

遨遊星體的內心世界一

淺談鎳鐵隕石的組織變化與分類

文／黃克峻、陳君榮·圖／黃克峻

摘要

鎳鐵隕石為一群沉重的天外來客。在人類進入鐵器時代前，它常被古文明利用成為工具與飾品之原料。然而在外觀看起來都很像的前提下，它其實是具有許多變化的特殊岩石。鎳鐵隕石特有的韋德曼交紋圖案不僅賞心悅目外，其中鐵紋石條帶組構變化亦可用於鎳鐵隕石的分類。另外，透過化學成分特徵為依據，科學家們更推測目前已知鎳鐵隕石來自於 12 個以上曾經存在於太陽系初的原始星體。鎳鐵隕石的組織結構與化學特徵紀錄了太陽系初形成時原始星體、星球的碰撞事件，讓我們洞悉了太陽系初生成時的「狂暴動盪時期」。

關鍵詞: 鎳鐵隕石、八面隕鐵、六面隕鐵、無紋隕鐵、韋德曼交紋圖案

科學家透過數百年來發現的隕石，依星體演化過程及成分區分為「原始球粒隕石」、「原始無球粒隕石」及「已分化無球粒隕石」三大類。所謂「原始」即指形成於原始太陽系星雲中，未受熔融或相對熔點低的熱反應的隕石，是目前所知最古老的物質。而「已分化無球粒隕石」，則代表其來自曾開始熔融、依礦物組成特色分層、化學分化的星體或小行星。這些於太陽系初形成之時出現的星體擁有如現今地球內部構造，有鐵質的核心及超基性、基性岩組成的地幔。不同類別的無球粒隕石即源自不同分化程度的星體及不同深度的產物，經碰撞破碎後漫遊於太陽系的碎片。鎳鐵隕石是「已分化無球粒隕石」大家族中的特殊族群，它們多來自已消失的小星體之心臟部位—核心，其以鐵、鎳合金為主的成分讓我們可間接了解地球的內核組成。鎳鐵隕石是國內外博物館的常客，也是民眾最常見到的隕石類型。其經切割再化學處理後展現出美麗的「韋德曼交紋圖案」(Widmanstätten Pattern)一直為大眾所熟悉的隕石樣貌(圖 1、2)。這些美麗圖紋的變化受控於星體的分化程度及降溫歷程，因此只要仔細觀察圖紋的型態，瞭解不同圖紋之差異並將其分類，即能追溯曾經存在於太陽系的已分化小星體們。在欣賞各式各樣的韋德曼交紋圖案的同時就猶如遨遊於不同星體的內心世界。

韋德曼交紋圖案的形成及分類

鎳鐵隕石中最引人注意的就是那交織的「韋德曼交紋圖案」，是隕石切開後經拋光、強酸蝕刻後才能顯現的晶體構造。此圖案是鎳鐵合金於星體核心中經漫長時間降溫所造成，每百萬年下降大約 1~10 度，在實驗室中無法製造出這樣粗大的組構，使得這圖案被認為是鑑別大部分鎳鐵隕石的重要特徵。這些紋路主要是透過含鐵較高的鐵紋石(化學式 $Fe_{0.9}Ni_{0.1}$)與含鎳較高的鎳紋石(化學式 $Fe_{0.8-0.35}Ni_{0.2-0.65}$)交織生長而形成。透過鎳鐵合金鎳含量與溫度之相圖(圖 3, a 至 b 點路徑)，可見鎳鐵合金在高溫時率先形成的鎳紋石在降溫至 850°C 以下後開始不穩定，隨著溫度逐漸降低，晶體中開始析出鐵紋石，此晶析作用過程中鐵紋石仍沿著原鎳紋石八面體晶面發育，因而形成具顯著方向性的鐵紋石—鎳紋石交紋。然而，鐵紋石的寬度變化取決於熔融星體的鎳含量、結晶作用發生時的溫度，以及降溫的速率。整體而言，鎳的含量越低或降溫較慢之星體，鐵紋石條帶越寬。由於鐵紋石條帶易於觀察，因此最早被利用來分類鎳鐵隕石。依照隕石之鎳含量與鐵紋石之寬度大小與可將鎳鐵隕石分為以下三大類：

