

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20210170

电炉炼钢钢铁原料的现状分析与展望

吴耀光¹，肖步庆²，朱立光³，王雁^{4,5}

(1. 中冶京诚工程技术有限公司冶金工程咨询设计部, 北京 100176; 2. 河钢股份有限公司邯郸分公司一炼钢厂, 河北 邯郸 056015; 3. 河北科技大学, 河北 石家庄 050018; 4. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 5. 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心, 河北 唐山 063000)

摘 要: 电炉炼钢作为短流程的核心工艺, 具有铁元素循环利用率高、能源消耗低及环境效益良好的特点, 推动电炉炼钢健康发展符合中国实现“碳达峰”、“碳中和”目标对钢铁绿色发展的要求。电炉炼钢入炉的钢铁原料种类较转炉多且结构灵活, 并且对电炉冶炼的工艺过程控制有直接的影响。为创造充分挖掘和发挥电炉炼钢优势的良好起始条件, 针对目前电炉炼钢的主要入炉钢铁原料的情况和特点, 从其生产储备、工艺过程操作、能源消耗、环境保护等方面入手, 分析了废钢、铁水和直接还原铁作为主要原料的使用现状及优缺点, 并着重对比分析了直接还原球团特点和技术指标, 为探究和优化合理的电炉炼钢入炉钢铁原料结构提供了理论依据。从资源消耗、环境保护等方面考虑, 废钢和直接还原球团将成为今后短流程炼钢的主要原料。结合钢铁循环利用技术和产业专业化的逐渐成熟, 以及更加绿色环保的氢冶金技术的发展, 废钢综合回收利用技术、高品位洁净球团生产技术、氢气竖炉直接还原技术将会是未来电炉入炉钢铁原料生产技术的发展方向, 配套新型高效智能电弧炉冶炼技术将会是未来短流程炼钢的发展方向。

关键词: 电炉炼钢; 废钢; 铁水; 直接还原铁; 洁净球团; 氢冶金

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2021)11-0055-08

Current situation analysis and prospect of iron and steel raw material for electric arc furnace steelmaking

WU Yao-guang¹, XIAO Bu-qing², ZHU Li-guang³, WANG Yan^{4,5}

(1. Metallurgical Engineering Consulting and Design Division, MCC Capital Engineering and Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China; 2. The First Steel Plant, Handan Branch of Hegang Co., Ltd., Handan 056015, Hebei, China; 3. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 4. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 5. Hebei High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: As the core technology of short-path steelmaking, electric arc furnace steelmaking (EAF) has the characteristics of high iron recycling rate, low energy consumption and good environmental benefits. Promote the healthy development of EAF steelmaking, which is in line with the requirement of green development of iron and steel to achieve the goal of emission peak and carbon neutrality. EAF has various and flexible raw iron and steel materials for charging than the converter, and which affect directly the process control of EAF smelting. To create a good starting condition for excavating and exerting fully the advantages of EAF, the application, advantages and disadvantages of scrap, hot metal and direct reduced iron (DRI) as the main raw materials were analyzed from their production and storage, process operation, energy consumption, environmental protection and other aspects base of the current situation and characteristics of the main steel raw materials for EAF, and it is as a key point that the characteristics and technical indexes of direct reduction pellets are compared and analyzed, which provided a theoretical basis for exploring and optimizing the structure of raw iron and steel materials of EAF steelmaking. The scrap and direct reduced pellets will turn into the main raw materials of short-path steelmaking in the future considering resource consumption and environmental protection. Combined with the gradual maturation of iron and steel recycling technology and

industrial specialization, and the development of more green hydrogen metallurgy technology, the new technologies, including comprehensive recycling technology of scrap, production technology of high-grade clean pellet as well as direct reduction technology of hydrogen shaft furnace, will be the development direction of production technology of iron and steel raw materials charged for EAF. Meanwhile, matching new and high efficient intelligent electric arc furnace smelting technology will be the development direction of short-path steelmaking in the future.

Key words: electric arc furnace steelmaking; scrap; hot metal; direct reduced iron; clean pellet; hydrogen metallurgy

电炉炼钢作为炼钢工艺的主要工艺之一,较转炉炼钢有着不可替代的优势。其设备简单、工艺布置紧凑、流程短、占地面积小、投资少、建设周期短;废钢利用率高、资源消耗小、“三废”排放少、对环境友好。近些年,大型新型电炉,如超高功率、高阻抗、连续加料、废钢预热等装备水平和技术的发展,使得电炉的优势更加突出,冶炼的钢种与转炉的差距越来越小,并且在某些钢种的冶炼上比转炉更具优势^[1-2]。尤其是电炉发展与炉外精炼和连铸连轧技术的配套完善和统筹衔接,自动化电炉炼钢技术已经形成,并向更先进的智能化方向发展。从全流程来看,电炉炼钢比转炉炼钢对一次性能源的消耗更小,环境效益更好,更符合绿色循环经济发展的理念和发展绿色钢铁的道路。

