

# LiF-NaF 熔盐体系理化性能研究

王晨雪, 那维克然·塞力木, 何艳君, 王守明, 陈方永, 李念念, 黄建国, 翁鸿蒙  
(新疆有色金属研究所有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830026)

**[摘要]** 熔盐电解工艺中的支持电解质需具备良好的导电性、较低的黏度,同时兼顾表面张力、密度、熔融温度等理化性质。本文基于前人熔盐电解工艺研究,借助高温熔体物性测试系统,研究了不同温度(750 °C、800 °C、850 °C、900 °C、950 °C、1 000 °C)和不同摩尔比(LiF/NaF = 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4)对氟化盐二元体系 LiF-NaF 熔盐混合物的密度、黏度、表面张力和电导率等理化性质的影响。结果表明, LiF-NaF 熔盐体系的密度随温度升高而减小,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而增大; LiF-NaF 熔盐体系的黏度随温度升高而降低,在 950 °C 后趋于稳定,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低; LiF-NaF 熔盐体系的表面张力随温度升高而下降,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低; LiF-NaF 熔盐体系的电导率随温度升高而升高,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低。采用 LiF-NaF 熔盐体系时,应针对具体电解目标产物选用最适宜摩尔比和温度。

**[关键词]** 熔盐体系; 密度; 黏度; 表面张力; 电导率

**[中图分类号]** TF111; TF82

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2025)06-0007-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2025.06.002

## 0 引言

自然界中金属有游离态和化合态两种存在形式,金属冶炼的实质是通过还原使化合物的金属阳离子变成金属单质。根据金属活泼性质的不同,金属冶炼一般有热分解法、还原法及电解法,其中电解法又分为水溶液电解和熔盐电解,如铜、锌等重金属的精炼常用到水溶液电解法,但高于水分解电压的

金属,如铝、钠、锂、铍等活泼轻金属不能通过水溶液电解的方式制备,这些轻金属电负性强,不适合采用碳还原法来制取,只能通过非水溶液电解才能得到,而这类电解的电解质主要是熔盐。熔盐电解是利用电能加热并转换为化学能,将某些金属的盐类熔融并作为电解质进行电解,以提取和提纯金属的冶金过程<sup>[1-3]</sup>。除了活泼轻金属,难熔金属(如钛)也可采用熔盐电解法来制取<sup>[4-6]</sup>,该工艺不会引入其他还原金属杂质,也无须考虑还原金属再生的问题,是一种代替热还原法的制备难熔金属的新工艺。

目前研究成果中,能采用熔盐电解法制取的金属达六十余种,理论上所有活泼金属都可通过熔盐电解法制取,但因为不同金属盐类有各自的理化性质,在工业应用时应考虑扬长避短,发挥出熔盐电解法工艺简单、成本低廉、清洁高效的优点<sup>[7-9]</sup>。应用熔盐电解工艺,首先要选择适宜的电解质,电解质在熔融状态时,具有分解电压高、电导率大、蒸气压低、扩散系数大、黏度低、对原料溶解度大、电解温度低、成本低且广泛易得等优势,而盐类的基本理化性质是决定熔盐电解过程中电解质性质的根本因素。因此,构成熔盐体系的电解质盐的选择在熔盐电解工

**[收稿日期]** 2025-06-23

**[基金项目]** 新疆维吾尔自治区“天山英才”培养计划(2022TSYCJC0044);国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFC2901400);新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B01039)。

**[作者简介]** 王晨雪(1985—),女,硕士,高级工程师,研究方向为有色金属冶金新材料。

**[引用格式]** 王晨雪,那维克然·塞力木,何艳君,等. LiF-NaF 熔盐体系理化性能研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(6): 7-12.

WANG Chenxue, Naweikeran · Sailimu, HE Yanjun, et al. Study on the physicochemical properties of LiF-NaF molten salt system[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(6): 7-12.

