

引文格式:王日昕,李翰墨,伍永福,等. 基于液相量及挥发分控制的低盐二次铝灰焙烧结圈抑制研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(2): 9-16.

WANG Rixin, LI Hanmo, WU Yongfu, et al. Suppression of ring formation of low-salt secondary aluminum dross based on liquid phase and volatile matter control[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 9-16.

基于液相量及挥发分控制的低盐二次铝灰焙烧结圈抑制研究

王日昕¹, 李翰墨², 伍永福², 张 勇¹, 王艺慈², 刘中兴²

(1. 江西省科学院 材料与智能制造研究所, 江西 南昌 330096;

2. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

[摘 要] 针对目前回转窑在处理二次铝灰冶炼过程中频繁出现的结圈问题,本研究以某企业低盐二次铝灰为原料进行烧结试验研究,通过热重分析、高温形变分析、液相量及挥发与温度的关系等确定原料的致密化烧结温度和成分挥发温度,提出了两段式焙烧工艺,并进行了验证。回转窑在焙烧低盐二次铝灰时,产生结圈现象的主要原因是高温阶段生成了过量的液相。710℃下二次铝灰由于剧烈燃烧放出大量热,导致局部快速升温产生液相,促使烧结致密化,850℃时致密化完成;939.5~1 194.9℃时Cl、F、K、Na等元素挥发;随着温度升高,液相总生成量呈现先增加后降低趋势,1 000℃时达到最大生成量10.66%,1 300℃时熔盐类液相总生成量降至7.16%。两段式焙烧工艺即850℃低温焙烧3 h,用于完成物料造球致密化并让氮气平稳逸出;1 300℃高温焙烧3 h,目的是在控制液相量的前提下,集中处理并挥发Cl、F、K、Na等易导致结圈的盐类元素。验证试验表明,与单一温度焙烧相比,两段式焙烧(850℃, 3 h; 1 300℃, 3 h)结圈质量仅为0.41 g,较方案一(850℃, 3 h)减少了28.07%,方案二(1 300℃, 3 h)减少了14.58%,抑制回转窑结圈效果明显;两段式焙烧后,样品中Na和Cl含量分别降至1.21%和0.03%,Al₂O₃富集度提升至81.44%,此外Cl、K₂O、SO₃和F的质量分数也明显下降,焙烧效果更好。本研究结果为回转窑处理低盐二次铝灰过程中减轻结圈问题提供了理论指导和技术参考。

[关键词] 二次铝灰; 回转窑焙烧; 抑制结圈; 两段式焙烧; 液相量; 挥发分

[中图分类号] TF821; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0009-08

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.002

0 引言

回转窑法作为火法处理二次铝灰的主要技术手段,通过回转窑的高温焙烧过程,能够有效去除

铝灰中盐分和氮化铝^[1]。然而,在回转窑生产操作过程中,结圈现象的发生颇为频繁^[2]。回转窑结圈所带来的负面效应不仅使工艺制度失常、失控,还会引起窑内有效截面积的减少,这不仅影响了物料的流动性,也对热交换效率产生了不利影响。为了克服结圈区域对物料流动的阻碍,不得不提高推动力,此举无疑加重了回转窑的运行负担,并导致能源消耗增加。另外,结圈的存在还会导致物料煅烧不均匀,进而影响最终产品质量^[3,4]。在极端情形下,严重的结圈甚至可能导致窑炉完全堵塞,迫使生产中断,甚至造成机械应变,破坏耐火衬层^[5,6],引起频繁停产检修^[7,8]。因此,减轻回转窑结圈已成为球团生产的重要课题^[9-11]。

[收稿日期] 2025-10-12 [修订日期] 2025-11-11

[录用日期] 2025-11-13 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 王日昕(1983—),男,硕士,副研究员,主要从事固体废物资源化利用方面的研究。

[通信作者] 伍永福(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为能源高效洁净利用及装备制造业热加工及冶金行业中复杂流动传热传质过程模拟优化。

[基金项目] 高校基本科研业务费项目(2024RCTD008);内蒙古自治区教育科学研究“十四五”规划课题(NGJGH2022365);内蒙古自然科学基金项目(2022LHMS05004)。

