

高频电热表面淬火法

王式璠 刘树民

科学技术出版社

本書提要

鋼鐵機件（如軸類、氣缸套、齒輪等零件），常常要求具有高硬度的表面及軟韌的心部。要達到這種技術要求，就要進行表面淬火。表面淬火的方法很多，而高頻感應電熱表面淬火則是現代新型的方
法。它的優點是：生產效力高，變形小，可以高度自動化，成本低廉，
質量高。這種方法可以大量推廣。

這本小冊子就是介紹這種淬火的方法。

總號：1259

高頻電熱表面淬火法

著者：王式璣 劉樹民

出版者：科學技術出版社

（北京市西直門外郭家灣）

北京市書刊出版營業許可證出字第091號

發行者：新華書店

印刷者：北京五三五工廠

（北京北郊花園路甲1號）

開本：787×1092 1/32 印張：2

1959年2月第1版 字數：33,000

1959年2月第1次印刷 印數：7,050

統一書號：15051·224

定價：（9）2角1分

目 次

一、前言	(1)
二、概述常用的表面硬化法	(1)
三、交流电流和交变磁场	(4)
四、电磁感应和涡流	(8)
五、怎样利用涡流使钢铁机件表面加热淬火	(12)
1. 高频加热的电源设备	(13)
2. 加热感应器	(16)
六、高频电热表面淬火时的加热方法	(22)
七、高频电热表面淬火法的优点和在工业中的应用 实例	(26)
1. 高频电热表面淬火法的优点	(26)
2. 铸铁缸套和钢制曲轴的高频淬火工艺	(27)
3. 国内应用高频电热表面淬火法的概况及新 工艺——车床床身导轨高频电热表面淬火	(35)
八、高频电热表面淬火的技术安全设备维护	(51)
1. 技术安全	(51)
2. 设备维护(检查和备修)	(52)
九、高频感应加热在工业中的使用远景	(54)
1. 齿轮双频表面淬火	(55)
2. 钢轨端部高频电热表面淬火	(56)
3. 感应电热轧制齿轮	(57)
4. 高频电热快速气体渗碳	(58)
5. 高频电热器皿壁面涂珐琅	(60)
6. 介质和半导体制品的高频电场加热	(61)

高頻感應電熱是現代化熱處理工藝中的一種新型加熱方法。雖然它出現在工業中的歷史還不久，但是它的应用範圍几乎已經擴大到所有的工業部門。不論在通用機器製造廠，或者汽車拖拉機製造廠、造船廠、工具廠以及農業機械製造廠等，到處都能看到高頻電熱設備和用它處理過的機件。現在，高頻感應電熱在工業中已占有相當重要的地位，甚至很難想象在上述各個現代工業廠礦中能不采用這種先進的加熱方法。

高頻感應電熱在下列工藝過程中应用得最多：

1. 黑色金屬和有色金屬的高頻感應熔煉；
2. 鋼制件及鑄鐵件的高頻表面淬火；
3. 鍛坯的感應透熱；
4. 高頻釐焊。

另外，高頻感應電熱也用于半導體體和非半導體體的介質加熱（如加熱塑料製品及干燥木材、砂型、糧食等）。

我們在這里只想介紹一下高頻電熱表面淬火法，因為目前它的应用比其他几項更為廣泛。

二、概述常用的表面硬化方法

組成機器的許多鋼鐵機件，由於工作特性的不同，常常要求具有綜合的機械性能。例如汽車發動機的曲軸，當發動機運轉的時候，曲軸本身承受扭轉力和彎曲力，同時軸頸表面還承受摩擦力。為了保持曲軸不被這些外力所破壞。除要求材料適當外，軸頸的表面應具有較高的耐磨性，而心部又應具有良好

的韌性。又如耕田用的犁頭，也是要求它的表面具有一定的硬度，心部具有韌性的韌性。對待這類機件，如果仍採取一般的热处理方法，把機件全部加熱淬火，那是絕對不能達到上述要求的。因為整個機件加熱淬火後，表面是得到了一定的硬度，但內部却因硬化而變脆了。在這種情況下，如果採用表面淬火，就會符合要求。

