

塔式熔铝炉降低能耗和烧损的技术研究与实践

俞杭生, 章旭霞, 俞锦涛, 刘坚辉, 吴 军

(浙江万丰科技开发股份有限公司, 浙江湖州 312400)

摘要: 熔铝炉是铝合金产品生产过程中能耗与烧损最高的设备。为降低塔式熔铝炉的能耗, 项目增大了料塔储量, 并增设蓄热燃烧系统与余热回收换热器, 对烟气余热加以回收利用; 为减少塔式熔铝炉的烧损, 增设涡流熔化室, 实现铸造浇冒口和机加工铝屑的无氧熔化。实践结果表明, 设备能耗与金属烧损均得到有效控制, 排烟温度由原先的600~800 °C降至300 °C以下, 单位产品平均能耗由65 Nm³/t降至55 Nm³/t, 综合烧损率由约1.7%降至1.3%, 有效削减了生产成本。

关键词: 熔铝炉; 余热回收; 节能减排; 能耗; 烧损

中图分类号: TG155.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0817-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0104

Technical Research and Practice on Reducing Energy Consumption and Burn-off in Tower-Type Aluminum Melting Furnace

YU Hang-sheng, ZHANG Xu-xia, YU Jin-tao, LIU Jian-hui, WU Jun
(Zhejiang Wanfeng Technology Development Co., Ltd., Shengzhou 312400, Zhejiang, China)

Abstract: Aluminum melting furnace is the equipment with the highest energy consumption and metal loss in the production process of aluminum alloy products. To decrease the energy consumption of the tower-type aluminum melting furnaces, this project expanded the storage capacity of the material tower, and installed regenerative combustion systems and waste heat recovery heat exchangers to recycle and utilize the waste heat from flue gas; to reduce the metal loss of the tower-type aluminum melting furnaces, a swirling melting chamber was added to realize oxygen-free melting of the casting gates and risers, and the machined aluminum scraps. Practical results show that both of the equipment energy consumption and the metal loss have been effectively controlled. The flue gas temperature has been dropped from the original 600–800 °C to below 300 °C, the average energy consumption per unit product has been decreased from 65 Nm³/t to 55 Nm³/t, and the overall metal loss rate has been fallen from approximately 1.7% to 1.3%, effectively lowering production costs.

Key words: aluminum melting furnace; waste heat recovery; energy conservation and emission reduction; energy consumption; burn-off

近年来, 随着新能源汽车的飞速发展, 汽车轻量化成为其中的重要环节。汽车轻量化研究的核心方向在于实现材料的轻质化, 以降低整车质量, 提升车辆动力学性能与经济性^[1]。铝合金具有密度小、强度高和耐腐蚀性好等优点, 是实现结构轻量化的关键材料^[2]。熔铝炉作为铝合金熔化和保温的必须设备, 应用十分广泛, 其中最常见的是塔式熔铝炉, 具有使用寿命长、自动化程度高、出铝快、炉内含氧量低和集中熔化等特点^[3], 但也是生产过程中能耗和烧损最高的设备。塔

式熔铝炉普遍采用天然气作为燃料, 通过天然气燃烧产生的高温将固态铝加热和熔化, 运行过程中炉内产生的高温烟气不间断排出, 导致烟气中大量的热量流失, 能源利用率低下。在“双碳”目标下, 工业熔炉的余能深度回收利用是“节能与能效提升技术创新”重点任务^[4]。

我国工业能耗占总能耗的70%以上, 其中至少50%转化为载体不同、温度不同的工业余热, 大部分可回收利用; 而目前我国工业余热资源回收率仅约为30%,

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2024ZD0704101); 浙江省科技计划项目 (2024C01139)。

收稿日期: 2026-04-28 收到初稿, 2026-05-07 收到修订稿。

作者简介: 俞杭生 (1990-), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事铝行业熔铝炉、保温炉、加热炉和热处理炉等领域的设计及研究工作。电话: 18358563683, E-mail: 1119664046@qq.com

引用格式: 俞杭生, 章旭霞, 俞锦涛, 等. 塔式熔铝炉降低能耗和烧损的技术研究与实践 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 817–821.

Yu Hangsheng, Zhang Xuxia, Yu Jintao, et al. Technical research and practice on reducing energy consumption and burn-off in tower-type aluminum melting furnace [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 817–821.

