

钼铼合金对掉落临界安全的影响

胡彬和, 李 龙, 吴晓春, 孙 征, 柯国土

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 发射阶段的掉落临界安全是空间快堆设计中的重点和难点。目前空间快堆保证掉落临界安全的常用手段之一是采用谱移材料兼作结构材料。钼铼(Mo-Re)合金因其优异的谱移性能和高性能常用作空间快堆的谱移材料和结构材料。本文以美国 Prometheus 基本型堆芯方案为研究对象, 采用 MCNP 程序计算并分析了不同 Re 含量的 Mo-Re 合金对掉落临界安全的影响及其机理。计算结果及分析表明: Re 含量不同, 反应堆掉落工况对临界安全影响也不同; 能谱软化和 Re 含量增加引起的 Re 共振吸收增强是最严重掉落工况转变的主要因素。

关键词: 空间快堆; 钼铼合金; 谱移吸收; 掉落临界安全

中图分类号: TL392

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)10-1813-04

doi: 10.7538/yzk.2016.50.10.1813

Effect of Mo-Re Alloy on Drop Critical Safety

HU Bin-he, LI Long, WU Xiao-chun, SUN Zheng, KE Guo-tu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The drop critical safety at the launch phase is the key point and difficult point in the design of space fast reactor. One of the general methods to ensure drop critical safety is using spectral shift absorption material as the structure material. The Mo-Re alloy is usually used as spectral shift absorption material and the structure material with its excellent spectral shift performance and high temperature performance. The study was focused on Prometheus basic core scheme, using MCNP code, calculated and analyzed the effect of Mo-Re alloy on drop critical safety and its mechanism in the different drop conditions. The results suggest that the drop condition has different effects on the critical safety with the different contents of Re. The strengthened resonance absorption caused by softenspectrum and the increase of Re content are the main factors of the change of the worst drop condition.

Key words: space fast reactor; Mo-Re alloy; spectral shift absorption; drop critical safety

当空间快堆在发射阶段发生掉落事故时, 反应堆返回地面存在 3 种掉落工况: 堆芯为干

沙包裹、堆芯进水并为湿沙包裹、堆芯进水并为水包裹。为方便说明, 将上述 3 种掉落工况

依次简称为干沙包裹工况、湿沙包裹工况和水包裹工况。由于这 3 种掉落工况增强了反射效果并使堆芯能谱软化,使得反应堆存在很大的临界安全风险。空间快堆设计要求在发射阶段发生掉落事故时,堆芯的有效增殖因数 k_{eff} 不大于 0.98。

钼铼(Mo-Re)合金与空间快堆常用燃料和冷却剂均有良好的相容性。在 Mo 中添加 5%~50% 的 Re 元素,可增强韧性、抗氧脆性、蠕变强度,提高焊接性能,降低韧脆转变温度,非常适合作为空间快堆的高温结构材料^[1]。而作为一种谱移材料,Mo-Re 合金尤其是其中的 Re 元素,其快中子吸收截面远小于热中子吸收截面。因此,为保证掉落临界安全,目前空间快堆普遍采用 Mo-Re 合金谱移材料兼作结构材料,如 S4 空间快堆采用 Mo-14%Re^[2-3];ScORe 空间快堆采用 Mo-14%Re^[4-5];Prometheus 空间快堆采用 Mo-47.5%Re^[6];美国 Idaho 国家工程实验室的星表气冷反应堆^[7]和日本电力工业中央研究院的 RAPID-L 反应堆也采用了 Mo-Re 合金^[8]等。本文采用 MCNP 程序计算并分析不同 Re 含量的 Mo-Re 合金对掉落临界安全的影响及其机理。

