

高铁三水铝石型铝土矿烧结过程中氧化铝反应热力学

朱忠平, 姜 涛, 李光辉, 黄柱成

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究了高铁三水铝石型铝土矿烧结过程中 Al_2O_3 与 CaCO_3 、 CaO 、 SiO_2 及 FeO 反应的热力学规律。结果表明: 在 1 473~1 673 K 温度下, Al_2O_3 比 Fe_2O_3 更易与 CaCO_3 反应; Al_2O_3 与铁酸钙($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) 反应不能生成 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, 当烧结温度大于 1 000 K 时, 可以与 $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 反应生成 $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$; SiO_2 比 Al_2O_3 更易与 CaO 结合, Al_2O_3 与 SiO_2 直接反应生成硅酸铝的可能性较小; 当烧结温度为 1 473~1 673 K 时, 除 $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 不能向 $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 转变外, 其余铝酸钙均可在 SiO_2 的作用下向硅酸钙转变; $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 是 CaO 、 Al_2O_3 和 SiO_2 三者直接反应的产物, 不能由硅酸钙和铝酸钙相互反应生成; CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 SiO_2 四元矿物存在时, 烧结过程优先生成 $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 和 $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, 这与烧结实验结果相符。

关键词: 三水铝石; 铝土矿; 铁矿石; 烧结; 氧化铝

中图法分类号: TF521; TF821 文献标识: A

Thermodynamics of reaction of alumina during sintering process of high-iron gibbsite-type bauxite

ZHU Zhong-ping, JIANG Tao, LI Guang-hui, HUANG Zhu-cheng

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The thermodynamics of the reactions of alumina(Al_2O_3) with CaCO_3 , CaO , SiO_2 and FeO in the sintering process of high-iron gibbsite-type bauxite was investigated. The results show that alumina reacts with calcium carbonate much easier than ferri oxide(Fe_2O_3) at the industrial sintering temperature of 1 473–1 673 K. Alumina can not react with calcium ferrites($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ and $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) to form $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, but when temperature is over 1 000 K alumina reacts with $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ to form $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$. SiO_2 reacts with CaO much easier than Al_2O_3 . The possibility of alumina silicate from direct reaction of Al_2O_3 with SiO_2 is little. Except for $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, the other calcium aluminates can transform into calcium silicate by reacting with SiO_2 . Gehlenite($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) can not be formed from the reaction of calcium silicate($\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) with calcium aluminate($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), but it can be directly formed from the reaction of CaO , Al_2O_3 and SiO_2 . When CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 and SiO_2 coexist in the sintering process, they are more likely to form ternary compound $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ and $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, which is consistent with the sintering results in laboratory.

Key words: gibbsite; bauxite; iron ore; sintering; alumina

随着我国经济的快速发展, 对支持国民经济可持续发展的第一、二大金属铁、铝的消耗也越来越大, 铁矿和铝土矿的资源供应量严重短缺^[1-3]。20 世纪 80 年代, 我国在广西等地发现大量高铁三水铝石型铝土

矿(以下简称为高铁铝土矿), 资源储量超过 1.6 亿 t。该矿中铝、铁含量较低(总铁含量 24%~37%, Al_2O_3 含量 20%~37%)、铝硅比较低($A/S=2.6\sim 5.4$), 而且由于铁矿物与铝矿物嵌布粒度细, 相互胶结, 矿物的单

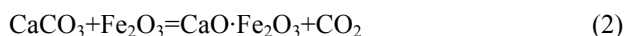
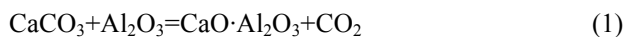
体解离性能极差,难以选别,若以单一铁矿或铝土矿开发,均未达到一般冶炼品位要求^[1]。但由于该矿含有价金属品种多(主要含铁、铝、钒、镓、锰和钛等),国内外科研工作者一直没有间断对此矿的研究。

东北大学对广西高铁铝土矿“高炉冶炼—炉渣浸出提铝”工艺的研究表明,通过严格控制渣条件,可在炼铁高炉中实现铁铝的有效分离^[4]。本课题组^[5]针对该矿的烧结特性进行了系统的研究,结果表明:高铁铝土矿超高碱度烧结矿,机械强度高,还原性能良好,基本能满足高炉冶炼要求。在烧结过程中,一般通过添加大量的石灰石熔剂,以使烧结混合料中的氧化铁转化为铁酸钙,氧化铝转化铝酸钙。氧化铁在烧结过程中的行为已有研究^[6],本文作者基于已有热力学数据^[7-13],对氧化铝在烧结过程中的反应行为进行分析研究。

1 热力学分析

1.1 Al_2O_3 与含钙化合物的反应

烧结过程中涉及的含钙化合物主要有碳酸钙、氧化钙、铝酸钙、铁酸钙和硅酸钙等。在高铁铝土矿与石灰石的烧结过程中,高铁铝土矿中的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 均与碳酸钙发生化学反应生成相应的铝酸盐和铁酸盐。在 Al_2O_3 - CaO - Fe_2O_3 系中,烧结过程同时存在 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与 CaCO_3 的反应,其反应方程式如下:



