

文章编号：0258-0926(2019)06-0149-06; doi:10.13832/j.jnpe.2019.06.0149

一种常闭翅片式冷冻阀的结构设计与有限元分析

蒋鑫越^{1,2}, 王纳秀^{1*}, 苏博^{1,2}, 陈玉爽^{1,2},
孔祥波^{1,2}, 陆惠菊¹, 傅远¹

1. 中国科学院上海应用物理研究所嘉定园区, 上海, 201800; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要：在钍基熔盐堆（TMSR）二回路中冷冻阀 TMSR-FV1 的功能是充当常闭截止阀。TMSR-FV2 为 TMSR-FV1 的改进版，其在保持 TMSR-FV1 整体不变的情况下，在外表面增加翅片以增强传热。本文采用有限元方法对 TMSR-FV2 进行了结构设计和传热分析，研究自然冷却条件下翅高、翅厚和翅距等因素对 TMSR-FV2 内熔盐冻堵效果的影响，提出了一种翅片结构，并与 TMSR-FV1 在自然冷却及不同冷却流量条件下的实验冻堵效果进行了对比。计算结果表明：在研究范围内，本文提出的 TMSR-FV2 翅片结构有效降低了冷冻阀扁平段中心熔盐温度，对提升冷冻阀冻堵效果明显，实现了冷冻阀非能动关闭功能。

关键词：翅片；冷冻阀；有限元；熔盐堆

中图分类号：TL353⁺.1 **文献标志码**：A

Structural Design and Finite Element Analysis of a Normally-Closed Finned Freeze Valve

Jiang Xinyue^{1,2}, Wang Naxiu^{1*}, Su Bo^{1,2}, Chen Yushuang^{1,2},
Kong Xiangbo^{1,2}, Lu Huiju¹, Fu Yuan¹

1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai, 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: The freeze valve TMSR-FV1 functions as a normally closed shut-off valve in the secondary loop of the Thorium-based Molten Salt Reactor (TMSR). TMSR-FV2 is an improved version of TMSR-FV1, which heat transfer is enhanced by adding fins to the outer surface of freeze valve while keeping its size intact. In this paper, the Finite Element Method was used to make structural design and thermal analysis of TMSR-FV2. The effects of fin height, fin thickness and fin pitch on the cooling of molten salt in TMSR-FV2 under natural cooling conditions were studied. A finned freeze valve structure was proposed and compared with the experimental salt plug effect of TMSR-FV1 under natural cooling and different cooling flow conditions. The calculation results show that the proposed TMSR-FV2 effectively reduces the central molten salt temperature of the flat section to enhance the salt plug of the freeze valve and realizes the passive closing function of the freeze valve within the scope of the research.

Key words: Fin, Freeze valve, Finite element, Molten salt reactor

0 引言

冷冻阀因其无运动部件、零泄漏和兼有过热

安全排放等优点，成为熔盐堆中关键的安全设备。

目前关于冷冻阀的研究主要集中在对阀体的传热

收稿日期：2018-10-19；修回日期：2019-05-17

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA0201002）；国家自然科学基金（91326201）

