

熟料烧结过程中氧化铁反应行为的热力学分析

周秋生, 齐天贵, 彭志宏, 刘桂华, 李小斌

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 通过对 Fe_2O_3 与碳酸钠、氧化钙以及硅酸钙反应的热力学分析, 明确 Fe_2O_3 在铝土矿炉料烧结过程中的热力学反应规律。热力学计算、分析结果表明: Fe_2O_3 在正常烧结温度范围内能与 Na_2CO_3 或 CaO 发生反应, 但更易与 CaO 反应形成 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, Fe_2O_3 和 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 能使 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 转变为 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 进一步与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 反应生成不溶的三元化合物而造成烧结法生产氧化铝过程中 Na_2O 和 Al_2O_3 的损失。 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 不能由铁酸钙和铝酸钠相互反应产生, 而可能是 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 三者直接反应的产物, 且在烧结条件下 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 可分解 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

关键词: 铝土矿; 熟料; 烧结; Fe_2O_3 ; 热力学

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

Thermodynamics of reaction behavior of ferric oxide during sinter-preparing process

ZHOU Qiu-sheng, QI Tian-gui, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua, LI Xiao-bin

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the thermodynamic analyses of the reactions of ferric oxide(Fe_2O_3) with sodium carbonate, calcium oxide and calcium silicates, respectively, the thermodynamic of those reactions was determined. The results show that ferric oxide can react with sodium carbonate and calcium oxide respectively, but be more likely to react with calcium oxide to form calcium ferrite in the industrial sintering temperature range. Ferric oxide and sodium ferrite($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) can transform $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ and $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ into $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, and $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ can further react with $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ or sodium ferrite to form insoluble ternary compounds, which results in the loss of sodium oxide and alumina during the alumina production by the sintering process. Calcium ferrite aluminate ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) can not form from the reaction of calcium ferrite($\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) and sodium aluminate but rather is the direct product of the reaction of calcium oxide, alumina and ferric oxide. And calcium ferrite aluminate can be decomposed by sodium ferrite under the condition of sintering.

Key words: bauxite; sinter; sintering; Fe_2O_3 ; thermodynamics

我国绝大部分铝土矿属于高铝高硅、低铝硅比的一水硬铝石矿, 这种铝土矿结晶完善, 结构致密, 铝硅比在 4~7 之间的铝土矿约占已探明总储量的 80%, 由此决定了我国氧化铝生产长期处于烧结法和拜耳—烧结联合法为主的格局^[1]。目前, 我国采

用烧结法生产的氧化铝约占氧化铝总产量的 45%。

在碱石灰烧结法中, 一般是使炉料中的氧化物通过烧结转变为铝酸钠、铁酸钠、原硅酸钙和钛酸钙。在烧结所得熟料溶出时, 铝进入溶液而大部分杂质则进入赤泥, 从而实现铝与杂质的有效分离。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623702-2)

收稿日期: 2006-10-30; 修订日期: 2007-03-15

通讯作者: 周秋生, 博士, 副教授; 电话: 0731-8830453; E-mail: qszhou@mail.csu.edu.cn

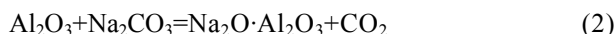
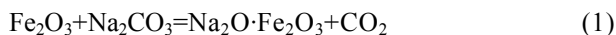
铁的氧化物是铝土矿中的主要杂质之一, Fe_2O_3 在烧结过程中的行为与 Al_2O_3 非常相似, 它与 Na_2CO_3 反应生成铁酸钠, 而铁酸钠能够与熟料中的多种化合物生成连续固溶体, 从而降低炉料的熔点, 因此, 铝土矿中铁含量太低将使炉料的熔点太高而很难挂上窑皮, 铝土矿中铁含量太高则将使炉料的熔点大幅度降低, 使烧结温度范围变窄, 造成烧结过程操作困难^[1]。因此, 在高铁炉料中往往加入大量的 CaO , 使部分 Fe_2O_3 生成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, 以减少铁对烧结过程的不利影响。

