Al-Mg	YL302	518	ADC5	AlMg5Si1	$\sigma \geq 220$ MPa; $\delta \geq 2\%$

註：機械性能為抗拉強度及伸長率
資料來源：材料導報，2018年11月



壓鑄鋁合金的成分決定了鑄件的機械性能，針對不同要求的鑄件，不但要選用不同的壓鑄工法，也需配合與之適應的鋁合金成分。歸納來說，普通壓鑄鋁合金中主要合金元素是Si、Fe、Cu等，Si可以提高合金的流動性，Fe利於脫模，Cu可以增加鑄件的強度。然而Fe易形成針狀的 β -Al₃FeSi相（圖1），導致普通鋁合金壓鑄件的伸長率一般低於3%。為防止壓鑄過程中產生的黏模，壓鑄合金中的含Fe量一般都較高，高含量的鐵會減弱鑄件韌性。由JIS H 5302:2000中得知，ADC12之抗拉強度為228 MPa、伸長率為1.4%；即使應用充氧壓鑄技術時，ADC12之伸長率也只有1.9%，可知其伸長率天生就偏低。

2. 普通壓鑄鋁合金的改質

為提高壓鑄件的機械性能，國外在傳統壓鑄鋁合金的基礎上做了很多改性研究。例如在ADC12合金中添加1.0%的Sm，使ADC12合金中的共晶矽尺寸顯著細化，二次枝晶間距從51 μ m降到15 μ m，其抗拉強度和伸長率分別達到220 MPa和3.1%。亦有利用添加0.05%Sr來細化ADC12合金中的晶粒，改善共晶矽形貌，使其抗拉強度和伸長率分別達到269.5 MPa和3.2%。

A380是美國使用最廣泛的壓鑄鋁合金，具有優良的機械性能、鑄造性能等。383和384就是A380的改良型合金，其Si含量比A380更接近共晶成分，進一步改善了合金的流動性；383合金的Cu

含量較低，在壓鑄時具有較低的熱裂形成傾向。美國Makhlouf教授長期研究壓鑄鋁合金，包括新型合金開發、壓鑄製程優化以及合金性能評價等。他開發了iSelect-Al2.0軟體，並利用該軟體對A380鋁合金的化學成分進行優化，成分調整主要包括提高Si、Mn和Mg含量，降低Fe和Cu含量，並加入Sr進行改質處理。經成分優化後，AMC380鋁合金抗拉強度較A380提高7.0%~9.9%，降伏強度提高20.5%~24.8%，然而伸長率有所下降。A380鋁合金的伸長率則提高到4.6%，提高幅度達17%~22.6%，但抗拉強度和降伏強度提升低於5.9%。

學者在A380合金中添加0.6%Li，使合金中 β -AlFeSi相和共晶矽更加彌散、均勻，最終壓鑄件的抗拉強度及伸長率從274MPa和3.8%分別提升至300MPa和6%。學者藉由添加0.04%Sr和後續熱處理，使A380鋁合金的抗拉強度和伸長率分別達到258MPa和4.2%。也有在A380合金中添加0.05%Be來減少Fe的影響及細化共晶矽尺寸，使鑄件的抗拉強度從270MPa增加至295MPa，伸長率從3.7%增加到4.7%。歸納來說，普通壓鑄鋁合金改質研究對合金的強度尤其是降伏強度和伸長率提高較大，但由於其中的Fe含量較高，對鑄件的伸長率提高幅度不大，經過改質後伸長率也基本在5%以下。

