

综述

转底炉技术及其在含铁尘泥处理中的应用

李博¹, 毛艳丽¹, 王博蔚², 曲余玲¹, 景馨¹, 富琳¹

(1. 鞍钢集团经济发展研究院, 辽宁鞍山114009; 2. 鞍山钢铁集团有限公司, 辽宁鞍山114021)

摘要: 钢铁企业产生大量含铁尘泥, 且锌、碱金属含量较高, 不利于回收利用, 转底炉技术有效地解决了该问题, 使尘泥中的有价金属得到了很好的回收。概述了 Inmetco、Fastmet、Fastmelt 和 Itmk3 等处理含铁粉尘的转底炉工艺, 并详细介绍了国内外转底炉处理含铁粉尘的应用情况, 指出了转底炉技术存在的问题, 展望了转底炉处理含铁尘泥的未来发展方向。

关键词: 转底炉; 含铁粉尘; 金属化率

中图分类号: TF55 文献标识码: A 文章编号: 1006-4613(2017)06-0008-05

Treatment Process by Rotary Hearth Furnace and Its Application in Treatment of Iron-bearing Sludge

Li Bo¹, Mao Yanli¹, Wang Bowei², Qu Yuling¹, Jing Xin¹, Fu Lin¹

(1. Institutes of Economic Development Research of Ansteel Group Corporation, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Group Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: The large amount of iron-bearing sludge with high content of such elements as Zn, Na, K in steel-producing by steel enterprises was not easy to be recycled. However, the problem was solved effectively by using the treatment process by rotary hearth furnace and thus the valuable metals in the sludge can be recycled effectively. So such treatment processes for treating iron-bearing sludge by rotary hearth furnace as Inmetco, Fastmet, Fastmelt, Itmk3 were introduced. Meanwhile the applications of these processes at home and abroad were discussed in detail and the problem of the treatment process by rotary hearth furnace was proposed. At last the development trend of the treatment process by rotary hearth furnace for treating iron-bearing sludge in the future was forecasted.

Key words: rotary hearth furnace; iron-bearing sludge; metallization rate

钢铁企业尘泥总量一般为钢产量的 8%~12%, 锌、钠、钾等元素含量较高的粉尘约占钢铁厂粉尘量的 25%~30%, 这些锌、钠、钾元素含量高的粉尘如直接返回烧结, 将会造成锌、钠、钾元素的富集进而影响高炉顺行和寿命。转底炉技术有效地解决了该问题, 它将尘泥配料后直接还原, 生成直接还原铁, 并将锌、钠、钾等元素以粉尘的形式回收, 使尘泥中的有价金属得到了很好的回收, 目前已在国内外多家钢厂应用, 宝钢湛江钢铁、莱钢钢铁、日照钢铁等国内钢厂均有建成投产的转

底炉, 日本新日铁、韩国浦项等国外钢厂也投产若干座转底炉。本文对处理含铁尘泥的各种转底炉工艺和国内外钢厂的应用情况进行介绍。

1 转底炉工艺概况及特点比较

转底炉(RHF)是转底式加热炉(Rotary Hearth Furnace)的简称, 是指通过炉底转动将坯料送进的加热炉。最早的转底炉是用于轧钢的环形加热炉, 近十余年来移植为冶炼设备, 既可以用于铁精矿的煤基直接还原, 又可以处理钢铁厂的含铁尘泥^[1-2]。目前已工业化应用的转底炉工艺主要有: Inmetco、Fastmet、Fastmelt、ITmk3 和 DRyIron 工艺等。

李博, 硕士, 工程师, 2014年毕业于东北大学冶金工程专业。

E-mail: libo_ansteel@163.com

1.1 转底炉工艺概况

Inmetco 转底炉工艺由 International Metal Reclamation Company 公司开发,并在美国建成世界上第一座具有生产规模的转底炉,可从不锈钢粉尘中回收 Zn、Ni、Cr 等金属。该工艺首先将原料、燃料送入造球系统,造好的球团由加料溜槽加入转底炉内,球团在炉内 1 250~1 300 ℃高温下还原成直接还原铁,通过螺旋卸料机排出炉外^[3-4]。