张晨光研究表明^[2], 熟料中氧化铝的溶出率与铝土矿中铁含量关系密切, 当 Fe_2O_3 含量达到一定程度后, Al_2O_3 溶出率降低。一般认为这是熟料中的一部分氧化铝转化为铁铝酸钙或 $\text{Na}_2\text{O}\cdot 11(\text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ 所造成的^[3]。但由于铝土矿炉料组分复杂以及烧结过程中反应错综复杂, 因此, 近年来虽然针对烧结法生产氧化铝工艺开展了许多卓有成效的工作, 使技术经济指标得到显著提高^[4-9], 并对通过烧结工艺回收工业废料中的针铁矿等也进行过研究^[10-12], 但关于 Fe_2O_3 在铝土矿炉料烧结过程中的行为至今仍不甚清楚, 也鲜有研究报道。为此, 本文作者基于氧化铝生产热力学数据库^[13], 针对 Fe_2O_3 在铝土矿炉料烧结过程中的反应行为进行较系统的热力学分析。

1 热力学分析结果与讨论

1.1 Fe_2O_3 与碳酸钠的反应

在传统的碳酸钠、石灰、铝土矿三成分炉料烧结过程中, 铝土矿中的 Fe_2O_3 、氧化铝均与碳酸钠发生化学反应生成相应的铝酸钠和铁酸钠。在 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ 系中, 烧结过程同时存在 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 与 Na_2CO_3 的反应, 其反应方程式为:



应用“氧化铝生产热力学数据库”计算软件对反应式(1)和(2)进行热力学计算, 其反应吉布斯自由能与烧结温度的关系如图1所示。由图1可以看出: 不同晶型的氧化铝和 Fe_2O_3 与碳酸钠反应的吉布斯自由能都随温度的升高而降低, 在正常烧结温度下(1 200 °C左右), 反应(1)和(2)均能自动向右进行, 生成相应的铝酸盐和铁酸盐; 在同一温度下, 氧化铝与碳酸钠反应的反应吉布斯自由能比 Fe_2O_3 与碳酸钠反应的反应吉布斯自由能更负, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

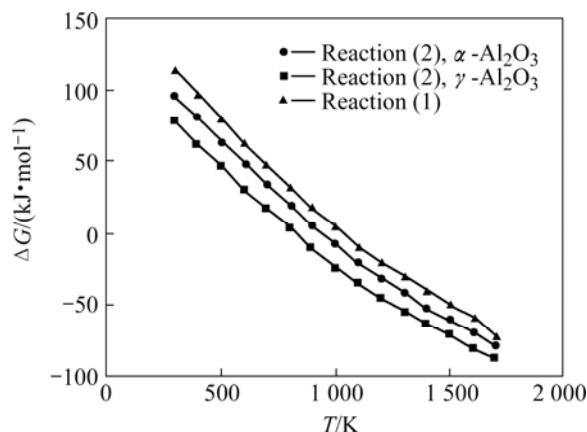


图1 反应式(1)和(2)的反应吉布斯自由能与温度的关系
Fig.1 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (1) and (2) and temperature

与碳酸钠反应的反应吉布斯自由能比 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与碳酸钠反应的反应吉布斯自由能更负。由此可知, 在热力学上, Fe_2O_3 与 Na_2CO_3 的反应只能在 Al_2O_3 与碳酸钠反应后有剩余碳酸钠的条件下才能进行。当所配碳酸钠不足时铁酸钠可能向铝酸钠转变, 其反应为:



反应式(3)在不同温度下的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图2所示, 由图2可知, 在烧结温度范围内, 铁酸钠向铝酸钠转化反应的自由能为负值, 这说明碳酸钠优先与 Al_2O_3 反应, 当所配碳酸钠不足时, 不能生成 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。在 $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系中, 当 $n(\text{Na}_2\text{O}):n(\text{R}_2\text{O}_3) > 1$ ($\text{R}=\text{Al}, \text{Fe}$) 时, 得到 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 固溶体以及游离的

