感应电热设备的设计(12)

汤景明　　机械部西安电炉研究所　　(西安　710061)

Design of Induction Heating Equipment(12)

Tang Jingming

4　实心圆柱形炉料感应透热炉的设计计算

感应透热炉或称感应加热炉,由于工艺要求的不同有多种多样的形式,且多是非标产品。但是,实心圆柱形炉料的加热所占的比重最大,所以我们给以重点研讨。

此种透热炉可分为卧式和立式两大类。立式炉应用较少,主要用于炉料重而大,频率偏低,温度又高,炉衬不易解决的场合。有时也用于扁块料的顺序式加热。常见的透热炉多为卧式结构。

从加热方式上可分为周期式、顺序式和连续式三大类。所谓周期式是指线圈内只有一块炉料,从初温加热至终温出炉后再进入第二块初温炉料。上述用于重而大炉料的立式炉就是周期式炉。顺序式炉是应用最广泛的炉型,多为卧式,一般在线圈内有三个以上的多个炉料,在进口端进入一根新料,则出口端推出一根已达终温的热料,炉料在线圈中顺序渐进,温度也逐步上升。上述的立式扁块料加热炉也是顺序式的,此种炉料如采用卧式,则应抬高出料端与水平面成一个不大的角度,以便推料前进时料块不至倒下。连续式炉是指炉料匀速前进的炉子,多用于长料的加热。炉料传动机构可以是气动、液动或电机传动等。

炉料材质有磁性和非磁性两大类,以磁性材料加热居多,非磁性材料加热又与磁性材料高温状态(居里点以上)相似,故我们的研讨以铁磁材料为主。

4.1　透热炉的方案设计

一台好的加热炉,应满足以下条件:

①满足用户的生产要求,首先是满足生产率,同时要得到工艺要求的温度和温度均匀度;

②技术经济指标先进,如能耗低,材料省,操作费用少,劳动环境好等;

③产品质量好;

④使用维护方便,操作安全可靠。

我们的方案设计,应结合用户要求,尽量达到以上各点。但是,目前国内订货,专用设备较少,多为一台设备用于多种规格的炉料。这时就应选出一种产量最大的炉料作为代表品种,并以此进行最佳设计,兼顾其他规格炉料的加热,对多种炉料都是最佳状态的设计是不存在的。

(1) 确定设备功率

从满足生产率要求出发,可求出感应器的平均功率为:

$$P_g = \frac{c\Delta TM}{t\eta} \quad 或 \quad P_g = \frac{c\Delta TN}{\eta} \quad (192)$$

式中:c 为炉料比热容的积分平均值,kJ/(kg·℃);ΔT 为炉料的温升,℃;m 为炉料的质量,kg;t 为加热时间,s;$N = m/t$ 为生产率,kg/s;$\eta = \eta_d \cdot \eta_t$ 为感应器的效率,其电效率 η_d 和热效率 η_t 之积,参见表 4。

电源功率 P_y 的选取,应本照 $P_y \geq P_g$ 的原则,按电源容量的标准系列选用,如变压器容量和中高频电源的功率等。对非磁性炉料和连续式加热的磁性炉料,由于其在加热过程中负载参数变化不大,电源容量按感应器平均功率选取即可。对磁性炉料周期式加热,在电压恒定的情况下,其冷、热态时的功率相差 1.4 ～ 2.0 倍,冷态功率大大超过平均功率,该时就需要选用较大容量的电源。对炉内炉料数量较少的顺序式加热,电源也应留有适当的安全系数。

(2) 合理地选择设备的频率

电源频率选用的合适与否关系到炉子的两

汤景明:男,1936 年生,研究员级高级工程师。

(收稿:1998-08-20)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

个主要性能:电效率和径向温差。下面分别进行讨论。

①电效率与频率的关系

电效率的公式通常为:

$$\eta_d = \frac{r_2'}{r_1 + r_2'} = \frac{1}{1 + \frac{r_1}{r_2'}} \qquad (193)$$

式中:$r_1 = W^2 \frac{\pi D_1}{a_1} \frac{\rho_1}{\Delta_1}$ 为线圈电阻;$r_2' = W^2 \frac{\pi D_2}{a_2} \frac{\rho_2}{\Delta_2} \frac{Z_2 A}{\sqrt{2}}$ 为炉料换算电阻。

