

# 金屬 3D 列印與粉末開發

實習生：蔡昀佑

專案經理：李國頌

## 1. Introduction

積層製造(Additive manufacturing, 亦稱為 3D 列印)技術問世後因其優異的設計自由度、較短生產時長、較少的後處理需求而被視為製造結構零件的重要新興技術[1]。作為工業應用中使用量僅次於鋼鐵的金屬材料，鋁合金的低密度、高比強度(specific strength)等性質使其在航空工程等用途廣受歡迎[2]。其中雷射粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 製程相較於其他積層製造技術具有更高的尺寸精度，更能發揮高設計自由度的優勢，因此廣受重視[3]。然而，多數鋁合金粉末存在低雷射吸收率、高熱導率、易氧化、含大量易揮發元素和熱裂(hot cracking)傾向顯著等挑戰，導致成形不易或機械性質低落，大幅限制 LPBF 積層製造鋁合金的應用潛力[4]。

為了解決上述問題，目前主流的做法有二：其一是使用具高可鑄性(castability)的鋁矽合金，例如 AlSi7Mg、AlSi10Mg 和 AlSi12Mg 等較小凝固範圍(freezing range)之合金成分，減少金屬凝固時收縮量，進而減少裂紋產生[5]。其二是在高強度鋁合金中添加一定比例的成核劑(nucleator)，例如鈦(Sc)、鋯(Zr)等金屬元素或是 TiB<sub>2</sub>、TiC 等奈米顆粒(nano particles)促進液態鋁合金冷卻時成核，產生細等軸晶粒(equiaxed fine grains)，使得凝固末期的液體較容易回填晶界區域，進而提升成形品質[6]。儘管以上方法皆有助於提升鋁合金的可列印性(printability)，但實際上仍有諸多限制。鋁矽合金雖具有良好的可列印性，但機械性質較低，即使經過熱處理後極限抗拉強度(ultimate tensile strength, UTS)普遍低於 400MPa[7]，難以達到高性能鋁合金的水準，侷限其在機械性質需求高的應用。而添加成核劑則會面臨到成本高昂(鈦每公斤價格約新台幣十萬元)、奈米粉末添加不利於工業大規模生產[8]等缺點。

綜上所述，發展具高機械性質且具有良好可列印性的鋁合金配方為本專案的研究方向，為了更好的了解鋁合金的配方和機械性質以及可列印性的關聯，本研究彙整了近年提升高強度鋁合金可印性的相關文獻並歸納其強化機制，作為後續開發配方的參考，同時亦選出三組具發展潛力之配方，詳細分析其強化可列印性的機制和預期機械性質，作為後續實際列印測試的候選對象。另亦預期於後續結合機器學習方法和熱力學模擬軟體預測合金性質，輔助實驗進行和加速開發流程同時降低成本。

## 2. Methodology

考慮到實際生產粉末的技術限制以及熱力學模擬軟體的模擬準確性，本專案主要聚焦在鋁合金成分比例變化對列印鋁合金機械強度的影響。本研究主要蒐集具實驗數據支持的相關文獻，比較 30 組鋁合金配方，針對其合金類別、強化策略概述、成分比例 (wt%)、雷射功率 (W)、掃描速度 (mm/s)、hatching distance ( $\mu\text{m}$ )、層高 ( $\mu\text{m}$ )、相對密度 (%)、試片方向 (平行/垂直)、降伏強度 (MPa)、抗拉強度 (MPa)、伸長率 (%)、熱處理參數，以及熱處理後之降伏強度、抗拉強度與伸長率等共 16 項參數進行系統性整理與分析。另也同時彙整各配方熱處理前後之降伏強度、極限抗拉強度、拉伸測試之伸長率等資訊，建立具比較性的表格，利於後續篩選具實際實驗潛力的配方。

為了確保分析結果的參考價值，本文整理之文獻皆具合金完整的元素重量比、且提供列印參數、微結構分析、機械強度測試等資訊，並優先挑選有提供完整列印參數、熱處理參數的配方利於後續實驗進行。

