



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107399960 A

(43)申请公布日 2017. 11. 28

(21)申请号 201710806927.8

(22)申请日 2017.09.08

(71)申请人 中国科学院地球化学研究所

地址 550002 贵州省贵阳市观山湖区林城西路99号

(72)发明人 孟勇 郭秀美 韦东田 龚国洪

(74)专利代理机构 贵阳天圣知识产权代理有限公司 52107

代理人 杜胜雄

(51)Int. Cl.

C04B 35/14(2006.01)

C04B 35/10(2006.01)

C04B 33/13(2006.01)

权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种电瓷材料配方优化设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种电瓷材料配方优化设计方法,包括步骤:一、建立配方优化模型:1.选取目标配方,通常以企业制造成功的各等级电瓷产品中各种氧化物的组成比例为目标配方,也可以根据性能要求重新设计;2.选取优化变量,以各种电瓷原料的用量作为优化变量;3.确定子目标函数:以配方中各种氧化物的计算值与目标值的绝对误差的最小值为子目标函数;4.确定统一目标函数:每个子目标函数分别乘以一个权重系数然后求和,得到统一目标函数;5.确定约束条件,根据电瓷的性能要求,确定约束条件;二、运用优化模型求解软件LINGO求解。相对于传统的人工计算或经验配方,本发明能够大大提高配方的效率和准确性,从而保证电瓷产品质量的稳定,降低废品率。

1. 一种电瓷材料配方优化设计方法, 其特征在于: 包括以下步骤:

(一) 建立电瓷材料配方优化计算模型:

(1) 将电瓷原料的用量作为优化变量 $X(X_1, X_2, \dots, X_m)$;

(2) 将已经成功的电瓷产品的化学组成可以作为目标配方;

(3) 以配方中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 八种氧化物的计算值与目标值的绝对误差作为子目标函数;

(4) 以每个子目标函数分别乘以一个权重系数然后求和, 得到统一目标函数;

(5) 约束条件选取:

1) 各原料用量之和应为100 (wt%), 用数学式表示为:

$$X_1 + X_2 + \dots + X_m = 100;$$

2) 各原料用量应大于等于0小于等于100, 用数学式表示为:

$$0 \leq X_i \leq 100, (i=1, 2, \dots, m);$$

3) 八个目标函数的计算值相对目标值的偏差可以具体要求小于某值, 用数学式表示为:

$$|\text{计算值}A_i - \text{目标值}B_i| \leq \alpha, (i=1, 2, \dots, m);$$

4) 氧化铁的含量不能超过1.2%;

5) 氧化钙和氧化镁的总量小于1.5%;

6) 氧化钠和氧化钾计算值之和介于3%到4%之间;

(二)、使用优化求解软件LINGO求解。

一种电瓷材料配方优化设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及矿物材料领域,具体涉及一种电瓷材料配方优化设计方法。

技术背景

[0002] 电瓷材料是输变电路重要的元件,是由粘土、长石、铝矾土等多种原料混合,经复杂工艺烧结而成的硅铝酸盐材料,具有耐高压、抗腐蚀和强度高优点。其基本功能有两个:支撑电线和绝缘电流。

[0003] 电瓷配方是电瓷生产过程的起始环节,配方的优劣直接关系产品质量的好坏。目前多数电瓷厂的配方设计主要凭经验和人工粗略计算完成,费时费力,且配方不稳定,严重阻碍了生产效率的提高。

[0004] 电瓷材料配方优化设计即根据性能要求从可供选择的多个原料中,应用科学的优化计算方法,在约束条件的约束下,确定达到或接近目标配方所要求的各种化学成分含量的原料配比。配方的优化设计有利于资源的合理利用和产品合格率的提高,从而减少三废。例如配方中铁含量过高则会导致产品介电性能的降低甚至废品的产生,不仅造成原料、劳动和能源的浪费,而且会向环境排放三废污染物。尤其是废瓷件,其在环境中稳定性很好,很难自然降解。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题在于提供一种高效准确、简单实用的电瓷材料配方优化计算方法,解决电瓷行业配方过程费时费力而且配方不稳定等缺点。

[0006] 本发明的目的及解决其主要技术问题是采用以下技术方案来实现的:一种电瓷材料配方优化设计方法,具体步骤如下:

[0007] (一)建立电瓷材料配方优化计算模型:

[0008] 步骤一、选取优化变量。将各种原料的用量(质量百分比)作为优化变量 $X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 。

[0009] 步骤二、选取目标配方。目标配方是根据性能指标要求和生产工艺条件设计的可以用于生产的各种氧化物配比方案。可以通过正交试验结合生产经验和文献资料来寻找到目标配方。已经成功的电瓷产品的化学组成可以作为目标配方,后续生产中还可进一步升级完善目标配方,找到最合理目标配方,长期使用。

[0010] 步骤三、确定各子目标函数。从氧化物角度看,电瓷等无机矿物材料主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 八种氧化物组成。以配方中各氧化物的计算值尽可能接近目标值为目标,取计算值与目标值的绝对误差为目标函数。为了直观方便,用各种氧化物化学式代表其计算值与目标值的绝对误差,则各个子目标函数用数学表达式表示如下:

[0011] $\text{Min绝对误差} F_i = \text{计算值} A_i - \text{目标} B_i$

[0012] $\text{Min } SiO_2 = (C_{11} \cdot X_1 + C_{21} \cdot X_2 + \dots + C_{m1} \cdot X_m) - B_1 \quad (1)$

[0013] $\text{Min } Al_2O_3 = (C_{12} \cdot X_1 + C_{22} \cdot X_2 + \dots + C_{m2} \cdot X_m) - B_2 \quad (2)$

$$[0014] \quad \text{Min Fe}_2\text{O}_3 = (C_{13} \cdot X_1 + C_{23} \cdot X_2 + \dots + C_{m3} \cdot X_m) - B_3 \quad (3)$$

$$[0015] \quad \text{Min CaO} = (C_{14} \cdot X_1 + C_{24} \cdot X_2 + \dots + C_{m4} \cdot X_m) - B_4 \quad (4)$$

$$[0016] \quad \text{Min MgO} = (C_{15} \cdot X_1 + C_{25} \cdot X_2 + \dots + C_{m5} \cdot X_m) - B_5 \quad (5)$$

$$[0017] \quad \text{Min K}_2\text{O} = (C_{16} \cdot X_1 + C_{26} \cdot X_2 + \dots + C_{m6} \cdot X_m) - B_6 \quad (6)$$

$$[0018] \quad \text{Min Na}_2\text{O} = (C_{17} \cdot X_1 + C_{27} \cdot X_2 + \dots + C_{m7} \cdot X_m) - B_7 \quad (7)$$

$$[0019] \quad \text{Min TiO}_2 = (C_{18} \cdot X_1 + C_{28} \cdot X_2 + \dots + C_{m8} \cdot X_m) - B_8 \quad (8)$$

[0020] 其中 C_{mi} 是第 i 种氧化物在第 m 种原料中的百分比。每一个等式的括号内为该氧化物在配方中的计算值,后面的 B_i 为该氧化物在目标配方中的目标值。

[0021] 步骤四、统一各子目标函数。每个子目标函数分别乘以一个权重系数然后求和,得到统一目标函数。设各个子目标函数 Min SiO_2 、 $\text{Min Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Min Fe}_2\text{O}_3$ 、 Min CaO 、 Min MgO 、 $\text{Min K}_2\text{O}$ 、 $\text{Min Na}_2\text{O}$ 、 Min TiO_2 的加权系数分别为 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 、 W_6 、 W_7 、 W_8 ,则统一后的目标函数的数学表达式为:

$$[0022] \quad \text{Min } F(X) = W_1 \cdot \text{Min SiO}_2 + W_2 \cdot \text{Min Al}_2\text{O}_3 + W_3 \cdot \text{Min Fe}_2\text{O}_3 + W_4 \cdot \text{Min CaO} + W_5 \cdot \text{Min MgO} + W_6 \cdot \text{Min K}_2\text{O} + W_7 \cdot \text{Min Na}_2\text{O} + W_8 \cdot \text{Min TiO}_2$$

[0023] 步骤五、确定约束条件。约束条件是确保求解结果满足要求的必要条件。电瓷制造配方基本的约束条件有:

[0024] 1.各原料用量之和应为100(%),用数学式表示为:

$$[0025] \quad X_1 + X_2 + \dots + X_m = 100 \quad (9)$$

[0026] 2.各原料用量应大于等于0小于等于100,用数学式表示为:

$$[0027] \quad 0 \leq X_i \leq 100, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

