

物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应

雷先明¹, 肖友刚²

(1. 邵阳学院机械与能源工程系, 湖南邵阳 422004; 2. 中南大学轨道交通安全重点实验室, 长沙 410075)

[摘要] 根据回转窑内物料颗粒的运动特点, 推导了颗粒团在贴壁运动过程中的非稳态导热系数及界面处的接触传热系数, 进而得出了物料与封盖窑壁间的换热系数; 结合已有研究成果, 建立了回转窑的传热数学模型。计算表明, 未考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应时, 物料温度偏低; 温度越高, 强化效应对物料温度的影响越大; 考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应, 有利于提高回转窑煅烧熟料的质量和热效率。

[关键词] 物料; 封盖; 传热过程; 强化效应

[中图分类号] TK124 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0039-06

滚落状态是物料颗粒在回转窑内的理想运动状态。在这种状态下, 料层表面颗粒从料层高端源源不断地滚落至低端, 并形成一稳定的活动层, 活动层内是物料混合的主要场所。在下部固定层, 物料随窑壁一起旋转, 不产生轴向位移^[1], 即相对于窑壁, 物料静止不动。当这层物料颗粒运动到整个颗粒群的顶端时, 才沿着倾斜面向下滚动, 随即发生混合与分离。由于窑体旋转, 窑壁内表面不断地与热烟气及温度相对比较低的生料接触, 在窑壁中依次发生蓄热、放热过程。这种存贮-释放式的传热过程强化了窑壁与物料之间的热交换。虽然通过研究烟气、窑壁、物料间的对流传热或辐射传热已取得了一系列成果^[2,3], 但这些成果大都没有考虑窑壁内表面与物料间歇接触对回转窑传热过程的强化效应。因此, 考虑窑壁内表面与物料间歇接触对回转窑传热过程的强化效应, 并结合其他研究成果, 建立回转窑的传热数学模型, 得出回转窑温度场的分布状况, 有利于提高回转窑的热效率及产量、质量。

窑体周向和轴向的导热对传热的影响很小, 仅

占总传热量的2%^[2], 可忽略不计。在窑体旋转作用下, 可以假定窑内物料充分混合, 在各个截面, 物料、烟气、窑壁为温度均匀的灰体。这样, 回转窑任一截面的换热过程可从五方面描述: 封盖窑壁与物料间的换热; 敞开窑壁与物料间的辐射换热; 敞开窑壁与烟气之间的对流及辐射换热; 物料与烟气之间的对流及辐射换热; 窑外壁与周围空气的对流及辐射换热。

1 封盖窑壁与物料间的换热系数

由于窑体旋转, 固定层内的物料颗粒群沿着环形区贴壁运动, 运动一定的距离后离开壁面, 又不断有新的颗粒群进入固定层, 沿环形区贴壁运动。因此, 窑壁内表面不断地与热烟气及温度相对比较低的生料接触, 窑壁和物料处于一种间歇接触状态, 封盖窑壁与物料间的换热是4种传热过程的综合: 颗粒团在贴壁运动过程中的非稳态导热; 界面处的接触传热; 界面处的辐射换热; 物料中由于颗粒相对运动引起的热对流。

窑壁、物料和烟气的温度分布状况及窑壁、物

[收稿日期] 2006-02-13; **修回日期** 2006-03-27

[基金项目] 中国博士后科学基金资助项目(2005038227); 湖南省自然科学基金资助项目(04JJ3050)

[作者简介] 雷先明(1964-), 男, 湖南武冈市人, 硕士, 邵阳学院副教授

料颗粒的几何形状都将影响封盖窑壁与物料间的换热。为简化计算过程,假设:

·壁面处颗粒间隙内的气体沿壁面的每个位置都是均匀的,它只与颗粒形状、大小及窑壁的几何形状和微观不平度有关;

·在颗粒间隙中的气体随着颗粒的流动而被迫流动,气体与颗粒间均无相对运动;

·物料颗粒为球形, Biot 数足够小;

·内壁和物料表面为灰体表面,烟气的灰体。

在简化的完全混合情况下,物料中由于颗粒相对运动引起的热对流可以忽略。将物料的非稳态导热和界面处的接触传热视为封盖窑壁与物料间的对流换热;则:

$$h_{cb-cw} = h_{cb-cw}^C + h_{cb-cw}^R \quad (1)$$

式中 h_{cb-cw}^C , h_{cb-cw}^R 分别为封盖窑壁与物料间的对流换热系数和辐射换热系数,下标 cb 表示封盖的物料表面, cw 表示封盖窑壁。