对于回转窑结圈问题,诸多学者做了大量研究,并提出了相应措施。范晓慧等^[12]分别对窑炉的头、中、尾三段进行深入探讨,分析了结圈现象的形成原因及其影响因素。研究表明,窑中高温环境以及低熔点物质、超细粉末的高占比是导致该区域结圈现象的关键因素。此外,窑炉中部结圈、窑尾区域粉末停留时间较长又是引发窑尾结圈现象的重要因素。李晓兵等^[13,14]对宣钢回转窑结圈现象的原因进行了深入分析,结果表明球团中 SiO_2 、 CaO 质量分数高易生成低熔点的铁橄榄石、钙铁橄榄石液相,是产生结圈的诱因;球团粉末含量较高以及高温焙烧过程中粉末间发生固相反应是造成结圈的主要因素,通过调整配矿策略、降低脉石比例等手段可解决结圈问题。王兴锋等^[15]发现,球团内部晶粒间的连晶固结效果不佳,易于形成低熔点的铁橄榄石和钙铁橄榄石液相,提出优化原燃料资源质量、改善配矿结构等技术创新措施来抑制回转窑的结圈现象。罗果萍等^[16]提出,球团原料中($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)的质量分数增加,容易导致形成低熔点化合物,进而使得回转窑内的粉末物料及球团矿的软熔变形温度降低,液相量相应增多;这些液相物质通过黏结粉料及球团矿,形成了结圈物质。司金凤等^[17]研究表明煤粉促进粉末固结,更易结圈。甄彩玲等^[18]研究发现,结圈物主要为赤铁矿,其次为石英、钙铁橄榄石、钙镁橄榄石、长石等硅铝酸盐;球团矿产生的粉末及煤灰在高温下形成低熔点化合物,并形成液相渗入球团矿;液相中的赤铁矿在球团矿表面重结晶、再结晶,形成稳定的结圈物;通过采用改善配矿结构降低硅及碱金属含量、优化

燃料资源质量减少低熔点物质的摄入、提高各工序操作条件减少粉末的摄入等措施,可有效抑制结圈现象。综上所述,大量的研究和试验表明,回转窑结圈的主要因素是球团粉末多、低熔点物质生成和局部焙烧温度高,未来的研究工作应当聚焦于预防和解决回转窑结圈的措施,包括改进工艺操作流程、优化原料配比、提升预热效率以及调整燃煤量等^[19,20]。目前研究尚存在不足之处:一是对结圈机理的深入研究尚显不足,研究重点多集中于现象描述和影响因素的分析,而对于焙烧过程中液相量的成分及含量变化规律探讨不够深入;二是虽然提出了改进工艺操作流程、优化原料配比等解决策略,但对于具体实施措施及其效果评估的明确性仍有待加强。

针对回转窑结圈问题,本研究以某企业低盐二次铝灰为原料进行烧结实验,通过热重分析、高温形变分析、液相量及气相挥发组分与温度的关系分析等确定原料的致密化烧结温度和成分挥发温度,提出了两段式焙烧工艺,并进行验证。该研究结果可为回转窑法处理二次铝灰过程中减轻结圈问题提供理论指导和技术支撑。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验用二次铝灰取自贵阳某再生铝企业熔炼工艺,成分分析见表1。该二次铝灰中金属Al含量为4%,AlN含量为8.58%。将试样置于刚玉研钵中磨细,过100目(孔径165 μm)筛后保存备用。

表1 低盐二次铝化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of secondary aluminum dross(mass fraction)

%

组分	Al	Al_2O_3	AlN	SiO_2	CaO	MgO	NaCl	F	Cl	Zn	Fe_2O_3	CuO	S	KCl	MnO
含量	4	44.26	8.58	6.11	3.36	1.88	5.65	2.59	0.2	2.58	6.18	4.14	1.58	5.33	3.56

1.2 试验设备

高温管式炉(包头云捷电炉厂)中心部分为刚玉管反应器,反应器中心为加热核心区域。实验装置见图1。

1.3 实验方法

1) 热重分析。称取10 mg样品置于刚玉坩埚内并放置在热重分析仪中,开展热重实验,分析焙烧

过程中样品质量变化以了解二次铝灰的燃烧过程。热重实验的焙烧温度范围为30~1300℃,升温速率为10℃/min,实验气氛为空气,气体体积流量为50 mL/min。

2) 高温形变分析。取用部分样品与无水乙醇混合压制成 $\Phi 10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 的紧密圆柱体,置于可视化高温形变分析仪中,升温速率10℃/min,根据摄像

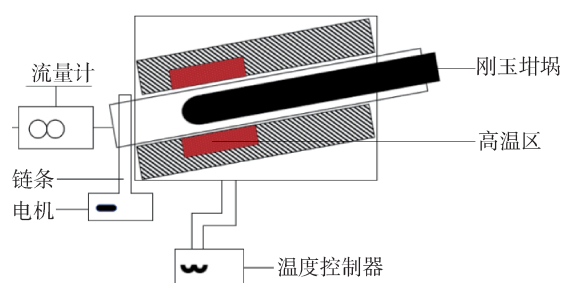


图1 高温管式炉

Fig. 1 High-temperature sintering tube furnace

体系捕捉的试样外轮廓,确定室温下试样轮廓面积记为 A_0 ,升温至任一温度 T 时轮廓面积记为 A ,得到圆柱体试样在升温过程中轮廓面积变化的相对值 A/A_0 ,绘制烧结升温过程的形变曲线并进行分析,得出低盐二次铝灰完成造球及烧结致密化过程的最低烧结温度。

