

電熱在金屬工業上的應用

溫 德 蘭 著
王 世 豐 譯

科學技術出版社

電熱在金屬工業上的應用

(德)溫德蘭著

王世豐譯



科學技術出版社

1951

38 Kb 23 · 25 K · P. 110 · ¥ 8,000

版權所有 不准翻印

原著書名 Elektrowärme in der Eisenund
Metallindustrie

原 作 者 O. Wundram

原出版者 Verlag von Julius Springer
Berlin

原本版次 萬鎔書局 1949 年版

特約責任編輯：譚惠然 校對：唐佩卿

1951 年 7 月發排(新華) 1951 年 11 月付印(星光)

一九五一年十一月初版

北京造 0001—8000 冊

科學技術出版社 北京燈市口甲 45 號

中國圖書發行公司總經售

出版者的話

在工業上利用電熱的地方很多，特別是用在金屬工業上，如金屬的熔解和鑄造，淬火、回火以及銲接等都可利用電熱。

本書介紹現場所常用的各種電熱設備的構造、用途和使用方法等，這些知識是現場工作同志所必需的。

1951年9月

目 次

一 電熱發生的基本原理	1
1 熱	1
概說——導熱係數——熱容量	
2 電	3
概說和電學上應用的符號——電學上幾個基本定律——電阻	
3 發電和配電	7
電磁感應——電動機和發電機——直流和交流——自感應、電容和移相——功率因數——渦流——三相交流——變壓器	
4 電熱的發生	12
電阻發熱——電弧發熱——渦流發熱和感應電爐	
二 電熱設備的分類和製造材料	16
1 電熱設備的分類和基本型式	16
構造——用途——操作法	
2 電熱設備的製造材料	20
發熱電阻體——電弧用的電極——熱和電的絕緣體	
三 電熱設備	30
1 熔解爐	30
概說——電弧爐概說——小型電弧爐——中型和大型電弧爐——中型和	

大型電弧爐舉例——感應電爐概說——低週率感應電爐——高週率感應電爐——電阻熔解爐	
2 加熱爐	52
概說——固定裝入物的加熱爐——連續作業的加熱爐——熱處理用的鹽槽爐	
3 其他方面的電熱應用	66
電鋸接——乾燥器——雜項應用	
四 電熱的測定和調節	75
1 測定	75
測定法——測定儀器	
2 調節	77
調節電壓——變更電阻——發熱的自動調節	
五 應用電熱的經濟價值	82
概說——電熱設備的優點——電熱的效率	
譯名對照表	86

一 電熱發生的基本原理

1 熱

概說 熱和光都是人類可以直接感覺的一種能 (Energy) 的形態。由於熱的利用，人類獲得了有用的動力和更多的物資。熱是分子的振動，並不是實際的物質。研究熱的時候，必須對溫度 (Temperature) 和熱量 (Quantity of heat) 加以區別。在工業和學術上，採用瑞典科學家攝氏 (Celsius) 的方法，將冰的融解點和水的沸騰點的溫度差分為一百等分，以測量溫度。熱量是使物質達到某一溫度時，所給與或者減去的熱能 (Heat energy) 的量，實用上以大卡 (kcal, Large calorie) 為衡量單位。1 大卡是 1 公升水從 15°C 加熱到 16°C 時，所要的熱量。要使物質的溫度增高 1°C 時，必須供給一定的熱量，這種熱量，叫作比熱 (Specific heat)。各種物質的比熱都不相同，一般是以 1 kg 的物質，溫度上升 1°C 時，所需要的大卡數來表示比熱的數值。水的比熱是 1。將熱從某一物體傳於他一物體，或者由同一物體的某部分轉移到另一部分，這種移動的形式和方法，是熱的利用上極重要的事項。熱是藉着輻射 (Radiation，例如太陽的熱傳到地球

