

## 气基竖炉内直接还原铁黏结机理研究

唐 恩<sup>1</sup>, 陈洋杨<sup>2</sup>, 吕维嘉<sup>1</sup>, 张 瑞<sup>1</sup>, 王 坤<sup>1</sup>, 胡一迪<sup>1</sup>

(1. 浙江工贸职业技术学院 材料工程系, 浙江 温州 325000; 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为探究气基竖炉内直接还原铁(DRI)的黏结机理,分析黏结现象与生产工艺的内在联系,本文通过冷固结球团高温还原试验模拟竖炉直接还原过程,采用扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)对还原后球团的形貌、成分及黏结结构进行观察与表征。结果表明,球团间黏结物的TFe质量分数高达93.56%,碎屑黏结物因脉石富集导致TFe质量分数较低为53.88%;球团之间的黏结主要由还原后铁元素的聚集与长大导致,其过程可分为低于800℃的低温固相烧结和800~900℃的高温还原融合两个阶段。黏结形态受颗粒接触、扩散及高温融合共同影响,其中,高温阶段铁原子的扩散与再结晶是黏结强化的关键。DRI的黏结现象不可避免,但可通过控制原料强度、还原温度、金属化率等条件减轻黏结程度。本文研究成果可为优化气基竖炉生产工艺、提高DRI产品质量提供理论依据。

**关键词:**气基竖炉; 直接还原铁; 黏结机理; 高温还原; 铁元素聚集

中图分类号:TF55

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)04-0106-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.04.064

## Research on bonding mechanism of DRI in gas-based shaft furnace

TANG En<sup>1</sup>, CHEN Yangyang<sup>2</sup>, LÜ Weijia<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, HU Yidi<sup>1</sup>

(1. Materials Engineering Department, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325000, Zhejiang, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** In order to explore the bonding mechanism of DRI in gas-based shaft furnaces and analyze the internal relationship between the bonding phenomenon and the production process, the direct reduction process of the shaft furnace is simulated by cold-consolidated pellets by high-temperature reduction test, and the morphology, composition and bond structure of the reduced pellets are observed and characterized by SEM and EDS. The results show that the TFe mass fraction of the inter-pellet binder is as high as 93.56%, and the TFe mass fraction of the clastic binder is low at 53.88% due to gangue enrichment. The bonding between pellets is mainly caused by the aggregation and growth of iron after reduction, and the process can be divided into two stages: low-temperature solid-phase sintering below 800 °C and high-temperature reduction fusion at 800 ~ 900 °C. The bonding morphology is affected by particle contact, diffusion and high-temperature fusion, among which the diffusion and recrystallization of iron atoms at high temperature stage are the key to bond strengthening. DRI bonding is unavoidable, but the degree of bonding can be reduced by controlling the strength of the raw material, reduction temperature, metallization rate, etc. The results can provide a theoretical basis for optimizing the production process of gas-based shaft furnaces and improving the quality of DRI products.

**Key words:** gas-based shaft furnace; DRI; bonding mechanism; high-temperature reduction; iron element gathering

随着时代的发展,钢铁产业发展十分迅猛,钢铁技术也随之提高。由于高炉炼铁所用铁矿资

源价格日益高昂且存在环境污染问题,很多国家开始致力于研究非高炉炼铁技术,而直接还原炼

收稿日期:2024-06-25; 修回日期:2024-08-04

基金项目:温州市基础公益项目(G2023068);浙江工贸引进人才项目(YJRC202305)。

作者简介:唐 恩(1979—),男,博士,教授,从事非高炉炼铁方面的研究工作。

铁技术也由此受到关注。铁矿直接还原是一种制造直接还原铁(direct reduced iron, DRI)的炼铁技术,通过将固体状态的矿石或含铁团块还原到软化温度以下。由于还原温度低,直接还原铁或海绵铁呈多孔低密度海绵状结构,含碳量低,且含有脉石杂质<sup>[1]</sup>。当金属铁作为氧化球团的主要生产原料时,该产品仍然是球团,并被称为金属化球团。为了提高产品的抗氧化性和便于运输,在热条件下将直接还原铁挤压成型的产品被称作热压铁(hot briquetted iron, HBI)<sup>[2]</sup>。

