

TiO₂ 在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料中的作用

尹玉成 梁永和 吴芸芸 王继宝

武汉科技大学高温陶瓷与耐火材料湖北省重点实验室 武汉 430081

摘要 阐述了 TiO₂ 在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料,特别是高铝矾土中的分布和存在方式,并通过分析 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火原料的煅烧过程和 Al₂O₃ - SiO₂ 系制品的使用过程中 TiO₂、Al₂O₃ 和 SiO₂ 三者之间的化学反应,介绍了 TiO₂ 对 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料结构和性能的影响。

关键词 TiO₂, Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料, 结构, 性能

Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料是目前我国应用比较广泛的一类材料。我国的 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火矿物原料储量丰富,已探明的高铝矾土储量在 10 亿 t 左右^[1]。但是,我国不少地方的矾土中 TiO₂ 含量较高,如陕西、贵州和河南等地的矾土中 TiO₂ 的质量分数一般为 2% ~ 3%,而四川的矾土中 TiO₂ 的质量分数有的则高达 8% 以上。因此,研究 TiO₂ 对 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料结构和性能的影响,特别是对莫来石结构和性能的影响很有意义。本文对 TiO₂ 在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料中的作用进行了综合介绍。

1 TiO₂ - SiO₂ - Al₂O₃ 三元系统

TiO₂ - SiO₂ - Al₂O₃ 三元系统相图早在 20 世纪 50 年代便被研究过。该系统有两个二元化合物,即 Al₂O₃ - SiO₂ 系的莫来石和 Al₂O₃ - TiO₂ 系的钛酸铝(AT)^[2],但关于 TiO₂ - SiO₂ 二元化合物还少见报道。宋宽秀等^[3]在采用水解法制备 TiO₂ - SiO₂ 复合材料时发现, TiO₂ 与 SiO₂ 发生了键合。至于在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料的煅烧和使用过程中 TiO₂ 与 SiO₂ 是否可以发生键合而形成 TiO₂ - SiO₂ 化合物,还有待研究。

1982 年由 J White 修订的相图(见图 1)确定了 TiO₂ 在莫来石中的固溶范围^[4]。从图 1 可以看出,在 B 点, Al₂O₃ 的质量分数为 75%,莫来石固溶体中 TiO₂ 的质量分数为 6%;在 C 点, Al₂O₃ 的质量分数为 69.5%,固溶体中 TiO₂ 的质量分数为 3.5%。由于该系统中莫来石固溶体的存在,该系统可以划分为以下几个组成三角形:

(1) Al₂O₃ - B - AT 组成三角形。始熔温度 1727 °C(P₁)。在此三角形内的组成点,其最终相组成为刚玉、AT 和组成为 B 的莫来石固溶体。

(2) AT - C - SiO₂ 组成三角形。始熔温度 1480 °C(P₂)。在此三角形内的组成点,其结晶相为 AT、SiO₂ 变体和组成为 C 的莫来石固溶体。

(3) Al₂O₃ - A - B、AT - B - C、SiO₂ - C - D 三个组成三角形。组成点在这些三角形内的混合物,其始熔温度点(即完全凝固点)分别在液相边界线 E₃P₁、P₁P₂、E₂P₂ 上,最终相组成分别为莫来石固溶体 A、B 与刚玉,莫来石固溶体 B、C 与 AT,莫来石固溶体 C、D 与 SiO₂ 变体的混合物。

