

## 金属化球团热态冶金性能对高炉炉料透气性的影响

刘志豪<sup>1</sup>, 王爱萍<sup>2</sup>, 彭浩<sup>1</sup>, 程彬<sup>1</sup>, 何环宇<sup>3</sup>, 周进东<sup>3</sup>

(1. 宝钢股份武钢有限公司 炼铁厂,湖北 武汉 430083;2. 重庆赛迪热工环保工程技术有限公司,重庆 401122;

3. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室,湖北 武汉 430081)

**摘要:**金属化球团作为新型高炉原料,其强度及热态冶金性能对炉料透气性有重要影响。本文通过实验室模拟高炉气固还原过程,研究金属化球团冶金特性及物化特征变化对炉料透气性的影响。结果表明:金属化球团疏松多孔的结构利于还原反应的进行,具有比氧化球团更快的还原反应速率和更高的还原度;金属化球团与氧化球团低温还原粉化性能相近,但具有更低的还原膨胀率、更高的滴落温度和较窄的熔化区间。在还原过程中,金属化球团中的MgO会抑制铁晶须的生成,避免球团发生恶性膨胀;MFe形成的铁连晶可强化金属化球团的结构,但Zn会显著破坏球团结构。采用金属化球团代替部分氧化球团不会出现高炉炉料强度明显下降、透气性恶化等问题,但金属化球团的高锌含量限制了其在高炉炉料中的配入量。提高金属化球团的初始强度、降低球团含锌量是改善炉料透气性的方向之一。

**关键词:**金属化球团; 热态还原; 冶金性能; 透气性; 锌负荷

**中图分类号:**TF046.6

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-8764(2025)04-0048-08

**doi:**10.13403/j.sjqt.2025.04.057

## Effect of high-temperature metallurgical properties of metallized pellets on breathability of blast furnace charge

LIU Zhihao<sup>1</sup>, WANG Aiping<sup>2</sup>, PENG Hao<sup>1</sup>, CHENG Bin<sup>1</sup>, HE Huanyu<sup>3</sup>, ZHOU Jindong<sup>3</sup>

(1. Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan 430083, Hubei, China; 2. Chongqing CISDI Thermal & Environmental

Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 3. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** As a new blast furnace raw material, the strength and high-temperature metallurgical properties of metallized pellets have an important impact on the breathability of furnace charge. In this paper, the influence of metallurgical properties and physicochemical characteristics of metallized pellets on the breathability of furnace charges is studied by simulating the gas-solid reduction process of blast furnace in the laboratory. The results show that the loose and porous structure of metallized pellets is conducive to the reduction reaction, and has a faster reduction reaction rate and higher reduction degree than oxidized pellets. Metallized pellets have similar low-temperature reduction powdering properties to oxidized pellets, but have lower reduction expansion rate, higher soft melt dripping temperature and narrower soft melt range. During the reduction process, MgO in metallized pellets can inhibit the formation of iron whiskers and avoid malignant expansion of the pellets. The iron adhesion formed by MFe could strengthen the structure of metallized pellets, but Zn would significantly damage the pellet structure. The use of metallized pellets instead of partial oxidized pellets will not cause problems such as significant decrease in the strength of blast furnace charges and deterioration of breathability,

**收稿日期:** 2024-04-26; **修回日期:** 2024-10-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51604199)

**作者简介:** 刘志豪(1982—),男,工程师,从事烧结球团的技术研发及固废资源处理工艺研究工作。

**通信作者:** 何环宇(1971—),女,副教授,从事冶金固废资源化利用及高炉行为方面的研究。

but the high zinc content of metallized pellets limits their dosage in blast furnace charges. Improving the initial strength of metallized pellets and reducing the zinc content of pellets is one of the directions to improve the breathability of the charge.

**Key words:** metallized pellets; thermal reduction; metallurgical properties; breathability; zinc load

我国钢铁生产中大量使用铁、锌共生矿和含锌废钢,伴生较多锌含量较高的尘泥。若将这些尘泥制备烧结矿供给高炉使用会造成高炉内锌的循环富集,因此开发适合含锌冶金尘泥回收利用的工艺十分必要<sup>[1]</sup>。转底炉工艺直接还原处理含锌冶金尘泥,在得到金属化球团的同时,也能形成粗锌产品以去除尘泥中的有害元素锌,该方法在处理含锌冶金尘泥具有明显优势<sup>[2]</sup>。将转底炉生产的金属化球团配入高炉原料替代氧化球团,可降低高炉能源消耗、扩展炉料来源、限制有害组分危害。宝钢本部、宝钢湛江、京唐、武钢等企业纷纷建成20~30万吨/a转底炉生产线,为助力我国钢铁企业绿色转型发展发挥了积极作用<sup>[3]</sup>。