艺中极其重要<sup>[10-13]</sup>。

电解质盐的熔点决定了电解工艺的温度及能耗,因此,熔点是电解质盐最重要的物理化学性质之一<sup>[14]</sup>,一般电解温度要高于熔点 50 ~ 200 °C<sup>[7]</sup>。熔盐体系电解温度一旦选定,熔盐的电导率、黏度、表面张力等物理化学性质便与熔盐体系的熔点密切相关。能作为电解质盐的化合物绝大多数为离子型,离子型晶体的熔点最高,当离子型晶体逐渐向分子型晶体过渡时熔点逐渐降低,分子型盐的熔点最低,但熔融状态下发生离子迁移的能力却是离子晶体更强。为了平衡熔点和离子迁移能力,常采用多组分电解质盐作为熔盐电解体系。目前从文献中能查阅到通过实验方法测得的二元或多元相图资料很多<sup>[15]</sup>,但实际上由于各研究者的实验方法不同,所用试剂的纯度不同,不同文献中单一化合物的熔点及混合盐的相图亦有不同程度的差异。因此,以文献资料中的相图为基础,在实际应用时还应继续考察熔盐体系的理化性质数据。

康雪等<sup>[16]</sup>、徐志铭等<sup>[17]</sup>研究了金属氯化物熔盐体系离子结构特征及变化规律;史秀梅等<sup>[18]</sup>研究了金属氧化物熔盐体系的密度、表面张力随温度的变化规律,并与熔体的密度、表面张力和温度关系作了比较研究;康红光等<sup>[19]</sup>、刘瑛鑫等<sup>[20]</sup>研究了金属

的氟络盐熔盐体系电解工艺。这些文献介绍了三类常见熔盐体系的理化性质。何艺霖等<sup>[21]</sup>等研究了组分含量变化对熔盐体系物性的影响规律,并评估出最佳的熔盐组分。有关熔盐体系的研究一般在选择了几种熔盐构成组分盐后,初步对多组分电解质盐组合进行不同配比,并对不同配比下的电解质体系的物理化学性质(如密度、电导率、黏度、表面张力等)进行系统性研究,以确定电解工艺条件。本文在上述熔盐电解工艺研究基础上,借助高温熔体物性测试系统,对氟化盐二元体系 LiF-NaF 的密度、电导率、黏度、表面张力等理化性质数据开展实验研究,为 LiF-NaF 熔盐体系在核能、冶金等领域的应用提供基础物性数据参考。

## 1 实验方法

### 1.1 样品制备

LiF 为新疆有色金属研究所生产,纯度 99.9% (AR),NaF 为天津鑫伯特化工有限公司生产,纯度 99.9% (AR)。表 1 为 LiF 和 NaF 基本理化性质数据<sup>[22-24]</sup>。其中 LiF<sup>(25 °C)</sup> 和 NaF<sup>(25 °C)</sup> 为固体密度,而 LiF 和 NaF 熔点分别为 845 °C、993 °C,出示的密度为 LiF<sup>(927 °C)</sup> 和 NaF<sup>(1027 °C)</sup>,两个温度点是两种盐开始熔融并逐渐达到稳定熔融态时的温度点。

表 1 电解质盐基本理化性质

试剂	摩尔质量/ (g·mol <sup>-1</sup> )	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	熔点/°C	沸点/°C	熔点黏度/ mPa·S	熔点表面张力/ (mN·m <sup>-1</sup> )	熔点电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	晶体结构
LiF	25.96	2 640 <sup>(25 °C)</sup>	845	1 676	1.2 ~ 1.5	250	3 000 ~ 4 000	立方晶系
		1 700 <sup>(927 °C)</sup>						
NaF	41.99	2 790 <sup>(25 °C)</sup>	993	1 695	1.8 ~ 2.2	200	2 000 ~ 3 000	立方晶系
		1 930 <sup>(1 027 °C)</sup>						

样品预处理:按 LiF 与 NaF 摩尔比 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4 混合均匀,放入相同规模高纯度、高密度(99.9%)石墨坩埚,再经 200 °C 低温保持 48 h 进行脱水烘干处理,制成 6 个熔盐体系试样。

