铝合金熔炼炉铝液温差的研究及措施

俞杭生，章旭霞，吴　军，俞津涛，刘坚辉，叶帅超
（浙江万丰科技开发股份有限公司，浙江嵊州 312400）

摘要：铝合金熔炼炉的放液口或取液口普遍存在内外温差较大的问题，本项目对铝液温差的产生原因做了研究和分析，通过在铝合金熔炼炉开口部增加定制的循环装置，实现内外铝液的缓慢循环，降低内外的温差。结果表明，增加循环装置后，放液型熔化炉的内外温差由30~35 ℃降低至3~5 ℃，取液型保温炉的内外温差由40~55 ℃降低至12~16 ℃，温度控制精度得到有效提升，平均能耗和生产成本也进一步降低。

关键词：铝合金熔炼炉；温差；循环装置；能耗；温度均匀性；热管理；工艺优化
中图分类号：TG146.21；TG232.3　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）08-0905-05
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0116

Research and Measures on Temperature Difference of Molten Aluminumin in Aluminum Alloy Smelting Furnace

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

Abstract: The drain port or ladle port of aluminum alloy melting furnaces generally exhibits a significant temperature difference between the inside and outside. In this project, the causes of the temperature difference in aluminum liquid were investigated and analyzed. By adding a customized circulation device at the opening part of the aluminum alloy melting furnace, slow circulation of aluminum liquid between the inside and outside achieved, reducing the temperature difference. The results indicated that after the addition of the circulation device, the temperature difference between the inside and outside of the tap-type melting furnace was decreased from 30-35 ℃ to 3-5 ℃, and that of the stationary holding furnace decreased from 40-55 ℃ to 12-16 ℃. The temperature control accuracy was effectively improved, and the average energy consumption and production costs were also further reduced.

Key words: aluminum alloy melting furnace; temperature difference; circulation device; energy consumption; temperature uniformity; thermal management; process optimization

近年来，随着高端制造业的发展，铝材料的应用领域日益增加[1]，轻量化是其中的重要环节。特别是在汽车领域，轻量化已成为提升续航里程、燃油经济性及碰撞安全性能的核心路径[2]。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[3]。铝合金材料密度仅为钢材的三分之一，兼具良好的力学性能与加工性能，为结构轻量化提供了可行途径[4]，当前主流车企已将铝合金应用比例作为衡量车型技术水平的重要指标[5]。在航空航天领域，铝合金的应用也是实现航空航天构件材料轻量化和结构轻量化的重要手段[6]。

铝合金的熔炼作为铝合金加工领域的首道工序，是必不可少的环节，因此铝合金熔炼炉的应用越来越广泛[7]。随着智能制造技术向金属加工领域渗透，构建熔炼过程精细化管控与实时质量反馈体系，已成为提升资源利用效率、降低生产损耗的核心路径，也是保障材料性能稳定的关键技术环节，其工艺水平直接影响最终产品的力学性能与服役可靠性[8]。铝行业工业炉的技术进步对工业的发展起着十分重要的作用[9]。

实现铝合金熔炼过程的数据采集、数据分析、数据处理与数据可视化，可有效提升铝合金生产过程的数字化、智能化水平，实现数据在质量溯源与预测方面的关联应用，有利于提升成品率，降低生产成本，提高产品质量[10]。铝工业是能源密集型产业[11]，对熔炼过程实施精细化管理有助于降低能耗、提高能源利用率。节能减排是我国的基本国策[12]，在地缘冲突日益

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：2025–06–03 收到初稿，2026–06–10 收到修订稿。
作者简介：俞杭生（1990–），男，工程师，工学硕士，主要从事铝行业熔化炉、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，吴军，等 . 铝合金熔炼炉铝液温差的研究及措施 [J]. 铸造，2026，75（8）：905–909.
Yu Hangsheng，Zhang Xuxia，Wu Jun，et al. Research and measures on temperature difference of molt enaluminum in aluminum alloy smelting furnace [J]. Foundry，2026，75（8）：905–909.

