

黑箱模型方法及其在耐火材料工艺中的运用

王杰曾 袁林 叶亚红 李鹏海 王俊涛

瑞泰科技股份有限公司 北京 100024

摘要:介绍了黑箱的概念,叙述了建模的条件,讨论了控制的方法;并以高纯硅砖为例,通过分析问题、设计试验、建立模型、进行优化,研制出了高纯度、低气孔率、低真密度和高强度硅砖。最后,探讨了利用信息技术提升耐火材料工艺的问题。

关键词:黑箱;建模;优化;工艺;耐火材料

中图分类号:TQ175.1

文献标识码:A

文章编号:1001-1935(2012)04-0244-05

目前,计算机技术已经可以有力支持传统行业的技术进步。但是,计算机的诸多功能还不为传统行业的技术人员知晓,计算机应用技术也还有待完善。所以,计算机还远远没有发挥应有作用。调查显示,个人计算机硬件的利用率只有1%~5%,软件功能使用率不到5%,数据中心服务器的利用率也只有10%^[1]。多年以来,笔者一直探索利用计算机定量研究耐火材料工艺,并已成功开发出多种新型耐火材料^[2]。在本工作中,介绍了如何利用计算机开发玻璃窑用高纯硅砖,以期发展新的耐火材料工艺研究方法。

1 基本概念

1.1 系统

系统是由相互联系、互相作用的要素组成的具有一定功能的整体。从信息的角度来看,系统具有输入、处理、输出和反馈4个要素^[3-4]。

如果把耐火材料工艺看作是一个系统,输入就是工艺参数;输出就是性能指标;处理就是工艺作用链(组成、加工、结构、性能之间的关系);反馈就是研究者根据试验结果进行的分析、作出的判断和实施的调控。由于不完全清楚工艺作用,研究者需要借助于黑箱来研究耐火材料。

1.2 黑箱

黑箱是指内部机制不很清楚,但可以通过外部观测和试验去认识其功能和特性的一类系统^[3]。

黑箱是一种重要的研究方法,尤其对控制那些尚不能认识其内部规律,但又必须驾驭的系统。对于耐火材料工艺系统,黑箱方法的步骤分为:1)设定输入(技术参数);2)测量输出(理化性能);3)建立模型

(运用统计学或人工智能方法建立输入-输出之间的数学关系);4)进行优化(控制输入,使输出最大限度地符合要求);5)反馈控制(评价结果,找出问题,分析原因,进行改进)。

1.3 模型

模型是为某个特定目的将原型的某一部分信息减缩提炼而成的替代物^[5]。在本工作中使用泰勒级数作为模型:

$$f(x, y) = f(x_0, y_0) + \frac{1}{1!} \left[(x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} \right] f(x_0, y_0) + \frac{1}{2!} \left[(x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} \right]^2 f(x_0, y_0) + \frac{1}{3!} \left[(x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} \right]^3 f(\theta x_0, \theta y_0), \quad (1)$$

式中: $0 < \theta < 1$; x_0, y_0 为多元函数 $f(x, y)$ 的起点。如忽略3次以上子项,式(1)就转变为一个由2次曲面表达的多变量函数。

1.4 回归

回归分析是一种常用的统计方法。对于耐火材料,可以通过回归建立性能指标向量 $Y(y_1, y_2, \dots, y_i)$ 和工艺参数向量 $X(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 之间的模型 ($Y = AX + \varepsilon$, 其中, A 为常数矩阵, ε 为随机误差)。逐步回归是一种提高回归方程预测精度的方法,其过程是反复进行显著性检验,不断调整方程,直至无法改进^[6]。

