

全氢气基竖炉还原段数值模拟

章荣荣¹, 束奇峰²

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院;
2. 奥卢大学冶金研究所)

摘要: 气基竖炉是氢还原炼铁过程中最重要的部件之一, 故在氢还原研究中对竖炉还原段运行情况的分析模拟备受关注。本文借助 ANSYS 平台旗下 Fluent 软件, 采用有限体积法, 根据气固相质量能量守恒方程建立全氢气基竖炉二维轴对称模型。分析了氢气流量、氢气温度和矿石颗粒直径对还原反应的影响。模拟结果显示氢气流量不小于 3.2 倍理论最少需气量即可满足冶炼需求, 且氢气流量继续增加对还原结果影响不大; 氢气入炉温度在 900℃ 时还原效果最佳; 入炉球团矿直径为 6mm 时还原效果最佳, 直径越大越难还原。

关键词: 气基竖炉; 氢还原; Fluent 数值模拟

中图分类号: TF19

Numerical simulation of reduction section of all hydrogen based shaft furnace

Zhang Rongrong¹, Shu Qifeng²

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing;
2. Process metallurgy research unit, University of Oulu)

Abstract: Gas-base shaft furnace is one of the most important part in the process of hydrogen reduction iron making, so the analysis and simulation of the operation of shaft furnace reduction section has attracted much attention in the research of hydrogen reduction. In this paper, with the help of Fluent software of ANSYS platform, the finite volume method is adopted to establish a two-dimensional axisymmetric model of all hydrogen based shaft furnace according to the gas-solid mass and energy conservation equation. The effects of hydrogen flow rate, hydrogen temperature and particle diameter on the reduction reaction were analyzed. The simulation results show that the hydrogen flow rate is not less than 3.2 times of the theoretical minimum gas demand to meet the smelting demand, and the continuous increase of hydrogen flow rate has little effect on the reduction results. The best reduction effect is achieved at 900℃. The reduction effect is best when the pellet diameter is 6mm, and the larger the diameter, the more difficult to reduce.

Key words: Gas-base shaft furnace; Hydrogen reduction; Fluent numerical simulation

0 引言

改革开放以来, 中国各行各业快速发展, 其中钢铁行业一直是中国国家综合国力和工业化程度的重要标志, 是最硬核的制造业之一。据统计中国年粗钢产量在 2020 年突破 10 亿吨, 截止 2022 年粗钢产量为 10.13 亿吨占全球粗钢产量 55%^[1], 是一个名副其实的钢铁大国。粗钢产量巨大的背后随之而来的是巨大的碳排放问题, 传统高炉路线因焦炭在冶炼过程中物理和化学方面作用的不可替代性, 很难大幅度降低碳排放。故能够实现超低碳排放的氢冶金技术^[2]是未来钢铁冶炼的方向。

氢冶金技术即用氢气取代焦炭作为还原剂和能量源炼铁, 还原产物为水, 可实现超低碳

作者简介: 章荣荣, 男, 主要研究方向为氢冶金计算与模拟

通信联系人: 束奇峰, 男, 教授, 主要研究方向: 高温熔渣, 连铸保护渣, 氢冶金过程. E-mail: shuqifeng@ustb.edu.cn

45 排放^[3], 其中竖炉作为氢还原炼铁过程中矿石与氢气反应的场所, 对竖炉内还原过程的研究
 显得十分重要, 在考虑到成本的前提下对竖炉内进行数值模拟可以为实际生产提供一定参考
 价值。

全氢气基竖炉 (图 1) 与传统竖炉相同, 矿石从竖炉顶部喂入, 通过重力下降并遇到在
 反应器的中间高度横向喂入, 顶部排出的热氢气流^[4]。还原反应发生在还原气体出口和进口
 50 的上部之间并在进气口处生成直接还原铁。在还原段下部, 使用锥形部分冷却直接还原铁。
 另外炉顶装备有气体回收部分 (图中未显示)^[5], 由 H₂-H₂O 组成的顶部气体将被冷却为冷
 凝水, H₂ 被回收, 与电解厂的新鲜 H₂ 混合, 并重新加热至所需温度。

