

第三册目录(上)

第八章 金属加热炉

第一节	连续加热炉.....	1
第二节	机械化炉底加热炉.....	83
第三节	均热炉.....	120
第四节	锻造用室状加热炉.....	159
第五节	热处理炉.....	182

第三册目录(下)

第九章 工业电炉

第一节	概况·····	265
第二节	直接作用电阻炉·····	269
第三节	间接作用电阻炉·····	283
第四节	感应炉加热·····	351
第五节	无芯感应熔炼炉·····	386
第六节	铁芯感应熔炼炉·····	405
第七节	真空技术概论·····	429

第十章 大气污染及其防治

第一节	烟尘·····	449
第二节	各种气体·····	464

第九章 工 业 电 炉

第一节 概 述

一、电炉的类型

电炉是利用电能作为热能来源的电热设备。电炉的类型繁多，为了便于命名和讨论，简介电炉的分类。

电热方法，即把电能转变为热能的方法，是电炉分类的主要依据。按目前在工业上应用的电热方法，电炉有六大类：电阻炉，感应炉，电弧炉，电子束炉，等离子炉，高频加热设备。

每一大类的电炉或电热设备，又可按其结构、用途、气氛、温度等不同而分成许多小类。根据炉子结构特点，电炉有箱式炉、井式炉、台车式炉、传送带式炉、推送式炉、辊底炉、震底炉、步进炉等。根据炉子的工艺用途，电炉有熔炼炉、加热炉、热处理炉、淬火炉、回火炉、渗碳炉、氮化炉、扩散炉、区域熔炼炉等。根据炉内气氛，电炉有普通气氛炉、保护气氛炉、真空炉等。根据炉内工作温度，电炉有高温炉、中温炉、低温炉，等等。

电阻电热法的基本原理，是在直接与电源连接的导体内流动的电流，受导体的电阻作用而把电能转变为热能。按电流是否流过物料本身，电阻炉分为直接作用炉和间接作用炉。

直接作用电阻炉中，物料直接与电源连接，如图 9-1-1。电能由工业网路经接触器送至降压变压器的原级，由次级出来的低压电流通过短网导至电极（触头），然后流过

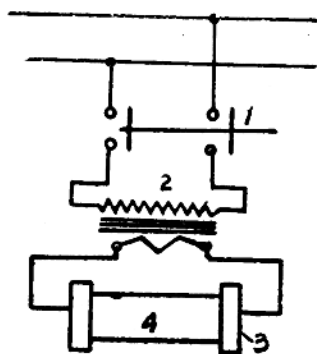


图 9-1-1 直接作用电阻炉工作原理

1—接触器 2—变压器；
3—电极 4—物料

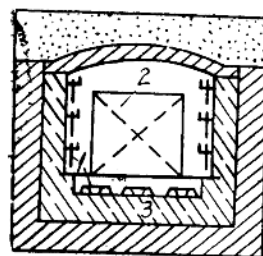


图 9-1-2 间接作用电阻炉示意图

1—电热体 2—物料
3—炉衬

物料本身。由于物料本身的电阻作用，将电能转变为热能，把物料自身加热。

间接作用电阻炉中，物料不与电源连接，而是电热体与电源连接，如图 9-1-2。电热体是另加的电阻元件，用金属或非金属材料制作，由它完成电热转变。电热体产生的热能，依靠传热作用传给物料，把物料加热至要求的温度。

感应电热法的基本原理，是位于交变电磁场中的导体内，因电磁感应而产生感应电流，感应电流克服导体自身的电阻而产生热，把导体加热。

图 9-1-3 示感应电炉的工作原理。当感应线圈中供交流电时，在它的附近产生交变的磁场，位于磁场中的物料内因电磁感应作用而产生感应电流，感应电流在物料中流动，克服自身的电阻而产生热，把物料加热以至熔化。加上铁芯的目的，是为了减少磁漏损失。按是否采用铁芯，炉子分为铁芯炉（图 a）和无芯炉（图 b）。显然，感应电炉的工作原理类似于变压器，特点是次级只有一匝而且短路。

电弧电热法的基本原理，是利用电极间气体电离形成电弧而把电能转变成热能。

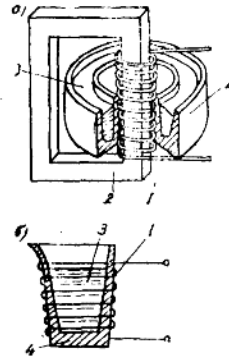


图 9-1-3 感应电炉的工作原理

1—感应圈 2—铁芯
3—物料 4—炉衬

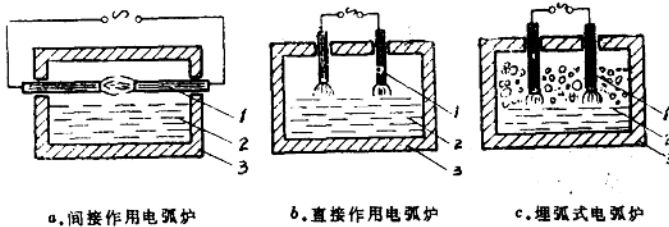


图 9-1-4 电弧炉的工作原理

1—电极 2—物料 3—炉衬

图 9-1-4 示电弧炉的工作原理。图 a 示间接作用电弧炉，炉中电弧产生于两个专门的电极之间，主要靠电弧对物料的辐射传热，把物料加热熔化。图 b 示直接作用电弧炉，电弧产生于电极和物料之间。图 c 是埋弧式电弧炉，电极插入被加热的物料内，电能的一部分依靠电弧作用转换成热能，一部分则因电流通过与被电极接触的物料时，由于电阻作用而转换成热能，故又称为电弧电阻炉，由于这种炉用于处理矿石，也称为矿热电炉。

