

## 從地心冷卻：隱身於韋德曼交紋中的秘密

文·圖—陳君榮、黃克峻

### 摘要

鎳鐵隕石源自太陽系初形成時，微行星或原行星的金屬地核。當鎳鐵金屬核心逐漸冷卻時，較高溫形成的鎳紋石逐漸會被較低溫形成的鐵紋石取代，使得鐵紋石與鎳紋石交織生長，形成鎳鐵隕石中著名的「韋德曼交紋圖案」。科學家們透過交紋圖案中鐵紋石與鎳紋石的生長情形，不僅可計算出鎳鐵隕石的冷卻速率，並且能估算其母星體的大小。不同隕石間冷卻速率的變化，反映出早期太陽系原行星間的撞擊歷程。因此，韋德曼交紋圖案可謂是探索早期太陽系微星體與原行星間碰撞事件的關鍵鐵證。

關鍵詞：冷卻速率、鐵紋石、鎳紋石、鎳鐵隕石

## 星體降溫紀錄器

太陽系形成之初，太陽周遭的塵埃彼此碰撞聚積成微行星，微行星內部放射性元素所產生的熱可使較重的鐵和鎳遷移、富集至核心，造成分異微行星。而當放射性元素耗盡，熱源逐漸消逝，炙熱的液態金屬核心也就逐漸冷卻，並形成鎳鐵合金。掉落至地球的鎳鐵隕石即代表過去曾經存在的星體核心碎片，其熱歷史可透露早期太陽系中微行星和行星早期形成階段的歷程。鎳鐵隕石在攝氏 700 至 500 度間緩慢的冷卻過程，可使鎳鐵晶相中低溫相鐵紋石（化學式  $\text{Fe}_{0.8-0.35}\text{Ni}_{0.2-0.65}$ ）生長並取代高溫相鎳紋石（化學式  $\text{Fe}_{0.9}\text{Ni}_{0.1}$ ），兩者之生長變化即形成著名的「韋德曼交紋圖案」（圖 1、3；館訊 363 期－遨遊星體的內心世界）。元素分布圖（圖 2、3）顯示，含鎳較高的鎳紋石位置對應在交紋圖案中暗線區域，而交紋中的粗亮條紋即為鐵紋石，可見鎳紋石分布區域明顯比鐵紋石少許多。由於當隕石降溫速度越慢時，鐵紋石可生長的時間越久，所形成的鎳紋石條紋便越寬。因此韋德曼交紋圖案變化是科學家們探討隕石冷卻速率的重要線索。

## 魔鬼藏在細紋裡

通常來說，鎳鐵隕石中鐵紋石條紋越寬可能表示其冷卻速率較慢，如發現於墨西哥的 Toluca 隕石（圖 1）明顯比納米比亞 Gibeon 隕石（圖 3）有較寬的鐵紋石條紋，這表示 Toluca 隕石冷卻速度比 Gibeon 隕石慢許多。然而要得知準確的冷卻速率卻不容易，因為韋德曼交紋圖案變化還受到隕石的鎳、鐵及磷含量、交紋圖案形成機制、鎳-鐵和鐵-鎳-磷相圖、鐵紋石成核溫度、鎳紋石阻隔效應，以及元素交互擴散係數等因素的控制。為簡化這些因素，科學家們透過實驗室研究所得之金相參數及生長機制，即可經由電腦模擬出不同冷卻速率下的條紋生長情形，而進一步與從隕石交紋圖案中所實際量測的條紋相關數據進行擬合，即可估算出隕石的金相冷卻速率。交紋圖案中可量測的數據包含：鐵紋石條紋寬度、鎳紋石條紋寬度、鎳紋石條紋中心鎳含量及鎳剖面變化（圖 2b、4b）等。早期僅能以鐵紋石寬度數據來計算冷卻速率，近年來隨著岩相分析技術的進展，則以鎳紋石相關數據來推算，所得的速率也較為準確可信。另外，科學家們亦嘗試利用鎳紋石條紋邊緣中僅約數百奈米的雲狀或島狀鎳紋石晶粒大小，以及鐵紋石及鎳紋石交界處兩礦物相的鈷/鎳比值等資訊來求得隕石冷卻速率。上述不同方式量測方法所計算的冷卻速率可能會有很大差別，例如 Gibeon 和 Toluca 的金相冷卻速率分別為每百萬年下降 20 度及 1.6 度，但以量測島狀鎳紋石尺寸的方法所估算的冷卻速率則分別為每百萬年下降 250 度及 25 度。因此在比較不同隕石的冷卻速率時，需考量其量測方法是否相同。