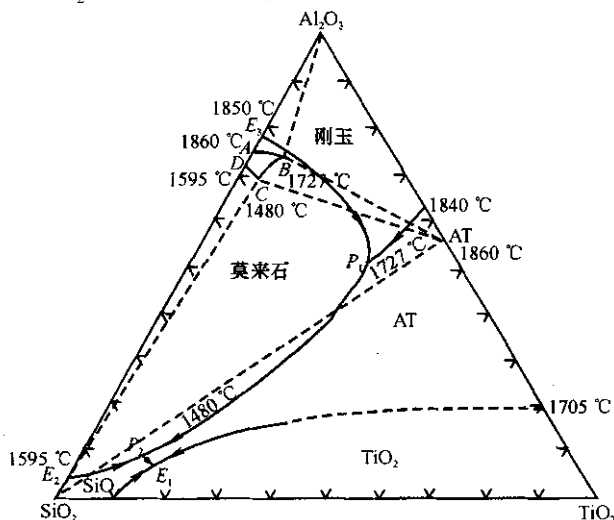


图 1 TiO₂ - SiO₂ - Al₂O₃ 系相图

在 Al₂O₃ 含量等于或低于莫来石组成的材料中,由于 TiO₂ 的质量分数一般 < 3.5%,未超出 C、B 两点中 TiO₂ 的含量范围,因而其所含 TiO₂ 应全部固溶于莫来石中; Al₂O₃ 含量高于莫来石组成的材料中,随着 Al₂O₃ 含量增高, TiO₂ 含量也相应增多。当混合物的

* 尹玉成:男,1981年生,硕士研究生。

E-mail: yycwust1981@126.com

收稿日期 2005-07-08

编辑 黄卫国

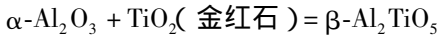
组成点在 AT-B-C 和 AT-B-Al₂O₃ 三角形内时,所含的 TiO₂ 不能全部固溶入莫来石中,部分 TiO₂ 在高温时进入液相,固化后有 AT 存在。

由此看出:TiO₂ 的存在对粘土制品无明显影响;而对高铝制品,特别是 I 等高铝制品,TiO₂ 含量的高低对其性质有较明显的影响,TiO₂ 含量的增多将会降低制品的荷重软化温度和高温蠕变性。

2 TiO₂ 在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料中的作用

2.1 TiO₂ 与 Al₂O₃ 生成钛酸铝的反应

通过平衡温度下热力学数据的处理,可以确定等摩尔的 Al₂O₃ 和 TiO₂ 反应合成 Al₂TiO₅ 的自由能变化:



$$\Delta G_{\text{AT}} = \Delta H - T\Delta S = 17000 - 10.95 T (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$$

当温度 $T > 1553 \text{ K}$ ($1280 \text{ }^\circ\text{C}$) 时, $\Delta G_{\text{AT}} < 0$ 时,即理论上当烧成温度达到 1553 K 以上时,上述反应会自发进行^[5]。值得注意的是,钛酸铝的形成反应伴随着 10% 左右的体积膨胀,并且由于钛酸铝晶体具有明显的各向异性,各轴方向上的热膨胀系数差异甚大,因此,所形成的钛酸铝呈微裂纹状态,自结合能力也变差^[6]。

2.2 TiO₂ 在刚玉和莫来石中的固溶

文献 [7] 报道,在氧化气氛下, TiO₂ 在 Al₂O₃ 中没有明显的固溶性;但是在还原气氛(如氢气)中, Ti⁴⁺ 能被还原成为 Ti³⁺, 从而固溶于刚玉中;在部分还原气氛下, Al₂O₃ 与 TiO₂ 可以形成 Al₂O₃ - TiO₂ 固溶体。另外,由于 Ti³⁺ 的离子半径为 0.9 \AA , 而 Al³⁺ 的离子半径为 0.50 \AA , 所以 Ti³⁺ 固溶于刚玉中会使刚玉晶格变形和膨胀。

