氢基竖炉条件下制备不同金属化率球团研究

刘西财[1]，石恩泽[1]，赵子川[1]，徐锦程[1]，唐 珏[1]，储满生[1,2]
（1. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819；2. 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室，辽宁 沈阳 110819）

摘要：随着钢铁行业碳减排压力的增大，氢冶金技术的应用可有效降低碳排放，其中氢冶金气基竖炉生产工艺受到了国内外的广泛关注。气基竖炉生产的高金属化率 DRI 可进入电炉生产优质钢材，同时也可生产出 50% 金属化率的球团作高炉炼铁原料。本文基于典型的氢冶金气氛及温度条件，综合考虑其还原行为，研究了生产不同金属化率球团的适宜工艺参数。结果表明：随着温度升高及还原气中氢气配比的增加，还原速率明显升高，还原后强度降低，还原膨胀指数升高；纯氢与富氢气氛（建议采用 HYL 气氛）下，在还原温度为 1 000 ℃时，适宜生产 92% 金属化率 DRI；纯氢气氛在还原温度为 950 ℃与富氢气氛（建议采用 HYL 气氛）在还原温度为 1 000 ℃条件下，适宜制备 50% 金属化率球团。

关键词：氢冶金；还原度；金属化球团；气基竖炉；DRI
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0058－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.008

Research on preparation of pellets with different metallization rates under hydrogen-based shaft furnace condition

LIU Xicai[1], SHI Enze[1], ZHAO Zichuan[1], XU Jincheng[1], TANG Jue[1], CHU Mansheng[1,2]
(1. *School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang* 110819, *Liaoning, China*; 2. *The State Key Laboratory of Rolling and Automation (abbreviated as RAL) Shenyang* 110819, *Liaoning, China*)

Abstract: With the increasing pressure of carbon emission reduction in the iron and steel industry, the application of hydrogen metallurgy technology can effectively reduce carbon emissions, among them, the gas-based shaft furnace production process of hydrogen metallurgy has received extensive attention at home and abroad. The high metallization rate DRI produced by the gas-based shaft furnace can be fed into electric furnace to produce high-quality steel, while it can also produce pellets with a metallization rate of 50% as raw materials for blast furnace iron-making. Based on the typical atmosphere and temperature conditions of hydrogen metallurgy, and comprehensively considering its reduction behavior, the suitable process parameters for producing pellets with different metallization rates are researched. The results show that, with the increase of temperature and hydrogen ratio in the reducing gas, the reduction rate increases significantly, the strength decreases after reduction, and the reduction swelling index increases. Under pure hydrogen and hydrogen-rich atmospheres (HYL atmosphere is recommended), 92% metallization rate DRI is suitable for production at a reduction temperature of 1 000 ℃. As for pure hydrogen atmosphere at a reduction temperature of 950 ℃ and hydrogen-rich atmosphere (HYL atmosphere is recommended) at a reduction temperature of 1 000 ℃, it is suitable to prepare 50% metallization rate pellets.

Key words: hydrogen metallurgy; reduction degree; metallized pellet; gas-based shaft furnace; DRI

收稿日期：2022－01－05；**修回日期**：2022－01－28
基金项目：国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202110145041)
作者简介：刘西财(2000—)，男，本科，从事低碳炼铁方面的研究。
通讯作者：储满生(1973—)，男，教授，从事低碳智能化炼铁方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随着钢铁行业碳减排压力的增大，传统的高炉冶炼已经不能满足当前提出的双碳目标，若要在保证生产的条件下达到低碳生产的目的，应用氢冶金技术是其不二之选，基于氢冶金的气基竖炉直接还原—电炉短流程工艺得到了许多钢铁企业的关注，氢冶金直接还原技术具有碳排放低、还原产物清洁、还原反应高效等优点[1-2]，已在国外得到了广泛推广和应用，其中以 Midrex 和 HYL 为代表的技术已在世界各地建厂并实现大型化[3-5]。目前，国内诸多钢铁企业也以引进技术加自主开发的方式开始设计建设气基竖炉并投产[6-8]，各科研单位也相继开展了关于氢冶金相关的各项技术研究，以期掌握氢冶金气基竖炉生产的关键技术。

在气基竖炉生产中，要求产品的金属化率要达到 90%[9] 以上，以便于后续熔分精炼，得到优质钢材。同时，还原过程中铁矿球团的各项还原行为，如还原膨胀率，还原后抗压强度也需要在不同还原条件下合理控制，以保证在竖炉中的生产顺行。目前已有诸多学者对其还原性能[10-12]进行了研究及分析，但在实际生产中，不同的球团具有不同的冶金性能，在生产之前也需要实验研究其球团的冶金性能是否符合生产标准。