作为一种新型高炉原料,金属化球团具有高品位、高金属化率等优点,但其抗压强度远低于氧化球团<sup>[4]</sup>。在高炉的热态还原环境下,金属化球团的还原性、低温还原粉化、还原膨胀、软熔滴落等冶金性能,以及组成和结构等变化会对高炉炉料的透气性产生影响<sup>[5-8]</sup>。金属化球团因金属铁含量高(金属化率 $\geq 60\%$ ),铁氧化物主要以FeO和铁橄榄石形式存在,且孔隙率高、分布合理,使其还原性能优于氧化球团、烧结矿和天然块矿<sup>[9]</sup>。在高炉内,铁橄榄石转化为易还原的钙铁橄榄石,进一步提升了还原效率。良好的还原性有助于提高间接还原比例,降低焦比,改善煤气利用率,从而提升高炉的生产效率。此外,金属化球团在转底炉内已进行预还原,高价铁氧化物的含量极低。因此,在高炉中配加部分金属化球团,有利于降低综合炉料的粉化率<sup>[10]</sup>。金属化球团中铁氧化物大多以浮氏体(FeO)的形式存在,且含有大量的CaO和MgO碱性溶剂;相比普通氧化球团,其还含有大量的ZnO。在经历高炉气固还原时,金属化球团在碱性氧化物和ZnO的作用下生成铁晶须,从而导致球团恶性膨胀。因高FeO含量和复杂渣相,金属化球团具有较低的软化开始温度,软化性能较差<sup>[11]</sup>。但随着配比的增加,FeO含量降低,低熔点化合物减少,软化温

度升高,软熔区间变窄。此外,金属化球团中的残碳可通过渗碳作用提高铁熔点,改善综合炉料的熔滴性能<sup>[12]</sup>。

但关于金属化球团的具体熔滴性能,特别是球团中MFe、FeO和其它复杂氧化物等对熔滴性能的影响报道甚少。为此,本文通过研究金属化球团的物化特性,在实验室模拟金属化球团在高炉内的气固还原过程,并结合成分分析和微观检测手段研究金属化球团的还原特性以及相应冶金性能,为提高金属化球团强度,推广转底炉工艺及金属化球团在高炉中的应用,保障高炉顺行和降低高炉原料成本提供参考与借鉴。

## 1 试验原料与方法

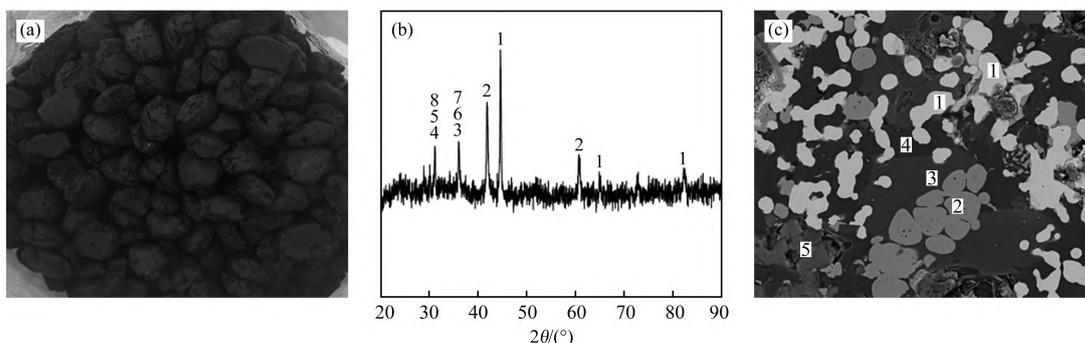
### 1.1 金属化球团基本物化性能

试验所用金属化球团来自某钢铁厂转底炉,其外观形貌为28 mm×25 mm×15 mm的椭圆扁球。按照《铁矿石颗粒 破碎强度的测定》(ISO 4700—1983)测得金属化球团的抗压强度为1 557 N/P。对比试验中,氧化球团的抗压强度为2 614 N/P。采用Agilent OES 730 ICP测得金属化球团和氧化球团的化学成分如表1所示。采用FEI Quanta 4000 SEM/EDS电镜和SmartLab SE型X射线衍射仪观察金属化球团的微观形貌和物相组成,如图1所示。

由图1可见,与致密的氧化球团不同,金属化球团具有多孔疏松的结构特点,金属铁、铁氧化物以及其他组分在球团内分布比较均匀,这种结构的不同也体现在两种球团抗压强度的差距上。从组成上看,金属化球团和氧化球团同样是高铁品位的含铁原料,但经过转底炉直接还原处理,其含铁组分主要以FeO和MFe形式存在,几乎没有高价铁氧化物。非铁组分中CaO、MgO等碱性组分的含量较高,使得金属化球团表现出一定的偏碱性。其二元碱度 $[R = w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)]$ 为1.13,这些碱性组分与铁氧化物和其他组分形成钙铁橄榄石(CaFeSiO<sub>4</sub>)、钙镁黄长石(Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)和