电子束电热法的基本原理，是在真空条件下，用高速的电子轰击被处理的物料，电子的动能转变为热能，把物料加热以至熔化。

图 9-1-5 示电子束炉的工作原理。在真空炉壳内，用通低压交流电的灯丝加热阴极，使之发射电子，电子束受加速阳极的高压正电场的作用而加速运动，射击金属材料，

电子的动能转变为热能，把物料加热以至熔化。

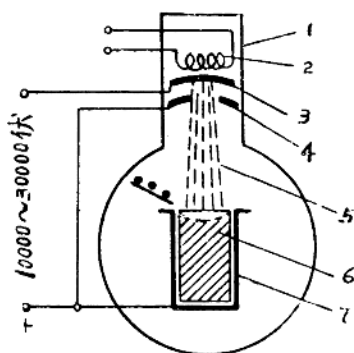


图 9-1-5 电子束炉工作原理

- 1—炉壳 2—灯丝 3—阴极
4—加速阳极 5—电子束 6—物料
7—阳极（水冷却的铜坩锅）

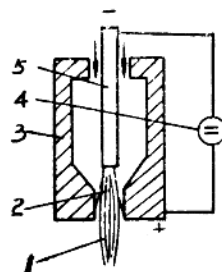


图 9-1-6 等离子枪工作原理

- 1—等离子焰 2—电弧
3—喷头 4—直流电源
5—钨或钨钼阴极

等离子电热法的基本原理，是用电能使气流电离形成等离子体，再使等离子体放电复合，生成高温弧焰，把电能转变成热能。

等离子电炉配置等离子枪，用以实现电热转变。图 9-1-6 示等离子枪工作原理。它有阴极和阳极，阴极通常是钨棒或表面敷有二氧化钍的钨棒；阳极是用水冷却的铜制圆筒，它的端头做成喷口形状。工作气体（例如氩气）从上面引入，从喷口喷出。工作时先用其他电源，如电火花高频发生器，使阴极和阳极之间触发电弧，这个过程和间接作用电弧炉中的电弧放电过程相同。工作气流通过枪膛时，受电弧中高速运动的电子撞击而电离，变成等离子气体。等离子体从喷口喷出后，其中自由电子和正离子随即复合为气体的原子和分子，并放出原先在电弧中所吸收的能量，形成高温的等离子焰。等离子焰的温度比电弧温度高，例如氩离子焰的中心温度可达 15000℃ 以上。高温高速（100~500 米/秒）的等离子焰射向物料，使物料得到快速的加热。

高频加热设备用于加热电介质，例如木材、塑料、纸板等。图 9-1-7 示电介质高频加热原理。物料置于极板之间，极板和高频电源连接，电源的频率视物料品种而定，例如干燥木材采取 0.3~0.75 兆赫，焊接硬聚氯乙烯塑料采取 50~75 兆赫。在高频电场作用下，非导体物料中的电荷进行交变的位移，它的频率和电源频率相同，电荷的位移产生热量，把物料加热。

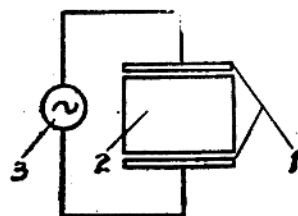


图 9-1-7 电介质高频加热原理

- 1—极板 2—物料 3—高频电源

二、电炉的应用

工业电炉主要用于冶金工业和机械工业，用途和所用的设备见表 9-1-1。

表 9-1-1

部门名称	用 途	所 用 设 备
冶 金 工 业	熔炼普通钢	炼钢电弧炉
	熔炼合金钢	炼钢电弧炉, 真空感应熔炼炉, 真空电弧炉, 电渣炉, 电子束炉, 等离子炉
	熔炼铜合金	感应熔炼炉
	熔炼铝合金	感应熔炼炉, 间接作用式电阻炉
	熔炼难熔金属, 活泼金属	真空电弧炉, 电子束炉, 等离子炉
	生产铁合金、镍、铜、锌、锡等	矿热炉
	生产石墨电极	直接作用(加热)式电阻炉
	粉末冶金, 制造硬质合金	电阻炉, 感应炉
	制造半导体材料	电阻炉, 感应炉, 电子束炉
机 械 工 业	钢铁材料, 有色金属材料, 玻璃等的加热和热处理	电阻炉, 感应加热设备
	铸钢的熔炼	炼钢电弧炉, 感应炉
	铸铁的熔炼	感应炉
	有色金属铸造的熔炼	感应炉, 电阻炉, 间接作用式电弧炉
	铝、镁等轻合金铸造的熔炼	感应炉、电阻炉
	金属材料锻造、冲压或挤压前的加热	感应透热炉, 直接作用和间接作用式电阻炉
	制造电熔刚玉和碳化硅	矿热炉, 直接作用式电阻炉
	干燥泥芯、模子和木材	介质加热设备, 电阻炉
	制造半导体器件	间接作用式电阻炉, 感应炉
	加热塑料和各种绝缘材料	介质加热设备

表 9-1-1 说明, 仅就冶金与机械工业而言, 电炉的应用非常广泛。这是因为与火焰炉比较, 电炉具有许多优点:

电炉可以在较短的时间内把物料加热到规定的温度, 甚至达到火焰炉所不能达到的高温。例如采用感应法加热钢材, 可以在几分钟甚至几秒钟内, 把工件加热到 1000°C 以上, 加热时间仅为火焰炉加热时间的若干分之一。钨的熔点 $3390 \pm 60^{\circ}\text{C}$, 只能用电炉熔炼。

电炉的温度比较易于进行准确的控制。例如: 某些铝合金材料或工件热处理用的空气循环炉, 其温度误差可准确地控制到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$; 某些新型材料及工件热处理用电阻炉, 甚至可以精确地控制到 $\pm 3^{\circ}\text{C}$; 料坯感应加热的温度差在 $\pm 0.5 \sim 1\%$ 范围内。

电炉炉内的气氛可以按需要人为地进行控制。例如: 硅钢带卷的连续退火炉, 在炉子的各个段可控制成各种不同的气氛; 某些钢铁工件的热处理炉, 可以向炉内通入氮气或渗碳剂, 进行工件渗氮或渗碳等; 电子束炉, 可以在炉内造成高度的真空, 以进行某

些难熔或活性金属的熔炼等。

电炉的电热效率高，可达 50~60%，甚至 80~90%。

电炉较易于实现生产过程的机械化和自动化，等等。

由于上述原因，电炉已成为冶金、机械、国防等工业部门，科学研究部门等，为提高产品的质量、获得新材料、研究新过程等方面极其重要设备，甚至是不可缺少的重要设备。

解放前，我国没有电炉制造业，电炉在工业上的应用也很少。现在，随着社会主义工业建设的日益发展，需用电炉的品种、规格也不断增加，在自力更生的基础上，我国不但有了几十个制造电炉的工厂，建立了电炉研究所，还培养了一支近万人的研究、制造电炉的专业队伍，为我国的社会主义建设事业做出了一定的贡献。

第二节 直接作用电阻炉

直接作用电阻炉工作原理见图 9-1-1。当然，条件一定时，可以由车间电网直接供电，不配置专用的变压器。这种炉子可用作加热炉，也可用作熔炼炉。

由于电极（或称导电夹头、导电触头）和物料间靠接触导电，这种电热法又称为接触加热。

接触加热有许多优点。因为在加热过程中，电流直接从被加热物料中通过，加热物料所需的热量产生于被加热物料本身，所以在其他条件相同的情况下，材料内部的温度差就很小，而加热速度很高，设备的生产能力高，电热效率一般较高。由于没有加热元件，加热温度不受限制。用于加热金属物料时，由于加热非常快，加热时间只有几十秒以至几秒钟，因此，热损失就显得很小，在很多情况下无须用炉衬就能有很高的热效率，即使不用保护气氛保护，金属的氧化及脱碳也很少。

但是事物总是一分为二的，接触加热也有其本身在应用上的局限性和需要解决的问题。主要是：

- 1) 因为加热过程中物料所产生的热量，取决于物料本身的电阻和通过物料的电，而被加热物料的电阻又往往很小，故接触加热通常在低压大电流下工作，必须采用巨大的降压变压器和短网，电路损失大，电效率不很高。

- 2) 为避免被加热物料的加热温度局部地偏高或偏低，在被加热的整个长度上，电阻必须均匀，故接触加热只适用于加热沿整个长度截面均匀的材料，如管材、棒材、板材或线材的加热或退火等；对于沿长度上截面变化的物料，必须用多接头供电的办法，在断面均匀的某一段上进行接触加热，或逐段加热。但这样的操作和设备都将复杂得多。

- 3) 由于接触加热必须向被加热物输送很大的电流，若接触不良，常常会引起很强烈的电弧，以致可能局部地烧坏物料和接触装置。因此，如何根据不同的情况设计出良好的接触装置，是一个十分重要的问题。

一、电热原理

在直接作用电阻炉的操作和设计工作中,电热量、集肤效应、加热时间、端电压、设备功率等是重要的理论问题。

(一) 电 热 量

物料加热所需的有用热量

$$Q_{\text{用}} = Gc_i(t_{\text{终}} - t_{\text{始}}) \text{ 千卡} \quad (9-2-1)$$

式中 G — 物料的重量, 公斤;

$t_{\text{始}}, t_{\text{终}}$ — 物料加热的开始和终了温度, $^{\circ}\text{C}$;

c_i — 物料在加热温度范围内约平均热容, 千卡/公斤 $\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

物料应产生的电热, 为加热物料所需的热和补偿热损失的热之和, 即

$$Q_{\text{料}} = Q_{\text{用}} + Q_{\text{失}} \text{ 千卡}$$

而

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_{\text{用}}}{Q_{\text{料}}}$$

称为炉子的热效率。所以应该由物料转变的电热量

$$Q_{\text{料}} = \frac{Q_{\text{用}}}{\eta_{\text{热}}} \text{ 千卡} \quad (9-2-2)$$

根据焦耳——楞茨定律确定为了产生物料电热量所要求的电参数, 即电流通过导体时所放出的热量

$$\begin{aligned} Q_{\text{料}} &= 860 P \tau \\ &= 860 UI \tau \times 10^{-3} \\ &= 860 \frac{U^2}{R_i} \tau \times 10^{-3} \\ &= 860 I^2 R_i \tau \times 10^{-3} \text{ 千卡} \end{aligned} \quad (9-2-3)$$

式中 P — 导体的电热功率, 千瓦;

τ — 通电时间, 时;

U — 供给导体的端电压, 伏;

I — 通过导体的电流, 安培;

R_i — 导体在工作温度下的电阻, 欧姆;