1.1 物料的非稳态导热系数

在上述假设的基础上,根据物料的非稳态导热模型(见图1),得出物料在贴壁运动过程中的非稳态导热方程及定解条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha_b \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

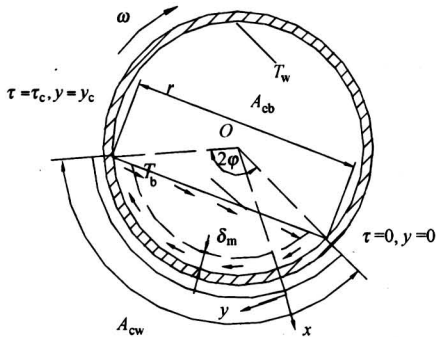


图1 物料的非稳态导热模型

Fig.1 Transient conduction model of material

边界条件为:

$$T = T_w, x = 0 \text{ 时} \quad (3)$$

$$T = T_b, x = \delta_m \text{ 时} \quad (4)$$

初始条件为:

$$T = T_b \quad (5)$$

式中坐标 x 沿窑体截面径向,坐标原点在窑壁内表面上; τ 为时间; α_b 为物料的有效热扩散率, $\alpha_b = \lambda_b / \rho_b c_{pb}$, λ_b , ρ_b , c_{pb} 分别为物料的导热系

数,密度和比热容; δ_m 为物料的表面层厚度,由物料的渗流传热深度确定。

式(2)至式(5)是一维非稳态导热问题,采用分离变量法,可得该问题的分析解为:

$$T(x, \tau) = T_w - \frac{4(T_w - T_b)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp\left\{-\left[\frac{(2n-1)\pi}{2\delta_m}\right]^2 \alpha_b \tau\right\} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{2\delta_m} \quad (6)$$

窑壁处的热流密度为:

$$q_w = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{2\lambda_b(T_w - T_b)}{\delta_m} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left\{-\left[\frac{(2n-1)\pi}{2\delta_m}\right]^2 \alpha_b \tau\right\} \quad (7)$$

在 x 方向上的平均温度为:

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\delta_m} T(x, \tau) dx}{\delta_m} = T_w + \frac{8(T_w - T_b)}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left\{-\left[\frac{(2n-1)\pi}{2\delta_m}\right]^2 \alpha_b \tau\right\} \quad (8)$$

由此可得由物料非稳态导热引起的传热系数为:

$$h_c = \frac{q_w}{T_w - \bar{T}} = \frac{\lambda_b \pi^2}{4\delta_m} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left\{-\left[\frac{(2n-1)\pi}{2\delta_m}\right]^2 \alpha_b \tau\right\}}{\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left\{-\left[\frac{(2n-1)\pi}{2\delta_m}\right]^2 \alpha_b \tau\right\} / (2n-1)^2} \quad (9)$$

回转窑内物料的渗流传热深度 δ_m 通常较小。根据级数的收敛性,化简式(9),可得物料非稳态导热系数的近似解为:

$$h_c = \sqrt{\frac{\rho_b c_{pb} \lambda_b}{\pi \tau}} \quad (10)$$

1.2 封盖窑壁与物料间的接触传热系数

由于窑壁与颗粒表面微观不平度的影响,在壁面和近壁颗粒间存在着一层厚度不均匀的气膜。在研究物料与固体壁面间的传热时,可以认为壁面传热热阻是由这层气膜所致。由于该气膜的导热能力相对于颗粒系统的导热能力小很多,壁面的传热系数主要取决于该气膜的厚度。

将热颗粒传热单元进行分割,计算出不同位置处的固体颗粒通过缝隙气膜的导热热量。如图2所示,颗粒在近壁面某一位置时,颗粒表面的传热单元可根据球截面半径 r 进行分割,各单元的导热热量可表示为^[4]:

$$dq = \frac{\lambda_g}{\delta + d} (T_w - T_b) 2\pi r dr \quad (11)$$

式中 $d = R_p - \sqrt{R_p^2 - r^2}$, R_p 为颗粒直径, 取物料颗粒的平均值; δ 为表面粗糙度; λ_g 为烟气导热系数。

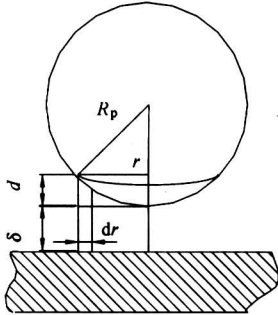


图 2 窑壁与颗粒间的接触传热
Fig.2 Contact heat transfer between kiln wall and granule

对式 (11) 从 $0-R_p$ 积分, 得颗粒的导热量为:

$$q = 2\pi\lambda_g R_p (T_w - T_b) [(\delta/R_p + 1)\ln(R_p/\delta + 1) - 1] \quad (12)$$

