

先進封裝大多是透過立體結構的堆疊方式，達到縮小體積和提升效能的目標。但材料的層層堆疊加上結構複雜，散熱性、熱膨脹等因素，都會影響產品穩定性與壽命。

材料熱分析重中之重 精熟熱特性強固先進封裝

江政哲

隨著半導體技術發展遇到的物理極限與瓶頸，摩爾定律(Moore's Law) 在半導體製程上漸漸不再成立，加上電晶體微縮製程的成本不斷提高，在尋求技術發展與成本的平衡之中，先進封裝進而帶來了有效的解決方案。

2023年AI熱潮席捲全世界，而人工智慧發展核心關鍵就是高效能運算(HPC)，然而先進封裝大多是透過立體結構的堆疊方式，

達到縮小體積和提升效能的目標。但材料的層層堆疊加上結構複雜，散熱性、熱膨脹等因素，都會影響產品穩定性與壽命。筆者透過實驗室的多年經驗，分享熱特性對於選擇封裝材料的重要性，以及如何運用熱分析工具量測熱特性數值。

封裝材料考量熱特性

市面上常見的先進封裝技術包括2.5D封

裝技術，例如：CoWoS、I-Cube。3D封裝技術則有SoIC、InFO、XCube與Foveros等等。這些多樣的封裝型式與技術，大多有著共同的特點。就是經由封膠(Molding)程序，將包含晶片在內的整個元件進行密封，保護其不受外在水氣、灰塵、靜電、腐蝕氣體或UV光影響。而一般提到半導體封裝材料，多數就是用來提供黏著、支撐與保護的封膠。

封裝材料的種類從金屬、塑膠到陶瓷等等，各種材料都有優點和適用的產品。例如，金屬封裝擁有較佳的機械強度與散熱特性，且金屬材質本身就帶有一定的電磁波屏蔽能力。陶瓷封裝材料則具有低介電

係數、耐腐蝕及熱膨脹係數小的優勢。塑膠封裝價格較低且質量輕，一般擁有良好的絕緣和抗衝擊能力，也是目前半導體封裝材料的主流。

綜觀上述各種材料的優點，不難看出，許多材料特性都跟「熱」息息相關，因此在選擇封裝材料時，必須將材料的熱特性納入考量，確認材料可以承受元件工作的溫度，以確保工作整體的穩定性與壽命。

以最常見的「塑膠封裝材料」來說明，塑膠封裝材料的成分，以酚醛樹脂、環氧樹脂與矽樹脂為主，其中又以環氧樹脂類為大宗，常應用於填充支撐和絕緣的底部填充膠(Under Fill, UF)，或是作為外殼保護的模封膠(Molding Compound, MC)。

以一張填充膠的規格書(表1)為範例，可初步了解常見的幾項熱特性及相關測試。

表1 塑膠封裝填充膠的規格書範例

Physical Properties After Cured		Test Method	
Coefficient of Thermal Expansion(CTE)			
Below Tg	15 ppm/°C	TMA	QC-TMA-XX
Above Tg	32 ppm/°C		
Glass Transition Temperature(Tg)			
By TMA	95 °C	TMA	QC-TMA-XX
By DMA, tan Delta	115 °C	DMA	QC-DMA-XX
Modulus			
At 25 °C	18 GPa	DMA	QC-DMA-XX
At 120°C	7 GPa		

資料來源：宜特材料分析實驗室整理

表2 一般常見的TMA測試規範

Test Standard No.	Test Method
ASTM E831	Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis
ASTM D3386	Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Electrical Insulating Materials
ISO 11359-2 Part 2	Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature
JIS K 7197	Testing method for linear thermal expansion coefficient of plastics by thermomechanical analysis

資料來源：宜特材料分析實驗室整理

CTE量測

要建立材料的熱特性基本概念，最優先要知道的就是熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)。熱膨脹係數通常都是溫度的函數，隨著溫度而異。塑膠封裝材料的規格書中常以玻璃轉移溫度(Glass Transition Temperature, Tg)作為分界來區別。

