



SUMMARY REPORT

鑄造表面旋壓強化技術 總結報告

編輯Editors:

黎偉華先生 Mr Waiwah LAI
楊浩坤博士 Dr Haokun YANG
盧匡行先生 Mr Honghang LO
王陳劼先生 Mr Chenjie WANG

Published by

香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council
HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

Copyright © 2025

香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council

版權所有 翻印必究 All Rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form, whether in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.



Casting surface spinning
strengthening technology
summary report





目录

- 02 前言
- 04 铸造铝合金介绍
- 13 铸造铝合金常用强化方法
- 19 搅拌摩擦表面强化工艺
- 24 搅拌摩擦焊设备及夹具设计
- 30 搅拌摩擦焊强化性能

- 02 INTRODUCTION
- 04 CASTING ALUMINUM ALLOY INTRODUCTION
- 13 CAST ALUMINUM ALLOY COMMONLY USED STRENGTHENING METHODS
- 19 FRICTION STIR SURFACE STRENGTHENING PROCESS
- 24 FRICTION STIR WELDING EQUIPMENT AND FIXTURE DESIGN
- 30 FRICTION STIR WELDING ENHANCED PROPERTIES

前言 Introduction

編輯Editors:

黎偉華先生 Mr Waiwah LAI
楊浩坤博士 Dr Haokun YANG
盧匡行先生 Mr Honghang LO
王陳劼先生 Mr Chenjie WANG

Published by

香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council
HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong



Copyright © 2025

香港生產力促進局
The Hong Kong Productivity Council

版權所有 翻印必究 All Rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form, whether in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

致謝 Acknowledgement

感謝香港汽車零部件工業協會與香港鑄造業總會，力勁機械國際有限公司，河北泰利振特科技有限公司與廣東省科學院中烏焊接研究所的支持。

Thank you for the support from the Hong Kong Auto Parts Industry Association, Hong Kong Foundry Association, Kenzumi Precision Ltd, L.K. Machinery International Limited, Hebei Intelligent Welding Co. Ltd, as well as China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences.

該技術總結報告乃創新科技署撥款資助的創新科技基金項目中的其中一項成果。在此總結報告上的資料，或項目成員表達的任何意見、結論建議及展現的成果，並不代表香港特別行政區政府或創新科技署的觀點。

This technology summary is a publication under the ITF project which is funded by the Innovation and Technology Commission. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this handbook (or by members of this project team) do not reflect the views of the Government of Hong Kong Special Administrative Region or the Innovation and Technology Commission.

1. 鑄造鋁合金介紹

鋁合金鑄造技術介紹

鑄造鋁合金作為一種有色金屬材料，因其高強度和耐腐蝕性能而被廣泛應用於各個領域。隨著經濟發展，對鑄造鋁合金的需求不斷增加，其性能指標要求也在提高。特別是在汽車工業的發展中，對鑄造鋁合金的生產工藝和技術提出了新的要求。根據不同應用，鑄造鋁合金的性能特點也有所不同。例如，耐熱性鋁合金主要強調其耐熱特性，耐腐蝕性鋁合金則注重其耐腐蝕性能，高強度鋁合金則利用其強韌性。

鑄造鋁合金分類

(1) 鋁矽合金

鋁矽合金具有良好的鑄造性能和耐磨性，熱膨脹係數小，是最廣泛的鑄造鋁合金，矽含量為4%~13%。鎂含量為0.2%~0.6%的矽鋁合金常用於結構件，如殼體、筒體、箱體和框架。有時加入銅和鎂以提升力學性能和耐熱性，廣泛用於製造活塞和其他零件。

(2) 鋁銅合金

鋁銅合金中，Cu含量為4.5%~5.3%的合金強化效果最佳，適量添加Mn和Ti可顯著提高室溫和高溫強度及鑄造性能，主要用於製作動靜態載荷大、形狀不複雜的砂型鑄件。

(3) 鋁鎂合金

鋁鎂合金是密度最低（2.55g/cm³）、強度最高（約355MPa）的鑄造鋁合金，含Mg 12%，強化效果最佳。該合金在大氣和海水中耐蝕性良好，室溫下綜合力學性能和可加工性優異，適用於雷達基座、飛機發動機殼體、螺旋槳、起落架等零件以及裝飾材料。

(4) 鋁鋅合金

鋁鋅合金常添加矽、鎂元素以提高性能，俗稱“鋅矽鋁明”。在鑄造條件下，合金具有淬火作用，即“自淬火”，無需熱處理即可使用。熱處理後，鑄件強度高，尺寸穩定，常用於製作模型、模板和設備支架。

鑄造鋁合金牌號與分類

本章節內容主要參考中華人民共和國鑄造鋁合金國家標準GB/T 1173-2013。鑄造鋁合金代號由表示“鑄鋁”的拼音字母“ZL”以及後面的三個阿拉伯數字組成。其中，第一位數字表示合金的系列，1、2、3、4分別表示鋁矽、鋁銅、鋁鎂、鋁鋅系列合金，ZL後第二、三位數字表示合金的順序號。優質合金在其代號後附加字母“A”。

典型鑄造鋁合金成分

下表為典型鑄造鋁合金牌號、代號與成分。

合金種類	合金牌號	合金代號	主要元素（質量分數）/%							Al
			Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	
Al-Si合金	ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45					餘量
	ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5		0.25~0.45			0.08~0.20		餘量
	ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0							餘量
	ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5		0.17~0.35		0.2~0.5			餘量
	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6					餘量
	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.555					餘量
	ZAlSi9Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5		0.3~0.5	0.10~0.25		餘量
	ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5						餘量

Al-Si 合金											
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0		0.3~0.9					餘量
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3					Ni 0.8~1.5		餘量
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	4.0~6.0	5.0~8.0	0.2~0.5							餘量
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6		0.10~0.35	0.10~0.35				餘量
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5		0.45~0.75		0.10~0.20			Be 0~0.07		餘量
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2		0.4~0.65	1.2~1.8				Sb 0.1~0.25		餘量
ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5		0.35~0.55		0.10~0.30			Be 0.15~0.40		餘量
ZAlSi7Cu2Mg	ZL118	6.0~8.0	1.3~1.8	0.2~0.5		0.1~0.3	0.10~0.25				餘量
Al-Cu 合金											
ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3			0.6~1.0	0.15~0.35				餘量
ZAlCu5MnA	ZL201A		4.8~5.3			0.6~1.0	0.15~0.35				餘量
ZAlCu10	ZL202		9.0~11.0								餘量
ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0								餘量
ZAlCu5MnCdA	ZL204A		4.6~5.3			0.6~0.9	0.15~0.35		Cd 0.15~0.25		餘量
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A		4.6~5.3			0.3~0.5	0.15~0.35		Cd 0.15~0.25 V 0.05~0.3 Zr 0.15~0.25 B 0.005~0.6		餘量
ZAlR5Cu3Si2	ZL207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.15~0.25		0.9~1.2			Zr 0.15~0.2 Ni 0.2~0.3 RE 4.4~5.0		餘量

Al-Mg 合金											
ZAlMg10	ZL301					9.5~11.0					餘量
ZAlMg5Si	ZL303	0.8~1.3				4.5~5.5		0.1~0.4			餘量
ZAlMg8Zn1	ZL305					7.5~9.0	1.0~1.5		0.10~0.20	Be 0.03~0.10	餘量
Al-Zn 合金											
ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0				0.1~0.3	9.0~13.0				餘量
ZAlZn6Mg	ZL402					0.5~0.65	5.0~6.5	0.2~0.5	0.15~0.25	Cr 0.4~0.6	餘量