[0028] 3.八个目标函数的计算值对目标值偏差可以具体要求小于某值,用数学语言表示为:

$$[0029] \quad |\text{计算值 } A_i - \text{目标值 } B_i| \leq \alpha, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

[0030] 4.铁含量过高则瓷体易被电击穿,且色泽不佳。通常氧化铁的含量不能超过1.2%,数学表达式为:

$$[0031] \quad C_{13} \cdot X_1 + C_{23} \cdot X_2 + \dots + C_{m3} \cdot X_m \leq 120 \quad (12)$$

[0032] 5.钙和镁常以碳酸盐和硫酸盐的形式存在,高温分解产生气体,若在釉层融化封闭之前还没彻底分解完毕,就可能使瓷体产生气孔。此外,它们起助熔作用,如果含量过高,将降低坯料的烧成温度,并缩小烧成温度范围。通常氧化钙和氧化镁的总量要小于1.5%,数学表达式为:

$$[0033] \quad (C_{14} \cdot X_1 + C_{24} \cdot X_2 + \dots + C_{m4} \cdot X_m) + (C_{15} \cdot X_1 + C_{25} \cdot X_2 + \dots + C_{m5} \cdot X_m) \leq 150 \quad (13)$$

[0034] 6.氧化钠和氧化钾起助熔作用,若含量太低,将提高瓷体烧成温度;若含量太高,将使烧成温度降低,但由于成分彼此之间反应不完全,玻璃相含量将过高,瓷体的机械强度降低,热稳定性变坏。经验表明氧化钠和氧化钾计算值之和介于3%到4%之间最为合适,数学表达式为:

$$[0035] \quad 300 \leq (C_{16} \cdot X_1 + C_{26} \cdot X_2 + \dots + C_{m6} \cdot X_m) + (C_{17} \cdot X_1 + C_{27} \cdot X_2 + \dots + C_{m7} \cdot X_m) \leq 400 \quad (14)$$

[0036] 7.从矿物的角度看,电瓷原料是由高岭石、伊利石、蒙脱石、埃洛石、绿泥石、长石、石英、刚玉等矿物组成的。其中蒙脱石、埃洛石和绿泥石因含水量高,烧结过程中容易使瓷

体收缩变形,为有害成分。因此要控制原料中这三种矿物的量,用数学语言表示为:

$$[0037] \quad C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 + \dots + C_m \cdot X_m \leq \beta \quad (15)$$

[0038] 其中 C_i 是第 i 种原料中有害矿物的百分比, β 为配方所允许的有害矿物的最大量。

[0039] 除以上约束条件以外,还可根据具体配方情况进行约束。

[0040] (二)选择合适的优化求解软件。

[0041] 本发明使用优化求解软件LINGO。LINGO是Linear Interactive and General Optimizer的缩写,即“交互式的线性和通用优化求解器”,用于求解线性规划、非线性规划和二次规划模型,功能强大,是求解优化模型的最佳选择。其特色在于内置建模语言,允许以简练、直观的方式描述较大规模的优化问题,方便灵活,而且执行速度非常快。能方便与EXCEL,数据库等其他软件交换数据。

[0042] 相对于传统的人工计算或经验配方,本发明能够大大提高配方的效率和准确性,从而保证电瓷产品质量的稳定,降低废品率。

附图说明

[0043] 图1是LINGO程序语句。

[0044] 图2是LINGO求解报告。

具体实施方式

[0045] 以下结合附图和较佳实施例,对依据本发明提出的一种电瓷材料配方优化设计方法具体实施方式、结构、特征及其功效,详细说明如后。

[0046] 实施例:发明人帮助电瓷企业贵州毕节高原电瓷有限公司建立了一套电瓷原料配方优化设计方案,提高了该企业配方设计的稳定性、可靠性和电瓷产品的质量,降低了废品率,取得了很好的效果。以生产420kN等级电瓷配方优化设计为例。选用该公司420kN等级电瓷的化学组成为目标配方,以其拥有的六种原料进行配方优化计算。目标配方和六种原料的化学组成如表1和表2(已换算成扣除灼减量后的百分含量):

[0047] 表1、目标配方(wt%)

[0048]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
46.34	46.54	0.83	0.44	0.36	2.93	0.76	1.8