当 δ 趋于 0 时, 式 (12) 中颗粒与壁面通过气膜的导热量将趋于无限大, 这是不合理的。实际上若光滑颗粒与壁面相接触, 必须考虑 Smoluchowski 效应, 这样式 (12) 可写成:

$$q = 2\pi\lambda_g R_p (T_w - T_b) \cdot \left[\left(\frac{\delta + \gamma}{R_p} + 1 \right) \ln \left(\frac{R_p}{\delta + \gamma} + 1 \right) - 1 \right] \quad (13)$$

式中 γ 为气体分子平均自由程修正值。

由此可得物料与窑壁的接触传热系数为:

$$h_p = \frac{q}{\pi R_p^2 (T_w - T_b)} = \frac{2\lambda_g}{R_p} \left[\left(\frac{\delta + \gamma}{R_p} + 1 \right) \ln \left(\frac{R_p}{\delta + \gamma} + 1 \right) - 1 \right] \quad (14)$$

1.3 封盖窑壁与物料间的对流换热系数

封盖窑壁与物料间的对流换热包括物料的非稳态导热和界面处的接触传热两部分。封盖窑壁与物料的对流传热系数可表示为:

$$h_{cb-cw}^c = \frac{1}{1/h_c + 1/h_p} \quad (15)$$

将式 (10)、式 (14) 代入式 (15), 并在接触时间 τ_c 内对 h_c 积分, 可得到物料与封盖窑壁间的对流传热系数:

$$h_{cb-cw}^c = 2h_p [\tau_c' - \ln(1 + \tau_c')] / (\tau_c')^2 \quad (16)$$

式中 $\tau_c' = h_p \sqrt{\pi \tau_c / (\rho_b c_p \lambda_b)}$, τ_c 为物料与窑壁的接触时间, 也就是单个颗粒经过固定层的时间, 由于固定层内物料相对于窑壁静止不动, 因而 $\tau_c = 2\varphi/\omega$, φ 为物料填充角的一半 (见图 1), ω 为窑体的旋转速度。

1.4 封盖窑壁与物料之间的辐射传热系数

与物料及窑壁的长度相比, 物料与窑壁的间距很小, 可以认为物料与封盖窑壁是相互平行的, 而且封盖窑壁与物料之间的气膜很薄, 气膜层可视为透明, 同时将物料与窑壁视为灰体, 则基于颗粒群的多相反射, 可推出物料吸收率的计算公式为^[5]:

$$\epsilon_b = 0.5(1 + \epsilon_p) \quad (17)$$

物料与封盖窑壁间的辐射传热系数表示为

$$h_{cb-cw}^c = \frac{\sigma \epsilon_b \epsilon_w (T_b^2 + T_w^2)(T_b + T_w)}{(\epsilon_b + \epsilon_w - \epsilon_g \epsilon_w)} \quad (18)$$

式中 σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, ϵ_w 为窑壁吸收率。

2 敞开窑壁、物料及烟气的换热系数

除了烟气流速和窑体结构尺寸的影响外, 窑体转速和物料填充率对窑内对流换热系数也有很大影响。烟气与物料的对流换热系数 h_{g-cb}^c 及烟气与敞开窑壁间的对流换热系数 h_{g-cw}^c 采用如下计算公式^[6]:

$$h_{g-cb}^c = 0.46\lambda_g Re_D^{0.535} Re_w^{0.104} \eta^{-0.341} / D_e$$

$$h_{g-cw}^c = 1.54\lambda_g Re_D^{0.575} Re_w^{-0.292} / D_e \quad (19)$$

$$Re_D = \rho_g \nu_g D_e / \mu_g, Re_w = \rho_g \omega D_e^2 / \mu_g$$

式中 $D_e = D [\pi - \varphi + \sin(2\varphi)] / (\pi - \varphi + \sin\varphi)$ 。 Re_D 为窑轴向雷诺数, Re_w 为窑回转雷诺数, ρ_g , ν_g , μ_g , λ_g 分别为烟气的密度、速度、粘度及导热系数。