相较于氢冶金气基竖炉的快速发展，高炉—转炉长流程仍将长期作为我国钢铁生产的主要流程，依旧无法取代，因此诸多关于高炉低碳技术的研究也在开展，其中金属化率较低的金属化球团可用作高炉炼铁原料[13-14]，高金属化率炉料加入高炉后，可以降低焦比，减少高炉能源消耗，加快生产效率，提高铁水产量，有助于钢铁低碳生产。鉴于竖炉通过合理控制工艺参数，可生产出适合高炉生产的金属化球团，本文选用某钢铁企业自制氧化球团，研究了基于典型氢冶金气氛及温度条件下，综合考虑球团还原行为，提出了生产不同金属化率球团的适宜工艺参数，以期为生产实践提供理论支撑。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验选用的球团原料为某钢铁企业球团厂自制氧化球团，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，球团 $w(\mathrm{TFe})$ 为 64.77%，$w(\mathrm{FeO})$ 为 2.64%，$w(\mathrm{SiO_2})$ 为 4.44%，选用球团的粒度范围为 8 ~ 16 mm，平均抗压强度为 3 165 N/P。

表 1　氧化球团的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical compositon of oxidized pellets

%

TFe	FeO	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	S
64.77	2.64	0.57	0.78	4.44	0.57	0.001

1.2　试验方法

本文在参考 HYL 和 Midrex[15] 两种典型的气基竖炉直接还原工艺的同时，考虑到纯氢还原工艺，设计的还原气氛条件如表 2 所示，并选取 850、900、950、1 000、1 050 ℃ 5 个还原温度对所用球团进行竖炉还原试验的研究。

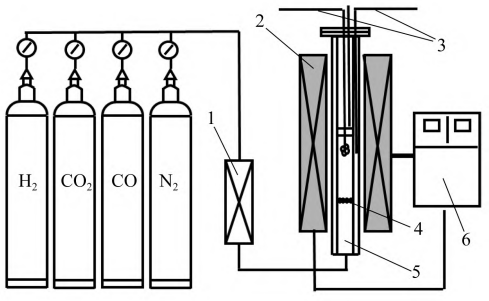
表 2　球团气基直接还原试验条件

Table 2　Scheme of pellet gas-based direct reduction

还原气氛	Midrex	HYL	H_2
H_2/CO	1.6	2.6	全氢
$v(H_2)$/%	55	74	100
$v(CO)$/%	35	16	—
$v(CO_2)$/%	4	3	—
$v(N_2)$/%	6	7	—

1.2.1　还原度试验

还原试验使用的设备为实验室自制的气基竖炉还原装置(见图 1)，其主要包括计算机控制系统、气体流量计、加热炉、热电偶、氧化铝球、反应管及还原坩埚。装置中加热炉使用



1—气体流量计；2—加热炉；3—热电偶；4—氧化铝球；5—反应管；6—计算机控制系统。

图 1　球团还原试验炉

Fig. 1　Pelletizing reduction experimental furnace

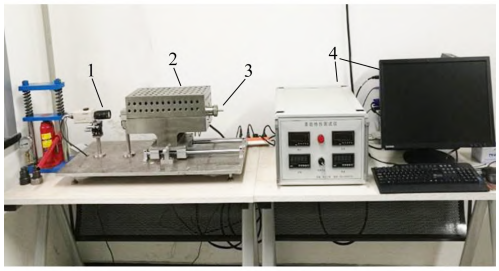
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

硅碳棒加热，升温速度及加热温度由计算机控制系统程序设定，最高加热温度可达到1 200 ℃，符合氢冶金条件下直接还原温度的要求；还原气体通过气体供给系统由底部通入，还原后的气体由抽风系统排出；气体供给系统由H_2、CO、CO_2、N_2气瓶罐组成，气体流量由浮子流量计控制。

试验先将粒度合格的球团在110 ℃的温度下烘干，再单次称取500 g的球团装入特制的石墨坩埚中，将石墨坩埚放入反应管内部底座上，而后通过计算机给定电压调整升温速度及温度。当球团温度升至200 ℃时，通入N_2保护炉料升温至指定的还原温度后开始通入表2中所示的混合还原气体。还原试验结束后，停止还原气通入，开始通入N_2保护直到样品冷却至室温以下，以供后续检测。