上)、傳導 (Conduction, 例如金屬的導熱性) 或者氣體及液體的對流 (Convection) 而移動的。

導熱係數 物體的導熱係數 (Thermal conductivity) 各不相同。熱的不良導體, 可直接作保溫器材使用 (例如玻璃絨, 矽藻土)。導熱係數又分為內部和外部二種: 內部導熱係數是 1cm 厚的平板, 兩面的溫度差保持 1°C 時, 在 1 秒鐘內通過 1cm^2 面積的熱量; 外部導熱係數是物體在 1 秒鐘內, 溫度上升 1°C 時, 在 1cm^2 面積上, 由於輻射作用或傳導作用而移動的熱量。導熱係數也用大卡表示。

熱容量 熱容量 (Heat capacity) 是物體達到一定溫度時, 所必須吸收的熱量。熱容量是與質量和比熱成正比, 所以質量和比熱都很大的物體, 可以利用為蓄熱體。但是熔解或加熱用的電熱器具, 如果蓄熱能力太大, 則對於工作很不利。

熱是能的一種形態, 與機械能和電能之間, 有一定的數量關係。熱與機械能和電能的換算率, 叫作熱功當量 (Mechanical equivalent of heat)。關於熱功當量的數值, 到下節再來說明。無論固體、液體、氣體受熱後, 都發生膨脹現象, 這也是熱的重要作用之一。表 1 是本書中常見的幾種數值和熱的膨脹數值。此外導熱係數的數值, 可以參

表 1 密度, 比熱, 膨脹係數

材料種類	密度 g/cm^3	比熱 $\text{kcal}/^{\circ}\text{C}$	膨脹係數 100 $^{\circ}\text{C}$ 時的 % 數
鋼	7.9	0.12	1.2
鎳鉻合金	8.7	0.12	1.1
鋁	2.6	0.22	2.3
碳素	2.1	0.23	2.5
耐火粘土燒料	2.0	0.2	0.9
絕熱粉末	0.2	—	—

看圖 34 求得。

2 電

概說和電學上應用的符號 電流也和熱一樣，是可以利用的一種能的形態，它可以變為光能、磁能、化學能、機械能，而更容易變為熱能。電流變為熱能是電熱發生的根源，所以本節以敘述電流變為熱能的關係為主。要想明瞭電流和熱的數量關係，必須先了解電學理論上的各種重要數量，和它們相互間的關係。電流是電子 (Electron) 的集合。電可以拿水來作比喻，水必須有水壓或者水頭 (Water head) 才能流動；同樣電流在導體內也必須在電位 (Potential) 不同的兩點間才能流通。兩點間的電位差叫做電壓，電壓的單位為伏特 (Volt)，電流的單位為安培 (Ampere)。有一定的水量和水壓，水才能通過水透平機或者水車發出一定的動力；電力也是有電流和電壓才能發生。電力單位用伏特和安培的相乘積表示，一般稱為伏特安培或瓦特 (Watt)。動力在一定時間內完成的工作叫作功 (Work)；在電學上用瓦特秒，或者用仟瓦小時 (Kilowatt hour, kwh) 來衡量功的大小。其次在電學上各種計量中，最重要的是電阻 (Resistance)。在電路中有阻力的時候，電能就可以變成熱能。電阻為發熱的根源，恰和力學上的摩擦作用相似。阻力的大小和導體的種類、長短及斷面積的大小有關係。衡量電阻的單位叫作歐姆 (Ohm, 採用德國物理學者 Ohm 的名字)。

以上所說的電壓、電流、電力、功，和以後要說到的頻率、自感應、電容量等各種電學上的單位名稱，大多採用有名的物理學家或科學家的姓名。

各種計量的單位，都可用物理學上或工程學上所採用的長度、質

量、時間三種基本度量單位來表示，一般都統一採用 C. G. S. 單位 (Centimeter, Gram, Second)。基本度量單位以外的理論說明，超出本書範圍，不再多加敘述。不過電功、機械功和熱能相互間的數量關係，也就是相互間的當量關係，必須明瞭熟悉，所以電學上的簡單定律，必須時刻記牢。以後在計算式中的各種量都用符號代表。表 2 表示各種單位和代表的符號。

