

# 複合材料的 創新與利用

複合材料廣泛地使用於我們的日常生活中，其創新與適當的利用對人類文明發展會有深遠的影響。

■ 王雲哲

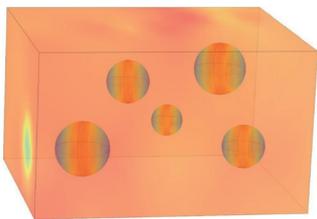
複合材料可依其內含物的幾何形狀分為：顆粒型、纖維型、層狀複合材料，當然也可以是不同內含物的組合。「複合材料」一詞常用來表示碳纖維複合材料，用環氧樹脂為基材，把細長狀碳纖維「黏住」，以形成具纖維狀內含物的材料，或簡稱為「複材」。因其良好的力學性質，例如高強度、低密度等，所以常用在航太工業或高階自行車產業。

上述「黏住」一詞並不是一個嚴謹的科學說法，但有助於我們對基材與內含物界面的情況建立一約略的想像。其實在碳纖維複合材料中，這界面的結合力是由物理 / 化學鍵結所產生。整體複合材料的品質往往由基材與內含物界面的性質所決定，探討界面則是一個頗為專門的領域。

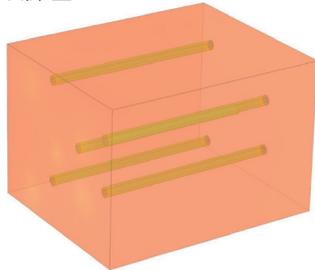
混凝土是一種典型的顆粒複合材料，其中顆粒形狀的石頭是骨材，直徑約 3 ~ 5 公分，另以水泥砂漿做為膠結材料把骨材「黏住」，而形成一顆粒複合材料。實際上，在混凝土內部並沒有「黏住」骨材這回事。

事實是水泥砂漿因水化 (hydration) 反應，由黏稠液體變成固體時，由於部分的水泥砂漿已滲入骨材表面的孔隙中，使得固化後的水泥砂漿得以「抓住」骨材。因此混凝土內部骨

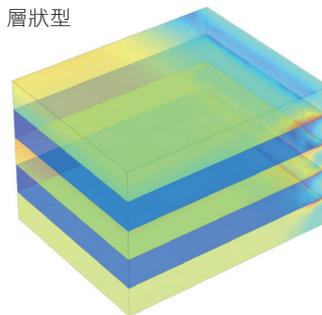
顆粒型



纖維型



層狀型



顆粒型、纖維型和層狀複合材料。

材與水泥砂漿的界面，在力學分析時可視為是一完美的內界面。但是因骨材的力學性質比固化後的水泥砂漿強，所以破壞大多由這內界面開始。混凝土材料可提供良好的強度與耐久性，但缺乏延展性與韌性，是一脆性材料，使其使用受到大幅的限制。

反觀金屬材料，如鋼鐵或鋁合金，同時具有良好的韌性與強度，因而大量使用在鋼結構高樓建築中。金屬材料因為是由許多大小約為 1 微米（ $10^{-6}$  米或公尺）單晶體的晶粒，以不同的方向藉由晶界結合而組成，因此純金屬也可視為一種複合材料。

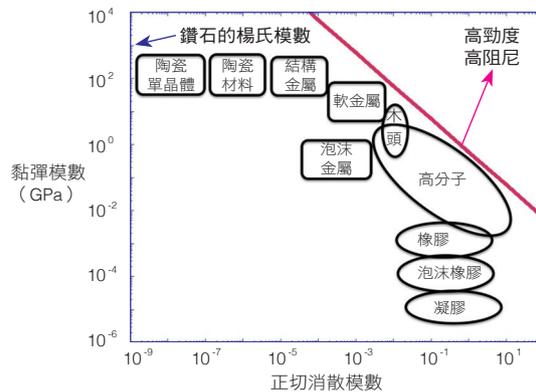
目前以現象理論（phenomenological theory）為基礎的學理分析模型，雖然可以成功地把金屬材料當成單一物質，並預測出其大部分的物理性質。但這類模型的缺失在於忽略了金屬是複合材料的天性，因此新力學模型的建立必須正視這一事實，即金屬是多晶粒組成的複合材料。