较转炉工艺入炉钢铁原料为铁水、废钢、少量生铁块和球团,电炉炼钢的主要入炉钢铁原料种类多,包括废钢、生铁、直接还原铁、铁水、碳化铁、脱碳粒铁和复合金属料^[1],电炉钢铁原料对电炉冶炼的操作有重要的影响,其成本占总成本的 80% 以上,对冶炼成本控制起主导作用^[3-4],其中主要入炉原料为废钢、直接还原铁和铁水。发达国家废钢资源丰富,基本可采用全废钢冶炼,如美国;天然气丰富的国家多采用直接还原铁,如中东地区国家;而中国采用了大量的铁水。

1 废钢使用现状分析

废钢是钢铁材料的回收再生资源,是电炉炼钢生产不可缺少的原料。炼钢过程加入废钢有利于减少吨钢钢铁料的消耗、增加产能。废钢质量的好坏和成本高低直接影响了企业的生产效率和技术经济效益。

1.1 废钢分类

废钢按照来源大致可分为厂内自循环废钢和外购废钢。厂内自循环废钢主要有铸余、坏头、轧钢废料以及渣钢,该部分废钢可在产生的源头进行标识和分类,受控条件好,质量稳定。外购废钢多为他厂

工厂废钢、社会废钢、折旧废钢、二次加工废钢等,成分、尺寸、形状差异大,质量不稳定,管理和控制难度大。对于该部分废钢的管理,应设经过专业培训的专人进行监督、检验和管理,形成标准化废钢回收、加工、分类、配送一体化的产业^[5-8],近几年在国家政策支持下,废钢的回收加工产业发展迅速。

1.2 废钢管理

按照企业生产管理的需要,采用分类细化的管理模式,人工智能+人工分拣。在初步分类的同时,还应尽量根据废钢的用途,初步判断废钢中所含贵重合合金元素,以便合理地、最大化地利用废钢中的合金元素,节约合金成本。比如,安钢采取的“废钢基地采购模式+数据量化验收新思路”方式,将废钢分为工厂废钢、拆船料、社会废钢、破碎料、打包块、小料、带渣废钢 7 大品种,每个品种再根据尺寸、厚度、直径的不同细分等级^[9]。此外,比如,山东钢铁莱芜分公司对入炉的废钢做出了明确的技术要求,分类回收、加工、存放、成分清晰;保证钢铁料的纯度、块度、密度、清洁度;消除钢铁料的合金元素、有色金属、易燃易爆物品、非金属夹杂、异品种等有害物^[10]。

此外,中国由于资源的紧张,废钢远不能满足国内企业的需求,不得不通过进口废钢填补空白。但是,由于各国的限制措施,进口废钢多是汽车废钢、轻废钢、打包料,机械废钢、重废钢比例很低,很难满足电炉生产优质钢、洁净钢的需要^[11]。

1.3 废钢熔炼优势

与用铁矿石相比,用废钢生产 1 t 钢大约可节约铁矿石 1.65 t,能源消耗降低 350 kg,标准煤 CO₂ 排放减少近 2/3,废气排放量减少 80%、废水排放量减少 76%和废渣排放量减少 97%,可见,废钢的综合利用对中国钢铁企业的转型升级和绿色发展具有十分重要的意义^[4, 12]。采用全废钢熔炼时,入炉钢铁原料中配入的磷含量达到最低水平,对于脱磷能力较弱的电弧炉,大大缓解了其脱磷压力。同时对钢水中硫含量的控制也有一定的优势,后续精炼工序脱硫压力也可大幅减小^[13]。此外,废钢中含有丰

富的合金元素,可以更好地进行二次回收利用,尤其是贵重的铌、钼等合金元素。

1.4 废钢熔炼不足

高废钢比或全废钢配料模式下,熔池中碳含量很低,冶炼前期难以在短时间内形成泡沫渣,不能埋弧操作,致使电弧外露,热量损失大,还会影响耐火材料使用寿命。在无泡沫渣的情况下,供电和大量吹氧,导致大量铁元素氧化和蒸发,铁损增加^[14]。

在配料计算时,需要配入一定比例的含碳原料,常用的有生铁块、石墨压块等。并且要在冶炼过程中,结合供氧曲线和炉内反应,强化喷吹炭粉的操作,增加了工艺过程控制的变量。同时,由于废钢的多次回收循环利用,一些冶炼过程中难以去除或者无法去除的残留元素会不断地富集,比如,铅(Pb)、锡(Sn)、砷(As)、锑(Sb)和铋(Bi)等会对钢材的性能产生严重的危害。不合理或不够精细的废钢分类管理,极易造成一些特殊的高质量钢的残留元素超标。因此,对于电炉炼钢,废钢的管理和入炉配料尤为重要。

