

提升鋁合金鑄造產品品質之研究

Research of Aluminum Alloy Casting Products Quality Improvement

馬 恆 教 授 中 華 大 學 工 業 管 理 學 系 Email: hengma@chu.edu.tw
林如慧 研 究 生 中 華 大 學 工 業 管 理 學 系 Email: rita2829@yahoo.com.tw

摘要

鋁合金因具有質輕、美觀、延性與熱傳性佳等優良特性，因此被廣泛的應用於重視表面品質的3C、帷幕牆與汽車輕量化等產品上。另一方面又具有節能減碳與材料循環利用的國際重視議題，使得鋁合金成為重要金屬之一。

鋁合金的陽極產品被廣泛用來製造重視外觀的3C產品殼件，如AA5052鋁合金。惟國內鋁製造業者在產製這種高階陽極產品時，軋延鋁片常有組織條紋或細線紋等品質問題，追根究底其原因在於上游鑄胚粗晶所致。國內業者因此需外購較高價優質鑄胚來進行生產而影響其競爭力。為提倡國內產業技術自主，不需仰賴進口鑄胚，本研究收集相關文獻釐清鑄胚粗晶問題，並引進國外最先進的優質Al-3Ti-B細晶線，將與產業既有使用的一般Al-3Ti-B細晶線及Al-5Ti-0.2B細晶線比較細化效果，藉由系統化的模擬實驗，發現優質Al-3Ti-B細晶線可在加線用量減半下更優於目前一般Al-3Ti-B細晶線及Al-5Ti-0.2B細晶線之鑄胚細化能力，鑄胚晶粒易達到180 μ m以下水準。另改變加線位置，由除氣機入口端改為出口端，且透過陽極與化拋處理，證實新製程在鋁片上的組織條紋與細線紋的檢驗，皆可由C級不良等級提升至A級的優良等級，並達到國際水準，實現物美價廉的結果。

關鍵字：鋁合金、陽極產品、細晶線、晶粒

ABSTRACT

Aluminum alloy with light weight, artistic surface, great ductility, and thermal conductivity, so, it's widely applied to 3C, only curtain wall and save-weight vehicle products which care surface quality. On the other hand, it is also match international concern issue about energy saving, carbon, reduction, and material economic cycle, and then become to shiny metal

Anodized AA5052 aluminum alloy products are broadly used for 3C cover parts, however the domestic manufacturers to produce this high level products, often found some structure stripes or stringers defect on rolling sheet, to get to the heart of the matter, those defect due to about 600 μ m coarse grain. so they need to import excellent quality slab to overcome this problem. For the technical autonomy and without import slab, this study will collect documents to clarify what problem on slab grain refining and thinking introduce state-of-the-art advanced Al-3Ti-B grain refiner, to compare refining efficiency with both existing general Al-5Ti-0.2B and Al-3Ti-B grain refiners. Under simulation experiment of systematization, the advanced Al-3Ti-B grain refiner with predominant refining efficiency of only half adding rate of existing refiner, and easy to achieve small than 180 μ m grain size, if correct the adding position on exit port of degassing facility, the final rolling sheet can avoid both structural stripe and stringer defect after anodized and chemical polish inspection. This to prove the anodized products quality can be promoted the level from C to A under use the new melting and casting process, which adopted new type grain refiner and correct adding position. Finally, the product has been achieved the international quality level.

Keywords : aluminum, anodized alloy, grain refiner, grain size



1. 緒論

1.1. 研究背景與動機

鋁合金陽極處理的應用與發展，主要在彌補鋁合金本質易氧化的問題，鋁合金氧化層雖有一定鈍化作用，但長期曝露之結果，氧化層仍會剝落，喪失保護作用。「鋁陽極氧化處理」的目的，即是善加利用其易氧化之特性，藉電化學方法控制氧化層之生成，以防止鋁材進一步氧化，同時增加表面的機械性質，且金屬的氧化物較金屬更安定，所以更耐腐蝕；另不同鋁合金做陽極處理，可做上色工作，故可兼顧美觀性質與可提高耐磨性大大的提升鋁合金實用性價值。

