

# 能量守恆定律的創建者麥爾 ——熱與功可相互轉換

田曉東<sup>1</sup> 姚珩<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>福建閩南師範大學 物信學院

<sup>2</sup>國立臺灣師範大學 物理系

## 壹、生平

麥爾(Julius R. Mayer, 1814-1878,圖 1) 出生於德國南部的海爾布隆市，父親在那經營一家藥店，使得他從小便對化學和科學實驗非常感興趣。18 歲進入杜賓根大學學習醫學，24 歲完成畢業論文，獲得了醫學博士。



圖 1、能量概念的建立者——麥爾

畢業後懷著想目睹海外世界的理想，於是報考了前往印度貿易船上的隨船醫生，在開航前為了通過評級，需在巴黎接受六個月的訓練準備。在這段時間，他結識了後來成為數學教授的年輕同胞鮑爾，

---

\*為本文通訊作者

在之後的幾年裡，鮑爾提供麥爾不少數學上的協助。

1840 年 2 月麥爾出發到爪哇，當他需從南太平洋船上的水手身上抽血檢驗時，他驚訝地發現他們的靜脈血比歐洲人的更為鮮紅明亮。他後來回憶說對此印象很深刻，此觀察也是引起麥爾提出能量普遍化概念的火種。麥爾認為身體的活動需靠消耗養分，來提供熱量，此過程就像是燃燒反應，也就是要消耗血中的氧氣。由於生活在熱帶地區的人，不需要太多熱量來維持體溫，需要的氧化反應也較少，造成從動脈流入靜脈中的血液，含氧量依然很高，而較為鮮紅。

麥爾次年回國，立刻著手檢視他的科學猜測，開始認為熱量和機械功之間必定有恒定關係，於 1841 年 6 月提交一篇短文《關於能量定量和定性的決定》至《物理與化學期刊》，但當時他對物理學的看法仍顯得較模糊，而未被接受。這對麥爾而言並不是一件壞事，因為這可使他明白自己尚未能以足夠專業的邏輯方式，表達出清楚的觀點。幸運的是，他沒有氣餒，在學習到更成熟的基礎科學術語後，透過研究氣體的熱性質，首先提出了熱量與機械功對應的量化關係，並於 1842 年 3 月，寄至化學家利比希主編的《化學與藥學期刊》上。文中雖然沒有寫下實際的計算細節，

但這是科學史上，最先準確寫下熱功當量的出處。此篇名為《無機自然的能量》論文雖然被接受發表，但選擇《化學和藥學期刊》毫無疑問是不幸的，因為此份期刊並無法廣泛地引起像焦耳及其他物理學家的關注。

同年他結婚成家，原本可過著舒適快樂的醫師生活，但他卻強烈地受到熱與機械功之間的關係為一種無所不包的科學觀點所驅動，斷言：運動、熱、光、電和各種化學反應都屬於不同外形下的相同物件，而專心投入研究。除了受到好友鮑爾在數學上的指點，鮑爾並敦促他擴大論述範圍，使理念更清晰，從而獲得更多的讀者支持。麥爾接受了這個建議，決定繼續展示其基本概念，並可以應用於生理學。三年後的 1845 年，麥爾以 112 頁的專書發表了《生物體內的運動及其與新陳代謝的關聯》，這是麥爾最重要的代表作，書中他以空氣的定容與定壓比熱的實驗值，仔細地計算出熱功當量。雖然依然受到疏忽，但他仍堅持不懈，在 1848 年帶來了另一篇長篇論文《天體力學》，努力解釋太陽熱量，與隕石墜落動能轉化為熱量的機制。

但好運似乎總是未眷念麥爾，當時德國發生了戰爭，動亂分散了眾人對科學的關注，1846 年和 1848 年間，麥爾的三個小孩相繼過世，造成他很大的悲痛。當時有些人還稱麥爾是一個無知的人，並認為熱的機械理論是一個笑話。不幸的是麥爾卻相當認真地看待這個荒謬的事情，這一切都讓他心煩意亂，造成他失眠與精神衰