Fastmet 工艺由美国 Midrex 公司与日本神户制钢合作开发,用以处理钢厂内部的含铁粉尘和铁屑等,球团在 1 250~1 300 ℃温度下被加热还原,其工艺流程与 Inmetco 工艺基本相似^[5]。由于 Fastmet 工艺产品中含有脉石、煤灰分等杂质,金属化率也依赖于原料品位,所以在此基础上,将埋弧电炉(ELF)设置在转底炉后处理直接还原铁,形成了 Fastmelt 工艺。

ITmk3 工艺(第三代煤基直接还原工艺)由神户制钢和美国 Midrex 公司联合开发,既可以还原铁矿石,又可以处理冶金厂产生的粉尘,以及其它含铁、铬、锌的冶金废弃物等。该工艺以粉矿、含铁粉尘和喷吹煤粉为原料,使用造/压球机等设备制成球团或团块,在 1 350~1 450 ℃的加热条件下完成还原、渗碳及熔融反应,并对排出的渣、铁进行分离^[6]。

DRyIron 工艺是由美国 MR&E 公司与罗杰钢公司(RSC)联合开发的煤基直接还原工艺,可以用来处理回收钢铁厂含锌粉尘。该工艺在原料准备阶段的特点是将焦粉(或煤粉)与铁矿粉(或者含铁固废)混合后直接压制成块,不使用粘结剂,并在转底炉单层装料,一般在 1 160~1 300 ℃下完成还原反应^[7-8]。

近年来,国内高校及相关科研机构也开发出了拥有自主知识产权的转底炉专利技术,其中北

京科技大学、北京神雾集团、钢铁研究总院、中冶赛迪等已分别与国内钢铁企业合作,建设并投产了多条转底炉生产线。

1.2 转底炉工艺特点比较

Inmetco 转底炉工艺还原温度范围略小于 Fastmet 工艺和 Fastmelt 工艺,但基本工艺流程相似,只在烧嘴形式、温度分布等方面有区别。ITmk3 工艺还原温度高于前面几种工艺,能使金属在球团还原时进一步熔化,并实现渣铁分离,在短时间内生产出成分如生铁的高纯度粒铁产品,且生产出的产品质量高于前述几种工艺。DRyIron 工艺其特征是用压块代替造球,简化了工艺流程,含锌粉尘压块在炉内的停留时间短,并且克服了煤基还原时带来的粉化、脉石含量高、硫高等缺点。

2 国内外钢厂转底炉工艺应用现状

转底炉工艺以其成本低、原燃料灵活、生产节奏适应性强、环境友好等优点,受到了国内外钢铁企业的青睐。转底炉工艺最先在美国兴起,并在日本发扬光大,近年来,引起了我国的广泛关注,国内钢厂通过技术引进等手段,已投产若干座转底炉,并取得了良好的效果。

2.1 国外钢厂转底炉工艺应用情况

国外钢厂共投产 13 座转底炉用于处理含铁尘泥,分别位于美国、日本、韩国等地,各钢厂转底炉使用工艺及主要技术指标见表 1。其中使用 Inmetco 工艺的转底炉 3 座,使用 Fastmet 工艺 6 座,使用 DryIron 工艺 4 座,上文提到的 Fastmelt 工艺和 ITmk3 工艺并未应用于含铁尘泥的处理。美国 Inmetco 公司、神户钢铁公司加古川厂和新日铁光厂的转底炉产能较小,其余几座转底炉产能均能达到 14 万 t/a 以上。

表 1 国外钢厂转底炉及主要技术指标

钢厂	工艺	产能/(万 t·a ⁻¹)	还原温度/℃	金属化率/%
美国 Inmetco 公司	Inmetco	9×1	1 250~1 300	96
神户钢铁公司加古川厂	Fastmet	1.4×1	1 300~1 350	85~92
新日铁广畑厂	Fastmet	19×3, 22×1		
新日铁光厂	DryIron	2.8×1	1 300	70~80
新日铁君津厂	Inmetco	18×1, 14×1	1 250~1 300	75~85
	DRyIron	31×1		
JFE 西日本钢铁福山厂	Fastmet	19×1		
韩国浦项浦项厂	DryIron	14×1		
韩国浦项光阳厂	DryIron	14×1		