表 1 试验用球团的主要化学成分(质量分数)

球团名称	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Zn	S	MFe
金属化球团	65.56	41.05	9.30	2.86	10.51	2.34	0.61	0.34	33.63
氧化球团	63.17	0.32	6.13	1.166	0.72	0.64	0.014	0.011	—



(a) 外观形貌; (b) 物相组成; (c) 微观结构

1—Fe; 2—FeO; 3—CaFeSiO<sub>4</sub>(CFS); 4—Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(C<sub>2</sub>MS<sub>2</sub>); 5—Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>(C<sub>2</sub>A<sub>2</sub>S); 6—CaO; 7—MgO; 8—ZnO。

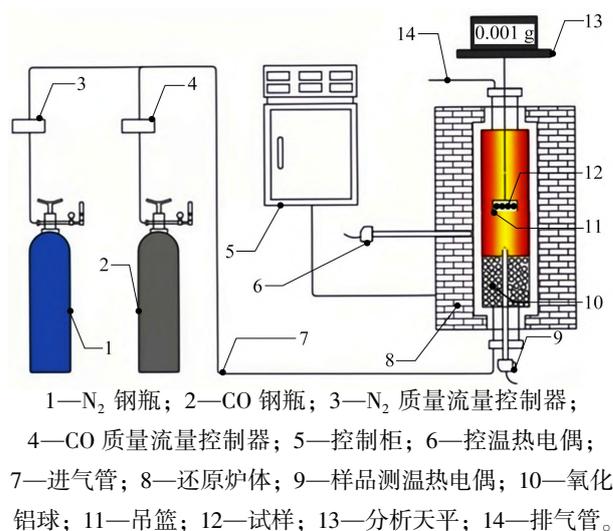
图 1 金属化球团形貌及微观结构和组成

Fig. 1 Morphology, microstructure and composition of metallized pellets

钙铝黄长石(Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>)等复杂物相。金属化球团中高达 0.61% 的 Zn 是不可忽略的, 这些 Zn 以 ZnO 形式存在, 其在高炉中会循环富集造成危害。因此, 采用提高转底炉的还原温度以提高其脱锌率, 同时限制高炉入炉原料中锌含量, 对减配金属化球团后高炉的锌负荷, 降低锌的危害是非常有必要的。金属化球团中 S 含量也偏高, 但在高炉良好的脱硫条件下不会造成明显负担。

## 1.2 试验设备及流程

金属化球团还原性、低温还原粉化性、膨胀性及软熔特性等热态冶金性能的测试分别按照《铁矿石还原性的测定方法》(GB/T 13241—2017)、《铁矿石低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)、《高炉用铁球团矿自由膨胀指数的测定》(GB/T 13240—2018)和《铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)进行。还原性试验所用设备为 SX2-6-13 型高温立式电阻炉, 该设备由高温立式电阻炉、分析天平和记录装置三部分组成。设备示意如图 2 所示。将干燥处理后的球团放入 Fe-Cr-Al 质的耐高温吊篮, 将吊篮悬挂于天平底部并放置于炉内加热段, 对电阻炉升温并通入还原气体模拟高炉内的还原过程, 在还原过程中采用电子天



1—N<sub>2</sub> 钢瓶; 2—CO 钢瓶; 3—N<sub>2</sub> 质量流量控制器; 4—CO 质量流量控制器; 5—控制柜; 6—控温热电偶; 7—进气管; 8—还原炉体; 9—样品测温热电偶; 10—氧化铝球; 11—吊篮; 12—试样; 13—分析天平; 14—排气管。

图 2 还原试验设备示意

Fig. 2 Schematic diagram of reduction experimental equipment

平记录球团的质量变化, 并根据结果计算还原率。

## 1.3 冶金性能参考指标计算

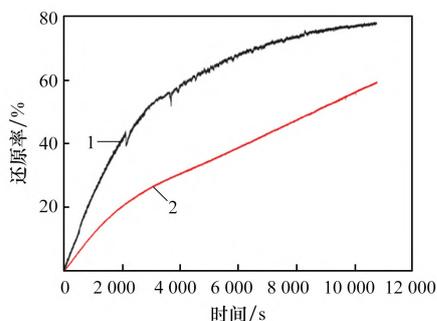
根据试验过程失重量, 采用还原率  $R_t$  衡量金属化球团的还原性, 并规定  $t = 3$  h 的还原率为还原度指数。低温还原粉化性用 500 °C 还原后球团的转鼓粉化指数  $RDI_{>3.15\text{ mm}}$  表示, 并参考  $RDI_{>6.3\text{ mm}}$  和  $RDI_{<0.5\text{ mm}}$ 。根据还原后球团的体积变化, 还原膨胀性采用自由膨胀指数 ( $V_{FS}$ ) 表示。软熔特性根据

