直接还原与熔融还原

气基竖炉富氢气氛下赤铁矿还原的热力学研究

张晓萍[1,2]，温宝良[2]，宋灿阳[2]，杨佳龙[1]
（1. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032；2. 马鞍山钢铁有限公司，安徽 马鞍山 243003）

摘要：为评估富 H_2 含 CO 气基竖炉工艺中赤铁矿的还原行为，研究基于最小吉布斯自由能原理，利用 HSC Chemistry 9.5.1 软件构建热力学模型，分析在固定反应气的物质的量为 3 kmol 条件下，气体成分与温度对铁氧化物还原路径及平衡物相组成的影响。结果表明：单一还原剂条件下，H_2 在 1 000 ℃时可完全还原赤铁矿的临界量为 0.405 kmol；CO 在 700～800 ℃时还原能力达到最强，临界量为 0.415 kmol，但超过 800 ℃后，CO 受高温逆向反应制约还原能力减弱。增加还原剂配比可促进磁铁矿与浮氏体向金属铁转化。H_2 中引入约 40% CO 可拓宽还原温度窗口，弥补纯 H_2 低温区（<700 ℃）还原能力不足与纯 CO 高温区（>800 ℃）还原势衰减的缺陷，在 800 ℃左右有效提升金属铁产率。典型气基竖炉工艺还原能力排序为 HyMEX≈HYL－III＞Midrex，其中 Midrex 工艺完全还原赤铁矿的最高处理量为 0.352 5 kmol，而 HYL－III 与 HyMEX 工艺分别可达 0.395 kmol 和 0.400 kmol，后两者因富 H_2 气氛更适应高温还原。本文研究成果可为优化气基竖炉的还原工艺参数提供理论依据。

关键词：低碳炼铁；气基竖炉；H_2－CO 还原；最小吉布斯自由能原理；热力学平衡相
中图分类号：TF554 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0093－09
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.033

Thermodynamic study on reduction of hematite in a hydrogen-rich atmosphere in a gas-based shaft furnace

ZHANG Xiaoping[1,2], WEN Baoliang[2], SONG Canyang[2], YANG Jialong[1]
(1. School of Metallurgical and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China;
2. Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243003, Anhui, China)

Abstract: In order to evaluate the reduction behavior of hematite in the H_2-rich CO-containing gas-based shaft furnace process, a thermodynamic model is constructed by using HSC Chemistry 9.5.1 software based on the minimum Gibbs free energy principle, and the effects of gas composition and temperature on the reduction path of iron oxides and the composition of the equilibrium phase are analyzed under the condition of fixed reaction gas molar (3 kmol). The results show that the critical amount of H_2 that could completely reduce hematite at 1 000 ℃ is 0.405 kmol. The reduction ability of CO reaches to the strongest at 700～800 ℃, and the critical amount is 0.415 kmol, but after exceeding 800 ℃, the reduction ability of CO is restricted by the reverse reaction of high temperature and weakened. Increasing the proportion of reducing agents can promote the conversion of magnetite and floatonite to metallic iron. The introduction of about 40% CO into H_2 can broaden the reduction temperature window, make up for the lack of reduction capacity in the low temperature region of pure H_2 (<700 ℃) and the attenuation of the reduction potential in the high temperature region of pure CO (>800 ℃), and effectively improve the yield of iron metal at about 800 ℃. The reduction capacity of typical gas-based shaft furnace processes is ranked by HyMEX≈HYL-III＞Midrex, among which the maximum treatment capacity of fully reduced

收稿日期：2025－09－08；**修回日期**：2025－11－07
基金项目：安徽省重大产业创新计划资助项目（AHZDCYCX-LSDT2023－01）
作者简介：张晓萍（1982—），女，高级工程师，从事炼铁新技术与理论方面的研究。
通信作者：温宝良（2000—），男，工程师，从事炼铁新技术与理论方面的研究。

hematite by the Midrex process is 0.352 5 kmol, while the HYL-III and HyMEX processes could reach 0.395 kmol and 0.400 kmol, respectively. The latter two are more suitable for high temperature reduction due to H_2-rich atmosphere. The results can provide a theoretical basis for optimizing the reduction process parameters of gas-based shaft furnaces.

Key words: low-carbon ironmaking; gas-based shaft furnace; H_2-CO reduction; the principle of minimum Gibbs free energy; thermodynamic equilibrium phase

高炉碳热还原炼铁工序是将铁矿转化为铁水的核心环节，但其碳排放量占钢铁冶炼全流程的70%以上[1]。当前我国钢铁行业正面临“双碳”目标的压力，在此背景下气基竖炉还原炼铁工艺因其技术成熟度较高、反应气体富含 H_2、流程短、碳排放低等优势，被视为具有潜力的低碳炼铁过渡技术路径[2-3]。2024 年，全球直接还原铁(DRI)产量达到 1.44 亿吨，主要采用 Midrex 和 HYL 工艺生产[4-6]。其气源以重整天然气和焦炉煤气等富 H_2 含 CO 的反应气为主[7]，而绿氢反应气的工业化推广仍受限于绿电的高成本、储运的安全风险以及运输成本过高等问题[8-9]。

