

穿透感应加热在工业中的应用

〔苏〕 C.E. 赖斯金 著

黄 福 万 译

2812

48

国防工业出版社

穿透感应加热在工业中的应用

〔苏〕 C.E.赖斯金 著

黄福万 译

国防工业出版社

内 容 提 要

感应加热具有很多优点，在工业生产中已获得日益广泛的应用。本小册子较详细地论述了感应加热的基本特性；介绍了锻造、轧制及其它生产用感应加热器的基本类型及感应加热设备的种类、结构、特性参数和供电方式；还阐述了感应加热的自动化方法和各种自动化机构；指出了按具体生产任务选择感应加热装置的方法。

本小册子根据俄文第四次修订版译出，该版增加了无氧化加热方面的内容。

该小册子可供从事电热设备使用和设计的工艺员及设计员参考，也可供大专院校热加工专业的师生及锻压技术工人参考。

ПРИМЕНЕНИЕ СКВОЗНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. Е. Рыскин

Ленинград «Машиностроение»

1979

*

穿透感应加热在工业中的应用

〔苏〕 С. Е. 赖斯金 著

黄福万 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张2¹/₂ 49千字

1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷 印数：0,001—3,600册

统一书号：15034·2394 定价：0.28元

前 言

任何电加热，包括感应加热，每吨半制品所消耗的能源（煤，石油，燃气）都比火焰炉加热的经济性低。这是因为燃料在热电站燃烧时，所得到的热能在转变成机械能和电能的过程中损耗了一部分，而一部分电能又在变压器、传输导线、变频器（当中频及高频加热时）以及感应器上转变成成为热能而消耗了。

但是，利用各种电加热方法也有很多优点，例如高的生产率，加热过程完全自动化和高的稳定性以及改善劳动条件等。因此，电加热获得日益广泛的应用。

目前，电加热的使用形式如下：感应加热、电接触加热、电阻炉加热、等离子加热、电弧加热、电子束加热、激光加热。只有电接触加热和电阻炉加热在某种程度上能与感应加热相竞争，其余的电加热形式只在某些工业技术部门应用^(3,4,5)。

电接触加热直接通 50 赫芝的电流使半制品穿透加热。这种加热方式没有在变频器及感应器上的能量消耗，因此，它的有效利用率稍高于中频及高频加热。然而，为了获得足够高的有效利用率，半制品在采用电接触加热方式时，其长度应该显著地大于其直径 ($l : d > 3$)。电接触加热方式不可能沿半制品的整个长度加热，因为半制品与导线接触处通常不能加热。由于这些特性，电接触加热一般只用于半制品的

局部加热，并且主要用在半制品的加热与形变同时进行的加热装置中^[6]。

电阻炉广泛应用于下述情况：零件加热温度不超过 1000°C ，零件的形状比较复杂，需要缓慢均匀加热，并在高温下长时间的保温，然后缓慢冷却。在这种情况下，电阻炉加热比感应加热更经济^[7,9]。感应加热的主要优点是它有高的功率密度。电阻炉的单位功率很少超过 $25\text{千瓦}/\text{米}^2$ ，而感应加热一般在 $500\sim 1000\text{千瓦}/\text{米}^2$ 范围内。

感应加热器比电阻炉更适于在工艺流水线上使用，在这种流水线上，从冷棒料开始送到加热器直到最后送走锻好的锻件，整个过程都是自动进行的。一般情况下，在选择加热方式时，必须仔细地进行技术经济分析。然而，当圆截面、矩形截面及正方截面的柱形钢半制品加热超过 1000°C 时，特别是在小型加热装置上要求迅速加热时，感应加热比其它加热方式具有无可争辩的优点。

本小册子介绍了感应加热的动力学特性及工艺特性的知识，记述了苏联成批生产的加热器，包括各种加热器的典型图及各种参数，同时介绍了其它加热方法^[6,7,9]。可供从事工业加热装置设计、使用和选择加热方式时参考。

目 录

第一章 感应加热	1
§ 1 感应加热的基本特性	1
§ 2 单位功率	5
§ 3 加热制度	6
§ 4 加热时间	7
§ 5 加热方法	9
§ 6 有效利用率	12
§ 7 电流频率的选择	14
§ 8 加热装置的基本元件	21
§ 9 加热器的供电方式	24
§ 10 加热器的功率	26
第二章 加热器的基本类型	28
§ 11 加热器的选择	28
§ 12 长度 300 毫米以下的匀整圆柱形半制品用加热器	29
§ 13 从感应器内引出半制品	37
§ 14 长度从 300~2000 毫米的圆柱形半制品用加热器	39
§ 15 半制品端部及局部加热用加热器	40
§ 16 无氧化加热用加热器	44
第三章 感应加热的自动化	48
§ 17 加热制度自动化的方法	46
§ 18 向加热器中运送半制品的自动化机构	50
第四章 工业用感应加热设备	60
§ 19 成批生产的设备种类	60
§ 20 匀整半制品加热用设备	62
§ 21 半制品端部加热用设备	66
§ 22 棒料及管材加热用设备	69
参考文献	71