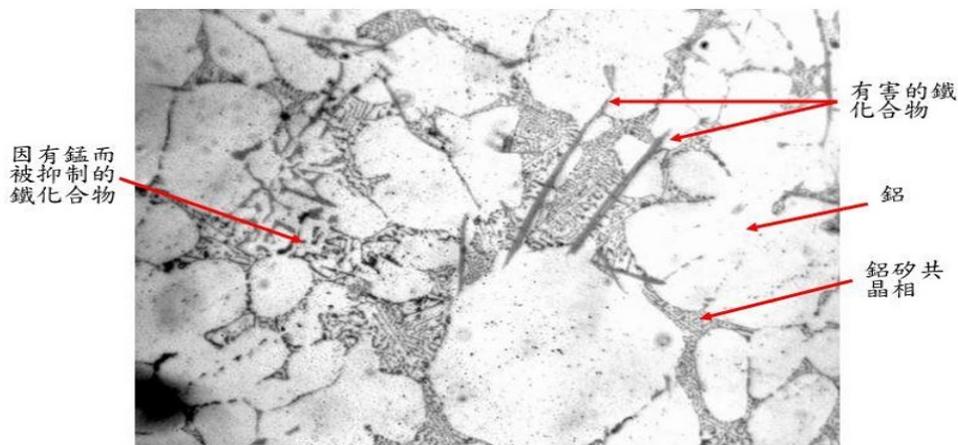


圖1 傳統壓鑄鋁合金微觀組織

資料來源：輕金屬製造技術與應用研討會，2019.09.05



三、高真空壓鑄鋁合金的特點及分類

汽車上一些受力件和保安零部件，對強韌性、疲勞性的要求遠高於普通的壓鑄件，一般要求伸長率超過8%，然而，普通鋁合金壓鑄件的伸長率低於5%。運用高真空壓鑄技術可以明顯提高普通壓鑄鋁合金的機械性能，如ADC12高真空壓鑄件的抗拉強度和伸長率分別比普通壓鑄件提高6.6%和25%。即便如此，普通壓鑄鋁合金藉由高真空壓鑄技術也很難達到汽車受力結構件的性能（尤其是伸長率）的要求，故除其成型工法須採用高真空壓鑄外，還要採用性能更為優異的壓鑄鋁合金。

為進一步提高壓鑄件的機械、耐蝕及疲勞等諸多性能，國外研究人員致力於開發用於高真空壓鑄的新型低成本、高性能鋁合金，目前主要集中在Al-Si和Al-Mg系列合金。業界中較為知名的鋁合金牌號包含了Silafont®-36、Magsimal®-59、Aural-2及Aural-3等，都是以優化或添加合金元素為主，而新開發類型之鋁合金主要為日本Yamaha開發的DiASil鋁合金，目前產業應用的主要高強韌鋁合金牌號及成分如表2所示。

（一）Al-Si系高真空壓鑄鋁合金

由於具有良好的鑄造性能，Al-Si系合金也是高真空壓鑄鋁合金的主要研發材料，其中Al-Si系高真空壓鑄鋁合金都屬於亞共晶合金-AlSi10MnMg合金，與普通壓鑄鋁合金相比，其主要區別在於：

- A.高Si：保證合金具有良好的鑄造性能，可製作壁厚僅1.1mm的零件；
- B.儘量避免Cu：保證汽車受力結構件有較好的耐蝕性；
- C.儘量降低Fe含量：相對增加Mn含量來確保合金具有較好的抗黏模性(Die Soldering Resistance)，同時當Mn/Si比例合適時，可避免產生針狀的 β -Al₃FeSi化合物，而形成細小彌散的 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂四元相，而確保材料具有良好的綜合性能；
- D.添加Sr和Ti：添加Sr不但可藉由其改質作用來改變共晶矽相的形態以提高合金的伸長率，而且可以減少壓鑄過程中的黏模傾向。Ti添加後可以細化 α -Al枝晶和第二相的尺寸，進而提高鑄件的機械性能。

1. Silafont®-36

1994年德國的Rheinfelden Alloys公司首次推出高韌性壓鑄鋁合金Silafont®-36，Silafont®-36是以歐洲牌號EN AC-43400為基礎開發而成，由表2中可看出EN AC-43400與Silafont®-36之成分差異。Silafont®-36的鐵含量相當低，但過低的鐵含量易造成鑄件產生黏模的現象，而錳的添加可減少黏模現象的產生，又不會與鋁產生針狀之金屬間化合物。另外，鋇的加入可對共晶矽進行改質，使鑄件中原本呈現粗大針狀的共晶矽，轉變為細小纖維化的共晶矽，提升了合金韌性，而對於耐蝕性有不良影響的Cu、Zn則屬不純物元素而受到嚴格限制。