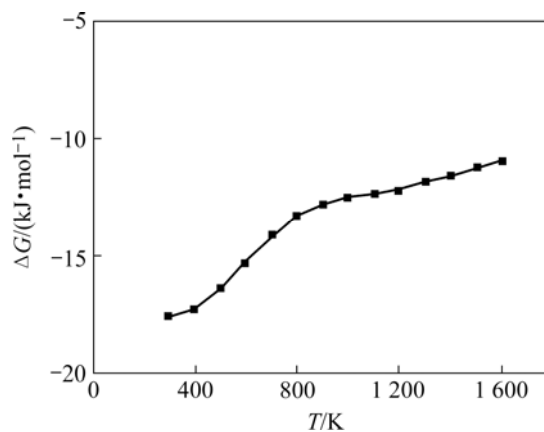
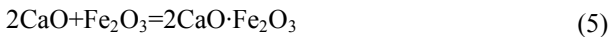


图2 反应式(3)的反应吉布斯自由能与温度的关系
Fig.2 Relationship between Gibbs free energy change of reaction (3) and temperature

Na₂CO₃; 当 $n(\text{Na}_2\text{O}):n(\text{R}_2\text{O}_3)=1$ 时, 得到 Na₂O·Al₂O₃ 和 Na₂O·Fe₂O₃^[3, 14], 这与热力学计算结果一致。

1.2 Fe₂O₃ 与钙化合物的反应

Fe₂O₃ 与 CaO 反应可生成 CaO·Fe₂O₃ 和 2CaO·Fe₂O₃。在高铁炉料烧结过程中通过控制合适的钙比可使部分铁转变为 CaO·Fe₂O₃ 和 2CaO·Fe₂O₃ 以改善熟料的烧结质量和溶出性能。Fe₂O₃ 与 CaO 反应的方程式为:



反应式(4)、(5)与反应式(1)的反应吉布斯自由能与温度的关系曲线如图 3 所示。热力学计算结果表明, Fe₂O₃ 与 CaO 的反应比它与 Na₂CO₃ 的反应更容易进行, 而且在热力学上 CaO·Fe₂O₃ 较 2CaO·Fe₂O₃ 更易生成。

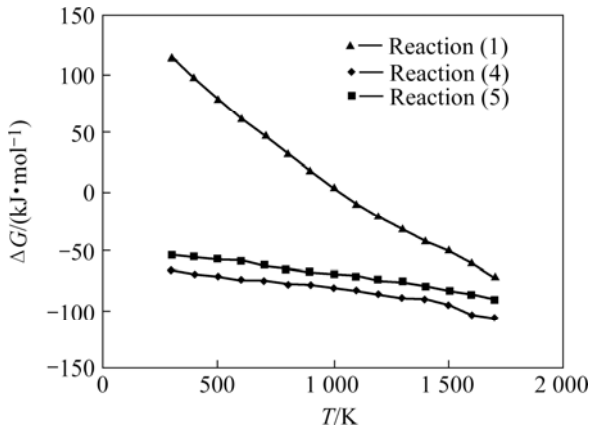


图 3 反应式(1)、(4)和(5)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.3 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (1), (4) and (5) and temperature

在熟料烧结过程中, 炉料中的钙按照矿石中的硅和钛进行配料, 炉料在烧结过程中可能形成 CaO·SiO₂、2CaO·SiO₂、3CaO·2SiO₂ 和 CaO·TiO₂。Fe₂O₃ 与硅酸钙反应生成 CaO·Fe₂O₃ 的可能反应见反应式(6)~(11), 其相应的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图 4 所示。Fe₂O₃ 与硅酸钙反应生成 2CaO·Fe₂O₃ 的可能反应见反应式(12)~(17), 其相应的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图 5 所示。

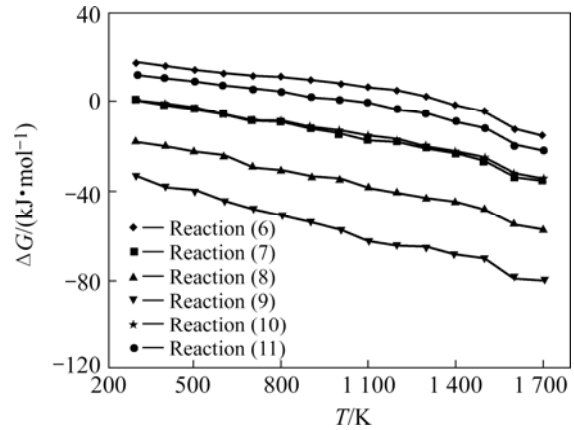
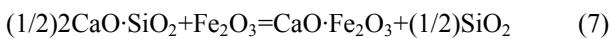
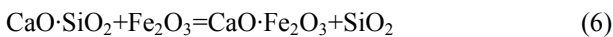