## 3. Preliminary Results

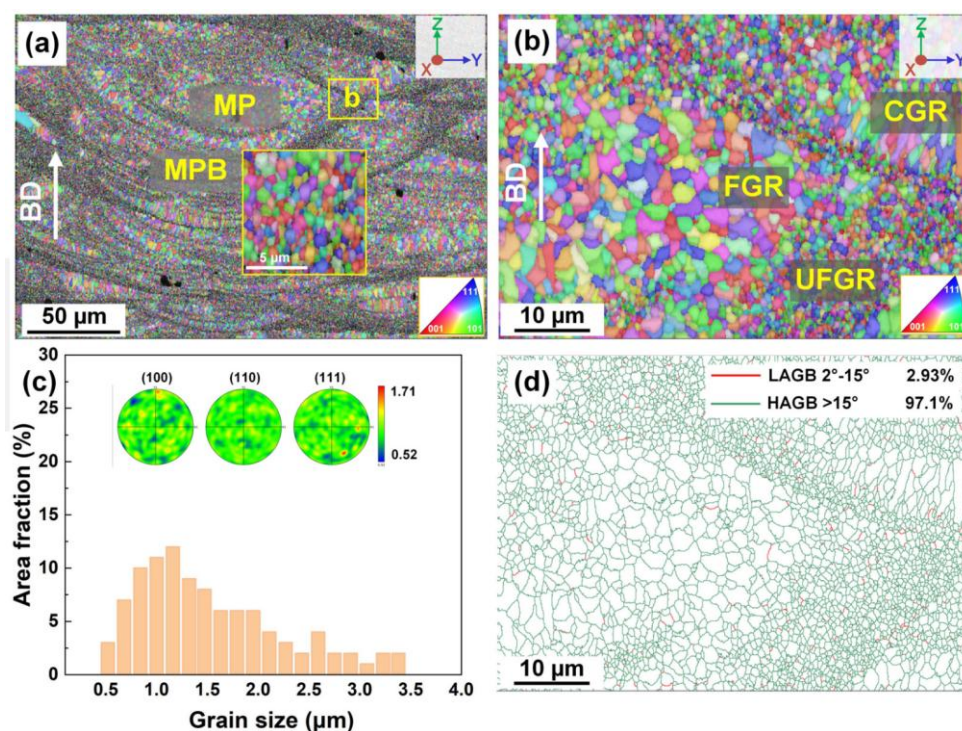
本研究將 30 組鋁合金配方進行系統化比較後分析根據其合金成分、強化策略進行歸類。由於表格欄位眾多，完整表格請見附表 A。綜合各配方的微結構觀察和拉伸試驗結果，發現 5、6 和 7 系列鋁合金添加釷、鋯的配方經過熱處理後能提供相較其他強化方式優異的機械性質。基於以上觀察，最終選擇出三種配方，其成分列表如下所示：

代號	元素成分(wt%)	Ref.
AlMgSc	Al-4.2Mg-1.1Sc-0.7Mn-0.5Zr-0.6Cu-0.1Zn-0.1Fe	[9]
AlMgSi	Al-8.0Mg-1.3Si-0.5Mn-0.5Sc-0.3Zr	[10]
AlZnMgCu	Al-6.78Zn-2.53Mg-1.94Cu-0.46Sc-0.23Zr-0.09Si-0.07Fe	[11]

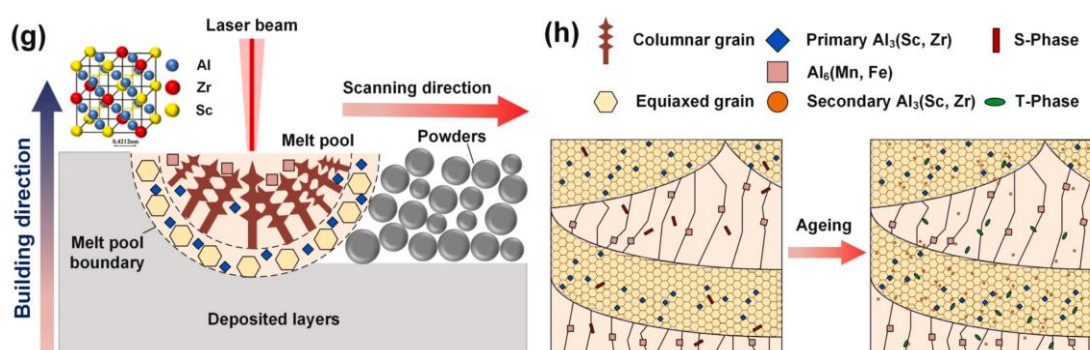
表 1、三種配方之元素成分比例

上述三種配方皆具有成核劑(釷、鋯)，並搭配熱穩定之析出元素(鎂、矽、錳、鋅、銅、鐵)，提供多重強化機制，顯著提升其可列印性和機械性質。AlMgSc 配方中， $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Zr})$ 和  $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 在熔池冷卻過程中析出提供晶粒成核點，促進等軸晶形成，且  $\text{Al}_6(\text{Mn}, \text{Fe})$ 具良好熱穩定性，使熱處理過程中降低晶粒成長可能性。而 AlMgSi 配方則是觀察到  $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 在熱處理後進一步析出，熔池中央柱狀晶界產生的  $(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}$  則有助於穩定晶界。另一方面，AlZnMgCu 配方除了  $\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{Zr}_{1-x})$ 提供的晶粒細化有助於減少熱裂產生，晶粒內和晶界形成的富含 Mg-Zn-Cu 的準晶(quasicrystal) I-phase 也可以阻礙位錯移動，經過熱處理後  $(\text{Al}, \text{Zn})_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 均勻析出更加提升機械強度[9], [10], [11]。以上述配方強化機制可得