3) 热力学分析。使用FactSage软件中Equilib模块对该铝灰焙烧过程中液相量和气相挥发组分质量随温度的变化进行分析,得出挥发分充分逸出且液相量尽量低的温度区间。模拟计算温度范围选取 $300 \sim 1400^\circ\text{C}$,计算步长为 100°C ,标准大气压和氧分压条件($21\%\text{O}_2$),物相组成变化以质量分数表示。

4) 验证试验。另取试样置于高温管式炉中保

温烧结,反应结束后管式炉自然冷却取出物料待测分析。采用X荧光光谱仪分析不同焙烧温度下二次铝灰熟料的主要元素和含量,以验证结果的准确性。具体焙烧制度为:温度范围 $30 \sim 750^\circ\text{C}$,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,空气流量 $80 \text{ mL}/\text{min}$,保温 3 h ;温度范围 $750 \sim 1300^\circ\text{C}$,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,空气流量 $80 \text{ mL}/\text{min}$,保温 3 h 。

1.4 测试与分析

采用综合热分析仪(HCT-4北京恒久科学仪器厂)对低盐二次铝灰焙烧过程的质量变化进行分析;采用可视化高温形变分析仪对试样轮廓所占的面积进行分析;采用FactSage7.1对低盐二次铝灰焙烧过程中液相量及气相挥发组分质量与温度的关系进行计算;采用X荧光光谱仪(荷兰PANalytical AXIOS)对铝灰渣中元素含量进行分析。

2 结果及讨论

2.1 二次铝灰焙烧过程热重及DTA曲线分析

TG曲线反映了样品质量与温度之间的关系,将TG曲线一阶微分就可以得到DTG曲线^[21]。二次铝灰在焙烧过程中的TG、DTG、DTA曲线如图2所示。

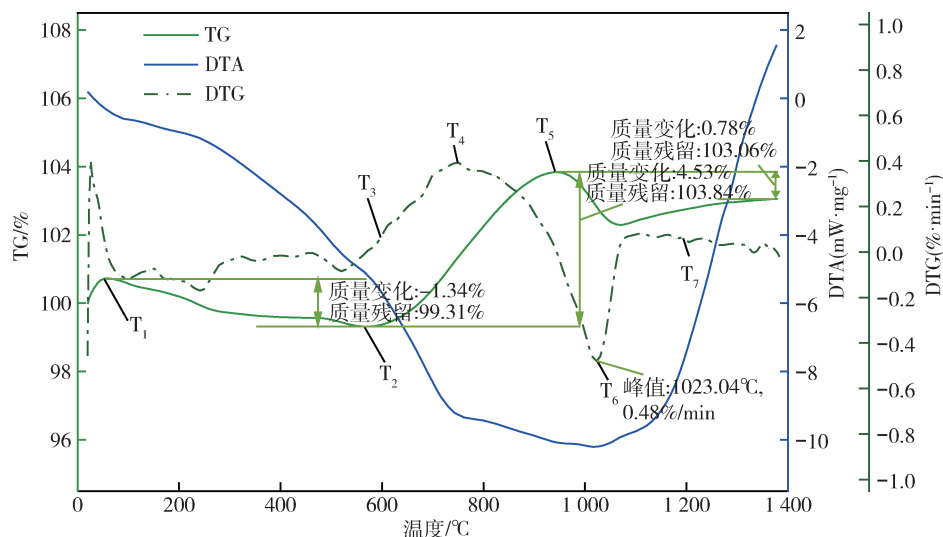


图2 低盐二次铝灰热重曲线

Fig. 2 Thermogravimetric curve of low-salt secondary aluminum dross

由图2的TG、DTG曲线中可知二次铝灰在氧化燃烧的过程中7个特征温度点。

1) $T_1(54.6^\circ\text{C})$ 。单质铝和氮化铝的自发氧化反应同时存在于样品升温过程中,在该点处样品增重

0.72%。

2) $T_2(568.2^\circ\text{C})$ 。该温度为TG曲线上样品燃烧前质量最低点温度,相较上一温度点样品失重1.41%,产生该现象的原因是因为低盐二次铝灰中

残留的水分随温度升高而不断蒸发,导致样品失重。

3) $T_3(597.8^{\circ}\text{C})$ 。样品着火温度,样品开始燃烧,发生氧化反应。

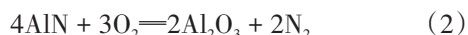
4) $T_4(750.3^{\circ}\text{C})$ 。DTG曲线上的最高点,即样品质量增速最快点温度,在该点处样品质量增速为 $0.39\%/min$,试样中的Al及AlN迅速氧化增重。