表1.2 典型鑄造鋁合金化學成分表

不同牌號鑄造鋁合金性能特點及用途

鋁矽系合金

1. ZL101

鋁鎂矽三元合金，具有良好的鑄造性能和高流動性，線收縮小，氣密性高，但有集中縮孔和氣孔的傾向。其耐蝕性高，可通過熱處理強化，淬火後具備自然時效能力，強度和塑性較高，焊接容易，切削加工性中等，耐熱性不高。適用於鑄造複雜形狀、承受中等載荷和要求高氣密性、耐蝕性的零件，工作溫度應 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ，如水泵、傳動裝置殼體、水冷發動機汽缸體等。

2. ZL102

典型的鋁矽二元合金，鑄造性能與ZL101相近，但在厚大斷面處易產生集中縮孔，吸氣傾向大。耐蝕性高，不能通過熱處理強化，力學性能一般，但隨鑄件壁厚增加，強度降低較小。焊接性能良好，但切削性差，耐熱性不高。適用於鑄造複雜形狀、承受較低載荷的薄壁零件及要求高耐蝕性和氣密性的零件，工作溫度應 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ 。

3. ZL104

鋁矽鎂錳四元合金，鑄造性能良好，流動性高，氣密性好，但吸氣傾向大，易形成針孔。可通過熱處理強化，室溫下力學性能良好，但高溫性能較差。耐蝕性好（但比ZL102低），切削加工性和焊接性能一般。適用於鑄造複雜形狀、薄壁、耐腐蝕性及承受較高靜載荷和衝擊載荷的大型零件，工作溫度不宜 $\geq 200^{\circ}\text{C}$ 。

鋁銅系合金

1. ZL201

ZL201是添加少量錳和鈦的鋁銅合金，鑄造性能較差，流動性低，易產生熱裂和縮孔，線收縮大，氣密性低，但吸氣傾向小。可通過熱處理強化，處理後具有高強度和良好塑性，耐熱性優異，是鑄造鋁合金中強度和耐熱性最好的一種。焊接和切削加工性能良好，但耐蝕性差。適用於工作溫度175°C~300°C或室溫下承受高載荷、形狀不複雜的零件，也可用於低溫(-70°C)下承受高載荷的零件，是用途較廣的一種鑄造鋁合金。

2. ZL203

ZL203是典型的鋁銅合金，鑄造性能差，流動性低，易產生裂紋和縮松，線收縮大，氣密性一般，但吸氣傾向小。淬火處理後具有較高的強度和良好塑性，鑄件經淬火後有自然時效傾向。無需變質處理，焊接和切削加工性能良好，耐蝕性差（特別是人工時效狀態下的鑄件），耐熱性不高。適用於鑄造形狀簡單、承受中等靜載荷或衝擊載荷、工作溫度 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ 並要求良好切削加工性的零件，如曲軸箱、支架、飛輪蓋等。

3. ZL204A

ZL204A是加入少量鎳和鈦的鋁合金。鎳加速人工時效，鈦細化晶粒並降低有害雜質含量。通過適當的熱處理工藝，可獲得抗拉強度達440MPa的高強度耐熱鑄造鋁合金。該合金屬固溶體型，結晶間隔寬，鑄造工藝較差，主要用於砂型鑄造，不適宜金屬型鑄造。適用於鑄造高強度和耐熱性的鑄件，可替代一般鋁合金鍛件，廣泛應用於航空和航天工業。

鋁稀土金屬系合金

ZL207A

ZL207A含有較高的稀土金屬Re，以及銅、矽、錳、鎳、鎂、鋯等元素。其耐熱性好，可在高溫（工作溫度達400°C）下長期使用。鑄造性能優良，結晶溫度範圍小（約30°C），充型能力好，針孔傾向小，氣密性高，不易產生熱裂和疏鬆。缺點是室溫下力學性能較低，成分複雜。適用於鑄造形狀複雜、受力不大且需在高溫下長期工作的零件。

鋁鎂系合金

1. ZL301

ZL301是典型的鋁鎂合金，具有極高的耐蝕性，特別是在海水和大氣中。鑄造性能差，流動性一般，易產生氣孔和顯微疏鬆，氣密性低，收縮率和吸氣傾向大。可通過熱處理強化，淬火狀態下具有高強度和良好塑性、韌性，但長期使用會導致塑性下降。耐熱性不高。切削加工性良好，表面拋光後能長期保持光澤。焊接性能較差，熔煉易氧化，工藝複雜，廢品率高。適用於高靜載荷和衝擊載荷、暴露在腐蝕性介質中的簡單形狀零件，工作溫度 $\leq 200^{\circ}\text{C}$ ，如雷達底座、水上飛機和船舶配件等。

2. ZL303

ZL303是鋁鎂矽多元合金，加入1%矽和少量錳。耐蝕性高，接近ZL301。鑄造性能一般，流動性中等，有氧化、吸氣和縮孔傾向（比ZL301稍好），收縮率大，氣密性一般，熱裂傾向低於ZL301。鑄態下具有一定力學性能，但不能熱處理強化。切削性和拋光性與ZL301相同，焊接性能明顯改善，生產工藝簡單，但易氧化和吸氣。適用於與腐蝕介質接觸、工作溫度 $\leq 220^{\circ}\text{C}$ 且承受中等載荷的零件，如海輪配件、殼體、氣冷發動機汽缸頭等。

鋁鋅系合金

1. ZL401

ZL401是鋁鋅矽鎂四元合金，俗稱鋅矽鋁明。鑄造性能好，流動性高，縮孔和熱裂傾向小，線收縮小，但吸氣傾向大。需進行變質處理。在鑄態下具有自然時效能力，可獲得高強度，無需熱處理。耐熱性低，耐蝕性一般，密度大，限制了應用。焊接和切削加工性能良好，價格低廉。適用於鑄造大型、複雜、承受高靜載荷且不便熱處理的零件，工作溫度不超過200°C，如汽車零件、醫療器械、儀器零件等。

2. ZL402

ZL402是鋁鋅鎂多元合金，加入少量鉻和鈦。鑄造性能較好，流動性和氣密性好，縮松和熱裂傾向小。鑄態時效後可獲得較高力學性能，低溫（-70°C）下性能優良，接近鋁矽合金。切削加工性好，焊接性能一般。鑄件人工時效後尺寸穩定。密度大，限制了應用。適用於承受高靜載荷和衝擊載荷且不便熱處理的零件，也可用於與腐蝕介質接觸和要求尺寸穩定的零件，如高旋轉葉輪、飛行起落架、空氣壓縮機活塞等。

2. 鑄造鋁合金常用強化方法

合金化強化

合金化是目前獲得高強度鑄造鋁合金的主要途徑之一。通過在鋁合金中添加合金元素，合金化可以改變其組織與性能。

銅 (Cu)

銅是鋁合金中的重要合金元素，與鋁形成 θ 相，起到固溶強化和彌散強化的作用。在 548°C 時，銅在鋁中的最大溶解度為5.65%，而當溫度降至 302°C 時，其溶解度降至0.45%。此外，時效析出的 CuAl_2 強化相具有顯著的時效強化效果。鋁合金中的銅含量通常在2.5%到5%之間，最佳的固溶強化和彌散強化效果出現在銅含量為4.5%到5.5%時。然而，需要注意的是，隨著銅含量的增加，合金的耐蝕性能和鑄造性能會降低。

矽 (Si)

銅是鋁合金中的重要合金元素，與鋁形成 θ 相，起到固溶強化和彌散強化的作用。在 548°C 時，銅在鋁中的最大溶解度為5.65%，而當溫度降至 302°C 時，其溶解度降至0.45%。此外，時效析出的 CuAl_2 強化相具有顯著的時效強化效果。鋁合金中的銅含量通常在2.5%到5%之間，最佳的固溶強化和彌散強化效果出現在銅含量為4.5%到5.5%時。然而，需要注意的是，隨著銅含量的增加，合金的耐蝕性能和鑄造性能會降低。