图 4 反应式(6)~(11)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.4 Relationship between Gibbs free energy change of reactions (6)~(11) and temperature

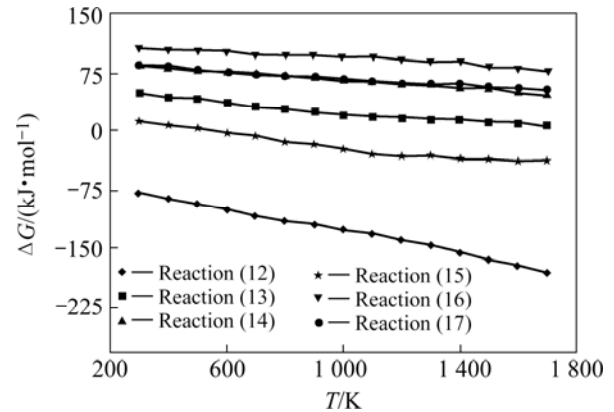
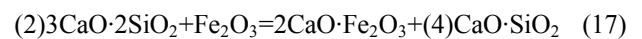
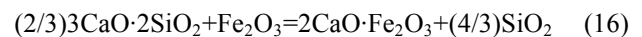
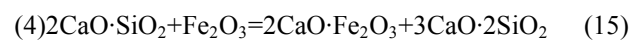
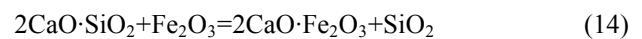
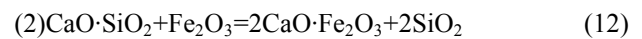
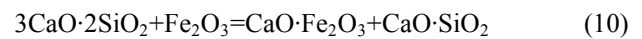
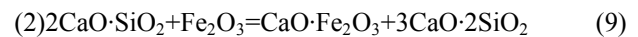
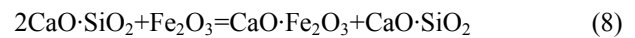


图 5 反应式(12)~(17)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.5 Relationship between Gibbs free energy change of reactions (12)~(17) and temperature



从图 4 和图 5 可看出, 在正常的烧结温度下, CaO·SiO₂ 和 2CaO·SiO₂ 能够与 Fe₂O₃ 反应生成

$\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 不能与 Fe_2O_3 反应生成 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 而能生成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。比较图 4 和图 5 可得出, 在热力学上, Fe_2O_3 与硅酸钙反应更易生成 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, 从而使 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 转化为 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 。而 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 能够与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应生成不溶的三元化合物, 使熟料中氧化铝的溶出率降低。 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 的反应见式(18)~(20), 其相应的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图 6 所示。

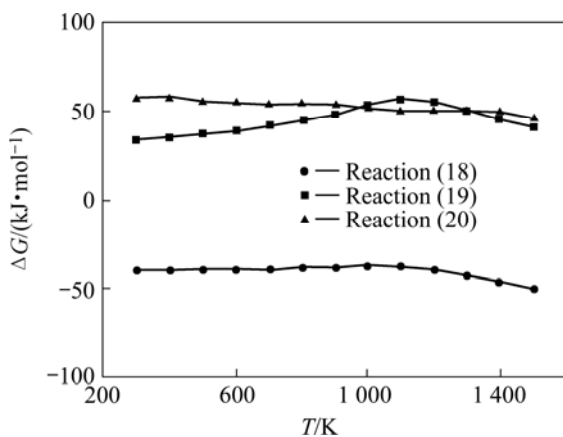
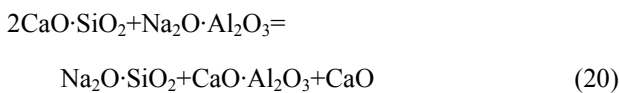
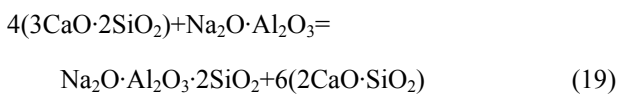
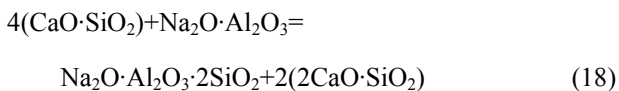


