

生產與技術叢刊

高頻電熱

王端驥編著



機械工業出版社

生產與技術叢刊

高 頻 電 熱

王 端 驥 編 著



機械工業出版社

1953

出版者的話

，高頻電熱是目前工業方面一項新的加工方法，即是應用高頻的電力來產生高熱。它的使用範圍很廣，可以作鋼件的表面處理、錫鋅的工作、木夾板的製造及醫療化工等方面的工作。這是在若干新式工業中不可缺少的一種加工方法，也是目前在蘇聯發展最快的一種工業工作方法。

這本小冊子的目的只是對高頻電熱作一般性的介紹，使讀者對高頻電熱的使用範圍得到初步的認識。在取材方面，以介紹高頻電熱的應用及設備為主，附帶介紹一些必要的理論。

編著者：王端驥

1953年1月初版 1953年9月第二版 3,001—5,500冊
書號 0354-13-3 31×43¹/₂₅ 58千字 23印刷頁 定價 5,000元(乙)

機械工業出版社(北京盛甲廠17號)出版

機械工業出版社印刷廠(北京泡子河甲1號)印刷

中國圖書發行公司總經售

目 次

引言	(1)
第一章 感應電熱	(3)
皮膚作用	(4)
感應電熱所用的頻率	(6)
感應電熱中所需要的電功率	(7)
感應電熱在鋼鐵硬度處理方面的應用	(8)
感應電熱連續硬度處理的方法	(12)
感應電熱在燒焊及錫焊工作中的應用	(17)
感應電熱在其他方面的應用	(21)
第二章 介質電熱	(23)
介質電熱在膠木製品方面的應用	(24)
介質電熱在木材工業中的應用	(27)
介質電熱在其他方面的應用	(31)
第三章 高頻電熱所需電功率的計算	(34)
第四章 高頻電源與作物間的耦合設備	(37)
第五章 高頻電熱的設備	(45)
第六章 機件的安全及使用的方便	(50)
第七章 結論	(52)

引 言

感應電熱在工業上的應用，開始於十九世紀末葉，其方法是用一個感應圈，通以高頻電流，使發生高頻的交流磁場。在此磁場內的任何金屬，因感應作用而生渦流，發生高熱，熔化金屬。此後的若干年中，電磁學的理論研究有了顯著的進步，因而電感應所生電熱現象的知識，也逐步深入與明確，在工業應用方面，得到了更進一步的發展。在所使用的交流電源方面，曾經試用了當時所能得到的各種不同的頻率，但因發生的頻率不能很高，所以高頻電熱只能用來熔化金屬。

此後數十年，高頻電熱才發現了它的新用途。有人用感應方法作鋼件的表面硬度處理，即用高頻感應方法，使鋼件的表面發熱，來代替普通的表面淬火法；近代在汽車製造工業中，汽缸的曲軸表面淬火便是應用高頻感應方法來進行，使其部分的表面得到高度的硬度，但不使整個曲軸因過硬而發脆或變形。自此，高頻電熱法才漸漸使用在各種機械製造事業中。高頻感應法後來更常用於真空管的製造，在真空管製造過程中，抽真空時，用感應電熱法，使真空管屏極發熱而驅逐出其中所含的氣體。

高頻電熱除由於感應作用而使金屬生熱外，利用電介質的損耗，亦可得到電熱。其方法係將需要加熱的物品放在容電器的兩個金屬片間，當高頻電壓加於此容電器時，因物體本身的介質損耗，而生電熱。此種電熱的方法，最初用於除去煙葉中的潮氣，將要去潮的煙葉原捆的放在高頻電場中，使煙葉本身發熱後，自己乾燥；亦有人使用此法以除糧食中的蟲，當糧食通過此項容電器間時，蟲在高頻電場中的介質損耗較糧食為高，蟲便因本身所發熱過多而熱死；在蠶絲工業中，可使用此法以殺死繭中的蛹。蛹在繭內被殺死，但繭的本身溫度不會太高，便不致減低絲質的耐拉強度。在醫療方面，介質電熱亦應用於人體皮膚的發熱以治病，在製造木夾板工業中，因介質的損耗，

熔化了夾板間的膠質而製成夾板。

高頻電熱使用的初期，因發生高頻電力的設備價值太大，又不完善，使高頻電熱，難以廣泛的應用。但因其本身的特殊性能及優點，使其對於某些工作成爲不可少的工具。近來，高頻電熱的電力發生器的設計，有很大的改進，成本費用亦減低，故高頻電熱的應用亦逐步推廣。