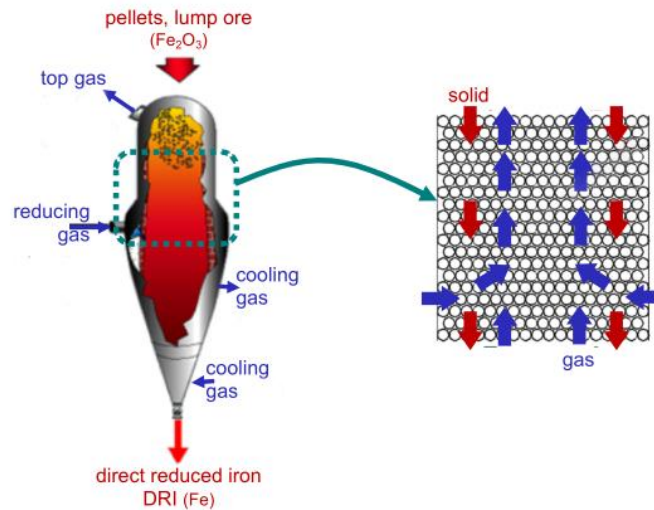
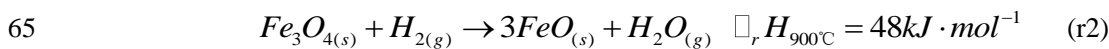
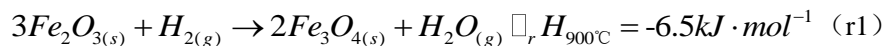


图 1 全氢气基竖炉

1 建立模型

55 1.1 基本假设

在实际生产过程中, 竖炉属于气固逆流移动床反应器^[6,7], 竖炉还原段为旋转对称结果, 为了简化模拟过程, 减少不必要的计算量, 将此全氢气基竖炉简化成一个二维轴对称模型。本次模拟使用 ANSYS 平台旗下 Fluent 软件, 采用有限体积法, 根据气固相质量能量守恒方程建立全氢气基竖炉二维轴对称模型^[8]。模拟研究还原段高度为 6m, 直径为 2.7m, 模拟年产量为 100 万吨/每小时产能 180t 直接还原铁的竖炉, 设定炉料入口温度为室温 25℃。由于
 60 氢还原铁的氧化物需要吸收大量的热, 为了保证炉料能够充分还原, 需要通入过量的还原气
 故设定还原气流量为 3634mol/s, 即 7.3kg·s⁻¹, 是根据化学反应计量系数所需还原氢气的 3.7
 倍^[9]。考虑 H₂ 逐级还原过程如下:



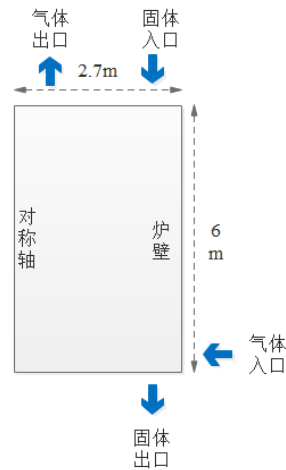


图2 模型参数

建模过程中作以下假设简化模拟过程:

- 70
- (1) 入炉矿石全部为直径一定的氧化铁球团且在竖炉内呈活塞流沿轴向匀速下降;
 - (2) 将原料层简化为多孔介质;
 - (3) 竖炉内物料和还原气体的物性参数固定不变;
 - (4) 忽略竖炉炉衬的传热。

1.2 控制方程

75 模型基本方程主要包括传输对流扩散方程、气相/固相质量守恒方程、能量守恒方程,以及气体连续性方程等。

传输对流扩散方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma\vec{\nabla}) + S$$

气相组分 $i(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$ 质量方程如下:

80

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rc_i x_i u_{g,r})}{\partial r} + \frac{\partial (c_i x_i u_{g,z})}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rc_i D_r \frac{\partial x_i}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (c_i D_z \frac{\partial x_i}{\partial z}) + S_i$$

$$-S_{H_2} = S_{H_2O} = r_1 + \frac{16}{19} r_2 + r_3$$

固相组分 $j(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$ 质量方程如下:

$$-\frac{\partial (\rho_b u_{s,z} w_j)}{\partial z} = S_j$$

$$S_{Fe_2O_3} = -3M_{Fe_2O_3} r_1$$

85

$$S_{Fe_3O_4} = M_{Fe_3O_4} (2r_1 - r_2)$$

$$S_{Fe_s, O} = M_{Fe_s, O} \left(\frac{60}{19} r_2 - r_3 \right)$$

$$S_{Fe} = 0.95 M_{Fe} r_3$$

能量守恒方程如下:

$$\frac{d}{dt}(\rho E) + \nabla(v(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T - \sum H_m J_m + \tau_{eff} v) + S_h$$

90 其中有效传导系数 k_{eff} ($W / m \cdot K$) 通过气体和固体传热系数的平均值求得:

$$K_{eff} = \varepsilon K_g + (1 - \varepsilon) K_s$$

Fluent 中化学反应热以能量源项形式参与计算^[10]:

$$S_h = -m \sum_j \left(\frac{h_m^0}{M_m} + \int_{T_{ref,m}}^T c_{p,m} dT \right) R_m$$

动量守恒方程如下所示:

$$95 \quad \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i$$

$$K = 150 \frac{(1 - \varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3 d_p^2} \mu_g + 1.75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon_b^3 d_p} \rho_g \mu_g$$

其中在 Fluent 软件中动量守恒方程中的动量源项由粘性阻力源项和内部阻力源项组成, 方程如下所示:

$$S_i = \sum_{j=1}^2 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^2 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j$$

100 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j K)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{K}$$

化学反应速率常数公式如下所示:

$$105 \quad k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

2 边界条件与数值求解

还原气由竖炉下部侧面喂入, 还原气的物性参数, 流量, 组成和温度一定; 还原气在竖炉内呈轴对称分布; 即 $T_g(r, 0) = 900^\circ C$, $\bar{u}_g(r, 0) = 3643 mol / s$, $\frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{\partial x_i}{\partial z} \approx 0$;

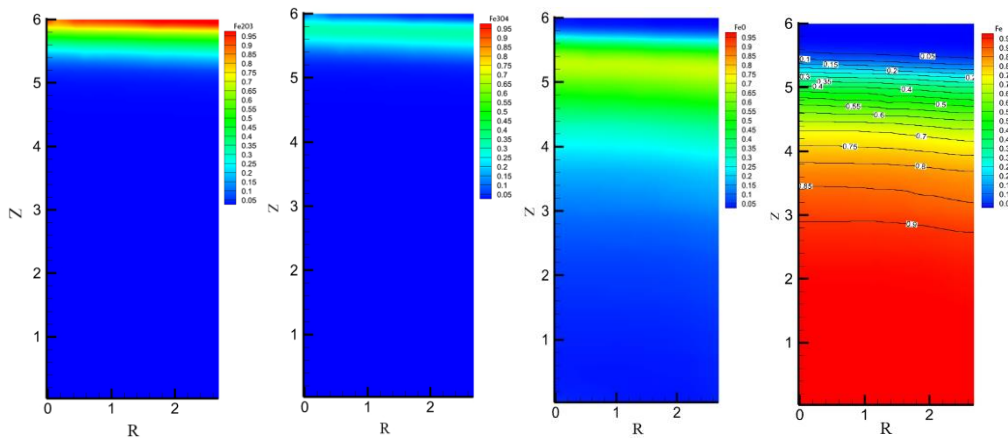
竖炉顶部为球团矿进口, 球团矿直径, 物性参数和温度一定, 底部为直接还原铁出口,

110 不考虑出口处沿轴向温度梯度；即 $d_p = 10mm$ ， $T_s = 25^\circ C$ ， $\frac{\partial T_s}{\partial z} \approx 0$ ；壁面为绝热壁面；

导入 Fluent 进行求解设置，由于竖炉内化学反应随时间变化故采用瞬态求解器计算，各个方程离散方式设置为二阶迎风差分式，求解精度设置为 10^{-3} 范围内。