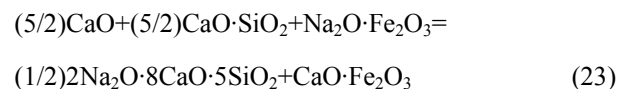
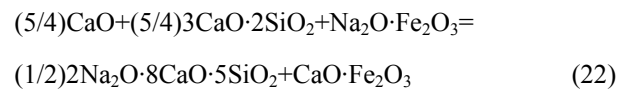
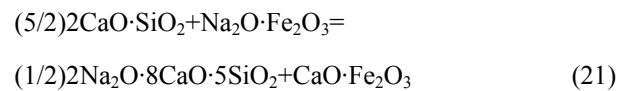
图 6 反应式(18)~(20)的反应吉布斯自由能与温度的关系
Fig.6 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (18)~(20) and temperature

从图 6 中可看出, 烧结条件下 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应的反应吉布斯自由能为负值, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 反应的吉布斯自由能均为正值。这说明在烧结条件下, 当炉料中 Fe_2O_3 含量很低时, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 能稳定存在, 不会造成铝的损失; 而 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 不稳定, 容易造成铝的损失。因此, 烧结过程应尽量避免 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的生成。在高铁炉料烧结过程中, 当 Na_2CO_3 的摩尔数与 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的摩尔数之和的比值小于 1 时, 由图 1、图 4 和图 5 的分析结果可知, Na_2CO_3 将优先与 Al_2O_3 反应生成 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, 剩余的 Na_2CO_3 与部分 Fe_2O_3 反应生成 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 未结合的 Fe_2O_3 将分解 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 生成 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, 从而造成

氧化铝的损失。因此, 必须配入适量的氧化钙, 保证炉料中 SiO_2 生成 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 或 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$, 未结合的 Fe_2O_3 与 CaO 反应生成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

1.3 三元化合物的生成

当烧结炉料中氧化铁含量升高到一定程度时, 熟料中存在一个氧化铝溶出率较低的区域, 一般认为在该区域内造成氧化铝损失的主要原因是部分 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 相互反应生成三元化合物 $2\text{Na}_2\text{O}\cdot 8\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$ 和 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 。这些三元化合物在熟料溶出过程中不溶解, 从而造成铝和碱的损失^[2]。 $2\text{Na}_2\text{O}\cdot 8\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$ 的可能生成反应见式(21)~(23), 其相应的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图 7 所示。



由图 7 可知, 在高铁炉料中, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 都能反应生成 $2\text{Na}_2\text{O}\cdot 8\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2$, 造成碱的损失, 同时 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 转化为 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。从图 7 还可得出, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 反应的反应吉布斯自由能依次变得更负, 这说明 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的反应依次变得更为容易, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的存在更易造成 Na_2O 的损失。

一般认为, 在高铁炉料中, 当 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量达

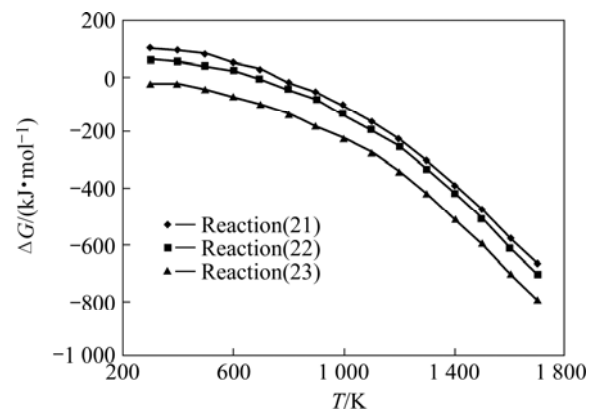
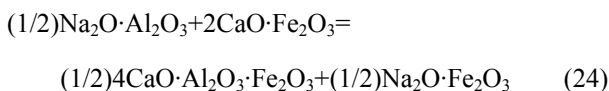
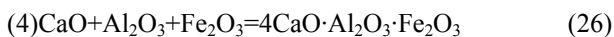
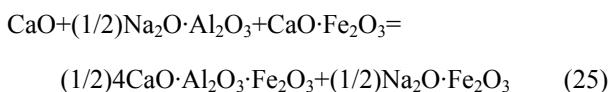