表2 主要之高強韌鋁合金牌號及成分

材料牌號	元素含量(%)										
	矽	錳	鎂	鋇	鈦	鐵	銅	鋅	鈹	鉬	銻
EN AC-43400 ⁽⁷⁾	9.0~11.0	0.55	0.2~0.5	-	0.02	1	1	0.15	-	-	-
Silafont®-36 ⁽⁸⁾	9.5~11.5	0.5~0.8	0.1~0.5	0.01~0.02	0.15	0.15	0.03	0.07	-	-	-
Magsimal®-59 ⁽⁹⁾	1.8~2.6	0.5~0.8	5.0~6.0	-	0.2	0.2	0.03	0.07	0.04	-	-
Castasil®-37 ⁽¹⁰⁾	8.5~10.5	0.35~0.6	0.06	0.006~0.025	-	0.15	0.05	0.07	-	0.1~0.3	0.1~0.3
Aural-2 ⁽¹¹⁾	9.5~11.5	0.45~0.55	0.27~0.33	0.01~0.16	0.08	0.15~0.22	0.03	-	-	-	-
Aural-3 ⁽¹¹⁾	9.5~11.5	0.45~0.55	0.4~0.6	0.01~0.16	0.08	0.15~0.22	0.03	-	-	-	-
DiASil ⁽¹²⁾	20	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-

資料來源：工業材料395期，2019/11



圖2為Silafont®-36微觀組織，與未添加Sr的AlSi9MnMg合金相比，添加了Sr的Silafont-36其共晶Si的形狀會從層狀變成微細的球狀化。也由於這項共晶Si的形狀改變，因而即使是F材也可以得到伸長率達10%的高延性。透過固溶化處理的實施，雖然共晶Si會長大一些，但同時也會球狀化，而這項共晶Si的球狀化，就是使其T7材（固溶處理+過時效）產生高延性的原因所在。Silafont®-36經由高真空壓鑄技術及進行熱處理後，可析出Mg₂Si等強化相，提升合金強度。表3是Silafont-36和ADC12的機械性質比較，目前Silafont-36已成為商用標準的合金，在Aluminum Association的牌號為AA365.0。

2. Castasil-37

Castasil-37也是Rheinfelden Alloys公司開發的Al-Si-Mn系高強韌壓鑄鋁合金，鑄造性良好，不須熱處理，在鑄造狀態下就可以獲致高延性（伸長率12%以上），也不會因為高溫環境下的時效而產生材質變化。其Mg含量在0.06%以下，而且添加了Mo和Zr。透過對Mg含量的限制，可以防止鑄件使用時的經年時效硬化，而另一方面，添加過渡元素Mo和Zr則是用來彌補因為Mg含量的降低而導致的降伏強度減少。Castasil-37之共晶Si以Sr進行改質處理之後和Silafont-36同樣地可被細化，而且比Silafont-36還要更加微細，圖3為Castasil-37鑄態微觀組織。