5) $T_5(939.5^{\circ}\text{C})$ 。TG曲线最高点,即样品质量最大点温度,相较 T_2 处质量变化 4.53% 。

6) $T_6(1\,023^{\circ}\text{C})$ 。DTG曲线最低点,即样品最大失重速率点温度,失重速率为 $0.48\%/min$,试样中挥发分大量溢出,致使样品快速失重。

7) $T_7(1\,194.9^{\circ}\text{C})$ 。样品质量变化速率稳定在0附近,样品质量不在发生显著变化。

对于低盐二次铝灰焙烧过程,根据样品的特征温度点可将燃烧过程分为5个阶段:初始增重阶段, $T_0 \sim T_1$;蒸发失重阶段, $T_1 \sim T_2$;燃烧阶段, $T_2 \sim T_3$;元素挥发阶段, $T_3 \sim T_7$;燃尽阶段, $>T_7$ 。由图2中的TG曲线可以看出,燃烧阶段($T_2 \sim T_3$)有明显的增重现象,这是由于二次铝灰中的单质Al和AlN的燃烧反应引起的(经计算,1 kg单质Al燃烧增重0.89 kg,1 kg AlN燃烧增重0.24 kg,发生的反应见式(1)—(2))。TG曲线上($T_3 \sim T_7$)阶段有明显的失重现象,这是由于碱金属与卤族元素挥发导致。



2.2 二次铝灰高温变形分析

在回转窑中进行物料造球致密化的过程中,烧结温度发挥着至关重要的作用。该温度不仅决定了物料的熔融程度以及球团的坚固程度,同时亦对结圈现象的产生具有直接的影响。适当的烧结温度能够促使物料有效粘结,完成球团的致密化;但若烧结温度超出或未达适宜范围,有可能诱发结圈现象。低盐二次铝灰的高温变形分析曲线见图3,由图可知,低盐二次铝灰在 710°C 时已基本完成造球与烧结致密化过程。综合热重分析与热力学计算结果来看,这一致密化现象可能是由物相变化与化学反应协同作用导致的。热力学计算表明,当焙烧温度大于 700°C 后,体系内的熔盐类物质开始发生液化,这些新生成的微量液相在颗粒间可以起到“黏结剂”的作用,通过表面张力促使固相颗粒发生重排和润湿。对应TG-DTG曲线, 710°C 正处于试样

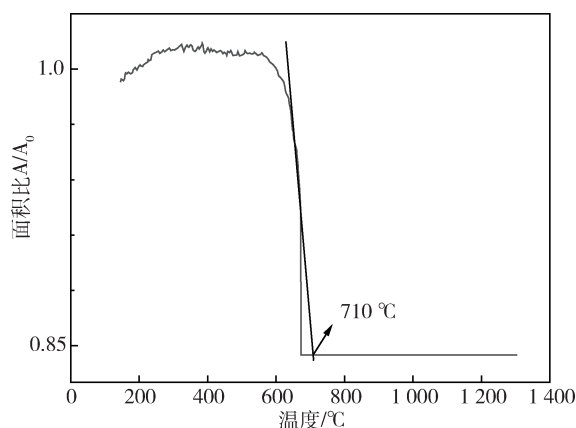


图3 低盐二次铝灰最低烧结温度测定曲线

Fig. 3 Determination curve of sintering end temperature for low-salt secondary aluminum dross

的剧烈燃烧阶段,靠近DTG最高点 750.3°C 。试样中的Al及AlN在此阶段发生迅速的氧化反应,其剧烈的放热效应导致局部温度急剧升高,进一步加速了固相间的扩散与连结,最终导致烧结致密化。因此对于低盐二次铝灰,低温烧结温度应控制在 710°C 以上。

2.3 焙烧过程中液相量与温度的关系

采用Factsage7.1软件中的Equilib模块对低盐二次铝灰焙烧过程中液相量与温度的关系进行计算,结果如图4所示。

由图4可以看出,在研究温度范围内低盐二次铝灰焙烧过程中液相量的变化十分明显,主要发生

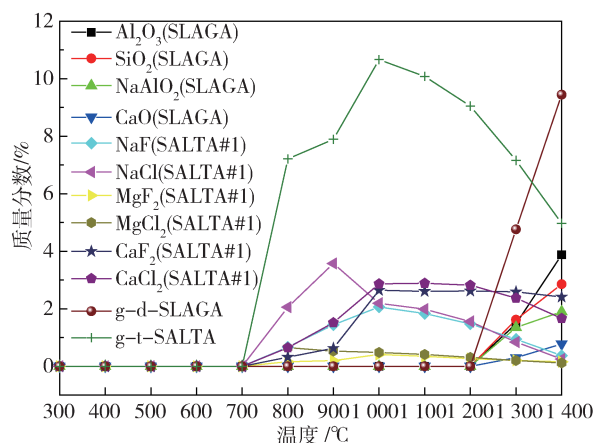


图4 低盐二次铝灰焙烧过程中液相量质量分数随温度变化曲线

Fig. 4 curve of the liquid phase mass fraction varying with temperature during the roasting process of low-salt secondary aluminum dross

