

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.011

NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl 混合熔盐的制备及其热性能

陈晓丹, 宋康, 范舟风, 周婷, 王军涛

(湖北科技学院 核技术与化学生物学院, 湖北 咸宁 437100)

摘要: 为获得太阳能光热发电用的低熔点高热稳定温度的蓄热熔盐, 采用材料掺杂法, 往 NaCl-KCl-ZnCl₂ 三元体系的两个共晶点 E1 和 E2 中掺杂不同质量分数的无水 LiCl, 得到了 12 种不同组成比例的混合熔盐, 并对其进行了差式扫描量热法(DSC)熔点测试、热重(TG)动态热稳定测试、52 h 静态热稳定测试和熔盐密度测定。DSC 试验结果表明, 制备的四元混合熔盐的最低熔点为 174.2 °C, 比其掺杂前的 E1 共晶点的熔点 210.4 °C 降低了 36.2 °C, 相应的相变潜热为 78 J/g; TG 动态热稳定和长时间静态热稳定试验表明, 新四元混合盐的热稳定温度为 700 °C; 熔盐液态密度测试表明, 新四元混合熔盐在 250~700 °C 的液态密度为 2.35~2.58 g/cm³。该四元混合熔盐有可能用作太阳能光热发电的蓄热储能材料。

关键词: 光热发电; 氯化盐; NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl; 熔盐; 蓄热; 储能

中图分类号: TK512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2024)12-0080-07

Preparation and Thermal Properties of NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl Molten Salt Mixture

CHEN Xiaodan, SONG Kang, FAN Zhoufeng, ZHOU Ting, WANG Juntao

(School of Nuclear Technology and Chemistry & Biology, Hubei University of Science and

Technology, Xianning 437100, Hubei, China)

Abstract: In order to obtain thermal storage molten salts with low melting point and high thermal stability temperature used as thermal storage medium in concentrating solar power, 12 kinds of NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl quaternary mixed molten salts were prepared by doping anhydrous LiCl with different mass fractions into two eutectic points E1 and E2 of NaCl-KCl-ZnCl₂ ternary system. Then, differential scanning calorimetry (DSC) melting point test, thermogravimetric (TG) dynamic thermal stability test, 52 hours static thermal stability test and molten salt density determination were carried out. The DSC results show that the lowest melting point of the prepared quaternary mixed molten salt is 174.2 °C, which is 36.2 °C lower than the melting point of E1 eutectic point 210.4 °C before doping, and the corresponding latent heat of phase transition is 78 J/g. TG dynamic thermal stability and long-term static thermal stability experiments show that the thermal stability temperature of the newly quaternary mixed salt is 700 °C. The liquid density test of molten salt is 2.35—2.58 g/cm³ at 250—700 °C. The newly quaternary molten salt mixture may be used as thermal storage medium for solar thermal power generation.

Key words: concentrating solar power; chloride salt; NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl; molten salt; thermal storage; energy storage

收稿日期: 2024-04-26

基金项目: 湖北省大学生创新创业训练计划项目(S202010927045); 湖北科技学院校级科研项目(2021-23GP02)

作者简介: 陈晓丹(2000-), 女, 本科生; 通信作者: 王军涛(1979-), 男, 博士, 副教授

随着生态和环境保护受到日益重视,清洁可再生能源持续受到国内外研究者的关注,其中太阳能发电技术成为研究热点之一^[1-4]。太阳能发电分为光伏和光热两种技术,后者更有潜力。光热发电技术经过多年的发展日益成熟,国内外相继建设了众多商业型光热电站并成功运行^[5-8]。在常见的几种光热发电技术中,塔式光热发电技术装机规模更大,通常会设置高温熔盐蓄热单元,以便能够实现24小时连续发电,因而更有前景。

目前光热发电技术所使用的熔盐蓄热材料主要是二元混合硝酸盐 Solar salt^[4,9](60% NaNO₃ + 40% KNO₃,质量分数,下同),实际使用时的液态温度窗口为290~565℃^[9]。Solar salt熔盐高达290℃的使用温度大大增加了运行维护成本,而565℃的使用温度上限也制约了发电效率。为了进一步提高光热发电效率和降低蓄热成本,塔式光热发电技术迫切需要热稳定温度高达700~800℃的熔盐蓄热材料^[10-12]。