以上就一般的複合材料先做簡單的介紹，並以民生工業中常用的混凝土與鋼鐵材料為例加以說明。以下，續針對高阻尼高勁度黏彈複合材料，例如金屬高分子複合材料、泡沫金屬、負勁度複合材料等的發展，做深入的說明。

## 高阻尼高勁度黏彈複合材料

高勁度高阻尼複合材料的應用十分廣泛，例如鉛心橡膠支承墊等，它的功能是提供勁度以傳遞力，同時提供阻尼以降低振動，是機械構件或結構物中很重要的元件。它也可吸收大量的衝擊能量，且同時維持材料的幾何形狀，所以適合應用於汽車保險桿等。

**複合材料是可以設計的，因此提供了無窮多的可能，預期會創造出許多工程上所需的新材料。**



一般高勁度材料具低阻尼，例如陶瓷；低勁度材料具高阻尼，例如橡膠。

目前成熟的力學理論可在不需知道材料微觀結構的條件下，預測複合材料的整體勁度與阻尼。研究發現理論預測的結果與實驗觀察一致，也就是大多數的材料無法同時具備勁度與阻尼這兩個性質，高勁度材料具低阻尼，低勁度材料具高阻尼，例如建築用材料就具有高勁度與低阻尼。很顯然直接從自然界取得的材料，應該無法再改進其物理性質。然而複合材料是可以設計的，因此提供了無窮多的可能，預期會創造出許多工程上所需的新材料。

以複合材料的方式應可兼具這兩種性質，例如橡膠或高分子聚合物與金屬材料組成的黏彈複合材料—鉛心橡膠支承墊，是一種單方向消能的元件，以環狀軟金屬與高分子材料製成，環狀軟金屬內部是縷空的微觀結

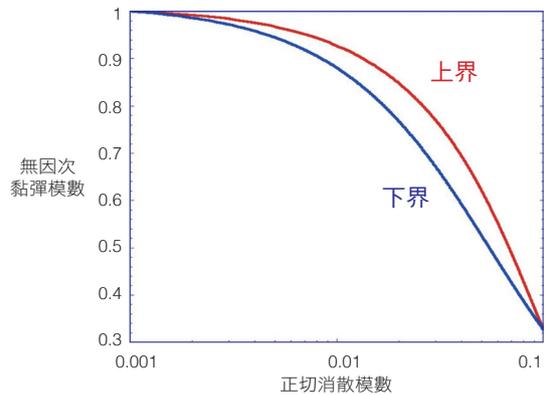
構，高分子材料可填充其中。黏彈性複合材料的理論告訴我們，當黏彈複合元件結合軟金屬（低降伏金屬材料）與高分子材料時，高阻尼及高勁度可同時產生。

當大變形發生時，元件中的軟金屬塑性性質提供優異的塑性消能性質，大幅消散了外部能量的注入，而能保護結構物整體的安全。在更大外力作用下，災難即將發生時，這元件會先自行破壞，保障其連結構件的結構功能，避免瞬間式的整體破壞所造成的災難。因此，藉由控制複合材料的勁度、阻尼與強度，可增加這黏彈複合元件提供給結構物的消能性質（高阻尼）、變形能的儲存（高勁度）、局部化破壞的能力。這些性質都是現代土木或其他承載構件所需擁有的特性。