关于 TiO₂ 在刚玉或者莫来石中的固溶量及其与温度等因素的关系也有诸多报道。祝金楼等^[8] 的研究表明: $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, TiO₂ 在刚玉中的固溶量(质量分数,下同)可达 1%, 在莫来石中的固溶量可达 4%。文献 [9] 中通过对 TiO₂ - SiO₂ - Al₂O₃ 三元系统进行淬火试验,研究了 TiO₂ 在莫来石中的固溶量,结果表明: TiO₂ 在莫来石中的固溶量与 Al₂O₃ 的含量和温度有密切的关系,在低 Al₂O₃ 范围(Al₂O₃ 的质量分数 $\leq 42\%$)内,当温度为 $1500 \sim 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,莫来石中 TiO₂ 的固溶量为 $2.4\% \sim 3.9\%$, 而在高铝范围(Al₂O₃ 的质量分数为 $62\% \sim 72\%$)内,当温度为 $1718 \sim 1745 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,莫来石中 TiO₂ 的固溶量为 $5.9\% \sim 6.0\%$ 。

到目前为止,关于 TiO₂ 在莫来石中的固溶量还

没有统一的结论,尚有很多的看法。如有人认为:在 $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, TiO₂ 在莫来石中的固溶量为 3.3% , 在刚玉中的固溶量为 0.16% , $1650 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, TiO₂ 在莫来石中的固溶量为 $4\% \sim 5\%$ 。也有人认为 TiO₂ 在莫来石中的最大固溶量为 6% ^[9]。

3 TiO₂ 在 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火原料中的存在方式及分布

高铝矾土中的 TiO₂ 多以金红石形式存在,多为细分散粒状($\sim 10 \mu\text{m}$),也可见较大晶体($\sim 100 \mu\text{m}$)。除金红石外,还发现少数以锐钛矿和板钛矿形式存在^[2]。

高铝矾土熟料中 TiO₂ 的质量分数一般为 $2\% \sim 4\%$, 个别的高达 10% 。关于高铝矾土熟料中的含钛矿物,国内外已作过大量的研究。王金相^[10] 曾对烧后高铝矾土的结晶相和玻璃相作过研究,认为 TiO₂ 部分进入结晶相, M Caldwell^[11] 指出:在煅烧富钛矾土过程中形成了化合物 $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2)_{0.925} (\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2)_{0.075}$, 该化合物在高于 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时开始熔融。

Schneider 等^[12] 对圭亚那、苏里南和中国的矾土熟料进行了研究,指出莫来石中 TiO₂ 的质量分数为 4.7% , Fe₂O₃ 的质量分数为 4.4% 。还有人认为^[13], 莫来石中 TiO₂ 的固溶量为 $2\% \sim 4\%$ 或 3.3% 。王金相^[10] 指出,我国各等级的高铝矾土在煅烧之后, $62\% \sim 94\%$ 的 TiO₂ 进入结晶相。

4 TiO₂ 对 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料结构和性能的影响

4.1 TiO₂ 对 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料烧结性能的影响

钟香崇^[14] 认为,在矾土的煅烧过程中, TiO₂ 有三种可能的存在形式:进入刚玉和莫来石晶格形成固溶体;与 Al₂O₃ 反应形成钛酸铝,进入玻璃相。在 Al₂O₃ - SiO₂ 系原料的煅烧和 Al₂O₃ - SiO₂ 系制品的生产过程中, TiO₂ 同样会通过上述煅烧矾土过程中的三种存在方式产生影响,究竟以哪种方式存在,则取决于 TiO₂ 的含量及原料和制品的化学组成(Al₂O₃/SiO₂)。

TiO₂ 对 Al₂O₃ - SiO₂ 系耐火材料最明显的作用是促进烧结,很多学者对此作了相关的报道。如文献 [15] 指出,在刚玉陶瓷中加入 TiO₂ 产生了一些引人注目的效果,例如加入 1% (质量分数)的 TiO₂ 后,在 $1500 \sim 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 烧成后已达到了通常在 $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ 烧成后才能达到的 95% 的相对密度。文献 [8] 的研究结果

