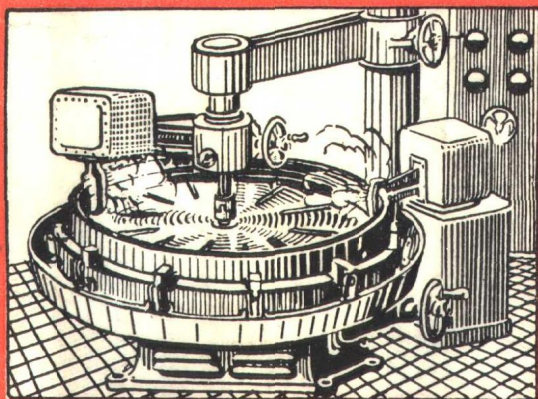




第 3 册

高 频 淬 火

[苏联] A. Д. 杰米切夫 著
C. B. 沙施金



科学 技 術 出 版 社

56-99
5

內 容 提 要

这本小册子对于鋼件表面淬火时加热用的高頻装置介紹一个簡要的概念;說明电流頻率的选择問題;叙述各种表面(圓柱形表面、內表面、外表面、平面)及复杂形状物体的同时淬火法和循序連續淬火法。

这本小册子可供工业部門中从事高頻电流加热工作的有关人员参考。

高 頻 淬 火

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАКАЛКА

原 著 者 [苏联] А. Д. Демичев
С. В. Шапкин

原出版者 Машгиз · 1954 年版

譯 者 刘 德 馨

*

科 学 技 術 出 版 社 出 版

(上海南京西路2004号)

上海市書刊出版业营业許可証出 079 号

上海市印刷五厂印刷 新华書店上海发行所总經售

*

統一書号: 15119 · 595

开本 787×1092 1/32 · 印張 2 3/16 · 字數 44,000

1957 年 11 月 第 1 版

1958 年 6 月 第 2 次印刷 · 印數 1,901—4,400

定 价 : (10) 0.32 元

原 序

高频淬火是苏联在鋼件热处理技术方面的最重大的成就。在近二十年来，由于科学和生产中的先进代表人物的创造性的友谊合作以及电气、金属、热处理、工艺和设计各方面人员的共同努力，高频淬火得到了广泛的发展。

目前，在苏联許多大型机器制造工厂內都有高频热处理車間，来进行数十种乃至数百种重大零件的表面淬火。这些零件一晝夜的总产量可达数十万件。

高频淬火法之所以得到广泛的采用，是因为它是大批生产鋼件的表面强化法，因而满足了苏联年复一年工业发展的迫切要求。

由于此种方法在工业中应用的结果，不仅显著地提高了热处理的生产率，而且根本地改善了劳动条件。这样，所创造的热处理过程自动化的广泛可能性，就能够使热处理过程納入生产的流水作业綫甚至自动作业綫內。

在苏联国家內，为更进一步推广这一先进方法建立了一切先决条件：电气工业制造了为配备高频淬火装置所必需的主要设备；国家培养出熟練的技术干部；建立了“B. П. 沃洛格金教授”高频电流科学研究院，来研究各种材料用于各种不同目的的高频加热方法；在很多工厂和研究院內都設立了專門實驗室。

高频淬火法的可能性是确定了，当然还远远沒有全部揭曉。每年都有新的工艺程序研究出来，出現新型的设备和自动控制。

系統等。

高頻淬火与其他形式的高頻电流加热一样，愈来愈引起生产者的兴趣了。更进一步掌握这一方法是在工业中有效地使用它的最重要条件之一；进一步掌握这一方法，能够帮助我們排除在实际中遇到的一些不正确和无效使用高頻淬火的情况，而这些情况的产生却都是科学研究工作者和实际生产者之間未能充分交流經驗的結果。

在这本小冊子內研討了鋼鉄淬火感应加热的諸問題。

这本小冊子將能對我們在工业中正确的使用高頻淬火法有所帮助。

目 录

原序	1
緒論	3
1. 淬火裝置	6
2. 电流频率的选择	18
3. 同时淬火法	28
4. 循序連續淬火法	42
5. 双感应器循序連續淬火法	45
6. <u>內表面</u> 的淬火	49
7. <u>平面</u> 的淬火	56
8. 复杂形状物体的淬火	61
9. 工厂内高频淬火的組織及高频淬火进一步发展的前途	