弱。1850 年 5 月麥爾從臥室的窗戶跳到了下面的街道，雖然保住了命，但嚴重損傷了他的腳。他顯然意識到他需要一些幫助，1851 年他決定自願進入私人療養院，那時醫院還認為他的病情毫無希望，不太可能活下去。這段期間，他從科學圈子消失了十年。沒多久許多物理學家相繼發現熱與力學能的關係，但麥爾早期的貢獻基本上仍被遺忘了。

與此同時，麥爾安靜地生活，逐漸恢復健康。直到 1858 年他從科學默默無聞中脫穎而出，他的科學成就開始受到遲來的認可，首先由化學家尚班推薦，成為巴塞爾自然科學院名譽會員。1860 年後，他開始參加科學會議，並給了多次通俗演講，這些大大增強了他的聲譽。英國科學家廷德爾在 1862 年倫敦的科學會議上，做了對麥爾回顧的講座，對他在熱力學理論上的開創性工作給予充分肯定；之後許多優秀的物理學家，如亥姆霍茲、杜林也分別公開承認麥爾發現熱和機械功關係的優先權。1871 年麥爾獲得倫敦皇家學會至高榮譽的科普利獎章(焦耳與亥姆霍茲分別於 1870 與 1873 年獲得)，麥爾並成為杜賓根大學榮譽博士，也是巴伐利亞和都靈學院的院士。去世後家鄉海爾布隆為他修建了一個紀念碑，表揚他在能量守恆上的創見。

## 貳. 研究成果

18 世紀末之前眾人都接受化學家拉瓦錫的觀點，認為物體的溫度取決於內部所含的熱質(caloric)，1798 年倫福德在觀

察鑽頭鑽炮筒情形，發現與熱質說觀點矛盾，提出「熱不是一種物質，而是由運動產生的」觀點。但在之後的半個世紀中，熱量的運動理論並沒有得到確立。

### (一) 最初的能量概念

年輕的麥爾藉著研究許多化學反應，對拉瓦錫提出物質守恆的信念：物質既不能被創造也不能被破壞，它只是外形改變，印象深刻。1841 年寫了第一篇短文，認為：科學就是對變化中的無機或有機世界，尋找造成這些自然現象結果(effect)的背後原因(cause)，這個原因稱作「能量」(kraft)，例如位能是造成物體下落運動的原因。且能量不可被毀滅，它的量總是不變，只是性質在變化。運動、熱與電都是一種能量，彼此可互相轉換。運動消失後可產生等比例的熱；藉著膨脹，熱可轉變成運動。此篇論文沒有任何計算，但他堅定地指出熱與運動有著必然的對應關係。

### (二) 熱功當量

1842 年麥爾在期刊上正式發表了第一篇小論文，對物理原理的掌握有相當驚人的提升。他引用萊布尼茲提出的著名原則——原因等於結果——來佐證潛在等同性的因果關係，由此指出能量是一切變化的原因，所產生的結果雖不再具有原始形式，但它們之間的數量是等價的。並由高處的位能可轉換成動能；及強烈攪動水，停止之後動能消失，必定會產生某種結果，此結果便是熱，它可造成水溫上升，由此來

論證能量是不可毀滅的。

在結尾時他明白寫下：自 365 米高處落下的水，可使等量的水上升 1°C。當時熱量的單位是卡(cal)，定義為使 1 克的水上升 1°C 所需的熱量。他雖然沒有給出計算，但按照今天的作法，因 1 克水在 365 米高處的位能為

$$\begin{aligned} U &= mgh = 1 \text{ g} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 365 \text{ m} \\ &= 3.58 \text{ J} = 1 \text{ cal} \end{aligned} \quad (1)$$

亦即，在此處麥爾已清楚指出熱量(卡)與機械功(焦耳)對應相等，這兩者的定量關係稱為熱功當量(mechanical equivalent of heat)。這是史上首次出現熱與功是一體的兩面，彼此可以互相轉換觀點的出處。麥爾在此所提供的數值雖然還不是很精確，但他將熱與功對應結合起來卻是一項重大創舉！