考虑到硝酸盐、亚硝酸盐、以及它们的混合盐的热稳定温度普遍在500~600℃,而硫酸盐和碳酸盐的熔点相对较高,因此氯化盐及其混合物由于其合适的熔点和很高的热稳定温度引起了研究者的极大兴趣^[13]。已有国内外学者相继研究并报道了一些氯化物混合熔盐体系^[14-16]。其中,闫全英等^[14]报道了二元体系LiCl-NaCl的系列样品,其测试的样品的熔点范围为523.5~542.0℃、相变潜热的范围为205.7~370.6 J/g,但未做热稳定性测试;魏小兰等^[15]报道了四元体系NaCl-KCl-CaCl₂-MgCl₂的最低熔点为380.3℃,相变潜热是228 J/g,稳定液态工作温度范围为480~700℃;刘波等^[16]在四元体系NaCl-KCl-MgCl₂-CaCl₂低共熔组成的基础上再添加质量分数为5%的LiCl,新五元氯化物熔盐的熔点为356.5℃,相变潜热是150.9 J/g,热稳定温度为600℃,可作为高温传热蓄热材料使用。

其中,NaCl-KCl-ZnCl₂三元混合熔盐体系由于其低廉的原料价格和较高的综合热性能,被视为具有潜力的新型混合熔盐蓄热材料^[7,17-18]。该三元体系存在两个共晶点E1和E2,熔点分别为204.4和210.4℃。根据相图热力学原理,如果往NaCl-KCl-ZnCl₂三元混合熔盐体系里面掺杂加入第四种氯化物,预期将可以进一步降低其熔点而热稳定温度基本不变。有文献报道,在制备蓄热混合熔盐时,锂盐是不错的熔盐添加剂^[19]。因此,本文选择单盐LiCl作为添加剂,将其

掺杂加入NaCl-KCl-ZnCl₂三元混合熔盐体系,可以获得新四元混合熔盐体系NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl,预计可以进一步降低其熔点而维持热稳定温度基本不变。由于缺乏四元体系NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl所包含的子二元和子三元体系的超额混合热力学参数,使得相图预测计算极其困难。因此,本文采用材料掺杂方法往三元体系NaCl-KCl-ZnCl₂加入单盐LiCl,制备了一批NaCl-KCl-ZnCl₂-LiCl四元混合熔盐样品,通过热力学试验获得了其最佳材料组成配方,预期在光热发电应用中更加具有潜力。

1 试验部分

1.1 试剂和仪器

NaCl(熔点801℃)、KCl(熔点770℃)、ZnCl₂(熔点283℃)和LiCl(熔点614℃)均为分析纯,均购自国药集团化学试剂有限公司,未进行重结晶纯化。

德国Sartorius BS224S分析天平;德国MBRAUN UNIlab Plus手套箱;德国NETZSCH DSC-200-F3综合热分析仪;德国NETZSCH STA 449C热重分析仪器;诺巴迪材料科技有限公司NBD-M1200-101C马弗炉。

1.2 样品的制备

1.2.1 单盐样品烘干

将购买的4种无水单盐LiCl、NaCl、KCl和ZnCl₂分别在充氮气的手套箱内研磨成细粉,在电热烘箱中150℃烘干8h干燥除水,称量单盐的质量为 m_1 ;然后将该单盐重新在电热烘箱中150℃烘干5h,称量单盐的质量为 m_2 ;如果 $m_1 = m_2$,说明单盐已经不含水分(一般烘干8h已经完全去除了水分),将烘干的单盐转移至无水手套箱重新研磨,然后放入手套箱内的玻璃干燥器备用。

1.2.2 三元混合熔盐样品的制备

根据文献^[17]报道的三元熔盐体系NaCl-KCl-ZnCl₂相图(图1)可知有两个共晶点;E1=213℃、E2=204℃。E1和E2两个共晶点的质量分数组成为: E1=9.96% NaCl+15.28% KCl+74.76% ZnCl₂, E2=5.26% NaCl+22.52% KCl+72.22% ZnCl₂。按照共晶点E1的质量组成依次称取无水单盐NaCl、KCl和ZnCl₂,使其总质量为25g。在手套箱内研磨混合均匀,然后放入50 mL刚玉坩埚(加盖子)在马弗炉中加热到300℃维持1h熔化,然后在500℃下保温3h,再用不锈钢勺子取样约0.2g样品,并立即放入干燥器内自然冷却保存,样品记为

