

# 感应电热设备的设计 (10)

汤景明 机械部西安电炉研究所 (西安 710061)

Design of Induction Heating Equipment(10)

Tang Jingming

## 辐射传热损耗

辐射能的载体是电磁波,加热物体表面热能发射的电磁波波长一般是  $0.4 \sim 40 \mu\text{m}$  之间,其中  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$  为可见光, $0.8 \sim 40 \mu\text{m}$  是红外线。所以,热能的辐射传递以红外线为主,并有部分可见光波。

任何物体都在不停地放射能量,而被加热的物体则更为显著。放出的能量落在其他物体上时,一部分被吸收,一部分被反射,还有一部分透过该物体。被吸收的辐射能在物体中又会转化为热能。设落在物体上的总能量为  $Q$ ,  $Q_1$  被吸收,  $Q_2$  被反射,  $Q_3$  穿透物体,则有:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

两边除以  $Q$  得出:

$$\frac{Q_1}{Q} + \frac{Q_2}{Q} + \frac{Q_3}{Q} = 1 \quad (146)$$

公式(146)可写成:

$$A + R + D = 1$$

其中,  $A = \frac{Q_1}{Q}$  为物体的吸收率;  $R = \frac{Q_2}{Q}$  为物体的反射率;  $D = \frac{Q_3}{Q}$  为物体的穿透率。

根据上面三个比值的极限情况,可以把物质区分为三类:如  $A = 1, R = D = 0$ ,这一类物体叫作绝对黑体,即所有落在物体上的辐射能全部被吸收;如  $R = 1, A = D = 0$ ,这一类物体叫作镜体,即全部辐射能被反射出去;若  $D = 1, A = R = 0$ ,这一类物体叫作绝对透明(热)体,即所有的辐射能全部穿透物体。

在自然界中不存在绝对的黑体,绝对的镜体和绝对的透明体,以上概念只是理论上的假定。

### (a) 几个有关的热辐射定律

蒲郎克定律确定了物体辐射强度  $q$  与温度和波长的关系如下:

$$q = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{T_k}} - 1} \quad (147)$$

式中:  $\lambda$  为波长,  $\mu\text{m}$ ;  $T_k$  为物体的绝对温度, K;  $C_1$  和  $C_2$  为蒲郎克常数。

斯蒂芬 - 波尔兹曼定律给出了绝对黑体的辐射能量与物体温度的定量关系:

$$q_0 = C_0 \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (148)$$

式中:  $C_0 = 20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$  为绝对黑体的辐射系数。

所有其它物体的辐射强度都比绝对黑体要小,称为灰体。其辐射强度公式为:

$$q = C \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (149)$$

式中:  $C = C_0$  为物体的辐射系数。

由此引出了物体黑度的概念,即:

$$= \frac{C}{C_0} \text{ —— 物体黑度或相对辐射系数。}$$

常见物体的黑度给予表 9。

不但不同物体的辐射系数不同,同样材质的物体,由于表面状态、温度等的差异也不相同。如光滑表面比粗糙表面时的  $C$  值要小。感应炉常用的材料  $C$  值如下:

材料	$C/\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})^{-1}$
抛光的金属表面	0.8 ~ 2.1
光洁的金属表面	2.1 ~ 8.3
氧化的金属表面	12.5 ~ 18.8
耐火材料	14.6 ~ 18.8
带融熔表层的粘土盖	15
有氧化层的钢	16

为了近似地计算炉子的热损,对耐火材料和表面氧化的金属可取  $C = 17 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ 。

