

# 稀土精矿冶炼炉窑的高温烟气资源化利用研究

李 博<sup>1</sup>, 戎 旭<sup>1,3</sup>, 姚 远<sup>1</sup>, 魏小林<sup>\*1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;  
3. 中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 稀土精矿冶炼炉窑是稀土生产工艺的核心装备,会产生大量含氟酸性高温烟气,其中氟化物 0.81%、硫酸雾 1.06%、二氧化硫 0.23%,同时温度达 300℃以上,烟气余热丰富,烟气成分的复杂性和特殊性为余热及资源回收利用带来挑战。介绍一种新的稀土精矿冶炼炉窑的高温烟气余热利用技术及其现场中试情况。根据物质流、能量流守恒计算了烟气流量、温度、组分浓度以及余热,分析了余热回收的可行性和技术难点;提出了新的烟气干法余热回收工艺,依据能源梯级利用原则,通过余热锅炉实现烟气分级降温和余热回收,同时回收高浓度冷凝酸并副产余热蒸汽;该工艺在稀土精矿冶炼炉窑系统进行了现场中试,采集并分析 72 h 中试数据,取得良好资源回收效果。

**关键词:** 有色金属;稀土精炼;炉窑烟气;余热利用;资源回收

**中图分类号:** TF845 **文献标识码:** A

## 0 引 言

稀土广泛应用于先进材料如催化剂、稀土永磁材料、储氢合金、荧光材料、抛光粉等的生产<sup>[1]</sup>。稀土作为重要的战略资源,受到国内外的高度重视。由于稀土资源紧缺,国外对于稀土的国际供应研究非常重视,包括稀土的供应链分析、开发过程的生态与环境保护、政策的影响等<sup>[2-5]</sup>,同时也十分重视稀土的清洁生产以及从含稀土废弃物或煤灰中的稀土回收技术等的研究<sup>[6-7]</sup>。

包头白云鄂博铁矿富含稀土资源,矿区是世界著名的稀土之乡。白云鄂博稀土矿与铁共生,主要为轻稀土矿物,有氟碳铈矿和独居石,其比例约为 3:1,达到了稀土回收品位,称为混合矿。稀土工业储量达  $4.35 \times 10^7$  t,约占世界储量的 38%,堪称为世界第一大稀土矿<sup>[8]</sup>。凭借稀土资源优势和稀土分离技术的发展,包头已成为中国最大的稀土原料生产基地,国内约有 70%以上的稀土产品是白云鄂博稀土矿冶炼和分离提取出来

的,现生产规模已达十万吨级,精矿品位一般在 40%~60%<sup>[8]</sup>。

国内外处理包头稀土精矿的主要方法是浓硫酸高温焙烧法<sup>[9]</sup>,该方法得到了广泛的应用,仅包头地区就有二十多个厂家使用该工艺。虽然该工艺被广泛应用,但是在高温焙烧过程中会产生大量含硫、氟、强酸性烟气,含氟酸性废水和放射性废渣等“三废”<sup>[8-10]</sup>。经测算,在  $1.01 \times 10^5$  Pa、0℃条件下,每焙烧 1 t 稀土精矿将产生烟气 6 000 m<sup>3</sup>/h,随烟气带出的氟化物为 75 kg,硫酸雾 433 kg。此外,由于烟气降温的需要,喷淋塔和沉渣池需要大量喷入冷水(烟气喷淋废水约为 16 t/t 精矿),冷水与烟气直接接触产生混酸液体,这部分液体要求回用,通过 MVR 等设备进行蒸酸,提升酸液的浓度,这不仅增加了冷却水的消耗,还增加了蒸酸所需要的能量消耗。如果通过换热的方式将烟气显热回收,同时降低烟气进入沉渣和喷淋工序的温度,可以大大减分,同时含尘量很大,余热回收设备长期稳定运行需要解决积

收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2020-03-27.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601501).