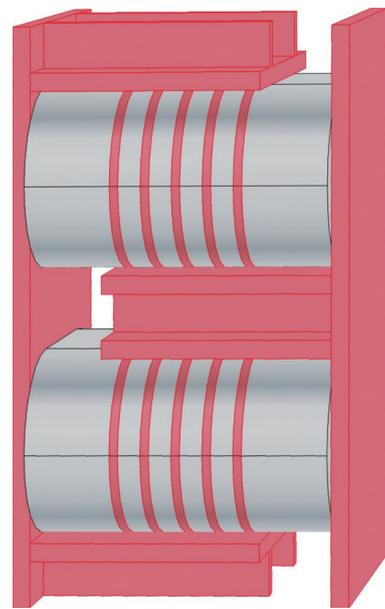
以上所描述在約數十公分大小（大尺度）的金屬—高分子複合材料的消能行為，也可在小尺度（約 1 公釐）微觀結構的材料中實現，例如：泡沫金屬（foamed metal）。泡沫金屬是一種相對密度（泡沫試體密度與其固體成分密度的比值）非常低（約低於 5%）的多孔隙金屬，這類材料是一種結合固體（稱為骨幹）與空氣的複合材料。

日常生活中常見的泡沫材料是高分子泡沫，常用於坐墊或洗碗工具。泡沫金屬比較少見，但並非不尋常，目前泡沫鋁、泡沫銅和泡沫鋼在市面上都買得到。測試這類材料的力學性質可以使用共振超音波頻譜儀。

共振超音波頻譜儀以兩個壓電制動器夾住試體，其中一個送出高頻率的應力波（1 ~ 100kHz）進入試體，另一個壓電制動器接收試體的振動訊號，若試體產生力學共振，則所收集到的振動訊號會有一峰值。角點接觸壓電制動器是為了降低力學阻抗，提高訊號 / 雜訊比值，同時降低邊界束制，達到自由振動的要求，使得理論解可用於分析實驗數據。這試驗方式突破傳統拉伸

