

关于红外加热技术及其应用的讨论(五)

电阻炉辐射换热系统模型的研讨

张 泽 清

(哈尔滨拖拉机配件厂)

摘要——本文对传统电阻炉设计的理论依据提出了初步质疑,提出了红外辐射电阻炉的换热模型和计算公式,并作了实验验证。

一、引 言

传统电阻炉已有数十年历史,在我国被广泛使用。传统电阻炉有许多优点,但也以“电老虎”著称。近年来国内外对电阻炉的节能改造取得了许多进展,但尚未从理论上摆脱传统电阻炉设计所依据的“二元绝热辐射换热系统模型”。这个模型的特征有二:(1)把电阻炉内的辐射换热简化为二元换热,即热元件与炉膛作为辐射元,金属工件作为接收元。炉膛被当作蓄热库被首先加热,采用高温辐射体包围低温受热体的模式,并把封闭式炉膛按理想化的绝热系统处理,从而导出电阻炉的辐射换热公式:

$$Q_{12} = C_1 \phi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_2, \quad (1)$$

$$\phi = \left[\frac{1}{\varepsilon_2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \frac{F_2}{F_1} \right]^{-1}. \quad (2)$$

这个公式与实际情况相差甚远,误差甚大,但却一直沿用到今。(2)把金属工件当作灰体处理,这与已被氧化、油污的金属在远红外区和光洁金属在近红外区具有一定选择性吸收的事实不符,仅为了计算简化而令 $\alpha(\lambda, T) = \alpha$ 和 $\alpha = \varepsilon$, 这就堵塞了对金属加热也应采取匹配吸收的思路。于是传统电阻炉设计所遵循的原则是:

(1) 等向辐射原则。即热元件对各向的辐射强度是均等的,以造成一个均匀的空间辐射场。在箱式电阻炉中,螺旋形电热元件放出总辐射中仅有 20% 左右直接射达工件。

(2) 热炉墙原则。因把炉墙内壁当作高温辐射元,故炉墙内壁温度必须高于被加热金属工件的温度,致使总能耗的 70% 左右(间歇加热时)被炉墙蓄热和散热所浪费。

(3) 封闭吸收原则。认为金属是灰体,对辐射能谱分布无选择性吸收,只要把热元件和金属工件都封闭在炉膛内,则发射率和吸收率的大小对两者到达热平衡的时间并无重大影响。

以上就是造成传统电阻炉升温慢、能耗高、生产效率和热效率都很低的根本原因。故欲

本文 1983 年 10 月 28 日收到。修改稿 1984 年 5 月 3 日收到。

治本,应抛弃上述三原则及其理论依据——“二元绝热辐射换热模型”。而代之以“三元非绝热红外辐射换热系统模型”及其新三原则:即定向辐射,匹配吸收和“冷炉墙”原则;并推导出红外辐射炉换热的有关公式;确立若干具体措施,为新一代电阻炉的诞生提供依据。

二、三元非绝热辐射换热系统模型及其热工计算

建立本模型的指导思想如下:

1. 实际电阻炉中存在着热元件、金属工件、炉墙、炉气、辅具(如炉底板、装工件的料框或挂具、轨道等)多元之间的辐射、对流、传导换热;且系统是非绝热的,从炉门、炉墙外壁、热元件导电杆、观测孔等处向大气散热。在系统中只有工件吸热算作有效做功,其余诸元耗用的热能全被视作损耗。从严格的意义上讲就是浪费。在中高温炉中,热元件与工件和炉墙三元间的辐射换热居于主导地位。在保温段,系统向外的热辐射和对流损失处于主导地位。故应建立三元非绝热辐射换热模型。

2. 欲使工件获得辐照最多,炉墙获得辐照最少,则热元件应采取定向辐射,以造成一个不等辐射强度的非均匀辐射场,这是本模型的第一特征。

3. 欲使到达工件的辐照被吸收最多,被反射、透射及自身辐射较少,则热元件的一次辐射(和炉墙的反射与二次辐射)到达工件的辐射能谱分布应满足与工件的特征吸收(反射)光谱最佳匹配的要求。这是本模型的第二特征。