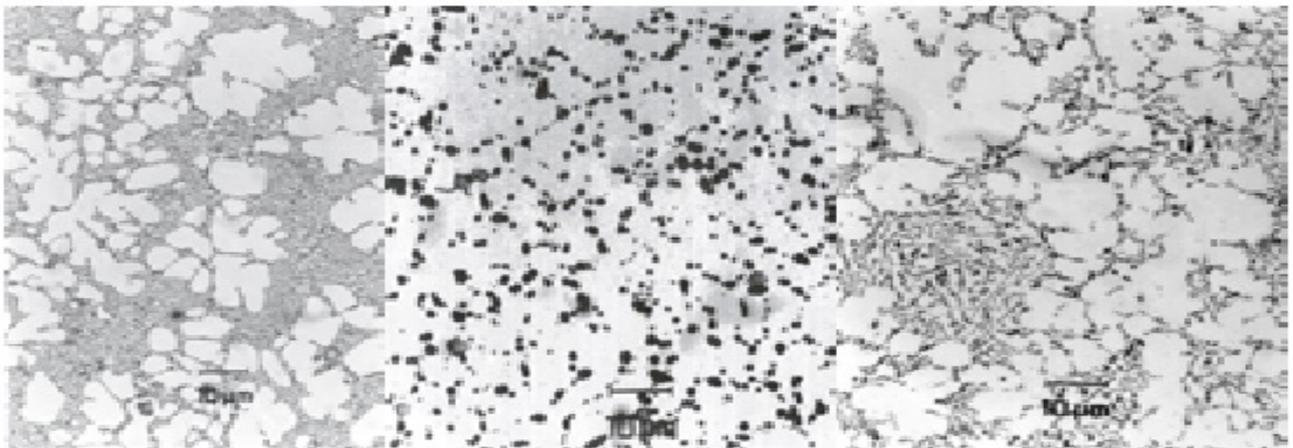


圖2 Silafont®-36微觀組織（左：鑄態，中：固溶處理，右：未添加Sr）
資料來源：素形材，2009.09

表3 Silafont-36和ADC12機械性質比較

合金	熱處理狀態	降伏強度 N/mm ²	抗拉強度 N/mm ²	伸長率 %	硬度 HB
Silafont-36	F	120-150	250-290	5-11	75-95
Silafont-36	T4	95-140	210-260	15-22	60-75
Silafont-36	T5	155-245	275-340	4-9	80-110
Silafont-36	T6	210-280	290-340	7-12	90-110
Silafont-36	T7	120-170	200-240	15-20	60-75
ADC12	F	154	228	1.4	74.1

註：ADC12的數據為自11類產品取出27片試片，進行拉試驗結果的平均值 [5]

資料來源：機械工業，2019.12

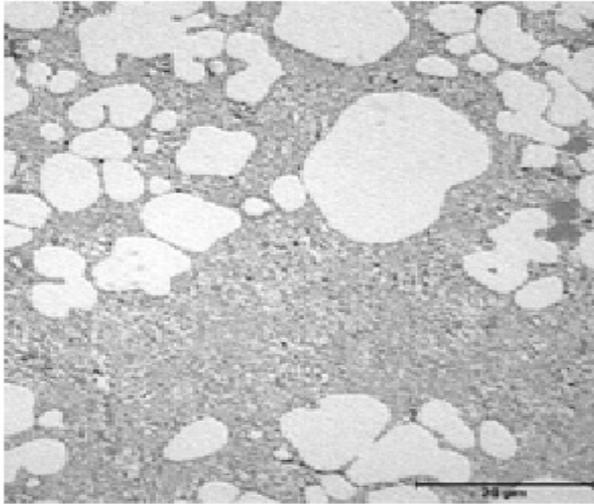


圖3 Castasil-37鑄態微觀組織
資料來源：素形材，2009.09

3. Aural-2/3

Aural-2/3是Alcan公司開發之Al-Si-Mg系高強韌鋁合金，其Mg含量為0.27%~0.33%時（稱Aural-2），是一種充填流動性較強，適合生產複雜大型薄壁鋁合金壓鑄件的高強韌鋁合金，而Mg含量提高至0.4%~0.6%時（Aural-3），再配合高真空壓鑄，鑄件則具備優良的可鉚性和可熱處理性能。Aural-3合金在熱處理後降伏強度可達250MPa，伸長率甚至可達5%~12%。在壓鑄Al-Si-Mg系合金時，由於Mg不能完全溶解在 α -Al固溶體中，激冷時Mg在 α -Al固溶體中呈過飽和狀態，時效處理時會析出強化相 Mg_2Si ，可以提高合金的抗拉強度和降伏強度。

4. C448

C448 (AlSi9Mg) 是Alcoa開發之熱處理型易澆鑄高強韌鋁合金，其元素約為10%的矽和0.2%的鎂。該合金藉由析出硬化 (Mg_2Si)，需要進行固溶熱處理，然後淬火和時效。

Si在7% - 12%範圍內的亞共晶合金，為避免 Al_3FeSi 的初生相，Fe的含量必須低於三元共晶點0.8%，圖4顯示在Al-Si-Mg-Fe合金中添加Mn的效果，假設在共晶點以0.8%的Mn完全取代Fe，然後比較上述幾種高強韌壓鑄鋁合金避免形成初生Fe/Mn金屬間化合物的能力。

在AA365中，Mn範圍為0.5%-0.8%，而在Aural-2/3和C448合金的上限為0.6%Mn。Silafont-36中的最大鐵含量是0.15%，C448是0.20%，而Aural-2/3是0.25%。似乎AA365中允許的最高Mn含量是導致形成含Fe/Mn初生相的原因，如圖4中陰影區所示。

