



積層製造參數對麻時效鋼模具組件機械性能之影響 Effects of Additive Manufacturing Parameters on Mechanical Properties of Mold Components with Maraging Steels

莊水旺^{1*}、唐振哲¹、游大衛²

¹ 國立臺灣海洋大學

² 馬亞科技

*E-mail: shjuang@mail.ntou.edu.tw

摘要

模具是壓鑄成形至關重要的工具，模具的好壞決定生產零件的品質，同時也影響製造成本 and 生產週期。常用的壓鑄模具材料是 H13 熱作工具鋼，因其具有卓越的高溫強度和韌性。在積層製造模具組塊使用麻時效鋼粉末，這種鋼材擁有優異的機械性能，包括高溫強度、硬度、延展性、抗衝擊性、疲勞極限和耐磨性，同樣也廣泛應用在壓鑄模具。

本文使用雷射床熔融技術加工麻時效鋼粉末，透過不同的加工參數，包含雷射功率（160 W、180 W 和 220 W）、雷射掃描速度（1900 m/s 和 2100 mm/s）、掃描中心間距（0.04 mm 和 0.06 mm）和時效熱處理等，針對積層製造麻時效鋼零組件之機械性能進行緻密度、表面粗糙度、機械性質和顯微組織等進行研究。

研究結果顯示，最適合麻時效鋼模具組塊之時效熱處理為 590°C/4 hr，雷射路徑重疊率 31.42% 可獲得最佳的表面粗糙度，雷射輸入能量 220 W 和 1900 mm/s 可達最高的密度。受到製程結構缺陷或析出物分布的影響，積層製造獲得較高硬度與強度者之密度並非最高。SEM 觀察破斷面的韌窩組織，水平建構試片的延展性優於垂直建構者。

關鍵詞：積層製造、麻時效鋼、時效處理、機械性能、壓鑄模具

Abstract

The mold plays a critical role in die casting, which the quality of the mold directly determines the properties of the cast parts and also significantly influences production costs and cycle time. H13 hot work tool steel is commonly used for die casting molds due to its excellent strength at elevated temperatures. In additive manufacturing, maraging steel powder is often utilized with excellent mechanical properties, including high strength, hardness, ductility, impact resistance, fatigue limit, and wear resistance. As such, it is also widely applied in the diecasting mold industries.

This article used laser bed fusion technology to process maraging steel powder through different parameters, including power (160 W, 180 W and 220 W), scanning speed (1900 m/s and 2100 mm/s), scanning center spacing (0.04 mm and 0.06 mm) and with aging heat treatment, and to study on density, surface roughness, mechanical properties and microstructure of additive manufactured components.

Results showed that the most suitable aging condition is 590°C/4 hr, and the best surface roughness can be obtained with a overlap rate of 31.42%. The highest density can be achieved with input energy of 220 W and 1900 mm/s. Affected by structural defects or precipitate distribution, higher hardness and strength obtained from additive manufacturing are not the highest density. SEM observations of the dimple structure on the fracture surface indicate that horizontally built specimens exhibit superior ductility compared to those built vertically.



Keywords: additive manufacturing, maraging steel, aging treatment, mechanical properties, diecasting mold,

1. 前言

傳統製程難以或不可能製造的複雜零件，積層製造（3D列印）可根據電腦輔助設計或掃描現有物件，建構零部件的3D模型，根據設定的層厚將模型轉換為由一系列薄層的數值資料，再透過3D列印機逐層建構形成實體物件 [1-3]。傳統製造是採用減裁加工方式，將原材料進行切割及除料來加工物體以形成所需形狀，因此需要大量的原物料，並會在生產過程中產生大量的廢棄物，增加清理和處理的成本。

壓鑄模具常用的基層製造粉末是H-13熱作工具鋼或麻時效鋼粉末，其中麻時效鋼具有優異的機械性能，例如高強度、硬度、延展性、抗衝擊性、疲勞極限和耐磨性等。這種金屬粉末已使用於製作具有隨型冷卻水路的壓鑄模具入子和分流子 [4]。