2 铁水使用现状分析

电炉热装铁水炼钢工艺是中国冶金工作者对现代电炉炼钢技术发展的贡献^[15-16],是电炉冶炼的一项全新的技术。该技术是针对中国废钢资源不足采取的一种替代性的工艺技术。

2.1 热装铁水优势

热装铁水可以带入大量的物理热和化学热,缩短熔池形成时间,提前大功率供电的时机,显著降低冶炼电耗,缩短冶炼时间,提高生产效率,降低生产成本。铁水的碳含量较高,脱碳沸腾有利于泡沫渣的形成,可以尽早实现埋弧,降低电离导致的钢水中的氮含量,同时沸腾搅拌熔池有利于去除夹杂物和有害气体。此外,低含量有害残留元素的铁水,可以很好地中和废钢中富集的残留元素,具备冶炼高洁净度钢种的条件。

2.2 热装铁水不足

铁水热装工艺也有其明显的缺点。因为铁水碳含量高,高比例的热装铁水会增加电炉的脱碳负荷、延长冶炼时间。同时,铁水中的磷含量也高,增加了脱磷的任务。电炉冶炼脱磷的热力学和动力学条件都不如转炉好,并且冶炼过程中熔池的温度主要受化学热的控制,导致脱磷反应不易控制,冶炼低磷钢(成品 $w(P) \leq 0.01\%$)难度大^[17]。由于现代新型电炉的功能较传统电炉的功能单一,取消了冶炼的还

原期,将还原脱硫的功能转移到了 LF 进行,因此,大比例热装铁水,也会增加电炉的脱硫负荷。

该工艺从热量带入的角度,分析热装比例越高电耗降低越多,但实际生产中并非如此,而是呈现出先低后高的规律性变化,热装比例与电耗存在一个最佳值。随着热装比例的提高,供电时间缩短,冶炼所需电能降低。与此同时,铁水带入的碳含量增加,吹氧脱碳时间相应延长。当吹氧脱碳时间超过有效供电时间时,吹氧脱碳时间将决定冶炼周期,此时热装比例即为冶炼周期拐点。继续提高热装比例,冶炼周期延长,供电时间延长,热量的耗散增加,电耗上升。

受废钢资源等因素的影响,部分企业的铁水热装比例高达 70%~89%,从而出现了“电转炉”的操作,例如韶钢、鄂钢^[18]。但从炼钢全流程角度来看,综合成本和其他方面的影响因素,必然存在一个合理的热装比例范围值。众多研究人员认为,铁水热装比例为 30%~60%可提高生产效率,实现经济效益最大化^[19]。热装铁水的比例受原料条件、炉型和容量、配套装备、生产节奏等多种因素的影响^[20]。各种输入条件相互之间合理地匹配,才能保证冶炼过程中炉内钢水碳含量控制在合理范围内^[21],实现过程控制操作平稳,各生产单位应结合自身的条件确定最优热装比例。比如,三宝钢铁根据生产经验,70 和 90 t 电炉利用铁水温度约为 1 250 °C,碳质量分数为 3.5%~4.0%,硅质量分数为 0.35%~0.5%,热装比例为 30%~35%,冶炼电耗最低(约为 130 kW·h),周期最短(缩短冶炼时间约 10 min)^[22]。

3 直接还原铁使用现状分析

铁的直接还原是指不经过在高炉或其他熔化过程的熔化阶段,在固相中直接从氧化物(主要以块矿或球团的形式)还原生成铁的冶金过程,该生产工艺得到的主要含铁产品具有蜂窝状结构和微小的孔隙,因此,通常被称为海绵铁或直接还原铁或金属化铁^[23]。

3.1 海绵铁、热压块和冷压块

直接还原铁的种类包括海绵铁(DRI)、热压块(HBI)和冷压块。其基本技术参数要求见表 1 和表 2。高金属化率的直接还原铁具有更好的冶金性能,比如,Antara Steel Mills 公司的 MIDREX 生产的热压块年平均金属化率高达 93.49%,卡塔尔钢铁公司生产的冷态直接还原铁年平均金属化率高达

94.70%,Tenaris Siderca 生产的直接还原铁年平均 金属化率高达 95.40%^[24]。

表 1 海绵铁和热压块化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of DRI and HBI constituents

