

蓄热式熔铝炉能耗分析与氮氧化物排放特性研究

席礼阳, 梁斯宇, 黄璞, 徐顺塔, 涂垚杰, 张世红, 刘豪*

(华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在某 25t 蓄热式熔铝炉上开展了现场烟气成分和热平衡测试, 并进行物料平衡和热平衡计算, 得到了熔铝炉单个熔炼周期内质流分布、热流分布、吨铝天然气耗量, 分析不同升温阶段下烟气 NO 浓度的变化获得了 NO 排放特性, 结果表明: 该熔铝炉的热效率为 62.48%, 吨铝天然气耗量 72.1 Nm³/t, 系统主要的热损失为炉体及管道热损失和散热风损失, 分别占总输出热的 14.24%和 11.98%; 灰渣带出物理热占总输出热的比重不大, 但烧损及杂质会降低铝液的输出质量; 可通过缩短熔炼时间、减少冷却风在非点火时间的通入量、减少炉门开启次数等措施降低熔铝炉的能耗; 该熔铝炉 NO 排放浓度长期高于 600 mg/m³@ 3.5%O₂, 排放峰值 1197.0 mg/m³@ 3.5%O₂; 可通过优化燃烧器结构、优化运行参数和应用无焰燃烧技术的措施降低 NO 排放浓度。

关键词: 熔铝炉; 热平衡; NO 排放; 热流分布; 物料平衡

中图分类号: TK113

文献标志码: A

Energy consumption analysis and nitrogen oxide emission characteristics of regenerative aluminum melting furnace

XI Liyang, LIANG Siyu, HUANG Pu, XU Shunta, TU Yaojie, ZHANG Shihong, LIU Hao*

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Field flue gas composition and heat balance tests were carried out on a 25t regenerative aluminum smelting furnace, and the material balance and heat balance calculations were carried out to obtain the mass flow distribution, heat flow distribution and ton of aluminum natural gas consumption in a single smelting cycle of the aluminum smelting furnace. The NO emission characteristics were obtained by analyzing the change of NO concentration in flue gas at different heating stages. The results showed that: The thermal efficiency of the furnace is 62.48%, and the consumption of natural gas per ton of aluminum is 72.1 Nm³/t. The main heat loss of the system is the heat loss of furnace body and pipeline and the heat dissipation loss, accounting for 14.24% and 11.98% of the total output heat, respectively. The proportion of physical heat from ash and slag is small, but the burning loss and impurities will reduce the output quality of liquid aluminum. The energy consumption of aluminum smelting furnace can be reduced by shortening the melting time, reducing the amount of cooling air in non-ignition time and reducing the number of furnace door opening. The NO emission concentration of the smelting furnace was higher than 600 mg/m³@ 3.5%O₂ for a long time, and the peak emission was 1197.0 mg/m³@ 3.5%O₂. The NO emission concentration can be reduced by optimizing burner structure, optimizing operating parameters and applying flameless combustion technology.

Key words: Aluminum melting furnace; Heat balance; NO emission; Heat flow distribution; Material balance

收稿日期: XXXX-XX-XX 责任编辑:

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52376112)

作者简介：席礼阳（2000—），男，安徽六安人，华中科技大学硕士研究生。E-mail: m202271224@hust.edu.cn

通讯作者：刘豪（1978—），男，湖北襄阳人，华中科技大学研究员，博士生导师，研究方向为无焰燃烧、工业炉窑节能减排等。E-mail: liuhao@hust.edu.cn

0 引 言

随着经济的飞速发展，我国已有工业炉窑十余万套^[1,2]，在种类繁多的工业炉窑中，铝工业用窑炉是重要的一个分支。当前铝的产量和使用量在常用的金属中仅次于钢铁^[3]，且铝生产时的能耗约为生产相同质量钢能耗的3倍^[4]，铝工业用窑炉消耗了大量能源，也排放了大量的二氧化碳。为了推动铝工业低氮节能发展，2020年8月工业和信息化部推出了《铝行业规范条件》^[5]，对铝工业窑炉的能源消耗、资源消耗及综合回收率、污染物排放提出了更严格的要求。熔铝炉是铝行业中最重要工业炉窑之一，目前使用最广泛的熔铝炉为应用了第一代高温空气燃烧技术的蓄热式熔铝炉，虽然经过多年的发展，蓄热式熔铝炉能耗已有一定程度的降低，但仍存在诸多不合理的能源损失现象^[6-8]，且蓄热式熔铝炉生产过程的能耗可占铝加工总工序能耗的38.5%^[9]，降低蓄热式熔铝炉的能耗对整个铝行业的节能发展将起到有效作用。因此，在实现“碳达峰”和“碳中和”目标的要求下，熔铝炉急需进行低碳节能转型升级。

除了高能耗，蓄热式熔铝炉还存在着高氮氧化物排放的问题，排放的NO_x总量可占铝加工总工序排放的50%以上^[10]。目前NO_x已经成为我国主要的大气污染物之一，严重地影响了大气环境质量和人民的健康^[11]。为了控制NO_x排放，国家出台了一系列的大气污染物排放标准，目前对铝工业NO_x排放浓度要求最高的标准为2017年北京市颁布的《大气污染物综合排放标准》^[12]，要求NO_x排放不高于100 mg/m³，此外，在再生铝行业，2015年国家环保部颁布了GB 31574—2015《再生铜、铝、铅、锌工业污染物排放标准》^[13]，规定了重点区域内再生铝行业NO_x特别排放限值为100 mg/m³。为了满足严格的大气污染物排放标准，必须对蓄热式熔铝炉进行低氮改造。

若要实现蓄热式熔铝炉的节能降氮，需要弄清其运行过程中的能耗和NO_x排放特性。能量流动的载体是质流，要对熔铝炉进行能耗分析，还需开展质流分析。魏小林等人^[14]和刘鹏^[15]根据质量守恒原理，研究了物质流的分配和去向，量化评估了生产过程中物质的利用率和损耗率，

为提出工业窑炉的节能方案提供了理论指导。在能耗研究方面，桂冠冠等人^[16]根据某18t蓄热式熔铝炉的运行参数，提出了一套在完全燃烧状态下熔铝炉的理论热平衡分析方法，计算得到该炉理论的热效率为80.14%，远高于实际热效率，并为蓄热式熔铝炉提出了节能建议。王飞扬等人^[17]在7.5t蓄热式熔铝炉上开展空气预热系统改造，采用优化蓄热体结构、更换三维变空间高效换热器的方法，使吨铝气耗量从约75 Nm³/t降至约65 Nm³/t。王新华等人^[18]在25t熔铝炉上应用弥散式火焰燃烧技术，使吨铝气耗量从约72 Nm³/t降至约57 Nm³/t。于苏杭^[19]和王浩等人^[20]在熔铝炉上开展了热平衡测试，在热平衡计算时考虑了物料带走热、物料熔化潜热、烟气带走热、炉体表面散热、炉渣带走热等热量支出项，但忽略了熔炼周期内非点火期间通入炉膛的冷却风带走的热量。在氮氧化物排放研究方面，曾虎^[21]指出熔铝炉生产过程产生的NO_x以NO为主，占90%以上。胡红胜等人^[22]测量了氧化铝焙烧、炭素阳极煅烧、电解铝等铝工业典型工序排放的烟气中NO、SO₂、粉尘浓度，虽然并未测量蓄热式熔铝炉的NO排放，但其现场采样方法和对影响污染物排放浓度的因素的分析方法可为蓄热式熔铝炉的NO排放研究提供参考。张腾飞等人^[23]对熔铝炉生产过程的NO排放浓度进行测量，发现炉膛温度低于700℃时烟气NO浓度为100-300 mg/m³，炉膛温度700-1000℃时烟气NO浓度为300-1000 mg/m³，炉内温度超过1000℃时NO浓度可超过1500 mg/m³。

