

核反应堆用钼铼合金辐照损伤行为研究进展

常恬, 林小辉, 张伟伟, 辛甜, 薛建嵘, 梁静, 高选乔, 张文

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 空间核反应堆结构材料需经受高温、高通量中子辐照等极端服役环境的考验, 其性能极大程度地影响着反应堆运行的安全性与经济性。本文聚焦于空间核反应堆用Mo-Re合金的辐照损伤行为, 系统综述了辐照损伤效应、辐照引起的微观结构演变和服役性能退化, 为Mo-Re合金作为反应堆材料的组织结构优化、性能预测和服役寿命评价提供理论基础。

关键词: 辐照损伤; Mo-Re合金; 空间核反应堆; 微观结构演化; 力学性能

中图分类号: TG146.4⁺12

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)05-1374-11

1 引言

近年来,随着星表能源^[1]、陆基核电源^[2]以及深空和深海探测^[3]等领域应用需求的不断提升,对新型空间核反应堆的性能提出了更为严苛的要求,包括结构设计紧凑、安全性高及寿命长等。核燃料包壳管、堆芯构件及堆外压力容器等结构材料作为核反应堆的重要部件,需经受高温、高通量中子辐照等极端服役条件的考验,其性能直接关系到核能系统的安全性与可靠性。Mo-Re合金因其高强高韧、抗疲劳、抗蠕变性、可焊性、与核燃料及碱金属冷却剂良好的相容性等优异的综合性能,被认为是反应堆燃料包壳、聚变堆偏滤器和其他面向等离子体的热核元件等空间核反应堆关键结构部件的首选材料^[4-11]。辐照环境下结构材料的硬化、脆化、肿胀、腐蚀、疲劳及蠕变等性能退化是威胁反应堆安全的主要因素之一^[12]。因此,结构材料的辐照损伤行为研究对评估反应堆系统的安全性具有重要价值^[13-14]。

从20世纪90年代起,美国、俄罗斯、日本和丹麦等国家已经对空间核反应堆用Mo-Re合金的中子辐照损伤行为进行了较为系统的研究,重点对辐照后合金力学性能退化的关键因素、微观机制及工程应用进行了探究。如丹麦国家实验室Singh等^[15]对Mo-5Re和TZM合金进行了辐照前后微观组织及力学性能研究,发现低剂量的辐照也会引起严重的辐照脆化(文中Re含量均为质量分数)。美国太平洋西北实验室的Garner等^[16]研究了Nb-1Zr和Mo-41Re高中子暴露下(58~111 dpa),辐照诱导肿胀对热处理状态的响应性。橡树岭国家实验室Busby等^[17]研究了Mo-41Re和Mo-47.5Re在空间堆相关

温度的辐照损伤,高温辐照脆化的原因归结于嬗变和辐照诱导偏析对相稳定性的影响。俄罗斯中央结构材料研究所Fabritsiev等^[18]发现中子辐照后,纯Mo及Mo-0.5Re~Mo-47Re合金(Re含量为0.5wt%、1wt%、3wt%、5wt%、9wt%、13wt%、20wt%、30wt%和47wt%)的物理和力学性能均发生了一定程度的退化。日本原子能研究所Nemoto^[19]和东北大学Hasegawa^[20]等研究了不同铼含量的Mo-Re合金显微组织演化与硬化、脆化的直接关系,提出了辐照条件下适用的最佳铼含量和热处理工艺。我国对空间核反应堆用Mo-Re合金材料的制备及应用研究起步较晚,相应地,关于其辐照性能的研究鲜有报道。近年来,国内相关团队开始对Mo-Re合金材料的辐照损伤行为展开研究,如中国核动力研究设计院的邱玺与厦门大学冉广团队^[21]利用原位TEM技术研究Mo-Re合金离子辐照下的位错环动态演化过程。

材料辐照性能的提升始终是推动核技术发展的关键因素^[22]。本文聚焦于国内外空间核反应堆用Mo-Re合金的辐照损伤行为,系统阐述了材料的辐照损伤与效应、微观结构演变、辐照损伤与服役性能的变化,以期Mo-Re合金作为反应堆材料的组织结构优化、性能预测和服役寿命评价提供理论基础。