%

化学成分	产品等级		
	1	2	3
TFe	89~93	≥88	85~88
金属铁	≥80	≥76	≥70
碳(气基海绵铁)	≤1.5	≤1.5	≤1.5
碳(煤基海绵铁)	0.08~0.12	0.08~0.12	0.06~0.12
热压块	≥1.1	0.97~1.1	0.97~1.1
硫(气基海绵铁)	≤0.005	≤0.005	≤0.005
硫(煤基海绵铁)	≤0.030	≤0.030	≤0.030
热压块	≤0.005	≤0.005	≤0.005
磷	≤0.060	≤0.070	≤0.100
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	≤6	≤7	≤8
Pb、Zn、Cu、Sn、Cr、Ni、As 合计	≤0.010	≤0.015	≤0.015

注:1、2、3 级的金属化率分别≥88%、≥86%、≥82%。

表 2 冷压块化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical composition of cold briquettes

%

化学成分	产品等级		
	1	2	3
TFe	≥88	≥87	85~87
金属铁	90~92	≥85	≥82
碳(气基)	≥1.3	≥1.3	≥1.3
碳(煤基)	≥0.3	≥0.3	≥0.3
硫	≤0.04	≤0.04	≤0.04
磷	≤0.060	≤0.060	≤0.060
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	≤8	≤9	≤10
Pb、Zn、Cu、Sn、Cr、Ni、As 合计	≤0.015	≤0.015	≤0.015

注:1、2、3 级的金属化率分别≥78%、≥76%、≥70%。

直接还原铁作为废钢不足的替代品,在生产工
艺中直接配加的比例一般为 20%~70%,根据电炉
装备和生产工艺情况而异,但在某些国家和地区也
采用全直接还原铁冶炼工艺。目前,全球范围内主
要的电炉炼钢流程,废钢和直接还原铁的配加比例
一般为 50%~70%^[25]。

在生产海绵铁的原料中,与块矿相比,球团主要
是由铁精粉和其他含铁物料造球、焙烧而成,球团原
料广,可充分利用通过选矿去除杂质和有害元素的
低品位矿、尾矿,同时还可综合利用其他含铁物料。
例如,中东国家某钢铁企业球团的成分见表 3,中国
某钢铁企业现用高炉球团的成分见表 4。

表 3 中东国家某钢铁企业球团的成分(质量分数)
Table 3 Composition of pellets of an iron and steel enterprise in Middle East countries

%

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	CaO+MgO	P	S	V ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	Mn
67~68	≤0.5	1.15	0.5	0.68	0.26	≤2.0	≤2.0	≤0.05	≤0.015	<0.1	0.05	0.004	0.05

注:碱度为 0.5~1.0。

表 4 中国某钢铁企业现用高炉球团的成分(质量分数)

Table 4 Composition of blast furnace pellets in an iron and steel enterprise in China								%
品种	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	TiO ₂	w(CaO)/w(SiO ₂)
乌球	64.38	4.64	1.22	0.43	0.38	0.113	0.01	0.09
澳球	65.30	2.36	0.51	0.25	1.70	0.001	1.18	0.11
智利球	65.54	2.23	0.68	1.87	0.70		0.39	0.84
山东	63.54	4.15	1.27	0.78	2.89	0.020		0.19
加拿大	65.35	4.6	0.36	0.94	0.39		0.05	0.2
河南 ^①	≥62	≤6.5	≤1.5	>2.0	>2.0	≤0.025	≤0.1	

①为河南一家自熔性球团生产企业的技术要求。

由表 3 和表 4 可以看出,国内使用的球团品位较低,TFe 质量分数相差 2%~5%;w(CaO)/w(SiO₂)差别和波动大,且 CaO 质量分数有高有低且差值也大, SiO₂ 质量分数高达 1%~3.5%;w(SiO₂+Al₂O₃)和 w(CaO+MgO)的差值分别最高为 3.86%和1.19%。而且不同来源的球团成分相差很大。由此可见,由于高炉炼铁和竖炉直接还原工艺的要求不同,入炉球团

矿的要求差别很大。表 3 的球团属于自熔性球团,不适于目前国内高炉大比例使用透气性更好的高碱度烧结矿的配料结构;同时,该特性的球团具有高膨胀率,入炉比例达到 25%~30%时,容易产生爆裂,导致高炉透气性变差,影响高炉顺行。此外,粒度及其他物理化学指标也与高炉球团不同(表 5 和表 6),抗压强度的要求也明显优于国内高炉用球团。

表 5 中东国家某钢铁企业球团的粒度要求

项目	数据					
粒度/mm	>16	9~16	9~12.5	6.3~9	<6.3	<5.0
比例/%	≤5	≥90	40~50	≤3	≤2	≤1

表 6 中东国家某钢铁企业球团的物理化学指标要求

Table 6 Physical and chemical requirements for pellets of a steel enterprise in Middle East countries								
抗压强度/kN	堆密度/(t·m ⁻³)	破碎率/%	安息角/(°)	转鼓指数/%		含水率/%	孔隙率/%	金属化率/%
				>6.3 mm	<0.5 mm			760℃林德还原 815℃静态床还原
≥2 500	2.2	≤2.0	32	≥96	≤2.0	2.0	19	≥92.0 ≥92.0

