应用研究

转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工艺技术

李 岩，赵志坚，冯怀萱，王静松，佘雪峰，薛庆国
（北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083）

摘要：为解决转底炉工艺工程化过程中遇到的问题，进一步优化工艺流程和技术参数，本文通过化学分析等手段明确含锌粉尘原料的理化性质，利用控制变量法分析球团成球性能和还原过程中金属化率的影响因素，通过分析二次粉尘的化学成分及物相组成推断换热系统中黏结物的形成机理，并对不同煤气作为燃料用于转底炉的能效进行对比分析。结果表明：当混合粉尘水分质量分数为12%、膨润土质量分数为5%时，采用强力混合机+对棍压球工艺生产可满足造球系统要求；在211～314 ℃条件下干燥脱水，生球的临界含水量为3.35%；当温度高于1 300 ℃时，球团的金属化率可达到85%以上，当碳氧比高于0.9时，球团的金属化率可达到70%以上；通过减少生球团中KCl质量分数可有效改善二次粉尘在换热系统中的黏结堵塞问题；在相同工艺条件下，使用高炉煤气、转炉煤气和发生炉煤气的能耗比焦炉煤气高约15%～20%。本文研究的基础数据可为转底炉工艺设计及应用提供借鉴和参考。

关键词：转底炉；含锌粉尘；直接还原；二次粉尘；能效分析
中图分类号：TF09；TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0106－10
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.091

Technology of treating zinc-containing dust and mud in iron and steel plant by rotary hearth furnace

LI Yan, ZHAO Zhijian, FENG Huaixuan, WANG Jingsong, SHE Xuefeng, XUE Qingguo
(*State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to solve the problems encountered in the process engineering of rotary hearth furnace, and further optimize the process flow and technical parameters, the physical and chemical properties of zinc-containing dust raw materials are determined by chemical analysis, and the influencing factors of pelletizing performance and metallization rate in reduction process are analyzed by control variable method. The formation mechanism of adhesive in heat exchange system is deduced by analyzing the chemical composition and phase composition of secondary dust, and the energy efficiency of different gases used in rotary hearth furnace is compared and analyzed. The results show that when the moisture mass fraction of mixed dust is 12% and bentonite is added with 5%, the production process of strong mixer + counter-bar pressing ball can meet the requirements of pelletizing system. Under the condition of drying and dewatering at 211～314 ℃, the critical water content of green pellets is 3.35%; When the temperature is higher than 1 300 ℃, the metallization rate of pellets can reach over 85%, and when the $n(C)/n(O)$ ratio is higher than 0.9, the metallization rate of pellets can reach over 70%. Reducing KCl mass fraction in green pellets can effectively solve the problems of secondary dust sticking and blocking in heat exchange system. Under the same process conditions, the energy consumption of blast furnace gas, converter gas and generator gas is about 15%～20% higher than that of coke oven gas. The basic data can provide references for the process design and application of rotary hearth furnace.

收稿日期：2022－10－21；**修回日期**：2022－10－28
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2019YFC1905705)；广东省科技计划资助项目(GDK2020002)
作者简介：李 岩(1995—)，男，博士研究生，从事冶金固废资源化利用的研究。
通信作者：佘雪峰(1978—)，男，博士生导师，教授，从事冶金固废综合利用相关工艺技术研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Key words：rotary hearth furnace；zinc-containing dust；direct reduction；secondary dust；energy efficiency analysis

随着钢铁工业的飞速发展，钢铁生产产生的粉尘对环境和人类的危害日益加重，这也对企业铁前生产造成危害[1-2]。钢铁企业一般将低锌含铁粉尘配入烧结使用，但中高锌粉尘配入烧结会降低烧结矿质量，并对高炉顺性和高炉寿命产生不良影响[3-4]。如何经济地实现含锌粉尘的高效利用成为难题。由于我国环保法规和产业政策日趋严格，2007 年以来转底炉工艺处理钢铁厂含锌粉尘技术陆续在莱钢、马钢、日钢和沙钢投产运行。在上述 4 座转底炉投产期间，钢铁企业和科研设计单位在设计、施工和生产过程中获得了宝贵的转底炉运行经验，为支撑转底炉工艺在国内钢铁企业大面积铺开起到了重要的作用。

本文通过阐述国内外转底炉工艺的发展现状，分析该工艺的优势以及工程化过程中存在的问题，并对含锌粉尘原料的理化性质、球团的成球性能、金属化率和二次粉尘的形成机理及转底炉能效问题等进行系统研究和分析，期望能够为转底炉工艺设计及应用提供借鉴和参考。

1　转底炉发展概述

转底炉工艺最初是一种煤基直接还原炼铁工艺[5]，后来用于处理钢铁厂含锌粉尘，尤其在日本和中国得到快速发展。20 世纪 50 年代，美国 Ross 公司发明了转底炉直接还原法，取名为 Fastmet 工艺。1974 年，加拿大的国际镍集团公司用转底炉处理不锈钢的氧化物废料，并命名为 Inmetco 工艺[6]。日本神户钢铁厂与美国 Midrex 公司联合开发转底炉直接还原新工艺，在 20 世纪 90 年代中后期取得突破性进展，生产出了高纯度粒铁，该产品被命名为 ITmk3。新日铁于 1998 年从美国 MaumeeR&E 公司引进转底炉技术处理钢铁厂粉尘，技术改进后在日本 Kimitsu、Hikari、Hirohata 等企业建造了工业生产规模的转底炉[7]。北京科技大学是我国最早研究转底炉的科研院所，在 1992、1996 和 2001 年分别在河南舞钢、鞍山和山西冀城建成了不同规模的转底炉。为了解决高炉锌的危害，2007 年北京科技大学与莱钢合作，建成了年处理粉尘量为 30 万吨的大型转底炉，并投入生产[8]。近年来，北京钢研总院、北京神雾研究院和中冶赛迪等单位也相继开展研究转底炉技术，在设计、施工和生产方面取得一定成果。