如果感应器有足够长度,可取 $a_1 \approx a_2$,将上述各参数代入公式(193)则有:

$$\eta_d = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \frac{\rho_1 \Delta_2}{\rho_2 \Delta_1} \frac{\sqrt{2}}{Z_2 A}}$$

则 Δ_1 和 Δ_2 公式展开代入并化简得出:

$$\eta_d = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}} \frac{\sqrt{2}}{Z_2 A}} \qquad (194)$$

式中:$Z_2 = \frac{\sqrt{2} R_2}{\Delta_2}$ 为相对频率,对感应加热系统,频率绝对值的高低尚不能反映加热性能的实质,而炉料大小与加热层深浅的比值才反映加热性能的本质。

当 $Z_2 \geq 6$ 时,$\frac{\sqrt{2}}{Z_2 A} \approx 1$,电效率趋于极限值:

$$\eta_{dj} = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu}}} \qquad (195)$$

图 48 给出了加热钢质圆柱形炉料时在不同的直径比 D_1/D_2 条件下电效率 η_d 和相对频率 Z_2 的关系曲线。计算时,采用 $T = 800\ ℃, \rho_2 = 10^{-6}\ \Omega \cdot m, \mu = 1$。线圈的电阻率 $\rho_1 = 2 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$。

通常情况下,在合理的 D_1/D_2 时,$Z_2 \geq 2.5$,其电效率已可达极限值的 90 % 以上,即 $\eta_d \approx 0.9 \eta_{dj}$。我们以此条件来确定合理频率的下限。

$$Z_2 \geq 2.5$$

$$\frac{\sqrt{2} R_2}{\Delta_2} \geq 2.5$$

将 $\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu f}}$ 代入上式,整理后得出:

$$f \geq \frac{3 \times 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}\ \text{Hz} \qquad (196)$$

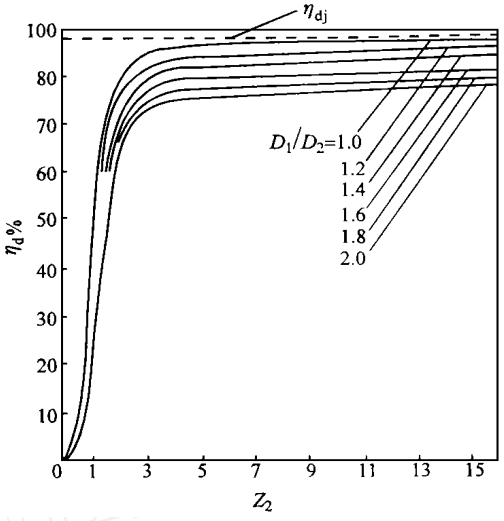


图 48 不同 D_1/D_2 时 η_d 对 Z_2 的关系曲线

②径向温差与频率的关系

透热炉一个很重要的技术指标是希望沿截面温度分布均匀,即在尽可能短的时间内达到工艺允许的径向温差。为此,我们希望有较深的有效加热层 ξ。在 3.1 中已阐述过,$\xi \leq \Delta_2$,而 $\Delta_2 = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu f}}$,即有效加热层与频率的平方根成反比。从图 22 上曲线可看出,有效加热层的极限值为 $\xi_j \approx 0.4 R_2$,即 $\frac{\Delta_2}{R_2} \approx 0.4$。频率再降低,从计算中可得出更大的 Δ_2 值,但 ξ_j 已不再加深。所以,频率范围的上限即由此确定。

$$\frac{R_2}{\Delta_2} \leq 2.5$$

代入 Δ_2 的公式后整理得出:

$$f \leq \frac{6 \times 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2}\ \text{Hz} \qquad (197)$$

由公式(196)和(197)可得出:

$$\frac{3 \times 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2} \leq f \leq \frac{6 \times 10^6 \rho_2}{\mu D_2^2} \qquad (198)$$

不等式(198)就确定了圆柱形炉料透热的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

最佳频带。

但是,由于我们讨论 η_{dz} 时是把阻抗换算系数 C 作为 $C = 1$ 考虑的,这对长线圈是适用的(如 $D/a < 0.1$)。实际上多数情况下 $C < 1$,因此频率的下限值就显得偏低了,即电效率要低于极限值的 90 %。为此,应在频带范围内,根据电源的频率系列尽可能向偏离方向选频。