例如表1規格書中的CTE，在常溫到Tg之間的數值很接近常見印刷電路板水平方向的CTE。但過了Tg點之後，CTE就有了明顯的變化，在這個溫度環境下很可能導

致產品因為CTE的無法相配，而造成電路板產生脫層或彎折，甚至元件或零件的斷裂及斷路現象。故CTE這個參數資訊，對於材料的選擇會是一個相當重要的指標。

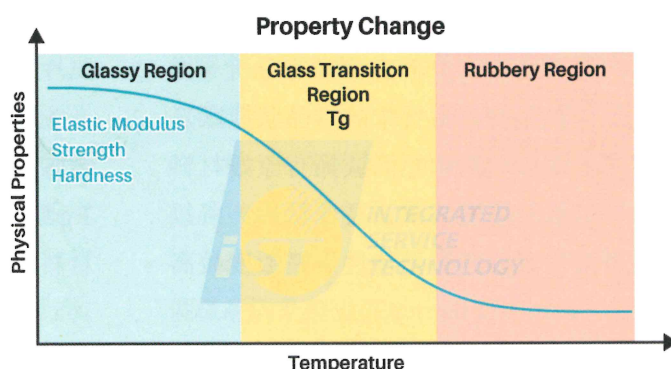
CTE的量測方法，是依據樣品材質與測試工具不同，有多種規範可以參考。表2是廠商如宜特材料分析實驗室彙整出來，常見適用於熱機械分析儀(Thermal Mechanical Analyzer, TMA)的測試規範。但需特別注意，有時在規格書中看到的測試值，會是以材料商自行設計的測試方法測得，故測試值通常是供比較參考用。

量測玻璃轉移溫度

前面有提到CTE是溫度的函數，無法相互搭配的CTE可能造成許多不良影響。那為什麼會以Tg點來作為觀察CTE的分界呢？這就需要了解什麼是Tg點，以及具有Tg點的材料在不同溫度下的特性了。

Tg點和熔點、沸點等相變點(Transition Point)相似，用來定義物質於兩個狀態之間的可逆轉換溫度。熔點為固態與液態的轉換，沸點為液態與氣態的轉換，但Tg則同為固態之間的轉變，不像一般固、液、氣三態間轉換因為有明顯的體積改變所以容易觀察。

材料的部分物理特性與溫度的關係可用圖1來概述，當材料在低溫時，會呈現出相對硬脆的特性。但當受熱升溫時，非結晶性部分的分子鏈區因獲得能量，便具有可移動的



資料來源：宜特材料分析實驗室整理

圖1 物理特性與溫度的關係概圖

自由度，使得固體呈現出如同橡膠般柔軟的特性，因此以「玻璃態」和「橡膠態」稱呼這兩種不同的狀態，而在這兩種狀態間的過度區溫度，就被稱為「玻璃轉移溫度」，也就是Tg。

從上圖可知，Tg代表的並不是一個固定的溫度，應該視為一個「區間」較為恰當。使用者可依據製程的加工需求與產品的使用環境，來選擇合適Tg的材料，以滿足產品可靠度與壽命的需求。

那規格書中的Tg點為什麼不是一個區間，而是一個溫度值呢？這就要牽涉到「定義」的問題。在不同的測試規範下有對Tg點的量測與取法作出定義，大家才能同樣的基礎下進行Tg點的比較。

Tg點的測試方式大略分為三種，除了如表1出現的TMA與動態機械分析儀(Dynamic Mechanical Analyzer, DMA)之外，還有對樣品狀態寬容度相對較高的微示差掃描熱卡分析儀(Differential Scanning Calorimeter, DSC)。表3是宜特材料分析實驗室彙整出三種測試方式，搭配常見的Tg點測試規範。

那當有Tg點測試需求時，該選擇哪個工具，可透過材料分析實驗室的分析，得知每個測試設備都有要求的樣品狀態跟尺寸限制。對於材料供應商或擁有原始材料者，可以依照設備需求去製作試片，所以一般會選擇以偵測黏彈特性、靈敏度較高

的DMA來進行測試，或是因應要求而製作試片以進行TMA測試。

DSC則是要依靠材料在不同溫度的比熱容(Specific Heat Capacity, Cp)差異來作Tg點的量測，因此需要是Cp變化較大的材料，才能表現出比較好的測試靈敏度。

即便如此，DSC還是有它的優勢，就是它的樣品需求量少，也沒有尺寸上的限制，只要重量足夠，即使是粉體也可以量測，對於小量或是粉體的材料來說是很便利的測試工具。

表3 測試方式與常見的Tg點測試規範

Tool	Test Standard No.	Test Method
TMA	ASTM E1545	Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Thermomechanical Analysis
	ISO 11359-2	Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature
DMA	ASTM E1640	Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis
	ASTM D7028	Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA)
	ASTM D4065	Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures
DSC	ASTM E1356	Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry
	ASTM D7426	Standard Test Method for Assignment of the DSC Procedure for Determining Tg of a Polymer or an Elastomeric Compound
	ASTM D3418	Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry
	ISO 11357-2	Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 2: Determination of glass transition temperature and step height
	JIS K 7121	Testing Methods for Transition Temperatures of Plastics