2 材料的辐照损伤与效应

材料辐照效应的本质是入射粒子与晶格原子相互作用引发的微观结构及性能演变,这一过程涵盖粒子碰撞、缺陷形成以及微观结构演化3个阶段^[23]。金属材料受到高能射线辐照后,原子间级联碰撞造成空位、间隙原子、位错环、气泡等缺陷的产生及扩展,导致材料的肿胀和性

收稿日期:2025-05-22

基金项目:陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-365)

作者简介:常恬,女,1994年生,硕士,工程师,西北有色金属研究院,陕西 西安 710016,电话:029-86231082, E-mail: changtian1994@126.com

能退化,包括辐照脆化、硬化、辐照肿胀、辐照蠕变等。

2.1 辐照缺陷

辐照损伤可形成多尺度晶体缺陷,按几何维数分为点缺陷(空位和间隙原子)、线缺陷(位错)、面缺陷(层错)及体缺陷(空洞)等。高能粒子辐照能够高效诱导非平衡态点缺陷的形成。点缺陷是最简单的晶体缺陷,更为复杂的辐照缺陷问题归根结底皆由点缺陷引起的。缺陷的扩散将引起晶体缺陷的湮灭或聚集,进而演化为二次缺陷。其中,空位可聚集形成位错环、层错四面体或空洞等复杂缺陷结构,而间隙原子仅能聚集形成位错环^[24]。此外,辐照缺陷还会与晶界、析出物等微观结构发生相互作用,引发进一步的微观组织演变。

2.1.1 位错与位错环

在辐照条件下,位错通常以位错环(dislocation loop)的形态存在。这一过程始于点缺陷的聚集形成层错结构,随后通过位错反应使层错消失,最终演化为稳定的位错环^[25]。

Mo-Re合金与钨、钼、铁素体钢一样,属于体心立方(bcc)晶体结构。由于体心立方晶体的层错能很高,因而导致层错消失的位错反应比在面心立方晶体中更易发生。在bcc金属中形成了 $1/2\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ Burgers矢量的两种主要的位错环,间隙原子型位错环和空位型位错环都有这两种形式。判定辐照形成的位错环的柏氏矢量,对于bcc金属的抗辐照肿胀性能十分重要^[12]。

2.1.2 空洞(或气泡)

空洞是空位沿三维方向聚集形成的聚合物。形貌一般为多面体而非球形。其内表面由表面能较低的低指数晶面构成。不同于层错四面体,空洞内部完全不含晶格原子,因此要形成相同尺寸的空洞,所需的空位数量远多于层错四面体。

实际上的辐照材料中纯粹的空洞并不存在。首先,材料中残留的气体会与贫原子区和过饱和空位相互作用,形成含气体的空洞;其次,嬗变气体的存在不可避免。因此,空洞实质上是带有气体的空洞,其与气泡的区别仅在于内部气体含量的多少。特别是在聚变中子辐照条件下,由于产生大量嬗变气体,基本上处于气泡状态^[26]。

空洞并不引起晶格畸变,不直接引起体积变化。辐照过程中,空位和间隙原子虽然成对产生,但由于位错、晶界等缺陷对它们的捕获效率存在显著差异,即位错对间隙原子的吸收能力远大于对空位的,导致间隙原子持续被缺陷阱吸收,而空位则在基体中不断积累。随着空位浓度逐渐升高,最终聚集并形成空洞结构^[27]。空洞的持续生长往往伴随着间隙原子位错环的同步扩张。这种肿胀现象本质上源于空洞内的原子向位错环的迁移,导致材料体积膨胀。辐照肿胀会引发一系列严重后果,包括紧固件断裂和套管变形等结构失效问题,对材料性能

造成显著损害。在辐照损伤研究领域,肿胀效应占据了重要地位,尤其是针对快中子堆包壳材料和聚变堆第一壁材料的研究最为深入,这些关键部件在强辐照环境下的肿胀行为直接关系到反应堆的安全运行。