经热力学计算,其吉布斯自由能(ΔG)与温度(T)的关系如图1所示。由图1可知 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与 CaCO_3 反应的吉布斯自由能都随温度的升高而降低,在正常烧结过程中(由于1200 K以上 CaCO_3 发生分解,因而1200 K以上没有作曲线),反应(1)和(2)均能自动向右进行,生成相应的铝酸钙和铁酸钙;在同一温度下, Al_2O_3 与 CaCO_3 反应的吉布斯自由能比 Fe_2O_3 与 CaCO_3 反应的更负。在1473~1673 K 烧结温度下, CaCO_3 实际已发生分解,因此在以下的分析中只按 CaO 考虑。

由于烧结的最终目的是要满足高炉需要的烧结矿,使铁铝在高炉冶炼过程中分离后,再由炉渣浸出提取氧化铝。如果不考虑炉渣中 MgO 和 TiO_2 等少量组分,则炉渣可简化为 CaO - Al_2O_3 - SiO_2 三元系。在该三元系中的含铝矿物中,只有 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_{12}A_7)

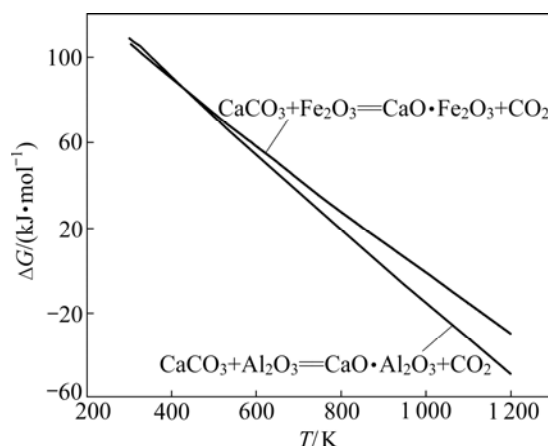
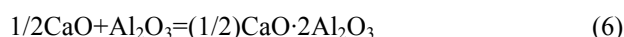
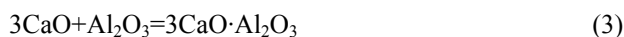


图1 反应式(1)和(2)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.1 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (1) and (2) and temperature

能完全溶于碳酸钠溶液中, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (CA) 溶解速度较慢,而 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (C_2AS) 等矿物则完全不溶。假定高炉不再添加熔剂,则烧结配料时应按照高炉冶炼和炉渣浸出的要求,考虑尽量避免这些三元化合物的生成,并应使 Al_2O_3 尽可能地形成 C_{12}A_7 ,且避开 C_2AS 的初晶区。 Al_2O_3 与 CaO 反应生成 C_3A 、 C_{12}A_7 、 CA 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA_2) 的方程式如下:



反应式(3)~(6)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图2所示。由图2可知, Al_2O_3 与 CaO 反应的吉布

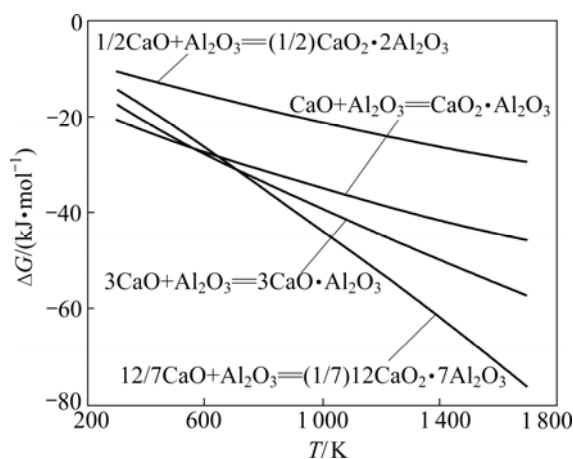
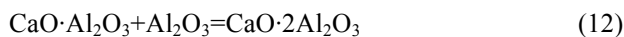
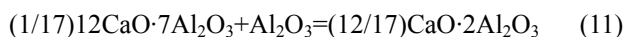
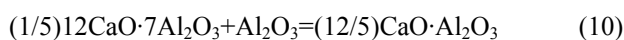
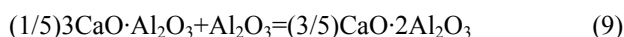
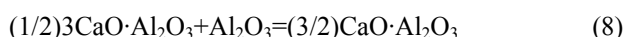
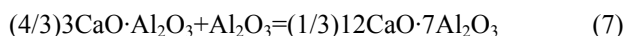


图2 反应式(3)~(6)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.2 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (3)~(6) and temperature

斯自由能随着温度的升高而降低, 在正常烧结温度区间(1 473~1 673 K, 下同)下, 反应(3)~(6)均能自动向右进行, 生成相应的铝酸钙; 在热力学上, 在同一烧结温度下, 1 mol Al_2O_3 与 CaO 生成铝酸钙由易至难的顺序为: C_{12}A_7 、 C_3A 、 CA 和 CA_2 。