緒 論

高頻电流具有通过金属表面及在足够的功率下引起表面加热的特性,利用这种特性可以得到表面淬火的制件。冷却时,此种制件在某一厚度的表面层内有着高的硬度,而制件的中心却仍处在原有的状态,并保留着可塑性。

通常所指的高頻淬火就是用高頻电流加热零件的表面淬火。此时“高頻率”一詞与任何一定的頻率数值或甚至頻率范围是完全无关的。由于零件尺寸、所要求的淬火层深度、生产率及淬火加热的其他条件的不同,所使用的电流可以从工頻(50周)至最高的射頻。在絕大多數的情況下,加热零件內的电流不是用任何接触而是用所謂感应方法激出来的。現举出用这一方法激出电流的例子,例如电力变压器,如初級繞組通以交流电时,則就在連接任一負荷的次級繞組內激出电流来。

感应加热器是一台变压器,它的次級电路由起次級繞組作用的加热零件所代替,而加热零件与某一負荷电阻連接(图1)。它沒有象变压器那样的导磁体,但在磁性材料加热到因高溫而消失磁性以前,可以將磁性材料当作为磁路的成分。

在这变压器內,交流电的电能不能由初級繞組的电路傳到次級繞組內。各繞組之間沒有任何导綫連接,而由連接初級和次級电路的总磁通傳导电能。由于一部分电能消耗在初級繞組的銅的发热上,所以感应器的效率小于1。

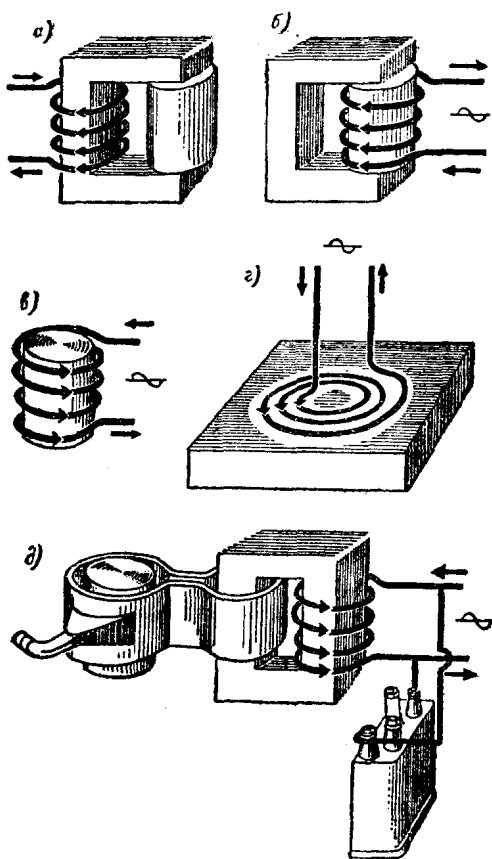


图1. 由降压变压器到表面淬火感应加热装置的电路图。
 a 和 b—降压变压器(可作为工件的加热); c 和 d—无
 铁心的感应加热装置; d—感应加热的典型装置。

1. 淬火裝置

由銅导体紧紧繞好的單匝或數匝的螺旋体是最普通的感應加熱器(圖2),一般為銅管狀,有水通過管內使之冷卻。被加熱的零件——制件——放在螺旋体的里面。螺旋体就叫做感應器,根據用途的不同有着各式各樣的形狀。根據被加熱零件的形狀和截面的不同,感應器可以是圓形、方形、直角形或其他形狀。有一些感應器制成平的螺旋体或与被加熱表面接近而有一些間隙的單獨感應导体。這樣的感應器往往有鉄的導磁体,用來使沿

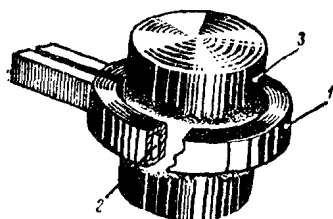


圖2. 最普通的感應加熱器。

1—感應导体; 2—冷卻液供給室;
3—被加熱的零件。

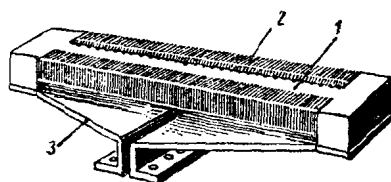


圖3. 有鉄導磁体的感應器。

1—感應导体; 2—導磁体;
3—有接綫板的匯流板。

零件截面流動的電流達到所需要的分布(圖3)。通常零件淬火用的加熱感應器都有將水或其他冷卻液供給被加熱表面的裝置。

根據電源和通電方法的不同,感應器可以做成多匝的和單匝的。有時用憑經驗確定的計算方法來規定感應器端子所必需的電壓,以期在所指定的時間內將零件加熱到需要的溫度。單匝感應器的結構比較合適,因為這種感應器制造比較簡單,而工作也較可靠。