表明, TiO_2 促进烧结的作用与 TiO_2 的固溶和钛酸铝的形成有关; 当 TiO_2 的加入量低于 TiO_2 在莫来石和刚玉中的固溶度之和时, TiO_2 与莫来石和刚玉形成固溶体, 从而形成了晶格缺陷, 加快物质扩散, 促进烧结; 当 TiO_2 的加入量超过了 TiO_2 在莫来石和刚玉中的固溶度之和时, 部分 TiO_2 可以和莫来石或刚玉反应生成钛酸铝。由于钛酸铝热膨胀的各向异性容易造成晶间孔隙, 因此阻碍材料的烧结。

H S Tripathi 和 G Banerjee^[16] 在研究了 TiO_2 对采用天然硅线石合成的莫来石的烧结性能和机械性能的影响之后认为: 添加 TiO_2 可以降低莫来石的合成温度, 并加速其致密化过程; 添加质量分数为 4% 的 TiO_2 对于降低莫来石的生成温度最有利, 莫来石的合成温度可以降低到 1500 °C; 莫来石的高温强度依赖于 TiO_2 的添加量。他们采用 XRD 和 IR 研究发现: 在 TiO_2 的添加量为 4% (质量分数) 时, 硅线石几乎完全转化为莫来石, 但这样的莫来石并不是理想的 3:2 型莫来石; 在烧成温度为 1500 °C 时, 高达 3.06% (质量分数) 的 TiO_2 以固溶的方式进入莫来石中。S K Sen 和 P S Aggarwal^[17] 研究 TiO_2 作为添加剂对采用硅线石为原料合成莫来石的影响时发现: TiO_2 有利于针状莫来石的生成。 TiO_2 对采用脱水高岭石和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 凝胶为原料合成莫来石也具有积极的作用^[18]。随着 TiO_2 含量的增加, 烧成后制品的显气孔率下降, 体积密度增大, 这是因为 TiO_2 的存在增加了材料中的液相, 从而促进其烧结。也有文献报道^[19], TiO_2 对合成莫来石初期和中期致密化的加速作用的机理是降低液相的粘度。

4.2 TiO_2 对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系耐火材料力学性能的影响

TiO_2 对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系耐火材料力学性能的影响主要是通过钛酸铝产生的。由于钛酸铝热膨胀的各向异性^[8], 钛酸铝的形成可以造成制品内部各相间的热膨胀失配, 使内部产生微裂纹。微裂纹的存在可以提高材料的断裂韧性, 从而提高材料的抗热震性和荷重软化温度。郭玉香等^[20] 的试验结果表明: 随着材料抗热震性能的提高, 材料的体积密度和耐压强度明显下降。因此, TiO_2 的加入量应该有一个最佳量, 使制品既获得较低的热膨胀系数, 又保持较高的强度。夏胜杰和朱秀英^[21] 研究了 ZrSiO_4 和 TiO_2 对铝硅系耐火材料抗热震性的影响后指出: 在加入 8% 的 ZrSiO_4 和 3% TiO_2 时, 材料将获得最佳的抗热震性, 但是对材料的常温性能并无明显的改善作用。他们认为这两种加入物提高 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系耐火材料抗热震性的主要机理为微裂纹增韧及第二相(钛酸铝)降

低了材料的热膨胀系数。关于 TiO_2 对刚玉 - 莫来石材料性能的影响, 文献 [7] 也有报道: TiO_2 对材料的抗折强度的影响也取决于 TiO_2 的量, 当形成钛酸铝后, 材料的强度降低, 这是由于钛酸铝的生成削弱了晶间结合。

用铝硅系原料合成莫来石时, 较低含量的 TiO_2 只起到矿化剂的作用, 仅在 TiO_2 含量较高时才起到杂质的作用, 增加熟料的玻璃相含量。对于 $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 三元系统的研究得知, TiO_2 的影响取决于 Al_2O_3 和 SiO_2 的质量比。对 Al_2O_3 、 SiO_2 和 TiO_2 的质量分数分别为 65%、30% 和 5% 的试样的研究发现, 其莫来石化程度最高, 同时具有很好的物理性能。据此认为 5% 的 TiO_2 可能是有益的^[9]。