2.2 辐照缺陷形成过程

碰撞过程包括入射粒子与晶格原子发生碰撞产生初级离位原子和嬗变核素,以及初级离位原子和嬗变原子在晶格中引发连续的次级碰撞所形成的碰撞级联,如图1所示^[23]。之后,局域晶格原子经历剧烈碰撞后形成低密度的类熔融态液滴结构,并伴随着冲击波前沿的离位峰。随后,离位峰弛豫,间隙原子逸出,离位峰从高温液滴冷却为过冷液滴。最终,这一过程导致贫原子区、空位和间隙原子等缺陷结构的形成。晶格中的贫原子区、空位、间隙原子和嬗变杂质与固有缺陷(如位错、相界)相互作用,驱动微观结构演变,这一过程涉及离位级联内缺陷的扩散、复合和聚集形成空位团。外围的间隙原子和空位逸出并扩散到位错、晶界、空洞、沉淀相等缺陷处,进而引发显微组织的演变。辐照缺陷通过扩散、复合与聚集,并与杂质及气体相互作用,最终促使不同尺寸缺陷团簇的形核与长大,形成多尺度的辐照缺陷分布。

3 辐照 Mo-Re 合金的微观结构演变

下一代核反应堆材料将暴露在更为极端的服役环境下,包括更高的温度、辐照通量和辐照剂量。理解极端条件下结构金属合金的微观结构受辐照的影响对认识辐照损伤和开发新的耐辐照材料具有重要意义。由于中子辐照实验复杂且周期长,重离子辐照被广泛用作研究核材料辐照性能的替代方法^[28]。此外,辐照损伤常用的理论计算、模拟方法主要有蒙特卡洛模拟(MC)、第一性原理计算以及分子动力学(MD)。离子辐照的优点包括可通过控制辐照参数,如位移剂量、剂量率和温度。此外,与核反应堆中通常经历的剂量率相比,由于采用的剂量率高($10^{-3}\sim 10^{-4}$ dpa/s),离子辐照相对快速。重离子辐照结果的解释具有挑战性,由于损伤深度浅、损伤梯度和损伤速率大。此外,离子辐照的微观结构在样品表面附近和损伤区域末端可能会显示出显著的人工效应。因此,建议在损伤区域的“中间”进行空洞、位错结构等辐照缺陷的定量表征^[29-30]。

有关Mo-Re合金在中子或带电粒子辐照后微观组织研究已有许多报道。辐照温度、剂量相对较低时仅观察到位错环,未见析出或空洞。例如Singh等^[15]研究了在DR-3反应堆中50~450℃,约0.16 dpa下辐照Mo-5Re合金后仅观察到位错环。Chakin等^[31]研究了SM-2反应堆中Mo-Re合金(Re含量为15%、20%、30%和41%),120~160℃下相对较低剂量中子辐照后,也仅观察到位错环;辐照温度及剂量较高时,有析出相形成。Mo-Re合

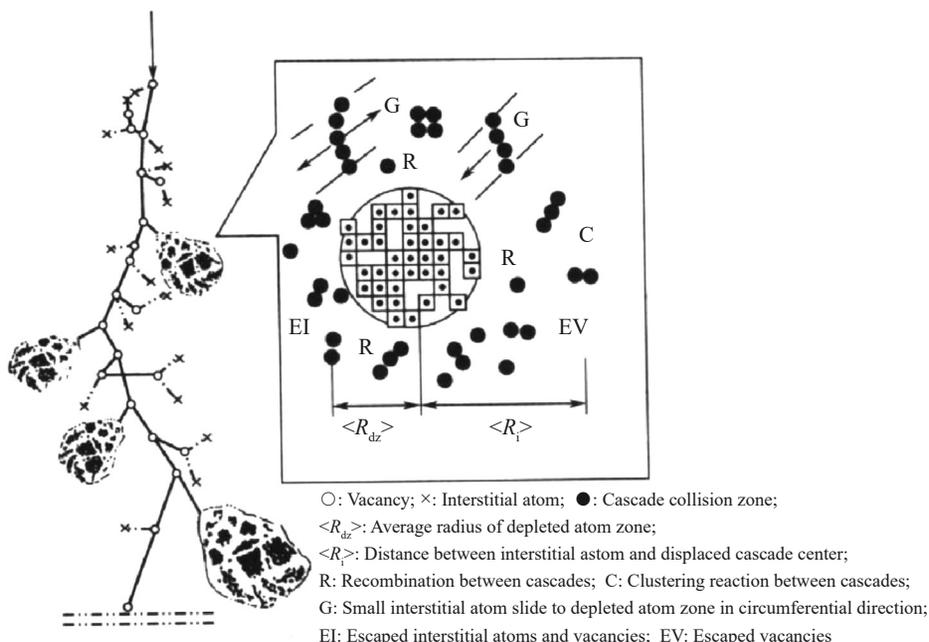


图1 入射粒子在固体中碰撞过程的示意图

Fig.1 Schematic diagram of collision process of incident particles in a solid^[23]