$T_{10}$  (软化开始温度)、 $T_{40}$  (软化终了温度)、 $T_s$  (熔化开始温度)、 $T_d$  (滴落温度)、 $\Delta P_{\max}$  (最大压差值)以及软化区间( $\Delta T_1$ )、熔化区间( $\Delta T_2$ )、滴落区间( $\Delta T_3$ )和熔滴带厚度等参数获得,具体指标参照 GB/T 34211—2017 中的方法计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 金属化球团还原特性及影响

按照 GB/T 13241—2017 并利用高温立式电阻炉,试验测得金属化球团、氧化球团的还原度指数分别为 77.6%、59.3%,其还原率变化结果如图 3 所示。由图 3 可见,与氧化球团相比,金属化球团的还原率在反应之初迅速增加,反应进行 1 h 时的还原率已达还原度指数(3 h)的 80% 左右,还原反应在一个比较短的时间内基本完成。而氧化球团 1 h 时的还原率还不到还原度指数的一半,在反应接近 3 h 时还原率还有明显变化,其还原反应持续的时间较长。金属化球团的还原度指数比氧化球团的高 18.3%,增幅达到 30.86%。金属化球团表现出更快的还原反应速率和更高的还原度与其结构有关,其疏松多孔的结构形式非常利于还原气体的扩散,而铁氧化物的均匀分散也有助于反应物之间的充分接触并发生反应。



1—金属化球团; 2—氧化球团。

图3 金属化球团与氧化球团的还原性比较(900 °C)

Fig. 3 Comparison of reducibility between metallized pellets and oxidized pellets(900 °C)

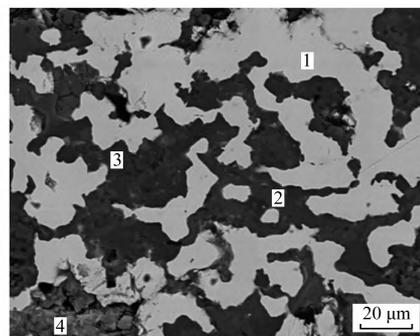
还原 3 h 后金属化球团含铁组分变化如表 2 所示,球团内部微观结构如图 4 所示。从还原后含铁组分变化看,1 000 °C 时金属化球团的 FeO 质量分数从最初的 41.05% 下降到 5.89%,此时还原度指数达到 93.51%,此温度区间对应高炉软熔带开始形成区域,说明金属化球团在高炉内的还原

是以软熔带以上块状区的间接还原为主。继续观察还原后金属化球团内部微观结构可以看出,随着反应的进行,球团中金属铁相、浮氏体和渣相不断集聚,相互间紧密相连,球团内部结构变得更加致密。以此可以推测,用金属化球团替代氧化球团加入高炉,主要发生在高炉块状带的还原过程不会出现球团强度急速下降、炉料透气性恶化的情况。

表 2 金属化球团还原后含铁组分变化(质量分数)

Table 2 Iron content of reduction products of

项目	metallized pellet					%
	800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1 000 °C	
MFe	53.27	53.85	54.76	58.12	59.86	
FeO	14.19	14.09	13.87	7.67	5.89	



1—Fe; 2—CFS; 3— $C_2A_2S$ ; 4— $C_2MS_2$ 。

图4 金属化球团还原后微观结构(3 h, 1 000 °C)

Fig. 4 The microstructure of the metallized pellets after reduction(3 h, 1 000 °C)

### 2.2 金属化球团低温还原粉化性及影响

按照 GB/T 13242—2017,在 500 °C、60 min 条件下试验测得金属化球团、氧化球团的 > 6.3 mm 低温还原粉化指数( $RDI_{>6.3 \text{ mm}}$ )分别为 98.88% 和 99.14%;  $RDI_{>3.15 \text{ mm}}$  分别为 98.99% 和 99.32%;  $RDI_{<0.5 \text{ mm}}$  分别为 0.82% 和 0.64%。试验结果表明,氧化球团具有较好的低温还原粉化性, $RDI_{>3.15 \text{ mm}}$  达 99.32%,与文献[13]的结果一致,这可能与该氧化球团制备时的矿石选择、制备工艺和炉料质量控制相关。金属化球团各项低温还原粉化指标与氧化球团相当, $RDI_{>3.15 \text{ mm}}$  也在 99% 左右,不存在明显的低温还原粉化现象。球团低温还原粉化的主要原因:铁氧化物在 400 ~ 600 °C 由  $Fe_2O_3$  还原成  $Fe_3O_4$  时晶格变化产生的内应力导致铁矿碎裂粉化<sup>[14]</sup>。经过转底炉直接还原处理后,金属化

