

積層製造用金屬粉末製程技術 及設備發展與前瞻應用

MIRDC-103-S101



作 者：林偉凱、劉文海、梁孝祖



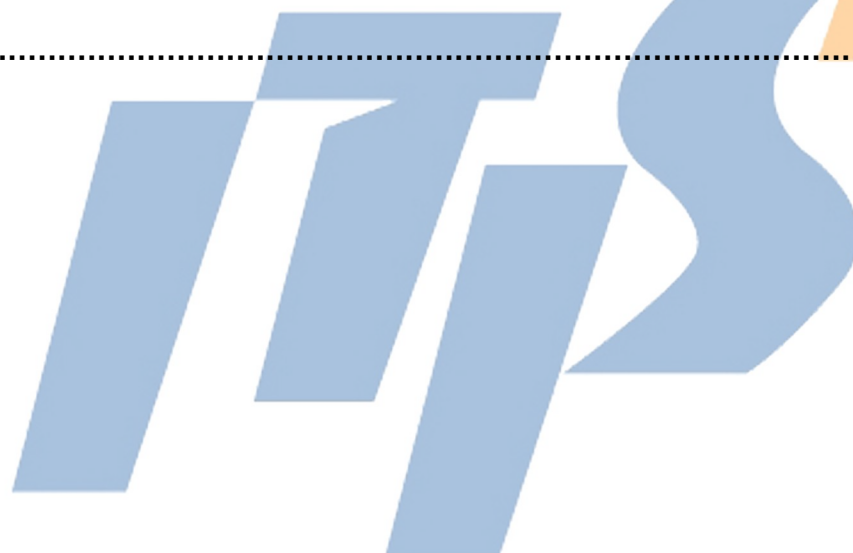
中 華 民 國 103 年 11 月

財 團 法 人 金 屬 工 業 研 究 發 展 中 心

文目錄

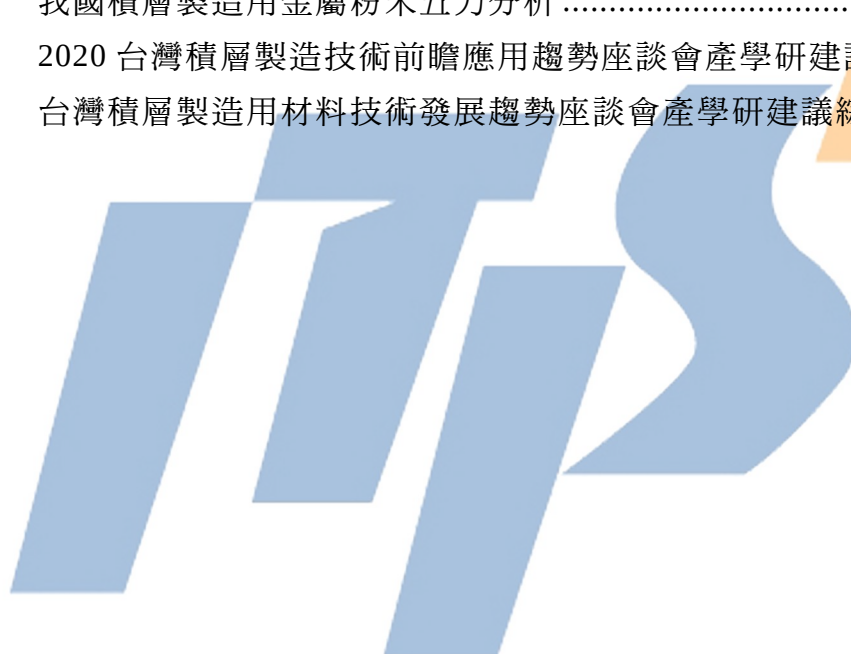
第一章 緒論	1
第一節 研究動機與目的	1
第二節 研究範圍	4
第三節 研究方法與架構	5
第四節 研究時程與限制	6
第二章 積層製造金屬粉末種類 與特性介紹	9
第一節 前言	9
第二節 積層製造金屬粉末的基本性能要求	10
第三節 雷射積層製造用金屬粉末特性與種類	11
第四節 積層製造金屬粉末製程技術	18
第三章 積層製造金屬粉末市場供需及供應鏈介紹	21
第一節 3D 列印材料市場規模	21
第二節 金屬粉末市場規模預測	23
第三節 主要生產廠商	25
第四章 積層製造金屬粉末量產 關鍵設備、製程技術發展現況	29
第一節 金屬粉末製程技術分類	29
第二節 霧化法發展現況	32
第三節 物理－化學法發展現況	47
第五章 雷射積層製造金屬粉末製程技術發展趨勢	49
第一節 氣霧化法發展趨勢	49
第二節 旋轉電極霧化法發展趨勢	56
第三節 電漿霧化技術發展趨勢	59
第六章 我國積層製造金屬粉末 前瞻應用產品與發展策略	64
第一節 電子業與汽車產業的應用	64
第二節 牙科與人工關節的應用	65

