

蜘蛛網黏性的來源與特性

文·圖—廖鎮磐

蜘蛛網的黏性來源

相信不少人在摸到蜘蛛網後手掌上有黏黏不舒服的經驗與感受，但這種黏性對結網型蜘蛛而言是捕食獵物時不可或缺的重要武器。

幾乎所有的蜘蛛都是捕食者，主要捕食比其體型更小的節肢動物。一般而言，大致可將蜘蛛的捕食方式區分為結網型與徘徊型二大類：前者必須結成一張網子做為陷阱來捕捉獵物，而後者則主動發動伏擊而不用依賴一張網子。結網型蜘蛛，在演化史中較早期出現的網結構稱為典型圓網，也就是現今常見的網，其平面垂直於空中且由具有輻射方向與螺旋方向的蜘蛛絲共同組成的網類型(圖1A)。當獵物撞上典型圓網時，藉由輻射方向的縱絲進行非彈性延展與收縮可將獵物的動能轉換為熱能，以降低獵物的速度。之後，使獵物固定在網上而不會掉下

來，則是由螺旋方向的黏絲所負責。直到蜘蛛奔至獵物旁，將獵物包裹並麻醉，蜘蛛網才完成其做為陷阱的功能。

黏珠型黏絲

上述螺旋方向黏絲的黏性來源並不是單一的。綜合物種類別、型態與作用機制，黏絲可區分為兩大類，分別為「黏珠型」與「篩絲型」兩大類(圖1)。黏珠型所屬的蜘蛛類群在人類生活中較常遇見，包括了常見的鬼蛛科(圖1B)、人面蛛科等，又通稱為「無篩疣蜘蛛」。黏珠型黏絲有一對極具延展性的鞭狀腺絲做為軸心絲，其延展性可使它被拉長至2倍的原長度仍不斷裂，使獵物在掙扎的過程中不至於將黏絲拉斷。在軸心絲上另有極大量的黏珠附著其上(圖1C-E)。黏珠的直徑大約介於0.001至0.01公分，除非用放大鏡仔細觀察否則是看不見的。黏珠排列的密度約是每公分的軸心絲至少有20顆黏珠。這些黏珠是由聚狀腺(一種特化的蜘蛛絲腺體)所分泌。在蜘蛛結網時，最後(也是最耗時、最耗能量)的過程是以螺旋方向運動將黏絲織在網上。此時，蜘蛛以步足拉出一段軸心絲，同時讓黏珠分泌處「滑過」正被拉出的軸心絲，方使一顆顆黏珠規律地附著在軸心絲上。

黏珠表面的主要成份包括了氯化膽鹼與乙酰牛磺酸，因此黏珠極具親水性。黏珠親水性的表面可以吸收空氣中的水份，進而增加黏珠的體積並提供表面張力可與獵物保持接觸，亦可使黏絲整體更富延展性。在黏珠內部則具有一圈隧道狀黏性的糖蛋白，可使黏珠「緊握」著軸心絲而不脫離(圖1E)。當軸心絲過分收縮時，黏珠的表面張力與黏性會將過長的軸心絲「收攏」在黏珠之內以避免黏絲鬆弛而相互吸附糾纏(圖2A)。當獵物上網時，獵物身體會與多個黏珠接觸與黏著。當獵物掙扎時，多個黏珠會同時被拉長並產生對抗獵物掙扎的張力，而形成吊橋般的力學結構(圖2B)。在這個吊橋模式中，特別是在潮濕的條件下，越是在兩端的黏珠或是越多黏珠與獵物附著則能提供的張力越大。根據測量，將一片僅有0.2公分寬的金屬與一根黏絲相黏後，該黏絲最大可以產生約0.002公克的黏力。這已經相當於許多小型昆蟲的體重。