作者简介：蒋鑫越（1993—），男，博士研究生，现从事熔盐回路设备研究

*通讯作者：王纳秀，E-mail: wangnaxiu@sinap.ac.cn

分析及非能动排盐时间的计算。橡树岭国家实验室(ORNL)^[1]通过建立试验台架及实验堆研制了用于非能动排盐的冷冻阀,该冷冻阀无需外部加热装置即可使阀内熔盐融化从而实现阀体的非能动开启;中国科学院战略性先导专项钍基熔盐堆(TMSR)通过建立冷冻阀试验台架及FLiNaK工程试验回路(技术报告TMSR-DMM-LT-TR-2016-08)研制了用于熔盐加载和排放的冷冻阀(简称TMSR-FV1),该冷冻阀无翅片结构,使用感应加热将阀内熔盐融化实现开启,使用高压风机将阀内熔盐凝固实现关闭;李启明等^[2-3]利用ANSYS Workbench的热-结构耦合方法分析了TMSR的FLiNaK工程试验回路的冷冻阀在关闭状态及开启过程中的性能特点,模拟结果与FLiNaK工程试验回路的试验结果相吻合;Swaroop^[4]使用COMSOL模拟了冷冻阀内熔盐的融化过程,得出了一维热传导模型下阀体排盐时间随冷冻阀顶部热流量的变化规律;Tuyll和Makkinje^[5-6]设计了复合冷冻阀结构,使用COMSOL及MATLAB分析了不同直径、长度的复合冷冻阀的开启时间;Deurvorst^[7]分析了不同几何参数的圆柱形翅片对阀体排盐时间的影响。

TMSR-FV1作为常闭截止阀,阀体外表面热阻大,需要用高压风机对阀体持续吹风,通过冷却并维持阀体内熔盐处于固态来保持阀体的关闭状态。这种常闭状态需要外部设备来维持,不属于非能动设备。翅片式冷冻阀(简称TMSR-FV2)作为TMSR-FV1的改进版,在保持常闭截止阀功能不变的情况下,在冷冻阀扁平段外表面增加翅片,增强阀体空气侧传热,减小阀体外表面热阻,从而实现冷冻阀非能动关闭功能,提高设备安全性和可靠性。

本文采用ANSYS Workbench稳态及瞬态热分析模块,研究了不同因素(翅片高度、翅片厚度、翅片间距)对TMSR-FV2扁平段中心熔盐温度变化的影响及1800 s内TMSR-FV2扁平段中心熔盐温度随时间的变化规律。

1 分析模型

1.1 物理模型

TMSR-FV1、TMSR-FV2的结构分别如图1、图2所示。冷冻阀为轴对称结构,由直管段、过

渡段、扁平段3段组成,其几何尺寸如表1所示。冷冻阀扁平段由液压机在室温下压制而成,过渡段在压制中自然成型。TMSR-FV2的阀体与TMSR-FV1阀体结构相同,综合考虑翅片的加工工艺及翅片与冷冻阀的兼容性,其翅片形式为纵向矩形翅片。

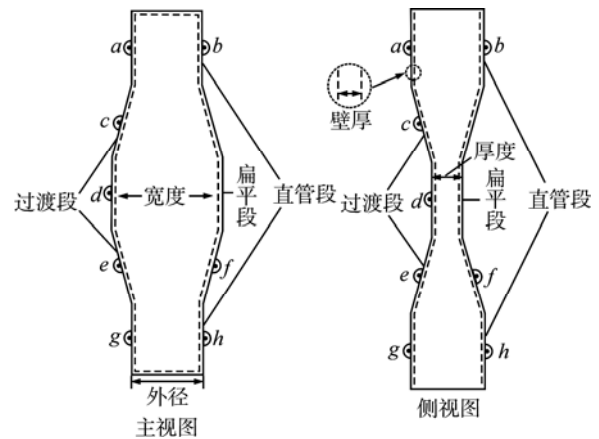


图1 TMSR-FV1结构

Fig. 1 Structure of TMSR-FV1

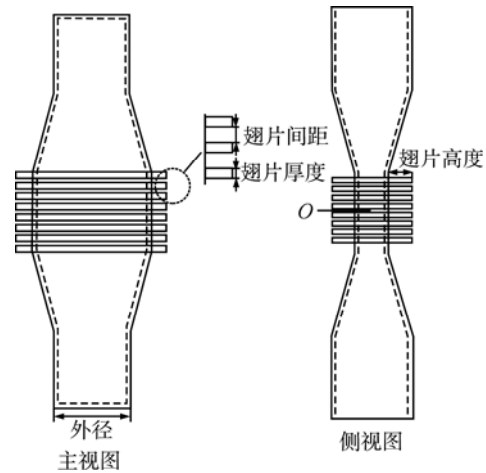


图2 TMSR-FV2结构

Fig. 2 Structure of TMSR-FV2

表1 TMSR-FV2几何尺寸
Table 1 Geometry Size of TMSR-FV2

参数名	参数值
直管段长度/mm	50
过渡段长度/mm	50
扁平段长度/mm	50
扁平段宽度/mm	75.68
扁平段厚度/mm	20.7
外径/mm	48.3
壁厚/mm	3.68