转底炉处理含锌粉尘的工艺流程如图 1 所示。由图 1 可知：各类含锌粉尘原料通过配料、成球、烘干单元后进入转底炉，并在 1 250 ~ 1 300 ℃的高温环境下发生还原和挥发等物理化学变化[9]，最后成为金属化球团用作高炉或转炉的原料；生成的高温烟气先通过余热锅炉回收余热，再经过除尘后排放大气，同时得到富锌二次粉尘，该粉尘可作为提锌及多种化工产品的原料。转底炉工艺可大幅降低铁前系统的锌、铅及碱金属负荷。

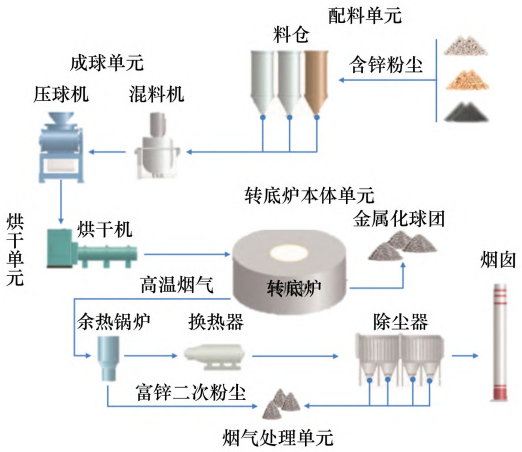


图 1　转底炉工艺流程

Fig. 1　Process flow chart of rotary hearth furnace

转底炉技术在美国、日本、韩国和中国均得到了应用[10-11]。日本建造的转底炉约有 10 座，技术来源均是新日铁公司，年处理能力最小为 1.4 万吨，最大为 31 万吨。韩国浦项引进新日铁的技术，建成 2 座年处理能力为 14 万吨的转底炉，生产的直接还原铁除一部分供浦项自用外，其余均出口到新日铁。目前国内建造

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的转底炉约有 26 座，主要技术来源为新日铁、北京科技大学、北京钢研总院、北京神雾研究院和中冶赛迪等单位。其中，台湾中钢和宝钢马钢的转底炉由新日铁提供技术支持；日照钢铁的转底炉由北京钢研总院提供技术支持；江苏沙钢、天津荣程和攀钢的转底炉由北京神雾研究院提供技术支持；宝钢湛江、湛江二期、河北燕钢、宝钢宝山、首钢京唐、新余钢铁、宝钢武钢、中天钢铁、江苏沙钢二期及东海特钢的转底炉由中冶赛迪提供技术支持。

转底炉工艺的优势在于流程紧凑，自动化程度高，比回转窑更容易操作和维护，且环保措施良好[12]。但转底炉在工程化应用的过程中遇到诸多问题，如球团的金属化率及强度低、炉底黏连、出料破损严重、能耗高等。

2 转底炉工艺单元及原理

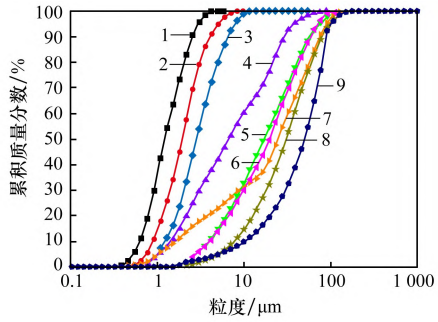
2.1 原料特性及配料模型

2.1.1 物理性质

国内某厂转底炉原料的粒度分布、粒度组成及其他检测数据分别如图 2、表 1 所示[13]。由图 2 可知，不同粉尘的粒度组成有很大差异。粉尘堆积密度与堆积角数值是设计料仓尺寸的重要参数。由表 1 可知：各种粉尘中，转炉环境灰的堆密度最大为 1.715 t/m^3，转炉细灰的堆密度最小为 0.778 t/m^3；轧线污泥的堆积角最大为 57.7°，转炉粗灰的堆积角最小为 33.8°。

2.1.2 化学成分

各种粉尘的化学成分如表2所示。由表2可知：高炉布袋除尘灰中碳质量分数较高，其在原料配比中可代替煤粉等充作还原剂使用；轧线污泥的含铁品位最高，为71.73%；转炉细



1—烧结电场灰；2—电炉灰；3—转炉细灰；4—转炉粗灰；5—高炉布袋灰；6—高炉槽灰；7—转炉环境灰；8—转炉污泥；9—轧线污泥。

图 2 粉尘的粒度分布

Fig. 2 Grain size distribution of dust

表 1 粉尘的堆密度、粒度组成和比表面积

Table 1 Bulk density, particle size composition and specific surface area of dust

粉尘名称	堆比重/(t·m^{-3})	堆积角/(°)	X_{50}/μm	比表面积/(m^2·g^{-1})
高炉布袋灰	0.800	39.2	17.041	0.730
转炉细灰	0.778	47.9	2.822	3.031
转炉粗灰	1.701	33.8	6.694	1.975
电炉灰	0.788	38.1	1.941	4.350
轧线污泥	1.582	57.7	27.846	0.667
转炉污泥	1.442	50.7	1.207	6.521
高炉槽灰	1.279	40.2	19.762	0.694
转炉环境灰	1.715	46.1	24.615	1.368

注：X_{50}为样品的累计粒级质量分数达到 50% 时所对应的粒径值。

表 2 各种粉尘的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of various dusts %

粉尘名称	Fe	MFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	K	Na	C	Zn
高炉布袋灰	17.03	1.65	7.88	2.87	2.18	0.7	0.76	0.28	34.00	16.60
转炉细灰	52.30	2.48	15.59	2.37	6.52	1.05	1.01	1.67	1.52	0.03
转炉粗灰	56.32	24.04	26.34	2.99	18.84	3.76	0.46	0.59	0.70	0.05
电炉灰	44.73	0.34	8.91	2.06	2.92	1.38	1.32	1.32	1.14	2.61
轧线污泥	71.73	0.13	43.86	1.39	0.02	0.03	0.14	0.36	1.12	0.13
转炉污泥	58.19	6.43	59.58	1.98	10.28	3.47	0.19	0.21	1.65	0.25
高炉槽灰	51.50	0.18	5.16	4.68	3.86	0.91	0.20	0.11	3.66	0.02
转炉环境灰	38.60	3.10	12.72	4.02	12.2	3.07	0.80	0.58	2.18	1.96