為了使感應器的工作電壓與電源電壓相互一致,感應器不

應該直接接到供电的发电机或汇流条上，而應該通过專用的降压变压器(有时叫做淬火变压器)来連接^①。

当帶有零件的感应器与功率相当大的电源接通时，为了在接通时不改变感应器的电压，根据测量仪表的讀数可以看到，帶有被加热零件的感应器如电气工作者所說的是具有低 $\cos\varphi$ 或小功率因数的电抗負荷；譬如說，它类似低負荷的异步电动机或变压器。在低的 $\cos\varphi$ ，电气装置的工作与发电机附加的电流負荷和汇流条上的电能消耗有关系。

如同在某些变电站或具有感应电炉的裝置一样，为了增大平行于感应器或淬火变压器的初級电路的功率因数，应連接有足够电容和功率的电容器組。在每种情况下都可以選擇使电源工作条件成为最有利的电容器組^②。

用低于 10,000 周的声頻电流加热欲淬火零件的感应器应由高频发电机供电；而用頻率更高的电流加热零件的感应器則由电子管振荡器供电^③。就安裝、运用、控制和修理而言，高频发电机与旋轉式交流发电机的区别很小，它是由一台标准的工頻的三相异步或同步电动机帶动旋轉的。有时电动机与高频发电机共裝在一个壳体内。

采用高频感应加热的大型机器制造厂，通常都有高频发电机。它們按頻率的不同分組联合到总功率超过 1,000 千瓦的中央供电系統上。这就是真正的高频发电站。高频发电机將高频电能供給那些直接位于热处理、鍛压、机械及其他車間内流水作业上的加热裝置或淬火裝置。此时，高频电能是由長达数百公

① 參看 Bc. B. 沃洛格金著“高频加热用的变压器”，本叢書第 7 册。

② 參看 A. H. 沙莫夫著“高频加热裝置的供电”，本叢書第 10 册。

③ 參看 P. II. 热日林著“高频加热用发电机”，本叢書第 8 册；A. C. 瓦西里也夫和 A. A. 康德拉茨基合著的“高频加热用电子管振荡器”，本叢書第 9 册。

尺的電纜傳遞的。

電子管振盪器是由電子管、變壓器、感應線圈、電容器等等無線電元件所構成的裝置。要使振盪器可靠地工作，饋電線路或整流裝置和絲極電路必須穩定。如將電動機的效率估計進去，高頻發電機的效率根據頻率的不同可達70~80%，而電子管振盪器的效率則為50~60%。

在電子管振盪器的頻率下，遠距離傳遞高頻電能雖然可能，但是會遇到許多實際困難，因此電子管振盪器通常是裝在直接需要的地方。每個振盪器只供一個加熱器工作。應根據加熱器功率和工作頻率來選擇功率為10~200千瓦的各型振盪器。通常在電子管振盪器的裝置內，具有整流器的振盪器和加熱裝置是在一個总的構架內連接在一起的。

對於表面淬火的高頻加熱來講，其特徵是加熱時間極短，用幾秒（很少超過十秒）有時也用十分之幾秒來計算。因此，需用自動控制來達到規定的加熱溫度。

只有使冷卻、以新零件代替已淬火零件等一切工序都自動化時，淬火裝置的生產率才能充分發揮。有一種特殊的自動機床能由加料箱內或直接由傳送帶上取得零件，並能將已淬火的零件送走。這種機床是大批制件表面淬火裝置的一個重要組成部分^①。保證控制裝置、保證防止裝置發生事故及保證淬火質量均勻的複雜自動電路系統，有時有着大量的各種繼電器、接觸器、電動機、光電元件及其他自動裝置。

