

氢在 FLiNaK(LiF-NaF-KF)熔盐中的渗透行为

曾友石^{1,2,3} 杜林^{1,2,3} 皮力^{1,2,3} 吴胜伟^{1,2} 钱渊^{1,2}
王广华^{1,2} 黄豫^{1,2} 朱海云^{1,2} 刘卫^{1,2}

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院核辐射与核能技术重点实验室 上海 201800)

3 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 FLiNaK(LiF-NaF-KF)熔盐在高温熔盐堆或聚变堆的应用中面临着氚扩散渗透的问题。研究 H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的渗透行为,能够为 FLiNaK 熔盐中氚的控制提供依据。氢同位素在熔盐中的扩散渗透特性测试系统主要用于测定熔盐中氢同位素的渗透行为,以获得氢同位素在熔盐中的扩散系数和溶解度常数等相关参数。通过该系统,本文对 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透、扩散和溶解等行为进行了研究。结果表明,受实验装置和实验方法的限制, H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的渗透主要以氢原子(或离子)的方式进行。在 500-700 °C 时, FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散系数与温度的关系满足: $D_{\text{FLiNaK-H}}=1.12 \times 10^{-4} \exp(-66.40 \times 10^3/R_g T)$ (m²·s⁻¹), 其扩散活化能为 66.40 kJ·mol⁻¹。而对于 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解常数,其与温度的关系可表述为: $K_{\text{FLiNaK-H}}=2.1 \times 10^{-5} \exp(-0.94 \times 10^3/R_g T)$ (mol·m⁻³·Pa^{-1/2})。

关键词 FLiNaK 熔盐, 氢, 渗透, 扩散, 溶解

中图分类号 TL281

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020603

FLiNaK(LiF-NaF-KF)熔盐在高温时,化学性质稳定,同时具有较好的传热性能,被认为是一种很有应用潜力的传热介质,可作为高温熔盐堆的传热流体^[1-2]。其中, LiF、NaF 和 KF 的摩尔比分别为 46.5%、11.5%和 42%的熔盐是研究较多的一种 FLiNaK 熔盐,其熔点为 454 °C^[3]。第 IV 代先进高温堆的设计中,将 FLiNaK 熔盐作为二回路传热流体的备选^[4]。此外,在聚变堆研究中,提出了以 FLiNaK 熔盐作为氚增殖包层的可能^[5]。然而,无论是作为熔盐堆的传热盐还是聚变堆的氚增殖包层,在使用时均面临着高温时氚(T)的扩散渗透问题^[6]。熔盐中的锂(Li)受中子辐照后会产生氚,氚在高温下极易透过热交换器及回路管道进入环境中,产生对人体危害极大的氚化水(HTO)。因此,研究熔盐中氚的扩散渗透行为,对于熔盐中氚的控制和回收有着非常重要的意义。

目前,对 FLiNaK 熔盐中氚行为性质的研究,国内外相关报道很少。另外,在这些研究中,由于实验条件和实验方法之间的差异,造成彼此间数据差异较大。本文通过自建的氢同位素在熔盐中的扩散渗透特性测试系统,对 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透、扩散和溶解行为进行研究,获得 FLiNaK 熔盐中 H₂

的扩散和溶解行为的参数。通过与相关文献的实验方法和实验结果比较,探讨实验方法对实验结果的影响,以期获得较为准确的 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散和溶解参数,从而为 FLiNaK 熔盐中氚的行为性质研究提供参考依据。

1 实验方法

本实验在氢同位素扩散渗透特性测试系统中进行(图 1)。该测试系统分为:供气系统、渗透罐与加热系统、检测系统和辅助部件。其中,供气系统可为实验提供 Ar、H₂、D₂ 以及 Ar 和 H₂(或 D₂)的混合气。渗透罐分为内外两个腔体,均由 316L 不锈钢焊接而成。内腔通过焊接镍板分割成上下两个腔室。实验时,上腔填入熔盐,并通过加热系统使熔盐达到实验指定温度。下腔充入 H₂(或 D₂)气,高温时 H₂(或 D₂)通过镍板进入熔盐。熔盐中的 H₂(或 D₂)通过渗透,最终在熔盐表面释放。释放出来的 H₂(或 D₂)被上腔吹扫气体(Ar)载入检测系统,检测系统可检测载气中 H₂(或 D₂)的浓度。通过载气中 H₂(或 D₂)的渗透通量与时间的拟合关系,可计算出熔盐中 H₂(或 D₂)的扩散系数与溶解度。详细的实验装置与实验方法的介绍参见文献[7]。

