

國立交通大學

材料科學與工程研究所

碩士論文

高導熱鋁基複合材料(Gr/A356)之擠壓鑄造製程與性質研究

A Study on Fabrication and Properties of High Thermal Conductivity

Aluminum Composite (Gr/A356) by Squeeze Casting

研究生：張鈞富

指導教授：朝春光 教授

劉增豐 教授

中華民國九十九年七月

國立交通大學

材料科學與工程研究所

碩士論文

高導熱鋁基複合材料(Gr/A356)之擠壓鑄造製程與性質研究

A Study on Fabrication and Properties of High Thermal Conductivity

Aluminum Composite (Gr/A356) by Squeeze Casting



研究生：張鈞富

指導教授：朝春光 教授

劉增豐 教授

中華民國九十九年七月

高導熱鋁基複合材料(Gr/A356)之擠壓鑄造製程與性質研究

A Study on Fabrication and Properties of High Thermal Conductivity

Aluminum Composite (Gr/A356) by Squeeze Casting

研 究 生：張鈞富

Student : C. F. Chang

指 導 教 授：朝春光

Advisor : C. G. Chao

劉增豐

T. F. Liu



Submitted to Department of Materials Science and Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in

Materials Science and Engineering

July 2010

HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

高導熱鋁基複合材料(Gr/A356)之擠壓鑄造製程與性質研究

學生：張鈞富

指導教授：朝春光 博士

劉增豐 博士

國立交通大學

材料科學與工程研究所碩士班

摘要

本實驗以擠壓鑄造法製作高導熱係數之石墨-鋁基複合材料，將鱗狀石墨與顆粒狀石墨以不同比例均勻混合後置入模具以 10MPa 的壓力預壓，然後加熱至 550°C，隨後將 750°C 的 A356 鋁湯以 50MPa 的壓力擠入。可得石墨均勻散佈且幾無氣孔之石墨-鋁基複合材料以 OM，SEM 觀察其表面形態與微結構並使用 x-光散射儀分析石墨與 A356 是否產生 Al_4C_3 化合物。最後使用 TPS2500 熱傳導係數儀測量複合材料的熱傳導係數與熱擴散係數。

依實驗結果顯示，若石墨全為顆粒狀石墨，石墨的體積分率僅 43%，複合材料的導熱係數為 174W/mK，在石墨中加入鱗狀石墨則後，石墨的體積分率可依鱗狀石墨的比例增加至 74.6%，而複合材料的導熱係數可達 263W/mK 是 A356 基材 128W/mK 的兩倍以上。

A Study on Fabrication and Properties of High Thermal Conductivity Aluminum Composite (Gr/A356) by Squeeze Casting

Student : C.F. Chang

Advisors : Dr. C. G. Chao

Dr. T. F. Liu

Department of Materials Science and Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Manufacturing high thermal conductivity and high volume fraction graphite-reinforced aluminum matrix composite was taken by squeeze casting procedure. Mixing several different ratios of flake graphite and particulate graphite, then those mixtures pour into the mold and pre-pressed with pressure 10MPa. Graphite was heated up to 550°C and the melting aluminum alloy (A356) with 750°C was infiltrated into the interconnect pores of graphite by 50MPa pressure. A uniform and nearly pore less graphite-reinforced aluminum matrix composite can be obtained. After the observation of the surface morphology and microstructure via optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM), as well as phase analysis by X-ray diffractometer, there is no Al_4C_3 compound between graphite and aluminums interface. The thermal conductivity and thermal diffusivity were measured by TPS2500 thermal conductivity analyzer.

The test result shows that graphite volume fraction is only 43% and thermal conductivity of aluminum composite is about 174W/mK with all graphite particles. Owing to the addition of flake graphite, the volume fraction of graphite can be increased to 74.6%. The thermal conductivity of aluminum composite is raised up to 263W/mK which is 2 times higher than that of A356 (128W/mK).



誌謝

在研究所待了兩年，這段期間內，非常感謝朝春光教授對我的諄諄教誨，在實驗方向、行事態度，以及邏輯思考上給我很大的啟發與幫助，無論是言教或是身教方面，朝教授都為學生建立了良好的示範。在此獻上我由衷的敬意與感謝。此外，非常感謝工研院材化所的陳俊沐博士與翁震灼博士，有他們提供的資源與建議，實驗才能順利進行。

同時感謝實驗室的學長與同學們的鼎力相助，這篇論文才得以完成。首先要感謝林晟毅同學與吳政霖學弟，因為他們兩位在擠鑄時的幫忙與協助，實驗才能有現今的成果；感謝林志龍、蔡浩然、陳柏至、王浩仰、陳永昌、林哲毅等諸位學長不厭其煩的給予我協助與建議，讓我獲益匪淺；謝謝薛力銘與王喬立兩位一起奮鬥的同學，常常相互討論交流意見，共同度過充實的碩士生涯；感謝實驗室的助理楊雅聿小姐，因為有她處理實驗室的帳務與行政，我們才得以無後顧之憂的專心於研究；感謝宋品儀、李孝謙、王孝鐘等學弟，不時的給予我幫助與鼓勵。

在研究所生涯中，最感謝的還是親愛的家人們，不斷給予我最真摯的鼓勵與親情，謝謝媽媽與妹妹對我的包容與愛護；感謝以琳五年多來的支持與陪伴，沒有妳們，就沒有今天的我。最後，謹以此篇論文，獻給我在天上的父親。

總目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	IV
總目錄	V
表目錄	VII
圖目錄	VII
第一章 前言	1
第二章 文獻回顧	3
2-1 鋁基複合材料	3
2-2 鋁基複合材料製程技術	4
2-3 高導熱鋁基複合材料	6
2-4 材料之導熱係數計算與原理	7
2-5 熱傳導係數量測技術簡介	10
第三章 實驗方法	16

3-1 實驗材料	16
3-1-1 材料選用	16
3-1-2 顆粒調配	16
3-2 複合材料的擠壓鑄造	16
3-2-1 擠壓鑄造流程	16
3-2-2 儀器設備	16
3-2-3 模具安裝	16
3-2-4 粉體預壓	17
3-2-5 粉體預熱	17
3-2-6 擠壓鑄造	17
3-3 測試及分析	17
3-3-1 密度測試	17
3-3-2 石墨體積分率之計算	18
3-3-3 石墨-鋁基材界面分析	18
3-3-4 光學顯微鏡金相觀察	18
3-3-5 掃描式電子顯微鏡金相觀察	18
3-3-6 TPS 熱傳導係數儀量測	18
第四章 結果與討論	26
4-1 鋁基複合材料中石墨體積分率	26

4-2 擠壓鑄造後塊材之微結構分析.....	28
4-3 石墨-鋁基複合材料之界面分析	28
4-4 石墨體積分率與熱傳導係數關係.....	29
第五章 結論	43
參考文獻.....	44

表目錄

表 2-1 各種材料之熱性質與密度.....	12
表 2-2 石墨基底面與垂直基底面之性質.....	13
表 2-3 A356 成分.....	13
表 3-1 石墨與 A356 性質	20
表 3-2 石墨顆粒的比例調配.....	20
表 4-1 石墨顆粒比例與複合材料視密度與體密度.....	31
表 4-2 複合材料之體密度與石墨體積分率.....	31
表 4-3 石墨體積分率、複合材料體密度與複合材料比熱.....	32
表 4-4 TPS 2500 量測結果	32

圖目錄

圖 2-1 TPS2500 感應器及熱源	14
----------------------------	----

圖 2-2	鑽石與 SiC 顆粒體積分率 20% 的鋁基複合材料	14
圖 2-3(a)	DEM 理論結果與量測結果，實驗值與理論值比較	15
圖 2-3(b)	DEM 理論結果與量測結果，體積分率與導電率關係	15
圖 3-1 (a)	鱗狀石墨外觀俯視圖	21
圖 3-1 (b)	鱗狀石墨橫截面	21
圖 3-2 (a)	顆粒石墨外觀俯視圖	22
圖 3-2 (b)	顆粒石墨橫截面	22
圖 3-3	擠壓鑄造流程圖	23
圖 3-4	擠壓鑄造模具示意圖	24
圖 3-5	擠壓鑄造擠製示意圖	24
圖 3-6	TPS2500 熱傳導量測示意圖	25
圖 3-7	TPS2500 量測結果圖型	25
圖 4-1	鋁基複合材料之塊材外觀	33
圖 4-2	塊材切割成熱傳導試片外觀	33
圖 4-3 (a)	石墨體積分率 74.6% 複合材料金相組織	34
圖 4-3 (b)	石墨體積分率 64.1% 複合材料金相組織	34
圖 4-3(c)	石墨體積分率 59.3% 複合材料金相組織	35
圖 4-3(d)	石墨體積分率 50.2% 複合材料金相組織	35
圖 4-3(e)	石墨體積分率 43.0% 複合材料金相組織	36

圖 4-4 (a) 石墨鋁基複合材之顯微結構 SEM 影像·····	37
圖 4-4 (b) 石墨鋁基複合材之顯微結構 SEM 影像·····	37
圖 4-5 石墨-鋁基複合材料的 XRD 圖·····	38
圖 4-6(a) 石墨體積分率 74.6%，A356-石墨界面 SEM 影像，5000 倍	39
圖 4-6(b) 石墨體積分率 64.1%，A356-石墨界面 SEM 影像，5000 倍	39
圖 4-6(c) 石墨體積分率 74.6%，A356-石墨界面 SEM 影像，10000 倍	40
圖 4-6(a) 石墨體積分率 64.1%，A356-石墨界面 SEM 影像，10000 倍	40
圖 4-7 A 試片於 TPS2500 導熱係數儀之量測結果·····	41
圖 4-8 熱傳導係數與石墨體積分率關係圖·····	41
圖 4-9 TPS 熱傳導係數實驗值與理論值·····	42
圖 4-10 熱在樣品內擴散圖·····	42

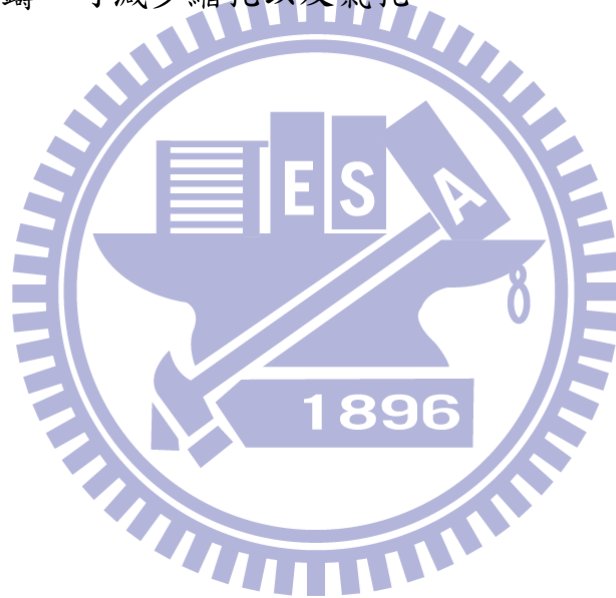


第一章 前言

近年來電子元件蓬勃發展，其體積逐漸縮小，功率卻與日俱增。如何在狹小的空間中排除廢熱使元件保持最佳性能，成為電子產業持續發展的關鍵課題，舉例來說，高功率的發光二極體(Light Emitting Diode, LED)為目前科技業最具前景的產品之一，但是，隨著高功率而產生的大量廢熱將嚴重影響 LED 的發光品質，高功率 LED 的光電轉換效率值(Wall-Plug efficiency ; WPE)相當有限，目前僅約 15%~25%的功率轉換為光，其餘皆以熱量形式散出，倘若熱量無法迅速排除，將會使 LED 亮度下降以及元件嚴重耗損，進而使 LED 的波長產生偏移^[1]，而欲改善 LED 晶片的散熱情況，使用高熱導的材料來當作基板是最直接有效的方法，現今多採用銅片為其散熱基底^[2]，銅雖然為導熱係數最高的金屬，但是其價格及密度皆為鋁的三倍，此外，相較於鋁，銅有著無法擠型成形以及不易加工的缺點，因此若能善用鋁基材良好的機械性質，輔以強化材的高導熱係數，研發出具有高導熱係數的鋁基複合材料，產生的優異性質可取代許多傳統材料並給予許多科技產品新的可能性以及發展空間。

具有高導熱係數的強化材料包括人造鑽石、碳纖維、天然石墨等。相對於人造鑽石以及碳纖維，石墨的優點在於成本低廉且容易取得，其六角形基底面 (Hexagonal Basal Plane) 的導熱係數可高達 1500W/mK ~ 2000W/mK^[3]，若能有效利用其導熱性質，可望將提升原有鋁基複合材的

熱傳導係數。若石墨體積分率越高，則複合材料之導熱係數越高。但碳與鋁界面的潤濕性(wettability)不佳^[4]，造成石墨-鋁基複合材料相對於其他高導熱鋁基複合材更加難以製造，若是鋁與石墨界面反應產生 Al_4C_3 陶瓷相，則將降低複合材料的導熱性能；本實驗採用擠壓鑄造法，將鋁湯注入石墨預型體的孔隙之間，以期得到均質的石墨-鋁基複合材，此方法的優點為(1) 操作容易，快速且經濟，(2) 高溫反應時間短，無較厚的 Al_4C_3 反應層產生^[5] (3) 高溫擠鑄，可減少縮孔以及氣孔^[6]。



第二章 文獻回顧

2-1 鋁基複合材料(Aluminum Matrix Composites, AMCs)

鋁合金為工業上最被廣泛使用之金屬材料，其優異的基本物理性質包括低密度、高延展性、高導電導熱、抗大氣腐蝕等；隨著科技的發展，工業界對材料性質的要求也日漸提高，於是以鋁合金為基材，再加入強化材料，生成具有更優異物理性質的鋁基複合材料成為新型材料的發展重點之一。此外，由於鋁合金有著低熔點及易加工的特性，鋁基複合材料的製程相對於其他金屬基複合材料具有更大的發展潛力與空間。鋁基複合材料可依據其強化材型態的不同，分為下列四類^[7-10]：

A. 顆粒強化材 (Particle Reinforcement)

顆粒強化材為最常見以及成本最低廉之強化材料，通常為陶瓷或者氧化物顆粒，可有效增加複材的機械或物理性質，例如將 SiC 加入 A356 鋁合金中，當體積分率達到 60% 以上時，其複材彈性係數 (Young's Modulus) 可到達 220GPa 以上，且熱傳導係數 (Thermal Conductivity) 亦達 110W/mK^[10]。顆粒強化材鋁基複合材的特色為均質且無方向性 (isotropic)，並可二次加工。

B. 連續纖維強化材 (Continuous Fiber Reinforcement)

連續纖維強化材的成分通常為碳、氧化鋁 (Al_2O_3)、碳化矽 (SiC) 等，在複合材中可以平行排列或者互相交織。此強化材可大幅提升複合材料的

機械以及物理性質，例如鋁基材中若含有體積分率 60% 的連續 Al_2O_3 纖維時，其拉伸強度 (Tensile Strength) 可達 1500MPa，而彈性勁度 (Elastic Stiffness) 為 240GPa^[8]。但纖維製造成本高昂，且複合材料也難以二次加工。