鎂 (Mg)

鎂是Al-Si合金中的主要強化元素，通過熱處理，Mg與Si形成 Mg_2Si 沉澱相，從而顯著提高合金性能。隨著Mg含量的增加，合金強度提升，但延性下降。對於356合金，每增加0.01%的Mg，合金強度增加6.89 MPa，而對於357合金，強度只增加一半。最新研究表明，Mg能夠抑制Fe相的有害作用。當鐵含量較低時，Mg與Si仍形成 Mg_2Si 相；當Fe含量增加時，可形成Al-Fe-Si-Mg化合物，從而減少Fe的危害。此外，加入1%以下的錳 (Mn) 可以補充強化作用，並降低熱裂傾向。

錳 (Mn)

錳是鋁合金中的重要元素，可以單獨加入形成Al-Mn二元合金，更多情況下是與其他合金元素共同加入。因此大多數鋁合金中均含有錳。錳能夠阻止鋁合金的再結晶過程，提高再結晶溫度，並顯著細化再結晶晶粒。在Al-Cu系合金中，錳的含量通常在0.1%到1%之間。錳的強化作用包括兩部分：一部分錳溶入 α 固溶體，起固溶強化作用；另一部分錳在合金中形成 $Al_{12}CuMn_2$ 相，熱處理後大部分以二次 $Al_{12}CuMn_2$ 相質點彌散分佈在基體中，起到彌散強化作用，少量 $Al_{12}CuMn_2$ 相呈不連續網狀分佈在 α 晶界。因此，錳含量不能過多，否則會增加合金的脆性，降低衝擊韌性。錳還可以溶解鐵，形成 $(Fe, Mn)Al_6$ ，減少鐵的有害作用。

鋅 (Zn)

單獨加入鋁中的鋅對合金強度的提升有限，並且會導致應力腐蝕開裂傾向。然而，當鋅和鎂同時加入鋁中形成強化相Mg-Zn₂時，可以顯著提高合金的強度。通過調整鋅和鎂的比例，可以提高抗拉強度和應力腐蝕開裂抗力。鋅在鋁合金中還可以提高銅的溶解度和溶解速度，增加合金的塑性。當鋅含量約為1%時，全部固溶在基體中，不形成可見的相組織。鋅還會增加鋁合金的自然時效傾向，同時降低合金的鑄造性能和耐蝕性能。

其他元素

用於鋁合金強化的其他合金元素包括鎘 (Cd)、釷 (Sc)、鈦 (Ti)、硼 (B)、鋯 (Zr) 和釩 (V) 等。研究表明，以適當的方式加入適量的這些元素，通常可以對合金進行有效的強化。

熱處理與加工硬化

鋁合金材料的研發主要圍繞提升材料的強度、塑性、韌性、耐蝕性以及疲勞性能等綜合性能展開，而這些性能的實現依賴於合金的微觀和宏觀組織結構。因此，需要深入研究和掌握變形鋁合金在各種狀態下的組織特性及其對性能的影響，並探索有效的組織調控技術，其中熱處理是最主要的手段。

鋁合金熱處理的分類如下：

1.固溶處理：將合金加熱到高溫單相區並保持恆溫，使過剩相充分溶解到固溶體中，然後快速冷卻（水冷），以得到過飽和固溶體的熱處理工藝。

2.不完全人工時效：採用較低的時效溫度或較短的保溫時間，以獲得優良的綜合力學性能，包括較高的強度、良好的塑性和韌性，但耐腐蝕性能可能較低。

3.完全人工時效：採用較高的時效溫度和較長的保溫時間，以獲得最大的硬度和最高的抗拉強度，但伸長率較低。

4.穩定化處理：通過熱處理使工件在長期服役條件下的形狀和尺寸變化保持在規定範圍內。

5.自然時效：將鑄件置於露天場地半年以上，使工件內部應力自然釋放，從而消除或減少殘餘應力。

6.退火：將組織偏離平衡狀態的金屬或合金加熱到適當溫度，保持一定時間，然後緩慢冷卻，以達到接近平衡狀態組織的熱處理工藝。

熱處理狀態代號：

F 自由加工狀態（適用於成型過程中對於加工硬化和熱處理條件無特殊要求的產品，該狀態產品的力學性能不作規定）

O 退火狀態（適用於經完全退火獲得最低強度的加工產品）

H 加工硬化狀態（適用於通過加工硬化提高強度的產品，產品在加工硬化後可經過使強度有所降低的附加熱處理，H代號後面必須跟有兩位或三位阿拉伯數字）

W 固溶處理狀態（一種不穩定狀態，僅適用於經固溶熱處理後，室溫下自然時效的合金，該狀態代號僅表示產品處於自然時效階段）

T 熱處理狀態（適用於熱處理後，經過加工硬化達到穩定狀態的產品）

T1 人工時效

T2 退火

T4 固溶處理+自然時效

T5 固溶處理+不完全人工時效

T6 固溶處理+完全人工時效

T7 固溶處理+穩定化處理

T8 固溶處理後冷加工再人工時效的狀態

T9 固溶處理後人工時效，再經冷加工的狀態

加工硬化

通過塑性變形（如軋製、擠壓、鍛造、拉伸等）來提升合金的強度的方法被稱為加工硬化。加工硬化的核心在於塑性變形過程中位錯密度的增加。據統計，金屬在強烈變形後，位錯密度可以從每平方釐米10⁶根增加到超過10¹²根。由於位錯密度越大，在後續變形過程中位錯相互交割和阻礙的機會也越多，因此變形抗力增大，合金得到強化。

金屬材料加工硬化的原理在於變形過程中產生的位錯不均勻分佈。初始階段，位錯成群糾纏，形成位錯纏結。隨著變形量的增加和變形溫度的升高，位錯纏結逐漸轉變為胞狀亞結構組織。此時，變形晶粒由許多稱為“胞”的小單元組成，高密度位錯纏結集中在胞周圍形成包壁，而胞內部位錯密度較低。這些胞狀結構阻礙位錯運動，導致不能運動的位錯數量大幅增加，需要更大的力才能使位錯克服障礙繼續運動。變形越大，亞結構組織越細小，抵抗繼續變形的能力越強，加工硬化效果越顯著，強度也越高。由於亞結構的產生，這一過程也被稱為亞結構強化。

加工硬化的程度因變形率、變形溫度及合金本身的性質而異。同一種合金材料在相同溫度下進行冷變形時，變形率越大，強度越高，但塑性會隨著變形率的增加而降低。合金在不同變形條件下，位錯分佈也有所不同。當變形溫度較低（如冷軋）時，位錯活動性較差，變形後位錯大多呈現紊亂無規則的分佈，形成位錯纏結，此時合金強化效果好，但塑性顯著降低。當變形溫度較高時，位錯活動性較大，並發生交滑移，位錯可局部集聚、糾結、形成位錯團，出現亞結構及其強化。此時，強化效果不如冷變形，但塑性損失較少。

加工硬化或亞結構強化在常溫下是非常有效的強化方法，適用於工業純鋁、固溶體型合金和熱處理不可強化的多相鋁合金。然而，在高溫下，由於回復和再結晶的作用，對強度的貢獻顯著減小。

某些鋁合金在冷變形時能形成較好的織構，從而在特定方向上得到強化，這種現象被稱為織構強化。

攪拌摩擦工藝的主要加工參數包括刀具移動速度、刀具旋轉速度、目標深度和主軸傾斜角度等。其中，刀具移動速度和刀具旋轉速度參數尤其能影響材料的微結構。若提升刀具的旋轉速度與移動速度的比率，或進行多次加工，可對基材產生更多的熱量，但是過度攪拌亦可導致形成孔隙大而晶粒粗糙的微觀結構，從而產出不理想的成品。各種攪拌摩擦工藝的參數整理見表1。