4. 在三元模型中炉墙不是被加热的对象。如果工件已到达指定温度时炉墙还是“冷”的,当然最好。因此造成一个比传统电阻炉耗热要低数倍的相对“冷炉墙”,是本模型的第三特征。

此外热元件自身消耗和向外散失的热量的降低也应引起足够的重视。三元换热的模型见图1。热元件(带状)的正面包围着工件,背面被炉墙包围,正面涂有高温高辐射涂层(1000°C 时, $s \geq 0.9$),背面涂有高温极低辐射涂层(1000°C 时 $s < 0.2$),炉墙内壁具有高温高反射表面,外壁具有中低温高反射表面。炉墙由耐高温与耐中温耐火纤维分别作内外衬,并在墙中加有数层金属反射箔。

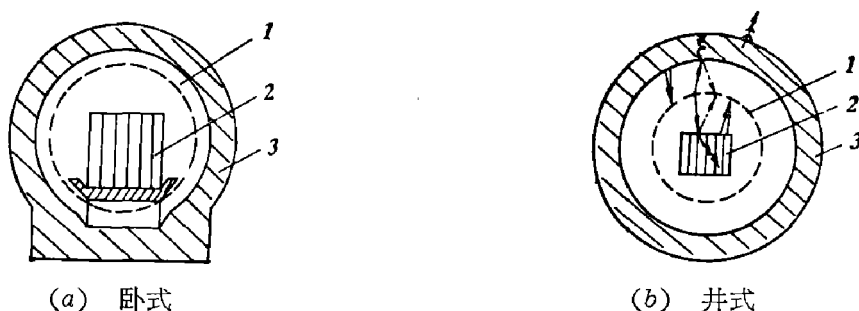
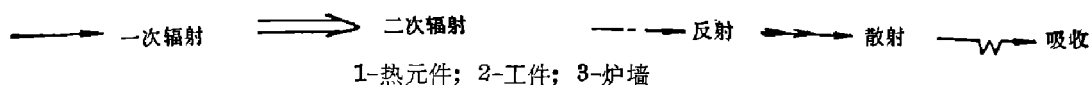


图1 换代电阻炉三元换热模型



在三元换热系统模型中,主要的热交换是在热元件正面与工件之间以辐射形式进行;热元件背面与炉墙之间,和炉墙与工件之间的热交换已降到很低的水平。热元件放出的总热能中不仅在数量上绝大部份可(不依赖炉墙转手)直接射达工件;而且要使数量具有一个最

佳的质量构成,以达到用最少能耗加热出最优工件的目的。这个辐射热质量包括三个分布,即辐射能的最佳能谱分布,最佳能场分布与最佳能强分布;当主辐射区(工程上指由8%到88%之间的能谱区)正好复盖在被加热物的最佳吸收区时的能谱分布称作最佳能谱分布。使一次辐射定向并垂直投射到工件各部表面,并使二次辐射和反射到达工件需热部位的能场分布称作最佳能场分布。使工件各部均匀升温(或按需升温)没有局部过热或低温,并保持最优升温速率的能强分布称作最佳能强分布。

消灭“电老虎”,提高热效率,要从换热系统热平衡的全过程入手。令热元件总发热量为 Q ,自身蓄热 Q_0 ,炉底板、装件箱等蓄热 Q_1 ,工件需热 Q_2 、炉墙蓄热 Q_3 、挂具、轨道等辅具蓄热 Q_4 、炉气蓄热 Q_5 、各项散热损失之和为 Q_6 。

升温段:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (3)$$

保温段:

$$Q = Q_2 + Q_3 + Q_6, \quad (4)$$

炉子热效率为:正平衡:

$$\eta = Q_2 / Q, \quad (5)$$

反平衡:

$$\eta = 1 - (Q_0 + Q_1 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6) / Q. \quad (6)$$

在红外辐射炉中,对 Q_0 、 Q_1 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 要严格地逐项逐条尽力压低;对工件需热 Q_2 则尽力提供。 Q_2 来自辐射热转移 Q_{12} ,对流热转移 Q'_{12} ,传导热转移 Q''_{12} ,即

$$Q_2 = Q_{12} + Q'_{12} + Q''_{12} = \left(1 + \frac{Q'_{12}}{Q_{12}} + \frac{Q''_{12}}{Q_{12}}\right) Q_{12} = K Q_{12}. \quad (7)$$