在温度大于700℃后。通过热力学计算可知,低盐二次铝灰焙烧过程中液相组成主要分为两大类,“SLAGA”和“SALTA#1”。“SLAGA”对应计算过程中的氧化物渣的数据库,在低盐铝灰焙烧过程中主要包含了 Al_2O_3 、 SiO_2 、 NaAlO_2 和 CaO 四种液相成分;“SALTA#1”对应计算过程中的熔盐类的数据库,在低盐铝灰焙烧过程中主要包含了 NaF 、 NaCl 、 MgF_2 、 MgCl_2 、 CaF_2 和 CaCl_2 六种液相成分。图中“g-d-SLAGA”为氧化物熔渣类液相生成总量,“g-t-SALTA”为熔盐类液相生成总量。随着焙烧温度的增加,熔盐类的液相成分先生成于产物中,其总量在温度大于700℃后开始液化,温度达到1000℃时达到最大生成量10.66%,其中 NaF 占比2.06%, NaCl 占比2.19%, MgF_2 占比0.41%, MgCl_2 占比0.48%, CaF_2 占比2.64%, CaCl_2 占比2.87%。随着温度的继续升高,原本处于熔融状态的低熔点盐类物质(如 NaCl 、 NaF 等)发生气化,大量挥发并逸出了物料体系,熔盐类液相成分生成量逐渐降低,1300℃时熔盐类液相总生成量降至7.16%,其中 NaF 与 NaCl 变化较为显著,分别降至0.94%与0.84%。焙烧温度大于1200℃后,氧化物渣系的主要成分 Al_2O_3 、 SiO_2 、 NaAlO_2 和 CaO 开始变成液相,并随着温度的提升四种氧化物的质量分数逐渐增加。在1300℃处,氧化物熔渣类的液相成分占比4.76%,其中占比最大的为 SiO_2 (占比1.62%), Al_2O_3 次之(占比1.48%)。

2.4 二次铝灰焙烧过程中气相挥发组分质量与温度的关系

采用FactSage热力学计算软件中的Equilib模块对低盐二次铝灰焙烧过程中的气相挥发组分质量的变化进行计算,结果如图5所示。由图5可以看出,低盐二次铝灰焙烧过程中气相挥发组分质量在800℃以前基本维持在5%左右,主要成分为 N_2 (占比3.27%)、 O_2 (占比1.02%);当温度大于800℃后,随着焙烧温度的逐渐提升,相挥发组分质量逐渐上升。生成的气相挥发组分主要包括 N_2 、 O_2 、 AlF_3 、 NaAlF_4 、 SiF_4 、 Cl_2 、 NaCl 和 $(\text{NaCl})_2$ 、“g-GAS”为低盐二次铝灰焙烧过程中气相挥发组分的总质量分数,气相总质量由焙烧温度为800℃时的4.51%增加到焙烧温度为1400℃时的10.19%,高温下明显增加的气相组分 NaCl (由0%增至2.42%)、 NaAlF_4 (由0.03%增至1.41%)和 O_2 (由1.01%增至1.61%)。

基于上述热力学计算结果分析可知,在二次铝

灰焙烧过程中,导致回转窑结圈现象的重要因素是过量液相的生成。因此,本研究提出采用两段式焙烧策略(即低温焙烧与高温焙烧相结合),在低温阶段使氯化铝燃烧产生的、在气相中占比最大的氮气平稳逸出,避免物料在后续急剧升温至1300℃并产生大量液相时,因内部气体剧烈膨胀析出而破坏已经初步烧结致密的球团结构。完成物料的造球及烧结致密化步骤,随后在1300℃的高温阶段,集中处理并挥发 Cl 、 F 、 K 、 Na 等导致结圈的盐类元素,尽量降低高温焙烧阶段液相量的比例,以期减轻或消除回转窑内的结圈问题。

