

红外加热机理中的“匹配”概念

夏 继 余

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

一、几种不同的见解

为达到最佳的节能效果,研究红外加热技术的人们特别重视辐射源的辐射性能与被加热物对该辐射的吸收性能间的关系问题。许多研究人员对此持有不同的见解及处理模式,差别甚大。归纳起来,大致有如下一些观点:

(1) 应使辐射源的光谱特性与被加热物的光学性质相匹配^[1]。

(2) 应使辐射源的光谱发射率与被加热物的光谱吸收率相匹配^[2, 3]。

(3) 应选择一种辐射源,能使被加热物对它的全吸收率尽可能地大^[4, 5]。若辐射源的光谱辐射功率与物料的光谱吸收率相匹配,就可达到高的加热效率^[8]。

(4) 使被加热物的吸收光谱与辐射源的光谱强度(相对强度)两者具有完全相对应的光谱,就可成为无损失的理想的辐射加热^[6~11]。他们所说的吸收光谱实际上是指透过率光谱,并设透过率为100%时,吸收率为0%;透过率为0%时,吸收率为100%^[6]。芳贺幸明是这一理论的代表。

(5) 使辐射源的辐射光谱与被加热物的吸收光谱实现最佳匹配;与不需要加热的物料的吸收光谱实现最劣匹配^[12]。他们还根据吸收光谱与辐射光谱两者图形的对称程度,分别引入“正匹配”、“偏匹配”、“内匹配”等名称,并用“匹配度”来校正辐射换热公式。

(6) 有人提出“非匹配吸收”干燥理论^[13]。认为芳贺幸明等人的理论适用于薄物料,对于木材等厚物料,应采用“非匹配”。所谓物料对辐射的“非匹配吸收”,在吸收光谱上,表现为选用各吸收峰之间的全部区域,以实现深部加热。

(7) 还有人指出^[14]:对于表面型的薄层材料宜用匹配理论处理;对于表层和里层同时吸收的厚物料用“非匹配”理论处理;对于仅里层吸收的特殊情况可用“反匹配”理论。

看来,参考文献[6~14]都同意这一概念,即通过辐射光谱与吸收光谱图形相对称的途径,至少可以使薄物料的辐射加热达到最大的效率(无损失辐射加热)。

显然,在上述几种与节能(即辐射能利用效率)有关的见解中,分歧主要在于:

(1) 所称被加热物的吸收性能是指其光谱吸收率谱还是光谱透过率谱(即吸收光谱)。

(2) 所称辐射源的辐射性能是指其辐射能谱(或相对辐射强度谱)还是光谱发射率谱。

(3) “匹配”的含义。当吸收光谱与辐射光谱图形完全相对应时,是否就能构成无损失的辐射加热。

(4) 辐射在物料中的透入深度与辐射能利用效率的关系。

二、分析和讨论

为简便起见,在下面的讨论中,均忽略辐射在传输路程中因环境介质选择性吸收引起的

能量损耗和能谱变化。

1. 需要澄清的几个概念

(1) 光谱吸收率谱, 吸收光谱与吸收系数

当辐射照射到物料表面上时, 会产生反射、吸收和透过现象, 由能量守恒定律可知, 其光谱反射率 ρ_λ 、光谱吸收率 α_λ 和光谱透过率 τ_λ 之间有如下关系:

$$\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1。$$

若物料很厚, 则 $\tau_\lambda = 0$, $\rho_\lambda + \alpha_\lambda = 1$ 。

由此可见, 除了 ρ_λ 值为零的特殊情况外, 仅从光谱透过率谱 (吸收光谱) 还不能求得光谱吸收率谱; 当已知 τ_λ 和 ρ_λ 的数据后才能得到 α_λ 谱。

众所周知, 物料的表面状态对 ρ_λ 值影响很大。实验还发现, 当辐射在物料内部传输时, 内部的透过率 $\tau_{\mu\lambda}$ 随透入距离 x 和吸收系数 k_λ 而改变:

$$\tau_{\mu\lambda} = e^{-k_\lambda x}。$$

通常把 $1/k_\lambda$ 值作为衡量辐射透入深度的一个指标。可见 α_λ 与 k_λ 是有关系的, 但并不是一回事。 k_λ 可以看作与被吸收的辐射能在物料内按透入深度分配的情况有关的一个参数。“非匹配”理论实际上要求选用这样的辐射, 物料对这种辐射具有小的 k_λ 。