加工變量		刀具設計變量		強化變量	材料特性	其他變量
刀具	旋轉速度	肩部	輪廓	顆粒尺寸	機械性能	路徑密度
	移動速度		直徑	顆粒體積比		
	傾斜角度	銷	輪廓直	強化方式	熱性能	相鄰路徑方向
軸向力	徑長度		加工次數			
目標深度						

表2.2 攪拌摩擦工藝的變量

3. 攪拌摩擦工藝對鋁合金材料的發展進程和性能

攪拌摩擦工藝

攪拌摩擦工藝 (Friction Stir Processing, FSP) 是一種基於攪拌摩擦焊接 (Friction Stir Welding, FSW) 改進而成的金屬材料強化工藝。1991年, 英國焊接研究所開發了攪拌摩擦焊接工藝, 通過攪拌摩擦產生熱能的方式加工重疊的金屬板材, 以焊接材料製造出緻密化焊點, 初期應用於航空、航太和汽車工業上。後來於1999年, Mishra等人開發了攪拌摩擦工藝, 通過攪拌摩擦進行熱-機械運動的方式加工單塊的鋁合金板材, 以高應變率的大量塑性變形方式強化材料。隨後, 攪拌摩擦工藝在鋁合金及其他金屬的研究中持續開展, 目前應用於汽車、航空和海洋工業。

攪拌摩擦工藝是一種綠色、高效、節能、經濟的金屬材料強化技術。由於不需要投入氣體, 亦不會產出煙霧或二次污染物, 加工時間短, 能快速促進材料內顆粒之間的反應, 故被視為是一種新穎的材料處理強化方法。相比之下, 傳統的金屬材料強化方法包括粉末冶金、液態冶金和機械合金化工藝等存在各自的缺陷。例如, 粉末冶金會出現可影響拉伸性能的微觀孔隙; 液態冶金會出現可導致機械性能弱化的鑄造缺陷和顆粒聚集等問題; 高溫液態冶金會析出金屬間化合物和形成無關的相; 機械合金化可出現不均勻的微觀結構, 導致材料延展性變差, 污染物亦有機會進入材料中。與傳統的複合材料製造技術相比, 攪拌摩擦工藝所製作出的複合材料具有較少或無介面反應故具有較顯著的優勢。

攪拌摩擦加工工藝的核心工具為攪拌摩擦刀具（Tool）。刀具通常為圓柱形針狀的工具，帶有截面面積相對較大的肩部（Shoulder）。肩部以下是截面面積相對小的螺紋圓柱銷（Peen/Probe）。攪拌摩擦刀具會安裝到設備上，設備需要令刀具高速旋轉並同時完成三軸移動等動作。

在過程中，首先把金屬板狀基材放置刀具下方，刀具高速旋轉並插入金屬板中。由於刀具與板材表面的摩擦作用會產生熱能，使基材溫度上升，塑化的金屬使螺紋圓柱銷能一步降下至材料基體內部，並持續攪動軟化的材料。刀具的肩部會降下至接觸基體表面，進一步摩擦工件，從而產生熱量。圓柱銷的旋轉運動會使材料經歷高應變率的大量塑性變形（Severe Plastic Deformation, SPD），其中包含了如摩擦、擠壓和鍛造等金屬加工工序的綜合作用。攪拌摩擦工藝的熱加工特性可有效地使材料產生顆粒增強相，高密度的位元錯和放熱反應促進合金元素擴散到鋁基材中，達致均勻微觀結構。當刀具插入基材，持續轉動並停留一定時間後，刀具會沿著工件表面進行水平移動，此時塑化的基體材料會從前進側推進到後退側，旋轉和橫向移動的結合作用有助將微量元素顆粒與工件混合，從而形成增強相。進行攪拌摩擦處理後，材料的宏觀表面顯示出均勻的外觀，攪拌路徑表面光滑沒有瑕疵微觀結構會變得細緻。

攪拌摩擦工藝能讓金屬材料微觀結構改性，原位對材料進行超塑性處理，可剪切和擴散顆粒，合成出更細小的增強相，並在熱力學上達到更穩定的狀態。攪拌摩擦工藝可使材料晶粒細化、微觀結構均勻化、均質化、表面改性，並可提升金屬材料的機械性能，包括材料的拉伸強度、屈服強度、硬度、韌性、抗疲勞性、延展性、成型性、耐腐蝕性、和耐磨性能，亦可修復焊點和焊縫、製造出表面複合材料等，能在一次加工中對材料造成多種效果。

攪拌摩擦工藝加工區域的材料截面可以細分為三個不同的微觀區域，分別為熱-機械影響區（Thermo-Mechanically Affected Zone）、熱影響區（Heat Affected Zone）和熔核區（Nugget Zone）。熔核區是經歷過最為劇烈和最高溫的大量塑性變形區域，位於材料的最核心位置，該位置材料會完全再結晶和晶粒細化，通常具有最均勻和細小的晶粒結構，機械性能如強度和硬度會顯著地提升。熱-機械影響區位置靠近熔核區，材料受到熱和機械變形的共同影響下，會在低於熔點的高溫中經歷顯著的塑性變形，通常會出現晶粒細化和再結晶現象。熱影響區是加工路徑最外圍的區域，指材料僅受到熱影響而沒有經歷顯著的機械變形，溫度升高至出現微觀結構變化，但不會產生塑性變形的區域。

由於攪拌摩擦過程中產生的高溫 and 塑性變形促進動態再結晶，能消除鋁合金材料中的偏析和鑄造缺陷，將異質化微結構轉變為同質化微結構，從而提高了材料的整體性能和穩定性。當材料的內部缺陷和微裂紋減少，晶粒尺寸縮小，材料的拉伸強度可得到提升，材料的耐腐蝕性能亦可提高，抗疲勞裂紋擴展能力也能得到顯著提升。攪拌摩擦技術同時能夠提高鋁合金材料的延展性和塑性變形能力，方便材料進行後續加工或成形。根據前人的研究，攪拌摩擦工藝處理過的材料硬度能增加60%，抗拉強度提升12%。採用攪拌摩擦工藝處理後，材料熔核區的硬度增加了約50%。並且通過攪拌摩擦工藝處理後的Al2024鋁合金的極限抗拉強度增加20%，衝擊強度增加150%。

對鋁合金進行攪拌摩擦加工時，亦可以選擇同步在鋁合金表面置入硬質顆粒物，以增強材料性能或形成表面合金層，以提高材料的耐磨性和表面硬度。有關的強化研究包括使用陶瓷材料、金屬增強顆粒，及廢料灰渣等等。

可用於強化攪拌摩擦工藝的陶瓷材料包括碳化物（B₄C、SiC、TiC、納米碳管）、氧化物（TiO₂、Al₂O₃、K₂O）、硼化物（TiB₂、ZrB₂）等，均可用於增強鋁合金基材性能。有相關研究顯示，在加工時加入碳化物粉末，可以提高材料硬度。根據I. Sudhakar和V. Madhu的研究，添加碳化硼粉末到AA7075鋁合金後，可以提升材料耐磨性能。根據R. Srinivasu和A. Sambasiva Rao的研究，添加碳化硼粉末到鑄態A356鋁合金後，材料出現更高分散硬化，硬度顯著增加。亦有研究指出氧化鉀具有陰極抑制特性，有助於製造出化學穩定性更佳，抗點蝕性能更強的鋁基材料。MAX相材料亦為陶瓷材料，同時具有金屬和陶瓷特性，公式為M_n+1AX_n，當中M是過渡金屬，A是IIIA和IVA族金屬，X是碳（C）或氮（N）。MAX相材料有良好的導電性，高強度和加工能力，亦有良好的熱衝擊抗性和氧化抗性。加入MAX相材料的鋁合金的抗拉強度有約20%的增幅，微觀材料硬度亦可增加約33%。