中国科学院先导专项(No.XDA020200)资助

第一作者:曾友石,男,1987年出生,2014年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位,研究领域为熔盐堆中氚的控制

通讯作者:刘卫, E-mail: liuwei@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-09-22, 修回日期:2014-10-21

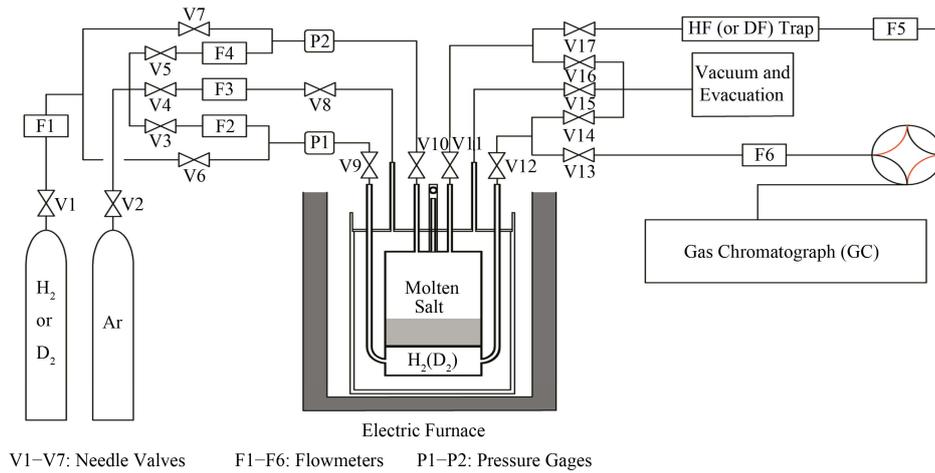


图 1 氢同位素在熔盐中的扩散渗透特性测试系统简图

Fig.1 A schematic diagram of the testing system for permeation and diffusion characteristics of hydrogen isotope in molten salt.

实验用熔盐为摩尔比分别为 46.5% LiF、11.5% NaF 和 42% KF 的混合盐，装填厚度为 30 mm。熔盐在装填前经过净化处理，为保证熔盐的纯度，实验操作均在 Ar 气氛中进行。实验开始前，使用 Ar 气吹扫熔盐，直至无法检测到吹扫气中 H₂(或 D₂)。实验时，对渗透罐的外腔抽真空，以消除从渗透罐内腔壁渗透的 H₂ 产生的影响。实验过程分为：(1) 温度为 500 °C、550 °C、600 °C、650 °C 和 700 °C 时，FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透行为研究，用以测定 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散和溶解系数与温度的依赖关系；(2) 不同 H₂ 分压(10 kPa、100 kPa 和 500 kPa) 时，FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透行为研究，以检测 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透方式。

2 结果与讨论

图 2 是 500–700 °C 时 FLiNaK 熔盐中 H₂ 渗透通量与时间的关系以及相应的拟合结果。

拟合方程为^[7]：

$$\frac{j_H}{(j_H)_{\text{Steady}}} = \sqrt{\frac{4L_{\text{Salt}}^2}{\pi D_{\text{Salt-H}} t}} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 L_{\text{Salt}}^2}{4D_{\text{Salt-H}} t}\right) \quad (1)$$

式中， j_H 为瞬态时，氢在熔盐中的渗透通量， $\text{mol}\cdot\text{H}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ； $(j_H)_{\text{Steady}}$ 为稳态时，氢在熔盐中的渗透通量， $\text{mol}\cdot\text{H}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ； L_{Salt} 为熔盐厚度，m； $D_{\text{Salt-H}}$ 为熔盐中氢的扩散系数， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ； t 为渗透时间，s。