5 结语

TiO_2 对 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系材料烧结性能的影响主要是通过固溶和反应生成钛酸铝产生的, 并与 TiO_2 的加入量密切相关, 当 TiO_2 的加入量低于其在材料中的固溶度时将促进烧结, 反之将阻碍烧结。

TiO_2 对材料力学性能的影响和钛酸铝的形成有关。钛酸铝的产生在制品中形成微裂纹, 提高制品的抗热震性能, 但对材料的强度产生不利的影

参考文献

- [1] 赵杰, 胡晓力, 尹虹. 我国高铝矾土资源及其在硅酸盐工业中的应用. 陶瓷, 2002 (6): 43-46
- [2] 高振昕. 煅烧 D-K-R 型矾土的相组成. 耐火材料, 1990, 24 (1): 16-21
- [3] 宋宽秀, 颜秀茹, 霍明亮, 等. $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ 复合材料的制备与表征. 硅酸盐通报, 2000, 19(5): 36-39
- [4] 王维邦. 耐火材料工艺学. 第 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 75-78
- [5] 张军战, 张颖. 钛酸铝陶瓷材料. 陶瓷, 2004 (3): 22-24
- [6] 郭宗奇, 黄朝晖, 宋小维, 等. 高钛高铝矾土的烧结特征. 耐火材料, 1991, 25(1): 11-14
- [7] 赵怡溪, 译. 添加 TiO_2 对氧化铝烧结的影响. 国外耐火材料, 1988, 13(2): 54-56
- [8] 祝金楼, 孙庚辰, 钟香崇. TiO_2 对刚玉 - 莫来石系烧结材料显微结构和高温抗折强度的影响. 耐火材料, 1990, 24(5): 4-9
- [9] 林彬荫, 吴清顺. 耐火矿物原料. 第 1 版. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 272
- [10] 王金相. 我国 D-K 型烧结高铝矾土的结晶相和玻璃相的研究. 硅酸盐学报, 1982, 10(3): 289-297
- [11] Caldwell M. Role of titania in bauxite refractories. Brit Ceram Soc Trans, 1967, 66(3): 107-119
- [12] Schneider H, Seifert - kraus U, Majdic A. Microchemistry of refractory-grade bauxites. Am Ceram Soc Bull, 1982, 61(7): 741
- [13] 张丽华. 高铝矾土熟料中含钛矿物的研究. 耐火材料, 1990, 24

- (1) 22 - 27
- [14] 钟香崇. 矾土基耐火材料的研究与发展. 耐火材料, 1997, 31 (3) :125 - 130
- [15] 杨丽明, 译. TiO₂ 添加剂对 Al - Si - Al₂O₃ 系中相形成的作用. 国外耐火材料, 1996, 21(10) :45 - 49
- [16] Tripathi H S, Banerjee G. Effect of chemical composition on sintering and properties of Al₂O₃ - SiO₂ system derived from sillimanite beach sand. Ceramics International, 1999, 25 (1) :19 - 25
- [17] Sen S K, Aggarwal P S. Effect of TiO₂ and ZrO₂ on sintering of sillimanite. Ceramics International, 1994, 20(5) :299 - 302
- [18] Mitra N K, Mandal A, Maitra S *et al.* Effect of TiO₂ on the interaction of dehydroxylated kaolinite with Al(OH)₃ gel in relation to mullitisation. Ceramics International, 2002, 28(3) :235 - 243
- [19] Hong S H, Messing G L. Anisotropic grain growth in diphasic - gel - derived titania - doped mullite. J Am Ceram Soc, 1998, 81(5) :1269 - 1277
- [20] 郭玉香, 张玲, 龚叔菊, 等. 莫来石 - 钛酸铝复相材料的研究. 鞍山钢铁学院学报, 2001, 24(1) :8 - 10
- [21] 夏胜杰, 朱秀英. ZrSiO₄ 和 TiO₂ 对铝硅系耐火材料抗热震性的影响. 耐火材料, 1998, 32(4) :192 - 194