C. 不連續纖維強化材 (Discontinuous Fiber Reinforcement)

不連續纖維指的是在複合材料中強化材為較短之纖維，且排列無特定方向，其性質介於顆粒強化複合材與連續纖維複強化材之間，常見的有氧化鋁^[12]或碳化矽短纖維。

D. 鬚晶強化材 (Whisker Reinforcement)

鬚晶強化材為直徑小於 $2\mu\text{m}$ 的單晶無缺陷纖維材料，相對於其他強化材，鬚晶具有最佳的物理性質，可最大程度優化複合材料，但由於價格昂貴且會隨著時間而劣化，使的鬚晶強化複合材料的實用價值有限。

2-2 鋁基複合材料製程技術

Huda^[7]等人將鋁基複合材料分為下列兩種：^[7-9,13-21]

(1) 固相製程 (Solid Phase Fabrication Methods)：

常見的固相製造技術包括擴散接合(Diffusion Bonding)、粉末冶金 (Powder Metallurgy) 等。擴散接合是將排列好的纖維強化材置於鋁箔上，隨後置入真空腔體內施以高溫高壓，使金屬基材與強化材間互相擴散，製

成無空孔之複合材料，若纖維表面與基材潤濕性較佳，則可使用熱壓法製作複合材料，以降低製造成本；粉末冶金法普遍用於不連續纖維或者顆粒狀強化複合材，將調配好之強化材料置於模具中並施以壓力使顆粒間界面緊密接合，隨後予以燒結或熱壓，使材料間產生固相反應而生成複合材料。

(2) 液相製程 (Liquid Phase Fabrication Methods) [7-9,13-21] :

常用的液相製造技術包括擠壓鑄造(Squeeze Casting)、液相浸透(Liquid Metal Infiltration)、離心鑄造(Centrifugal Casting)與流變鑄造(RheoCasting)等。擠壓鑄造法在 1878 年由蘇俄的 Chernov 首先發展出此技術，其方法為將熔融的金屬擠壓至強化材預型體的孔隙間，並保持適當壓力直到金屬液凝固，此方法用途廣泛，製程容易控制且可依模具形狀鑄造出不同型體之複合材料。真空浸透是將金屬塊材置於預壓過的強化材預型體之上，而後將模具抽真空，利用重力或壓力差使金屬液滲進入強化材孔隙之中，此方法可得到幾無空孔之材料，但製程較複雜且不易變動。離心鑄造原理類似真空浸透，唯金屬液所受其壓力來源改成離心機產生之離心力，其最大的缺點為難以得到均質的複合材料。流變鑄造為 1972 年由麻省理工研究人員所發展出的製程，將熔融之液態金屬與強化材均勻攪拌並冷卻至固液共存區，隨後將此半固態黏漿置於冷室以壓鑄機鑄成複合材料，但若是強化材與液態金屬潤濕性不佳或者比重差距過大，則較不適用流變鑄造製程。

2-3 高導熱鋁基複合材料

高導熱鋁基複合材料主要利用碳纖維，鑽石，碳化矽等高熱傳導材料 [22-26] (表 2-2) 來加強鋁基複合材料的導熱係數，與鋁合金相比，鋁基複合材料除了導熱係數有所提高，亦通常具有較低的熱膨脹係數，這種高導熱低熱膨脹的性質為散熱技術持續發展提供有利條件。高導熱鋁基複合材料的研究發展的關鍵在於強化材的選用，碳纖維由於具有高達 2000W/mK 的高熱傳導係數，最常被當作強化材以增加熱傳導係數，當碳纖維的體積分率達到 63% 時，複合材料沿碳纖維方向的熱傳導係數可達 654W/mK [27]，但碳纖維的價格過高，在生產上難以大量運用；鑽石具有 2000W/mK 以上的導熱係數，A.L.Geiger 利用鑽石與 SiC 顆粒，以擠壓鑄造法製作出鑽石體積分率 20% 的鋁基複合材料(圖 2-1)，其導熱係數可提升至 215W/mK [24]，但一樣有成本過高無法量產的問題；高純度碳化矽的導熱係數僅約 270W/mK ，難以大幅提升鋁基複合材之導熱係數。相較之下，石墨不僅價格低廉，其基底面的導熱係數高達 $1500\text{-}200\text{W/mK}$ (表 2-3)，而高熱傳導石墨薄片的熱傳導係數可達 500W/mK ，故若以石墨為強化材，應可有效提高鋁基複合材料之熱傳導係數。但是，碳與鋁的潤濕性不佳，根據 B. P. Krishnan [4] 指出，液態純鋁於 730°C 時與碳的接觸角為 145° ，即石墨-鋁的界面接合不佳，導致在製程上難以將鋁與石墨緊密結合，其界面也容易散射電子與聲子，使熱流難以於複合材料中傳導，進而降低導熱係數。欲改

善石墨與鋁之間的潤濕性，可改用含有矽之鋁合金^[5]，例如 A356(表 2-4)，以降低其表面能；也可在石墨表面無電鍍銅^[28]，以增加其潤濕性。但無電鍍製程所產生廢液過多，易造成環境汙染，故不適合大量生產；此外，若是外加壓力，強迫鋁與石墨界面緊密接合，也可達到改善界面性質的效果。若是能有效解決石墨與鋁之間潤濕性不佳的問題，石墨-鋁基複合材將成為最具發展潛力的高導熱鋁基複合材料^[29-31]。

由上述可知，若欲以石墨作為顆粒強化鋁基複合材的強化材，可採用含 Si 比例較高的 A356 合金，並利用製程簡便的擠壓鑄造法來將鋁湯注入石墨預型體孔隙中，同時擠鑄的壓力或可將石墨與鋁基材緊密結合，避免產生界面性質不佳的問題。複合材料的導熱係數的高低由石墨在複合材中的體積分率決定，而鱗狀石墨的層狀堆疊比起顆粒狀石墨的堆積具有較高的堆積密度，且鱗狀石墨可充分將基底面優異的熱傳導性表現在整體複合材上，使複合材料有更高的熱傳導係數。因此，若能以鱗狀石墨作為強化材，A356 鋁合金作為基材，輔以擠壓鑄造製程，將可得到高熱傳導係數的鋁基複合材料。

2-4 熱傳導係數量測

熱傳導係數量測基本原理：^[32,33]

給予塊材一端穩定熱源，測量塊材兩端之溫度差以及長度，便可算出塊材

內部的溫度梯度，並考慮截面積，

T₁

T₂

即可算出此材料之熱傳導係數，

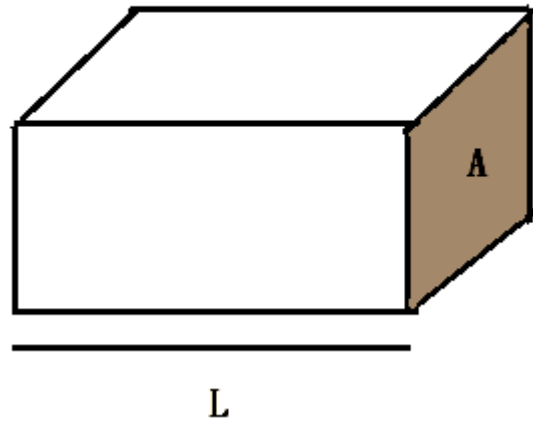
如公式 (1) (2) (3) (4) 所示：

$$q = -k \times A \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

$$\frac{qL}{\lambda A} = (T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$k = \frac{qL}{A(T_1 - T_2)} \quad (3)$$

$$R = \frac{L}{kL} = \frac{T_1 - T_2}{q} \quad (4)$$



q: 熱流(J)

k: 熱傳導係數(W/mK)

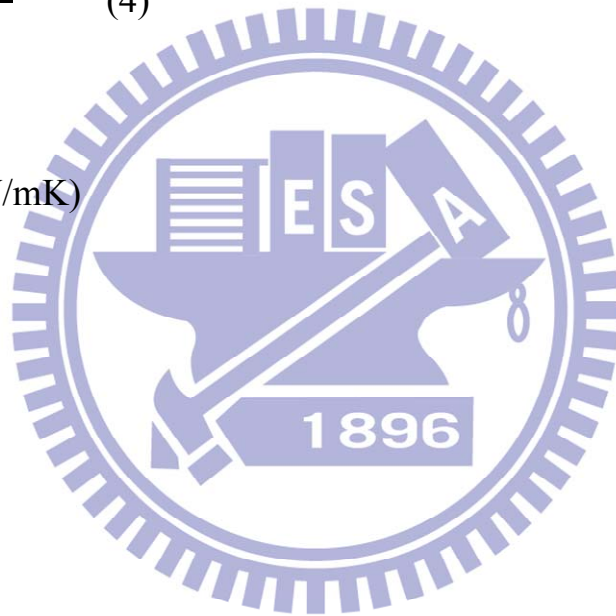
R: 熱阻(°C/W)

A: 面積(m²)

L: 長度(m)

T₁: 低溫端(°C)

T₂: 高溫端(°C)



現今量測熱傳導係數的技術可分成(a)穩態(Steady State Method)以及(b)瞬變(Transient State Method)兩類。穩態分析法的原理為：將試片一端加熱，當塊材與熱源達熱平衡時，再由偵測器測量由塊材另一端所釋放的熱流，並藉此計算塊材的熱擴散係數以及比熱，量測的方法可分為三種：1.Hot Wire 2.Hot Plate 3.Heat Flow Meter。穩態分析法的量測對象只限於線材以及

塊材，且無法直接測得熱傳導係數，所測得的數據為材料的熱流以及溫度梯度，再經由公式(1)計算獲得熱傳導係數；此外，穩態分析法為接觸式的測量，如何避免測量時所產生的接觸熱阻，亦是一大難題。瞬變分析法則是近年來較新穎的量測方法，此分析法主要分為兩種方法，1.Laser Flash 2.Hot Disk。這兩種技術皆可以避免接觸時產生的熱阻，且可量測塊材不同軸向的熱傳導係數，所需時間短，測量範圍廣。

Laser Flash 的測量是將雷射射向塊材的一面，同時紅外線偵測器將測量塊材另一面的溫度，無需等塊材與熱源達到熱平衡，便可計算熱傳導係數，Laser Flash 只能測量塊材的熱傳導值，且對試片條件要求較高，若是塊材表面不平整或可吸收光或透光，將嚴重影響測量結果。

Hot Disk法的測量原理是基於Silas Gustafsson^[34,35]所發明的瞬變平面熱源法(Transient Plane Method, TPS)，TPS技術是由Hot Wire發展而來，其感測器為鎳線經蝕刻處理後形成具螺旋結構的薄片（圖2-1），可同時作為熱源與溫度感測器，給與試片熱源時，螺旋結構的感測器可以量測試片不同位置的溫度與熱流傳遞所需時間，並藉此測量導熱係數以及熱擴散係數。Hot Disk法可測量固體、粉末、薄膜、液體等材料的熱傳導係數及熱擴散係數，並以此計算出複合材料比熱，TPS亦可測量材料異向性(anisotropic)的性質，且其試片也較Laser Flash法容易製備，只需要相對平整的樣品表面即可。

2-5 複合材料之導熱係數計算

複合材料的物理性質為可調整的 (Tailorable)，也就是說，強化材或者基材的體積分率多寡，將決定複合材料的物理性質，包括密度、熱膨脹係數、熱傳導係數等 [22,24,34-40]，因此 J-M Molina 針對顆粒強化複合材料的導熱性質進行分析，並利用 DEM (Differential Effective Medium) 法來進行計算 [22]，預估其熱性質。根據研究結果 (圖 2-2)，影響顆粒強化複合材料的導熱係數的因素可分為四項：

1. 基材與強化材本身的熱傳導係數
2. 強化材於複合材中所佔體積分率
3. 強化材顆粒的大小
4. 強化材與基材間介面的性質

J-M Molina 根據 DEM 理論與發展出下列三個公式，以計算複合材料的熱傳導係數：

$$\frac{dk}{dV_p} = k \sum_i f_i \frac{-(k - k_{ri}^{eff})}{(k - k_{ri}^{eff})S - k} \quad (5)$$

$$k_r^{eff} = \frac{k_r^{in}}{1 + \frac{k_r^{in}}{ha}} \quad (6)$$

$$\int_{k_m}^{k_c} \frac{dk}{k \sum_i f_i \frac{-(k - k_{ri}^{eff})}{(k - k_{ri}^{eff})S - k}} = -\ln(1 - V_p) \quad (7)$$

S: 材料本質係數，顆粒型材料約為 $\frac{1}{3}$

h: 介面熱傳導係數

a: 強化材顆粒大小

k_f^{eff} : 強化材有效熱傳導係數

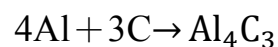
k_f^{in} : 強化材本身熱傳導係數

K_m : 基材熱傳導係數

K_c : 複合材料熱傳導係數

V_p : 強化材體積分率

首先由(6)式算出強化材顆粒能有效提供的熱傳導係數，再代入(5)式，並考慮強化材的體積百分率，便可獲得強化材在整體複合材料中提供的有效熱傳導係數，最後，將公式(7)中的左式積分，由基材的熱傳係數積分至複合材料的熱傳導係數；而右式可由實驗測得強化材之體積分率並計算其結果，再與左式比對，便可算出複合材料的熱傳導係數為何。在計算過程中，我們只考慮基材與複合材的熱傳導係數，然而，在鑄造複合材料的過程中，鋁基材與石墨在高於 500°C 時即會反應生成 Al_4C_3 [41-43]



Al_4C_3 為陶瓷相，因此存在會在基材與強化材的介面間產生一層熱傳導障礙，使公式(6)中的 h 大幅上升，導致複合材料的熱傳導係數下降 [44]。

表 2-1 各種材料之熱性質與密度 [20][28]

	熱傳導係數(W/mK)	熱膨脹係數($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	密度(g/cm^3)
鋁	247	23	2.7
金	315	14	19.32
銅	398	17	8.9
鉛	30	39	11
鉬	142	4.9	10.22
鎢	155	4.5	19.3
鈹	260	6	3
鑽石	~2000	10.9	3.51
氮化鋁	320	4.5	3.3
碳化矽	270	3.7	3.3
鱗狀石墨	140~500	0.5-2	1.5-2.1
顆粒石墨	100~250	1-5	1.5-2.1

表 2-2 石墨基底面與垂直基底面之性質^[28]

性質	基底面方向	垂直基底面方向
電阻 (Ωm)	0.4	60
彈性係數 (GPa)	1020	36.5
抗拉強度 (GPa)	96	34
熱傳導係數(W/mK)	2000	10
熱膨脹係數($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-0.5×10^{-6}	27×10^{-6}

表 2-3 A356 成分^[10]

	Si	Mg	Cu	Fe	Ti	Zn	Mn
含量(wt%)	6.5-7.5	0.25-0.45	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1