1.2.2 还原膨胀试验

氢冶金直接还原炉料膨胀行为试验所采用的装置如图2所示。该装置主要构造包括摄像仪、卧式加热炉、计算机控制系统和气体供给系统。该装置中卧式炉升温速度及加热温度由计算机控制系统程序设定，最高加热温度可达到1 400 ℃，符合氢冶金直接还原温度要求；卧式加热炉两端有进气口和出气口，还原气体通过气体供给系统进入进气口还原试验原料，摄像仪通过玻璃视窗拍摄炉内球团实时照片，通过计算机控制系统计算处理；气体供给系统由H_2、CO、CO_2、N_2气瓶罐组成，气体流量由浮子流量计控制。



1—摄像仪；2—卧式加热炉；3—进气口；
4—计算机控制系统。

图2 球团还原膨胀试验炉

Fig. 2 Pellet reduction swelling experimental furnace

试验将球团放入恒温干燥箱中，在110 ℃下烘干后取出备用；打开温控箱，通过计算机给定电压调整升温速度及温度，当达到试验预定的还原温度后，再先由进气口吹入氮气以排出管路中的空气，形成保护性气氛，随后将单个球团推至炉中，调整位置使其在高温区，仅保持出气口畅通，待球团达到预定温度后，通入表2中还原气开始试验；每隔3 min通过摄像头实时记录炉内球团变化，截图保存，直至球团体积不再发生变化后，停止试验(每组测试两次，两次结果相近为准)。

1.3 试验计算方法

在已知球团成分中的$w(\mathrm{TFe})$和$w(\mathrm{FeO})$数值后，通过记录各时间还原前后球团质量，即可计算得到在某时间的球团还原度R_t，具体计算公式见式(1)：

$$R_t=\left[\frac{0.11W_1}{0.43W_2}+\frac{m_1-m_t}{m_0\times 0.43W_2}\times 100\right]\times 100\% \tag{1}$$

式中：R_t为还原t时间的还原度,%；m_0为试样质量，g；m_1为还原开始前试样质量，g；m_t为还原t时间后试样质量，g；W_1为试验前试样的FeO含量,%；W_2为试验前试样的全铁含量,%。

在已知还原后金属化球团成分中的$w(\mathrm{TFe})$和$w(\mathrm{MFe})$数值后，通过式(2)可计算某时间内球团还原后的金属化率，具体见式(2)：

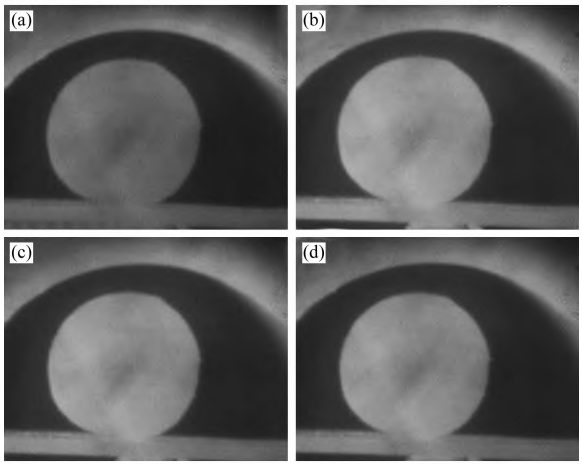
$$M_t=\frac{W(\mathrm{MFe})}{W(\mathrm{TFe})}\times 100\% \tag{2}$$

式中：M_t为还原t时间的金属化率,%；$W(\mathrm{MFe})$为还原t时间后试样的金属铁含量,%；$W(\mathrm{TFe})$为还原t时间后试样的全铁含量,%。

在实验过程中，假定球团是圆球状并且在体积膨胀过程中各方向均匀膨胀，且在实验过程中，通过摄像仪记录的照片尺寸相同，通过软件计算还原反应中不断变化的球团面积(S)(如图4)，软件会自动依据颜色划分图像中区域，加以比例尺即可换算出各区域面积，球团的面积即可得出。记录还原前球团面积为S_0，还原n min后球团面积记为S_n，由面积计算体积V_n，则每一时间的还原膨胀率计算为V_n/V_0，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