第一章 感应加热

§ 1 感应加热的基本特性

感应加热时，半制品放在通工频或高频电流的导体的交变电磁场中（图1）。该导体称为感应导体，一般由圆形或矩形的钢管制造。根据加热的半制品形状，将感应导体绕制成横截面为圆形或者矩形的柱状螺旋形。为使零件得到必需的温度场，感应导体还可以制成其它的任何形状。由于电磁感应，半制品中感生出电流，其频率与初始电流的频率相同。感应导体中的

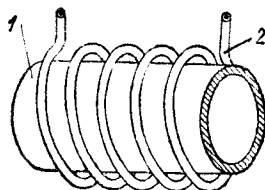


图1 金属半制品（1）
在感应导体（2）的交变
电磁场中

电流和半制品中的感应电流沿截面的密度是不同的。如果感应导体从外面包围加热的半制品，则相对旋转的感应导体及加热的半制品表面具有最大电流密度值，并随远离这层表面按指数规律逐渐减少。电流密度减少到表面电流密度的37%的距离处称为透入深度。图1中半制品端面上的阴影线表示透入深度。

离半制品表面的距离大于透入深度的各层，其电流密度不大。在透入深度范围内一般有85~90%的能量析出传给加热表面。

透入深度 Δ (米) 按下式计算:

$$\Delta = \sqrt{2\rho / (\omega\mu_0\mu)}$$

式中 $\omega = 2\pi f$ —— 角频率;

f —— 频率 (赫芝);

μ_0 —— 真空导磁率 (亨利·米);

μ —— 相对导磁率;

ρ —— 电阻率 (欧姆·米)。

大多数材料的电阻率都随自身温度的升高而增加。

所有金属及其合金可以按照磁性分为两组。

1. 铁磁金属及合金, 它们的导磁率比真空导磁率大得多 ($\mu > 1$);

2. 顺磁及反磁金属及合金, 它们的导磁率接近真空导磁率。

碳钢、铁、镍、钴属于第一组; 耐热钢、不锈钢、黄铜、铝、德银[●]等属于第二组。

反磁及顺磁金属及合金在加热过程中仅仅电阻率有变化, 导磁率实际上保持不变。因此, 反磁及顺磁金属及合金在加热时, 由于材料导电率降低, 其电流透入深度增加不多。

铁磁金属及合金在加热过程中, 在导电率降低的同时, 导磁率也降低。当金属加热达到一定温度后, 导磁率降到真空导磁率值, 使电流透入深度激烈增加。这一温度称为磁转变温度或临界点。因此, 加热低于磁转变温度的钢中之电流透入深度和加热高于磁转变温度的钢中之电流透入深度 (电

● 德银的化学成分: Ni29~33%, Fe0.6~1%, Mn0.8~1.3%, 其余为Cu。——译者注

流的《热》透入深度)是不同的。

钢的相对导磁率及电阻率与温度的关系示于图 2。

感应电流沿表面层流动引起表面加热。随着表层温度的增加,由表面到中心的热传导增加,同时,由于通过周围空气的热辐射和热传导,表面的热损失也增加。

为了减少这些热损失,半成品与感应导体之间可放置绝热物质。

感应导体通过电流时,自身也被加热了。为了散热,感应导体可用通冷却水的管子制造。

在感应导体上析出的热造成了进一步的损失,因而感应加热器比电阻炉及电接触加热装置的有效利用率低。当半成品放到感应导体内时,不要损坏绝热材料。绝热材料由耐热材料导轨或无磁性的钢管(通冷却水)支撑。这些管子中的热损失同样降低感应器的有效利用率。感应导体从外面固定在专门的绝热材料支架上或者埋在耐热混凝土中。感应导体、耐热绝热物、支撑半制品的导轨、支架、冷却部件(软管、接管嘴)结成一体统称为感应器装置。