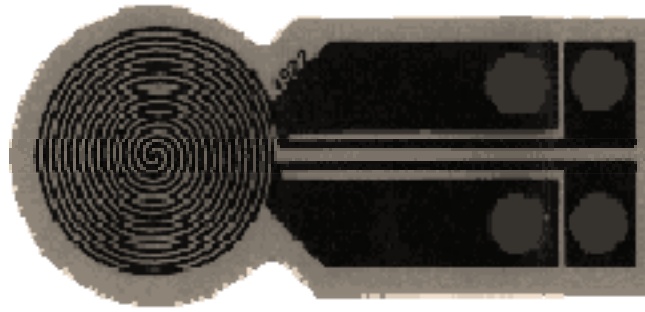


圖 2-1 TPS2500 感應器及熱源

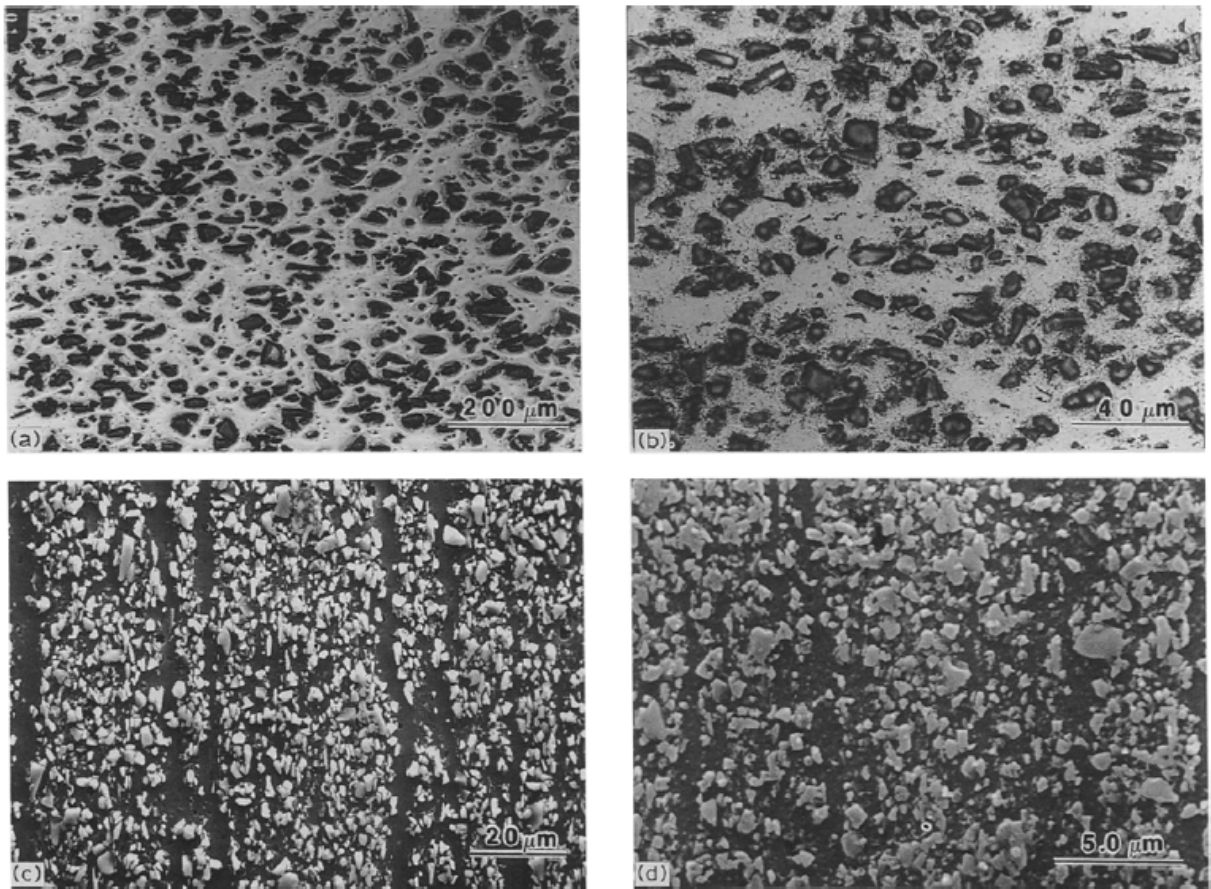
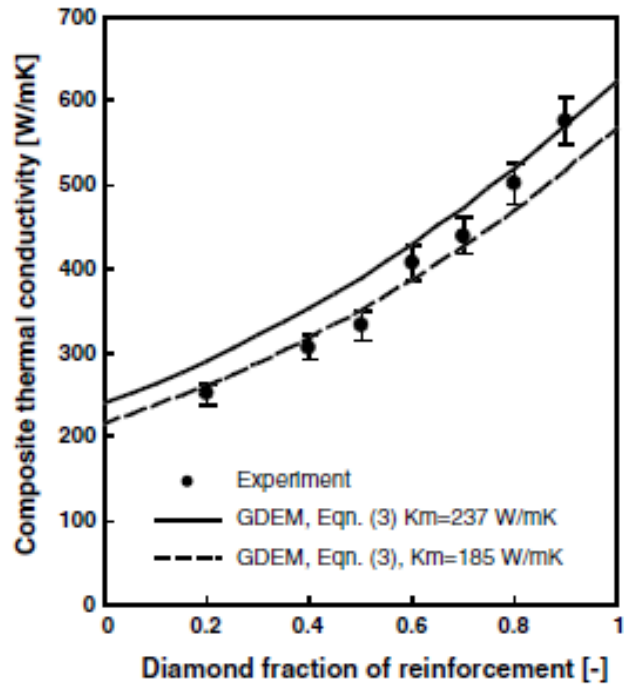
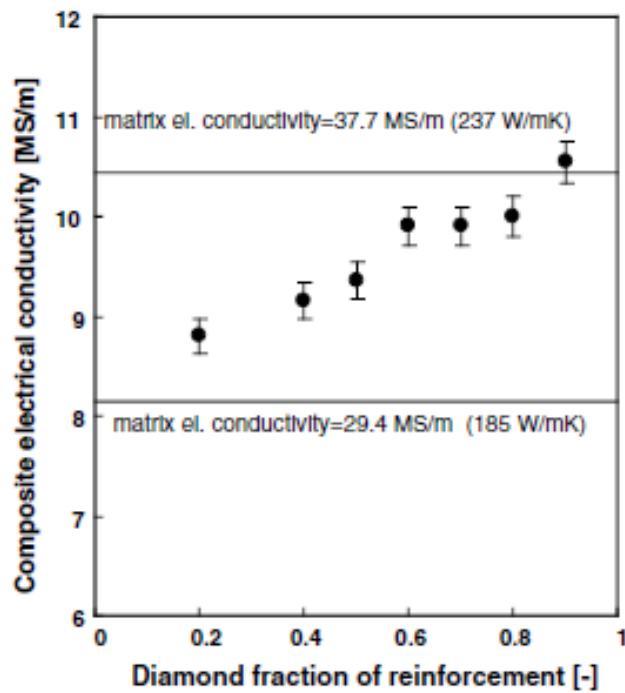


圖 2-2 鑽石與 SiC 顆粒體積分率 20% 的鋁基複合材料 [24]



(a)



(b)

圖 2-3 DEM 理論結果與量測結果 [22]

(a) 實驗值與理論值比較 (b) 體積分率與導電率關係

第三章 實驗方法

3-1 實驗材料

3-1-1 材料選用

本實驗所用之強化材為鱗狀石墨與顆粒石墨（圖 3-1），皆為工業潤滑用石墨，粒徑約 1mm；鋁基材選用熔融時鋁湯流動性較佳的 A356，其性質如表 3-1 所示：

3-1-2 顆粒調配

將不同比例(表 3-2)的鱗狀石墨與顆粒石墨，總重 50g，置入丙酮中，以超音波震盪器震 15 分鐘，以去除表面雜質，烘乾後置入藥品罐，將罐子置於於球磨機上滾 3 小時，使兩種石墨均勻混合。

3-2 複合材料的擠壓鑄造

3-2-1 擠壓鑄造流程

本實驗之擠壓鑄造流程如圖 3-2 所示

3-2-2 儀器設備

模具為一高 15cm，內徑 6×6cm 的正方形模穴，外徑為半徑 10cm 之圓形對半模，外層以一加熱線圈套住，再以耐火棉包住線圈，所使用之擠壓機為萬能試驗機。

3-2-3 模具安裝（圖 3-3）

在萬能試驗機工作平台上鋪一層耐火布，並在其上放置一耐熱平版，將

模具以及加熱套置於耐熱版上，施力 10KN 將模具與加熱線圈套牢。

3-2-4 粉體預壓

將調配好的石墨粉體倒入模具內，後以 10MPa 之壓力預壓粉體，使其密實平整。

3-2-5 粉體預熱

以加熱線圈加熱模具與石墨，並用耐火綿包住加熱線圈以減少散熱，同時將熱電偶置入模孔並接觸石墨粉體，將加熱線圈溫度設定為 550°C。

3-2-6 擠壓鑄造

當石墨溫度到達 550°C，將熱電偶取出，倒入熔融的 750°C A356 鋁湯，隨即放入沖頭進行擠壓，當擠製壓力到達 50MPa 時持壓 120 秒，令複材成型後，除去壓力並關掉加熱線圈電源，最後退模取出試片。

3-3 測試及分析

3-3-1 密度測試

將複材試片以 100°C 去離子水煮 2 小時，再放置令其冷卻，根據阿基米德原理，以精密天平測出浮重 S，擦乾試片後測出濕重 W，把試片烘乾後測出乾重 D。

$$\text{視密度} = \frac{D}{D-S} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\text{體密度} = \frac{D}{W-S} \quad (\text{g/cm}^3)$$

3-3-2 石墨體積分率之計算

根據混合法則,假定石墨的體積分率為 V ,則:

$$2.1V + 2.68(1-V) = \text{體密度}$$

3-3-3 石墨-鋁基材界面分析

利用 X-光繞射儀以確定 A356 與石墨是否形成 Al_4C_3 反應層,以每分鐘五度的速率進行範圍 20~80 度的偵測,並以 MDI ade5.0 軟體進行比對。

3-3-4 光學顯微鏡金相觀察

將鋁基複合材料切割成適當大小,以碳化矽(SiC)砂紙依序由#220, #400, #600, #800, #1200, #1500, #4000 研磨後,再以氧化鋁懸浮液(Al_2O_3) $1.0\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$, $0.05\mu\text{m}$ 進行拋光,接著將試片置入丙酮(Acetone)中以超音波震盪器震盪五分鐘將試片表面的雜質去除,將試片吹乾後利用光學顯微鏡觀察石墨與 A356 基材的表面型態與分布情況。

3-3-5 掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy,SEM)

將製備好的光學顯微鏡試片置入鍍金機中鍍 120 秒,使試片表面能充分導電,利用 Hitachi JSM6500F 型掃描式電子顯微鏡觀察石墨與 A356 的分佈以及兩者之間的界面。

3-3-6 熱傳導係數量測

將鋁基複合材料製備成兩片 $50 \times 50 \times 1.5\text{mm}$ 的薄片,將感測器以兩片試片夾住,輸入試片的大小與厚度,設定感測器給予試片 5W 以及感測時

間 0.1 秒，便可得到如 3-5 的圖，縱軸為溫度差，橫軸為特徵時間，特徵時間為熱擴散係數、探測時間與感測器半徑平方的比值，斜率即為試片之熱傳導係數。^[35]

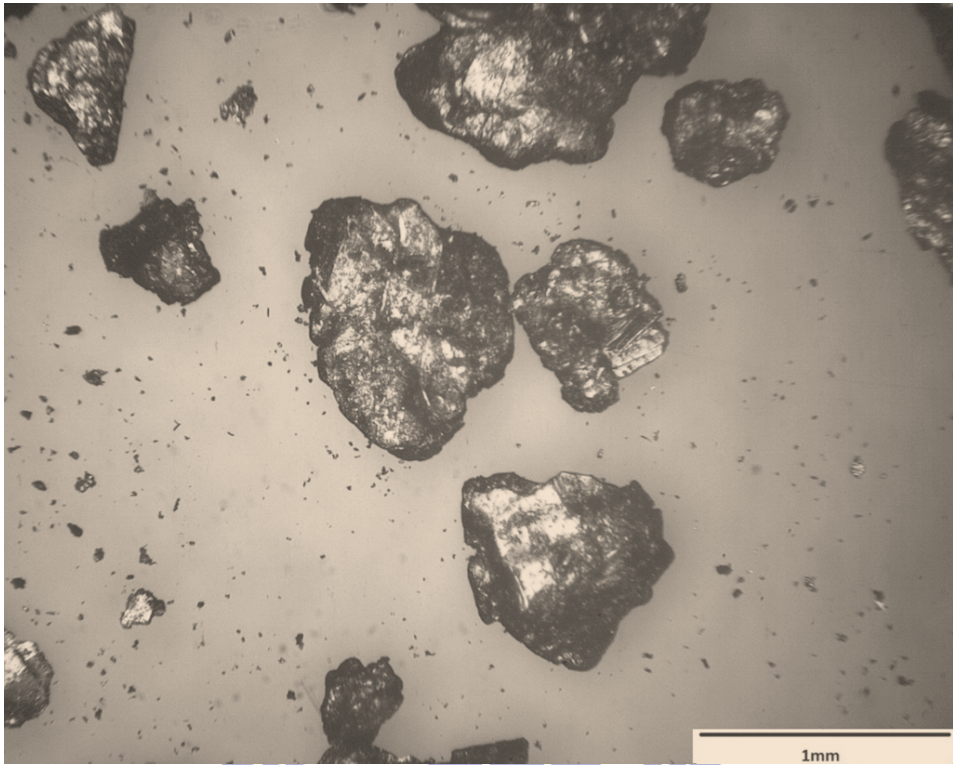


表 3-1 石墨與 A356 性質^[45]