当原料中 CaO 用量不足时, 多余的 Al_2O_3 可能会与新生成的高钙铝比(CaO 与 Al_2O_3 摩尔比)的铝酸钙向低钙铝比的铝酸钙转变, 其反应方程式如下:



反应式(7)~(12)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 在正常烧结温度下, 反应式(7)~(12)的反应吉布斯自由能均为负, 反应均能向右进行, 生成相应的低钙铝比的铝酸钙; 除反应式(9)和(10)外, 其余反应式的吉布斯自由能随着温度的升高而更负; 在热力学上, 在正常烧结温度下, 各反应式由易到难进行的顺序依次为(7)、(8)、(9)、(10)、(11)和(12)。对比图(2)和(3), 在热力学上, Al_2O_3 与 CaO 反应更容易生成 C_{12}A_7 。

在高铁铝土矿烧结过程中, SiO_2 在烧结过程中可能与 CaO 形成 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (CS)、 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (C_3S_2)、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)、和 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S), 其相应的反应吉布斯自由能随温度的变化曲线见图 4。

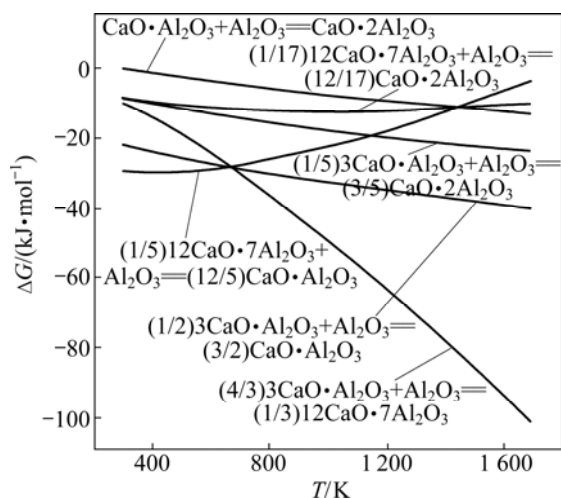


图 3 反应式(7)~(12)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.3 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (7)~(12) and temperature

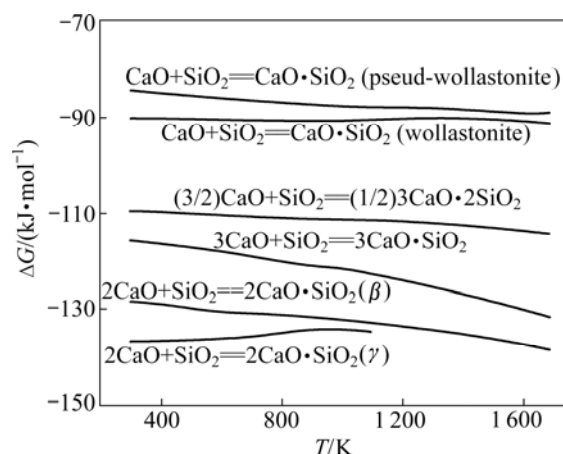
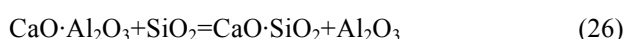
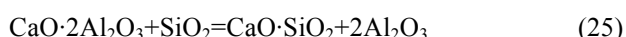
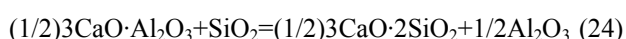
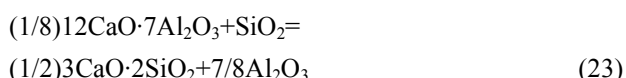
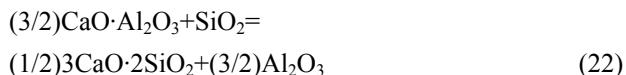
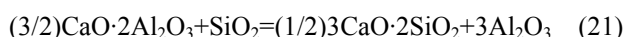
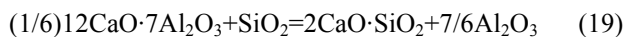
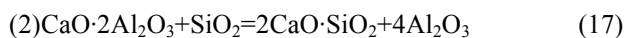
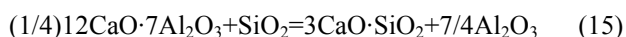
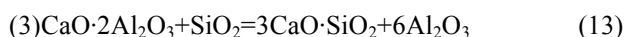


图 4 硅酸钙的吉布斯自由能与温度的关系

Fig.4 Relationship between Gibbs free energy changes of calcium silicate and temperature

由图 4 可知: 在热力学上, 当温度低于 1 100 K 时, SiO_2 与 CaO 先形成 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$, 当温度高于 1 100 K 时, SiO_2 与 CaO 先形成 $\beta\text{-C}_2\text{S}$; 在正常烧结温度下, 在热力学上, 硅酸钙形成的先后顺序为 C_2S 、 C_3S 、 C_3S_2 、 CS 。