计算表明,在电阻炉内 1000°C 自然对流时, K 值在 $1.05 \sim 1.1$ 之间,即工件吸收的热量 Q_2 中90%以上来自辐射 Q_{12} 。据能量守恒定律,当热元件功率恒定时, Q_{12} 的增加只能来自其它各项的减少。故对热转移的全过程要求如下:

在发射段: $Q = Q_{\text{辐}} + Q_{\text{对}} + Q_{\text{传}}$,使 $Q_{\text{辐}}$ 最大;

在传输段:存在着炉墙、底板、料框、辅具、炉气等许多吸收 $Q_{\text{辐}}$ 的“竞争者”。应使工件得到的辐射份额 $Q_{\text{辐} \rightarrow \text{工}} = \phi_2 Q_{\text{辐}}$ 最大。 ϕ_2 称作集能系数。

在接收段:使到达工件的辐射能谱与工件的最佳吸收区带相匹配,以使被吸收的份额最大,并使工件的反射和自身辐射尽量减小。为此,用吸能系数 ϕ_1 表征。经推导得:

$$Q_{12} = 4.88 \phi_1 \phi_2 \left[\frac{\varepsilon_1}{a_1} \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \frac{\varepsilon_2}{a_2} \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 [\text{大卡/时}], \quad (8)$$

当 $a_1 = \varepsilon_1$, $a_2 = \varepsilon_2$ 时,可用简式

$$Q_{12} = 4.88 \phi_1 \phi_2 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \quad (9)$$

式中

$$\phi_1 = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5}, \quad (10)$$

$$\phi_2 = P_{12} \left[\frac{1}{\varepsilon_{1P}} + \left(\frac{1}{a_{2P}} - 1 \right) \frac{F_1}{F_2} \right]^{-1}. \quad (11)$$

其中 T_1 为热元件表面辐射温度(K), T_2 为工件表面温度(K)。在升温段, T_1 、 T_2 都是变量,可按实测分段求积。 F_1 为热元件有效辐射面积(米²), ϕ_1 为经验公式,可由工程实验加以验证或校正, f_1 为定向系数, f_2 为射角系数, f_3 为匀度系数, f_4 为满度系数, f_5 为介质动态系数。 ε_{1P} 为热元件正面发射到工件的主辐射区间的区间发射率,简称主发射率。 a_{2P} 为工件

被主辐射区间所复盖的区间吸收率, 简称主吸收率。 P_{12} 为 ε_{1P} 与 a_{2P} 的匹配度。 F_2 为工件被照射到的总面积(米²), 不包括隐蔽和阴影区面积。

只要解得 $f_1 \sim f_5$ 和 ε_{1P} , a_{2P} , P_{12} , T_1 , F_1 等十个参数的最佳值, 便可求得 Q_{12} 的极大值。对这些参数最佳值的求解, 目前尚未建立起严格的数理方程。为满足工程近似计算的需要, 作为一种尝试, 推荐一组实用公式如下, 期待在今后进一步完善之。

1. 定向系数 f_1

在三元换热系统中工件获得的辐照可分解为来自热元件的一次辐射和来自炉内壁的二次辐射。令热元件总辐射面积中射到和射不到工件的面积分量分别为 u_1 与 u_2 , $u_1 + u_2 = 1$ 。又其全发射率分别为 ε'_1 与 ε''_1 。则热元件射到工件的和未射到的分别为: $C_1 \varepsilon'_1 (T_1/100)^4 F_1 u_1$ 与 $C_1 \varepsilon''_1 (T_1/100)^4 F_1 u_2$, 故一次辐射到达工件的比额为

$$f'_1 = \varepsilon'_1 u_1 / (\varepsilon'_1 u_1 + \varepsilon''_1 u_2) \quad (12)$$

同理, 可算得炉墙二次辐射到达工件的比额为

$$f''_1 = \frac{\varepsilon'_3 A_1 T_A^4}{\varepsilon'_3 A_1 T_A^4 + \varepsilon''_3 A_2 T_A^4 + \varepsilon''_3 B T_B^4} \quad (13)$$