球团中几乎不存在  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，因而也不存在上述晶格变化带来的应力破坏。低温还原粉化发生在高炉上部，因此高炉使用部分金属化球团替代氧化球团，不会对料层上部透气性带来明显影响。

### 2.3 金属化球团还原膨胀性及影响

按照 GB/T 13240—2018，在 900 °C、60 min 条件下试验测得金属化球团、氧化球团的还原膨胀率分别为 5.64% 和 10.84%。结果表明，金属化球团比氧化球团有更低的还原膨胀率，在设置的还原条件下其膨胀率仅为氧化球团的一半左右。球团还原膨胀的主要原因：高价铁氧化物还原为低价铁氧化物时的晶格变化，以及  $\text{Fe}_x\text{O}$  浮氏体还原成 Fe 时生成的铁晶须导致球团内部结构疏松<sup>[15]</sup>。金属化球团中虽然不存在高价铁氧化物，但其含有的大量 FeO 还原成 Fe 时生成的铁晶须会导致金属化球团的膨胀甚至是恶性膨胀。然而试验中并没有观察到金属化球团还原过程的恶性膨胀现象。图 5 为金属化球团 900 °C、60 min 条件还原后的断面微观形貌。由图 5 可以看出，还原后的金属化球团内部出现很多金属铁的小凸起，但并没有观察到铁晶须的存在，或者说这些金属铁的小凸起并没有发展成铁晶须，因此对球团内

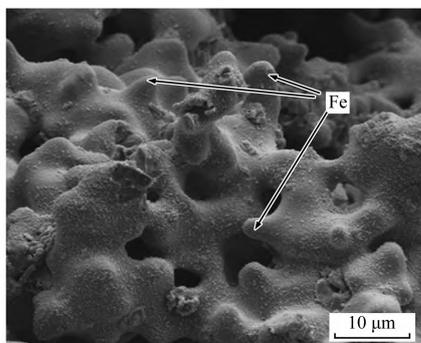


图 5 金属化球团还原后的微观断面形貌  
(900 °C、60 min)

Fig. 5 The section microscopic morphology of metallized pellets after reduction (900 °C、60 min)

部结构的损害有限，没有造成球团的恶性还原膨胀。

研究认为，当有 MgO 存在时，FeO 还原过程中，离子半径更小的  $\text{Mg}^{2+}$  (半径为 65 pm) 会进入铁氧化物晶格替换  $\text{Fe}^{2+}$  (半径为 74 pm)，打断铁晶须生长的连续性并减小晶格膨胀<sup>[16-17]</sup>。金属化球团是一种偏碱性的物质，含有一定量的 CaO、MgO 等碱性氧化物。图 5 中金属化球团的还原断面仅出现铁的小凸起而没有进一步发展为铁晶须，这可能与金属化球团中含有的 MgO 有关。由此可以得出，金属化球团的组成特点使其存在较小的还原膨胀，这对炉料透气性的影响有限。

### 2.4 金属化球团软熔特性及影响

按照 GB/T 34211—2017 并采用铁矿石软熔滴落测定仪，测得金属化球团和氧化球团熔滴性能的结果如表 3 所示。由表 3 可见：与氧化球团相比较，金属化球团具有更高的软化开始温度，更窄的软化区间和滴落区间，更小的最大压差值和更薄的软熔带厚度，代表透气性的特征值  $S$  也远小于氧化球团。因此，金属化球团比氧化球团在高炉内有更低的软熔带位置和更薄的软熔带厚度，这对降低高炉软熔带位置、减小直接还原度、改善软熔带透气性和煤气分布、降低焦比等有利。

金属化球团具有更优熔滴性能的原因与其组成和结构有关。与酸性氧化球团发生固相反应生成低熔点的铁橄榄石 ( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ) 不同，碱性金属化球团发生固相反应生成的复杂相为熔化温度更高的  $2(\text{Fe}, \text{Ca})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$  和硅酸二钙 ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )，同时金属化球团的高预还原程度使得其产生的渣量偏少，这可能是金属化球团软熔带位置更低、软熔带更薄的原因。同时，有研究认为，矿石的气孔率会促进熔融前期的变形，推迟其软化，降低矿石的软化温度<sup>[12]</sup>；金属化球团多孔疏松的结构对降低软化温度起一定作用。