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

灰中碱金属质量分数高于一般除尘灰，钾、钠的质量分数分别为 1.01% 和 1.67%。

2.1.3　球团配料及配料计算模型

球团配料过程主要从化学成分和成球性两个方面考虑：① 配料时首先要满足 $n(C)/n(O) \geqslant 1$(摩尔比)，然后根据各种粉尘的产量及化学成分选择合适的配比；② 选择成球性能较好和较差的除尘灰搭配以期得到较高的成球率。

进行配料计算首先要确定计算所需的基本参数，其原则[14]：① 通过化验取得各种粉尘的化学成分；② 确定除高炉布袋灰以外各种粉尘的配比；③ 给出配料计算的 $n(C):n(O)$ 值，该值一般先确定为 1.0，或根据生产工艺需要做相应调整；④ 根据生产工艺需要，确定配料总量。根据碳氧摩尔比，得到配料计算模型如公式(1)～(4)所示。

$$C_{wt} = a \times A_C + b \times B_C + \cdots + x \times F_C \tag{1}$$

式中：C_{wt}为混合粉中 C 的质量分数,%；a、b、…、x 为混合粉尘中各类粉尘的质量分数,%；A_C、B_C、…、F_C 为各类粉尘中 C 的质量分数,%。

$$O_{wt} = O_{Fe} + O_{Zn} \tag{2}$$

$$O'_{Fe} = O_{FeO} + O_{Fe_2O_3} \tag{3}$$

式中：O_{wt}、O_{Fe}、O_{Zn}分别为混合粉尘、铁氧化物、锌氧化物中 C 的质量分数,%；O'_{Fe}为混合粉尘中 Fe 的质量分数,%；O_{FeO}、$O_{Fe_2O_3}$分别为 FeO 氧化物、Fe_2O_3 氧化物中 O 的质量分数,%。

当碳氧摩尔比为 1.0 时：

$$\left(\frac{C_{wt}}{12}\right) / \left(\frac{O_{wt}}{16}\right) = 1.0 \tag{4}$$

2.2　成球工艺单元

球团制备是转底炉工艺处理含锌尘泥的重要工序，通常选择圆盘造球或对辊压球。圆盘造球工艺运行成本低且设备磨损小，但对原料要求严格，需要 -0.045 mm 粒级占比达 70% 以上。对辊压球工艺对原料粒度组成和水分的要求范围较宽，其单体设备产能大于圆盘造球[15]。因此，实际应用应根据原料情况选择合适的造球工艺。球团的性能受多种因素影响，本文以抗压和落下强度为标准，分析混匀方式、水分质量分数和黏结剂添加量对球团质量的影响。

2.2.1　混匀方式

原料配比如图 3 所示。在实际生产中，混合粉尘的碳氧比为 1.0、膨润土配比为 3%、水分控制为 12.5%，采用混碾机和强力混合机分别对混合料处理后进行压球，获得的生球和烘干后的干球的抗压和落下强度如图 4 所示。由图 4 可知：当混合粉尘处理 1、2 min 时，两种混合方式所得球团的指标基本没有差异；当处理时间为 3 min 时，强力混合机的处理效果优于混碾机。与混辗机相比，强力混合机可以使起黏结作用的膨润土和 CaO 分散程度增加，改善生球和干球的质量。

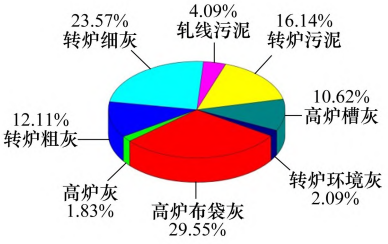


图 3　各类粉尘的配加量

Fig. 3　The amount of each type of dust dispensed

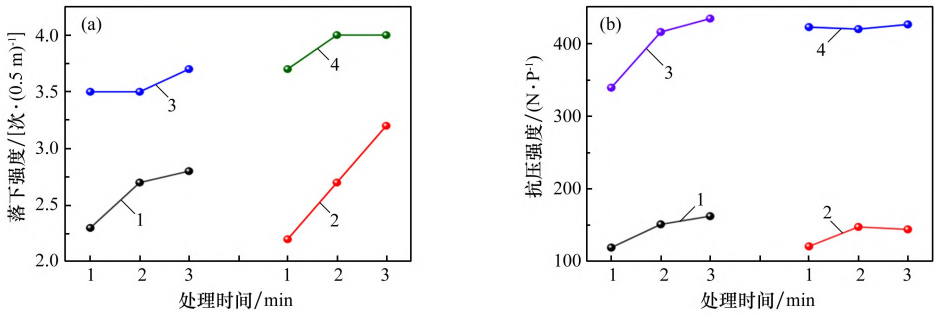
2.2.2　水分质量分数

在其他工艺参数一定时，混合料水质量分数对成球性能的影响如图 5 所示。由图 5 可知：湿球落下强度随水分的增加而增大，干球落下强度在水分质量分数为 10%～12% 时出现极大值。在通常情况下，压球机的压力、粉尘在球窝的停留时间等与物料水分质量分数紧密相关、互相影响。在试验条件下，当压球线压力为 3 t/cm 时，最佳配水量为 12% 左右。

2.2.3　黏结剂添加量

当混合粉尘的碳氧比为 1.0、水分质量分数为 12% 时，膨润土添加量对成球性能的影响如图 6 所示。由图 6 可知：随着膨润土用量的增加，球团的性能显著增强。当膨润土用量达到 5% 以上才能达到造球系统的要求，但膨润土用量过多会降低金属化球团的品位和增加能耗。因此开发有机黏结剂或复合黏结剂来解决