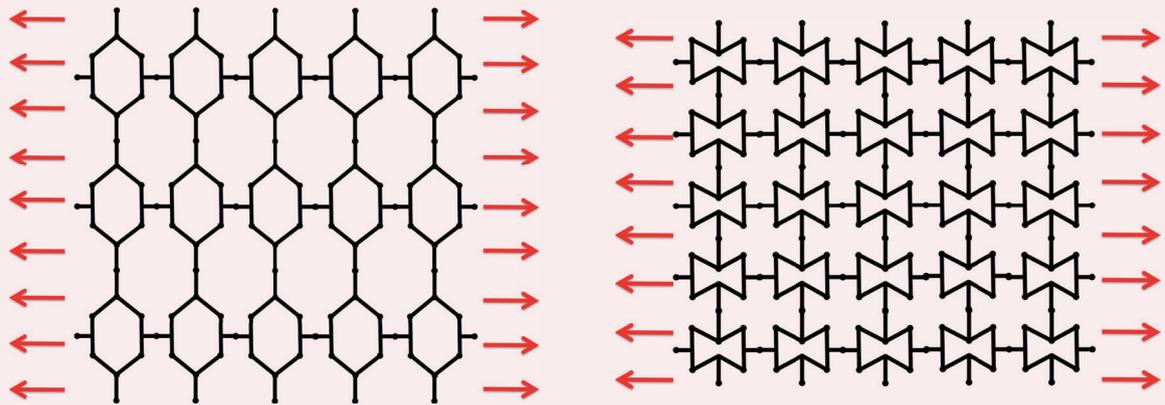


不考慮組成物的微觀結構，在各種可能的組成比例下，理論預測兩相複合材料的整體黏彈模數與正切消散模數必須介於上、下界之間。

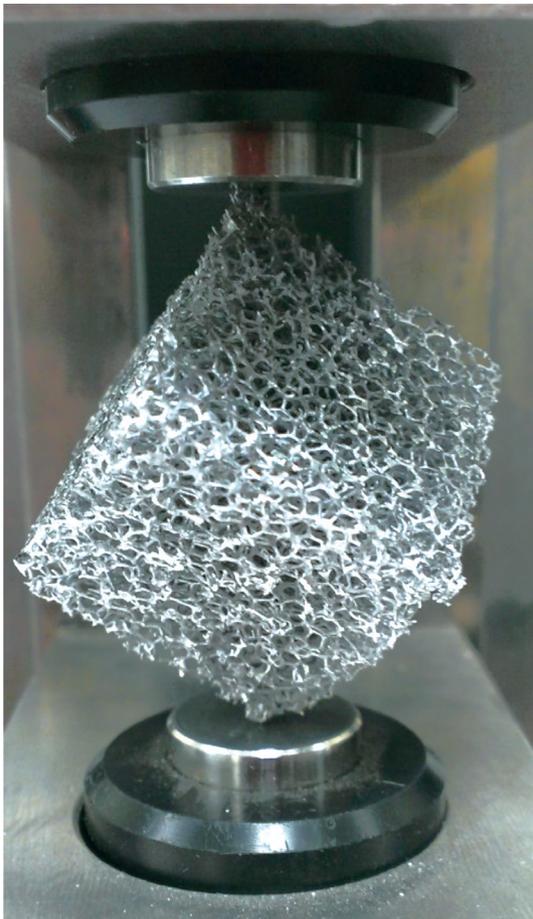


由軟金屬（紅色）與高分子聚合物（灰色）組成的黏彈複合式消能元件，具有高勁度與高阻尼的特性。這元件可置放在結構物中，消散外力做的功，以降低振動、減低地震造成的破壞，同時提供所需的勁度與強度。

式試驗的難處，如狗骨頭試體形狀的切割、夾具與應變量測等問題，可獲得材料在高頻率刺激下精確的彈性常數和黏彈阻尼。



正卜松比泡沫材料的微觀結構由正規多面體組成（左圖），然而負卜松比泡沫材料的微觀結構，其組成單元具有凹向內的多面體（右圖）。



在共振超音波頻譜儀機台上測試中的泡沫鋁合金（約 2 公分立方大小）。

泡沫金屬本身的勁度與阻尼表現都不錯，勁度是來自於金屬骨幹的高彈性模數，阻尼則來自金屬骨幹塑性變形後提供的塑性消能。塑性消能是一不可逆的變形過程，會使材料產生永久變形。當泡沫金屬與高分子材料結合時，這複合材料可進一步在線性變形階段使用高分子的線黏彈阻尼消能。此外，減振就是減噪，在噪音的來源中，很大一部分是來自材料的力學振動，如使用阻尼降低振動，噪音自然而然也可以降低。

提及泡沫材料，則必須對其卜松比（Poisson's ratio）有些許了解，因為泡沫材料是目前創造負卜松比材料的原物料之一。卜松比是描述試體受軸向拉力下，其側向變形與軸向變形的比值。大多數材料受拉力作用時，軸向會伸長（正應變），側向則縮短（負應變），因此卜松比在數學上的定義是負的側向變形與軸向變形的比值。一般金屬材料的卜松比約為 0.3，橡膠約為 0.5，紅酒瓶所用的軟木塞約為 0，泡沫高分子或金屬材料約為 0.3，最小的等向性材料的卜松比是 -1。

正卜松比與負卜松比材料都是泡沫材料，但具有不同的微觀結構。正卜松比材料由正規多面體單元堆疊而成，負卜松比材料則由凹向內的多面體單元堆疊而成，這些多面體在真實材料中會以些微扭曲的狀態存在。