金中析出相的晶体结构受多种因素影响,包括铼含量、辐照温度和剂量等。表1总结了主要析出相类型及其晶体结构特征^[32], σ 相(四面体结构,CrFe结构)、 χ 相(MoRe₃, α -Mn立方结构)、hcp结构的富铼相。通常在任何Re含量下合金微观结构都具有一定的 σ 相^[33]。这些析出相具有复杂的晶体结构,且均是强脆性相,会导致材料力学性能产生严重退化。

Hasegawa等人^[20]在快中子通量试验装置(fast flux test facility,FFTF)中373~800℃,7~34 dpa剂量水平下辐照Mo-5Re均观察到了空洞,但只有在520℃以上辐照的试样中才形成了板状析出物。将Re含量从5%增加到41%,可以抑制空洞形成,但析出物变得更多且形貌复杂。在373℃下有相对较大的针状或薄板状沉淀物,在406、519和600℃下有针状或矩形沉淀物,在800℃下有大块和板状沉淀物。Nemoto等^[19]进一步拓展了Hasagawa的研究,确定了析出物的晶体结构。在406~800℃,20 dpa的FFTF中辐照Mo-Re合金,如图2为1072 K中子辐照后Mo-Re合金再结晶的显微照片,辐照

后的Mo-Re合金中都观察到空洞,均有等轴 σ 相和片状 χ 相析出。

3.1 位错环演化及其机理

由于传统中子辐照研究难以实时追踪微观结构演变,Qiu等^[21]采用原位TEM技术观察Mo-5Re合金在400 keV、Fe⁺辐照下的位错环动态演化过程,为理解bcc金属辐照损伤机制及开发抗辐照材料提供了重要参考。图3为在靠近[111]晶带轴的 $g=110$ 处拍摄的明场TEM图像,图中字母表示位错环,原位观察位错环演化包括形核、生长、湮灭过程。位错环通过3种主要途径消失:(1)与邻近环合并形成更大环或位错网络;(2)被晶界、位错线等强缺陷汇吸收;(3)在周围环的竞争吸收下收缩消失。

为了提高材料的抗辐照性能,一种常见且可行的方法是引入缺陷促进辐照诱导缺陷的湮灭^[34-38],如通过沉淀和细化晶粒增加固有平面缺陷(晶界和相界)密度^[39-40]。近年来,纳米晶材料的辐照行为得到了广泛的研究^[41-42],具有高密度晶界的纳米晶材料(~300 nm)显著抑制位错环形核,而粗晶(>10 μ m)则易形成高密度位错

表1 σ 、 χ 和Re(Mo)的晶体结构特征
Table 1 Crystal data for σ , χ and Re(Mo)^[32]

Phase	σ	χ	Re(Mo)
Structural type	D85(Cr6Fe7)	A12(α -Mn)	A3(Mg)
Space group	P42/mnm	I-43m	P63/mmc
Lattice parameter/nm	$a=0.9570$	$a=0.9584$	$a=0.2766$
Volume/nm ³	0.455 54	0.880 32	0.029 58
Molar mass/g·mol ⁻¹	468.34	9626.22	181.69
Density/g·cm ⁻³	17.08	18.16	20.41

