

低温低压试验回路辐照钼铽同位素安全研究

张毅, 徐西安, 张培升

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要: 钼铽同位素是一种重要的医用同位素, 铀-235 在低温低压堆内试验回路中进行辐照是钼铽同位素生产的一种重要方法。为了确保钼铽同位素辐照过程不会危及试验回路、研究堆的安全, 建立了回路的 RELAP5 模型, 并对钼铽同位素生产进行安全分析研究。分析结果表明, 即使辐照过程中发生了典型的设计基准事故, 也不会对靶件、试验回路及反应堆构成威胁, 辐照过程符合安全要求。

关键词: 试验回路; 堆内辐照; 事故分析; 钼铽同位素

中图分类号: TL364.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2021)S0-0092-06

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0801

Safety Research on Mo-Tc Isotope Irradiation with Low Temperature and Low Pressure Test Loop

ZHANG Yi, XU Xi'an, ZHANG Peisheng

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Mo-Tc isotope is an important medical isotope. The irradiation of ^{235}U in the low-temperature and low-pressure in-core test loop is an important method for Mo-Tc isotope production. In order to ensure the test loop and reactor are safe in the irradiation process of Mo-Tc isotope, the RELAP5 model of the loop was developed and the safety analysis was performed on the production of Mo-Tc isotope with the low-temperature and low-pressure test loop. The calculated results show that the Mo-Tc isotope irradiation process will not endanger the safety of the test loop and the research reactor, and the safety requirements are met during a typical design basis accident.

Key words: test loop; in-reactor irradiation; accident analysis; Mo-Tc isotope

钼铽同位素是一种重要的医用同位素, 由于钼铽同位素半衰期短的特点, 在核医学诊断成像中被广泛应用, 据统计全球约 85% 的医学诊断成像技术采用了钼铽同位素^[1]。半衰期短的特点也使得钼铽同位素不耐储存, 需求具有

时效性和连续性, 因此钼铽同位素的需求在近年来一直在增加。铀-235 在低温低压堆内试验回路中进行辐照是钼铽同位素生产的一种重要方法^[2]。为确保钼铽同位素辐照过程不会发生危及试验回路、研究堆的安全, 造成不可接受的

后果,根据法规需对辐照方案进行安全分析。本文建立回路、辐照装置和同位素靶件的 RELAP5 模型,选择一些典型的事故,对钼铀同位素生产进行安全分析研究,以此确定生产方案符合安全要求。即使辐照过程中发生了典型的设计基准事故,也不会对靶件、试验回路及反应堆构成威胁,满足相关法规的要求^[3-4]。

1 低温低压试验回路及同位素辐照方案简介

1.1 低温低压试验回路

低温低压试验回路由堆内辐照装置、一回路、二回路、安注系统、设备冷却系统、加压系统和破损探测等系统组成。辐照过程中产生的热量通过一回路和二回路间的换热器带出,设备冷却系统可为各设备提供冷却,保证各设备的正常工作环境。加压系统可确保回路运行在需要的压力参数上,安注系统在回路发生失水事故时注入冷却水,保证辐照靶件的冷却,缓解事故后果^[5]。低温低压试验回路可模拟研究堆、试验堆的运行工况,进行研究堆核燃料、核材料堆内辐照及同位素生产^[6]。

1.2 钼铀同位素辐照方案

在进行辐照时需将钼铀靶件放入回路的辐照装置中,辐照装置在进行堆内辐照时处于研究堆的堆芯内,辐照装置和试验回路的一回路为辐照靶件提供了一个合适的辐照条件^[7]。钼铀靶件为环形结构,辐照装置周向布置 5 根辐照管,每根辐照管内轴向叠放 6 个靶件。辐照管内径和靶件外径形成冷却剂外通道,靶件内径和拉杆外径形成冷却剂内通道。辐照开始后,一、二回路内的冷却剂在泵的驱动下通过热交换器将辐照产热带出,保证靶件冷却。辐照主要热工参数列于表 1。

表 1 主要热工参数

Table 1 Main thermal parameter

参数	数值
冷却压力,MPa	0.6
入口温度,K	330.65
总功率,kW	356(单根辐照管功率 71.2)
平均线功率,kW/m	69.8
轴向功率因子	1.3
总流量,m ³ /h	9.6(单根辐照管流量 1.92)