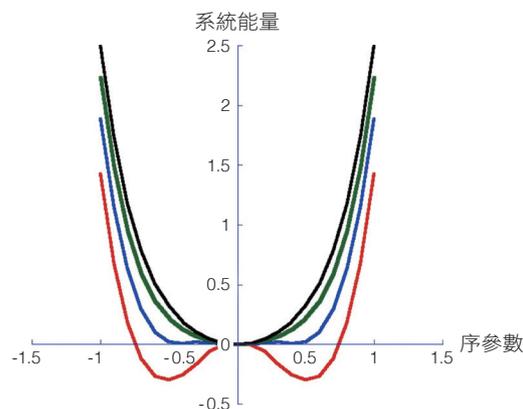
當材料具有小於 -1 的卜松比時，這材料具有負勁度的特性。負卜松比材料適用於螺絲（因變形後體積大幅增加）、降低兩物體間的接觸應力（因曲率變化特性），以及降低噪音（因微結構的皺褶增加）。目前對負卜松比材料的研究專注在使沒有孔隙的連續體介質中產生負卜松比，對負卜松比材料有興趣的讀者，請參閱網址 <http://www.auxetic.info>。

#### 四兩撥千斤的「極端」複合材料

鐵彈性複合材料是金屬基複合材料的一種，它以金屬為基材，而以其他材料例如陶瓷顆粒為內含物的複合材料。在鐵彈性複合材料中，內含物是具鐵彈性質的陶瓷顆粒，一般使用二氧化鈮或鈦酸鋇。所使用的鐵彈性內含物的量僅約一個體積百分比，就可使得整體複合材料產生「極端」的整體勁度與阻尼，「極端」是因為極大的整體阻尼與極大或極小的整體勁度，因此稱為是「四兩撥千斤」的極端複合材料。

鐵彈性質與鐵電性質有密切的關係，當受外在物理場量的影響時，如加減溫度或改變電場，它們就會進行固態—固態的相變換，也就是其固體組成的晶格狀態會改變成另一個狀態。如鈦酸鋇在約攝氏 110 度時，其晶格態由立方體（高溫）改變成四方晶系。

在相變換時，其系統能量會由具有一個能量低點的特徵改變為具有兩個能量低點。



鐵彈性材料可藉由溫度（或其他物理場）的外在控制改變其能量曲線。

由於穩態的物理系統須處於能量低點，因此當系統由高溫降為低溫時，原本高溫態的能量低點就變成負勁度。因為勁度是能量的曲率（二次微分），能量高點就表示負勁度。因此系統會改變其幾何形狀，新的系統會選擇兩個能量低點之一，材料內部因而形成局部區域（domain）。很多時候就會出現孿生子（twin）的微觀結構，因為選擇這兩個能量低點之中的任一個的機率是一樣的。

勁度是描述材料受外力後其變形的程度。負勁度則展現相反的力與位移關係，也就是對材料施予均勻張力，材料內部則呈現壓應變，這個現象在自然界是不存在的。一個純負勁度的力學系統是不穩定的，表示這系統在長時間下，會因周圍微小的擾動而變換至另一平衡位置，因此無法存在。

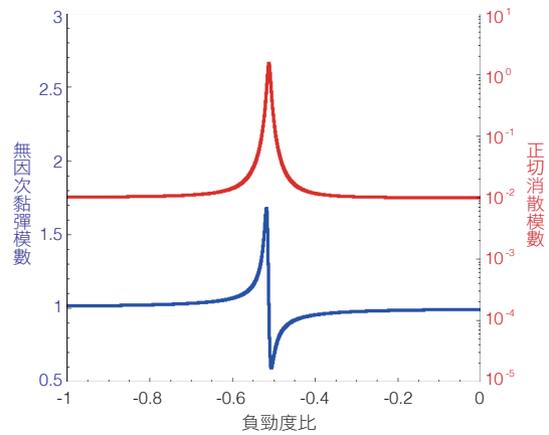
負勁度是一個以等效的觀念描述材料或系統的力學性質，在一些力學系統中，如薄殼，其後挫曲行為可產生負勁度。在材料科學中，固態—固態相變換也可產生負勁度。在層狀結構中，若某些層含高度的預應力，或其物質組成是容易因壓力而發生相變化的材料，則這層物質也會產生負勁度。