已有学者对蓄热式熔铝炉生产过程的能耗和NO排放特性开展了一些研究，主要的研究目标是通过改造蓄热式熔铝炉的燃烧器、蓄热器、炉体等部件以降低熔炼过程的能耗^[17, 18, 24-28]。然而，针对大型蓄热式熔炼炉实际生产过程中的能量利用效率、较为全面的热损失占比份额的试验数据匮乏，不同生产工艺阶段中的NO排放浓度也很少被关注。

针对以上的问题，本文对湖北省某铝业公司25t蓄热式熔铝炉进行了物料平衡与热平衡测试，通过分析各项热损失直接找出影响熔铝炉运行经济性的主要因素，明确了进一步节能降耗的方向与途径。通过分析熔铝炉不同升温阶段的NO排放浓度，为进一步改进型燃烧器结构与运

行参数提供科学依据。

1 蓄热式熔铝炉设备参数及测试方法

1.1 蓄热式熔铝炉设备参数

以湖北某铝业公司 25 t 蓄热式熔铝炉作为测试对象，燃烧器最大负荷 4 MW，单周期铝熔炼量 25t，燃烧器侧和炉门侧实体结构分别如图 1 和图 2 所示。该熔铝炉采用蓄热式周期换向燃烧方式，当天然气从左侧燃烧器供入炉膛时，右侧燃烧器做烟气通道，炉内烟气经右侧燃烧器流入蓄热体进行储热降温，最后经烟囱排空。天然气、助燃风和烟气管道均配备双换向阀，由换向阀的开关实现对气流走向的控制，换向周期为 60 s。冷却风从两燃烧器冷却风管道供入炉膛，对燃料管道进行冷却降温。

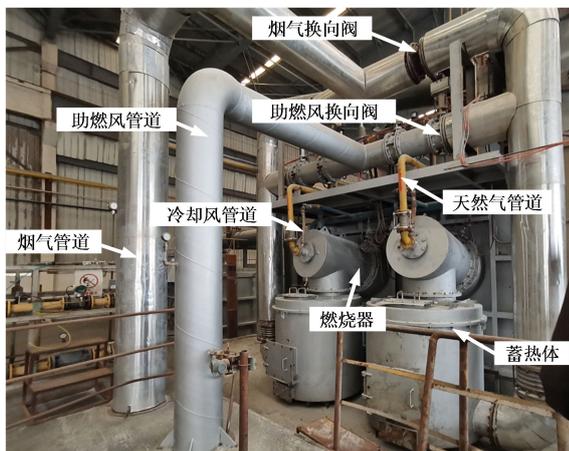


图 1 蓄热式熔铝炉燃烧器侧实体结构

Fig. 1 Structure of burner side of regenerative aluminum melting furnace

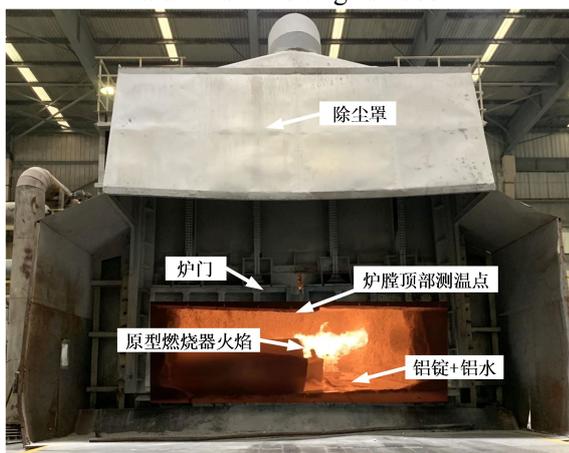


图 2 蓄热式熔铝炉炉门侧实体结构

Fig. 2 Structure of the door side of the regenerative aluminum melting furnace

该 25 t 蓄热式熔铝炉结构、管路布置与测点分布如图 3 所示，炉膛本体由火焰空间和熔

池组成，炉膛尺寸长 (5.05 m) × 宽 (4.26 m) × 高 (1.45 m)，铝液熔池呈四棱台状，平均深度为 0.67 m，炉墙由耐火浇注料和纤维板组成，厚度约 0.5m。测试过程中辅助烟道阀门关闭，烟气经主烟道 (燃烧器烟气通道) 流出。炉膛温度测点 (T) 设于炉膛顶部中心下侧 0.2 m 处，此监测点温度接近炉膛平均温度，下文提到的炉膛温度均指炉膛温度测点的温度。

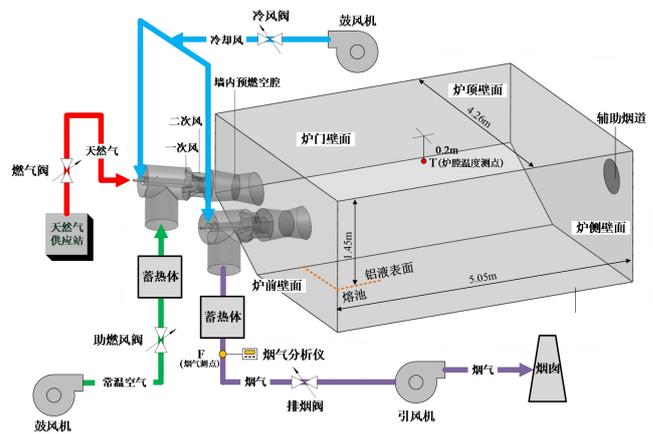


图 3 25 t 蓄热式熔铝炉结构、管路布置与测点分布

Fig. 3 Structure, pipeline layout and measuring point distribution of 25 t regenerative aluminum melting furnace

该蓄热式熔铝炉的技术参数见表 1，给定炉膛额定温度为 1050 °C，即当炉膛温度升至 1050 °C 时，燃烧器停止运行。燃烧器最大输出天然气能力为 400 m³/h，熔化能力 ≥ 4 t/h，铝液出炉温度位于 720~760 °C 之间，炉膛压力位于 10~100 Pa 之间。

表 1 25 t 蓄热式熔铝炉技术参数

Tab. 1 Technical parameters of 25 t regenerative aluminum melting furnace

名称	单位	数值
炉膛额定温度	°C	1 050
铝液温度	°C	720~760
铝液温差	°C	≤±5
熔化能力	t/h	≥4
熔池面积	m ²	5.05×4.0
熔池中心平均深度	m	0.67
燃烧器能力	m ³ /h	400
天然气热值	kcal/m ³	8 400
燃烧器前燃气压力	Pa	~8 000
炉压控制范围	Pa	10~100