根據經驗，Aural-2/3和C448合金採用較低的Mn含量，以避免形成鐵/錳初生相而降低延展性。AA362的錳含量較低（0.25-0.35%），而最大鐵含量較高（0.4%），但其組成範圍仍低於圖4中形成Fe/Mn初生相的預測線。含鐵量最大為0.25%的AA367和AA368合金（9%矽），其Mn含量與AA362一樣低，因此也遠低於該預測線。

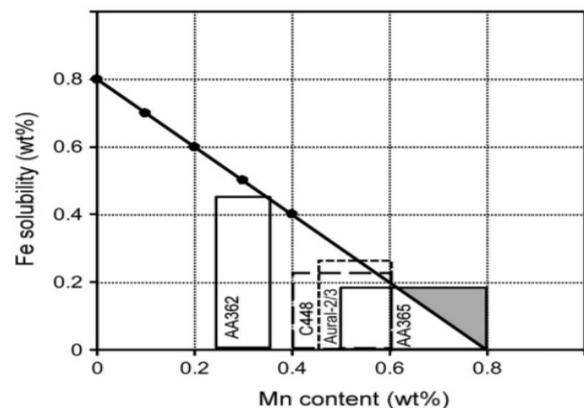


圖4 高強韌Al-Si-Mg-Fe合金中添加Mn取代Fe的效果

資料來源：「Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Recent Advances」，2018

根據 $Fe(max) = 0.80 - Mn(max)$ 的概念，高Mn需要低Fe來避免析出Fe/Mn初生相。Mn最大值為0.35%（例如Mercalloy合金）時，為避免形成Fe/Mn初生相而降低伸長率，Fe必須低於0.45%（參見圖5）。在提供抗黏模性方面，因為已發現鋇(Sr)的能效比Mn或Fe高出十倍，故Silafont-36、Aural-2/3和Alcoa的C448都允許降低Mn含量。這意味著可以使用更高的鐵含量，故可提高模具及料管壽命。如圖5所示，選擇Mn範圍0.25% - 0.35%（最大Mn含量0.35%），意味著Fe必須低於0.45%以避免金屬間化合物的析出。

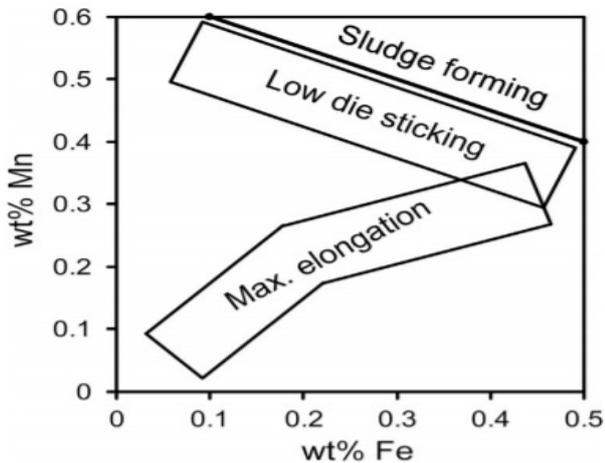


圖5 高強韌鋁合金之Mn/Fe含量與伸長率關係
資料來源：「Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Recent Advances」, 2018

儘管AlSi10MnMg系合金的性能優異，然而目前商用的該系合金主要由電解鋁錠直接配製而成，不能接受再生鋁添加，成本較高，且回收後Fe含量易超標。目前，基於再生鋁之高Fe含量AlSi10MnMg合金的研究還處於實驗階段，該類合金的生產成本大大降低，不過其鑄件的伸長率不高仍是目前產業化面臨的最大問題。現有研究發現列舉如下：

- A. 當合金中的Fe含量在0.47%~0.6%時，AlSi10MnMg系合金的強度和伸長率均隨著Fe含量增加而降低，不過添加的Mn/Fe比例在2/3左右時，鑄件的伸長率可以保持在8%以上。
- B. 高Fe的AlSi10MnMg合金中主要由 α -Al、共晶矽、富Fe中間合金相（如 α -Al₁₅(MnFe)₃Si₂、Al₅FeSi等）、Mg₂Si、Al₈FeMg₃Si₆等組成，當Fe含量低於0.7%時，隨著Fe含量提高合金的抗拉強度也升高，伸長率則一直下降。
- C. 藉由調整Mn/Fe比例和提高冷卻速率可提高含0.55%Fe的AlSi10MnMg合金鑄件的伸長率。