知，調整適當成核劑比例和搭配相容之析出元素為開發高強度可列印鋁合金的關鍵策略，此策略亦為未來使用熱力學模擬軟體預測合金性質提供方向和依據。



圖一、(a)列印樣本熔池邊界處的超細晶結構(b)放大區域呈現三重模態晶粒尺寸分佈(c)對應晶粒尺寸統計與極點圖(d)晶界錯取角分佈[9]



圖二、列印過程和後續熱處理中微結構演化過程[9]

## 4. Future Works

由於金屬粉末製造之高昂成本，預計使用熱力學模擬軟體 Thermo-Calc 計算不同鋁合金配方列印過程中關鍵熱力學行為，包含但不限於列印過程中熔池高速冷卻產生之微偏析(Microsegregation)、列印過程中熱循環的析出相演化(Precipitate evolution)、理想熱處理參數、可列印參數窗口分析等。同時嘗試建構

回歸與分類型機器學習模型，並將上述透過模擬運算軟體所得資料輸入機器學習模型預測不同鋁合金配方之列印參數操作窗口和機械性質，結合熱力學模擬提供的理論依據與機器學習擅長處理之多維數據與非線性關係，提升配方預測的準確性與泛化能力。以此作為配方開發初期之篩選工具，能有效降低實驗所需次數，進一步提升開發效率以及減少開發成本。

## 5. References

- [1] T. DebRoy *et al.*, “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [2] Z. Zhu *et al.*, “Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 190, p. 104047, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104047.
- [3] D. Bayoumy, W. Kan, X. Wu, Y. Zhu, and A. Huang, “The latest development of Sc-strengthened aluminum alloys by laser powder bed fusion,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 149, pp. 1–17, June 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2022.11.028.
- [4] H. R. Kotadia, G. Gibbons, A. Das, and P. D. Howes, “A review of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties,” *Addit. Manuf.*, vol. 46, p. 102155, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102155.
- [5] N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, L. Parry, I. Ashcroft, C. Tuck, and R. Hague, “3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 106, p. 100578, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100578.
- [6] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, “3D printing of high-strength aluminium alloys,” *Nature*, vol. 549, no. 7672, pp. 365–369, Sept. 2017, doi: 10.1038/nature23894.
- [7] K. V. Yang, P. Rometsch, C. H. J. Davies, A. Huang, and X. Wu, “Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy in mechanical properties of A357 alloy produced by selective laser melting,” *Mater. Des.*, vol. 154, pp. 275–290, Sept. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.05.026.
- [8] T. Zheng, C. Ma, A. Killips, B. Li, and X. Li, “Nanoparticle-enabled additive manufacturing of high strength 6061 aluminum alloy via Laser Powder Bed Fusion,” *Manuf. Lett.*, vol. 41, pp. 753–757, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.093.

- [9] C. Zang *et al.*, “Multi-nanoprecipitate strengthened aluminium-scandium alloy for additive manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 256, p. 114256, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.114256.
- [10] R. Li, M. Wang, Z. Li, P. Cao, T. Yuan, and H. Zhu, “Developing a high-strength Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy for selective laser melting: Crack-inhibiting and multiple strengthening mechanisms,” *Acta Mater.*, vol. 193, pp. 83–98, July 2020, doi: 10.1016/j.actamat.2020.03.060.
- [11] Z. Zhu *et al.*, “Superior mechanical properties of a selective-laser-melted AlZnMgCuScZr alloy enabled by a tunable hierarchical microstructure and dual-nanoprecipitation,” *Mater. Today*, vol. 52, pp. 90–101, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mattod.2021.11.019.