目前在工业上使用各种结构的感应器,其中应用最广泛的两种感应器示于图 3 和图 4。

如果供给半制品的功率在所有温度范围内都超过从它表

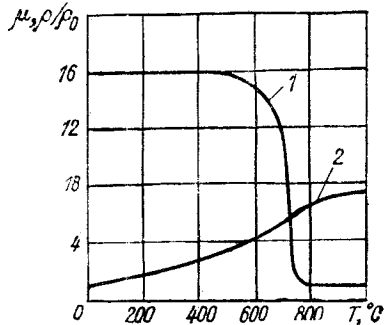


图 2 钢的相对导磁率 1 及电阻率 2 随温度增加的变化曲线

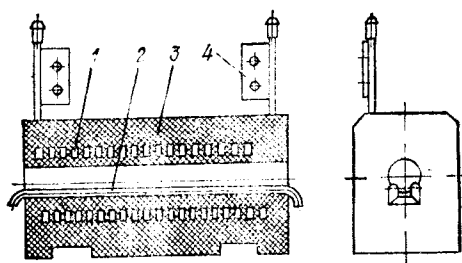


图3 用耐热混凝土作绝热物的感应器

- 1—用矩形钢管制的感应导体；2—一支加热半制品的管状水冷导轨；
3—耐热水泥绝热物；4—连接感应器和电源的铜片。

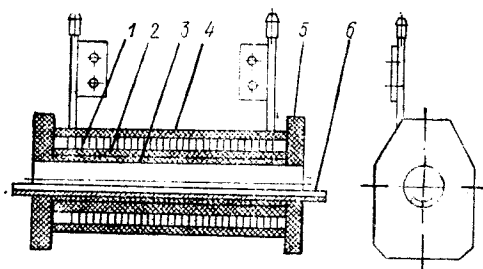


图4 用碳化硅及石棉作绝热物的感应器

- 1—用玻璃带或者聚丙烯绝热物包覆的铜管感应导体；2—碳化硅导管；
3—石棉导管；4—使感应器具有必要刚度的玻璃塑料导管；5—石棉板；
6—支撑半制品的耐热合金槽。

面损失的热能，通过一段时间后，半制品整个截面的温度将处在一定的范围内，此时，加热可以终止，以便半制品转送到下一工序。感应加热时，在被加热的物体上直接产生热量，因此，其加热速度高于火焰炉及电阻炉的加热速度。

感应电流总是沿着封闭路径流通。当感应导体与加热物体之间的间隙很小时，电流通过的宽度大约等于感应导体的

宽度。感应导体离开加热表面的距离越大，则感应电流泛流的宽度也越大。

感应电流沿电阻最小的路径流通，一般泛流的宽度很大，由于此处的感应电流密度很低，所以加热温度也相当低。

选择感应导体形状要考虑上述感应电流的流通特性并注意热传导现象，这样才可以用感应方法均匀地加热形状很复杂的零件。然而，从表面到中心，加热过程进行得很缓慢，所以复杂的及变截面的零件加热时一般需要相当长的时间。这样的半制品用感应加热在劳动生产率方面得不到什么大的好处，自动化输送通常也办不到。因此，这样的半制品适于在电阻炉中加热。

感应加热最适于圆形或正方形（倒圆角）横截面的柱形零件。

§ 2 单位功率

供给被加热表面单位面积上的功率与感应电流密度的平方成正比；而感应电流密度与加热物体单位长度内感应导体的安-匝数成正比。

半制品在穿透加热时感应器一般和电源直接相连，无需一般在半制品表面加热装置中常用的那种中间匹配变压器。

因此，如果选择电源，感应器的电压也是固定的，对于半制品来说，电流强度取决于感应导体的圈数。当其它条件相同时，圈数愈多，电流强度就愈小，从而单位功率也愈小。

感应器的圈数保证供给半制品必需的单位功率水平，感应器圈数的确定方法在专门的文献中研究^[8,11]。

在某些情况下，例如当要求加热小直径的半制品或者加

热短的半制品端面（生产率不高）时，感应器的计算圈数可能无法顺利地按感应器的长度分配。此时，感应器必须用高频降压变压器供电。

§ 3 加热制度

传给半制品的能量在表层中析出，该表层深度等于电流的透入深度。铁磁物体加热到磁转变温度时，电流透入深度激烈增加，然后保持不变。顺磁材料电流透入深度变化不大。为了获得足够高的有效利用率（见 § 7），在所有情况下，电流的透入深度应该远小于半制品横截面的尺寸。因此，物体截面的大部分是依靠热传导而加热的。

热传导速度取决于温度梯度。如果开始加热能保证供给加热表面足够的功率，则可以在几秒钟内使半制品热透入深度范围内的表面层加热到锻造温度（钢约为 1200°C ），此时，表面与中心的温度差以及由表面向中心的热传导速度达到最大值。随着中心温度的升高，热传导速度减低。