目前鋁陽極處理產品最廣泛被應用的是AA5052之3C產品殼件，國內鋁軋製業提供鋁軋

製半成品陽極處理廠進行陽極處理，常被抱怨鋁片表面品質不良而使最終的陽極處理品質欠佳，追究其原因，係因鑄胚晶粒粗大而引發軋延鋁片產生組織條紋，或鑄胚存在某些硬質顆粒造成鋁片表面之細線痕，這些都導致最終陽極處理產品之品質嚴重不良。此本研究的動機，即進行探討與研究熔鑄細晶不良的問題。

1.2. 探討問題

熔鑄的生產製程如圖1所示，熔鑄製程主要包含熔化爐、靜置爐、細晶機、除氣爐、過濾器與澆鑄機等六個主要作業製程。對於鑄胚鑄造組織中，其晶粒細化則最為關鍵。若晶粒細化做好，連帶的也會對其他鑄造組織甚至鋁液清淨度皆有正向幫助，因此鑄胚的晶粒細化對鋁軋製產品之品質，可說是重中之重的技術。

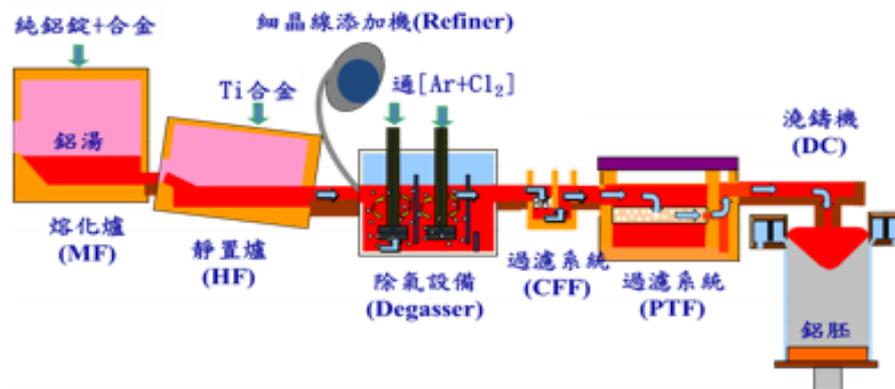
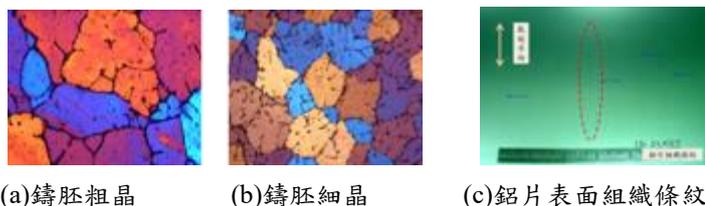


圖1 鋁熔鑄的生產製程
(本研究自行繪製)

國內鋁業之鑄胚常因細晶作業不良，致使鑄造組織常為粗晶約 $500\mu\text{m}$ 以上如圖2(a)所示，而先進國家之鑄造組織常為細晶約 $200\mu\text{m}$ ，如圖2(b)所

示。鑄胚發生粗晶將導致軋延鋁片時會發生鋁片表面組織條紋，如圖2(c)所示。尤其當鑄胚晶粒達 $400\mu\text{m}$ 以上時，組織條紋就會越明顯。



(a)鑄胚粗晶 (b)鑄胚細晶 (c)鋁片表面組織條紋

圖2 鑄胚粗晶、細晶與鋁片表面組織條紋之示意
(至鋁廠自行拍攝)

目前國內鋁廠鑄胚的組織條紋等級仍在C級 低階水平；而國外鋁廠之鑄胚，其組織條紋的等



級可達A級高階水平，這顯示國內生產陽極氧化產品的水準仍落後國外鋁廠一大截。主要癥結點，在於如何將鑄胚晶粒大小由400~500 μm 細化至小於180 μm ，故本研究著重於突破細晶技術，以解決鋁軋業界的品質與成本問題。

1.3. 探討目的

本研究的目的，在於設計一套實驗來進行各種細晶線內質探討，將比較各種細晶線加線比對晶粒細化之能力分析，將AA5052陽極合金料之熔鑄鑄胚晶粒大小由400~500 μm 細化至小於180 μm ，得以將軋延鋁片的組織條紋等級由C級水準提升至A級水準。