第三節	航空與航太產業的應用	68
第四節	工模具產業的應用	72
第五節	國防與珠寶產業的應用	73
第七章	我國積層製造金屬粉末 產業發展策略	77
第一節	台灣產業現況與問題	77
第二節	五力分析	80
第八章	結論與建議	91
第一節	結論	91
第二節	建議	95
參考資料		97
附錄一		99
附錄二		101



表目錄

表 2-1	產業應用需求之粉末特性比較	10
表 2-2	雷射燒結積層製造用金屬粉末種類(以 EOS 公司為例).....	14
表 2-3	各種金屬粉末造粒之特性比較	19
表 3-1	2011~2018 積層製造之金屬粉末材料使用量預測	24
表 3-2	2011~2018 金屬材料使用金額預測	25
表 3-3	全世界已有技術生產 AM 用金屬粉末的廠商	26
表 4-1	金屬粉末的主要製造方法	30
表 7-1	我國積層製造用金屬粉末五力分析	84
表 7-2	2020 台灣積層製造技術前瞻應用趨勢座談會產學研建議綜整	86
表 7-3	台灣積層製造用材料技術發展趨勢座談會產學研建議綜整.....	88



圖目錄

圖 1-1	「積層製造用金屬粉末製程技術及設備發展與前瞻應用」之研究範圍 ...	4
圖 1-2	專題研究之方法與大綱	6
圖 1-3	專題研究時程	7
圖 2-1	粉體熔融成形系統結構	12
圖 2-2	指向性能量沉積系統結構	12
圖 2-3	德國某廠家不銹鋼粉末的 微觀結構	13
圖 2-4	中國大陸某廠家的不銹鋼 粉末微觀結構	13
圖 2-5	液相燒結與熔融重新凝固顯微組織	17
圖 2-6	超氣體噴霧法示意圖(a)水平式，(b)垂直式	18
圖 2-7	超氣體噴霧法金屬粉末形成示意圖	19
圖 3-1	3D 列印材料市場規模	21
圖 3-2	3D 列印之金屬成品	23
圖 4-1	水、氣霧化法之粉末形狀	31
圖 4-2	水/氣霧化法之設備示意圖	33
圖 4-3	自由落體與限制式氣霧化法噴嘴結構示意圖	34
圖 4-4	超音速霧化法噴嘴結構示意圖	34
圖 4-5	超音速霧化原理	35
圖 4-6	兩種緊耦合霧化噴嘴結構圖	36
圖 4-7	高壓霧化噴嘴結構圖	38
圖 4-8	層流霧化噴嘴結構圖	39
圖 4-9	離心霧化法示意圖	41
圖 4-10	旋轉電極霧化技術示意圖	42
圖 4-11	電漿旋轉電極霧化法量產設備外觀	43
圖 4-12	短桿型電漿旋轉電極設備結構圖	44
圖 4-13	長桿型電漿旋轉電極設備結構圖	45
圖 4-14	溶氣真空霧化設備示意圖	46
圖 5-1	吸氣壓力式預成膜霧化噴嘴結構	49
圖 5-2	壓力旋流混合預成膜霧化器結構	50
圖 5-3	緊耦合氣霧化噴嘴頂端壓力與氣體壓力關係	50
圖 5-4	在高壓條件下之吸氣壓力式噴嘴的電腦流體動力學模型	51

