doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2026. 038

铁铝共生矿在 H_2 气氛中的还原行为

武婷婷，董凯凯，方渊勃，曲迎霞，邵 磊，邹宗树
（东北大学 冶金学院，沈阳 110819）

摘 要：针对铁铝共生矿资源的高效利用问题，系统探究了其球团在 H_2 气氛中的还原行为，重点考察了反应温度、H_2 体积分数及 CaO 添加量（质量分数，下同）对还原过程的影响，并进行了动力学分析.结果表明：在未添加 CaO 的条件下，铁铝共生矿球团的还原度随温度与 H_2 体积分数的升高先增大后趋于稳定，反应 5 min 后，持续存在的 $FeAl_2O_4$ 是阻碍还原的关键物相；添加 CaO 可有效抑制 $FeAl_2O_4$ 生成，显著提升还原速率，当 CaO 添加量为 6%～8%时，效果最优，最终还原度可提高约 16.34%.动力学分析表明，未添加与添加 8%CaO 的球团还原过程均受化学反应控制，表观活化能分别为 40.42 kJ/mol 和 33.11 kJ/mol.该研究结果可为铁铝共生矿的清洁高效利用提供理论依据.

关键词：铁铝共生矿；高效分离；H_2 气氛；还原行为；动力学分析
中图分类号：TF 557 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-6620(2026)05-0460-08

Reduction behavior of iron-aluminum symbiotic pellets in H_2 atmospheres

Wu Tingting, Dong Kaikai, Fang Yuanbo, Qu Yingxia, Shao Lei, Zou Zongshu
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To address the efficient utilization of iron-aluminum symbiotic resources, this study systematically investigated the reduction behavior of its pellets under H_2 atmospheres. The effects of reaction temperature, H_2 volume fraction, and CaO addition (mass fraction) on the reduction process were examined. The kinetic analysis was then conducted. The results show that, without CaO addition, the reduction degree of the iron-aluminum symbiotic pellets initially increases with rising temperature and H_2 volume fraction and then stabilizes. The persists $FeAl_2O_4$ after 5 minutes of reaction is the key phase hindering reduction. The addition of CaO effectively inhibits the formation of $FeAl_2O_4$ and significantly enhances the reduction rate. An optimal CaO addition range of 6% ~ 8% yields the best results, increasing the final reduction degree by approximately 16.34%. Kinetic analysis indicates that the reduction processes for both CaO-free pellets and those with 8% CaO are controlled by chemical reaction. The apparent activation energies are 40.42 kJ/mol and 33.11 kJ/mol, respectively. These findings can provide a theoretical basis for the clean and efficient utilization of iron-aluminum symbiotic ores.

Key words: iron-aluminum symbiotic ore; efficient separation; hydrogen atmospheres; reduction behavior; kinetic analysis

目前，我国高品位铁矿石和铝土矿资源对外依存度长期保持在较高水平.据报道，2024 年我国铁矿石原矿产量约 10.42 亿 t，进口量则达到 12.37 亿 t[1-2]；铝土矿国内产量仅 0.64 亿 t，进口量高达1.59 亿 t[3-4].国内铁矿石的平均品位仅为 34.50%，贫矿储量占总储量的 80%[5-6]. 铝土矿储量仅占世界总储量的 3%，且质量相对较差的一水硬铝石型铝土矿占总储量的 95%以上[7].作为全球第一大钢铁和铝的生产国与消费国，我国亟需摆脱铁矿和铝土矿资源长期受制于人的被动局面.因此，攻克一系列低品位或共生矿资源的综合利用技术，是增强我国矿产资源自我保障能力与

收稿日期：2026-02-08.
基金项目：国家自然科学基金项目（52374329）.
作者简介：武婷婷（2000—），女，硕士研究生，E-mail：wutt1@ mails. neu. edu. cn.
通讯作者：曲迎霞（1983—），女，副教授，E-mail：quyx@ smm. neu. edu. cn.
引文格式：武婷婷，董凯凯，方渊勃，等. 铁铝共生矿在 H_2 气氛中的还原行为［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：460-467.
（Wu Tingting, Dong Kaikai, Fang Yuanbo, et al. Reduction behavior of iron-aluminum symbiotic pellets in H_2 atmospheres［J］. Journal of Materials and Metallurgy, 2026, 25（5）: 460-467.）

提高经济效益的有效途径[8].