1 研究对象和计算程序

为支持各种外层空间和星表任务提供 100 kW 以上的电力,2003 年美国启动了 Prometheus 计划。针对上述需求,承研单位给出了 6 种初选方案。其中基本型堆芯方案为氦氘混合气体冷却的快堆,采用 UO₂ 燃料,设计热功率为 1 MW,采用闭式布雷顿热电转换系统,热效率约为 20%,设计寿命为 15 a。为保证掉落临界安全,该方案在堆芯中央设置了 1 根粗大的安全棒并采用了大量 Mo-47.5%Re 结构支撑体兼作谱移吸收材料。全堆共装载 288 根 90% 富集度的 UO₂ 燃料棒,采用铍作为径向移动反射层^[6]。本文以 Prometheus 基本型堆芯方案为研究对象,采用 MCNP 程序计算并分析了不同 Re 含量的 Mo-Re 合金对掉落临界安全的影响及其机理。图 1 示出根据 Prometheus 基本型堆芯方案建立的 MCNP 程序计算模型,计算条件均为 1 000 代,每代 5 000 个粒子,舍去前 50 代。

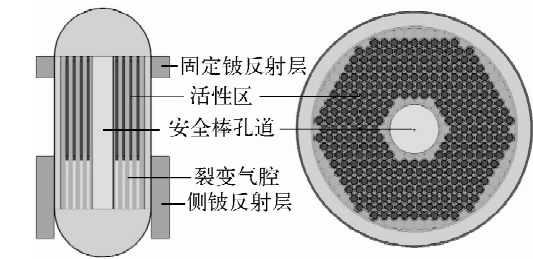


图 1 堆芯的纵截面、横截面示意图
Fig.1 Longitudinal section and cross section diagrams of core

2 Re 含量对掉落临界安全的影响

为比较不同 Re 含量对掉落临界安全的影响,以 Prometheus 基本型堆芯方案 (Mo-47.5%Re) 为基准,保持其他参数不变,只改变 Mo-Re 合金结构材料中的 Re 含量,在侧铍反射层完整的情况下,采用 MCNP 程序计算了不同 Re 含量下的冷态清洁堆芯以及 3 种掉落工况下的 k_{eff} ,结果列于表 1。

表 1 Re 含量对掉落临界安全的影响
Table 1 Effect of Re content on drop critical safety

Re 含量 (铍完整)	冷态清洁 堆芯 k_{eff}	掉落环境		掉落 k_{eff}
		堆外	堆内	
纯钼	1.190 65	干沙	氦氘	1.145 20
		湿沙	水	1.203 07
		水	水	1.202 74
Mo-7%Re	1.155 95	干沙	氦氘	1.095 41
		湿沙	水	1.117 73
		水	水	1.117 51
Mo-14%Re	1.132 78	干沙	氦氘	1.061 52
		湿沙	水	1.061 29
		水	水	1.061 27
Mo-30%Re	1.087 87	干沙	氦氘	1.009 75
		湿沙	水	0.981 79
		水	水	0.981 35
Mo-47.5%Re	1.046 54	干沙	氦氘	0.968 17
		湿沙	水	0.924 00
		水	水	0.923 79

由表 1 可见,Prometheus 堆芯方案的最严重掉落工况是纯钼情况,掉落前冷态清洁堆芯

的 k_{eff} 为 1.190 65,掉落在湿沙时的 k_{eff} 达到 1.203 07, k_{eff} 不仅未减小,反而较掉落前还大,该方案是最不安全的;而引入金属 Re 后,由于 Re 的热中子截面较大,在反应堆掉落到具有慢化剂材料中,Re 的谱移特性使 k_{eff} 降低;最安全的是 Mo-47.5%Re 情况,掉落前的 k_{eff} 为 1.046 54,掉落即使在最严重的干沙时的 k_{eff} 也只有 0.968 17, k_{eff} 小于设计要求的 0.98,表明 Prometheus 基本型堆芯方案 Mo-47.5%Re 配比完全满足掉落临界安全且有一定的安全裕度。

为方便说明,首先引入谱移反应性 $\Delta\rho$:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{accident}} - \rho_{\text{excess}}$$

其中: ρ_{accident} 为某种掉落工况下的事故反应性; ρ_{excess} 为冷态清洁堆芯时的后备反应性,堆内可有谱移吸收材料。 $\Delta\rho$ 与考察的事故工况有关,同一反应堆在不同的事故工况下有不同的 $\Delta\rho$ 。某种掉落工况的 $\Delta\rho$ 反映了该工况的安全程度, $\Delta\rho$ 越小,该工况越安全,材料的谱移吸收能力也越大。