1.2 测试方法

为获取 25 t 蓄热式熔铝炉实际运行时的各

项热工参数，针对蓄热式熔铝炉单个熔炼周期进行热平衡与烟气成分测试。图 4 给出了蓄热式熔铝炉的热力系统，可以看出，蓄热式熔铝炉整个热力系统包括熔铝炉本体、蓄热体、燃烧器以及相应的连接管道和阀门。热力系统的输入项包括天然气、助燃风、冷却风、铝锭、铝水和辅料（铝硅、铝钛、铁剂、铜剂、打渣剂、精炼剂），输出项包括烟气、散热风、铝液、灰渣、烟尘。热平衡测试的热工参数包括：输入项和输出项中各物料的温度和质量（或体积流量）、熔铝炉本体和连接管道的表面温度、环境的温度与湿度以及各设备的运行时间。其中，烟气流量通过烟气残氧量和过量空气系数计算获得，散热风量通过熔炼周期内非点火期间通入炉膛的冷却风量计算获得。烟气成分测试的参数包括烟气温度和烟气组分，通过烟气分析仪和热电偶测试获得。

热平衡与烟气成分测试数据的获取方法包括 2 种途径：（1）直接从熔铝炉在线监测仪器设备上读取；（2）在现场直接采用便携式仪器设备测量。由于在熔铝炉升温过程中一些参数存在波动现象，为保证测量的准确性，每间隔一段时间记录一次数据，最终结果取算数平均值，具体测量方法参照 GB/T 13338-2018《工业炉热平衡测定 与计算基本准则》执行。

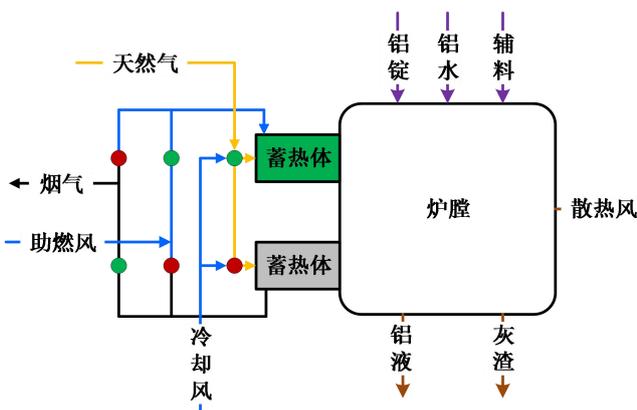


图 4 蓄热式熔铝炉热力系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of thermal system of regenerative aluminum melting furnace

2 物料平衡和热平衡计算方法

2.1 物料平衡计算

在熔铝炉热力系统中，根据质量守恒原则，

输入系统的各项物料质量之和与输出系统的各项物料质量输出之和相等，计算公式如下：

(1)

式中， $(M_i)_{in}$ 表示系统输入的各项物料质量，kg； $(M_j)_{out}$ 表示系统输出的各项物料质量，kg。

系统物料输入项计算

(2)

式中， M_{gy-in} 表示固液态物料（铝水、铝锭及辅料）输入总质量，kg，通过磅秤和吊车直接测量获得； M_{zr} 表示助燃风输入总质量，kg，根据助燃风流量和熔炼周期内点火时间的测试数据计算得到； M_{lq} 表示冷却风输入总质量，kg，根据冷却风流量和单周期熔炼时间的测试数据计算得到。

系统物料输出项计算

(3)

式中， M_{gy-out} 表示固液态物料输出总质量，kg； M_{CO_2} 表示 CO_2 生成质量，kg，根据燃料燃烧反应方程式计算得到； M_{H_2O} 表示 H_2O 生成质量，kg，根据燃料燃烧反应方程式计算得到； M_k 表示剩余空气质量，kg，为实际空气消耗质量与燃料燃烧反应方程式计算得到的理论空气消耗质量之差； M_{sr} 表示散热风输出总质量，kg，根据冷却风流量、单周期熔炼时间和点火时间计算得到。

2.2 热平衡计算

在熔铝炉热力系统中，根据能量守恒原则，输入系统的各项热量之和与输出系统的各项热量输出之和相等，计算公式如下：

(4)

式中， $(Q_i)_{in}$ 表示系统输入的第 i 项热量，kJ； $(Q_j)_{out}$ 表示系统输出的第 j 项热量，kJ。

系统热输入项计算

(5)

式中， Q_{rl} 表示燃料燃烧产生的化学热，kJ； Q_{zr} 表示助燃风带入的物理热，kJ； Q_{lq} 表示冷却风带入的物理热，kJ； Q_{ls-in} 表示铝水带入的物理热，kJ，含固相铝从基准温度升至熔点、铝相变、铝水升温所需热量，kJ。

(6)

式中， Q_{ls-out} 表示铝水带出的物理热，kJ； Q_{hz} 表示灰渣带出的物理热，kJ，为灰渣在基准温度与实际温度间的平均比热容、灰渣质量、灰渣与环境温度之差三者的乘积； Q_{sr} 表示散热风带出的物理热，kJ，通过熔炼周期内非点火期间通入炉膛的冷却风量计算； Q_y 表示烟气带出的物理热，kJ，通过烟气残氧量和过量空气系数计算获得； Q_s 表示炉体及管道表面散热，kJ，通过炉体及管道的表面积、表面黑度、表面温度和对流换热系数计算获得； Q_{fs} 表示炉门辐射热，kJ，通过炉门开启面积、炉门开启时间和辐射角系数计算获得。

2.3 NO 测试方法

在现场测试中，烟气测点开孔位置受限，位于蓄热体出口后部管道。在不同的测试阶段或烟气中氧含量出现动态波动时，为便于不同工况下 NO 排放浓度的比较，将实际的 NO 排放浓度换算为干烟气基准氧浓度（3.5%）下的 NO 排放浓度，计算公式如下：

(7)

式中， $NO (mg/m^3@3.5\%O_2)$ 表示标准状况下干烟气基准氧浓度下的 NO 排放浓度， mg/m^3 ； $NO (ppm)$ 表示干烟气实测氧浓度下 NO 的体积浓度，ppm；2.05 为 NO 由体积浓度折算为质量浓度的折算系数； $O_{基}$ 表示干烟气基准氧浓度，%； $O_{实}$ 表示实测干烟气氧浓度，%。

3 结果分析与讨论

3.1 物料平衡分析

通过气态物料平衡计算出烟气输出质量，通过固液态物料平衡计算出铝液的输出质量，为热平衡计算提供了数据，蓄热式熔铝炉单个熔炼周期的物料平衡结果如表 2 所示。根据表 2 绘制了熔铝炉单个熔炼周期内的质流分布如图 5 所示，可以看出，在熔铝炉单个熔炼周期内，冷却风持续通入炉膛，冷却风输入质量占气态物料输入总质量的 46.5%，在炉内点火期间，冷却风送入炉膛起助燃作用，此阶段输入质量占比 12.63%；在炉内非点火期间，由于烟气管道阀门完全关闭，冷却风在炉膛内被加热后仅能通过炉门未闭合处流出，此阶段冷却风流出形成散热风，占气态物料输出总质量的 33.87%。固液态物料输入项中铝水占比较高，两包铝水合计占比达到 56.76%，这是主要是为了加速铝锭的熔化，缩短熔炼工期。最终出炉的可用产品为加入辅料精炼后的铝液，单个熔炼周期内铝液输出质量占比 97.65%，这一数值越高代表熔炼过程中的氧化烧损越低。