所謂表面淬火法，是只把工件的表面層加熱到臨界點以上，然後在適當的冷卻介質中進行急劇的冷卻淬火，使淬火後工件的表面層具有淬火鋼的組織——馬氏體，而內層具有未淬火鋼的組織——珠光體以至索氏體，以保證工件既能承受撓曲應力，又有較高的耐磨性和疲勞強度。

表面硬化的方法主要有下列幾種：

1. 火焰加熱表面淬火法

火焰淬火法是應用氧乙炔火焰把機件的局部表面加熱到臨界溫度以上，然後用水或其他冷卻介質淬火，使機件表面獲得高的硬度。

2. 化學热处理表面硬化法

(1) 滲碳處理：滲碳處理是將含碳低的鋼件放在滲碳劑中加熱，使滲碳劑中的碳，滲入鋼件表面，使一定深度的表面層含碳量增加（也可以用氣體滲碳法或液體滲碳法達到這一目的）。然後經過淬火和回火，使機件表面獲得高的硬度。

(2) 氰化處理：氰化處理一般是將鋼件放在加熱的液體氰化鹽槽（含有碳和氮）中，或在爐中通入含氰的混合氣體加熱，然後在空氣中冷卻或直接淬火，使鋼件表面獲得高的耐磨性。

(3) 氮化處理：氮化處理是將鋼件在氮氣中加熱到 480—650°C 的溫度，長時間保溫使氮氣飽和鋼的表面，從而獲得較高的耐磨性和硬度。滲氮還可以提高鋼的抗腐蝕性。

3. 电鍍表面硬化法

电鍍是应用电解原理，把一种金屬或合金复盖在另一种金屬或合金的表面上。目前最常用的电鍍法已有鍍鉻、鍍鋅、鍍銅、鍍鎳等。电鍍后可提高鋼的抗腐性和耐磨性。

1. 电火花表面强化法

电火花表面强化法是将被强化的工件接上直流电，使它成为負極，将强化用的金屬接上直流正电，使它成为正極，然后使正負兩極之間产生电火花放电，将正極上的金屬微粒附在負極(工件)的表面上，使工件的表面得到强化，从而提高工件表面的硬度和耐磨性。

5. 高頻电热表面淬火法

高頻电热表面淬火法与上述几种表面硬化方法相比，存在着根本性的差別：一般热处理(包括化学热处理)都是外热源加热，而高頻电热是采用內热源加热的方法，即感应加热法。感应加热是在交变电磁場中完成的；当高頻电流通过加热感应器时，其周圍便产生密集的高頻磁力綫。此时位于感应器磁場里的零件，在其表面的一定深度層中受磁力綫的作用，产生感应电流，有感应电流通过的部分便受到强烈加热。感应加热时透入工件表面層的热能很高，由于表面效应的影响，也很集中，一般能达 16 千瓦/公分^2 ，而其他加热方法的热能却很低，如用火焰加热时热能約为 1 千瓦/公分^2 ，用热傳导加热时約为 20 瓦/公分^2 ，而用輻射加热时热能仅約 8 瓦/公分^2 。为了說明鋼件表面層中的感应电流，以及电流如何使鋼件加热到淬火温度，故需依次解釋下面几个問題：

(1) 交流电流和交变磁場；

(2) 电磁感应和渦流；

(3) 怎样利用渦流使金屬表面加热。

三、交流电流和交变磁场

現代工矿企业中及日常生活中，几乎到处都要用电，如照明的电灯、通訊用的电话和电报，工厂中拖动机器的电动机等，都不可缺少电。所以工业愈发达，用电的范围就愈广，需要的电量也就愈大。