作者简介: 李 博(第一作者),男,汉族,1981 年生,河南省清丰县人,工学硕士,助理研究员,主要从事工业节能、余热发电等方面的研究与开发工作. E-mail: 13811009718@163.com;

魏小林(通信作者),男,汉族,1967 年生,陕西蓝田县人,工学博士,研究员,主要从事清洁燃烧及热能利用等方面的研究与开发工作. E-mail: xlwei@imech.ac.cn

灰和耐腐蚀的问题<sup>[11-12]</sup>。

研究人员开展了烟气污染治理的研究<sup>[13-15]</sup>,包括稀土冶炼的污染治理研究<sup>[16-20]</sup>,特别是对稀土冶炼过程中的废水处理,而对于烟气污染物处理的研究很少<sup>[21]</sup>。衣守志等<sup>[22]</sup>开展了稀土精矿酸法冶炼中含氟废气治理技术的研究,结果表明,将稀土矿中的氟回收后用于稀土生产,同时在稀土精矿冶炼分离过程中回收氟元素,可以实现氟元素的循环利用。田震煜<sup>[23]</sup>进行了稀土精矿酸法冶炼中含氟废气治理的技术分析,分析了稀土精矿酸法冶炼中的氟污染,探讨了冶炼中氟废气的治理技术。杨西萍等<sup>[24]</sup>研究了稀土冶炼烟气中氟盐回收工艺,提出了新的氟盐回收工艺方法,并阐述了相关原理、工艺流程和处理工艺的优缺点。

已有的关于稀土冶炼方面的污染治理研究,主要关注于冶炼本身废气废水的治理,关于稀土精矿冶炼炉窑高温烟气余热利用技术的研发与示范还很缺乏。因此,进一步开发新型干法工艺及装置,降低精矿冶炼装置的能耗,回收烟气余热对浓硫酸高温焙烧法处理精矿技术具有重要意义。

## 1 稀土精矿烟气理论计算

### 1.1 物质流与能量流模型

以热力学第一定律以及质量守恒理论为基础,研究和建立稀土精矿冶炼炉窑的物质及能源消耗模型。由质量守恒理论可知,稀土精矿、配合料、助燃气体以及燃料的质量流量输入总和,应该等于稀土产品、烟气的质量流量的输出总和;由能量守恒理论可知,燃料燃烧热和物理热、助燃气体物理热、稀土精矿物理热以及配合料物理热的热量的输入总和,应该等于生成并加热稀土产品、加热烟气以及窑体散热消耗的热量的输出总和。

1) 用质量守恒定律来分析稀土精矿冶炼炉窑的物质流关系。

对于稀土精矿冶炼炉窑,根据物质守恒,当进出窑体的物质达到平衡时,其物质流将满足:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (q_{m_i} - q_{m_j}) = 0 \quad (1)$$

式中: $M$ 为从外界环境进入稀土精矿冶炼炉窑的物质的种类量; $N$ 为离开稀土精矿冶炼炉窑的物质的种类量; $q_{m_i}$ 为从外界环境进入稀土精矿冶炼炉窑的第*i*种物质的质量流量; $q_{m_j}$ 为离开稀土精矿冶炼炉窑的第*j*种物质的质量流量。即:

$$q_{m_{\text{矿}}} + q_{m_{\text{配}}} + q_{m_{\text{助燃}}} + q_{m_{\text{燃料}}} = q_{m_{\text{产品}}} + q_{m_{\text{烟}}} \quad (2)$$

式中: $q_{m_{\text{矿}}}$ 为稀土精矿的质量流量; $q_{m_{\text{配}}}$ 为配合料的质量流量; $q_{m_{\text{助燃}}}$ 为助燃气体的质量流量; $q_{m_{\text{燃料}}}$ 为燃料的质量流量; $q_{m_{\text{产品}}}$ 为稀土产品的质量流量; $q_{m_{\text{烟}}}$ 为烟气的质量流量。