由于 SiO_2 的酸性比 Al_2O_3 的强, 因此, 新生成的铝酸钙有可能与 SiO_2 反应生成硅酸钙和铝氧化物, 其可能反应见反应式(13)~(28), 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。



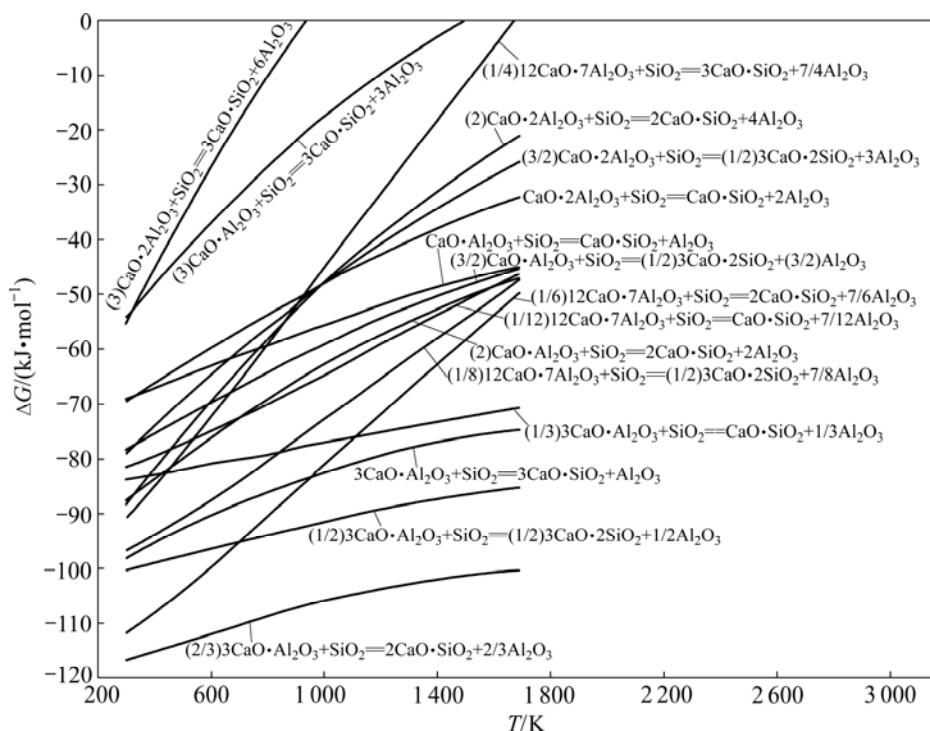
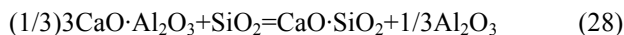
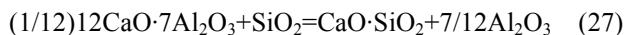


图 5 反应式(13)~(28)的反应吉布斯自由能与温度的关系

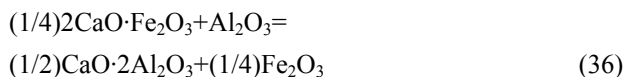
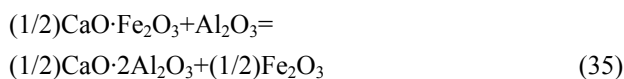
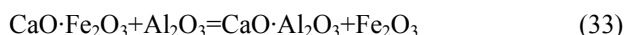
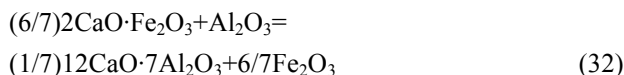
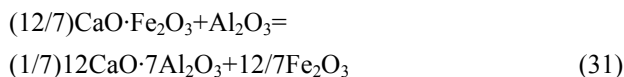
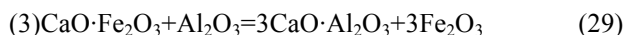
Fig.5 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (13)~(28) and temperature



由图 5 可知：反应的吉布斯自由能均随着温度的升高而增加；在正常烧结温度下，反应式(13)不可能发生，也即钙铝比最低的铝酸钙不能向钙硅比(CaO 与 SiO₂ 摩尔比)最高的硅酸钙转变，当温度在 1 500 K 以上时，反应式(14)的吉布斯自由能也大于 0，反应也不会向右进行，其余铝酸钙均能与 SiO₂ 生成硅酸钙；在热力学上，在正常烧结温度下，SiO₂ 与铝酸钙反应的顺序是先与 C₃A，然后与 C₁₂A₇、CA 和 CA₂ 反应，也即先与高钙铝比铝酸钙反应再与低钙铝比铝酸钙反应。

由图 2~5 可知，在热力学上，当有 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 同时存在时，在不考虑形成三元化合物的情况下，更容易先生成 C₂S，然后是 C₁₂A₇。