赤铁矿(Fe_2O_3)在 H_2-CO 混合气氛中的还原行为研究以还原动力学试验及模拟与还原层铁氧化物相结构分析为主[10-11]。ABDELRAHIM 等[12]的研究表明，在还原温度为700～1 100 ℃范围内，与 CO-CO_2-N_2 反应气相比，CO-CO_2-H_2-H_2O-N_2 反应气还原赤铁矿的能力更强，能在更低的温度下于球团外围和核心形成金属铁(Fe)，提高还原温度和反应气中 H_2 量会导致球团在还原过程中孔隙率增大和比表面积增加。KOROBEINIKOV 等[13]研究则表明，当还原温度为 850 ℃时，增加 H_2-CO 混合反应气中的 CO 量会减缓还原速率，该现象产生的原因与气相扩散速率差异相关；此外，H_2-CO-H_2O 反应气还原球团产生的孔隙，比采用 H_2-H_2O 反应气还原球团产生的孔隙更粗大。赤铁矿在 H_2-CO 气氛中的还原热力学分析主要还是依赖氧势图(Ellingham type diagram)[14]和叉子曲线图(Baur-Glässner diagram)[15]。尽管这两种方法能够描述各种氧化物稳定性的次序，并直观呈现不同物相稳定条件下反应气氛的边界区间，但其无法动态量化体系内铁氧化物的组成变化，从而难以准确刻画不同 H_2 与 CO 配比反应气条件下赤铁矿还原的热力学行为。

最小吉布斯自由能原理(principle of minimum Gibbs energy)是冶金学中判定热力学过程方向的核心准则。该原理指出，在等温等压条件下，系统的自发过程总是朝着使吉布斯自由能减小的方向进行，最终达到最小值，即系统平衡状态。相较于氧势图和叉子曲线图等传统分析方法，最小吉布斯自由能原理能够通过数学方法量化铁氧化物在不同 H_2 与 CO 配比反应气还原过程中的多相与多组分变化。王小艾等[16]构建了基于吉布斯自由能最小化的非线性方程组，以计算气基竖炉的工艺操作参数对铁氧化物还原相平衡的影响，研究结果表明：气基竖炉的最大煤气利用率为44.12%，增加炉内还原温度并适当降低操作压力有利于铁氧化物还原。JABBOUR 等[17]基于最小吉布斯自由能原理，使用 HSC chemistry 7.1 软件对 H_2 还原赤铁矿过程进行热力学模拟与还原反应优化，提出不同温度下赤铁矿完全还原至金属铁所需的 H_2 与 Fe_2O_3 物质的量之比，并总结试验数据验证其热力学计算结果。SADEGHI 等[18]则同样基于最小吉布斯自由能原理和 HSC 软件，研究了矿相结构组成对球团中铁氧化物还原行为的影响。

为此，本文采用最小吉布斯自由能原理对赤铁矿在 H_2-CO 混合气氛中的还原热力学进行计算，预测赤铁矿在理想条件下的平衡相组成分布；进而在富 H_2 含 CO 反应气条件下，评估气基竖炉反应条件对赤铁矿还原趋势的影响，为精确调控还原条件，提升气基竖炉炼铁工艺的生产效率提供理论支撑。

1 热力学计算方法及反应条件

1.1 热力学计算方法

采用 HSC Chemistry 9.5.1 软件的化学反应平衡模块(Equilibrium Compositions)构建热力学模型，在给定物质、物质的量以及反应条件后，基于最小吉布斯自由能原理，使用“GIBBS”求解器计算并绘制平衡相组成曲线。其中，反应物与生

成物及相态的选择：① 气相，包括反应物 CO(g)、H_2(g)以及生成物 CO_2(g)、H_2O(g)；② 氧化物相，包括反应物 Fe_2O_3(s)以及生成物 FeO(s)、Fe_3O_4(s)；③ 纯物质相，包括生成物 Fe(s)、C(s)。其中，Fe(s)、FeO(s)、Fe_3O_4(s)为块状的铁及铁氧化物产物。

研究纯 H_2还原赤铁矿时的平衡相组成时，不考虑反应物 CO(g)、生成物 CO_2(g)及 C(s)；同理，研究纯 CO 还原赤铁矿时的平衡相组成时，不涉及反应物 H_2(g)与生成物 H_2O(g)。尽管 SiO_2对球团的可还原性和还原历程存在一定影响[19-20]，但实际气基竖炉工艺所用球团中的 SiO_2含量较低[21]，且其中多数硅元素以石英相形式存在，不易被还原，因而其影响相对有限。因此，在本文研究的热力学计算中，未将 SiO_2作为主要变量加以考虑。

由于本文研究的热力学计算以体系达到完全平衡状态为前提，而 Fe_3C 本质为亚稳相[22]，在最终计算结果中几乎不存在，因此未将其纳入平衡相组成。Fe_3C 在直接还原铁(DRI)中室温下的留存及其对结构性能的影响，属于还原动力学行为与工艺控制范畴[23]，需借助其他分析手段进行研究[24-26]。计算假设各气相为理想混合态，各氧化物相及纯物质相均为纯物质态，其中 Fe(s)、FeO(s)、Fe_3O_4(s)为块状铁及其氧化物。研究纯 H_2还原赤铁矿时的平衡相组成时，不涉及 CO(g)、CO_2(g)、生成物 C(s)；同理，研究纯 CO 还原赤铁矿时的平衡相组成时，不涉及 H_2(g)与 H_2O(g)。以反应式 $Fe_2O_3 + 3H_2/3CO \rightarrow 2Fe + 3H_2O/3CO_2$为依据，即纯 H_2或纯 CO 与 Fe_2O_3 的物质的量之比为 3∶1作为基准，反应物输入量与产物输出量均以 kmol为单位。在固定总反应气量为3 kmol的前提下，通过调整 H_2与 CO 的具体输入量，考察赤铁矿量、还原温度、不同 H_2与 CO 配比的反应气以及不同气基竖炉工艺条件对赤铁矿还原平衡相的影响。最终计算结果仅以铁与铁氧化物的形式表示，并给出其在铁与铁氧化物体系中的摩尔分数。