图 7 反应式(21)~(23)的反应吉布斯自由能与温度的关系
Fig.7 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (21)~(23) and temperature

到一定值后, 熟料中 Al_2O_3 的溶出率与熟料中 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的含量成反比^[2]。托罗波夫认为这是由于 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相互反应生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 而造成熟料中 Al_2O_3 的损失^[1]。生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的反应见式(24):



$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 相互反应生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 以及 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 三者直接反应生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的可能反应分别见式(25)和(26):



反应式(24)~(26)的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线如图8所示。由图8可知, 当反应温度低于1800 K 时, 反应式(24)和(25)的反应吉布斯自由能都为正值, 说明铝酸钠与铁酸钙相互反应生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的反应在热力学上是不可能发生的, 这与托罗波夫的观点不同。反应式(26)的反应吉布斯自由能为负值, 说明在烧结过程中 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 可直接反应生成 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, 而 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 可沿反应式(24)和(25)的逆反应方向被 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 分解。从热力学上看, 熟料中的 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 并不是铝酸钠和铁酸钙相互反应的产物, 而是 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 三者直接反应并且未被 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 完全分解的结果。因此, 保证熟料中一定含量的 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 可避免 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 生成。

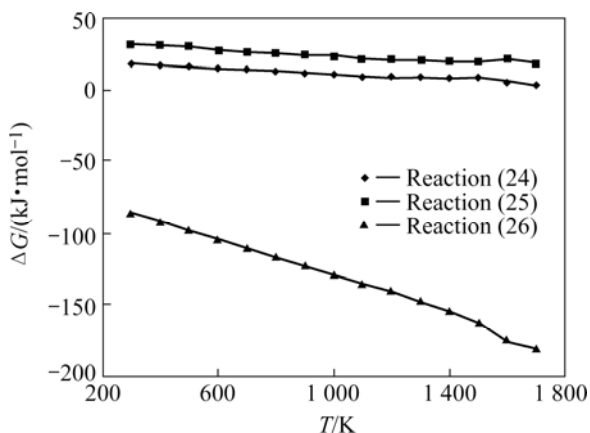


图8 反应式(24)~(26)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.8 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (24)~(26) and temperature

综合 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与硅酸钙的各种反应, 可以看出 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 可能是造成熟料中 Na_2O 和 Al_2O_3 损失的主要原因。在高铁熟料中, 由于 Fe_2O_3 、 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2$ 相互反应, 使 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2$ 向 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 转变, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 再进一步与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 作用生成不溶的三元化合物, 造成 Al_2O_3 和 Na_2O 的损失。随着熟料中 CaO 含量的增加, $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的量将不断减少, 熟料溶出过程 Na_2O 和 Al_2O_3 的损失将不断下降。因此 Fe_2O_3 对熟料烧结过程的影响主要是通过它对硅酸钙生成反应过程的影响进行的。

2 结论

1) 烧结条件下, 与 Fe_2O_3 相比, Al_2O_3 优先与 Na_2CO_3 反应, 当所配 Na_2CO_3 不足时先生成 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, 当 Na_2CO_3 足够时才生成 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$; Fe_2O_3 能与 Na_2CO_3 或 CaO 反应, 但更易与 CaO 反应生成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

2) Fe_2O_3 比 SiO_2 更易与 CaO 结合, 并且 Fe_2O_3 可使 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2$ 转变为 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$; 而 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 可与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 反应生成不溶三元化合物而造成 Na_2O 和 Al_2O_3 的损失。

