

熔铸 Al_2O_3 系耐火材料退火过程数学模型

成 洁¹⁾ 李宏光²⁾ 王廷籍¹⁾

(1) 中国建筑材料科学研究院, 北京 100024; 2) 北京化工大学自动化系, 北京 100029)

摘 要: 通过对熔铸 Al_2O_3 系耐火材料保温退火过程的机理分析, 建立了该过程的数学模型。仿真研究结果表明, 该模型与工业过程相吻合, 能够用于退火过程温度分布及其内在规律的分析。

关键词: 熔铸 Al_2O_3 ; 退火; 数学模型

中图分类号: O 242. 1

引 言

熔铸 Al_2O_3 系耐火材料是玻璃窑用关键筑炉材料, 其保温退火是该材料生产过程中重要的工艺环节, 直接影响制品最终质量。熔铸材料生产成本低、耗时长, 不适于频繁进行现场实验。采用机理分析方法建立熔铸 Al_2O_3 系耐火材料退火过程的数学模型, 进而用可测操作参数估计铸件在冷却过程中的热状态, 具有重要的理论意义和工程实用价值。

本文分析了熔铸 Al_2O_3 系耐火材料退火过程的应力形成机理, 针对几何和物理特点进行合理假设, 采用机理方法建立系统的数学模型。在对模型进行简化求解的基础上, 进行了计算机仿真实验分析, 为合理选择铸模、保温材料及保温方式和退火工艺提供依据。

1 退火过程机理

熔铸 Al_2O_3 退火系统如图 1 所示。熔化的料液由电弧炉浇铸至预制的铸模, 在保温箱中进行退火降温, 保温箱依据铸件不同形状尺寸采用不同保温方式和导热系数的保温材料, 铸模内料液在保温箱内成型、固化和冷却。

熔铸 Al_2O_3 在凝固过程中因应力和应变形成开裂是造成铸件报废的主要原因, 其应力按形成原因可分为热应力、相变应力和机械阻碍应力三种, 品

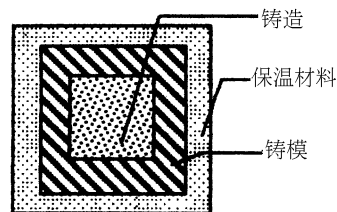


图 1 退火系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of annealing system

种材质不同, 所形成的应力种类及大小有所不同, 对于熔铸 Al_2O_3 系耐火材料来说在冷却降温过程中存在热应力。

2 模型方程

熔铸 Al_2O_3 的退火过程数学模型分为两部分, 一是“铸件-模具”退火系统, 简称 CM 系统, 二是“铸件-铸模-保温层-退火层”退火系统, 简称 CMIA 系统, 它较 CM 更接近于实际情况。根据熔铸 Al_2O_3 退火过程分析, 可以进行如下模型假设:

- (1) 仅考虑二维系统的模拟, 这并不会使所得结果失去普遍意义^[1];
- (2) 根据退火系统在空间(几何)和物理上的对称性, 只对其顶部或底部四分之一的部位进行分析研究;
- (3) 向铸模内浇铸是在瞬间进行的, 熔融的 Al_2O_3 料液初始温度是均匀一致的;
- (4) 铸件一开始处于零应力状态;
- (5) 退火系统介质是各向同性的。

退火过程是一个分布参数系统, 状态变量不仅是时间的函数, 而且是空间坐标的函数。基于模型基本假设, 其内部不稳定导热可由二维不稳定导热

收稿日期: 1999-05-28

基金项目: 中国建筑材料科学研究院科技基金资助项目

第一作者: 女, 1970 年生, 工学硕士

方程予以描述:

$$k \left(\frac{\partial^2 t(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y)}{\partial y^2} \right) = c \frac{\partial t(x, y)}{\partial \tau}$$