1.4. 研究限制

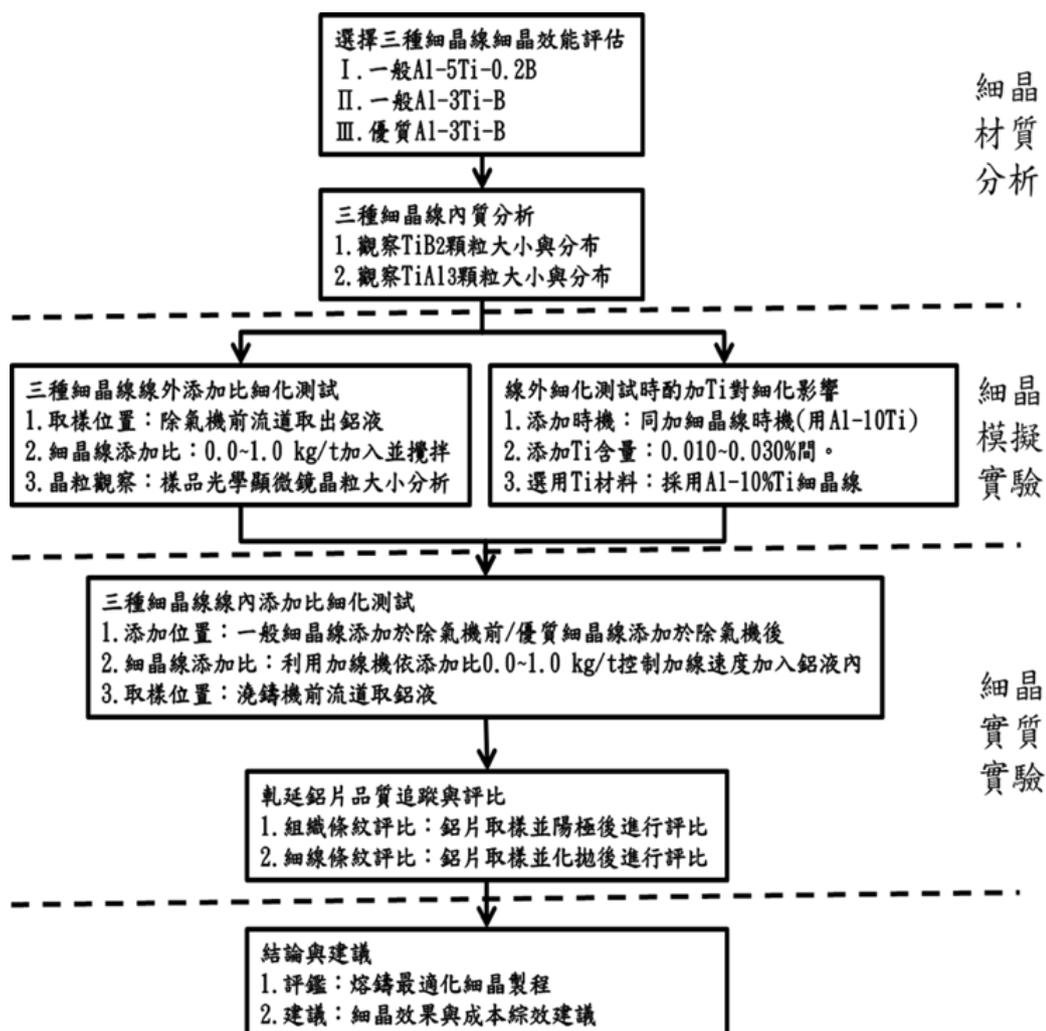
本研究需有AA5052合金鋁液，進行加入各種細晶線至鋁液中進行晶粒分析，合金鋁液取得將是極大問題。本研究經洽國內業界A公司，其同意全力配合本研究在其生產AA5052合金時，

所需的一般常用的Al-5Ti-0.2B與Al-3Ti-B細晶線皆可提供配合，而製程必要之變更也可配合。另新創優質Optifine細晶線，則洽瑞典MQP公司，該公司亦願意免費提供本研究所需優質細晶線之材料。