表 3 金属化球团和氧化球团的软熔滴落性能

Table 3 Softening dropping property of metallized pellets and oxidized pellets

项目	$T_{10}/\text{°C}$	$T_{40}/\text{°C}$	$\Delta T_1/\text{°C}$	$T_s/\text{°C}$	$T_d/\text{°C}$	$\Delta T_3/\text{°C}$	$\Delta P_{\max}/\text{kPa}$	熔滴带厚度/mm	$S/(\text{kPa}\cdot\text{°C})$
金属化球团	1 125	1 186	61	1 268	1 302	34	4.3	23	643.6
氧化球团	1 040	1 115	75	1 119	1 290	171	11.3	38	1 052.3

注： $S$  为熔滴特征值。

## 2.5 还原过程组成变化及影响

从化学组成看,金属化球团中以FeO为代表的铁氧化物和ZnO会在上述过程中发生还原反应,分别被还原为MFe和Zn。上述还原过程中金属化球团MFe和Zn的含量变化如表4所示。由表4可见,随着还原时间的延长或还原温度的升高,金属化球团的MFe含量增加,特别是升高还原温度更为明显。还原生成的金属铁在球团内部迁移聚集形成铁连晶,温度越高迁移速度越快,形成的铁连晶越大、集聚度越高,如图4所示。铁连晶对球团起到支撑和聚拢作用,使得球团内部结构变得更加致密,膨胀开裂等现象得到改善。因此,金属化球团中FeO还原为MFe有效缓解了球团强度降低、炉料透气性恶化的问题。

ZnO的还原也是一个明显的吸热过程,升高温度有利于Zn的还原挥发去除。当还原温度由900℃升高到1100℃时,球团的Zn质量分数由0.45%急剧下降到0.06%,而不改变还原温度时,还原时间由20min延长到60min,球团的Zn质量分数仅由0.55%小幅下降到0.45%。Zn的存在除了增加高炉锌负荷,影响高炉顺行操作外,还在还原过程中,使离子半径更大的 $Zn^{2+}$ (134 pm)更容易进入铁氧化物晶格替代半径较小的 $Fe^{2+}$ (74 pm)引起晶格畸变<sup>[18]</sup>,造成球团的膨胀开裂,降低了球团强度,进一步恶化了炉料透气性。

金属化球团的还原膨胀率随温度和时间的变化如图6所示。由图6可看出还原过程中MFe和Zn的变化对球团强度的影响。结合表4可知,升高还原温度,金属化球团中MFe含量增加,生成的铁连晶起到增大球团强度的作用,同时Zn含量明显降低,其恶化球团强度的作用减弱。在这两方面共同作用下,金属化球团的膨胀率由900~950℃时的5.64%~5.85%下降到1100℃时的2.21%。延长还原时间,金属化球团中MFe虽有

一定增加,铁连晶可一定程度强化球团结构,但Zn质量分数随还原时间的延长降低不明显。随着还原时间的延长, $Zn^{2+}$ 不断进入铁氧化物晶格替代 $Fe^{2+}$ ,金属化球团的膨胀率反而由20min时的1.57%增加到60min时的5.56%。由此也可以看出,Zn对金属化球团强度的影响比MFe更大。降低金属化球团的锌含量,严格控制入炉锌负荷对保持金属化球团强度,提高高炉透气性是非常必要的。

## 2.6 有害组分Zn、S对金属化球团入炉比的影响

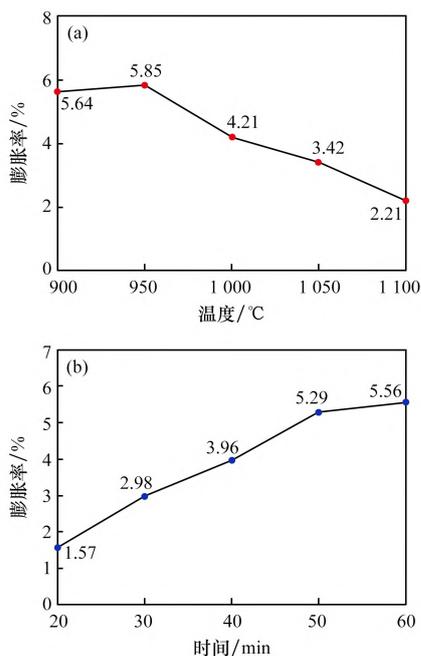
金属化球团的高金属铁含量对降低高炉燃料比有积极作用,然而其高Zn、S组成特点又会对高炉生产带来影响,限制了金属化球团的大量配入。因此,从高炉锌、硫负荷出发,探讨金属化球团中有害组分Zn、S对球团入炉比的影响。某钢铁厂高炉炉料结构为70%烧结矿+17%块矿+13%氧化球团,该厂拟采用转底炉生产的金属化球团替代部分氧化球团,转底炉生产能力约为高炉含铁炉料的1%左右。考虑转底炉的生产能力设置不同的金属化球团配入量,对应混合炉料锌负荷、硫负荷变化如表5所示。该高炉目前要求锌负荷不超过0.3 kg/t Fe,硫负荷不超过4 kg/t Fe。由表5可见,虽配入金属化球团带来高炉的锌、硫负荷明显增加,但混合炉料的硫负荷均在高炉允许范围内。因此,使用金属化球团满足高炉的硫负荷要求。