激烈和世界能源格局深度调整的当下，“节能与能效提升技术创新”是能源技术革命创新行动计划的重点任务[13]。

现有的铝合金熔炼炉的结构普遍存在内外铝液温差大的问题，造成能源浪费和铝合金质量下降[14]。在开口部的铝液由于温降和传热效率不足，温度会比保温室内的铝液低几十度，而控制系统普遍都采用取液口的铝液温度进行控制，为了保证取液口的铝液温度，燃烧系统会持续对炉内进行加热，导致炉内铝液过烧和能耗增加。

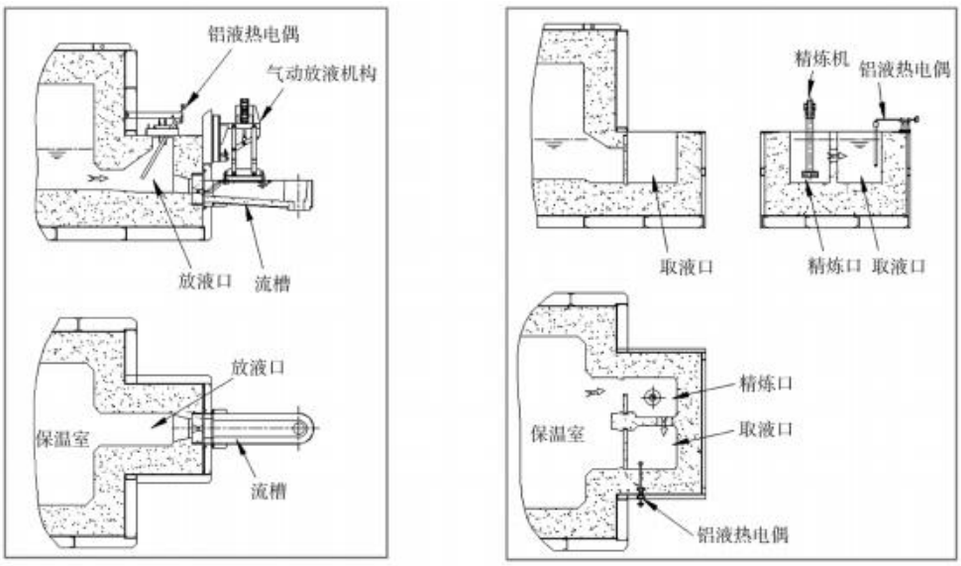
基于以上背景与现状，本项目对铝合金熔炼炉内外铝液温差的产生原因做了研究和分析，通过在铝合金熔炼炉开口部增加定制的循环装置，实现内外铝液的缓慢循环，从而降低内外的温差，实现温度的精确控制，措施实施对象为一台放液型熔化炉和一台取液型保温炉。

1 铝液温差的产生

铝合金熔炼炉在放液或取液时，高温铝液会经过炉墙侧壁的开口部且需停留一段时间，开口部存在较大的散热，而铝液无法及时从炉膛内获取足够的热量来平衡热量的散失，所以炉膛内外铝液存在一定的温差是较为普遍的现象。

开口部结构主要有放液型、取液型两种，结构如图1所示。

放液型的开口部（图1（a））设有实时检测的铝液热电偶，外侧设有放液机构和流槽，在放液口内的铝液容量约300~350 kg，放液口与炉膛之间的通道横截面积只有0.1m^2，传热面积很小。在放液结束时，放液口的铝液温度与保温室内一致，随着热量的散失，放液口的铝液温度会持续下降，直至下一次放液。而放液时间间隔一般都要大于30 mm，铝液内外的温差会达到30~40 ℃，有些保温效果较差的则温差会更大。



（a）放液型　　（b）取液型

图1　开口部结构图

Fig. 1 Opening structural drawings

放液时，首先放出的是放液口内温度相对较低的铝液，在此期间，保温室内的铝液迅速补充进入放液口，放液口的铝液温度会迅速升高，直至与炉内温度一致。在此过程中，铝液热电偶检测到的铝液温度会有很大的波动，影响温度控制系统运行和燃烧系统的频繁动作。在熔炼炉使用较长时间后，放液口与炉膛之间的通道会逐渐形成挂渣，如图2所示，进一步缩小通道的横截面积，保温室内与放液口的换热更加困难，导致铝液的内外温差进一步加大[14]。

取液型的开口部（图1（b））一般同时设有精炼口和取液口，保温室出来的铝液先在精炼口进行除气精炼，提升铝液品质，精炼完后的铝液进入取液口，待机器人或人工取液进行浇注。在精炼口和取液口的铝液容量约800~900 kg，取液口与炉膛之间设有具一定传热功能的隔板，由于散热面积较大，内外温差达到40~50 ℃，若长时间不取液，取液口的铝液温度还将降持续下降。在使用较长时间后，隔板上会形成挂渣，传热效果也将进一步变差，取液口和炉内的温差也会更大。