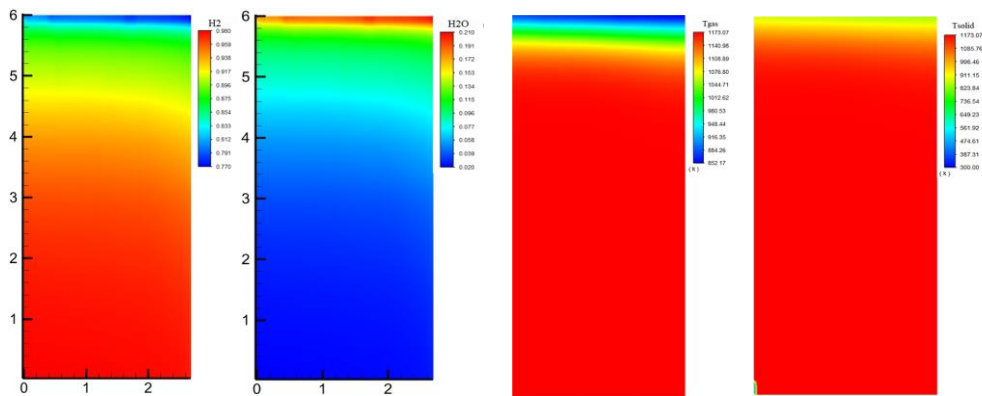
3 结果与分析

115 下图显示了在还原气组分为 98% H_2 、2% H_2O 且温度为 $900^\circ C$ 条件下，全氢竖炉内直接还原铁以及铁的氧化物质量组分分布情况。可以清楚的看到：首先， Fe_2O_3 迅速被还原成 Fe_3O_4 ；在距离球团矿入口（ $Z=0$ ）大约下降 0.9m 处大部分被还原成 FeO ；还原 FeO 比较困难所耗费的时间最久， FeO 全部还原成 Fe 大约需要下降 3m，是整个还原过程的限制性环节。可以看出整个还原过程是清晰的、成功的且大致符合文献^[11,12]中对于氢还原铁的规律的描述，证明了本次模拟的正确性。



120 图3 竖炉内直接还原铁与铁的氧化物质量组分分布从左至右分别为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO 和 Fe

125 竖炉内还原铁及铁的氧化物的质量组分数随竖炉高度的变化情况如图 5 所示。通过观察可以看到，在竖炉内整个还原过程依次为 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ 。其中 Fe_2O_3 集中分布在竖炉顶部且质量组分数不断减小在距离球团矿入口（ $H=6m$ ）1m 处被全部还原； Fe_3O_4 主要分布在高度 5.1m~5.9m 处； FeO 主要分布在 3m~5.7m 处并在 5.2m 处达到最大值，随后被进一步还原； Fe 在高度 5.6m 处开始生成，随着还原反应的进行含量不断增加，在高度约为 3m 处达到 90%。由以上结果可知纯氢竖炉还原速率很快，3m~4m 高竖炉就可以满足冶炼需求，相比于传统合成气竖炉（Midrex）需要 9m 高才能满足生产需求，全氢竖炉有着更高的竞争力。



130 图4 炉内气体分布图与气固温度分布图从左至右 H_2 、 H_2O 分布图，气体固体温度分布图

135

如图 4 所示：竖炉内氢气含量由进气口时的 98%到出气口的 77%；水蒸气含量由进气口的 2%到出气口的 21%。这表明炉内氢气和水的变化值可以使还原生成的直接还原铁保持在稳定范围内，永远不会发生逆向反应。竖炉顶部气体出口温度为 852K、物料进口温度为 300K 外，气体温度分布和固体温度分布大体相同，这表明两相之间的热量交换非常充分，3.8 倍的气体流量提供了足量的热量输入，使得整个竖炉内温度基本都达到了气体供应温度。