为了保持温度梯度及传热速度而提高表面温度的方法一般不可取，因为表面会强烈氧化，表层组织也会恶化，而某些牌号的钢半制品在迅速加热时会发生破裂。因此，供给加热零件的功率必须逐渐减低，使表面保持一定的温度（输入功率应该补偿由于表面热辐射、热对流以及向中心热传导而造成的损失）。这种加热制度在所有加热期间要保证表面与中心之间尽可能大的温度梯度，从而保证尽可能大的向中心传热的速度。显然，在研究任何保温时间下的加热规范时，半制品的表面温度总是稍高于中心温度。

当钢表面与中心的温度差不超出下列范围时，通常可停

止加热，非合金结构钢为 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，锻造温度范围比较窄的钢为 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

半制品由感应器转送到锻造机组时，表面温度稍有降低。这样一来，温度将更趋均匀。

零件以给定的温度差由 20°C 加热到锻造温度所需的时间称为加热时间。显然，加热时间取决于电流的频率（即电流的透入深度）、半制品的物理性质（导热性）以及半制品横截面的尺寸（直径）。

上述获得最小加热时间的加热制度称为表面恒定温度加热。

供给加热表面的单位功率可以这样进行选择：使半制品表面温度逐渐升高到锻造温度（约 1200°C ）而中心温度为 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 。

显然，这种加热制度比第一种加热制度需要的单位功率小，但需要的加热时间较长（计算和试验证明为 $1\sim 2$ 倍）。然而，由于下面所说的一系列原因，这种加热制经常使用，因此，称为普通加热制度。继续减少单位功率是不适合的，因为那将导致热损失增加和加热时间延长。

利用程序控制^[10] 单位功率可以实现加热时间处于第一和第二种加热制度之间的中间加热制度。

§ 4 加 热 时 间

材料及直径已给定的半制品在使用这种或那种电流频率时，其加热时间一般按图表来确定，而这些图表是用大量的各种品种的半制品和各种频率用试验的方法编制的。

表 1 列出了各种直径的碳素结构钢半制品用标准频率的

电流和普通加热制度及表面恒定温度加热制度的加热时间。

表1 圆柱形钢半制品以标准频率电流加热到1250°C的加热时间(秒)①

半制品 的直径 (毫米)	频 率 (赫芝)											
	500		1000		2500		4000		8000		10000	
	0 ②	ПТН ③	0	ПТН	0	ПТН	0	ПТН	0	ПТН	0	ПТН
20	—	—	—	—	—	—	—	—	10	4	11	4.5
30	—	—	—	—	—	—	—	—	28	12	31	12.5
40	22	9	30	12	43	18	50	20	58	24	61	25
50	—	—	—	—	—	—	—	—	100	40	101	41
60	72	32	96	39	123	50	134	56	148	60	151	61
70	—	—	—	—	—	—	—	—	205	83	212	86
80	162	66	202	82	243	98	259	105	278	112	283	114
100	295	119	350	141	463	163	425	172	449	181	455	183
120	467	188	538	217	605	244	632	255	660	266	667	269
140	681	275	767	310	848	342	880	355	—	—	—	—
160	936	378	1038	419	1131	457	1170	472	—	—	—	—
180	1232	498	1349	545	1456	588	1500	606	—	—	—	—
200	1568	633	1700	686	1822	735	1870	755	—	—	—	—

① 普通加热；② 表面恒定温度的加热；③ 该表由雅茨柯夫编制。

合金钢及有色金属的物理性质和碳素结构钢显著不同，其加热时间应以试验方法确定。

在不同的具体情况下，当半制品表面与中心的温度差一定时，加热到给定温度所需的时间可以和查表所得的数值稍有不同。这种差别和感应器结构的某些特性及半制品的物理性质有关。因此，具体的加热时间要在设备调整时用试验方法最后确定。正方形或矩形半制品在纵向磁场中(图5a)的加热时间同样可用表1的数据确定。