[0049] 表2、六种原料化学成分(wt%)

[0050]

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
杨家湾粘土	70.5	23.74	1.56	0.71	0.63	2.22	0.41	0
小河粘土	51.1	44.84	1.09	0.15	0.84	1.1	0.59	0
长地埂粘土	60.26	29.69	1.59	0.81	0.58	2.02	0.71	2.00
黔陶粘土	75.39	17.92	0.52	0.18	0.44	4.46	0.33	0.19
长石	70.51	15.50	0.3	0.26	0.12	10.1	2.13	0
煅烧铝矾土	6.54	87.13	1.72	0.31	0.19	0	0	3.98

[0051] 结合表中数据的优化计算步骤如下:

[0052] (一) 建立电瓷材料配方优化计算模型:

[0053] (1) 将表2中的六种电瓷原料(杨家湾粘土、小河粘土、长地埂粘土、黔陶粘土、长石、煅烧铝矾土)的用量分别作为优化变量: X1, X2, X3, X4, X5, X6;

[0054] (2) 将该公司的420kN等级电瓷的化学组成为目标配方;

[0055] (3) 以配方中SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、TiO₂八种氧化物的计算值与目标值的绝对误差作为子目标函数,代入目标配方和各原料的化学成分具体的数值后,八个子目标函数的数学表达式如下:[0056] $\text{MinSiO}_2 = (70.5 \times X_1 + 51.1 \times X_2 + 60.26 \times X_3 + 75.39 \times X_4 + 70.51 \times X_5 + 6.54 \times X_6) - 4634;$ [0057] $\text{MinAl}_2\text{O}_3 = (23.74 \times X_1 + 44.84 \times X_2 + 29.69 \times X_3 + 17.92 \times X_4 + 15.50 \times X_5 + 87.13 \times X_6) - 4654;$ [0058] $\text{MinFe}_2\text{O}_3 = (1.56 \times X_1 + 1.09 \times X_2 + 1.59 \times X_3 + 0.52 \times X_4 + 0.3 \times X_5 + 1.72 \times X_6) - 83;$ [0059] $\text{MinCaO} = (0.71 \times X_1 + 0.15 \times X_2 + 0.81 \times X_3 + 0.18 \times X_4 + 0.26 \times X_5 + 0.31 \times X_6) - 44;$ [0060] $\text{MinMgO} = (0.63 \times X_1 + 0.84 \times X_2 + 0.58 \times X_3 + 0.44 \times X_4 + 0.12 \times X_5 + 0.19 \times X_6) - 36;$ [0061] $\text{MinK}_2\text{O} = (2.22 \times X_1 + 1.1 \times X_2 + 2.02 \times X_3 + 4.46 \times X_4 + 10.1 \times X_5) - 293;$ [0062] $\text{MinNa}_2\text{O} = (0.41 \times X_1 + 0.59 \times X_2 + 0.71 \times X_3 + 0.33 \times X_4 + 2.13 \times X_5) - 76;$ [0063] $\text{MinTiO}_2 = (2.00 \times X_3 + 0.19 \times X_4 + 3.98 \times X_6) - 180;$

[0064] (4) 假设各氧化物同等重要,取各子目标函数的权重系数为1,代入数值,则统一目标函数的数学表达式为:

[0065] $\text{Min } F(X) = \text{Min SiO}_2 + \text{Min Al}_2\text{O}_3 + \text{Min Fe}_2\text{O}_3 + \text{Min CaO} + \text{Min MgO} + \text{Min K}_2\text{O} + \text{Min Na}_2\text{O} + \text{Min TiO}_2 =$ [0066] $|70.5 \times X_1 + 51.1 \times X_2 + 60.26 \times X_3 + 75.39 \times X_4 + 70.51 \times X_5 + 6.54 \times X_6 - 4634| +$ [0067] $|23.74 \times X_1 + 44.84 \times X_2 + 29.69 \times X_3 + 17.92 \times X_4 + 15.50 \times X_5 + 87.13 \times X_6 - 4654| + |0.71 \times X_1 + 0.15 \times X_2 + 0.81 \times X_3 + 0.18 \times X_4 + 0.26 \times X_5 + 0.31 \times X_6 - 44| +$ [0068] $|0.63 \times X_1 + 0.84 \times X_2 + 0.58 \times X_3 + 0.44 \times X_4 + 0.12 \times X_5 + 0.19 \times X_6 - 36| +$ [0069] $|2.22 \times X_1 + 1.1 \times X_2 + 2.02 \times X_3 + 4.46 \times X_4 + 10.1 \times X_5 - 293| +$ [0070] $|0.41 \times X_1 + 0.59 \times X_2 + 0.71 \times X_3 + 0.33 \times X_4 + 2.13 \times X_5 - 76| +$