至于电到底是什么，現在我們只能作簡單的介紹。根据电子学說，凡是占有一定空間和具有一定質量的东西，都叫做物質。物質是由許多叫做分子微粒所組成。分子是由原子組成。原子又是由电子和質子組成。这些电子和質子都帶有一定数量，但彼此不同性質的电荷。習慣上規定把質子所帶的电荷叫做阳电荷（或正电荷），电子所帶的电荷叫做阴电荷（或負电荷）。我們平常所說的“电”也就是指这些电荷所表現的各种現象。在正常情況下，物質体积內的正負电荷相等，而彼此相抵消，不呈帶电性質，叫做“中性”物質。如果因为外部因素的影响，能使金屬內部的电子（金屬內部只有电子可移动）向某一个方向移动。这些移动的电子流称为“电流”。因为电子所帶的电是負的，而習慣上又規定正电荷移动的方向为电流流动的方向，所以电子流动方向正好与电流的方向相反；从圖 1 可以看得很清楚。

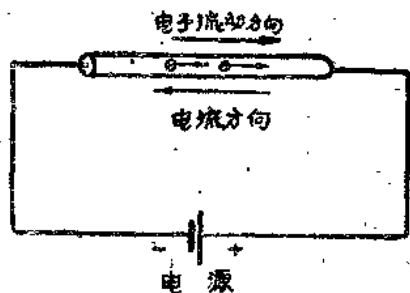


图 1

能够繼續不断地供給电流的设备称为“电源”，

如发电机、蓄電池等就是。电源可以用水泵来作比喻。电源好

比水泵，水泵能不断地推动水流动，与电源设备推动电子流流动相似。这样，电源设备可以认为是“电子泵”。由此可知，在电源内部有一种推动电子流动的原动力，类似水泵推动水流流动的原动力，这种原动力称为“电动势”。

地球上的一切物体，当自由行动时，总是从高处移向低处。这种现象在日常生活中非常普遍，当你不小心时，拿在手中的物体会从手中掉下来；高山上的水总是向河里流。而在电学中，电源输出的电流也有类似的性质，总是从正极流向负极，也就是从高电位流向低电位。电路中任意两点（如图2中AB两点）之间的电位之差，称为“电压”。所以电动势和电压的意义是有差别的。但它们都是以伏特（简称伏）为单位。

电源可以分为二类：

一种电源，流出电流的一个极永远流出电流，叫做阳（正）极；流回电流的一个

极永远流回电流，叫做阴（负）极，结果电流便从阳极不断地流向阴极，方向不随时间而变化，这种性质的电叫做直流电。比如手电筒中用的干电池就是这种性质的电。另一种电源却不这样，电动势的大小及方向是不断地周而复始重复变化的，因此，这样的电源就没有固定的阴阳极之分了，这种性质的电叫做交流电。我们日常生活中用来点电灯的电就是这种性质的电。

上面讲过，交流电流的方向是不断变化的，一会晃向一个

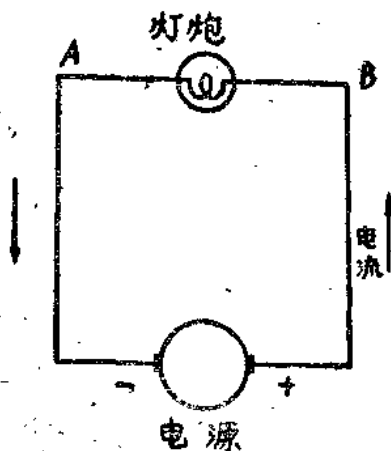
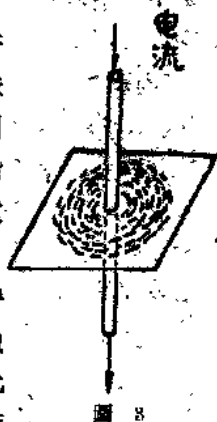