* 国家“十一五”科技支撑重大项目“绿色制造工艺与装备”(2006BAF02A26)。

王杰曾,男,1957年生,博士,教授级高级工程师。

E-mail: wjz@bjruitai.com

收稿日期:2012-02-13

编辑:周丽红

1.5 控制

控制是为达到规定的目标,对被控系统进行调节,使其输出或状态服从控制者意愿的一种操作。

控制有三组要素。第一组是目标函数,即耐火材料性能指标向量 Y 和工艺参数向量 X 之间的函数关系 ($Y = F(X) + \epsilon$);第二组是控制变量 X ,即工艺因素;第三组是约束关系,即要满足的限制条件^[7],如指标不得低于多少,成本不得高于多少,参数不得超出多少等。控制的可行解指找到一组满足约束条件的参数;控制的最优解指找出一组参数不仅满足约束关系,而且还要能在已有条件下最大限度满足控制者要求。所谓优化,就是寻找最优解的过程。

2 高纯硅砖的开发

2.1 提出问题

硅砖具有高抗蠕变性、低体积密度、低热导率、低价格和对玻璃污染低等特性,被广泛用于玻璃窑碲顶。全氧燃烧技术出现以后,玻璃窑中 NaOH 蒸气的浓度增高,碱的侵蚀加剧,硅砖的寿命急剧降低。为提高窑衬寿命,需要开发一种高纯度,低气孔率的新型硅砖^[8-12]。

2.2 分析问题

2.2.1 提高纯度

为提高硅砖的纯度,一个措施是降低矿化剂的掺量,另一个措施就是使用高纯的原料。

如果能够改善硅砖原料中粉体的分散性,就可以使矿化剂均匀分布在基质中,从而提高矿化剂的效率。这样,不仅可以减少矿化剂的掺量,提高硅砖的纯度,也有助于消除硅砖中的“钙洞”、“铁斑”缺陷,改善硅砖的表观品质。其次,用 $w(\text{SiO}_2) > 98.0\%$ 的结晶石英作骨料,用 $w(\text{SiO}_2) > 99\%$ 的脉石英粉作粉料,可以强化基质,进一步提高纯度的同时也不会影响硅砖的物理性能和制砖的合格率。

2.2.2 降低显气孔率

为降低显气孔率,需要详细了解制造中硅砖显微组织的变化,把握硅砖制造的技术要点。硅砖的技术要点在于控制工艺,使石英充分转化,形成理想的矿物组成,通过烧结获得致密的结构和良好的性能。同时,减少坯体的开裂,保证制品的合格率。为此,需要深入分析 SiO_2 的相转变:

(1) 高温下,基质中矿化剂和邻近的 SiO_2 反应,形成液相;

(2) 在液相的触媒下,基质中的 SiO_2 发生转变,

形成鳞石英;

(3) 在液相的触媒下,骨料边缘的 SiO_2 开始发生转变,形成鳞石英和方石英;

(4) 无液相的条件下,骨料中心部位的石英逐渐转变成成为方石英;

(5) 在液相的触媒下,基质逐渐松弛骨料中 SiO_2 相变产生的应力,有利于防止砖坯开裂;

(6) 在液相的触媒下,基质发生烧结,降低硅砖的显气孔率,并提高其他的物理性能。

因此,对于硅砖,如果固定原料种类和烧成制度,最重要的工艺因素就是颗粒级配和矿化剂掺量,以及两者可能的交互作用。这些因素控制着坯体的堆积密度、 SiO_2 的相变、相变应力、烧结进程等,对于硅砖的物理性能有十分重要的影响。

2.3 设计试验

根据 2.2.1 的分析,在实验室中选用的制砖原料如下:骨料为 $2.5 \sim 1.0$ 、 < 1.0 mm, $w(\text{SiO}_2) > 98\%$ 的天然硅石;粉料为 < 0.044 、 < 0.012 mm, $w(\text{SiO}_2) > 99.5\%$ 的天然硅石;超微粉为 $w(\text{SiO}_2) = 98\%$ 的 SiO_2 微粒;结合剂为亚硫酸纸浆废液;矿化剂为 < 10 μm 的 C_3S 和 < 10 μm 的 Fe_2O_3 ;分散采用第三代减水剂。