由于进入稀土精矿冶炼炉窑的物质组分会发生相变和燃烧等物理化学反应,需要考虑组分间的定量关系,因此定义 $k_{ij}$ 为进入炉窑内的*i*物质转化生成成为*j*物质的定量系数。因此离开炉窑的*j*物质可以由进入炉窑的*i*物质表达为

$$q_{m_j} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (k_{ij} \times q_{m_i}) \quad (3)$$

2) 基于物质流模型,用热力学第一定律来分析稀土精矿冶炼炉窑的能量流关系。

当物质流进出稀土精矿冶炼炉窑,各物质的显热将伴随进出,同时在炉窑内若有物质组分发生物理化学反应时,将会有潜热或化学热的变化。

将物质的显热表达为

对于固体:

$$Q_{\text{显}} = c_p m t \quad (4)$$

对于气体:

$$Q_{\text{显}} = c_p V t \quad (5)$$

式中: $c_p$ 为该物质的平均比定压热容; $m$ 为该物质的质量; $t$ 为该物质的摄氏温度; $V$ 为该物质的体积。

由于物理化学反应从*i*物质转化为*j*物质,其相变潜热和反应热为

$$Q_{\text{潜}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [k_{ij} \times q_{m_i} \times (L_{ij} + \Delta H_{ij})] \quad (6)$$

式中: $L_{ij}$ 为反应热; $\Delta H_{ij}$ 为相变潜热。

因此根据能量守恒定律,当进出炉窑的能量达到平衡时,其能量流将满足:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(Q_{\text{显,进}} - Q_{\text{显,出}}) + Q_{\text{潜}}] = 0 \quad (7)$$

计算时采用自编程序来求解物质流和能量流方程组公式,进而获得稀土精矿冶炼炉窑的物质流和能量流各部分的分布数据并进行分析。

### 1.2 物质流与能量流分析

通过现场调研包头某条年处理精矿  $1.00 \times 10^4$  t 的稀土精矿冶炼炉窑,得到了稀土精矿成分表(见表 1)和加料参数表(见表 2)。按照浓硫酸焙烧法的化学工艺,浓硫酸高温焙烧稀土精矿产生的烟气中主要有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{HF}$ 、水蒸气、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{N}_2$ 。根据稀土精矿冶炼炉的物质流,基于质量守恒定律,计算并分析了窑尾烟气流量、温度和组分构成及其体积分数等,得到窑尾烟气组分如表 3 所示,窑尾酸性高温烟气温度可达到  $300^\circ\text{C}$ 。

从表 3 的结果可见:窑尾烟气流量约

表1 测试数据

Tab.1 Test data

$w(\text{REFCO}_3)/\%$	$w(\text{REPO}_4)/\%$	$w(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F})/\%$	
51.35	19.60	8.22	
$w(\text{CaF}_2)/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$
4.64	7.72	1.32	8.00

表2 焙烧窑的加料参数

Tab.2 The feeding parameters of the roasting kiln

稀土矿 给料量/ ( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	硫酸加料量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )		天然气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	过量空 气系数	反应 温度/ $^\circ\text{C}$
	67%稀酸	92%浓酸			
1.390	0.600	1.920	225.00	3.6	800

注:在  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $0^\circ\text{C}$  条件下。

表3 窑尾烟气组分

Tab.3 The components of kiln flue gas

烟气组分	质量/kg	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	体积分数/%
H <sub>2</sub> O	983.0	0.800	1 228.75	14.87
CO <sub>2</sub>	544.0	1.977	275.16	3.33
氟化物	157.0	2.340	67.09	0.81
硫酸雾	121.0	1.385	87.36	1.06
SO <sub>2</sub>	54.0	2.860	18.88	0.23
SO <sub>3</sub>	69.4	1.970	35.22	0.43
O <sub>2</sub>	1 540.0	1.429	1 077.67	13.05
N <sub>2</sub>	6 839.0	1.250	5 471.20	66.23
合计	10 307.0		8 261.36	
含灰量	4.67~4.88 g/m <sup>3</sup>			

注:在  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $0^\circ\text{C}$  条件下。