3.2 直接还原铁优势

在冶炼优质钢方面,采用直接还原铁与采用铁水工艺,在碳含量高、形成泡沫渣早、冶炼过程熔池活跃等方面有相同的优势,且有害元素含量比铁水更低,不会造成残余元素的富集。综合铁前生产,成本更低、污染物排放水平更低。碳含量可随生产需求调整,调整范围为 1.0%~3.5%,从而可以满足不同电弧炉的需要^[26]。同时,低硫含量的直接还原铁与废钢冶炼相比,钢水中硫含量的控制效果更好。直接还原铁的块度小且均匀,更利于炉料预热,自动加料,减少供电中断时间和热量损失,提高电能利用率^[1, 15],缩短冶炼时间,提高产量。

球团具有品位高、杂质少、粒度小而均匀、冷态

强度和抗压强度好的特点,利于在气固还原过程中炉内的透气性和气流的均匀分布,同时,在电炉冶炼方面具有低渣料消耗、低渣量、低电耗的优势。且随着高品位铁矿石储量的减少和价格的上涨,球团的优势逐渐明显。电弧炉采用球团入炉,可根据自身生产技术特点,适当灵活调整球团的冶金性能和技术参数。同时,其生产过程资源消耗强度较高炉小,污染物排放少,更适合绿色钢铁之路的发展。

通过热料输送和热装(通常温度为 500~700℃)入炉,吨钢节约电能 60~80 kW·h,进一步提高热能利用率,降低生产成本。其热料输送和热装的方法不尽相同,例如,印度 Assar 公司使用保温罐法;墨西哥 HYL 公司使用气体管道输送法(Hytemp 技

术);德国 Aumund 公司使用热输送机法(Aumund 法)等^[27]。

3.3 直接还原铁不足

直接还原铁的缺点是含有一些未还原的铁的氧化物和脉石,冶炼渣量大,若使用酸性脉石($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$)含量特别高的直接还原铁,渣量会高达 $300\sim 400\text{ kg/t}^{[28]}$,热量损失多,电耗增加。冶炼过程中,连续加入直接还原铁时,由于其密度小,加入速度过快有可能导致冷态直接还原铁局部富集,漂浮在钢液熔池表面形成堆积现象,也称为“冰山现象”。造成工艺过程控制和操作的难度增加,同时还会影响电炉耐火材料使用寿命。此外,直接还原铁成品容易氧化,不利于长期保存和长距离运输。

生产块状直接还原铁和高品位高质量的球团对矿石的品味要求较高,同时要求有丰富的还原性气体资源。气基直接还原工艺采用天然气作为主要还原气体,煤基直接还原工艺采用煤制煤气作为主要还原气体,而工艺较气基直接还原复杂,能耗也高于以天然气为还原剂的气基直接还原^[29]。显然,在现阶段技术条件下,中国大规模发展直接还原铁技术不具备明显的优势。

中东国家某钢铁企业根据当地原料条件供应情况及本企业生产控制技术水平,确定了 5 种原料入炉比例,见表 7。随着直接还原铁装入比例的降低和废钢比例的提高,炉内的反应趋于平缓稳定,氧化期剧烈的沸腾现象减少,并且持续时间缩短。渣料消耗降低,渣量减少,但直接还原铁热送热装的比例降低,电耗和热损失增加。依据该企业的实际情况,结合电炉电气、机械等设备参数特点,生产实践验证,在装料模式三和模式四下,先集中加入废钢,后保持 100 %直接还原铁的连续加入冶炼工艺有利于电炉操作。既能调整优化废钢的配料,减少频繁断电加料,又能较大限度地进行直接还原铁的热送热装操作,并且还能实现与后道工序的良好匹配。但也有企业控制入炉原料中的废钢比不超过 35%,尽可能多采用直接还原铁。

4 其他钢铁原料

电炉入炉的钢铁原料除了废钢、铁水和直接还原铁之外,还包括一些少量的其他入炉钢铁原料,比如生铁块、脱碳粒铁、碳化铁、复合金属料等^[1,10,14],多作为优化入炉原料结构配比和冶炼过程控制的调节剂。

表 7 电炉炼钢装料模式		
Table 7 Charging mode of electric furnace steelmaking		
装料模式	装料比例/%	
	废钢	DRI
模式一		100
模式二	10	90
模式三	40	60
模式四	50	50
模式五	70	30

生铁多来源于高炉,通常情况下,当高炉供应铁水量大于炼钢消耗铁时,会将富余的铁水通过铸铁机浇铸成生铁块。相对于废钢而言,生铁块除物理热外,与铁水的特点相同。但对于电炉炼钢,生铁块只是全废钢冶炼提高炉料配碳量时或者废钢不足时作为废钢的补充。其配入量通常为 10%~25%,最高不应超过 35%,一般不作为主要的电炉炼钢的钢铁料。