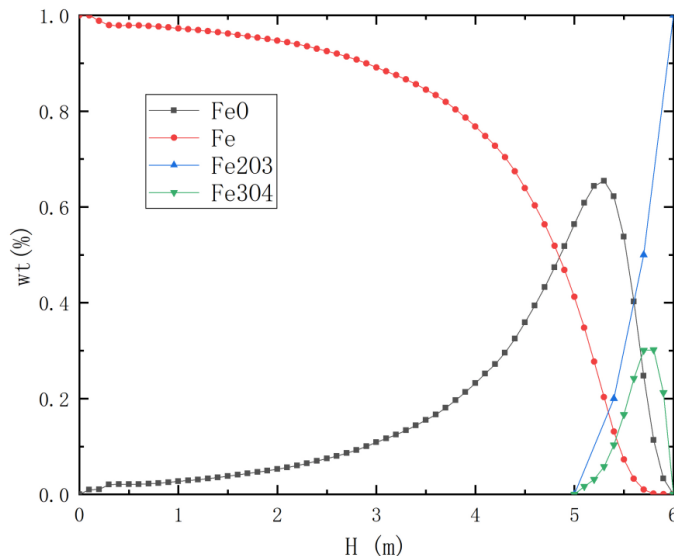


图 5 还原铁及铁的氧化物质量组分随竖炉高度分布

3.1 氢气流量对还原的影响

140

基于Midrex工艺进行的整个氢还原炼铁法的一个整体计算得出了一个参考流量：3.8倍的化学计量数。这一流量可以确保竖炉内有足够的热量供应满足还原需求且同时在出口处生成的水的浓度不会使矿石重新被氧化。但没有研究表明这是纯氢条件下最佳的流量：故模拟了在其他条件均相同的情况下，气体流量为2.4、3.2、3.8和4.2倍化学计量数的还原过程，找到可以减少气体流量的工艺参数进而降低经济成本。铁的组分质量分布如下图所示。

145

可以看到当气体流量为 2.4 倍时，还原反应基本只在气体进气口进行并且在竖炉中心金属化率仅为 70%，因此，2.4 倍流量不足以满足还原需求。当气体流量为 3.2 倍时，在出铁口处反应时均匀且完全的基本在炉高 2m 处完全还原，所以 3.2 倍的气体流量基本可以满足还原需求。当气体流量为 3.8 倍和 4.2 倍时，相比于 3.2 倍还原反应更加迅速，还原更彻底，适合竖炉高度不大的工况但所消耗的氢气量比较大。