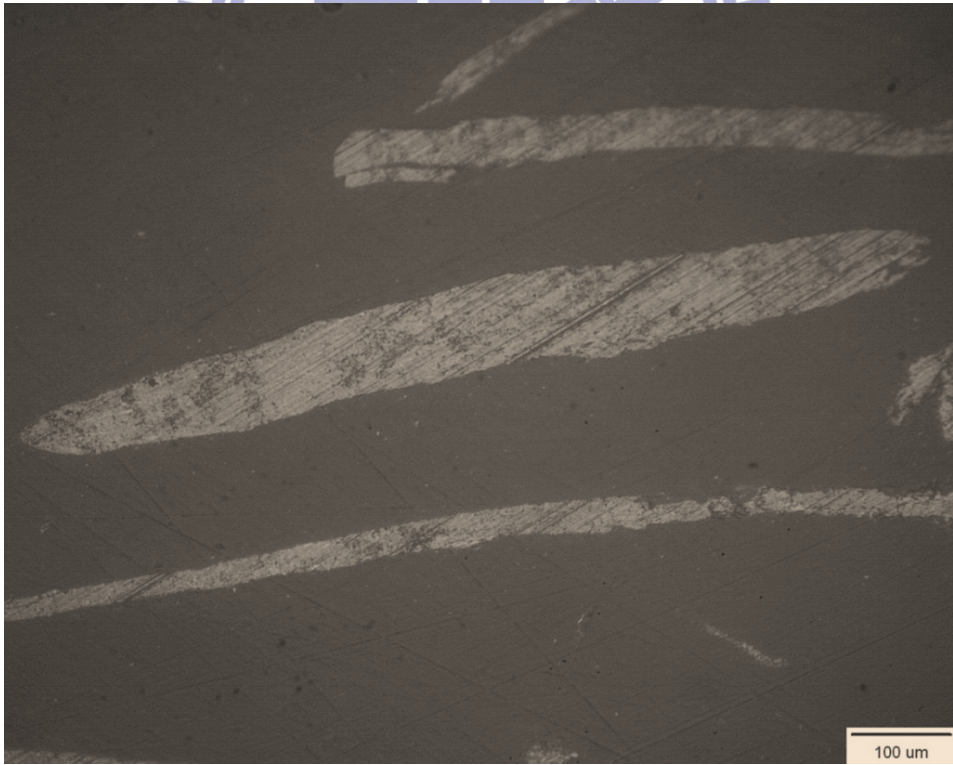
	顆粒石墨	鱗狀石墨	A356
密度(g/cm ³)	2.09-2.23	2.09-2.23	2.76
熱傳導係數(W/mK)	140-500	150-500	128
比熱(J/kgK)	100-250	710-830	900

表 3-2 石墨顆粒與鱗狀石墨之比例

試片	顆粒狀石墨 (g)	鱗狀石墨 (g)
A	2.5	47.5
B	5.0	45.0
C	7.5	42.5
D	10.0	40.0
E	50.0	0

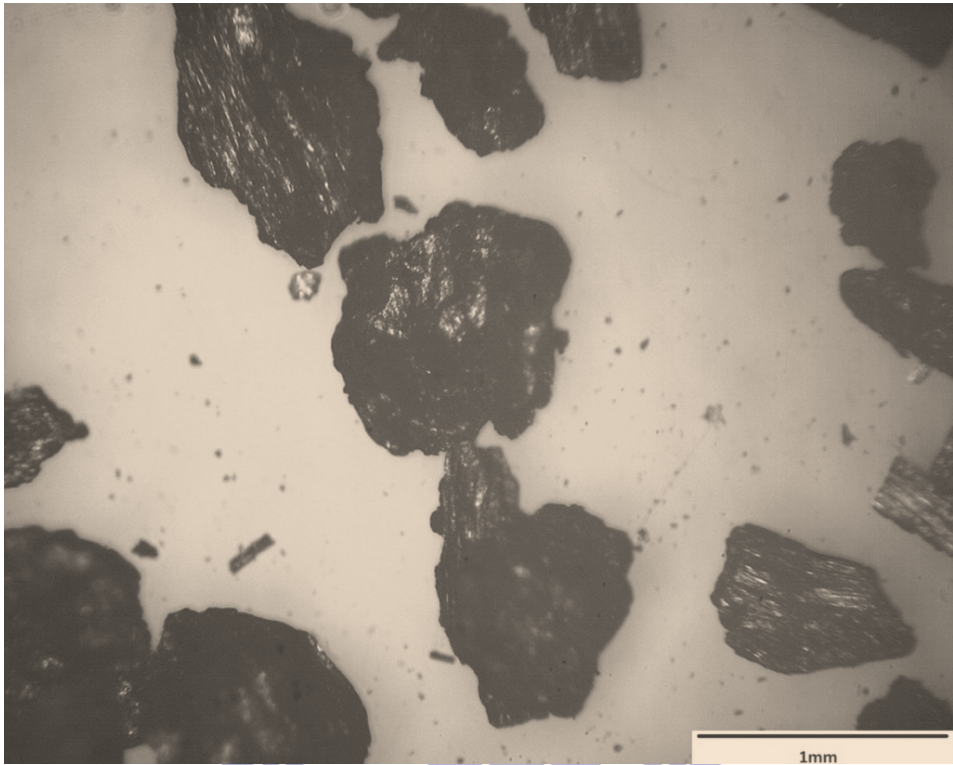


(a)

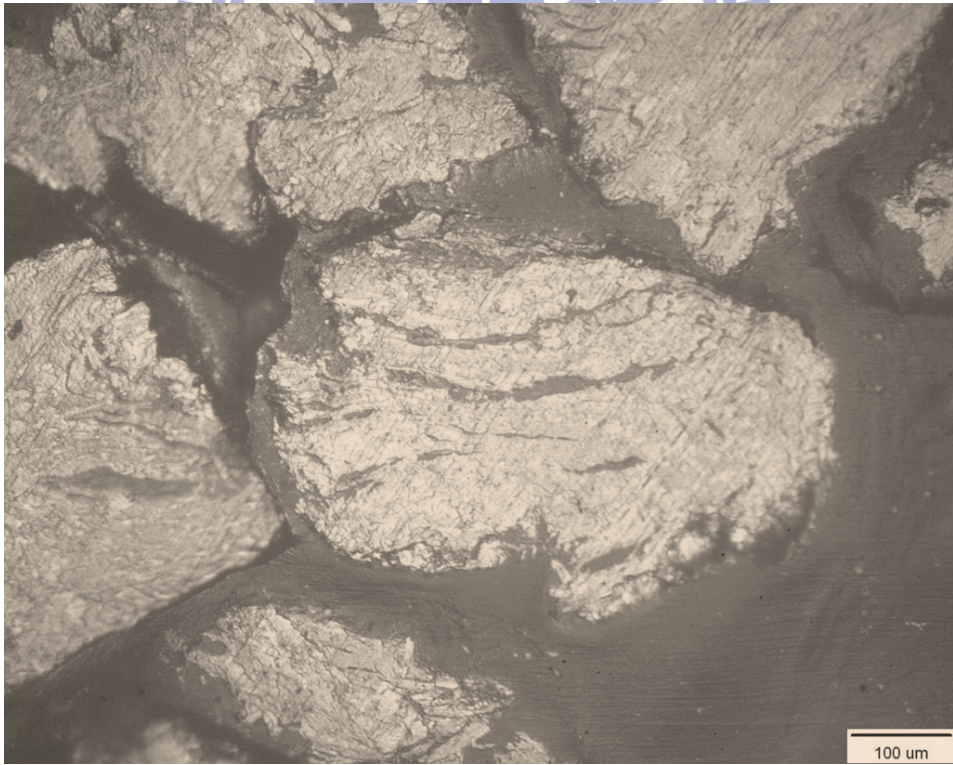


(b)

圖 3-1 (a) 鱗狀石墨外觀俯視圖 (b) 鱗狀石墨橫截面



(a)



(b)