表 2 蓄热式熔铝炉单个熔炼周期物料平衡表

Tab. 2 Material balance table for a single smelting cycle of regenerative aluminum smelting furnace

状态	物料输入项		物料输出项	
	项目	质量(kg)	项目	质量(kg)
气态	天然气输入质量	510.98	烟气输出质量	11873.50
	助燃风输入质量	9094.53	散热风输出质量	6080.99
	冷却风输入质量	8048.98		
	合计	17954.49	合计	17954.49
固液态	铝锭输入质量	9211.00	铝液输出质量	21215.80
	辅料输入质量	184.00	灰渣输出质量	511.20
	#1 铝水输入质量	6218.00		
	#2 铝水输入质量	6114.00		
	合计	21727	合计	21727

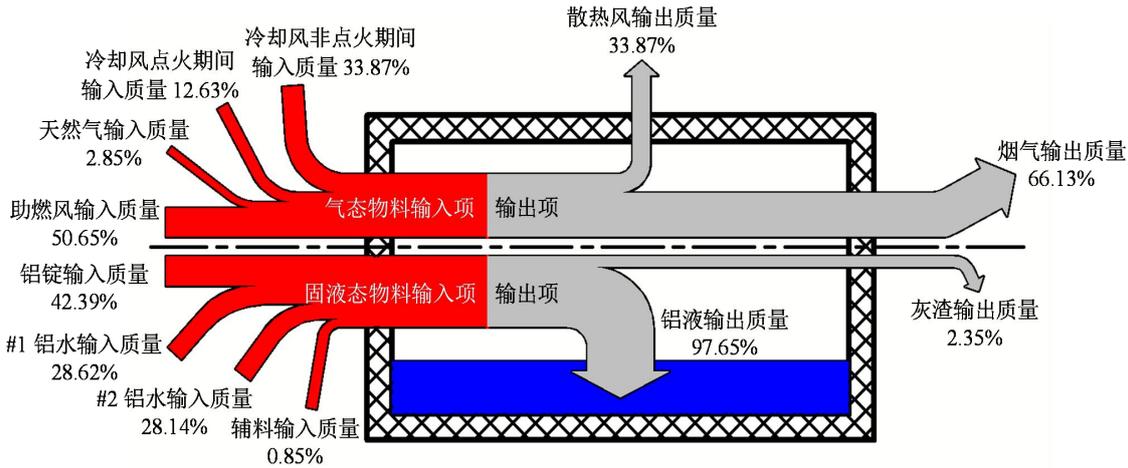


图 5 熔铝炉单个熔炼周期内的质流分布

Fig. 5 Mass flow distribution in a single smelting cycle of aluminum smelting furnace

3.2 热平衡、吨铝天然气耗量及节能措施分析

3.2.1 热平衡分析

采用正平衡和反平衡进行计算，通过正平衡直接获得铝熔化有效吸收热在总输入热量的占比，通过反平衡可以获得各项热损失在热输入总量的占比，进而分析减少热损失的途径和措施。通过热平衡计算公式获得熔铝炉单个熔炼周期的热平衡结果如表 3 所示，可以看出，热输入项由天然气燃烧的化学热和铝水、助燃风及冷却风的物理显热组成；热输出项相对比较复杂，除铝液的带出的物理显热之外，还包括各项热损失：炉体及管道散热、烟气带走物理热、灰渣物理显热、散热风热损失、炉门辐射散热损失。热输入项和热输出项的总热量计算值误差为 $1.75% < 5%$ ，计算误差在允许范围之内。

表 3 蓄热式熔铝炉单个熔炼周期热平衡表

Tab. 3 Heat balance table for a single melting cycle of regenerative aluminum smelting furnace

热输入项		热输出项	
项目	热量(MJ)	项目	热量(MJ)
天然气燃烧化学热	23106.12	铝水带出物理热	24198.05
#1 铝水带入物理热	7520.58	烟气带出物理热	2255.66
#2 铝水带入物理热	7656.61	灰渣带出物理热	558.726
助燃风带入物理热	291.49	散热风热损失	4638.88
冷却风带入物理热	155.04	炉体及管道热损失	5516.46
		炉门辐射热损失	883.40

		其他	664.92
合计	38729.84	合计	38053.10

该误差的主要原因在于：（1）烟尘携带的物理热难以测定；（2）由于炉体结构密封性原因，炉门、烟道等处会存在缝隙导致漏风现象，漏风导致的热损失难以测定；（3）熔炼周期炉墙耐火材料升温蓄热、装炉时铝水散热、集尘罩抽风带走热、烟气中 CO 未完全燃烧热未能完全考虑；（4）在整个运行周期中，部分参数如炉体及管道表面黑度的选择和热损失计算可能存在一定的估算偏差；（5）由于燃烧的周期性，部分参数如烟气中氧含量和烟气温度存在震荡和波动，采用均值计算本身存在一定的偏差；（6）由于运行过程中散热风的量难以测定，采用熔铝炉非点火期间冷却风的流量进行替代可能存在一定的偏差。

图 6 熔铝炉单个熔炼周期内的热流分布给出了熔铝炉单个熔炼周期内的热流分布，可以看出，单个熔炼周期的有效利用热为 62.48%，即 37.52%的热量通过各种途径流失。其中，由于蓄热体的应用使得排烟温度较低，烟气带走物理热占比 5.83%；由于后期精炼时间长，炉内长时间处于保温状态，通过炉体及管道散热损失达到 14.24%；由于冷却风全程持续通入炉膛，炉内非点火期间冷却风被加热后形成大量散热风流出，使得散热风损失占比高达 11.98%，其余的 5.5%热量通过炉门热辐射以及灰渣和烟尘的物理显热带走。根据热平衡分析可知，系统主要的热损失为炉体及管道热损失和散热风损失。

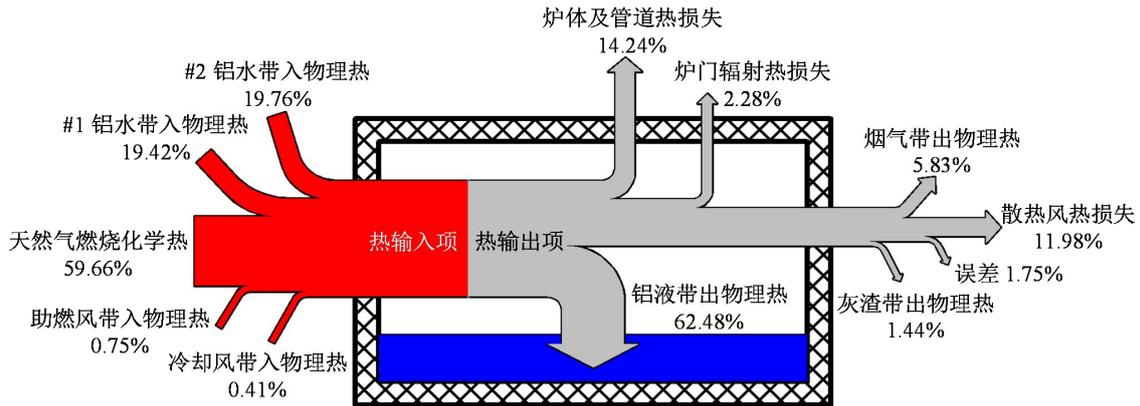


图 6 熔铝炉单个熔炼周期内的热流分布

Fig. 6 Heat flow distribution in a single smelting cycle of aluminum smelting furnace