860 — 电的热功当量, 1 千瓦 $\cdot$ 时 = 860 千卡。

导体的电阻

$$R_i = \rho_i \frac{l}{A} \text{ 欧} \quad (9-2-4A)$$

$$\rho_i = \rho_0(1 + \alpha t) \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{米} \quad (9-2-4B)$$

式中 l — 导体导电长度, 米;

A — 导体导电截面, 毫米 2 ;

ρ_0 ——导体在常温下的比电阻，欧·毫米²/米；

α ——导体的电阻温度系数，℃⁻¹；

t ——导体的平均温度，℃。

式 9-2-3 是电炉的一个基本关系式，对于任何存在电流的导体都是适用的。它确定了电热与电热功率，导体的端电压、电流和电阻，以及供电时间的关系。

式 9-2-3 说明，在供电功率足够时，直接作用炉可以很快地把物料加热到规定的温度。在物料的电阻不大时，炉子的工作电流相当大，而端电压相当低。例如金属棒料的直接作用加热，物料两端的电压一般是 4~20 伏，而通过物料的电流达若干千安。该式也说明，馈电导线也发热，损耗电能，为使馈电损耗小，馈电导线的电阻只能是物料电阻的若干分之一。

(二) 穿透深度

导体通直流电时，电流沿导体截面分布是均匀的，即整个截面都导电。但是，导体通交流电时，导体截面不一定都能有效地导电，往往只有部分截面导电。

导体通交流电时，电流沿导体截面分布是不均匀的，表面电流密度最大，中心电流密度最小，这种现象称为交流电的“集肤效应”。其所以如此，是因为导体通交流电时，围绕导体产生交变的电磁场，导体切割该磁场的磁力线而产生自感电势，自感电势是反抗电流变化的，导体中心所链的磁力线最多，自感电势最大，所以电流密度最小；而表面所链的磁力线最少，自感电势最小，所以电流密度最大。在导体的直径足够大时，导体的中心部分甚至没有电流通过。电流密度相对值的变化关系如图 9-2-1 所示。图中 x 为某点至导体表面的距离， δ 为电流穿透深度， i_x 与 i 为 x 处和表面的电流密度。该图说明，电流密度按指数函数的关系向中心递减。

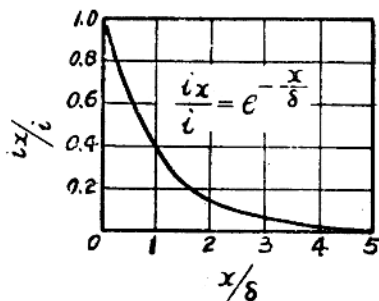


图 9-2-1 存在集肤效应时电流密度的变化

由于存在集肤效应，交流电在导体中流动时单位面积的有功功率也是表层大而中心小。电磁场理论证明，若导体的厚度或直径很大时，有功功率的 86.4% 集中在厚度为 δ 的表面层内。这个表面层厚度称为“穿透深度”，其数值由下式确定：

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{厘米} \quad (9-2-5)$$

式中 ρ ——导体的比电阻，欧·厘米，

μ ——导体的相对导磁率；

f ——供电频率，赫。

穿透深度是表达集肤效应的具体数值。实践上近似认为，穿透深度层所占有的截面

是有效的导通交流电的截面。若导体的厚度或直径小于穿透深度的两倍（即 2δ ），则其整个截面是导电的；否则，扣除穿透深度层所占的面积外，其余的截面实际上认为是不导电的。

工频电源对几种金属材料的穿透深度见表 9-2-1。金属材料的比电阻随温度升高而增大，所以高温下穿透深度较大。有色金属及其合金和不锈钢是非磁性材料，相对导磁率接近于 1。铁磁性材料的导磁率常温时与其成分及磁场强度有关，大约在 60~120 之间，730~760℃是磁性变态点（居礼点），在此以前导磁率没有明显变化。变态点时突然失去磁性，此后的导磁率也是接近于 1。所以铁磁性材料的穿透深度随温度变化很大。

几种金属材料在电流频率为 50 赫时的穿透深度 表 9-2-1

材 料	钢		铜		黄 铜		铝	
温 度 [℃]	20	1000	20	1000	20	850	20	600
比 电 阻 $\rho \times 10^6, [\text{欧} \cdot \text{厘米}]$	10	130	2	10	7	14.7	2.9	11.3
导 磁 率	60	1	1	1	1	1	1	1
穿 透 深 度 毫米	2.8	85.5	9.5	23.5	18.7	27.4	12	24

集肤效应对直接作用电阻炉的影响很大。可以认为，物料中电热转换实际上是在穿透深度层内完成的。应用 9-2-4 式时，物料的导电截面应采取穿透深度层所占有的面积。

铜在常温下输送工频电时穿透深度为 9.5 毫米，所以输送工频的大电流时，铜棒的直径或铜带的厚度不超过 20 毫米，这是设计短网电路时一个原则。

（三）加热过程与加热时间

图 9-2-2 表示了钢坯在接触加热过程中表面和中心温度的变化。由曲线可以看到，加热的开始阶段，中心的温度明显地低于表面的温度，但随着时间的延长，物料温度升高，表面散热损失增加，加热时间足够长以后，中心温度就等于表面温度（曲线的交叉点处），甚至超过表面温度，之后，随着时间的延长，两者的差值越大。由此可以理解，物料接触时，加热时间应当选择在曲线的交叉点上，或稍前一些允许的温差范围内，并据此来考虑物料的加热速度和时间。