表 2 符號及單位一覽表

量	符 號	單 位 和 略 字
電壓	U	伏特(V)
電流	J	安培(A)
電阻	R	歐姆(Ω)
固有電阻	ρ	長 1 m, 斷面積 1mm ² 的阻力 ($\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$)
自感應	L	亨利 (Henry, H)
靜電容量	C	法拉第 (Farad, F)
電力	N	瓦特(W), 仟瓦(kW)
功率因數(力率)	$\cos \phi$	無名數 (P. F.)
時間	t	秒(s), 時(h)
功	A	瓦特秒或焦耳(Ws), 仟瓦小時(kwh)
溫度	t	攝氏度(°C)
熱量	Q	大卡(kcal)
導熱係數	γ	kcal/cm·sec·°C, Kcal/cm ² ·sec·°C
比熱	c	kcal/kg·°C
斷面積	q	平方公厘(mm ²)
長	l	公尺(m)
質量	m	工程上用克(g), 公斤(kg), 噸(t)等重力單位
效率	η	百分率(%)

電學上幾個基本定律

a) 電壓(U)、電阻(R)、電流(J)三者之間，有下列關係：

$$J = U/R(\text{安培}), \quad U = JR(\text{伏特}) \dots \dots \dots (1)$$

(1)式就是歐姆定律，從這公式中說明了電流和加於導體的電壓成正比，和電阻成反比。

b) 電力(N)、功(A)、熱量(Q)三者之間，有下列關係：

$$N = UJ \text{ (瓦特)}$$

$$A = Nt = UJt \text{ (瓦特小時)}$$

$$U = JR$$

$$\text{所以 } A = JRJt = J^2Rt \text{ (瓦特小時)} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式雖是表示電功的關係式，但同時對於機械功和熱的關係也可以適用。羅伯麥耶 (Rob. Meyer) 於 1842 年證明機械功相當於一定的熱量 (熱功當量)。1 kcal 的熱量相當於 427 mkg (Meter kilogram) 的機械功。其他的有關數值，以後再詳細說明。機械功率的實用單位 1 馬力 (公制馬力, Metric horse power), 相當於 75 mkg/sec, 所以 1 馬力小時等於 270,000 mkg (75 mkg/sec $\times$ 3600 sec)。在電學上 1 馬力等於 736 瓦特; 1 馬力小時等於 736 瓦特小時; 所以 1 仟瓦小時等於 1.36 馬力小時。由於上述的關係, 電功、機械功和熱能之間的關係, 可由下列各式來表示:

$$1 \text{ kWh} = 1.36 \text{ HPh} \qquad 1 \text{ HPh} = 270,000 \text{ mkg}$$

$$1 \text{ kWh} = 367,200 \text{ mkg} \qquad 1 \text{ kcal} = 427 \text{ mkg}$$

$$1 \text{ kWh} = 367,200 / 427 = 860 \text{ kcal}$$

由上式可以知道, 在電熱利用上最重要的原理是電熱當量。電功與熱量成正比, 係數 $c = 860$, 所以熱量和電功的關係, 又可寫成下式:

$$Q = c A / 1000 = 0.86 J^2Rt \text{ kcal} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式是焦耳定律。發生電熱時, 如果已知電流 (安培) 和電熱線電阻 (歐姆) 的大小, 就可以由上式算出所得的熱量 (大卡)。例如用鎳鉻線

作的電力加熱爐，電阻為 19 歐姆，電流為 20 安培，則 1 小時可發生 6536 大卡。這是假定所發生的熱，沒有損失的理論數值，實際上可以利用的熱量並不和理論數值相等，而僅為它的幾分之一。電爐發生的熱量，對於能夠有效利用的熱量的百分比，叫作效率(η)。一般電熱應用的效率為 50—90%。