脱碳粒铁又称为脱碳粒化生铁,是用高压水直接淬化高炉铁水,生成粒度为 3~10 mm 的生铁粒,其成分与铁水和生铁块特点相同,但是由于其粒度小,表面增加了少量的 FeO,加入电炉后有利于泡沫渣的形成。

电炉炼钢配加生铁块,虽然能提高生产,降低消耗,但由于其主要来源于高炉,存在明显的温度反复和能量耗散损失,而且从全流程来看,在节能和环保方面都体现不出电炉工艺的优势,脱碳粒铁也是如此。

碳化铁是以矿石或者精粉,通过与工业气体反应而生成。由于碳含量较高,可以替代炭粉喷吹入炉,不仅能起到炭粉喷入的造泡沫渣、增加热量的作用,还减少了喷吹炭粉带入的硫等杂质,同时降低钢中氮含量。

复合金属料以铁水配加烧结矿、球团矿冷却复合形成。虽然在电炉冶炼中能起到一些积极的作用,但提高了生产成本,也浪费了一些金属元素,致使缺点也很明显。

上述含铁原料经试验、生产证明可以作为电弧炉炼钢的原料,但由于与其他入炉原料相比优势不明显,加之生产工序、生产成本、生产实践和经验影响,在现实生产中应用很少。

5 总结与展望

由于废钢的短缺、铁水的环境不经济性、直接还

原铁的低速发展,入炉钢铁原料是制约中国电炉发展的主要因素。随着中国基础建设的完善,工业化水平的发展,中国的钢铁材料将逐步实现循环利用。按照钢铁 8~30 年的平均循环周期,目前中国废钢的循环率正处在上升期。未来几年,废钢的价格将会逐渐降低并趋于合理的水平,废钢占炼钢入炉原料的比例将会提高,废钢的分类管理和综合回收利用技术也会成为钢铁行业的热点,同时也会催生废钢回收和分类管理的专业化工序或企业。

按照当前人类对铁矿石资源的开发和利用的强度,高品位的富矿越来越少,低品位矿、尾矿和其他含铁原料将成为主要的钢铁原料,为保证洁净钢生产的需求,其综合利用将成为新的研究课题。具有良好冶金性能的球团将成为电炉炼钢主要的洁净原料。

页岩气开发技术逐渐成熟,可燃冰利用技术突破和氢冶金技术的发展,使气基竖炉直接还原工艺将更具优势,这会助力洁净冶炼的绿色钢铁走向新的高度。高品位洁净球团生产技术与氢气竖炉直接还原技术的结合,将会是电炉炼钢洁净原料的重要方向。基于国家“碳达峰”、“碳中和”政策,对绿色高效钢铁企业的发展理念和要求。废钢综合回收利用技术、高品位洁净球团生产技术、氢气竖炉直接还原技术将会是未来电炉入炉钢铁原料生产技术的发展方向,配套新型高效智能电弧炉冶炼技术将会是未来短流程的发展方向。

参考文献:

[1] 朱荣,刘会林.电弧炉炼钢技术及装备[M].北京:冶金工业出版社,2018.(ZHU Rong,LIU Hui-lin. Electric Arc Furnace Steelmaking Technology and Equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2018.)

[2] 朱荣,吴学涛,魏光升.电弧炉炼钢绿色及智能化技术进展[J].钢铁,2019,54(8):9.(ZHU Rong, WU Xue-tao, WEI Guang-sheng, et al. Development of green and intelligent technologies in electric arc furnace steelmaking process[J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 9.)

[3] 朱荣,田博涵.电弧炉炼钢成本分析及降成本研究[J].河南冶金,2019,27(3):1.(ZHU Rong, TIAN Bo-han. Cost analysis and cost reduction of EAF steel[J]. Henan Metallurgy, 2019, 27(3): 1.)

[4] 蔡九菊.钢铁工业的空气消耗与废气排放[J].钢铁,2019,54(4):1.(CAI Jiu-ju. Air consumption and waste gas emission of steel industry[J]. Iron and Steel, 2019, 54(4): 1.)

[5] 上官钦,酆秀萍,周继程,等.中国废钢资源发展战略研究[J].钢铁,2020,55(6):8.(SHANGGUAN Fang-qin, LI Xiu-ping, ZHOU Ji-chen, et al. Strategic research on development of steel scrap resources in China[J]. Iron and Steel,

2020, 55(6): 8.)

[6] 王新江.中国电炉炼钢的技术进步[J].钢铁,2019,54(8):1.(WANG Xin-jiang. Technological process of EAF steel-making in China[J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 1.)