### 1.2 实验设备

高温熔体物性测试系统:VWR-1600 型,测试系统最高温度为 1 600 °C,重庆大学技术。

设备组成:高温炉、黏度计、密度计、表面张力仪、电导率测试仪。

高温熔体物性测试系统参数见表 2。

选用可在手册及文献等资料上查阅到理论值的常用化学试剂氯化钠,作为高温熔体物性测试系统调试样品。NaCl 熔盐物性测试数据见表 3。由表 3

表 2 高温熔体物性测试仪参数

物性	量程	精度	转子材料
密度	< 10 g/cm <sup>3</sup>	0.01 g/cm <sup>3</sup>	哈氏合金
黏度	0.03 ~ 300 mPa·S	1%/FS	哈氏合金
表面张力	50 ~ 1 000 mN/m	1 mN/m	不锈钢
导电性	1 mΩ ~ 1 MΩ	1%	铂

表 3 氯化钠熔盐物性测试数据

项目	温度/ °C	表面张力/ (mN·m <sup>-1</sup> )	电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	黏度/ mPa·S
理论值	850	110	3 510	1 540	1.16
测试值	840	110	3 570	1 551	0.956

可知,多次实验结果平均值与理论数值相差不大,表明物性测试系统测试结果稳定。

### 1.3 实验方法

1) 密度测试:采用阿基米德法,采用直径20 mm、长度37 mm的哈氏合金转子,标准液为蒸馏水,标准液常数 $k$ 为997(标准状况下水的密度约为 $997 \text{ kg/m}^3$ )。

2) 黏度测试:改进的旋转黏度计,采用直径20 mm、长度37 mm的哈氏合金转子。黏度测试标定时,选用蒸馏水、标准液1、标准液2三种液体进行标定(黏度分别为 $0.89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、 $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ),标定完成后得到整合常数,保存数据得到相关系数 $0.9996$ 。

3) 表面张力测试:采用拉筒法,所用金属钨筒直径15 mm,表面张力测试标定的标准液为熔融态KCl,标准液常数为95( $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,KCl熔盐的表面张力约为 $95 \text{ mN/m}$ )。

4) 电导率测试:采用连续变化电导池常数法(CVCC),电导率测试的标准液用NaCl和KCl熔盐, $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 时标准液常数分别为3657和2303( $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 时NaCl和KCl的电导率分别为 $3657 \text{ mS/cm}$ 和 $2303 \text{ mS/cm}$ )<sup>[25]</sup>。

### 1.4 实验步骤

1) 测试前对仪器进行标定,通过步冷曲线法测定了LiF-NaF熔盐体系的初晶温度。测试过程在高温管式炉中进行:熔盐中插入外置K型热电偶以及石墨搅拌桨,搅拌速度为 $50 \text{ r/min}$ ,冷却速率为 $1 \text{ }^\circ\text{C/min}$ ,LiF-NaF熔盐配比为1.5时,测定LiF-NaF熔盐初晶温度为 $651.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,如图1所示。据文献相图所示,LiF-NaF熔盐配比为1.5时,共晶温度最低,故本文以1.5为基准条件,以此作为对照<sup>[15]</sup>。LiF熔点 $845 \text{ }^\circ\text{C}$ ,NaF熔点 $993 \text{ }^\circ\text{C}$ ,当制成LiF-NaF混合熔盐时,初晶温度大幅下降。

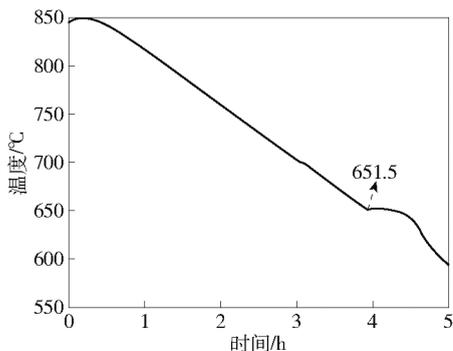


图1 LiF-NaF熔盐初晶温度

2) 利用高温熔体物性测试系统进行物性测试时,采用流动氩气,将6个摩尔比LiF-NaF混合熔

盐试样分别升温至 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,并于各温度保温1 h后,分别放入测量密度、黏度、表面张力、电导率的转子,使用软件进行测试,记录测量数据并绘制曲线图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 密度

熔盐电解制备金属时,会从阴极析出产物,产物与熔盐的密度差决定了阴极析出的金属在熔融电解质中的位置,从而决定产物收集的方式。实验考察不同温度、摩尔比对LiF-NaF熔盐体系密度的影响,使用哈氏合金转子在 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时测试摩尔比为1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4的LiF-NaF熔盐体系的密度,绘制密度随温度变化曲线如图2所示。