8 261.00 m<sup>3</sup>/h,其中 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 是三大主要成分,N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 占 79.28%,水蒸气占 14.87%,CO<sub>2</sub> 占 3.33%;污染物的体积分数相对偏小,其中氟化物占 0.81%,硫酸雾占 1.06%,SO<sub>2</sub> 占 0.23%,SO<sub>3</sub> 占 0.43%。由于烟气成分复杂,且含有大量含氟酸性气体和飞灰,必须经过相关除尘除酸的工艺才能排放,也无法采用常规的换热工艺和换热设备对稀土精矿冶炼烟气进行余热回收。

基于质量守恒定律,对稀土精矿冶炼炉能量流开展进一步计算和分析,根据窑尾烟气成分计算得到烟气的平均比热容为 1.089 kJ/(kg·K)。窑尾烟气热量平衡情况如表 4 所示。

由表 4 可知,稀土精矿冶炼炉窑的高温烟气余热量为 3 367 296.9 kJ/h。大部分稀土生产厂家采用沉渣室沉降粉尘后,用水吸收塔进行冷却

表4 稀土精矿冶炼炉窑的热量平衡分析

Tab.4 The heat balance analysis of the smelting furnace of rare earth concentrate

燃料	燃料热值 $\dot{Q}$ (标准状态)/ ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ )	燃料体积流量 $q_v/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	过量空气 系数 $a$	燃烧温度 $t/^\circ\text{C}$
天然气	39 732	225.00	3.6	800
输入热量 $\Phi_1/(\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1})$		散热损失(5%) $\Phi_2/(\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1})$		反应过程物料吸收热量 $\Phi_3/(\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1})$
8 939 700.0		446 985.0		5 125 418.1
窑尾烟气 温度 $t'/^\circ\text{C}$	窑尾烟气比热容 $c/(\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	窑尾烟气质量 流量 $q'_m/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	窑尾烟气余热 $\Phi_1/(\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1})$	
300	1.089	10 307.000	3 367 296.9	

降温,后接三级 PVC 喷淋塔对烟气进行喷淋洗涤,除去大部分 HF、硫酸雾及粉尘,剩余的烟气用碱液吸收后高空排放。该工艺虽然可以有效处理烟气,但是在处理过程中,由于沉渣和水洗,烟气温度从 300 降低到 60 $^\circ\text{C}$ 左右,这部分热量被冷却水带走,白白浪费。

由于高温烟气成分复杂,且含有大量酸性气体,若采用常规换热设备进行烟气余热回收,当水蒸气与酸性气体经过换热器降温,烟气温度降至酸露点之下,换热器内将出现大量高浓度凝酸,混合的硫酸和氢氟酸具有极强的腐蚀性,常规换热设备难以承受该极端环境,因此,无法采用常规换热工艺和换热设备对稀土精矿冶炼烟气进行余热回收。

## 2 干法余热回收工艺

稀土精矿冶炼主要采用烟气湿法处理工艺系统,该工艺系统采用水喷淋对烟气进行减温、除尘、混酸回收,其关键技术包括:1) 采用多级循环除尘、降温、脱酸喷淋塔;2) 喷淋塔的酸水经过多级换热降温,冷源为循环冷却水;3) 采用蒸汽加热的方式对混酸进行分离,然后通过循环冷却水冷凝,实现氟硅酸和硫酸的回收再利用。该工艺在运行过程中存在问题:喷淋过程加入大量冷却水,将该冷却水回收后产生的废酸液为低浓度混合酸,需要通过蒸发器和冷凝器(三效蒸发),采用进一步的浓缩和分离工艺处理,才能回收再利用;同时,高温烟气携带的大量余热资源被浪费,因此,存在能耗高、工艺复杂、处理时间长、水资源浪费等诸多问题。