3.2.2 吨铝天然气耗量分析

参考上述对整个熔炼周期过程的物料平衡和热平衡计算结果，对蓄热式熔铝炉能耗进行分析。采用吨铝天然气耗量的概念对熔铝炉能耗进行表示，其计算公式如下：

(8)

式中， V_{in} 表示入炉天然气量， Nm^3 ； M_{la} 表示入炉铝锭量， t 。

由于入炉铝料包括铝水和铝锭，而入炉铝水温度高达 $840\text{ }^\circ\text{C}$ 左右，从温度来说已经超过了熔铝炉出铝液温度的标准，只是铝的合金成分需要调质和精炼，因此，将入炉铝水带入的超出 $740\text{ }^\circ\text{C}$ 部分的物理显然应折算为相应的天然气耗量，计算公式如下：

(9)

式中， V_{Qls} 表示入炉铝水富余热折算天然气量， Nm^3 。

根据式 9 计算得出，当考虑铝水富余显热时，湖北省某铝业公司 25 t 蓄热式熔铝炉的吨铝天然气耗量为 $76.0\text{ Nm}^3/\text{t}$ 。表 4 为国内蓄热式熔铝炉能耗现状，经过对比，该炉能耗处于国内下游水平，具有较大的节能优化空间。

表 4 国内蓄热式熔铝炉能耗现状统计

Tab. 4 Current energy consumption statistics of regenerative aluminum smelting furnace in China

厂家	入炉物料	吨铝天然气耗量 (Nm^3/t)
广东某 25 t 圆形熔铝炉[29]	铝锭和废铝	59.14
佛山 50 t 熔铝炉[24]	/	63
河南神火铝材 25 t 熔铝炉[26]	电解铝液、铝锭 和废料	≤ 65
佛山高明 12 t 熔铝炉[28]	/	65

中冶华天工程技术 2×1 t/h 熔 铝炉[20]	铝锭	≤ 70
中国铝业山东某 40 t 熔铝炉 [27]	/	73.6
中国铝业山东某 30 t 熔铝炉 [27]	铝锭和废铝	80

3.2.3 节能降耗措施分析

1) 减少炉体及管道表面散热

通过热平衡分析发现，炉墙及管道散热损失占比 14.24%，是降低熔铝炉热效率的主要因素之一，这主要是因为熔铝炉实际熔炼时间过长，使得大部分热量从炉墙及管道表面散失至周围环境中。炉体外壁面与周围空气的对流传热、周围环境的辐射传热直接相关，采用导热系数较低的耐火、保温材料能够有效降低外壁面温度。

2) 减少散热风热损失

散热风热损失占比 11.98%，这主要是由在熔铝炉非点火时间冷却风持续通入引起。在熔铝炉非点火时间，燃料管所需的冷却风量大大减少，甚至可以暂停冷却风的通入。因此，可引入调节冷却风和助燃风流量的控制系统，实现冷却风通断和燃烧状态的联动，非点火时间助燃风停止后减小或者暂停冷却风的通入^[30]。

3) 减少炉门辐射散热

炉门开启辐射热损失占比 2.28%，因此，减少炉门的开启次数能够显著降低这部分的热损失。可采用先进的 CCD 非接触式测温技术，不仅可实现现在关闭炉门的情况下获取铝液的温度，还可以实时监测火焰的温度分布和燃烧状态，及时发现异常工况^[31, 32]。

4) 减少烟气热损失

整个熔炼过程从蓄热体流出的烟气温度约

200 °C，烟气带走热占比 5.83%。因此，可考虑进一步回收烟气余热，降低烟气带走的物理热，具体方法包括：对蓄热体进行改造以提高蓄热体的蓄热能力与传热效率^[33]，尾部烟道增加热管式换热器实现烟气对助燃空气的初步预热^[34]，尾部烟道增加铝锭预热设备利用低温烟气余热实现对铝锭的预热^[20]。另外，可引入可调空燃比的燃烧控制系统，通过适量的减小过量空气系数，防止空气量过大引起排烟损失增大，且不会因为空气量过小导致燃料不完全燃烧损失^[35]。

5) 提高铝液的熔炼品质，优化燃烧方式

灰渣带走物理热占比 1.14%，占比相对较低，但部分烧损进入烟气时会造成燃烧器的堵塞，增加燃烧器的运行风险，缩短燃烧器使用寿命。同时，杂质生成量增加将导致铝液的品质降低。高温空气燃烧方式能够较好的减少烧损及杂质的生成，具体优点包括：增大燃烧反应区，使炉内温度分布相对均匀，降低炉内峰值温度，避免产生局部高温现象；提高炉内整体温度水平，增强高温烟气与铝液表面的辐射传热效果，加快铝液的熔炼速度，缩短熔炼周期；保持铝液表面较低的氧浓度，削弱铝液与炉气的氧化反应，减少烧损的生成。

3.3 NO 排放及降氮措施分析

3.3.1 NO 排放分析

熔铝炉单个熔炼周期内炉膛温度主要表现为两个主要阶段：炉膛低温启动的升温阶段和高温状态下的保温阶段。图 7 给出了炉膛温度随炉内点火时间变化的升温曲线，可以看出，在炉内点火期间，炉膛温度处于 800 °C 以上的时间占点火时间的 90% 左右，点火时间 80min 时，炉膛温度升至 1000 °C 以上。120min 时炉膛温度达到 1050 °C 进入保温阶段，此后炉膛温度一直处于高温状态。

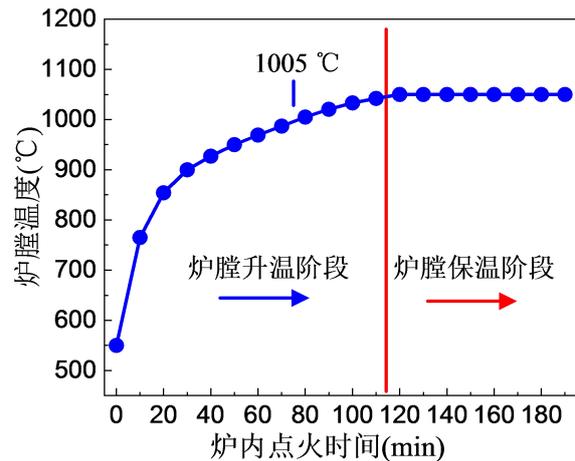


图 7 炉膛温度随点火时间的变化

Fig. 7 Variation of furnace temperature with ignition time

图 8 给出了炉膛温度在 870 °C、970 °C 和 1050 °C 时的 NO 排放浓度的瞬态变化规律。可以看出，随炉膛温度的升高，NO 排放浓度整体升高。当炉膛温度升至 1050 °C 时，NO 平均排放浓度高达 1197.0 mg/m³@3.5%O₂。而在熔铝炉点火期间，炉膛温度 90% 以上的时间处于 800 °C 以上，35% 以上的时间处于 1050 °C 的高温状态，因此，对不同炉膛温度区间的 NO 排放浓度均值进行了测试，结果如图 9 所示。可以看出，800~900 °C 区间内 NO 排放浓度的均值为 635 mg/m³@3.5%O₂，1000~1050 °C 区间内 NO 排放的均值为 1160 mg/m³@3.5%O₂。可以得出结论，该熔铝炉长时间处于 NO 超高排放状态，已远超湖北省熔炼炉 NO 排放要求 (240 mg/m³@3.5%O₂)。因此，对该熔铝炉进行降氮改造刻不容缓。