積層製造的金屬粉末在製作中容易受到製程變數影響，進而出現不同的機械性能。在雷射粉末床熔融系統中有數十個條件參數，最常考慮的因素包括雷射功率、雷射掃描速度、切片層厚、雷射掃描間距和掃描策略（每層上的雷射掃描圖案）。考量積層製造的自由度，沒有一組最佳化的參數能適用於所有的需求、材料性能和生產效率 [5]。因此本文旨在研究麻時效鋼粉末經過雷射粉末床熔融成形後之機械性能；另外，為了壓鑄模具之量產，特別進行590°C/4 hr的時效硬化熱處理，再進行未時效處理與時效處理過的機械性能變化。

2. 文獻回顧

壓鑄模具的材料直接影響模具的壽命、尺寸精度、加工性、經濟價值及製造成本。典型的壓鑄模具材料為5%鉻系熱作工具鋼，具有較高的硬度，在高溫下也能保持高硬度的紅硬性，此外還有很好的耐磨性和韌性 [6]。麻時效鋼是一種低碳鐵鎳合金，經熱處理後具備卓越的強度、韌性與穩定性，適應高壓高溫環境且保持優良機械性能；其優異性能來自奈米級析出物與麻田散鐵基體的結合，通過添加鎳形成微觀結構，無需高碳含量。因為幾乎不含碳的元素成分使得麻時效鋼具有良好的可焊性，使其成為積層製造技術的首選材料 [3]。

積層製造是將高功率雷射聚焦成極小的光束以實現極高密度的能量，透過熔化材料粉末再凝固成形。當高能雷射接觸材料時，發出的熱能大於傳導消散的熱量時，才能讓粉末熔化。而其中許多製程參數會影響到材料粉末熔化與凝固的行為，進而使材料改變其物理特性及內部晶格結構 [5]。積層製造係透過多層粉末熔融完成，其間的製程參數包含雷射功率、掃描速度、層厚、材料粉末特性等，而積層製造品質包含機械性能、表面粗糙度、尺寸精度、微觀結構、相組成、孔隙率、拉伸強度、抗疲勞性與硬度等 [7-8]。積層製造的金屬零件因快速熔化與冷卻，形成細化微觀結構。惟麻時效鋼在積層製造中的機械性能較低，可透過時效處理讓金屬間化合物沉澱，大幅提升機械性能 [9-11]。

3. 研究方法

3.1 實驗方法

實驗設計方法採用全因子實驗方法，考慮5個控制因子，包含雷射功率（160、180和220 W）、雷射掃描速度（1900和2100 mm/s）、掃描中心間距（0.04和0.06 mm）及經590°C /4hr時效處理與否，如表（1）所示，共計24種組合；另外，拉伸試驗使用0°和90°兩種成形型角度因子。實驗的固定參數包含雷射光束直徑、粉末層厚度和粉末顆粒大小分別為70 μm、30 μm和20 μm。

表（1）積層製造參數組合。

編號	雷射功率(W)	掃描速度(mm/s)	掃描中心間距(mm)
1	160.00	1900.00	0.04
2	160.00	1900.00	0.06
3	160.00	2100.00	0.04
4	160.00	2100.00	0.06
5	180.00	1900.00	0.04
6	180.00	1900.00	0.06
7	180.00	2100.00	0.04
8	180.00	2100.00	0.06
9	220.00	1900.00	0.04
10	220.00	1900.00	0.06
11	220.00	2100.00	0.04
12	220.00	2100.00	0.06

3.2 粉末材料

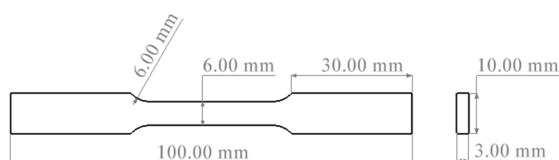
本研究所使用的材料是美國3D Systems研製的麻時效鋼粉末，該材料與1.2709麻時效鋼具有相同的特性，表（2）是該材料的化學成分。

表（2）Maraging Steel 化學成分。

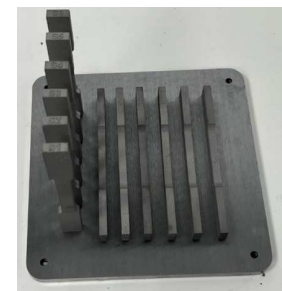
Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Co	Fe
wt %	≤0.03	≤0.10	≤0.15	≤0.01	≤0.01	≤0.25	4.50	17.0	0.80	8.50	Residual