(2) 辐射能谱与光谱发射率谱

如果已知辐射源在工作温度 T 时的光谱发射率谱 ε_λ , 就可通过与它同温度下黑体的能谱 $E_{0\lambda}$ (按普朗克公式计算) 来求出它的能谱 E_λ ,

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{0\lambda}。$$

总的辐射能量 E 则可按式给出:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \varepsilon \sigma T^4,$$

这里 σ 是常数; ε 是全发射率 ε , $\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{0\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}。$

由此可见, 光谱发射率仅是影响辐射能谱诸参数中的一个。用辐射能谱 (或相对辐射强度谱) 比用光谱发射率谱更能全面地反映辐射源的辐射性能。

(3) 辐射能利用

物料 r 要提高温度, 首先得让它得到能量。在辐射加热时, 它只能通过吸收辐射才能获得能量, 那些被透过和反射的辐射对加热不起作用。因而吸收率才是表征辐射能利用效率的唯一参数。显然, 光谱吸收率 $\alpha_{r\lambda}$ 和全吸收率 α_r 才能代表物料对辐射的吸收性能。

为了节省能量, 当然要求辐射源 S 所发射的全部能量都被物料 r 吸收, 这必然涉及全吸收率 α_r 。 α_r 值最大为 1。

假如已知入射辐射的能谱 (或相对辐射强度谱) $E_{s\lambda}$ 和物料的光谱吸收率谱 $\alpha_{r\lambda}$, 则物料对该入射辐射的全吸收率 α_r 可按式计算:

$$\alpha_r = \frac{\int_0^\infty \alpha_{r\lambda} E_{s\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{s\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty \alpha_{r\lambda} \varepsilon_{s\lambda} E_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \varepsilon_{s\lambda} E_{0\lambda} d\lambda}。$$

由于 $\alpha_{r\lambda}$ 、 $E_{s\lambda}$ 一般通过测试得到, 通常很难用数学方程式表示, 故常采用作图法求 α_r 。即作

$E_{s\lambda}-\lambda$ 图, 再按对应波长上 $\alpha_{r\lambda}$ 与 $E_{s\lambda}$ 的乘积点出曲线, 则

$$\alpha_r = \frac{\alpha_{r\lambda} E_{s\lambda} \text{ 曲线与波长坐标间包含的面积}}{E_{s\lambda} \text{ 曲线与波长坐标间包含的面积}}。$$

由上式可见: α_r 值的大小与物料本身的光谱吸收率谱及与入射辐射的能谱分布状况有关。显然, 当光谱吸收率谱与入射辐射的能谱(相对强度谱)图形相对应时, α_r 值一般不等于 1; 而且当用不同能谱的辐射来照射同一物料, 并计算各个 α_r 值时, 这种图形相对应时的 α_r 值一般还不是其中最大的一个。可见一般做不到无损失的辐射加热。光谱发射率谱与光谱吸收率谱相对应时情况也类同。

因此, 所谓“匹配”的主要含义应指选用能使物料达到全吸收率值尽可能地大的辐射能谱, 而不应指辐射光谱与吸收光谱图形的对应。

2. 两厚物料之间纯粹的辐射热交换

当物料 S 的辐射 E_s 照射到物料 r 的表面上时, 一部分能量 $\alpha_r E_s$ 被物料 r 吸收; $(1-\alpha_r)E_s$ 被反射。此外, 物料 r 自身会同时向周围发射辐射能 E_r 。这样物料 r 净的热量变化值 q_r 为

$$q_r = E_r - \alpha_r E_s,$$

则从物料 r 表面有效发射的总能量 $E_{r\text{有效}}$ 为

$$E_{r\text{有效}} = E_r + (1-\alpha_r)E_s = \frac{1}{\alpha_r} E_r - \left(\frac{1}{\alpha_r} - 1\right) q_r。$$

同理,

$$E_{s\text{有效}} = E_s + (1-\alpha_s)E_r = \frac{1}{\alpha_s} E_s - \left(\frac{1}{\alpha_s} - 1\right) q_s。$$

在一般情况下, 物料 s 和 r 的辐射不会百分之百地全部都照射在对方表面, 为简化运算, 可引入平均角系数概念。平均角系数 F_{sr} 表示 s 的辐射有多大比例照射在 r 上。它与 s 和 r 两者的表面形状、大小、相互位置及距离有关。设 s 的表面积为 A_s , r 的表面积为 A_r , 则

$$F_{sr}A_s = F_{rs}A_r。$$

显然, 从物料 s 传到物料 r 的净辐射热量 Q_{sr} 为

$$Q_{sr} = E_{s\text{有效}}F_{sr} - E_{r\text{有效}}F_{rs},$$

$$E_r = \varepsilon_r A_r \sigma T_r^4; \quad E_s = \varepsilon_s A_s \sigma T_s^4。$$