此外，日本Ryobi公司在其獨自研發的高真空壓鑄技術的基礎上，調整AC4CH成分，研發了亞共晶的AlSiMg系熱處理型高韌性壓鑄用鋁合金，其伸長率在T5熱處理時為5%~15%、T4熱處理時

則高達10%~25%。2002年日本Yamaha公司開發了一款高矽鋁合金DiASi1汽缸，含矽20%及含銅1%，在高真空壓鑄條件下，初晶矽尺寸小於50 μ m，材料的強度和耐磨性均得到了提高，成功應用於摩托車汽缸體的壓鑄成型，然而該合金的韌性較差，不適合用於其他受力結構件。

歸納來說，高真空壓鑄Al-Si系合金的開發主要集中在AlSiMg系列合金，該系列合金的鑄造性能好、強度高，可用於汽車中形狀複雜、綜合機械性能要求較高的零部件，不過提高鑄件的機械性能主要依賴於後續熱處理，但熱處理過程中不可避免鑄件發生變形，需增加矯正工序，使其製造成本提高。

(二) Al-Mg系高真空壓鑄鋁合金

Al-Mg系合金不需固溶處理即可獲得很高的抗拉強度和伸長率，但是由於Al-Mg系合金中Mg的加入，熔煉時容易氧化或形成渣，壓鑄控制難度要比Al-Si系合金大，主要用於一些有特殊外觀和防腐要求且對機械性能要求不高的壓鑄件。

1. Magsimal®-59

Magsimal®-59是Rheinfelden Alloys公司於1995年開發之高強韌壓鑄鋁合金，鑄態時的伸長率可保持在15%以上，降伏強度高於120 MPa，主要用於汽車部件。Magsimal-59也是以純度99.8%以上的原生鋁錠為基礎熔煉而成，此合金屬於AlMg₅Si₂Mn合金，主要構成元素是Mg、Si、Mn，組織則是由 α 相和Mg₂Si共晶所構成，其中Mg、Si的含量要調整到Mg₂Si共晶率為40~50%（面積率）以得到良好的鑄造性與熔湯補給性，同時Mg/Si比為2.5以上以確保其耐蝕性和 α 相的強度。此外，藉由控制Fe含量低於0.2%以及Cu含量低於0.03%，以提高伸長率；控制Na和Ca含量均低於0.001%，增加熔湯流動性，增強抗熱裂性；Mg含量超過2%後高溫時易燒損，另外，由於Al-Mg合金在熔解時容易生成氧化浮渣，藉由添加微量的Be在熔湯表面形成密度較高的BeO，進而減少Al和Mg擴散至表面發生氧化，圖6為Magsimal®-59鑄態微觀組織。

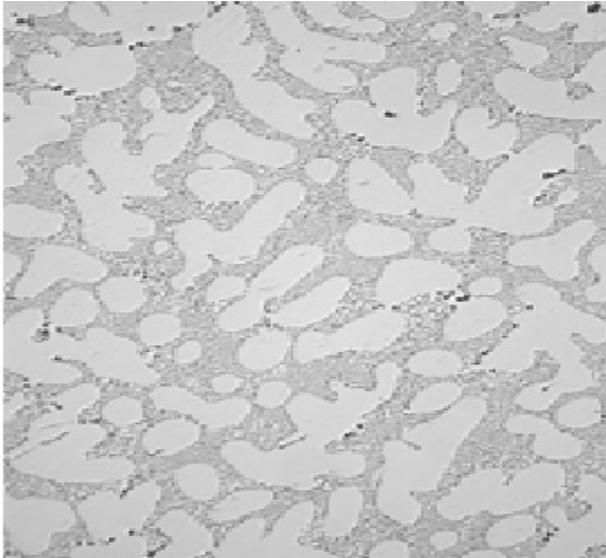


圖6 Magsimal®-59鑄態微觀組織
資料來源：素形材，2009.09

學者研究Mg含量、組織和時效處理對AlMg₅Si₂Mn合金的影響，開發出新型的AlMg₅Si₂Mn合金，其鑄件的抗拉強度和伸長率分別為324MPa和8.3%，經過250°C × 1 h的人工時