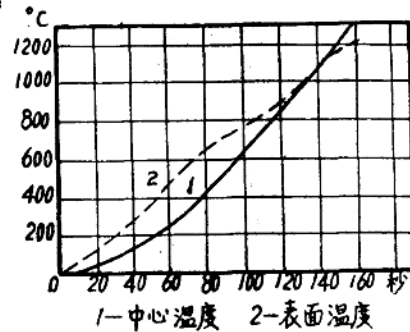


图 9-2-2 钢坯接触加热时表面和中心温度的变化

图 9-2-2 说明, 钢材在接触加热初期, 即在居礼点以下, 由于集肤效应, 电流密度不均匀, 被加热物料截面上的温度分布也是极其不均匀的, 表层温度高, 中心温度低, 中心部分的加热主要靠高温表层向中心的传导作用, 如图 9-2-3(a)。物料表层温度超过居礼点后, 穿透深度层的厚度逐渐增大, 所以物料中心部分的温度上升较快, 结果表层和中心的温差逐渐减小。并且由于物料辐射 (有时还有对流) 的热损失, 虽然物料表面的电流密度最大, 最高的温度却是在离表面一定距离的薄层上, 如图 9-2-3(b)。

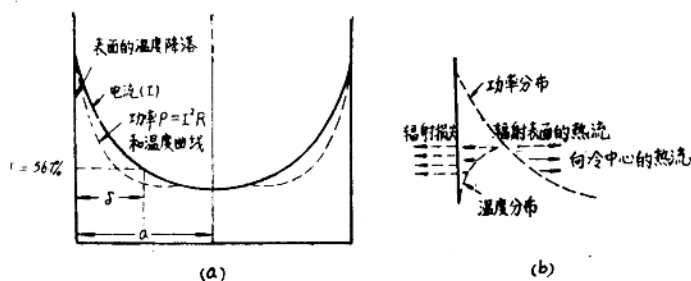


图 9-2-3 被加热物料截面上的温度分布

用接触加热法将物料加热至规定温度所需的时间, 主要决定于毛坯本身的放热速度。理论上这一速度是受限制的, 但实际上, 由于前述毛坯截面上温度分布的不均匀性和沿长度上的温度的不均匀性 (接触装置附近可能过热), 下一步热加工需要一定时间, 毛坯具有最理想的结晶组织需要有一定的相变时间等, 加热的速度还是受到限制的。一些资料认为, 在锻造⁽⁹⁾生产实践中证明, 以毛坯 100 毫米长度上的放热强度为 4~6 千卡/秒 (16.7~25.1 千瓦) 为宜, 其中大数值相应于直径较大的毛坯。根据这一数值即可决定毛坯加热至所需温度的时间

$$\tau = \frac{G_{100} c_p (t_2 - t_1)}{a} \text{ 秒} \quad (9-2-6A)$$

其中 G_{100} ——被加热毛坯 100 毫米长的重量, 公斤;

c_p ——毛坯由 t_1 加热至 t_2 的平均热容量, 千卡/公斤、℃;

t_1, t_2 ——毛坯加热的开始与终了温度, ℃;

a ——被加热毛坯每 100 毫米长度上的平均放热强度, 千卡/秒。

另一些资料认为⁽¹⁰⁾, 虽然关于接触加热的加热时间方面还没有足够可靠的研究结果作为依据, 但从中心部分的加热主要依靠高温表层的导热作用的观点看, 与感应加热的情况是类同的, 只是这里使用工业频率电流而已。因此, 可以和感应加热一样, 接触加热时, 毛坯截面上的温度差按不超过 100℃ 的情况来考虑加热速度。这时, 对于被加热毛坯的半径 (或厚度的一半) 小于或接近于电流穿透深度时, 或者对于较大直径 (或厚度) 的毛坯已加热至居里点 (760~780℃) 以上时, 加热时间可以由下式决定

$$\tau = d^2 \text{ 秒}$$

或

$$\tau = (2-3) d^2 \text{ 秒} \quad (9-2-6B)$$

其中 d ——毛坯的直径，厘米。

因为钢的毛坯（所有的结构钢和大多数的合金钢）在居里点以上时，电流穿透深度为 70~75 毫米，故在接触加热时，上述式 9-2-6B 对直径 10~125 毫米的所有毛坯均适用。

但式 9-2-6B 中， d^2 前的系数为 1 时的加热时间是最小的允许值。如果比较式 9-2-6A 和 9-2-6B 可以看到前者所得的 τ 值比后者大得多，即加热过程中，毛坯截面上的温度差小于 100℃，但设备的生产率较低。 d^2 前的系数越大（在 3 以下）两式所得结果越接近。

总结上述，可以认为 9-2-5A、9-2-6B 式均仅有参考的价值，更确切的计算方法尚待研究。

（四）工作电流和工作电压

如图 9-1-1，直接作用电阻炉是物料、接触器和短网导线三者组成的串联电路。

炉子的工作电流取决于加热物料至规定温度所需的电流。通常物料的电阻远远大于它的电感，由式 9-2-1、9-2-2、9-2-3 导出确定工作电流的关系式

$$I = \sqrt{\frac{Gc(t_{\text{终}} - t_{\text{始}}) \times 10^3}{860\eta_{\text{热}} R_{\text{料}} \tau}} \quad \text{安} \quad (9-2-7)$$