图 2

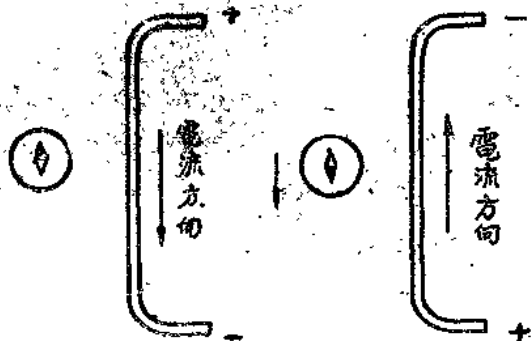
方向流动，轉瞬間又向相反方向流动，永远是这样繼續不断地循环下去。一个循环所經過的时间，叫做交流电的“周期”。每一秒鐘內的周期数，也就是每一秒鐘內循环次数，叫做频率。（以赫芝或周波/秒为單位）。我們工业用电及城市照明使用的交流电的频率为 50 赫芝。

当电流通过导线时，在它的周圍总是产生磁場。磁場是人們无法看見的。不过我們可以利用磁針或鉄屑来做試驗，証实它的存在。

将导线穿过一塊紙板，如圖 3 所示，并使电流通过这根导线，然后在紙上撒一些鉄屑。我們便可以發現，鉄屑会有規則地团团圍住导线，形成許多同心环。如果把紙板沿导线作上下移动，并不影响鉄屑的排列。这說明整根导线的周圍都是有磁場存在的。

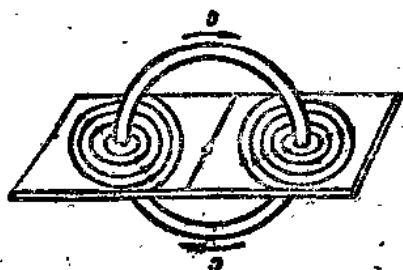


假定在导线旁側放置一个指南針，把导线的上端与电源的正極联接，下端与电源負極联接，使电流自上而下地流动，指南針北極所指的方向是順时針方向。如果将导线兩

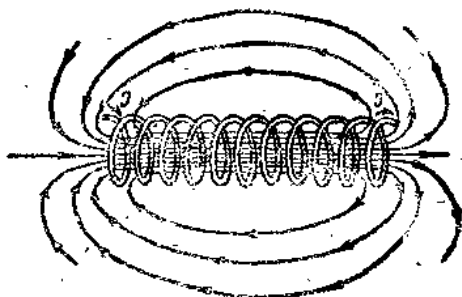


端与电源两极之间的联接互换，使电流由下而上地流动，指南针的北极便转为逆时针方向(圖4)。由此可知，导线四周磁场是有一定方向的(我们用箭头来表示它的方向)，并且决定于流经导线的电流方向。所以当导线中通过直流电流时，它周围磁场是固定不变的；但当导线中通过交流电流时，其周围磁场的方向是周期地不断变化的，其变化周期数等于交流电流的周期数(频率)。例如：交流电流频率为50周时，交变磁场的频率也为50周；交流电流频率为2,500周时，交变磁场的频率也为2,500周。

为了便于分析磁场的分布情况和特性，我们把磁场用磁力线来表示。磁力线是这样构成的：线上每一点的切线方向符合于该点的磁场方向。同时还可以借助所画磁力线的稀密来表示磁场的强度。这样，借磁力线之助，便可以更形象化地刻划出磁场的特征。由于每一点的磁场只能有一个方向，所以磁力线是一条互不交叉的闭合曲线。



a. 圆形电流底磁力线底方向



b. 螺线管底磁力线底方向

圖 5

为了进一步了解磁场，我们画出磁力线表示下列两种形状导线所形成的磁场(圖5 a, b)，以便大家想象。

四、电磁感应和涡流

既然在通过电流的导线周围总要产生磁场，反过来，有了磁场是否可以产生电流呢？如果可以，那么又怎样利用磁场来产生电流呢？由实验证明：当导线周围的磁场发生变化时，在导线中因感应而产生了感应电动势。这样产生感应电动势的方法叫做“电磁感应”。如果产生了感应电动势的导线是闭合的，那么导线中便产生感应电流。利用磁场来产生电流的方法基本上有三种：①移动导线附近的磁场；②使导线在固定的磁场中移动；③变动导线周围磁场的强度。这里我们只谈谈第三种方法。