本文提出新的烟气干法余热回收工艺,图 1

为稀土精矿烟气干法余热回收工艺路线。系统包括粗除尘装置、余热锅炉、酸回收系统和二级脱氟除尘系统。粗除尘装置进行第一道除尘工序,可以减少长期运行烟气中的大量灰尘颗粒对整个工艺系统的磨损。相比湿法的喷淋加水,该干法工艺采用换热设备对高温烟气进行余热回收,依据能量梯级利用原则,采用多级换热设备对烟气进行分段降温,可将烟气温度从 300 降至 70 °C 以下;同时,在不同换热温区分别产生蒸汽和热水,进一步回收利用,解决了原湿法工艺能耗高、水资源浪费的问题。根据含酸烟气中不同酸的露点不同这一特性设计了独立的酸回收系统,通过分段降温,烟气中的酸性气体在不同温区产生凝酸,进入对应的酸回收系统,大大降低后期对混酸进行分离的固定设备投资和运行维护的成本。最后,烟气通过二级脱氟除尘系统,进一步降低烟气中的含尘量和含氟量,使其达标后通过烟囱排放。

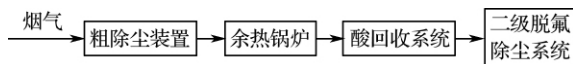
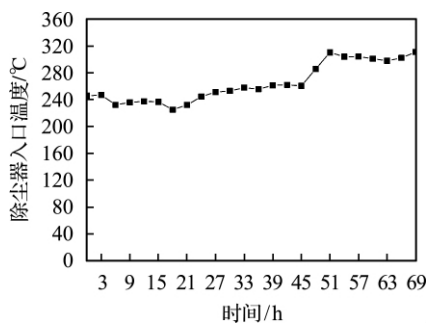
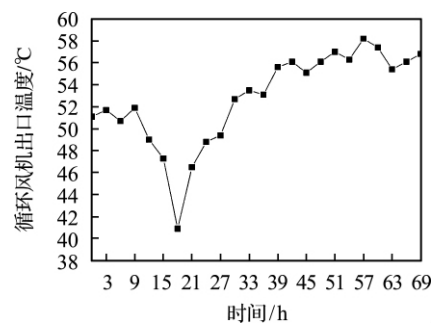


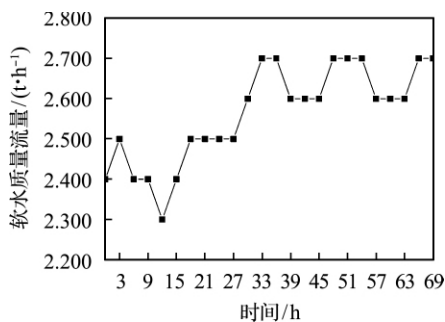
图 1 稀土精矿冶炼烟气干法余热回收工艺路线  
Fig. 1 The dry method process of flue-gas waste heat recovery of rare earth concentrate smelting



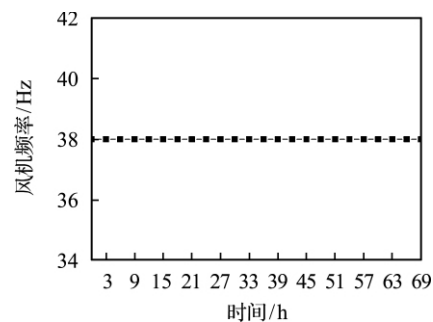
(a) 除尘器入口温度随时间变化



(b) 循环风机出口烟气温度随时间变化



(c) 软水流量随时间变化



(d) 风机频率随时间变化

图 3 2018 年 8 月 25 日至 8 月 27 日连续运行试验监控数据图

Fig. 3 The charts of the monitoring data of continuous operation test from August 25 to August 27, 2018

### 3 中试结果

该稀土精矿烟气干法余热回收工艺已经完成稀土精矿冶炼炉窑系统的现场中试,本文采集并分析了该工艺中试过程中 72 h 的现场试验数据。图 2 为稀土精矿冶炼炉窑系统新工艺示范中试现场实物图。图 3 为稀土精矿冶炼炉窑系统新工艺示范中试现场 2018 年 8 月 25 日~8 月 27 日连