(3) 感应线圈外形尺寸的确定

感应线圈的主要尺寸是其内径 D_1 和长度 a_1。

①线圈内径 D_1 的确定

由图 48 曲线看出,线圈的电效率随 D_1/D_2 值的增大而下降。众所周知,D_1 和 D_2 之间主要是炉衬,而炉衬越厚,炉子的热损越少,也就是说,D_1/D_2 越大,热效率越高。对钢质炉料加热锻造温度时,多采用耐火材料的炉衬(如耐火粘土质材料或耐火混凝土等)。我们可做出 $\eta = \eta_d \cdot \eta_t$ 与 D_1/D_2 的关系曲线于图 49。从图上看出,炉子的总效率有一个峰值(最佳值)。当 $D_1/D_2 \approx 1.4 \sim 1.8$ 时,总效率最大。但是,当 $D_1/D_2 = 1.25 \sim 2.0$ 时,总效率变化也不十分显著,所以也可作为合理的选用范围。

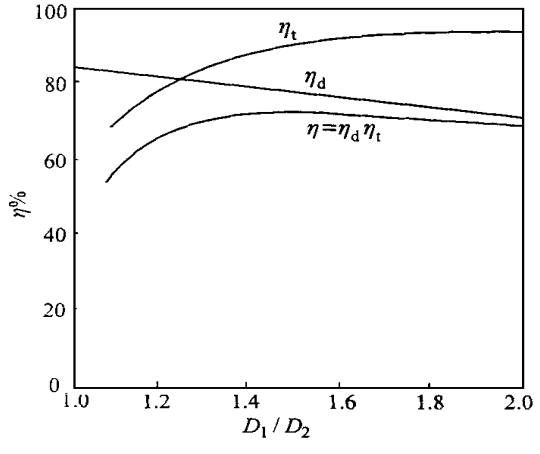


图 49 感应线圈与毛坯直径比与效率的关系曲线

对于温度较低的加热,多采用不锈钢筒或耐热钢筒外包保温棉作炉衬。这时 D_1 的考虑主要是从具体结构出发,要照顾到以下因素来确定 D_1 值。首先要保证炉料畅通的间隙,其次应考虑炉料尺寸公差和热膨胀、导轨高度、炉筒厚度、保温层厚度、线圈和炉衬的制造公差和装配公差等。即使是耐火材料炉衬,按上述范围初选 D_1 尺寸后也应做上述各种因素的检查,必须满足方可,否则宁可超出规定的合理范围,以保证炉子的正常运行。

②线圈的长度 a_1

a. 周期式加热炉 周期式炉一般炉内只有一根料。设炉料尺寸为 $D_2 \times l_2$,则此时 $a_2 = l_2$。经验证明,为保证沿轴向的均匀加热,应按下式确定线圈长度 a_1。

$$a_1 = a_2 + (1.0 \sim 1.5) D_1 \quad \text{m} \qquad (199)$$

这是因为有限长度的线圈均有端头效应,即在线圈端部磁场发生散射,强度减弱。如果取线圈长度合理地大于料长,使炉料处于线圈中磁场的均匀部分,则避免了炉料端部温度偏低的现象。这种端头长度之差称为感应器的"缩头"。

根据任务要求的工作节拍或生产率,可以定出生产每根炉料所需的时间 t(s)。在 3.2 ② 中,我们讨论了炉料温度均匀性的计算,给出了保证径向温差 ΔT 时最短加热时间 t_k(s) 的各种求法。如果 $t_k < t$,则用一只感应器即可;如果 $t_k > t$,则应用几只或感应器交替工作,以延长炉料受热(或均温)时间。感应器数 $n = t_k/t$。

b. 顺序式加热炉 顺序式加热炉的进口端,由于炉料衔接的连续性,不存在缩头,只需在出口端保证缩头。所以线圈的长度应为:

$$a_1 = a_2 + (0.5 \sim 0.75) D_1 \quad \text{m} \qquad (200)$$

式中:$a_2 = nl_2$,n 为线圈内的炉料数量,且 $n \geq t_k/t$。

如果炉料长度 l_2 值比较大,n 值也大的话,求出的 a_1 值太长,会给制造和使用带来困难和不便。该时则可将线圈作成两个或数个,即制成双膛(多膛)炉或几个炉子。

c. 连续式加热炉 此种炉型,由于进出料均保持连续不断,一般不存在缩头问题,故取 $a_1 = a_2 = a$,且按下式确定其值:

$$a = vt_k \quad \text{m} \qquad (201)$$

式中:v 为炉料运动速度,m/s。(下转第 46 页)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高频设备的节能改造措施