圖 5-5	緊耦合霧化器環型噴嘴剖面圖	52
圖 5-6	霧化噴嘴與嵌入式噴嘴角度配比示意圖	52
圖 5-7	霧化形態與噴嘴配置關係	53
圖 5-8	真空氣體霧化設備結構圖	54
圖 5-9	真空及惰性氣體霧化設備示意圖	55
圖 5-10	PIGA 及 EIGA 技術示意圖	56
圖 5-11	REP 與氣體輔助 REP 之產出率比較	58
圖 5-12	電漿霧化法製程設備示意圖	60
圖 5-13	電漿霧化法生產之 Ti-6AL-4V 預合金粉末及粒度分布曲線	60
圖 6-1	Optomec 將電子迴路印刷於產品角落	64
圖 6-2	牙冠、牙橋產品及成形示例	65
圖 6-3	人工牙根(左)與植體表面 SEM 照片(200 倍)(右)	66
圖 6-4	表面空隙部位也有骨頭生長(左)與植體表面的骨頭生長(右)	66
圖 6-5	具多孔構造之植體：左－髌臼，右－脛骨基座(膝關節)	67
圖 6-6	GE90 渦輪引擎	68
圖 6-7	燃油噴油嘴	69
圖 6-8	輕量化之飛機結構鉸鏈	70
圖 6-9	飛機內部結構中空設計之機翼	70
圖 6-10	應用積層製造生產的輸送推進器噴嘴測試	71
圖 6-11	使用選擇性雷射燒結技術生產的噴油嘴	71
圖 6-12	具有複雜水路設計之嵌入成型模	72
圖 6-13	左圖為汽車門把手，右圖為使用 DMLS 生產之模仁	73
圖 6-14	美國 F-22 鈦框加工前後圖比較	74
圖 6-15	使用積層製造技術生產的鈦合金戰機大型組件	75
圖 6-16	使用 18 黃 K 金導入雷射燒結技術製作的網狀手鐲	76
圖 7-1	全球雷射金屬積層製造設備商市佔率分布	82
圖 8-1	全球積層製造市場發展潛力分析	93

摘要

歐美等國為提升當地製造業競爭力，已將積層製造 (Additive manufacturing) 技術納入國家發展戰略規劃，英國經濟學人甚至比喻積層製造將掀起第三波工業革命，未來 3~5 年，因專利到期與技術發展等原因，積層製造機器和耗材價格下降，應用將更為普及，預估 2017 年全球產值可達 65 億美元。根據 Primary Research and Markets and Markets 報告評估，金屬粉末材料在積層製造應用市場上，是深具發展潛力的材料，並預估積層製造金屬材料 2013 年至 2018 年的使用量，平均複合增長率約為 21.4%，且由於對鋼材、鋁、鈦及金、銀等貴金屬的消費積極成長，市場對金屬材料的需求量有望從 2013 年的 234 公噸增長至 2018 年將達到 615 公噸，金額從 2013 年的 111 百萬美元成長至 2018 年的 259 百萬美元。

雷射金屬積層製造用之粉末除需具備良好的可塑性外，還要求粒度分布範圍小、高球形度、高鬆裝密度，對氣體含量(主要是氧)、流動性、不同批次產品的穩定性要求嚴格，需要特殊設備製作。

氣霧化法是生產金屬及合金粉末的主要方法之一，其基本原理是用高速氣流將液態金屬流破碎成小液滴並凝固成粉末的過程，控制氣流之噴嘴設計成為氣體霧化的關鍵技術，噴嘴的結構和性能決定了霧化粉末的性能和效率。氣霧化法已成為雷射金屬積層製造用之粉末製備技術的主流，若欲生產高潔淨度或高活性之金屬粉末，則以電極感應熔融氣體霧化法、電漿霧化法與電漿旋轉電極法較恰當。