2.1.1 美国 Inmetco 公司

美国 Inmetco 公司转底炉建于 1978 年, 采用的是自主研发的 Inmetco 工艺, 用于处理不锈钢粉尘以及含锌电池, 产能 9 万 t/a。该转底炉直径 16.7 m, 炉底宽 4.3 m, 炉底面积 146 m², 转速 15~20 r/min, 还原温度 1 250~1 300 ℃, 金属化率为 96%。

2.1.2 神户钢铁公司

神户钢铁公司加古川厂转底炉建于 2001 年, 采用的是 Fastmet 工艺, 用于处理钢铁厂的含铁、含锌粉尘, 产能为 1.4 万 t/a。该转底炉直径为 8.5 m, 炉底宽 1.25 m, 还原温度为 1 300~1 350 ℃, 还原时间为 12 min, DRI(直接还原铁)或 HBI(热压块铁)金属化率 85%~92%, 镍品位 95%~100%, 脱锌率超过 90%, 回收粉尘中锌含量为 44.70%^[9]。

2.1.3 新日铁公司

新日铁公司目前建有 8 座转底炉, 广畑厂 4 座, 光厂 1 座, 君津厂 3 座, 分别采用了 Fastmet 工艺、DryIron 工艺和 Inmetco 工艺。

新日铁广畑厂分别于 2000 年、2005 年和 2008 年建成 3 座转底炉, 采用 Fastmet 工艺, 用于处理钢铁厂含铁、含锌废弃物, 产能均为 19 万 t/a, 其中 3 号转底炉由新日铁工程与神钢的合资专业公司建设。该转底炉直径 21.5 m, 炉底宽 2.8 m, 转速 3.75 r/min, 设备作业率可达 90%以上。当炉子的生产率为 10 kg/(m²·h) 时, DRI 金属化率达 91.9%, 脱锌率为 94.0%, 其中 14 万 t 金属化球团供该厂转炉炼钢, 转底炉布袋过滤器回收的粉尘含锌量约为 63.4%(其中 78.9%是 ZnO), 铁含量小于 1%, 可作为炼锌厂原料。此后在 2011 年又建成产能为 22 万/a 的 4 号转底炉。

新日铁光厂转底炉建于 2001 年, 采用 DryIron 工艺, 用于处理不锈钢生产过程中产生的固体废弃物(电炉粉尘、酸洗沉渣和轧钢氧化铁皮等), 回收铁、锌、镍、铬等成分, 产能为 2.8 万 t/a。该转底炉直径为 15 m, 还原温度为 1 300 ℃, 还原时间为 15 min, 作业率为 80%左右, DRI 的金属化率为 70%~80%, DRI 产品用于电炉和 AOD 炉^[10]。

新日铁君津厂在 2000 年和 2002 年先后建成 2 座转底炉, 采用 Inmetco 工艺, 用于处理来自高炉和转炉的干粉尘和低水分污泥, 产能分别为 18 万 t/a 和 14 万 t/a, 还原时间分别为 10~20 min 和 15~30 min, 生球处理能力分别为 22 t/h 和 17 t/h。

该转底炉直径为 24 m, 炉底宽为 4 m, 炉膛面积为 230 m², 冶炼温度为 1 250~1 300 ℃, DRI 金属化率达到 75%~85%; 脱锌率可达 92%, 直接还原铁平均强度为 10 MPa^[11]。此后在 2008 年又建成 3 号转底炉, 采用 DRyIron 工艺, 产能为 31 万 t/a。

2.1.4 JFE 公司

JFE 西日本钢铁福山厂转底炉建于 2009 年, 采用 Fastmet 工艺, 用于处理高炉尘和转炉尘, 产能为 19 万 t/a, 产品 DRI 用于高炉, 回收的氧化锌出售。该转底炉直径为 27 m, 生产的 DRI 还原度大于 80%, 锌回收率大于 90%, 耐压性大于 100 kg/块。