$a(x=0)$, 表示为 NKZ-E1+0% LiCl; 按照同样方法制备共晶点 E2 熔盐样品, 记为 $g(x=0)$, 表示为

NKZ-E2+0% LiCl。称量单盐和混合过程均在氮气保护的手套箱内进行。

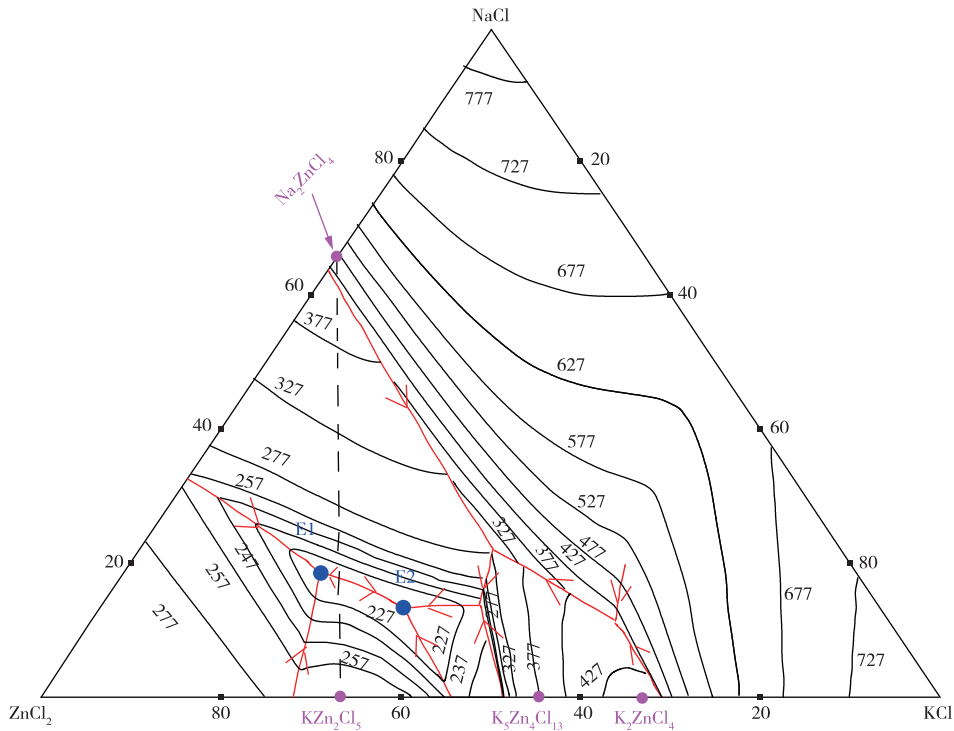


图 1 NaCl-KCl-ZnCl₂ 三元熔盐体系的相图^[17]

Fig. 1 Phase diagram of NaCl-KCl-ZnCl₂ ternary molten salt system^[17]

1.2.3 四元混合熔盐样品的制备

按照 1.2.2 节熔盐样品制备方法, 在 25 g 三元混合熔盐样品 NKZ-E1+0% LiCl 的基础上掺杂加入质量分数为 2% 的无水 LiCl, 放进马弗炉中 300 °C 下加热 1 h, 然后升高温度到 500 °C 保温 3 h, 得到的样品记为 $b(x=2)$, 表示为 NKZ-E1+2% LiCl。以此类推, 分别制备混合熔盐样品 $c(x=4)$ 、 $d(x=6)$ 、 $e(x=8)$ 、 $f(x=10)$, 分别表示为 NKZ-E1+x% LiCl ($x=4, 6, 8, 10$)。

按照同样方法制备 E2 系列混合熔盐样品, 标记为 $g(x=0)$ 、 $h(x=2)$ 、 $i(x=4)$ 、 $j(x=6)$ 、 $k(x=8)$ 、 $l(x=10)$, 分别表示为 NKZ-E2+x% LiCl ($x=0, 2, 4, 6, 8, 10$)。

1.3 样品的测试与表征

DSC 测试使用标准带盖的铝坩埚对约 5 mg 样品压片, 升降温速率为 5 °C/min, 高纯氮气用作保护气和炉盖吹扫气, 升温降温测 3 个循环, 采用液氮控制升降温全过程。WANG 等^[20] 分别采用 0.1、0.5、1.0、5.0 °C/min 等四种不同的控温速率测试了同一份熔盐样品的 DSC 曲线, 发现测试结果相差很小, 可以忽略升温速率的影响。因此, 熔盐测试 DSC 曲

线时候一般采用 5 °C/min 的控温速率。TG 测试使用 Al₂O₃ 装载约 8 mg 样品, 升温速率为 10 °C/min; 长时间静态热稳定性测试是将制备的 25 g 混合熔盐样品放入 100 mL 刚玉坩埚中(加坩埚盖子), 放入座式电炉, 分别在 550、600、650、700、725、750 °C 下静态熔融保温 52 h, 每隔 4 个小时取出坩埚放入干燥器冷却至室温称重, 记录混合熔盐样品的热失重数据。