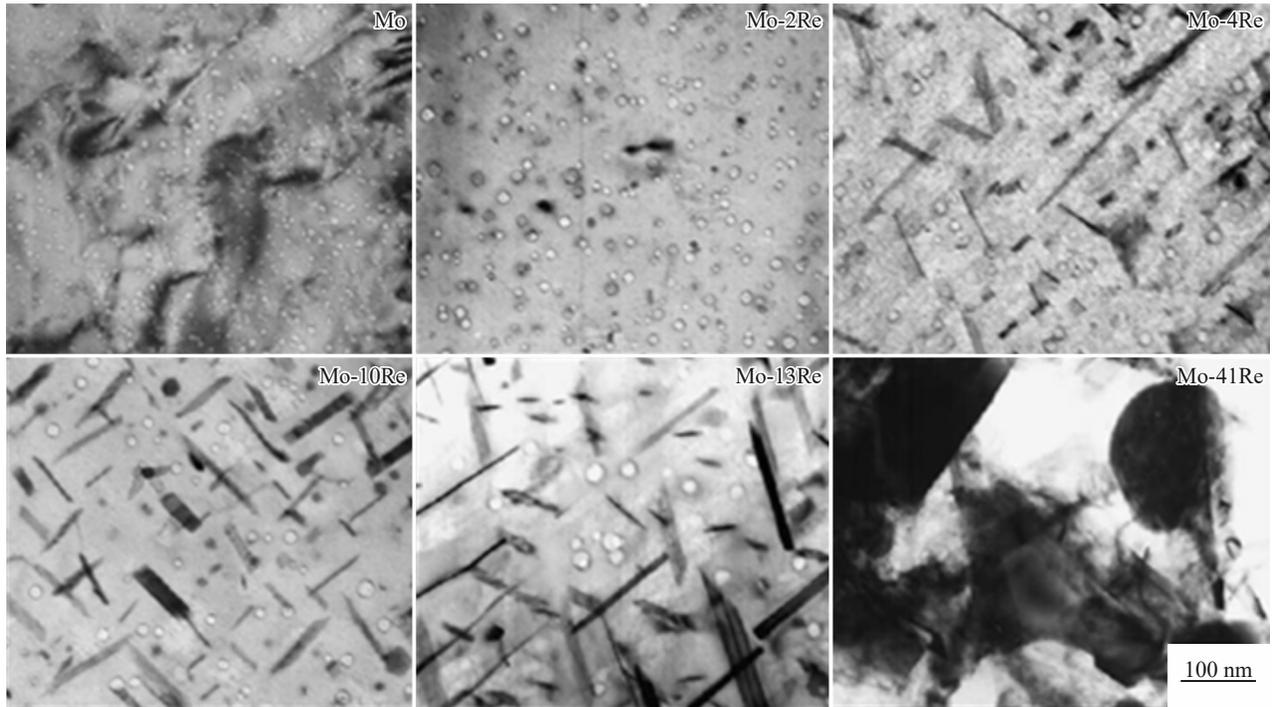


图2 再结晶 Mo-Re 合金在 1072 K、18 dpa 辐照后显微照片
Fig.2 Micrographs of recrystallized Mo-Re alloys irradiated at 1072 K up to 18 dpa^[19]