2.1.5 韩国浦项

韩国浦项与日本新日铁合作, 分别在浦项厂和光阳厂各建成 1 座转底炉, 采用 DryIron 工艺, 用于处理含锌尘泥和轧钢铁鳞, 每座转底炉可生产 HBI(或 DRI)14 万 t/a, 总投资 1 300 亿韩元, 出资比例为 7:3。浦项厂转底炉从 2008 年 8 月开始建设, 于 2009 年 9 月建成, 生产的 HBI 大部分出口到新日铁; 而光阳厂转底炉从 2009 年 1 月开始建设, 于 2009 年底建成, 生产的 DRI 则全部被浦项公司利用。

浦项通过回收利用炼钢过程中产生的副产品增加铁水产量和公司利润, 同时, 通过将转底炉项目与联合国清洁发展机制项目(CDM)相结合, 以确保获得二氧化碳排放权。

2.2 国内转底炉工艺应用现状

国内钢厂共投产 7 座转底炉用于处理含铁尘泥, 2 座在建。各钢厂转底炉及主要技术指标见表 2。

表 2 国内钢厂转底炉及主要技术指标

钢厂	工艺	产能/ (万 t·a ⁻¹)	金属 化率/%
马鞍山 钢铁	DryIron	20×1	80
日照 钢铁	冷固结成型+转底炉直接还原 技术	20×2	75~85
莱芜 钢铁	转底炉直接还原处理钢铁厂 含锌尘泥成套工艺	32×1	
沙钢 集团	“蓄热式转底炉处理含锌尘泥、 综合回收铁/锌”的成套工艺技术	30×1	72~96
宝钢 湛江	中冶赛迪转底炉固废处理 成套技术	20×1	>75
燕山 钢铁	中冶赛迪转底炉固废处理 成套技术	20×1	>75

除马钢直接引进新日铁 DryIron 工艺外,其他几家钢厂均是采用国内高校或者科研机构成套技术。国内钢厂转底炉投产时间较晚,技术也较为成熟,建成转底炉产能均在 20 万 t/a 以上。

2.2.1 马鞍山钢铁公司

马鞍山钢铁公司引进新日铁 DryIron 工艺,于 2009 年 7 月建成投产 1 座产能为 20 万 t/a 的转底炉,用于处理高锌尘泥,该转底炉核心技术和设备由日本新日铁工程公司提供,马钢设计院负责国内的配套,之后,马钢设计院与日本新日铁公司合资成立马鞍山中日资源再生工程技术有限公司。该转底炉直径为 20.5 m,炉底宽为 4.9 m,作业率平均为 80% (最高可达 95%),成品球能耗为 248.57~297.43 kgce/t,系统脱锌率达 85% 以上,排碱率达 60%,烟尘浓度低于 50 mg/m³,回收含锌 55% 的粗锌粉为 0.3 万 t/a,生产金属化率大于 80% 的金属化球团 14 万 t/a^[12-13]。

2.2.2 日照钢铁公司

日照钢铁公司采用钢铁研究总院的“冷固成型+转底炉直接还原”技术,建成 2 条 20 万 t/a 的转底炉生产线,于 2010 年 5 月投产,其产品金属化球团产量为 14 万 t/a,可作为转炉炼钢的冷却剂原料,副产品粗锌粉尘外售作为炼锌的原料。该转底炉直径为 21 m,炉底宽为 5 m,炉膛内高为 1.5 m,炉底面积为 330 m²,烧嘴数 31 个,助燃空气预热器可以将助燃空气加热至 450~480 °C,煤气预热器将发生炉煤气加热至 250~280 °C,炉子作业率达到 90%,所生产的直接还原铁金属化率平均在 75%~85%,可日产 400~500 t 合格金属化球团,生产运行成本控制 800~900 元/t^[14-16]。

2.2.3 莱芜钢铁公司

山东莱芜钢铁公司与北京科技大学投资 2 亿元合作开发出转底炉直接还原处理钢铁厂含锌尘泥成套工艺,产能为 32 万 t/a,于 2010 年 11 月投产,用以处理烧结灰、高炉除尘灰、转炉灰、电炉除尘灰、轧钢污泥、转炉污泥等,可年产金属化球团 20 万 t、锌灰 0.2 万 t,生产的金属化球团供高炉或转炉使用,转底炉二次除尘灰经湿法富集锌后作为炼锌原料。该转底炉直径为 34.5 m,炉底宽为 5 m,生产的金属化球团金属化率大于 60%,TFe 品位大于 55%,脱锌率大于 93%,粗锌品位为 41.36%,粗锌产量为 2 000 t/a,脱钾、钠率大于 85%,综合能