## 星體越大冷得越慢

通常星體越大，冷卻所需的時間越長，因此冷卻速率越慢。透過金相冷卻速

率與母星體熱演化數值模型結合，可估算出隕石母星體的尺寸大小。目前已知鎳鐵隕石經微量元素進行化學分類後可分析出至少 14 個以上類群。而相同化學分類群內的鎳鐵隕石可能源自同一母星體，也會有相近的冷卻速率。因此，透過同一類群中鎳鐵隕石冷卻速率的變化範圍，可約束其母星體可能的尺寸大小。例如 II AB 群含有 78 個以上的鎳鐵隕石，這些隕石冷卻速率變化範圍為每百萬年下降 6 至 12 度，母星體的半徑範圍經計算為 45 至 65 公里。III AB 群含有 220 個以上的鎳鐵隕石，冷卻速率變化範圍為每百萬年下降 56 至 338 度，母星體的半徑範圍經估算為 20 至 58 公里。可見 II AB 群隕石母星體比 III AB 群隕石母星體的降溫速率慢，推估其母星體的尺寸也比較大。然而，在計算星體大小的數值模型中，主要的誤差來自冷卻過程中地幔、地殼及地表的狀態。由對現今小行星的觀測，顯示它們的表面往往被角礫狀或多孔的岩屑所包覆。由於表面覆蓋物質可能會使隕石冷卻速率降低 5-10 倍，因此若考量覆蓋物質的影響，其推算出來的母星體半徑可能會減少一半以上。

#### 冷卻不均，碰撞有理

IVA 群鎳鐵隕石有 61 個成員（知名的 Gibeon 隕石即為其中之一；圖 3），這些成員的冷卻速率以最準確測的方法量測，仍有每萬年下降 100 至 6600 度的變化範圍。在有明顯隔熱效果的矽酸鹽地幔包覆的情況下，金屬核心外部至內部的冷卻速率應差別不大，因此，似乎只有母星體在冷卻前遭受嚴重撞擊，才能解釋其核心冷卻速度不均的現象。然而令人費解的是，這些成員的冷卻速率卻明顯與其鎳含量呈現負相關，這意味著含鎳最高的金屬核心深處，其冷卻速率較慢，而含鎳較少的核心外圍，冷卻速率最快，如此情況類似於一團幾乎沒有地幔包覆的炙熱液態金屬直接暴露冷卻而成。再者，在沒有地幔包覆隔熱的狀態下，冷卻速率範圍所估計出的母星體直徑至少達 300 公里。究竟該如何解釋這些情況呢？科學家們認為小行星帶原本可能存在許多直徑達上千公里的原行星，當原行星間發生相互擦撞時，原行星的部分金屬核心被猛烈撞擊而釋放出來，因而形成一連串富含金屬而無矽酸鹽地幔包覆的微行星。近年來人類不僅具登陸小行星的能力，未來甚至可採集岩樣回地球分析。然而在人類探訪最近的金屬小行星前，鎳鐵隕石的韋德曼交紋無疑是太陽系早期微星體或原行星間碰撞、肇逃的最佳鐵證。

#### 參考文獻

- Benedix, G. K., Haack, H., & McCoy, T. J., 2014. Iron and stony-iron meteorites. *Meteorites and cosmochemical processes*, 267-285.
- Goldstein, J. I., Scott, E. R. D., & Chabot, N. L., 2009. Iron meteorites: Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 69(4), 293-325.
- Short, J. M., & Goldstein, J. I., 1967. Rapid methods of determining cooling rates of iron and stony iron meteorites. *Science*, 156(3771), 59-61.

Yang, J., & Goldstein, J. I., 2005. The formation of the Widmanstätten structure in meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 40(2), 239-253.