由图 1 可知，反应式(1)比(2)的吉布斯自由能更负，因此，从热力学上分析，Fe₂O₃ 与 CaCO₃ 反应只能在 Al₂O₃ 与 CaCO₃ 反应后有剩余 CaCO₃ 的条件下才能进行。当 CaCO₃ 不足时，新生成的铁酸钙有可能向铝酸钙转变，其反应如下：



反应式(29)~(36)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图 6 所示。由图 6 可知：Al₂O₃ 不能置换铁酸钙中的 Fe₂O₃ 生成 C₃A；也不能置换 CaO·Fe₂O₃(CF)中的 Fe₂O₃ 生成 C₁₂A₇，但当温度大于 1 000 K 以上时，可以将 2CaO·Fe₂O₃(C₂F)中的 Fe₂O₃ 置换生成 C₁₂A₇；温度越高，反应的吉布斯自由能越负；Al₂O₃ 可以与 CF 和 C₂F 生成 CA 或 CA₂，且随着温度的升高，反应的吉布斯自由能更负。由于在热力学上，Fe₂O₃ 与 CaO 反应更容易生成 C₂F(见图 7)，因此，在正常烧结温度下，当原料中配 CaO 充足时，反应产物最终为 C₁₂A₇。

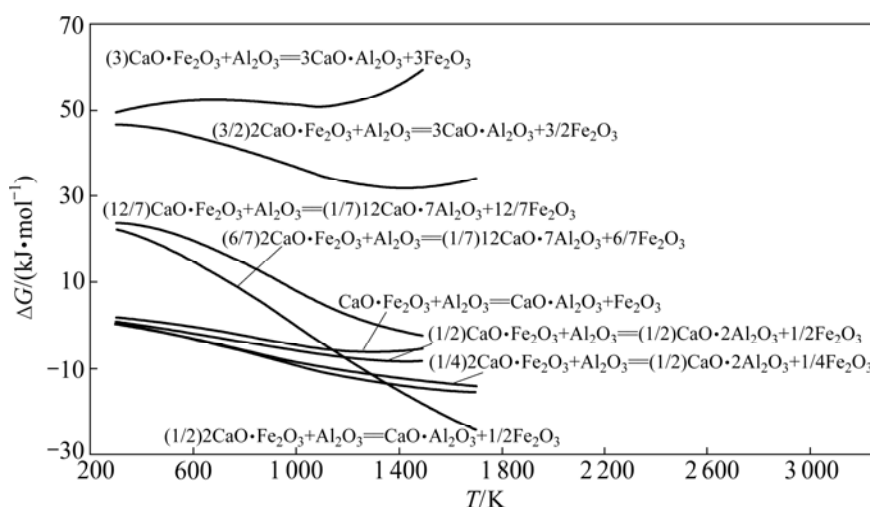
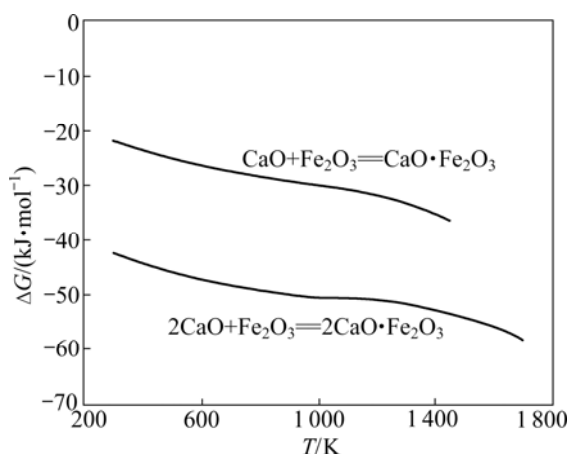


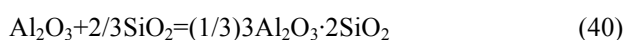
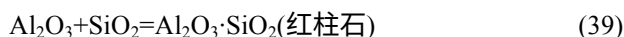
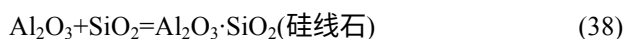
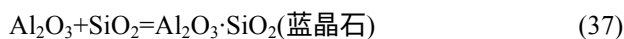
图 6 反应式(29)~(36)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.6 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (29)–(36) and temperature

图 7 CaO 与 Fe₂O₃ 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 CaO and Fe₂O₃ and temperature

1.2 Al₂O₃ 与 SiO₂ 的反应

SiO₂ 主要来自高铁铝土矿和焦粉灰分, Al₂O₃ 与 SiO₂ 反应可生成的硅酸盐有 Al₂O₃·2SiO₂(AS₂)、Al₂O₃·SiO₂(AS)红柱石、AS 蓝晶石、AS 硅线石、3Al₂O₃·2SiO₂(A₃S₂)。热力学计算表明, 在烧结条件下, Al₂O₃ 与 SiO₂ 反应不可能生成 AS₂。其余各反应的方程式如下:



反应式(37)~(40)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图 8 所示。由图 8 可知: 在正常烧结温度下, 反应式(37)的吉布斯自由能大于零, 反应不可能发生; 反应式(38)和(39)的吉布斯自由能受温度的变化很小; 反应式(40)的吉布斯自由能随着温度的升高而降低。从热力学上分析, 在正常烧结温度下, 生成硅酸铝由难至易的顺序为 A₃S₂, AS 红柱石和 AS 硅线石。在有 CaO 存在时, 由图 2 及 4 可知, CaO 与 SiO₂ 和 Al₂O₃ 反应更容易先生成 C₂S, 然后是 C₁₂A₇。因此, 在烧结过程中, 在热力学上硅酸铝形成的可能性较小。

1.3 Al₂O₃ 与 FeO 的反应

在高铁铝土矿的烧结过程中, Al₂O₃ 还有可能与烧结过程中产生的富氏体(FeO)发生反应, 生成

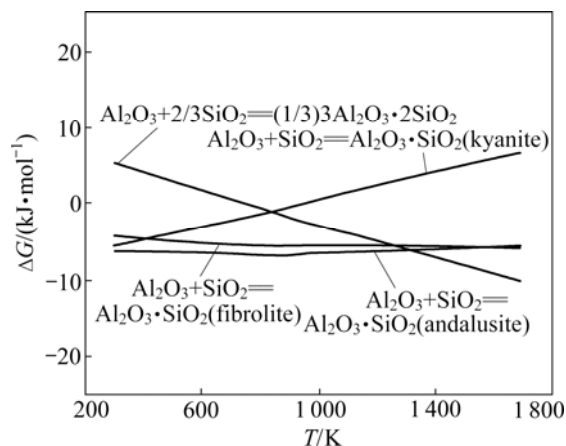


图 8 反应式(37)~(40)的反应吉布斯自由能与温度的关系

Fig.8 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (37)–(40) and temperature

$\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 其化学反应方程式如下:



反应式(41)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图 9 所示。由图 9 可知:在正常烧结温度下,吉布斯自由能为负,反应式(41)可以向右进行,生成 $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;反应式(41)的反应吉布斯自由能随着烧结温度的升高而升高,在热力学上,烧结温度越高,反应进行的趋势越低。

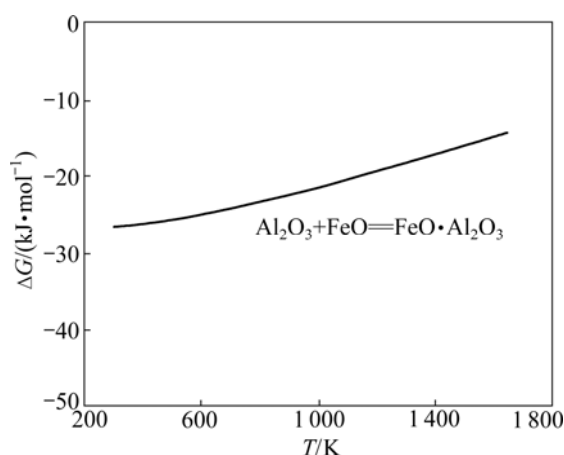
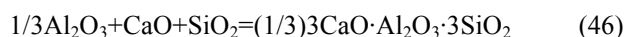
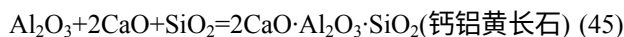
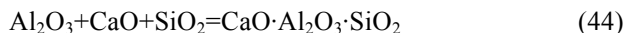
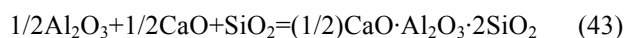
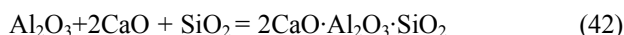


图 9 反应式(41)的反应吉布斯自由能与温度的关系

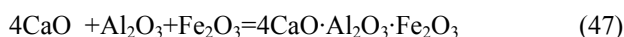
Fig.9 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (41) and temperature

1.4 三元化合物

烧结过程 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 生成的三元化合物主要有 C_2AS 、 CAS_2 、 CAS 和 C_3AS_3 。其反应方程式如下:



除此之外, CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 还可以生成 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), 其反应式如下:



反应式(42)~(47)的反应吉布斯自由能与温度的关系如图 10 所示。由图 10 可知:除反应式(46)外,反应式(42)~(47)的吉布斯自由能随温度的升高而更负;在热力学上,在 1 473 K 烧结温度下,三元化合物的生成由难至易的顺序为 C_2AS (钙铝黄长石)、 C_4AF 、 CAS 、 C_3AS_3 、 C_2AS 、 CAS_2 。