1.2 物性参数和边界条件

TMSR-FV2 阀体及翅片材料为 Hastelloy C-276, 其在不同温度下的物性参数见文献[3]。熔盐为 FLiNaK (LiF-NaF-KF, 46.5-11.5-42.0 mol%), 其熔点约为 454℃, 密度、热导率及比热与温度有关, 关系式见文献[8]。

采用商业软件 ANSYS 14.5 Workbench^[9] 进行稳态及瞬态温度计算, 边界条件为: ① 阀体两端直管段表面采用恒温壁面条件, 温度为 550℃ (参考 TMSR-FV1 实验时两端伴热温度); ② 阀体扁平段、过渡段和翅片表面采用混合传热边界条件, 自然对流传热系数设为 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$, 辐射率设为 0.1 (参考 TMSR-FV1 实验数据); ③ 其他边界条件为绝热边界条件; ④ 阀体传热环境温度设为 30℃ (环境温度为 TMSR-FV1 实验期间 TMSR 试验台架的环境温度均值, 且不考虑极端天气对阀体环境温度的影响)。

因 TMSR-FV2 横截面具有对称性, 为了减少计算量, 选取横截面的 1/4 进行数值模拟。简化后的计算模型如图 3 所示, 其为 3 层网格结构, 第 1 层为熔盐, 第 2 层为阀体, 第 3 层为翅片。为便于稳态分析, 对模型做如下假设: ① 不考虑熔盐相变, 将阀体传热过程简化成阀内熔盐和翅片传热的动态热平衡过程; ② 考虑到本模拟条件下阀体内部的熔盐不流动, 可将其视为固体, 不考虑熔盐回流; ③ 翅片只分布在冷冻阀扁平段外表面, 忽略翅片和阀体外壁接触热阻, 认为翅片根部和阀体外壁温度相同。

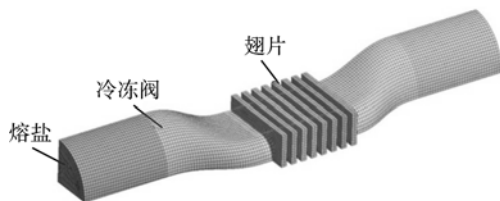


图 3 TMSR-FV2 计算模型
Fig. 3 Calculation Model of TMSR-FV2

1.3 有限元模拟方法的准确性验证

图 4 为 TMSR-FV1 实验台架简化示意图。在 TMSR-FV1 两端直管段装有 2 个加热功率为 6 kW 的圆柱形陶瓷电阻加热装置, 其长度 l 为 100 mm, 直径 D 为 200 mm, 可为阀体两端直管段提供 550℃ 的伴热温度。通过 TMSR-FV1 的实验获得

自然冷却条件下 TMSR-FV1 扁平段、过渡段处于稳态热平衡时的自然对流传热系数为 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$, 辐射率为 0.1。TMSR-FV1 温度传感器分别布置于直管段、过渡段、扁平段的中点, 如图 1 中的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 点, d 点为阀体扁平段中心贴壁温度测点。此温度传感器紧贴阀体壁面安装, 暴露在空气中, 无法显示真实的熔盐温度。

图 5 给出了 TMSR-FV1 的稳态模拟结果与 TMSR-FV1 的试验结果的对比情况。由于该有限元模型忽略了熔盐流动及相变, 与实际工况存在差异, 稳态分析结果与实验值存在一定的误差, 但总体趋势吻合较好, 误差在 $\pm 5\%$ 以内, 表明有限元模拟的分析方法是可靠的。