图 2 稀土精矿冶炼炉窑系统新工艺示范中试现场实物图

Fig. 2 The pilot site physical picture of the new process demonstration for rare earth concentrate smelting furnace system

续运行试验监控数据图。本文的数据采集方式为3 h一次。

由现场试验数据可知,该新干法工艺系统回收的烟气余热可以产生0.80 MPa以上饱和蒸汽约1.000 t/h,同时烟气的排放温度可以降至70℃以下,余热回收效率高,可以产生良好的经济效益。表5为该烟气干法余热回收工艺与现有湿法工艺重要参数的对比。

表5 烟气干法余热回收工艺与现有湿法工艺对比

Tab.5 Comparison of the new dry and the existing wet heat recovery process for flue gas

	现有湿法工艺	新型干法余热回收工艺
工艺类型	湿法	干法
烟气降温	喷淋塔	余热锅炉
烟气除尘	喷淋塔、 铅电除雾器	旋风除尘装置、 二级脱氟除尘系统
烟气脱氟酸	喷淋塔	分级酸回收、 二级脱氟除尘系统
烟气脱硫酸	喷淋塔	分级酸回收
工艺水消耗	4.000 t/h	约为0.000 t/h
工艺蒸汽消耗	0.648 t/h	0.000 t/h
工艺副产蒸汽	0.000 t/h	1.000 t/h
工艺副产热水	0.000 t/h	2.200 t/h
酸回收率	77%	90%以上
硫酸回收浓度	65%	65%
氟酸回收浓度	10%	14%
烟气含尘量		<20 mg/m <sup>3</sup>
烟气含氟量		<10 mg/m <sup>3</sup>

注:在 $1.01 \times 10^5$  Pa,0℃条件下。

由表5现场中试数据可知,与现有湿法处理工艺比较,该干法处理工艺的各项指标均优于现有烟气处理工艺。相比现有湿法工艺,烟气中含尘量降至20 mg/m<sup>3</sup>,实现体积分数为14%氟酸回收和体积分数为65%硫酸回收,酸回收率高达90%以上,且副产蒸汽和热水,完全可以满足稀土精矿冶炼炉窑节能减排的需要。

## 4 结论

稀土精矿冶炼炉窑的高温烟气资源化利用技术研发与示范是一项节能减排的公共事业工程,是稀土冶炼含氟酸性烟气干法处理的首次尝试,得到结论。

1) 基于物质流、能量流守恒,计算并分析了

稀土精矿冶炼炉窑的窑尾酸性高温烟气流量、温度、组分浓度等数据,高温烟气余热量高达3 367 296.9 kJ/h。

2) 针对常规换热工艺和换热设备难以完成该工况烟气余热的回收利用的现状,提出了烟气干法余热回收工艺,回收的烟气余热可以产生0.80 MPa以上饱和蒸汽约1.000 t/h,烟气排放温度降至70℃以下,解决了原湿法工艺能耗高、水资源浪费的问题。

3) 建成了稀土精矿冶炼炉窑烟气干法处理的中试系统,对比现场运行数据与现有烟气处理工艺,发现新工艺各指标均优,含尘量降至20 mg/m<sup>3</sup>,酸回收率高达90%以上。

## 参考文献(References):

- [1] CHAKHMOURADIAN A R, WALL F. Rare earth elements: Minerals, mines, magnets (and more) [J]. *Elements*, 2012, **8**(5): 333-340.
- [2] ARTEM G, MARGARETHA S, ERSKINE P D, et al. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities [J]. *Resources Policy*, 2014, **41**(1): 52-59.
- [3] WANG X B, YAO M T, LI J S, et al. Global embodied rare earths flows and the outflow paths of China's embodied rare earths: Combining multi-regional input-output analysis with the complex network approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **216**: 435-445.
- [4] CHEN Z H. Rare earth supply and demand in the post-WTO era [J]. *China Rare Earth Information*, 2013, **19**(11): 1-3.
- [5] MANCHERI N A, BENJAMIN S, GWENDOLYN B, et al. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, **142**: 101-112.
- [6] KOEN B, PETER T J, BART B, et al. Recycling of rare earths: A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **51**: 1-22.
- [7] JELLE H. RADEMAKER, RENÉ K, YANG Y X. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: A systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(18): 10129-10136.
- [8] 许延辉. 白云鄂博稀土矿清洁冶金现状及研究进展 [J]. 稀土信息, 2015(11): 10-13.