金属化球团的配入对锌负荷的影响非常显著。该高炉在没有配入金属化球团时锌负荷已达0.241 kg/t Fe,随着金属化球团的加入,锌负荷快速增加。当金属球配入量为1%时,锌负荷已达0.323 kg/t Fe,超过该高炉的锌负荷上限要求。按照该高炉0.3 kg/t Fe的锌负荷要求,计算得到此时金属化球团的配入量为0.72%。因此,转底炉的生产能力不能得到充分释放,将造成车间设

表4 还原过程中金属化球团内铁和锌的质量分数变化

Table 4 The changes in the mass fractions of iron and zinc within the metallized pellets during the reduction process %

项目	900℃恒温条件下不同反应时间					60min时不同反应温度				
	20min	30min	40min	50min	60min	900℃	950℃	1000℃	1050℃	1100℃
MFe	50.70	51.04	51.37	51.55	52.04	52.04	52.72	52.93	53.49	54.52
Zn	0.55	0.52	0.49	0.46	0.45	0.45	0.31	0.17	0.14	0.06



(a) 不同还原温度(60 min); (b) 不同还原时间(900 °C)

图 6 不同还原温度和时间下金属化球团还原膨胀率的变化

Fig. 6 Changes in the reduction expansion rate of metallized pellet under different reduction temperature and time

表 5 不同金属化球团配比下混合炉料锌、硫负荷变化

Table 5 Changes in zinc and sulfur loads of mixed furnace materials under different ratios of metallized pellets

金属化球团 替代比/%	$w(\text{Zn})/\%$	锌负荷/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )	$w(\text{S})/\%$	硫负荷/ ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )
0	0.014 6	0.241	0.025 2	0.411
0.5	0.017 1	0.282	0.026 7	0.435
1.0	0.019 6	0.323	0.028 2	0.462
1.5	0.022 1	0.364	0.029 7	0.485

计制造成本的浪费。综上,降低高炉入炉原料特别是金属化球团的锌含量,采取有效措施提高转底炉去锌率是促进转底炉工艺推广、提高高炉金属化球团配比的重点。

### 3 结论

(1) 金属化球团在高炉内的还原主要发生在软熔带以上的固态区域,多孔疏松结构使得其比氧化球团有更快的还原反应速率和更高的还原度,且随还原反应的进行球团的结构趋于更加致密。

(2) 金属化球团中的  $\text{MgO}$  会抑制铁晶须的生成及球团的恶性膨胀,还原出的  $\text{MFe}$  形成铁连晶可强化金属化球团的结构,但球团中残存的  $\text{Zn}$  对金属化球团结构的破坏非常突出。

(3) 与氧化球团相比,金属化球团具有更优的还原膨胀、还原熔滴和相当的低温还原粉化等热态冶金性能,采用金属化球团代替部分氧化球团不会出现高炉炉料强度明显下降、透气性恶化等现象。

(4) 金属化球团的高锌含量限制了其在高炉炉料中的配入量,转底炉的生产能力不能得到充分释放,提高金属化球团初始强度、降低球团含锌量是改善炉料透气性的方向之一。

### 参考文献:

- [1] 李强,陈铁军,李奇勇,等. 钢铁行业含锌冶金尘泥资源化利用现状与研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(7):1-9;39.  
LI Qiang, CHEN Tiejun, LI Qiyong, et al. Situation and research development on resource utilization of metallurgical dust containing zinc in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2023, 33(7): 1-9; 39.
- [2] 李岩,赵志坚,冯怀萱,等. 转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工艺技术[J]. 烧结球团,2022,47(6):106-115;145.  
LI Yan, ZHAO Zhijian, FENG Huaixuan, et al. Technology of treating zinc-containing dust and mud in iron and steel plant by rotary hearth furnace[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(6): 106-115; 145.
- [3] 罗磊,郭灵巧. 转底炉助力钢铁企业实现绿色制造[J]. 工业加热,2021,50(11):59-62.  
LUO Lei, GUO Lingqiao. Rotary hearth furnace helps iron and steel enterprises achieve green manufacturing[J]. Industrial Heating, 2021, 50(11): 59-62.
- [4] 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 charging metallized pellet in Zhanjiang steel's BF [J]. Ironmaking, 2019, 38(4): 27-29.
- [5] 李鹏,毕学工,张慧轩,等. 武钢球团矿还原反应动力学[J]. 钢铁研究学报,2015,27(11):8-13.  
LI Peng, BI Xuegong, ZHANG Huixuan, et al. Reduction