炉料黏结是指在直接还原过程中,还原铁之间发生不同程度地相互黏结或团聚而结块的现象。直接还原技术自开始发展以来已有近百年历史,其主要类型为以天然气为主的气基直接还原技术和以煤为主的煤基直接还原技术,这些工艺在生产中都不可回避地需要解决生产过程中的黏结问题<sup>[3]</sup>。如气基竖炉要求入炉球团具有较高的强度,以控制粉化率;并在球团表面喷涂水泥,在竖炉内部设置振打设施,以防止随着生产过程中还原程度的提高,球团之间黏结加重<sup>[4]</sup>。以韩国浦项为代表的 Finex 工艺,其入炉粉矿的还原率提高后,还原后粉末黏结失流,严重影响生产顺行,使得预还原球团的金属化率低于 60%<sup>[5-7]</sup>;以回转窑为代表的外配煤混合球团生产工艺,存在炉料黏结的问题导致回转窑经常结圈,造成回转窑停炉检修,因此,回转窑生产工艺要求较高的入炉球团强度以降低运行过程中的粉化率<sup>[8-9]</sup>;以隔焰加热竖炉为代表的外配煤混合球团生产工艺,与回转窑类似,其对入炉粉化率或还原温度的要求较高,也会出现炉料黏结等问题<sup>[10]</sup>。

上述各类 DRI 的生产工艺实践表明,只要炉料发生还原反应,通常就会有黏结问题的产生。因此,本文通过冷固结球团高温还原试验,结合微观结构表征,系统探究气基竖炉内直接还原铁(DRI)的黏结机理,重点分析黏结相的形貌、成分差异,以明确黏结的核心驱动因素,验证原料强度、还原温度及金属化率对黏结程度的影响,并提出黏结动态分阶段模型,对于深入理解气基竖炉生产过程中的物料黏结现象、优化生产工艺和提高产品质量具有一定借鉴意义。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验原料

为更为直观地研究 DRI 的黏结情况,试验采用典型的直接还原工艺用铁精粉,其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可见,铁精粉中含有一定量的脉石,其质量分数约为 9%。

表 1 铁精粉的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of iron

concentrate							%
TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	P	S
64.22	0.49	3.82	1.93	0.72	0.32	0.06	0.01

### 1.2 试验方法

试验采用冷固结球团在高温炉中模拟竖炉直接还原过程,试验装置由高温炉及测定架、取样箱、智能控温装置、CO 气转化炉及温控仪等组成,如图 1 所示。模拟的主要参数:还原区 930 ℃ 保持 16 h,炉料荷重为 1.4 kg/cm<sup>2</sup>,通入的煤气为 65% 的 CO、10% 的 CO<sub>2</sub>、25% 的 N<sub>2</sub>,流量为 5 L/min,对应煤气量为 400~500 m<sup>3</sup>/t DRI。采用 Zeiss Evo 18 扫描电镜观察分析还原后的试样,制备断面试样、光片试样对还原铁内部结构及形态进行研究。



图 1 模拟及检测装置

Fig. 1 Analog and detection device

## 2 结果与讨论

### 2.1 还原后的球团形貌及黏结情况

还原后球团试样形貌如图 2 所示。由图 2 可见,除了正常球状还原铁外,部分球团出现一定程度黏结及粉化,主要有球团之间发生黏结、球团产生的碎屑或粉末团聚发生黏结两种情况。