XU Yanhui. Status and research progress of clean

- metallurgy in Baiyun Ebo rare earth mine [J]. *Rare Earth Information*, 2015(11): 10-13. (in Chinese)
- [9] 杜长顺, 李梅, 柳召刚, 等. 包头稀土精矿处理现状及建议 [J]. 湿法冶金, 2010, **29**(1): 1-4.  
DU Changshun, LI Mei, LIU Zhaogang, *et al.* Present situation and suggestions for treatment of baotou's rare earth concentrate [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2010, **29**(1): 1-4. (in Chinese)
- [10] 刘叶. 我国近几年稀土行业环保治理与成效 [J]. 研究, 2014(6): 36-39.  
LIU Ye. Environmental governance and effectiveness of China's rare earth industry in recent years [J]. *Research*, 2014(6): 36-39. (in Chinese)
- [11] 尹洪超, 付立欣, 陈建标, 等. 废液焚烧炉内燃烧过程及污染物排放特性数值模拟 [J]. 热科学与技术, 2015, **14**(4): 297-304.  
YIN Hongchao, FU Lixin, CHEN Jianbiao, *et al.* Numerical investigation of characteristics of combustion process and pollutant emissions in wastewater incinerator [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, **14**(4): 297-304. (in Chinese)
- [12] 钱虹, 陈琪琪, 王佳辉, 等. 基于热力学机理与生产数据挖掘相结合的受热面积灰程度的研究 [J]. 热科学与技术, 2018, **17**(5): 418-424.  
QIAN Hong, CHEN Qiqi, WANG Jiahui, *et al.* Research on heating surface fouling degree based on the combination of thermodynamic mechanism and production data mining [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, **17**(5): 418-424. (in Chinese)
- [13] 杜谦, 王建峰, 高建民, 等. 工业锅炉小型湿法烟气脱硫喷淋塔入口倾角优化的数值模拟 [J]. 热科学与技术, 2011, **10**(2): 174-179.  
DU Qian, WANG Jianfeng, GAO Jianmin, *et al.* Optimization on inlet angle for spray tower of industrial boiler by numerical simulation [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2011, **10**(2): 174-179. (in Chinese)
- [14] 尹洪超, 付立欣, 陈建标, 等. 废液焚烧炉内燃烧过程及污染物排放特性数值模拟 [J]. 热科学与技术, 2015, **14**(4): 297-304.  
YIN Hongchao, FU Lixin, CHEN Jianbiao, *et al.* Numerical investigation of characteristics of combustion process and pollutant emissions in wastewater incinerator [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2015, **14**(4): 297-304. (in Chinese)
- [15] 蒋绍坚, 黄波, 艾元方, 等. 助燃空气温度对生物质成型燃料炉点火过程污染物排放的影响 [J]. 热科学与技术, 2011, **10**(1): 68-74.  
JIANG Shaojian, HUANG Bo, AI Yuanfang, *et al.* Effect of air temperature on emission of biomass pellet stove during ignition [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2011, **10**(1): 68-74. (in Chinese)
- [16] TANUSHREE D, KIM K H, MINORI U, *et al.* Global demand for rare earth resources and strategies for green mining [J]. *Environmental Research*, 2016, **150**: 182-190.
- [17] KOEN B, PETER T J, BART B, *et al.* Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **99**: 17-38.
- [18] 王春梅, 张永奇, 黄小卫, 等. 稀土冶炼废水处理技术发展现状 [J]. 有色冶金节能, 2012(1): 11-15.  
WANG Chunmei, ZHANG Yongqi, HUANG Xiaowei, *et al.* Development status of wastewater treatment technology in rare earth hydrometallurgy [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2012(1): 11-15. (in Chinese)
- [19] 陈涛, 李宁, 晏波, 等. 稀土湿法冶炼废水污染治理技术与对策 [J]. 化工进展, 2019, **38**(3): 1468-1475.  
CHEN Tao, LI Ning, YAN Bo, *et al.* Pollution control technologies and measures of rare earths hydrometallurgy wastewater [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, **38**(3): 1468-1475. (in Chinese)
- [20] ELISA A, ANDREW M, SHERMAN T J, *et al.* Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3406-3414.
- [21] 东明, 张宇轩, 李素芬, 等. 烟气流速对不同极线结构下静电除尘器内微细颗粒脱除的影响 [J]. 热科学与技术, 2018, **17**(1): 41-48.  
DONG Ming, ZHANG Yuxuan, LI Sufen, *et al.* Effect of flue gas velocity on removal of fine particles in electrostatic precipitator with different wires arrangement structures [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, **17**(1): 41-48. (in Chinese)
- [22] 衣守志, 方中心, 金峰. 稀土精矿酸法冶炼中含氟废气治理技术 [J]. 天津科技大学学报, 2012,