铁铝共生矿为典型的复杂难处理矿石，又被称为高铁铝矿或高铝铁矿.矿石中铁矿物与铝矿物总含量较高,二者品位却均难以满足各自提取工艺的指标要求[9].当前国内已探明的储量超 15 亿 t[10],几内亚、澳大利亚、印度尼西亚等国家也有大量该类矿产分布[11].国内外学者针对该类矿石开展了大量研究,从工艺流程划分,所用方法大致可归纳为先选后冶、先铝后铁、先铁后铝三类[9, 12].从技术层面而言,通常会协同搭配物理选矿、湿法、火法中的两种或三种工艺联用.研究表明,矿石内含铁物相与含铝物相嵌布粒度极细、结合致密;同时,矿石中存在铁铝类质同象现象[13-14],也就是 Al^{3+} 渗入晶格置换部分 Fe^{3+}.这使得单纯依靠磁选、浮选等常规选矿手段,或是直接湿法溶出氧化铝,都难以获得理想处理效果[9, 15].Bhima[16] 以焦炭为还原剂,经焙烧还原提升磁性含铁物相含量后再实施磁选. Zhang、Liu、Pickles 和 Wang 等[7, 11, 17-18] 也开展了相关研究,结果表明,还原焙烧-磁选工艺优于单一物理分选方式,但磁性产物中仍含有较多的氧化铝.主要原因是铁铝共生矿在还原过程中会生成大量的铁铝尖晶石(Fe_2AlO_4),这大大降低了铁氧化物的还原程度,从而影响铁铝的分离效率.后续研究证实,引入钠盐或钙盐(或其氧化物)等添加剂可与氧化铝优先反应,有助于 FeO 参与还原反应[17].现阶段,“先铁后铝”工艺可更高效地完成铁铝分离[19-20];其中较为成熟的路线是直接以铁铝共生矿为炼铁原料,依托高炉炼铁产出铁水与铝酸钙炉渣,再利用炉渣进一步提取氧化铝.该工艺存在短板:冶炼时炉渣黏度偏高,干扰高炉稳定运行,同时整体碳排放量偏高.基于前人经验,笔者所在研究团队提出“富氢预还原—铁浴熔融还原—铝酸钙渣高效溶出”新工艺,耦合预还原与熔融还原实现铁铝高效分离,同时以氢气作还原剂削减碳排放.本文中重点探究 H_2 气氛下铁铝共生矿的还原行为,对比未添加添加剂、添加 CaO 两种条件下还原过程的区别,揭示作用机理并构建对应的动力学模型.所得研究结果以期为此工艺精准调控提供理论支撑,也为该技术后续落地应用与推广筑牢基础.

1　实验原料及方法

1.1　实验原料

铁铝共生矿的主要化学成分如表 1 所列,其 XRD 物相分析结果如图 1 所示.物相分析的衍射角变化范围为 0°~ 90°,扫描速度为 5°/min.由图 1 可知,Fe 主要赋存于赤铁矿和针铁矿中,而铝主要赋存于三水铝石中.Al_2O_3 和 Fe_2O_3(折算后)的质量分数约为 41.65%和 30.67%.此外,针铁矿中的部分 Fe 被 Al 取代,形成了 $Fe_{0.93}Al_{0.07}O(OH)$ 和 $Fe_{0.83}Al_{0.17}O(OH)$ 这两种铝针铁矿.

表 1　铁铝共生矿的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of iron-aluminum symbiotic ore (mass fraction)　%

TFe	FeO	Al_2O_3	SiO_2	CaO
21.47	<0.10	41.65	2.17	0.10
MgO	TiO_2	Cr_2O_3	MnO	Na_2O
0.13	2.20	0.088	0.045	0.051
K_2O	Ni	P	S	烧损
0.030	<0.01	0.078	0.058	22.73

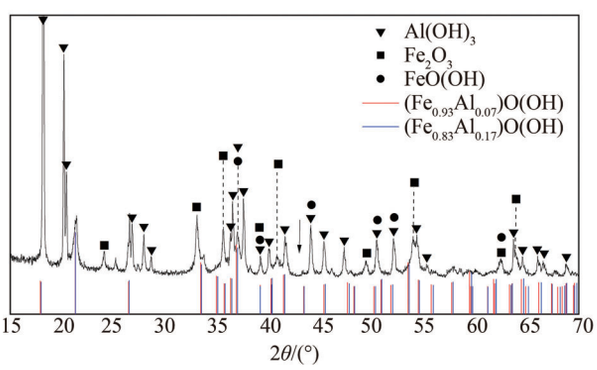


图 1　原料的 XRD 分析结果

Fig. 1　XRD patterns of raw materials

1.2　实验设备及方法

本研究采用热重分析法,探究铁铝共生矿球团在 H_2 气氛中的还原特性,即在恒定温度下,向反应釜中通入还原气体并实时记录球团的失重情况,利用球团的失重量换算出还原度.实验装置如图 2 所示,主要包括一台电加热炉、控制柜、高精度天平(精度为 0.001 g)、反应釜、数据采集端和气瓶等.电加热炉最高工作温度为 1 300 ℃.每次实验,将约 400 g 球团盛装在带有密封盖的反应釜内,而反应釜则悬吊在天平下方,以保证球团置于电加热炉的恒温区. H_2 和 N_2 由高纯气体钢瓶供应,采用控制柜中的质量流量控制器精准控制其流量.上述两种气体在混气罐中混合后,由顶部的气体入口通入反应釜,气体总流量为 6 L/min.进气管路直通反应釜底部,经气体均配管和筛板后,与球团均匀且充分接触,在指定温度下发生还原反应,反应后

的气体由顶部气体出口排出.实验开始后,每隔12 s记录一次球团质量.升温段和冷却段仅采用6 L/min的N_2进行保护,料层内的温度由S型热电偶进行实时监测.