2 减小温差的措施

针对铝液内外温差大的问题，新项目设计时增加

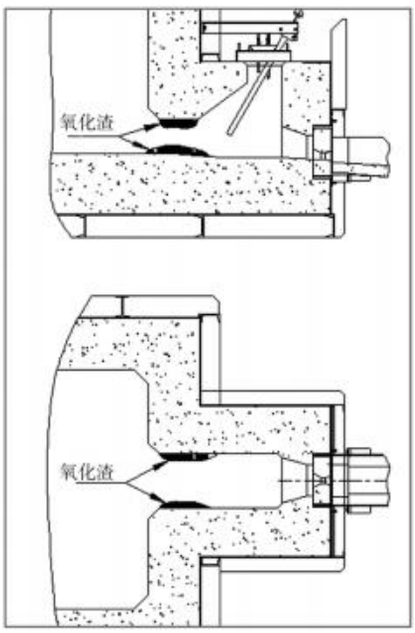


图2 通道形成挂渣示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slag adhesion in the channel

了铝液循环装置，安装在铝合金熔炼炉的开口部，将开口部的铝液与炉内铝液进行缓慢循环，减小内外铝液温差。实施的放液型熔炼炉为2 t/h塔式熔化炉，保温室容量为5 t，增加循环装置后的开口部结构如图3所示。实施的取液型熔炼炉为5.5 t保温炉，用于铸造机器人取液浇注，增加循环装置后的开口部结构如图4所示。

放液型熔炼炉的开口部加大，在放液口一侧增加循环口，循环口的底部通道与放液口相连，循环口侧边的回流通道与炉内相连，用于铝液的回流循环。铝液循环装置安装在循环口上方的炉壁上，工作时，循环装置下降使转盘贴近循环口底部，通过转盘旋转使铝液产生离心力后沿通道循环流动，循环方向如图3中箭头所示。

取液型熔炼炉的开口部，在取液口一侧增加循环口，循环口的底部通道与取液口相连，循环口侧边的回流通道与炉内相连。铝液循环装置安装位置和功能与放液型熔炼炉相同，循环方向如图4中箭头所示。

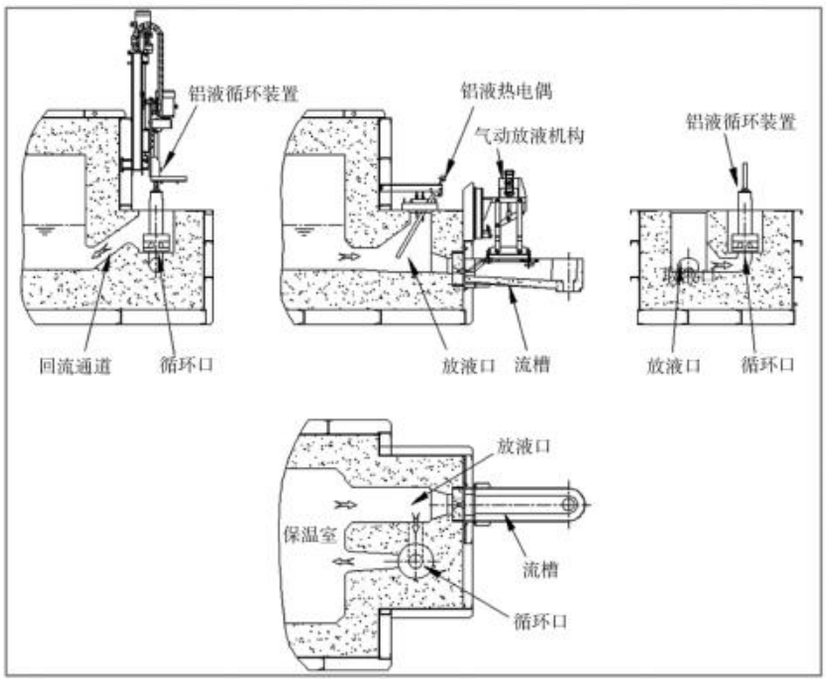


图3 放液型熔炼炉增加循环装置后的结构图

Fig. 3 Structural diagram of the tap-type aluminum melting furnace with an added circulation device