同时，当正方形半制品的边长或者矩形半制品截面较短的边长等于圆形半制品的直径时，其加热时间大约等于圆形

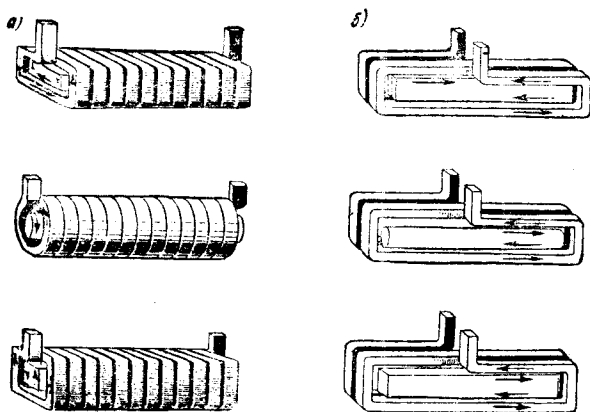


图5 矩形、圆形及正方形半制品的加热

α —在纵向磁场中； β —在横向磁场中（箭头表示感应导体及加热半制品中电流的瞬时方向）。

半制品的加热时间。在纵向磁场中加热时（图5 β ），加热时间比查表所得的时间增加0.5~1倍。

§ 5 加热方法

如果已知加热装置的生产率（每小时公斤数或者每小时半制品件数），在选好加热制度后，按表1确定半制品的加热时间 t_n ，根据公式 $n = t_n / t$ （式中 t 为半制品由感应器送到锻造机组所给定的时间范围），就可以计算出同时加热的半制品件数 n 。同时加热 n 个半制品可以用两种方法来实现。

1. 装 n 个同样的感应器，按次序和加热时间 t 放置同一种半制品，然后将相应的感应器接通电源。那么，在经过 $t_n = in$ 秒钟时，所有的感应器中将装满了半制品。在第一个感应器中的半制品首先达到锻造温度，这个感应器即可以断

电，并将半制品从该感应器中取出送到下一工序，同时向感应器中装上新的半制品。然后由第二个感应器中取出半制品，依次循序进行。这种加热方法（每个感应器中有一个半制品，当更换半制品时，感应器停电）称为周期加热法。同时，为了保证半制品端面均匀加热，感应器的长度应稍大于半制品的长度（大约二倍于半制品的直径）。当用周期加热法时，感应器上的电压严格保持不变，而传给半制品的单位功率随时都是变化的，因为加热的半制品的电阻率及导磁率是变化的。

2. 可以装一个长感应器，在该感应器中同时放置 n 个半制品。每 t 秒钟由感应器的一端送进一个冷的半制品。这时，处在感应器中的所有半制品每移动一步即等于半制品的长度。达到锻造温度的半制品由感应器的另一端送出。这样，在加热过程中，半制品由感应器的一端移向另一端。感应器工作一开始就接通电源，并且在整个工作时间都保持通电。在这种感应器上，当电压不变时，供给半制品的功率在整个工作时间内也保持不变（如果同时处在感应器中的半制品数足够多，例如不少于 5~6 件）。因为供应的最后一个及倒数第二个半制品彼此的温度差不大，它们的电阻率及导磁率区别也很小。也可以说，从感应器中取出的半制品随后又装进了感应器中。半制品的这种加热法称为顺序加热法。顺序加热法使用的感应器长度按下式计算：

$$l_n = n l_s + \Delta l_n$$

式中 l_s ——半制品的长度；

Δl_n ——为使第一个及最后一个半制品的端面加热不滞后，感应器补充增加的长度。

在用顺序加热法时，有时利用滚轮机构以保证半制品以 $v = l_s / t$ (米/秒) 的速度向感应器连续运送半制品，在采用周期加热法时，根据半制品加热的程度可利用程序控制器（对供给感应器的机械式发生器的激励系统发生作用）及降压感应器来实现表面恒定温度加热制度。按其它程序工作的这种调节器也可以实现普通的加热制度。

在用顺序加热法时，将感应器按长度分成几部分，根据每部分放置的半制品的整数得出表面恒定温度加热制度。为了使半制品所有部分处于相同单位功率区的时间相等，必须用顶杆推动半制品。感应导体绕制的螺距每后段比前段要大。由于连续的接通感应器的各段，因此每一段流过的电流相同。从一端到另一端的单位长度上的安-匝数逐渐减少。这样一来，随着半制品沿感应器的移动，传给半制品的单位功率也降低。当适当地选择每段感应导体的长度及螺距⁽¹¹⁾时，就可以实现必需的加热制度。如果半制品以固定的速度 ($v = l_s / t$) 通过感应器，那么，在感应器的每段中，可以不必要求有整数的半制品。在用顺序加热法时，按选择的感应器总圈数及长度得出普通加热制度。此时，沿感应器整个长度内的螺距保持不变。

表面恒温加热（或叫快速加热）感应器制造比较复杂。此外，在半制品的品种很多和需要频繁调整时，这种加热制度需要极高的操作技能，稍有违犯加热制度，半制品表面就会发生熔化。因此，这种加热制度比普通加热制度使用少得多。

周期加热有一个主要的优点。在锻造机组停止工作进行修理时，半制品应在感应器内保留一定时间。半制品达到锻