表面淬火裝置由饋電線路所取得的電能，在操作過程結束時，完全消耗於各種冷卻系統的水中。加熱時直接達到淬火制件的那一部分電能，轉給淬火溶液了，而淬火溶液又常將電能轉

① 參看 C. E. 雷斯金著“淬火機床和感應加熱器”，本書第11冊。

給流經散熱器的水(冷却排水槽內溶液用的)。另一部分電能則消耗于冷却感應器、淬火變壓器、振盪器等裝置的水中。僅很少一部分熱能由輻射或對流所消失。這樣，在淬火裝置的組成部分內必須或多或少有複雜的、與振盪器功率相稱的冷却系統以吸收熱量。

因而，現代的感應表面淬火裝置是完美的、高生產率的，但是複雜的設備，通常在大批處理零件的條件下，使用這一設備是合算的。如將安裝開支計算進去，則這一設備的價值十分昂貴，而只有在正確和充分利用它們時才能得到補償。頻率是選擇設備型式的根據。

2. 電流頻率的選擇

如前所述，目前表面淬火加熱用的電流頻率是極其不同的：50、500、1,000、2,500、5,000、8,000周的聲頻範圍及 $10^5 \sim 5 \cdot 10^5$ 周的射頻範圍。此處規定的頻率值基本上是与出產的設備型式一致的，而常帶有偶然性。

頻率的選擇所指的是規定最合適的頻率波段，或更正確地說是規定頻帶。精確的規定頻率不是最根本的問題，因為僅在頻率的改變相當大時，其影響才是顯著的。但是，最重要的是不要選錯頻率的波段，因為選擇得是否正確（例如，選擇2,500周頻率或射頻）將顯著地影響淬火結果。

頻率的選擇在頗大的程度上決定着高頻淬火裝置的技術經濟指標；它也決定着質量指標。例如，淬火零件的機械性能，首先是疲勞強度^①。

① 參看 Г. Ф. 高洛文著“鋼件高頻淬火後的組織和性能”，本叢書第4冊。

頻率的选择是以感应加热时所产生的电磁过程、加热过程、金属弹性、塑性变形、加热速度、生产率和經濟等問題的研究,以及以各种設備特性的比較作根据的。

在感应表面淬火法发展的最初几年內, В. П. 沃洛格金就已經对选择頻率的問題作了詳尽无遺的理論上的研究和确切的实际介紹^①。曾对两种高频电能的主要来源——高频发电机和电子管振荡器划分过最合适的使用范围。但是工厂內使用各种发生器的实践証明,关于頻率的选择問題往往是不够十分重視的,因此我們現在就詳細地討論一下这一問題。

我們来研究一下裝在通以相当强的高频电流的感应器內的大型圆柱形鋼件。在圆柱形零件內的感应电流因所謂表面效应而沿零件截面有着不均匀的分布(图4)。在靠近感应导線下面的圆柱形零件的表面层內,具有最大的电流密度。如果圆柱形零件在电磁性方面是完全均匀的,則愈往深处电流的密度就愈小,而最后在某一深度內我們將得到实际上沒有电流的金属层。

电流密度沿深度的降低率可由电流的頻率、圆柱形零件材料的导磁率及电阻率决定

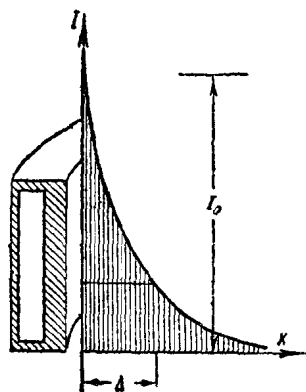


图4. 电流密度沿被加热鋼件截面的分布。

I_0 —表面上的电流密度;
 Δ —电流的等效透入深度。

① 参看 В. П. Вологдин: “Поверхностная закалка индукционным способом”, Металлургиздат, 1939, 及 “Поверхностная индукционная закалка”, оборонгиз, 1947.