2 结果讨论

2.1 DSC 熔点测试分析

对制备的 12 个熔盐样品分别进行了 DSC 升降温 3 次循环测试, 试验结果见图 2 和图 3, DSC 曲线的外推起始熔点和熔点峰值温度见表 1。虽然制备无水单盐和制备混合熔盐是处于手套箱的无水环境, 避免了熔盐接触空气而吸附微量水分。但是在 DSC 测试之前需要压片, 对熔盐压片的短短一两分钟内没有处于无水手套箱内, 在这极短时间内熔盐会吸附微量水分, 因此需要对熔盐样品测试 3 个 DSC 循环曲线, 以便通过前 2 个升温降温循环过程把压片过程中吸附的微量水分去除。对于熔盐样品, 大量 DSC 重复循环试验测试表明, 经过前面

2 个循环测试,熔盐吸附的微量水分已经完全去除,第 3 个循环曲线是让人满意的测试结果。以样品 a 为例,对其测试了 3 次 DSC 循环曲线,为了准确比较熔化吸热峰,在图 2 中只列出了升温曲线。

由图 2 中第 1 次吸热升温曲线可知,在快速压片过程中样品存在微量吸附水,导致第一次升温曲线基线不平,熔化峰变宽不够尖锐;而后面 2 次升温曲线高度重合,基线平整光滑且熔化峰非常尖锐。说明经过了第一次升降温测试,样品在短时间一两分钟内压片过程中吸附的水分已经完全去除了,所以第 2 次和第 3 次的升温曲线高度重合。因此,本文对所有熔盐样品均测试 3 次循环曲线,并且均采用第 3 次的 DSC 曲线数据。

表 1 中的数据 and 图 3 中的曲线均取自每个样品测试 DSC 的第 3 次循环曲线。通过对比图 3 中 DSC 曲线和表 1 的数据可知:在共晶点 E1 系列的 6 个样品中,随着 LiCl 的质量分数由 0 增加到 10%,6 个外推起始熔点分别为 210.4、207.2、185.6、175.3、174.2、171.7 °C,表现出熔点依次下降的规律,但是下降趋势越来越小;同时,样品 a、b、c、d、e 对应的 DSC 曲线在熔化过程中表现为单一尖锐峰型,

说明混合熔盐样品中的几种单盐在相变过程中保持同步熔化行为;样品 f 在加热熔化过程中分裂为 3 个峰,说明样品 f 中的几种盐不能同步吸热熔化;而样品 b 和 f 在冷却凝固过程中均分裂为 2 个峰,说明几种单盐不能同步结晶析出。综合 E1 系列 6 个样品的外推起始熔点数据和 DSC 峰形可知,样品 e 在 E1 系列中是最好的样品,其添加 LiCl 的质量分数为 8%。