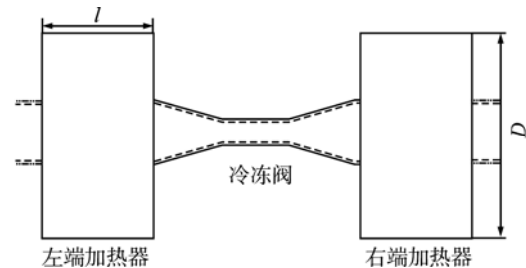


图 4 TMSR-FV1 实验台架简化示意图
Fig. 4 Simplified Schematic Diagram of TMSR-FV1 Experimental Facility

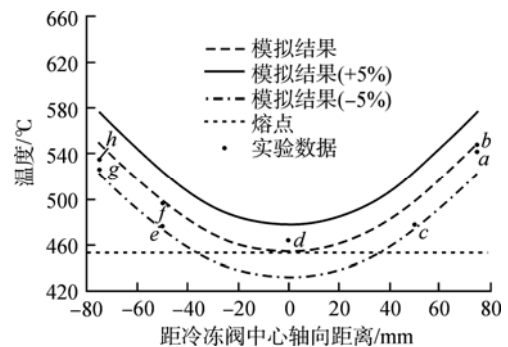


图 5 TMSR-FV1 稳态模拟结果与实验结果对比
Fig. 5 Comparison of TMSR-FV1 Steady-State Simulation Results with Experimental Results

1.4 TMSR-FV2 冻堵效果评价指标

考虑阀体、翅片材料和熔盐的导热系数及比热容的温度非线性, 无法准确求得阀体的散热量, 而 Hastelloy C-276 的热导率远大于 FLiNaK 盐的热导率, 阀体贴壁温度高于熔盐温度。TMSR-FV1 的实验是根据阀体表面贴壁温度来判断阀内熔盐

是否冻堵^[2],证明了通过阀体表面贴壁温度来判断阀体冻堵效果的可行性。本文将阀内熔盐近似为固态盐,与阀体表面之间只存在热传导,因此本文用冷冻阀扁平段中心点的熔盐温度(图2b中O点温度)来近似评价TMSR-FV2的冻堵效果。

冷冻阀中心熔盐温度越低,阀内熔盐冻堵块越稳定,但冷冻阀中心熔盐温度过低会导致冷冻阀开启时需要更多的能量和时间。根据ORNL对冷冻阀内FLiNaK熔盐深度冻堵的定义^[1],当冷冻阀中心熔盐温度为其熔点以下104℃时,阀内熔盐在无需冷却气体的情况下能够维持冻堵,阀体处于稳定关闭状态。综合考虑,将冷冻阀中心熔盐温度接近其熔点以下104℃作为TMSR-FV2冻堵效果的评价指标。

2 分析结果

2.1 TMSR-FV2 结构设计

本文先以翅片高度作为结构设计变量进行阀体稳态温度计算,获得冷冻阀冻堵效果较优的翅片高度;再以翅片厚度/间距作为结构设计变量,最终获得冻堵效果较优的TMSR-FV2结构。

2.1.1 翅片高度对 TMSR-FV2 冻堵效果的影响

翅片高度增加,翅片表面积增加,翅片传热增强。但翅片高度过高会增大沿翅片高度方向的热阻,使热量难以从翅片根部传递到翅片顶部。综合考虑翅片现有加工工艺和冷冻阀的实际工况,选取翅片高度分别为5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、10 mm的纵向矩形翅片进行稳态传热计算,其翅片厚度为3 mm,间距为3 mm,将此计算结果与TMSR-FV1的稳态计算结果(翅片高度为0 mm)相对比,对比结果见图6。