可用於強化攪拌摩擦工藝的金屬增強顆粒例子包括高熵合金、形狀記憶合金、金屬間化合物和MAX相材料。加入金屬材料會使基材出現相變效果並達致更高強度，部分金屬材料亦有更高熔點。其中形狀記憶合金的例子有鎳鈦（NiTi）、鎳鈦銅（NiTiCu）、銅鋁鎳（CuAlNi）、銅鋅鋁（Cu-Zn-Al）和鐵錳矽（Fe-Mn-Si）等，加入形狀記憶合金可使鋁合金具有低密度、高強度，以及具有形狀記憶效應。此外，使用工業和農業廢料，如稻殼、煤灰、紅泥、椰殼、蛋殼、竹葉和甘蔗的灰渣，亦可增強攪拌摩擦工藝的效果。由於此類廢料質量輕，亦富含如碳化矽（SiC）、氧化鋁（Al₂O₃）等成分，故亦可取代高硬度陶瓷材料以提高材料性能，同時舒緩廢料處理問題。此類回收材料可以增強基材的耐磨性、衝擊強度和顯微硬度，但延伸率、屈服強度和抗拉強度則會下降。研究發現稻殼的灰燼能使攪拌摩擦工藝加工後的鋁合金硬度提高約11%。

攪拌摩擦工藝的其他進一步研究還包括對攪拌摩擦材料的熱循環作出改變，例如多次攪拌摩擦工藝，攪拌摩擦加工後進行快速冷卻，和低溫環境攪拌摩擦工藝等。此外，由於攪拌摩擦工藝的參數和加工後材料性能的關係尚未被完全理解，目前仍然未能總結出攪拌摩擦工藝的理論模型。因此需要對攪拌摩擦工藝的成品持續進行更深入的研究，包括疲勞行為、彈道抗性、熱力學、擴散動力學、微觀結構及機械性能之間的關係、刀具磨損對材料的潛在影響、熱輸入和流動應力之間的關係等。攪拌摩擦工藝還可以擴展進一步的實際應用，例如工業應用、生物醫學應用、同時可尋求降低刀具成本和加工成本、以及利用循環再用廢料作為增強材料之用。此外亦可以基於攪拌摩擦工藝的方法再研究出新穎技術，如無針攪拌摩擦加工等。

4. 攪拌摩擦焊設備及夾具設計

攪拌摩擦焊設備設計

技術背景

鋁是地球上蘊藏量最多的金屬元素，製成鋁合金後，具有密度小、比強度高、耐腐蝕佳、熱穩定性好、機械加工性能好、回收再生性能穩定、回收效率高、成本低等優點。目前，鋁合金的先進製造工藝主要有：激光焊接、液壓成形、擠壓鑄造和高真空壓鑄工藝等。與其他製造工藝相比，壓鑄成形工藝生產效率高、尺寸精度高、力學性能優良、材料利用率高、批量化生產經濟效益較佳。

壓鑄鋁合金是鋁合金中最常用的一種，其用量約占鑄造鋁合金產品總用量的70%。然而，壓鑄鋁合金的力學性能略有不足，典型的壓鑄Al-Si鋁合金，ZL101鋁合金，其抗拉強度僅有150 MPa左右。

技術特點

為了提高壓鑄鋁合金的力學性能，現有技術常用摩擦攪拌處理技術對基材進行處理強化。摩擦攪拌處理技術需要通過一個帶有針頭和肩部的非消耗

性旋轉工具，對基材進行處理。在摩擦攪拌處理過程中，工具高速旋轉並在軸向力的作用下插入工件，直到肩部與工件表面接觸，產生摩擦。然後，工具相對於工件沿著加工方向移動，此時肩部與工件之間的摩擦產生大量熱量。在摩擦熱的作用下，加工區域的基材溫度升高，使得材料軟化，並通過針頭的旋轉和移動引起強烈的塑性變形。最後，材料在塑性流動下重新成形。

在攪拌摩擦強化過程中，鑄造鋁合金樣品會受到攪拌頭的扭矩影響發生震動和移位。這種震動和移位會嚴重影響加工的精度，因此需要夾具對樣品進行夾持。然而，現有夾具一方面存在夾持不穩定的問題，另一方面存在被夾持樣品取出和安裝不便的問題，影響攪拌摩擦強化處理的效率和效果。

多向固定氣動夾持機構設計

在攪拌摩擦強化過程中，鑄造鋁合金樣品會受到攪拌頭的扭矩影響而發生震動和移位。這種震動和移位會嚴重影響加工的精准度，因此需要夾具對樣品進行夾持。然而，現有夾具的夾持穩定性不佳，在加工過程中樣品仍然會發生小幅度位移。

為了實現樣品的多向穩定夾持，本項目設計了一種多向固定的氣動夾持機構。該機構包括一個底座，在底座上設有樣品夾持區，並在夾持區周圍佈置了至少兩個從不同位置夾持樣品的第一氣動夾持機構。

每個第一氣動夾持機構包含一個氣動伸縮部件。氣動伸縮部件的氣缸部分固定在底座上，伸縮杆部分連接第一夾持接板，該接板朝向樣品夾持區的一側設有第一夾持接頭。通過這種多向夾持設計，可以確保樣品在夾持過程中保持穩定。