積層製造技術於金屬成品應用上可分為直接製造與間接製造兩種方式，前者因材料成本相較於粉末冶金昂貴，加上製造速度緩慢導致成品的價格偏高，不利於大量生產，因此目前產業化的產品載具包含人工骨科植體、人工牙科植體、工模具產業於異型水路設計的應用、航太零組件、戰鬥載具修復及戰鬥機零組件等包含少量多樣客製化、一體成形需求高、材料廢料率

高、特殊非商業需求等應用；而就應用產業面向來看，醫療、國防、汽機車、農業、航太、電機/電子、休閒器材業等應用為主要大宗，隨著工業與科技之千變萬化，尤其近幾年來，在醫療、航太用品等主導下，已漸漸成為重要的高科技產業。

因金屬雷射積層製造設備系統參數上的限制，目前仍無專營副牌之積層製造金屬粉末製造商。現階段台灣政府已投入資金建立積層製造的設備與材料端的先期研究，如果台灣能趁勢發展市占率高之設備廠副牌材料，不啻為一個新的藍海市場。



Abstract

In order to enhance local manufacturing competitiveness, European countries and the U.S. have integrated additive manufacturing into their national development strategic planning. The Economist even predicted that additive manufacturing would set off the third wave of the industrial revolution. In the next 3-5 years, the application of additive manufacturing will become more popular due to the reduction in prices of additive manufacturing machinery and consumables caused by patent expiry and technical development. It is estimated that the global output value will reach 6.5 billion USD by 2017. According to the evaluation of the Primary Research and Markets and Markets, metal powder material is a highly potential material in the additive manufacturing application market, and it estimates that the compound annual growth rate of the application amount of the additive manufacturing metal material will be about 21.4% from 2013 to 2018. In addition, due to the aggressive growth of consumption of precious metals, such as steel, aluminum, titanium, gold and silver, the market demand quantities of these metal materials are expected to increase from 234 metric tons in 2013 to 615 metric tons in 2018, and the amount is expected to increase from 111 million USD in 2013 to 259 million USD in 2018.

In addition to good plasticity, the powder for laser metal additive manufacturing should have a small distribution range of particle size, high sphericity and high apparent density. Being highly demanding in terms of gas content (mainly oxygen), fluidity and stability of different batches of products, it requires special equipment for manufacturing.

The gas atomization process is one of the major methods for producing

metal and alloy powder. The basic principle of its process is crushing the liquid metal flow into droplets with high-speed air flow, and then being solidified into powder. The nozzle design controlling the air flow becomes the key technology of the gas atomization. The nozzle structure and performance determine the performance and efficiency of the powder atomization. The gas atomization process has become the main stream of preparation technology of the powder for laser metal additive manufacturing. If you want to produce the metal powder with high cleanliness and high activity, the electrode induction fusion gas atomization method, plasma atomization method and plasma rotating electrode method are most appropriate.

The additive manufacturing technology applied to finished metal products can be divided into direct manufacturing and indirect manufacturing. The former is more expensive in terms of material cost compared to powder metallurgy, and its slow manufacturing speed results in higher priced finished products, making mass production unfavorable. Therefore, industrialized products currently consist of artificial orthopedic implants, artificial dental implants, and applications of the tools and dies industry to conformal cooling design, aerospace parts and components, combat vehicle repair and fighter parts and components, and other applications with small quantity of diversified customization, high demand of integral forming, high material scrap rate and special non-commercial demand. From the perspective of the applied industries, major applications with large quantities are medical care, national defense, automobile/motorcycle, agriculture, aerospace, electrical/electronic, leisure equipment industry etc. With ever-changing industry and science and technology, especially in recent years, led by medical care and aerospace products, additive manufacturing has gradually become an important high-tech industry.

Due to the limitation of parameters of metal laser additive manufacturing equipment system, currently, no manufacturers are specialized in second-line metal powder additive manufacturing. At the current stage, Taiwan's government has invested funds to conduct the pilot study on additive manufacturing equipment and materials. If Taiwan can take advantage of the trend to develop the manufacturers' second line materials with high market share, it will be as good as a new blue ocean market.