Effect of TiO₂ on Al₂O₃ - SiO₂ system refractories/ Yin Yucheng, Liang Yonghe, Wu Yunyun, *et al.* // Naihuo Cailiao. - 2006, 40(2) :139

The distribution of TiO₂ in Al₂O₃ - SiO₂ refractories especially in high alumina bauxite was summarized. Effects of TiO₂ on the structures and properties of Al₂O₃ - SiO₂ system refractories were also introduced by analyzing the inter-reaction between TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ during the sintering process of Al₂O₃ - SiO₂ raw material and application of Al₂O₃ - SiO₂ products.

Key words : TiO₂, Al₂O₃ - SiO₂ system refractories, Structure, Properties

Author 's address : The Hubei Province Key Lab of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China



(上接 135 页)

- [8] 桂明玺, 译. 混铁车用加 β- Si₃N₄ 的 Al₂O₃ - SiC - C 砖. 国外耐火材料, 1992, (6) :23 - 27
- [9] 张伟刚, 成会明, 沈祖洪, 等. 炭材料抗氧化研究进展(I): 实现炭材料抗氧化的主要途径. 炭素, 1997, (2) :1 - 6
- [10] 刘开琪. 含炭耐火材料抗氧化涂料的配制及抗氧化原理. 耐火材料, 2000, 34(1) :20 - 22
- [11] 韩文瑞, 周川生, 张学翠. 铝炭耐火制品防氧化涂料的研制与应用. 耐火材料, 1991, 25(3) :168 - 170
- [12] 崔素芬, 译. 石墨制品防氧化用自凝性涂层. 国外耐火材料, 1998, 23(4) :35 - 38

Review of research on oxidation resistance of carbon-containing refractories/ Li Xinjian, Ke Changming, Li Nan // Naihuo Cailiao. - 2006, 40(2) :133

According to the requirements of oxidation resistance of carbon-containing refractories, the technologies of adding antioxidants, improving anti-oxidation by surface soaking and coating are reviewed. In addition, the characteristics and anti-oxidation mechanism of all improving anti-oxidation methods are also presented. On the principle foundation, the research direction of oxidation resistance technologies for carbon-containing refractories is suggested.

Key words : Carbon-containing refractories, Oxidation resistance, Antioxidants, Coating technology, Surface soaking method

Author 's address : The Hubei Province Key Lab of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Sci & Tech, Wuhan 430081, China

TiO₂ 在Al₂O₃-SiO₂ 系耐火材料中的作用

作者: 尹玉成, 梁永和, 吴芸芸, 王继宝
作者单位: 武汉科技大学高温陶瓷与耐火材料湖北省重点实验室, 武汉, 430081
刊名: 耐火材料 **ISTIC** **PKU**
英文刊名: REFRACTORIES
年, 卷(期): 2006, 40(2)

参考文献(21条)

