

# 锂在热管反应器吸液芯上毛细作用的理论分析

朱 强, 郑邯勇, 李维维, 张 强

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056000)

**摘 要** 根据热管反应器工作特点, 建立了吸液芯理论模型, 推导出液态锂在吸液芯上升高度的公式, 对特定条件下锂在吸液芯的上升高度进行了计算, 并分析了锂在吸液芯上升高度随丝网目数、层数、温度以及热流密度的变化规律。为热管反应器设计及吸液芯参数选择提供了依据。

**关键词** 锂; 六氟化硫; 热管反应器; 吸液芯; 毛细作用

**中图分类号** TK16 **文献标识码** A

## Theoretical Analysis for Capillary Action of Lithium in Wick of Heat Pipe Reactor

ZHU Qiang, ZHENG Hanyong, LI Weiwei, ZHANG Qiang

(No. 718 R&D Institute, CSIC, Handan 056000, China)

**Abstract** According to work characteristics of heat pipe reactor, a theoretical model of the wick is established. The formula for rising height of liquid lithium in the wick is derived. The wick rising height is calculated under certain conditions. In addition, the change rules of rising height of lithium in wick with the mesh number, layer number, temperature and heat flux are analyzed. It provides the basis for the design of the heat pipe reactor and the selection of the wick parameters.

**Key words** lithium; sulfur hexafluoride; heat pipe reactor; wick; capillary action

## 0 引言

锂与六氟化硫在一定条件下可以反应, 释放出很高的热量, 并生成液态氟化锂与硫化锂产物。产物体积与消耗锂的体积大致相同, 可以储存在反应器中, 不用向系统外排出。锂/六氟化硫反应器与汽轮机或斯特林发动机配合, 可以构成性能优异的闭式循环动力系统, 适合用作水下航行器的动力装置<sup>[1-3]</sup>。

锂/六氟化硫反应有两种形式。一种是浸没喷射反应, 氧化剂喷嘴与传热管均浸没在液态锂中, 氧化剂喷射到液态锂中发生反应, 反应热量经过液态锂或产物传递到传热管壁, 再传输给工质。由于氧化剂喷嘴直接与高温锂或产物接触, 停止反

应后容易引起喷嘴的堵塞。因此这种反应方式适用于输出功率大、持续时间短的应用场合; 另一种是吸液芯反应, 吸液芯布置在锂液面上, 液态锂通过毛细作用传输到吸液芯上, 与氧化剂反应, 通过锂的蒸发与冷凝实现反应热量传递。由于六氟化硫喷嘴位于锂液面上, 停止反应后喷嘴不会堵塞, 可以做到重复启动, 但是这种反应形式的放热量受到吸液芯燃料传输能力限制, 适用于小功率、长时间工作的应用场合。我们称这种反应形式的反应器为热管反应器<sup>[4]</sup>。

热管反应器结构示意图见图1, 主要由筒体、传热管、吸液芯、法兰盖等组成, 反应器上部是反应及传热区, 下部是锂和产物储存区, 吸液芯距传热管内壁一定距离处布置, 其下端延伸到锂液面下,

收稿日期: 2018-01-05

作者简介: 朱强(1968-), 男, 高级工程师, 主要从事金属燃料能源技术研究。

六氟化硫喷嘴安装在反应器的顶部。

工作时,液态锂在表面张力作用下沿吸液芯上升,与六氟化硫在吸液芯内表面反应放热。反应热量传递给吸液芯,吸液芯中的锂受热蒸发,一部分参与反应,一部分扩散到传热管壁冷凝,将热量传给工质,凝结的锂液沿螺旋管壁流至锂池。反应产物在吸液芯上冷凝为液体,沿吸液芯向下流至储存区底部。毛细提升力把锂源源不断提供给吸液芯,反应可以一直进行到锂消耗完,反应产物储存在反应器中<sup>[5-6]</sup>。