2. 實驗架構與文獻參考

本研究實驗架構如表1所示，包含細晶線材質分析之鑑定、細晶模擬實驗與細晶實質實驗。細晶線材質分析是鑑定TiB₂與TiAl₃顆粒分布，細晶模擬實驗則是探討不同細晶線及不同加線位置對細晶能力之影響，而細晶實質實驗則是依據模擬實驗之結果，設計「傳統熔鑄製程」與「創新熔鑄製程」進行實際鑄造晶粒比較，並追蹤至最終產品，觀察「創新熔鑄製程」對組織條紋與細晶紋缺陷問題之改善成效。

表1 細晶研究實驗架構



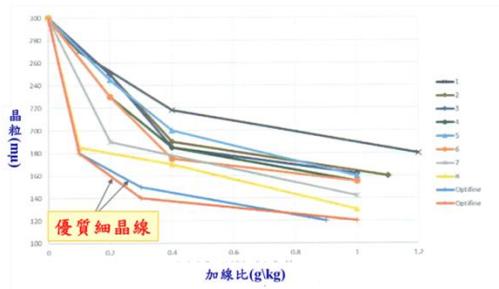
2.1. 晶粒細化原理

鋁合金的晶粒細化原理，概略歸納出三大理論，包含細晶核粒子理論、晶格能理論與包晶理論等。茲進一步介紹其原理與機構如下：

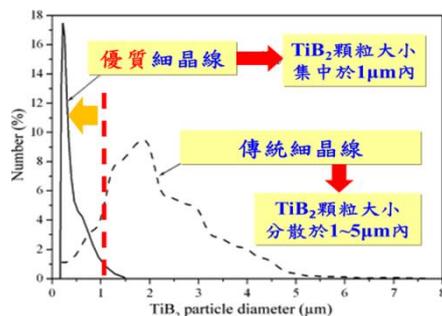
2.1.1. 細晶核粒子理論

根據Rein Vainik與John Courtenay等人(2021)於近年開發出新創優質Al-3Ti-B細晶線(又名optifine refiner)，其研究optifine優質細晶線的細化能力可優於傳統一般Al-3Ti-B細晶線，如圖3(a)

所示，新創優質Al-3Ti-B細晶線的特色乃在於在低的加線比(或稱添加比)下，很快在0.1~0.2 g/kg加線比即達到180μm的細小晶粒尺寸，而一般Al-3Ti-B細晶線須在0.4~1.0 g/kg高添加比才免強達到180μm細小晶粒。根據疏達(2018)對細晶線細晶核之研究，優質細晶線細晶核TiB₂顆粒大小，具有約有95%集中於1μm內，而傳統一般細晶線細晶核TiB₂顆粒大小則約95%集中於5μm內，如圖3(b)所示，傳統細晶線細晶核顆粒大小較粗而分散於0~5μm較寬廣範圍，而優質細晶線細晶核較細小且集中於0~1μm較細且較窄的範圍內。



(a) 優質細晶線細化能力趨勢



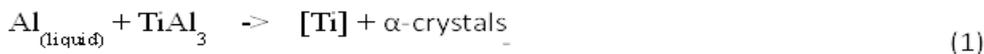
(b) 優質細晶線細化能力趨勢

圖3 新創優質Al-3Ti-B細晶線細化能力趨勢

(取自 Rein Vanik, Lennart Backerud and John Courtenay (2006))

2.1.2. 包晶理論(Peritectic theory)

根據Crossley與 Mondolfo二人(1950)提出的包晶理論，鋁液中成核是藉由Al-Ti合金發生包晶反應，如式(1)：



加入Al-Ti錠或細晶線中TiAl₃在鋁液中，依據任俊與陶欽貴等人(2007)的研究，Al-Ti平衡相圖富鋁端之包晶成核形成過程如圖5所示。由圖5可

知，當TiAl₃溶解時，導致周圍鋁液中形成富Ti，當Ti達到一定濃度和溫度時，包晶反應開始在其固態鋁(α-Al)表面成核，包晶反應後而形成樹枝狀晶。此樹枝狀晶在鋁液對流衝擊下，被分割成各個小晶核，最終結晶而形成晶粒。