对于退火系统复合边界条件的确定, 可以借鉴金属铸造中钢锭与铸模之间的传热的边界条件形式^[2,3]。CM 系统边界条件为:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_r(t_r - t_{m1})$$

$$(x = x_r, 0 \leq y \leq y_r; y = y_r, 0 \leq x \leq x_r)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_{\text{ext}}(t_{m2} - t)$$

$$(x = x_m, 0 \leq y \leq y_m; y = y_m, 0 \leq x \leq x_m)$$

CMIA 系统的边界条件可用下式表示:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_r(t_r - t_{m1})$$

$$(x = x_r, 0 \leq y \leq y_r; y = y_r, 0 \leq x \leq x_r)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_p(t_{m2} - t_{i1})$$

$$(x = x_m, 0 \leq y \leq y_m; y = y_m, 0 \leq x \leq x_m)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_q(t_{i2} - t_{a1})$$

$$(x = x_{i1}, 0 \leq y \leq y_{i1}; y = y_{i1}, 0 \leq x \leq x_{i1})$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = h_{\text{ext}}(t_{a2} - t)$$

$$(x = x_{a2}, 0 \leq y \leq y_{a2}; y = y_{a2}, 0 \leq x \leq x_{a2})$$

由于研究集中于系统四分之一的部位, 因此, 无论是 CM 系统还是 CMIA 系统都存在一个穿过垂直中心平面的边界, 该边界规定为绝热边界, 边界条件为:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n} = 0$$

3 模型方程离散化

为进行计算机求解, 必须对微分方程进行离散化, 得到温度分布的状态方程:

$$t_{n,m}(k+1) = F_x[t_{n+1,m}(k) + t_{n-1,m}(k)] + F_y[t_{n,m+1}(k) + t_{n,m-1}(k)] + [1 - 2(F_x + F_y)]t_{n,m}(k)$$

应用热平衡法^[4]可以直接获得复合边界温度的差分方程, 以下以 x 方向为例, 给出典型的边界方程。

(1) 铸件 x, y 方向中轴线上的边界点

$$t_{n,m}(k+1) = 2F_x t_{n-1,m}(k) + 2H_x t_{m1}(k) + 2F_y t_{n,m+1}(k) + [1 - 2(F_x + H_x + F_y)]t_{n,m}(k)$$

(2) 铸件表面边界点

$$t_{n,m}(k+1) = 2F_x t_{n-1,m}(k) + 2H_x t_{m1}(k) + F_y t_{n,m-1}(k) + F_y t_{n,m+1}(k) + [1 - 2(F_x + H_x + F_y)]t_{n,m}(k)$$

(3) 铸件拐角

$$t_{n,m}(k+1) = 2F_x t_{n-1,m}(k) + 2H_x t_{m1}(k) + 2F_y t_{n,m-1}(k) + 2H_y t_{m1}(k) + [1 - 2(F_x + H_x + F_y + H_y)]t_{n,m}(k)$$

其中, F_x, F_y, H_x, H_y 的取值为:

$$F_x = \frac{k_r}{r c_r (x)^2}; F_y = \frac{k_r}{r c_r (y)^2};$$

$$H_x = \frac{h_r}{r c_r x}; H_y = \frac{h_r}{r c_r y^2}。$$

4 仿真研究

鉴于篇幅所限, 仅给出 CM 系统数学模型部分仿真分析结论。

4.1 铸件温度梯度的变化规律

图 2 和图 3 给出了铸件中心和边角温度梯度的动态响应以及不同区域温度梯度的分布。可以看出, 较大的温度梯度发生在退火初期, 靠近铸件边角的地方, 温度梯度峰出现的时间早、峰值大, 靠近铸件边角的地方, 温度梯度峰向低温区扩展。这说明出现裂纹的机率较大。

4.2 几何参数对温度梯度的影响

图 4 的模具厚度比分别为 $x_m/y_m = 1, 0.667, 0.817$ 时铸件内部温度梯度分布曲线。除高温区的主峰外, 在低于 1580 的温度区还出现一个次峰,