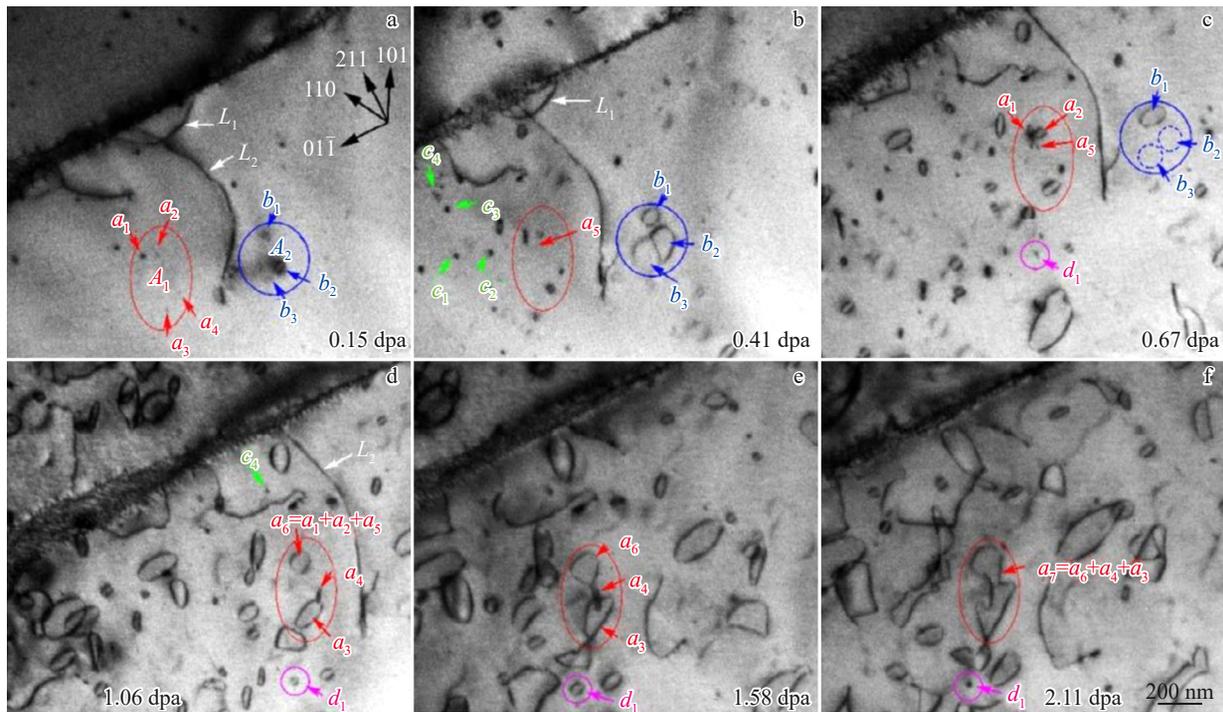


图3 700 °C 下 400 keV Fe⁺辐照 Mo-5Re 合金中位错环演化的 TEM 照片

Fig.3 Bright field TEM images of dislocation loop evolutions in the Mo-5Re alloy irradiated by 400 keV Fe⁺ at 700 °C with irradiation doses of 0.15 dpa (a), 0.41 dpa (b), 0.67 dpa (c), 1.06 dpa (d), 1.58 dpa (e), and 2.11 dpa (f)^[21]

环^[21]。此外,据报道纳米晶材料比粗晶材料表现出更突出的抗空洞膨胀和环结的能力^[41-42]。纳米晶材料虽因高密度晶界在抗辐照方面有优势,但存在晶界合并等问题,限制了实际应用^[43]。而细晶材料热稳定性更好,且能通

过热加工获得块状材料,更符合实际辐照场景;引入预先位错线,高密度位错线(如通过冷加工引入)可吸收辐照缺陷,抑制新位错环形成,从而减轻辐照硬化(如位错线密度稳定时,强度增量仅 2%~5%)^[21]。此外,高剂量和复

杂辐照环境(如高温+中子+氢氦协同)下位错环的长期演化规律有待进一步研究。

3.2 辐照诱导偏析

辐照诱导的微观结构变化还包括局部化学成分的改变,如在晶界、空洞和位错环等缺陷阱的溶质偏析(富集或耗尽)。辐照过程中,高能粒子碰撞导致原子位移和缺陷形成,引发元素非平衡扩散,在缺陷阱建立非平衡的溶质浓度。这个过程被称为辐照诱导偏析(RIS)^[44]。早在1973年,研究人员就在核反应堆材料中首次发现了由中子辐照引起的合金元素偏析现象^[45]。RIS的调控机制主要有逆Kirkendall^[46]和混合哑铃间隙两种^[47],这两种机制与原子尺寸差异密切相关。在Mo-Re合金中,Re原子因尺寸因子差异(Re原子体积比Mo小约5.56%)倾向于通过间隙机制偏析至缺陷处^[48-49]。Mo-Re合金的辐照诱导偏析主要由Re元素的缺陷驱动偏析和嬗变(Re→Os)主导,导致非平衡相析出与成分变化,进而引发硬化、脆化和密度波动。通过优化铼含量、热处理及辐照条件可改善其抗辐照性能,但高铼含量的Mo-Re合金在快中子环境中仍面临显著挑战。Wang等^[50]通过机器学习势函数和分子动力学模拟,系统研究了单相Mo-Re合金中Re含量对辐照缺陷形成与演化的影响。研究发现,Re原子引起的晶格畸变可提升抗辐照性能,但固溶体中Re纳米偏聚(Re-NS)会捕获间隙原子,促进缺陷簇聚和位错增殖,加剧辐照损伤。同时,辐照级联事件进一步强化Re偏聚,增强硬化效应。该工作揭示了原子尺度微观结构演化对理解Mo-Re合金辐照损伤机制的关键作用。