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

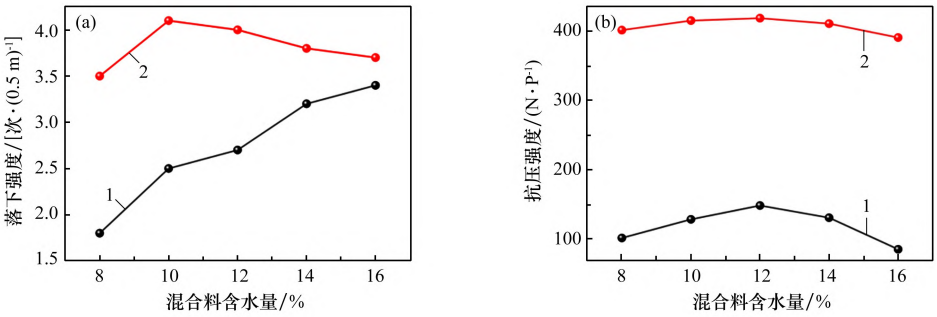


（a）落下强度；（b）抗压强度

1—混辗湿球；2—强力湿球；3—混辗干球；4—强力干球。

图 4 混料方式对成球性能的影响

Fig. 4 Effect of mixing method on pellet forming properties

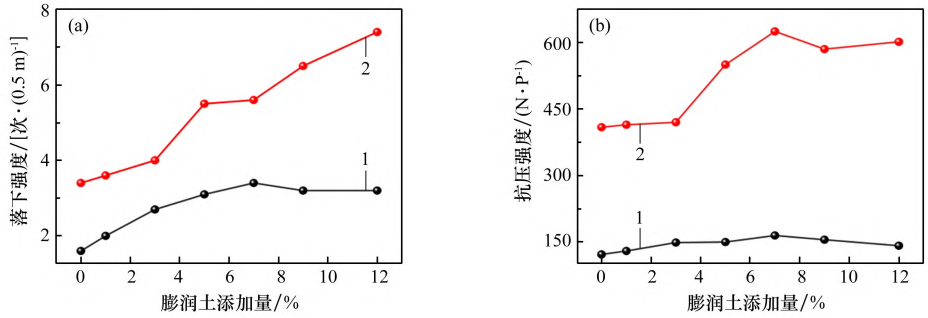


（a）落下强度；（b）抗压强度

1—湿球；2—干球。

图 5 含水量对成球性能的影响

Fig. 5 Effect of water content on pellet forming properties



（a）落下强度；（b）抗压强度

1—湿球；2—干球。

图 6 膨润土添加量对成球性能的影响

Fig. 6 Effect of bentonite addition on pellet forming properties

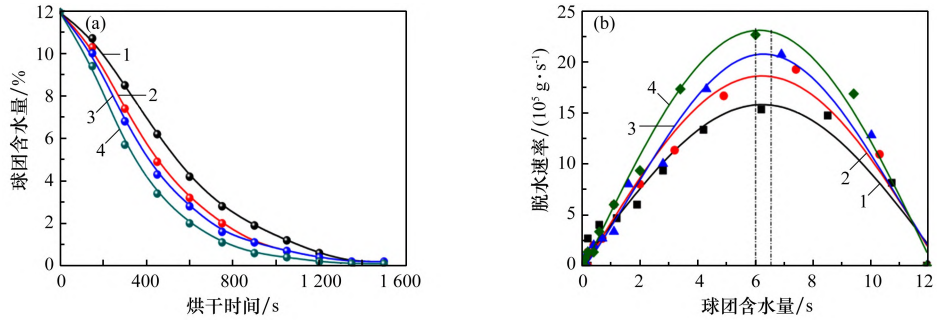
生球质量问题是未来发展方向。

2.3 烘干工艺单元

未经干燥的生球进入转底炉易使球团粉化，导致生产率降低[16]。按照 $n(C):n(O)=1.0$ 对混尘进行混合，设置水分质量分数为 12%、膨润土添加量为 3%，然后压球，得到烘干温度对球团的影响如图 7 所示。由图 7 可知：在不同温度下，干燥开始时脱水速率不断增加，到达峰值后开始下降。脱水速率没有明显的恒速区间，此结果与 PICKLES[17] 的研究类似。

当球团表面脱水速率大于内部水分向外的扩散速率时，脱水速率开始减慢。此时，球团

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）温度；（b）脱水速率

干燥温度/℃：1—211；2—254；3—282；4—314。

图 7　烘干对成球性能的影响

Fig. 7　Effect of drying on pellet forming properties

的含水量称为临界含水量，用 $w_{临界}$ 表示；脱水速率称为临界脱水速率，用 $N_{临界}$ 表示。临界含水量的确定是烘干工艺球团终点水分控制的一项设计依据。利用图切法确定不同温度下的 $w_{临界}$ 与 $N_{临界}$，结果如表 3 所示。

表 3　不同温度下的特征值

Table 3　Characteristic values at different temperatures

项目	211 ℃	254 ℃	282 ℃	314 ℃
$w_{临界}$/%	3.3	3.0	3.7	3.4
$N_{临界}$/(10^5 g·s^{-1})	11.77	12.21	15.85	17.33

将不同温度下的临界含水量通过水平最小二乘法求解，得出临界含水量为 3.35%。因此，在 211 ~ 314 ℃烘干条件下的临界含水量与烘干温度和脱水速率无关。

2.4　转底炉本体单元

将含锌粉尘制成球团后进行直接还原是转底炉工艺的核心单元。大部分铁氧化物被还原成金属铁，球团变为金属化球团，球团中的有价元素挥发脱除[18-19]。配料后粉尘的化学成分如表 4 所示。经过混匀、压球、烘干后的球团放入高温硅钼炉中还原，到达设定时间取出。

表 4　混合粉尘的主要化学成分(质量分数)

Table 4　Main chemical composition of mixed dust　　%

TFe	MFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Pb	K	Na	C	Zn
43.60	5.12	21.58	2.76	6.84	1.66	0.77	0.62	0.64	11.26	5.05

2.4.1　球团金属化率

球团金属化率在不同因素下的变化规律如图 8 所示。由图 8(a)可知：当 $n(C):n(O)=1$ 时，随着温度的升高，铁氧化物还原达到平衡金属化率的时间越短；当还原温度高于 1 300 ℃时，球团金属化率达到 85% 以上。由图 8(b)可知：当温度为 1 300 ℃时，随着当 $n(C):n(O)$ 的增加，球团的金属化率也在增加；当还原时间超过 9 min 时，不同 $n(C):n(O)$ 球团的金属化率开始出现差别。若要求球团金属化率大于 70%，则 $n(C):n(O)$ 应不低于 0.9。