150

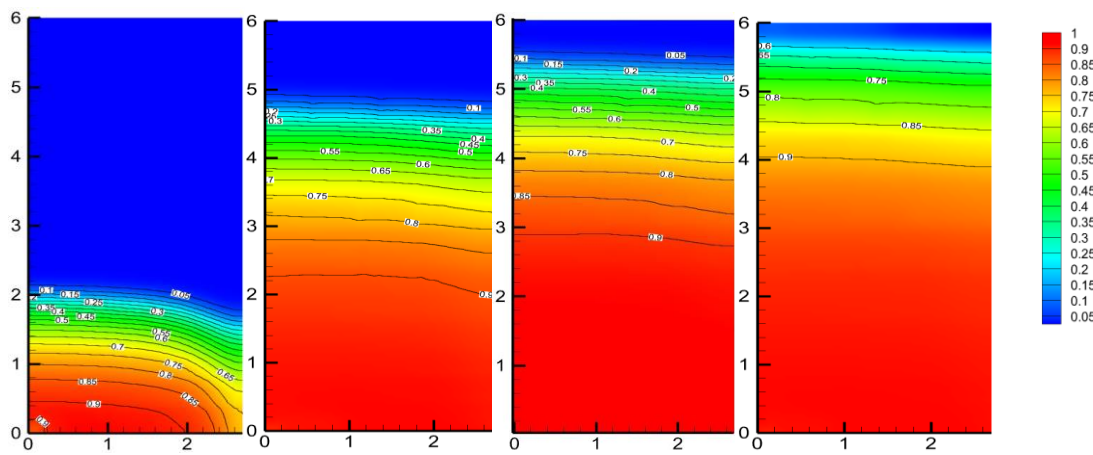


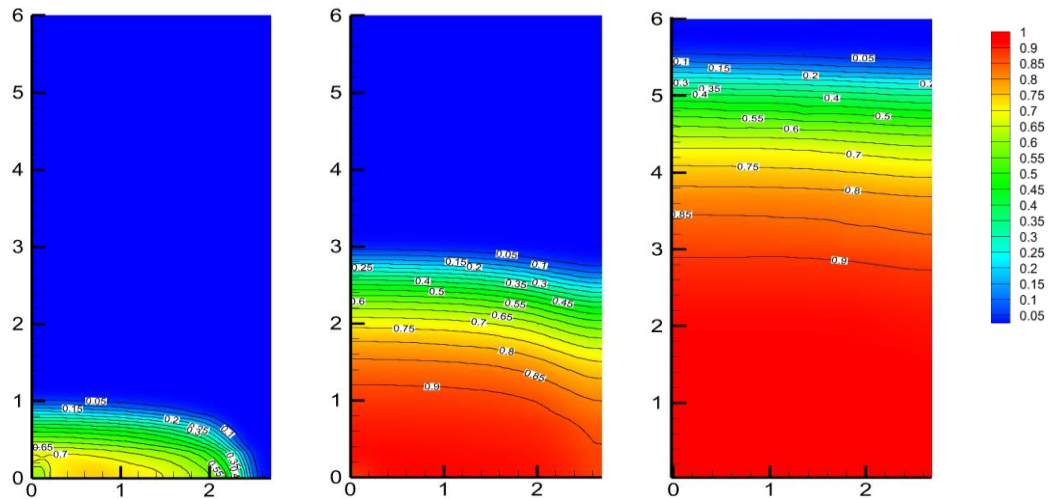
图 6 通气量(从左至右 2.4、3.2、3.8、4.2 倍)对直接还原铁分布的影响

3.2 氢气温度对还原的影响

还原气温度对炉内还原反应速率有很大的影响，故本文在其他条件不变的情况下，研究了还原气在 600℃、800℃和 900℃时的反应情况，铁的质量组分分布如图 7 所示：

155

在 600℃时，只有在氢气入口区域有铁生成且金属率不足 80%，存在很明显的径向梯度；在 800℃时，反应速率较 600℃明显提高了不少，在接近出料口处还原基本完成产物均匀；在 900℃时，反应速率进一步加快，在炉高 3m 处金属率达到 90%。但相比于气体温度 800℃时所需用于加热还原气所消耗的能量要更多。



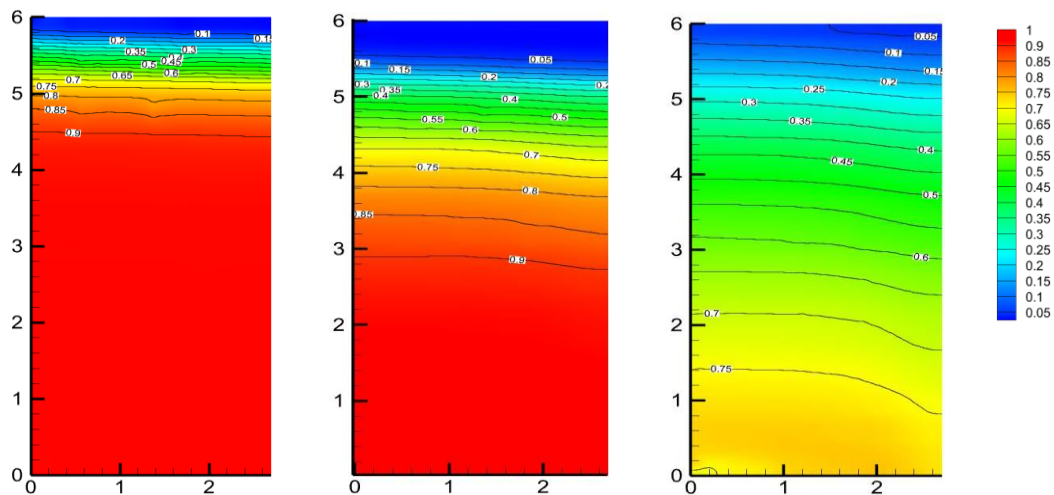
160

图 7 氢气温度对直接还原铁分布的影响

3.3 颗粒大小对还原的影响

由于球团颗粒的大小会影响气固反应的反应速率，对最终直接还原铁的生成有着一定的影响。本文模拟了直径为 6mm、10mm 和 24mm 的球团颗粒在竖炉中反应，最终铁的质量组分分布如图 8 所示。可以看到球团尺寸变小之后，反应速率有明显的增加。对于 6mm 的球团颗粒，铁在矿料下降约 1.5~2m 时已经生成，相比于 10mm 球团颗粒需要在矿料下降约 3.5m 才能完全生成反应速率增加了将近一倍。在球团颗粒直径为 24mm 时，观察可知由于直径较大在出铁口附近金属率仅为 75%，直径较大导致气体很难扩散到球团内部导致金属率较低。