在乾燥的環境中，黏珠中的水份會被蒸發至空氣中，造成黏絲延展性降低、黏性也降低，甚至完全失去黏性。此時，蜘蛛會經常性地結新網以

達2至10倍之多。因此有人提出分析蜘蛛網上污染物的量是一種監測空氣品質指標的方法。雖然黏珠的黏性在乾燥或空氣品質不佳的環境容易衰退，但黏珠型蜘蛛在演化上仍十分成功，主要原因是其單位長度的黏性較高且生產的成本較低。相對地，另一種型式的黏絲：篩絲型黏絲在這方面則略顯下風。

篩絲型黏絲

常見的篩絲型蜘蛛包括渦蛛科、鬼面蛛科(圖1F)。目前分子親緣學上的證據指出，蜘蛛產生結網捕食行為先是篩絲型黏絲出現，而後黏珠型才演化出現。篩絲型黏絲與黏珠型黏絲一樣是以螺旋方向排列在圓網上，但兩者在顯微鏡下的樣貌非常不同。篩絲型黏絲內部具有一對稱為偽鞭狀腺絲的軸心絲，一條以螺旋狀纏繞或游離於軸心絲的螺旋絲，以及數以百計的細小篩絲(圖1G-I)。當篩絲型蜘蛛結網時，會利用其第4對步足上的梳子狀結構—「櫛器」，由腹部的篩板一次拉出大量篩絲包覆著軸心絲及螺旋絲，並且以步足擠壓與拉扯篩絲形成團狀結構。因此，這些蜘蛛又通稱為「有篩疣蜘蛛」。根據研究，「加工」成團狀結構可以增強黏絲整體的延展性以利於對付獵物的掙扎動作，但也使得結網時花費更長的時間與更多的絲蛋白。整條黏絲的直徑約0.02公分，明顯粗於黏珠型黏絲，因此篩絲型黏絲在外觀上通常比較白亮顯眼。

篩絲型黏絲本身並不具有如黏球絲般的黏性，而是依靠大量的篩絲形成巨大表面積產生的凡德瓦力與表面張力以達成巨觀上的黏性，但這樣的黏性並不因為接觸面積增加而等比例地增加。篩絲型黏絲單位長度的黏性也遠不及黏珠型黏絲，且篩絲內部的軸心絲之延展性亦不如黏珠型黏絲的軸心絲，加上其生產單位長度所需的時間與能量成本較高，看來似乎篩絲型黏絲的黏性功能明顯劣於黏珠型。然而，篩絲型黏絲也並不是一無是處。一般認為，由於篩絲型黏絲並不依賴水份保持其黏性，可以在野外維持更久的黏性而不受過份乾燥的環境所影響，因此篩絲型蜘蛛不必要如黏珠型蜘蛛般頻繁地更新圓網。雖然其軸心絲的延展性較黏珠型黏絲差，但據研究，篩絲型黏絲在不斷被拉伸時，首先是部分篩絲逐漸斷裂，隨後軸心絲斷裂，最終才是螺旋絲斷裂。如此「多階層」的斷裂過程可讓黏絲整體以漸次斷裂的方式消耗獵物掙扎時的能量，且最終仍以螺旋絲保證其極大的延展性。

對仿生學的啟發

目前科學家對於如何利用蜘蛛黏絲做為模仿對象有許多興趣。以黏珠型黏絲為例，其「越濕越黏」的特性是很多人工化學黏著劑所沒有的。其黏珠可自動收攏過長的軸心絲而不產生糾結，亦可能應用在小尺度結構構成階段以利材料的彈性使用。以篩絲型黏絲為例，合成不同性質的纖維以利用其不同的機械性質又互補彼此缺點，整體而言仍可達成優良性質，這已經是材料科學中普遍的研發方向。小小蜘蛛經歷千萬年的演化而成就了以黏絲捕食獵物的精巧材料。在野外被蜘蛛網黏著滿臉時絕對值得去體會那比髮絲還細的蜘蛛絲竟具有如此不成比例的黏性。