他也提到氣體吸收的熱可使氣體膨脹，轉換成機械功，但依然沒給出計算細節，對日後有關能量的優先權造成不少困擾。

### (三) 熱功當量的計算與熱力學第一定律

具有生理學和醫學背景的麥爾，將不可避免地尋求把能量概念應用於生物體上。他在 1845 年發表了最重要的專著《關聯》一書，分別探討無機體與有機體的能量轉化。

## 1. 無機體的能量轉化

在書中的前半段，麥爾寫下了獲得熱功當量的詳細步驟，他使用了法國化學家給出的空氣定壓比熱  $c_p$  值，即在固定壓力下使 1 克空氣上升  $1^\circ\text{C}$  需要 0.267 卡，並使用物理學家杜隆發現的比值關係  $c_p/c_v = 1.421$ ，得知定容比熱  $c_v = 0.188 \text{ cal/g}$ 。若使定容氣體上升  $1^\circ\text{C}$  所吸的熱為  $x$ ，則使定壓氣體上升  $1^\circ\text{C}$  所吸的熱將會更多，設為  $x + y$ ，此處多出的  $y$  是定壓氣體膨脹時對外所做的功，即  $y = P\Delta V$ ，其中  $P$  為壓力， $\Delta V$  為膨脹前後的體積差。

由於在溫度  $0^\circ\text{C}$  壓力 76 cm 汞柱高， $1 \text{ cm}^3$  體積的空氣品質為 0.0013 g，故在定壓下使  $1 \text{ cm}^3$  的空氣，從  $0^\circ\text{C}$  上升到  $1^\circ\text{C}$  所需要吸收的熱量為

$$(0.0013 \text{ g})(0.267 \text{ cal/g}) = 0.000347 \text{ cal} \quad (2)$$

而在定容下使  $1 \text{ cm}^3$  的空氣，從  $0^\circ\text{C}$  上升到  $1^\circ\text{C}$  所需要吸收的熱量則為

$$(0.0013 \text{ g})(0.188 \text{ cal/g}) = 0.000244 \text{ cal} \quad (3)$$

此二值的差  $\Delta Q = .000347 \text{ cal} - .000244 \text{ cal} = 0.000103 \text{ cal}$ ，即為空氣膨脹時所作的功  $W$ ，如圖 2 所示。而在壓力固定時，氣體體積變化與溫度變化成正比，故從  $0^\circ\text{C}(273 \text{ K})$  上升到  $1^\circ\text{C}(274 \text{ K})$  的體積變化為  $\Delta V = (\Delta T/T)V = (1/273)V$ ，由大氣壓力  $P = 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ，故定壓膨脹時所作的功

$$\begin{aligned} W &= P\Delta V \\ &= (1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left( \frac{1}{273} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \right) \\ &= 3.70 \times 10^{-4} \text{ J} \end{aligned} \quad (4)$$

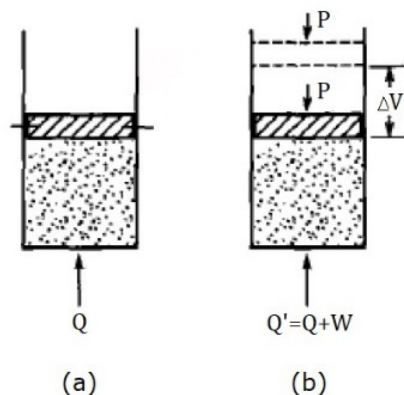


圖 2、(a)定容比熱(b)定壓比熱示意圖

結合上面二式  $\Delta Q = W$  或  $0.000103 \text{ cal} = 3.70 \times 10^{-4} \text{ J}$ ，即可得到熱功當量

$$1 \text{ cal} = 3.59 \text{ J} \quad (5)$$

後來法國化學家雷諾特表明， $c_p$  實際上是  $0.238 \text{ cal/g}$ ， $c_p/c_v$  更接近 1.40。根據這些值，麥爾的計算得出的值與現今公認的測量結果  $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$  完全一致。

又由於在定壓下，定量的熱量  $Q$  提供給氣體時，一部分是用來增加溫度(改變氣體的內能  $\Delta U$ )，其餘部分則會使氣體對外作功  $W$ ，即

$$Q = \Delta U + W \quad (6)$$

在此他已經以普通的形式說出了熱力學第一定律。

他也描述 1 g 的碳生成二氧化碳的燃燒熱為 8558 cal，此熱量對應的功可使  $3.6 \times 10^5 \text{ kg}$  的碳上升 1 m，即

$$Q = 8558 \text{ cal}$$

$$\begin{aligned} &= W = mgh \\ &= 3.6 \times 10^5 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} \\ &= 35280 \text{ J} \end{aligned} \quad (7)$$