第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

3D 列印(3D printing)技術，又稱“積層製造”(Additive Manufacturing)技術，是製造業領域正在迅速發展的一項新興技術，被稱為“具有工業革命意義的製造技術”。運用該技術進行生產的主要流程是：應用電腦軟體，設計出立體的加工樣式，然後通過特定的成型設備(俗稱“3D 印表機”)，用液化、粉末化、絲化的固體材料逐層“列印”出產品。積層製造技術作為製造業智慧化革命的一項重大突破，已經進入了工業化和實用化的初步階段，在促進新興產業快速發展的同時，也帶來了生產方式、商業模式和組織結構的深刻變革。積層製造技術正在成為發達國家實現製造業回流、提升產業競爭力的重要載體。可以說，新一輪的全球製造業競爭，極有可能是積層製造與機器人等高端裝備的競爭。以積層製造技術為代表的數位化、智慧化製造以及新型材料的應用將重塑製造業和服務業的關係，重塑國家和地區比較優勢，重塑經濟發展格局，加快第三次工業革命的進程。

根據美國專門從事積層製造技術的技術諮詢服務公司—沃勒斯(Wohlers Associates)發佈的 2013 年度報告顯示

第二章 積層製造金屬粉末種類 與特性介紹

第一節 前言

積層製造金屬粉末的應用範圍相當廣泛，應用產業主要涵蓋醫療、國防、汽機車、農業、航太、電機/電子、休閒器材業等。隨著工業與科技之千變萬化，尤其近幾年來，在醫療、航太用品等主導下，已漸漸成為重要的高科技產業。現今積層製造金屬粉末零件的應用趨勢正朝向高強度、高精密度、複雜形狀的構件、組合燒結及接合零件、具耐熱、耐磨、耐蝕燒結合金鋼、瓷金等少量多樣材料等方向上發展。

積層製造製程的成本，粉末成本佔的比重大，原因是微細粉末的價格高，其成本約為傳統粉末冶金用粉的 10 倍。AM 技術不能普及化，粉末成本高是主要原因。氣噴霧製粉技術由於產量大，是未來 AM 取得低成本微細粉末的主要來源。氣噴霧法，壓力在 $1,000 \sim 1,500 \text{ kg/cm}^2$ 的噴霧下，可以得到產率在 60% 以上的微細粉末，平均粉末粒徑可達 $20 \mu\text{m}$ 以下，但平均粒徑在 $20 \mu\text{m}$ 以下的粉末製作難度高，反映在成本上較水噴霧法為高。在使用上，因為氣噴霧粉末的外型為圓形或橢圓形

第三章 積層製造金屬粉末市場供需 及供應鏈介紹

第一節 3D 列印材料市場規模

根據 Wohlers Associates 統計，3D 列印材料市場規模 2012 年約為 42 億美元，比起 2011 年成長約 29.2%，如【圖 3-1】所示。其中光硬化樹脂 (Photopolymer) 約占 50%，熱塑性塑膠 (Thermoplastic) 占 40%，金屬粉末約 6%，其他材料約 4%。