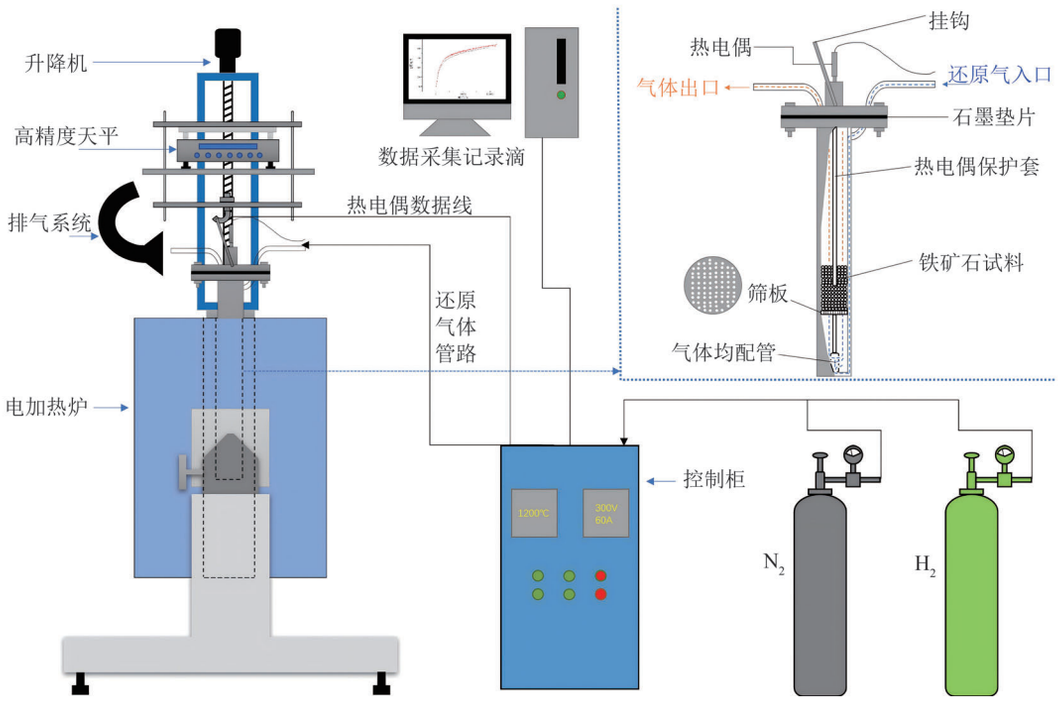


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

球团由研磨后的矿粉、约1%(质量分数)的膨润土和不同添加量(质量分数,下同)的CaO试剂混合制成.造球后,选取直径为11~13 mm的球团置于150 ℃烘干箱中干燥5 h.实验条件如表2所列.

表2 实验条件

Table 2 Experimental conditions

因素	取值
还原温度 / K	1 073、1 123、1 173、1 223、1 273
$\varphi(H_2)$/%	20、40、60、80
w(CaO)/%	0、2、4、6、8、10

1.3 动力学分析方法

还原过程中,任一时刻球团还原度定义为球团总失重质量与还原前球团内和铁相结合的总氧质量的比值,如式(1)所示.

$$\alpha=\frac{\Delta m}{m_O}\times100\%=\frac{\Delta m}{m_S\times w(\mathrm{TFe})\times0.429}\times100\% \quad (1)$$

式中:α为球团还原度,%;Δm为球团失重质量,g;m_O为球团中与铁结合的氧质量,g;m_S为还原前球团的总质量,g;w(TFe)为还原前全铁的质量分数,%.

对于一般的气-固反应,其反应速率方程的微分函数如式(2)所示[21].

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}=k(T)f(\alpha)=Ae^{-(E/RT)}f(\alpha) \quad (2)$$

将上式分离变量并进行积分,可得到关于球团还原度随时间变化的积分表达式$g(\alpha)$,如式(3)所示.

$$g(\alpha)=\int_0^\alpha\frac{\mathrm{d}\alpha}{f(\alpha)}=Ae^{-(E/RT)}t \quad (3)$$

式中:k为表观反应速率常数,min^{-1};A为指前因子,min^{-1};E为表观活化能,kJ/mol;R为气体常数,J/(mol·K);T为反应温度,K;t为反应时间,min.

表3中列出了前人已汇总出不同反应机理下固态反应动力学机理函数的微分及其对应的积分表达式[22].

本研究采用线性拟合法展开动力学分析,将实验得到的还原度数据代入表3中的反应机理函数$g(\alpha)$进行拟合,依据线性相关系数数值筛选匹配度最优的反应机理函数.利用式(4)对$\ln k$与$1/T$进行线性拟合,通过直线的斜率可计算出还原反应的活化能E,由直线的截距可求出指前因子A.

$$\ln k(T)=\ln A-\frac{E}{RT} \quad (4)$$

表 3　常用固相反应机理函数表达式

Table 3　Common kinetic model functions for solid-state reactions

模型	反应机理	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$
形核模型	power law（P2）	$2\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$
	power law（P3）	$3\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$
	power law（P4）	$4\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$
	Avrami-Erofeyev（A2）	$2(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$
	Avrami-Erofeyev（A3）	$3(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$
	Avrami-Erofeyev（A4）	$4(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/4}$
几何收缩模型	contracting area（R2）	$2(1-\alpha)^{1/2}$	$1-(1-\alpha)^{1/2}$
	contracting volume（R3）	$3(1-\alpha)^{2/3}$	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
扩散模型	1-D diffusion（D1）	$\frac{1}{2\alpha}$	α^2
	2-D diffusion（D2）	$-\frac{1}{\ln(1-\alpha)}$	$(1-\alpha)\ln(1-\alpha)+\alpha$
	3-D diffusion（D3）	$\frac{3(1-\alpha)^{2/3}}{2[1-(1-\alpha)^{1/3}]}$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$
	Ginstling-Brounshtein（D4）	$\frac{3}{2[(1-\alpha)^{1/3}-1]}$	$1-\frac{2}{3}\alpha-(1-\alpha)^{2/3}$
反应级数模型	zero-order（F0/R1）	1	α
	first-order（F1）	$(1-\alpha)$	$-\ln(1-\alpha)$
	second-order（F2）	$(1-\alpha)^2$	$[1/(1-\alpha)]-1$
	third-order（F3）	$(1-\alpha)^3$	$\frac{(1-\alpha)^{-2}-1}{2}$

2　结果与讨论

2.1　反应温度的影响

图 3 示出了 H_2 气氛且无添加剂情况下，铁铝共生矿球团还原度在不同反应温度下随还原时间的变化情况.设定 H_2 体积分数为 60%，总还原时间为 210 min（3.5 h）.