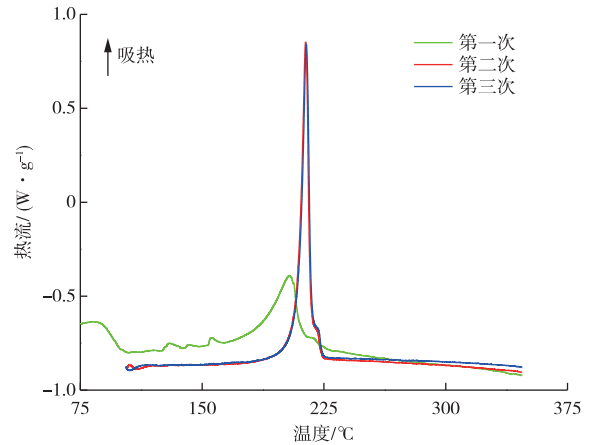


图 2 样品 a 的 DSC 图

Fig. 2 DSC plots of sample a

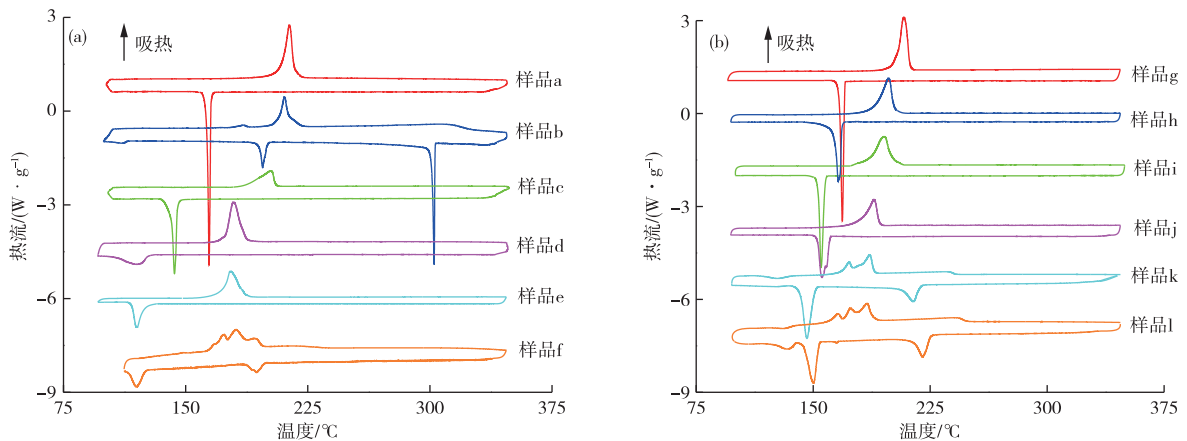


图 3 样品的 DSC 图

Fig. 3 DSC plots of samples

表 1 所有样品的 DSC 数据

Table 1 DSC data of all samples

样品编号	外推起始熔点/°C	峰值温度/°C	熔化峰的峰形	凝固峰的峰形
a(x=0)	210.4	213.8	尖锐	尖锐
b(x=2)	207.2	210.7	尖锐	分裂为双峰
c(x=4)	185.6	202.3	尖锐	尖锐
d(x=6)	175.3	179.5	尖锐	不尖锐
e(x=8)	174.2	177.7	尖锐	尖锐
f(x=10)	171.7	180.7	分裂为三峰	分裂为双峰
g(x=0)	204.4	208.1	尖锐	尖锐
h(x=2)	189.2	198.2	尖锐	尖锐
i(x=4)	185.3	195.3	尖锐	尖锐
j(x=6)	180.5	188.8	尖锐	尖锐
k(x=8)	178.5	186.2	分裂为双峰	分裂为双峰
l(x=10)	175.8	184.3	分裂为三峰	分裂为三峰

在共晶点 E2 系列的 6 个样品中,随着含 LiCl 的质量分数由 0 增加到 10%,6 个外推起始熔点分别为 204.4、189.2、185.3、180.5、178.5、175.8 °C,同样表现出熔点依次下降的规律,但是下降趋势越来越小;同时,样品 g、h、i、j 对应的 DSC 曲线在熔化和冷却过程中表现为单一尖锐峰形,说明混合熔盐样品中的几种单盐在相变过程中保持同步熔化和凝固行为,而样品 k 和 l 在加热熔化过程中分别分裂为 2 个和 3 个峰,说明几种盐不能同步吸热熔化,在冷却凝固过程中分别分裂为 2 个和 3 个峰,说明几种单盐不能同步结晶析出。综合 E2 系列 6 个样品的外推起始熔点数据和 DSC 峰形可知,样品 j 在 E2 系列中是最好的,其添加 LiCl 的质量分数为 6%。

综合对比样品 e 和 j,它们的 DSC 曲线在熔化和冷却过程中均表现为单一尖锐峰型,且对称性良好。样品 e 的外推起始熔点和峰值温度分别为 174.2 和 177.7 °C,熔化焓为 78 J/g;而样品 j 的外推起始熔点和峰值温度分别为 180.5 °C 和 188.8 °C,熔化焓为 62 J/g。由此可知,样品 e 的外推起始熔点比样品 j 的低,同时其相变潜热比后者大,因此,在 12 个样品中,样品 e 最适合作为熔盐蓄热材料。

2.2 四元混合熔盐的热稳定性

熔盐作为蓄热材料使用的一个重要参数是其热稳定温度。对于筛选出来的样品 e(NKZ-E1+8% LiCl),采用 TG 试验技术测试了它的热重曲线,结果见图 4。关于熔盐的热稳定温度,众多研究者的表述不一,暂没有统一的标准。其中,RAADE 等^[21]提出一个基本可行的观点:控制升温速率为 10 °C/min,在熔盐样品的 TG 曲线上,以 300 °C 为基准,继续热失重 3% 对应的温度可以视为熔盐的热稳定温度,也即热分解温度。按照这个标准,样品 e 在 300 和 716 °C 时对应的质量分数分别为 99.86% 和 96.86%,因此样品 e 的热稳定温度为 716 °C。