2 事故分析安全限值及初始条件

根据以往的经验以及分析判断,选择了失流事故和失水事故这两类典型事故进行研究,以此评价低温低压试验回路钼铀同位素辐照的安全性能。其中失流事故选择了发生概率较高的堵流事故及丧失外电源导致主泵停止转动的失流事故进行分析,失水事故则分析了由于仪表管断裂导致的冷端和热端小破口事故。

采用以下的验收准则^[8]:1) 辐照靶件表面最高温度 $<873.15\text{ K}$;2) 回路系统压力 $\leq 1.76\text{ MPa}$ 。

3 钼铀同位素辐照事故分析

对试验回路(包括辐照装置、一回路、二回路、安注系统以及各种重要设备等)及钼铀靶件建立计算模型,使用 RELAP5 程序对回路辐照进行分析研究。

3.1 失流事故分析

辐照装置内的辐照靶件是通过主泵输送冷却剂实现强迫循环来冷却的。当试验回路运行时,主泵因动力电源故障或机械故障而被迫停止运行,或回路中由于意外的机械故障使流道发生堵塞,使冷却剂流量减少,从而降低堆芯的传热能力,即失流事故^[9]。

1) 辐照装置冷却剂流道堵塞

试验回路中有可能因为机械故障而导致部分流道堵塞。堵塞是由于辐照靶件变形等原因造成的。

对于冷却剂流道堵塞,设计中用回路低流量停堆信号来保护系统的安全,即当辐照装置出口冷却剂流量低于 $14.08\text{ m}^3/\text{h}$ 时反应堆将自动停堆。停堆后此类事故一般可得到缓解,事故分析中假设辐照装置冷却剂流道发生 40% 的流量丧失。

主要计算结果列于表 2。在反应堆额定功率水平,辐照装置内流量降至额定流量的 60% 条件下,靶件表面最高温度为 431.15 K ,考验靶件是安全的。实际上,冷却回路的运行参数(如系统压力、流量及冷却剂温度)与反应堆控制保护系统存在联锁关系,在流量降低至额定流量 60% 之前,流量过低信号将触发停堆。从计算结果看,该事件不会影响靶件的安全。

2) 失去外电源

在低温低压试验回路中,有两台主循环泵。

回路运行时 1 台泵正常运转, 1 台备用。其电源供应系统包括厂外动力电源和紧急情况启用的应急电源。两台主循环泵分别接到两路不同的厂外动力电源系统上。一般情况下, 当两路厂外动力电源都丧失时, 应急电源能立即投入使用, 以维持堆芯辐照装置继续被冷却。

表 2 主要计算结果

Table 2 Main calculation result

参数	数值	
	靶件内通道	靶件外通道
通道流速, m/s	1.07	1.23
冷却剂体积流量, m ³ /h	0.51	1.41
平均线功率, kW/m	27.9	41.9
峰值线功率, kW/m	36.2	54.4
峰值热通量, MW/m ²	0.703	0.780
冷却剂出口温度, K	372.15	350.15
出口冷却剂平均温度, K	348.15	336.15
包壳表面温度, K	431.15	428.15

分析中假设一回路失去厂外动力电源时, 应急电源也未启动两个主泵^[10]。

主要假设: 为保证计算结果具有足够的保守性, 可包络由于一些关键安全参数不确定性造成的计算结果的不确定性, 计算中这些关键参数选取如下^[11]: 靶件功率取 102% 的名义功率; 辐照装置出口流量取最大负偏差 2%; 辐照装置出口压力取最大负偏差 0.02 MPa。

失去外电源事故序列如表 3 所列。

图 1 示出失去外电源事故下辐照装置流速

和靶件热点表面温度。由图 1a 可知, 初期活性段流速下降得很快, 不久即进入稳定的自然循环阶段, 流速很小。由图 1b 可知, 由于辐照装置活性段冷却剂流量下降非常快, 所以靶件外表温度急剧上升, 最高温度为 437.49 K。反应堆停堆后, 辐照装置活性段的发热量迅速降低, 靶件热点表面温度也随之很快下降, 最后保持稳定。

表 3 失去外电源事故序列

Table 3 Sequence of loss of offsite power accident

事故过程	时间/s
失去厂外电源	1 800.0
低流量停堆信号	1 800.4
控制棒开始下落	1 801.9
靶件最高表面温度	1 802.3

3.2 失水事故分析

1) 冷端小破口失水事故

低温低压试验回路一回路压力边界相连着一些较细的小管($\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$), 细管主要是测量管、取样管和排气、排水管等。如果其中 1 根管由于某些原因发生断裂, 将会造成回路的小破口失水事故^[12-13]。下面的分析讨论针对 $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 小管在冷端断裂情况, 假设破口在安注水注入口与辐照装置入口之间。