根据 2.2.2 的分析,采用 $L_8(2^7)$ 正交表,将工艺控制问题表述成一个 4 输入、6 输出的黑箱:以 $2.5 \sim 1.0$ mm 粗粒硅石掺量 x_1 、 < 1.0 mm 细粒硅石掺量 x_2 、 C_3S 掺量 x_3 、粉料中微粉的比例 x_4 作为输入;以生坯的耐压强度,硅砖的烧成线变化、耐压强度、真密度、显气孔率和体积密度作为输出。制砖的成型条件为 160 MPa 30 s,烧结条件为 1450 $^\circ\text{C}$ 18 h。为便于分析,还需对控制变量进行标准化变换:

$$\text{变换值} = 2 \times \frac{\text{实际值} - \text{最低值}}{\text{最高值} - \text{最低值}} - 1. \quad (2)$$

2.4 试验结果

按照 2.3 所述试验条件,在实验室制出了硅砖样品,其控制变量和被控变量的对应关系见表 1。

从表 1 可知:配方 2 具有最接近研究目标的物理性能,其烧成线变化为 3.5%,生坯耐压强度为 12.3 MPa,耐压强度为 51.4 MPa,真密度为 2.342 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,显气孔率为 17.9%,体积密度为 1.91 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.5 建立模型

依据式(1)和表 1,可以建立描述各个被控性能指标 y 和控制变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 以及交互作用 x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_3x_1 之间关系经验方程:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{23}x_2x_3 + a_{31}x_3x_1. \quad (3)$$

根据表1的数据,采用 Matlab(一种常用的高级科学计算语言)和 Excel 进行逐步回归分析,求出式(3)中的未知系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_{12}, a_{23}, a_{31}$ 。由此,得到表2所示计算结果。

表1 控制变量对硅砖物理性能的影响
Table 1 Effect of controlling variables on physical properties of silica brick

配方编号	粗粒硅石掺量 x_1	细粒硅石掺量 x_2	C_3S 掺量 x_3	基质中微粉比 x_4	烧成线变化/%	生坯耐压强度/MPa	耐压强度/MPa	真密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	显气孔率/%	体积密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
1	-1	-1	-1	-1	3.6	9.8	46.8	2.352	19.3	1.88
2	1	-1	-1	1	3.5	12.3	51.4	2.342	17.9	1.91
3	-1	1	-1	1	3.5	9.6	39.5	2.349	17.9	1.91
4	1	1	-1	-1	3.7	4.7	33.6	2.342	18.7	1.89
5	-1	-1	1	1	3.5	14.1	39.1	2.344	18.4	1.90
6	1	-1	1	-1	3.6	10.1	34.6	2.325	18.8	1.89
7	-1	1	1	-1	3.7	5.9	39.0	2.348	19.2	1.89
8	1	1	1	1	3.8	5.2	39.1	2.349	18.5	1.90