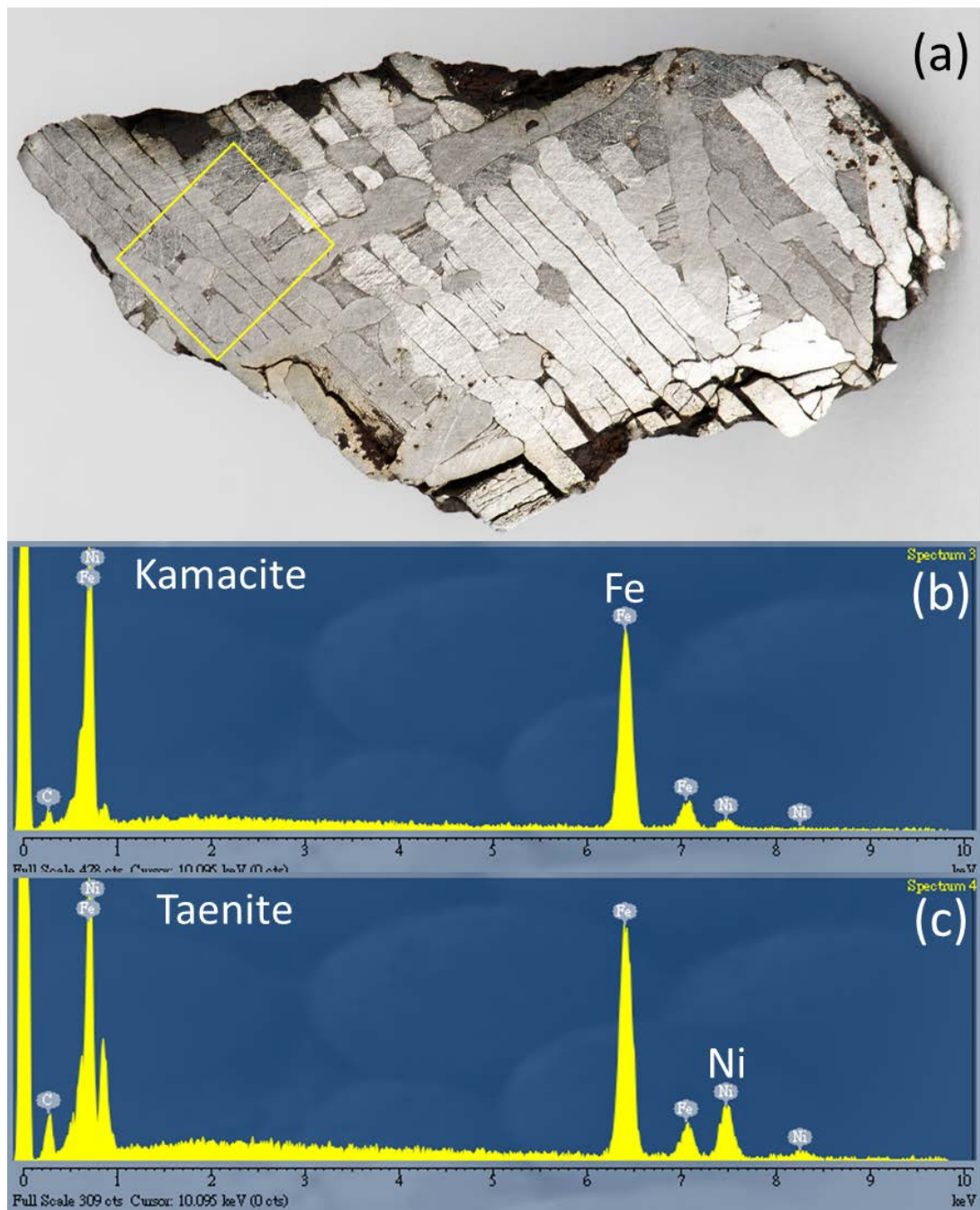


圖 1 (a)墨西哥 Toluca 鎳鐵隕石，屬 IAB 群的粗晶八面隕鐵，鎳含量 8.1%。黃色框之分析請見圖 2a。(b)及(c)分別為 Toluca 隕石中鐵紋石及鎳紋石之能量分散 X 射線光譜。可見鎳紋石比鐵紋石有較強之鎳訊號。

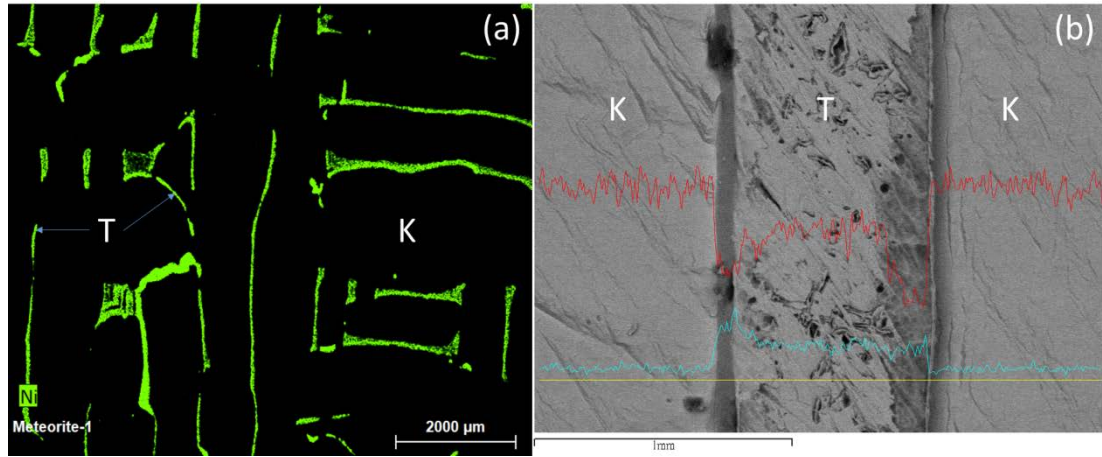


圖 2 墨西哥 Toluca 鎳鐵隕石之元素分布圖及線掃描分析:(a)X 光螢光光譜面掃描分析顯示綠色區域為鎳紋石分布位置，黑色區域為鐵紋石。分析位置為圖 1a 中黃色方框位置。(b)鎳紋石微區之 X 光能量分散光譜線掃描分析圖。藍線與紅線分別顯示鎳與鐵成分之變化。