之。圓柱形零件的直徑也可能是有意義的，但我們暫且假設零件直徑至少比電流的透入深度大到十倍。這就可使我們不去考慮表面彎曲對電流透入深度的影響了。

電流密度降低到 $\frac{1}{2.7}$ 的深度就是電流的降低速度。這一深度被假定為“透入深度”。正因為在研究中採用了這一數值，所以在計算時就非常容易（數字 2.7 是自然對數的底）。

如果將圓柱形鋼件先加熱到鋼消失磁性的溫度再放到感應器內，那末其中電流降低速度將比具有磁性的冷態時為小。就鋼料而言，所謂“熱”透入深度往往要比“冷”透入深度超過到 20~30 倍；而只有非磁性材料的“熱”透入深度才與“冷”透入深度相差無幾。

電流的透入深度^①可用下列公式決定：

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad \text{公尺}, \quad (1)$$

式中： $\omega = 2\pi f$ ； Δ ——電流透入深度，公尺； f ——電流頻率，周； μ ——導磁材料的導磁率，亨/公尺； γ ——導電率，1/歐姆·公尺。

實際的計算通常是按下式進行：

$$\Delta = 5,000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu' f}} \quad \text{公分}, \quad (2)$$

式中： Δ ——電流透入深度，公分； f ——電流頻率，周； ρ ——導電材料的電阻率，歐姆·公分； μ' ——導磁材料的相對導磁率（對於加熱超過磁性轉變溫度的鋼料而言， $\mu' = 1$ ）。

為了評定這些數值的大小，在表 1 內列出按公式(2)計算出的冷鋼、冷鋼和熱鋼的電流透入深度的數值。

① 參看 H. II. 格魯哈諾夫著“高頻加熱的物理基礎”，本叢書第 2 冊。

表 1. 在不同頻率下的电流透入深度

頻 率, 周	透 入 深 度, 公 分		
	鋼 $t=15^{\circ}\text{C}$	鋼 $t=15^{\circ}\text{C}$	鋼 $t=800^{\circ}\text{C}$
50	1.0	0.22	7.08
2,000	0.15	0.05	1.12
10,000	0.07	0.02	0.50
100,000	0.02	0.007	0.16

由計算式表明, 在透入深度內析出的熱能達到被加熱零件的所有熱能的 86.4%。

此時加熱過程可按以下情況推測之：在最初階段內，鋼棒內的析出熱量集中在“冷”透入深度層內。當供給發生器以足夠的功率時，這一層的溫度將迅速增高到這種程度，以致靠導熱性僅能傳給金屬的較深層很少一部分被析出的熱量。當鋼的表面層加熱到磁性消失的溫度時， $\tau^{\circ}\text{C}$ 電流透入深度就會增加，而加熱層內的溫度增高便趨緩慢，且由最大體積密度產生的熱能析出已不在該層內，而是在仍有磁性的較深鄰近層內。磁性消失後，第二層開始迅速地使第三層及其他各層加熱。實際上，加熱過程是不間斷的。在這種情況下，必須指出熱的迅速傳導主要是由於鋼的電磁性的變化而引起，決非導熱性所

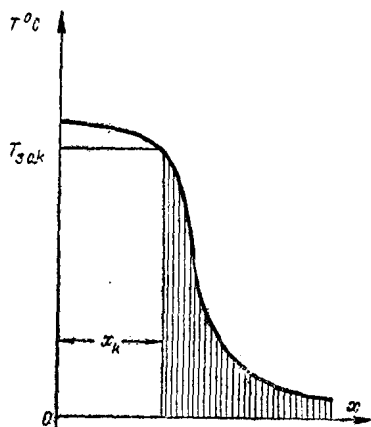


圖 5. 溫度沿零件被加熱層的分布。
 T_{gak} —淬火溫度； x_k —淬火加熱層的深度。

引起的。

此时沿被加热零件的深度所得到的温度分布，是以其均匀性、在温度超过鋼磁性转变温度的层内的较小温差及在仍未失去磁性的内层内的陡降为特征（图 5）。随着被加热层的厚度与“热”透入深度的接近程度，热的传导速度会缓慢下来，而在較深的“热”透入深度内，热的传导可能仅依靠鋼的导热性来实现。当整个过程延續数秒鐘，而用于加热单位表面的功率不少于 1 千瓦/公分^2 时，上述的温度分布对于迅速加热才是正确的。当用小功率缓慢加热时，则所指出的热传导特性，因导热性影响的结果，会表现得明显。

从利用傳給零件的热能的观点来看，如果加热保证了所謂温度的“直角”分布，即沒有表面过热现象，且在零件内部完全沒有加热的条件下，將整个层均匀地加热到規定厚度的淬火温度，那末，这就是欲表面淬火零件的規定深度的理想加热。当然，这样的加热是不会实现的。首先，因为有导热性的緣故，一定有热漏到物体内部去，漏热愈多，加热時間就愈長；其次，略高于淬火温度的淬火层外部的过热要多耗費一些电能。