在热管反应器中锂既是燃料,又是传热介质。吸液芯不仅起输送燃料与导流产物作用,而且反应与传热都围绕吸液芯进行。吸液芯作为传热系统的一部分,与传统热管的蒸发段有些类似。热管中工作介质的循环靠吸液芯产生的毛细压头维持,由于吸液芯所能提供的压头是有限的,将使热管的最大传热量受到限制。对热管反应器来说,锂/六氟化硫反应放出热量,同时吸液芯中锂的蒸发带走热量,将使吸液芯温度保持在一定水平。如果吸液芯不能输送足够的锂到反应器上部,满足反应与传热要求,吸液芯会发生局部干涸,可能引起吸液芯或传热管烧蚀,这种极限即是吸液芯毛细极限。

为了研究热管反应器的设计、工作特性以及吸液芯毛细极限,本文建立理论模型,对锂在吸液芯上的毛细作用进行理论分析。

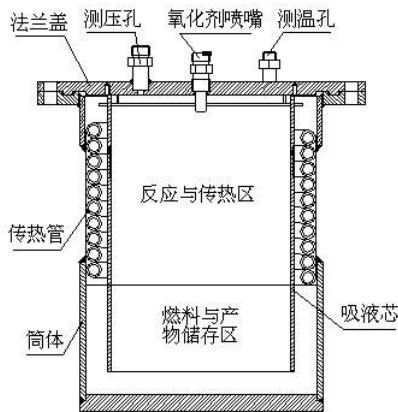


图 1 热管反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat pipe reactor structure

## 1 吸液芯理论分析<sup>[7-8]</sup>

图 2 是吸液芯理论模型示意图。液态锂在毛

细作用下爬升到吸液芯中,氧化剂喷入由法兰盖、吸液芯与锂液面组成的封闭空间内,吸液芯上的锂与氧化剂反应,反应热使吸液芯上更多的锂蒸发,从吸液芯内部蒸发的锂与氧化剂反应,从吸液芯外部蒸发的锂在传热管壁冷凝,将热量传输给工质。我们假定吸液芯表面锂的燃烧速度均匀,锂从吸液芯外表面的蒸发速度也均匀。假设系统处于稳定状态,液面上全部反应热量通过吸液芯传输。吸液芯液面上高度为  $H$ ,吸液芯单位面积反应的燃料质量流量为  $m_c''$ ,吸液芯单位面积蒸发的燃料质量流量是  $m_e''$ ,吸液芯热流密度是  $q''$ 。

吸液芯有多种结构形式,本文研究的吸液芯是由金属丝网制成的。多层金属丝网紧密排列在一起,构成多孔材料,对液体有一定的毛细作用。由于高温情况下锂具有很高的还原性,六氟化硫具有极高的氧化性,综合考虑耐腐蚀情况,金属丝网采用不锈钢材质。

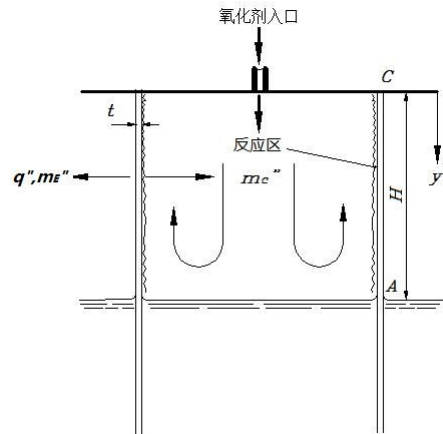


图 2 吸液芯理论模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wick theoretical model

单位面积吸液芯用于反应与蒸发的燃料质量流量:

$$m'' = m_e'' + m_c'', m_c'' = \frac{q''}{Q_r}, m_e'' = \frac{q''}{h_{fg}} \quad (1)$$