3.3 辐照下的核嬗变反应

材料受高能中子辐照还会发生核嬗变反应(n,α)和(n,p),使得原子核发生变化。反应堆结构材料设计过程中,需要重点考量核嬗变反应导致的合金元素成分变化及诱发的放射性^[51]。Mo-Re合金辐照过程中,中子与Re原子发生(n,γ)反应,生成不稳定的同位素,随后通过β衰变转化为Os,如式(1)~(2);同时Mo可能转化为Tc、Ru等元素。Greenwood和Garner^[52]第一个提出在Re上有效积累Os和其他重同位素。



核嬗变反应会产生大量的气体元素H、He与缺陷等相互作用对材料结构和性能的影响极大^[53]。一般热中子堆的结构材料中的He主要来自B元素的核嬗变反应,快堆材料中几乎所有的元素都能生成大量的H、He。Mo-Re合金中有关“氢脆”与“氦脆”对辐照损伤的影响还有待研究。强中子诱导偏析和Re的嬗变对Mo-Re合金相稳定性有重要影响。Edwards等^[54]研究了Mo-41Re合金的相变与嬗变机制。辐照导致Re的显著偏析,形成非平衡的富Re hcp相,随着辐照剂量的增加,Re逐渐嬗变

为Os。此外,还存在与温度相关的相竞争,例如在高温下出现χ相。其中低温辐照(420~645℃)下hcp相主导,颗粒密度高且尺寸随温度升高而增大,引起合金基体的完全不稳定。该相由Re、Os及少量Mo组成,呈薄片状分布,其形成速度远超平衡态χ相。高温(730℃)及高剂量(53 dpa)下出现χ相竞争。平衡态χ相与hcp相竞争Re导致hcp相溶解。Os的生成显著影响合金密度,Re(密度约20 g/cm³)偏析初期降低整体密度,而Os的累积(密度约22.6 g/cm³)导致后续密度回升。嬗变还改变相稳定性,例如Os与Re的固溶度差异可能抑制σ相形成。辐照诱导的相变及嬗变导致微观结构剧烈重构,可能引发材料性能变化,从而限制Mo-Re合金在核能结构中的应用。

4 Mo-Re合金的辐照损伤与服役性能

中子辐照环境下,Mo-Re合金微观结构和化学成分会因辐照诱导偏析与嬗变发生显著变化,进而影响材料服役性能。辐照缺陷和微观结构在应力场下与位错相互作用导致力学性能变化,在电场和晶格振动下与电子、声子相互作用导致物理性能的变化。本节从关键辐照条件的影响机制、辐照后物理和力学性能的变化方面概述Mo-Re合金的辐照损伤与服役性能的研究现状。

4.1 关键辐照条件影响机制

理解中子辐照条件与力学性能的关系对于预测反应堆材料寿命、设计更耐辐照的新材料、确保核设施安全运行至关重要。Mo-Re合金的辐照稳定性受辐照参数(中子注量、中子能谱、辐照温度)和材料本征特性(如Re含量、晶界特征、初始缺陷密度)的共同调控,以下对关键辐照条件与力学性能关系进行详细分析。

4.1.1 中子注量

中子注量是辐照试验最核心的参数之一,直接决定了辐照损伤的总量。损伤通常与注量呈正相关关系,随着中子注量增加,辐照缺陷密度上升,成为位错运动的强障碍,导致强度、硬度显著升高,塑性、韧性急剧下降^[55]。研究发现,即使在很低的辐照剂量(0.001~0.1 dpa)下,辐照脆化与硬化效应便会发生^[56]。

4.1.2 中子能谱

不同反应堆的中子能谱差异巨大,聚变堆和快堆的中子能谱比热堆产生更严重的级联损伤,导致更复杂的缺陷结构。俄罗斯埃夫莫科学研究所Fabritsiev^[18]研究发现Mo-Re合金在SM-2混合光谱堆和BOR-60快中子堆两种反应堆中的辐照脆化机制不同。BOR-60中,试样的辐照膨胀和辐射脆化与辐照诱导偏析有关,在更高的辐照温度下RIS消失,Mo-Re合金具有足够高的强度且保留了有限的延展性。SM-2中,辐照脆化归因于Os嬗变体沿晶界的偏析。