安装后的铝液循环装置如图5所示。循环装置由2.2 kW变频电机带动主轴旋转，主轴下方安装有石墨连接轴和石墨转盘，可长时间浸泡在铝液中工作。循环装置机架上装有升降电机，两侧有导柱定位，可实现自动升降，便于维护和更换配件。

3 铝液循环装置效果

熔炼炉启用后，运行铝液循环装置，开口部温度相对较低的铝液回流到保温室内升温，保温室温度较高的铝液补充至开口部使用，使内外铝液的温差减小。循环装置运行时循环口的铝液情况如图6所示。

3.1 运行测试及效果

循环装置的旋转电机分别在5 Hz、8 Hz和10 Hz做运行测试，每个频率运行时间4 h，铝液温度设置700 ℃。当开口部的铝液温度达到设定值时，用手

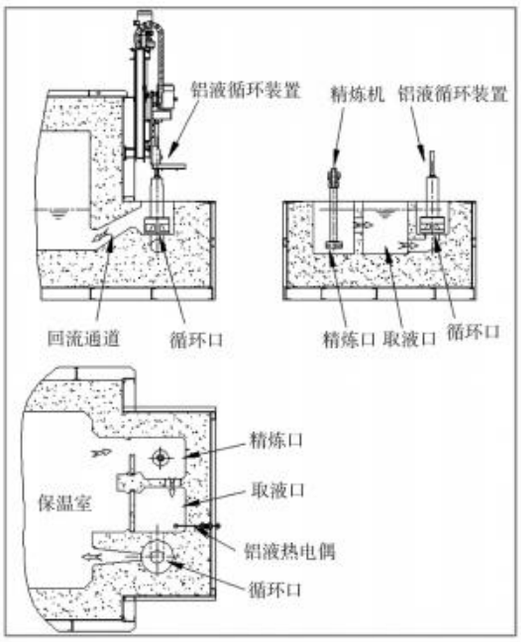


图4　取液型熔炼炉增加循环装置后的结构图

Fig. 4 Structural diagram of the stationary aluminum melting furnace with an added circulation device

图5　铝液循环装置

Fig. 5 Aluminum liquid circulation device

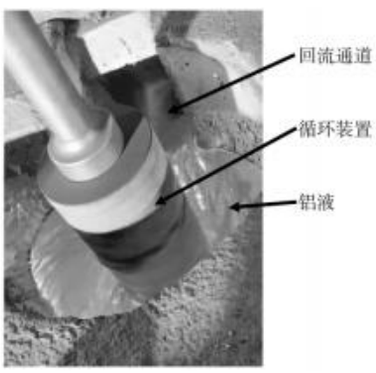


图6　铝液循环装置运行示意图

Fig. 6 Operation diagram of the aluminum liquid circulation device

持式热电偶从炉门口伸入保温室内，测得炉内的铝液温度。测温方法如图7所示，每个频率至少测的5个数据，得到炉内铝液温度和内外温差的数据见表1。取液型保温炉的铝液密度，从取液口中间位置舀取，在铝液测氢仪中测得。

表1　测试数据表

Tab. 1 Test data table

炉型	频率/Hz	炉内铝液温度/℃	内外温差/℃	铝液密度/（g·cm^{-3}）
放液型	0	730~735	30~35	——
	5	706~708	7~10	——
	8	703~705	3~5	——
	10	702~703	2~3	——
取液型	0	740~755	40~55	2.65
	5	712~716	12~16	2.62
	8	708~710	8~10	2.59
	10	704~706	4~6	2.55

注：频率为0时，循环装置不运行。

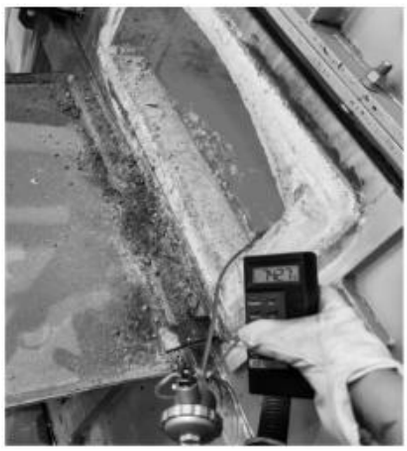


图7　保温室内铝液温度检测方法

Fig. 7 Temperature detection method for the aluminum liquid in the holding furnace