效處理後，抗拉強度和伸長率為369MPa和8.5%。因具有優異的機械性能，此合金已應用於中國品牌汽車後副車架的生產上。廣東鴻泰公司發明了一種Al-Mg-Si-Mn系合金，Fe含量在0.25%以下，把Mg含量控制在4.5%~6.3%，高真空壓鑄後鑄件的降伏強度可達217.2 MPa，伸長率高於7%。

Al-Mg系合金的凝固區間較大，鑄造性能較差，且Mg含量高，熔煉保護及熔湯處理難度大，主要用於形狀比較簡單、沒有薄壁的零部件。Al-Mg系合金的機械性能主要與晶粒及合金相尺寸有關，其機械性能的優劣主要取決於鑄件的壁厚，整體而言Al-Mg系合金的應用範圍較Al-Si系合金窄得多。

2. C446

C446 (AlMg3Mn) 是Alcoa公司開發之一種不需熱處理的Al-Mg系高強韌鋁合金，其元素約為3.5%的鎂和1.3%的錳，鐵<0.2%。合金基於固溶強化，因此不需要熱處理。C446與C448兩種合金的鐵和銅含量都很低，表4是此二種合金的機械性質比較。

表4 C446及C448高強韌鋁合金的機械性質比較

	C 448 T7 Heat treated	C 446 Non heat-treatable
Chemical Designation	AlSi9Mg	AlMg3Mn
Yield Strength (min / typ) [MPa]	120 / 140	120 / 150
Ultimate Strength (min / typ) [MPa]	180 / 200	190 / 250
Elongation (min / typ) [%]	10 / 15	10 / 20
Fatigue Limit [MPa]	> 100	> 120
Weldability	WIG / MIG / Laser	WIG / MIG / Laser
Self Piercing Riveting	Very good	Very good
Resistance to Corrosion	resistant	Relatively resistant
Formability	Very good	Very good
Surface quality	Good	Excellent
Castability	Very good	Design changes necessary

資料來源：「The Aluminium Automotive Manual」，EAA，2002



四、高強韌壓鑄鋁合金的應用

隨著汽車零組件擴大採用高強韌壓鑄鋁合金，全球各大公司也不斷開發出鋁合金汽車結構件。由於Silafont®-36可進行熱處理強化，因此適合應用於製作許多汽車底盤保安零組件，如引擎支架、汽車前框架、尾門框架及底盤構件等（見圖7），而Magsimal®-59已運用於汽車變速箱橫樑、前輪懸吊支架及汽車油箱底殼等（見圖8）。

2018年歐洲壓鑄展鋁合金優秀鑄件前三名所使用之合金材料皆是以AlSi10MnMg之合金成分為主再進行微調，而AlSi10MnMg也正是Silafont®-36添加之主要元素，獲獎鑄件簡介如下：

第一名：汽車連接結構件（圖9），生產商：瑞士DGS，鑄件尺寸：長797mm×寬437mm×高304mm，鑄件重量：3.043Kg，合金：AlSi10MnMgZnZr，熱處理：T6。

第二名：高壓蓄電器殼體（圖10），生產商：德國麥格納BDW公司，鑄件尺寸：長1120mm×寬540mm×高60mm，鑄件重量：7.27 Kg（上），14.12 Kg（下），合金：EN AC-AlSi10MnMg(Fe)，熱處理：T7。

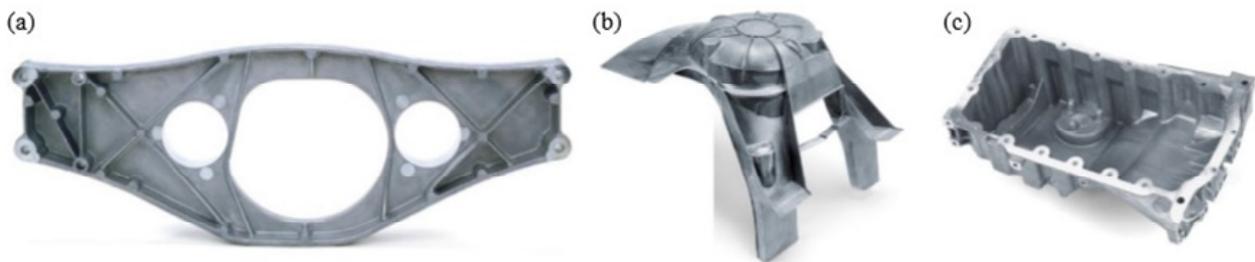
第三名：混合動力車油箱殼體（圖11），生產商：瑞士GF，鑄件尺寸：長980mm×寬626mm×高236mm，鑄件重量：10.9Kg，合金：EN AC-AlSi10MnMg，熱處理：T7。