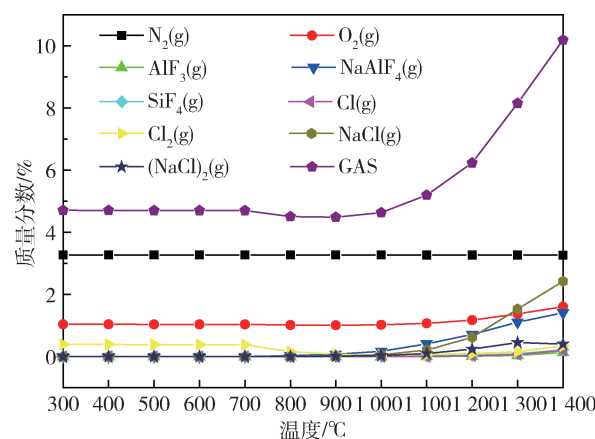


图5 低盐二次铝灰焙烧过程中气相挥发组分数量随温度变化曲线

Fig. 5 Curve of gas phase volatile component quantity change with temperature during the roasting process of low-salt secondary aluminum dross

2.5 二段焙烧工艺制度确定及结圈抑制效果验证

由热力学计算结果可知,在850℃时,总液相量维持在较低水平,约6%~7%、挥发分约4.49%,高于最低烧结温度710℃,可完成造球及烧结致密化过程;在1300℃时,液相量约12%,可以完成液相中 Na 、 K 、 Cl 、 F 等元素快速挥发过程。因此对于低盐二次铝灰可采用850℃焙烧3 h随后以10℃/min升温至1300℃继续焙烧3 h的两段式焙烧制度,在确保挥发分充分逸出的同时尽量降低液相量占比,从而达到抑制结圈的目的。

为验证热力学计算结果的准确性,对低盐二次铝灰分别进行了850℃单一焙烧、1300℃单一焙烧以及两段式焙烧(850℃至1300℃)处理,并采用X荧光光谱仪测定焙烧后样品的化学成分组成,结果

见表2。

表2 低盐二次铝灰焙烧过程化学成分变化(质量分数)

Table 2 Chemical composition variation during the roasting of low-salt secondary aluminum dross (mass fraction) %

化学成分	850℃, 3 h	1300℃, 3 h	850℃, 3 h-1 300℃, 3 h
Al ₂ O ₃	76.64	78.11	81.44
MgO	7.40	7.58	7.35
SiO ₂	5.59	5.88	4.91
Na ₂ O	3.09	2.44	1.21
Cl	1.46	0.51	0.03
CaO	1.42	2.34	1.40
TiO ₂	0.96	0.50	1.14
K ₂ O	0.96	0.46	0.31
Fe ₂ O ₃	0.75	0.61	0.88
MnO	0.64	0.67	0.76
SO ₃	0.29	0.02	0.02
V ₂ O ₅	0.29	0.28	0.28
F	0.24	0.13	—
BaO	0.13	0.08	0.07
Cr ₂ O ₃	0.03	0.20	0.04
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.02

由表2可知,对于低盐二次铝灰,850℃单一焙烧下Na₂O(3.09%)和Cl(1.46%)等元素含量较高,脱除效果有限。升温至1 300℃虽能促进挥发,但由于缺乏低温预处理,效果有限。相比之下,两段式焙烧方案表现最优;Na和Cl含量分别降至1.21%和0.03%,Al₂O₃富集度提升至81.44%,此外Cl元素、K₂O、SO₃和F元素质量百分数也明显下降,与热力学计算结果相吻合。

在结圈抑制效果方面,实验结果表明,经方案一焙烧后结圈质量为0.57 g;经方案二焙烧后结圈质量为0.48 g;而经方案三焙烧后,挥发分大量平稳逸出,结圈质量仅为0.41 g。经对比,方案三的结圈质量较方案一减少了28.07%,较方案二减少了14.58%。由此可见,两段式焙烧策略在抑制回转窑结圈方面具有明显优势。

3 结论

针对回转窑处理低盐二次铝灰过程中出现的

结圈现象,本研究以某企业低盐二次铝灰为原料进行烧结实验,通过热重分析、高温形变分析、烧结实验等确定原料的致密化烧结温度和成分挥发温度,提出了两段式焙烧工艺,并进行了验证,得到以下主要结论。

1) 回转窑在焙烧低盐二次铝灰时,产生结圈现象的主要原因是高温阶段生成了过量的液相。热重分析及高温形变分析表明,当温度高于710℃时样品处于剧烈燃烧阶段,放热效应导致局部温度快速升高,产生液相,促使烧结致密化;939.5~1 194.9℃属于Cl、F、K、Na等元素挥发阶段,其后质量不再变化;温度大于700℃后样品开始液化,且不断增加,1 000℃时达到最大生成量10.66%,之后开始减少,1 300℃时熔盐类液相总生成量降至7.16%。

2) 两段式焙烧工艺即采用850℃低温焙烧3 h与1 300℃高温焙烧3 h相结合的新制度。850℃阶段用于完成物料造球致密化并让氮气平稳逸出;1 300℃阶段则在控制液相量的前提下,集中处理并挥发Cl、F、K、Na等易导致结圈的盐类元素。