1.2　热力学反应条件

纯反应气及不同气基竖炉工艺还原赤铁矿的反应条件[8]如表 1 所示。其中，河钢集团张宣科技基于 HYL-III 工艺整合 Energiron-ZR 技术，提出了名为 HyMEX 的气基竖炉直接还原炼铁技术，其反应气采用零重整焦炉煤气。

表 1 中不同气基竖炉工艺的反应气体组分忽略了 CH_4、H_2O、CO_2和 N_2，原因如下：CH_4会与 H_2O、CO_2发生重整反应(如 $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$，$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$)，该过程在消耗抑制还原反应的氧化性气体($CO_2$和 H_2O)的同时[27]，生成还原剂(H_2和 CO)；CO_2的存在会对还原反应产生热力学平衡限制，过高的 CO_2分压会抑制 FeO 被 CO 还原的进程。但在工艺设计上，无论是 Midrex 还是 HYL-III 与 HyMEX 工艺，均通过循环气体洗涤系统严格控制入炉还原气中 CO_2与 H_2O 的含量，尽管体系中存在 H_2O 和 CO_2，其浓度被主动控制在较低水平；N_2作为载气介质，不直接参与反应。因此，表 1 中不同气基竖炉工艺的初始反应气体组分仅以最终还原气(即 H_2与 CO)进行计算。

2　结果与讨论

2.1　纯反应气条件下还原赤铁矿的平衡相组成

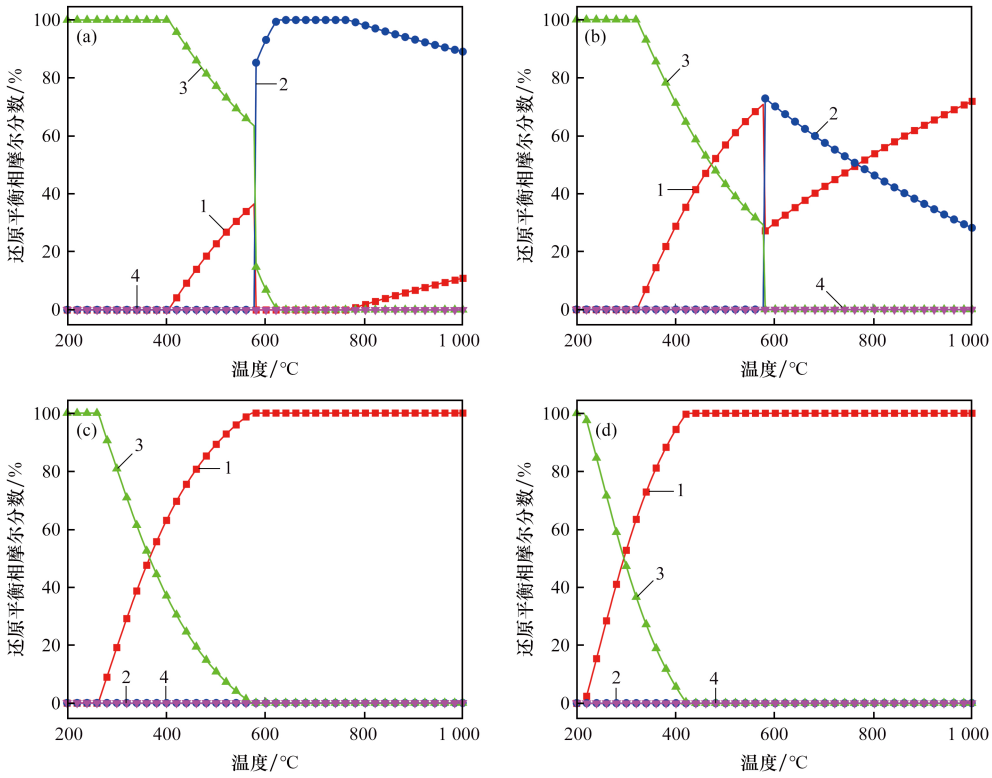
2.1.1　纯 H_2条件

固定纯 H_2反应气量为 3 kmol 时，得到不同赤铁矿用量下温度对还原平衡相摩尔分数的影响如图1所示。由图1可见，当温度低于580 ℃时，赤铁

表 1　纯反应气与不同气基竖炉工艺还原赤铁矿的反应条件

Table 1　Reaction conditions for reducing Fe_2O_3 using pure reaction gas and different hydrogen-based shaft furnaces

气体组成	纯反应气		不同气基竖炉工艺		
	100% H_2	100% CO	Midrex	HYL-III	HyMEX
H_2(摩尔分数)/%	100	0	62	85	89
CO(摩尔分数)/%	0	100	38	15	11
还原温度/℃	200 ~ 1 000	200 ~ 1 000	750 ~ 900	900 ~ 1 050	1 000 ~ 1 050
还原压力/MPa	0.10	0.10	0.25	0.60	0.75



赤铁矿量/kmol：(a) 1；(b) 0.5；(c) 0.25；(d) 0.125

不同还原平衡相：1—Fe(s)；2—FeO(s)；3—Fe_3O_4(s)；4—Fe_2O_3(s)。

图 1 不同赤铁矿量条件下温度对还原平衡相摩尔分数的影响

Fig. 1 The influence of temperature on the mole fraction of equilibrium phases in the reduction under different amounts of Fe_2O_3