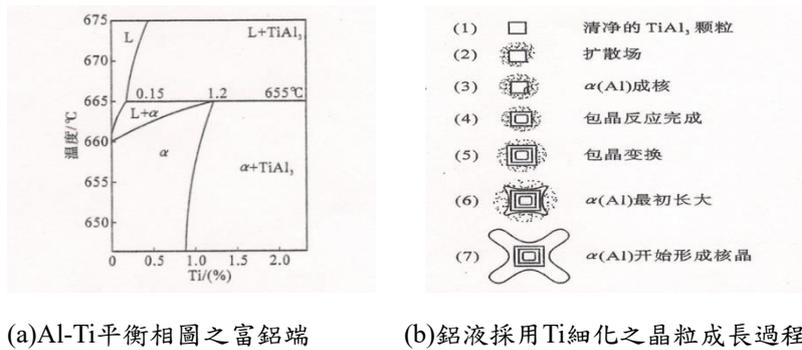


圖4 Al-Ti平衡相圖富鋁端之包晶成核形成過程
(取自任俊、陶欽貴、馬穎(2007), Al-Ti-B合金晶粒細化劑及細化機理的發展與現狀)

2.1.3. 細晶線B/Ti比對細化影響

Al-Ti-B細晶線主要常用的計有三種類型，即Al-5Ti-0.2B、Al-5Ti-B與Al-3Ti-B，根據詹金生(2020)對傳統此三種類型的細晶線的B/Ti比與細晶線內部顆粒(含TiB₂、TiAl₃)分布，其比較如圖5(a)可知，Al-3Ti-B的B/Ti比為0.33，是三種細晶線中最大值，而其顆粒以TiB₂細顆粒為主，條塊

狀之TiAl₃為輔。另根據石漢正與蘇俊仁等(2005)等人對Al-Ti-B三種類型細晶線的研究，B/Ti比與晶粒數&晶粒大小的關聯圖如圖5(b)可知，B/Ti比越高則顆粒數與體積分率越大，因此具有較好的細化能力，Al-3Ti-B的B/Ti比0.33為最大，故具有更好的細化能力，也因此Al-3Ti-B細晶線成為業界之首選。

細晶線種類	B/Ti 比	細晶核分布說明	細晶核分布圖
1. Al-5Ti-0.2B	0.04 (=0.2/5)	-塊狀TiAl ₃ 為主 -少量細TiB ₂ 為輔	
2. Al-5Ti-B	0.20 (=1/5)	-塊狀TiAl ₃ 與 TiB ₂ 兩者相當	
3. Al-3Ti-B	0.33 (=1/3)	-細TiB ₂ 為主 -少量長塊狀的 TiAl ₃ 為輔	

(a) 不同Al-Ti-B細晶線B/Ti比的細晶核分布差異

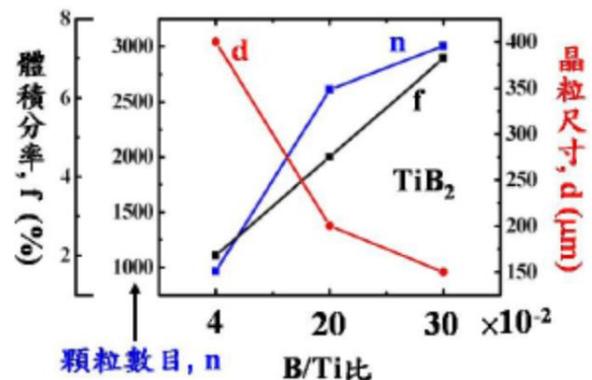


圖5 B/Ti比對細晶線內質與晶粒大小關係
(詹金生, 2020), 5052A鋁胚鑄造組織精進改善, A公司品管圈活動成果報告書)

2.2. TiB₂顆粒團聚理論

當細晶線加入在鋁液當中，因此會有TiB₂的細晶核，若鋁液因提昇清淨度的需求，通常會利用除氣機通入Ar(氬氣)與Cl₂(氯氣)進行鋁液移除氬氣與雜質。根據 T Gudmundsson 與 G Saevarsdottir 等人(1997)及 Rein Vanik 與 Lennart Backerud(2006)等人之研究，氯氣會與鋁液中Ca、Na等雜質作用而形成氯化物(chlorides)如CaCl₂、