八面隕鐵(Octahedrite)—最常見的鐵隕石組構

具有美麗交紋圖案的鎳鐵隕石其含鎳量多介於 6-18 wt%之間(圖 3)。由於韋氏交紋圖案中之鐵紋石沿著鎳紋石之{111}晶面，亦即八面體晶面上生長而來。使得具這種組織的隕石被稱為八面隕鐵(圖 1、圖 2a,b)。依據鐵紋石寬度可細分為：極粗晶(>3.3mm)、粗晶(1.3-3.3mm)、中晶(0.5-1.3mm)、細晶(0.2-0.5mm)、

極細晶 (<0.2mm)。具有顯微尺度組織之「隕合紋」(plessite) 則為極細晶的鐵紋石與鎳紋石交互生長而成，通常形成於較大的鐵紋石條帶交錯間隙中。切割八面隕鐵時若能平行著鎳紋石之{111}晶面切割，即可使鐵紋石條帶間呈現完美的 60 度或 120 度夾角 (圖 1a、圖 2a)。

六面隕鐵(Hexahedrite)－碰撞事件紀錄者

當星體核心含鎳量低於 5wt%時，隨著降溫過程其組成僅能形成以具有{001}立方體晶面解理的鐵紋石 (圖 3，c 至 d 點路徑)。由於所形成的鐵紋石晶體多半巨大 (>50mm) 且僅有少量鎳紋石共生，因此六面隕鐵多半不見美麗的韋氏交紋圖案。雖然如此，六面隕鐵中反而常見到許多經碰撞震盪產生的晶體缺陷－紐曼線(Neumann lines)，紀錄了太陽系初形成時原始星球的碰撞，反映當時非常動盪的時期。

無紋隕鐵 (Ataxite)－沒有韋氏交紋圖案的鐵隕石

並不是所有的鎳鐵隕石都有美麗的韋氏交紋圖案，無紋隕鐵是這類隕石的代表。因為鎳含量可高達 30wt%的它，於降溫時鎳紋石進入鐵紋石之穩定範圍已經低於 600 度 (圖 3，e 至 f 點路徑)，鎳紋石晶體結構於這個溫度已經太過低溫，無法有足夠的熱擴散產生明顯的鐵紋石晶析構造，因此不具韋氏交紋圖案。但是，一般取得的無紋隕鐵樣本多會有美麗如鏡子般的拋光，反而相當有魅力 (圖 2c)。

鎳鐵隕石的化學分類

隨著化學分析技術的進展，1950 年代以後開始以隕石的化學組成來進行分類。由於微量元素銻在親鐵元素中相對較易揮發，當星體核心分化程度不同時會導致其濃度顯著變化。因此，根據隕石中銻的濃度隨鎳含量而變化分布的情形，搭配相對不易揮發的鈹元素濃度為對比，可進一步分出 12 個化學類群，並以羅馬數字與英文組合表示 (圖 4)。然而目前尚有約 15%的隕石之成份不落於上述 12 個化學類群中，另被分於第 13 群「未分類」中。鐵鎳隕石若有相近的化學特性可能代表具有相同的星體來源。這些化學分類顯示目前鎳鐵隕石星體來源至少有 12 種以上，若以同位素分析結果進行分類，其來源可能更高達 50 種以上。

太陽系初形成約 0.1－1 百萬年期間，小行星與原始星球反覆加積誕生與碰撞毀滅。科學家根據不同類型鎳鐵隕石的冷卻速率，估算這些已不存在的原始星體直徑為 5－300km 左右。如今已消失殆盡的它們，鎳鐵隕石成爲了解它們存在的關鍵線索

參考文獻

- Scott, E. R., & Wasson, J. T., 1975. Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics*, 13(4): 527-546.
- Haack, H., & McCoy, T. J., 2003. Iron and stony-iron meteorites. *In*: Davis, A.M. (Ed.), 2003, *Meteorites, Comets, and Planets Vol. 1: Treatise on geochemistry*, pp. 325-341. Oxford: Elsevier-Pergamon
- Yang, J., Goldstein, J. I., & Scott, E. R., 2007. Iron meteorite evidence for early formation and catastrophic disruption of protoplanets. *Nature*, 446(7138): 888-891.