通过调节 $D_{\text{Salt-H}}$ ，使实验结果与拟合值吻合，此时得到的扩散系数即为熔盐中氢的扩散系数。

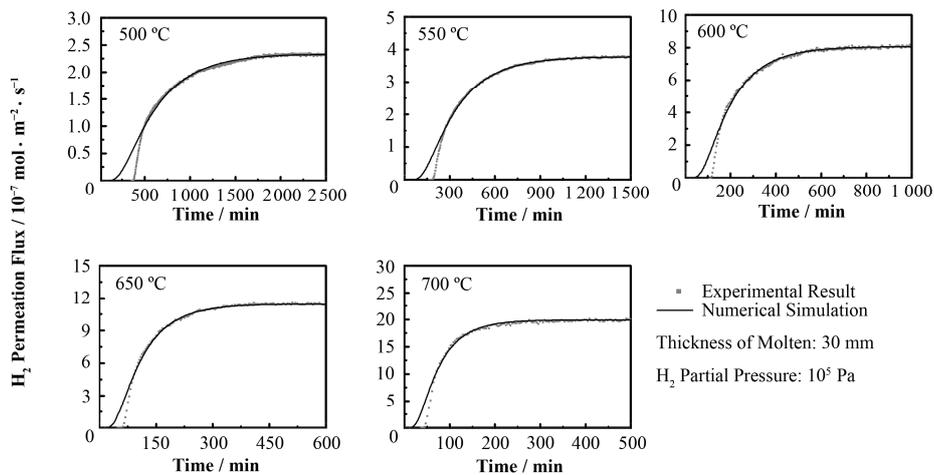


图 2 500–700 °C 时 FLiNaK 熔盐中 H₂ 渗透通量与时间关系的实验和拟合结果

Fig.2 H₂ permeation flux with time and the numerical calculations in molten FLiNaK at 500–700 °C.

由图 2, 除渗透初始时间外, 500–700 °C 时 FLiNaK 熔盐中 H₂ 渗透的实验结果与拟合结果是非常吻合的。而在渗透初始时测量结果与拟合结果的偏差, 其原因可归结为: (1) H₂ 从供气系统经过管路到达渗透罐时需要一定的时间 (死时间), 造成 H₂ 渗透时, 初始渗透的时间与测量的时间出现偏差; (2) 实验开始时, 将下腔的 Ar 换成 H₂ 后, H₂ 会与管道和腔内残留的 Ar 混合, 最终影响初始渗透时上游端 H₂ 的分压值。另外, 由于 H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的扩散过程随温度升高而加快, 因此随实验温度的升高, 测量结果与拟合结果出现差异的时间范围也逐渐减小。

图 3 是不同 H₂ 分压以及不同温度下, FLiNaK 熔盐中 H₂ 的稳态渗透通量。H₂ 在熔盐中的渗透有两种方式: (1) 以氢分子方式渗透; (2) 以氢原子 (或离子) 方式渗透。不同的渗透方式, 将导致 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压的关系存在以下两种可能:

$$(j_H)_{\text{Steady}} = \frac{P_{\text{Salt-H}}}{L_{\text{Salt}}} P_{\text{up}} \quad (2)$$

$$(j_H)_{\text{Steady}} = \frac{P_{\text{Salt-H}}}{L_{\text{Salt}}} \sqrt{P_{\text{up}}} \quad (3)$$

式中, $P_{\text{Salt-H}}$ 为熔盐中 H₂ 的渗透率, mol·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹ 或 mol·m⁻¹·s⁻¹·Pa^{-1/2}; P_{up} 为渗透上游 H₂ 分压, Pa。