NaCl等，這些氯化物則會與TiB₂細晶核藉由虹吸的表面張力作用而結合，這就是TiB₂細晶核發生團聚(agglomeration)。



3. 實驗結果與討論

3.1. 細晶線材質鑑定結果

三種細晶線材質規格歸納如下：

- (a) 一般Al-5Ti-0.2B細晶線：TiB₂顆粒少，其小顆粒0~2μm佔比88.78%。
- (b) 一般 Al-3Ti-B 細晶線：TiB₂ 顆粒多，其小顆粒 0~2μm 佔比 82.21%。
- (c) 優質 Al-3Ti-B 細晶線：TiB₂ 顆粒多，其小顆粒 0~2μm 佔比 96.54%。

細晶線以TiB₂顆粒為主要之細晶核，另文獻所提小顆粒0~2μm佔比越大越集中者，有利其細化效果，因此上述三種細晶線以優質Al-3Ti-B細晶線最具細化效果。

3.2. 細晶模擬實驗-不同細晶線對晶粒細化能力評估結果

模擬實驗分別在AA1070純鋁與AA5052合金對三種細晶線各加線比之細化能力分析，其實驗結果如下：

- (a) 一般Al-5Ti-0.2B細晶線：

不論在AA1070純鋁與AA5052合金，很難快速細晶效果且在高加線比晶粒仍無法小於180μm。

- (b) 一般 Al-3Ti-B 細晶線：

不論在AA1070純鋁與AA5052合金，尚能快速細晶效果但須在高加線比晶粒勉強小於180μm。

- (c) 優質Al-3Ti-B細晶線：

不論在AA1070純鋁與AA5052合金，具有快速細晶效果並在低加線比晶粒即可小於180μm。

因此，模擬實驗結果，對三種細晶線相同成分下之各加線比晶粒細化能力順序為：

優質Al-3Ti-B細晶線 > 一般Al-3Ti-B細晶線 > 一般Al-5Ti-0.2B細晶線

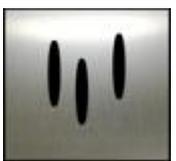
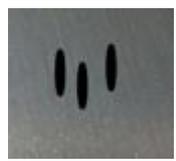
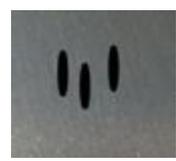
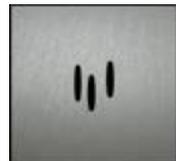
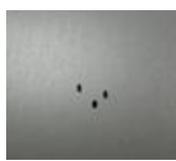
3.3. 細晶模擬實驗-不同加線位置對晶粒細化能力評估結果

本次實驗採用優質 Al-3Ti-B 細晶線且在相同 0.15kg/t 加線比下，進行加線比位置入口端與出口端對晶粒之影響。其結果加線比位置出口端113μm較入口端121μm為細小。

3.4. 細晶實質實驗

由模擬實驗之結果，將得到之優化參數，實質進行「傳統熔鑄製程」與「創新熔鑄製程」之晶粒與軋延品質比較，如表2所示：

表 2 傳統熔鑄製程及創新熔鑄製程對晶粒與軋延品質結果一覽表

熔鑄製程別	傳統熔鑄製程		創新熔鑄製程		
加線位置	除氣機入口端		除氣機出口端		
細晶線別	一般 1-5Ti-0.2B	一般 Al-3Ti-B	一般 Al-5Ti-0.2B	一般 Al-3Ti-B	優質 Al-3Ti-B
晶粒大小 (μm)	653	259	198	171	87
軋延條紋					
條紋型態	細長條紋	細短條紋	細短條紋	細緻條紋	不易見條紋



評等	C (差)	B (尚可)	B (尚可)	A. (佳)	A (佳)
----	-------	--------	--------	--------	-------