表2 工艺经验方程的系数
Table 2 Coefficient of experience equations

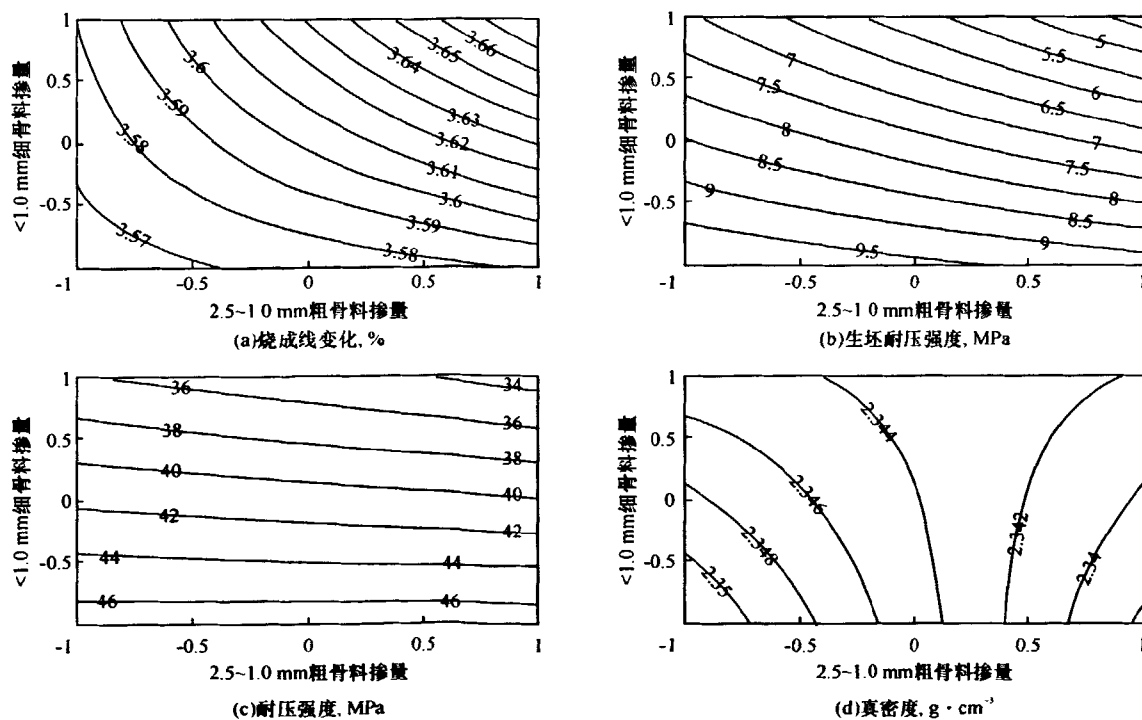
项目	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_{12}	a_{23}	a_{31}
烧成线变化的系数	0.036 1	0.000 3	0.000 7	0.000 3	-0.000 3	0.000 2	0.000 5	0.000 0
生坯耐压强度的系数	8.983 9	-0.892 2	-2.622 4	0.000 0	1.332 9	-0.523 2	-0.654 7	0.000 0
耐压强度的系数	40.380 0	-0.717 0	-2.574 0	-2.433 7	1.874 2	-0.735 3	3.681 8	0.000 0
真密度的系数	2.343 9	-0.004 4	0.003 1	-0.002 4	0.002 1	0.002 9	0.003 9	0.000 0
显气孔率的系数	18.590 0	-0.112 5	-0.012 5	0.000 0	-0.412 5	0.137 5	0.137 5	0.037 5
体积密度的系数	1.896 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.008 8	-0.003 8	0.000 0	0.000 0

2.6 预测优化

在本工作中采用图解法寻优。图解法直观表示模型输入-输出之间的关系,便于工程技术人员运用专业知识进行分析。

如前所述,表1中的2号配方($x_1 = 1, x_2 = -1, x_3 = -1, x_4 = 1$)具有最好的性能。但为降低成本和

少用微粉,由2号配方变形得到的($x_1 = 1, x_2 = -1, x_3 = -1, x_4 = -1$)可能也是一个不错的选择。由此,首先固定 $x_3 = -1, x_4 = -1$,采用 Matlab 绘出上述6项物理性能随 x_1, x_2 的变化趋势,结果见图1;其次,固定 $x_1 = 1, x_2 = -1$,采用 Matlab 绘出上述6项物理性能 x_3, x_4 变化的趋势,结果见图2。



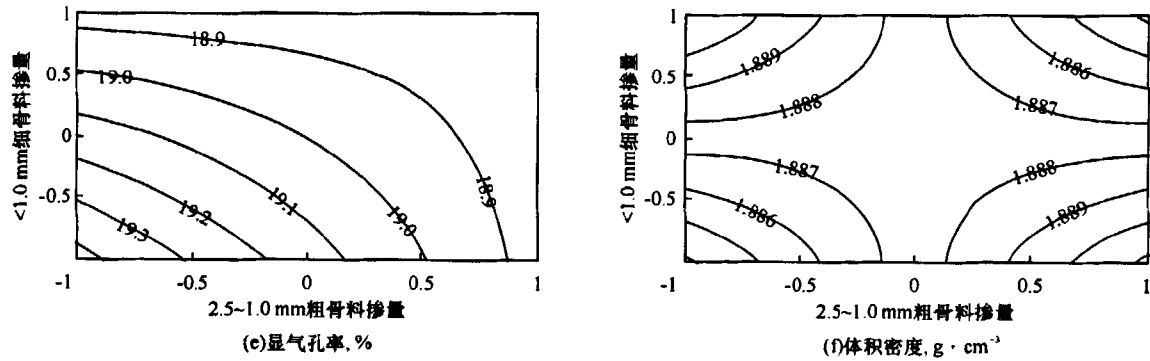


图1 粗骨料与细骨料掺量对硅砖物理性能的影响
Fig.1 Effect of coarse aggregate(x_1) and fine aggregate(x_2) on physical properties of silica brick