電阻 電流通過導體的電阻，可由下式計算。

$$R = \rho l / q \dots \dots \dots (4)$$

ρ 是長 1 m，斷面積為 1mm² 的導體的固有電阻 (Natural resistance)。各種導體的固有電阻都不相同 (參看表3)；例如鎳鉻合金電熱線的固有電阻為 1.1，加熱爐需要的總電阻如為 19 歐姆，從(4)式就可以決定電熱線的長短或斷面積的大小。導體的斷面積不能任意決定，因為斷面積如果小於某一定數值時，就會使導體內的電流強度過大，使導體本身被熔融或者被蒸發。所以使用有一定導熱係數的電熱線材料，同時熱的供給量也一定時，就必須限制電流強度，使導體的溫度不超過它連續使用時所能支持的溫度。假設對於 20 安培的連續負荷，必須 1.5mm² 的斷面積時，從(4)式就可以決定導體的長度。

$$l = qR / \rho = 1.5 \times 19 / 1.1 = 25.8 \text{ m}$$

也就是說在實用上，要把供給的電力變成所要的熱量，就必須使用長約 26m 的導體。非金屬和流動狀態的發熱體的電阻，都不是均一性的，關於它們的電阻計算，在技術上也不像金屬導體那樣簡單，所以電熱器具熱量計算也比較複雜。

電阻並不是一定不變的，溫度對於導體的電阻有相當的影響。除碳和幾種金屬鹽類的電阻隨溫度增高而減少外，大多數金屬的電阻，都是隨着溫度增高而增加的。對於 1°C 變化所發生的電阻增減率，

叫作溫度係數 (Coefficient of temperature)。有幾種合金的電阻，對於溫度變化的敏感性很小。

3 發電和配電

電磁感應 發生電熱用的強電流，用發電機來供給。發電機的發電理論是根據電磁感應 (Electro-magnetic induction)，現在略加說明如下。用絕緣導線繞在軟鐵心上，通過電流時，鐵心就發生磁性，而成為電磁石。磁石的極性 (Polarity) 由導線的繞法和電流的方向決定。由磁石兩極生出的磁力，可以用磁力線 (Line of magnetic force) 來表示它的方向和強度。磁力線通過的空間叫磁場；磁場的強弱與導線的圈數和電流的大小有關係。將金屬導體在磁場內移動時，導體內就會由感應作用而發生電壓。又導體固定，而變更磁場強弱或使磁場斷續發生時，導體中也可以發生電壓。在磁場內導體移動的速度愈大或串聯連續的導體愈多，所生的感應電壓也就愈大。同樣道理，在單位時間內磁場的變化愈大，所生的感應電壓也愈大。所以電磁感應所生的電壓，與單位時間內和導體切割的磁力線數成正比。感應電壓的極性由磁力線的變化方向（導體的移動、磁場的斷續和強弱）來決定。如果磁力線不變，導體也不移動時，就不能發生電壓。實際上是把強力的電磁石，和導體互相轉動所發生的

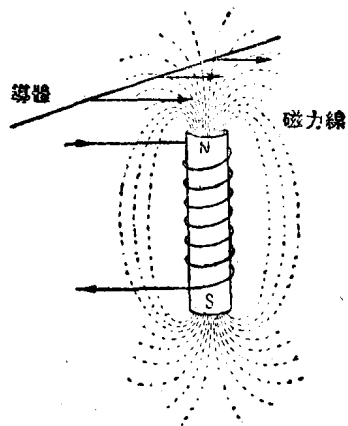


圖1 導體和磁力線切割發生感應電壓

電磁感應現象，儘量利用到電力的發生上。用這種方法可以把運動的機械能變為電能並且在理論上 1 馬力 (Metric HP) 相當於 736 瓦特。

電動機和發電機 它們的基本型式有二種：一種是感應導體 (電樞, Armature) 在固定的電磁石鐵軛 (Yoke of magnet) 內迴轉；另一種是正與這相反，電樞靜止不動，電磁石和磁場迴轉。磁石線圈所需要的電流，由發電機 (Generator) 本身或由其他的電源供給。利用電磁感應現象的電機，可以變換使用，用機械力運轉的時候是發電機，供給電流而生出機械力的為電動機。這樣變換使用，不可避免的要有一些能量的損失，一般的效率為 75—90%。