圖 3-2 (a) 顆粒石墨外觀俯視圖 (b) 顆粒石墨橫截面

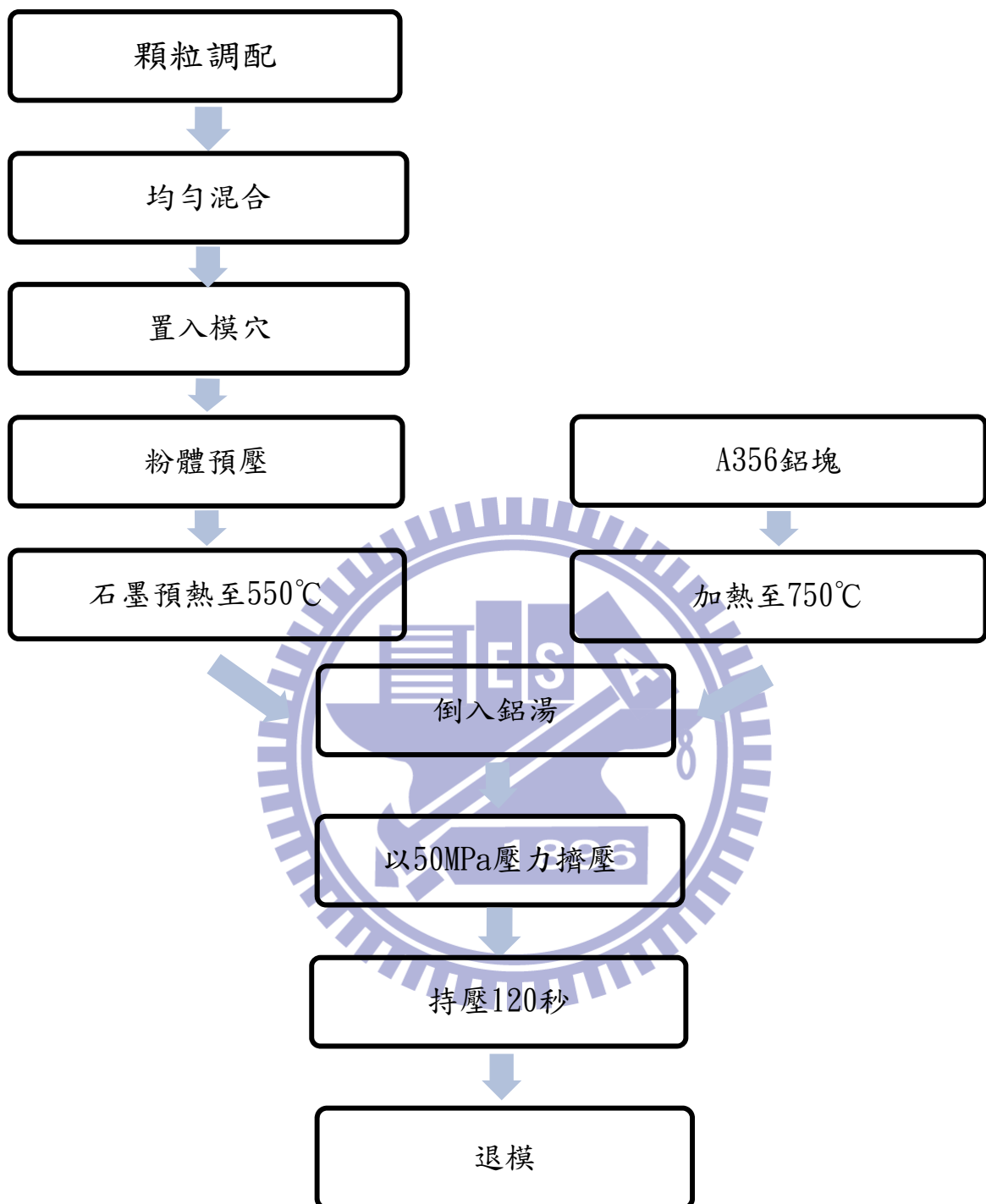


圖 3-3 擠壓鑄造流程圖

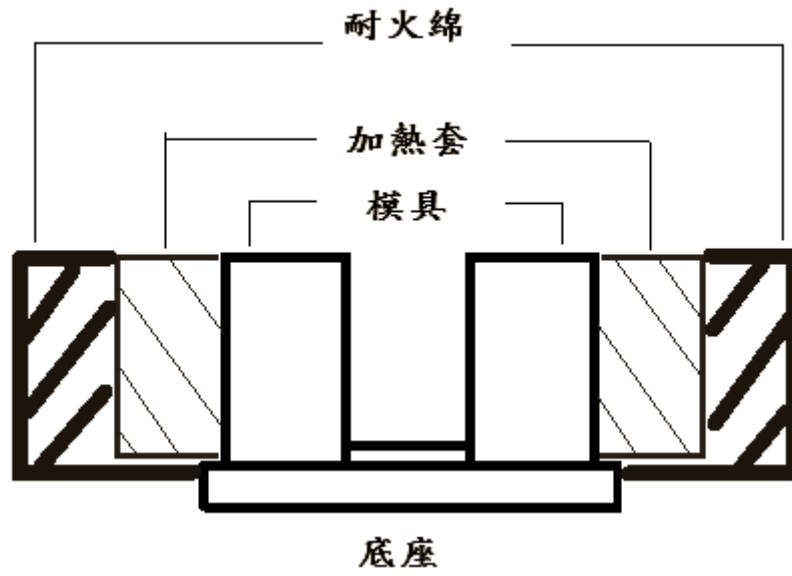


圖 3-4 擠壓鑄造模具示意圖

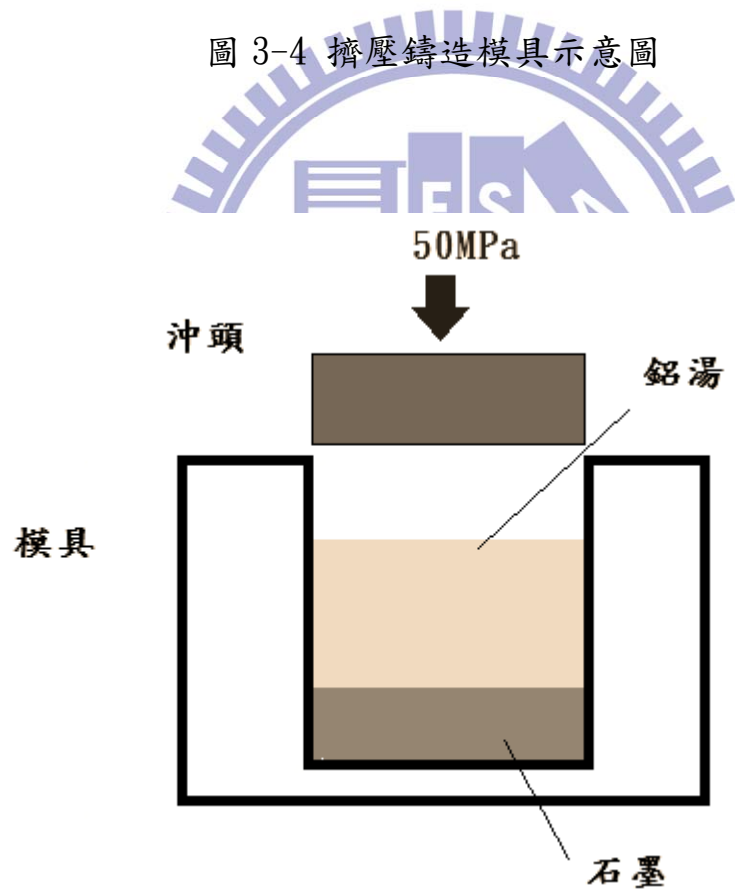


圖 3-5 擠壓鑄造擠製示意圖

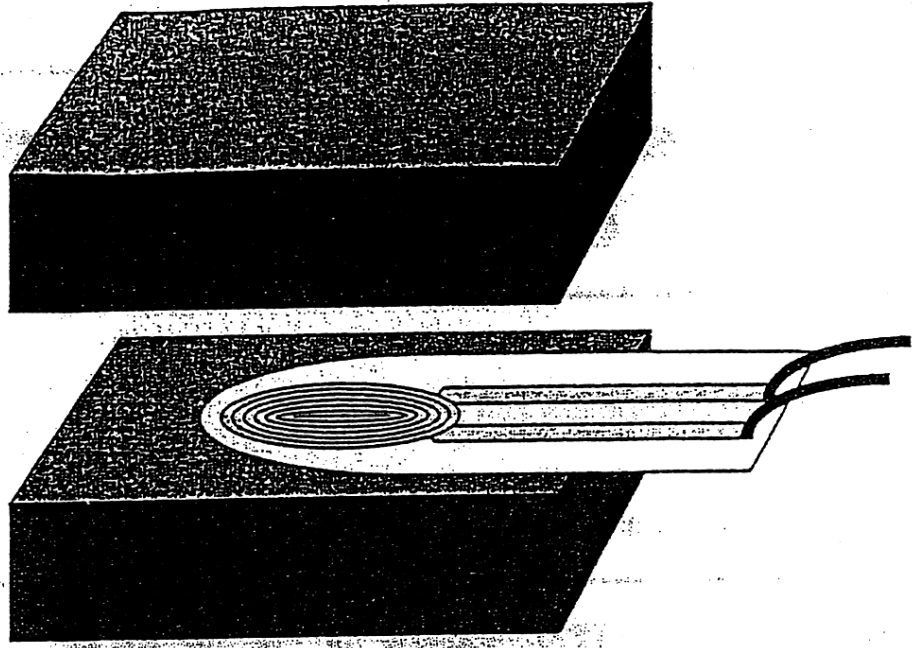


圖 3-6 TPS2500 熱傳導量測示意圖

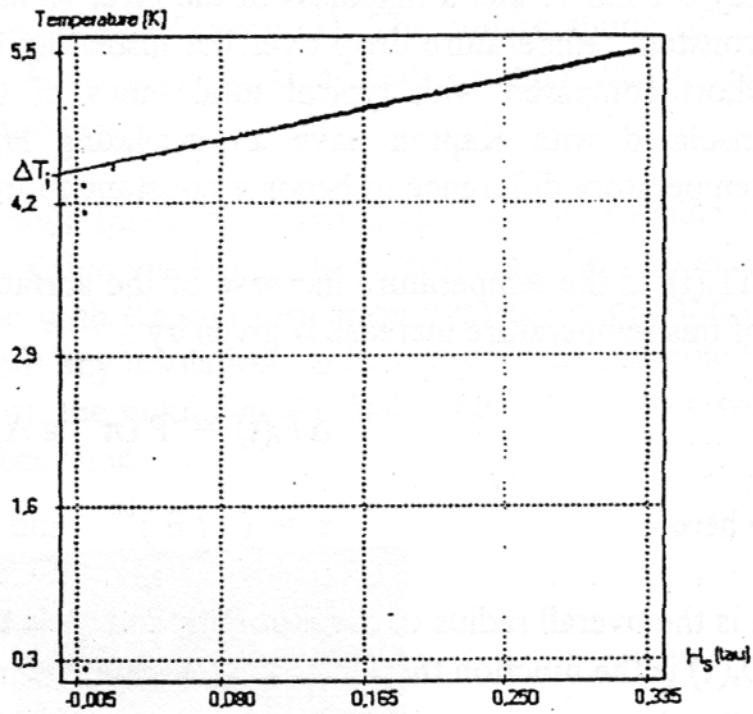


圖 3-7 TPS2500 量測結果圖型 [36]

第四章 結果與討論

4-1 鋁基複合材料密度與石墨體積分率

將擠壓鑄造後所得之塊材（圖 4-1）經切割後得到厚度 1.5mm、長寬各為 50mm 的石墨-鋁基複合材料薄片，隨後利用阿基米德法計算其視密度與體密度（表 4-1）。E 試片的石墨比例，即全為顆粒狀石墨，進行擠壓鑄造，發現由於顆粒狀石墨堆積時的孔隙較大，故難以得到高體積分率之石墨-鋁基複合材，其石墨體積分率僅約 43.6%。若增加預壓時的壓力，則會將顆粒狀石墨壓碎，但被壓碎的石墨卻無法均勻分布，導致隨後將鋁湯注入擠製複合材料時，將無法得到均質的複合材料塊材。因此，我們無法以增加壓力來提升石墨的堆積密度。根據文獻^[11]，加入不同粒徑大小的 SiC 顆粒，可有效提升其體積分率至 70%，但不同顆粒大小的石墨不如碳化矽般容易取得，因此採用不同顆粒大小來增加體積分率的方法在此難以實行。石墨形體除了顆粒狀，亦有較為扁平的鱗狀石墨，於是我們便希望嘗試利用不同形體的石墨相互混合，以期增加石墨的堆積密度，進而增加石墨於複合材料中的體積分率。

由表 4-1 中可得知，A 試片的體密度最小，而 E 試片的體密度最大，根據混合法則，由表 4-1 可推測出 A 試片的石墨體積分率最高，E 試片的石墨體積分率最低（表 4-2）。可證明當鱗狀石墨於石墨中的比例越高時，由於其堆積方式較為緊密，堆積密度較高，所以經擠壓鑄造所滲進去的鋁

湯較少，石墨於複合材料中的體積分率可由原來的 43.6% 提升至 73%。圖 4-3 為 A 到 E 五組複合材料於光學顯微鏡之金相組織（未腐蝕，倍率為 100 倍），由光學顯微鏡之影像可以明顯看出，當鱗狀石墨越多時，其層狀堆疊可產生較高的堆疊密度，產生高體積分率之石墨-鋁基複合材。隨後，我們嘗試將強化材都換成鱗狀石墨，卻發現因為其近似平板的型體，在進入模穴預壓後，造成石墨與石墨之間孔隙過於狹窄，進行擠壓鑄造製程時，鋁湯難以進入石墨與石墨間隙之中，以致於無法將複合材料成型。是故我們還是必須加入部分的顆粒狀石墨，以提供足夠的孔隙使鋁湯可順利填充至石墨之間。

根據表 4-1 所示，經擠壓鑄造後所製成的石墨-鋁基複合材料，其孔隙率約在千分之一左右，可見此製程利用熔融時流動性較佳的 A356 能確實滲進石墨之間的孔隙之間，值得注意的是，試片 A 的孔隙率明顯高於其他四組試片，有可能是因為試片 A 的石墨體積分率最高，其鱗狀石墨的比例也最高，因此 A 試片的鋁湯在石墨間所需流動的距離大於其餘試片，若是在流動過程中鋁湯一經凝固，接下來將無法繼續浸透其餘部分的石墨，而在複合材料的內部產生空孔，導致利用阿基米德法測量密度時，試片 A 的視密度明顯大於體密度。

4-2 擠壓鑄造後材料之微結構分析

由於碳-鋁之間的潤濕性不佳，因此鑄造出石墨-鋁基複合材料後，首先要注意的就是鋁跟石墨的接合情況是否良好，於是利用 Hitachi JSM6500F 型掃描式電子顯微鏡觀察其顯微組織，由圖 4-4 (a) (b) 可以看出，白色的部分為 A356 鋁合金基材，而深色的部分為石墨強化材，在經由 50MPa 的擠鑄壓力後，可看出石墨與鋁基材良好的接合在一起，其界面並無產生孔隙或者缺陷，可證明由擠壓鑄造法以及使用 A356 鋁合金，可有效改善碳-鋁潤濕性不佳的問題。

4-3 石墨-鋁基複合材料之界面分析

複合材料的界面性質往往影響複合材料的強化材與基材是否可以展現其各自的優點^[47]，若是 A356 與石墨反應產生 Al_4C_3 陶瓷相，將影響複合材料的熱傳導性質，因此將藉由 X-ray 來確定 A356 是否與石墨產生反應。如圖 4-5 所示，並無見到 Al_4C_3 的訊號，因此在擠壓鑄造時無顯著 Al_4C_3 生成，應不會降低複合材料的熱傳導性質。

利用掃描式電子顯微鏡以高倍率觀察 A356 與石墨界面，在 10000 倍，圖 4-6(C)(D) 時，發現 A356 與石墨界面無生成反應物，亦可說明 A356 與石墨幾乎不會反應生成 Al_4C_3 。

4-4 石墨體積分率與熱傳導係數

將石墨-鋁基複合材料塊材裁切成相同兩片 $50 \times 50 \times 1.5 \text{mm}$ 大小的熱傳導試片，並將 TPS2500 的感測器夾入兩片試片之間。試片 A (圖 4-7) 到 E 的熱傳導係數，如表 4-4 所示，當石墨體積分率越高時，其熱傳導係數也可提升至 263.1W/mk [圖 4-8]。根據阿基米德法所得之體密度，可計算出複合材料之比熱；而根據 TPS 法可得熱傳導係數以及熱擴散係數，而這兩項數據的比值亦為複合材料之比熱，如表 4-3，表 4-4 所示，當石墨體積分率增加，熱傳導係數上升時，複合材料的比熱也隨之下降。計算得到之比熱與量測所得比熱相距不遠，可證明石墨的體積分率計算亦具有可信度。

根據 Gustafsson 的理論，感測器所感測的溫度差與特徵時間的比值即為熱傳導係數，而在均質材料中，熱傳導係數應為一定值，故實驗所得應為直線，但圖 4-9 中的虛線為 TPS2500 所量得的圖型，並非直線而為 S 型(圖 4-9)，有可能是由於複合材料中，石墨與 A356 的導熱係數不同 (表 3-1)，A356 為金屬，因此其導熱能力主要是由自由電子貢獻；石墨無自由電子，其導熱能力為六角型碳原子環中的共振電子移動以及碳原子環相互震動來傳遞熱量 [48]。因此當溫度升高時，金屬由於電子動能變大，導熱係數增加，而石墨卻因為溫度升高時，石墨中的碳分子環較低溫時不規則震動，所以當熱流經過時，將受到干擾而有部分被散射，導致熱傳導係數降低。當熱在複合材料中傳導時，由於石墨與鋁基材間的傳導能力不同，而導致感測

器在不同部位所量得的熱傳導係數不盡相同，因而造成測量所得導熱係數並非定值。

利用 TPS 技術測量熱傳導係數時，必須輸入材料試片的厚度及大小，因為其感測器量測時需考慮熱在樣品內的擴散條件（圖 4-10），不同大小的感測器，其供給試片的瓦數大小以及量測的範圍亦不相同，所以若是真實條件較感測器的範圍大，如圖 4-10 右側所示，所測得結果將有較大的誤差，如何選擇感測器尺寸以及決定探測時間，將影響最終獲得的測量數據。

本實驗可證明當石墨體積分率增加時，熱傳導係數可顯著的提升，若需要將熱傳導係數進一步提升到與銅相當，可採用石墨純度與導熱性質更佳的鱗狀石墨，並利用擠壓鑄造製程，有可能製作出足以取代銅，成為最具前景與發展性的高熱傳材料。



表 4-1 複合材料之視密度與體密度

試片	視密度 (g/cm ³)	體密度 (g/cm ³)
A	2.259	2.248
B	2.310	2.308
C	2.338	2.336
D	2.393	2.389
E	2.434	2.431

表 4-2 複合材料之體密度與石墨體積分率

試片	石墨總體積百分率 (%)	複材體密度(g/cm ³)
A	74.6	2.248
B	64.1	2.308
C	59.3	2.336
D	50.2	2.389
E	43.0	2.431

表 4-3 石墨體積分率，複合材料體密度與比熱

試片	石墨體積分率(%)	複材體密度 (g/cm ³)	複材比熱 (MJ/m ³ K)
A	74.6	2.248	1.905
B	64.1	2.308	1.976
C	59.3	2.336	2.009
D	50.2	2.389	2.092
E	43.0	2.431	2.140

表 4-4 TPS2500 量測結果

石墨體積分率(%)	複材比熱(MJ/m ³ K)	複材熱傳導(W/mK)
74.6%	2.035	263.1
64.1%	2.111	243.2
59.3%	2.179	205.8
50.2%	2.253	189.4
43%	2.269	174.6