式中 A_1 、 A_2 为炉墙内壁辐射到达和未到达工件的面积比额, B 为炉墙外壁的面积比额, 炉墙总面积比为 $A_1 + A_2 + B = 1$ 。各面积的全发射率分别为 ε'_3 , ε''_3 , ε''_3 。 T_A 与 T_B 分别为炉内壁与外壁的表面温度。确定 u_1 与 A_1 与工件的装载量有关:

$$u_1 = \frac{F'_1}{F_1} \cdot \frac{F_2}{F'_2}, \quad A_1 = \frac{F'_3}{F_3} \cdot \frac{F_2}{F'_2} \quad (14)$$

F'_2 为满载时工件被辐照到的总外表面积(遮挡部份不算), F_2 为总外表面积。 F_1 为热元件的总有效辐射面积, F'_1 为 F_1 中可直射到 F'_2 的面积。 F_3 为未被热元件遮挡的炉内壁面积, F'_3 为 F_3 中可直射到 F'_2 的面积。

定向系数所表征的是工件获得的一次辐射与二次辐射占系统中总辐射之比。故

$$f_1 = f'_1 + (1 - f'_1) f''_1 \quad (15)$$

传统(箱式)电阻炉的 $u_1 = 0.2$, $u_2 = 0.8$, $\varepsilon'_1 = \varepsilon''_1 = 0.75$, $T_A = 850^\circ\text{C}$, $T_B = 500^\circ\text{C}$ (耐火砖外侧), $\varepsilon'_3 = \varepsilon''_3 = 0.75$, $\varepsilon''_3 = 0.8$, $A_1 = 0.2$, $A_2 = 0.1$, $B = 0.7$, 算得 $f_1 = 0.2 + 0.8 \times 0.42 = 0.54$, 即总辐射能中到达工件(满载时)的一次辐射占 20%, 二次辐射占 42%, 占总辐射的 54%。在同功率下按本文设计的红外辐射炉的 $u_1 = 0.4$, $u_2 = 0.6$, $\varepsilon'_1 = 0.9$, $\varepsilon''_1 = 0.2$, $\varepsilon'_3 = 0.9$, $\varepsilon''_3 = 0.2$, $\varepsilon''_3 = 0.3$, $T_A = 850^\circ\text{C}$, $T_B = 50^\circ\text{C}$, $A_1 = 0.15$, $A_2 = 0.15$, $B = 0.7$, 算得 $f'_1 = 0.75$, $f''_1 = 0.81$, $f_1 = 0.75 + 0.25 \times 0.81 = 0.95$, 即总辐射的 95% 可到达工件。

2. 射角系数 f_2

辐射强度随入射角度而变化, 直射最大, 平射为零。将工件的总表面积分作 n 份, a_1, \dots, a_n 为各份的分量。 $a_1 + \dots + a_n = 1$, $\theta_1, \dots, \theta_n$ 分别为各份面积的辐射入射角, 当各份均获得垂直入射时效果最佳, $f_2 = 1$ 。工程上用下式近似计算,

$$f_2 = a_1 \cos \theta_1 + \dots + a_n \cos \theta_n \quad (16)$$

使 $f_2 = 1$, 并使 f_1 趋近于 1 的能场分布即为最佳能场分布, 这就要求热元件的形状、布置与炉墙的形状、结构、布局都要对应于工件(群)的形状、排布有一个最佳空间构成。

3. 匀度系数 f_3

加热必须满足工件受热的质量要求, 由于工件的厚薄、形状、各部位材质, 及各部位需热

的要求、目的不一,故向各部位提供辐射能的强度大小应采用匀度系数来予以考核。将工件(群)按体积分作 n 份, τ_1, \dots, τ_n 为各部份升到所需温度占用的时间, τ_{\min} 为 n 份中最先到达所需温度的最佳工艺要求时间。当 $\tau_1 = \dots = \tau_n = \tau_{\min}$ 时, $f_3 = 1$, 此时的空间辐射能强分布即为最佳分布。

$$f_3 = \left[\frac{\tau_{\min}}{\tau_1} + \dots + \frac{\tau_{\min}}{\tau_n} \right] / n_0 \quad (17)$$