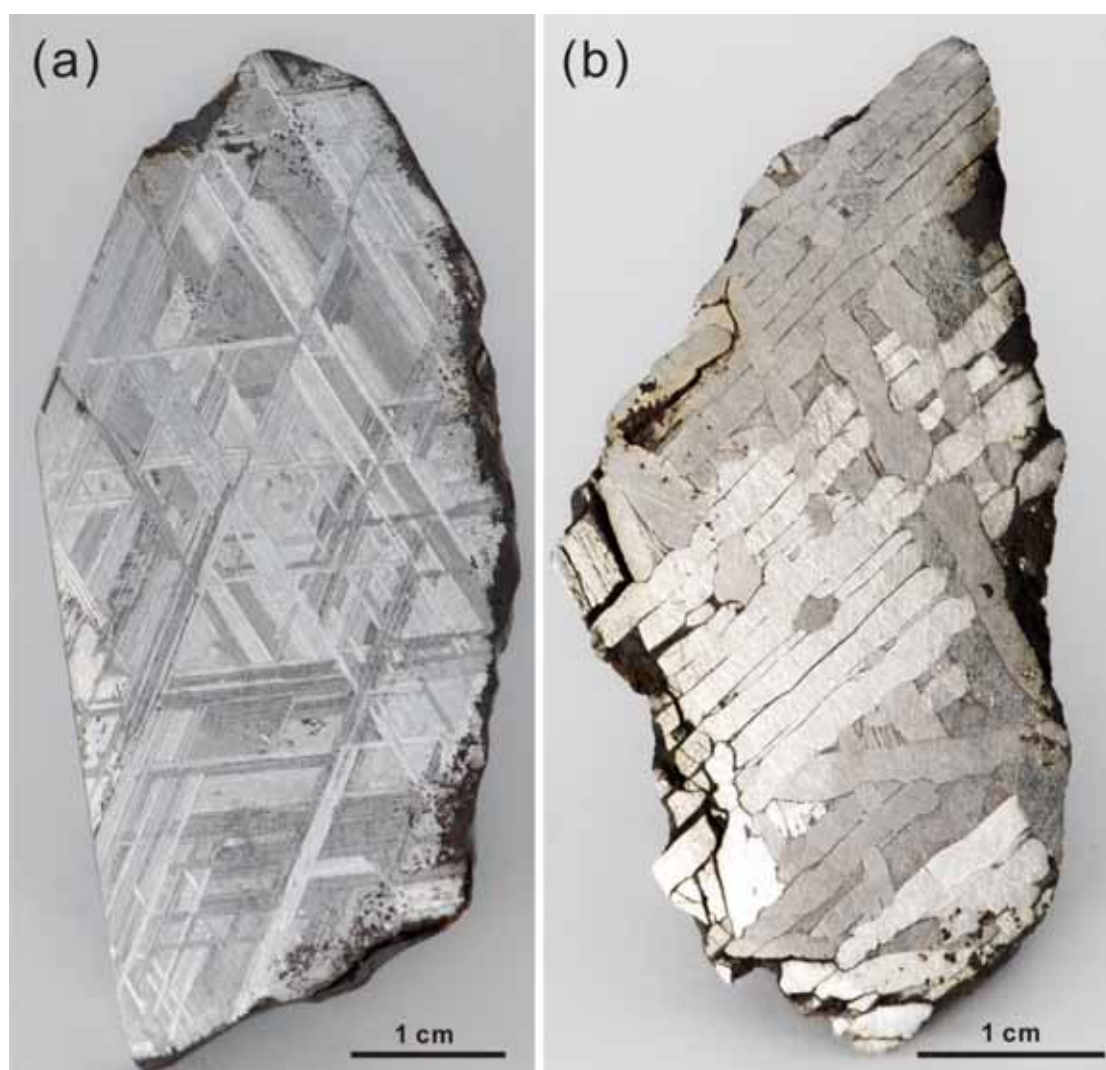


圖 1. (a)瑞典 Muonionalusta 鎳鐵隕石，屬 IVA 群的細晶八面隕鐵，鎳含量 8.4%，鐵紋石條帶間呈現接近 60 度或 120 度之夾角。(b)墨西哥 Toluca 鎳鐵隕石，屬 IAB 群的粗晶八面隕鐵，鎳含量 8.1%。兩者之鐵紋石條帶寬度有顯著不同。