第一章 感應電熱

當一個綫圈放在交流磁場中，在綫圈中便會產生交流感應電壓。假如這綫圈兩端短路，便可因交流電壓而在綫圈導體內產生電流。今假設在交流磁場中，放一塊金屬物體（任何有導性的物體），此塊金屬的作用，正彷彿一個兩端短路的單匝綫圈。在金屬塊內也發生交流電壓及電流，此項交流電流謂之渦流，渦流通過金屬塊本身的電阻而生電熱。發生電熱的功率是與電阻及渦流的平方成正比。這就是說，如渦流的電流量增加成兩倍，其所生成的電熱便要增加到四倍。

照以上所述，如這金屬塊是鐵質，或其他有感磁性的金屬，它本身有磁滯（Hysteresis）註①的特性。這金屬塊除因渦流現象發熱外，另因磁滯現象更增加發熱，所以有感磁性的金屬，受到高頻感應之後，比較無感磁性的金屬發熱為多。在低頻低溫度時，因渦流所發的熱與因磁滯所發的熱兩者數值約相等，但如溫度加高到一定限度後，磁滯作用在鐵中消失，只剩因渦流所發的熱。在使用高頻時，無論在高溫度或低溫度因渦流所發的熱是比較多。在高頻電熱中，其熱能的發生，大部分由於渦流作用，因磁滯現象所生熱能僅居極小的部分。

註①：我們可以假設一塊鐵的內部是由無數小磁鐵所組成。當這塊鐵未放在磁場中時，其中所含的無數小磁鐵排列的方式是使它們的磁性互相抵消，結果這塊鐵整個的來說是沒有磁性。當這塊鐵放在磁場中之後，其中所含的小磁鐵因受磁場的關係，便順着磁場的方向排列起來。但當磁場改變到與前相反的方向時，這許多小磁鐵也同樣改變到與前相反的方向來排列，在交流的磁場中，一塊鐵中所含的小磁鐵是不斷的在改變它們排列的方向。因改變排列方向使小磁鐵間互相磨擦而產生熱，這便是磁滯現象所生的熱。

在實際應用中，受熱體與綫圈的耦合關係甚為重要。所謂耦合關係，係指綫圈與受熱體的磁束 (Magnetic Lines of Force) 連鎖關係。如果通以高頻電流的綫圈，其所發生的交流磁束完全通過或連鎖住受熱體，這就是說，綫圈與受熱體有最緊密的耦合關係，或稱緊密耦合。將綫圈通以高頻電流，則發生交流磁場，欲加熱之任何金屬物體，須置於此綫圈中，使生渦流。在物體中所產生的高頻電熱是與渦流數值平方成正比，而渦流的大小，則決定於綫圈與受熱體的耦合關係，耦合緊密，渦流大，反之則渦流小。所以在感應電熱器中，如何使綫圈與受熱物體的耦合緊密，為設計中一重要問題。

皮 膚 作 用

當直流電通過一個導體，電流在導體截面上是平均分佈的，但當此同一導體，通過高頻交流電時，在其截面上中心部分通過電流少，外層電流多。此種現象謂之皮膚作用 (Skin Effect)。如上節所述，物體放在外接交流電源的首級綫圈中，因感應作用而發生交流電壓之後，因其本身成為一個短路的綫圈，便一定亦發生交流電流。今假設一交流電源接以兩個電抗數值相等的綫圈，同時假設兩個綫圈不相耦合如圖1甲，則通過兩個綫圈的電流相同。如兩個綫圈的電抗不相同如圖1乙，則電抗小的綫圈將通過較多的電流。如將綫圈換為一根直的圓形導綫如圖2，在此導綫上有A B C三個點，A點在導

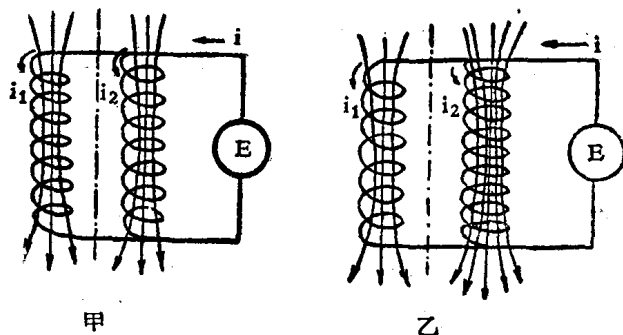


圖 1 電壓電流與電感的關係

綫的中心，C點在導綫的表面，B點在A C兩點之間；圖2便表示這根導綫。假如交流電流 i 在此導綫截面上平均分佈的通過去，在此導綫週圍必產生交流磁場。此項磁場不但發生在導綫之外，亦發生在導綫的內部。在導綫表面的C點與磁束1至6相連鎖如圖2。在B點則與較多的磁束(1至8)相