式中 G ——物料的重量，公斤；

$t_{\text{始}}、t_{\text{终}}$ ——物料加热开始和终了温度，℃；

c ——在加热温度范围内物料的平均热容，千卡/公斤·℃；

$\eta_{\text{热}}$ ——物料加热热效率；

$R_{\text{料}}$ ——物料在加热温度范围内的平均电阻，欧；

τ ——物料的加热时间，时。

为了以给定的速度对物料进行加热，并在加热终了时，物料截面上温差符合要求，供给物料的端电压必须一定，其大小与物料的几何尺寸和物理性质有关。

若加热过程中物料的集肤效应可以忽略，即电流穿透深度大于物料的半径，例如直径为 20 毫米的铜棒，可以认为是纯电阻的加热，则供给物料两端电压的平均值

$$U_{\text{料}} = IR_{\text{料}} = 1.08 \times 10^{-8} l \sqrt{\frac{\rho \gamma c (t_{\text{终}} - t_{\text{始}})}{\tau \eta_{\text{热}}}} \quad \text{伏} \quad (9-2-8)$$

式中 l ——物料加热段长度，米；

γ ——物料的重量，公斤/米³

ρ ——物料的比电阻，欧·毫米²/米；

c ——物料的平均热容，千卡/公斤·℃。

$t_{\text{始}}、t_{\text{终}}$ ——物料的开始和终了温度，℃；

τ ——物料的加热时间，时；

$\eta_{\text{热}}$ ——物料加热热效率。

式 9-2-8 说明，供给物料的端电压正比于它的长度，而和它的截面积无关。

对于直径小于 85 毫米加热温度超过居里点的钢材加热，可以应用式 9-2-8 计算物

料的端电压。

若加热过程中物料的集肤效应不可忽略，则物料的端电压

$$U_{\text{料}} = IZ_{\text{料}} = I\sqrt{R_{\text{料}}^2 + X_{\text{料}}^2} \quad \text{伏} \quad (9-2-9)$$

式中 $X_{\text{料}}$ 为物料的感抗，欧。

图 9-2-4 表示钢锭的电阻与感抗的变化情况。图中 R_0 为物料的直流电阻， r 和 δ 为物料的半径和穿透深度。在 $r/\delta \leq 1$ 时，即物料半径小于穿透深度时， $R_{\text{料}} \approx R_0$ ， $X_{\text{料}} \ll R_0$ ，故 $R_{\text{料}} \gg X_{\text{料}}$ ；随着 r/δ 的增加， $R_{\text{料}}/R_0$ 和 $X_{\text{料}}/R_0$ 的比值差不多是线性地增加；在 $r/\delta > 2$ 以后， $R_{\text{料}}$ 只是稍大于 $X_{\text{料}}$ 。

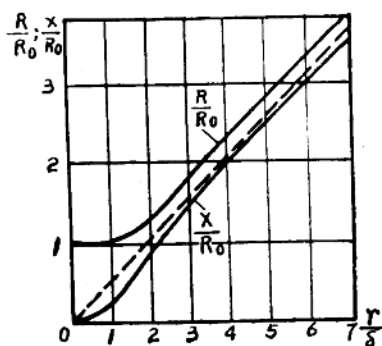


图 9-2-4 R/R_0 及 X/R_0 与 r/δ 的关系

工频加热时，钢材的穿透深度在常温下约为 3 毫米，在居礼点时失去磁性，穿透深度突变，增至 85 毫米左右。所以，直径小于 85 毫米钢坯的加热，若加热终

了温度显著超过居礼点，例如锻造前的加热，宜采用 9-2-8 式确定端电压；若加热终了温度接近居礼点，例如退火，宜采用式 9-2-9 确定端电压。

为了确定变压器的次级电压和电热效率，须预先确定实现规定的产量的炉子工作电压。直接作用电阻炉可视为物料、接触器和短网三者组成的串联电路，工作电压等于工作电流流过三者所产生的压降之和，即

$$U = U_{\text{料}} + U_{\text{触}} + U_{\text{网}} \quad \text{伏} \quad (9-2-10)$$

接触器可以认为是纯电阻元件，它和物料之间的电压降。

$$U_{\text{触}} = IR_{\text{触}} \quad \text{伏} \quad (9-2-11)$$

式中 I ——炉子的工作电流，参考式 8-2-7 安；

$R_{\text{触}}$ ——接触器和物料之间接触电阻，欧。

接触电阻受很多因素影响，尚无可靠的计算办法，设计时采取实验或经验数据。影响接触电阻的因素主要是物料和接触器的材质，接触方式和面积，接触压力，工作电流等，见表 9-2-2。表中所示的是工作电流为 1000 安条件下用工频电加热的实验数据，工作电流大于 1000 安时接触电阻略有减少；但是小于 1000 安时，随着电流减少接触电阻成倍地增大，如图 9-2-4。接触压力增大时，接触电阻减少，如图 9-2-5。接触面积增大则接触电阻减少，但是接触面积大于一定数值后接触电阻变化不大，如图 9-2-6。

根据上述图表介绍的数据，接触器应该用铜或铜合金制造。为了避免过热，防止氧化起皮，应该通水冷却接触器。

短网的电压降为

电流为 1000 安条件下的接触电阻

表 9-2-2

互相接触的材质	接 触 电 阻 $R_{\text{触}} \times 10^6$, 欧	接触面的直径 毫米	接 触 压 力 $p \times 10^{-4}$, 公斤/米 ²
紫铜—紫铜	0.25~12	15	5~70
紫铜—62黄铜	1.5	15	5~70
紫铜—青铜	2.5~10	15	5~70
紫铜—45°钢	2.5~25	15	5~70
45°钢—45°钢	5~12	15	5~70
紫铜—碳(石墨)	16	30	14
碳—碳(石墨)	20	50	14
钢—碳(石墨)	23	50	14
紫铜—硬铝	13~15	15	5~60
硬铝—硬铝	65~70	15	5~60
硬铝—钢	65~84	15	5~60