- [0071] $|2.00 \times X_3 + 0.19 \times X_4 + 3.98 \times X_6 - 180|$
- [0072] (5) 约束条件。
- [0073] 1. 六种原料的百分含量之和应为100%，数学表达式如下：
- [0074] $X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = 100$ ；
- [0075] 2. 二氧化硅含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.5%，数学表达式如下：
- [0076] $|\text{Min SiO}_2| =$
- [0077] $|(70.5 \times X_1 + 51.1 \times X_2 + 60.26 \times X_3 + 75.39 \times X_4 + 70.51 \times X_5 + 6.54 \times X_6) - 4634| \leq 50$ ；
- [0078] 3. 三氧化二铝含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.5%，数学表达式如下：
- [0079] $|\text{Min Al}_2\text{O}_3| =$
- [0080] $|(23.74 \times X_1 + 44.84 \times X_2 + 29.69 \times X_3 + 17.92 \times X_4 + 15.50 \times X_5 + 87.13 \times X_6) - 4654| \leq 50$ ；
- [0081] 4. 氧化钙含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.3%，数学表达式如下：
- [0082] $|\text{Min CaO}| =$
- [0083] $|(0.71 \times X_1 + 0.15 \times X_2 + 0.81 \times X_3 + 0.18 \times X_4 + 0.26 \times X_5 + 0.31 \times X_6) - 44| \leq 30$ ；
- [0084] 5. 氧化镁含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.3%，数学表达式如下：
- [0085] $|\text{Min MgO}| =$
- [0086] $|(0.63 \times X_1 + 0.84 \times X_2 + 0.58 \times X_3 + 0.44 \times X_4 + 0.12 \times X_5 + 0.19 \times X_6) - 36| \leq 30$ ；
- [0087] 6. 氧化钾含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.3%，数学表达式如下：
- [0088] $|\text{Min K}_2\text{O}| =$
- [0089] $|(2.22 \times X_1 + 1.1 \times X_2 + 2.02 \times X_3 + 4.46 \times X_4 + 10.1 \times X_5) - 293| \leq 30$ ；
- [0090] 7. 氧化钠含量计算值与目标值的正负偏差不超过0.3%，数学表达式如下：
- [0091] $|\text{Min Na}_2\text{O}| =$
- [0092] $|(0.41 \times X_1 + 0.59 \times X_2 + 0.71 \times X_3 + 0.33 \times X_4 + 2.13 \times X_5) - 76| \leq 30$ ；
- [0093] 8. 铁含量越低越好，但原料中都或多或少含铁，理论上不可能无限低。铁含量过高则瓷体易被电击穿，且色泽不佳。通常氧化铁含量计算值不超过1.2%，数学表达式如下：
- [0094] $1.56 \times X_1 + 1.09 \times X_2 + 1.59 \times X_3 + 0.52 \times X_4 + 0.3 \times X_5 + 1.72 \times X_6 \leq 120$ ；
- [0095] 9. 钛含量过高则瓷体色泽不佳，氧化钛含量计算值不超过1.8%，数学表达式如下：
- [0096] $2.00 \times X_3 + 0.19 \times X_4 + 3.98 \times X_6 \leq 180$ ；
- [0097] 10. 钙和镁常以碳酸盐和硫酸盐存在，高温分解产生气体，若在釉层融化封闭之前还没彻底分解完毕，就可能使瓷体产生气孔。此外，它们起助熔作用，如果含量过高，将降低坯料的烧成温度，并缩小烧成温度范围。通常氧化钙和氧化镁的总量要小于1.5%，数学表达式如下：
- [0098] $(0.71 \times X_1 + 0.15 \times X_2 + 0.81 \times X_3 + 0.18 \times X_4 + 0.26 \times X_5 + 0.31 \times X_6) + (0.63 \times X_1 + 0.84 \times X_2 + 0.58 \times X_3 + 0.44 \times X_4 + 0.12 \times X_5 + 0.19 \times X_6) \leq 150$ ；
- [0099] 11. 氧化钠和氧化钾起助熔作用，若含量太低，将提高瓷体烧成温度，若含量太高，将使烧成温度降低，但由于成分彼此之间反应不完全，玻璃相含量将过高，瓷体的机械强度降低，热稳定性变坏。经验表明氧化钠和氧化钾计算值之和介于3%和4%之间最为合适，数学表达式如下：
- [0100] $300 \leq (2.22 \times X_1 + 1.1 \times X_2 + 2.02 \times X_3 + 4.46 \times X_4 + 10.1 \times X_5) + (0.41 \times X_1 + 0.59 \times X_2 + 0.71 \times$