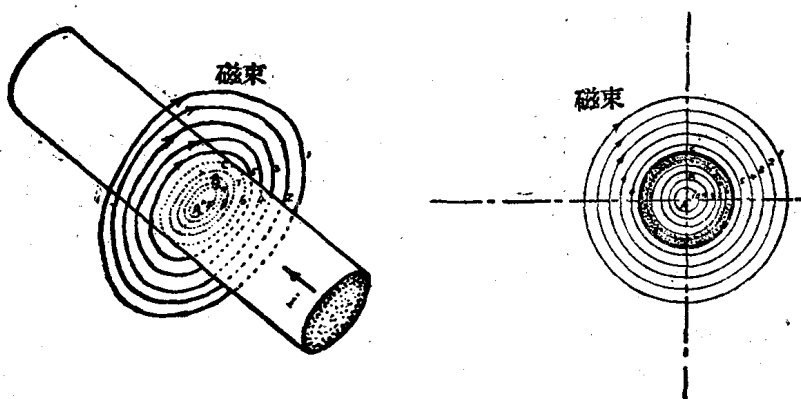


圖 2 高頻電流與磁場的關係與皮膚作用

連鎖，電磁感應因之亦較強。在導線的中心 A 點，則受更強的磁感應（與磁束 1 至 10 相連鎖）。

對於交流電流 i 說，導體愈近中心部分感應愈強，電抗亦愈高，因而通過的電流亦愈少。其結果電流多集中在導體的表面如圖3。為簡單起見，我們可以假定此導體只是表面傳電，內部不傳電。但所謂表面傳電部分（亦即電流的滲入部分）及中心的不傳電部分，根本沒有一個明確的界限。為計算方便起見，自導體的表面向內至電流密度減低到導體表面電流密度的37%處（這也便等於 $1/e=1/2.717$ ），便作為滲入的深度。

滲入深度是按着以下幾種情形而增減：

1. 所用交流電的頻率愈高，深度便愈小；
2. 所用導體材料的電阻愈大，深度愈大；
3. 假如是使用磁性的導體，其導磁係數愈高，則深度愈小。以下的公式便是代表滲入深度：

$$\text{滲入深度(公分)} = 5.03 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

ρ — 電阻率（微歐—公分）

f — 電流頻率（週/秒）

μ — 導磁係數。

圖3便表示滲入深度。在滲入深度處的電熱發生率（為電流的平方）約等於表面的十分之一。亦即絕大部分的熱是

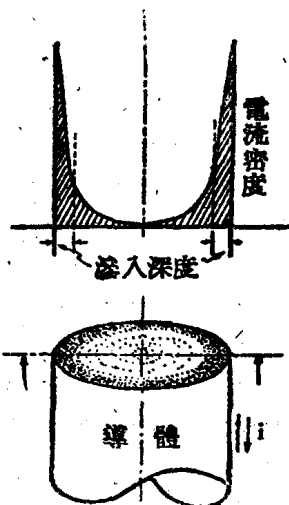


圖 3 皮膚作用與滲入部分

發生在滲入深度部分以內。

感應電熱所用的頻率

皮膚作用及滲入部分的厚度，與交流電的頻率發生一定的關係。頻率愈高，則皮膚作用愈是顯著，滲入部分亦愈薄，為得到一定的滲入厚度，必須使用一定的頻率，不應太低，亦不應太高。

對於感應電熱來說，使用的頻率愈高，則渦流愈大。渦流愈大，則發生的熱愈多，但這並不能無止境的增加電熱。因為頻率愈高，皮膚作用愈顯著，滲入深度愈小。對於渦流來說，它所流過的途徑電阻愈高，這就使整個發生的電熱減少。圖4表示一個圓柱體，在單位體積中