3.3 實驗試片

實驗試片是根據ASTM-E8M規範製作，使用小尺寸扁平試片尺寸，試片厚度3 mm，並對試片外輪廓尺寸預留加工量0.6 mm，如圖（1.a）所示。拉伸試驗的成形角度分別為0°和90°，如圖（1.b）所示。



圖（1.a）實驗試片。



圖（1.b）積層製造方向。

3.4 試驗分析

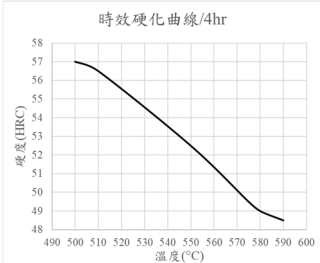
實驗使用Olympus LEXT OLS5100雷射共軛聚焦顯微鏡對未經任何加工的積層製造試片進行表面粗糙度測量；使用Precisa自動內校精密天平360ES-M型號ES2220M量測重量，再透過阿基米德沉水法量測試片密度；使用大氣回火爐，對積層製造麻時效鋼試片進行時效硬化處理；使用Mitutoyo HR200洛氏硬度試驗機量測試片硬度，荷重設定為150 kgf，量測壓頭為120°之鑽石圓錐角；使用Instron 68TM萬能拉伸試驗機，配備Gotech螺旋式金屬夾具(MA-5T)、延伸計Instron 25mm型號(2620-604)進行拉伸試驗；使用Phenom XL Electron microscope(SEM)掃描式電子顯微鏡對拉伸試片的破斷面進行分析。

4. 結果與討論



4.1 時效處理溫度對硬度關係

麻時效鋼粉末利用積層製造的試片經時效硬化處理4小時，處理溫度從500°C至590°C，間隔為10°C，升溫和持溫時間分別為30 min和4 hr，處理後接續空冷。時效處理過的試片硬度隨著處理溫度上升而下降，從57 HRC下降至49 HRC；其中經590°C/4 hr時效熱處理的試片約49 HRC，符合壓鑄模具的工作條件。圖（2）表示時效處理溫度對試片硬度的關係。



圖（2）時效處理溫度-硬度關係。

4.2 表面形貌分析

圖（3）表示量測的試片表面形貌，其中綠色、紅色和藍色分別表示平均高度、波峰和波谷。表（3）列出 12 種積層製造試片的表面粗糙度介於 9 – 13 μm ，彼此差異不大，其中編號 #12 試片的粗糙度最大，高達 13.685 μm 。積層製造的試片表面較難完全平滑，仍需後處理加工。當雷射光束直徑為 0.07 mm 時，掃描間距由 0.04 mm 增至 0.06 mm，掃描重疊率從 31.42% 降至 6.34%。不論雷射功率高低與掃描速度快慢，掃描間距 0.06 mm 的表面粗糙度均較 0.04 mm 為高，其幅度增加 6 – 43%。

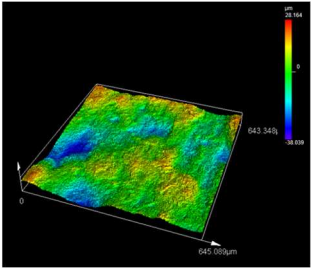


圖 3 表面形貌分析結果。

表（3）不同試片之表面粗糙度。

雷射掃描中心間距 雷射功率-掃描速度	0.04 mm		0.06 mm	
	編號	粗糙度 (μm)	編號	粗糙度 (μm)
160 W-1900 mm/s	1	9.154	2	12.906
160 W-2100 mm/s	3	9.457	4	10.693
180 W-1900 mm/s	5	11.107	6	11.795
180 W-2100 mm/s	7	12.362	8	13.305
220 W-1900 mm/s	9	9.741	10	11.412
220 W-2100 mm/s	11	10.817	12	13.685