由图 3, 在对数坐标图中, 同一温度下, FLiNaK 熔盐中 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压成正比。其中, 在 500 °C、650 °C 和 700 °C 时, 两者的斜率分别为 0.64、0.67 和 0.57。这一斜率关系更接近于式(3)中 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压的关系, 说明在本实验中, H₂ 在 FLiNaK 熔盐中主要以氢原子 (或离子) 的方式进行渗透。而在类似的实验中, Fukada 等^[8]同样得到了 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压成正比的关系, 但两者的斜率却更接近于 1.0, 即满足式(2)。同时, 也说明了在 Fukada 的实验中, 氢在 FLiNaK

熔盐中主要以氢分子的方式进行渗透。实验中出现两种氢渗透方式, 其原因可能是充氢方式不同。在本实验中, 采用的是下腔充氢的方式, 而在 Fukada 等^[8]的实验中, 采用的是上腔充氢的方式。下腔充氢时, H₂ 先通过镍板再进入熔盐中。此时, H₂ 在镍板中先离解成氢原子, 氢原子再透过镍板进入熔盐中, 因此熔盐中的氢可能会以氢原子 (或转变为氢离子) 的方式存在。而上腔充氢时, H₂ 先通过熔盐再进入镍板, 因此熔盐中的氢可能会以氢分子的方式存在。由此可见, 充氢方式的不同, 可能造成熔盐中 H₂ 的渗透方式的差异。另一方面, FLiNaK 熔盐中 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压的斜率比 0.5 稍大, 说明在本实验中, FLiNaK 熔盐中同时存在氢分子的渗透。其来源可能是氢原子透过镍板后复合成氢分子, 而氢分子再进入熔盐中进行渗透。

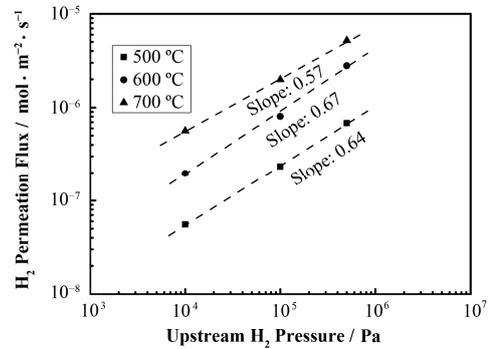


图 3 500 °C、600 °C 和 700 °C 时, FLiNaK 熔盐中 H₂ 的稳态渗透通量与渗透上游 H₂ 分压关系

Fig.3 Steady-state H₂ permeation flux in molten FLiNaK with upstream H₂ partial pressure at 500 °C, 600 °C and 700 °C.

在实验中, 由于充氢方式的差异, 可能造成熔盐中不同的氢渗透方式, 从而导致氢扩散机理发生变化。另外, 在不同的熔盐中, 氢的扩散机理也存在差异。表 1 是 FLiNaK 熔盐与其它熔盐中氢的扩散方式。

表 1 不同熔盐中氢的扩散方式
Table 1 Diffusion form of hydrogen in different molten salts.

熔盐 Molten salts	扩散方式 Diffusion form	文献 Ref.
Pb-Li(Li ₁₇ Pb ₈₃)	H ⁻ 和 H ⁰	Masuyama ^[9]
Li	H ⁻	Fukada ^[10]
FLiBe(2LiF-BeF ₂)	H ⁺	Klix ^[11]
FLiNaK(LiF-NaF-KF)	H ₂	Fukada ^[8]
FLiNaK(LiF-NaF-KF)	H ⁰ (或 H ⁺)以及少量 H ₂	本研究 This study

在液态锂铅合金(Li₁₇Pb₈₃)中, 氢的扩散行为主要通过 Li-H(H⁻)的形成以及溶解的 H 原子(H⁰)来完

成^[9]。在液体锂(Li)中, 氢的扩散行为则主要通过 Li-H(H⁻)中 H 原子的迁移来完成^[10]。在熔盐 Li₂BeF₄

中,以 HF 形式结合的 H 原子及其迁移是 H₂ 扩散的主要方式^[11]。对于 FLiNaK 熔盐, Fukada 等^[8]的实验表明, H₂ 在 FLiNaK 熔盐的扩散是以 H₂ 分子形式为主的,而低温时才受熔盐中 H⁺影响;在本研究中,FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散则表现出以 H 原子(H⁰)或 H 离子(H⁺或 H⁻)的形式为主,同时还存在少量的 H₂。在这一方式下, H₂ 的扩散可能与熔盐 Li₂BeF₄ 中 H₂ 的扩散类似,即通过以 HF 的结合来完成氢的迁移。