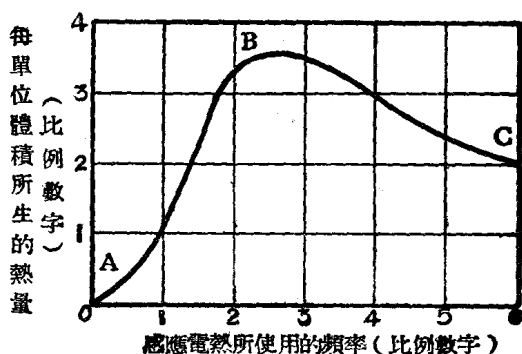


圖4 感應電熱在一個圓柱體上所生的熱與所用頻率的關係

所生的熱功率與所用頻率的關係。自A點開始，頻率愈加高，所生的熱愈多。直到B點，熱功率發生到最高點，如再繼續增加頻率，發生的熱反而漸漸減少，這便是由於皮膚作用的原故。發生最高熱的頻率（在圖4的B點），便是“最適宜頻率”。如使用的頻率較“最適宜頻率”為低，所發生的熱便要減少。如使用較“最適宜頻率”為高的頻率，雖然熱也減少，但減少得並不多。所以在使用感應電熱中，寧可使用較高的頻率，不可使用太低的頻率。

在感應電熱中所使用的頻率，可以分為三類：

第一類：是在一千週/秒以下的頻率。此項頻率大都用於熔鐵，鍛鋼或熔化其他有色金屬。所用的電力自幾個瓩以至一兩千瓩。此項電力，可用高頻發電機供給；

第二類：約自一千以上至一萬週/秒。此項頻率大都用於鍛鋼、燒焊、錫焊等工作或較大鋼件的硬度處理等。但此項處理不只限於極表面的加硬。電力的供給全賴旋轉高頻發電機，其發生電力約可高至一千瓩。

第三類：在本文內敘述較詳的，為使用於處理電阻較低的物質，如銀、銅、鋁等較小鋼件的硬度處理或極表面的硬度處理，亦需要更高的頻率。通常的使用，可自一萬以上至百萬週/秒。其所用電力亦可自一百以至二百瓩。是項

電力的發生，在較低的頻率時，可以使用火花式高頻電力發生器；二十萬週秒以上，則應使用真空管高頻電力發生器。

感應電熱中所需要的電功率

一般使用感應電熱的目的，是利用電磁感應的原理，將一個金屬物體加熱，使其溫度升高到所需要的程度。如使用於鋼件的硬度處理，該鋼件所受的感應電熱須使其溫度能升高至可以淬火的程度。如用於錫焊工作，溫度必須能達錫熔化的溫度。

如需將物體本身的溫度升高至所需要的程度，高頻電熱設備所供給的熱能，必是以下三種熱能的總合：

1. 物體溫度升高到一定程度，其本身所需要的熱能；
2. 當物體在加熱之後，其溫度漸漸高出四週環境溫度時，使發生不可避免的散熱現象，所散去的熱能需要補入；
3. 感應電熱設備本身，也有若干熱能的損失。

茲分述如下：

1. 增加物體本身溫度所需要的熱能，也就是由於比熱關係所需要的熱能。自物理學中得知，將1立方公分的水升高其溫度攝氏一度，需要一個卡路里的熱能。假如1立方公分的水在一分鐘內升高其溫度 80°C ，則需要每秒鐘 1.34 的卡路里，亦即為 $1.34/0.427 = 3.13$ 瓦 (0.427 卡路里/秒 = 1 瓦)。假如被加熱物是一個銅件，其比熱為 0.09，則如欲使銅與水的溫度同時升高，則用於銅的功率只是水的 9%。為此所使用的電功率與加熱物質的重量、比熱及提高的溫度成正比；而與所需用的時間成反比。換言之，對於同樣重量、比熱的物件如欲將其溫度提高至同樣程度，使用的電功率愈小，則須時愈久。

在不同的溫度時，各種物質的比熱可能有變化。圖 5 所示為黃銅與鐵在不同溫度時比熱的變化。黃銅是愈在高溫度時其比熱亦愈高，鐵的比熱在不同溫度時，成為不規則的曲線。此中原因在於鐵加熱之後，其內部組織變化，為此必須吸收