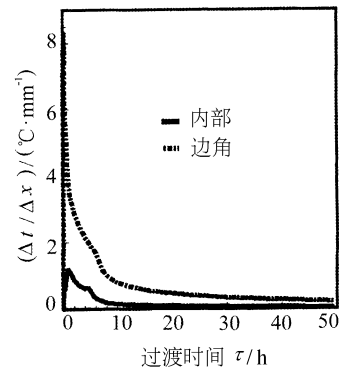


图 2 铸件中心和边角温度梯度的动态响应

Fig. 2 Temperature gradient near corner and inside cast as a function of elapsed time

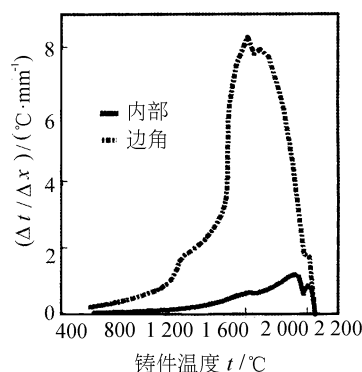


图3 不同温度区铸件中心和边角温度梯度分布

Fig. 3 Temperature gradient near corner and inside cast as a function of temperature

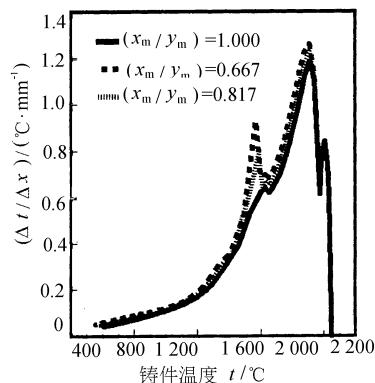
图4 x_m/y_m 对铸件内温度梯度的影响

Fig. 4 The effect of x_m/y_m on temperature gradient in cast

若 x_m/y_m 适当, 次峰可以显著减小, 甚至消逝。当 x_m/y_m 为 0.667 时, 主、次峰均较高; x_m/y_m 为 0.817 时, 次峰幅度降低较大, 但仍然存在; 当 x_m/y_m 接近 1 时, 主峰高度降低, 次峰基本消失。因此, x_m/y_m 的合理选择对保证铸件安全度过危险温度区域, 降低产生裂纹的可能性非常重要。从图 5 可见, 当 x_m/y_m 小于 0.78 时, 次峰数值较大, 当 x_m/y_m 大于 0.78 时, 次峰处于较低位置。因此, 只有在 x_m/y_m 大于 0.78 时, 才有可能降低或消除危险的次峰。