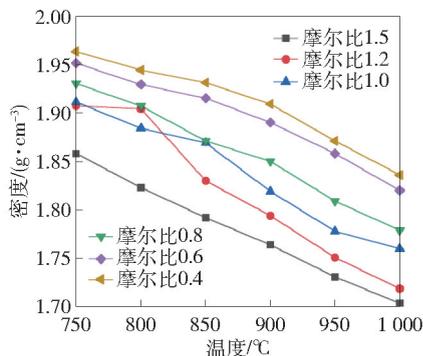


图2 不同摩尔比LiF-NaF熔盐体系的密度随温度变化曲线

由图2可知,在相同摩尔比下,LiF-NaF熔盐体系密度随温度升高逐渐降低,推测高温使体系中离子以及分子间动能增大,各粒子间作用力减小,使其体积增大,密度减小,这符合熔盐在高温下体积膨胀导致密度降低的基本物理规律。在相同温度下,随着LiF-NaF熔盐体系中NaF占比的增加,熔盐的密度呈上升趋势。在温度为 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、LiF与NaF摩尔比为1.5时,熔盐密度为 $1850 \text{ kg/m}^3$ ;在温度为 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、LiF与NaF摩尔比为0.4时熔盐密度为 $1960 \text{ kg/m}^3$ ,推测虽然LiF与NaF为同族相邻元素,均为立方晶系结构,密度数值接近,但由于Na原子量与离子半径均比Li大,金属性更强,且Li带有少量共价键性质,使得Na密度更大,故形成共晶盐时,随着Na含量增加,密度呈上升趋势。摩尔比为1.2、温度 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度数值点偏移过大,可能为测量误差,但不影响条件组的总体趋势。因此,应用LiF-NaF体系制备金属时,可根据产物密度选择密

度差较大的熔盐体系及其摩尔配比和电解温度,以便于收集金属产物。

## 2.2 黏度

在电解过程中,理想的熔盐电解质应具有较低的黏度,以促进离子迁移和气体释放,尤其是在高温操作中,低黏度有助于提高操作的稳定性和效率。实验考察了不同温度、不同摩尔比对 LiF-NaF 熔盐体系黏度的影响,使用哈氏合金转子在 750 ℃、800 ℃、850 ℃、900 ℃、950 ℃、1 000 ℃ 时测试了摩尔比 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4 的 LiF-NaF 熔盐体系黏度,绘制黏度随温度变化曲线如图 3 所示。

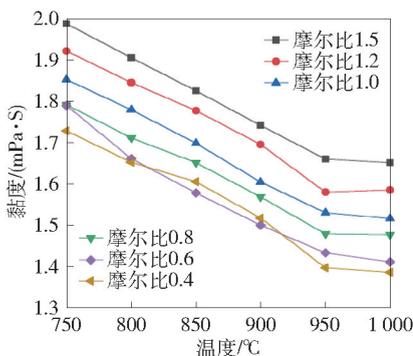


图3 不同摩尔比 LiF-NaF 熔盐体系黏度随温度的变化曲线

由图3可以看出,随着 LiF 含量的降低及温度的升高, LiF-NaF 熔盐黏度均呈下降趋势,温度升高导致熔盐中离子的热运动增加,离子间的相互作用力减弱,使得离子的移动更容易,减少了流体的内部摩擦力,从而使得黏度降低。在各摩尔比体系下,温度为 950~1 000 ℃ 时,黏度基本保持不变,说明温度超过 950 ℃ 后,再升高温度对黏度影响不大;其次, LiF 含量降低时,共熔体黏度更小,推测原因是虽然 LiF 和 NaF 均为离子化合物,但因  $\text{Li}^+$  半径小、电荷密度大,与电负性最大的  $\text{F}^-$  静电结合力更强,  $\text{Li}^+$  更容易在共熔体中产生  $[\text{LiF}_x]^{1-x}$  结构,极化能力增强,增大了熔体流动阻力,故共熔体黏度随 LiF 含量的降低而降低。摩尔比 0.6 与摩尔比 0.4 的曲线出现交叉重合现象,推测在摩尔比在 0.6 以下时,体系黏度下降较小或不再下降,但趋势不变,不影响条件组黏度随温度的曲线趋势。因较低黏度是电解的期望条件, LiF-NaF 熔盐体系在不同摩尔比和温度下的黏度值均低于 2.0 mPa·s,属于黏度相对较低的体系,适于作为熔盐电解的支持电解质。