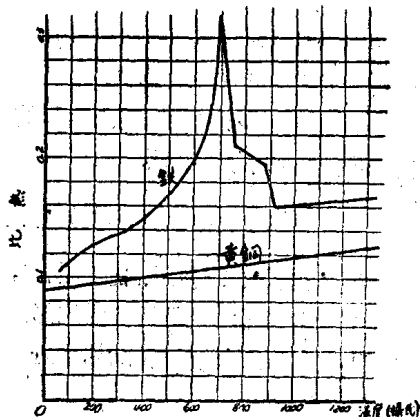


圖 5 在不同溫度時的比熱變化

大量熱能。正如冰的溶化爲水時，亦必須吸收大量熱能一樣。

2. 散熱：當一物體加熱後，因其溫度高出其環境溫度時，其熱能便不可避免地向四週發散。發散的方法有三種，即輻射、對流與傳導。

輻射的面積愈大，則熱能的消失率亦愈大，同時自熱處向較冷處所發輻射熱能的速率，與兩者不同溫度四次方之差成正比。換言之，在溫度較低時，輻射所費的熱功率甚小。但當溫度差增到較大時，輻射的熱功率急驟的增加，參看圖6。輻射熱功率的大小，亦視物質的表面情形而定，物質表面爲黑體者，其輻射性能最高，表面愈光潔者，則輻射性能愈小。

對流的熱功率損失特性見圖6，其升高不如輻射之速。

傳導的熱功率損失，可分爲兩部分。其一爲因表面加熱後，其熱能向內部的傳導；另一爲加熱物件對接近物體的傳導。這種熱功率的損失往往必須由實驗中得知。

3. 在感應電熱中必須使用感應圈，由感應的作用，大量熱功率發生於受熱的物件上。同時也需要大量的電流通過感應圈。因此項電流通過的感應圈上亦發生大量的熱損耗。爲使感應圈的溫度不致太高，須使用銅管製造，而用冷水通之。此項冷水帶去的熱功率，亦爲一很可觀的數值。

設計高頻電熱者，要將以上所需的各項熱功率全部加以計算及估計，方能求出所需要總的電功率。

感應電熱在鋼鐵硬度處理方面的應用

爲鋼鐵硬度處理使用的感應電熱，須要注意如何將高頻電功率有效地化爲熱功率，應用在鋼件所需要的部分。其中一個主要關鍵，便是如何設計感應圈，使其與鋼件能緊密的耦合，使鋼件能感受較多高頻磁場的作用而發熱。

如用一個單匝的感應圈，使圓柱形及平面鋼件發生感應電熱，其作用如

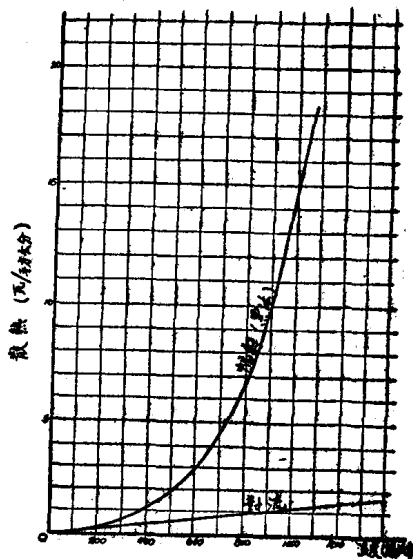


圖 6 熱功率在輻射及對流的損失

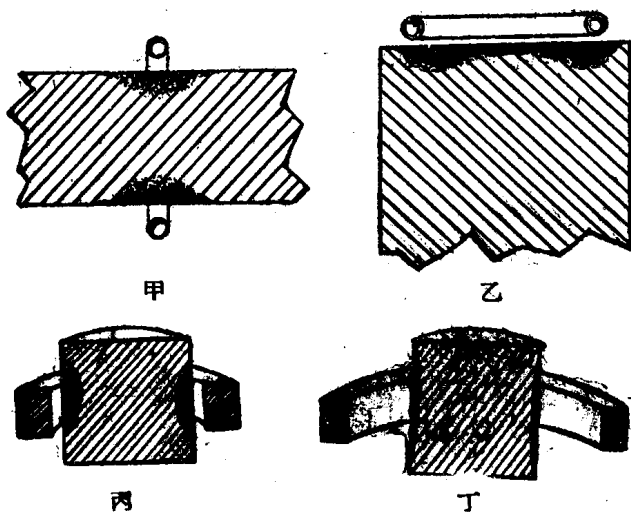


圖 7 單匝感應圈使鋼件發熱情形

圖 7 甲及乙所示。黑的部分表示鋼件因感應關係所發生的熱型(即熱的分佈情形)。感應圈愈是與鋼件緊密耦合,則所發生的熱型愈是深入,愈是集中,如圖 7 丙,否則就如圖 7 丁,熱型廣泛而淺薄。以總的熱量來看,耦合緊的,所得熱功率高。多匝的感應圈如繞得很空如圖 8,則不能得一均勻的熱型。在設計感應圈時,每匝間的距離不應大於所用銅管的兩倍。