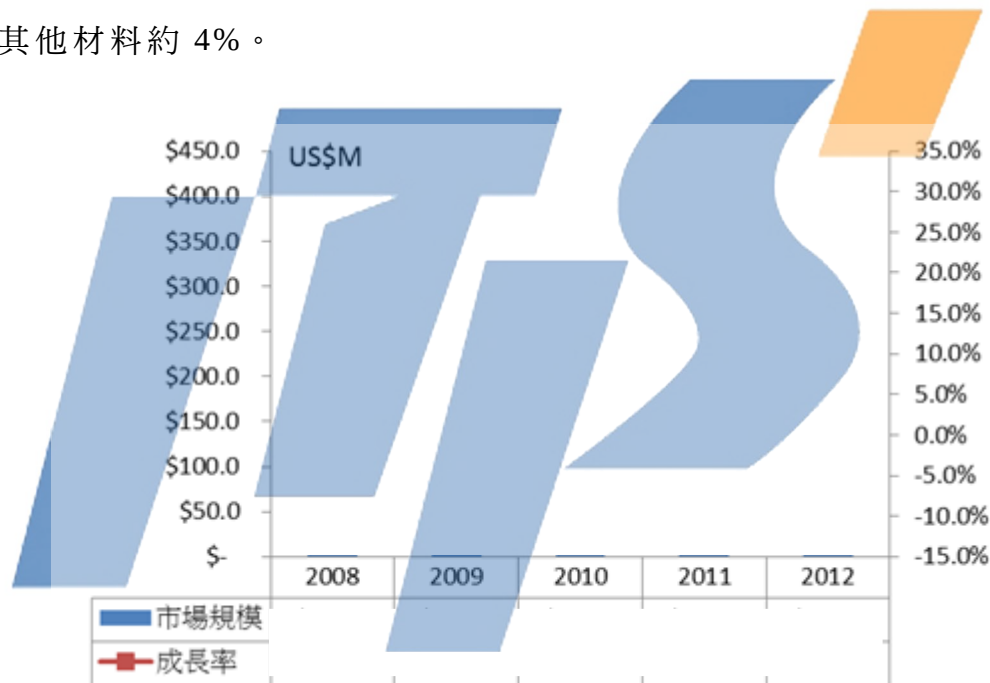


圖 3-1 3D 列印材料市場規模

資料來源：Wohlers Associates/金屬中心 MII-ITIS 計畫整理

目前 3D 列印材料大致可分成塑料、金屬及其他粉料等大類，以下針對金屬列印材料其列印原理及特性說明如下：

第四章 積層製造金屬粉末量產 關鍵設備、製程技術發展現況

第一節 金屬粉末製程技術分類

目前金屬粉末製備方法主要可分為：1.機械法：球磨法、氣流磨粉碎法；2.化學法：還原法、析出法、電解法、羰基(Carbonyl)分解法；3.霧化法(Atomization)；4.物理－化學法：氫化－脫氫法(HDH)等，參見【表4-1】。其中，以還原法、電解法和霧化法生產的粉末作為原料應用到粉末冶金工業的較為普遍。電解法和還原法特徵是可以獲得非常微細的粒子，而且最近對於次微米粒徑的粉末製造技術也已廣泛進行研發，但僅限於單一成份純金屬粉末的生產，而對於合金粉末這些方法均不適用。

始於 1940 年代的霧化法則是利用氣體或液體等高壓噴霧介質的動能，或是透過圓盤高速旋轉的離心力讓熔湯金屬飛散而使其液滴凝固粉末化的方法，由於可以量產粒徑小於 150 μm 且品質穩定的粉末，因此是目前製備高性能金屬及合金粉末的主要方法之一。

霧化設備、霧化氣體和金屬液流是氣霧化過程 3 個基本條件……

第五章 雷射積層製造金屬粉末製程技術發展趨勢

第一節 氣霧化法發展趨勢

一、霧化器噴嘴技術之進展

(一)預成膜霧化器

在限制式噴嘴設計中，循環氣流的產生是由於氣體同軸流動到熔湯出口噴嘴，在此處，氣體和熔湯會在進入霧化室之前先進行混合。由於吸力作用，使得熔湯將分佈在噴嘴邊緣表面上形成薄膜，並受到高速氣流剪切。成膜是熔湯有效霧化的重要條件，當熔湯薄膜在噴嘴邊緣與超音速氣流相互作用時便會分裂為細顆粒，【圖 5-1】為此種吸氣壓力式預成膜霧噴嘴結構，目前使用率逐漸增加。



圖 5-1 吸氣壓力式預成膜霧化噴嘴結構

資料來源：Powder Metallurgy Review, Summer 2014

第六章 我國積層製造金屬粉末 前瞻應用產品與發展策略

第一節 電子業與汽車產業的應用

傳統的印刷電路板(PCBA)之電路迴路傳統上於平板上印刷成型，如果未來電子迴路可以直接印刷到產品表面上，將可以破壞性地顛覆傳統電子產品的設計與製造方式，而應用積層製造技術於此創新的構想早在 2005 年便由 Sandia National Laboratories 展開研究，且大部分先進的電子迴路印刷展示已由 Optomec 發表出來。【圖 6-1】為電子迴路印刷在產品角落部位。