在長時間的加热过程中，电能的非生产消耗可能超过加热到規定层的淬火温度所需电能的 4~5 倍。此时，加热的热效率將不超过 20~15%。

在迅速加热的情况下，当加热层的深度比“热”透入深度小时，温度的分布是非常好的，而热效率也將高到 30~40%，这很重要，因为这时將使淬火金属单位重量的电能消耗量减少 $1/2$ 和更多。

同早已尽人皆知的在炉内和鹽槽内加热、用气焊枪火焰加热等其他方法相比較，感应淬火加热的主要优点是：第一，此种

方法不用任何中間媒介，而能在被加热的零件內立即产生热能；第二，它能恰在零件需淬火的截面部分內产生热能，这对于表面淬火是非常重要的。这些优点大大地促进了使零件特别是实心零件的淬火加热过程加速和成本降低的可能性。

热处理專家們有着这样的顧慮，就是感应方法使实心鋼件迅速表面加热的特性，可能引起不可容許的热应力和裂紋，但在实践过程中并未得到証实。当在大的單位功率下迅速进行加热过程时，导热性的作用是极小的，而此时在制件內所得到的热应力也是不显著的。这是因为，虽然被加热层也力求伸展，因而造成在零件的冷的剩余部分內产生拉应力，但在迅速加热时，与零件剩余部分相比較，被加热层是非常薄的，甚至是极其压縮的，故只能在制件剩余部分內造成极弱的拉应力。經過一段時間之后，当被加热层加热到塑性状态时，它对于冷的部分的影响就会减少到几分之一。在相当于加热层失去磁性的時間內，这一影响产生的变动不大。此后，其下面較深的一层开始迅速地加热，并首先在冷的部分內造成拉应力，但这一应力也是极不显著的。

这样，每个時間內在鋼件某一比欲淬火层薄而且通常比零件剩余未淬火部分的厚度小得不成比例的薄层內的集中加热，能在沒有产生不可容許的热应力的危險下，將欲表面淬火的零件的加热時間縮減到数秒鐘。在利用鋼的导热性进行較長時間感应加热的情況下，当零件的大部分截面要热透时，对热应力方面的条件將是不太有利的。

对于任何零件來講，通常都將由零件表面到含有 50% 馬氏体层的距离規定为淬火层深度。在大多数情況下，工作于摩擦下的零件都要求不小于 1.5~2 公厘的淬火深度。根据磨損程度考虑可能要重磨时，有时將淬火层深度規定得較大些。对受

过扭曲、压力负荷等等试验的零件来讲，淬火层深度通常相当于4~5公厘，而对冷轧的轴来讲，则达10公厘和更多。某些零件淬火层深度应达100公厘。对于在最大疲劳强度的条件下承受变向负荷而工作的零件来讲，淬火层深度可在零件直径的10~15%范围内。

如果根据某种理由选择出的电流频率，使与其相应的“热”透入深度的数值比规定的淬火层深度小得很多时，特别是在电子管振荡器供电下进行数公厘深度淬火时，则淬火结果可能是不良的。热的传导将比电流的“热”透入深度缓慢，热的传导只能依靠导热性进行，因此使零件表面层温度的增加超过了淬火温度，即使表面层过热。

根据钢料牌号、加热时间及对淬火层组织所提出的要求的不同，欲淬火的表面加热温度的增高可在 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的范围内，有时还要高些。经验证明，在特别重要的情况下，这一增高应在不超过 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

为了在容许的表面过热得到大于“热”透入深度的淬火层深度，应在小的单位功率及甚低的热效率进行长时间的加热。此时，便相继地失去了正确进行感应加热的一切优点，在质量方面则如同鹽槽加热、气焊枪火焰加热等一样。

为了部分的证实上述事实，我们来引证表2内的一些比较数据。这些数据是在300,000和2,000周的频率，用45号钢制成的直径为52公厘的圆柱体进行不同深度淬火的实验方法得到的。

从表2的数据中可以看出，在2,000周频率进行的规定深度淬火的加热，比在射频进行的加热所消耗的电能较少。在企图利用射频进行表面过热较小（ 50°C ）的加热下，其差别就更