从图6中可以看出,随着翅片高度的增加,

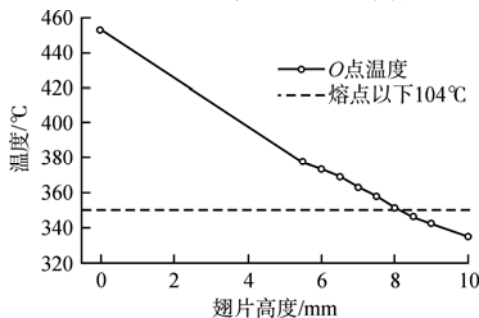


图6 翅片高度对TMSR-FV2冻堵效果的影响
Fig. 6 Respond of Fin Height on Salt Plug Effect of TMSR-FV2

熔盐中心温度降低。翅片高度为8.0 mm的TMSR-FV2的熔盐中心温度为351.08℃,较接近于熔盐熔点以下104℃。此后,随着翅片高度的增加,开启冷冻阀将需要更多的能量和时间。与TMSR-FV1相比,翅片高度为8.0 mm的TMSR-FV2的熔盐中心温度降低了22.50%,从而确定了9种不同翅片高度中较优的翅片高度为8.0 mm。

根据TMSR-FV1的实验结果(技术报告TMSR-DMM-LT-TR-2016-08),当冷却风流量为176 m³/h时,TMSR-FV1冻堵时的d点温度为395.5℃,而阀体中心熔盐温度高于阀体贴壁温度,因此翅片高度为8.0 mm的TMSR-FV2的O点温度至少比冷却风流量176 m³/h下的O点温度降低了11.23%,表明翅片高度8.0 mm的TMSR-FV2冻堵效果优于冷却风流量176 m³/h下TMSR-FV1的冻堵效果。

2.1.2 翅片厚度/间距比值对 TMSR-FV2 冻堵效果的影响

翅片厚度增加会增大材料使用量,但翅片厚度太小又会导致翅片强度不够,可能会引起变形甚至断裂。翅片间距太大会导致翅片密度降低,太小会导致翅片容易积灰,降低传热效果。由于冷冻阀扁平段长度一定,翅片厚度和翅片间距之间存在相互影响。本文选取翅片高度为8.0 mm、翅片厚度和翅片间距不同的纵向矩形翅片进行分析(表2),模拟结果见图7。

图7展示了不同翅片厚度/间距比值的TMSR-FV2的O点温度分布。翅片间距为3 mm和3.5 mm的O点温度随翅片厚度间距比值增加先上升后下降。下降是因为阀体扁平段长度一定,翅片厚度/间距比值增加会引起相邻翅片表面间距离减小,效果相当于减小翅片间距,故阀体中心点的熔盐温度降低,定性表明翅片间距对阀体冻堵效果的影响大于翅片厚度对阀体冻堵效果的影响。

翅片厚度/间距比值为1时,也即翅片厚度为3 mm、翅片间距为3 mm时,TMSR-FV2的O点温度较接近于350℃,根据ORNL对冷冻阀内熔盐深度冻堵的定义,确定了较优的翅片厚度、间距为3 mm。

综合考虑翅片高度、翅片厚度和翅片间距,翅片高度为8 mm、翅片厚度为3 mm、翅片间距为3 mm的TMSR-FV2冻堵效果较优,其O点温

表2 厚度/间距比值与翅片厚度、翅片间距组合
Table 2 Fin Thickness/Pitch Ratio, Fin Thickness and Fin Pitch

