

红外涂料的节能评估

曾庆祯

(广州师范学院物理系, 广东, 广州, 510400)

摘要 讨论了红外辐射涂料的节能机制, 分析了涂料对燃料加热炉排烟温度的影响及涂料与炉表温度的关系, 并从理论和实践两方面评估了红外涂料的节能作用.

关键词 红外涂料, 节能, 红外辐射.

引言

高温节能涂料问世以来, 其节能效果引起了世界范围的重视. 英国 CRC 公司研制的 ET-4^[1] 高温节能涂料被誉为加热炉发展的里程碑, 日本把研制节能涂料列入了高科技发展的“月亮计划”. 我国在这方面也开展了大量的研制工作. 与英国的 ET-4 涂料, 英国和欧澳多国联营的 Enecoat 涂料^[2], 日本 CRC 公司的 CRC1100 和 CRC1500 涂料相比, 我国某些涂料其性能并不逊色, 但是有关的理论研究远落后于实验研究, 本文报道我们开展红外涂料节能理论和实验的研究工作.

1 红外涂料发射率和反射率对加热的影响

根据红外辐射理论, 炉衬的红外辐射加热由自身辐射加热和反射加热两部分组成. 我们认为用红外涂料可以强化炉衬自身辐射的加热效果^[3]. 燃烧产生的辐射, 投射到炉壁的涂层界面, 发生反射、吸收和透射的界面效应. 以 R_λ 表示界面单色反射率、 α_λ 表示界面单色吸收率、 τ_λ 表示界面单色透射率; 当辐射平衡时其关系为:

$$R_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad [4] \quad (1)$$

对于全波段的红外辐射(平均)有

$$R + \alpha + \tau = 1. \quad (2)$$

根据基尔霍夫定律, 涂层界面的单色发射率等于该波长的单色吸收率, 即

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda. \quad (3)$$

对于封闭腔, 表面半球全波段的总发射率 ϵ 等于该表面半球全波段的总吸收率 α , 即

$$\epsilon = \alpha. \quad (4)$$

红外波在涂层界面的透射率 τ 决定于红外波在涂层中的透入深度, 如果透入深度小于涂层的厚度, 说明涂层是不透明的, $\tau=0$; 相反, 涂层是透明的, $\tau \neq 0$.

根据麦克斯韦理论, 微米波长的红外波在涂层界面的透入深度为

$$d = \frac{1}{\omega \sqrt{\epsilon \mu}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} - 1} \right) \right]^{1/2}}, \quad (5)$$

式(5)中 ω 是红外波的圆频率 ($10^{12} \sim 10^{15}$ Hz); ϵ 是涂层介电常数, 在红外波段, 它等于真空介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m; μ 是涂层导磁系数, 在红外波段, 它等于真空导磁系数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; σ 是涂层电导率, 它接近 ZrC 的电导率, $\sigma = 10^4 \Omega \cdot \text{m}$, 把上述数据代入式(5), 可以估算出透入深度 d 是微米量级, 通常涂层厚度为 0.3~1mm. 因此红外波在涂层中的透射率

$$\tau = 0. \quad (6)$$

涂层对红外波是不透明的介质. 把式(4)和式(6)的结果代入式(2)有

$$\epsilon + R = 1, \quad (7)$$

假设燃烧产生的辐射波入射到涂层界面的强度 I_i , 由式(7)则有

$$\epsilon I_i + R I_i = I_i,$$

式中 ϵI_i 是涂层自身辐射强度, $I_e = \epsilon I_i$; $R I_i$ 是涂层反射强度, $I_R = R I_i$, 所以

$$I_e + I_R = I_i. \quad (8)$$

I_e 和 I_R 之和等于入射涂层界面的辐射波强度, 当 I_e 增加时, 则 I_R 减小; 相反亦然.

反射波的频率恒等于入射波频率, 它是由燃料燃烧的辐射波所决定的, 燃料燃烧波谱是高温水汽、CO、CO₂、C 以及杂质氧化物等辐射波谱的迭加, 这个波谱与被加热工件(固体材料)的红外吸收波谱匹配不好, 所以加热效果并不高, 而且涂层反射波对工件的辐照角度亦影响加热效果.