在稳定状态下,

$$Q_{sr} = q_s = -q_r,$$

代入并经过运算后得到

$$Q_{sr} = \frac{\sigma A_s \left(\frac{\varepsilon_s}{\alpha_s} T_s^4 - \frac{\varepsilon_r}{\alpha_r} T_r^4 \right)}{\frac{1}{F_{sr}} + \left(\frac{1}{\alpha_s} - 1 \right) + \frac{A_s}{A_r} \left(\frac{1}{\alpha_r} - 1 \right)}。$$

由此可见, 影响辐射能利用效率的因素是很多的。就辐射源与被加热物的光学性能间关系来说, 使被加热物有尽可能大的全吸收率值是主要的。这必然涉及正确选择辐射源的温度和光谱发射率谱。即处理好 $\varepsilon_{s\lambda}$ 、 T_s 与 $\alpha_{r\lambda}$ 之间的关系, 使 α_r 大、 α_s 小。

3. 辐射能利用与物料的红外加热干燥速度

物料加热干燥质量、干燥速度和节能是加热干燥工序中三项重要指标, 然而三者又互相制约。我们的任务就是要处理好这三者之间的关系, 挑选出最佳方案。

例如在物料化学干燥时,某些波段的辐射能通过光化学作用,对干燥起促进作用。因此我们在选择辐射源的能谱时,还必须根据多种因素进行综合设计。

三、结 论

综上所述,在处理辐射源的辐射性能与物料的吸收性能之间的匹配关系时,广义地说,应着重考虑下列因素:

1. 选用能使物料有极高全吸收率值的入射能谱,以保证达到高的辐射能利用效率。
2. 在入射辐射的能谱中,对物料有特殊功效(如光化学作用、穿透深度大)的波段的辐射强度适当地高,以便充分发挥入射辐射与物料相互作用时有益部分的潜力。

此外,为使物料有较高的加热干燥速度,入射辐射还应有足够高的全辐射强度。

参 考 文 献

- [1] Рыжков, В. И., *Светотехника и Инфракрасная техника*, тома, 1973, 196~247.
- [2] 刘任源、陈惠德, *红外研究*, 2(1983), 3: 229~230.
- [3] Guzdar, A. R., Rhee, S. S. and Harvey, A. C., **AD752897** (1972).
- [4] 夏继余, *红外研究*, 2(1983), 3: 230~31.
- [5] 夏继余、王正深、胡仲寅, *能源材料通讯*, (1983), 1: 50~54.
- [6] 芳贺幸明, *涂装と涂料*, (1973), 231: 35~53.
- [7] 细川秀克, *涂装と涂料*, (1974); 244: 131~143.
- [8] 阿部利一, 芳贺幸明, *涂装と涂料*, (1976), 271: 55~62.
- [9] 上海科技大学一系远红外材料材料组, *能源与热物理*, (1980), 4: 42~53.
- [10] 葛世名, *涂料工业*, (1982), 4: 40~44.
- [11] 化学系红外辐射材料研究组, *吉林大学学报(自然科学版)*, (1977), 4: 73~75.
- [12] 卢为开、李铁津、张泽清编著, *远红外辐射加热技术*, 上海科技出版社, 1983.
- [13] 侯兰田、汤大新、李玉润, *红外研究*, 2(1983), 1: 1~7.
- [14] 徐怀平、侯玉华, *电子工艺技术*, (1983), 3: 32~40.

(本文1983年9月10日收到)

信 稿 摘 编

对搞好讨论的几点建议

《红外研究》开辟“关于红外加热技术及其应用的讨论”专栏,很有意义,深受欢迎。建议:

1. 对那些不够成熟的、有争议的概念和理论进行讨论。至于红外涂料的作用问题,不论从理论上还是实际测试结果上,都是已被大多数人所肯定了的。象这样的问题,建议不要化很多时间去讨论。

2. 在讨论中,基本原理、机理和技术三者要区别开来。比如用红外辐射对某些物质进行加热干燥,这一基本原理人们是不怀疑的,因此红外加热干燥技术本身是可行的。仔细推敲下去,人们对加热干燥的机理有争议,因此需要讨论。搞清机理将有利于推广应用。然而,在具体应用中,由于一些技术问题一时没有解决而影响效果,这样的问题既不是原理问