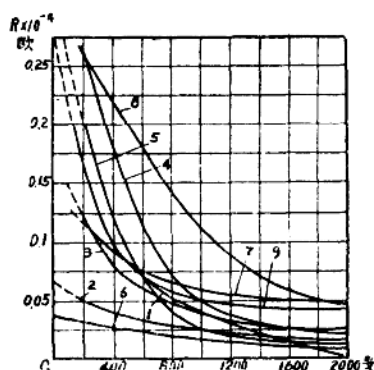


图 9-2-5 接触电阻和电流的关系 (直径15毫米, 压力 500 公斤)

1—铜—铜 2—铜—黄铜 3—铜—青铜 4—铜—铜
5—青铜—青铜 6—青铜—黄铜 7—青铜—铜
8—铜—黄铜 9—铜—铜

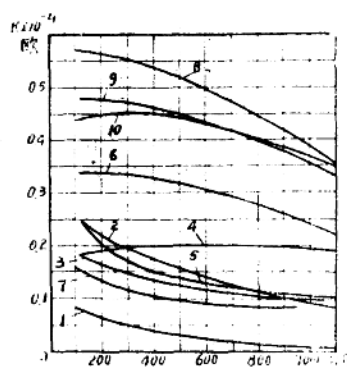


图 9-2-6 接触电阻和接触压力的关系 (直径15毫米, 电流 2000 安)

1—铜—铜 2—铜—黄铜 3—铜—青铜 4—铜—铜
5—青铜—青铜 6—黄铜—黄铜 7—青铜—黄铜
8—青铜—铜 9—黄铜—铜 10—铜—铜

$$U_{\text{网}} = I Z_{\text{网}} \text{ 伏} \quad (9-2-12)$$

式中 $Z_{\text{网}}$ 为短网的阻抗, 等于网路的电阻与感抗的综合, 即

$$Z_{\text{网}} = \sqrt{R_{\text{网}}^2 + X_{\text{网}}^2} \text{ 欧}$$

式中 $R_{\text{网}}$ —考虑了集肤效应的有效电阻, 欧;

$X_{\text{网}}$ —短网的感抗, 欧。

应该尽量减少短网的阻抗, 阻抗大不仅降低加热的电效率, 而且降低功率因数。有

关短网计算，参考电弧炉的短网计算。设计正确的短网， $X_{网}$ 比 $R_{网}$ 小很多。

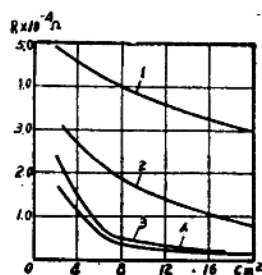


图 9-2-7 接触电阻和接触面积的关系
(压力 50~60 公斤/厘米²)

1—钢-钢 2—铜-钢
3—铜-青钢 4—铜-铜

简介短网设计的重要原则。为使短网的阻抗小，通常采用铜排送电。为使导体的有效电阻小和材料用量小，应考虑集肤效应和临近效应的影响，保证导体的整个截面都能有效地导电。例如孤立的铜带，即与其他导体距离相当远的铜带，其厚度不应超过穿透深度的 4 倍；而两邻近的铜带，厚度不超过穿透深度的 2 倍。

采用铜排送电时，为了减少短网的电感，尽可能使进线和出线交错排列。如果条件不允许交错排，进线的一组铜排和出线的一组铜排之间距离尽可能缩短；而每一组铜排的诸导体之间却需要保持相当的距离。

应该注意，短网的电流很大，导体之间的电磁力必须考虑。电流方向相同的诸导体之间彼此作用的是排斥力，而电流方向相反的诸导体之间彼此作用的是吸引力。所以应该把导体固定，防止产生机械震动。

(五) 电热效率和功率因数

直接作用电阻炉的电热效率

$$\eta = \eta_{电} \eta_{热}$$

式中 $\eta_{电}$ 为电效率， $\eta_{热}$ 为热效率。电热效率一般是 0.7~0.85，在各类型电炉中是比较高的。

直接作用电阻炉的电效率，等于加热物料的有效功率与炉子的有功功率之比。由于炉子是串联电路，故它的电效率

$$\eta_{电} = \frac{P_{料}}{P_{总}} = \frac{R_{料}}{R_{料} + R_{网} + R_{触} + R_{变压器}} \quad (9-2-13)$$

也就是说，炉子的电效率取决于物料的电阻与炉子电路诸电阻之和之比。电阻大的物料容易获得较高的电效率。所以这种加热法特别适于加热比电阻大而又细长的物料，例如钢棒。当然，为获得高的电效率，在物料的电阻一定时，应该尽量减少短网电阻和接触器与物料之间的接触电阻。

按式 9-2-2，直接作用炉的热效率为

$$\eta_{热} = \frac{Q_{用}}{Q_{料}} = \frac{Q_{用}}{Q_{用} + Q_{失}} = \frac{1}{1 + (Q_{失}/Q_{用})} \quad (a)$$

按式 9-2-1，加热物料的有效热量

$$Q_{用} = Gc_p(t_{终} - t_{始}) = Al\gamma c_p(t_{终} - t_{始}) \text{ 千卡} \quad (b)$$