涂层自身辐射波谱不仅与燃料燃烧波谱有关, 而且也依赖于涂层的成份和结构. 我们利用这种依赖关系可以设计涂层, 使其自身辐射波段既复盖燃烧辐射波段, 也复盖工件吸收波段. 当入射波入射时, 涂层分子有的受到共振激发, 有的产生受迫振动. 入射波激发的过程便是涂层分子吸收入射能量, 将其转化为热振动的过程. 涂层分子将发生振动和转动跃迁辐射、涂层电子也发生掺杂能级跃迁辐射, 这些都是红外辐射, 而且可以实现优化 1~5 μm 波段的辐射, 补偿耐火材料炉衬在 1~5 μm 波段发射率低的弱点. 理论分析和实践证明都支持我们选择了提高发射率, 降低反射率的强化加热途径; 以实现辐射波谱和吸收波谱匹配加热的高效节能效果.

2 红外涂层和烟气温度的关系

炉衬的红外涂料在红外全波段的平均发射率大于 0.9;因此涂层将很快吸收燃烧的辐射能量.燃料燃烧后的烟气很快释放能量、输运到炉尾时温度已下降很多.新进入炉内的空气在自然对流输运过程中,一部分因助燃而变成 CO 和 CO₂,还有高温水汽,它们是有极分子,容易与炉内红外辐射交换能量;另一部分是 N₂、O₂ 等无极分子,它们对红外辐射不敏感,随烟气排出时温度并不高.红外涂层发射率高,必然反射率低,导致炉衬反射波强度比较弱,而反射波频率与烟气的固有频率相耦合,所以烟气吸收涂层的辐射能量少,排烟的温度较低;相反,若涂层发射率低,则反射率高,和烟气固有频率相耦合的反射波强度较强,烟气吸收涂层辐射能量较多,因此排烟温度较高.我们研制的红外涂料 HES^[6]在轧钢加热炉中使用.经广东省能源监测中心现场测试,在没有涂层时,排烟温度为 376℃,每轧一吨钢排烟带走热量为 $3.208 \times 10^5 \text{kJ}$;有了 HES 涂料,排烟温度降为 362℃,每轧一吨钢排烟带走热量降为 $2.842 \times 10^5 \text{kJ}$.说明涂料可降低排烟温度,减少能耗.

3 红外涂层对炉表温度的影响

我们用 1kW 箱式电阻炉做了两次对比测试试验:第一次是炉门内侧表面不涂涂料;第二次是在炉门内侧表面涂上 HES-I 涂料,其它条件都相同.以 $T_1(t)$ 曲线和 $T_2(t)$ 曲线分别表示第一次和第二次测试试验中炉膛温度随时间的变化;以 $t_1(t)$ 曲线和 $t_2(t)$ 曲线分别表示第一次和第二次测试中,炉门表面温度随时间的变化.电炉控温的最高温度为 1000℃,实验曲线如图 1 所示.由图 1 可见, $T_1(t) < T_2(t)$, $t_1(t) < t_2(t)$;表示高发射率涂料涂在炉体内壁,炉内温度和炉表温度都比没有涂这种涂料时升温快.涂层对炉表温度影响表现在两个方面:一方面是涂层发射率高,则其吸收率高,升温快,增加了向炉表热传导的热流,所以炉表温度就高.另一方面,涂层对炉表有隔热作用.涂了一层涂料,增加了一层介质,多了一层界面效应,增加了光子传热和声子传热的热阻,这样便会降低炉表温度.通常,如果涂一层高发射率涂料,炉表温度会增加;如果涂一层低发射率涂料,炉表温度会降低;如果在炉衬上先烧结一层低发射率涂料,再烧结一层高发射率涂料,这种复合结构,既可以优化炉内辐射传热,提高加热效率,又可以降低炉表温度,减少热耗.但是,对于燃料加热炉,炉表散热只有排烟耗热的 1/4,所以只考虑用高发射率涂料来优化强化加热波谱匹配,提高升温速度,降低排烟温度.对于电阻炉,用红外涂料提高炉衬发射率,可提高升温速度,缩短加热时间,有 10%以上的节能效果.

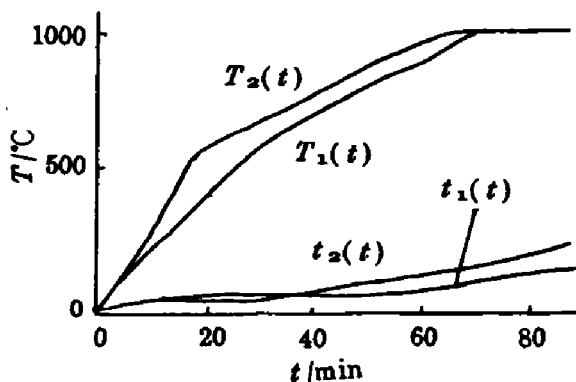


图 1 涂层对炉表温度的影响

Fig. 1 The effect of infrared coating on the temperature of outer surface of a furnace