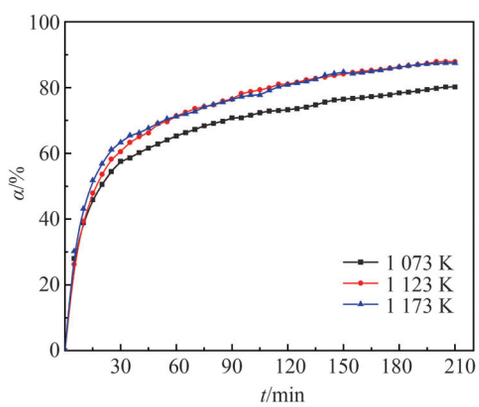


图 3　不同反应温度下未添加 CaO 的球团还原度随时间的变化

Fig. 3　Variation of reduction degree with time for pellets without CaO at different temperatures

由图 3 可知，在同一反应温度下，还原度均随还原时间的延长而逐渐升高.当反应温度为1 073 K时，还原度约为 80.19%；当反应温度升至 1 123 K时，还原度上升至 87.88%；继续提高温度至 1 173 K，还原度未发生较大的变化，约为87.45%.从还原过程来看，球团在 1 123 K 下的还原度显著高于1 073 K下的还原度，而1 173 K下的还原度与 1 123 K下的还原度始终相差不大.综上，当反应温度超过 1 123 K 后，继续升高温度对铁铝共生矿球团还原度的强化效果显著减弱，该规律与常规铁矿球团还原特性存在明显差异.

为探究上述现象的原因，选取 1 123 K 下不同还原时间（0、5、10、40、210 min）的球团试样进行 XRD 物相分析，结果如图 4 所示.其中，还原时间为 0，表示仅在惰性气氛下将球团加热至1 123 K并恒温一段时间后取出，未通入还原性气体；210 min 为还原终点.由图 4 可知：当还原时间为 0 时，检测出的主要物相为 Fe_2O_3 和 Al_2O_3；还原 5 min 后，球团中 Fe_2O_3 消失，检测出了金属铁、Fe_3O_4 和 $FeAl_2O_4$，但并未检测出 FeO.从热力学角度来说，当还原温度高于 843 K 时，铁氧化物的还原路径应为 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$[23].此外，由于 XRD 为半定量分析，故仅能推断出大部分 FeO 与 Al_2O_3 反应，生成难以还原的 $FeAl_2O_4$.当还原时间为 10、40、210 min 时，与还原 5 min 的球团相比，Fe_3O_4 相消失，金属铁衍射峰逐渐增强，而 $FeAl_2O_4$ 的衍射峰逐渐减弱；但直至还原终点，仍存在一定量的铁铝尖晶石.

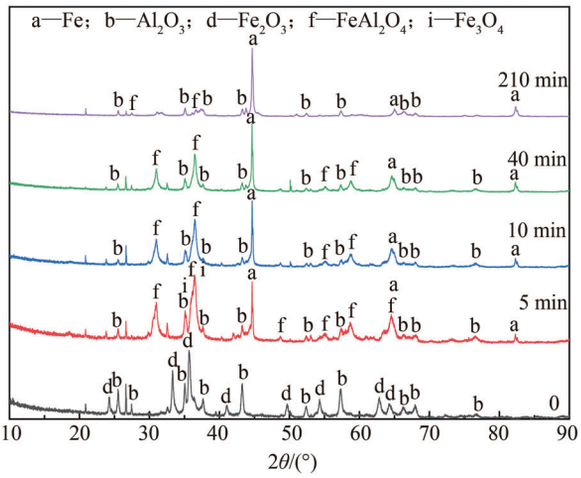


图4 球团在还原过程中的物相演变规律

Fig. 4 Phase evolution patterns of pellets during reduction process

2.2 H_2 体积分数的影响

图5示出了还原气体中 H_2 体积分数对铁铝共生矿球团还原度与还原速率的影响.