此外，該夾持機構主要採用氣動夾具，通過閥門或開關即可便捷地實現夾持和解除夾持的過程，操作簡便高效。

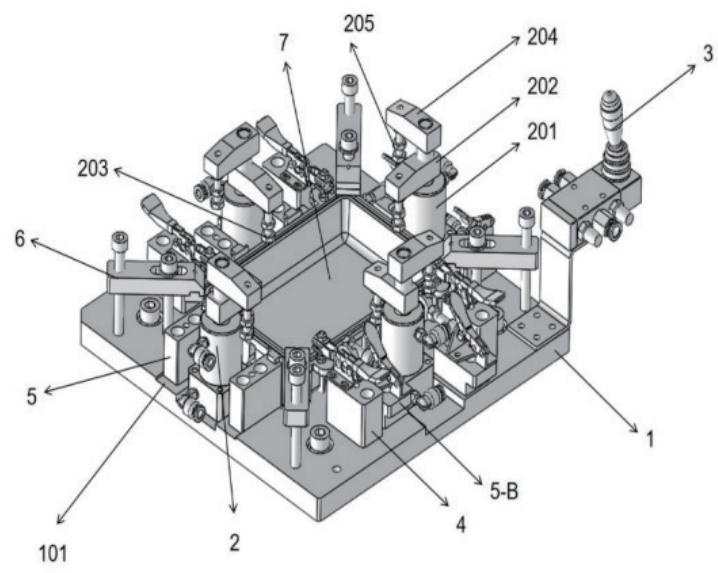


圖4.1 多向氣動夾持機構示意圖-1

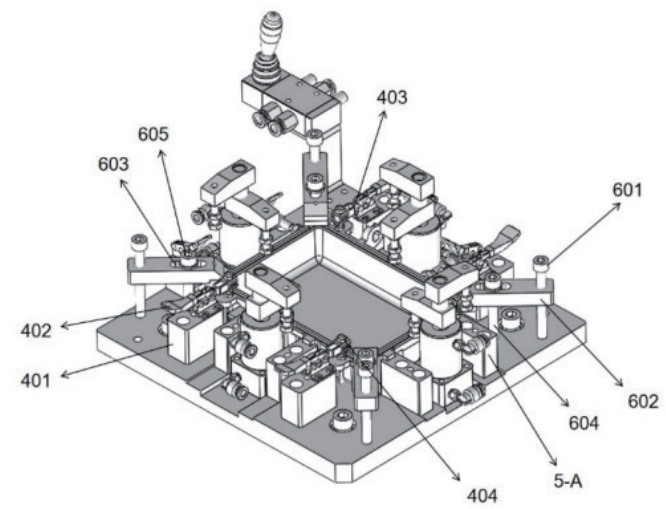


圖4.2 多向氣動夾持機構示意圖-2

結構設計

氣動夾持機構的主要結構包括一個底座，該底座上設有被夾持樣品的夾持區，並圍繞夾持區設置至少兩個從不同位置夾持樣品的第一氣動夾持機構。第一氣動夾持機構由氣動伸縮部件構成，其氣缸部分固定於底座，伸縮杆連接第一夾持接板，接板朝向夾持區的一側設有夾持接頭。第一夾持接板通過轉動機構與伸縮杆連接，並可安裝至少一個第二夾持接板，第二夾持接板同樣設有夾持接頭，且兩者底面高低搭配。

第一氣動伸縮部件的高壓氣入口端通過獨立或共同的高壓氣啟閉閥門與外部高壓氣源連通，出口端則與外接環境或收納機構連通。底座上還設有至少兩個第二鎖定夾持機構，這些機構包括可拆卸的鎖定基座，基座上設有控制連接杆鎖定狀態的按壓開關，連接杆上設有與樣品固定孔匹配的鎖定孔。

此外，底座上圍繞夾持區設有至少兩個滑動槽，滑動固定塊與滑動槽連接，並可拆卸固定。底座上還設有至少兩個輔助夾持部件，包括與底座轉動的螺桿及其上的第三夾持接板，以及用於抵壓樣品的限位杆，第三夾持接板靠近被夾持樣品夾持區的一端設有長腰孔。限位杆頂端寬于長腰孔，並固定有穿過長腰孔的螺柱。螺柱在長腰孔背對限位杆的一側螺接有旋鈕。

設計特點

基本結構

該氣動夾持機構設計如圖4.1和圖4.2所示，裝置包括底座1，底座上設有被夾持樣品的夾持區，並圍繞該區域佈置至少兩個第一氣動夾持機構2。第一氣動夾持機構2包括第一氣動伸縮部件201，其氣缸部分固定在底座上，伸縮杆部分連接第一夾持接板202，第一夾持接板202朝向夾持區的一側設有第一夾持接頭203。

操作過程

1. 樣品放置與夾持：首先關閉第一氣動伸縮部件201，使伸縮杆回彈，樣品7可放入夾持區。然後啟動第一氣動伸縮部件201，使伸縮杆下壓，通過第一夾持接板202帶動第一夾持接頭203下壓樣品7。由於設有至少兩個從不同位置的第一氣動夾持機構2，可對樣品施加穩定的壓力，確保其被穩固夾持。

2. 樣品取出：加工完成後，關閉第一氣動伸縮部件201，使伸縮杆回彈，取出加工完成的樣品7，放入新樣品並重複上述過程。

結構改進

1. 轉動機構：第一夾持接板202與第一氣動伸縮部件201的伸縮杆通過轉動機構連接，轉動機構可為軸承等單軸轉動機構或螺接的定向轉動結構。該設置使第一夾持接板202具有可調節自由度，便於調整第一夾持接板202和第一夾持接頭203的位置，提高下壓的穩定性，並避免安裝和取出樣品時遮擋安裝空間。

2.多層夾持：第一夾持接板202上安裝有至少一個第二夾持接板203，第二夾持接板203與第一夾持接板202之間採用固定或轉動方式連接，第二夾持接頭204的底面與第一夾持接頭203的底面呈高低搭配設置。該設置通過轉動第一夾持接板202，使第二夾持接頭204匹配不同高度的樣品，提高適配性。

3.氣動控制：各第一氣動伸縮部件201的高壓氣入口端通過獨立或統一的高壓氣啟閉閥門與外部高壓氣源連通，高壓氣出口端與外接環境或收納機構連通。統一控制高壓氣啟閉閥門3啟動時，高壓氣通過氣管軟管供至各第一氣動伸縮部件201，伸縮杆下壓；關閉時，高壓氣排出至外部環境或收納機構。

輔助夾持

1.第二鎖定夾持機構：底座1上圍繞夾持區設有至少兩個第二鎖定夾持機構4，第二鎖定夾持機構4包括與底座1可拆卸固定連接的鎖定基座401，鎖定基座401上設有按壓開關402，控制連接杆403的鎖定狀態。連接杆403靠近夾持區的一端設有鎖定頭404，鎖定頭404上開設有與樣品固定孔相匹配的鎖定孔。該設置通過鎖定螺釘螺接鎖定頭404和樣品7，並調節連接杆403，使其與鎖定基座401可解除固定，提升夾持穩定性。

2.滑動固定塊：底座1上設有至少兩個朝向夾持區的滑動槽101，滑動固定塊5與滑動槽101滑動連接，並與底座1或滑動槽101可拆卸固定連接。該設置根據樣品7的結構使用相匹配的滑動固定塊5提供多方向的抵壓作用力，進一步提升夾持穩定性。滑動固定塊5-A為方塊結構，滑動至抵壓樣品7的位置並固定；滑動固定塊5-B為杆式固定機構，通過按壓開關調節抵壓杆的位置，使抵壓頭抵壓樣品7側面。

3.輔助夾持部件：底座1上設有至少兩個輔助夾持部件6，輔助夾持部件6包括與底座1轉動的螺桿601，螺桿601上螺接有第三夾持接板602。將第三夾持接板602轉動至樣品7上方後限制其轉動，轉動螺桿601上下調節位置，使第三夾持接板602下壓樣品7實現輔助夾持。反向轉動螺桿601上移第三夾持接板602，解除輔助夾持。

4.限位杆：輔助夾持部件6還包括用於抵壓樣品的限位杆604，第三夾持接板602靠近夾持區的一端設有長腰孔603，限位杆604頂端寬于長腰孔603，並固定有穿過長腰孔603的螺柱605，螺柱605在長腰孔603背對限位杆604的一側螺接有旋鈕606。通過旋轉旋鈕606解除與長腰孔603周圍板面的抵壓作用力，滑動調整限位杆604的位置，使其抵壓樣品7側壁，反向旋轉旋鈕606固定限位杆604，實現側向抵壓作用力。

5. 攪拌摩擦焊強化性能

原材料準備

對實驗用的材料進行熔煉準備。先將原材料加入電阻爐中，加熱至500°C，保溫1小時；隨後升溫至800°C，保溫30分鐘，使原料能完全熔化。隨爐降溫至720°C，加入10g精煉劑，用鈦合金工具攪拌2分鐘。保溫30分鐘，清除表面浮渣，澆鑄至經過250°C預熱的鐵製模具中，在空氣中冷卻後即可獲得鑄錠。

材料元素分析如下表。

元素	鐵(Fe)	矽(Si)	錳(Mn)	銅(Cu)	鎂(Mg)	鋅(Zn)	鋁(Al)
重量百分比	≤ 0.3	7.5-9.5	≤ 0.3	2.0-4.0	≤ 0.3	≤ 1.0	餘量

表5.1 原材料的元素含量

樣品強化過程

對樣品進行表面強化處理。過程期間，分別使用了軸肩尺寸為14和11.8 mm的攪拌頭，以及三種組合的攪拌頭運轉參數，分別為：攪拌頭轉速1200rpm及水準運行速度每分鐘200mm，轉速1500rpm及運行速度每分鐘200mm，以及轉速1500rpm及運行速度每分鐘300mm。此外，亦測試了三種垂直下壓量，分別為0.3mm，0.5mm及0.7mm。各樣品的表面強化加工的具體參數如下表。