通常,如果涂一层高发射率涂料,炉表温度会增加;如果涂一层低发射率涂料,炉表温度会降低;如果在炉衬上先烧结一层低发射率涂料,再烧结一层高发射率涂料,这种复合结构,既可以优化炉内辐射传热,提高加热效率,又可以降低炉表温度,减少热耗.但是,对于燃料加热炉,炉表散热只有排烟耗热的 1/4,所以只考虑用高发射率涂料来优化强化加热波谱匹配,提高升温速度,降低排烟温度.对于电阻炉,用红外涂料提高炉衬发射率,可提高升温速度,缩短加热时间,有 10%以上的节能效果.

4 红外涂料的节能评估

红外涂料在高温加热炉中的节能作用. 主要有三个方面:

(1) 提高炉衬 $1\sim 5\mu\text{m}$ 波段的发射率, 其潜在节能效率达 10% 以上.

(2) 优化强化红外加热波谱, 降低排烟温度, 提高加热效率.

(3) 提高炉内温度, 加速升温, 缩短加热时间, 使辐射场和温度场均匀, 促使燃料完全燃烧.

本文着重从理论上分析和证明提高 $1\sim 5\mu\text{m}$ 波段发射率的潜在节能效果. 我们依据图 2 和图 3 样品测试的数据, 利用计算机外推法程序进行计算, 求得 1000°C 高温下耐火砖在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 波段平均发射率为 $\bar{\epsilon}_1 = 0.55$, 在全波段的平均发射率为 $\epsilon_{1\infty} = 0.8$; HES-I 涂料在此波段平均发射率 $\bar{\epsilon}_2 = 0.8$, $\epsilon_{2\infty} = 0.9$; 钢锭被氧化后在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 波段平均发射率 $\bar{\epsilon}_3 = 0.65$; 从斯忒藩——玻尔兹曼定律可求得炉衬发射率由 $\bar{\epsilon}_1$ 提高到 $\bar{\epsilon}_2$ 而增加的加热效率为

$$\eta = \frac{\bar{\epsilon}_2 \bar{\epsilon}_3 - \bar{\epsilon}_1 \bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_1 \bar{\epsilon}_2 + \bar{\epsilon}_1 \bar{\epsilon}_3 - \bar{\epsilon}_1 \bar{\epsilon}_2 \bar{\epsilon}_3} = 15\% \quad (9)$$

从另一个理论角度计算这同样的问题.

首先计算炉衬单位面积、单位时间因发射率提高而增加的辐射能量为

$$\Delta W = W' - W, \quad (10)$$

式(10)中 W' 是涂层单位面积单位时间辐射能量, W 是没有涂层时炉衬单位面积, 单位时间辐射的能量:

$$W' = \int_0^{\infty} \epsilon_{2\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$$

$$W = \int_0^{\infty} \epsilon_{1\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$$

式中 $\epsilon_{1\lambda}$ 是耐火砖单色发射率, $\epsilon_{2\lambda}$ 是涂层单色发射率, $E_{b\lambda}$ 是黑体单色辐射强度.

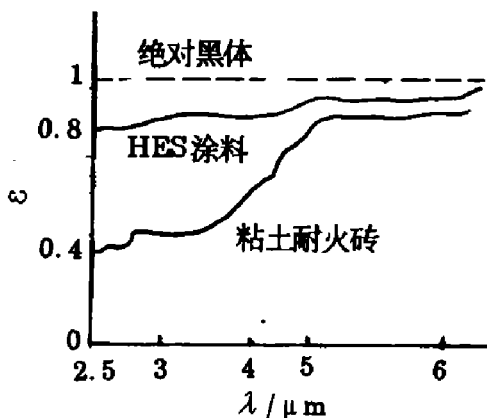


图 2 不同材料的发射率 ϵ
(测试温度: 800°C)

Fig. 2 Emissivity of different materials

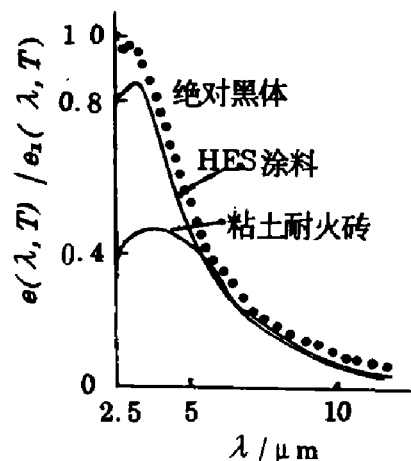


图 3 材料热辐射能谱
(测试温度: 800°C)