### (b) 固态物体的互相辐射

温度不同的两个物体之间都存在热交换,

表 9 物体的黑度

材料名称	T/	材料名称	T/
绝对黑体	1.0	平整的玻璃	22 0.937
石墨粉	0.95	上釉的瓷器	22 0.924
石棉纸板	24 0.96	熔附铁上的珐琅	19 0.897
石棉纸	40 ~ 370 0.93 ~ 0.945	表面磨光的铝	225 ~ 575 0.039 ~ 0.057
熔化后表面粗糙的石英	20 0.932	表面不光滑的铝	26 0.055
表面粗糙的红砖	20 0.93	在 600 下氧化后的铝	200 ~ 600 0.11 ~ 0.190
表面粗糙没上釉的硅砖	100 0.83	表面磨光的铁	425 ~ 1 020 0.144 ~ 0.377
表面粗糙上釉的硅砖	1 100 0.85	氧化后的铁	100 0.736
上釉的耐火粘土砖	1 100 0.75	未经加工的铸铁	925 ~ 1 115 0.87 ~ 0.95
耐火砖(新)	1 100 0.83 ~ 0.87	表面磨光的钢铸件	770 ~ 1 040 0.52 ~ 0.56
耐火砖(旧)	1 100 0.72 ~ 0.76	研磨后的钢板	940 ~ 1 100 0.55 ~ 0.61
涂在不光滑钢板上的白瓷漆	23 0.906	在 600 时氧化的钢	200 ~ 600 0.80
涂在钢板上有光泽的黑漆	25 0.875	轧制后未加工黄铜板	22 0.06
无光泽的黑漆	40 ~ 95 0.96 ~ 0.98	600 氧化后黄铜板	200 ~ 600 0.59 ~ 0.61
白漆	40 ~ 95 0.80 ~ 0.95	600 氧化后的紫铜	200 ~ 600 0.57 ~ 0.87
各种不同颜色的油质涂料	100 0.92 ~ 0.96	氧化铁	500 ~ 1 200 0.85 ~ 0.95
加热的铝质涂料	150 ~ 315 0.35	氧化铜	800 ~ 1 100 0.54 ~ 0.66
磨光的硬橡皮板	23 0.945	熔解的铜	1 075 ~ 1 275 0.16 ~ 0.13
灰色不光滑的软橡皮板	24 0.859	磨光的镍	225 ~ 375 0.07 ~ 0.087
(精制过)		镀锡铁皮	25 0.043 ~ 0.064
镀锌铁皮	28 0.228	纯银	225 ~ 625 0.019 8 ~ 0.032 4
铬	100 ~ 1 000 0.08 ~ 0.26		

即高温物体向低温物体传递热能。传递热能的大小取决于物体的温度、形状、尺寸、黑度和空间位置等。

两个平行平面间的热辐射(图 43a)

$$q_{1-2} = n C_0 \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (150)$$

式中:  $q_{1-2}$  为高温物体传给低温物体的热量,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $T_{k1}$  和  $T_{k2}$  分别为高、低温物体的温度,  $\text{K}$ ;  $n$  为系统的折合黑度。

$$n = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (151)$$

其中,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别为两个物体的表面黑度。

同心圆柱间的传热(图 43b)

此种情况下,辐射传热的计算公式为:

$$Q_{1-2} = n C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/\text{h} \quad (152)$$

式中: 
$$n = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (153)$$
  
 $T_{k1} > T_{k2}$

其中,  $F_1$  为内圆柱体的表面积,温度为  $T_{k1}$ ,黑度系数为  $\epsilon_1$ ;  $F_2$  为外圆柱体的内表面积,温度为  $T_{k2}$ ,黑度系数为  $\epsilon_2$ 。

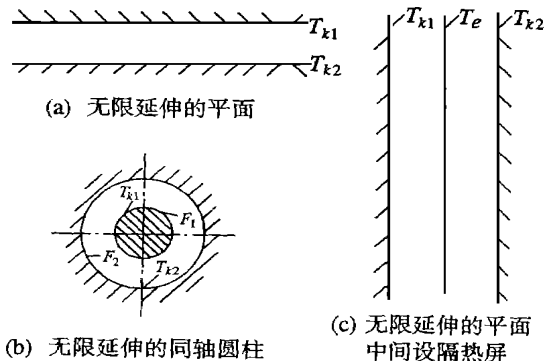


图 43 两物体间的辐射传热

有遮热屏的平面热交换

将用薄板制成的遮热屏置于两个平行平面之间(图 43c)。假设遮热屏和两平面的黑度相同,则有:

无遮热屏时按公式(150) 传热,即

$$q_{1-2} = nC_0 \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

当有遮热屏时,从第一平面到遮热屏的传热量为:

$$q_{1\text{表面}} = nC_0 \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ke}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (154)$$

从遮热屏到第二平面的传热量为:

$$q_{e-2} = nC_0 \left[ \left( \frac{T_{ke}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (155)$$