即可计算出铁精矿球团体积膨胀系数。



还原时间/min：（a）氧化球团；（b）1；（c）3；（d）8

图 3　球团随还原时间面积变化

Fig. 3　Area change of spheres with reduction time

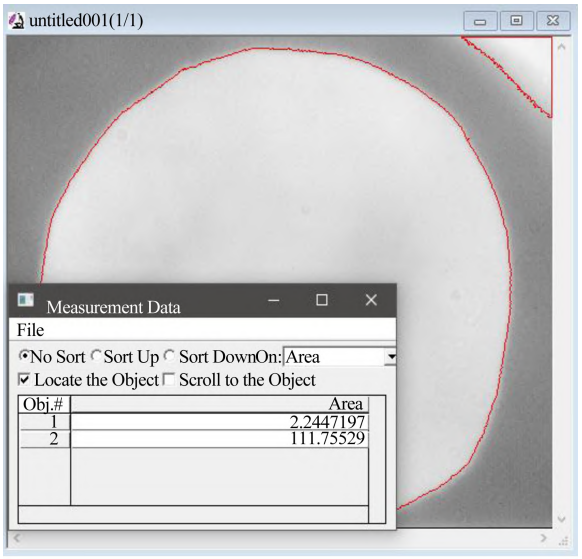


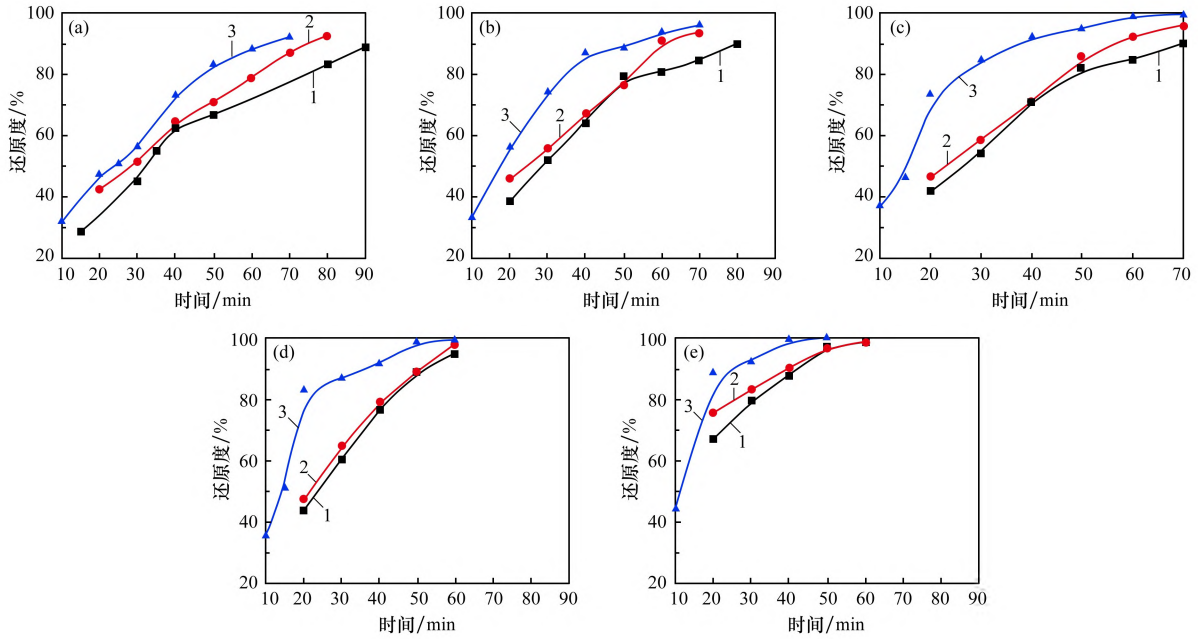
图 4　球团面积计算示意

Fig. 4　Schematic diagram of pellet area calculation

2　氢冶金直接还原工艺参数对球团还原度的影响

2.1　还原气氛对球团还原度的影响

不同还原温度条件下，还原气氛对球团还原度的影响如图 5 所示。由图 5 可知，球团的还原度随着时间的延长而不断增加，在还原初期还原度增加较快，后期还原度增速变缓。随还原过程中 H_2 体积分数的增加，球团的还原度也会相应的增加。以 1 000 ℃条件下为例，在还原反应的初始阶段，随着还原气中 H_2 体积分数的增加，还原度从 Midrex 气氛下的 43.63% 变为了 HYL 气氛下的 47.44%，当还原气氛变为纯 H_2 时，还原度升高到了82.78%［图5(d)］，



还原温度/℃：（a）850；（b）900；（c）950；（d）1 000；（e）1 050

1—MIDREX；2—HYL；3—H_2。

图 5　不同温度条件下还原气氛对球团还原度的影响

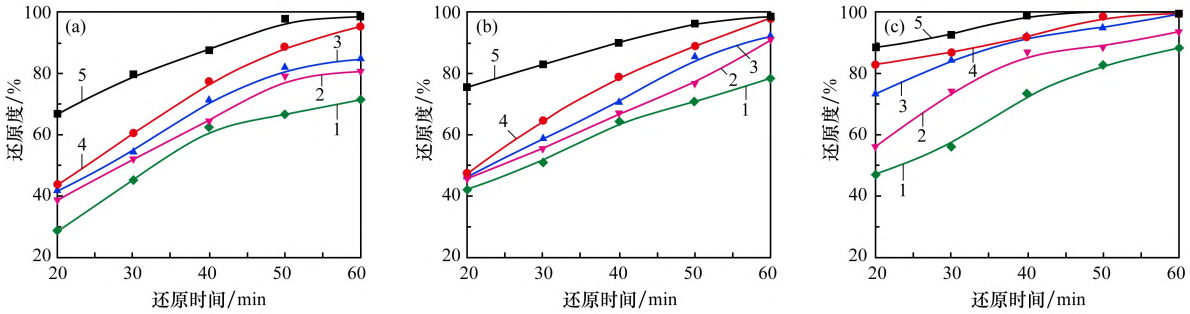
Fig. 5　Effect of reduction atmosphere on reduction ratio at different temperatures