- 27(4): 74-78.
- YI Shouzhi, FANG Zhongxin, JIN Feng. Treatment technology of fluorine-containing flue gas in smelting of rare earth ore [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2012, 27(4): 74-78. (in Chinese)
- [23] 田震煜. 稀土精矿酸法冶炼中含氟废气治理技术分析 [J]. *江西建材*, 2015(24): 316.
- TIAN Zhenyu. Analysis of fluorine-containing waste gas treatment technology in rare earth concentrate acid smelting [J]. *Jiangxi Building Materials*, 2015(24): 316. (in Chinese)
- [24] 杨西萍, 王益民. 稀土冶炼尾气中氟盐回收工艺研究 [J]. *山东工业技术*, 2018, 227(23): 24.
- YANG Xiping, WANG Yimin. Study on recovery of fluoride in rare earth smelting tail gas [J]. *Shandong Industrial Technology*, 2018, 227(23): 24. (in Chinese)

## Research of resource utilization of high-temperature flue-gas of smelting furnace for rare earth concentrate

LI Bo<sup>1</sup>, RONG Xu<sup>1,3</sup>, YAO Yuan<sup>1</sup>, WEI Xiaolin<sup>\*1,2</sup>

- ( 1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. MCC Huatian Engineering and Technology Corporation, Nanjing 210019, China )

**Abstract:** The smelting furnace of rare earth concentrate is the main equipment of rare earth production. A large number of acidic high-temperature flue gas will be produced, containing 0.81% fluoride, 1.06% sulfuric acid fog, and 0.23% sulfur dioxide, and its temperature is up to 300 °C, that the waste heat could be utilized. But the complexity and particularity of the flue gas compositions bring great challenges to the recovery of heat and resource. A new waste heat utilization technology of high-temperature flue gas of rare earth concentrate smelting furnace was proposed, and the real situation of the field pilot-scale test was introduced. Firstly, the flue gas flow rate, temperature, component concentration and waste heat were calculated according to the conservation of material and energy. The feasibility and technical difficulties of the waste heat recovery were analyzed. Then, a new dry process of waste heat recovery of the flue gas was proposed. According to the cascade utilization principle of energy, the flue gas was grading cooled and the waste heat was used with the waste heat boiler. Moreover, high concentration condensed acid was gathered and the steam was produced by side. Finally, the field pilot-scale test of the new technology was demonstrated, and the data of 72 h were collected and analyzed. The field pilot-scale test showed a good effect on resource recovery.

**Key words:** nonferrous metals; rare earth refining; furnace flue gas; waste heat utilization; resource recovery

[责任编辑:毛雯娟]