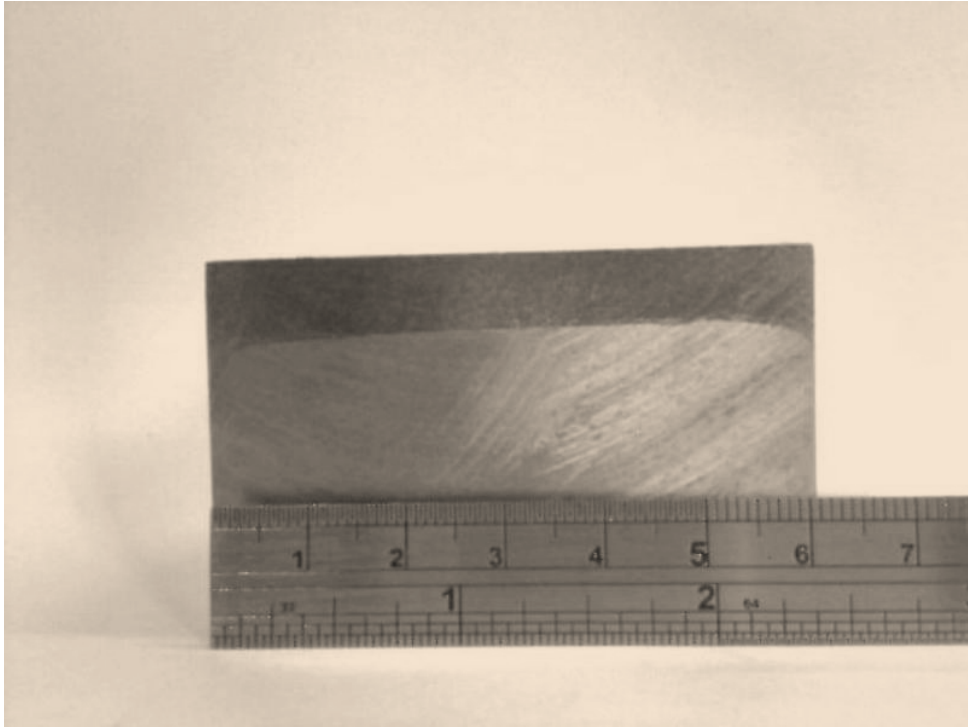


圖 4-1 鋁基複合材料之塊材側面外觀

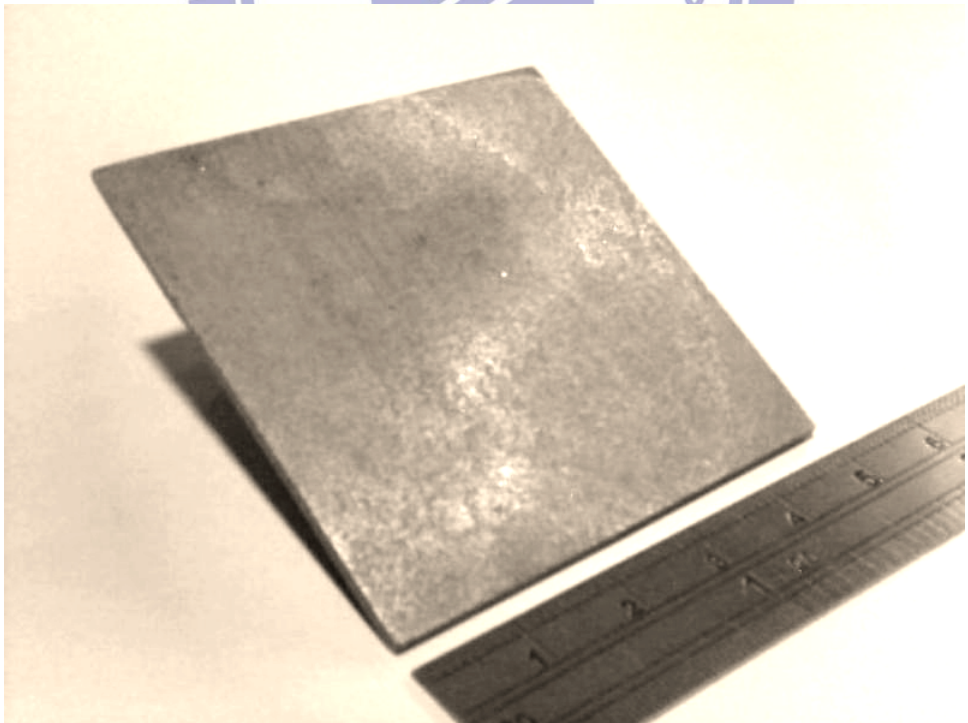
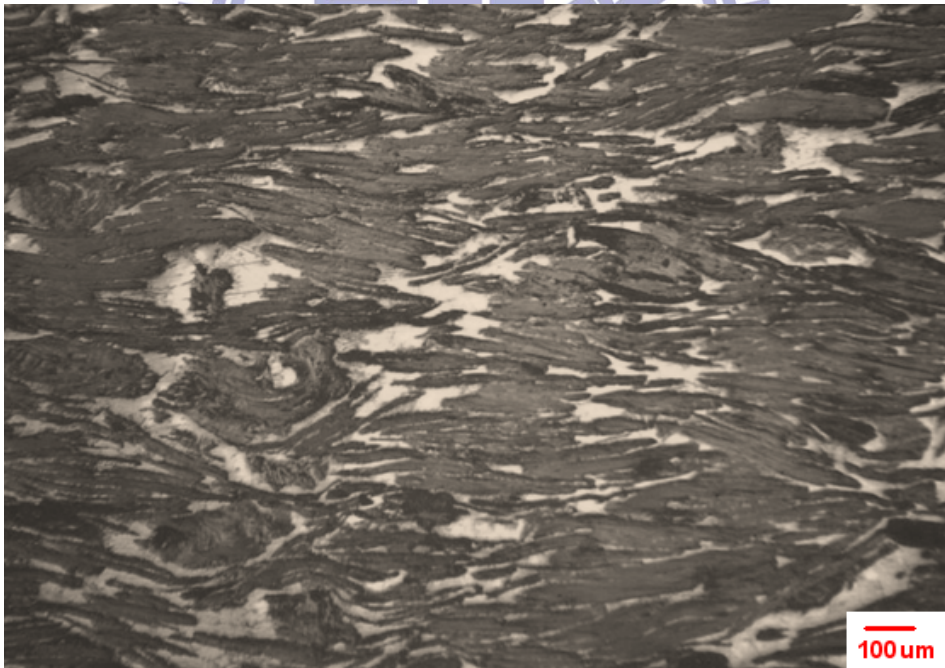


圖 4-2 塊材切割成熱傳導試片外觀



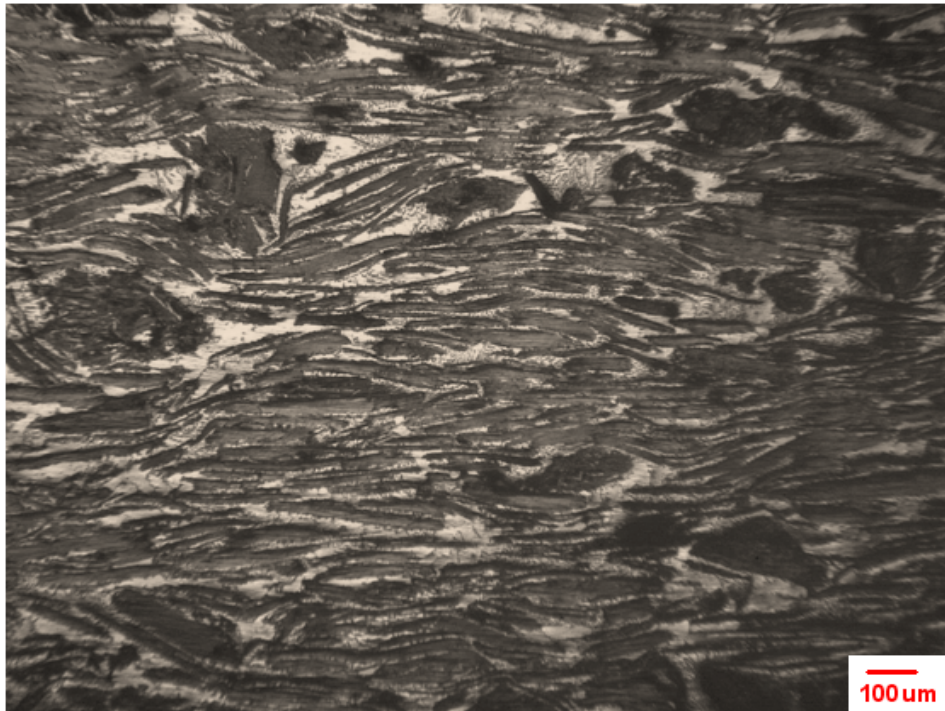
(a)



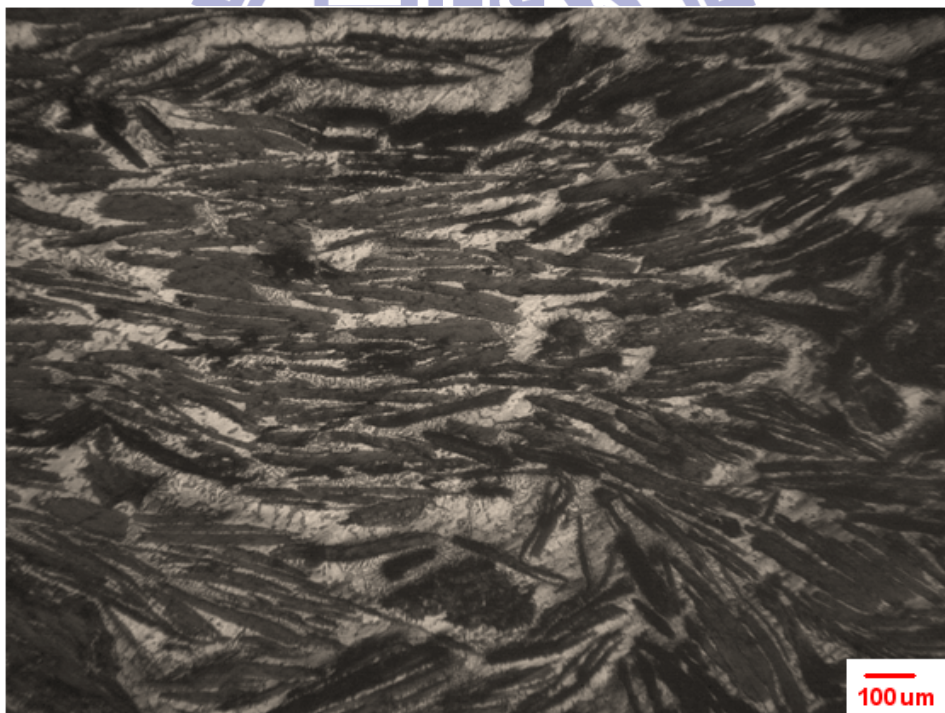
(b)

圖 4-3 不同石墨體積分率之複合材料金相組織

(a) 石墨體積分率 74.6% (b) 石墨體積分率 64.1%



(c)



(d)

圖 4-3 不同石墨體積分率之複合材料金相組織

(c)石墨體積分率 59.3%(d)石墨體積分率 50.2%

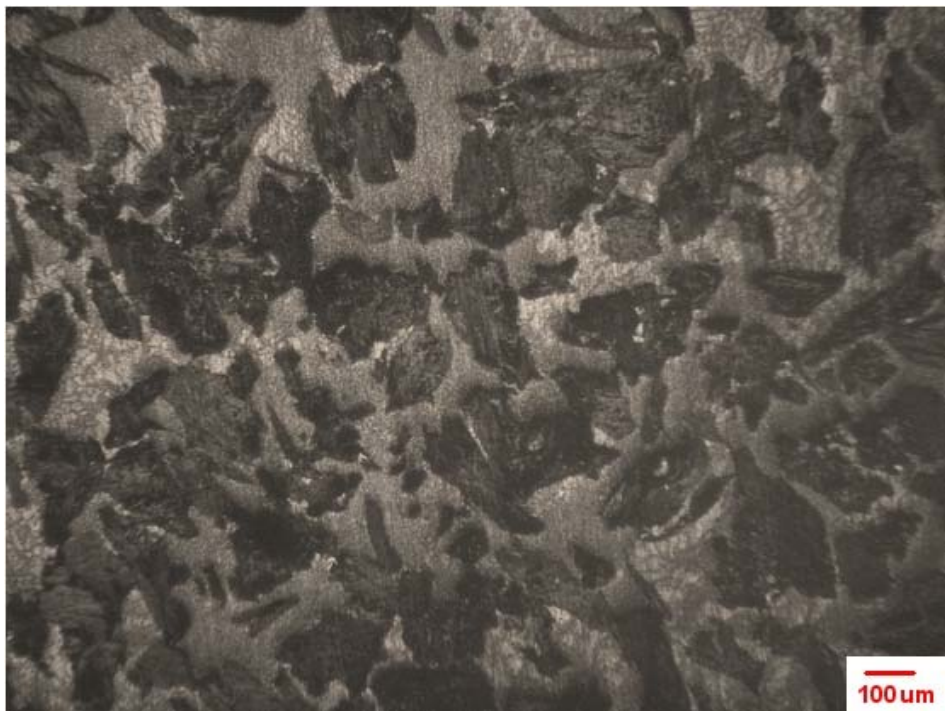
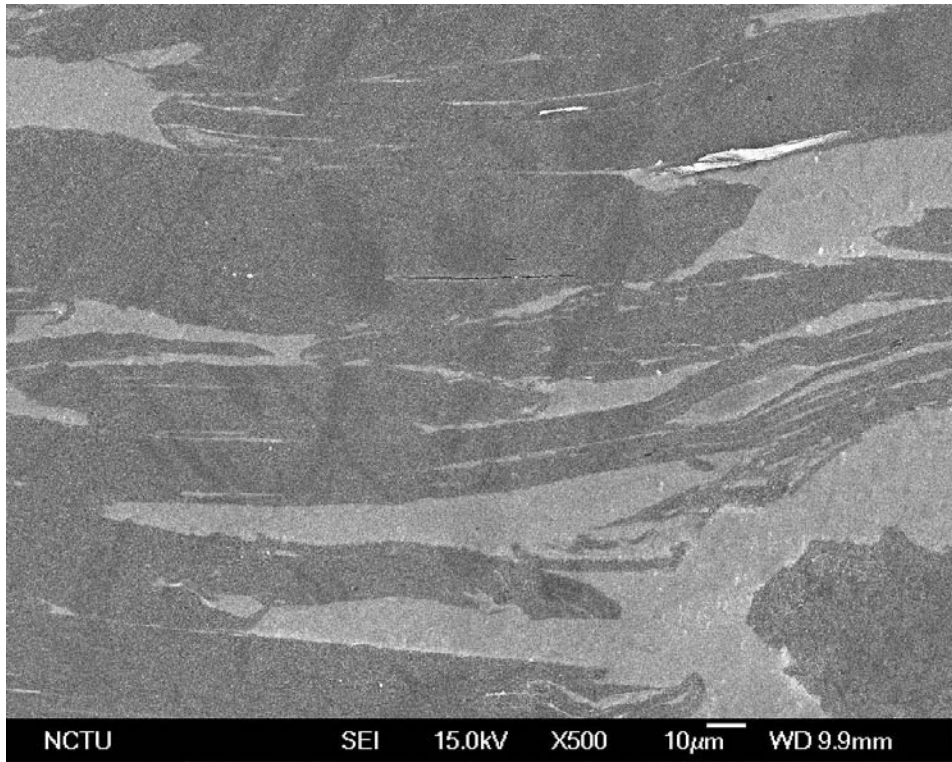
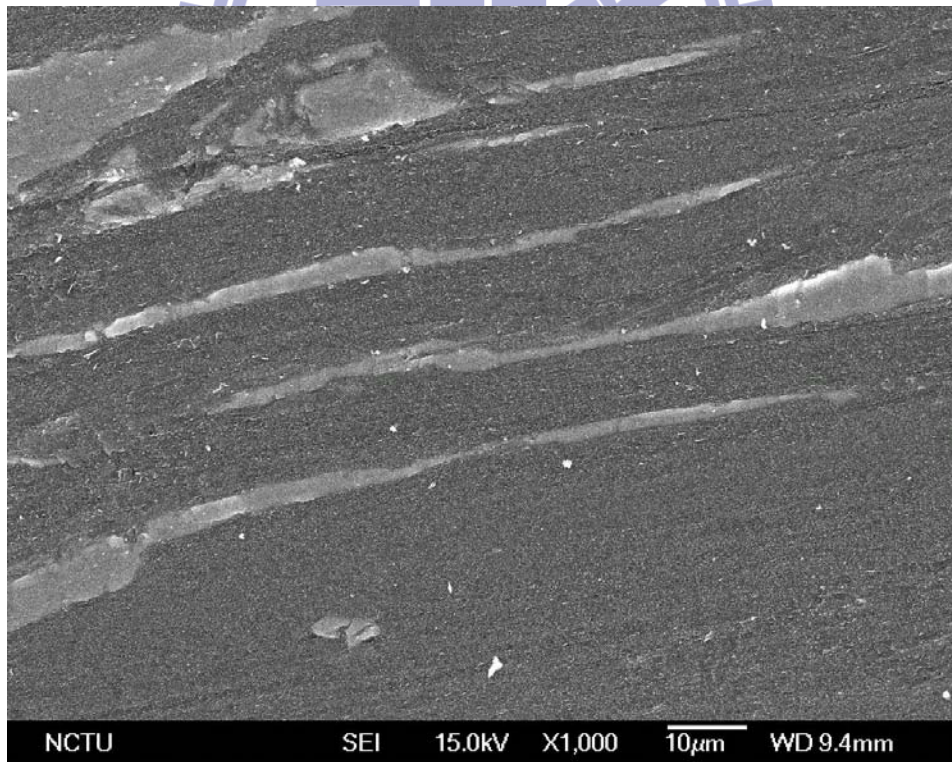


圖 4-3 不同石墨體積分率之複合材料金相組織

(e) 石墨體積分率 43%



(a)



(b)