4.3 密度量測

針對 12 種不同實驗參數組合之積層製造試片，使用 Precisa 360ES-M 自動內校精密天平量測重量，再透過阿基米德原理計算的密度，如表（4）所示。從表中可以看出，編號#9 試片的緻密性最佳，其密度可達 8.052 g/cc；相對地，編號#8 試片緻密性較差，量測的密度為 7.872 g/cc，彼此間的密度差異不及 2.3%。

表（4）不同試片之量測密度。

雷射掃描中心間距 雷射功率-掃描速度	0.04		0.06	
	編號	密度 (g/cc)	編號	密度 (g/cc)
160 W-1900 mm/s	1	8.013	2	7.933
160 W-2100 mm/s	3	7.944	4	7.908
180 W-1900 mm/s	5	8.036	6	7.988
180 W-2100 mm/s	7	8.000	8	7.872
220 W-1900 mm/s	9	8.052	10	8.027
220 W-2100 mm/s	11	8.049	12	8.013

4.4 硬度試驗

硬度試驗分為兩組試片，其中一組是未時效處理的試片，另一組則是經 $590^{\circ}\text{C}/4\text{hr}$ 時效處理過的試片，12 種積層製造試片的量測洛氏硬度，如表 (5) 所示。未時效處理試片之硬度介於 HRC34 - 41，其中編號#11 試片之硬度最高，達 HRC41.45，顯示實驗的硬度與密度並非一致，可能是受到晶粒結構影響。時效處理過的試片硬度提升至 HRC46 - 49，且不同試片的差異不顯著，如圖 (4) 所示。

圖 (5) 清楚顯示，當掃描速度分別為 1900 及 2100 mm/s 時，未時效處理試片的硬度隨雷射功率增加而上升；同時硬度與掃描間距也有關聯，間距 0.04 mm 的試片硬度較 0.06 mm 為高。整體而言，硬度變化趨勢與密度的量測結果變化一致。

表 (5) 試片未時效處理與時效處理過的硬度量測結果比較。

雷射掃描中心間距	硬度(HRC)					
	0.04 mm			0.06 mm		
雷射功率-掃描速度	編號	未時效處理	時效處理過	編號	未時效處理	時效處理過
160 W-1900 mm/s	1	38.25	49.25	2	36.32	47.69
160 W-2100 mm/s	3	38.30	49.25	4	34.47	46.25
180 W-1900 mm/s	5	39.80	49.00	6	38.30	48.75
180 W-2100 mm/s	7	39.50	48.75	8	36.80	47.50
220 W-1900 mm/s	9	40.65	49.25	10	39.20	48.75
220 W-2100 mm/s	11	41.45	49.00	12	38.90	48.50

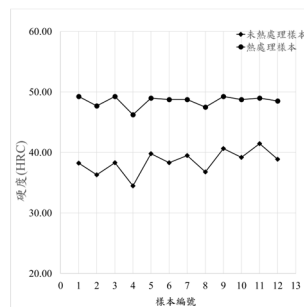


圖 (4) 1 試片未時效處理與時效處理過之硬度比較。

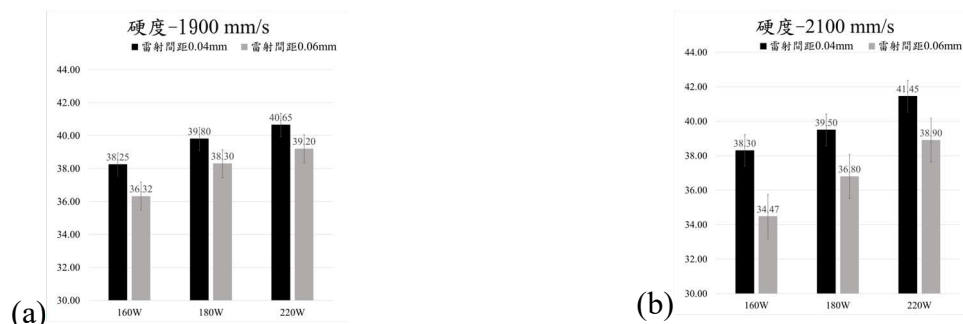


圖 (5) 未時效處理試片的硬度，(a)掃描速度 1900 mm/s；(b)掃描速度 2100 mm/s。

4.5 拉伸試驗

拉伸試驗的試片分為四組，即試片長邊平行於基板（編號//）且未時效處理、試片長邊平行於基板（編號//）且時效處理過（ $590^{\circ}\text{C}-4$ 小時）、試片長邊垂直於基板（編號 $\perp$ ）且未時效處理和試片長邊垂直於基板（編號 $\perp$ ）且時效處理過（ $590^{\circ}\text{C}-4$ 小時）等。