将线圈甲的两端联接一电流表（图 6 A），然后把一个通过直流电流的线圈乙向下（线圈乙套住线圈甲）移动，此时，电流表的指针发生偏转（譬如向右），这说明在线圈中产生了感应电动势和感应电流。如果线圈乙停止不动，电流表的指针便回到中间位置“0”处（如图 6 B 所示）。当线圈乙向上（离开线圈甲）移动，此时，我们又可以看到电流表指针偏转，但偏转方向是向左（如图 6 C 所示）。由此可知感应电动势的方向是与线圈乙的移动方向有关。我们如果再进行仔细地观察，就可以发现，

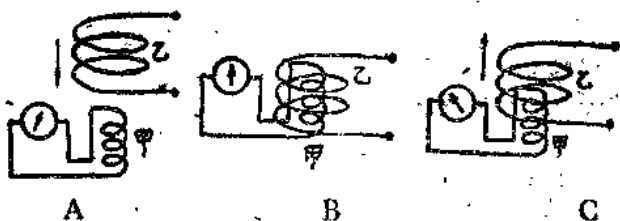


图 6

线圈乙移动的速度愈快，则电流表所偏转的角度愈大。这充分表明了电动势的大小是与线圈乙移动速度的大小有关的。

要是进一步研究上述现象，我们可以发现，当通过直流电流的线圈乙向下移动时，它所产生的磁力线穿过线圈甲的数量逐渐增加，线圈甲中便感应出电动势来，从而引起电流，使电流表的指针向右转动。当线圈乙停止运动时，穿过线圈甲的磁力线停止增加（即磁力线的数量不变），线圈甲中不能感应出电动势，所以电流表的指针停在中间位置“0”处。当线圈乙向上移动时，穿过线圈甲的磁力线逐渐减少，线圈甲中又产生了电动势，也引起了电流使电流表的指针转动，不过转动的方向和线圈向下移动时相反（向左转动）。线圈乙移动速度愈快，穿过线圈甲中的磁力线增加（或减少），速度也愈快，产生的电动势和电流就愈大，所以电流表偏转角度也就愈大。由此，我们便得到一个很重要的结论：线圈中产生电动势的先决条件必须是与线圈相链结的磁力线发生数量上的变化，电动势的大小与其变化速度成正比，而方向则决定于磁力线是增加还是减少。

但是我们运用上述方法来使一线圈中链结的磁力线发生变化，以获得电动势，总觉得不方便，同时移动速度也很慢。如果将两个线圈的位置固定不变（如图7所示），在线圈甲的两端



加上交流电压，使其流过交流电流，而产生了交变磁场，因此在线圈乙中被感应出电动势来，这样上述缺点便没有了。由于交流磁场的大小和方向是不断的变化着的，所以线圈乙中所产生的电动势的大小及方向也是不断变化着的。这就是上节所讲交流电。现在变电所中用的变压器就是基于这种原理而制成的。

上面说过，放在通过交流电流的线圈中的另一线圈可以感

应出交流电动势来。如果将一个铁棒插入通过交流电流的线圈中，在交变磁场的作用下，是否也同样能产生出感应电动势和感应电流来呢？我们的回答是“同样可以产生交流电动势及交流电流”。事实上，我们可以把一个整块铁棒想象成是由若干个同心管紧密地套合而成的（如图 8 所示），把每个同心管都看成是一个单匝线圈，因此每一单匝线圈中也毫无例外地感应出交流电动势来。这种感应电动势在同心管中引起的交流电，自行回路象旋涡似地流动，所以电学上把这种电流，叫做“涡流”。但实际上它是感应电流的一种，而习惯上不把它叫做感应电流。