图 4 是 H₂ 在 FLiNaK 熔盐中扩散系数的拟合结果,同时图 4 中也给出了其他相关的文献数据。通过实验,FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散系数可拟合为以下 Arrhenius 方程:

$$D_{\text{FLiNaK-H}}=1.12 \times 10^{-4} \exp(-66.40 \times 10^3 / R_g T) \quad (4)$$

式中, $D_{\text{FLiNaK-H}}$ 为 FLiNaK 熔盐中氢的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; R_g 为理想气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K。

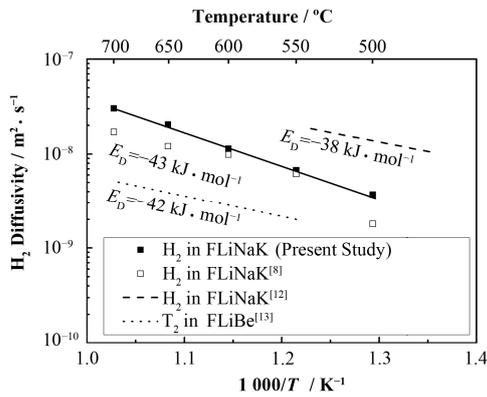


图 4 熔盐 FLiNaK 中 H₂ 的扩散系数与温度关系

Fig.4 Diffusivity of H₂ through FLiNaK as a function of the reciprocal of temperature.

从图 4 中可看出,相较于 Fukada^[8]的实验结果,本研究的扩散系数在 500–700 °C 时具有更好的拟合结果($R^2=0.998$)。同时,在 500 °C、650 °C 和 700 °C 时,其扩散系数比 Fukada 得到的扩散系数偏大,特别是在 500 °C 时。另外,在 Fukada 的实验结果中,舍弃 500 °C 时偏离的扩散系数后,得到的 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散活化能为 43 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (550–700 °C)。而在本研究中,FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散活化能为 $(66.40 \pm 1.57) \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ (500–700 °C)。研究得到的扩散系数和扩散活化能与文献[8]中的差异原因可能是 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散机理不同。一方面, Fukada 的实验中,在 550 °C 和 600 °C 时,FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散受熔盐中 H⁺的影响。而本研究中 H₂ 在 FLiNaK 熔盐中主要以氢原子(或离子)的方式进行扩散。因此在 550 °C

和 600 °C 时,两者中 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散可能都以 H⁺为主,从而导致两者在 550 °C 和 600 °C 时得到的扩散系数比较接近。

另一方面,与 FLiBe 熔盐中 T₂ 的扩散活化能 ($42 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)^[13]相比,本研究得到 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散活化能明显偏大(忽略 H₂ 和 T₂ 的同位素效应)。尽管 FLiBe 熔盐和 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散均可能以 H⁺(HF)为主,但文献[14]表明,FLiBe 熔盐中存在正四面体结构的 BeF₂²⁻ 离子,而 BeF₂²⁻ 离子将对 H⁺(HF)的迁移产生影响。例如,相比于自由 F⁻与 H⁺形成的 HF,由 BeF₂²⁻ 离子中的 F⁻与 H⁺形成的 HF 更不稳定,从而导致了 FLiBe 熔盐中更低的 H₂ 扩散活化能。

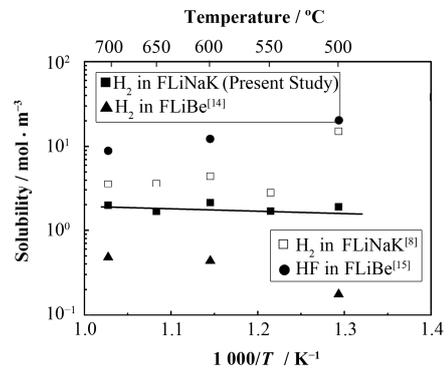


图 5 熔盐 FLiNaK 中 H₂ 的溶解度与温度关系

Fig.5 Solubility of H₂ in FLiNaK as a function of the reciprocal of temperature.