165



170

图 8 颗粒大小对直接还原铁分布的影响

4 结论

本次模拟采用有限体积法,根据气固相质量能量守恒方程建立了竖炉还原段二维轴对称模型,根据模拟结果可知氢气还原铁矿石步骤:首先 Fe_2O_3 迅速被还原成 Fe_3O_4 ; 在距离球团矿入口 ($Z=0$) 大约下降 0.9m 处大部分被还原成 FeO ; 还原 FeO 比较困难所耗费的时间最久, FeO 全部还原成 Fe 大约需要下降 3m, 是整个还原过程的限制性环节。

由于氢还原为吸热反应,需要通入过量的氢气来满足炉内热量的需求,经过模拟分析得出:

(1) 3.2 倍氢气流量便可以初步满足竖炉内还原反应的需求, 3.8 倍和 4.2 倍流量效果更好但需要综合考虑制氢成本;

(2) 氢气温度的大小对还原影响也十分明显,温度越高还原,越快 900°C 时效果最好, $800^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$ 温度区间可以满足冶炼需求;

(3) 入炉球团矿颗粒的大小也影响的还原反应的进行,从结果分析可得 6mm 时还原反应迅速完成,矿石下降仅 1m 便有 80% 质量组分的还原铁出现, 24mm 球团矿则相对缓慢,由于颗粒较大氢气很难扩散到矿石内部导致金属率较低,在矿石下降约 5m 处仅有 75% 组分质量的直接还原铁出现。

[参考文献] (References)

- [1] Lei Ren, Sheng Zhou, Tianduo Peng, Xunmin Ou. A review of CO₂ emissions reduction technologies and low-carbon development in the iron and steel industry focusing on China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143(110846).
- [2] Fabrice Patisson, Olivier Mirgoux. Hydrogen Ironmaking: How It Works[J]. Metals, 2020, 10(7):
- [3] 郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索 [J]. 中国冶金, 2012, 22(07): 1-6.
- [4] 邵磊, 张晓楠, 聂浩, 曲迎霞, 邹宗树, 陈严. 氢气竖炉内气固热质传递行为的数值模拟[J]. 中国冶金, 2021, 31(09): 110-114.
- [5] 吕建超, 白明华, 徐宽, 龙鹤, 任素波, 何云华. 气基直接还原竖炉生产过程的数值模拟研究[A]. 第十一届中国钢铁年会[C]. 中国北京, 2017: 1146-1153
- [6] A. Ranzani da Costa, D. Wagner, F. Patisson. Modelling a new, low CO₂ emissions, hydrogen steelmaking process[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 46(27-35).
- [7] 张福明, 曹朝真, 徐辉. 气基竖炉直接还原技术的发展现状与展望 [J]. 钢铁, 2014, 49(03): 1-10.
- [8] R. Bechara, H. Hamadeh, O. Mirgoux, F. Patisson. Optimization of the Iron Ore Direct Reduction Process through Multiscale Process Modeling[J]. Materials (Basel), 2018, 11(7):
- [9] VOGL V, ÅHMAN M, NILSSON L J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 203(736-45).
- [10] Bayu Alamsari, Shuichi Torii, Azis Trianto, Yazid Bindar. Heat and mass transfer in reduction zone of sponge iron reactor[J]. International Scholarly Research Notices, 2011, 2011(
- [11] 赵长福. 氢气直接还原竖炉内流场及还原过程研究[D]. 燕山大学, 2018.
- [12] Lei Wang, Peimin Guo, Lingbing Kong, Pei Zhao. Industrial application prospects and key issues of the pure-hydrogen reduction process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(10): 1922-1931.
- [13] Jue Tang, Man-sheng Chu, Feng Li, Cong Feng, Zheng-gen Liu, Yu-sheng Zhou. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(713-723).