[7] 何坤,王立.撬全球废钢市场·促钢铁产能输出与经济效益[J].中国冶金,2021,31(2):103.(HE Kun, WANG li. Leveraging global scrap market, improving export of China's steel production capacity and achieving economic benefits[J]. China Metallurgy, 2021, 31(2): 103.)

[8] 王腾飞,王和兵,戴昭颖,等.钢水包增容改造及包底工艺优化实践[J].冶金能源,2019,38(1):34.(WANG Teng-fei, WANG He-bin, DAI Zhao-ying, et al. Improvement of ladle capacity increase and bottoming process optimization practice[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2019, 38(1): 34.)

[9] 秦海涛.安钢废钢验收方法的创新与实践[J].河南冶金,2020,28(3):54.(QIN Hai-tao. Novel method of receiving inspection of scrap steel developed and implemented by An-yang Steel[J]. Henan Metallurgy, 2020, 28(3): 54.)

[10] 孟宪华.特钢 50 t 电炉在不同铁水比下的炉料结构优化实践[J].山西冶金,2019(2):78.(MENG Xian-hua. The optimization practice of furnace structure of special steel 50 t electric furnace under different iron water ratio[J]. Shanxi Metallurgy, 2019(2): 78.)

[11] 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,2010,20(4):23.(ZHAO Qing-jie, CHU Man-sheng. EAF steelmaking raw materials and direct reduction ironmaking processes[J]. China Metallurgy, 2010, 20(4): 23.)

[12] 王国军,朱青德,魏国立.电炉钢与转炉钢成本比较[J].甘肃冶金,2019,41(5):74.(WANG Guo-jun, ZHU Qing-de, WEI Guo-li. Cost comparison between EAF steel and converter steel[J]. Gansu Metallurgy, 2019, 41(5): 74.)

[13] 安杰,李涛,王哲,等.60 t 电弧炉全废钢熔炼技术[J].工业加热,2020,49(5):18.(AN Jie, LI Tao, WANG Zhe, et al. Smelting technology of full scrap in EAF[J]. Industrial Heating, 2020, 49(5): 18.)

[14] 金辉.降低钢铁料消耗实现降本增效[J].科技视界,2015,28:233.(JIN Hui. Reduce the consumption of iron and steel material to achieve cost reduction and efficiency[J]. Science and Technology, 2015, 28: 233.)

[15] 傅杰,王新江.现代电炉炼钢生产技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2009.(FU Jie, WANG Xin-jiang. Modern Electric Furnace Steelmaking Production Technical Manuals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.)

[16] 葛建华,王明林,赵文博,等.不同热装方式下铸坯温度分布研究[J].上海金属,2017,39(4):48.(GE Jian-hua, WANG Ming-lin, ZHAO Wen-bo, et al. Study on temperature distribution in continuous casting slab under different hot charging behaviors[J]. Shanghai Metals, 2017, 39(4): 48.)

[17] 孙开明,张露,温德松.现代电弧炉炼钢热装铁水技术的再认识[J].北京科技大学学报,2007,29(s1):52.(SUN Kai-ming, ZHANG Lu, WEN De-song. Re-understanding for modern EAF steel-making of charging hot metal[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(s1): 52.)

[18] 艾磊,何春来. 中国电弧炉发展现状及趋势[J]. 工业加热, 2016, 45(6): 75. (AI Lei, HE Chun-lai. The present situation and development trend of EAF in China[J]. Industrial Heating, 2016, 45(6): 75.)

[19] 金凤奎,周伟,张新文,等. 电炉提高热装铁水比的生产实践[J]. 宝钢技术, 2009(6): 51. (JIN Feng-kui, ZHOU Wei, ZHANG Xin-wen, et al. Production practice of enhancing EAF's hot metal charging ratio[J]. Baosteel Technology, 2009(6): 51.)

[20] 王军涛,王宝明,纪连海. 电炉热装铁水比例对冶炼工艺的影响分析[J]. 天津冶金, 2012(4): 4. (WANG Jun-tao, WANG Bao-ming, JI Lian-hai. Analysis of influence of molten iron hot charging ratio on EAF smelting process[J]. Tianjin Metallurgy, 2012(4): 4.)

[21] 王保峰. 80 t 电炉热装铁水技术改造[J]. 中国铸造装备与技术, 2018, 53(6): 44. (WANG Bao-feng. Technical transformation of hot metal charging in 80 t electric furnace[J]. China Foundry Machinery Technology, 2018, 53(6): 44.)

[22] 翁玉水. 三宝电炉技术升级改造[J]. 福建冶金, 2018(1): 22. (WENG Yu-shui. Technology upgrades of Sanbao electric furnace[J]. Fujian Metallurgy, 2018(1): 22.)