主要假设: 为保证计算结果具有足够的保守性, 可包络由于一些关键安全参数不确定性造成的计算结果的不确定性, 计算中关键参数如下^[14]: 靶件功率取 102% 的名义功率; 辐照装

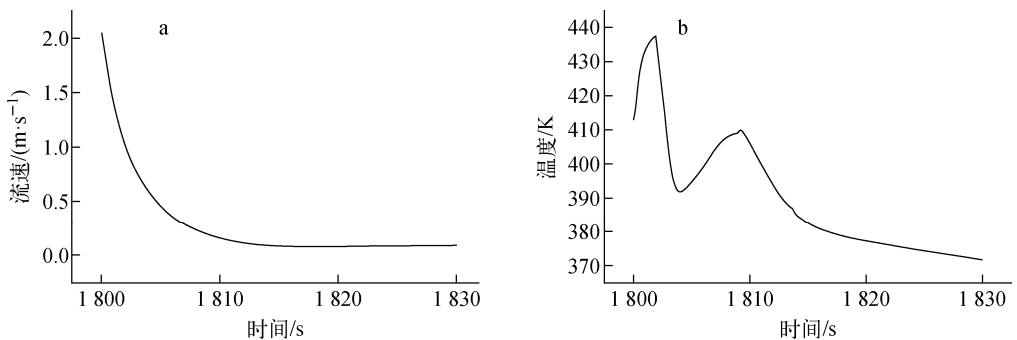


图 1 失去外电源事故下辐照装置流速和靶件热点表面温度

Fig. 1 Coolant velocity of irradiation section and hot spot surface temperature of target during loss of offsite power accident

置出口流量取最大负偏差 2%;辐照装置出口压力取最大正偏差 0.02 MPa。

冷端小破口事故序列如表 4 所列。

表 4 冷端小破口事故序列

Table 4 Sequence of cold leg small break accident

事故过程	时间/s
破口发生	1 800.0
出口压力低停堆信号	1 812.26
控制棒开始下落	1 813.76
辐照靶件外表最高温度(422.25 K)	1 811.5
低压安注水投入	2 410.8

图 2 示出冷端小破口失水事故下主回路压力、辐照装置流速、辐照装置水位和靶件热点外表温度。由图 2a 可知,小破口失水事故

开始后,一回路的冷却剂迅速向回路间喷放,回路很快减压,随后低压安注系统投入。由图 2b 可知,冷却剂流速在反应堆停堆、主循环泵停泵之前基本保持较高值,主循环泵停泵后冷却剂流速迅速下降。由图 2c 可知,水位在事故前期基本没有大的变化,在约 2 410 s,辐照装置水位发生较大变化,但由于低压安注的作用,其水位又恢复到初始状态。由图 2d 可知,在破口事故的初期靶件外表温度有一个迅速的上升过程,然后很快跌落,导致这一现象的主要原因是:由于破口发生在辐照装置的入口处(冷端),活性段中冷却剂将由正向流动变为反向流动,在流量反过程中必然有一零流量时刻,该时刻即第 1 个温度峰时刻。在整个过程中,靶件外表最高温度为 422.25 K,未超过安全限值。