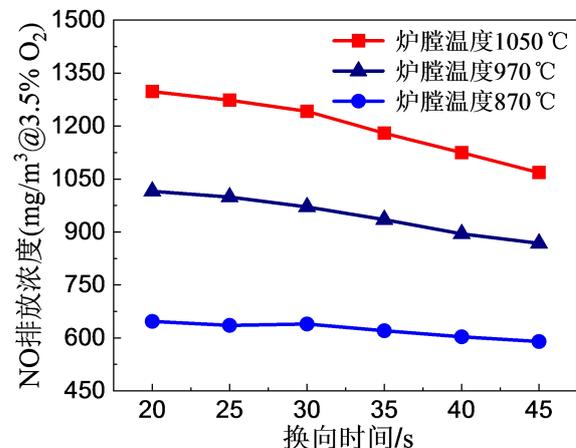


图 8 不同炉膛温度下 NO 排放浓度的瞬态变化

Fig. 8 Transient changes of NO emission

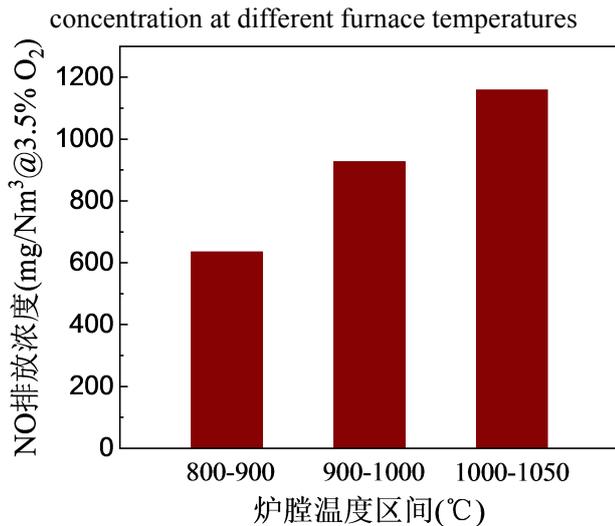


图 9 不同炉膛温度区间 NO 排放浓度均值

Fig. 9 Average NO emission concentration in different furnace temperature ranges

3.3.2 降氮措施分析

目前, 传统熔铝炉通常依靠在尾部烟道加装 SCR 来降低 NO 的排放^[23], 由于蓄热体出口烟气温度一般处于 200 °C 以下, 且烟气体积相对较小, SCR 存在运行效率低和改造成本高的缺点, 除了加装 SCR 的方法, 还可采用以下措施:

1) 燃烧器结构参数优化

传统蓄热式熔铝炉使用的原型燃烧器通常采用部分预混的燃烧方式, 这类燃烧器具有良好的节能效果, 但 NO 排放浓度较高。目前李洪刚^[27]、于苏杭^[19]、马飞龙^[36]等人已通过对熔铝炉燃烧器流道结构、燃烧器安装位置、安装倾角等结构参数进行改造, 既降低了蓄热式熔铝炉的气耗量, 也降低了烟气 NO 排放。因此, 优化或重新设计燃烧器结构, 可以实现蓄热式熔铝炉的节能降氮。

2) 运行参数优化

在蓄热式熔铝炉运行过程中, 空气预热温度和过量空气系数会对 NO 排放产生较大的影响^[37]。在蓄热式熔铝炉的运行过程中, 降低空气预热温度通常能够降低 NO 排放^[38-40], 但空气预热温度与蓄热体技术参数相关, 需要对蓄热体进行改造, 增加了改造的复杂性^[33]。蓄热式熔铝炉较高的空气预热温度拓宽了贫燃极限, 使得过量空气系数较小时依旧能够保持燃烧的高效、稳定^[26]。目前该炉常用的过量空气系数约为 1.15~1.25, 可考虑降低过量空气系数^[41, 42], 使炉内形成局部还原气氛, 增强 NO 的再燃效应, 降低 NO 的生成, 同时, 在使用低过量空气系数时应注意 CO 的排放浓

度, 综合考虑 NO 和 CO 的排放浓度, 选择合适的过量空气系数。

3) 具有节能和低氮双重效果的无焰燃烧技术

无焰燃烧技术能够通过高速的高温空气射流卷吸烟气, 形成炉内的烟气循环, 高温烟气再对燃料和空气射流进行稀释, 使得炉内的燃烧始终处于低氧和低燃料浓度的环境下。近年来, 无焰燃烧技术已在钢铁、水泥等领域的工业炉窑上得到了应用^[43-46], 并发现无焰燃烧反应区域较普通燃烧的反应区域明显增大, 炉膛内部温度分布更加均匀, 燃烧峰值温度降低, 受热面传热效果相应增强, 炉膛温度较高时的 NO 排放浓度显著降低。同时, 还能够显著减少烧损及杂质的生成, 提高铝熔炼品质。

4 结论

对湖北某铝业公司 25 t 蓄热式熔铝炉进行了现场热平衡测试, 并通过对熔铝炉进行物料平衡与热平衡分析, 获得熔铝炉的效率与各项热损失, 同时, 对熔铝炉不同升温阶段下烟气污染物排放进行了测试, 获得熔炼过程中的 NO 排放数据, 并依据测试数据分析结果给出了熔铝炉节能降氮的措施, 主要结论如下:

1) 25t 蓄热式熔铝炉的热效率为 62.48%, 吨铝天然气耗量 72.1 Nm³/t, 处于我国蓄热式熔铝炉能耗中下游水平, 具有较大的节能空间。系统主要的热损失为炉体及管道热损失和散热风损失, 分别占总输出热的 14.24%和 11.98%, 这主要是因为熔炼时间长以及冷却风整周期通入, 因此, 缩短熔炼时间、减少冷却风的通入量以及优化运行工序均能显著降低熔铝炉的能耗。

2) 在铝熔炼点火期间, 炉膛温度处于 800 °C 以上的时间占总点火时间的 90%左右, NO 排放浓度长时间处于 600 mg/m³@3.5%O₂ 以上。当炉膛温度最高 (1 050 °C) 时, NO 排放浓度也相应升至最高, 排放峰值高达 1 197.0 mg/m³@3.5%O₂, 严重超出 GB16297-1996 NO 排放标准 (240 mg/m³@3.5%O₂), 因此, 针对熔铝炉的降氮改造亟待实施。

3) 尽管热平衡分析中灰渣带出物理热占总输出热的比重不大, 但烧损及杂质的存在会严重危及到铝液的熔炼品质。同时, 当部分烧损被烟气带走时, 长期运行中会造成燃烧器的堵塞, 增加燃烧器的运行风险, 降低燃烧器的使用寿命。因此, 在节能和降氮改造中, 应尽量减少烧损及杂质的生成。

参考文献(References) :