吸液芯单位宽度的锂流量:

$$m_H' = H(m_c'' + m_e'') \quad (2)$$

式(2)可以写成:

$$m_H' = \frac{q'' H}{Q_r} (1 + \alpha), \alpha = Q_r / h_{fg} \quad (3)$$

吸液芯上锂流量随着高度而变化:

$$m' = ym_H'/H \quad (4)$$

吸液芯中由重力和粘性引起的压力降与吸液芯提供的毛细压力平衡。

$$\Delta P_s = \rho g H + \Delta p_v \quad (5)$$

为计算粘性压降,用到达西定律:

$$\frac{dp_v}{dy} = \frac{\mu m' \pi D_w}{\rho K A_w} \quad (6)$$

总粘性压降为

$$\Delta p_v = \int_0^H dp_v \quad (7)$$

将式(6)代入式(7),积分得:

$$\Delta p_v = \frac{\mu H^2 q''}{2 \rho K t Q_r} (\alpha + 1), t = A_w / (\pi D_w) \quad (8)$$

图 2 中 A 点弯月面半径为无穷大,吸液芯毛细压力为

$$\Delta p_s = 2\sigma \left( \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_A} \right) = \frac{2\sigma}{R_c} \quad (9)$$

锂在吸液芯中最大提升高度条件下,毛细压力等于静压与粘性压力之和。

$$\frac{2\sigma}{R_c} = \rho g H + q'' X H^2, X = \frac{\mu}{2 \rho K t Q_r} (\alpha + 1) \quad (10)$$

解方程(10),得到:

$$H_{\max} = \frac{-\rho g + \left[ \rho^2 g^2 + 4 q'' X \left( \frac{2\sigma}{R_c} \right) \right]^{1/2}}{2 X q''} \quad (11)$$

$$K = d^2 \varepsilon^2 / [122(1 - \varepsilon)^2]$$

$$\varepsilon = 1 - (1.05 \pi N d / 4)$$

式中: $m''$  为燃料单位面积质量流量; $q''$  为热流密度; $Q_r$  为锂/六氟化硫反应热; $h_{fg}$  为锂的汽化热; $m'$  为吸液芯单位宽度燃料流量; $H$  为吸液芯液面上高度; $\Delta p_s$  为吸液芯毛细压头; $\Delta p_v$  为粘性压力; $\rho$  为液态锂的密度; $\mu$  为液态锂的粘度; $D_w$  为吸液芯直径; $A_w$  为吸液芯截面积; $t$  为吸液芯厚度; $R$  为吸液芯弯月面半径; $\sigma$  为液态锂表面张力; $d$  为吸液芯钢丝直径; $N$  为吸液芯丝网目数; $K$  为吸液芯渗透率; $\varepsilon$  为吸液芯空隙率。

## 2 锂在吸液芯上升高度的计算及分析

热管反应器工作时吸液芯保持竖直状态,液态锂依靠毛细作用力上升到吸液芯参加反应与传热,

因为传热管布置在吸液芯外围,合理的吸液芯上升高度不仅提供足够的反应面积,而且提供足够的传热面积,因此液态锂在吸液芯上的上升高度是一个重要参数。

根据公式(11) 计算液态锂在丝网吸液芯的上升高度,分析丝网目数、层数、液态锂温度以及热流密度等参数对锂在吸液芯上升高度的影响。由于锂/六氟化硫反应产物氟化锂与硫化锂的共熔点大约为 810 °C,又考虑到不锈钢丝网的熔点与耐腐蚀状况,所以计算时假定锂温度取值范围在 827 ~ 1 027 °C。热管反应器存在毛细极限,热流密度太大会引起吸液芯烧毁,因此热流密度假定在 1 000 kW/m<sup>2</sup> 以下。

在温度 827 °C、热流密度 500 kW/m<sup>2</sup> 条件下,分别对目数为 20 目、40 目、80 目,层数为 2 层、3 层、4 层的丝网吸液芯的锂上升高度进行计算。表 1 为锂在吸液芯上升高度随层数与目数变化的计算结果。图 3 为锂在丝网吸液芯的上升高度随目数与层数变化趋势图。