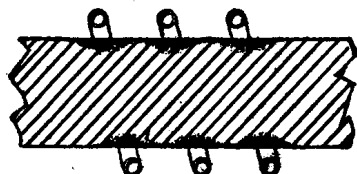


圖 8 鬆動感應圈所發的熱不能平均

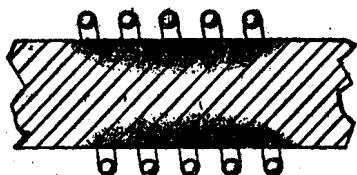


圖 10 長的鋼件中部發熱較多

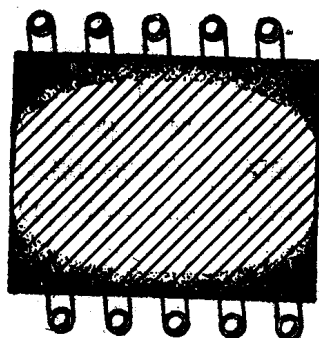


圖 9

短的鋼件兩端發熱較中部為多

若使用同一型式的感應圈,用於短的圓柱體及長的圓柱體,其所得熱型也不同。在短件中,兩端較中間的發熱為多;在長件中,中間較兩端的發熱為多,如圖 9 及圖 10 所示。為糾正此項缺點,使熱型均勻起見,在短鋼件中可用

中間密繞兩端較空的感應圈,或將感應圈的兩端直徑加大如圖11甲及乙,或用密繞的感應圈,其當中部分也比較可得均勻的熱型,如圖11丙。圖11丁表

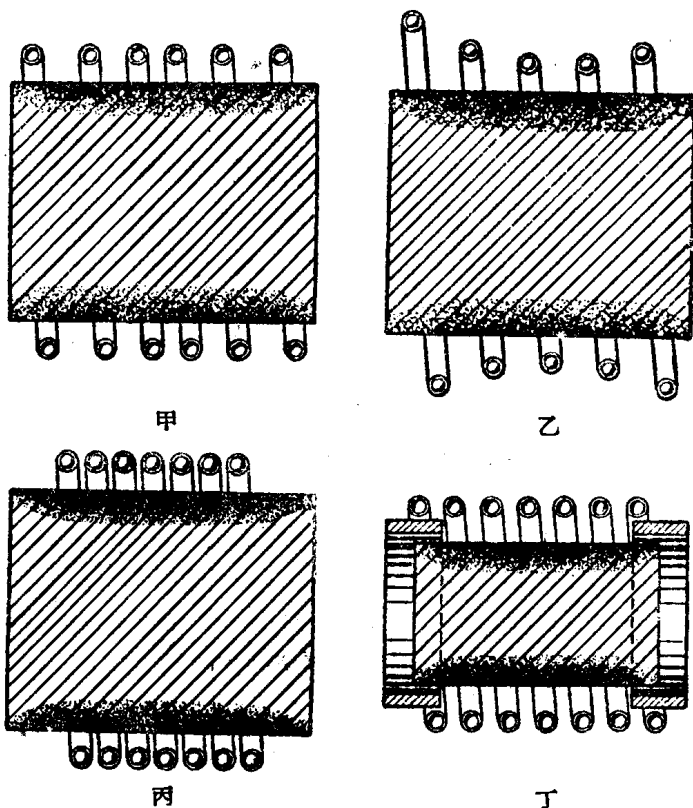


圖 11 使短鋼件發生平均熱型的方法

示在感應圈之外,鋼件的兩端加一銅質環。此環的作用,可以增加鋼件兩端對磁場的屏蔽作用 (Shielding), 減少熱量的發生。採用此種設置,亦能得

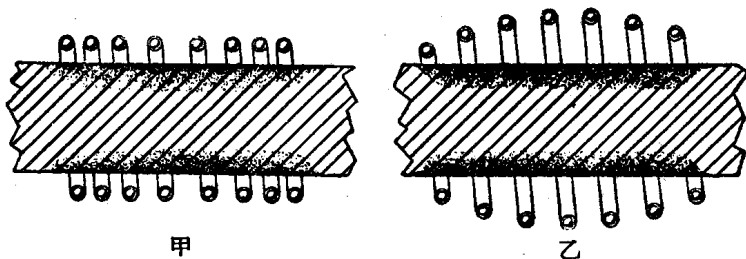


圖 12 使長鋼件發生平均熱型的方法

均勻的熱型。在長型圓柱鋼件中，如欲得均勻的熱型，其辦法與短型者相反，如圖12甲及乙。對於圓錐形鋼件，如感應圈的設計不適宜，如圖13甲及乙，亦將得不均勻的熱型。改變感應圈的設計如圖14 甲及乙，便可對此加以糾正。