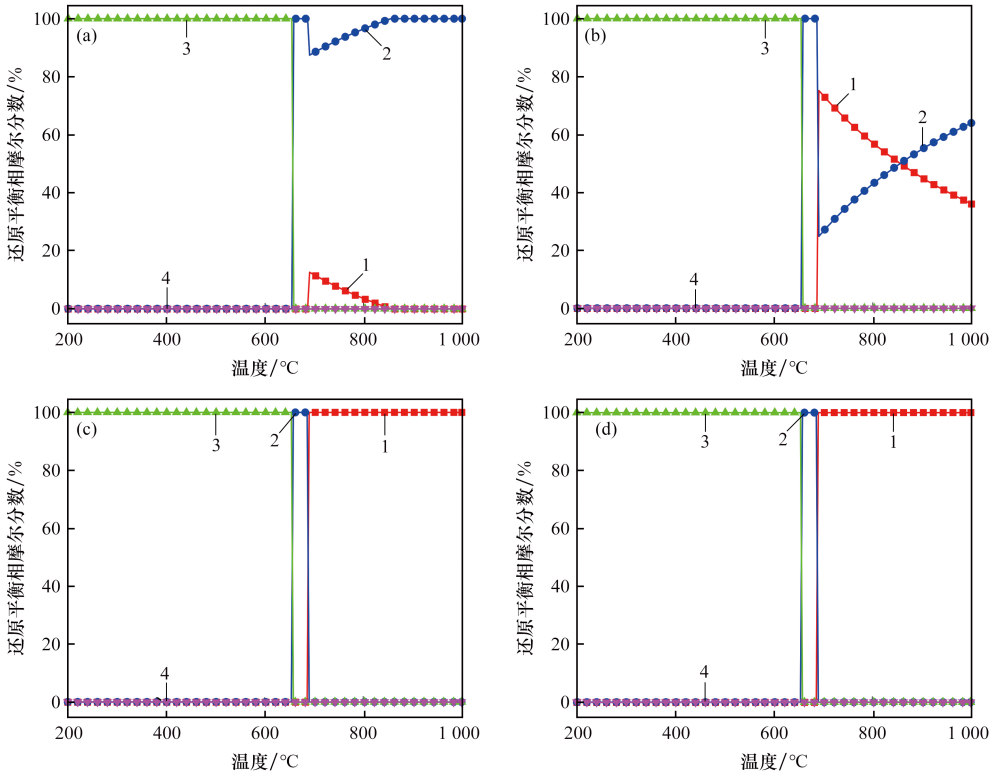
(注:固定纯 H_2 反应气量为 3 kmol)

矿还原生成磁铁矿与金属铁；随着反应温度升高，赤铁矿进一步还原为磁铁矿、浮氏体及金属铁。在赤铁矿用量为 1 kmol 和 0.5 kmol 的条件下，浮氏体可在中高温区(600 ~ 1 000 ℃)稳定存在；而当赤铁矿用量降至 0.25 kmol 和 0.125 kmol 时，如图 1(c)和图 1(d)所示，赤铁矿可在最终阶段完全还原为金属铁，无浮氏体生成。这表明，增加反应原料中 H_2 的比例(或减少赤铁矿用量)，可提高还原终期磁铁矿与浮氏体向金属铁的转化程度。

2.1.2 纯 CO 条件

由水煤气变换反应($CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$)的平衡特性可知，$H_2$ 与 CO 的还原性强弱受温度影响，在低于 800 ℃时，纯 CO 具有更强的还原性。对于纯 CO 还原赤铁矿，还需考虑析碳反应($2CO \rightleftharpoons C + CO_2$)，当反应温度超过 400 ℃时，该反应较为活跃，并生成碳沉积。析碳反应本身条件较为苛刻，但当体系中铁及其氧化物存在时，可起到催化作用，促进反应发生。因此，在模拟计算中需将产物中的纯物质碳[C(s)]纳入考虑。

基于此，固定纯 CO 反应气量为 3 kmol，计算不同赤铁矿用量下温度对还原平衡相摩尔分数的影响。结果如图 2 所示。由图 2 可知，与纯 H_2 相比，采用纯 CO 还原铁氧化物时，在低于 685 ℃条件下还原产物中不生成金属铁；当温度高于 800 ℃后，纯 CO 的还原能力弱于纯 H_2，而在 700 ~ 800 ℃区间内则强于纯 H_2。这一现象与 CO 还原浮氏体为金属铁的反应特性有关，该反应在热力学上为放热过程，较低温度有利于平衡向右移动。例如，当赤铁矿用量为 1 kmol 和 0.5 kmol 时，700 ℃下纯 CO 还原所得金属铁平衡含量最高；温度升高后，受 CO 还原浮氏体的放热反应特性影响，浮氏体还原平衡逆向移动，金属铁含量随之降低。增加 CO 用量可增强还原势，延缓金属铁含量的下降趋势，但不会改变金属铁含量最高



赤铁矿量/kmol：(a) 1；(b) 0.5；(c) 0.25；(d) 0.125

不同还原平衡相：1—Fe(s)；2—FeO(s)；3—Fe_3O_4(s)；4—Fe_2O_3(s)。

图 2　不同赤铁矿量条件下温度对还原平衡相摩尔分数的影响

Fig. 2　The influence of temperature on the molar percentage of equilibrium phases in the reduction under different amounts of hematite