樣品編號	軸肩(mm)	轉速(rpm)	運行速度(mm/min)	下壓量(mm)
1	14	1200	200	0.3
2	14	1500	200	0.3
3	14	1500	300	0.3
4	11.8	1200	200	0.3
5	11.8	1500	200	0.3
6	11.8	1500	300	0.3
7	14	1200	200	0.5
8	14	1500	200	0.5
9	14	1500	300	0.5
10	11.8	1200	200	0.5
11	11.8	1500	200	0.5
12	11.8	1500	300	0.5
13	14	1200	200	0.7
14	14	1500	200	0.7
15	14	1500	300	0.7

16	11.8	1200	200	0.7
17	11.8	1500	200	0.5
18	11.8	1500	300	0.7

表5.2 強化工藝參數

經過表面強化處理後的樣品外觀如下圖。



圖5.2 樣品加工後的外觀

粗糙度

將表面強化後的樣品進行測試，以得出樣品的表面粗糙度。具體結果如下表。

樣品編號	轉速(rpm)	運行速度 (mm/min)	下壓量(mm)	粗糙度Ra (μm)
1	1200	200	0.3	0.85
2	1500	200	0.3	1.02
3	1500	300	0.3	1.1
4	1200	200	0.3	1.95
5	1500	200	0.3	3.16
6	1500	300	0.3	2.2
7	1200	200	0.5	2.28
8	1500	200	0.5	2.53
9	1500	300	0.5	4.27
10	1200	200	0.5	3.72
11	1500	200	0.5	2.16
12	1500	300	0.5	2.45
13	1200	200	0.7	5.43

14	1500	200	0.7	8.16
15	1500	300	0.7	3.14
16	1200	200	0.7	5.15
17	1500	200	0.5	5.47
18	1500	300	0.7	5.86

表5.3 表面粗糙度

表面粗糙度測試過程如下圖。測試結果表明，經過表明強化，採用較低轉速和下壓量，可以有效改善表面粗糙度。

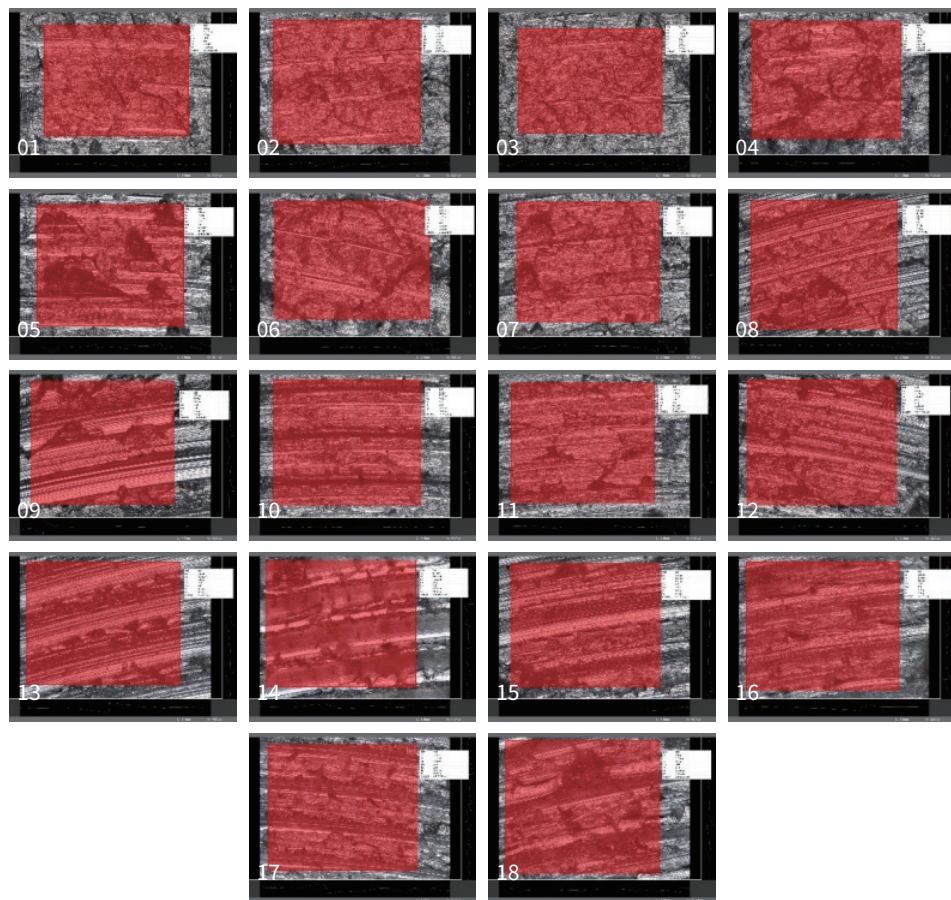


圖5.3 表面粗糙度測量結果

表面硬度

將表面強化後的樣品進行表面硬度測試，以評估樣品的硬度。測試條件為載荷HV 10kG，溫度是24.3°C，濕度是65%。樣品的表面硬度如下表。測試結果表明，經過強化處理後，樣品的表明硬度有顯著提升。

樣品編號	轉速(rpm)	運行速度 (mm/min)	下壓量(mm)	硬度(HV)
1	1200	200	0.3	160.9
2	1500	200	0.3	185
3	1500	300	0.3	146.9
4	1200	200	0.3	202.9
5	1500	200	0.3	129.8
6	1500	300	0.3	148.6
7	1200	200	0.5	167
8	1500	200	0.5	155.9
9	1500	300	0.5	165.9
10	1200	200	0.5	112.1
11	1500	200	0.5	147.7
12	1500	300	0.5	159.5
13	1200	200	0.7	149.9
14	1500	200	0.7	156.2
15	1500	300	0.7	144.2

16	1200	200	0.7	147.5
17	1500	200	0.5	124.1
18	1500	300	0.7	118.2

表5.4 表面硬度

拉伸強度

對使用14mm軸肩強化過的樣品進行拉伸測試，以評估樣品的拉伸強度。對比未加工過的原材料的抗拉強度為228 MPa。由此可見，經過表明強化後的樣品，其拉伸強度有顯著提升。

樣品編號	轉速(rpm)	運行速度(mm/min)	下壓量(mm)	拉伸強度(MPa)
1	1200	200	0.3	236.31
2	1500	200	0.3	274.49
3	1500	300	0.3	252.31
7	1200	200	0.5	260.73
8	1500	200	0.5	265.29
9	1500	300	0.5	250.74
13	1200	200	0.7	245.50
14	1500	200	0.7	266.47
15	1500	300	0.7	252.58

表5.5 拉伸強度

抗疲勞性能

對轉速1200rpm和1500rpm表面強化的樣品進行疲勞測試，以評估樣品的抗疲勞性能。採用50MPa，80MPa，110MPa，和140MPa 應力幅度進行測試，循環次數為100000次，樣品均未有發生斷裂，顯示表面強化後的樣品具有良好的抗疲勞性能力。



圖5.6 疲勞測試所使用的樣品

耐腐蝕性能

對純鋁材料樣品進行鹽霧測試，以評估樣品的耐腐蝕性能。在35°C的氯化鈉溶液環境中進行腐蝕（溶液濃度為每升50克氯化鈉，Ph值為6.8），樣品擺放角度為20°。在進行24小時的測試後，發現純鋁在經過鹽霧腐蝕後，表面有輕微腐蝕痕跡。對照用的純鋁材料腐蝕實驗結果如下圖。