2.4.2　锌、铅元素脱除率

温度对锌、铅脱除的影响如图 9 所示。由图 9 可知：当球团 $n(C):n(O)$ 为 1 时，随着温度的升高，球团中锌和铅元素的脱除速率越快；在 1 300、1 330 ℃条件下只需还原 15 min，球团中锌、铅元素脱除率就达到 99% 以上。脱铅率的曲线斜率比脱锌率更大，这表明在还原过程中铅比锌更加容易脱除[20]。

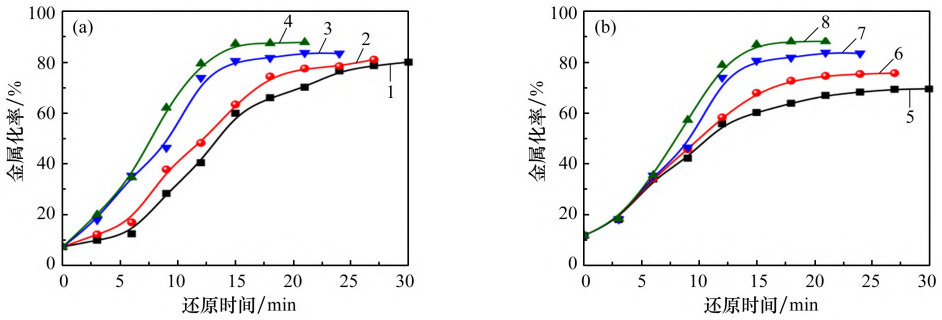
2.4.3　钾、钠元素脱除率

温度对钾、钠脱除的影响如图 10 所示。由图 10 可知：当环境温度为 1 330 ℃时，球团挥发脱钾达到平衡的时间比 1 200 ℃要短 15 min；在 1 330 ℃环境温度条件下，15 min 时钾、钠的质量分数即可降低到 0.1% 左右。

2.5　二次粉尘特性

含碳球团中的 Zn、K 等元素在高温还原过程中被脱除进入烟气，这些烟气经除尘处理后

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



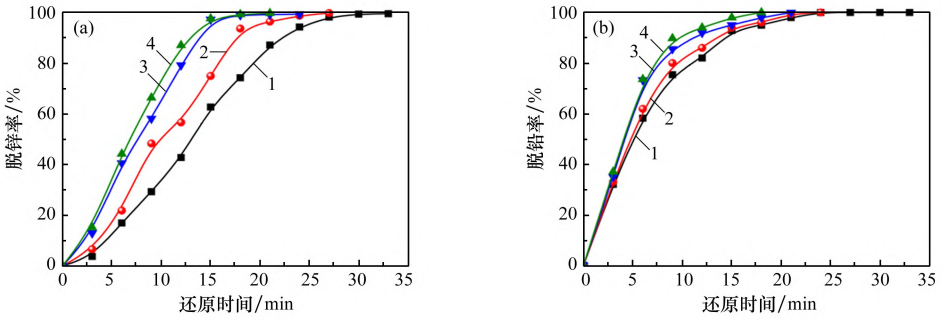
（a）不同温度；（b）不同碳氧摩尔比

温度/℃：1—1 200；2—1 250；3—1 300；4—1 330。

$n(C):n(O)$：5—0.8；6—0.9；7—1.0；8—1.1。

图 8 不同因素下还原时间与金属化率的关系

Fig. 8 Relationship between reduction time and metallization rate under different factors

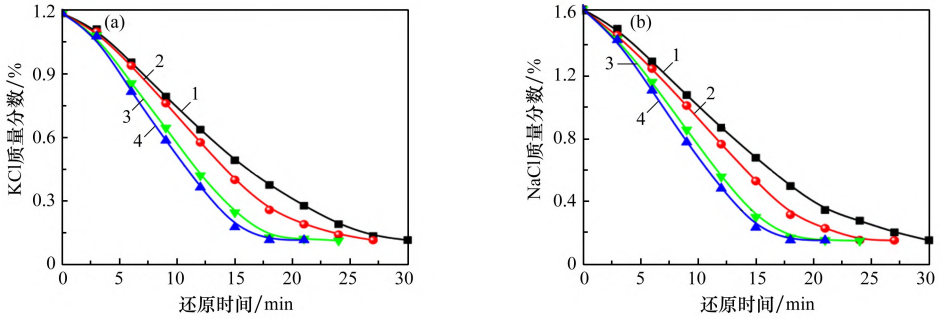


（a）脱锌率；（b）脱铅率

温度/℃：1—1 200；2—1 250；3—1 300；4—1 330。

图 9 不同温度对锌、铅脱除率的影响

Fig. 9 Effect of different temperatures on the removal rate of zinc and lead



（a）KCl；（b）NaCl

温度/℃：1—1 200；2—1 250；3—1 300；4—1 330。

图 10 不同温度下 NaCl、KCl 质量分数与还原时间的关系

Fig. 10 Relationship between NaCl and KCl content and reduction time at different temperatures

可得到富锌二次粉尘。二次粉尘的产生温度以及其在转底炉内不同位置的产生量等技术参数，直接影响到转底炉工艺的烟气处理、余热利用等关键设计参数[21-22]。

王静松等[20]、佘雪峰等[22]通过内配碳球团直接还原试验模拟转底炉工艺，对工业换热系统管道中的二次粉尘黏结物的成分进行了测定，得到相似的结论：其主要元素为 Zn、Pb、K 和 Fe，物相组成主要为 Fe_2O_3、ZnO、PbO、KCl、$ZnCl_2$ 和 $ZnFe_2O_3$。其中：Fe_2O_3 主要来源于含碳球团；ZnO 和 PbO 来源于球团中 Zn、Pb 元素的还原再氧化；KCl 来源于球团中 KCl 的挥发。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据此推断二次粉尘黏结物的形成过程如图 11 所示。由图 11 可知：球团中的含铁颗粒和挥发的 KCl、Zn、Pb 物质在热气流的作用下进入气相；随着换热的进行，气相中的 KCl 冷凝附着在换热器壁上，Zn 和 Pb 再次被氧化成 ZnO、PbO，并以小颗粒的形式吸附在换热器壁上；之后，ZnO 和 Fe_2O_3 发生反应生成 $ZnFe_2O_3$ 并吸附更多的灰尘形成初始的黏结物；最后，气相中的 Zn 单质与液态的 KCl 接触生成 $ZnCl_2$ 和 K_2O，凝结的 KCl 和 $ZnCl_2$ 等向初始黏结物内部渗透扩散，最终形成致密的黏结相。由此可知：转底炉所用生球团中 KCl 质量分数越高，二次粉尘在换热系统中的黏结现象就会越严重。