由表1中数据可知，铝液循环装置的频率越高，转速越快，炉内外的铝液温差越小。

放液型熔化炉的循环装置，从5 Hz提升至8 Hz时，内外温差有明显减小；而再继续提升至10 Hz时，温差的减小有限，已接近极限状态。测试结束后，循环装置最终以8 Hz的频率投产运行，内外温差控制在3~5 ℃。持续运行一周，测得平均能耗比没有循环装置的熔化炉降低2.6 Nm^3/h。

取液型保温炉，由于其取液口的铝液直接用于铸件的浇注，对铝液品质有一定要求。如果精炼不到位，铝液密度达不到要求，铝液中的杂质不仅会降低产品的质量和性能，还会对生产过程造成严重的影响[15]。循环装置的频率加大后，回流至保温室内的铝液量太

大，精炼机的精炼效果将受到影响，需要综合考虑。一般浇注要求铝液密度不小于2.60 g/cm^3，循环装置在5 Hz运行时，满足密度要求，且内外温差已经有较大的降低；循环装置在8 Hz、10 Hz运行时，铝液密度已无法满足要求。故循环装置在5 Hz运行较为合理，内外温差范围为12~16 ℃。在此频率运行一周，测得平均能耗比没有循环装置的保温炉降低3.1 Nm^3/h。

循环装置在5~8 Hz运行时，铝液的流动很缓慢，其对铝液的影响（如氧化）几乎可以忽略。而增加循环后，保温室内的铝液温度可以降低30~45 ℃，平均能耗降低的同时减少了烧嘴大火燃烧时长，可以一定程度上减少炉内铝液的氧化，减少铝渣的产生。

3.2 运行收益

与旧设备相比，放液型熔化炉增加的铝液循环装置在8 Hz运行后，平均能耗降低了2.6 Nm^3/h。计算年运行成本降低的收益如下：（按运行320天/年计算）

年节省然气：2.6 × 24 × 320=19 968 m^3

年节省燃气费用：19 968 × 4.0=79 872 ￥（燃气单价按4.0 ￥/m^{3}计算）

年增加耗电量：2.2 × 8/50 × 24 × 320=2 703 kW · h

年增加耗电费用：2 703 × 1.2=3 244 ￥（平均电价按1.2 ￥/m^{3}计算）

年运行成本降低：79 872–3 244=76 628 ￥

增加循环装置后的放液型熔化炉每年可节省运行成本约7.66万元，同此方法算得，增加循环装置后的取液型保温炉每年可节省运行成本约9.2万元。

4 结论

（1）增加循环装置可以有效减小熔炼炉铝液内外温差，精确控制铝液温度，提高铝液工艺参数的控制能力，提升熔炼炉设备的精细化管理水平。

（2）减小熔炼炉铝液的内外温差可以有效降低单位能耗，降低企业生产成本，减少能源浪费。

（3）循环装置的运行速度不是越快越好，要结合实际工况进行测试和分析，选择一个合理的运行频率。

参考文献：

[1] 程鸿鹏，彭宇，韩辉. 硼化处理去除铝液中钒、钛的试验研究 [J]. 甘肃冶金，2024，46（6）：94–97.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 李健东. 铝合金在现代汽车轻量化生产中的应用 [J]. 中国金属通报，2025（7）：7–9.

[5] 伍志铭. 铝合金在汽车轻量化中的应用与成效 [J]. 南方金属，2026（2）：21–23.

[6] 闫星辰，朱江奇，邱昊，等. 增材制造铝合金的材料工艺适配研究现状与发展趋势 [J]. 材料工程，2026-05-21. https：//link.cnki.net/urlid/11.1800.tb.20260521.1134.002.

[7] 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.

[8] 樊春阳，贺应钦. 关于铸造铝合金熔炼处理与在线质量控制的探讨 [J]. 冶金与材料，2026，46（2）：178–180.

[9] 王秉铨. 工业炉设计手册 [M]. 3版.北京：机械工业出版社，2010.

[10] 李波浪. 高性能铝合金熔铸过程的数据挖掘与质量溯源研究 [D]. 长沙：中南大学，2023.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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）[2026-05-28].http：//www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.

[14] 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.

[15] 佟鑫. 简析铝合金熔炼中常见夹杂及净化技术 [J]. 世界有色金属，2024（13）：1–3.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）