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

这说明 H_2 体积分数的增加促进了还原反应的进行，在图中体现为随着 H_2 体积分数的增加，曲线的斜率变大。在实验预定还原温度条件下，H_2 的还原效率大于 CO，这也与铁氧化物热力学中得出的在 810 ℃后 H_2 的还原效率大于 CO[16] 结论相吻合。

2.2 还原温度对球团还原度的影响

不同还原气氛条件下，还原温度对球团还原度的影响如图 6 所示。由图 6 可知，温度的升高可明显增加球团在同一时间的还原度。在还原反应开始的前 20 min，球团的还原速率随着温度的升高而加快，当还原达到 20 min 时，球团的还原度随着温度上升明显。例如在 H_2 气氛下随着温度升高，在 20 min 时还原度都有着明显的升高，850 ℃时还原度仅为 47.19%，而当温度升高到 1 050 ℃后，还原度达到了 88.21%，已接近了 90% 的还原度，说明在前 20 min 的还原速率随着温度升高而升高。在随后的还原过程中，相较于较高温度条件下，较低温度时还原度较低，但还原速率仍然较快，因此随着时间增加还原度基本保持匀速上升直至还原度达到 80% 左右，然后还原速率开始变缓；而在较高温度条件下，还原度在前 20 min 就已经达到了 80% 以上，因此在之后阶段的还原速率较缓，但还原度在 1 h 以内达到了 99%。



还原气氛：(a) MIDREX；(b) HYL；(c) H_2

还原温度/℃：1—850；2—900；3—950；4—1 000；5—1 050。

图 6 不同气氛条件下还原温度对球团还原度的影响

Fig. 6 Effect of reduction temperature of on reduction ratio at different atmospheres

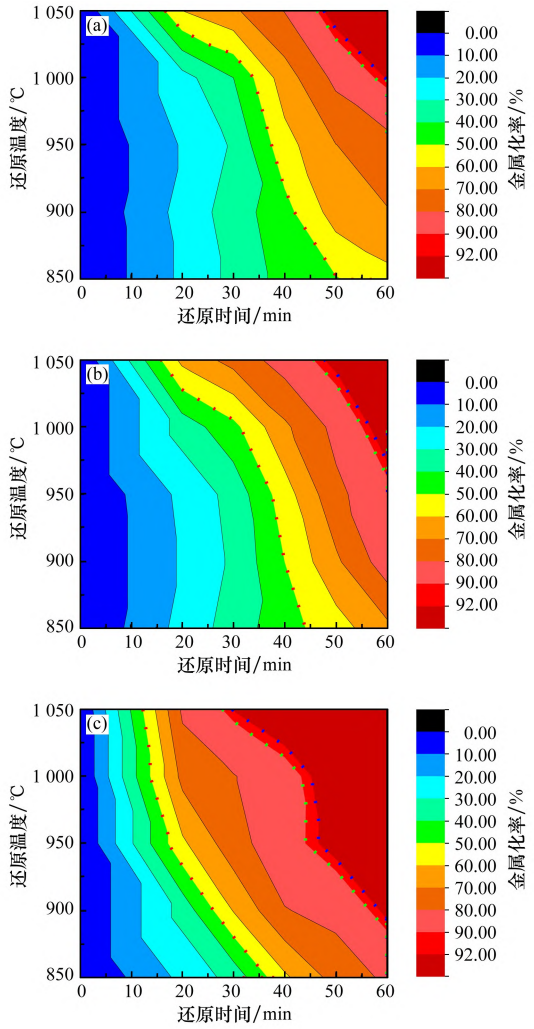
3 制备不同金属化率球团的适宜工艺参数

为了满足直接还原铁(DRI)产品的不同需求，在竖炉的还原生产中，通过调节还原气氛，温度及时间可以得到不同金属化率的球团。生产得到金属化率 92% 的 DRI 可用作转炉炼钢的材料，其化学成分稳定，可以有效改善钢的质量，有害杂质较少，可以缩短精炼所需时间，同时其使用成本低廉，经济效益良好。而生产得到的 50% 金属化率球团可以用作高炉炉料炼铁，高金属化率炉料加入高炉后，可以降低焦比，减少高炉能源消耗，加快生产效率，提高铁水产量。因此选择合理的工艺参数生产不同金属化率的球团，有利于控制生产成本，为生产提供指导性意见。