3) 验证试验表明,与单一温度焙烧相比,两段式焙烧(850℃, 3 h; 1 300℃, 3 h)结圈质量仅为0.41 g,较方案一(850℃, 3 h)减少了28.07%,方案二(1 300℃, 3 h)减少了14.58%,抑制回转窑结圈效果明显;两段式焙烧后,样品中Na和Cl含量分别降至1.21%和0.03%,Al₂O₃富集度提升至81.44%,此外Cl、K₂O、SO₃和F的质量分数也明显下降,焙烧效果更好。

4) 本研究结果为回转窑处理低盐二次铝灰过程中减轻结圈问题提供了理论指导和技术参考,为相关企业优化回转窑处理低盐二次铝灰工艺,提高生产效率和产品质量提供了新的思路和方法。

[参考文献]

- [1] 董良民. 二次铝灰无害化与资源化回收利用工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
DONG Liangmin. Research on the harmless and resource recycling technology of secondary aluminum dross [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [2] 杨雪峰, 姜涛, 范晓慧, 等. 昆钢球团回转窑结圈机理研究及预防控制[J]. 烧结球团, 2009, 34(3): 21-24.
YANG Xuefeng, JIANG Tao, FAN Xiaohui, et al. Mechanism study and countermeasures on ring formation of rotary kiln used to produce oxidized pellets in KISC [J]. Sintering and Pelletizing,

- 2009, 34(3): 21-24.
- [3] JESPER Stjernberg, JOHN C Ion, MARTA-LENA Antti, et al. Extended studies of degradation mechanisms in the refractory lining of a rotary kiln for iron ore pellet production [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(8): 1519-1528.
- [4] GUO Y, WANG S, HE Y, et al. Deposit formation mechanisms in a pulverized coal fired grate for hematite pellet production [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 161: 33-40.
- [5] 姚菲, 张兴凯, 尹啸, 等. 链算机-回转窑球团工艺中结圈物对耐火材料的侵蚀[J]. *中国冶金*, 2023, 33(9): 71-79.
- YAO Fei, ZHANG Xingkai, YIN Xiao, et al. Erosion of refractory material by ring-forming product in grate-rotary kiln pelletizing process [J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(9): 71-79.
- [6] LI Hailong, XIE Bin, ZHU Xiaolei, et al. Erosion behaviour of rotary kiln refractory and its effects on ringing during steel-rolling oily sludge incineration [J]. *Waste Management*, 2023, 164: 162-170.
- [7] 张汉泉. 链算机-回转窑氧化球团结圈结块原因及预防[J]. *金属矿山*, 2005(7): 59-61.
- ZHANG Hanquan. Causes for ringing and lumping of grate-kiln for oxidized pellets and precautions [J]. *Metal Mine*, 2005(7): 59-61.
- [8] 李军, 张化明. 邯钢氧化球团回转窑结圈原因分析及预防[J]. *烧结球团*, 2007(3): 55-58.
- LI Jun, ZHANG Huaming. Analysis and prevention of kiln-ringing of HANGANG oxidized pelletizing production line [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2007(3): 55-58.
- [9] 叶匡吾. 我国球团生产的现状和展望[J]. *烧结球团*, 2003(1): 1-4.
- YE Kuangwu. The present state and the forecasting of our country pelletizing industry, [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2003(1): 1-4.
- [10] 叶匡吾. 三种球团焙烧工艺的评述[J]. *烧结球团*, 2002(1): 4-7.
- YE Kuangwu. Review on three kinds of pellets roasting process [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2002(1): 4-7.
- [11] 侯恩俭, 王斌, 杨永斌, 等. 氧化球团回转窑中结圈物的形成机理及抑制措施研究[J]. *烧结球团*, 2016, 41(3): 34-38, 41.
- HOU Enjian, WANG Bin, YANG Yongbin, et al. Study on formation mechanism of rings in rotary kiln for oxidized pellet and their control measures [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(3): 34-38, 41.
- [12] 范晓慧, 甘敏, 袁礼顺, 等. 氧化球团链算机-回转窑结圈机理的研究[J]. *钢铁*, 2008(3): 15-20.
- FAN Xiaohui, GAN Min, YUAN Lishun, et al. Study of mechanism on ring formation in grate-kiln of acid pellet [J]. *Iron & Steel*, 2008(3): 15-20.
- [13] 李晓兵. 回转窑结圈的原因分析及防治[J]. *河北冶金*, 2021(6): 59-63.
- LI Xiaobing. Cause analysis and prevention of rotary kiln ring [J]. *Hebei Metallurgy*, 2021(6): 59-63.
- [14] 李晓兵. 延长回转窑结圈周期的生产实践[J]. *烧结球团*, 2021, 46(1): 83-87.
- LI Xiaobing. Production practice of extending the ringing formation period of rotary kiln [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(1): 83-87.
- [15] 王兴锋, 李铁柱, 孙孝东, 等. 大孤山球团厂回转窑结圈机制与抑制措施研究[J]. *冶金能源*, 2022, 41(6): 45-49.
- WANG Xingfeng, LI Tiezhu, SUN Xiaodong, et al. Study on the intrinsic relationship between pellet ore properties and mineral phases of rotary kiln nodules [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2022, 41(6): 45-49.
- [16] 罗果萍, 聂小龙, 吴胜利, 等. F、K、Na对氧化球团回转窑结圈性能的影响[J]. *烧结球团*, 2013, 38(6): 29-32, 40.
- LUO Guoping, NIE Xiaolong, WU Shengli, et al. Influence of F, K, Na on the ring formation properties of oxidized pellet rotary kiln [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2013, 38(6): 29-32, 40.
- [17] 司金凤, 贾彦忠, 刘吉涛, 等. 氧化球团回转窑结圈物显微结构的特性[J]. *钢铁研究*, 2014, 42(1): 5-8.
- SI Jinfeng, JIA Yanzhong, LIU Jitao, et al. Characteristics of microstructure for ring-forming material of oxidized pellet rotary kiln [J]. *Research on Iron and Steel*, 2014, 42(1): 5-8.
- [18] 甄彩玲, 梁功庆, 潘建, 等. 回转窑内结圈物特性分析[J]. *中国冶金*, 2024, 34(7): 42-50.
- ZHEN Cailing, LIANG Gongqing, PAN Jian, et al. Characteristic analysis of ring-forming material in rotary kiln [J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(7): 42-50.
- [19] WANG Yaozu, XU Yue, SONG Xiaoran, et al. Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD [J]. *Powder Technology*, 2024, 439: 119649.
- [20] 范广全. 球团矿生产技术问答(下册)[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- FAN Guangquan. Questions and Answers on Pellet Production Technology (Volume II) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [21] 武帅. 型煤的燃烧特性及其动力学研究[D]. 辽宁科技大学, 2020.
- WU Shuai. Study on combustion characteristics and kinetics of briquette [D]. University of Science and Technology Liaoning, 2020.