圖 4-4 石墨體積分率 74.6%複合材之 SEM 影像 (a) 500 倍 (b) 1000 倍

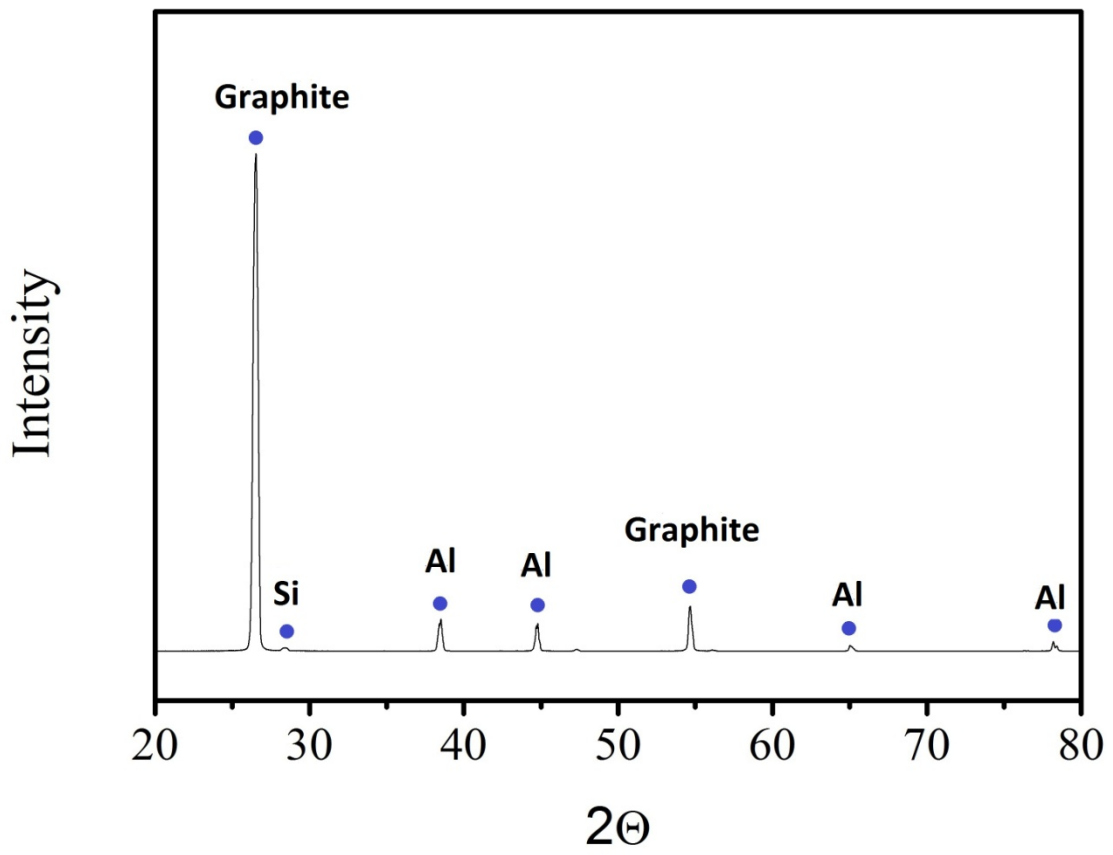
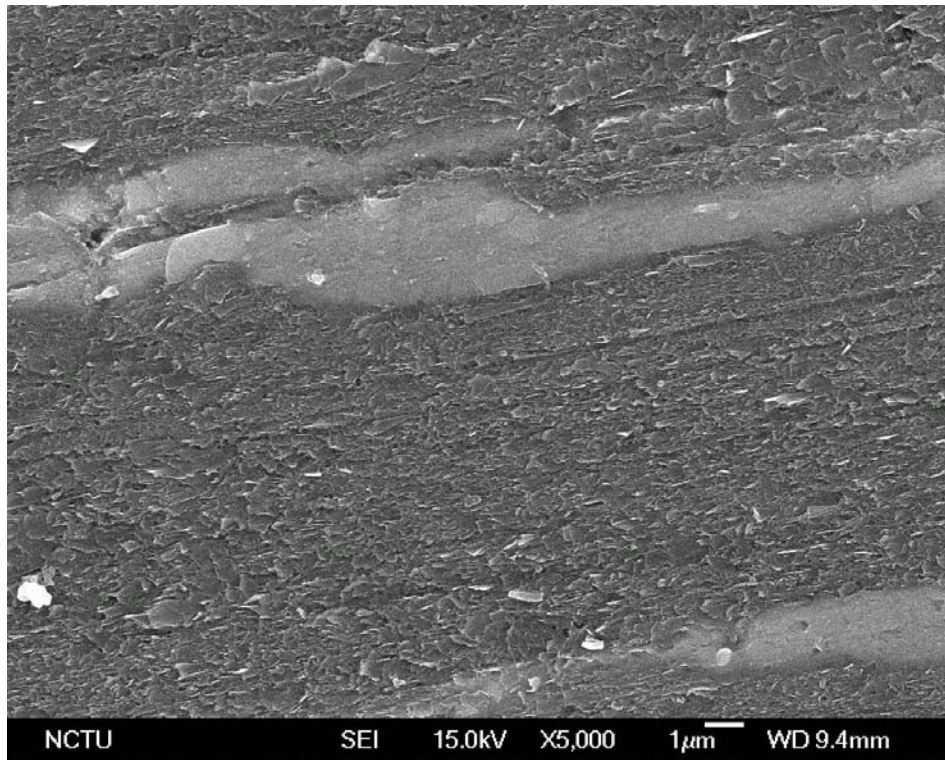
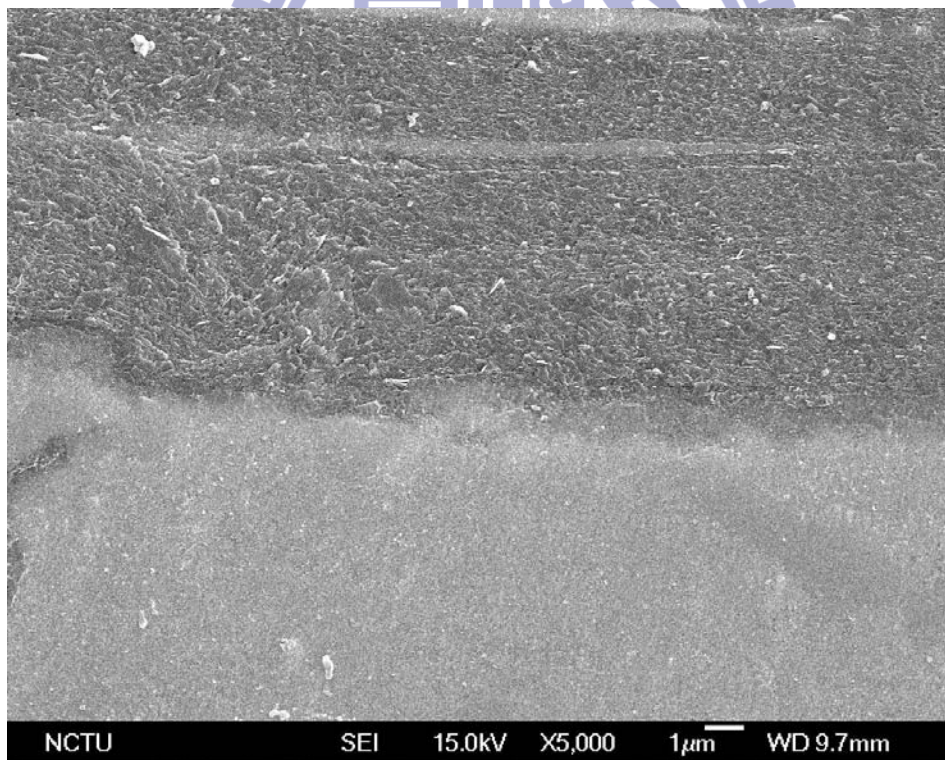


圖 4-5 石墨-鋁基複合材料的 XRD 圖



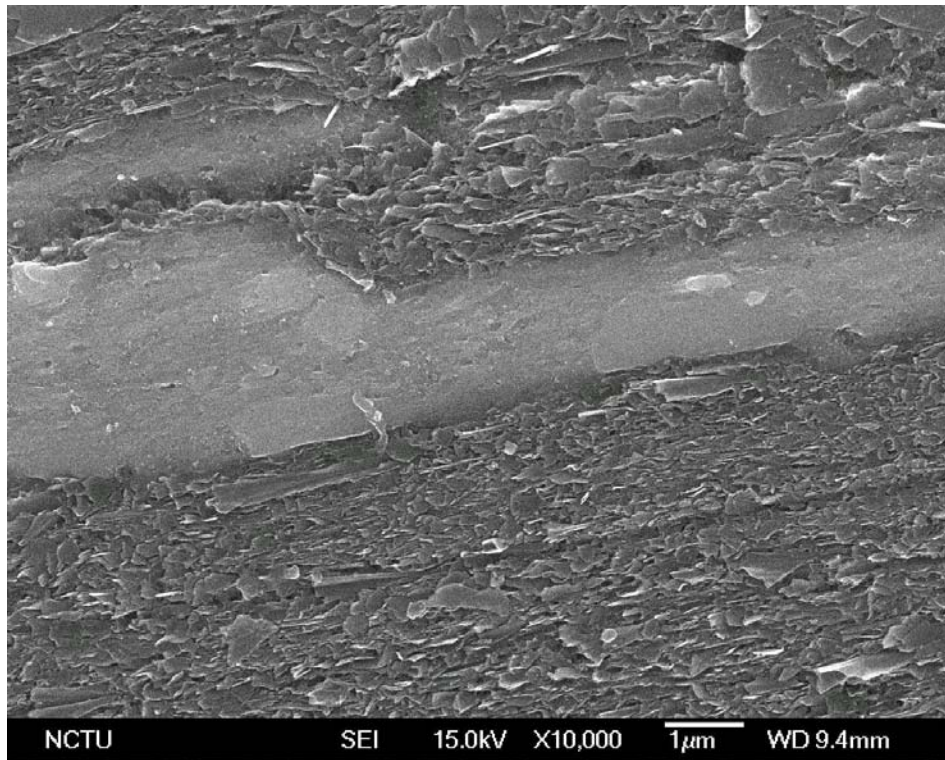
(a)



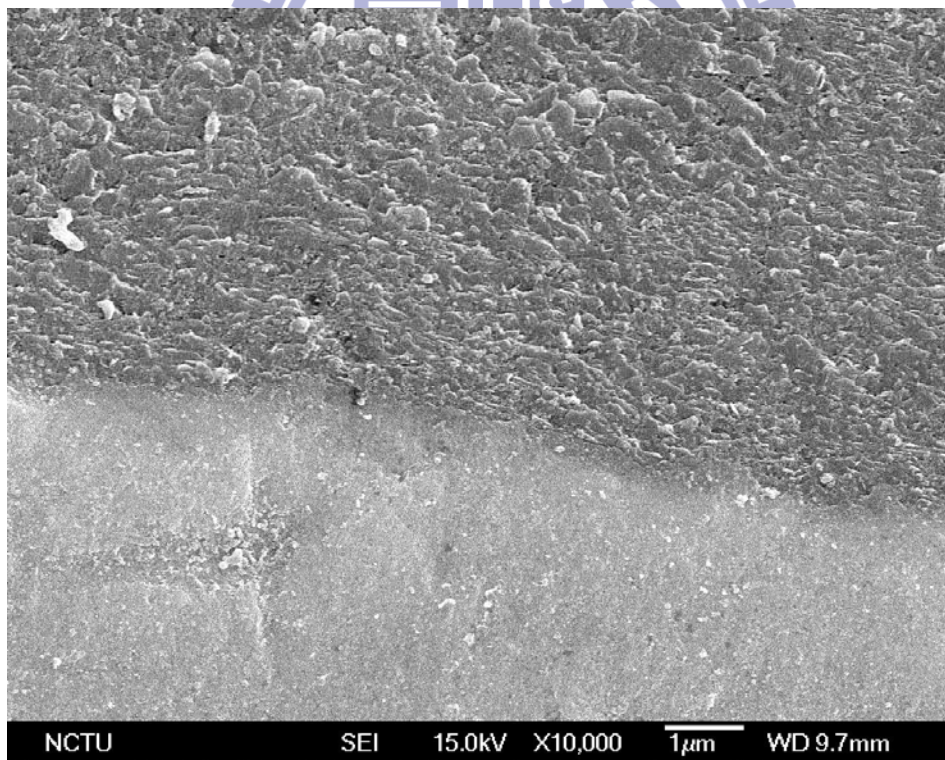
(b)

圖 4-6 (a) 石墨體積分率 74.6%，A356-石墨界面 SEM 影像，5000 倍

(b) 石墨體積分率 64.1%，A356-石墨界面 SEM 影像，5000 倍



(c)



(d)