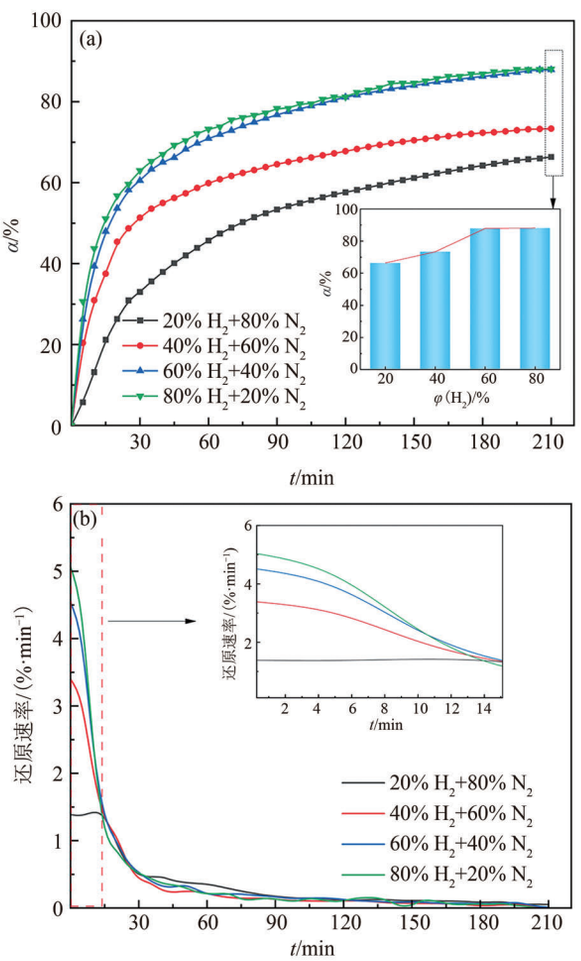


图5 H_2 体积分数对球团还原行为的影响

Fig. 5 Effect of H_2 volume fraction on reduction behavior of pellets

(a)—还原度;(b)—还原速率.

从图5(a)中可以看出,在相同的还原时间内,随着 H_2 体积分数由20%升至60%,铁铝共生矿球团的还原度显著增大.当 H_2 体积分数进一步升至80%时,还原度的增幅并不明显.当还原时间达到210 min、H_2 体积分数为20%时,球团最终还原度仅为66.36%;当 H_2 体积分数分别升至40%、60%和80%时,最终还原度依次达到73.34%、87.88%和88.01%.由图5(b)可知:所有条件下的还原速率均随反应的进行而逐渐下降,H_2 体积分数对还原速率的影响主要体现在反应前期(约14 min内),该阶段各组还原速率差异尤为明显.整体而言,在反应的前30 min内,平均还原速率较高;此后,还原速率均降至0.5%/min以下,这表明反应进入缓慢进行阶段.

2.3 CaO 添加量的影响

根据热力学计算可知,CaO 会优先与 Al_2O_3 发生固相反应,从而减少 $FeAl_2O_4$ 的生成[24].图6示出了在反应温度1 123 K、40%H_2+60%N_2 气氛的条件下,不同 CaO 添加量(0、2%、4%、6%、8%和10%)球团的还原度及还原速率随还原时间的变化情况.在反应的前30 min内,还原速率基本上随着 CaO 添加量的增大而加快;后期,CaO 添加量对还原速率的调控作用微弱.未添加 CaO 球团的还原速率较小,还原度仅为73.26%;添加了2% CaO 球团的还原速率略有提升,最终还原度为77.68%;而 CaO 添加量为6%的球团,还原速率明显增大,其还原度为88.32%.当 CaO 添加量继续增至8%时,还原速率略有提升;当 CaO 添加量增至10%时,还原速率基本不再发生变化,两者的还原度分别为89.60%和89.78%.因此,CaO 的最优添加量为6%~8%,最终还原度提高了约16.34%.

为与图3中无添加剂下的试验数据形成对照分析,本文进一步开展 CaO 添加量为8%的铁铝共生矿球团的还原试验,固定还原气氛为60%H_2+40%N_2,探究不同反应温度下球团的还原规律,结果如图7所示.由图7可知:与同等条件下未添加 CaO 的试样相比,添加 CaO 的球团还原度大幅提升,且还原速率随反应温度的升高逐步增大;当反应温度不低于1 173 K时,球团最终还原度可达92%以上,其中,1 273 K下球团最终还原度为98.74%.