能源利用效率偏低^[5]。工业企业中超50%的工业余热资源以各种型式散发而流失^[6]。对燃气熔炉烟气中余能资源进行深度回收利用,可有效提高熔炉热效率,实现节能减排降碳^[7]。目前行业内的塔式熔铝炉能耗普遍大于 $65 \text{ Nm}^3/\text{t}$,性能较差的能达到 $75 \text{ Nm}^3/\text{t}$ 以上,平均单位能耗较高。因此,提高铝合金熔炼过程的热效率,节约能源资源,已显得十分迫切和重要,这也是企业降本增效,增强企业竞争力的重要手段^[8]。在保证铝合金铸件质量的基础上,提高熔铝炉的热效率,节约资源,保护环境,降低生产成本,是我国铝合金企业需要努力和发展的方向之一^[9]。

金属的烧损也是熔铝炉的重要指标,常规铝锭熔化的烧损一般小于1%,而对于小物料的熔化,熔铝炉会有较大的烧损。若果是碎铝屑直接加入塔式熔铝炉内熔化,烧损会达到10%以上^[10]。铝产品在生产过程中,会有大量的铸造浇冒口和机加工铝屑产生,这些小物料如果与铝锭一样从料塔投入,严重的烧损会造成资源的大量浪费。当前铝价高位运行,铝产品生产企业艰难维持,国家铝矿资源对外依赖度较高,降低烧损具有重要的战略意义。

基于上述行业背景与设备应用现状,作者针对塔式熔铝炉存在的不足进行研究,通过增加料塔储量、加入蓄热燃烧技术、换热器余热回收技术来回收烟气余热,降低排烟温度,从而降低能耗;通过无氧熔化技术,降低小物料的金属烧损和生产成本。

本项目研究对象为3.4 t/h塔式熔铝炉,保温室容量为18 t,熔化物料中,铝锭及废产品投入量为1.8 t/h,铸造浇冒口和机加工铝屑投入量为1.6 t/h,平均能耗为 $65 \text{ Nm}^3/\text{t}$,综合烧损率为1.7%。由于能耗和烧损较高,对其进行优化改造,以降低能耗和烧损。

1 常规塔式熔铝炉介绍

常规塔式熔铝炉一般由熔化室、料塔、保温室、投料机及燃烧控制系统等组成,熔化室和保温室分别有清渣炉门,保温室侧壁设置放液口,料塔一侧设置用于排烟的烟道,如图1所示。生产时,熔化的铝材由投料机提升投入料塔内,铝材在料塔内加热升温,进入熔化室后熔化为铝液,铝液沿着通道斜坡进入保温室,需要放液时从放液口排出。

塔式熔铝炉有独特的结构优势,保温室产生的高温烟气会从炉内通道进入熔化室,与熔化室的高温烟气一同加热和熔化铝锭,随后排出时还会加热料塔内储存的铝锭,但由于采用常规烧嘴进行加热,料塔排出的烟气温度依然很高,可达 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,存在大量的热量浪费。

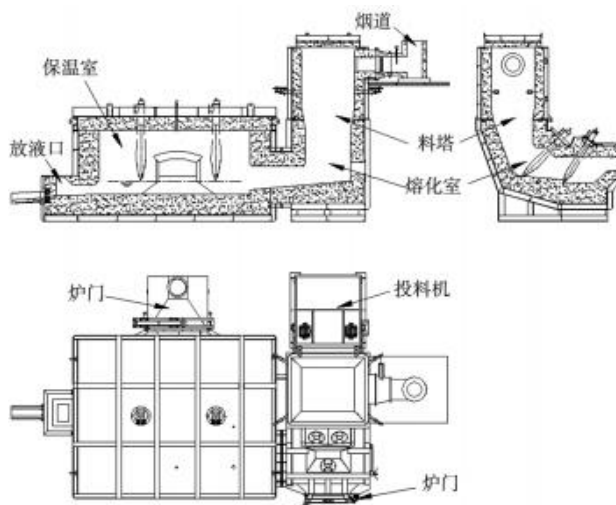


图1 常规塔式熔铝炉结构图

Fig. 1 Structural diagram of conventional tower-type aluminum melting furnace

2 降低能耗的技术

塔式熔铝炉降低能耗的技术研究主要集中在降低排烟温度的方向,而降低排烟温度的主要手段是将烟气热量用于加热助燃空气的温度,由助燃空气将热量带回炉内。一般认为,助燃空气温度每提高 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,可节约燃料5%左右,是有效的节能手段^[11]。