式 (20) 的适用范围为; $1600 < Re_D < 7800$, $20 < Re_w < 800$ 。

回转窑轴向某一区域的热辐射受其他轴向区域的影响很小, 因此, 烟气、窑壁、物料的轴向温度梯度对回转窑横截面辐射传热的影响可以忽略, 可将回转窑横截面作为一个封闭系统处理。窑内辐射换热可简化为封闭腔内吸收性烟气与灰体表面间的辐射换热。根据辐射传热的网络模拟法, 可得敞开窑壁、物料及烟气的辐射传热系数分别为^[2]:

$$h_{g-cw}^R = \epsilon_g \Psi_{wg} (E_g - J_w) / (T_g - T_w)$$

$$h_{g-cb}^R = \epsilon_g \Psi_{bg} (E_g - J_b) / (T_g - T_b) \quad (20)$$

$$h_{cw-cb}^R = (1 - \epsilon_g) \Psi_{bw} (J_{cw} - J_b) / (T_w - T_b)$$

式中 J 为有效辐射, E 为发射强度。 Ψ_{wb} , Ψ_{bg} , Ψ_{wg} 分别为敞开窑壁对物料的辐射角系数、物料对烟气的角系数、敞开窑壁对烟气的角系数, 且有 $\Psi_{wb} = A_{cb}/A_{cw}$, $\Psi_{bg} = 1$, $\Psi_{wg} = 1$ 。 A_{cw} , A_{cb} 为单位窑壁上敞开窑壁及物料表面积, 下标 ew 表示敞开窑壁, eb 表示敞开物料表面。

敞开窑壁、物料表面及烟气的换热系数为:

$$\begin{aligned} h_{g-cw} &= h_{g-cw}^R + h_{g-cw}^C \\ h_{g-cb} &= h_{g-cb}^R + h_{g-cb}^C \end{aligned} \quad (21)$$

3 窑外壁的散热系数

窑壁外表面向周围环境的散热包括辐射散射和对流散热, 即:

$$h_{sh-a} = h_{sh-a}^R + h_{sh-a}^C \quad (22)$$

式中 h_{sh-a}^R , h_{sh-a}^C 分别为窑壁外表面与周围环境间的辐射散射系数和对流散热系数^[2]。 $h_{sh-a}^R = \delta \epsilon (T_{ow}^2 + T_0^2) (T_{ow} + T_0)$, T_{ow} , T_0 为窑壁外表面及周围环境温度, A_{ow} 为单位窑壁上窑外壁的散热面积。

$$h_{sh-a}^C = 0.11 \lambda_a [0.5 Re_w^2 + Gr] Pr^{0.35} / D_{sh} \quad (23)$$

式中 λ_a 为大气导热系数, Gr 为格拉晓夫数, Pr 为普朗特数, D_{sh} 为窑壁外径。

4 回转窑轴向稳态传热数学模型

由于窑体旋转, 沿窑体长度方向的各个截面, 物料、烟气、窑壁可视为温度均匀的灰体; 周向和径向传热可忽略; 并假定窑体进、出口端面绝热, 窑壁无热量积累, 则稳定状态下, 回转窑内烟气、物料的温度变化率方程为:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \dot{m}_{kg} c_{p_{kg}} \frac{dT_g}{dx} &= h_{g-cb} A_{cb} (T_g - T_b) + \\ &h_{g-cw} A_{cw} (T_g - T_w) + \sum_{j=1}^m \Delta H_{jg} R_{jg}, \\ \sum_{i=1}^l \dot{m}_{ib} c_{p_{ib}} \frac{dT_b}{dx} &= h_{g-cb} A_{cb} (T_b - T_g) + h_{cb-cw}^R A_{cw} (T_b - \\ &T_w) + h_{cb-cw} A_{cw} (T_b - T_w) + \sum_{u=1}^v \Delta H_{ub} R_{ub} \end{aligned} \quad (24)$$

$h_{sh-a} A_w (T_{sh} - T_a) = h_{g-cw} A_{cw} (T_g - T_w) + h_{cb-cw}^R A_{cw} (T_b - T_w) + h_{cb-cw} A_{cw} (T_b - T_w)$, 式中 c_p 为比热容, ΔH , R 为反应热及反应速率, A_w 为单位窑壁上窑壁的外表面面积。