4. 满度系数 f_4

考核工件(群)占满炉膛空间程度的指标。工件装载量越不满,即使炉子设计十分合理,其热效率仍不会高。令 A_0 为炉膛有效容积, A_1 为工件(群)实占空间容积(合理间歇计算在内)。 j 为剩余空间中二次辐射和反射被工件截留的百分数, ε_a 为二次辐射表面的平均全发射率。当 $A_1 = A_0$ 时, $f_4 = 1$, 最佳。

$$f_4 = \frac{A_1}{A_0} + j\varepsilon_a \left(1 - \frac{A_1}{A_0} \right) \quad (18)$$

5. 介质动态系数 f_5

炉中的某些气体介质如 CO_2 , SO_2 , H_2O 和有机挥发物等均有选择性吸收特性,成为活动二次辐射源,特别在强制对流时,将改变空间内的能场、能强、能谱分布,对互相遮蔽的一群工件的均匀受热影响很大,将提高匀度系数,并加快对流和二次辐射热转移,减轻局部过热。 f_5 的确定有赖于不同条件下的工程模拟实验曲线。令 P_{\min} 为实验求得的介质动态最佳(化学成份、浓度、流速、流向等)时的单位产品能耗。 P_s 为实际存在的介质动态时的单位产品能耗。 K 为综合修正系数。在一般以空气为介质,自然对流的加热炉中影响甚小, K 值取 $0.95 \sim 1$ 。

$$f_5 = KP_{\min}/P_s \quad (19)$$

6. 主发射率 ε_{1P}

热元件从 λ_1 到 λ_2 的区间发射率为^[7]:

$$\varepsilon_{1P(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{1\lambda} \cdot C_{\lambda\mu} / \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_{\lambda\mu} \quad (20)$$

式中 $C_{\lambda\mu}$ 为黑体在波长 λ 处 1 微米区间内载有的能量占总辐射能的百分比。可查得^[7] $27^\circ\text{C} \sim 6000^\circ\text{C}$ 的 $C_{\lambda\mu}$ 值。当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = \infty$ 时,即得全发射率 ε ; 当 λ_1 为 8%、 λ_2 为 88% 能量线所在波长时,即得主发射率 ε_P 。表 1 为氧化锆(ZrO_2 92%, CaO 4.5%)辐射涂层在 127°C 时的 $\varepsilon_{P(\lambda_1 \sim \lambda_2)}$, ε_P 和 ε 计算值。同样可算得在其它温度时的 ε_P 和 ε 值。由此可知,每种红外辐射涂料均有其最佳使用温度和波长区间。当用于其它温度和波段时,其辐射效率均会下

表 1 氧化锆在 127°C 时的区间发射率、主发射率和全发射率

区间 (μm)	1~4	5~6		7~14				15~21	22~ ∞	主 发 射 率	全 发 射 率
波长(μm)	1~4	5	6	7	8	9	10~14	—	—	ε_P	ε
$\lambda_1 \sim \lambda_2$	0.75~4.5	4.5~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~8.5	8.5~9.5	9.5~14.5	14.5~21.5	—	5.2~21.7	0~ ∞
ε_λ	0.38	0.57	0.72	0.82	0.89	0.92	0.91	0.74	0.7	—	—
$C_{\lambda\mu}$	0.393	0.0616	0.0822	0.0901	0.0885	0.0817	0.2767	0.1599	0.12	0.8	1
$\varepsilon_\lambda \cdot C_{\lambda\mu}$	0.0149	0.0351	0.0592	0.0739	0.0788	0.0752	0.2518	0.1183	0.084	0.668	0.791
$\varepsilon_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$	0.38	0.66		0.9				0.74	0.7	0.835	0.79

降。用于最佳点时的 ε_P 最大, 称作 ε_{Pm} 。用于其它温度时的辐射效率为

$$\eta_s = \varepsilon_P / \varepsilon_{Pm} \quad (21)$$

7. 工件的主吸收率 α_{2P}

工件对垂直投入辐射在 λ_1 到 λ_2 区间的吸收率为

$$\alpha_{2P(\lambda_1 \sim \lambda_2)} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{2\lambda} \cdot \varepsilon_{1\lambda} \cdot C_{\lambda\mu} \quad \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{1\lambda} \cdot C_{\lambda\mu} \quad (22)$$