当整个传热系统达热稳态时,  $q_{1-e} = q_{e-2}$ ,

公式(154) 与(155) 相等,可写出:

$$\left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ke}}{100} \right)^4 = \left( \frac{T_{ke}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4$$

整理得出:

$$\left( \frac{T_{ke}}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 + \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \quad (156)$$

将公式(156)代入公式(154)和(155)则有:

$$q_{1-e} = q_{e-2} = \frac{1}{2} nC_0 \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \quad (157)$$

比较公式(157)和(150)可以看出:

$$q_{1-e} = q_{e-2} = \frac{1}{2} q_{1-2} \quad (158)$$

公式(158)表明,装一块遮热屏可使两平面间传热量降低一半。同样,可以证明,装两块遮热屏时,传热量将降低成 1/3。装“n”块遮热屏时传热量将降为原传热量的  $\frac{1}{n+1}$ 。

如果采用黑度较小的遮热屏时,相应地可便放热量降得更多。

(c) 经过孔洞的辐射

电炉中的高温炉料要经开启的炉门、炉盖和其它孔洞向周围空间辐射热量,这种热损可参照图 44 考虑。

图 44a 上是薄壁上的孔,射入孔腔的射线

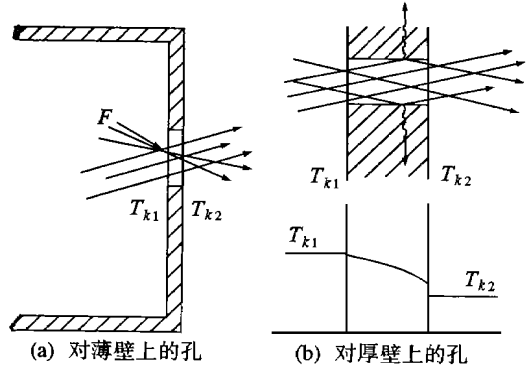


图 44 通过孔洞的热辐射

全部可达到炉外。当炉壁厚度小于孔洞的高和宽(或孔径)时,可以采用绝对黑体的辐射系数。其计算式为:

$$Q_{\text{铁}} = C_0 F \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/\text{h} \quad (159)$$

式中:  $F$  为孔洞面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_{k1}$  和  $T_{k2}$  为孔腔内、外的温度,  $\text{K}$ 。

较厚炉壁上的孔洞,进入孔腔的射线不能全部达到炉外,其中部分被炉壁吸收,少量反射回炉内(图 44b)。这样,计算式中就应加入与炉壁厚度和孔洞尺寸有关的遮蔽系数“ $\beta$ ”。在实际计算中可按图 45 上曲线确定  $\beta$  值,辐射热计算公式为:

$$Q_{\text{氧化}} = C_0 F \left[ \left( \frac{T_{k1}}{100} \right)^4 - \beta \left( \frac{T_{k2}}{100} \right)^4 \right] \text{ kJ}/\text{h} \quad (160)$$

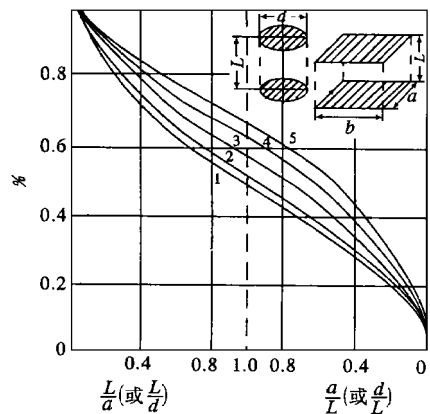


图 45 遮蔽系数曲线

- 1. 圆孔 2. 方孔 3. 矩形孔,  $a/b = 0.5$
- 4. 矩形孔,  $a/b = 0.2$  5. 长孔,  $a/b = 0$

有的炉子上孔洞用带耐火炉衬的门(或盖)遮盖,计算热损时应考虑开闭系数。有的炉子

### LF-50 t 钢包精炼炉炉盖的改进

目前,40~50 t 以上精炼炉几乎都采用水冷炉盖技术。水冷炉盖与耐火材料炉盖相比,大大提高了使用寿命,降低了维护工作量,但热损失较大,一般40 t 以下小型炉盖高达40%,大型炉盖为12%~14%。我公司50 t 钢水包属瘦长型,上口直径仅2 840 mm,高3 680 mm,这方面影响更为突出。在初步设计方案中采用管式与板式复合结构,如图1所示。双层结构,大面积使用板式水冷盘,在高温值下容易漏水,增加热停工时间,并且热效率降低。应用电极密封孔砖,限制了炉盖寿命提高。我们在综合考虑热效率及其它影响因素,移植采用了50 t 超高功率电炉炉盖区部分结构形式,使得精炼炉炉盖结构设计更趋合理,取得良好的效果。