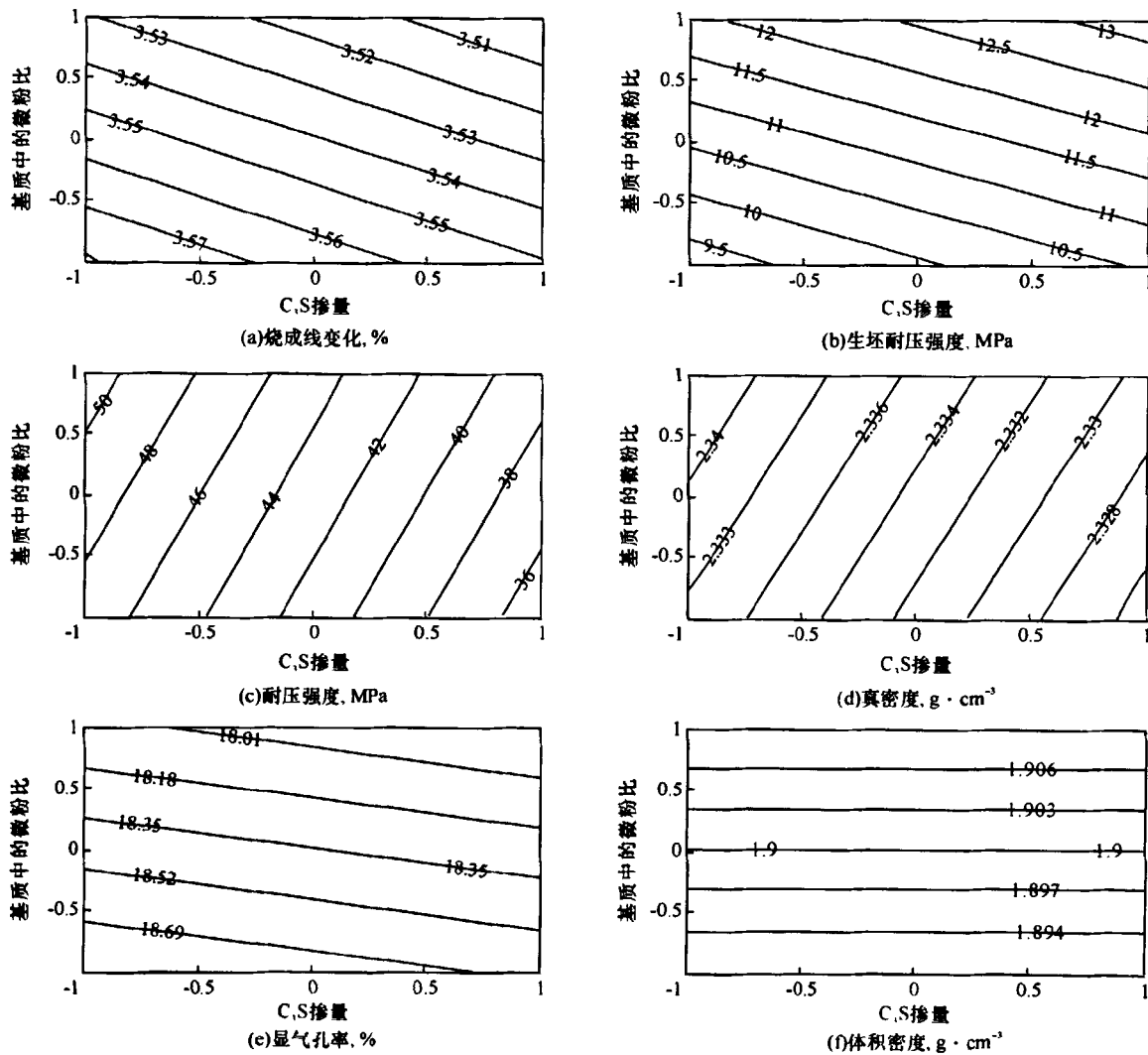


图2 C₃S与微粉掺量对硅砖物理性能的影响
Fig.2 Effect of C₃S(x_3) and micropowder(x_4) on physical properties of silica brick

由图1可知,当粗骨料取高值 $x_1 = 1$ 、细骨料取低值 $x_2 = -1$,且 $x_3 = -1, x_4 = -1$ 时,硅砖具有最高的耐压强度,很低的显气孔率,最低的真密度。由图2可知,当C₃S取低值 $x_3 = -1$ 、基质中微粉比例取低值 $x_4 = -1$,且 $x_1 = +1, x_2 = -1$ 时,硅砖具有较高的耐压强度,可接受的显气孔率,但真密度偏高。所以,采用 $x_1 = 1, x_2 = -1, x_3 = -1, x_4 = -1$ 的配方,适当延

长保温时间,可制得具有良好性能的高纯硅砖。

然后,改变控制变量,再次进行优化。经过几轮优化,找到了全局最优点,在实验室制出性能合乎要求的高纯硅砖。高纯硅砖工业试验的产品的性能指标见表3。

从表3可知;所制高纯硅砖的各项理化性能都十分理想。与 $w(\text{SiO}_2)$ 为96%的硅砖比较, SiO_2 的质量

分数从 96% 提高到 97.6%, 显气孔率由 20% 降低到 16.6%。这些都有利于提高耐火材料的抗侵蚀性。进一步的试验表明:可以再减少矿化剂掺量, 制出 $w(\text{SiO}_2) > 98\%$ 的硅砖。至此, 高纯硅砖的开发获得了成功。

表3 高纯硅砖的理化性能