(注:固定纯 CO 反应气量为 3 kmol)

点所对应的温度。同样，提高反应原料中 CO 的比例(或减少赤铁矿用量)，亦可促进还原终期磁铁矿与浮氏体向金属铁的转化。

2.2　纯反应气条件下还原赤铁矿至金属铁所需摩尔量

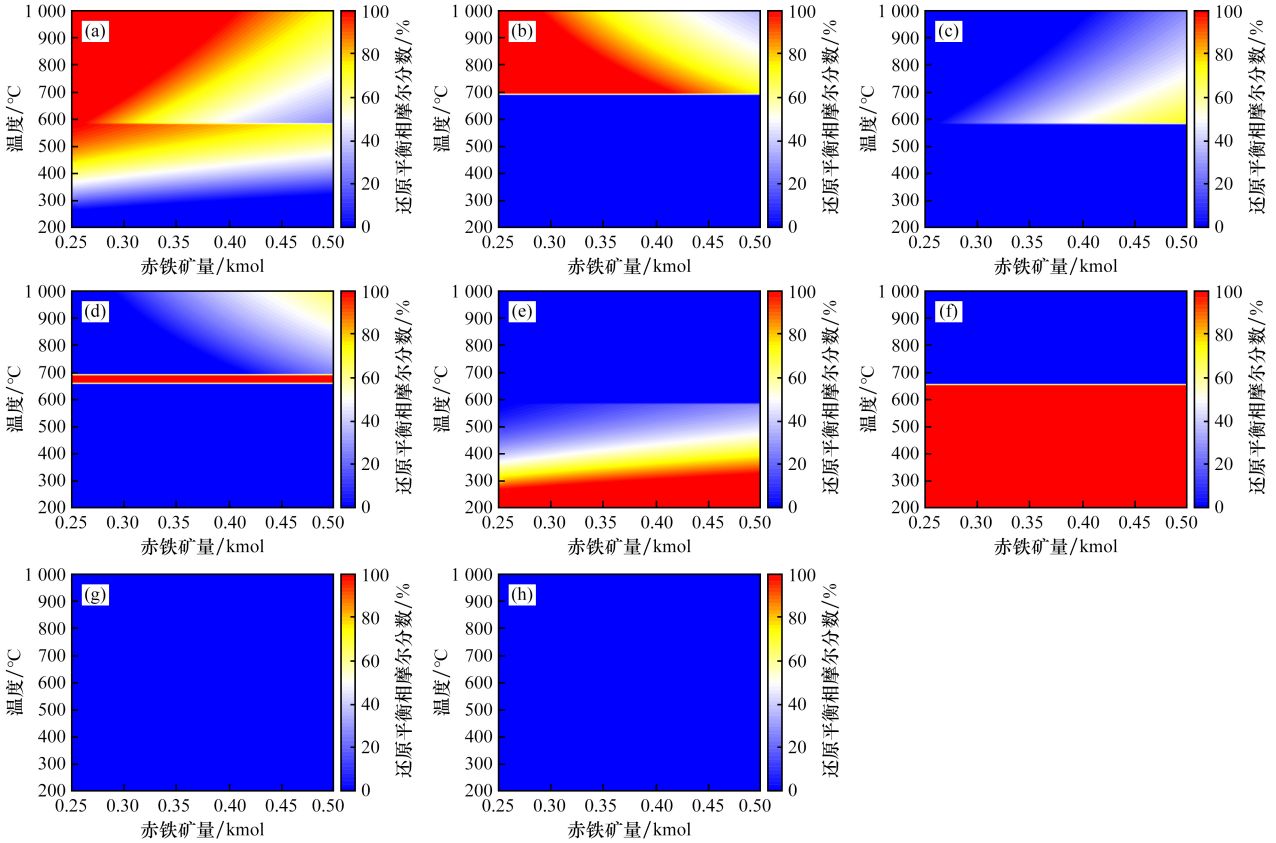
图 1 和图 2 的热力学计算结果表明，在 700 ~ 1 000℃温度范围内，固定纯 H_2或纯 CO 反应气量为 3 kmol 时，赤铁矿在还原终期由磁铁矿与浮氏体完全转化为金属铁的摩尔量应控制在 0.25 ~ 0.50 kmol。

为进一步分析纯 H_2或纯 CO 完全还原赤铁矿至金属铁所需的赤铁矿量，固定纯 H_2或纯 CO 反应气量为 3 kmol，考察还原温度与赤铁矿量(0.25 ~ 0.50 kmol)对还原平衡相摩尔分数的影响，结果如图 3 所示。由图 3 可知，在 1 000 ℃下，当纯 H_2量为 3 kmol 时，实现赤铁矿完全还原至金属铁所需的赤铁矿量介于 0.250 kmol 与 0.405 kmol 之间，这与高温有利于赤铁矿还原反应正向进行的热力学条件密切相关。在相同反应气量(3 kmol)条件下，纯 CO 于 700 ℃时还原赤铁矿的能力最强，完全还原所需的赤铁矿量为 0.250 ~ 0.415 kmol，与纯 H_2的还原能力相近。

2.3　H_2 + CO 混合气氛下还原赤铁矿的平衡相组成

当前不同气基竖炉工艺的反应气中通常含有 10%~40% 的 CO。不同反应气条件下温度和赤铁矿量对还原平衡相摩尔分数的影响如图 3 所示。由图 3 可知，固定纯 CO 量为3 kmol 时，赤铁矿的最高还原量为 0.4 kmol。基于此，固定 H_2 + CO 混合反应气总量为 3 kmol、赤铁矿量为 0.4 kmol、反应压力为 0.1 MPa，得到 H_2 + CO 混合气中 CO 摩尔分数和还原温度对赤铁矿还原平衡相摩尔分数的影响，如图 4 所示。