表 1 锂在吸液芯上升高度  
随层数与目数变化计算结果

Table.1 Calculation result of rising  
height of lithium in wick changing  
with layer number and mesh number

锂在吸液芯 上升高度	20 目 /mm	40 目 /mm	80 目 /mm
2 层	209	290	217
3 层	212	319	258
4 层	214	338	290

从图 3 可以看出,锂在吸液芯的上升高度随着丝网层数的增加而增大,但是在热管反应器设计时丝网层数不宜选取过多,一般选取 4 层。因为层数多,丝网厚度就增加,会增大吸液芯的热阻,引起吸液芯内外温差增大,增大吸液芯受到腐蚀的可能性。锂上升高度与丝网目数不成正比关系,在一定条件下有一个最佳目数,使得锂的上升高度最大。这是因为增加丝网目数会增加吸液芯的毛细提升能力,但同时也增大粘性压力,图 3 中锂上升高度

取得最大值的目数是 50 目左右。

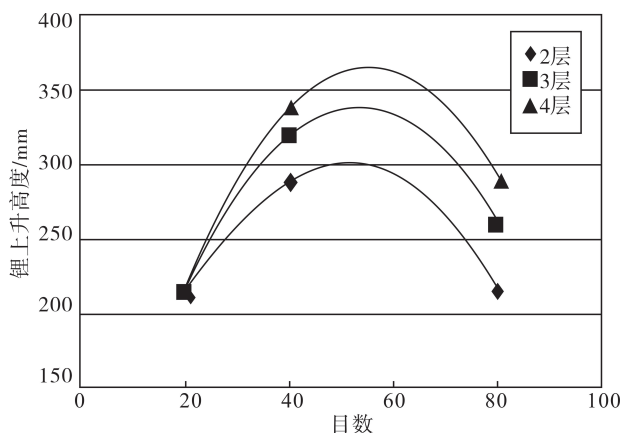


图 3 锂在丝网吸液芯的上升高度  
随目数与层数变化趋势图

Fig. 3 Change trend diagram of rising height of lithium in wick with mesh number and layer number

在热流密度  $500 \text{ kW/m}^2$  条件下,对 80 目、4 层网状吸液芯的锂上升高度随温度变化进行了计算。表 2 为锂在吸液芯上升高度随温度变化的计算结果。图 4 为锂在吸液芯的上升高度随温度变化趋势图。

表 2 锂在吸液芯上升高度随温度变化计算结果

Table 2 Calculation result of rising height of lithium in wick changing with temperature

温度 / $^{\circ}\text{C}$	锂在吸液芯上升高度 /mm
827	290
927	302
1 027	299

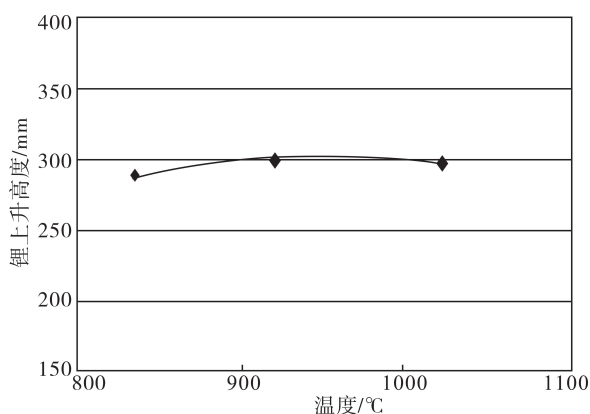


图 4 锂在丝网吸液芯的上升高度随温度变化趋势图

Fig. 4 Change trend diagram of rising height of lithium in wick with temperature

从图 4 可以看出,在温度  $827 \sim 1\,027 \text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,锂的上升高度随温度变化不明显。原因是尽管温度升高,使得液态锂的密度与粘度值都减小,有利于锂在吸液芯的上升,但是锂的表面张力也减小了,两方面作用相互抵消了。