Table 3 Chemical compositions and physical properties of high purity silica brick

项 目	数值	
化学组成(w)/%	SiO_2	97.59
	Al_2O_3	0.21
	Fe_2O_3	0.56
	CaO	0.94
	MgO	0.11
	Na_2O	0.011
	K_2O	0.051
真密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.322	
显气孔率/%	16.6	
耐压强度/MPa	59.7	
荷重软化开始温度 $T_{0.6}/^\circ\text{C}$	1 680	

3 结论

利用计算机进行定量分析, 通过建模、控制和优化, 可以改善生产工艺、提高产品性能、降低生产成本, 有力地支持耐火材料的技术进步。计算机辅助耐火材料工艺开发的步骤为:

(1) 提出问题: 根据市场需求, 提出需要开发的新型耐火材料和这种耐火材料应该具备的性能。

(2) 分析问题: 根据拟开发新型耐火材料需要具备的性能, 提出达到这些性能所需要采取的工艺措施;

(3) 简化问题: 提出拟开发材料需具备的主要性能和需采取的主要措施, 分析采取各措施的利弊得失;

(4) 提出方案: 利用耐火材料专业知识, 分析利弊的来龙去脉, 提出趋利避害、解决问题的方案;

(5) 建立黑箱: 根据上述方案, 确定需达到的目标, 要采取的手段, 明确手段和目标之间、手段和手段

之间的关系, 确定黑箱的输出和输入;

(6) 设计试验: 设计试验方案, 实施方案, 得到结果, 进行建模和优化, 得到局部最优点;