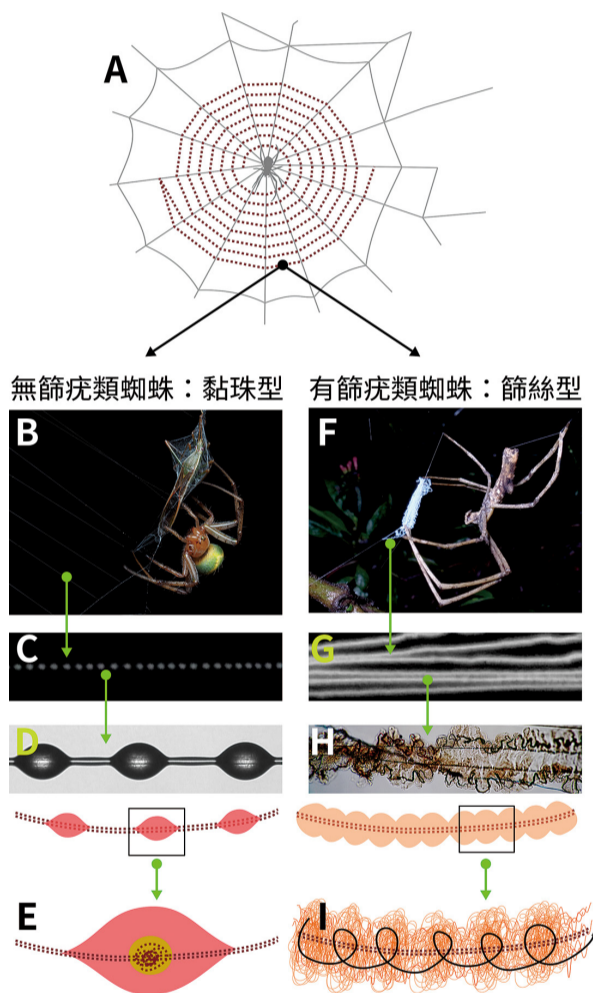


圖1 黏絲在典型圓網上呈螺旋狀排列(A)，且按分類群分為黏珠型(B-E)及篩絲型(F-I)兩大類。子圖D由M. Tierieszyna攝影，子圖H由D. Piorkowski攝影，皆取得授權。

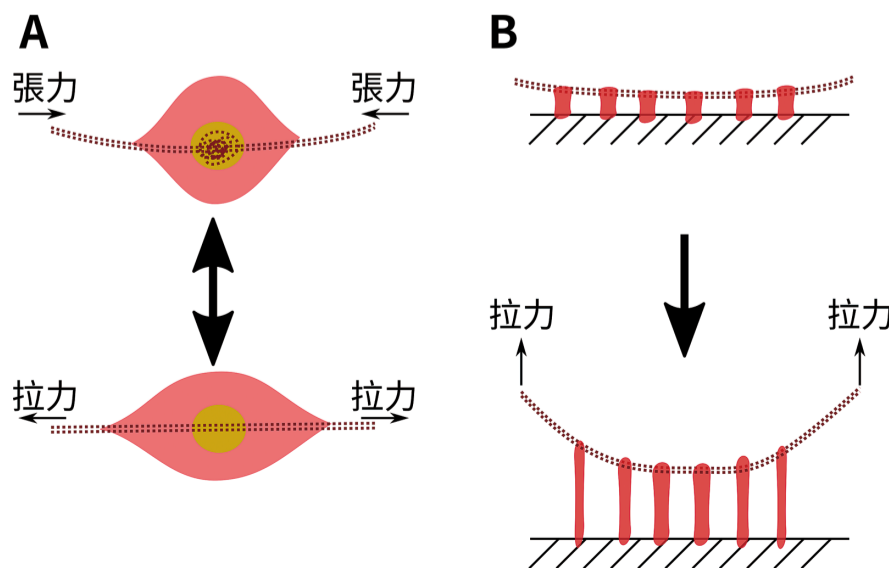


圖2 黏珠型黏絲收攏軸心絲(A)與附著獵物時的「吊橋機制」(B)。