- kinetics of pellets from Wuhan iron and steel corporation [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, 27(11): 8-13.
- [6] LIU Y L, WANG J S, GUO W T, et al. Kinetics calculation of the non-isothermal reduction of pellet [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2016, 35: 507-514.
- [7] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展[J]. *钢铁*, 2021, 56(4): 9-15. GUO Yufeng, LIU Kuo, LIU Yajing, et al. Research progress on reduction swelling mechanism and influencing factors of iron ore pellets [J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(4): 9-15.
- [8] 王佳,何环宇,刘志豪,等. 含锌尘泥金属化球团还原特性及动力学研究[J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(7): 866-874. WANG Jia, HE Huanyu, LIU Zhihao, et al. Research on reduction characteristics and kinetics of metallized pellets containing zinc dust and mud [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2024, 36(7): 866-874.
- [9] 段东平,韩宏亮,陈思明,等. 高炉灰在球团和金属化球团工艺中高效使用技术的研究 [C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会, 2011:1-6. DUAN Dongping, HAN Hongliang, CHEN Siming, et al. High effective utilization of blast furnace dust in pelletizing and metallized pelletizing processes [C]//Proceedings of the 8th (2011) China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2011:1-6.
- [10] 韩宏亮,冯根生,姜曦. 高炉原料中配加金属化球团的实验研究 [C]//2014年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(上). 郑州:中国金属学会, 2014: 466-470. HAN Hongliang, FENG Gensheng, JIANG Xi. Experiment research on adding metallized pellets in blast furnace burden [C]//Collection of 2014 National Ironmaking Production Technology Conference and Ironmaking Academic Annual Conference(I). Zhengzhou: The Chinese Society for Metals, 2014:466-470.
- [11] 杨慧贤. 金属化球团的冶金性能及对高炉冶炼影响的研究 [D]. 北京:北京科技大学, 2009. YANG Huixian. Research on the metallurgical properties of metallized pellets and their Impact on blast furnace smelting [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009.
- [12] 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. Experiment on metallurgical properties of blast furnace burden containing metallized pellets [J]. *China Metallurgy*, 2015, 25(5): 15-18.
- [13] 余珊珊,王志军,刘栋梁,等. 武钢高炉炉料冶金性能的研究 [J]. *钢铁研究*, 2014, 42(5): 8-10. YU Shanshan, WEN Zhijun, LIU Dongliang, et al. Study on metallurgical properties of blast furnace burden in WISCO [J]. *Research on Iron and Steel*, 2014, 42(5): 8-10.
- [14] 张朝晖,徐凯强,邢相栋,等. 烧结矿低温还原粉化影响因素研究进展 [J]. *钢铁研究学报*, 2021, 33(6): 453-460. ZHANG Zhaohui, XU Kaiqiang, XING Xiangdong, et al. Research progress of influence factors on low-temperature reduction degradation [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2021, 33(6): 453-460.
- [15] 赵路遥,田筠清,赵满祥,等. 球团矿还原膨胀率影响因素分析 [J]. *中国冶金*, 2023, 33(10): 60-64. ZHAO Luyao, TIAN Yunqing, ZHAO Manxiang, et al. Analysis on influencing factors of reduction swelling index of pellets [J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(10): 60-64.
- [16] WANG H T, SOHN H Y. Effect of CaO and SiO<sub>2</sub> on swelling and iron whisker formation during reduction of iron oxide compact [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2011, 38(6): 447-452.
- [17] 罗果萍,刘安康,王永斌,等. MgO对碱金属球团还原膨胀性能的影响 [J]. *烧结球团*, 2016, 41(3): 31-33; 56. LUO Guoping, LIU Ankang, WANG Yongbin, et al. Influence of MgO on the reduction swelling performance of alkali pellets [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(3): 31-33; 56.
- [18] 王飞,茅沈栋,毛瑞,等. 原料锌含量对转底炉球团还原焙烧过程的影响 [J]. *烧结球团*, 2018, 43(5): 51-55. WANG Fei, MAO Shendong, MAO Rui, et al. Influence of zinc content in raw materials on pellets of rotary hearth furnace during the roasting and reduction process [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2018, 43(5): 51-55.