耗为 227.86 kgce/t DIR^[17]。

2.2.4 沙钢集团

江苏沙钢集团与北京神雾集团投资 3 亿元联合开发出具有完全自主知识产权的“蓄热式转底炉处理含锌尘泥、综合回收铁/锌”的成套工艺技术和装备,建设了 1 座 30 万 t/a 的蓄热式转底炉,于 2011 年 12 月投产。该转底炉直径为 45 m,炉底宽为 5 m,转速为 20~30 min/r,金属化率在 72%~96% 之间,作业率达到 82.5%,脱锌率在 94%~97% 之间,锌元素平均回收率达到 95%,回收 ZnO 平均锌含量在 62% 以上(最高可达 70%),成品球能耗为 208.3 kgce/t。该转底炉技术不仅能回收高纯度 ZnO、金属铁,还能回收过热蒸汽,每年处理含铁污泥、除尘灰等冶金固废 37 万 t,可生产 30 万 t 金属化球团,并回收 ZnO 1.5 万 t,蒸汽 16 万 t,减排二氧化碳 3.12 万 t,生产运行成本为 776.41 元/t^[18]。

2.2.5 宝钢集团

宝钢湛江钢铁有限公司采用中冶赛迪转底炉固废处理成套技术,建成 1 座产能 20 万 t/a 转底炉,并于 2016 年 6 月热试成功。该项目投资约 2 亿元,可生产成品金属球约 14 万 t/a,粗锌粉约 1 万 t/a,脱锌率大于 85%,金属化率大于 75%,预期年收益达 5 000 余万元,可实现宝钢湛江钢铁厂含铁粉尘 100% 回收利用。之后,宝钢集团同中冶赛迪合作一个固废处置、资源综合利用项目,在上海本部拟建 2×20 万 t/a 转底炉,并按照两期分步实施建设,一期建设一条生产线,预留 1 条生产线二期建设。一期工程除转底炉本体及相应公辅设施外,还包括两期共用的原料接收、配料、混合系统、成品存储、原料除尘以及二期的部分土建设施。

2.2.6 燕山钢铁公司

河北钢铁集团燕山钢铁有限公司采用中冶赛迪集团自主研发的转底炉固废处理成套技术建成一座产能 20 万 t/a 的转底炉,用以处理各种高炉、转炉除尘灰,并于 2015 年 6 月热试成功,该转底炉脱锌率大于 85%,金属化率大于 75%,每年可获得约 14 万 t 金属化球团、0.5 万 t ZnO 粉尘、13 万 t 蒸汽。

3 转底炉存在的技术问题

转底炉技术虽然发展迅速,技术日趋成熟,但

由于工艺本身的局限性,仍存在如下的技术问题:

(1) 转底炉主要依靠辐射传热,且炉底料层较薄,所以普遍存在能耗高、生产率低、生产规模小的问题。

(2) 转底炉装置机械设备复杂,设备故障率高,运行维护费用较高。

(3) 转底炉处理的冶金尘泥中含有锌、铅、钾、钠等物质,由于这些物质熔点较低,导致转底炉烟气成分复杂,处理与回收利用困难。

(4) 转底炉生产原料成分复杂、开停炉频繁,致使耐材侵蚀速度快,制约了连续生产^[19-20]。

4 转底炉处理含铁尘泥的未来展望

随着环保标准收紧,钢铁厂环保压力大幅增加,对钢铁厂含铁粉尘的综合利用有着重大意义。Inmetco 和 Fastmet 工艺生产的 DRI 质量较差,不适合国内引进,后续开发的 Fastmelt 工艺能耗较高,也不符合我国国情。国内科研人员通过对现有技术研究,进一步优化主体系统和改进配套技术,提出了具有自主知识产权的研究成果。今后,我国应该坚持以经济效益为中心,以高效、优质、低耗、环保、安全为目标发展转底炉技术,在国家支持下,产学研相结合,对转底炉工艺的共性、关键技术难题开展技术攻关,对在转底炉运行条件下生成粒铁的的必要条件和充分条件开展基础研究,利用现有条件开展工业规模顺行生产条件的探索试验。