(a) 正常 DRI; (b) 球团间黏结; (c) 碎屑黏结

图 2 还原铁球团

Fig. 2 Reduced iron pellets

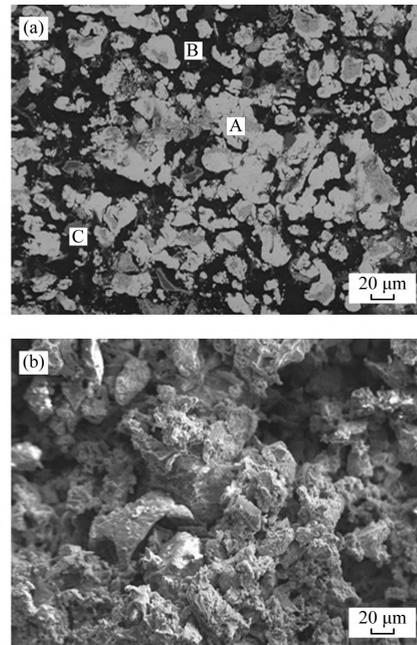
### 2.1.1 正常球团

图 3(a) 是正常还原铁球团 DRI 样品的内部结构切面。由图 3(a) 可以看到, 球团中铁的含量较高(图中白色区域), 还原过程中铁的还原效果较理想; 此外, 球团内部存在部分孔洞(图中黑色区域)。这些孔洞是在还原过程中, 氧化物被还原时产生的气体(如  $\text{CO}_2$  和水蒸气等)从球团内部逸出所留下的空间。这些孔洞虽然在一定程度上降低了球团的密度, 但同时也为后续球团冶炼过程中的反应提供了更多的活性表面, 有利于反应的进行。此外, 图中还可见到一些灰色区域, 它们相对较少, 主要由脉石成分组成。脉石通常是 DRI 球团原料中的杂质, 包括一些高熔点的氧化物和其他非金属矿物。在还原过程中, 这些脉石成分往往难以被完全还原, 因此会以残留的形式存在于球团中。

图 3(a) 中白色区域的大小并不均匀, 有些甚至呈现出片状聚集的形态。这表明, 在还原过程中, 铁元素具有自我聚集和长大的趋势<sup>[11]</sup>。这可能是铁元素在还原过程中的扩散和重结晶作用所导致的。随着还原过程的进行, 铁原子逐渐从氧化物中释放出来, 并在球团内部进行重新排列和聚集, 形成了大小不一的铁晶粒。

图 3(b) 展示了试样内部的颗粒形貌, 这些颗粒在断裂过程中展现出了典型的韧性撕裂特征。试样中可见明显的亮灰色“河流”纹理, 这些纹理的形成是由于金属铁颗粒在受到外力作用下发生了塑性变形。塑性变形是材料在应力作用下发生形状改变而不断裂的一种能力, 它反映了球团的强度。由于金属铁颗粒具有良好的塑性变形能力, 其在断裂过程中能够形成这种明显的“河流”纹理, 而不是直接断裂。除了韧性撕裂的典型特征外,

图 3(b) 中还出现了少量的脆性断裂形貌。这些脆性断裂形貌主要由脉石组成的区域所展现。脉石作为材料中的非金属杂质, 其力学性质与金属铁颗粒存在显著差异。在受到外力作用时, 脉石区域往往更容易发生断裂, 从而形成脆性断裂形貌。



(a) 切面; (b) 断口

A—金属铁; B—孔洞; C—脉石。

图 3 正常球团内部形貌

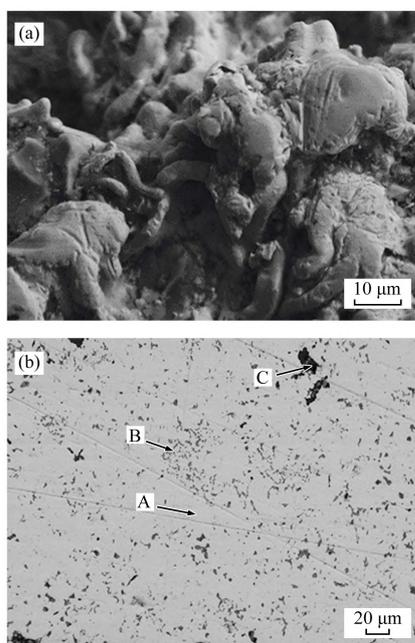
Fig. 3 Internal morphology of normal pellets

### 2.1.2 球间黏结

图 4(a) 为黏结球团的表面形貌。由图 4(a) 可见, 球团接触面呈现光滑的表面质地与独特的半球化形态特征, 这是由一系列复杂的物理和化学过程共同作用的结果。首先, 接触表面的光滑性是物料在高温和特定工艺条件下经历了长时间处理后形成的。在半熔融球化过程中, 随着温度的