5 计算结果及分析

中铝河南分公司 2 号回转窑直径为 4 m, 长 100 m, 转速 1.83 r/min。该窑的主要热工操作参数为: 熟料产量 54 t/h; 生料浆入窑体积流量 53.6 m³/h, 水份含量 36%, 入窑温度 53 °C; 一次风风量 4 475.4 m³/h, 风温 27 °C; 二次风风量 42 467.6 m³/h, 风温 569 °C; 窑头喷煤量 6 641.8 kg/h; 环境温度 25 °C。针对是否考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应两种情况, 应用四阶龙格-库塔法对 2 号窑的传热过程进行仿真, 可得出如下规律。

图 3 表示窑壁外表面温度的理论计算结果和实测温度。从图中可以看出, 考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应时, 计算温度与实测温度比较接近; 不考虑强化效应时, 计算温度较实测值明显偏低, 说明考虑强化效应, 更真实地反映了回转窑的热交换情况, 应用在此基础上建立的回转窑传热数学模型, 指导回转窑的热工操作, 能有效提高回转窑的产量和质量。虽然窑壁内表面温度最高的区段在 6.1 ~ 10.1 m 之间 (见图 4), 但该区段砌有厚 270 mm 的耐火砖, 粘附着厚 300 mm 的窑皮, 因而该区段窑壁外表面温度反而不高; 在 25 ~ 50 m 之间的区段, 窑壁内表面温度稍低, 但由于该区段无窑皮粘附, 因而窑壁外表面的温度反而最高。运行中, 应设法使该区段窑壁的外表面温度控制在 300 °C 以内; 超过 350 °C 应立即采取措施降温。

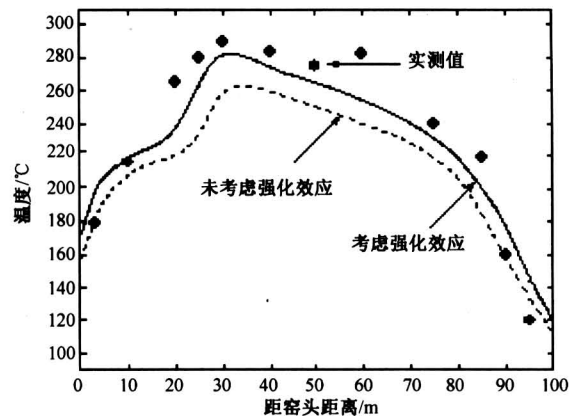


图 3 窑壁外表面温度理论计算结果与实测值

Fig.3 Comparison of computational results and experiment results of outer kiln wall temperature

在是否考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热

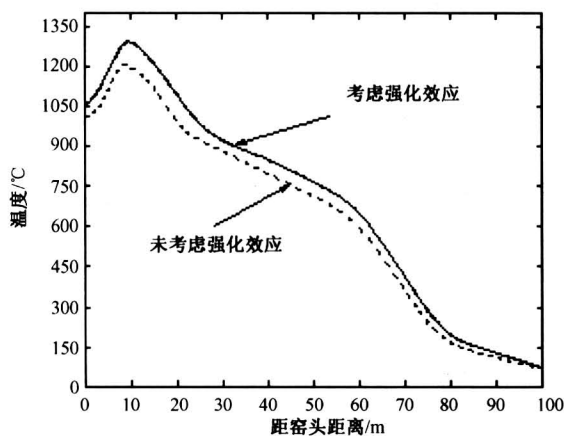


图 4 是否考虑强化效应时物料的轴向温度分布
Fig.4 Comparison of axial temperature distribution of material whether enhancement effect is considered or not

过程的强化效应的两种情况下，物料的轴向温度分布规律基本相同（见图 4）：在 81~100 m 区段，由窑尾喷入的物料主要以对流方式进行热交换，物料吸收的热量主要用于水分蒸发，该区段物料的温度增幅较小。在 57~81 m 区段，主要进行烟气与物料之间的热交换，该段物料温度逐渐升高，且升温速率基本趋于常数。在 19~57 m 区段，物料从热烟气吸收的热量主要用于物料分解，该段物料温度上升比较缓慢。在 6~19 m 区段，物料的温度最高，且对应物料的反应放热带和煤粉燃烧带，经该段后，物料由生料变成熟料。在正常情况下，该段窑衬应挂结一层 300 mm 左右的窑皮。若窑皮脱落，其裸露的耐火砖表面温度将超过 1 400 °C，从而使窑壁外表面温度大幅升高，不仅增加散热损失，还会烧损窑衬和筒体钢板，缩短回转窑的使用寿命。在 0~6 m 区段，熟料温度高于烟气温度的影响，热量由熟料传给烟气，使烟气温度升高，熟料温度降低。因此，物料与窑壁的间歇接触只是强化了回转窑内的热交换。