通过扩散系数与稳态渗透通量的关系,可推导出 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解度常数^[7]。在本研究中,由于 H₂ 的扩散是通过 H⁺的形式进行,因此其溶解度可通过 Sieverts 定律来拟合。图 5 是 1 atm-H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的溶解度以及熔盐和气体的相关文献值。而在本研究中, H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的溶解度常数可表述为以下 Arrhenius 方程:

$$K_{\text{FLiNaK-H}}=2.1 \times 10^{-5} \exp(-0.94 \times 10^3 / R_g T) \quad (5)$$

式中, $K_{\text{FLiNaK-H}}$ 为 FLiNaK 熔盐中氢的溶解度常数, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1/2}$ 。

由图 5,相较于 FLiBe 熔盐,在 500–700 °C 时,FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解度要大于 FLiBe 熔盐中 H₂ 的溶解度^[13],但小于 FLiBe 熔盐中 HF 的溶解度^[15]。另外,本文得到的 H₂ 溶解度均比 Fukada^[8]得到的溶解度偏小。在本研究中, H₂ 先透过镍板后才能进入熔盐,这无疑会降低 H₂ 在 FLiNaK 熔盐中溶解量;而在 Fukada 的实验中, H₂ 直接与熔盐接触,因此其溶解度会相对增大。事实上,本研究得到的 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解度在 550–700 °C 时

与 Fukada 得到的结果相差并不明显，只有 500 °C 时才具有明显的差异。这充分说明了镍板对 H₂ 渗透的阻力相对于熔盐对 H₂ 渗透的阻力要小很多。而对于 500 °C 的差异，从上文 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的扩散系数可看出，在 Fukada 的实验中，500 °C 时 FLiNaK 熔盐中 H₂ 扩散系数相对较小，在通过渗透率进行溶解常数的计算时，将导致 H₂ 的计算溶解度常数偏大。

对于 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解热，其值为 $(-0.94 \pm 4.70) \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，负的溶解热表明 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解过程可能为吸热的过程。这与 FLiBe 熔盐中 H₂ 的溶解过程相同，但不同于 FLiBe 熔盐中 HF 的溶解过程。另外，相对较小的溶解热，表明 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的溶解度与温度的依赖关系相比较小，与 550–700 °C 时 Fukada 得到的结果相似。

3 结语

使用氢同位素在熔盐中的扩散渗透特性测试系统，对 FLiNaK 熔盐中 H₂ 的渗透与扩散行为进行了研究。结果表明，在该实验装置中，H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的渗透方式与实验过程有关。采用下腔充氢的方式，H₂ 在 FLiNaK 熔盐中的渗透将主要以氢原子(或离子)的方式进行。在这一条件下，500–700 °C 时 H₂ 的扩散系数可拟合为： $D_{\text{FLiNaK-H}} = 1.12 \times 10^{-4} \exp(-66.40 \times 10^3 / R_g T)$ 。而溶解度常数则可表述为： $K_{\text{FLiNaK-H}} = 2.1 \times 10^{-5} \exp(-0.94 \times 10^3 / R_g T)$ 。与文献[8]值相比，相关参数的差异主要在于实验方法(充氢方式)上的差别。