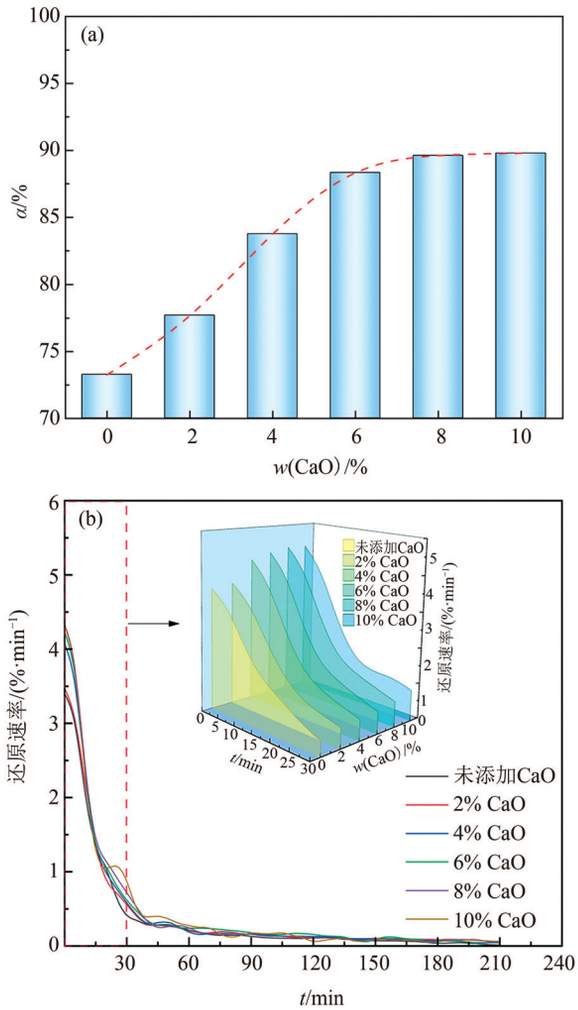


图 6　CaO 添加量对球团还原度和还原速率的影响

Fig. 6　Effect of CaO addition on reduction degree and reduction rate of pellets

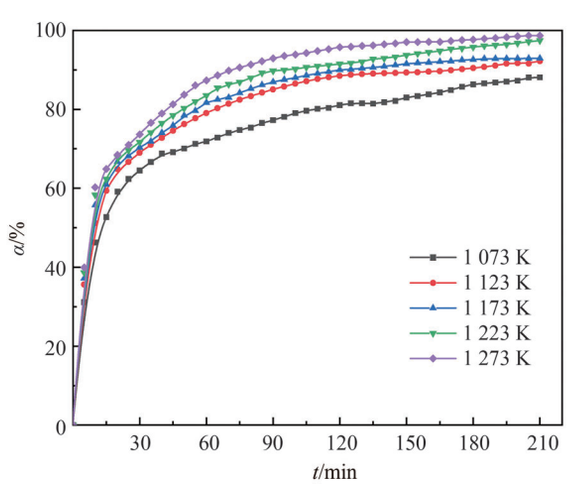


图 7　在 CaO 添加量为 8%的条件下球团还原度随温度和时间的变化

Fig. 7　Reduction degree of pellets with 8% CaO as a function of temperature and time

图 8 示出了在 CaO 添加量为 8%的条件下铁铝共生矿球团的物相演变规律.

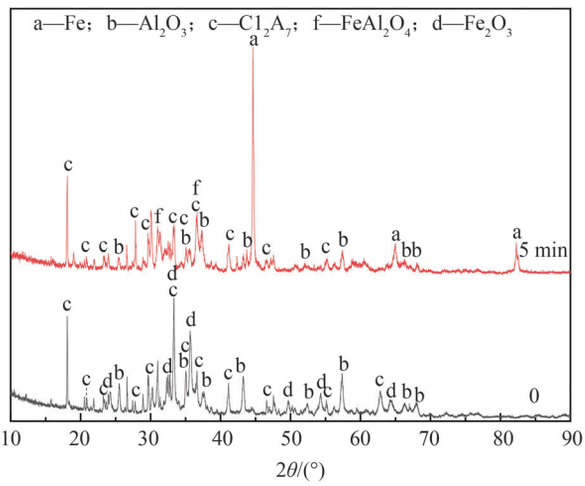


图 8　在 CaO 添加量为 8%的条件下球团在还原过程中的物相演变规律

Fig. 8　Phase evolution patterns of pellets with 8% CaO during reduction process

由图 8 可知：当还原时间为 0 时，球团中除 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 外，还存在 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$（$C_{12}A_7$）；还原 5 min 后，Fe_2O_3 消失，同时生成金属铁和 $FeAl_2O_4$.值得注意的是，与还原时间为 0 时相比，金属铁的衍射峰强度显著增强，而 $C_{12}A_7$ 衍射峰强度基本未发生变化.这表明 CaO 能将 Al_2O_3 固定于 $C_{12}A_7$ 中，进而有效抑制 $FeAl_2O_4$ 的生成.

2.4　铁铝共生矿的还原动力学分析

由前述分析可知，有无 CaO 添加的条件下，铁铝共生矿球团还原反应均表现出前 30 min 还原速率较快、反应后期还原速率显著降低的规律，因此选取反应前 30 min 的还原数据进行动力学拟合分析.将未添加 CaO 和添加 8% CaO 的球团还原数据（见图 3 和图 7）带入到表 3 的 16 个模型中并作图，可以得到不同的 $g(\alpha)$-t 曲线.本文采用皮尔逊相关系数（Pearson's correlation coefficient，一般用 r 来表示）来衡量 $g(\alpha)$ 与 t 之间的线性关系强度，r 值越接近 1，表明两者线性相关度越高.经对比可知，两种条件下均符合三级反应级数模型（F3），线性相关系数分别达到 0.999 1和 0.998 4，这表明两种条件下还原反应的限制性环节均为化学反应.在不同的反应温度下，以 $\frac{(1-\alpha)^{-2}-1}{2}$ 为纵坐标，以反应时间 t 为横坐标，可拟合得到动力学曲线，如图 9 所示.其中，直线的斜率为表观反应速率常数 k.根据式(4)，以 $\ln k$ 为纵坐标、$1/T$ 为横坐标作图，结果如图 10 所示.通过直线斜率计算得到还原反应活化能 E，由直线截距可计算得到指前因子 A.在未添加

CaO和添加8%CaO的条件下,计算得到的表观活化能分别为40.42 kJ/mol和33.11 kJ/mol;指前因子分别为6.95 min^{-1}和5.17 min^{-1}.尽管二者均为化学反应控制,但CaO添加量为8%的条件下,活化能明显降低,这表明添加CaO能够降低反应能垒.