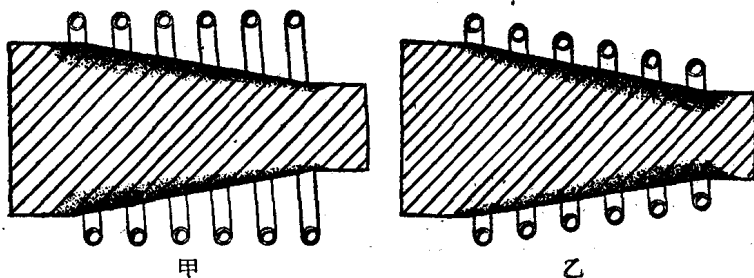


圖 13 圓錐體所發生不平均的熱型

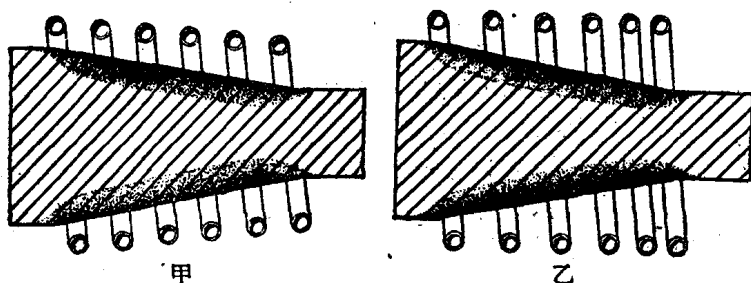


圖 14 改變感應圈設計後的平均熱型

如欲為圓筒形鋼件之內面作硬度處理，感應圈如使用一般的設計如圖15 甲，結果其兩端較中間為熱。將感應圈改變設計如圖15 乙可以糾正此弊。

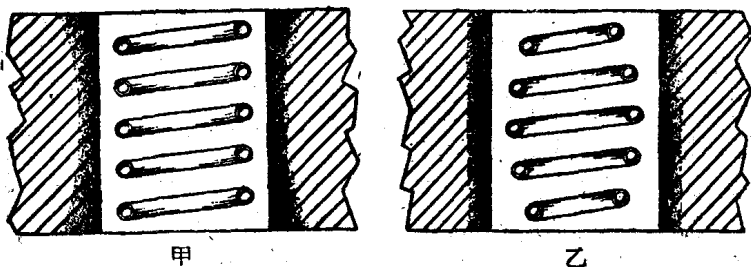


圖 15 圓筒形內面硬度處理的熱型

當感應圈放在圓筒式的鋼件外面，使只有外面受熱，其渦流的方向如圖16甲。如圓筒型式鋼件有孔如圖16 甲，則在孔附近的渦流如圖中虛線所示。

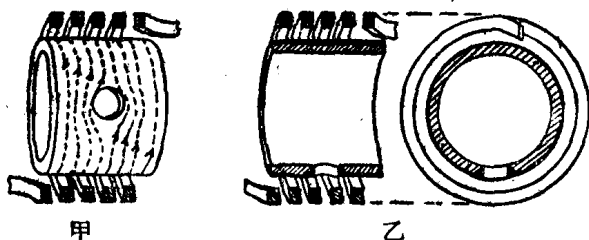


圖 16 筒形鋼件的熱型

結果在此圓孔的四週，按軸心平行方向得特多的熱，在與軸心垂直的方向便熱得不足，如欲使其兩個方向熱的情形相等，則可將圓孔用一銅塞塞住。其結果可使在此圓筒形鋼件的表面所受熱型，不受圓孔的影響。

在鋼件上所發生的渦流永遠是：

1. 在物件表面上；
2. 與感應圈中電流平行；
3. 自行成一循環的電路。第三項的性能可以用圖17表之。

圖 17 表示一個類似銼刀的鋼件，使用感應電熱作硬度處理。因為感應圈的位置關係，在鋼件上所發生的渦流方向如圖中虛線箭頭所表示，與感應圈中的電流平行。因為此項渦流必須自成一個循環的電路，所以在鋼件的凸出部分與凹入部分受到同樣的電流。圖 18 是一個更顯著的實際例子，應用在螺絲攻製造中的表面硬化。車製完成的螺絲攻，使用導板與電磁吸住器（使用直流電）安置在感應圈內。當高頻電流通過感應圈後，螺絲攻的表面發熱。其