直流和交流 在電磁感應現象中，由於導體距離磁極或遠或近，所發生的電壓大小和方向隨着變化，所以發生電流的大小和進行方向，也隨着相應的變化，而成大小和正負隨時變化的交變電流。在工業用途上，把電流分為直流和交流 (Direct current and alternating current) 二種，它們的特性如圖 2 所示。

圖 2 是表示電流的變化過程。橫座標代表時間，縱座標代表電壓或電流的大小。橫座標以上為正，以下為負。正常的交流現象，電流或電壓的大小和方向的變化對於時間的關係，是在橫座標的兩側成有規律的正弦曲線 (Sine curve)。電流或電壓從一點開始前進，

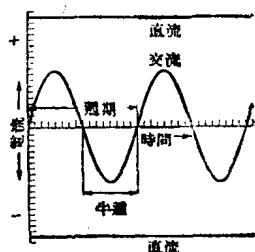


圖 2 直流和交流

越過橫座標，再回到和前點相對稱的地位叫做一週 (Cycle)，每變動一週所需要的時間，叫作週期。一秒鐘內在同一方向，越過橫座標 (例如由正向負，或者由負向正) 的次數，叫作週率。常用的交流電的週率多為 50 週，對於發生電熱，有時用高週率電流。直流電的方向和大小

是不變的，在圖上為直線，正極時相當於橫座標以上的部分，負極時相當於橫座標以下的部分。電機內部只能發生交流，要想變為直流，必須使用整流子 (Commutator)，將電流的方向劃一。在發電、送電和變電上，從經濟觀點來看，直流都不如交流。最近在電工業方面，直流的應用日漸減少，尤其是電熱應用方面，除電弧銲接以外，已幾乎沒有使用直流的了。

自感應 (Self induction)、電容 (Capacitance) 和移相 (Phase shifting) 這是關於電熱發生設備上必須了解的事項。由發電機 g (參看圖 3) 向鐵心線圈 s 通過電流 J 時，設克服線圈電阻使電流通

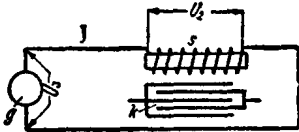


圖 3 自感應和電容量
 g = 發電機 s = 自感應
 k = 電容量

過的必要電壓為 U_1 ，那末 U_1 和 J 必在同時發生同樣變化；也就是說二者的相位必然一致。在線圈 s 上發生和電流週率相同的脈動磁場，線圈的線和磁力線切割，所以引起自感應現象，

而生出電壓 U_2 。 U_2 在時間上和電流 J 的相位差為一週期的 $1/4$ (圖 4)。因為電流和磁力線達到最高值時，變化的比例最小；通過零線時變化最大。同時感應電壓是隨着磁力線而變化的，電流最大時，感應電壓為零；電流為零時，感應電壓最大。將一週期分為 360° ，則電流 J 和感應電壓 U_2 的相位差相當於 90° 。要保持

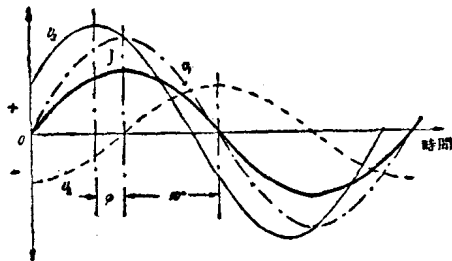


圖 4 移相

電流 J 通過線圈 s ，必須加一種電壓，以克服感應電壓 U_2 ；也就是說

由發電機再加以和 U_2 相反的電壓，使電壓變成 U_3 ，電流 J 才能流通；結果使電流的相位，較電壓落後一定的角度 φ 。在電容上這種關係就完全相反。電容器是用非導電體和金屬層片交互堆積製成，電容量是和金屬面的大小、兩面間的距離及所加的電壓成正比。電容器的兩端加以交流電壓時，它的兩端電壓向與電流相對的方向前進，這是因為電容器的蓄電需要相當時間的原故。電容器的蓄電能力（電容量）用法拉第（Farad）作單位（用英國物理學家 Faraday 的名號），自感應的實用單位叫作亨利（Henry，紀念英國物理學家 Henry）。