本项目对塔式熔铝炉加入蓄热燃烧技术、换热器余热回收技术,并增加料塔高度和储量,来降低排烟温度,达到降低能耗的目的,结构如图2所示。

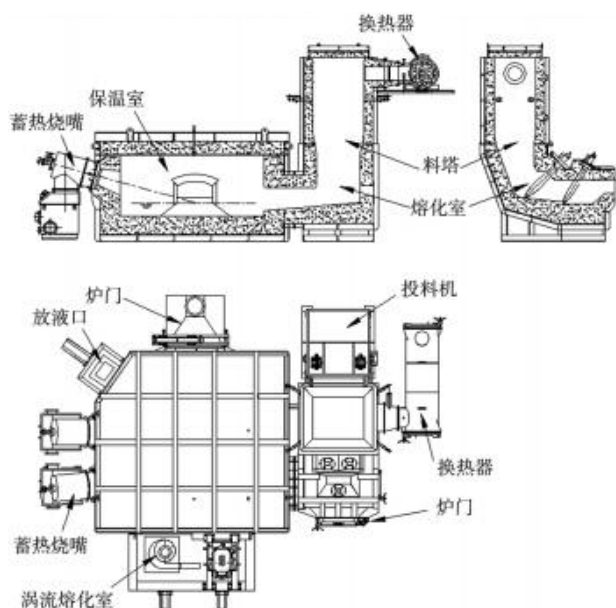


图2 改进后塔式熔铝炉结构图

Fig. 2 Structural diagram of the improved tower-type aluminum melting furnace

2.1 蓄热燃烧技术

蓄热燃烧技术是一种高效回收烟气余热、实现高效燃烧的先进工业燃烧技术，其核心是两个烧嘴切换使用，一个燃烧时另一个用于排烟，而装在烧嘴蓄热箱内的陶瓷蓄热体则进行交替蓄热和放热，可以把排烟温度降低到200℃以下，助燃空气温度预热到500~650℃，实现较大的节能、炉内温度更均匀。

熔铝炉的保温室配置蓄热烧嘴，由于排烟引风机的作用，蓄热烧嘴产生的烟气的80%~90%会从蓄热烧嘴中排出，其余的烟气从炉内通道进入熔化室，与熔化室烧嘴产生的烟气一同加热铝锭。从蓄热烧嘴排出的烟气中的热量被蓄热体吸收，烟气温度降低至200℃以下。增加的蓄热烧嘴如图3所示。



图3 增加的蓄热烧嘴

Fig. 3 The added regenerative burners

2.2 增加料塔高度和储量

增加料塔高度可以有效增加料塔内铝材的储量，从而增加对烟气热量的吸收，降低排烟温度。料塔高度越高，料塔内铝材的储量越大，排烟温度越低，而大多客户由于设备厂房的高度限制，料塔没法增加很大的高度，所以从料塔排出的烟气仍有很大的热回收价值。本项目中料塔高度增加0.5 m，料塔内部存储空间增加0.8 m³。

2.3 换热器余热回收技术

换热器是实现锅炉烟气余热回收的有效手段之一^[12]，是通过热交换直接将热量进行转移的技术。由于熔铝炉烟气中含有大量细屑、粉尘，换热器必须便于内部清理或不易于粉尘堆积的结构，所以常用于熔铝炉的余热回收换热器主要是管壳式换热器和套管式换热器。管壳式换热器内部设有若干不锈钢换热管，换热面积大，换热效果好，但制作成本较高；套管式换热器为大管套小管的结构，造价较低，但换热效果相对较差，在内管外壁加焊翅片可以显著增加换热效果^[13]。换热器的布置方式也会影响换热效果，有水平布置和竖直布置。研究表明，管壳式换热器水平布置

显著改善了自然对流换热效率，尤其在大容量储能系统中，其热响应速度与能量利用率均优于垂直结构^[14]。

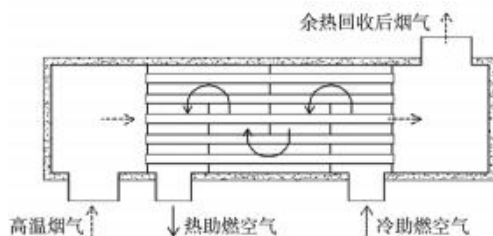


图4 换热器结构图

Fig. 4 Structural diagram of the heat exchanger

本项目中使用管壳式换热器进行余热回收，利用料塔排出的高温烟气加热熔化室烧嘴的助燃空气。换热器换热管为 $\Phi 109 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 不锈钢管，换热面积约12 m²，采用水平布置，且冷热气体的流向采用对流型式，遵循热交换最大化原理，提高烟气热量回收率，结构如图4所示。经过换热器换热后，排出的烟气温度降低至300℃以下，助燃空气的温度可以达到200~250℃。增加的换热器如图5所示。