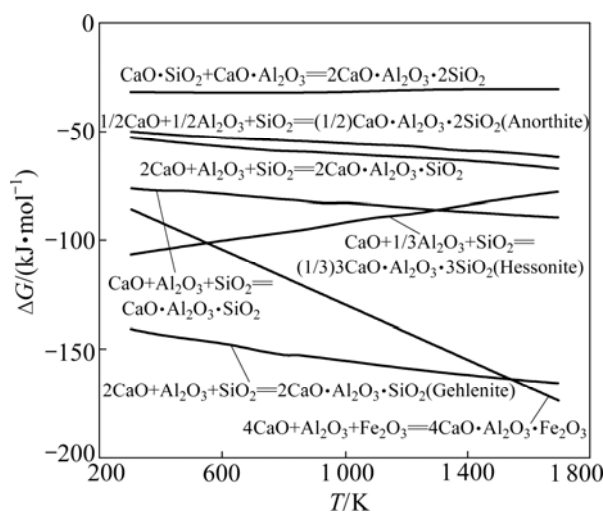


图 10 反应式(42)~(46)的反应吉布斯自由能与温度的关系
Fig.10 Relationship between Gibbs free energy changes of reactions (42)~(46) and temperature

C_2AS 也可能由 CA 和 CS 反应生成,其吉布斯自由能与温度的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知,反应式(45)的吉布斯自由能比 CA 和 CS 反应生成 C_2AS 的吉布斯自由能负得多,因此,从热力学角度分析,烧结矿中的 C_2AS 不是由二元化合物 CA 和 CS 反应的结果,而是 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 三者直接反应的产物。周秋生等^[14]认为, C_4AF 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。由图 1~10 中的热力学分析可知, Al_2O_3 更容易与 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 生成 C_2AS 和 C_4AF , 因此,高铁铝土矿烧结矿有较好的冷强度,这在烧结实验中得到了验证^[5]。因此,在添加 CaO 的氧化气氛烧结过程中,不经高炉冶炼而直接生成 C_{12}A_7 的可能性很小。假定高炉冶炼时不再添加石灰石熔剂,按照 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元相图中 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2-12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 线上化学组分进行烧结配料,经高炉冶炼渣铁分离除铁后,从热力学角度可以使炉渣中 SiO_2 全部转换成 C_2S , Al_2O_3 以 C_{12}A_7 形式存在,从而使 Al_2O_3 得到尽可能高的回收率。李殷泰等^[4]证实,经过“高炉冶炼—炉渣浸出提铝”工艺,通过严格控制烧结配料及高炉操作,可以使炉渣的最终成分为 C_2S 和 C_{12}A_7 ,从而实现铝铁综合回收利用。

2 实验结果

采用 Al_2O_3 含量 26.35%, 总铁含量 31.22%, 铝

硅比(A/S)3.17 的广西某高铁铝土矿进行烧结试验。该铝土矿中铝的赋存矿物中主要为三水铝石、针赤铁矿中以类质同像存在的 Al_2O_3 、高岭石和一水硬铝石, 分别占矿石中总 Al_2O_3 的 45.02%、23.68%、23.14%和 8.16%; 铁矿物主要为针赤铁矿, 占矿石中总铁物量的 98.60%; 硅矿物主要为铝硅酸盐, 占 96.51%。试验时将高铁三水铝石型铝土矿、焦粉、石灰石、返矿按烧结矿二元碱度 4.0、焦粉用量 8.0%组成混合料, 混合料水分按照 9.0%添加, 经一次混合、二次圆筒混合机混合制粒 3 min, 然后在 $d200 \times 640$ mm 烧结杯中进行烧结试验。试验条件为: 点火温度 1 050~1 150 °C、点火时间 1.5 min、点火负压 5 kPa、烧结负压 10 kPa。图 11 为烧结矿的 XRD 谱。由图 11 可知, 烧结矿主要成分为铁铝酸钙、铝铁酸钙、铁氧富氏体、赤铁矿、磁铁矿和二氧化硅。XRD 分析表明: 烧结矿中的铁铝酸钙分子式为 $\text{Ca}_2(\text{Fe}_{1.33}\text{Al}_{0.67})_2\text{O}_5$, 铝铁酸钙分子式为 $\text{Ca}_2(\text{Al}_{1.66}\text{Fe}_{0.40}\text{Si}_{0.94})_3\text{O}_7$, 其分子式为 C_2AS 中的 Al_2O_3 和 SiO_2 被一部分 Fe_2O_3 所取代的结果。因而, 可以认为烧结过程中形成 C_2AS , 这与热力学分析结果相一致。