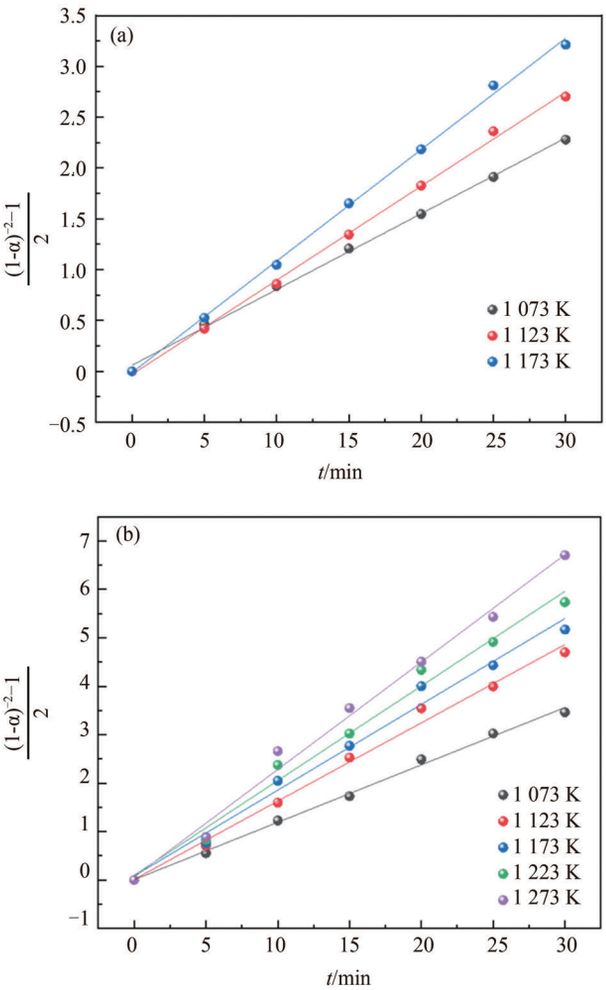
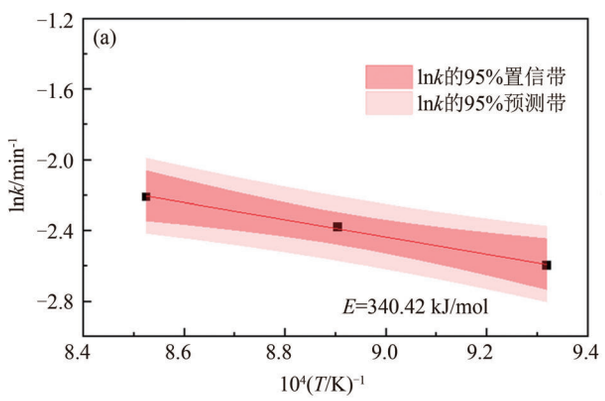


图9 不同温度下$1/2[(1-\alpha)^{-2}-1]$与t的动力学拟合曲线

Fig. 9 Kinetic fitting curves of $1/2[(1-\alpha)^{-2}-1]$ vs. t under different temperatures

(a)—未添加CaO;(b)—CaO添加量8%.



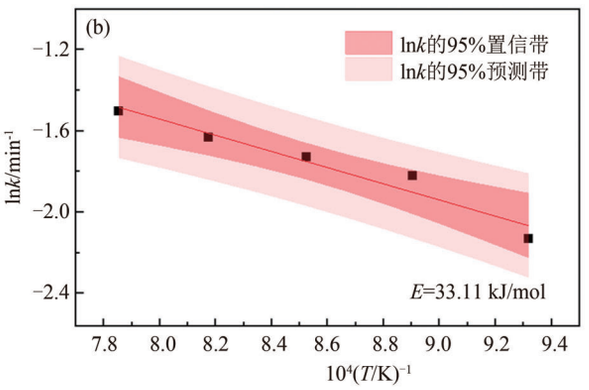


图10 铁铝共生球团还原的动力学分析

Fig. 10 Kinetic analysis of reduction of iron-aluminum symbiotic pellets

(a)—未添加CaO;(b)—CaO添加量为8%.

3 结论

(1)在未添加CaO的条件下,铁铝共生矿球团的还原度随着温度和H_2体积分数的升高先增大后趋于稳定,还原速率较为缓慢.还原5min后,持续生成的$FeAl_2O_4$是阻碍反应进行的关键物相.

(2)添加CaO能有效抑制$FeAl_2O_4$的生成,进而显著提高铁铝共生矿球团的还原速率,CaO的最优添加量为6%~8%.与未添加CaO相比,最终还原度提高了约16.34%.在最优添加量下,球团还原度随着温度的升高而逐渐增大,1 273 K下的最终还原度可达98.74%.

(3)在H_2体积分数为60%的气氛中,未添加与添加8% CaO的铁铝共生矿球团的还原动力学分析表明:二者还原过程均受化学反应控制,计算得到的表观活化能分别为40.42 kJ/mol和33.11 kJ/mol.

4 参考文献

[1] 吴琪,葛振华,高宇,等. 中国矿产资源开发利用形势分析及展望[J]. 矿业研究与开发,2025,45(6):288-300.
(Wu Qi, Ge Zhenhua, Gao Yu, et al. Situation analysis and prospect of mineral resources development and utilization in China[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(6): 288-300.)

[2] 周倩. 全球铁矿石供应保持增长增量结构持续调整[J]. 冶金管理,2025(4):41-44.
(Zhou Qian. Global iron ore supply maintained growth, incremental structure continued to adjust[J]. China Steel Focus, 2025(4): 41-44.)

[3] 林金华,李志国. 中国铝工业海外布局:几内亚铝工业园区的实践与思考[J]. 轻金属,2025(7):1-10.
(Lin Jinhua, Li Zhiguo. Overseas layout of China's aluminum industry: practice and reflection on Guinea aluminum industrial

park[J]. Light Metals,2025(7):1-10.)

[4] 李之学,王壮,彭宇. 浅析铝土矿溶出过程影响因素[J]. 山东化工,2025,54(15):89-91.
(Li Zhixue, Wang Zhuang, Peng Yu. Discussion on the influencing factors of bauxite dissolution process[J]. Shandong Chemical Industry,2025,54(15):89-91.)