逐渐升高,物料中的某些成分开始熔化并在表面聚集,随着物料流动和冷却,它们逐渐融合并覆盖在物料表面,从而形成了光滑的表面。此外,长时间的还原过程及物料运动也会对球间黏结表面形貌产生影响。在还原过程中,物料表面会受到一定程度的磨损,长时间的还原运动过程使得物料表面逐渐变得光滑,同时半球化形态也在这个过程中得到进一步强化。总之,黏结球团之间的表面形貌是由半熔融球化和长时间还原过程中的物料运动和磨损共同作用的结果。这一形貌的形成不仅与物料的成分、粒度和形状等因素密切相关,还受到温度、时间和还原气氛等工艺条件的影响。

图4(b)是对黏结球团接触处进行切片后的形貌。由图4(b)可以观察到,球间黏结物主要由大量白色基底所构成,这些白色基底是由铁元素的聚集、长大以及融合所形成,表明铁元素是球间黏结物形成过程中的主要组成元素。这种观察结果与铁矿在高温还原环境中的行为相吻合,因为在这种环境下,铁元素容易熔化和聚集及扩散,进而形成致密的球团结构。除了白色基底外,切片中还夹杂着少量的黑色孔隙和灰色脉石。这些



(a) 表面; (b) 内部

A—金属铁; B—孔隙; C—脉石。

图4 黏结球团间接触处形貌

Fig. 4 Contact morphology of between bonded pellets

黑色孔隙在球团结构中占据了相对较小的比例,但它们的存在对球团的性能也有着不可忽视的影响。从化学角度分析,黑色孔隙可能是由于物料在还原过程中脱氧后的气体排出所形成的。在高温还原环境下,物料中的氧元素与还原剂发生反应,使生成的气体逐渐被排出,从而在内部形成孔隙。灰色脉石则是球团中的另一种重要成分,在球团制备过程中,这些脉石杂质可能无法完全去除,从而被包裹在球团内部。

### 2.1.3 碎屑黏结

图5为碎屑黏结试样的切片内部结构。由图5可见,与球间黏结试样在整体形貌上具有一定的相似性,碎屑黏结试样均是以白色的基底为主,分布着不同大小的孔洞和脉石,说明其仍是以铁元素的黏结聚合为主。然而,二者之间仍存在着一定的差异。首先,从孔洞尺寸的角度来看,碎屑黏结样品内部的孔洞分布较球间黏结试样更为显著。这是由于在运动过程中,球团之间相互碰撞、摩擦,从而随机产生了大小、形状各异的颗粒,这些细小的颗粒在运动过程中不断还原、接触,受到挤压而随机黏结聚集成团,导致球团的密实性不够,难以完全消除颗粒间的空隙,从而形成了相对较大的孔洞。相比之下,球间黏结试样接触处孔洞分布更加均匀,以物理接触且以铁元素的扩散聚合为主,因此在黏结过程中更容易形成致密的内部结构,且孔洞尺寸相对较小。因此,碎屑黏结试样虽然在形貌上与球间黏结试样有所相似,但在微观结构和化学成分上也展现出一定的区别。

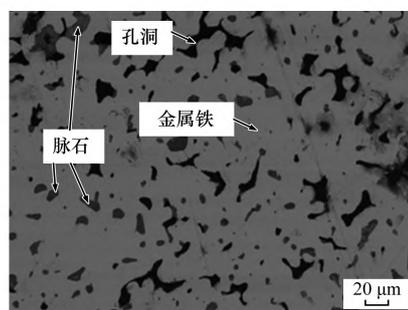


图5 碎屑黏结样品内部结构

Fig. 5 Internal structure of debris bonded sample

### 2.2 成分比较

采用EDS能谱分析对上述试样切片做面扫描,

定性、半定量成分分析结果如表 2 所示。由表 2 可见：球间黏结试样中金属铁的质量分数最高，正常球团次之，碎屑黏结最低；碎屑黏结样品中的脉石含量显著高于前两类试样。正常球团 TFe 质量分数为 87.82%，球间黏结 TFe 质量分数超过 90%，且球间黏结试样中脉石含量更少，进一步说明球间黏结物的形成以铁元素的聚合扩散为主。但碎屑黏结试样的全铁含量较低，说明在生产过程中，由于球团的粉化及磨损，铁矿中的脉石更易粉化，产生了细小颗粒。在后续高温还原过程中，在重力的挤压作用下，铁矿中的脉石容易形成不同形状和大小的碎屑黏结颗粒物。