圖 4-6 石墨-A356 基材界面 SEM 影像 (c) 石墨體積分率 74.6%，10000 倍

(d) 石墨體積分率 64.1%，10000 倍

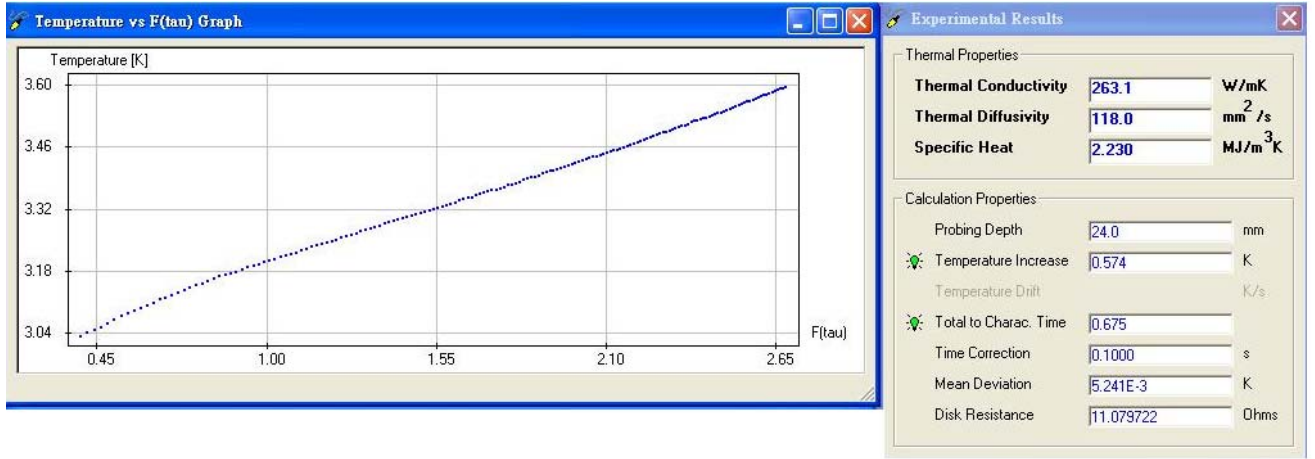


圖 4-7 A 試片於 TPS2500 導熱係數儀之量測結果

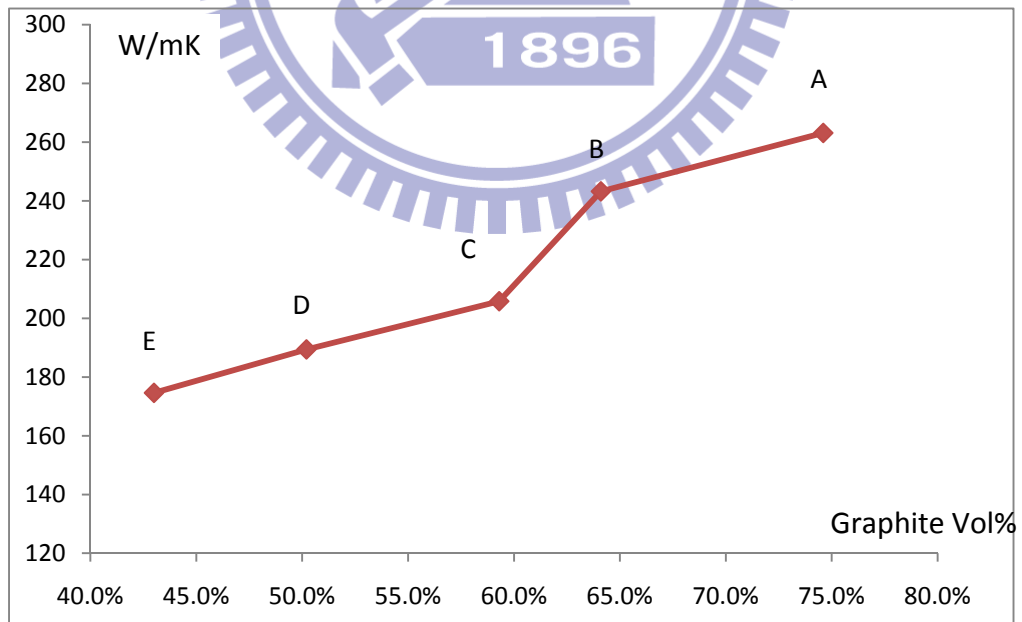
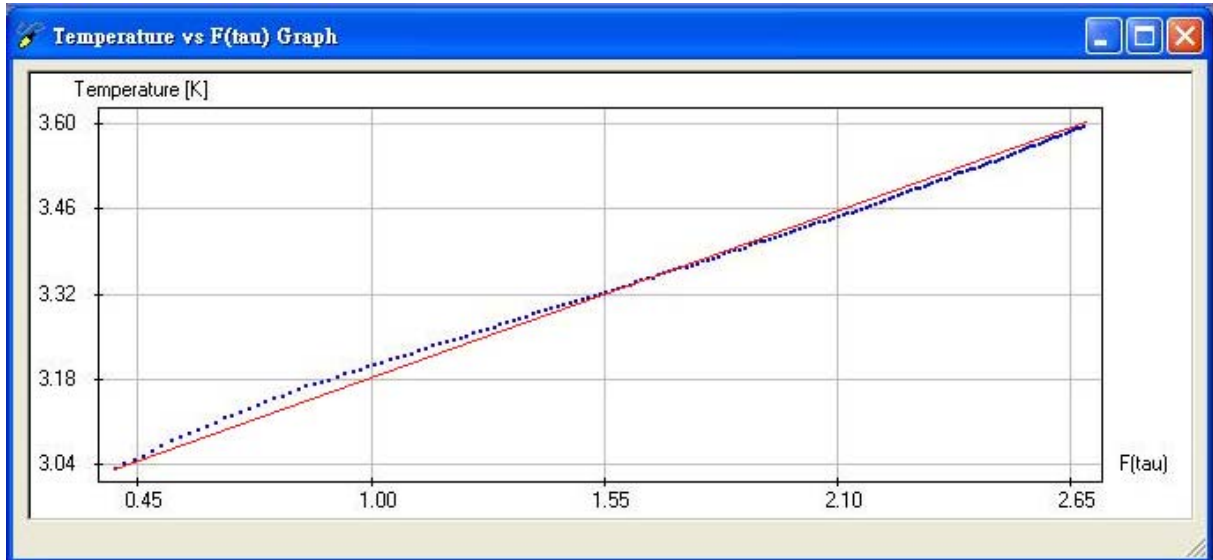


圖 4-8 熱傳導係數與石墨體積分率關係圖



實線斜率：熱傳導係數理論值；虛線斜率：TPS2500 測量熱傳導係數

圖 4-9 TPS 熱傳導係數實驗值與理論值

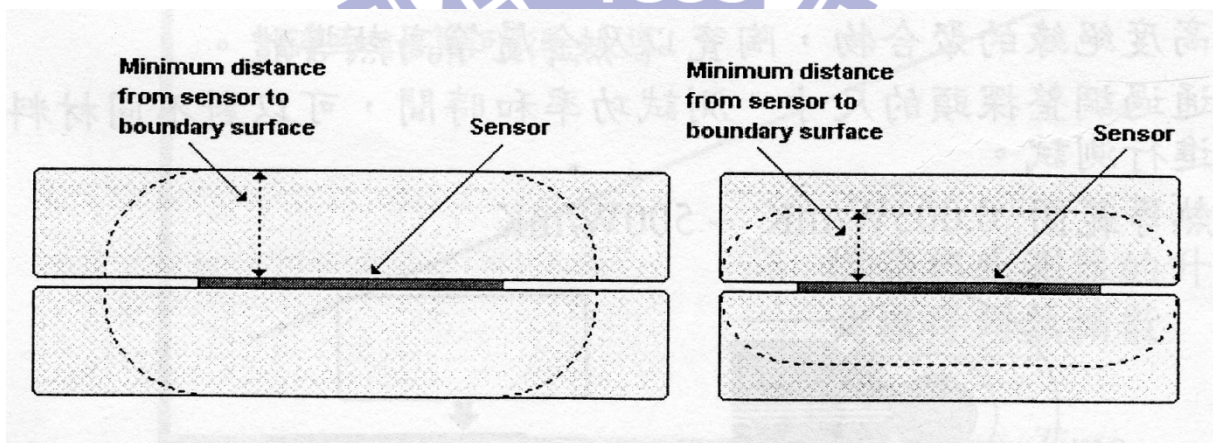


圖 4-10 熱在樣品內擴散圖 [34]

第五章 結論

本實驗以擠壓鑄造製程製作高導熱係數石墨-鋁基複合材料，當石墨溫度 550°C，鋁湯 溫度 750°C 時，以 50MPa 的壓力擠鑄，可得幾無氣孔的高導熱係數鋁基複合材料，根據石墨比例的不同，可調製不同導熱係數的複合材料，實驗結果整理如下：

1. 當石墨全為顆粒狀時，其體積分率僅為 43.6%，當將顆粒狀石墨置換成 95% 的鱗狀石墨與 5% 顆粒狀石墨時，可得到石墨體積分率達 74.6%。
2. 經由石墨體積分率的增加，當體積分率達到 74.6% 時，複合材料的熱傳導係數可提升至 263.1W/mK，為 A356 鋁基材導熱係數 128W/mK 的兩倍之多。
3. 擠壓鑄造製成的石墨-鋁基複合材料，經由 X-ray 繞射分析，無明顯的 Al_4C_3 訊號，可見由於反應時間短，產生的 Al_4C_3 量相當少，因此對熱傳導係數應幾無影響。

參考文獻

- [1] 黃振東, ” 淺談 LED 散熱材料及元件” , 材料世界網, 2010/5/6
- [2] 李豫華, ” 發光二極體的散熱技術” , 科學發展, 435 期 2009, p18-21
- [3] Julian Norley, ”The Role of Natural Graphite in Electronics Cooling”
<http://www.electronics-cooling.com/2001/08/the-role-of-natural-graphite-in-electronics-cooling/>
- [4] B. P. Krishnan, M. K. Surappa and P. K. Rohatgi, ” The UPAL Process: a Direct Method of Preparing Cast Aluminium Alloy-Graphite Particle Composites “, Journal of Material Science 16 ,1981, 1209-1216
- [5] E.A. Pastukhov, ”Wetting of Graphite Surface by the Aluminum Alloys Melts”, Institute of Metallurgy UB RAS Ekaterinburg
- [6] 薛雅仁, ” 碳纖無電鍍鎳製程對鋁基複合材料(Cf/A356)之影響 “, 國立交通大學材料科學與工程研究碩士論文, 1996
- [7] Huda, ”MMCs : Materials, Manufacturing and Mechanical Propertoes”, Key Engineering Materials Vols.104-107, 1995, pp.37-64
- [8] J. Eliasson, ”Applications of Aluminum Matrix Composites”, Key Engineering Materials Vols.104-107, 1995, pp.3-36
- [9] M. K. Surapa , ”Aluminum Matrix Composites Challenges and Opportunities”, Sadhana Vol. 28, Parts 1 & 2, 2003 February/April
- [10] 吳谷澤, ” 疊層複合材料(Cf/A356)之擠壓鑄造製程及性質研究” , 國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文, 1997
- [11] 陳長有, ” 擠壓鑄造法製作高體積分率碳化矽-鋁基複合材料之研究 “ 國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文, 1995

- [12]陳國洲, ” 擠壓鑄造法製作鋁基 (2024) /Al₂O₃ 複合材料時效硬化之研究”
國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文,1993
- [13]Arika Sato, ”Aluminum Matrix Composites: Fabrication and Properties” ,Metallurgical Transactions B ,Vol 7B, 1976-443 September
- [14]Fridlyander, ”Metal Matrix Composite Fabrication”,p75-129
- [15]A.J. Cook and P.S Werner, ”Pressure Infiltration Casting of Metal Matrix Composites” Materials Science and Engineering A 144, 1991 ,pp.186-206
- [16]Shy-Wen Lai,D.D.L Chung, ”Fabrication of Particulate Aluminum-Matrix Composites by Liquid Metal Infiltration”,Journal of Materials Science 29 1994 3128-3150
- [17] M. K. Aghajanian, ”The Fabrication of Metal Matrix Composites by a Pressureless Infiltration Technique”, Journal of Materials Science 26, 1991 447 454
- [18]http://mmc-assess.tuwien.ac.at/41index.htm#B13_Squeeze%20casting
- [19]T. S. Srivatsan, ”Processing Techniques for Particulate-reinforced Metal Aluminium Matrix Composites “,Journal of Materials Science 26 ,1991 5965-5978
- [20]邱垂泓, ” 金屬半固態製程簡介” ,工業材料 164 期, p160
- [21]D.D.L Chung , ”Materials of Thermal Conduction”, Applied Thermal Engineering 21
- [22]J.-M. Molina, M. Rheme, J. Carron and L. Weber , ”Thermal Conductivity of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Mixtures of Diamond and SiC Particles“,Scripta Materialia 58 , 2008, 393–396
- [23]M. Yang, J. Novak, R. Fink, J. Brookover and N.Jiang, ”Properties of a Newly Developed Carbon-Aluminum “,Applied NanoTECH,Inc.

- [24] A. L. Geiger. P. H. Hasselman, “Effect of Reinforcement Particle Size on the Thermal Conductivity of a Particulate Silicon Carbide-reinforced Aluminium-matrix Composite” Journal of Materials Science Letters 12, 1993 420-423
- [25]Edward C.Supan,”High Thermal Conductivity Metal Matrix Composite”,United States Patent number:5120495
- [26]Ce-Wen Nana and R. Birringer H. Gleiter,“Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with Interfacial Thermal Resistance” J. Appl. Phys. 81 (10), 1997, May 15
- [27]黃振東, “高導熱碳纖維強化鋁基複合材料成形技術”, 工研院金屬材料研究組
- [28]楊宗勳, “擠壓鑄造法製作石墨顆粒-鋁基複合材料(A356/Gr)之研究”, 國立交通大學材料科學與工程研究所碩士論文, 1996
- [29]Martin Smalc, Gary Shives “Thermal Performance of Natural Graphite Heat Spreaders”, Proceedings of IPACK2005 ASME InterPACK '05 July 17-22
- [30]Houle, S.J., Koning, P.A., Chrysler, G.M., 2002, “Carbon-Carbon and/or Metal-Carbon Fiber Composite Heat Spreaders,” US Patent Application Publication No. US2002/0038704 A1.
- [31]M. Bonnissela,“Compacted Exfoliated Natural Graphite as Heat Conduction Medium”Carbon,39,2001,2151-2161
- [32]林瑋翔,” 2010 春季熱傳導材料測試技術與產業應用研討會
- [33]Blumm, “2010 熱分析、閃光法、熱機械研討會”, 全拓科技有限公司
- [34]Dennis Lundstrom, “Anisotropix in Thermal Transport Properties of Cast γ -TiAl Alloys”,Z-Metallkd92(2001)11

- [35]Mattias Gustavsson, "On the Use of Transient Plane Source Sensors for Studying Materials with Direction Dependent Properties." Chalmers Industriteknik Foundation
- [36]T.S. Prasanna Kumar and K. Narayan Prabhu, "Heat Flux Transients at the Casting/Chill Interface during Solidification of Aluminum Base Alloys", Metallurgical Transactions B Volume 22B, 1991, October
- [37]Lawrence E. Nielsen, "The Thermal and Electrical Conductivity of Two-Phase System", Ind. Eng. Chem., Fundam., Vol.13, No.1, 1974
- [38]Silas E Gustafsson, Ernest Karawackit, "Transient Hot Strip Method for Simultaneously Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solids and Fluids", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.12 1979
- [39]Silas E Gustafsson, "Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Solid Materials", Rev. Sci. Instrum. 62(3) 1991 March
- [40]Kowbel, W., Patel, K., Champion, W., Withers, J.C., 2000, "Low Cost, High Thermal Conductivity Composites for Power Electronics," Proceedings, SAMPE 2000 Bridging the Centuries, 45th Conference, Long Beach, California, USA, 2000, May 21-25.
- [41]吳柏勳, "以竹碳粉製作碳化矽/鋁複合材料之研究", 大同大學材料工程研究所碩士論文, 2008
- [42]David J. Browne, "Interface Heat Transfer in Investment Casting of Aluminum METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A VOLUME 32A, December 2001—3055
- [43]Srinivasa R. Bakshi, "Interface in carbon nanotube reinforced aluminum silicon composites: Thermodynamic analysis and experimental verification", Journal of

Alloys and Compounds 481, 2009, 207–213

[44]T. P. D. Rajan, "Review Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminum Metal Matrix Composites", Journal of Materials Science 33 (1998) 3491D3503

[45]http://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm

[46]雷玉成, "N₂在等離子弧原位焊接SiCp/Al基複合材料中的作用", 中國有色金屬學報, Vol17, No4, 2007, April

[47]Song, J I , Han, K S, "Mechanical Properties and Solid Lubricant Wear Behavior of Al/Al₂O₃/C Hybrid Metal Matrix Composites Fabricated by Squeeze Casting Method", Journal Of Composite Materials. Vol. 31, no. 4, pp. 316-344. 1997 Feb.

[48] A. Lazarenko "Mechanism of thermal and electrical conductivity in polymer-nanocarbon composites", Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 2009

