



# 電磁場加熱概論

Introduction to Electromagnetic-Field Heatings

張志振

工研院機械所  
先進機械技術組

## 關鍵詞(Keywords)

- 電磁場            Electromagnetic Field
- 介電加熱        Dielectric Heating
- 感應加熱        Inductive Heating

## 摘要(Abstract)

電磁場加熱在工業領域應用廣泛，含蓋材料、化工、半導體、鋼鐵、食品、農產、生醫及家電等產業。本文擬概論電磁場加熱原理與方法，期為推升國內工業加熱技術盡棉薄之力。

Heatings using electromagnetic fields are widely applied in many regions of industry. Depending on the mechanism used, the heatings can be categorized into ohmic heating, dielectric heating, and inductive

heating. The applications cover materials, chemical engineering, semiconductor, steel, food industry, agriculture produce, biomedical and house electronics, etc. Different kinds of these heatings are briefly discussed in this article, in hopes of improving industrial heating techniques somehow and provoking many outstanding engineers to make contributions in this area as well.

## 1. 電磁場加熱分類

就對稱性而言，電磁場加熱可分為電場加熱與磁場加熱，前者可再分為電單極加熱與電偶極加熱；而後者也應分為磁單極加熱與磁偶極加熱，但因尚未發現磁單極，故只有磁偶極加熱一種。由馬克斯威爾方程式：



$$\oint_s \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{a} = q_e \quad (1)$$

$$\oint_s \mu_0 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{a} = (q_m) \quad (2)$$

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_{s'} \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a}' \quad (3)$$

$$\oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = - \int_{s'} \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a}' \quad (4)$$

其對稱性如下：若同時將  $\mathbf{E}$  與  $\mathbf{H}$  互換， $\epsilon_0$  與  $\mu_0$  互換， $\epsilon$  與  $\mu$  互換， $q_e$  與  $q_m$  互換，馬氏方程並未改變，除了(3)(4)兩式僅相差一個負號。然而此差異乃為必須，否則  $\mathbf{E}$  與  $\mathbf{H}$  互相感應其值越來越大，違反能量守恆定律。

(1)式為電荷的高斯定律；(2)式為磁荷(磁單極)的高斯定律；(3)式為磁流的法拉第定律，式左稱為感應電動勢，式右稱為磁通時變量；(4)式為電流的安培定律，式左稱為感應磁動勢，式右稱為電通時變量。式中： $\mathbf{E}$  為被加熱物中的電場， $\mathbf{H}$  為被加熱物質中的磁場； $\epsilon_0$  為真空介電常數； $\mu_0$  為真空介磁常數； $\epsilon$  為物質介電函數； $\mu$  為物質介磁函數； $q_e$  為物質內部總電荷， $q_m$  為物質內部總磁荷，因其尚未被發現，故以括弧標記； $\oint_s$  表示封閉曲面積分， $S$  為被加熱物表面曲面， $d\mathbf{a}$  為該表面上之法向微分量； $\oint_c$  表示封閉曲線積分， $C$  為  $S$  上的封閉曲線， $d\mathbf{l}$  為該曲線上之切向微分量； $\int_{s'}$  表示曲面積分， $S'$  為  $C$  所張開的最小曲面， $d\mathbf{a}'$  為該曲面上之法向微分量。

被加熱物對電磁場能量的吸收速率乃是流入被加熱物的電磁場總功率，依照電磁理論[1]定義為：

$$P_{abs} \equiv \langle \oint_s \mathbf{E} \times \mathbf{H} \cdot d\mathbf{a} \rangle \\ = \int_V (\omega \epsilon_r'' \epsilon_0 \mathbf{E}_0^2 / 2) dV + \int_V (\omega \mu_r'' \mu_0 \mathbf{H}_0^2 / 2) dV \quad (5)$$

其中  $P_{abs}$  為該物理量； $\int_V$  表示體積積分， $V$  為被加熱物之體積；角括號  $\langle \rangle$  表示取時間平均值； $\omega$  為電磁場簡諧變化之角向頻率，其值為  $2\pi f$  ( $f$  為頻率)； $\mathbf{E}_0$  為電場振幅； $\mathbf{H}_0$  為磁場振幅； $\epsilon_r''$  為被加熱物之相對介電函數虛部； $\mu_r''$  為被加熱物質之相對介磁函數虛部。由(5)式知：電場加熱與磁場加熱是獨立且對稱的。

## 2. 歐姆加熱

電單極加熱即歐姆加熱(ohmic heating)，其原理為被加熱物中的自由電子受外加電場的作用力而獲得動能並沿電場反方向運動，過程中電子受到周圍原子的阻礙使周圍原子的動能增加，宏觀地表現在被加熱物的升溫，進而達到加熱效果。適用電單極加熱的物質多為導體，如鎳、鉻、鎢、石墨甚至電漿，多具有低電導率(與銅相比)及高熔點(除電漿外)之特性。其機制及方法詳見文獻[2]。

## 3. 介電加熱

電偶極加熱又稱介電加熱(dielectric heating)，其機制乃藉由原子中外殼層電子受電場極化振盪繼而與周圍原子碰撞加熱，該電子與受激態原子或離子因庫倫靜電力束縛而形成電偶極，與不受束縛的自由電子(電單極)不同，其勞倫茲機械模型[1]可由圖 1 表示，其中靜電力在此模型中簡化為帶有阻泥的彈簧，阻泥代表電子因碰撞而產生熱耗損。假設此彈簧的簡諧振盪頻率為  $\omega_0$ ，阻泥係數[2]為  $\nu$ ，電子質量為  $m_e$ ，位移為  $\mathbf{x}$ ，當電子被簡

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】399期・105年6月號

每期220元・一年12期2200元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011

機械工業雜誌官方網站：[www.automan.tw](http://www.automan.tw)

機械工業雜誌信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)