[5] 刘航涛,吕振福. 国内外铁矿资源利用状况及发展趋势研究[J]. 中国矿业,2025,34(7):315-323.
(Liu Hangtao,Lü) Zhenfu. Utilization status and development trend of iron ore resources at domestic and abroad[J]. China Mining Magazine,2025,34(7):315-323.)

[6] 吴松涛,薛宇,于新磊. 低品位铁矿资源开发利用保护综合评价:以内蒙古乌拉特前旗低品位铁矿为例[J]. 地质科学,2024,59(3):841-851.
(Wu Songtao,Xue Yu,Yu Xinlei. Comprehensive evaluation of the development,utilization and protection of low-grade iron ore resources: Taking low-grade iron ore in Wulate Qianqi, lnner Mongolia as an example[J]. Chinese Journal of Geology, 2024,59(3):841-851.)

[7] Zhang J H, Pan X L, Lv Z Y, et al. Recovery of iron and alumina from iron - aluminum symbiotic ore via low - calcium carbothermal reduction [J]. Minerals Engineering, 2023,204:108426.

[8] 朱德庆,薛钰霄,潘建,等. 高铝铁矿和高锰铁矿共还原行为的研究[J]. 材料与冶金学报,2017,16(1):1-7.
(Zhu Deqing, Xue Yuxiao, Pan Jian, et al. Research on co-reduction of high-manganese and high-aluminum iron ores[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2017,16(1):1-7.)

[9] 李宏,杜艳清,余莹,等. 我国高铁铝土矿铝铁分离研究新进展[J]. 金属矿山,2021(10):82-91.
(Li Hong, Du Yanqing, Yu Ying, et al. New progress in research on separation of aluminum and iron from high-iron bauxite in China[J]. Metal Mine,2021(10):82-91.)

[10] Tian D, Shen X Y, Zhai Y C, et al. Extraction of iron and aluminum from high-iron bauxite by ammonium sulfate roasting and water leaching [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2019,26(6):578-584.

[11] Liu Z G, Chu M S, Wang Z, et al. Study on metallized reduction and magnetic separation of iron from fine particles of high iron bauxite ore [J]. High Temperature Materials and Processes,2017,36(1):79-88.

[12] 田丁,申晓毅,辛海霞,等. 铁铝共生矿绿色化综合利用[J]. 轻金属,2018(9):13-16.
(Tian Ding, Shen Xiaoyi, Xin Haixia, et al. Clean and integrated utilization of iron-aluminum paragenetic mineral[J]. Light Metals,2018(9):13-16.)

[13] Shokanov A,Vereshchak M,Manakova I,et al. Mössbauer and X-ray diffraction spectroscopy of high-iron bauxites from Kazakhstan[J]. Materials,2023,16(20):6706.

[14] 朱霞丽,秦彩霞,秦丽娜,等. 国外某高铝褐铁矿的赋存状态研究[J]. 现代矿业,2020,36(9):139-141.
(Zhu Xiali, Qin Caixia, Qin Lina, et al. Study on the occurrence state of a high-Al limonite abroad [J]. Modern Mining,2020,36(9):139-141.)

[15] 肖婉琴,朱阳戈,胡晓星,等. 某高铝高硅难选铁矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2022(1):109-114.
(Xiao Wanqin,Zhu Yangge,Hu Xiaoxing,et al. Experimental study on beneficiation of a refractory iron ore with high aluminum and silicon[J]. Nonferrous Metals Mieral Processing Section,2022(1):109-114.)

[16] Bhima Rao R. Novel approach for the beneficiation of ferruginous bauxite by microwave heating [J]. Mining, Metallurgy & Exploration,1996,13(3):103-106.

[17] Pickles C A,Lu T,Chambers B,et al. A study of reduction and magnetic separation of iron from high iron bauxite ore[J]. Canadian Metallurgical Quarterly,2012,51(4):424-433.

[18] Wang R F, Yuan S, Gao P, et al. Application of suspension magnetization roasting as technology for high-efficiency separation of valuable iron minerals from high-iron bauxite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2022,32(7):2391-2402.

[19] 李晓波,王纪元,李孟土,等. 某高铝铁矿烧结性能的试验研究[J]. 宝钢技术,2017(5):46-50.
(Li Xiaobo, Wang Jiyuan, Li Mengtu, et al. Experimental research on the sintering characteristic of high aluminum iron ore[J]. Baosteel Technology,2017(5):46-50.)

[20] 耿红娟. 纯体系铝酸钙炉渣配料优化数学模型的建立[D]. 沈阳:东北大学,2008.
(Geng Hongjuan. Establishment of compounding optimum mathematical model for the pure system of calcium aluminate slag[D]. Shenyang:Northeastern University,2008.)

[21] Heidari A, Niknahad N, Iljana M, et al. A review on the kinetics of iron ore reduction by hydrogen[J]. Materials,2021, 14(24):7540.

[22] Khawam A,Flanagan D R. Basics and applications of solid-state kinetics: a pharmaceutical perspective [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences,2006,95(3):472-498.

[23] Tong S,Hong L K,Xu Y,et al. Iron phase sintering behavior of magnetite pellets by isothermal reduction with pure hydrogen at high temperature [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,110:609-616.

[24] 张作良. 高铝铁矿石气基直接还原基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.
(Zhang Zuoliang. Fundamental research on high alumina iron ore by gas-based direct reduction[D]. Shenyang:Northeastern University,2014.)