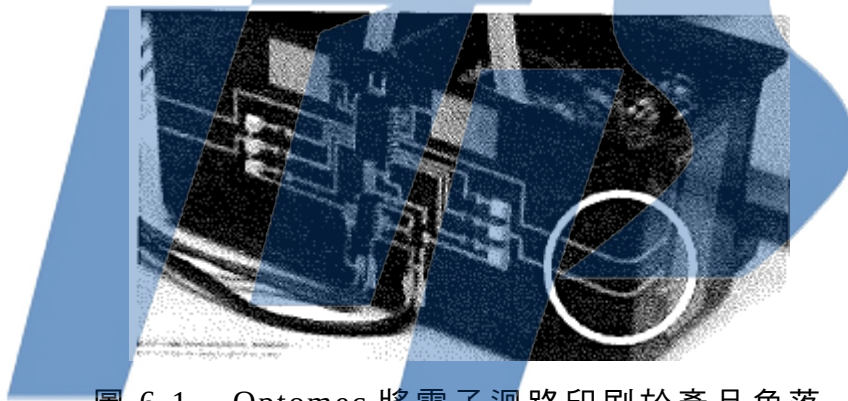


圖 6-1 Optomec 將電子迴路印刷於產品角落

資料來源：Wolhers Report., 2013

美國福特汽車已知應用積層製造技術於福特 C-MAX、福星混合動力車中的轉子、阻尼器外殼與變速器，翼虎複合動力車則為 Ecoboost 四汽缸發動機，最後 2011 年版的探險家系列則應用於剎車片上。此外，日本的小岩公司已經具備使用積層製造於生產渦輪增壓器的技術.....

第七章 我國積層製造金屬粉末 產業發展策略

第一節 台灣產業現況與問題

一、台灣產業現況

目前台灣在金屬粉末雷射積層製造領域屬於導入期，產業界僅有漢翔公司已擁有指向性能量沉積設備(DED)，應用於航太組件，使用美國進口之鎳基合金粉末(粒度 $<70\mu\text{m}$)。台灣積層製造公司(TAMC)於2013年底自日本松浦公司(Matsuura)首次引進金屬粉末雷射積層及CNC複合機，在金屬堆疊製造過程中以CNC提高成型速度及精度，工件可一體成型。數可、三詰公司已有金屬雷射燒結設備，計畫切入積層製造模具代工服務。此外，德芮達科技(DETEKT Technology)則計畫於2014年建構直接金屬雷射燒結設備，應用於生醫、模具等。台灣創新生醫公司則於2014年10月成立，預計推出金屬積層製造導引板及開發客製化植入固定板及牙材產品。

學術單位方面，成功大學航空太空工程學系的王覺寬教授於氣噴霧化法應用於高溫難熔金屬的前瞻研究，另有台灣大學材料科學與工程學系的連雙喜教授於旋轉電極法製粉之研究，在非晶質金屬方面則有國立成功大學材料科學及工程學系的曹紀元教授利用雙氣體霧化法生成金屬玻璃粉末，之後以放電電漿燒結及傳統熱壓製作多孔性塊狀金屬玻璃.....

第八章 結論與建議

第一節 結論

一、積層製造技術逐漸成熟並獲得強國關注



《積層製造用金屬粉末製程技術及 設備發展與前瞻應用》

全本電子檔及各章節下載點數，請參考智網公告

電話 | 02-27326517

傳真 | 02-27329133

客服信箱 | itismembers@micmail.iii.org.tw

地址 | 10669 台北市敦化南路二段 216 號 19 樓

劃撥資訊 | 帳號：01677112

戶名：財團法人資訊工業策進會

匯款資訊 | 收款銀行：華南銀行—和平分行

(銀行代碼：008)

戶名：財團法人資訊工業策進會

收款帳號：98365050990013 (共 14 碼)

服務時間 | 星期一~星期五

am 09:00-12:30 pm13:30-18:00



如欲下載此本產業報告電子檔，

請至智網網站搜尋，即可扣點下載享有電子檔。

ITIS 智網：<http://www.itis.org.tw/>