Fig. 3 Thermal radiation energy spectrum of different materials

$$\Delta W = W' - W = \int_0^{\infty} (\epsilon_{2\lambda} - \epsilon_{1\lambda}) E_{b\lambda} d\lambda.$$

从图 2 可见, 耐火砖发射率曲线与 HES 发射率曲线相差主要在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段, 大于 $5 \mu\text{m}$ 波段时, 两者大致相近, 相减为“0”; 小于 $1 \mu\text{m}$ 波段时, 从普朗克辐射定律知道, 红外波段的能量很小, $\int_0^{1\mu\text{m}} (\epsilon_{2\lambda} - \epsilon_{1\lambda}) E_{b\lambda} d\lambda = 0$, 所以,

$$\Delta W = \int_{1\mu\text{m}}^{5\mu\text{m}} (\epsilon_{2\lambda} - \epsilon_{1\lambda}) E_{b\lambda} d\lambda = (\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1) \int_{1\mu\text{m}}^{5\mu\text{m}} E_{b\lambda} d\lambda.$$

根据普朗克辐射理论计算, 在 1000°C 时绝对黑体全波段辐射能量分布在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的能量占 76%, 所以

$$\int_{1\mu\text{m}}^{5\mu\text{m}} E_{b\lambda} d\lambda = 0.76 \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda$$

$$\Delta W = 0.76(\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1) \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda.$$

又

$$\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4,$$

所以

$$\Delta W = 0.76(\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1) \sigma T^4 \quad (11)$$

式中 $\bar{\epsilon}_1 = 0.55$, $\bar{\epsilon}_2 = 0.8$, $T = 1273\text{K}$. σ 是斯忒藩—玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)$ 把上述数据代入式(11)可得到炉衬单位面积单位时间因发射率提高而增加辐射能量为

$$\Delta W = 3 \times 10^4 (\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

显然 $\frac{\Delta W}{W}$ 是单位面积炉衬因发射率提高 $\Delta\epsilon$ 而提高的加热效率, 但是, 燃料燃烧的辐射能量只是部分直接辐照到炉衬. 所以要乘上一个折算系数 (K_1), 另外, 投射到涂料上的入射波只是部份吸收. 亦要乘上一个折算系数 (K_2), 因此, 增加的加热效率为

$$\eta = K_1 K_2 \frac{\Delta W}{W}.$$

其中, 取 $K_1 = 4/5$, $K_2 = \epsilon_{2\infty} = 0.9$, 代入上式计算可得

$$\eta = 4/5 \times 0.9 \times \frac{0.76(\bar{\epsilon}_1 - \bar{\epsilon}_2) \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{1\lambda} E_{b\lambda} d\lambda} = 14\%.$$

由此得到结论, 在高温加热炉中, 用高发射率红外涂料提高炉衬 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的平均发射率为 0.25, 其潜在节能效率在 10% 以上. 我们研制的 HES 涂料在多种加热炉 (轧钢加热炉, 电阻炉、锅炉等) 中试用都获得了预期的效果. 它对节能具有重要的实际意义.

参考文献

- 1 C R C (Europe), *Metallurgia*. Feb. 1987, 75
- 2 Ellison D G. *J Institute of Energy*, Dec. 1987. 155~167
- 3 曾庆衿, *红外与毫米波学报*. 1991. 10(3):227~232
- 4 Incropera F P, Dewitt D P, *et al. Fundamentals of Heat Transfer* Frank P. Incropera & David P. Dewitt John Wiley & Sons, Inc. 1981. 陆大有等译. *传热基础*. 北京:宇航出版社, 1987, 383~387
- 5 郭硕鸿. *电动力学*. 北京:高等教育出版社, 1990, 138
- 6 曾庆衿, 发明专利, 专利号 ZL90101683. 7

EVALUATION OF ENERGY SAVING EFFECT OF INFRARED REFRACTORY COATING

Zeng Qingjin

(Department of Physics, Guangzhou Teacher's College, Guangzhou, Guangdong 510400, China)

Abstract The energy saving mechanism of the infrared radiation coating was discussed. The effect of the refractory coating on the temperature of the exit gas from fuel heating furnace and also the relationship between coating and the temperature of the furnace outer surface were analyzed. The effect of energy saving by means of the infrared coating was evaluated in both theory and practice.

Key words infrared coating, energy saving, infrared radiation.