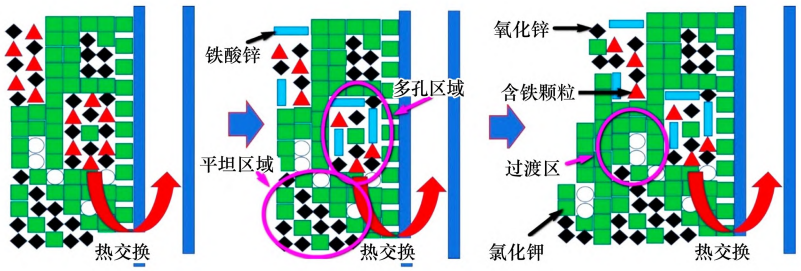


图 11　黏结物形成机理

Fig. 11　Formation mechanism of the bonding

二次粉尘的再次利用也受到众多学者的研究。王静松等[23]研究了二次粉尘的湿法处理工艺，其通过水浸、酸溶等工序实现粉尘中有价元素的梯级分离和提取，并制备出 KCl、NaCl 和 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 等高附加值产品。工艺流程如图 12 所示。

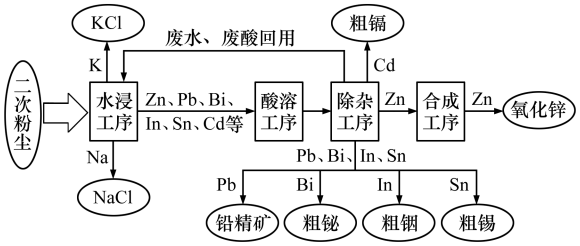


图 12　二次粉尘的湿法处理工艺

Fig. 12　Wet treatment process of secondary dust

2.6　不同煤气用于转底炉的能效分析

转底炉炉膛热量主要来源于煤气的燃烧。各种煤气的成分如表 5 所示。由表 5 可知：不同煤气做为转底炉的燃料时，转底炉的炉膛温度和煤气消耗值均会发生变化。

表 5　各种煤气的主要成分(体积分数)

Table 5　Main composition of various gases　　%

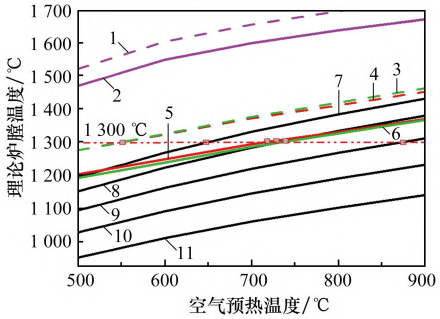
项目	种类	H_2	CO	CH_4	C_2H_4	N_2	CO_2	O_2	H_2O
高炉煤气	干成分	3.00	23.00	0.50	—	55.00	18.00	0.50	—
	湿成分	2.87	21.99	0.48	—	52.58	17.21	0.48	4.40
焦炉煤气	干成分	56.00	6.00	26.00	3.00	5.50	3.00	0.50	—
	湿成分	54.66	5.86	25.38	2.93	5.37	2.93	0.49	2.40
转炉煤气	干成分	1.50	63.50	—	—	19.00	15.50	0.50	—
	湿成分	1.48	62.61	—	—	18.73	15.28	0.49	1.40
发生炉煤气	干成分	14.00	30.00	2.00	—	44.50	9.00	0.50	—
	湿成分	13.64	29.38	1.98	—	44.26	8.85	0.48	1.40

2.6.1　炉膛温度对比

不同煤气富氧条件对炉膛温度的影响规律如图 13 所示。由图 13 可知：4 种煤气单独作为燃气时，理论炉膛温度均随空气预热温度的提高而升高。采用焦炉煤气为燃气，当空气预热温度大于 500 ℃ 时，理论炉膛温度远远超过

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1 300 ℃；采用转炉煤气和发生炉煤气为燃气，当空气预热温度为 720 ℃时，理论炉膛温度可达到 1 300 ℃，且两者对理论炉膛温度影响相似。在不富氧的条件下高炉煤气作为转底炉的燃气难以获得所需的理论炉膛温度。



1—COG26% O_2；2—COG21% O_2；3—LDG26% O_2；4—CG26% O_2；5—CG21% O_2；6—LDG21% O_2；7—BFG41% O_2；8—BFG36% O_2；9—BFG31% O_2；10—BFG26% O_2；11—BFG21% O_2。

图 13 不同煤气富氧条件对转底炉炉膛温度的影响规律

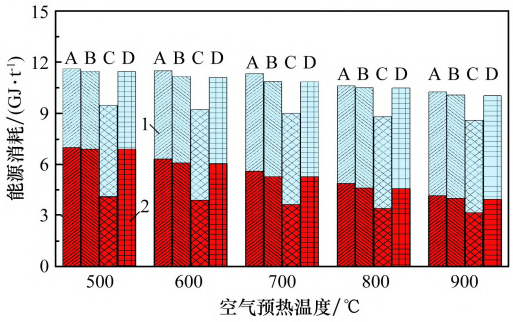
Fig. 13 Effect law of different gas oxygen enrichment conditions on furnace temperature of rotary hearth furnace