由于 TG 试验测试是短时间动态测试技术,远偏离于熔盐的高温化学分解平衡,而熔盐作为蓄热材料的使用条件是在长期密封的容器内,因而采用长时间静态熔融试验测试了样品 e 的热稳定性(测试时候刚玉坩埚加盖子),测试时间为 52 h,测试温度分别为 550、600、650、700、725、750 °C,试验结果见图 5。

由图 5 可知,样品 e 在 550、600、650 和 700 °C 的热失重非常微弱,在经历 52 个小时恒温后,样品在四个温度下的剩余质量分数分别为 99.91%、99.83%、99.80% 和 99.75%,热失重很微弱,说明

样品 e 在 550、600、650 和 700 °C 下可以长时间保持热稳定。样品 e 在 725 °C 的热失重很明显,在经历 52 个小时恒温后,剩余质量分数为 96.84%,说明在此温度下已经发生了明显的热分解,不能维持热稳定性。而样品 e 在 750 °C 下的热分解速度迅速增加,在经历 52 个小时恒温后,剩余质量分数仅为 92.11%,说明在此温度下发生了激烈的热分解反应。

由于图 5 是采用长时间热稳定测试方法,因此数据比图 4 的 TG 快速测试更可靠,因此可以得出结论,样品 e 的热稳定温度为 700 °C。

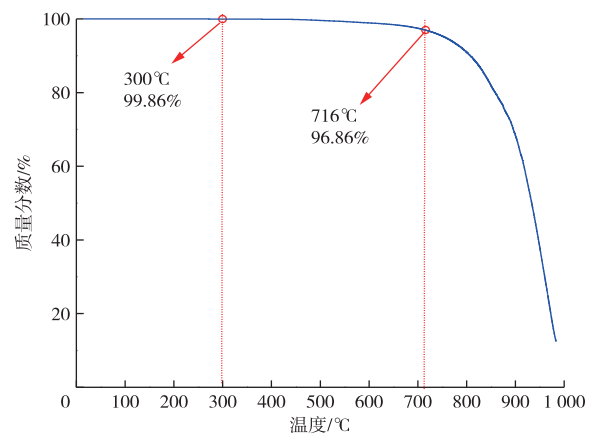


图 4 样品 e 的 TG 曲线

Fig. 4 TG plot of sample e

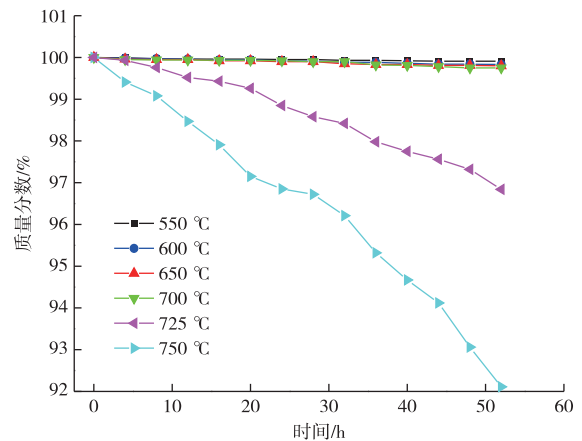


图 5 样品 e 的恒温质量损失曲线

Fig. 5 Constant temperature mass loss curves of sample e

2.3 液态熔盐密度

采用自制设备根据阿基米德法测定了样品 e 在加热到 250~700 °C 的液态密度,发现熔盐的液态密度随着温度升高而下降,其值在 2.35~2.58 g/cm³,测试所得到的数据如图 6 所示。根据试验数据拟合所得方程为:

$$\rho = 2.6961 - 4.8501 \times 10^{-4} T$$

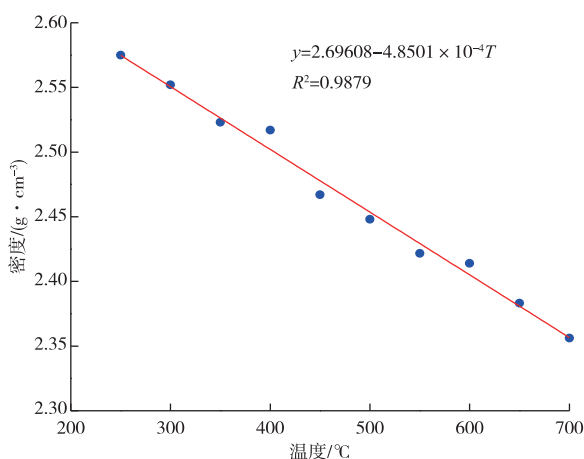


图6 样品e的高温液态密度

Fig. 6 High temperature liquid density of sample e

2.4 四元混合熔盐的使用成本

目前商业化太阳能光热电站普遍采用二元硝酸熔

盐 Solar salt 作为蓄热介质,本文优选出的是四元混合熔盐:9.26% NaCl+14.15% KCl+69.22% ZnCl₂+7.41% LiCl(质量分数)。表2列出了国内无机单盐(工业级)的价格,根据表2中单盐的价格和两种混合熔盐的质量分数组成,可以估算出 Solar salt 熔盐的价格大约为4.56元/kg,四元混合熔盐的价格约为19.98元/kg。