图5 增加的换热器

Fig. 5 The added heat exchanger

3 降低烧损的技术

塔式熔铝炉改造前，铝锭、废产品、铸造浇冒口和机加工铝屑的综合烧损率约为1.7%。改造方案在保温室侧壁增加了一个涡流熔化室，将铸造浇冒口和机加工铝屑直接投入铝液中进行无氧熔化，降低烧损率，涡流熔化室结构如图6所示，外形如图7所示。

涡流熔化室由泵室和涡流室组成，泵室和涡流室与炉膛之间均有铝液通道，泵室设置电动铝水泵，在铝水泵的驱动下，铝液进入涡流室时具有较高的流速，涡流室内腔有特殊的旋涡形状，使得有足够流速的铝液能形成涡流，需要熔化的铸造浇冒口和机加工

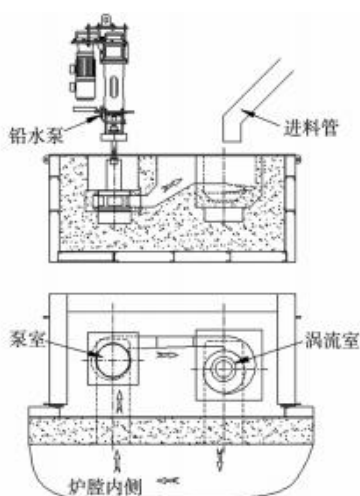


图6 涡流熔化室结构图

Fig. 6 Structural diagram of the eddy current melting chamber



图7 涡流熔化室外形图片

Fig. 7 Outline image of the eddy current melting chamber

铝屑等物料经过进料管进入涡流室后,能被铝液涡流迅速吸入其中熔化,熔化效果如图8所示。此过程中,铸造浇冒口和机加工铝屑的熔化基本在铝液内部进行,不接触燃烧火焰,综合烧损率由1.7%降低至1.3%以下。



图8 涡流熔化效果

Fig. 8 Effect of the eddy current melting

机加工铝屑一般都含有较多的切削液/切削油,油含量较大会使铝液涡流上方有较大的燃烧火焰,导致烧损率升高,且油污通常无法完全燃烧从而有较大的黑烟产生,所以机加工铝屑一般都需进行预处理,通

过甩干、烘干、磁选等手段将铝屑中的油液和杂志除去^[15]。本次改造同步增加一套铝屑预处理系统,包括粉碎机、甩干机、烘干回转窑、烟气再燃炉、磁选机及若干输送设备。增加的铝屑预处理系统如图9所示。



图9 增加的铝屑预处理系统

Fig. 9 The added aluminum chips preprocessing system

4 运行情况及效益

塔式熔铝炉改造时,对电气控制系统进行了同步改造升级,燃烧控制系统为双温控模式,铝液温度和炉膛气氛温度均可自动控制烧嘴的点火、大小火切换和熄火;投料机能根据炉内铝材、铝液情况自动投料或禁止投料;涡流上料装置能根据炉内铝液的容量和温度自动控制运行。升级后设备运行的自动化和智能化水平有很大提升,降低人工劳动强度。

设备经改造后稳定运行数月,性能得到有效改善,能耗和烧损均有明显降低,测得数据如表1所示。

表1 改造前后性能参数对比

Tab. 1 Comparisons of the performance parameters before and after renovation

	排烟温度/℃	平均能耗/(Nm ³ ·t ⁻¹)	综合烧损率/%
改造前	600~800	65	约1.7
改造后	蓄热烟道: ≤200 塔部烟道: ≤300	55	约1.3