[23] Sponge Iron and Smelting Reduction Sectional Committee, MTD 30. Sponge iron/direct reduced iron (DRI) hot briquette iron (HBI) and cold briquette iron (CBI) for steel making-specification[J]. Bureau of Indian Standards, 2007 (11):3.

[24] 石禹. MIDREX 直接还原铁厂 2019 年运营概述[J]. 冶金管理, 2020(20): 47. (SHI Yu. Overview of MIDREX direct reduced iron plant operations in 2019[J]. China Steel Focus, 2020(20): 47.)

[25] 宋赞,李相帅,查春和. 我国直接还原铁工艺的发展现状及趋势[J]. 冶金管理, 2020(16): 21. (SONG Zan, LI Xiang-shuai, ZHA Chun-he. Development status and trend of direct reducing iron technology in China[J]. China Steel Focus, 2020(16): 21.)

[26] 杨雄飞. Energiron 直接还原炼铁工艺介绍[J]. 世界金属导报, 2012-03-20: B02. (YANG Xiong-fei. Introduction to the energiron direct reduction ironmaking process[J]. World Metals, 2012-03-20: B02.)

[27] 赵庆杰,魏国,沈峰满. 直接还原技术进展及其在中国的发展[J]. 鞍钢技术, 2014(4): 1. (ZHAO Qing-jie, WEI Guo, SHEN Feng-man. Process of direct reduce technology and its development in China[J]. Angang Technology, 2014(4): 1.)

[28] 黄慧琴. 全装 DRI 电弧炉产量提高试验研究[J]. 世界金属导报, 2019-12-17: B03. (HUANG Hui-qin. Experimental research on yield increase of fully installed DRI arc furnace[J]. World Metals, 2019-12-17: B03.)

[29] 卢中强,杨永青. 用直接还原铁炼钢的工艺和能耗分析[J]. 中国金属通报, 2016(11): 60. (LU Zhong-qiang, YANG Yong-qing. Process and energy consumption analysis of steel-making with direct reducing iron[J]. China Metal Bulletin, 2016(11): 60.)



《连铸》杂志征稿启事

《连铸》杂志是由中国科学技术协会主管、中国金属学会、北京钢研柏苑出版有限责任公司主办的冶金技术类期刊(CN 11-3385/TG; ISSN 1005-4006)。《连铸》期刊创刊于1982年,是钢铁连铸技术领域专业性期刊。

《连铸》期刊为双月刊,大16开,页码为76页,期刊为自办发行。《连铸》杂志现任主编为包燕平教授。

自创刊以来,《连铸》期刊坚持面向基层、面向生产、面向科研的服务宗旨,坚持发扬学术民主、繁荣学术思想、促进技术交流的办刊理念,坚持科学、创新、严谨、求实的办刊精神,积极宣传加快发展连铸技术的战略决策,及时报道我国连铸技术发展的新动向及科研成果,对来自生产第一线的连铸生产新技术、新工艺等文章优先采用,为发展我国连铸技术做出了积极贡献。同时。也得到科研院所、企业的开发、生产、科技人员和高等院校师生的喜爱,同时也为试验设备生产企业提供了展示和推广其产品的平台。

《连铸》已被“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国核心期刊(遴选)数据库”和“中国知网”收录。其影响因子在同类期刊中名列前茅。

为了更好地为读者服务,加强学术交流,特向广大作者和读者征集原创科技论文。

一 征稿对象

在生产企业、科研单位、高等院校、技术监督、设备生产等部门从事钢铁工艺研究、生产、加工和使用的专家、学者、工程技术人员、研究生、管理人员等。

二 征稿范围

《连铸》杂志的报道范围涵盖了连铸上下游工序的工艺技术、装备技术、铸坯质量、控制与检测、耐火材料、保护渣、生产管理等方面,还将介绍连铸基本知识和国内外连铸技术发展动态、见解,连铸生产存在问题、创新成果、实际生产应用技术等。

《连铸》杂志为满足多层次读者的需求。即刊登来自钢铁企业、高等院校和科研院所单位的科技人员撰写的具有较高学术水平的学术性文章,也刊登来自钢铁企业生产第一线的工程技术人员撰写的技术革新、产品检测、生产管理等方面的技术交流文章。同时,还将刊登专家、学者针对国内外连铸技术发展动态、连铸生产存在问题、创新成果、实际生产应用技术的综述文章。

三 投稿须知

请登录《中国钢铁期刊网》网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击《连铸》的图标或刊名导航条,进入《连铸》期刊的首页了解详情。

欢迎投稿!感谢您对《连铸》的支持与理解!

四 联系方式

投稿网址:<http://www.chinamet.cn>

邮 箱:lianzhubianjibu@163.com

编 辑 部:张亚然 010-62183313

广告洽谈:高京慧 010-62183298

通讯地址:北京市海淀区学院南路76号