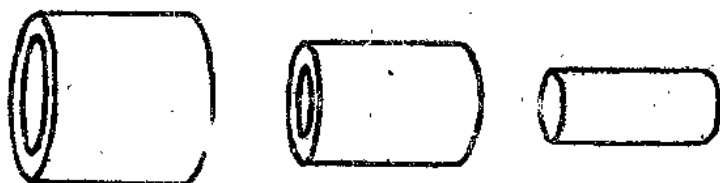


图 8

我们假设磁力线平均地分布在铁棒横截面上，越近中心的同心管所包围的磁力线越少，感应出的电动势也越小，从而产生的电流也越小；反之，越近表面的同心管中的电流越大。但是，铁棒中的涡流流动的方向，在任一瞬时都是与它外面线圈中的电流方向相反（注：为了讲述时方便，这里我们不考虑电感），因此它们所产生的磁场的方向也相反，从而削弱外线圈所产生的磁场。由于较外层的同心管的涡流所产生的磁场总是抵消较内层同心管所包围的磁场，从而使磁力线的分布不均匀：越近中心越稀少，越近表面越稠密。这样便大大地增加了表面与中心涡流之间的差别。这种现象称为“表面效应”，或称“集肤效应”。

表面效应是对感应加热过程有重大影响的现象。苏联科学院通讯院士沃罗金教授就是根据感应电流的这一效应发明了高频电热表面淬火法。图9是在不同电流频率下导体里的电流分布示意图。从图里可以明显看到，在直流电条件下，电流均匀地分布在导体截面上，即电流密度在导体横截面的每一点上都是相等的（图9a）。而在交流电条件下则不然，电流在导体截面上的密度是不均的，主要是沿导体的表面层流动（表现出交流电流的表面效应）。随着电流频率的增加，这种现象愈加强烈（即表面效应愈加明显）。当频率相当高的时候，导体的中心部分实际上是没有电流的（图9b, d, f）。

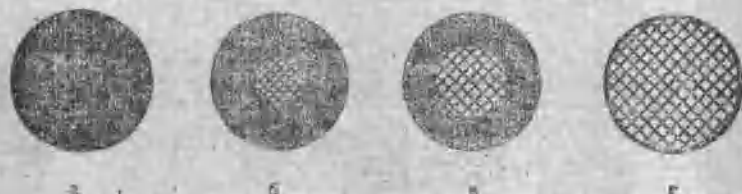


图9 在不同电流频率下，导体里的电流分布示意图

a—频率 = 0（直流）

b—频率 = 50 赫芝

d—频率 = 2,500 赫芝

f—频率 = 250,000 赫芝

表面淬火时，零件的表面淬硬层深度就是决定于电流的表面效应，即决定于电流在金属零件（导体）中的渗透深度。根据图9的示意图形可以看出电流渗透深度是与电流频率成反比例的，即频率愈高渗透深度愈浅，频率愈低渗透深度愈深。电流渗透深度(δ)与电阻系数(ρ)、导磁系数(μ)及频率(f)的关系，可按下面的公式计算：

$$\delta = 5.13 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{公厘})$$

$$= 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{公分})$$

式中的 ρ, μ, f 的單位: ρ (欧姆/公分), μ (高斯/奧斯特), f (周/秒或赫芝)。

下表是在 20°C 和 850°C 时, 电流在 45 号鋼中的渗透深度, 以及在 20°C 时, 电流在鋼中的渗透深度值。

电 流 密 率 (赫芝)	渗 透 深 度		
	紫 銅 $t = 20^{\circ}\text{C}$	45 号 鋼 $t = 20^{\circ}\text{C}$	45 号 鋼 $t = 85^{\circ}\text{C}$
50	10	4.5	80
2,500	1.4	0.64	11
8,000	0.8	0.35	6.2
20,000	0.16	0.071	1.2
1,000,000	0.07	0.039	0.55