功率因數（Power factor）自感應和電容的移相現象是互相反對的，但是在交流電路上，同樣有減低電力的不利作用。負荷為同一瞬間的電壓和電流的乘積，對於相位不一致的電流 J 和電壓 U_3 ，當然不能採用最大值計算，也就是說只有二者變化一致的一小部分能供利用。這一部分有效的電壓值，和角 φ 有一定的關係，一般用 $\cos \varphi$ 來表示，即有效電壓實際上為 $U_3 \cos \varphi$ 。所以自感應或電容負荷時，交流電力並不是單純的電流和電壓的相乘積，必須再乘上 $\cos \varphi$ 。

$$kW = kVA \cos \varphi$$

$\cos \varphi$ 叫作功率因數，它的數值通常都小於 1。從經濟的觀點來說，電機技術人員應當努力使自感應和電容的作用互相抵消，使功率因數和 1 接近。

渦流（Eddy current）交流電路的自感應現象，不僅在電機那樣整齊的導線上發生，若將金屬塊放在脈動的磁場內，金屬塊的內部也會發生自感應現象，不過所生的感應電壓和電流的通路是渦旋狀，而不是規則的。渦流可以變成熱能，在電力利用上是不可避免的損失。不過在電熱設備上，也有特別利用渦流來發生電熱的。

三相交流 一般使用的電壓，直流為 110、220、440 和 550 伏特；交流為 110、220、380 和 550 伏特。又使用單相交流的比較少，用三根導線，每隔 120° 相位捲成三相使用的比較多，現在三相交流 (Three

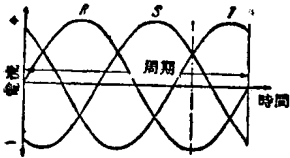


圖 5 交流

phase alternating current) 已是世界上最通用的電流樣式。如圖 5 中所示，每隔 120° 的交流 R、S 和 T 三個曲線，在任何一瞬間的和常等於零。所以在理論上只要三根導線，並不需要中線；但實際上三

個交流電路的負荷並不平衡，為了平衡電流，一般常用大地作中線，這是防止災害上應當注意的事項。圖 6 和圖 7 是普通配電時，在技術上最常應用的三相交流

電路接線圖。在電熱裝置上，為了調整負荷，星形接線法及三角形接線法可隨時變換。電源的電壓一定時，三角接線

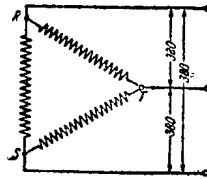


圖 6 三角接線

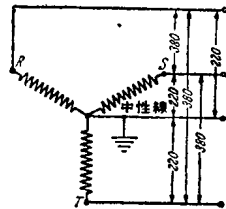


圖 7 星形接線

比星形接線能多受 $\sqrt{3}$ 倍 (1.73 倍) 的電流。

變壓器 現在電力應用的範圍非常廣泛，用前節所述的常用電壓，向廣大的區域輸電決不可能。所以把由發電機發出的 5000—10,000 伏特的電壓，再變成高壓（對地電壓可達 220,000 伏特）以輸電。直流電壓變高壓的方法，在技術上還未得到解決，這也是直流電在用途上被交流電代替的主要原因。變更交流電壓的簡單裝置是變壓器 (Transformer)。變壓器的作用，也是一種電磁感應現象。它的裝製，是將導線繞在環狀鐵心上 (圖 8)，原線圈 (Primary coil) 通