单从购买盐的成本来看,本文报道的四元混合熔盐的价格是 Solar salt 熔盐的4.38倍。但混合熔盐在实际使用的时候,还需要综合考虑熔盐的运行维护成本。Solar salt 混合熔盐的液态使用温度范围约为260~600℃,四元混合熔盐的液态使用温度范围约为174.2~700℃。由于四元混合熔盐具有更低的熔点,且具有更高的热稳定温度,因此其运行维护成本有可能比 Solar salt 熔盐低,预计其发电效率相对于使用 Solar salt 熔盐作为蓄热介质可能会更高一些。

表2 国内工业级单盐的价格

Table 2 The price of domestic industrial grade inorganic salts

单盐	价格/(元·kg ⁻¹)	单盐价格查询网址
NaNO ₃	2.6	https://www.chinabgao.com/jiage/xiaosuanna
KNO ₃	7.5	https://www.rawmex.cn/sell-32642.html
NaCl	0.68	https://www.100ppi.com/mprice/plist-1-534-1.html
KCl	2.1	https://www.100ppi.com/news/detail-20231123-2957662.html
ZnCl ₂	12.3	https://www.100ppi.com/news/detail-20240313-3182322.html
LiCl	150.0	https://www.100ppi.com/mprice/plist-1-4003-1.html

注:表中网页查询时间均为2024年3月13日。

3 结论

1)采用掺杂方法往三元体系 NaCl-KCl-ZnCl₂中掺杂无水 LiCl 单盐,制备出了具有更低熔点和更高热稳定温度的新四元混合熔盐,新四元混合熔盐的组成为9.26% NaCl-14.15% KCl-69.22% ZnCl₂-7.41% LiCl(质量分数)。

2)新四元混合熔盐的熔点是174.2℃,比原三元共晶 E1 的熔点(210.4℃)降低了36.2℃,相应的相变潜热是78 J/g。

3)新四元混合熔盐的热稳定温度为700℃,比 Solar salt 熔盐的热稳定温度(600℃)高100℃。

4)新四元混合熔盐在250~700℃的液态密度是2.35~2.58 g/cm³。

参考文献

[1] 赵林飞,韩中合,陈东旭,等.初参数对超临界 CO₂塔式光热发电系统焓效率的影响[J].可再生能源,2023,41(8):1023-1030.

ZHAO L F, HAN Z H, CHEN D X, et al. Effect of initial parameters on exergetic efficiency of supercritical CO₂ tower photothermal power generation system[J]. Renewable Energy, 2023, 41(8):1023-1030.

[2] 崔宇博,赵超亮,张志,等.铜锌锡硫硒太阳能电池 Mo/CZTSSe界面调控研究进展[J].化学研究,2022,33(2):95-102.

CUI Y B, ZHAO C L, ZHANG Z, et al. Research progress of Mo/CZTSSe interface regulation in Cu₂ZnSn(S_x, Se_{1-x})₄ solar cells [J]. Chemical Research, 2022, 33(2):95-102.

[3] 顿硕攀,郭续更.上转换纳米材料在染料敏化太阳能电池中的应用研究进展[J].化学研究,2022,33(4):329-338.

DUN S P, GUO X G. Advances in the application of upconversion nanomaterials in dye-sensitized solar cells[J]. Chemical Research, 2022, 33(4):329-338.

[4] LI Y, ZHOU S H, JIANG S L, et al. Preparation and thermal properties of LiNO₃-NaNO₃-NaCl/EG composite heat storage material [J]. Solar Energy, 2023, 263: 111926. DOI:10.1016/j.solener.2023.111926.