Suppression of ring formation of low-salt secondary aluminum dross based on liquid phase and volatile matter control

WANG Rixin¹, LI Hanmo², WU Yongfu², ZHANG Yong¹, WANG Yici², LIU Zhongxing²

(1. Institute of Materials and Intelligent Manufacturing, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China;

2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In view of the frequent ringing problem in the process of secondary aluminum dross smelting in rotary kiln, this study used low-salt secondary aluminum dross as raw material for sintering experiment. The densification sintering temperature and the composition volatilization temperature were determined by thermogravimetric analysis, high temperature deformation analysis and the relationship between liquid volume and volatile matter and temperature. A two-stage roasting process was proposed and verified. When the rotary kiln roasts the low-salt secondary aluminum ash, the main reason for the ringing phenomenon is the excessive liquid phase generated at the high temperature stage. At 710°C, the secondary aluminum dross emits a lot of heat due to violent combustion, which leads to the rapid heating of the local micro-area to produce liquid phase, which promotes the densification of sintering, and the densification is completed at 850°C. At 939.5–1 194.9°C, Cl, F, K, Na and other elements volatilize. With the increase of temperature, the total liquid phase increases first and then decreases, reaching a maximum of 10.66% at 1 000°C, and the total molten salt liquid phase decreases to 7.16% at 1 300°C. The two-stage roasting process, i. e. low-temperature roasting at 850°C for 3 h, is used to complete the balling densification and let the nitrogen escape smoothly. The purpose of high temperature roasting at 1 300°C for 3 h is to concentrate and volatilize Cl, F, K, Na and other salt elements that easily lead to ring formation. The verification test showed that compared with single temperature roasting, the ring quality under two-stage roasting (850°C, 3 h; 1 300°C, 3 h) is only 0.41 g, which is 28.07% lower than that of scheme 1 (850°C, 3 h) and 14.58% lower than that of scheme 2 (1 300°C, 3 h), and the effect of inhibiting the ring formation is obvious. After two-stage roasting, the content of Na and Cl in the sample decreased to 1.21% and 0.03%, respectively, and Al₂O₃ increased to 81.44%. In addition, the mass fraction of Cl, K₂O, SO₃ and F also decreased significantly, and the roasting effect was better. The results of this study provide theoretical guidance and technical reference for the ringing formation inhibit in roasting of low-salt secondary aluminum dross by rotary kiln.

Key words: secondary aluminum dross; rotary kiln sintering ring formation inhibit; two-stage roasting; liquid phase; volatile matter