由图 4 可以看出：在纯 H_2条件下，低温区(＜700 ℃)金属铁含量较低，表明纯H_2难以在中



不同还原平衡相：(a)、(b) Fe(s)；(c)、(d) FeO(s)；(e)、(f) Fe_3O_4(s)；(g)、(h) Fe_2O_3(s)

(a)、(c)、(e)、(g) —采用 H_2还原；(b)、(d)、(f)、(h) —采用 CO 还原。

图 3 不同反应气条件下温度和赤铁矿量对还原平衡相摩尔分数的影响

Fig. 3 The influence of temperature and the amount of hematite on the molar percentage of the equilibrium phases in the reduction under different reaction gas conditions

(注:固定纯反应气量为 3 kmol)

低温条件下驱动赤铁矿深度还原；当温度升至 1 000 ℃时，金属铁含量显著提高，印证了氢气作为还原剂的高温适宜性。在纯 CO 条件下，700 ℃左右金属铁质量分数已接近 100%，而当温度超过 800 ℃后，金属铁含量下降，这与 CO 还原能力减弱有关，体现了 CO 作为还原剂的低温适宜性。在混合气氛(CO 体积分数约为 40%)条件下，800 ℃时的金属铁含量得到有效提升，说明适量引入 CO 可拓宽还原温度窗口，在中高温区促进赤铁矿向金属铁的还原。

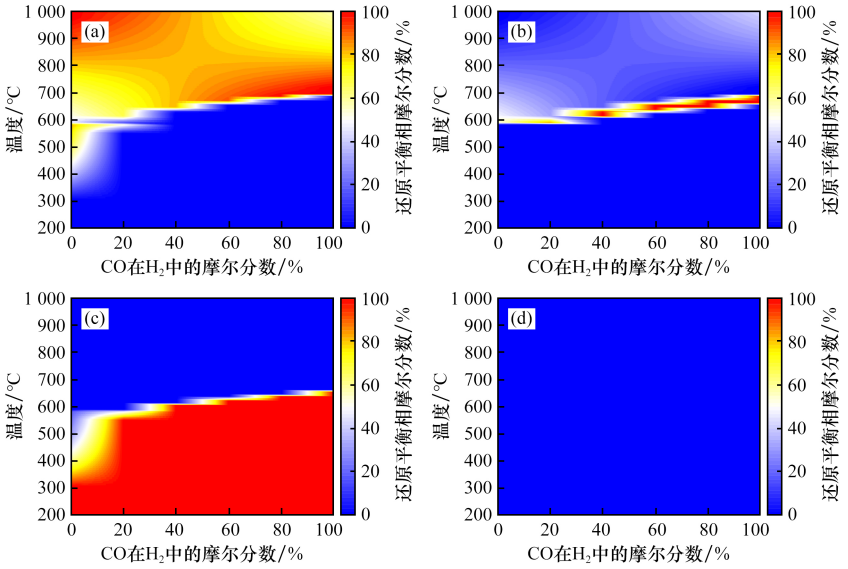
2.4 不同气基竖炉工艺条件下还原赤铁矿的平衡相组成

不同气基竖炉工艺下赤铁矿还原平衡相的摩尔分数如图 5 所示。由于还原至相平衡时磁铁矿与赤铁矿含量极低，图中仅展示了金属铁与浮氏体的摩尔分数。从金属铁的形成区间可以看出，不同气基竖炉工艺还原赤铁矿的能力排序：HyMEX ≈ HYL-III > Midrex，该结果与刘西财等[28]的研究结果相似，其试验结果同样表明 HYL 工艺的还原能力优于 Midrex，而 HyMEX 工艺与 HYL-III 工艺的还原能力接近。

在气基竖炉工艺反应气量均固定为 3 kmol 的前提下，Midrex 工艺实现赤铁矿完全还原为金属铁所对应的最高处理量为 0.352 5 kmol，而 HYL-III 工艺与 HyMEX 工艺则分别为 0.395 kmol 和 0.400 kmol。这表明，在相同反应气量下，HyMEX 工艺和 HYL-III 工艺可处理更多铁矿石，从而获得更高的 DRI 产量。