資料來源：宜特材料分析實驗室整理

表4 一般常見彈性模數的測試規範

Test Standard No.	Test Method
ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
ASTM D6272	Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending
ASTM D 638	Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
ISO 178	Plastics — Determination of flexural properties

資料來源：宜特材料分析實驗室整理

量測模數的方法

除了上述的CTE與Tg這兩項材料特性，機械特性對於材料的選擇也占有一定的影響力，常見的機械特性比如樣品的剛度或耐衝擊能力。這兩個特性可以簡單理解成柔軟的材料容易被拉伸與彎折，也容易把受到的衝擊能量，以熱或形變的形式耗散(Dissipation)。反之，較堅硬的材料不易受外力變形，就能將受到的能量較大量的保留並傳遞下去。

規格書中的模數(Modulus)一般指的是彈性模數(或稱彈性模量)，模數的定義為應力(Stress)與應變(Strain)的比值，它與常見的機械特性剛度(Stiffness)的定義是相似的，差別在於剛度須考量樣品的結構

與形狀。彈性模數則屬於材料組成的內部性質，與結構無關。

模數本身也是溫度的函數，一般會隨著溫度的上升而逐漸下降，可供製程人員選擇於合適的溫度下進行加工處理。一般規格書提供的模數為常溫下的量測數值，若有溫度條件的測試需求，則可於DMA或有加熱環境的拉伸試驗機中進行。

表4提供了一些常見彈性模數的測試方法，測試規範中出現了彎曲特性(Flexural Properties)和拉伸特性(Tensile Properties)兩種。兩種不同的測試規範，來自於「測試方向」的差異，也就是跟定義有關。

彎曲顧名思義就是對材料進行彎折來觀察強度特性，有分成二點、三點或四點彎曲三種不同的測試方式。而「拉伸」則是在材料的軸向施加力量，可以是拉伸或壓縮，藉由觀察樣品軸向的尺寸變化來計算對應的強度，常見的楊氏模數(或稱楊氏模量, Young's Modulus)就是在拉伸方向下測得的彈性模數。

熱分析儀量測數值的準確性

如果把剛封裝好的晶片，或是存放一陣子甚至使用過的晶片拿來測試，結果不一定會跟規格書上的數值相同。如果用上述測試方式來確認材質，也不一定能否符合要求，也不一定能否拿來做為進料檢驗的測試方式。同時無法確定能否用這些測試來推測，是不是因為材料差異或變質造成失效。

首先最基本的一點，就是文中多次提到的

「定義」。用什麼方法測？用什麼條件測？都需要說明清楚，才能在「相同的基礎」上進行測試結果的比較。其次，也是非常重要的一點，所有的熱分析都會牽涉到「熱」，樣品曾經歷過的加熱、冷卻以及時間長短等等過程，成就了樣品的現況，也稱為這個樣品的熱歷史(Thermal History)。

當操作人員要對樣品進行加熱或降溫的實驗動作，來取得需要的對應數據時，如果不是在相同熱歷史條件下的樣品，比較的基準就不同了。所以熱分析時常聽到「消除熱歷史」的這個動作，也就是在合適的熱處理條件下，使樣品達到可比較的測試基準後，再進行真正蒐集資料的測試步驟。

不過，也不是所有數據的取得都需要進行消除熱歷史的動作，甚至可能造成測試結果失去比較的意義。例如：測試Tg點時，消除熱歷史的動作可以讓材料的結晶特性表現的更準確，來取得可比較的實驗結果。反之，對熱固性樹脂做消除熱歷史的動作，反而可能造成樣品固化程度改變，就無法獲得樣品當前狀態的資訊。

材料特性組成複雜

熱分析僅僅是封裝材料分析的一小部分，若攤開完整的規格書來看，是這眾多的物理特性、電氣特性與化學特性造就了當前的這個材料。讓人不得不佩服設計材料的研發者，要投入多少知識與技能，才得以提供半導體產業如此豐富又多元的材料來做運用。

(本文作者為宜特材料分析工程處技術副理)