表 2 各试样的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of the samples %					
试样种类	TFe	Si	Al	Ca	Mg
正常球团	87.82	2.53	1.35	0.62	0.30
球间黏结	93.56	2.13	1.16	0.51	0.22
碎屑黏结	53.88	12.70	6.63	5.78	3.27

### 3 黏结机理

上述不同黏结情况表明，球团之间、碎屑之间的主要黏结物基本是还原后的铁元素，即铁元素的聚集、长大导致了还原后球团的黏结问题。但陈守明等<sup>[12]</sup>认为黏结的主要原因是铁矿自身成分如存在 Ca、Mg、Al、Si 等元素形成了低熔点结合物，需要在原料种类、还原温度上重点控制。而实际上这些元素组成的化合物多为高熔点难熔物，这些非铁系组分形成的多元相构成的化合物均是 1 400 ℃ 之上的结合物<sup>[13]</sup>。因此，还原铁的黏结问题有待结合直接还原工艺做进一步分析。

#### 3.1 条件分析

(1) 原料条件。气基竖炉直接还原一般要求使用高品位球团矿；球团以粒度 < 0.075 mm 的铁精粉为主要原料，通常是以 Fe 为主要成分，以 Ca、Mg、Si、Al、O 等其他组分构成的多元化合物；对炉内易导致结瘤的碱金属含量进行严格控制，一般要求低于 0.1%。因此，铁矿还原过程主要是去除氧元素。由于氧脱除的需求，还原铁的整体形貌以多孔为主，其也被称为海绵铁。

(2) 入炉条件。入炉前粉末状原料均需要加

工成球团，并达到一定的强度。一般球团抗压强度需要达到 2 000 N/P，高温膨胀指数低于 15%。在低温还原粉化率方面，Midrex 技术要求 5% 以下，HYL 技术要求 10% 以下，在不影响炉料透气性的同时减少黏结体的产生<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 过程分析

竖炉以对流移动床的方式工作。矿石自炉顶加入，还原完毕的海绵铁自炉底排出，固态炉料由上向下移动。还原气由还原带下部加入并向上流动，与炉料形成对流，进行热交换及发生还原反应。铁矿的气体直接还原与高炉冶炼过程类似，但没有熔化及造渣过程，只是铁矿中的铁被还原气体还原出来。铁氧化物的还原顺序<sup>[8]</sup>：当温度  $\geq 570$  ℃ 时，还原顺序为  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ；当温度 < 570 ℃ 时，还原顺序为  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ 。其中，FeO 被还原到 Fe 的阶段，是还原过程的关键步骤，这一阶段的失氧量占  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  总氧量的三分之二。因此在直接还原过程研究中，主要是弄清楚铁氧化物被还原的机理和状况。

炉料从竖炉顶部入炉到出炉的下行过程主要经历预热段、还原段、过渡段及冷却段，如图 6 所示。由图 6 可见：预热段是把铁矿加热到还原需要的温度，还原段是把铁矿还原到预定的还原度，过渡段是用炉料把还原带内的还原气氛与冷却带内的弱氧化气氛分隔开，冷却段则是把产品冷却到不能在大气中直接氧化的温度，并进行海绵铁的补充还原和渗碳。其中，黏结主要发生在前两个阶段，在预热、还原这两个阶段物料大致有如下变化过程<sup>[15]</sup>。