参考文献

- Ambrosek J, Anderson M, Sridharan K, *et al.* Current status of knowledge of fluoride salt (FLiNaK) heat transfer[J]. Nuclear Technology, 2009, **165**: 166–173
- Khokhlov V, Ignatiev V, Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixture[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2009, **130**: 30–37
- Holcomb D E, Cetiner S M. An overview of liquid-fluoride-salt heat transport systems[R]. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2010/156, 2010
- Sherman S R. 2005 DOE hydrogen program: NHI system interface and support system[R]. 2005 DOE H₂ Annual Review, Project ID #PD31, 2005
- Yamanishi H, Sagara A. Annual report of National Institute for fusion science[R]. Japan, April 1999-March 2000
- 黄豫, 刘卫, 肖德涛, 等. 熔盐堆中氚的控制和检测[J]. 核技术, 2011, **34**(8): 632–666
HUANG Yu, LIU Wei, XIAO Detao, *et al.* Control and monitoring of tritium in molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(8): 632–636
- Zeng Y S, Wu S W, Qian Y, *et al.* Apparatus for determining permeability of hydrogen isotope in molten salt[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(4): 040602
- Fukada S, Morisaki A. Hydrogen permeability through a mixed molten salt of LiF, NaF and KF (FLiNaK) as a heat-transfer fluid[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, **358**: 235–242
- Masuyama D, Oda T, Fukada S, *et al.* Chemical state and diffusion behavior of hydrogen isotopes in liquid lithium-lead[J]. Chemical Physics Letters, 2009, **483**: 214–218
- Fukada S, Kinoshita M, Kuroki K, *et al.* Hydrogen diffusion in liquid lithium from 500 °C to 650 °C[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, **346**: 293–297
- Klix A, Suzuki A, Terai T. Study of tritium migration in liquid Li₂BeF₄ with ab initio molecular dynamics[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, **81**: 713–717
- Katsuta H, Furukawa K. Diffusivity and solubility of hydrogen in molten fluoride mixture (LiF-NaF-KF)[J]. Journal of Nuclear Materials, 1978, **71**: 375–376
- Calderoni P, Sharpe P, Hara M, *et al.* Measurement of tritium permeation in FLiBe(2LiF-BeF₂)[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, **83**: 1331–1334
- Malinauskas A P, Richardson D M. The solubilities of hydrogen, deuterium, and helium in molten Li₂BeF₄[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research Fundamentals, 1974, **13**: 242–245
- Field P E, Shaffer J H. The solubilities of hydrogen fluoride and deuterium fluoride in molten fluorides[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1967, **71**: 3218–3222

Permeability of hydrogen in molten salt FLiNaK(LiF-NaF-KF)ZENG Youshi^{1,2,3} DU Lin^{1,2,3} PI Li^{1,2,3} WU Shengwei^{1,2} QIAN Yuan^{1,2}
WANG Guanghua^{1,2} HUANG Yu^{1,2} ZHU Haiyun^{1,2} LIU Wei^{1,2}¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)²(Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 201800, China)³(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Molten salt FLiNaK(LiF-NaF-KF) has potential to be used as heat-transfer fluid of molten salt nuclear reactor, because of its high chemical stability, moderate specific heat and sufficient thermal conductivity. One adverse characteristic was that tritium was produced at relatively high rates in such reactors, which could diffuse through metals at high temperature and thus required to evaluate the behavior of tritium in FLiNaK. **Purpose:** This study aims to the permeation behavior of hydrogen in molten salt FLiNaK, providing the basis for tritium permeation behavior in molten salt. **Methods:** Plentiful experiments were conducted in a testing system for permeation and diffusion characteristics of hydrogen isotope in molten salt. Numerical fitting method of experimental results was performed to obtain the hydrogen permeation characteristics in molten salt FLiNaK. **Results:** The results showed that hydrogen was diffusing as H^+ species in molten salt FLiNaK. The diffusion coefficients and solubility constants of hydrogen in molten salt FLiNaK can be correlated to $D_{\text{FLiNaK-H}}=1.12\times 10^{-4}\exp(-66.40\times 10^3/R_gT)$ ($m^2\cdot s^{-1}$) and $K_{\text{FLiNaK-H}}=2.1\times 10^{-5}\exp(-0.94\times 10^3/R_gT)$ ($\text{mol}\cdot m^{-3}\cdot Pa^{-1/2}$). **Conclusion:** The diffusion coefficients and solubility constants of hydrogen in molten salt FLiNaK were derived from the experimental results.

Key words Molten salt FLiNaK, Hydrogen, Permeability, Diffusion, Solubility

CLC TL281