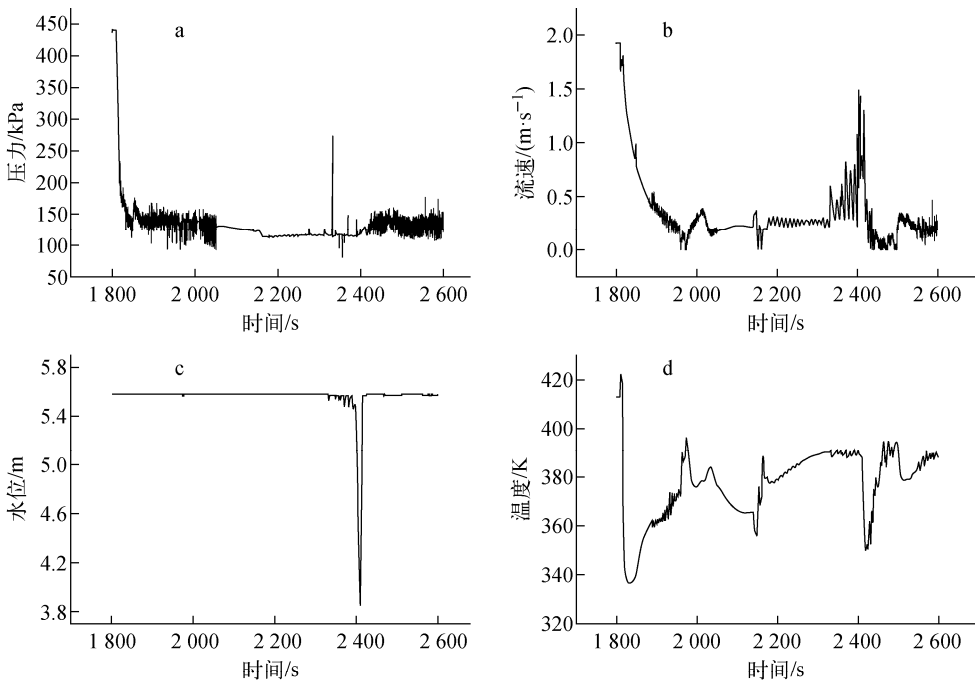


图 2 冷端小破口失水事故下主回路压力、辐照装置流速、辐照装置水位和靶件热点外表温度

Fig. 2 Pressure variation in primary circuit, coolant velocity of irradiation section, water level

in irradiation rig and hot spot surface temperature during cold leg small break loss-of-coolant accident

2) 热端小破口失水事故

辐照装置的出口端有一些小支管,假设 1 根 $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 细管在热端发生断裂,其事故进程和结果与冷端破口事故均有所差异^[15-16]。

主要假设:为保证计算结果具有足够的保

守性,可包络由于一些关键安全参数不确定性造成的计算结果的不确定性,计算中关键参数如下:靶件功率取 102% 的名义功率;辐照装置出口流量取最大负偏差 2%;辐照装置出口压力取最大正偏差 0.02 MPa。

热端小破口事故序列如表 5 所列。

表 5 热端小破口事故序列

Table 5 Sequence of hot leg small break accident

事故过程	时间/s
破口发生	1 800.0
出口压力低停堆信号	1 813.12
控制棒开始下落	1 814.62
靶件外表最高温度(415.44 K)	1 817.16
低压安注水投入	1 829.12

图 3 为热端小破口失水事故辐照装置水位、辐照装置流速和靶件热点表面温度。从

图 3a 看出,事故中辐照装置水位始终保持在初始状态。没有辐照装置中活性段裸露现象。从图 3b 可看出,事故在初始阶段流量不减小反而稍有增加,这是因为破口发生在热端,主循环泵当时还未停泵而且还有一回路与外部环境的压差,从而导致了上述现象,另外由于热端破口,辐照装置出口流量一直是正向的。从图 3c 可看出,在事故初期靶件外表温度峰值较冷端破口的情况要低,这是由于冷却剂流量未下降到零,而且由于在整个事故过程中辐照装置活性段未出现裸露现象,所以靶件外表温度的第 2 个峰值也没有出现。

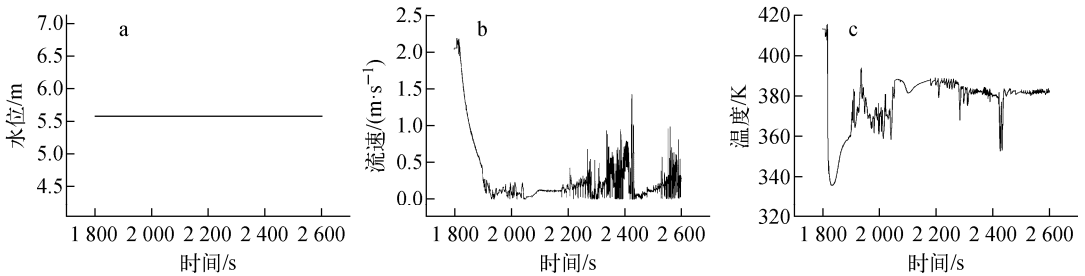


图 3 热端小破口失水事故下辐照装置水位、辐照装置流速和靶件热点表面温度
Fig. 3 Water level in irradiation rig, coolant velocity of irradiation section and hot spot surface temperature during hot leg small break loss-of-coolant accident

4 结论

对低温低压试验回路的分析包括了失流事故和失水事故,分析结果表明:

- 1) 在低温低压回路辐照钼铱同位素时如果发生上述事故,系统参数能满足验收准则,而且事故出现时,热工参数还有较大的安全裕度;
- 2) 低温低压试验回路钼铱同位素生产辐照方案的各种参数设计得当,可满足安全要求。

参考文献:

[1] IAEA. NF-T-5. 4 Non-HEU production technologies for molybdenum-99 and technetium-99m [S]. US: IAEA, 2013.