(7) 分析改进: 分析结果, 发现问题, 找出潜力, 再次进行试验搜捕, 如此反复, 直至找到全局最优点。

参考文献

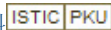
- [1] 中国科学院信息领域战略研究组. 中国至 2050 年信息科学发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 14-15, 28-30.
- [2] 王杰曾. 水泥窑用耐火材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 303-311.
- [3] 许国志. 系统科学大辞典[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1994: 220-221, 317-322, 373, 540-569.
- [4] 董肇君. 系统工程与运筹学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1-87, 203-236, 260-273.
- [5] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 1-21.
- [6] 中山大学数学力学系. 概率论与数理统计: 下册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 245-262.
- [7] 蔡宣三. 最优化与最优控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982: 1-24.
- [8] 王杰曾, 王晓红, 崔秀菊, 等. 全氧、富氧燃烧玻璃窑用耐火材料[J]. 中国建材科技, 2001(6): 52-56.
- [9] Allendorf M D, Nilson R H, Spear K E, et al. Analytical models for high temperature corrosion of silica refractories in glass-melting furnaces [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Advance in Fusion and Processing of Glass, New York, USA, 2003: 193-205.
- [10] Beerkens R C C, Verheijen O S. Reaction of alkali vapour with silica based refractory in glass furnaces, thermodynamics and mass transfer[J]. Glass Technology, 2005, 46(6): 371-382.
- [11] Alonso G R, John T B, Roger P W, et al. Review of improved silica crown refractory and practices for oxy-fuel-fired glass Melters[J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2004, 25(1): 33-42.
- [12] Wang Jiezeng, Yuan Lin, Ye Yahong, et al. Modeling and optimizing physical properties of high pure silica brick [C]//Proceedings Unitecr 2011 Congress(12th Biennial Worldwide Conference on Refractories), Kyoto, Japan, 2011: No1-B2-14.

Black box modeling method and its application in refractories techniques/Wang Jiezeng, Yuanlin, Ye Yahong, Li Penghai, Wang Juntao//Naihuo Cailiao. -2012, 46(4): 244

Abstract: Concept of black box, condition of modeling and control methods were introduced. Taking high purity silica bricks as an example, the silica bricks featured with high purity, low porosity, low true density and high strength were developed through problem analysis, test design, modeling and optimization. Using information technology to upgrade refractories technical process was discussed.

Key words: black box; modeling; optimization; techniques; refractories

First author's address: Ruitai Materials Technology Co., Ltd., Beijing 100024, China

作者: [王杰曾](#), [袁林](#), [叶亚红](#), [李鹏海](#), [王俊涛](#), [Wang Jiezeng](#), [Yuan lin](#), [Ye Yahong](#), [Li Penghai](#), [Wang Juntao](#)
作者单位: [瑞泰科技股份有限公司](#) 北京100024
刊名: [耐火材料](#) 
英文刊名: [Refractories](#)
年, 卷(期): 2012, 46(4)

参考文献(12条)

1. [中国科学院信息领域战略研究组](#) [中国至2050年信息科学发展路线图](#) 2009
2. [王杰曾](#) [水泥窑用耐火材料](#) 2011
3. [许国志](#) [系统科学大辞典](#) 1994
4. [董肇君](#) [系统工程与运筹学](#) 2003
5. [姜启源](#); [谢金星](#); [叶俊](#) [数学模型](#) 2003
6. [中山大学数学力学系](#) [概率论与数理统计:下册](#) 1980
7. [蔡宣三](#) [最优化与最优控制](#) 1982
8. [王杰曾](#); [王晓红](#); [崔秀菊](#) [全氧、富氧燃烧玻璃熔窑用耐火材料](#) 2001(06)
9. [Allendorf M D](#); [Nilson R H](#); [Spear K E](#); et al [Analytical models for high temperature corrosion of silica refractories in glass-melting furnaces](#) 2003
10. [Beerkens R G C](#); [Verheijen O S](#) [Reaction of alkali vapour with silica based refractory in glass furnaces, thermodynamics and mass transfer](#) 2005(06)
11. [Alonso G R](#); [John T B](#); [Roger P W](#) [Review of improved silica crown refractory and practices for oxy-fuel-fired glass Melters](#) 2004(01)
12. [Wang Jiezeng](#); [Yuan Lin](#); [Ye Yahong](#) [Modeling and optimizing physical properties of high pure silica brick](#) 2011

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl201204002.aspx