翅片厚度/mm	翅片间距/mm	翅片厚度/间距比值
1.0	3.5	0.29
1.0	3.0	0.33
1.0	2.5	0.40
1.5	3.5	0.43
1.5	3.0	0.50
2.0	3.5	0.57
1.5	2.5	0.60
2.0	3.0	0.67
2.5	3.5	0.71
1.5	2.0	0.75
2.0	2.5	0.80
2.5	3.0	0.83
3.0	3.5	0.86
3.0	3.0	1.00
3.5	3.0	1.17
3.0	2.5	1.20
2.5	2.0	1.25
2.0	1.5	1.33
3.5	2.5	1.40
3.0	2.0	1.50
2.5	1.5	1.67
3.5	2.0	1.75
3.0	1.5	2.00
3.5	1.5	2.33
2.5	1.0	2.50
3.0	1.0	3.00
3.5	1.0	3.50

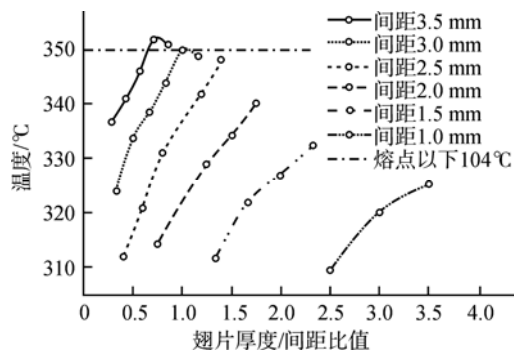


图7 翅片厚度/间距比值对 TMSR-FV2 冻堵效果的影响
Fig. 7 Respond of Fin Thickness/Pitch Ratio on Salt Plug Effect of TMSR-FV2

度比 TMSR-FV1 自然冷却时 O 点温度降低了 29.20%，比 TMSR-FV1 在冷却风流量 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 下的 d 点温度降低了 11.4%，表明翅片高度为 8 mm、翅片厚度为 3 mm、翅片间距为 3 mm 时的 TMSR-FV2 冻堵效果优于冷却风流量 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 下 TMSR-FV1 的冻堵效果。

2.1.3 各因素对 TMSR-FV2 冻堵效果的影响程度 本文采用 Excel 对影响 TMSR-FV2 冻堵效果

的各因素进行方差分析，显著性水平为 0.05。 F 值反应了各因素对 TMSR-FV2 冻堵效果影响程度的大小^[10]，结果如表 3 所示。对某一影响因素来说，若该因素的 F 值大于 F 临界值，则此因素对实验结果的影响显著。 F 值与 F 临界值的差距越大，该因素对实验结果的影响越显著。

由表 3 可知，翅片高度、翅片间距和翅片厚度的 F 值都大于其 F 临界值 1.4，表明这 3 个因素对 TMSR-FV2 冻堵效果影响显著。从各因素的 F 值大小来看，对 TMSR-FV2 冻堵效果的影响程度由高到低排序为翅片高度、翅片间距和翅片厚度。

表3 TMSR-FV2 冻堵效果影响因素方差分析
Table 3 Variance Analysis of Factors on Salt Plug Effect of TMSR-FV2

方差来源	F 值	F 临界值
翅片高度	123.03	1.40
翅片间距	33.07	
翅片厚度	7.25	

2.2 TMSR-FV2 瞬态传热分析

在 1.2 节所示边界条件下，计算了 1800 s 内 TMSR-FV2 内 O 点的瞬态温度分布。图 8 为 TMSR-FV2、TMSR-FV1 瞬态传热模拟的 O 点温度及 TMSR-FV1 不同冷却风流量 (F_g) 下的 d 点温度随时间的变化。通过图 8 可以看到，自然冷却时，TMSR-FV1 的 O 点温度在 1800 s 时仍高于熔盐熔点，表明自然冷却时 TMSR-FV1 阀内熔盐无法冻堵，不能实现关闭功能。随着 F_g 的增加，TMSR-FV1 的 d 点温度降低。虽然在 F_g 为 $137 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，阀体在 1800 s 时的 d 点温度略低于熔盐熔点，但由于熔盐中心温度高于阀体贴壁温度，