$X3+0.33*X4+2.13*X5) \leq 400$;

[0101] (二)、使用优化求解软件LINGO求解。

[0102] 将数据代入电瓷配方优化计算模型后,再以优化求解软件LINGO可以识别的程序语句的形式输入软件,如图1所示,程序由目标函数、约束条件和赋值语句组成。求解报告如图2,从求解报告可以看出,统一目标函数的最优解即六种原料的最佳配比方案为: $X1=0$; $X2=24.17$; $X3=4.26$; $X4=25.64$; $X5=14.2$; $X6=31.72$,解答过程共22步,统一目标函数的值为107.203,整个求解方案为全局最优。

[0103] 六种原料的用量 $x1$ 、 $x2$ 、 $x3$ 、 $x4$ 、 $x5$ 、 $x6$ 以及各种氧化物含量的计算值如表3所示。从表中可以看出, SiO_2 、 Al_2O_3 和 K_2O 的计算值相对目标值的无偏差, Fe_2O_3 的计算值比目标值高,但低于约束条件规定的小于1.2%, CaO 、 MgO 总量为0.67%,优于目标配方中含量0.8%,也满足工艺条件要求的低于1%, K_2O 、 Na_2O 总量为3.49%,目标配方中为3.69%,均满足电瓷工艺条件, TiO_2 的计算值为1.40%,优于目标值1.8%。

[0104] 表3、六种原料配方优化计算结果(wt%)

[0105]

原料\组分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	原料用量
杨家湾粘土	70.5	23.74	1.56	0.71	0.63	2.22	0.41		0
小河粘土	51.1	44.84	1.09	0.15	0.84	1.1	0.59		24.17
长地埂粘土	60.26	29.69	1.59	0.81	0.58	2.02	0.71	2.00	4.26
黔陶粘土	75.39	17.92	0.52	0.18	0.44	4.46	0.33	0.19	25.64
长石	70.51	15.50	0.3	0.26	0.12	10.1	2.13		14.2
煅烧铝矾土	6.54	87.13	1.72	0.31	0.19			3.98	31.72
目标配方	46.34	46.54	0.83	0.44	0.36	2.93	0.76	1.8	
计算结果	46.34	46.54	1.05	0.25	0.42	2.93	0.56	1.4	
偏差	0	0	-0.22	0.19	-0.06	0	0.2	0.4	

[0106] 以上所述,仅是本发明的较佳实施例而已,并非对本发明作任何形式上的限制,任何未脱离本发明技术方案内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属于本发明技术方案的范围内。



目标函数

约束条件

赋值语句

图1

```
Global optimal solution found.
Objective value:                107.2030
Objective bound:                107.2030
Infeasibilities:                0.000000
Extended solver steps:         0
Total solver iterations:       22
```

Variable	Value	Reduced Cost
X1	0.000000	0.000000
X2	24.17302	0.000000
X3	4.261836	0.000000
X4	23.64122	0.000000
X5	14.20207	0.000000
X6	31.02182	0.000000
X7	48.73824	0.000000
X8	48.54000	0.000000
X9	1.052806	0.000000
CaO	0.2521977	0.000000
MgO	0.4179074	0.000000
K2O	2.930000	0.000000
Na2O	0.560000	0.000000
CaO	1.355185	0.000000
CaO	0.8701032	0.000000
Na2O	1.400000	0.000000

六种原料用量

八种氧化物的计算值

氧化钙和氧化镁总量

氧化钾和氧化钠总量

目标函数值

求解步数共22

图 2. LINGO 求解报告