3) 在高铁炉料烧结过程中, 应配入适量的 CaO , 保证炉料中 SiO_2 生成 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 或 $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2$, 未与 Na_2CO_3 结合的 Fe_2O_3 生成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 以避免 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的生成。

4) 在热力学上, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 是 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 三者直接反应的产物, 而不是 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 或 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 相互反应的结果, 且在烧结条件下 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 可分解 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

REFERENCES

- [1] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 176-197.
YANG Zhong-yu. Technology of alumina production[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989: 176-197.
- [2] 张晨光. 钠铁比对熟料溶出率影响的探讨[J]. 山东冶金, 1999, 21(1): 51-54.
ZHANG Chen-guang. Discussion of influence of ratio of sodium oxide to ferric oxide on alumina recovery of sinter [J]. Shandong Metallurgy, 1999, 21(1): 51-54.
- [3] 阿布拉莫夫 B Я. 碱法综合处理含铝原料的物理化学原理 [M]. 陈谦德, 译. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988: 152-165.

- Абрамов В Я. Principle of physical chemistry for comprehensive treatment of alumina-containing resource with basic method[M]. CHEN Qian-de, transl. Changsha: Central South University of Technology Press, 1988: 152-165.
- [4] 李小斌, 谭培龙, 吕卫君, 刘桂华, 彭志宏, 周秋生. 高岭石碱石灰的烧结过程[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(4): 422-426.
LI Xiao-bin, TAN Pei-long, LÜ Wei-jun, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng. Sintering process between kaolinite and alkali lime[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(4): 422-426.
- [5] 李小斌, 潘军, 刘桂华, 彭志宏, 周秋生. 从铝酸钠溶液中析出一水软铝石的实验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(1): 25-30.
LI Xiao-bin, PAN Jun, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng. Boehmite precipitation from sodium aluminate solution[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 25-30.
- [6] 刘桂华, 刘云峰, 李小斌, 彭志宏, 周秋生, 徐华军. 拜耳法溶出过程降低赤泥碱耗[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 555-559.
LIU Gui-hua, LIU Yun-feng, LI Xiao-bin, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng, XU Hua-jun. Reducing loss of soda in red mud in process of Bayer digestion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(3): 555-559.
- [7] 李小斌, 刘祥民, 刘桂华, 彭志宏, 刘业翔. 强化烧结法生产氧化铝的工艺与实践[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(6): 1031-1036.
LI Xiao-bin, LIU Xiang-min, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, LIU Ye-xiang. Technology and application of the intensified sintering process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(6): 1031-1036.
- [8] LI Xiao-bin, FENG Gang-tao, ZHOU Qiu-sheng, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong. Phenomena in the late period of seeded precipitation of sodium aluminate solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(4): 947-950.
- [9] LI Xiao-bin, ZHAO Zhuo, LIU Gui-hua, ZHOU Qiu-sheng, PENG Zhi-hong. Behavior of the calcium silicate hydrate in the sodium aluminate solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(5): 1145-1149.
- [10] Pelino M, Cantalini C, Rincon J M. Preparation and properties of glass-ceramic materials obtained by recycling goethite industrial waste[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(17): 171-176.
- [11] 贺先新, 翁德明, 毕学工, 周国凡. 高品位烧结矿的烧结研究[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2002, 25(3): 230-233.
HE Xian-xin, WENG De-ming, BI Xue-gong, ZHOU Guo-fan. Study on the sintering of high-iron content sinter[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002, 25(3): 230-233.
- [12] Romero M, Rincon J M. Preparation and properties of high iron oxide content glasses obtained from industrial wastes[J]. J Eur Ceram Soc, 1998, 18(2): 153-160.
- [13] 任万能. 氧化铝生产热力学数据库的优化与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
REN Wan-neng. Optimization and application of thermodynamic database for alumina production [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [14] 汪志全. 低硅烧结矿烧结的矿物组成[J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(3): 211-214.
WANG Zhi-quan. Mineral composition of sinter with low silica[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2005, 22(3): 211-214.

(编辑 杨幼平)