表 (6) 列出四組試片的拉伸試驗結果，未時效處理之試片，其降伏強度 (YS) 和抗拉強度 (UTS) 分別介於 900 - 1100 MPa 和 1100 - 1300 MPa；試片經時效處理過，YS 和 UTS 分別提升至 1100 - 1400 MPa 和 1300 - 1600 MPa。最高 YS 值出現在編號 $\perp$ 10，其值為 1155.9



MPa; 而最高 UTS 值發生在編號 //3, 其值為 1404.98 MPa。結果顯示密度最高的試片編號#9, 它的強度並未出現最高的強度, 此乃因能量輸入、微觀組織差異或奧氏體與麻田散鐵的分布型態, 而影響積層製造試片的強度。另外, 試片編號 $\perp$ 4 的強度較其它試片的強度異常的低, 其 YS 和 UTS 分別僅為 539.59 MPa 和 565.96 MPa, 造成此結果的可能原因是積層製造過程中試片出現缺陷所致。雖然經過時效處理過的試片硬度趨於一致, 但拉伸強度仍呈現差異, 可能原因是析出物分布不均或晶粒大小變異所致。圖 (7) 及圖 (8) 顯示, 大部分長邊平行於基板 (//) 的積層試片的強度較長邊垂直積板 ($\perp$) 為高, 其中少數的例外可能是在積層製造過程中冶金反應造成的微觀結構變異, 或因快速冷卻與加熱交替導致的高溫梯度, 進而引發殘餘應力, 影響試片的整體強度表現。

表 (6) 積層製造試片的拉伸試驗結果。

平行於基板					垂直於基板				
未時效處理		時效處理過			未時效處理		時效處理過		
編號	YS (MPa)	UTS (MPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)	編號	YS (MPa)	UTS (MPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)
//1	991.54	1257.047	1533.87	1579.73	$\perp$ 1	996.72	1254.381	1355.71	1504.53
//2	931.5	1209.143	1395.51	1482.77	$\perp$ 2	981.08	1097.768	1307.21	1386.48
//3	1118.5	1404.98	1466.56	1595.91	$\perp$ 3	975.41	1241.919	失效	失效
//4	896.82	1250.884	1372.04	1374.05	$\perp$ 4	539.59	565.964	948.82	1001.69
//5	1058.1	1370.198	1473.58	1587.89	$\perp$ 5	1031.8	1398.45	1409.34	1515.09
//6	1019.5	1282.712	1470.55	1578.16	$\perp$ 6	976.43	1221.74	1390.3	1477.94
//7	1063.9	1201.22	1330.65	1449.55	$\perp$ 7	959.46	1193.102	1391.76	1482.03
//8	928	1181.941	1326.24	1438.85	$\perp$ 8	959.83	1032.06	1056.93	1067.89
//9	1093.5	1349.696	1469.68	1581.87	$\perp$ 9	1006.2	1273.51	1354.85	1468.53
//10	965.9	1396.466	1472.09	1586.28	$\perp$ 10	1155.9	1341.817	1362.63	1437.71
//11	1047.8	1342.797	1456.49	1593.35	$\perp$ 11	1010.2	1260.157	1287.46	1390.27
//12	1028.5	1315.587	1474.02	1591.87	$\perp$ 12	986.23	1220.71	1343.02	1382.77

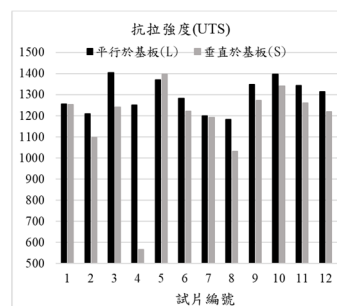
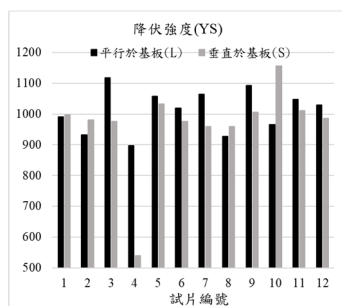