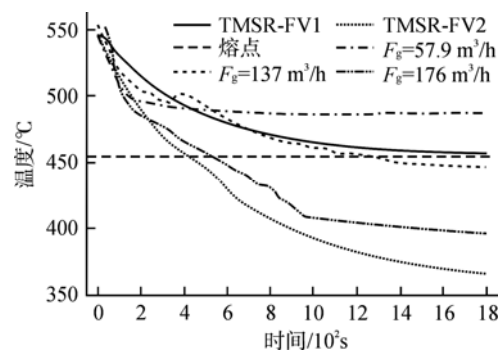


图8 TMSR-FV2 瞬态传热分析
Fig. 8 Transient Heat Transfer Analysis of TMSR-FV2

所以流量为 $137 \text{ m}^3/\text{h}$ 的冷却风并不能使阀体关闭。TMSR-FV1 的实验表明, 流量为 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 的冷却风能够实现阀体冻堵, 而 TMSR-FV2 的 O 点温度比流量为 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 冷却风吹扫时 TMSR-FV1 的 d 点温度低 7.5% , 表明 TMSR-FV2 的冻堵效果优于流量为 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 冷却风吹扫下的 TMSR-FV1 的冻堵效果。

3 结 论

本文对 TMSR-FV2 进行了结构设计, 并分析了自然冷却情况下翅片高度、翅片厚度、翅片间距对 TMSR-FV2 扁平段中心熔盐稳态及瞬态温度分布的影响规律, 主要结论如下:

(1) 在翅片高度 $5.5\sim 8 \text{ mm}$ 和翅片厚度、间距 $1\sim 3.5 \text{ mm}$ 范围内, 推荐翅片高度 8 mm 、翅片厚度 3 mm 、翅片间距 3 mm 的纵向矩形翅片式冷冻阀, 其自然冷却下的扁平段中心熔盐温度比自然冷却下 TMSR-FV1 扁平段中心熔盐温度降低了 29.20% , 冻堵效果优于 TMSR-FV1。

(2) 在研究范围内, 影响 TMSR-FV2 冻堵效果因素程度大小依次为翅片高度、翅片间距和翅片厚度。

(3) 1800 s 内, TMSR-FV2 的冻堵效果优于冷却风流量 $176 \text{ m}^3/\text{h}$ 吹扫下的 TMSR-FV1 的冻堵效果, 实现了冷冻阀的非能动常闭的功能。

通过上述研究, 设计了一种非能动常闭翅片

式冷冻阀, 为冷冻阀的结构优化及 TMSR 非能动冷冻阀的工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] ROBERTSON RC. MSRE design and operations report part I: description of reactor design: ORNL-TM-728[R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1965.
- [2] 李启明, 唐忠锋, 傅远, 等. 熔盐堆用冷冻阀的热-结构特性研究[J]. 核技术, 2013, 36(04): 256-264.
- [3] LI Qiming, TANG Zhongfeng, FU Yuan, et al. Preliminary study of the use of freeze-valves for a passive shutdown system in molten salt reactors[A]. Rockville, MD. Proceedings of the Twelfth NRC/ASME Symposium on Valves, Pumps, and Inservice Testing. USA: ASME, 2014:325-341.
- [4] PARTH Swaroop. Design of a freeze plug for the molten salt fast reactor(MSFR)[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2016.
- [5] FREDERIQUE van Tuyll. A new design for the safety plug in a molten salt fast reactor[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2016.
- [6] ANDRÉ Makkinje. Design of a freeze plug grate[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2017.
- [7] DEURVORST F R. Design of cooling fins on the freeze plug[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2017.
- [8] BENES O, KONINGS R J M. Thermodynamic properties and phase diagrams of fluoride salts for nuclear applications[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2009, 130(1): 22-29.
- [9] ANSYS Inc.. Workbench User's Guide for revision 14.5[Z]. 2012.
- [10] 杨小勇. 方差分析法浅析——单因素的方差分析[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(1): 41-43.

(责任编辑: 马 蓉)