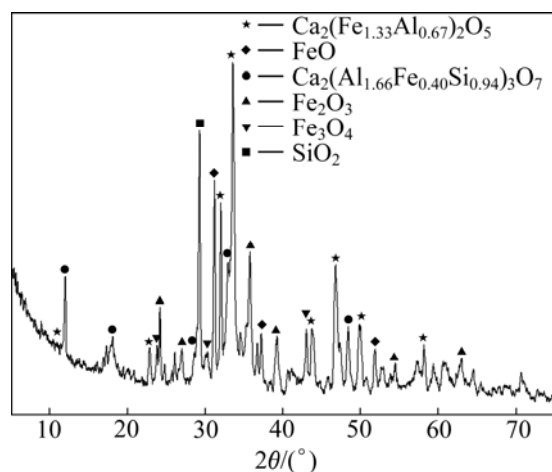


图 11 烧结矿的 XRD 谱

Fig.11 XRD pattern of sintering ore

3 结论

1) 在烧结条件下, Al_2O_3 比 Fe_2O_3 更易与 CaCO_3 反应, 当 CaCO_3 不足时, 先生成铝酸钙。 Al_2O_3 不能置换铁酸钙中的 Fe_2O_3 生成 C_3A , 当烧结温度大于 1 000 K 以上时, 可以将 C_2F 中的 Fe_2O_3 置换而形成 C_{12}A_7 , Al_2O_3 可以与铁酸钙生成 CA 或 CA_2 。

2) Al_2O_3 与 SiO_2 相比, SiO_2 更容易与 CaO 结合生成 C_2S , Al_2O_3 与 CaO 优先生成 C_{12}A_7 。在 1473~1673K 烧结温度下, 除 CA_2 和 CA 不能向 C_3S 转变外, 其余铝酸钙均可在 SiO_2 的作用下向硅酸钙转变, Al_2O_3 与 SiO_2 直接反应生成硅酸铝的可能性较小。

3) 在热力学上, C_2AS 不是 CS 和 CA 相互反应生成的, 而是由 CaO 、 Al_2O_3 和 SiO_2 直接反应生成的产物。 CaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 SiO_2 四元矿物存在时, 烧结过程优先生成 C_2AS 和 C_4AF 。

REFERENCES

- [1] 张家增. 中国铝工业发展历程与发展趋势[C]// 中国有色金属学会第五届学术年会论文集. 中国有色金属学会, 2003, 8: 40~42.
ZHANG Jia-zeng. The historical developmental course and future developmental trend of China's aluminum industry[C]// The 5th Annual Conference of China, Institute of Nonferrous Metal of 2003, 8: 40~42.
- [2] 顾松青. 我国的铝土矿资源和高效低耗的氧化铝生产技术[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 91~97.
GU Song-qing. Alumina production technology with high efficiency and low consumption from Chinese bauxite resource[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 91~97.
- [3] 侯宗林, 蔡立军. 中国铁矿资源与钢铁工业可持续发展[J]. 天津冶金, 2005, 131(6): 14~16.
HOU Zong-lin, CAI Li-jun. Everlasting development of Chinese iron ore resources and iron and steel industry[J]. Tianjin Metallurgy, 2005, 131(6): 14~16.
- [4] 李殷泰, 毕诗文, 段振瀛, 杨毅宏, 张敬东. 关于广西贵港三水铝石型铝土矿综合利用工艺方案的探讨[J]. 轻金属, 1992(9): 6~14.
LI Yin-tai, BI Shi-wen, DUAN Zheng-yin, YANG Yi-hong, ZHANG Jin-Dong. Study on multipurpose utilization technology of gibbsite-bauxite in Guangxi[J]. Light Metals, 1992(9): 6~14.
- [5] 朱忠平, 黄柱成, 姜涛, 李光辉, 庄剑鸣. 高铁三水铝石型铝土矿烧结特性[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(8): 1360~1366.
ZHU Zhong-ping, HUANG Zhu-cheng, JIANG Tao, LI Guang-hui, ZHUANG Jian-ming. Sintering properties of high iron gibbsite-type bauxite ores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(8): 1360~1366.
- [6] 傅菊英, 姜涛, 朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996: 2.
FU Ju-ying, JIANG Tao, ZHU De-qing. Sintering and palletizing[M]. Changsha: Central South University Technology

- Press, 1996: 2.
- [7] PRESNALL D C. Phase diagrams of earth-forming minerals[J]. *Minerals Physics and Crystallography*, 1995, 2: 248–268.
- [8] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 2.
- YE Da-lun, HU Jian-hua. Practical thermodynamics manual of inorganic substances[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 2.
- [9] GUDFINNSSON G H, PRESNALL D C. Melting behavior of model lherzolite in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-FeO at 0.7 to 2.8 GPa[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41: 1241–1269.
- [10] BARIN I, KNACKE O. Thermochemical properties of inorganic substances[M]. Berlin: Supplement, 1997.
- [11] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- YANG Chong-yu. Alumina production technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [12] 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.
- [13] AKAOGI M, HARAGUCHI M, YAGUCHI M, KOJITANI H. High-pressure phase relations and thermodynamic properties of CaAl₄Si₂O₁₁ CAS phase[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2009, 173: 1–6.
- [14] 周秋生, 齐天贵, 彭志宏, 刘桂华, 李小斌. 熟料烧结过程中氧化铁反应行为的热力学分析[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(6): 973–978.
- ZHOU Qiu-sheng, QI Tian-gui, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua, LI Xiao-bin. Thermodynamics of reaction behavior of ferric oxide during sinter-preparing process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(6): 973–978.

(编辑 龙怀中)