从图 4 中还可看出，物料温度越高，强化效应对物料温度的影响越大，这是由于物料与封盖窑壁间的对流传热受温度的影响很小，而辐射传热与温度的 4 次方成正比。考虑强化效应时物料的最高温度为 1 302 °C，未考虑强化效应时物料的最高温度为 1 216 °C，两者相差 86 °C，且未考虑强化效应时物料达到最高温度所需的区段向后顺延了 2 m，会

影响熟料的烧结过程。在制定回转窑的热工操作制度时，若不考虑强化效应，易造成物料过烧，也会造成能源的无端耗费，影响回转窑的质量和热效率。

6 结论

推导了颗粒团在贴壁运动过程中的非稳态导热系数及界面处的接触传热系数，得出了物料与封盖窑壁间的换热系数，建立了回转窑传热过程的数学模型。通过仿真研究，得出如下结论：

1) 考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应时，窑壁外表面的理论计算温度与实测温度更加接近，说明考虑这种强化效应建立的回转窑传热数学模型更接近实际。

2) 未考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应时，物料温度偏低，但并不影响物料温度的分布规律。温度越高，强化效应对物料温度的影响越大。

3) 在制定回转窑的热工操作制度时，应考虑物料与窑壁间歇接触对回转窑传热过程的强化效应，以提高回转窑煅烧熟料的质量和热效率。

参考文献

- [1] 严建华,李水清,黄景涛,等. 回转窑内 MSW 轴向传输和扩散的数学模型和仿真[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3):380~383
- [2] Gorog J P, Adams T N, Brimacombe J K. Regenerative heat transfer in rotary kilns [J]. Metallurgical Transactions B, 1982, 13B(6): 153~163
- [3] Boateng A A, Barr P V. Thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(10): 2131~2147
- [4] Schlunder E U. Particle heat transfer [A]. Proceedings of the 7th of the International Heat Transfer Conference [C]. Munchen: Hemisphere Publishing Corporation, 1982. 195~211
- [5] Basu P, Nag P K. Heat transfer to walls of a circulating fluidized bed furnace [J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(1): 1~26
- [6] Tscheng S H, Watkinson A P. Convective heat transfer in a rotary kiln [J]. Can J Chem Eng, 1979, 57(6): 433~443

Enhancement Effect Towards Heat Transfer of Rotary Kiln by Intermittent Contact Between Material and Kiln Wall

Lei Xianming¹, Xiao Yougang²

(1. *Department of Machine and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422004, China*; 2. *Key Lab of Railway and Traffic Safety, Central South University, Changsha 410075, China*)

[**Abstract**] In rotary kiln cluster moves against kiln wall. According to this feature, transient thermal conductivity of cluster and contact heat transfer coefficient of boundary between cluster and kiln wall are deduced, then heat transfer coefficient between material and covered wall is obtained. Combined with other research harvests, the heat transfer model of rotary kiln is established. The results can be shown as follows: the temperature of material is lower when the enhancement effect towards heat transfer of rotary kiln by intermittent contact between material and kiln wall has been ignored; the higher the temperature, the greater the influence of enhancement effect on material temperature; it is beneficial to improving the quality of clinker and thermal efficiency of rotary kiln when the enhancement effect has been considered.

[**Key words**] material; covered wall; heat transfer; enhancement effect

(cont. from p.32)

The Analysis on Output-input Ratio of Artificial Supplementary Energy in Agro-eco-engineering

Bian Yousheng¹, Liu Yingkun², Bian Jing³

(1. *Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China*;
2. *Henan Xinxian Municipal Environmental Protection Bureau, Xinxian, Henan 465550, China*;
3. *Beijing statistical Bureau, Beijing 100054, China*)

[**Abstract**] The output-input ratio of the artificial Supplementary energy reflects the function and productivity of an agro-eco-engineering as a whole. It is one of the important indicators measuring the effects of an agro-eco-engineer. The output-input ratio for artificial supplementary energy of Henan Xinxian's 10 peasant families has been calculated successively for three years.

[**Key words**] agro-eco-engineering; output-input ratio of energy