- [1] 董宝靛. 工业窑炉市场现状及未来发展趋势分析[C]. 第二十二届中国科学家论坛. 北京; 2023:5.
Dong Baoliang. Analysis of current situation and future development trend of industrial kiln market [C]. The 22nd Chinese Scientists Forum. Beijing; 2023-5.
- [2] 段英. 高温窑炉低氮燃烧器的数值模拟研究[D]. 辽宁科技大学. 2022
Duan Ying. Numerical simulation of low NO_x burner in high temperature furnace [D]. University of Science and Technology Liaoning. 2022
- [3] 中国国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]; 2024.
https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
National Bureau of Statistics of China. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2023 [EB/OL]; 2024.
https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [4] 黄伟拯. 广西铝业转型升级研究[D]. 广西大学. 2022
Huang Weizheng. Research on the transformation and upgrading of Guangxi aluminum Industry [D]. Guangxi University. 2022
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 铝行业规范条件[EB/OL]; 2020.
https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yclgy/art/2020/art_824a381780ea4607821b89b4b848976e.html.
Ministry of Industry and Information Technology, People's Republic of China. aluminum industry specification conditions [EB/OL]; 2020.
https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yclgy/art/2020/art_824a381780ea4607821b89b4b848976e.html.
- [6] 谭易君. 圆形蓄热式熔铝炉内多场耦合数值模拟及优化[D]. 中南大学. 2011
Tan Yijun. Numerical simulation and optimization on coupled multi-field of the regenerative cylindrical aluminum melting furnace [D]. Central South University. 2011
- [7] 张海涛. 高温空气燃烧机理及蓄热体换热特性的研究[D]. 中国科学技术大学. 2018
Zhang Haitao. Investigation on combustion mechanism of high temperature air combustion and heat transfer characteristics of regenerator [D]. University of Science and Technology of China. 2018
- [8] 李同杰. 蓄热式高温空气燃烧技术在熔铝炉上的应用[J]. 有色金属加工 2006(02):60-2.
Li Tongjie. Application of high temperature air combustion technology to aluminum melting furnace [J]. Nonferrous Metals Processing 2006(02):60-2.
- [9] 王计敏. 蓄热式铝熔炼炉熔炼过程多场耦合的数值模拟及优化研究[D]. 中南大学. 2012
Wang Jiming. Numerical Simulation and optimization of melting process of a regenerative aluminum melting furnace [D]. Central South University. 2012
- [10] 张佳男. 熔铝炉烟气循环燃烧过程数值模拟研究与装置设计[D]. 西南石油大学. 2018
Zhang Jianan. Numerical Simulation and Device design of flue gas Cycle combustion process in aluminum smelting furnace [D]. SouthWest Petroleum University. 2018
- [11] 朱广为. 工业炉窑的环保治理分析[J]. 工业炉 2012;34(4):30-3.
Zhu Guangwei. Analysis of environmental protection treatment of industrial furnace[J]. Industrial Furnace. 2012; 30-34 (4) : 3.
- [12] 北京市环境保护局. 大气污染物综合排放标准 DB11/ 501—2017[EB/OL]. 2017.
<https://sthjj.beijing.gov.cn/eportal/fileDir/bjhrb/resource/cms/2017/01/2017012316495934873.html>.
Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. Integrated emission standard of air pollutants DB11/501-2017 [EB/OL]. 2017.
<https://sthjj.beijing.gov.cn/eportal/fileDir/bjhrb/resource/cms/2017/01/2017012316495934873.html>.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 再生铜、铝、铅、锌工业污染物排放标准 GB 31574-2015[EB/OL]. 2015.
https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhbh/dqgdwrywrwrfbz/201505/t20150505_300588.htm.
Ministry of Ecology and Environment. People's Republic of China. Emission standard for recycled copper, aluminum, lead and zinc industry pollutants GB 31574-2015 [EB/OL]. 2015.
https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhbh/dqgdwrywrwrfbz/201505/t20150505_300588.htm.
- [14] 魏小林, 李慧鑫, 李森, 等. 工业炉窑物质流和能量流匹配的节能原理分析[J]. 洁净煤技术. 2020;26(05):11-9.
Wei Xiaolin, Li Huixin, Li Sen, et al. Principle analysis of energy saving of matched material and energy flows in the industrial furnace and kiln [J]. Clean Coal Technology. 2020; 26 (5) : 11-9.
- [15] 刘鹏. 预热还原与矿热炉流程匹配及炉窑热工特性研究[D]. 东北大学. 2019
Liu Peng. Synergy of preheating reduction with electric furnace process, and thermal characteristics of kiln-furnace [D]. Northeastern University. 2019
- [16] 桂冠冠, 陈镇江. 蓄热式铝熔炼炉理论热平衡计算及节能分析[J]. 有色冶金节能 2017;33(01):24-7.
Gui Guanguan, Chen Zhenjiang. Theoretical thermal equilibrium calculation and energy saving analysis of regenerative aluminum smelting furnace [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2017; 33 (01) : 24-7.
- [17] 王飞扬, 朱冬生, 刘世杰, 等. 新型组合式 3D 高效预热系统在熔铝炉上的节能示范研究[J]. 流体机械 2021;49(05):61-6.
Wang Feiyang, Zhu Dongsheng, Liu Shijie, et al. Energy conservation demonstration and study on new combined 3D high-efficiency preheating system on aluminum melting furnace [J]. Fluid Machinery 2021; 49 (5) : 61-6.
- [18] 王新华, 秦龙万, 赵德忠, 等. 弥散式蓄热燃烧技术在铝熔炼炉上的改造及应用[J]. 云南冶金 2023;52(02):131-6.
Wang Xinhua, Qin Longwan, Zhao Dezhong, et al. Transformation and application of dispersion regenerative combustion technology on aluminum melting furnace [J]. Yunnan Metallurgy 2023; 52 (02) : 131-6.
- [19] 于苏杭. 基于 FLUENT 的矩形蓄热式熔铝炉燃烧模拟优化设计[D]. 郑州大学. 2022
Yu Suhang. Optimal design of combustion simulation for rectangular regenerative aluminum melting furnace based on FLUENT [D]. Zhengzhou University. 2022
- [20] 王浩, 金保昇, 余波, 等. 熔铝炉烟气余热资源回收利用系统的