4.3 模具层保温材料的影响

图 6 给出采用不同保温材料的铸件宽面中心的温度 t_c 动态响应。可见, 导热系数较小的保温材料, 其降温速率也较小。

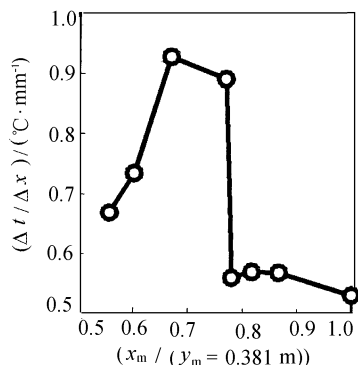
图5 铸件内温度梯度与 x_m/y_m 的关系

Fig. 5 Temperature gradient in cast as a function of x_m/y_m

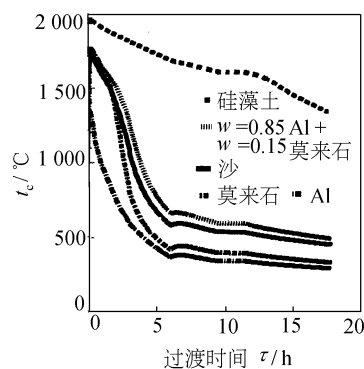


图6 保温层材质对铸件宽面中心温度的影响

Fig. 6 Centric temperature on broad face of cast as a function of elapsed time

图 7 为保温层材质对铸件边角部位的温度梯度的影响, 可以看出, 无论使用何种材料进行保温,

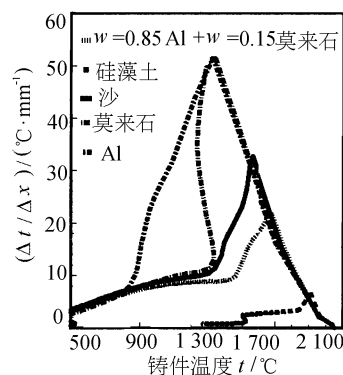


图7 保温层材质对铸件边角温度梯度的影响

Fig. 7 Temperature gradient on corner of cast as a function of temperature

铸件边角部位较大的温度梯度峰所处的温度区域均在 1310 ~ 1580 之间，这个温度区间是熔铸 Al_2O_3 系耐火材料退火时应注意的危险温度范围。

5 结 论

目前在国内外公开发表的文献中，尚未见到关于熔铸 Al_2O_3 退火过程数学模型的研究报道。笔者借鉴了相关领域的研究工作，在方法上进行了有效的改进，避免了模型过于复杂和脱离生产实际的缺点，同时大大减少计算量，并且对多层复合导热问题提出了新的计算方法，解决了复合层多边界条件的确定问题。仿真研究结果表明，该模型与工业过程基本吻合，能够用于退火过程温度分布及其影响规律的分析。

符 号 说 明

c ——比热容
 c_r ——铸件材料比热容
 h_{ext} ——CM 系统模具或 CMIA 系统退火层与环境边界热交换系数
 h_r ——CM 系统铸件与模具或 CMIA 系统铸件与铸模边界交换系数
 h_p ——CMIA 系统铸模与保温层边界热交换系数
 h_q ——CMIA 系统保温层与退火层边界热交换系数
 k ——导热系数
 t_{a1} ——CMIA 系统退火层内表面温度
 t_{a2} ——CMIA 系统退火层外表面温度

t_{i1} ——CMIA 系统保温材料内表面温度
 t_{i2} ——CMIA 系统保温材料外表面温度
 t_{m1} ——CM 系统模具或 CMIA 系统铸模内表面温度
 t_{m2} ——CM 系统模具或 CMIA 系统铸模外表面温度
 t_r ——CM 系统或 CMIA 系统铸件表面温度
 t ——环境温度
 τ ——时间
 x_r, y_r ——铸件宽度和长度
 x_m, y_m ——铸件宽面和窄面模具厚度
 ρ ——体积密度
 ρ_r ——铸件材料体积密度
 $t_{n,m}$ ——耐火材料在 (n, m) 的温度
 F_x, F_y, H_x, H_y ——中间变量

参 考 文 献

- [1] Cockcroft S L, Brimacombe J K, Walrod D G, Myles T A. Thermal stress analysis of fused-cast AZS refractories during manufacture part 1: development of thermo-elastic stress model. J Am Ceram Soc, 1994, 77(6): 1505
- [2] Oeters F, Ruttiger K, Selenz H J. Casting and solidification of steel. Guildford: IPC Science and Technology Press, 1977
- [3] Nishida Y, Droste W, Engler S. The air-gap formation at the casting-mold Interface and the heat transfer mechanism through the gap. Metall Trans B, 1986(17): 833 ~ 844
- [4] 章熙民, 任泽霖, 梅飞鸣, 等. 传热学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985

Mathematical model for the annealing of fused cast Al_2O_3 refractory

CHENG Jie¹⁾ LI Hong-guang²⁾ WANG Ting-ji¹⁾

(1) China Building materials Academy, Beijing 100024;

2) Department of Automation, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : Based on the mechanism of the annealing of fused cast Al_2O_3 refractory, a mathematical model has been developed in this paper. The results of the simulation show that the model matches the industrial process well, and could be used to investigate the temperature distribution and the corresponding internal laws of the annealing process.

Key words : Al_2O_3 fused cast; annealing; mathematical model