圖 (7) 試片未 2 時效處理之拉伸試驗結果, (a)降伏強度; (b)抗拉強度。

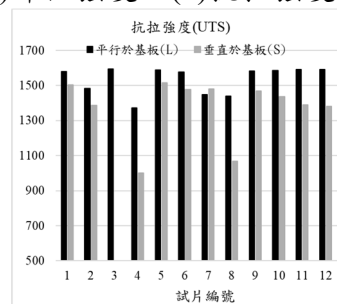
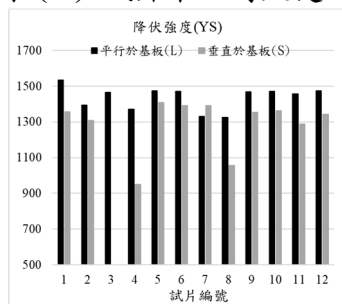


圖 (8) 試片經 3 時效處理過之 4 拉伸試驗結果, (a)降伏強度; (b)抗拉強度。

4.6 破斷面分析

使用 Phenom XL 掃描式電子顯微鏡 (SEM)，針對編號#3 與#10 等四個拉伸試片進行破斷面分析。圖 (9) 顯示 SEM 觀測面與積層製造建構層的方向，其中黑色箭頭表示粉末堆疊的方向，條紋表示粉末分層，灰色區域為 SEM 觀測面。觀測方向設定 x 軸為長邊和 y 軸為短邊。圖 (10) 和圖 (11) 分別為編號#3 及#10 之破斷面影像，其中 (a) 為建構方向平行於基板，時效處理前；(b) 為平行於基板，時效處理後；(c) 為垂直於基板，時效處理前；(d) 為垂直於基板，時效處理後。圖中之影像放大比例尺均為 100 μm 。

破斷面分析觀察結果顯示，除了出現韌窩組織之外，破斷面普遍存在大量細小孔洞及殘留的未熔融粉末。經過能譜分析 (EDX) 結果顯示，殘留粉末之化學組成與原始粉末一致，如圖 (12) 所示，推測其來源為在鋪粉過程中顆粒排列不均所致。如 3.1 節所述，粉末粒徑分布在 20 μm 左右，而積層製造之單層厚度為 30 μm ，且粉末形狀不規則，其粒徑差異也大，使得粉末間容易形成孔隙，導致細小顆粒可能插入其間，進而受限於熔池的熱傳導條件，造成大顆粒熔融而小顆粒未熔融的現象，此為破斷面上出現粉末殘留的問題。

此外，建構方向與破斷面型態也存在顯著的關聯性。當積層製造的建構方向平行於基板時，破斷面上的韌窩組織數量明顯多於垂直建構者，且出現大韌窩的機率亦較高，此顯示以水平方向建構的積層製造試片具有較佳延展性；相反地，垂直於基板建構的積層製造試片呈現較少的韌窩組織，且較少出現大韌窩。時效處理對破斷面形貌也有一定的影響，無論建構方向水平或垂直於基板，試片經時效處理過，其破斷面的韌窩數量皆顯著減少，大韌窩也隨之消失，且普遍出現裂紋及分層現象。此結果說明時效處理雖能提升積層製造試片的強度，但也使其延展性下降，破壞模式偏向脆性破壞。