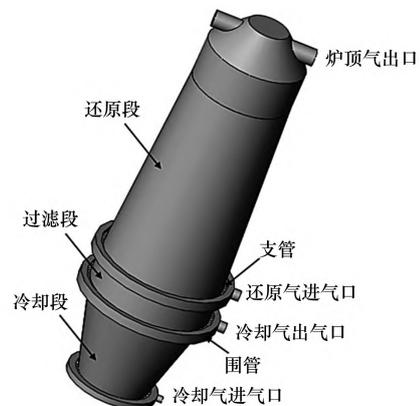


图 6 竖炉本体结构

Fig. 6 Structure of shaft furnace

(1) 预热段。在预热段中,铁矿剧烈升温,气体温度明显高于固体温度,但气固温差越向下越小。铁的高价氧化物大部分在预热段中被还原成低价氧化物。预热段和还原段没有明确的界限,一般低于800℃为预热段,在此段停留约0.5 h,主要完成球团矿加热到目标还原温度的过程。这一阶段由于热力学条件较差,主要完成物料的预热过程和高价铁至浮氏体(FeO)的还原,如水分或有机物的蒸发或挥发、吸附气体的排除、应力的消除,该阶段大部分时间为采用还原气的物理热用于物料升温。故此,球团矿中的铁仍以铁氧化物存在,这与传统烧结工艺类似,也可认为是低温固相烧结阶段<sup>[16]</sup>。

在竖炉直接还原过程中,球团之间的接触或球团粉化料聚集不可避免,即不同大小的颗粒相互接触。据此建立如图7(a)所示的黏结模型,假定两颗粒之间相互接触。球团中铁精粉受热,粉末表面气体或水分开始挥发,颗粒之间的黏结呈现范德华力的特性。该阶段无需原子明显位移,仅涉及颗粒接触面上部分原子重新排列或位置调整。这个过程只需要极小的活化能,因此,黏结仍然可以在低温和短时间内发生。尽管此时收缩不明显,颗粒内晶体没有变化,颗粒形状基本保持不变,并且密度增加微乎其微,但由于颗粒之间的结合面扩大导致烧结体强度和导电性均得到明显提升<sup>[17]</sup>。

(2) 还原段。还原段温度一般为800~900℃,炉料在此区域内停留约6 h,还原段内铁矿温度水平较高,气固温差很小。气相与固相之间的热量传递较预热带微弱得多。高温为化学反应提供了有利条件。因此,难还原的低价氧化物绝大部分在还原带被还原。离开还原带的矿石已经达到预定的金属化率,成为海绵铁。

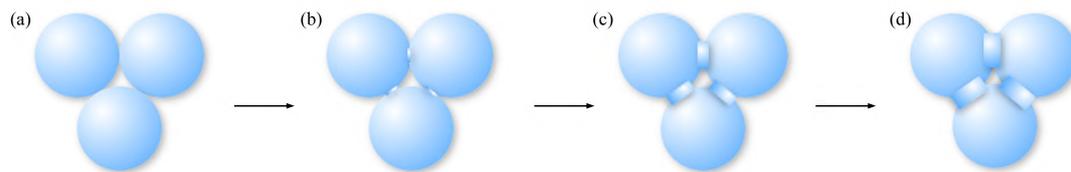
该阶段主要完成FeO至金属铁的还原以及铁元素的聚集长大,主要发生铁氧化物的还原、晶格扩散、蒸发与凝聚以及流动等<sup>[17]</sup>。当温度升高时,铁氧化物还原后铁原子的活性增大,由颗粒的自由表面向颗粒间的接触处扩散,如图7(b)所示。颗粒间的接触面增大,由点接触变成面接触,并通过扩散形成颈部;然后,接触面进一步融合,球团颗粒间的中心距缩短,颗粒融合聚集加快。

还原段高温的作用增加了原子的活动能力,促进粉末颗粒的结合,使得球团与球团之间、粉末颗粒的表层原子间发生相互扩散或塑性流动。随着颗粒间接触面积的增大,再结晶和晶粒长大现象发生,最终导致球团收缩并引起其性能明显变化,如图7(c)所示。颗粒之间的相互挤压使得铁晶粒沿接触面择优生长,从而进一步促进烧结颈的融合长大<sup>[18]</sup>,但与此同时,杂质和孔隙的存在对金属的晶界迁移构成阻碍,造成烧结过程中接触面的融合不如致密金属那么明显。还原过程结束后黏结体的最终形态如图7(d)所示。

### 3.3 生产分析

黏结是由于在竖炉直接还原过程中球团之间的接触或球团粉化料的聚集。不同大小的颗粒在高温还原气氛以及料柱压力下,随着金属还原程度的加深,在球团内部聚集和长大。而在球团之间或者粉末颗粒之间,就会发生由不易黏结的颗粒物转化为易于黏结的黏结物。