3 结 论

(1) 增加还原剂比例或减少赤铁矿用量，均可促进还原终期磁铁矿与浮氏体向金属铁的转化。

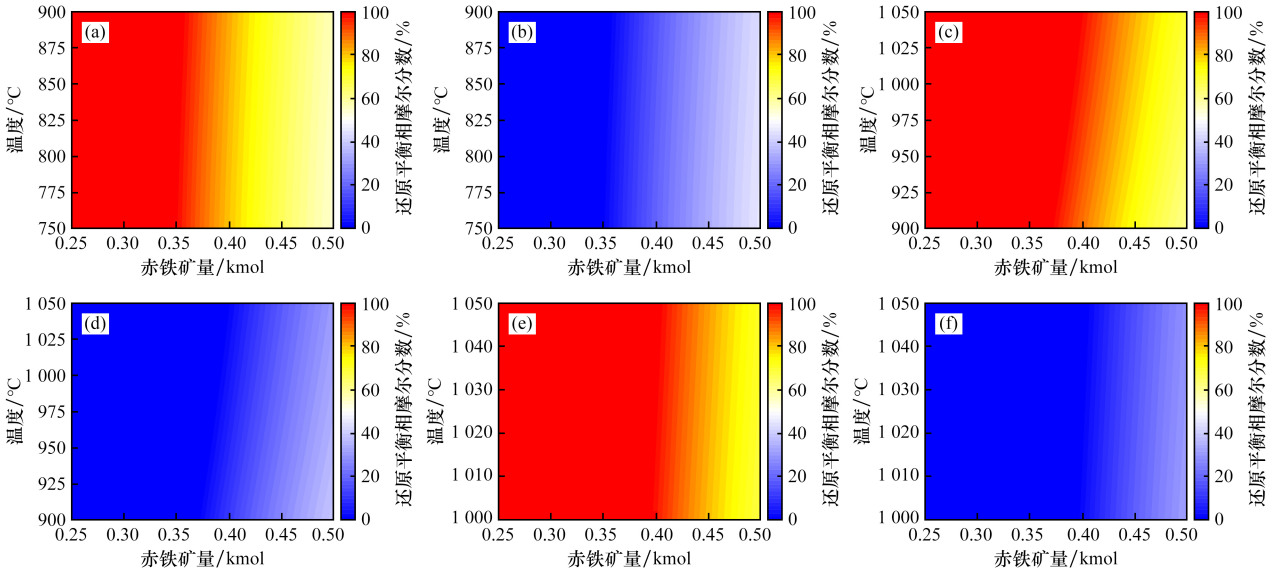


不同还原平衡相：(a) Fe(s)；(b) FeO(s)；(c) Fe_3O_4(s)；(d) Fe_2O_3(s)

图 4　温度与混合气中 CO 摩尔分数对还原平衡相摩尔分数的影响

Fig. 4　The influence of temperature and molar fraction of CO in the mixture gas on the mole fraction of the equilibrium phases in the reduction

(注:固定总反应气量为 3 kmol)



不同工艺：(a)、(b) Midrex；(c)、(d) HYL-III；(e)、(f) HyMEX

不同还原平衡相：(a)、(c)、(e) —Fe (s)；(b)、(d)、(f) —FeO(s)。

图 5　不同气基竖炉工艺条件下赤铁矿还原平衡相摩尔分数

Fig. 5　Molar percentage of the equilibrium phases in the hematite reduction under various gas-based shaft furnace processes conditions

(注:固定总反应气量为 3 kmol)

H_2在 1 000 ℃时完全还原赤铁矿的临界量为 0.405 kmol；CO 在 700～800 ℃时还原能力最强，完全还原赤铁矿的临界量为 0.415 kmol，受高温逆向反应制约，超过 800 ℃后 CO 还原能力下降。

(2) 在 H_2中引入约 40% 的 CO 可拓宽还原温度窗口。纯 H_2在低温区(<700 ℃)还原能力不足，纯 CO 在高温区(>800 ℃)还原势衰减，而混合气氛可在 800 ℃左右提高赤铁矿还原所得金属铁

含量。

（3）各气基竖炉工艺还原赤铁矿的能力排序为 HyMEX ≈ HYL-III > Midrex。在还原气量为 3 kmol 的条件下，Midrex 工艺完全还原赤铁矿的最高处理量为 0.352 5 kmol，而 HYL-III 工艺与 HyMEX 工艺分别可达 0.395 kmol 和 0.400 kmol。

参考文献：

[1] 张建良,宗燕兵,李克江,等. 全球低碳炼铁新工艺技术进展及展望[J]. 钢铁,2024,59(9):45－55;155.
ZHANG Jianliang, ZONG Yanbing, LI Kejiang, et al. Progress and future perspective of low-carbon ironmaking process in the world[J]. Iron and Steel,2024,59(9):45－55;155.

[2] 王新东,韩星,钟金红. 竖炉氢冶金是钢铁行业低碳发展重要路径之一[J]. 钢铁,2025,60(9):1－13.
WANG Xindong, HAN Xing, ZHONG Jinhong. Shaft furnace hydrogen metallurgy is one of the important ways for low-carbon development of iron and steel industry [J]. Iron & Steel,2025,60(9):1－13.

[3] 卢立金,王海风,王锋,等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用[J]. 钢铁,2024,59(3):183－196.
LU Lijin, WANG Haifeng, WANG Feng, et al. Development status and application of hydrogen metallurgy technology[J]. Iron and Steel,2024,59(3):183－196.

[4] 蒋历俊,张涛,郑军,等. 气基竖炉直接还原工艺发展现状及展望[J]. 烧结球团,2024,49(3):18－24.
JIANG Lijun, ZHANG Tao, ZHENG Jun, et al. Development status and prospect on direct reduction process of gas-based shaft furnace[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(3):18－24.

[5] 王莹,何志军,陈妍,等. 氢基竖炉直接还原工艺发展现状及思考[J]. 矿冶工程,2024,44(4):212－216.
WANG Ying,HE Zhijun,CHEN Yan,et al. Development status of hydrogen-based direct reduction process in shaft furnace and related thoughts[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(4):212－216.

[6] 李军,李传民,刘亚峰,等. 中等品位铁矿直接还原炼铁熔分工艺的发展现状及趋势[J]. 烧结球团,2025,50(3):1－11;25.
LI Jun, LI Chuanmin, LIU Yafeng, et al. Development status and trend of direct reduction ironmaking smelting separation process for medium-grade iron ore[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(3):1－11;25.