1. 赵杰;胡晓力;尹虹 我国高铝矾土资源及其在硅酸盐工业中的应用[期刊论文]-陶瓷 2002(06)
2. 高振昕 煅烧D-K-R型矾土的相组成 1990(01)
3. 宋宽秀;颜秀茹;霍明亮 TiO₂-SiO₂复合材料的制备与表征[期刊论文]-硅酸盐通报 2000(05)
4. 王维邦 耐火材料工艺学 1994
5. 张军战;张颖 钛酸铝陶瓷材料[期刊论文]-陶瓷 2004(03)
6. 郭宗奇;黄朝晖;宋小维 高钛高铝矾土的烧结特征 1991(01)
7. 赵怡溪 添加TiO₂对氧化铝烧结的影响 1988(02)
8. 祝金楼;孙庚辰;钟香崇 TiO₂对刚玉-莫来石系烧结材料显微结构和高温抗折强度的影响 1990(05)
9. 林彬荫;吴清顺 耐火矿物原料 1989
10. 王金相 我国D-K型烧结高铝矾土的结晶相和玻璃相的研究 1982(03)
11. Caldwell M Role of titania in bauxite refractories 1967(03)
12. Schneider H;Seifert-kraus U;Majdic A Microchemistry of refractory-grade bauxites 1982(07)
13. 张丽华 高铝矾土熟料中含钛矿物的研究 1990(01)
14. 钟香崇 矾土基耐火材料的研究与发展 1997(03)
15. 杨丽明 TiO₂添加剂对Al-Si-Al₂O₃系中相形成的作用 1996(10)
16. Tripathi H S;Banerjee G Effect of chemical composition on sintering and properties of Al₂O₃-SiO₂ system derived from silimanite beach sand[外文期刊] 1999(01)
17. Sen S K;Aggarwal P S Effect of TiO₂ and ZrO₂ on sintering of sillimanite[外文期刊] 1994(05)
18. Mitra N K;Mandal A;Maitra S Effect of TiO₂ on the interaction of dehydroxylated kaolinite with Al(OH)₃ gel in relation to mullitisation[外文期刊] 2002(03)
19. Hong S H;Messing G L Anisotropic grain growth in diphasic-gel-derived titania-doped mullite[外文期刊] 1998(05)
20. 郭玉香;张玲;窦叔菊 莫来石-钛酸铝复相材料的研究[期刊论文]-鞍山钢铁学院学报 2001(01)
21. 夏胜杰;朱秀英 ZrSiO₄和TiO₂对铝硅系耐火材料抗热震性的影响 1998(04)

本文读者也读过(10条)

1. 张宜萍, 易德莲, 梁永和, 吴芸芸 水化碳酸化处理MgO-CaO砂的工艺条件研究[期刊论文]-耐火材料2005, 39(2)
2. 吴芸芸, 梁永和, 易德莲, 赵敏伦, WU Yun-yun, HANG Yong-he, YI De-lian, ZHAO Min-lun 镁钙砂碳酸化反应特性的研究[期刊论文]-武汉科技大学学报(自然科学版) 2006, 29(1)
3. 梁永和, 李楠, 钱新伟, 吴芸芸, 孙承绪 低温合成高铬烧结料[期刊论文]-耐火材料2001, 35(4)
4. 张汪年, 吴芸芸, 梁永和 轻烧工艺条件对岩峰白云石煅烧性能的影响[期刊论文]-耐火材料2006, 40(5)
5. 吴芸芸, 梁永和, 易德莲, 赵敏伦 镁钙砂细粉碳酸化反应的热分析动力学研究[期刊论文]-耐火材料2005, 39(5)
6. 王继宝, 尹玉成, 吴芸芸, 李勇, 梁永和 烧成温度和ZrO₂含量对镁钙制品烧结性能的影响[期刊论文]-耐火材料2005, 39(6)
7. 吴芸芸, 易德莲, 梁永和, 赵敏伦, WU Yun-yun, YI De-lian, LIANG Yong-he, ZHAO Min-lun 氧化钙碳酸化反应动力学研究[期刊论文]-武汉科技大学学报(自然科学版) 2005, 28(2)

8. [王洪涛](#). [管少鹏](#) [以焦炉煤气为燃料煅烧高铝矾土的回转窑技术](#)[期刊论文]-[中国建材科技](#)2006, 15(4)
9. [杨中正](#). [徐恩霞](#). [葛铁柱](#). [Yang Zhongzheng](#). [Xu Enxia](#). [Ge Tiezhu](#) [矾土基莫来石料的工业生产实践](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2007, 41(5)
10. [李培佳](#). [李林](#). [贺智勇](#). [彭小艳](#). [杨粉荣](#) [硅线石对矾土基浇注料性能的影响](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2011, 45(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl200602017.aspx