$\alpha_{2\lambda}$ (脚标 2 代表工件) 为被加热物的光谱吸收率, 表 2 为铁的有关光谱特征, 表 3 为光洁钢材对 600°C 以上黑体辐射的主吸收率 α_P 和 α 。可见, 钢铁对 $2.5\mu\text{m}$ 以内的短波辐射, 其吸收率比以远的长波要大得多。辐射温度越高, 其主吸收率也相对越大。故采用 1327°C 以上的辐射温度和 $\varepsilon_{P(0.75 \sim 3.5)} > 0.9$ 的高温高辐射涂层, 就会获得一个加热光洁钢材的最佳能谱构成。

$$\eta_a = \alpha_P / \alpha_{Pm} \quad (23)$$

表 2 热辐射对铁的穿透深度及铁的反射率、吸收率与发射率^{[3]、[4]}

波 长	表面穿透深度 d_1	振幅穿透深度 d_2	反 射 率 ρ_λ			吸 收 率 α_λ		发 射 率 ε_λ	
			理 论	实 测 ¹⁾	实 测 ²⁾	理 论	实 测	实 测 ¹⁾	实 测 ²⁾
λ	(μm)	(μm)	(20°C)	(25°C)		(20°C)	(21°C)	(805°C)	(1048°C)
1	0.459	0.92	0.885	0.432	0.65	0.115	0.43	0.36	0.3
2	0.649	1.3	0.918	0.682	0.78	0.082	0.25	0.235	0.22
3	0.795	1.6	0.934	0.738	0.855	0.066	0.175	0.205	0.19
4	0.918	1.84	0.943	0.81	0.895	0.057	0.125	0.18	0.18
5	1.026	2.05	0.949	0.848	0.915	0.051	0.098	0.155	0.155
6	1.124	2.25	0.953	0.86	0.93	0.047	0.08	0.14	0.151
7	1.214	2.43	0.957	0.855	0.94	0.043	0.066	0.13	0.14
8	1.298	2.6	0.96	0.872	0.94	0.04	0.055	0.125	0.135
9	1.377	2.75	0.962	0.87	0.938	0.038	0.052	0.115	0.13
10	1.452	2.9	0.964	0.87	—	0.036	0.047	—	—
12	1.590	3.18	—	0.88	—	—	0.038	0.115	0.12
14	1.719	3.44	0.969	0.881	—	0.034	0.036	0.11	0.115
15	1.779	3.56	0.97	0.87	—	0.03	—	—	—

1) 0.5 mm 厚的光铁板, 含 C < 0.03%, 入射角 5° ; 2) 机械抛光。

表 3 光洁钢材对 600°C 以上黑体辐射的主吸收区间及 α_P 与 α

辐 射 温 度 ($^\circ\text{C}$)	主 吸 收 区 间 $\lambda_1 \sim \lambda_2$	主区吸收量 总入射量 (%)	全区吸收量 总入射量 (%)	前面两量 之 比 (%)	$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_{\lambda\mu}$ (%)	主吸收率 α_P	全吸收率 α
600	1.5~6.5	10.97	13.32	82.4	70.39	0.156	0.133
727	1.5~5.5	12.17	15.18	80.2	67.8	0.179	0.152
827	1.5~5.5	13.63	16.64	81.9	71.79	0.19	0.166
927	0.75~4.5	15.14	18.06	83.8	68.03	0.222	0.181
1027	0.75~4.5	16.9	19.43	87	72.46	0.233	0.194
1127	0.75~3.5	16.78	20.7	81	62.08	0.27	0.207
1227	0.75~3.5	18.43	21.92	84.2	66.36	0.278	0.219
1327	0.75~3.5	19.9	23	86.6	70.09	0.284	0.23

8. 匹配度

$$P_{12} = \sqrt{\eta_s \cdot \eta_a}$$

当 $\eta_s=1$ 、 $\eta_a=1$ 时, 则 $P_{12}=1$, 即为最佳匹配。

三、红外辐射涂料的优选试验

我们的目的是实测不同发射率涂料对 45# 钢加热的升温效果, 装置见图 2。方法如下: 严格保持恒定功率, 条件相同, 只改变辐射板上的细粉状涂层(用水膜吸附, 厚 0.3mm)重复三次, 结果见表 4。可见用 Ni_2O_3 、 NiO 、 MoSi_2 等物质作热元件的正面涂层; 用 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等作反面涂层将起到明显的效果。且这种效果是在辐射温度超过 800°C 以后愈益显著。笔者限于实验条件未能使温度继续升高, 但已可说明对钢材等金属加热, 匹配吸收原理不可忽视。