圖 (9) SEM 觀測面與建構層關係，(a)平行於基板 $\parallel$ ；(b)垂直於基板 $\perp$ 。

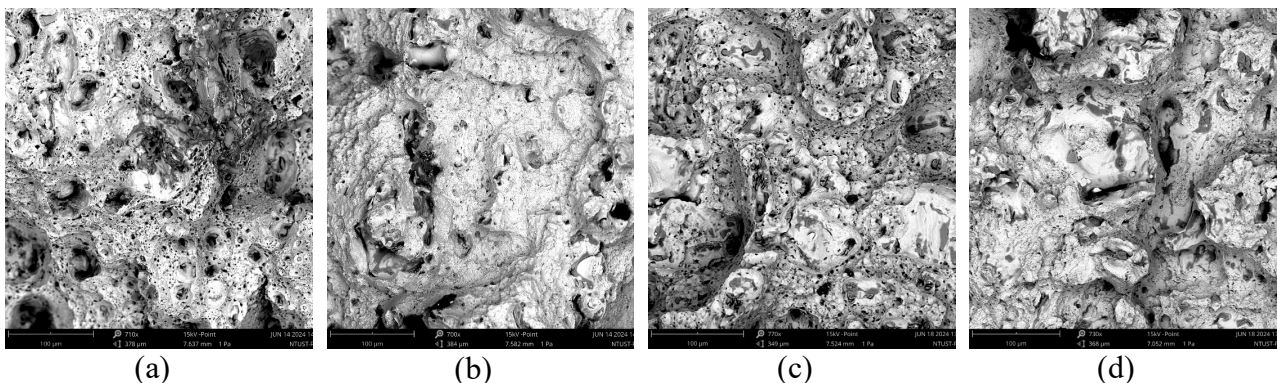


圖 (10) 拉伸試片編號 3 之破斷面 SEM 分析結果，(a)未時效處理，建構方向 $\parallel$ ；(b)經時效處理過，建構方向 $\parallel$ ；(c)未時效處理，建構方向 $\perp$ ；(d)經時效處理過，建構方向 $\perp$ 。

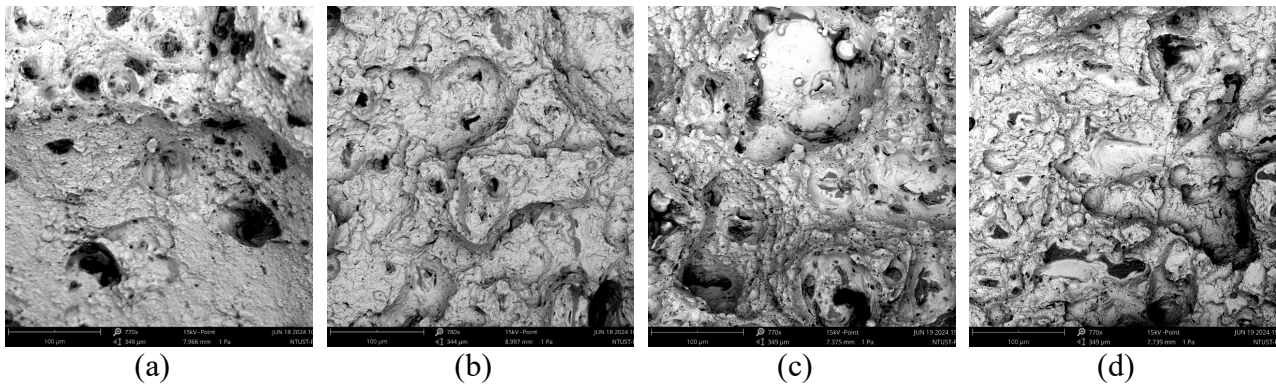


圖 (11) 拉伸試片編號 10 之破斷面 SEM 分析結果，(a)未時效處理，建構方向 //；(b)經時效處理過，建構方向 //；(c)未時效處理，建構方向 ⊥；(d)經時效處理過，建構方向 ⊥。

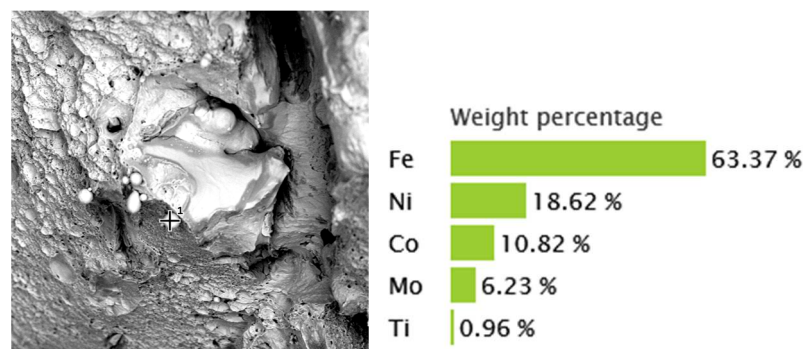


圖 (12) 破斷面殘留粉末之 EDX 成分分析。

5. 結論

本研究針對不同積層製造參數對麻時效鋼模具試片機械性能之影響，同時進行拉伸試片的破斷面分析及探討時效處理溫度 590°C /4小時對麻時效鋼粉末積層製造試片之影響。研究的主要結論摘要如下：