高频节能是当前热处理行业追求的目标,高频感应加热与其它加热手段相比,能耗大、利用率低(约 20 %～40 %),因此对旧高频设备进行节能改造已是势在必行。这不仅可以节省大量资金,而且还可避免更新换代中由于老设备报废而造成的浪费,故做好这项工作也是当前企业增收节支的一个重要组成部分。

老设备的特点

(1) 阳极供电采用晶闸管整流调压供电。

(2) 所有电子管属广播发射管,如 FU-89S(10 kW 机)、FU-431S(30～60 kW 机)、FU-433S、23S(100、200 kW 机)等。

(3) 槽路和隔直电容器为罐式电容器。

节能改造措施

(1) 阳极供电系统的改造　其要点一是以适应性强、工作可靠的高压硅整流桥(硅堆)或微机控制高频设备交流调压电源替代故障率高、寿命短、又不容易维修的汞弧闸流管。选型时应注意负载下,一旦出现过载或短路时整流器件的安全性,如 30 kW 高频设备可选额定直流输出电流 10 A,对 60、100、200 kW 者可依次选 15、20、50 A。二是选用单片微机控制交流调压电源替代笨重的感应调压器。某公司生产的这种数字式电源属第 3 代产品,比模拟控制的第 1、2 代产品优越许多,具有调速快、功耗少、尺寸小、重量轻、价格低、抗干扰能力强等特点。

(2) 高效节能型电子管的应用　老设备中广播发射管的共同弱点是耗能大、效率低、不耐冲击、寿命短,不能适应工业高频加热的工作要求。面对我国当前能源十分紧张的情况,应用高效节能的新型电子管是高频设备节能改造的一个重要课题。如涂钍阴极高效工业加热电子管,比老型号纯钨丝阴极与广播通用的电子管效率高 10 %以上,灯丝耗能降低 50 %以上。

近年来,锦州 777 厂等单位已能生产新型电子管系列产品,其性能质量可与国外同类产品相媲美。如阳极输出功率 88 kW 时,日本管 9T71 和国产管 FD-911S 的阴极损耗与灯丝加热功率之和同为 35 kW,可供用户按自身设备的功率档次选用,如 30～60 kW 机由 FU-307S 工业加热电子管替代 FU-431 管,100～200 kW 机用 FD-911S、FD-934S、FD-914S 管替代 FU-433S、FU-23S 管。需要指出的是,FD-911S 管用作 100 kW 的振荡管,功率裕量较大(可达 130 kW 以上),整机效率高,适于重载下连续工作。

(3) 更换新型电容器　老设备中罐式电容器耐压低、无功容量小、装夹不便、故障率高(击穿、放电、电晕等)、设备利用率低,故改造时应更换成耐压高、无功容量大、损耗小的新型高功率瓷介电容器。如 CCG81 板形电容器是槽路改造的较理想产品,替代 CCYP-2 罐形电容,无功功率可从 900 kVA 提高到 3 600 kVA(100 kW 机),对提高整机质量起了重要作用。CCG5-6 和 CCG5-7 可以作为阳极隔直和高压旁路电容使用。目前超音频设备的槽路电容器也多选用 CCG5-7 型电容器。

此外,在整个老设备改造中还应对一些小的部位做必要的检查、调整。如因放电烧过的线圈支撑绝缘板以及各种线圈、汇流条、电子管水套、铜质器件和老化的阻容器件等。

实践证明,高频设备在使用过程中,正确调谐是一个十分重要的操作环节。要求阳、栅极电流比应尽可能接近 6,以使电子管振荡器处于最佳临界工作状态。这样,阳极损耗最低,输出功率最大,有利于节能,提高生产率,运行也安全。

北京市丰台区花乡育芳园 27 栋 8# 　张仁良　供稿

(上接第 41 页)　除以上分析和计算外,如果选定了工频电源,则还应按概论中公式(7)、(8)和表 5 等有关资料求出补偿电容和平衡装置。根据线圈尺寸确定炉体的尺寸,根据炉子的机械化、自动化要求选配有关的辅助装置,根据要求确定设备成套范围和炉子与相关设备的衔接关系,以及根据现场情况考虑设备的总体布置等,完成设备的方案设计。　—待续—

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net