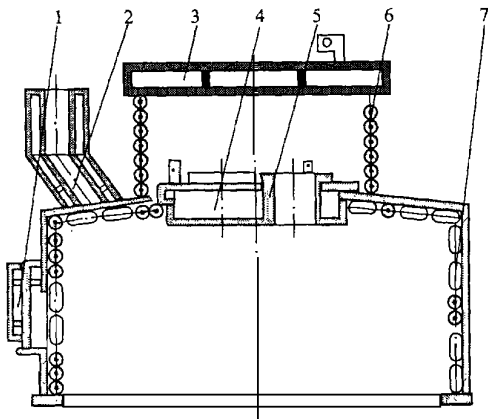


图1 水冷炉盖布置图

1. 窥视口 2. 加料管 3. 排烟盖 4. 水冷盘
5. 电极密封孔砖 6. 小炉盖 7. 大炉盖

改进后的结构设计如图2所示,具有以下特点:

(1) 将双层结构取消,改为单层结构;在保证必要的钢水处理沸腾高度前提下(底吹氩调温工艺),炉盖顶部离钢液面距离加大,工况得以改善。

(2) 将板式水冷盘改成管式,减少产生热

应力裂纹漏水的可能,减少热停工时间。

(3) 将电极密封孔砖改成整体打结炉衬形式,减少迎热水冷面积,提高热效率。

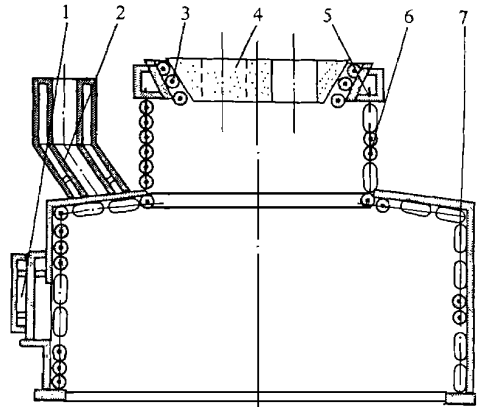


图2 水冷炉盖改进布置图

1. 窥视口 2. 加料管 3. 区水冷圈 4. 整体打结炉衬
5. 区炉盖支架 6. 小炉盖 7. 大炉盖

(4) 增加区水冷圈结构,对整体打结炉衬冷却保护,延长其使用寿命。

(5) 整体打结炉衬采用图3形式,形布置,最大限度降低耐火材料消耗。采用CDL-80刚玉质浇注料加入熔抽钢纤维制成,使用寿命达到300炉以上,能够满足生产要求。

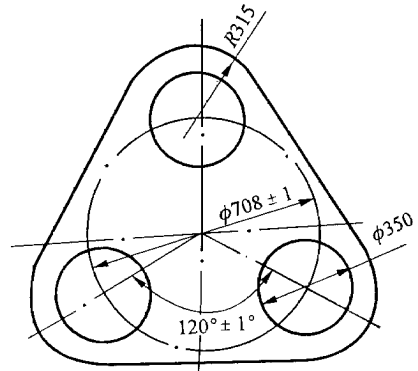


图3 整体打结炉衬图

中国国际钢铁制品有限公司 高秋生 供稿

采用纯金属的炉门(或盖),关闭时炉门仍有很强的热辐射,此时炉门只相当于遮热屏的作用。为了计算金属炉门的热辐射,可采用下式:

$$Q = CF \frac{1}{1 + \left[ \frac{T_{a1}}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{a2}}{100} \right]^4} \text{ kJ/h} \quad (161)$$

式中:C为炉门金属的辐射系数。

—待续—