（注：COG 为焦炉煤气；LDG 为发生炉煤气；CG 为转炉煤气；BFG 为高炉煤气）

2.6.2 煤气消耗量对比

在原料固定的条件下，采用不同煤气作为转底炉燃气时，单位产品的煤气消耗差异很大。不同空气预热温度下煤气的消耗情况如图 14 所示。由图 14 可知：当预热空气温度相同时，采用焦炉煤气生产单位产品所需要的总能源消耗最低，当空气预热温度为 500 ℃时，能源消耗为 9.45 GJ/t，其中焦炉煤气提供的热量占总热量的 43.51%；随着空气预热温度的提高，焦炉煤气的使用量逐步降低，当空气预热温度为 900 ℃时，总能源消耗降低到 8.59 GJ/t，此时焦炉煤气燃烧提供的热量占总热量的 37.0%。这是由于预热空气带入炉内的物理热增加，同时产生的烟气量减少均会降低总能源消耗，因此提高空气预热温度是降低能源消耗的最有效手段。

采用另外 3 种煤气作为转底炉的燃气时，其规律趋势与焦炉煤气相似，但由于后者燃烧后的废气体积更大，使得在相同工艺条件下后者的能源消耗比焦炉煤气高约 15%～20%，该部分能量转化为烟气余热，因此需要考虑高效余热回收系统以降低能源消耗。



A—高炉煤气；B—发生炉煤气；C—焦炉煤气；D—转炉煤气。1—非煤气提供热量；2—煤气提供热量。

图 14 不同煤气用于转底炉的能源消耗

Fig. 14 Energy consumption of different gas for rotary hearth furnace

3 结 语

转底炉技术在处理含锌尘泥方面具有经济环保、更易操作和维护等优势，但仍然存在一些技术挑战和局限性。本文通过对转底炉技术的配料、造球、直接还原和二次粉尘等单元的研究，得出如下结论。

（1）强力混合机混匀效果优于混碾机，加入黏结剂能有效改善生球质量，当膨润土的用量大于 5% 时能达到生球质量要求；在 211～314 ℃条件下干燥脱水，生球的临界含水量为 3.35%；当还原温度高于 1 300 ℃时，球团金属化率可达到 85% 以上，当碳氧摩尔比高于 0.9，球团金属化率可达到 70% 以上。

（2）通过对二次粉尘的理化特性进行分析，得出换热系统中二次粉尘黏结物的成因：球团中的含铁颗粒和挥发性的 KCl、Zn、Pb 等物质，随着换热的进行，KCl 冷凝附着在换热器壁上，Zn 和 Pb 再次被氧化成 ZnO、PbO，并以小颗粒的形式吸附在换热器壁上；之后，ZnO 和 Fe_2O_3 发生反应生成 $ZnFe_2O_3$ 并吸附更多的灰尘形成初始的黏结物；最后，气相中的 Zn 单质与液态的 KCl 接触生成 $ZnCl_2$ 和 K_2O，凝结的 KCl 和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$ZnCl_2$ 等向初始黏结物内部渗透扩散，最终形成致密的黏结相。

（3）在相同工艺条件下高炉煤气、转炉煤气和发生炉煤气的能耗比焦炉煤气高约 15%～20%。

参考文献：

[1] KHAN S, NAUSHAD M, LIMA E C, et al. Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies: A review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417, 126039.

[2] 张建良，李洋，袁骧，等. 中国钢铁企业尘泥处理现状及展望[J]. 钢铁，2018，53(6)：1－10.
ZHANG Jianliang, LI Yang, YUAN Xiang, et al. Present situation and prospect of dust treatment in Chinese iron and steel enterprises[J]. Iron and Steel, 2018, 53(6): 1－10.

[3] 张鲁芳. 我国转底炉处理钢铁厂含锌粉尘技术研究[J]. 烧结球团，2012，37(3)：57－60.
ZHANG Lufang. Study on treatment of Zn-containing dust of iron and steel plants by rotary hearth furnace process in China [J]. Sintering and Pelletizing, 2012, 37(3): 57－60.

[4] 佘雪峰，薛庆国，王静松，等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用及相关处理工艺比较[J]. 炼铁，2010，29(4)：56－60.
SHE Xuefeng, XUE Qingguo, WANG Jingsong, et al. Comprehensive utilization of zinc-containing dust in iron and steel plants and comparison of related treatment processes[J]. Ironmaking, 2010, 29(4): 56－60.

[5] 王广，薛庆国，佘雪峰，等. 转炉细灰对转底炉直接还原含碳球团性能的影响[J]. 武汉科技大学学报，2014，37(6)：424.
WANG Guang, XUE Qingguo, SHE Xuefeng, et al. Effect of BOF fine dust on the performance of carbon-contained pellets for RHF direct reduction process [J]. J Wuhan Univ Sci Technol, 2014, 37(6): 424.

[6] 黄洁. 谈转底炉的发展[J]. 中国冶金，2007，17(4)：23－25.
HUANG Jie. Development of rotary hearth furnace[J]. China Metallurgy, 2007, 17(4): 23－25.

[7] 佘雪峰，孔令坛. 转底炉的发展及其功能[J]. 山东冶金，2015，37(6)：1－4.
SHE Xuefeng, KONG Lingtan. Development and function of rotary hearth furnace[J]. Shandong Metallurgy, 2015, 37(6): 1－4.

[8] 朱荣，任江涛，刘纲，等. 转底炉工艺的发展与实践[J]. 北京科技大学学报，2007，29(增刊 1)：171－174.
ZHU Rong, REN Jiangtao, LIU Gang, et al. Development and practice on the rotary hearth furnace ironmakingprocess[J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2007, 29(Suppl 1): 171－174.

[9] LIN X, PENG Z, YAN J, et al. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 1079－1100.

[10] LI Yan, FENG Huaixuan, WANG Jingsong, et al. Current status of the technology for utilizing difficult-to-treat dust and sludge produced from the steel industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 367: 132909.

[11] 王冬斌，梁精龙，李慧，等. 冶金含锌粉尘中回收氧化锌的工艺综述[J]. 中国有色冶金，2018，47(6)：39－43.
WANG Dongbin, LIANG Jinglong, LI Hui, et al. A review of recovery of zinc oxide from metallurgical zinc dust[J]. China Nonferrous Metall, 2018, 47(6): 39－43.

[12] SUETENS T, KLAASEN B, VAN A K, et al. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy-efficiency[J]. J. Clean. Prod, 2014, 65: 152－167.