[7] 青格勒,王桂林,许佳,等. 直接还原铁生产用铁矿石及还原气的分析与思考[J]. 中国冶金,2025,35(5):55－64.
QING Gele, WANG Guilin, XU Jia, et al. Analysis and thinking of iron ore and reducing gases for direct reduced iron production[J]. China Metallurgy, 2025, 35(5):55－64.

[8] 李娜,亚娜,张淑会,等. 气基竖炉直接还原工艺发展现状与展望[J]. 炼铁,2024,43(6):1－8.
LI Na,YA Na,ZHANG Shuhui,et al. Development status and prospects of direct reduction technology of gas-based shaft furnace[J]. Ironmaking,2024,43(6):1－8.

[9] MA Y, BAE J W, KIM S H, et al. Reducing iron oxide with ammonia: A sustainable path to green steel[J]. Advanced Science,2023,10(16):2300111.

[10] MIŠKOVIČOVÁ Z,LEGEMZA J,DEMETER P,et al. An overview analysis of current research status in iron oxides reduction by hydrogen[J]. Metals,2024,14(5):589.

[11] ZHANG Y J, YUE Q, LI X, et al. Modeling and simulation of the direct reduction process for pellets in mixed reducing gas of H_2-CO[J]. Powder Technology, 2025,452:120539.

[12] ABDELRAHIM A, ILJANA M, OMRAN M, et al. Influence of H_2-H_2O content on the reduction of acid iron ore pellets in a CO-CO_2-N_2 reducing atmosphere[J]. ISIJ International,2020,60(10):2206－2217.

[13] KOROBEINIKOV Y, MESHRAM A, HARRIS C, et al. Reduction of iron-ore pellets using different gas mixtures and temperatures[J]. Steel Research International,2023, 94(10):2300066.

[14] RUKINI A, RHAMDHANI M A, BROOKS G A, et al. Metals production and metal oxides reduction using hydrogen: A review[J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2022,8(1):1－24.

[15] SPREITZER D,SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: A review[J]. Steel Research International, 2019,90(10):1900108.

[16] 王小艾,郅亚娜,李娜,等. 气基竖炉直接还原过程及性能的研究进展与展望[J]. 中国冶金,2024,34(11):1－9;21.
WANG Xiaoai, QIE Yana, LI Na, et al. Progress and prospect on process and performance of direct reduction

in gas-based shaft furnace[J]. China Metallurgy,2024,34(11):1 - 9,21.

[17] JABBOUR K, EL HASSAN N. Optimized conditions for reduction of iron (III) oxide into metallic form under hydrogen atmosphere: A thermodynamic approach[J]. Chemical Engineering Science,2022,252:117297.

[18] SADEGHI B, NAJAFIZADEH M, CAVALIERE P, et al. Effect of composition and processing conditions on the direct reduction of iron oxide pellets[J]. Powder Technology,2024,444:120061.

[19] 易陆杰,彭道胜,黄代亮. $w(SiO_2)$对高赤铁矿配比球团的影响[J]. 烧结球团,2023,48(5):74 - 78;107.
YI Lujie, PENG Daosheng, HUANG Dailiang. Influence of $w(SiO_2)$ on pellets with high ratio of hematite[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(5):74 - 78;107.

[20] YANG C C, WEI L, ZHU D Q, et al. Hydrogen-based direct reduction behavior of iron ore pellets with iron grades ranging from 59% to 68%[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,138:787 - 801.

[21] KIMS H, Zhang X, MA Y, et al. Rohwerder M. Influence of microstructure and atomic-scale chemistry on the direct reduction of iron ore with hydrogen at 700 ℃[J]. Acta Materialia. 2021,212:11693.

[22] 承强. 气基竖炉球团还原及渗碳行为基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2025:16 - 18.
CHENG Qiang. Fundamental research on the reduction and carburization behavior of gas-based shaft furnace pellets[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2025:16 - 18.

[23] 沈峰满,王硕,张严,等. 不同还原气体对气基竖炉直接还原过程的影响[J]. 钢铁,2025,60(11):43 - 50.
SHEN Fengman, WANG Shuo, ZHANG Yan, et al. Influence of different reducing gases on direct reduction process of gas-based shaft furnace[J]. Iron and Steel,2025,60(11):43 - 50.

[24] JOZWIAK W K, KACZMAREK E, MANIECKI T P, et al. Reduction behavior of iron oxides in hydrogen and carbon monoxide atmospheres[J]. Applied Catalysis A: General,2007,326(1):17 - 27.

[25] SADEGHI B, CAVALIERE P, RAMOS GONCALVES N, et al. Reducibility of high-grade pellets directly reduced in hydrogen atmosphere: Modeling and experimental procedure[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,144:69 - 84.

[26] GÖTHEL J, BURKMANN K J, VOLKOVA O. Review and evaluation of ceramic-stabilized iron oxides for use as energy storage based on iron-steam process[J]. Steel Research International,2025,96(5):2400265.

[27] 褚润林. 无喷氧条件下氢基竖炉的生产[J]. 河北冶金,2024(10):50 - 54.
CHU Runlin. Production of hydrogen-based shaft furnace without oxygen injection[J]. Hebei Metallurgy, 2024(10):50 - 54.

[28] 刘西财,石恩泽,赵子川,等. 氢基竖炉条件下制备不同金属化率球团研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):58 - 64;126.
LIU Xicai, SHI Enze, ZHAO Zichuan, et al. Research on preparation of pellets with different metallization rates under hydrogen-based shaft furnace condition[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):58 - 64;126.