## 2.3 表面张力

表面张力是描述液体表面分子间相互作用的力,影响熔盐的流动性、传质特性以及在高温应用中

的行为,对熔盐在电解和其他高温工艺中的性能具有重要影响。在熔盐电解过程中,表面张力的大小会影响电解质的性能和电解反应的效率。实验考察了不同温度、摩尔比对 LiF-NaF 熔盐体系表面张力的影响,使用不锈钢转子在 750 ℃、800 ℃、850 ℃、900 ℃、950 ℃、1 000 ℃ 时测试摩尔比 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4 的 LiF-NaF 熔盐体系的表面张力,绘制表面张力随温度变化曲线如图 4 所示。

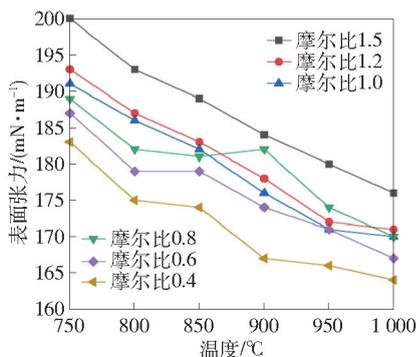


图4 不同摩尔比 LiF-NaF 熔盐体系表面张力随温度的变化曲线

由图4可知,随着 LiF 含量的降低及温度的升高, LiF-NaF 熔盐表面张力均呈下降趋势。首先,温度是影响熔盐表面张力的关键因素,随着熔盐温度的升高,高温下熔盐中的分子热运动增强,熔盐内各个粒子间的距离增大,相互间的作用力减小,导致表面张力减小;其次,随着 NaF 含量的增加,其表面张力逐渐降低,这是因为 LiF 比 NaF 表面张力大,推测因为 Li 和 Na 为同族元素,半径逐渐增大,相互间的作用力减小,表面张力减小,虽然 LiF 和 NaF 均为离子化合物,但 LiF 中存在一定的共价键成分,这种共价成分增强了 LiF 的键强度,使其表面张力更大,相比之下 NaF 的离子键更纯粹,共价成分较弱,因此表面张力较低,同时由于金属性逐渐增强,形成的阳离子通常极化能力变弱,因而  $\text{Na}^+$  比  $\text{Li}^+$  形成离子键能力更强,  $\text{Li}^+$  的极化能力比  $\text{Na}^+$  强,这意味着 LiF 中的  $\text{F}^-$  离子对邻近的阳离子有更强的吸引作用, LiF 比 NaF 共价能力更强,可能会减少表面层的离子排列,极性共价成分越多,表面张力越高,非极性共价成分越多,表面张力越低。因此,表面张力总体呈下降趋势,其中摩尔比 0.8 条件组在温度超过 900 ℃ 之后,表面张力发生波动,可能为测量误差,但不影响条件组的曲线趋势。

## 2.4 电导率

电导率是熔盐电解过程中的关键参数,它不仅

反映了熔盐中离子的流动性,还直接影响电解过程的电流效率、生产成本,因此,必须选择导电性较好的熔盐以提高电流效率,从而达到降低生产成本的目的。实验考察了不同温度、摩尔比对 LiF-NaF 熔盐体系电导率的影响,使用铂转子在 750 °C、800 °C、850 °C、900 °C、950 °C、1 000 °C 时测试摩尔比 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4 的 LiF-NaF 熔盐体系的电导率,绘制电导率随温度变化曲线如图 5 所示。