在  $827 \text{ }^{\circ}\text{C}$  温度条件下,对 80 目、4 层网状吸液芯,锂在吸液芯的上升高度随热流密度变化情况进行了计算。表 3 为锂在吸液芯上升高度随热流密度变化计算结果。图 5 为锂在吸液芯的上升高度随热流密度变化趋势图。

表 3 锂上升高度随热流密度变化计算结果

Table 3 Calculation result of rising height of lithium changing with heat flux

热流密度 / $\text{kW/m}^2$	锂在吸液芯上升高度 /mm
350	333
500	290
700	252

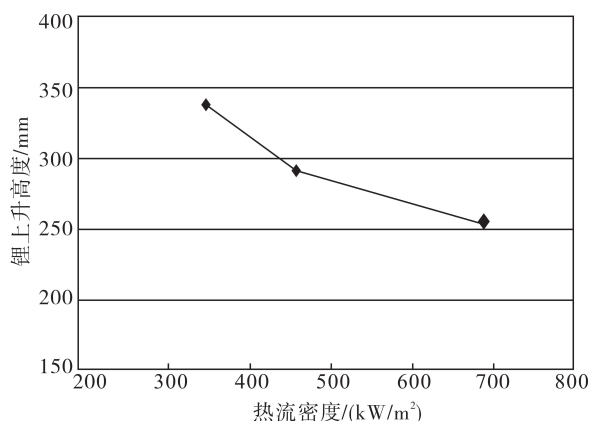


图 5 锂在丝网吸液芯的上升高度  
随热流密度变化趋势图

Fig. 5 Calculation result of rising height of lithium in wick changing with heat flux

从图 5 可以看出,随着热流密度增加,锂在吸液芯的上升高度反而减小。因为热流密度的增加,要求更多的锂参加反应,上升高度低有利于锂在吸液芯的流动。

### 3 结束语

通过对热管反应器吸液芯理论模型的研究,得到了锂在吸液芯上升高度的计算公式,对给定条件

下锂在吸液芯的上升高度进行了计算,根据计算结果分析了锂在吸液芯上升高度随丝网层数、丝网目数、温度、热流密度等参数的变化规律,为热管反应器设计及吸液芯参数选择提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] STEPHEN G. Thermal energy source for an unmanned underwater vehicle[C]// 2<sup>nd</sup> AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations. San Diego: AIAA, 2003.
  - [2] SEDOR G. A conceptual design of a propulsion system for an autonomous underwater vehicle[D]. Briton: University of New Hampshire, 1989.
  - [3] CHEN L D. On the interface modeling of Li-SF6 wick combustion[C]//30th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference. Indianapolis: AIAA, 1994.
  - [4] 黄庆,卜建杰,郑邯勇. Li/SF<sub>6</sub>热源在鱼雷和UUV推进系统中的应用[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(2): 67-71.
  - [5] YOU H Z, FAETH G M. A reactive-heat-pipe for combined heat generation and transport, AD-A131788[R]. US: AIAA, 1977.
  - [6] ALSTADT R H, FAETH G M. An investigation of wick-type metal combustors[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 1977.
  - [7] 庄骏,张红.热管技术及其工程应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
  - [8] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1987.
- 
- (上接第 62 页)
- [5] WAHLSTROM N. Target tracking using Maxwell's equations[D]. Linkoping: Linkoping University, 2010.
  - [6] BIRSAN M. Recursive Bayesian method for magnetic dipole tracking with a tensor gradiometer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 409-415.
  - [7] JAZWINSKI A. Stochastic process and filtering theory[M]. New York: Academic Press, 1970.
  - [8] SIMON J, JEFFERY U, HUGH D. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans. on Auto. Control, 2000, 45(3): 477-481.
  - [9] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Auto. Control, 2009, 56(6): 1254-1269.
  - [10] DOUCET A, GODSILL S, ANDRIEU S, et al. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering[J]. Statist. Comput., 3(10): 197-208.