[13] 佘雪峰，薛庆国，董杰吉，等. 钢铁厂典型粉尘的基本物性与利用途径分析[J]. 过程工程学报，2009，9(S1)：7－12.
SHE Xuefeng, XUE Qingguo, DONG Jieji, et al. Analysis of basic physical properties and utilization ways of typical dust in iron and steel plants [J]. Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 7－12.

[14] 陆颖. 转底炉直接还原处理含锌尘泥配料模型研究[J]. 河南科技，2013(17)：50－52.
LU Ying. Study on burden model for direct reduction of zinc bearing dust and sludge in rotary hearth furnace[J]. Henan Science and Technology, 2013(17): 50－52.

[15] 王昌安，朱德庆. 润磨活化机理初探[J]. 钢铁研究，2003，135(6)：23－27.
WANG Changan, ZHU Deqing. A preliminary investigation of the activation mechanism of wet grinding[J]. Steel Research, 2003, 135(6): 23－27.

[16] HAYASHI N, KASAI E, NAKAMURA T. A new drying process of dusts and sludge by employing heat storage materials[J]. ISIJ international, 2010, 50(9): 1282－1290.

[17] PICKLES C A. Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores[J]. Minerals Engineering, 2003, 16: 1327－1338.

[18] 杜亚星，王广，王静松，等. 含钛铌铁精矿含碳球团直接还原试验研究[J]. 烧结球团，2017，42(6)：51－56.
DU Yaxing, WANG Guang, WANG Jingsong, et al. Experimental study on direct reduction of carbon-containing pellets of titanium-bearing niobium iron concentrate[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(6): 51－56.

[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.
HU Junge, DU Xuen, ZHOU Wentao. Present situation of industrialized RHF technology and its review[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(1): 36－41.

（下转第 145 页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

carbonation of steel slag and its application in building materials[J]. Materials Reports,2020,34(3):132 – 138.

[8] LIU Z,ZENG H,WANG F. Development of high performance carbonatable concrete for steel slag valorization[J]. Construction and Building Materials,2021,291:123317.

[9] YANG S,MO L,DENG M. Effects of ethylenediamine tetraacetic acid(EDTA)on the accelerated carbonation and properties of artificial steel slag aggregates[J]. Cement and Concrete Composites,2021,118:103948.

[10] 张丰,莫立武,邓敏. 碳化养护对钢渣混凝土强度和体积稳定性的影响[J]. 硅酸盐学报,2016(5):1 – 7.
ZHANG Feng,MO Liwu,DENG Min,et al. Effect of carbonation curing on mechanical strength and volume stability of steel slag concrete[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2016(5):1 – 7.

[11] JIANG Y,LING T. Production of artificial aggregates from steel-making slag:Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing[J]. Journal of CO_2 Utilization,2020,36:135 – 144.

[12] GHOULEH Z,SHAO Y,GUTHRIE R,et al. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete[J]. Journal of CO_2 Utilization,2017,18:125 – 138.

[13] MO L,ZHANG F,DENG M,et al. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates[J]. Cement and Concrete Composites,2017,83:138 – 145.

[14] GHOULEH Z,CELIKIN M,GUTHRIE R I,et al. Microstructure of carbonation-activated steel slag binder[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(9):4018217.

[15] LIU G,SCHOLLBACH K,LI P,et al. Valorization of converter steel slag into eco-friendly ultra-high performance concrete by ambient CO_2 pre-treatment[J]. Construction and Building Materials,2021,280:122580.

[16] 李建华,杨钱荣,张方俊. 钢渣透水混凝土制备及其影响因素研究[J]. 粉煤灰综合利用,2014(5):3 – 8.
LI Jianhua,YANG Qianrong,ZHANG Fangjun. Preparation of steel slag pervious concrete and its influencing factors[J]. Fly Ash comprehensive Utilization,2014(5):3 – 8.

[17] 冯敏,郭鹏,王瑞燕. 钢渣透水混凝土影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(2):246 – 249.
FENG Min,GUO Peng,WANG Ruiyan. Study on influencing factors of steel slag pervious concrete[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),2011,30(2):246 – 249.

(上接第 48 页)

[25] 汪学彬,杨重卿,张祥伟,等. 工业固体废弃物制备陶粒及其应用研究进展[J]. 中国粉体技术,2021,27(2):1 – 8.
WANG X B,YANG C Q,ZHANG X W,et al. Preparation and application of ceramsite prepared from industrial solid waste:a review[J]. China Powder Science and Technology,2021,27(2):1 – 8.

[26] 张其勇,徐郡,赵蔚琳. 轻质陶粒的制备与性能研究[J]. 砖瓦,2018(8):18 – 22.
ZHANG Q Y,XU J,ZHAO W L. Study on preparation and properties of light ceramsite[J]. Brick and tile magazine,2018(8):18 – 22.

[27] SUN Y,LI J,CHEN Z,et al. Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash:Mechanism and optimization[J]. Construction and Building Materials,2021,287:122993.

[28] MI H C,YI L S,WU Q,et al. Preparation of high-strength ceramsite from red mud,fly ash,and bentonite[J]. Ceramics International,2021,47(13):18218 – 18229.

(上接第 115 页)

[20] 王静松,杨慧贤,佘雪峰,等. 转底炉处理冶金粉尘工艺的锌钾钠脱除及烟气形成[J]. 重庆大学学报,2011,34(3):82 – 87.
WANG Jingsong,YANG Huixian,SHE Xuefeng,et al. Study on mechanism of Zn,K,Na removal and flue gas formation in RHF direct reduction treat metallurgical dust process[J]. J Chongqing Univ,2011,34(3):82 – 87.

[21] 唐茜. 转底炉二次粉尘中有价元素提取工艺的实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
TANG Qian. Experimental study on the extraction process of valuable elements from the secondary dust of rotary hearth furnace[D]. Chongqing:Chongqing University,2018.

[22] PAN Y,SHE X,WANG J,et al. Study of the deposition formation mechanism in the heat exchanger system of RHF[J]. Metals,2019,9(4):443.

[23] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737 – 1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in the treatment and full resource utilization of refractory dust and sludge in the steel industry cluster[J]. Journal of Engineering Science,2021,43(12):1737 – 1749.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net