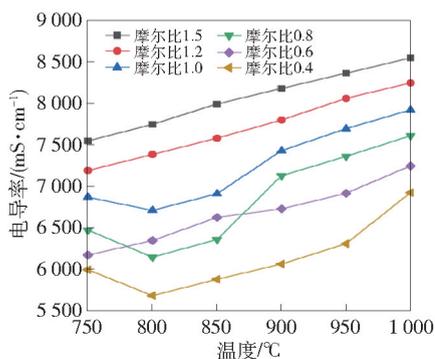


图5 不同摩尔比 LiF-NaF 熔盐体系的电导率随温度变化曲线

由图 5 可知,在相同摩尔比下,LiF-NaF 熔盐的电导率随着温度升高逐渐上升,推测原因在于高温使离子的动能增加,提高了电场作用下离子的移动速度,并且由黏度和表面张力与温度的关系曲线也可以看出,当温度升高时黏度和表面张力会出现下降,皆因离子和自由电子的运动受到阻力减小<sup>[26]</sup>,从而使得电导率增大;在相同温度下,随着 NaF 含量的增加,LiF-NaF 熔盐体系电导率呈下降趋势,尽管单纯 LiF 电导率在 3 000 ~ 4 000 mS/cm,而单纯 NaF 电导率在 2 000 ~ 3 000 mS/cm,但当 LiF-NaF 熔融时,高温使得共晶盐晶格缺陷和孔隙增多,Li<sup>+</sup>半径比 Na<sup>+</sup>小,Li<sup>+</sup>更易迁移,这意味着离子在 LiF 熔盐中的移动速度不如 NaF 熔盐中的离子快,因此,LiF 含量下降、NaF 含量上升时,共熔体的离子迁移率增大。摩尔比 0.8 条件组在温度 800 ~ 850 °C 时,电导率发生偏移,可能为测量误差,不影响条件组的总体趋势。

### 3 结论

本文研究了不同温度 750 °C、800 °C、850 °C、900 °C、950 °C、1 000 °C 和不同 LiF 与 NaF 摩尔比 1.5、1.2、1.0、0.8、0.6、0.4 条件下 LiF-NaF 熔盐体系的密度、黏度、表面张力和电导率的变化规律,得出如下结论:

1) LiF-NaF 熔盐体系的密度随温度升高而减小,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而增大。

2) LiF-NaF 熔盐体系的黏度随温度升高而降低,950 °C 后趋于稳定,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低。

3) LiF-NaF 熔盐体系的表面张力随温度升高而下降,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低。

4) LiF-NaF 熔盐体系的电导率随温度升高而升高,随 LiF 与 NaF 摩尔比下降而降低。

作为熔盐电解工艺中的支持电解质,良好的导电性、较低的黏度尤为重要,同时考虑表面张力、密度、熔融温度等理化性质,采用 LiF-NaF 熔盐体系时,应针对具体电解目标产物选择摩尔比和温度,选取最适宜的条件制备 LiF-NaF 熔盐体系作为电解制备金属的支持电解质。本文研究为熔盐在核能、冶金等领域应用提供数据支持。为同行在未来熔盐电解技术研究和优化熔盐理化性能测试方法方面提供参考。

### [参考文献]

- [1] 杨重愚. 轻金属冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991.
- [2] 王天,王耀武,王宇,等. 金属钛冶炼研究进展[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(3): 1-6, 27.
- [3] 梁晓楠,严红燕,贾雷. 制备金属钨的新进展[J]. 矿产综合利用, 2020(2): 1-7.
- [4] 赵国立,许莹,蔡艳青,等. 难熔金属含氧酸盐短流程熔盐电解制备金属单质及合金的研究进展[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(3): 53-62.
- [5] 吕泽鹏. 基于熔盐电解法的废钛高值化处置[J]. 当代化工研究, 2025(3): 31-33.
- [6] 董硕,梁精龙. 熔盐电解法制备钛及其合金的研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(5): 1-7.
- [7] 张明杰. 熔盐电化学原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [8] 袁亚,俞小花,谢刚,等. 熔盐电解质体系及在制备铝合金中的研究进展[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(1): 24-33.
- [9] 王旭,焦芸芬,廖春发. 非水溶剂电还原制取重稀土金属及合金的研究现状及发展[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(6): 99-104.
- [10] 刘玉宝,陈国华,于兵,等. 熔盐电解法制备稀土金属技术研究进展[J]. 稀土, 2021, 42(5): 133-143.
- [11] 林如山,何辉,唐洪彬,等. 我国乏燃料干法后处理技术研究现状与发展[J]. 原子能科学技术, 2020,