根据表 1 的数据可得 3 种掉落工况下, $\Delta\rho$ 与 Re 含量的关系如图 2 所示。

由图 2 可见,湿沙包裹工况和水包裹工况的曲线一致。这是由于侧铍反射层具有很好的反射及慢化作用,堆外湿沙包裹和水包裹的区别不大。此外,当 Re 含量低于 14% 时,最严重掉落工况为湿沙包裹和水包裹,在此两种工况下随 Re 含量的增加,Mo-Re 合金的谱移吸收能力显著增加;当 Re 含量高于 14% 时,最严重掉落工况为干沙包裹,在此工况下 Mo-Re 合金的谱移吸收能力已接近饱和,进一步增加 Re 含量对提高谱移吸收能力作用有限。

3 Re 在掉落临界安全中的作用机理

由表 1 及图 2 可知,当 Re 含量为 7% 时,最严重掉落工况是湿沙包裹和水包裹;当 Re 含量为 14% 时,3 种掉落工况的严重程度几乎一致;当 Re 含量为 47.5% 时,最严重掉落工况是干沙包裹。这表明不同的 Re 含量对应的最严重掉落工况不同。为分析这一现象,取第 1 能群为 0~10⁻⁹ MeV,将 0~20 MeV 按等勒间隔划分为 200 群,采用 MCNP 程序计算了侧铍反射层完整时上述 3 种 Re 含量在 3 种掉落工况下的活性区能谱,如图 3 所示。

由图 3 可见,干沙包裹工况能谱更硬,湿沙包裹和水包裹工况能谱更软。Re 元素的热中子吸收截面相对更大,因而活性区能谱更软时 Re 元素的寄生吸收更大。当堆芯处于湿沙包裹和水包裹工况时,一方面活性区能谱变软使得堆芯 k_{eff} 增大,另一方面活性区能谱变软和 Re 含量增大使得 Re 的寄生吸收增大(导致 k_{eff} 减小)。这两种相互竞争的因素决定湿沙包裹和水包裹工况能否成为最严重掉落工况。为证明该解释的合理性,采用 MCNP 程序计算 3 种 Re 含量情况下的 Re 相对于²³⁵U 的多群中子

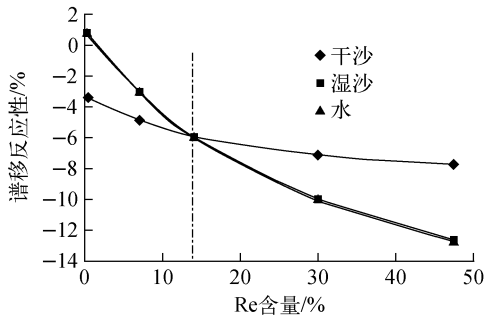


图 2 谱移反应性与 Re 含量的关系
Fig. 2 Relationship between spectral shift reactivity and Re content

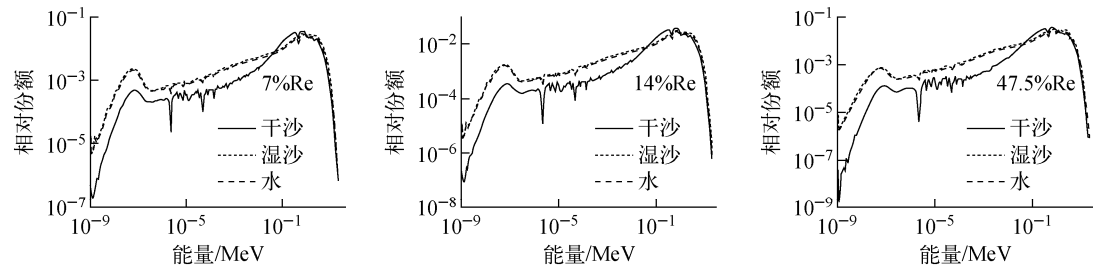


图 3 铍完整 3 种工况的活性区能谱
Fig. 3 Active zone spectra of three conditions under intact Be