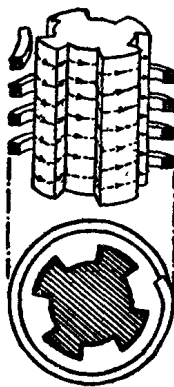


圖 17

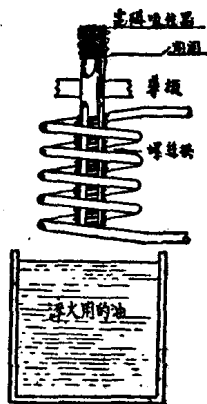


圖 18

渦流通過不規則表面 螺絲攻的硬度處理

所生的渦流方向類似圖17，但因為渦流的皮膚作用，在螺絲紋的峯處較為熱。當螺絲攻外表達到所需要的溫度時，只要將電磁吸住器的電流切斷，熱的螺絲攻便自動落到預置在下面的淬火劑中，使其表面硬化。

感應電熱連續硬度處理的方法

一塊大鋼板、或一根長鐵軌、天軸或三角鐵，要進行表面硬度處理，事實

上不可能將整件的東西加熱，必須使用連續硬度處理的方法。以下是在蘇聯的列寧格勒斯維梯藍那廠使用高頻電熱作連續硬度處理的情形。圖 19 就是

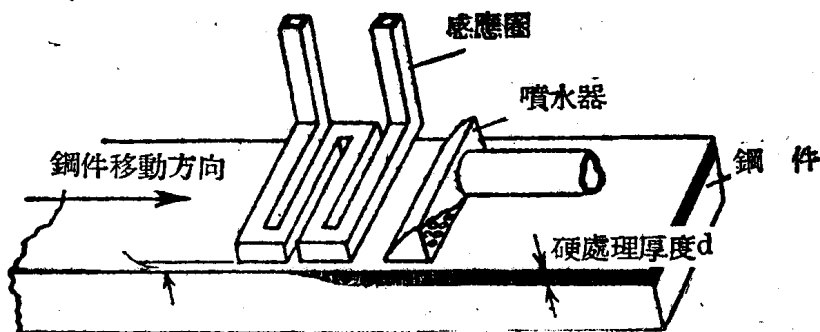


圖 19 連續硬度處理鋼板的設備

該廠用來將鋼板進行硬度處理的設備。圖中所示的感應圈與噴水器是固定的，鋼板自左向右移動（如圖中箭頭指示的方向）。在感應圈下面的鋼板，因為感應圈的作用使表面發熱。當鋼板的某一部分到達感應圈最左的一點時，鋼板表面開始發熱。當鋼板繼續前進，表面的溫度便繼續增高，溫度的滲入也漸漸加深。當鋼板將接近噴水器時，表面溫度已相當高，一經噴水器的噴水便硬化了。通常所使用感應圈的寬度應大於熱滲入度的五倍至十倍。為了經濟的利用感應圈所生的磁束，感應圈與鋼板間的距離，只要不妨礙鋼板的移動，愈近愈好，最遠不要超過 2 至 5 公厘。鋼板移動的速度與所用高頻電力的大小，硬度處理的厚度，鋼板的性質等等有很大的關係。在實際應用中，每秒鐘大約為 2 公厘到 100 公厘。

感應圈與噴水器間的距離，要看噴水器的形狀，其距離不應小於滲入度的兩三倍。有時感應圈本身最右面的一部分也可兼作噴水之用（尤其是用於較小的鋼件）。如使用兼有噴水作用的感應圈，要注意不使水噴到溫度尚未曾達最高度的鋼面上。這一方面要注意在設計噴水器時，水噴出的方向正確，一方面可用一遮板，使水不致噴到正在加熱的鋼面上。在噴水器上的噴孔完全是向着加熱鋼板的一面。噴孔的直徑約在 1—2 公厘。孔與孔的距離約在 4—5 公厘。噴孔與噴孔交叉排列，使噴出的水能均勻的到達鋼板。噴水器的進水管最好有兩三處，使噴出的水能更均勻。

當鋼件通過感應圈與噴水器，其表面的溫度變化如圖 20 的上半部所示。 T_k 為鋼的居里溫度，在此溫度以上鋼件中的分子組織發生變化，鋼件的性能改變並失去它的透磁性。 T_1 與 T_2 之間為硬度處理鋼件表面所需要的溫