應用鐵彈性材料的固態—固態相變換所產生的負勁度，與基材的正勁度的劇烈交互作用，大幅增加了顆粒型複合材料的整體阻尼與勁度，這現象已由理論、計算模擬、實驗驗證等交互檢驗而得到證實。材料整體勁度與阻尼的大幅提升，已超越傳統複合材料理論的預測，就是因為基材與內含物界面的大量變形。

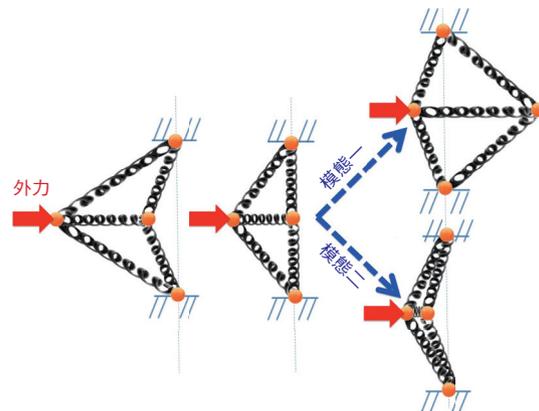
若以外層彈簧表示基材，內含物以內層兩彈簧描述，當內含物的兩彈簧形成一直線時，這內含物具有負勁度。這時外力的擾動可以使材料產生「模態一」或「模態二」的變形，兩種模態都可以發生，但「模態二」較不穩定，須透過適當的幾何、材料係數與外力作用以達到穩定。

「模態一」可同時提供高阻尼與高柔度，「模態二」則同時產生高勁度與高阻尼。雖然在某些條件下，鐵彈性複合材料的「模態二」變形的穩定性較低，但如果某些工程應用上須使用短時間的極端材料特性，如抵抗爆炸的一瞬間所需的高勁度與高阻尼，這負勁度複合材料是目前唯一的選擇。

此外、在層狀負勁度複合材料中，即由一層正勁度、一層負勁度疊加而成的複合系統，因負勁度層的影響產生能量釋放的現象，這現象可類比於地震時所釋放的



鐵彈性複合材料在適當內含物的負勁度影響下，可大幅提升整體阻尼與勁度或柔度。這理論結果已被實驗證實，得以突破傳統複合材料理論上、下界的限制。



負勁度複合材料的變形機制是藉由基材（外層斜彈簧）與內含物（內層斜彈簧）在力學上的劇烈交互作用產生「模態一」或「模態二」的變形。

能量。含負勁度的複合系統，經負勁度的作用，未來甚至可以做為新能源使用，因為負勁度材料或系統就是能量提供者。

**適當地使用複合材料可達到傳統材料無法提供的功能，  
更適切地解決相關的工程問題，滿足經濟上、環保上或能源上的諸多考量。**

適當地使用複合材料可達到傳統材料無法提供的功能，更適切地解決相關的工程問題，滿足經濟上、環保上或能源上的諸多考量。例如在生態復育工程上，為達到生物多樣性的指標，可以使用泡沫金屬，因為泡沫材料內孔洞的連通性可讓流體與微生物在孔洞內流動，避免了一般混凝土材料的絕對阻隔所造成的生態破壞。另外、使用高勁度高阻尼材料可有效降低因地震致使土木水利結構物的振動，所造成生態系統的破壞。

古語說：「工欲善其事，必先利其器。」這裡的「器」就是「工具」，但選取適當的材料來做工具，何嘗不是發展工具過程中重要的一環。

複合材料提供了材料創新的可能，如負卜松比材料是藉由微觀結構的改變而形成，負勁度複合材料則是由微觀機制的啟動而產生。這微觀機制是由鐵彈性材料的內含物，在進行固態—固態相變化時，產生的局部負勁度與基材的正勁度劇烈的交互作用，而達到高勁度、高阻尼及其他高耦合場量，如壓電常數、熱電常數等性質。這類新穎複合材料的創造與應用是可以預期的。

王雲哲  
成功大學土木工程學系