1. 為符合壓鑄模具之應用，積層製造試片經 590°C /4小時時效處理過，其硬度由57 HRC降至49 HRC。
2. 掃描間距由0.04 mm增至0.06 mm時，重疊率由31.42%降至6.34%，試片機械性能亦隨之下降。
3. 密度量測結果得知，試片的密度介於7.8–8.05 g/cc，其中編號#9試片的緻密性最佳，其密度可達8.052 g/cc；相對地，編號#8試片緻密性較差，量測的密度為7.872 g/cc，彼此間的密度差異不及2.3%。
4. 硬度試驗結果指出，試片的硬度介於HRC34–41，其中編號#11試片之硬度最高，達HRC41.45，顯示實驗的硬度與密度並非一致，可能是受到晶粒結構影響。時效處理過的試片硬度提升至HRC46–49，且不同試片的差異不顯著。
5. 拉伸試驗結果顯示，未時效處理之試片，其降伏強度（YS）和抗拉強度（UTS）分別介於900–1100 MPa和1100–1300 MPa；試片經時效處理過，YS和UTS分別提升至1100–1400 MPa和1300–1600 MPa。硬度相近情況下，強度仍有差異，可能與析出物分布不均或晶粒大小差異有關。
6. SEM觀察顯示破斷面含有大量細小孔洞及未熔融粉末，推測因粉末排列不均及粒徑差異影響熱傳導所致，導致熔池內部大顆粒粉末熔融，但小顆粒未熔融的現象。



7. 水平方向建構的積層製造試片之破斷面韌窩數量多於垂直方向建構之試片，且大韌窩出現機率較高，顯示水平方向建構之積層製造試片的延展性較佳。
8. 經時效處理過的試片，其破斷面韌窩組織明顯減少，且大韌窩消失，並伴隨裂紋與分層現象出現，顯示時效處理過的試片雖可提升其強度，卻降低其延展性。

6. 誌謝

本論文由馬亞科技股份有限公司之金屬積層製造技術支援，使本論文研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

7. 參考文獻

- [1] T. Duda and L.V. Raghavan, "3D metal printing technology," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 29, pp. 103-110, 2016.
- [2] C. Kamath, "Data mining and statistical inference in selective laser melting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, pp. 1659-1677, 2016.
- [3] C. Turk, H. Zunko, C. Aumayr, H. Leitner, and M. Kapp, "Advances in maraging steels for additive manufacturing," *Berg Huettenmaenn Monatsh*, vol. 164, no. 3, pp. 112-6, 2019.
- [4] P.C. Priarone, V. Lunetto, E. Atzeni, and A. Salmi, "Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability," *Procedia Cirp*, vol. 78, pp. 85-90, 2018.
- [5] J.P. Oliveira, A. LaLonde, and J. Ma, "Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 193, p. 108762, 2020.
- [6] 莊水旺, *智慧型壓鑄模具生產技術*, 五南圖書出版公司, 2013。
- [7] S.L. Sing *et al.*, "Emerging metallic systems for additive manufacturing: In-situ alloying and multi-metal processing in laser powder bed fusion," *Progress in Materials Science*, vol. 119, p. 100795, 2021.
- [8] B. Zhang, S. Liu, and Y.C. Shin, "In-Process monitoring of porosity during laser additive manufacturing process," *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 497-505, 2019.
- [9] S. Campanelli, N. Contuzzi, P. Posa, and A. Angelastro, "Study of the aging treatment on selective laser melted maraging 300 steel," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 6, p. 066580, 2019.
- [10] J. Song *et al.*, "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical behaviours of 18Ni-300 maraging steel manufactured by selective laser melting," *Optics & Laser Technology*, vol. 120, p. 105725, 2019.
- [11] Y. Bai, Y. Yang, D. Wang, and M. Zhang, "Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 703, pp. 116-123, 2017.