不同气氛下还原温度与时间对球团金属化率的影响如图 7 所示。本文考虑了在富氢及纯氢两种气氛条件下制备不同金属化率的球团的工艺，且在实验中发现两种工艺使用气体的成本高于提高气体温度所需的成本，因此在工艺参数选择时，主要从节约气体成本的角度考虑。在纯氢气氛下还原速率较快，容易得到高金属化率的 DRI，考虑到 H_2 成本较高，实验参数以节约其用气量为准。

从图 7 中可以看出，纯氢气氛下，温度为 1 050 ℃时，还原 30 min 便可以得到 92% 以上金属化率的 DRI，生产效率较高，而温度降低后，需延长还原时间才可得到 92% 以上金属化率的 DRI，气体消耗量大，不利于降低成本；生产 50% 金属化率球团时，1 050 ℃时反应速率过快，不利于球团还原前期金属化率的控制，应

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



还原气氛：(a) Midrex；(b) HYL；(c) H_2

图 7　不同气氛下还原温度与时间对球团金属化率的影响

Fig. 7　Effect of reduction temperature and time on the metallization rate of pellets under different atmospheres

当适当降低还原温度，选择还原温度为 950 ℃较为适宜。富氢气氛下，H_2 体积分数的增加有利于加快还原速率，也可以降低碳排放，因此选择 HYL 工艺的气氛，在生产 92% 金属化率的 DRI 时选择还原温度为 1 050 ℃，还原 50 min 可以得到 92% 以上金属化率的 DRI；生产 50% 金属化率球团时还原温度在 1 000 ℃条件下金属化率升高较为平稳，便于控制。因此适宜生产 92% 金属化率的 DRI 的工艺参数：纯氢气氛下，还原温度 1 050 ℃，富氢气氛下(建议选择 HYL 工艺气氛)，还原温度 1 050 ℃；制备 50% 金属化率球团的适宜工艺参数：纯氢气氛条件下，还原温度 950 ℃，富氢气氛下(建议选择 HYL 工艺气氛)，还原温度 1 000 ℃。

虽然上述试验已经提出了不同金属化率球团的适宜生产工艺参数，但合理参数的提出往往需要综合考虑气氛和温度对还原行为的整体影响，不同气氛、温度下球团还原行为指标如表 3 所示。由表 3 可知，随着温度升高，球团的膨胀会增大而其抗压强度则降低，这对于实际直接还原生产均会造成很严重的影响。因此，本文希望探讨选择出合理的还原温度及气氛，使其既能提高球团矿还原速率，缩短还原时间，减少还原气消耗，又可提高生产效率，并能合理控制球团膨胀及强度变化等冶金性能，保证生产顺行。

在考虑各还原行为时，对于还原后强度来说，日本冶金行业高炉使用球团冷却后的抗压强度为 141 N/P。实验在 1 050 ℃，Midrex 条件下最低抗压强度为 207.2 N/P，高于其标准值，因此，此指标可不作为优化工艺参数考虑的指标。对于球团还原膨胀指数来说，当球团还原膨胀率不超过15%时，属于正常膨胀，不

表 3　不同气氛、温度下球团还原行为指标

Table 3　Index of pellet reduction behavior under different atmospheres and temperatures

气氛	指标	900 ℃	950 ℃	1 000 ℃	1 050 ℃
Midrex	最大膨胀率/%	11.66	14.38	15.55	16.30
	最低抗压强度/(N·P^{-1})	682.80	597.20	291.40	207.20
HYL	最大膨胀率/%	11.25	13.58	14.78	15.98
	最低抗压强度/(N·P^{-1})	750.60	640.20	389.50	292.20
H_2	最大膨胀率/%	10.52	12.84	13.42	15.38
	最低抗压强度/(N·P^{-1})	854.40	751.90	436.20	337.10

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

会影响生产顺行，而各气氛、温度条件下球团的最大膨胀率为16.3%。在1 000 ℃及以下时，纯氢气氛及HYL气氛条件下球团的膨胀率均小于15%，而Midrex气氛下，1 000 ℃时球团膨胀为15.55%，而当温度降低为950 ℃后，其还原膨胀率变为14.38%，符合实际生产要求。因此，实验应当合理考虑球团膨胀率的数值，以保证球团在实际生产中顺行。