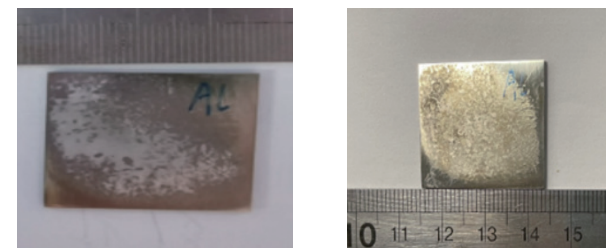


圖5.7.1 純鋁對照組（左）實驗前（右）24小時實驗後

對表面強化後的鑄造鋁合金樣品進行鹽霧測試，以評估樣品的耐腐蝕性能。在35°C的氯化鈉溶液環境中進行腐蝕（溶液濃度為每升50克氯化鈉，Ph值為6.8），樣品擺放角度為20°。在進行24小時的測試後，經表面強化後的鑄造鋁合金的實驗結果如下圖。實驗結果表明，經過表面強化後的鑄造鋁合金材料具有一定的抗鹽霧腐蝕能力，並與純鋁材的抗腐蝕能力相若。

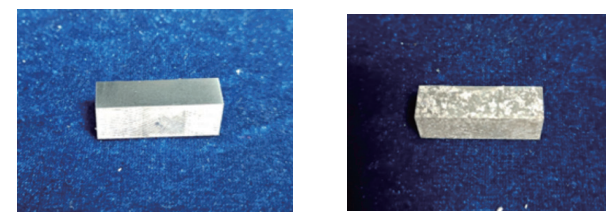


圖5.7.2 經過表面強化後的鋁合金（左）實驗前（右）實驗後

硬度測試

對使用14mm軸肩攪拌頭強化過的樣品進行硬度測試。以評估樣品表面以下的硬度。測試時溫度是23°C，製作樣品後，對樣品沿著垂直截面，在不同梯度的深度下進行硬度測試。測試結果表明，採用下述的強化工藝後，樣品的硬化效果均超過80 HV，並且硬化區域的深度不少於2mm。

樣品編號	轉速 (rpm)	運行速度 (mm/min)	下壓量 (mm)	在以下深度 (mm) 時的硬度 (HV)				
				0.05	0.55	1.05	1.55	2.05
1	1200	200	0.3	105	80.4	84.5	97.1	105
2	1500	200	0.3	110	107	92.2	85	116
3	1500	300	0.3	104	107	105	111	97.9
7	1200	200	0.5	103	112	88.8	108	89.5
8	1500	200	0.5	110	111	102	90.8	117
9	1500	300	0.5	113	110	92.2	95	111
13	1200	200	0.7	104	105	85	115	83.9
14	1500	200	0.7	104	105	95	81.5	91.5
15	1500	300	0.7	103	107	93.6	92.2	81.5

表5.8 不同梯度深度下的硬度測試值

各樣品的梯度硬度整理如下圖。



圖5.8 不同梯度深度下的硬度測試值

微觀結構檢測

對強化過後的樣品進行背向散射電子繞射技術（EBSD, Electron backscatter diffraction）觀測，以得到樣品的微觀結構。沿著樣品表面強化方向，從上方表面的硬化層向樣品內部進行晶粒尺寸表徵，結果如下圖所示。測量結果表明，表面強化工藝是通過細化晶粒的方法進行強化，且其強化深度不低於2mm。

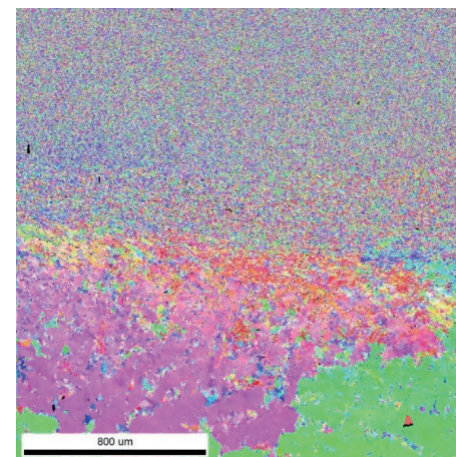


圖5.9 背向散射電子繞射（EBSD）檢測

6. 總結與展望

總結

隨著全球汽車工業對綠色，低排放的追求不斷增加，輕量化已成為汽車領域的重要研究方向。這些趨勢不僅是節能減排的重要途徑，也是新世紀汽車技術創新的前沿和熱點。汽車輕量化主要通過材質輕量化和結構輕量化來實現。考慮到成本和生產難度，鋁合金及其結構件壓鑄成為首選材料和最優工藝。

汽車結構件在車身中起到主要支撐和承載作用，常見於橫縱梁、A (B) 柱、減震塔和保險杠等部位。傳統的車身結構件通常由鋼板衝壓和拼接而成，存在重量大、工藝複雜、效率低等問題。通過使用大型輕合金薄壁鑄件，可以有效實現輕量化，並且由於結構高度集成和一體成形，減少了成型和連接環節，精簡了工藝，降低了成本。

壓力鑄造作為一種特種鑄造技術已有百年歷史，它在高速高壓下將液態或半液態金屬填入壓鑄模型腔，並使金屬液在一定壓力下快速凝固成鑄件。這種方法具有填充壓力大、填充速度高、壓射時間短的特點，使其能夠生產出形狀複雜、壁薄及深腔的金屬零件。壓鑄工藝在提高有色金屬合金鑄件的精度、表面質量及生產效率等方面顯示出顯著優勢。

目前，壓鑄工藝製造的許多結構件在汽車碰撞安全性和損壞控制方面發揮著重要作用。因此，工業界對壓鑄鋁合金結構件的強度指標提出了更高的要求。一體化和輕量化是壓鑄鋁合金結構件的主要優點，但在實現輕量化的同時保持其強度成為提升鋁合金結構件性能的關鍵。除了在碰撞時變形或碰撞吸收方面的功能要求和特定材料要求外，為了滿足能量效率要求，還存在非常高的機械性能要求。

為了應對上述挑戰，我們開發了表面旋轉壓強化技術和設備，對大型一體化鋁壓鑄件進行表面強化。所開發的表面旋轉壓制設備能夠改裝至本地製造商普遍擁有的傳統銑床，從而減少設備的資本投資。這種先進工藝將顯著提升一體化壓鑄鋁矽合金部件的表面硬度、整體強度和抗疲勞性能，同時維持被強化件的三維尺寸不變，確保鋁矽汽車結構件的強度符合現有及未來國家標準。

此外，這項技術將賦能業界製造出更高強度的大型一體化結構件，進一步保障乘客安全，並為自動駕駛時代的到來提供支持。通過這種表面強化技術，汽車製造商將能夠在不增加重量的情況下提升汽車結構件的強度和耐用性，進而推動汽車工業向更高效、更安全和更環保的方向發展。



圖6.1 表面旋壓強化設備

展望

本項目開發的旋壓強化設備與技術，能顯著提升由高流動性和穩定收縮的鋁矽合金製成的中大型一體化壓鑄結構件的強度和表面硬度。此技術所生產的大型一體化零件可取代由數百個複雜小型零組件的壓鑄、衝壓製備和組裝過程，從而顯著降低生產成本，並大幅減少汽車結構件的壁厚和重量。這項新技術可用於製作更輕量化、抗衝擊和增強安全性能的部件，對新能源汽車和自動駕駛汽車具有重要影響。

這項技術可應用於新能源汽車的關鍵結構和保護部件，例如底盤、防撞軌和電動汽車電池外殼。該強化設備可以改裝到CNC銑床上，製造業持分者能以大多數中小企都能負擔得起的成本採用本技術，在營運上亦能具有成本效益。