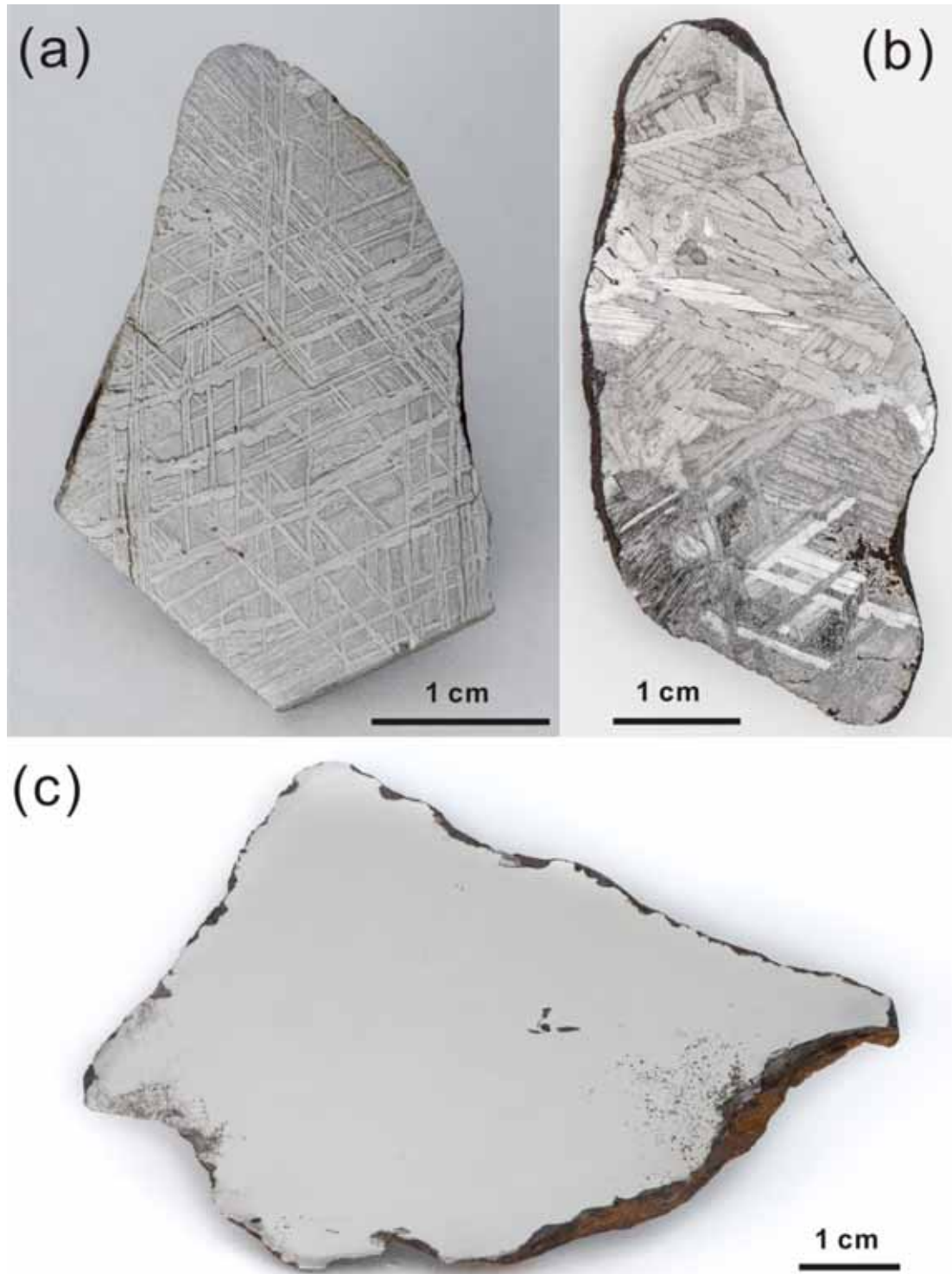


圖 2. (a) 澳洲 Henbury 鎳鐵隕石，屬 IIIAB 群的中晶八面隕鐵，鎳含量 7.5%。
(b) 澳洲 Mundrabilla 鎳鐵隕石，屬 IAB 群的中晶八面隕鐵，鎳含量 7.8%。(c)
俄羅斯 Chinga 隕石是知名的無紋隕鐵，鎳含量高達 16.7%。