对于竖炉还原生产,除了还原温度和还原时间外,竖炉的透气性是产品质量的重要保障。物料粉化是影响竖炉透气性的重要指标,因此需要控制碎屑黏结。由于高温还原工艺的特点,需要从源头控制碎屑黏结的产生,即控制球团自身强度和粉化率。对于球间黏结,可以从改变竖炉内物料运行的特点,如调节运行速度以及控制物料



(a) 物料接触; (b) 颈部形成; (c) 融合长大; (d) 黏结体形成

图7 颗粒的黏结过程

Fig. 7 The bonding process of particles

偏析等角度进行改善。

#### 4 结论

(1) 球团之间黏结物中铁元素质量分数高达 93.56%，表明黏结物主要由还原后生成的金属铁聚集、长大而成，夹杂少量孔隙和脉石残余，即还原后铁元素的富集和长大是气基竖炉内直接还原铁(DRI)黏结的主要驱动力。

(2) 气基竖炉中 DRI 的黏结过程可以划分为两个主要阶段：低温( $< 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的固相烧结和高温( $800\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的还原融合。在低温阶段，颗粒间通过范德华力接触，仅形成微弱黏结；随着还原温度的升高，铁元素在颗粒表面扩散，形成烧结颈并逐步融合，促进了黏结体的长大。该过程可细分为物料接触、还原后扩散形成烧结颈、融合长大及黏结体形成四个主要过程。

(3) DRI 生产全过程贯穿了不同大小颗粒的接触及高温还原扩散过程，为物料之间的黏结提供了充分条件，导致生产工艺中不可避免产生不同程度物料黏结。实际生产可从优化炉料强度、还原温度、还原时间、金属化率等角度着手，保证生产顺利进行。

#### 参考文献：

- [1] 张福明,程相锋,银光宇,等. 国内外低碳绿色炼铁技术的发展[J]. 炼铁,2021,40(5):1-8.  
ZHANG Fuming, CHENG Xiangfeng, YIN Guangyu, et al. Development of low-carbon green ironmaking technology at home and abroad[J]. Ironmaking, 2021, 40(5):1-8.
- [2] 齐渊洪,钱晖,周渝生,等. 中国直接还原铁技术发展的现状及方向[J]. 中国冶金,2013,23(1):9-14.  
QI Yuanhong, QIAN Hui, ZHOU Yusheng, et al. Present status and trend of direct reduction technology development in China [J]. China Metallurgy, 2013, 23(1):9-14.
- [3] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金,2019(6):1-7;31.  
YING Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process [J]. Hebei Metallurgy, 2019 (6):1-7;31.
- [4] 邱梓洋,王淇,王义松,等. 典型的气基竖炉直接还原工艺[C]//第十一届全国能源与热工学术年会论文集. 马鞍山:中国金属学会能源与热工分会,2021:604-610.  
QIU Ziyang, QI Wang, WANG Yisong, et al. Typical gas-based shaft furnace direct reduction process [C]//The 11th National Annual Conference on Energy and Thermal Engineering. Ma'an Shan; Energy and Thermal Engineering Branch of China Metallurgical Society, 2021:604-610.
- [5] 宋赞. 非高炉炼铁工艺发展现状[J]. 中国钢铁业, 2020(10):44-46.  
SONG Zan. Development status of non BF ironmaking process [J]. China Steel, 2020(10):44-46.
- [6] 吕建超. 气基直接还原竖炉内还原过程的研究与分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.  
LÜ Jianchao. Research and analysis of reduction process in gas-based direct reduction shaft furnace [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [7] MARTÍN M I, LÓPEZ F A, TORRALBA J M. Production of sponge iron powder by reduction of rolling mill scale [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2012, 39(3):155-162.
- [8] 徐宽. 气基直接还原竖炉内物料下行及还原气流场研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.  
XU Kuan. Study on material descending and reduction airflow field in gas-based direct reduction shaft furnace [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [9] 苑鹏. 生物质用于转底炉直接还原工艺的研究[D]. 唐山:华北理工大学,2015.  
YUAN Peng. Study on direct reduction process of biomass in rotary hearth furnace [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2015.
- [10] 钟昇平,郭磊,丁智勇,等. 铁矿粉气基直接还原过程中铁晶须生长观察[J]. 有色金属科学与工程,2018,9(1):15-21.  
ZHONG Shengping, GUO Lei, DING Zhiyong, et al. Observation on the growth of iron whisker in gas-based direct reduction process of iron ore fines [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(1):15-21.
- [11] LU F, ZHONG H, LIU B, et al. Particle agglomeration behavior in fluidized bed during direct reduction of iron oxide by CO/H<sub>2</sub> mixtures [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(4):626-634.
- [12] 陈守明,黄超,杨景武,等. 煤基竖炉直接还原铁炉料