## Appendix

合金類別	策略描述	雷射功率(W)	掃描速度(mm/s)	hatching distance(μm)	層高(μm)	相對密度(%)	試片方向	降伏強度(MPa)	抗拉強度(Mpa)	伸長率(%)	熱處理參數	熱處理後降伏強度(MPa)	熱處理後抗拉強度(Mpa)	熱處理後伸長率	連結
2 系	添加Zr 奈米粉末	200	83-667	90	40			464	493	4.8					<a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.032">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.032</a>
2 系	添加Mn、Ti							155.5	317.3	13.51					<a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.003">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.003</a>
2 系	添加Ti 奈米粉末	375	1200	130	30	99.5	皆有	321	365	12	495°C /1h->quench->190°C /12h	386	432	10	<a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.026">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.06.026</a>
3 系	添加Sc、Fe、Si	200	800	100	25	99.72		266	349	10.35	300°C/4h	397	430	4.89	<a href="https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111305">https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111305</a>
3 系	添加Mg、Sc、Zr	190	700	100	30	99.77	皆有	508	703	8.3	300°C/6h	621	712	4.5	<a href="https://doi.org/10.1007/s40195-021-01286-2">https://doi.org/10.1007/s40195-021-01286-2</a>
4 系	調整網徑大小	400			20-80			220	325	3					<a href="https://doi.org/10.1038/nature23894">https://doi.org/10.1038/nature23894</a>
4 系	添加Si、Mg					99.5	皆有	280	355	5.5					<a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.026">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.026</a>
4 系	添加Si、Sc、Zr	240	1000	100	30	99.4		334	540	2-8					<a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138931">https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138931</a>
4 系	添加Si		1455	110	50		皆有	270	325	4.4					<a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.009">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.009</a>
5 系	添加Sc、Zr	370	1259	140	30	99.5	皆有	420		17.8	300~350°C/4h	624-650		4.7~11	<a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.114256">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.114256</a>
5 系	添加Zr	200	200-800	135-150	30	99.2	皆有	220-221	287-292	25.6-29.0	400°C /8h	350-353	382-386	17.1-18.6	<a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.053">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.053</a>
5 系	添加Zr	200	200-800	135-150	30	99.2	皆有	282-290	329-332	24.0-25.2	400°C /8h	349-365	383-389	19.5-23.9	<a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.053">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.053</a>
5 系	添加Sc、Zr	400	800			99.2		166	222	10	325 °C/4h	289	373	32.5	<a href="https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107668">https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107668</a>
5 系	添加Sc、Zr	400	600	60	30	99	垂直				325 °C/4h	463.2	502.6	11.7	<a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139593">https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139593</a>
5 系	添加Sc、Zr	200	200	130	30		垂直	149.2	266.9	17.3	290°C/24h	308	390.3	11.2	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.06.023">https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.06.023</a>
5 系	添加Sc、Zr	300	800	100	50			323	394	10.5					<a href="https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.060">https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.060</a>
5 系	添加Sc、Mn、Zr	325	1200	80	30			336	362	11.2	350°C /8h	520	524	3.1	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154773">https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154773</a>
6 系	添加ZrH <sub>2</sub> 奈米粉末	400			20-80						480°C /2h->quench->120°C /18h				<a href="https://doi.org/10.1038/nature23894">https://doi.org/10.1038/nature23894</a>
6 系	添加Sc	200-350	1000-2500	85	40	99.98	垂直	300	350	31					<a href="https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.050">https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.050</a>
6 系	添加Si、Mn、Sc、Zr	200-450	300-1200	100	50			440	497	11	300°C/8h	510	550	8	<a href="https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.03.060">https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.03.060</a>
6 系	添加TiB <sub>2</sub> 、TiC 奈米粉末	350	1600	50	30	99.5		233	310	10.4	530°C /1.5h->quench->180°C /16h	328	350	3.1	<a href="https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.093">https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.093</a>
7 系	改變雷射 pattern	200	200	140	50	96.7	平行		160	0.3	450°C / 2h>400 °C / 2 h	97	159	3.5	<a href="https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101270">https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101270</a>
7 系	添加Sc、Zr	192	160	100	30	99.5		445	514	17.7	465°C /20 min->quench->123°C /24h	647	670	11.6	<a href="https://doi.org/10.1016/j.matmod.2021.11.019">https://doi.org/10.1016/j.matmod.2021.11.019</a>
7 系	添加ZrH <sub>2</sub> 奈米粉末	400			20-80						480°C /2h->quench->120°C /18h	373	417	5.4	<a href="https://doi.org/10.1038/nature23894">https://doi.org/10.1038/nature23894</a>
7 系	添加Sc、Zr	350	900	130	30	99.6	垂直	283.5	386	18.4	480°C /1h->quench->120°C /24h	418.3	435.7	11.1	<a href="https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.08.025">https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.08.025</a>
Scalmalloy	添加Sc、Zr	500~700	1200-1700				平行	490							<a href="https://doi.org/10.3390/ma12071007">https://doi.org/10.3390/ma12071007</a>
Scalmalloy	添加Sc、Zr	195			20		皆有				325°C/4h	520	530	14	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.03.047">https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.03.047</a>
Scalmalloy	添加Sc、Zr	200		90-225	30	99	皆有	277	400						<a href="https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.057">https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.057</a>
	高流動性合金+添加Zr	225-325	800-1200	60	40	99.98	垂直	497		2.2					<a href="https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104074">https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104074</a>
	添加Sc、Zr	250	600	100	50	99.2		410	430	3					<a href="https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111397">https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111397</a>