[2] 尹志民,韩耀礼,张品源,等. ^{99}Mo - $^{99}\text{Tc}^m$ 同位素辐照靶件研制[J]. 原子能科学技术, 1986, 20(2):129-135.

YIN Zhimin, HAN Yaoli, ZHANG Pinyuan, et al. The preparation of irradiation of ^{99}Mo - $^{99}\text{Tc}^m$ isotope production[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1986, 20(2): 129-135(in Chi-

nese).

[3] 唐学人,吕光全,林璋,等. 5 MW 低功率反应堆[J]. 核动力工程,1992,13(4):2-6.

TANG Xueren, LV Guangquan, LIN Zhang, et al. 5 MW low power reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 1992, 13(4): 2-6(in Chinese).

[4] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000:80-140.

[5] 张世顺. 堆内试验回路事故安全分析[J]. 核动力工程,1994,15(5):436-439.

ZHANG Shishun. Accident safety analyses for in-pile test loops[J]. Nuclear Power Engineering, 1994, 15(5): 436-439(in Chinese).

[6] 张述诚. 秦山核电站堆内考验 PWR 燃料棒束安全分析[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 1984.

[7] 王红兵,金华晋. 高温高压及低温低压辐照组件的物理设计[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 1992.

[8] 张世顺. 低温低压试验回路热工水力安全分析[R]. 北京:中国原子能科学研究院,1992.

- [9] 张森如. 金山核热电站一回路失流事故分析[J]. 核动力工程, 1986, 7(2): 21-28.
ZHANG Senru. Loss of primary loop flow accident analysis for Jinshan[J]. Nuclear Power Engineering, 1986, 7(2): 21-28(in Chinese).
- [10] 张沿发, 张维中. 秦山核电厂一回路惰走流量测量[J]. 核动力工程, 1993, 14(5): 394-396.
ZHANG Yanfa, ZHANG Weizhong. Measurement of the coastdown flowrate for QinShan Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14(5): 394-396(in Chinese).
- [11] 张毅, 季松涛. 秦山二期核电站环形燃料堆芯卡轴及弹棒事故分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11): 314-317.
ZHANG Yi, JI Songtao. Analysis of locked-rotor accident and rod ejection accident for Qinshan Phase II Nuclear Power Plant with annular fuel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 314-317(in Chinese).
- [12] 张毅, 季松涛, 张应超. CARR 高温高压试验回路小破口失水事故分析[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(增刊): 314-317.
ZHANG Yi, JI Songtao, ZHANG Yingchao. Analysis on CARR high-temperature and high-pressure loop SBLOCA[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(Suppl.): 314-317(in Chinese).
- [13] 汪景新, 赵华, 王开明. 4×4 燃料组件考验装置小破口失水事故分析[J]. 核动力工程, 1999, 20(4): 299-332.
WANG Jingxin, ZHAO Hua, WANG Kaiming. Supplementary analysis of small break loss of coolant accident on 4×4 fuel-assembly tests[J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(4): 299-332(in Chinese).
- [14] 张毅, 季松涛. 秦山二期核电站采用环形燃料 LBLOCA 研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增刊): 50-53.
ZHANG Yi, JI Songtao. Study on LBLOCA of Qinshan Phase II Nuclear Power Plant project loaded with annular fuel[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(Suppl.): 50-53(in Chinese).
- [15] 博金海, 王飞. 小破口失水事故研究综述[J]. 核科学与工程, 1998, 18(2): 172-179.
BO Jinhai, WANG Fei. Review on research of small break loss of coolant accident[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1998, 18(2): 172-179(in Chinese).
- [16] 余红星, 廖业宏. 中小破口失水事故现实估算分析[J]. 核动力工程, 2002, 23(5): 37-39.
YU Hongxing, LIAO Yehong. Realistic analysis of intermediate and small LOCA[J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 23(5): 37-39(in Chinese).