- 黏结机理及控制[C]//中国金属学会.2005中国钢铁年会论文集(第2卷).北京:冶金工业出版社,2005:422-424.
- CHEN Shouming, CHAO Huang, YANG Jingwu, et al. Cohesion mechanism and control of direct reduction iron burden in coal-based shaft furnace[C]//China Metallurgical Society. CSM 2025 Annual Meeting Proceedings. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 422-424.
- [13] 蒋曼,李俊达,张乐,等.硫酸渣煤基直接还原焙烧制备直接还原铁[J].矿产保护与利用,2019,39(3):58-62.
- JIANG Man, LI Junda, ZHANG Le, et al. Study on preparation of direct reduction of iron from pyrite cinder by coal-based direct reduction roasting[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 58-62.
- [14] SUN H Y, ZOU Z, ZHANG M J, et al. Fluidized magnetization roasting of refractory siderite-containing iron ore via preoxidation-low-temperature reduction[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(6): 1057-1066.
- [15] 陈晓丹.富铁煤泥直接还原白云鄂博铁精矿实验及机理研究[D].包头:内蒙古科技大学,2019.
- CHEN Xiaodan. Experiment and mechanism of direct reduction of Bayan Obo iron concentrate with iron-rich slime[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019.
- [16] SUOPAJÄRVI H, PONGRÁCZ E, FABRITIUS T. Bioreducer use in Finnish blast furnace ironmaking-Analysis of CO<sub>2</sub> emission reduction potential and mitigation cost[J]. Applied Energy, 2014, 124: 82-93.
- [17] DONG H, CAI J J, WANG G S, et al. Experimental study on gas flow distribution laws in pelletizing shaft furnace[J]. Journal of Northeastern University, 2004, 25(5): 435-438.
- [18] 闫方兴,章启夫,曹朝真,等.气基竖炉用含钒钛海滨砂矿球团直接还原试验研究[J].钢铁钒钛,2020,41(4):7-11.
- YAN Fangxing, ZHANG Qifu, CAO Chaozhen, et al. Experimental study on direct reduction of vanadium and titanium-bearing sea sand ore pellets in gas-based shaft furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4): 7-11.
- (上接第90页)
- [19] 郭培民.氢还原高磷鲕状赤铁矿还原技术[C]//第十三届中国钢铁年会论文集.重庆:中国金属学会,2022:43.
- GUO Peimin. Reduction technology of high phosphorus oolitic hematite by hydrogen reduction[C]//Proceedings of the 13th China Iron and Steel Annual Conference. Chongqing: China Iron and Steel Association, 2022: 43.
- [20] 张伏龙,黄润,徐本军,等.贵州鲕状赤铁矿的氢气还原行为[J].钢铁研究学报,2016,28(11):23-28.
- ZHANG Fulong, HUANG Run, XU Benjun, et al. Reduction of Guizhou oolitic hematite by hydrogen[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(11): 23-28.
- [21] 孙永升,栗艳锋,王定政,等.氟磷灰石还原过程热力学分析[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(6):875-880.
- SUN Yongsheng, LI Yanfeng, WANG Dingzheng, et al. Thermodynamic analysis of the reduction process of fluorapatite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(6): 875-880.
- [22] 赵栋.高磷鲕状赤铁矿氢还原—熔分制备直接还原铁的研究[D].武汉:武汉科技大学,2018.
- ZHAO Dong. Study on the slag/metal separation from H<sub>2</sub>-reduced high phosphorus oolitic hematite for direct reduction ironmaking[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.