与旧设备相比,改造后设备的平均能耗和烧损率得到明显降低,平均能耗从65 Nm³/t降低至55 Nm³/t,综合烧损率从约1.7%降低至1.3%。

项目按照运行22小时/天,320天/年计算收益(运行过程连续正常投料及放液)如下。

(1) 熔化量

铝锭及废产品的年熔化量: $1.8 \times 22 \times 320 = 12\,672\text{ t}$ 。

浇冒口和铝屑的年熔化量: $1.6 \times 22 \times 320 = 11\,264\text{ t}$ 。

总熔化量: $12\,672 + 11\,264 = 23\,936\text{ t}$

(2) 降能耗收益

年节省燃气: $(65 - 55) \times 23\,936 = 239\,360\text{ m}^3$ 。

年节省燃气费用: $239\,360 \times 3.5 = 837\,760\text{ 元}$ (按燃

气单价3.5元/m³计算)。

(3) 降烧损收益

年节省铝材: $23\,936 \times (0.017-0.013) \approx 95.7\text{ t}$ 。

年节省铝材费用: $95.7 \times 22\,000 = 2\,105\,400$ 元(按铝锭单价22 000元/t计算)。

(4) 经济效益分析

利用本项目技术改进后的3.4 t/h兼用熔铝炉,年节省燃气费用约83.8万元,年节省铝材费用约210.5万元,每年可节省生产成本约294.3万元。设备增加了蓄热燃烧系统、管壳式换热器、涡流熔化室及铝屑预处理设备,一次性投资费用增加约为180~230万元,可一年实现回本并盈利。

(5) 社会效益

排烟温度的有效降低,可直接降低熔化的单位能耗,从而减少二氧化碳等温室气体的排放,减少大气环境污染。

熔铝炉的烧损率下降0.4%,每年可减少铝

材消耗约95.7 t,氧化铝渣的产生减少约181 t ($95.7/0.53 \approx 181\text{ t}$, 0.53为Al₂O₃中Al的含量),大幅减轻后续固废处理压力。氧化铝渣属于危废,需经复杂处理后才能资源化利用或安全填埋,减少其产生量,不仅降低了企业的环保处置成本,也减少了二次污染风险与土地占用,提升铝行业的绿色可持续发展水平。

5 结论

(1) 利用蓄热燃烧、烟气热回收用于加热助燃空气等技术手段能有效降低熔铝炉能耗,节省能源费用。

(2) 在条件允许时,尽量加大料塔容量,利用铝材的吸热来降低烟气温度。

(3) 铸造浇冒口和机加工铝屑等小物料不宜在有明火的环境熔化,利用无氧熔化技术可大幅降低烧损率,节省材料成本。

参考文献:

- [1] 李晓瑜, 阎换丽, 程西西, 等. 新型铝合金材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车电器, 2026(1): 134-136.
- [2] 臧永兴, 苗赛男, 李鑫赫, 等. 再生铝合金的净化处理与应用研究[J]. 铸造, 2026, 75(3): 293-299.
- [3] 张笙辉, 冀辉, 杨运堂, 等. 塔式集中熔化炉温差问题的研究[J]. 铸造, 2023, 72(8): 1063-1066.
- [4] 国家能源局. 国家发展改革委. 国家能源局关于印发《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》的通知[EB/OL]. (2016-06-01)[2026-04-25]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.
- [5] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1856-1857.
- [6] 吴维成, 谷志卿, 鞠朋, 等. 工业低温余热回收利用研究进展[J]. 可再生能源, 2024, 42(8): 1096-1103.
- [7] 李美军. 燃气工业锅炉烟气余热深度回收改造性能研究[J]. 工业炉, 2026, 48(2): 55-60.
- [8] 张丽丽, 龙思远, 杨智等. 铝合金熔炼节能技术现状和发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 46-48.
- [9] 俞杭生, 章旭霞, 董春潮, 等. 熔铝炉熔化及预热结构的分析研究[J]. 铸造工程, 2024, 48(4): 54-56.
- [10] 何磊, 何向问. 铝加工行业中的金属损失及其控制措施[J]. 有色金属加工, 2024, 53(2): 31-33.
- [11] 王秉铨. 工业炉设计手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 郭勇, 王发现, 田学军, 等. 燃气锅炉烟气余热回收技术及其发展方向[J]. 工业炉, 2025, 47(1): 24-28.
- [13] 夏智扬, 田啟康, 徐伟, 等. 翅片型换热器性能试验研究及数值模拟优化[J]. 日用电器, 2026, 68(1): 40-46.
- [14] Seddegh S, Wang X, Henderson D A. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 348-358.
- [15] 叶珍, 郑长清, 葛素静, 等. 再生铝超净化处理与微合金化技术在低压铸造铝车轮中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 77-82.