- 54(S1): 122 - 132.
- [12] 张远景, 刘兆庭, 朱实贵, 等. LiCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>熔盐体系中Li-Mg共沉积机理研究[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(3): 311 - 317.
- [13] 闵定伟, 陈功, 文棠根, 等. NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-Cu<sub>2</sub>S熔体中铜电沉积的电化学机理[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(2): 182 - 188.
- [14] 张政. 熔盐化学法制备高熔点金属及其碳化物[D]. 东北大学, 2020.
- [15] WILLIAMS D F. Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI heat-transfer loop [M]. Washington, 2006.
- [16] 康雪, 侯剑峰, 谭喜瀚. LiCl-KCl熔盐中电解La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO制备LaNi<sub>5</sub>合金[J]. 有色金属工程, 2023, 3(4): 1 - 6.
- [17] 徐志铭, 吕国志, 王龙, 等. 无水氯化铝电解过程电解质体系物性研究[J]. 轻金属, 2024(9): 21 - 26.
- [18] 史秀梅, 王强, 牛小娟, 等. Li<sub>2</sub>O-2B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>熔体的物性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 76 - 79.
- [19] 康红光, 胡宪伟, 赵婉婷, 等. LiF-ZrF<sub>4</sub>熔盐体系离子结构的Raman光谱[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 823 - 828.
- [20] 刘瑛鑫, 颜恒维, 刘战伟, 等. NaF-K<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>-TiO<sub>2</sub>体系中直接电解制备钛的可行性研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 9 - 15, 64.
- [21] 何艺霖, 徐健淋, 马占山, 等. 熔盐氯化用熔体组分对体系物性的影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(4): 14 - 21, 34.
- [22] 刘光启. 化学化工物性数据手册-无机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [23] 赵桂芳. 熔盐电解法制取稀土金属的熔盐体系选择[J]. 江西有色金属, 1987(2): 42 - 49.
- [24] 邵铭杰, 王长治, 林勇, 等. 用于稀土废料电解回收的LiF-NaF-KF和NaCl-KCl熔盐体系物化性质研究[J]. 有色金属工程, 2024, 14(8): 77 - 86.
- [25] 康佳, 闫奇操, 于兵, 等. LaCl<sub>3</sub>-KCl熔盐体系物化性质研究[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(3): 145 - 151.
- [26] 刘晓兵. 饱和流体的表面张力及黏度与温度的相关性研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2024.

## Study on the Physicochemical Properties of LiF-NaF Molten Salt System

WANG Chenxue, Naweikeran·Sailimu, HE Yanjun, WANG Shouming, CHEN Fangyong,

LI Niannian, HUANG Jianguo, WENG Hongmeng

(Xinjiang Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd, Urumqi 830026, China)

**Abstract:** The supporting electrolyte in the molten salt electrolysis process needs to have good conductivity, low viscosity, and take into account the physical and chemical properties such as surface tension, density, and melting temperature. In this paper, based on the previous research of molten salt electrolysis process, the effects of different temperatures (750 °C, 800 °C, 850 °C, 900 °C, 950 °C, 1 000 °C) and different molar ratios (LiF/NaF = 1.5, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4) on the density, viscosity, surface tension and conductivity of LiF-NaF molten salt mixture of fluoride binary system were studied by means of high temperature melt physical property test system. The results show that the density of the LiF-NaF molten salt system decreases with the increase of temperature and increases with the decrease of the molar ratio of LiF to NaF. The viscosity of LiF-NaF molten salt system decreases with the increase of temperature, and tends to be stable after 950 °C. It decreases with the decrease of the molar ratio of LiF to NaF. The surface tension of the LiF-NaF molten salt system decreases with the increase of temperature and the decrease of the molar ratio of LiF to NaF. The electrical conductivity of LiF-NaF molten salt system increases with the increase of temperature and decreases with the decrease of LiF/NaF molar ratio. When using LiF-NaF molten salt system, the most suitable molar ratio and temperature should be selected for specific electrolysis target products.

**Key words:** molten salt system; density; viscosity; surface tension; conductivity