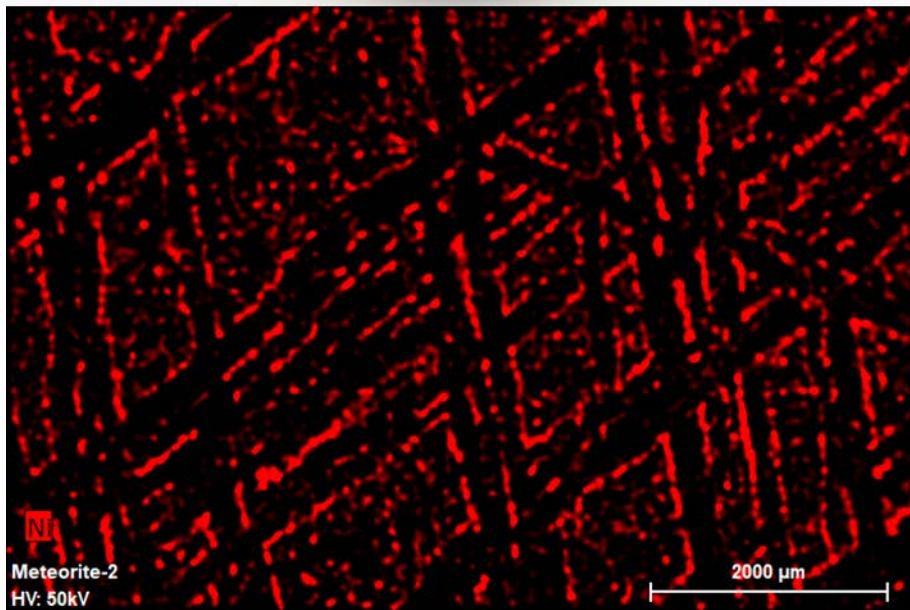


圖 3 上圖：非洲納米比亞 Gibeon 隕石屬 IVA 群的細晶八面隕鐵，鎳含量 7.7%。鐵紋石之條紋寬度多小於 1 公厘。標本直徑為 3 公分，此標本展示於自然學友之家。下圖：Gibeon 隕石之 X 光螢光光譜面掃描分析，紅色區域為鎳紋石，黑色區域主要為鐵紋石。

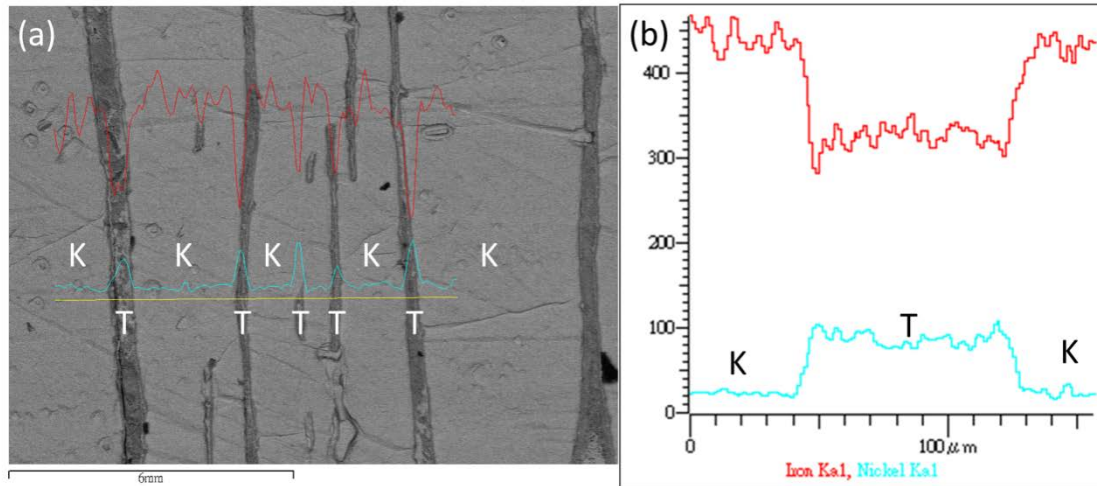


圖 4 Gibeon 鎳鐵隕石之電子顯微鏡照片及 X 光能量分散光譜線掃描分析。(a) 暗條紋區為鎳紋石，其餘亮區為鐵紋石。(b) 鎳紋石條紋剖面之元素濃度變化。可見鎳紋石條紋中心之鎳濃度較低，與鐵紋石接觸邊緣則較高。圖中藍線與紅線分別顯示鎳與鐵成分之相對變化。T 為鎳紋石，K 為鐵紋石。