- [5] 孙晓强,李海伟,汪莹,等. 新型电力系统中光热电站完全替代火电规划研究[J]. 电网技术,2022,46(8):7-8. SUN X Q, LI H W, WANG Y, et al. Planning research on the complete replacement of thermal power by photothermal power station in new power system [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(8): 7-8.
- [6] 付鹏,王志峰,余强,等. 塔式太阳能热发电站热力性能综合评价[J]. 太阳能学报,2021,42(11):42. FU P, WANG Z F, YU Q, et al. Comprehensive evaluation of thermal performance of tower solar thermal power station[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(11): 42-48.
- [7] KAMRAN M, AWAIS K, JAWAD S, et al. Comparison of a solar thermal tower power plant based on LiF-NaF-KF, NaCl-KCl-ZnCl₂, and NaNO₃-KNO₃ as HTF under different DNI conditions for different power cycles[J]. Solar Energy, 2022, 235:140-151.
- [8] BOUKELIA T E, ARSLAN O, BOURAUAI A. Thermodynamic performance assessment of a new solar tower-geothermal combined power plant compared to the conventional solar tower power plant[J]. Energy, 2021, 232:1-12.
- [9] 许利华,侯晓东,刘可亮. 塔式熔盐太阳能光热发电技术[J]. 能源研究与信息,2020,36(3):135-142. XU L H, HOU X D, LIU K L. Tower molten salt solar photovoltaic power generation technology [J]. Energy Research and Information, 2020, 36(3): 135-142.
- [10] GONG Q, SHI H, CHAI Y, et al. Molten chloride salt technology for next-generation CSP plants; compatibility of Fe-based alloys with purified molten MgCl₂-KCl-NaCl salt at 700 °C [J]. Applied Energy, 2022, 324, 119708. DOI:10.1016/j.apenergy. 2022. 119708.
- [11] 魏小兰,谢佩,王维龙,等. 含钙三元氯化物体系相图计算与熔盐热稳定性 [J]. 化工学报, 2021, 72(6): 3074-3083. WEI X L, XIE P, WANG W L, et al. Phase diagram calculation of ternary chloride system containing calcium and thermal stability of molten salt [J]. Acta Chimicae Sinica, 2021, 72(6): 3074-3083.
- [12] DING W J, YANG F, BONK A, et al. Molten chloride salts for high-temperature thermal energy storage: continuous electrolytic salt purification with two Mg-electrodes and alternating voltage for corrosion control [J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2021, 223: 110979. DOI:10.1016/j.solmat. 2021. 110979.
- [13] MICKAEL L, MARÍA T, MARÍA I L, et al. Past research and future strategies for molten chlorides application in concentrated solar power technology [J]. Solar Energy Material & Solar Cells, 2022, 237: 111557. DOI:10.1016/j.solmat. 2021. 111557.
- [14] 闫全英,刘超. 二元混合氯化盐的配制及热物性研究 [J]. 无机盐工业, 2019, 51(6): 25-28. YAN Q Y, LIU C. Preparation and thermophysical properties of binary mixed salt chloride [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, 51(6): 25-28.
- [15] 魏小兰,谢佩,张雪钊,等. 氯化物熔盐材料的制备及其热物理性质研究 [J]. 化工学报, 2020, 71(5): 2423-2431. WEI X L, XIE P, ZHANG X C, et al. Preparation and thermophysical properties of molten chloride salt materials [J]. CIESC Journal, 2020, 71(5): 2423-2431.
- [16] 刘波,魏小兰,彭强,等. 五元氯化物熔盐的制备及其传蓄热性能 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1815-1821. LIU B, WEI X L, PENG Q, et al. Research on preparation and properties of quinary chloride molten salt [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1815-1821.
- [17] ROBELIN C, CHARTRAND P. Thermodynamic evaluation and optimization of the (NaCl+KCl+MgCl₂+CaCl₂+ZnCl₂) system [J]. Thermodynamics, 2011, 43: 377-391.
- [18] HU Z, LIU L L, LU P F, et al. Corrosion behavior and mechanism of 316 stainless steel in NaCl-KCl-ZnCl₂ molten salts at high temperature [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103297. DOI: 10.1016/j.mtcomm. 2022. 103297.
- [19] XU F, WANG J T, ZHU X M, et al. Thermodynamic modeling and experimental verification of the NaNO₃-KNO₃-LiNO₃-Ca(NO₃)₂ system for solar thermal energy storage [J]. New Journal of Chemistry, 2017, 41(18): 10376-10382.
- [20] WANG T, MANTHA D, REDDY R G. Thermodynamic properties of LiNO₃-NaNO₃-KNO₃-2KNO₃ • Mg(NO₃)₂ system [J]. Thermochim Acta, 2013, 551: 92-98. DOI: 10.1016/j.tca. 2012. 09. 035.
- [21] RAADE J W, PADOWITZ D. Development of molten salt heat transfer fluid with low melting point and high thermal stability [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133(3): 94-99.