(a)汽車引擎支架；(b)汽車的前框架；(c)汽車尾門框架；(d)汽車底盤構件⁽⁸⁾

圖7 Silafont®-36的應用

資料來源：<https://rheinfelden-alloys.eu/>工業材料，2019/11



(a)汽車變速箱橫樑；(b)汽車前輪懸吊支架；(c)汽車油箱底殼⁽⁹⁾

圖8 Magsimal®-59的應用

資料來源：<https://rheinfelden-alloys.eu/>工業材料，2019/11



圖9 汽車連接結構件
資料來源：<https://kknews.cc>

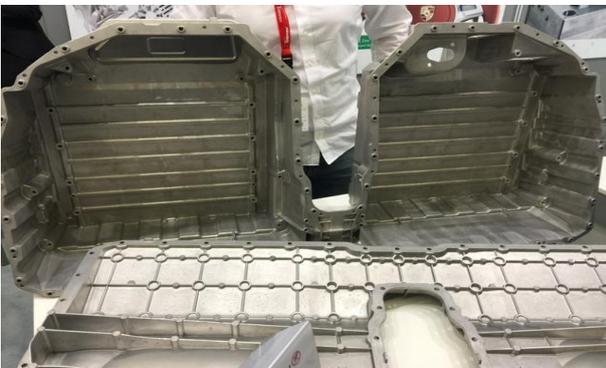


圖10 高壓蓄電器殼體
資料來源：<https://kknews.cc>



圖11 混合動力車油箱殼體
資料來源：<https://kknews.cc>

韌、高品質及形狀複雜一體化方向發展，這也為高真空壓鑄技術的發展提供了驅動力。未來應用於汽車零組件之鋁合金壓鑄材料應該還是會以 Silafont®-36 為基礎，進行相關汽車零組件之開發，畢竟要再開發新的合金材料，難度相當高。我國對高強韌真空壓鑄鋁合金及成型技術的研究時間較短，與國外企業的差距明顯。我國鑄造業要想趕上汽車產業先進國家，除了開發真空壓鑄技術及設備之外，還須要針對高真空壓鑄高強韌鋁合金在成分優化、熔湯處理、合金相強化機制等方面做更多的基礎及應用研究。

參考資料

1. 渡邊修一郎，「アルミニウム新材料による新たな用途」，素形材，2009.09
2. 山縣 裕，「アルミニウム車体及びエンジンブロックへの高品質ダイカスト技術の適用」，鑄造工学，2004，76（4），272
3. 「The Aluminium Automotive Manual」，EAA，2002
4. Roger N. Lumley，「Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Recent Advances」，Woodhead Publishing，2018 Elsevier Ltd
5. 張俊超等，「高真空壓鑄鋁合金的研究進展」，材料導報，2018年11月第32卷
6. 張百在等，「Mg含量對AlSi10MgMnFe壓鑄件性能和組織的影響」，特種鑄造及有色合金，2016年第36卷第8期
7. 萬里等，「高真空壓鑄技術及高強韌壓鑄鋁合金開發和應用現狀及前景」，特種鑄造及有色合金，2007年第27卷第12期
8. 邱垂泓等，「壓鑄鋁合金在汽車輕量化之應用與發展」，工業材料395期，2019/11
9. <https://global.yamaha-motor.com>
10. <https://kknews.cc>-- 「2018年歐洲壓鑄展優秀鑄件評比結果揭曉」
11. <https://rheinfelden-alloys.eu>

五、結 語

隨著汽車工業技術的進步，其動力性、安全性、舒適性、噪音、廢氣排放等指標不斷提高，隨之而來的是要求鋁合金壓鑄件向壁薄、高強