综上分析，纯氢与富氢气氛(建议采用HYL气氛)下，在还原温度为1 000 ℃时，适宜生产92%金属化率DRI；纯氢气氛在还原温度为950 ℃与富氢气氛(建议采用HYL气氛)在还原温度为1 000 ℃条件下，适宜制备50%金属化率球团。

4 结 论

(1) 在氢基竖炉还原过程中，随着还原温度从850 ℃升高到1 050 ℃，以及还原气氛中H_2配比的增加，还原速率均有明显提高，因此，升高温度与提高H_2配比均可以加快还原反应速率。

(2) 随着球团还原温度的升高及H_2配比的减少，球团抗压强度随之降低，还原膨胀率随之增大，各条件下最低抗压强度为207.4 N/P，符合生产标准。温度在1 050 ℃时，各还原膨胀指数均超过了15%，但在1 000 ℃时有所改善。

(3) 纯氢与富氢气氛(建议采用HYL气氛)下，在还原温度为1 000 ℃时，适宜生产92%金属化率DRI；纯氢气氛在还原温度为950 ℃与富氢气氛（建议采用HYL气氛）在还原温度为1 000 ℃条件下，适宜制备50%金属化率球团。

参考文献：

[1] TANG Jue, CHU Mansheng, LI Feng, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(6): 713 – 723.

[2] 唐珏, 储满生, 李峰, 等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金, 2020(8): 1 – 6; 51.
TANG Jue, CHU Mansheng, LI Feng, et al. Current status and future trends of hydrogen metallurgy development in China [J]. Metallurgy in Hebei, 2020(8): 1 – 6; 51.

[3] 胡俊鸽, 郭艳玲, 周文涛, 等. Midrex技术发展近况[J]. 烧结球团, 2016, 41(6): 44 – 47.
HU Junge, GUO Yanling, ZHOU Wentao, et al. Recent developments in Midrex technology[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(6): 44 – 47.

[4] 张奔, 赵志龙, 郭豪, 等. 气基竖炉直接还原炼铁技术的发展[J]. 钢铁研究, 2016, 44(5): 59 – 62.
ZHANG Ben, ZHAO Zhilong, GUO Hao, et al. Development of gas-based shaft furnace direct reduction ironmaking technology [J]. Iron and Steel Research, 2016, 44(5): 59 – 62.

[5] 周渝生, 钱晖, 张友平, 等. 非高炉炼铁的发展方向和策略[J]. 世界钢铁, 2009, 9(1): 1 – 8.
ZHOU Yusheng, QIAN Hui, ZHANG Youping, et al. The development direction and strategy of non-blast furnace ironmaking[J]. World Steel, 2009, 9(1): 1 – 8.

[6] 刘臣, 叶恒棣, 魏进超, 等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团, 2021, 46(6): 1 – 7; 26.
LIU Chen, YE Hengdi, WE Jinchao, et al. Green and low-carbon technology for iron-making process in steel industry [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(6): 1 – 7; 26.

[7] 白帆.【中晋动态】中晋太行矿业有限公司30万吨/年氢基还原铁项目开车仪式圆满成功[EB/OL]. [2020 – 12 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/w92X_DB3 nh195gjpduWW9A.
BAI Fan. [Zhongjin News] Successful start-up ceremony of 300,000 tons/year hydrogen-based iron reduction project of Zhongjin Taixing Mining Co. [EB/OL]. [2020 – 12 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/w92X_DB3nh195gjpduWW9A.

[8] 黄子轩. Green Steel, Better Life! 湛江钢铁,“氢”装上阵![EB/OL]. [2021 – 12 – 24]. https://mp.weixin.qq.com/s/J0Qv6a_DZk2wwijmBkdTbg.
HUANG Zixuan. Green Steel, Better Life! Zhanjiang Iron and Steel, "hydrogen" on the line! [EB/OL]. [2021 – 12 – 24]. https://mp.weixin.qq.com/s/J0Qv6a_DZk2wwijmBkdTbg.

[9] 赵庆杰, 储满生. 电炉炼钢原料及直接还原铁生产技术[J]. 中国冶金, 2010(4): 23 – 28.
ZHAO Qingjie, CHU Mansheng. Electric furnace steelmaking raw materials and direct reduction iron production technology [J]. Metallurgy in China, 2010(4): 23 – 28.

[10] YI Lingyun, HUANG Zhucheng, JIANG Tao, et al. Swelling behavior of iron ore pellet reduced by H_2-CO mixtures [J]. Powder Technology, 2015, 269: 290 – 295.