- 研究与应用[J]. 工业炉 2017;39(06):53-6.
- Wang Hao, Jin Baosheng, Yu Bo, et al. Research and application of flue gas residual-heat resource recovery system in aluminum melting furnace [J]. Industrial Furnace. 2017; 39 (6) : 53-6.
- [21] 曾虎. 熔铝炉烟气脱硝改造技术探讨[J]. 环境科学导刊 2021;40(5):83-7.
- Zeng Hu. Analysis of Denitration Transformation Technology for Flue Gas Emitted from Aluminum Melting Furnace [J]. Environmental Science Survey, 2021; 40 (5) : 83-7.
- [22] 胡红胜, 张正勇, 周善红. 铝业典型烟气硫磺排放特征研究[J]. 轻金属 2021(09):52-7.
- Hu Hongsheng, Zhang Zhengyong, Zhou Shanhong. Study on sulfur and nitrate emission characteristics of typical fume in aluminum industry [J]. Light Metals 2021(09):52-7.
- [23] 张腾飞, 康泽双, 李花霞, 等. 熔铝炉冶炼烟气脱硝技术现状与进展[J]. 中国冶金 2023;33(01):18-23.
- Zhang Tengfei, Kang Zesheng, Li Huaxia, et al. Status and progress of flue gas denitration technology in aluminum smelting furnace [J]. China Metallurgy 2023; 33 (01) : 18 - 23.
- [24] 宋长志, 安丰所. 50t 对冲式不换向蓄热式天然气熔铝炉的数值模拟[J]. 工业炉 2015;37(01):48-50.
- Song Changzhi, An Fengsuo. Numerical simulation of 50 t hedge type non-reversing regenerative gas aluminium melting furnace [J]. Industrial Furnace 2015; 37 (01) : 48-50.
- [25] 杨建新. 浅谈天然气熔铝炉燃烧器的技术改进[J]. 民营科技 2018(09):55.
- Yang Jianxin. Discussion on the technical improvement of the burner of natural gas melting aluminum furnace [J]. Private Science and Technology 2018(09):55.
- [26] 贾新武, 张磊. 熔炼炉燃烧参数控制[J]. 有色金属加工 2011;40(6):4.
- Jia Xinwu, Zhang Lei. Combustion parameter control in melting furnace [J]. nonferrous metal processing 2011; 40 (6) : 4
- [27] 李洪刚. 天然气熔铝炉燃烧器的技术改进[J]. 铝加工 2017(02):59-62.
- Li Honggang. Technical Improvement for Natural Gas Furnace Burner [J]. Aluminium Fabrication. 2017(02):59-62.
- [28] 陆涛. 圆形不换向蓄热式天然气熔铝炉的数值模拟[J]. 广东化工 2015;42(04):96-7+5.
- Lu Tao. Numerical simulation of 12 tons circular no commutator of regenerative gas furnace for melting aluminum [J]. Guangdong Chemical Industry 2015; 42 (4) : 96-7+5.
- [29] 冷明全. 圆形熔铝炉蓄热式燃烧系统的数值模拟及热态实验研究[D]. 广东工业大学. 2017
- Leng Mingquan. Numerical simulation and experimental study of regenerative combustion system in circular aluminum smelting furnace [D]. Guangdong University of Technology. 2017
- [30] 赵保权. 蓄热式台车热处理炉燃烧系统控制策略研究[D]. 河北科技大学. 2022
- Zhao Baoquan. Research on control strategy of regenerativetrolley heat treatment furnace combustion system [D]. Hebei University of Science and Technology. 2022
- [31] 李万航. 工业加热炉火焰监测综合控制平台研究[D]. 长春工业大学. 2024
- Li Wanhang. Research on the comprehensive control platform for flame monitoring of industrial heating furnace [D]. Changchun University of Technology. 2024
- [32] 李保华, 周东东, 徐科, 等. 基于高清彩色 CCD 相机的 RH 炉内监控与测温系统[C]. 第十四届中国钢铁年会. 重庆; 2023:5.
- Li Baohua, Zhou Dongdong, Xu Ke, et al. Furnace monitoring and thermometry system of RH refining based on high-definition color CCD camera [C]. The 14th China Iron and Steel Annual Meeting. Chongqing; 2023-5.
- [33] 邢悦悦. 旋转式蓄热氧化热回收系统性能研究[D]. 西安理工大学. 2024
- Xing Yueyue. Study on performance of rotary regenerative thermal oxidation heat recovery system [D]. Xi'an University of Technology. 2024
- [34] 全俊威. 陶瓷窑炉烟气余热回收的热管换热器设计及性能优化研究[D]. 景德镇陶瓷大学. 2021
- Quan Junwei. Design and research on performance optimization of heat pipe heat exchanger for fume waste heat recovery in ceramic kilns [D]. Jingdezhen Ceramic University. 2021
- [35] 唐光麒, 李翼, 王永机, 等. 一种空燃比可调的蓄热式单烧嘴熔铝炉燃烧控制系统[J]. 自动化与信息工程 2020;41(01):45-8.
- Tang Guangqi, Li Yi, Wang Yongji, et al. An air-fuel ratio adjustable combustion-control system for regenerative, single burner aluminum-melting furnaces [J]. Automation & Information Engineering, 2020; 41 (01) : 45-8.
- [36] 马飞龙. 新型蓄热式高速燃烧器的设计及优化[D]. 河北科技大学. 2023
- Ma Feilong. Design and optimization of a new type of regenerative high-speed burner [D]. Hebei University of Science and Technology. 2023
- [37] 聂晓康, 邱冰冰, 任航, 等. 预热温度、乙烯掺混对甲烷/空气层流扩散燃烧特性影响的数值模拟研究[J]. 燃烧科学与技术 2021;27(06):675-86.
- Nie Xiaokang, Qiu Bingbing, Ren Hang, et al. Numerical simulation study on effects of preheating temperature and ethylene mixing on methane/air laminar diffusion combustion characteristics [J]. Journal of Combustion Science and Technology. 2021; 27 (6) : 675-86.
- [38] 潘书婷, 戴方钦, 郭悦, 等. 取向硅钢高温环形退火炉用低 NO_x 天然气烧嘴的试验与数值模拟[J]. 材料与冶金学报 2022;21(05):382-90.
- Pan Shuting, Dai Fangqin, Guo Yue, et al. Experiment and numerical simulation of low NO_x natural gas burner in the annular furnace for high-temperature annealing of oriented silicon steel [J]. Journal of Materials and Metallurgy. 2022; 21 (5) : 382-90.
- [39] Mi J, Li P, Zheng C. Impact of injection conditions on flame characteristics from a parallel multi-jet burner[J]. Energy 2011;36(11):6583-95.
- [40] Szegő G, Dally B, Nathan G. Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system[J]. Combustion and Flame 2009;156(2):429-38.
- [41] Hu F, Li P, Guo J, Wang K, Gong C, Liu Z. New dependence of NO emissions on the equivalence ratio in moderate or intense low-oxygen dilution combustion[J]. Energy & fuels 2018;32(12):12905-18.
- [42] 解俊良. 低 NO_x 天然气燃烧器的设计与数值模拟[D]. 北京交通大学. 2021
- Xie Junliang. Design and numerical simulation of low NO_x natural gas burner [D]. Beijing Jiaotong University. 2021
- [43] 王业峰, 周浩宇, 刘前, 等. 无焰燃烧研究进展及其应用[J]. 工业加热 2023;52(03):1-6.
- Wang Yefeng, Zhou Haoyu, Liu Qian, et al. Research Progress and Applications of Flameless Combustion [J]. Industrial Heating 2023;

52 (3) : 1-6.

- [44] 崔名双, 李小炯, 苗鹏, 等. 低 NO_x 燃气燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术 2020;26(02):24-33.
Cui Mingshuang, Li Xiaojiong, Miao Peng, et al. Research progress of low NO_x gas combustion technology [J]. Clean Coal Technology 2020; 24-26 (02) : 33
- [45] 江华, 朱小辉. 轧钢加热炉超低氮排放无焰燃烧技术应用研究[J]. 工业炉 2023;45(06):1-4.
Jiang Hua, Zhu Xiaohui. Research on application of ultra low nitrogen emission flameless combustion technology in steel rolling heating furnace [J]. Industrial Furnace 2023; 45 (6) : 1-4.
- [46] 于庆起, 高永健, 王魁, 等. 低氧无焰燃烧高效脱氮技术的应用实践[J]. 中国水泥 2022(04):78-81.
Yu Qingqi, Gao Yongjian, Wang Kui, et al. Application practice of high-efficiency denitrification technology with low-oxygen flameless combustion [J]. China Cement 2022(04):78-81.