吸收情况。由于湿沙包裹工况和水包裹工况这两者的掉落临界安全差别很小,因此只比较湿沙包裹工况和干沙包裹工况下 Re 和 ^{235}U 的多群中子吸收情况(即湿沙包裹工况下的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值以及干沙包裹工况下的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值),能群结构仍采用能谱计算的 200 群结构。这两种掉落工况下的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值之比如图 4 所示。

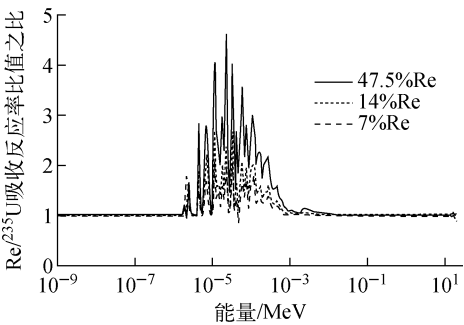


图 4 湿沙-干沙 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值之比
Fig. 4 Ratio of ratio for $\text{Re}/^{235}\text{U}$ absorption react rate between dry sand and wet sand

由图 4 可见,在 1 eV~1 keV 能区,湿沙包裹工况的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值高于干沙包裹工况的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值,其余能区两者的 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值则基本相等。而 1 eV~1 keV 这个能区恰好处于 Re 的共振吸收能区。当 Re 含量为 7%、14%、47.5%时,湿沙-干沙 $\text{Re}/^{235}\text{U}$ 吸收反应率比值之比的平均值依次约为 1.5、1.75、2.5。当 Re 含量为 14%时,3 种掉落工况的严重程度几乎一致,这表明“能谱软化”引起的 k_{eff} 增大与“能谱软化和 Re 含量增加”引起的 Re 共振吸收增强达到了平衡状态。当 Re 含量低于 14%时,“能谱软化”引起的 k_{eff} 增大占主导作用,湿沙包裹工况成为最严重工况;当 Re 含量高于 14%时,“能谱软化和 Re 含量增加”引起的 Re 共振吸收增强占主导作用,干沙包裹工况成为最严重工况。

4 结论

本文以美国 Prometheus 基本型堆芯方案为研究对象,分析了不同 Re 含量的 Mo-Re 合金对掉落临界安全的影响及其机理。计算结果及分析表明:Re 含量不同,反应堆掉落工况对临界安全影响也不同;能谱软化和 Re 含量增加引起的 Re 共振吸收增强是最严重掉落工况转变的主要因素。

参考文献:

[1] EL-GENK M S, TOURNIER J M. A review of refractory metal alloys and mechanically alloyed-oxide dispersion strengthened steels for space nuclear power systems[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 340: 93-112.

[2] KING J C, EL-GENK M S. Submersion-subcritical safe SPACe (S4) reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236 (17): 1 759-1 777.

[3] KING J C, ELGENK M S. Solid-core, gas-cooled reactor for space and surface power[C]// AIP Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 2006: 298-307.

[4] AIAA. Startup and load-following transients of a thermoelectric space reactor system with no single point failure[C] // 3rd International Energy Conversion Engineering Conference (AIAA). [S. l.]: [s. n.], 2009: 459-465.

[5] HATTON S A, EIGENK M S. How small can fast-spectrum space reactors get? [C]// AIP Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 2006: 426-436.

[6] ASHCROFT J M. The Space Technology and International Forum (STAIF) 2006 [C]. [S. l.]: [s. n.], 2006.

[7] JAHSHAN S N, BORKOWSKI J A. A gas-cooled cermet reactor system for planetary base power[J]. Symposium Space Nuclear Power & Propulsion, 2008, 271(2): 641-647.

[8] KAMBE M, TSUNODA H. RAPID-L operator-free fast reactor concept without any control rods [J]. Nuclear Technology, 2003, 143(6): 11-21.