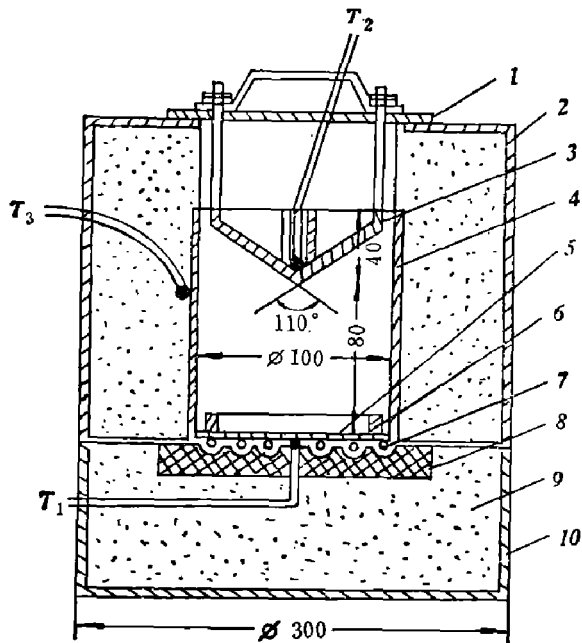


图 2 中高温涂料优选测试装置

1—炉盖; 2—上箱; 3—试件; 4—炉壁(不锈钢); 5—辐射板;
6—压圈; 7—电热丝; 8—炉盘; 9—硅酸铅毡; 10—下箱

表 4 不同辐射涂料对 45# 钢工件的升温对比(测到 1000°C)

涂 料 名 称	温 度 ($^\circ\text{C}$)											
	升 温 时 间: 0 分			升 温 时 间: 15 分			升 温 时 间: 30 分			升 温 时 间: 35 分		
	辐射板 表面	试 件	炉 壁	辐射板 表面	试 件	炉 壁	辐射板 表面	试 件	炉 壁	辐射板 表面	试 件	炉 壁
Ni_2O_3	64	35	56	744	338	417	956	760	782	1006	865	855
NiO	61	37	53	758	346	423	972	751	775	1020	856	850
MoSi_2	69	44	69	773	346	422	972	751	774	1015	853	846
Co_2O_3	66	36	58	756	344	420	952	752	775	1006	852	845
无涂料	56	35	54	732	340	414	931	745	774	979	845	840
铁锰酸稀土钙	63	36	60	745	337	409	949	743	779	1000	843	840
Fe_2O_3	62	36	55	789	324	396	974	745	767	1015	842	837
MnO_2	63	35	56	765	331	403	955	743	761	1000	837	830
SiO	62	37	50	783	326	400	926	738	755	980	819	818
高硅氧粉	55	38	60	815	323	409	1020	735	760			
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	71	36	61	826	323	399	1032	732	753			

四、结 论

1. 实际金属不是灰体, 对不同辐射涂层有不同升温效果。
2. 采用三元非绝热辐射换热模型研制新一代红外辐射炉, 将获得显著的节能、优质、低耗等实际经济效益。

参 考 文 献

- [1] 葛绍岩, 金属及其它物质的热辐射特性表, 科学出版社, 1958.
- [2] 许国樑等, 红外辐射在金属热处理中的作用 (1980 年全国光学学会论文).
- [3] 伽本尼, 光学物理, 科学出版社, 1976.
- [4] Toukounkian Y. S., *Thermal Radiative Properties, metallic elements and alloys*, 1970.
- [5] Toukounkian Y. S., *Thermal Radiative Properties, nonmetallic Solids*, 1972.
- [6] Richard A Nuquist, *Infrared Spectra of Inorganic Compounds*, 1964.
- [7] 卢为开、李铁津、张泽清, 远红外辐射加热技术, 上海科技出版社, 1983.
- [8] 西安交大, 热处理炉, 中国工业出版社, 1961.
- [9] 秦裕琨, 炉内换热, 机械工业出版社, 1981.