[11] 齐渊洪, 周渝生, 蔡爱平. 球团矿的还原膨胀行为及其机理的研究[J]. 钢铁, 1996, 31(2): 1 – 5.
QI Yuanhong, ZHOU Yusheng, CHAI Aiping, Study on the reduction expansion behavior of pellet ore and its mechanism [J]. Iron and Steel, 1996, 31(2): 1 – 5.

(下转第126页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

cal Industry Press,2014:92 – 100.

[6] 李杰,信自成,杨爱民. 碱度对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):35 – 41.
LI Jie,XIN Zihceng,YANG Aimin. Effect of basicity on quality of magnesium fluxed pellets. Iron and steel[J]. 2017,52(7):35 – 41.

[7] HANNINEN M J,SEPPANEN T E,SUNDBERY C R. Internal carbon additon during hematite fluxed pellet production at Tilen. Minerals& Metallurgical processing[J]. 2003,20(4):197 – 198.

[8] PRUSTI Pallishree,BARIK Kashinath,DASH Nilima. Effect of limestone and dolomite flux on the quality of pellets using high LOI iron ore[J]. Powder Technology,2020,16(3):14 – 17.

[9] 梁利生,周琦,易陆杰. 宝钢湛江钢铁熔剂性球团稳定生产实践[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2018:1 – 6.
LIANG lisheng,ZHOU Qi,YI Lujie. Production performance of grate-kiln fluxed pellet in Baosteel Zhanjiang iron and steel plant//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference. Beijing:Metallurgical Industry Press,2018:1 – 6.

[10] 李晓波,李孟土,易陆杰. 湛江球团配矿结构分析[J]. 烧结球团,2018,43(4):49 – 53.
LI Xiaobo,LI Mengshi,YI Lujie,Analysis of proportioning structure of zhanjiang pelletizing plant[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):49 – 53.

(上接第64页)

[12] DWARAPUDI S,GHOSH T K,SHANKAR A,et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2011,99(4):43 – 53.

[13] 章苇玲,牛长胜,王亚锋. 湛钢高炉配加金属化球团冶炼实践[J]. 炼铁,2019,38(4):27 – 29.
ZHANG Weiling,NIU Changsheng,WANG Yafeng. Smelting practice of Zhanjiang Steel blast furnace with metallized pellets[J]. Ironmaking,2019,38(4):27 – 29.

[14] 张旭孝,韩宏亮,姜曦. 高炉添加金属化球团炉料的冶金性能试验[J]. 中国冶金,2015,25(5):15 – 18.
ZHANG Xuxiao,HAN Hongliang,JIANG Xi. Metallurgical properties of blast furnace added with metallized pellet charge[J]. China Metallurgy,2015,25(5):15 – 18.

[15] 陈宏. HYL – Ⅲ海绵铁生产技术[J]. 钢铁,1999,34(11):64 – 67.
CHEN Hong. HYL – Ⅲ Sponge iron production technology[J]. Iron & Steel,1999,34(11):64 – 67.

[16] 汪琦. 铁矿含碳球团技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
WANG Qi. Carbon pellet technology of iron ore[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2005.

(上接第69页)

[6] GAN Min,FAN Xiaohui,JI Zhiyun,et al. Effect of distribution of biomass fuel in granules on iron ore sintering and NO_x emission[J]. Ironmaking & Steelmaking,2014,41(6):430 – 434.

[7] JI ZhiYun,FAN Xiaohui,GAN Min,et al. Assessment on the application of commercial medium-grade charcoal as a substitute for coke breeze in iron ore sintering[J]. Energy & Fuels,2016,30(12):10448 – 10457.

[8] CASTRO J A D,SILVA L M D,MEDEIROS G A D,et al. Analysis of a compact iron ore sintering process based on agglomerated biochar and gaseous fuels using a 3D multiphase multicomponent mathematical model[J]. Journal of Materials Research and Technology,2020,9(3):6001 – 6013.

[9] GAN Min,FAN Xiaohui,CHEN Xuling,et al. Reduction of pollutant emission in iron ore sintering process by applying biomass fuels[J]. ISIJ International,2012,52(9):1574 – 1578.

[10] FAN Xiaohui,JI Zhiyun,GAN Min,et al. Influence of preformation process on combustibility of biochar and its application in iron ore sintering[J]. ISIJ International,2015,55(11):2342 – 2349.

[11] 甘敏. 生物质能铁矿烧结的基础研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
GAN Min. Fundamental research on iron ore sintering with biomass energy[D]. Changsha:Central South University. 2012.

[12] CHENG Zhilong,YANG Jian,ZHOU Lang,et al. Experimental study of commercial charcoal as alternative fuel for coke breeze in iron ore sintering process[J]. Energy Conversion and Management,2016,125:254 – 263.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net