而散热损失的热量

$$Q_{失} = \alpha(t_{料} - t_{空})sl\tau \text{ 千卡} \quad (c)$$

把式(b)、(c)代入(a)，整理后得到

$$\eta_{\text{热}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \tau}{\gamma c_i} \cdot \frac{s}{A} \cdot \frac{t_{\text{料}} - t_{\text{空}}}{t_{\text{终}} - t_{\text{始}}}} \quad (9-2-14)$$

式中 α —物料对周围空气的传热系数, 千卡/米²·时·℃;

τ —物料加热时间, 时;

γ —物料的重度, 公斤/米³;

c_i —物料的平均热容, 千卡/公斤·℃;

s —物料散热表面的周长, 米;

A —物料的截面积, 米²;

$t_{\text{终}}$ —物料加热终了温度, ℃;

$t_{\text{始}}$ —物料加热开始温度, ℃;

$t_{\text{料}}$ —物料在加热时间内的平均散热温度, ℃;

$t_{\text{空}}$ —炉子周围空气的温度, ℃。

上式说明, 加热温度高而加热时间长, 则热效率低, 热效率和物料长度无关, 而是取决于物料周长与其截面之比。所以加热管棒时易于获得高的热效率, 往往可以直接暴露在大气中加热。对于加热温度高而加热时间长的直接作用电阻炉, 例如碳质电极石墨化电炉, 为了保证必要的热效率, 必须采用炉衬绝热。

钢坯直接暴露在空气中加热时, 可以认为钢坯基本上以辐射传热的方式散热, 若取平均散热温度为 1000℃, 物料由常温加热到 1200℃, 则上式可以简化为

$$\eta_{\text{热}} = \frac{1}{1 + 0.08 \frac{\tau}{d}} \quad (9-2-15)$$

式中 τ —加热时间, 秒;

d —钢坯的直径, 毫米。

直接作用电阻炉的功率因数定义为

$$\cos \varphi = \frac{\text{炉子系统的电阻 } R}{\text{炉子系统的阻抗 } Z}$$

它也是一个重要的技术指标。这种炉子是以电阻为主的炉子, 功率因数通常在 0.7 以上, 一般不附加补偿电容。但是, 为提高变压器的利用率, 节约短网导体材料消耗, 以及提高电效率, 要求功率因数愈高愈好。

炉子的功率因数不仅与物料和短网有关, 而且还取决于变压器的结构形式、初次两级的匝比、铁芯的结构形式和硅钢的质量等。功率因数难以计算精确, 设计时宜采取实验或经验数据。

炉子的功率因数并非常数。在加热过程中, 材料的电阻因温度升高而变化, 因而功率因数也是变化的。图 9-2-7 表示锻造生产中某炉变压器初级侧的功率因数变化情况。该图说明, 钢坯加热过程中功率因数逐渐增大, 坯径小则变化大。

图 9-2-8 表示钢坯的长度与截面之比对功率因数的影响。它说明坯的长度与截面之比不宜小于 1.0, 否则功率因数显著降低。这是因为对于直径小的坯, 它的阻抗中电阻

成份大。

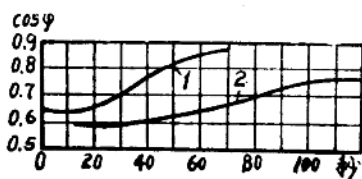


图 9-2-8 钢坯加热过程中功率因数的变化
(坯长 48 毫米)
1—坯径 48 毫米 2—坯径 60 毫米

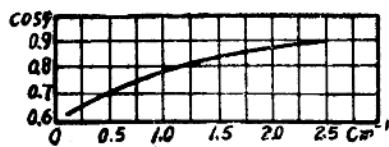


图 9-2-9 钢坯长度与截面比值对
功率因数的影响 (坯长
400 毫米)

(六) 钢坯加热的经验计算

精确计算钢坯的电阻和感抗是很困难的，因此往往根据经验数据作设计计算。某厂用接触法电加热直径 20~60 毫米的钢坯，加热了温度 1100~1200℃，根据生产实践，归纳了下述经验关系。

合理的放热强度是每 100 毫米长钢坯 4~6 千卡/秒，相当于 16.7~25.1 千瓦，直径大的坯取大值。可按此计算加热时间，如式 9-2-6A。于是加热坯的有功功率为

$$P_{\text{料}} = 4.18 \frac{l}{100} a \text{ 千瓦} \quad (9-2-16)$$

式中 l —坯的长度，毫米；

a —放热强度，每 100 毫米坯长 4~6 千卡/秒。

电源变压器的有功功率和视在功率，

$$P_{0..} = \frac{P_{\text{料}}}{\eta} \text{ 千瓦} \quad P_0 = \frac{P_{0..}}{\cos \varphi} \text{ 千伏安}$$

式中 η 为设备的电热效率， $\cos \varphi$ 为设备的功率因数，它们正比于物料的加热长度，反比于坯径的平方，见表 9-2-3。

钢坯直接电热的电热效率和功率因数

表 9-2-3

l/d^2 (cm/cm^2)	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	10及10以上 的数值
η	—	0.47	0.63	0.70	0.73	0.76	0.78	0.80	0.82	0.85~ 0.90
$\cos \varphi$	0.51	0.61	0.70	0.73	0.76	0.80	0.81	0.82	0.83	0.85~ 0.90

供给物料的端电压的平均值

$$U_{\text{料}} = 7.07 \times 10^{-2} \frac{l}{\eta \sqrt{\tau}} \text{ 伏} \quad (9-2-17)$$

式中 l —坯的加热长度，毫米；

τ —坯的加热时间，秒。