結果重點歸納：

(1) 鑄造晶粒方面：

創新熔鑄製程使用優質細晶線得到晶粒大小為 $87\mu\text{m}$ ，明顯優於使用一般細晶線晶粒大小 $171\mu\text{m}$ 。此證明優質細晶線在減半用量下，亦即可在更低的製造成本下，獲得更適合軋延之細小晶粒。

(2) 軋延品質方面：

優化熔鑄製程使用優質細晶線可使組織條紋與細線紋由傳統熔鑄製程的C級提升至A級，可媲美國際先進水準，進而減少工廠進口成本，達到更有效的成本控制。

4. 結論

(1) 本研究之「創新熔鑄製程」對AA5052陽極料而言，要改善組織條紋必須由熔鑄鑄造晶粒進行改善，而影響熔鑄細晶之重要因子如下：

- (a) 細晶線 TiB_2 顆粒小於 $2\mu\text{m}$ 佔比要大於95%為佳，優質細晶線符合此條件。
- (b) 細晶能力以Al-3Ti-B細晶線優於Al-5Ti-0.2B細晶線，主要與細晶線B/Ti比有關，B/Ti高者其細晶線內質的 TiB_2 細晶核較多有利細晶。

(2) 「創新熔鑄製程」產品延伸應用：

本研究原以AA5052 3C陽極料為研究之標的，但本技術可加以推廣應用如下：

(a) 產品「水平展開」應用：

除了AA5052 3C陽極料外，對所有其他所有陽極料，如：AA1070燈罩料與化妝盒、AA5005帷幕牆料等，皆可應用。

(b) 產品「垂直展開」應用：

除了上述陽極料外，舉凡對晶粒與防止 TiB_2 團聚之產品都可應用，因此如AA6061板料-防止粗晶造成表面橘皮粗造現象、AA5182罐用料-避免 TiB_2 團聚造成瀉縣紋等、皆有相當可觀成效。

(3) 綜合綜效：

以本研究之成果，若以中型鋁製造業年產量

20萬噸而言：

- (a) 細晶線用量減半，優質Al-3Ti-B細晶線單價雖然較一般Al-3Ti-B細晶線高，但優質Al-3Ti-B細晶線較一般Al-3Ti-B細晶線具有減半用量之能力，因此不會造成成本面的上升。減半用量亦可減少倉儲空間與減少加線機的負荷等，因此值得鋁製造業廣泛使用
- (b) 取得鋁片表面組織條紋缺陷問題改善，以此技術實現軋延鋼材國內製造，取代或減少軋延鋼材進口費用，以及因軋延條紋造成產品之降級、轉單、客訴或別退等之綜效，將達以億計算之年效益。

5. 參考文獻

1. 石漢正、蘇俊仁與詹金生(2005)。細晶劑品牌與其添加模式對細晶效果之影響。S公司研究報告。
2. 任俊、陶欽貴、馬頌 (2007)。Al-Ti-B合金晶粒細化劑及細化機理的發展與現狀。p.69-73。
3. 林繼正、詹金生、林旭文、陳翊閔與董宗晉 (2021)。鋁熔鑄製程細晶能力提升技術研究。中國鑛冶工程學會論文報告。
4. 庾忠義、石漢正與詹金生(2009)。高表面品質1000細晶能力提升技術研究。中國鑛冶工程學會，p.51-64。
5. 疏達(2018)。鋁-鈦-硼晶粒細化劑的細化效率及其影響因素。中國大陸福州市鋁鎂合金熔鑄技術交流會文集。
6. 詹金生(西元2020)。5052A鋁胚鑄造組織精進改善。A公司品管圈活動成果報告書，p.37。
7. Elli Tindall, Samuel R. Wagstaff, and Kathleen Bennet (2020). Impact of transition-metal elements on grain refining performance. *Light Metals*.1000-1006.
8. Rein Vanik, Lennart Backerud and John Courtenay (2006), A method for assessment of boride agglomeration in grain refinement of aluminum, *Light metals*, p. 1-3.



9. Rein Vainik, John Courtenay, and Frode Lien (2021). Grain refinement efficiency. *Light Metals*, 829-836.
10. T Gudmundsson, G Saevarsdottir, T I Sigfusson and D G McCartney, (1997). Chlorination of TiB₂ grain refined aluminum melts. *Light metals*, p.851-855.