由此可再得  $1 \text{ cal} = 4.12 \text{ J}$ 。

另一方面，英國物理學家焦耳於 1843 年在《論磁電的熱效應及熱的機械值》的論文中，提到自然界的能量，如力學能或電磁能，可等量轉換，不會消失，並得到熱功當量為  $4.18 \text{ J/cal}$ ；1845 年他做了著名的槳葉輪實驗，所得到的熱功當量為  $4.41 \text{ J/cal}$ 。兩人在熱與機械功的轉換，幾乎不分軒輊，由於焦耳在歐洲物理學界較活躍，因此獲得較多的關注。馬赫也將「熱與機械功等效定理」稱做「麥爾—焦耳原理」。

麥爾基本上把能量分為五種主要形式：1.位能 2.運動能量（移動與振動）3.熱 4.電磁能 5.化學能。彼此可以互相轉換，且逐一列舉出了 25 種可能的轉化情況，指出不論形式如何變化，它們的總能量維持不變。這是焦耳沒有強調的工作，馬赫也認為能量守恆定律強力的宣導者是麥爾與亥姆霍茲。

## 2. 有機體的能量轉化

麥爾是首位將能量轉換的概念應用於生物現象的科學家，也可說是開啟了生物物理學的領域。他主張生命過程只是物質與能量所發生的轉變，兩者皆不可能無中生有。並仔細探討身體如何將所吸收食物的燃燒熱轉化為力學能，經過相關物理證據的大量討論後，麥爾認為動物體內產生

熱量的唯一原因為化學反應，也就是氧化過程，並是透過血液來提供。

在植物的研究上他指出：植物吸收一種形式的能量—光能，並產生另一種形式的能量—化學能。植物不僅產生有機物質，而且還提供維持生命的能量。他的發現對日後光合作用的研究有著重要啟示。

## (四)天體研究與回顧

麥爾並未滿意將能量原理僅應用在生物學上，他決定關注更多有用的能量問題，令人驚訝的是，他的注意力被吸引到了太陽的熱量問題上。1848 年發表在巴黎科學院的《天體力學》論文，是十九世紀中期的第一篇探討與太陽系起源密切相關的天文研究，也已具有現代宇宙學的內涵。

他提到來自太陽的光輻射意味著持續的能量損失，計算出在沒有能源的情況下，太陽將在 5000 年內冷卻下來，僅能靠隕石與小星球的撞擊，所釋放出的動能，才可讓太陽維持高溫。在此著作裡，麥爾展現出他對天體力學相關文獻的熟悉度，以及變得更有能力處理許多困難的物理計算，也顯示了他在科學領域上多才多藝的天賦。

1851 年發表他的第四篇著作《評熱量的力學等效性》，文中以通俗的語言回顧自己對能量原理的研究工作，強調熱量和運動可以相互轉化，且兩者間之不變關係必須用數字精確表示。再次指出讓定量的水增高  $1^\circ\text{C}$  所需的熱量，對應於相同質量物體自 1200 呎墜落下來重力所作的功，相當

於每卡3.9焦耳。

他主張熱和功之間存在不變的數值關係，且有機體的機械產生和無機物之間沒有實質的差異，這也是生理燃燒理論的假設。熱與功等價的自然法則是基於人類思維的基本思想：物質和能量是堅不可摧的，

## 參、結論

麥爾是首位提出熱與功兩概念等同，可以能量一詞代表，並建立兩者可相互轉換所對應精確數值的物理學家，也是將能量概念與能量守恆定律廣泛應用在生物體與天體上的科學家。他的創見與視野，讓他成為物理史上頗為特殊的傑出人物。

## 參考文獻

- Caneva, K. (1993). *Robert Mayer and the Conservation of Energy*. Princeton: Princeton Univ. Press
- Lindsay, R. (1973). *Julius Mayer—Prophet of Energy*, New York: Pergamon.
- Mach, E. (1896). *Principles of the Theory of Heat*, Leipzig: Verlag.