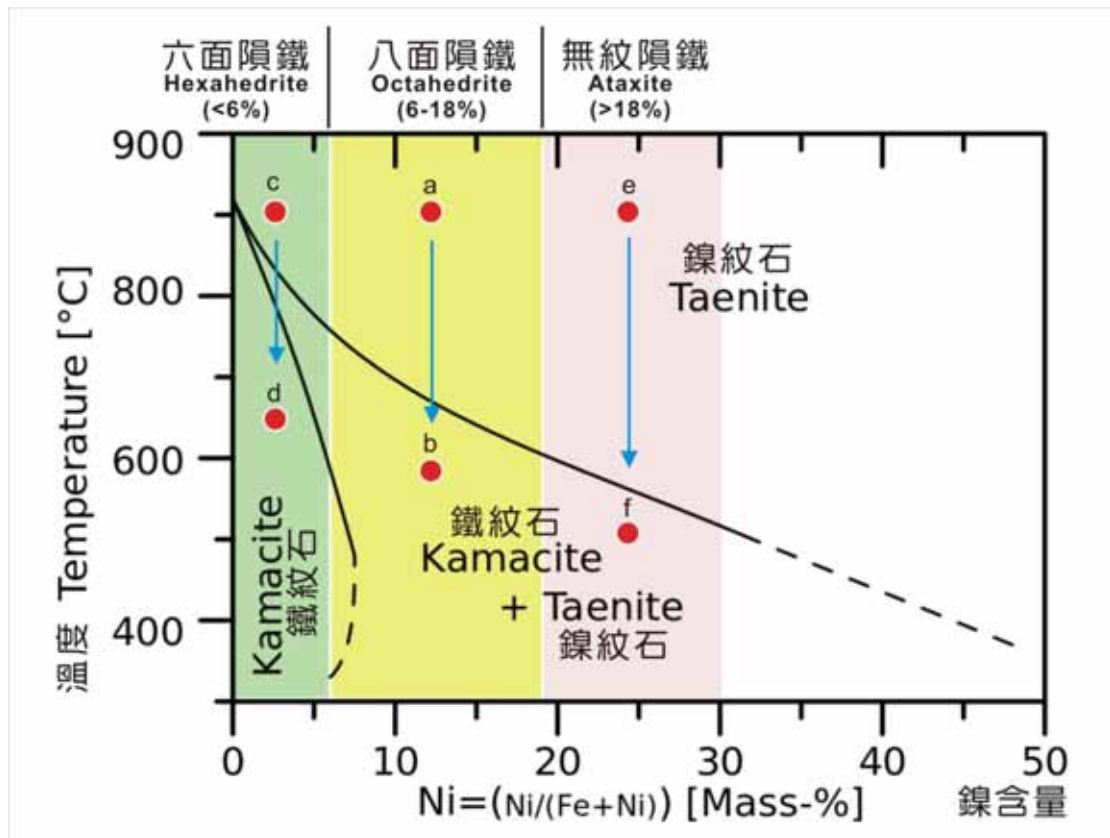


圖 3. 鎳鐵隕石中主要礦物生成之溫度與鎳含量之間的關係，顯示合金中鎳含量差異可導致不同組構的鎳鐵隕石形成。

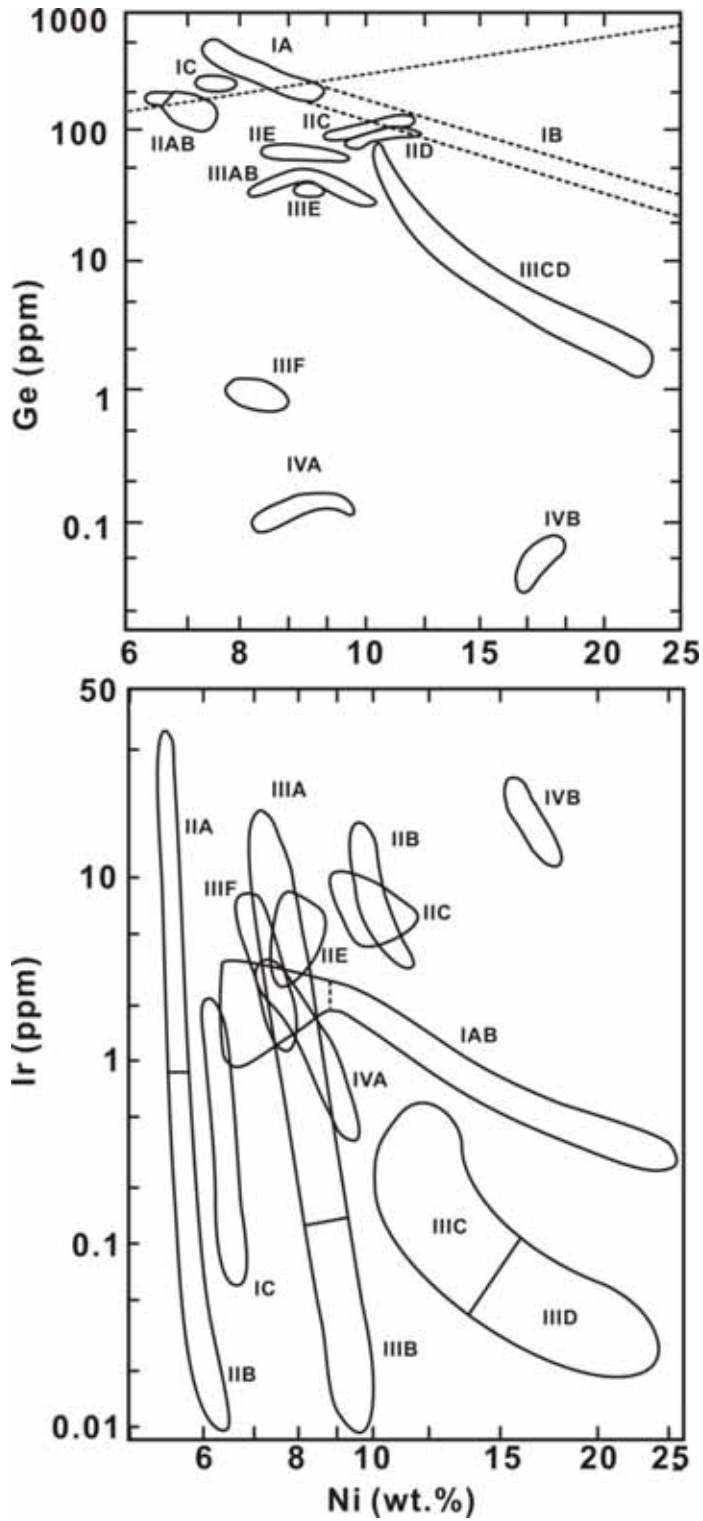


圖 4. 鎳鐵隕石之化學分類：根據鍺、銥濃度隨鎳含量變化的範圍定義出不同類型的鎳鐵隕石（修改自 Scott and Wasson, 1975）。



圖 5. 俄羅斯 Sikhote-Alin 隕石 (IIAB 群; 粗晶八面隕鐵), 其表面充滿稱為指捏痕(regmaglypts)的凹坑。標本約 10 公分寬。(洪誌橋拍攝)