5 结语

转底炉技术最早发源于美国,发展于日本,技术日趋成熟后被国内钢厂引进。目前已工业化应用的转底炉工艺主要有 Inmetco、Fastmet、Fastmelt、ITmk3 和 DRyIron 工艺等,国内高校及科研机构在这些工艺的基础上开发出了具有自主知识产权的成套技术,并已投产应用于国内部分钢厂。由于工艺本身存在着局限性,转底炉仍存在着一些技术问题,但其在资源利用和环保方面的杰出表现,必然推动该技术的进一步发展与完善。

参考文献

[1] 全荣. 钢铁厂尘泥的回收利用[N]. 世界金属导报, 2012-10-

08(B08).

- [2] 黄洁. 谈转底炉的发展[J]. 中国冶金, 2007, 17(4): 23-25.
- [3] 段绍华. Inmetco 法——一种优秀的直接还原法和含铁尘泥的处理工艺[J]. 湖南冶金, 1994(1): 53-56.
- [4] 唐恩, 周强, 秦涔, 等. 转底炉处理含铁原料的直接还原技术——INMETCO 工艺最新介绍[C]// 2008 年非高炉炼铁年论文集. 延吉: 中国金属学会, 2008: 118-121.
- [5] 沙永志, 王凤歧, 周渝生. Fastmet 工艺评述[J]. 钢铁研究学报, 1996, 8(3): 55-58.
- [6] Kobayashi I, Tanigaki Y, Uragami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal [J]. Iron & Steel Maker, 2001(28): 19-22.
- [7] Rodney A. Apple. 处理含锌粉尘的转底炉工艺——DRYIRON [J]. 世界钢铁, 2003(6): 31-34.
- [8] 陈亮, 陈宏. 干铁法(DRyIron)煤基直接还原工艺[J]. 世界钢铁, 1999(3): 67-70.
- [9] James M. McClelland, Jr P. E. FASTMET Dust Pellet Reduction Operations Report on the First FASTMET Waste Recovery Plant [C]//60th Ironmaking Conference Proceedings. USA: The Iron & Steel Society, 2001: 629-640.
- [10] 郭廷杰. 日本钢铁厂含铁粉尘的综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2003(1): 4-5.
- [11] 织田博史, 茨城哲治, 安部洋一. 回转炉床法によるダストリサイクルシステム[J]. 新日铁技报, 2006(384): 134-139.
- [12] 翁荣平. 马钢转底炉系统试生产过程的实践摸索[C]//2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会论文集. 唐山: 中国金属学会与河北省冶金学会, 2011: 538-540.
- [13] 王敏, 薛逊, 曹志成, 等. 转底炉直接还原工艺的应用及发展趋势[J]. 天津冶金, 2013(1): 42-44.
- [14] 石国星, 谢国海. 2×20 万吨转底炉生产实践及发展展望[C]// 2011 年中国直接还原铁研讨会论文集. 北京: 中国金属学会非高炉炼铁委员会, 2011: 148-152.
- [15] 何鹏, 许海川. 日钢 2×20 万 t 转底炉生产实践 [J]. 环境工程, 2011(29): 189-192.
- [16] 许海川, 周和敏, 齐渊洪, 等. 转底炉处理钢厂固废工艺的工业化及其生产实践[J]. 钢铁, 2012, 47(3): 89-93.
- [17] 余雪峰, 薛庆国, 王静松, 等. 莱钢转底炉生产实践[C]// 全国非高炉炼铁年会. 沈阳, 2012: 114.
- [18] 陈黎明, 夏杰生, 施建兵, 等. 沙钢转底炉处理含锌尘泥工程项目通过国家鉴定[N]. 中国冶金报, 2012-10-25(B01).
- [19] 胡俊鸽, 杜续恩, 周文涛. 工业化转底炉炼铁技术的现状及评述[J]. 烧结球团, 2013, 38(1): 36-41.
- [20] 杜续恩, 王再义, 王俊山, 等. 转底炉工艺技术存在的问题与发展建议[J]. 冶金丛刊, 2013(2): 42-44.

(编辑 贺英群)

修回日期: 2017-05-26