五、怎样利用渦流使鋼鉄机件 表面加热淬火

电流在导体中通过时, 总要使导体發热。当电流不变时, 导体的电阻越大發出的热量越多。这种現象在日常生活中是常遇到的, 如电爐, 电灯的發热就是这个道理。这种現象被技术工作者們利用来使金屬加热, 因而产生“高频电热”这門科学。这門科学現在發展很快, 在工业中应用得很广泛。鋼鉄机件表面淬火是目前高频电热在工业中应用最广的一种。

为了更好的了解怎样利用渦流使金屬表面加热淬火, 現在先来介紹一下“淬火”这个名詞。將鋼鉄机件加热到一定温度(临界温度)后, 立即放入水或油中急剧冷却以增加其硬度的操作, 叫做“淬火”。如果只將零件表面一層进行淬火, 称为“表面淬火”。

鋼鐵機件如各種軸銷、環套、齒輪等零件，常要求具有高硬度的表面及軟韌的心部；滿足這種技術要求的工藝方法之一就是利用渦流表面效應的特點給鋼鐵機件進行表面淬火。這種方法成本低，質量好，除能增加零件表面硬度、提高其耐磨性以外，在某些情況下還能提高零件的疲勞強度。因此這種方法在工業中應用很廣。

為了使鋼鐵機件內產生渦流，以便進行表面淬火，需要下列的設備和元件：

1. 高頻加热的电源設備

產生高頻電流的發電裝置，通稱為高頻發電機。高頻發電機可分為三種類型：

(1) 機械式高頻發電機(圖10)，是由電動機、高頻發電機、高頻變壓器、電容器組、加熱感應器及綫路控制部分組成的。這種發電機的頻率範圍是500—10,000赫芝，適用於要求淬火深度在2公厘以上之零件加熱淬火。淬火質量較真空管式發電機穩定，很少受電源電壓波動的影響。除淬火外，此類發電機

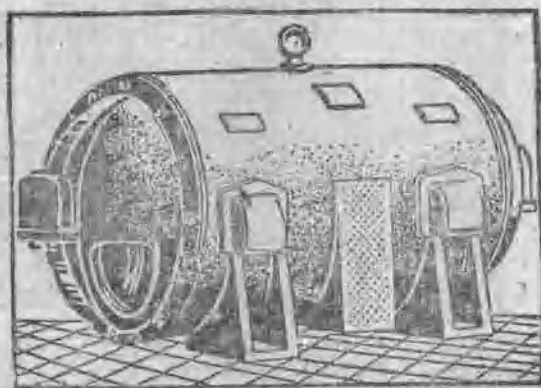


圖 10 機械式高頻發電機

还适用于金属熔炼、锻造和焊接等工艺。设备效率约70—80%。目前，我国电机工业已根据需要开始制造机械式发电机，不过制造型号尚不完全。现在国内应用的机械式发电机型号如下表所列：

高频发电机型号	功率(千瓦)	频率(赫芝)	主要用途
苏式 MF3-52	50	2500	淬火及焊接
苏式 MF3-102	100	2500	淬火及焊接
苏式 MF3-252	200	2500	淬火及焊接
苏式 MF3-108A	100	8000	淬火及焊接
苏式 MF3-208	200	8000	淬火及焊接
国产仿苏 MF3-252	200	2500	淬火及焊接
苏式 MTH-252	200	2500	锻造加热
国产仿苏 MTH-252	200	2500	锻造加热
苏式 MITI-252	200	2500	熔焊

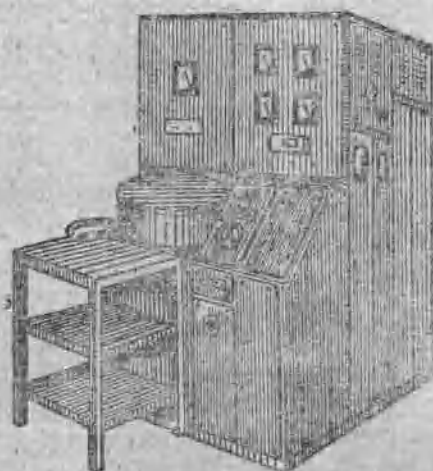


图 11 机械式高频发电机