4.1.3 辐照温度

辐照温度决定了点缺陷的迁移率、热稳定性。低温辐照时($<0.3T_m$, T_m 为熔点)点缺陷迁移率低,容易形成高密度的小缺陷团簇,导致显著辐照脆化与硬化。空洞通常不明显。中温辐照时($0.3T_m\sim 0.5T_m$)空位和间隙原子开始迁移,位错环长大并形成位错网络。硬化和脆化仍然显著,并可能出现肿胀,空洞肿胀通常在特定温度窗口达到峰值;高温辐照时($>0.5T_m$)空位和间隙原子都具有高迁移率,缺陷复合率高。硬化和脆化效应减弱,但高温蠕变、晶界弱化(如氢脆、Re偏析等)问题突出。

4.1.4 Re含量

Re含量对Mo-Re合金辐照后力学性能的影响研究较多。Re的加入在显著改善纯Mo的低温脆性和高温强度的同时,也带来了辐照响应的复杂性。高铼合金辐照后力学性能的退化程度相比于低铼合金更大,其辐照损伤风险主要有氢脆、Re偏析和脆性相的产生。Re含量越高,嬗变He产量越高,氢脆风险急剧增大;高Re含量下,辐照诱发脆性相析出或在晶界偏聚,严重损伤塑性与韧性;辐照诱导溶质偏析可能导致晶界或位错处Re富集(或贫化),改变局部性能和缺陷演化。

需注意的是,性能变化并非总是随辐照参数单调变化,如肿胀的温度窗口效应。辐照条件(如温度与注量率)之间存在强烈的耦合效应,共同决定微观结构和性能演化。嬗变气体氦和氢的产生及其影响是快中子谱辐照下最严峻的问题之一,极大地改变了性能退化的机制和程度。日本东北大学Hasegawa等^[20]研究了Re含量(5%和41%)、热处理和辐照条件(6.8~34 dpa中子辐照,646~1073 K)对力学性能的影响。应力消除态低铼合金样品在低温辐照($<600\text{ }^\circ\text{C}$)下易发生沿晶断裂,但可保留部分塑性,Mo-5Re在1073 K辐照后延伸率 $>10\%$ 。高铼合金中观察到细小、致密的沉淀相导致严重脆化和硬化,尤其在低温辐照($<874\text{ K}$)下,断裂模式以穿晶或混合断裂为主,室温塑性几乎丧失。另外,高铼含量促进Os等嬗变产物的积累(SM-2混合谱反应堆中尤为显著),进一步加剧脆化。相比于再结晶态样品,去应力热处理在抑制辐照脆化方面更有效。去应力热处理细化晶粒(晶粒尺寸约 $2\text{ }\mu\text{m}$)能够抑制裂纹扩展和 σ 相的生长,从而有效抑制脆化。再结晶热处理粗化晶粒(约 $20\text{ }\mu\text{m}$),促进沉淀相沿晶界生长,加剧硬化和脆化(如Mo-41Re再结晶态辐照后硬度达1800 HV)。

4.2 力学性能的退化

4.2.1 辐照脆化

高热通量和中子通量等极端服役条件下,辐照硬化与脆化是空间核反应堆材料性能退化的核心问题^[57],直接影响反应堆的可靠性和深空任务的安全性。Mo-Re合金的中子辐照后力学性能从关键影响因素、微观机制及

工程应用角度进行了较为广泛的研究总结,虽然剂量水平可能无法代表空间反应堆部件在寿命结束时的预期损伤水平,但在一定程度上可为该合金体系辐照诱导退化提供关键信息。辐照脆化与硬化的核心机制涉及辐照诱导缺陷(位错环、空洞)和相变(σ 相、 χ 相、hcp相)的竞争作用。表2汇总了Mo-Re合金辐照前后的拉伸性能数据,可以看出中子辐照后Mo-Re合金均发生了严重脆化。

关于辐照脆性机制,Singh等^[15]认为主要来源是晶粒塑性变形能力的耗尽和晶界脆性,非传统辐照偏析脆化。即辐照后晶内因高密度位错环难以塑性变形,而晶界强度相对更低,导致晶界滑动和分离成为主要断裂模式。

在工程应用中,Mo-Re合金焊接件辐照性能研究十分必要^[31,58-60]。Morito等^[58]研究了不同铼含量的Mo-Re合金电子束焊缝辐照性能。未辐照时,熔合区因晶粒粗大和低硬度成为优先断裂路径。高温中子辐照合金焊缝的损伤效应小于低温辐照,高温辐照强化了富Re相的均匀形核,这种效应平衡了焊缝熔化区、热影响区和基体金属各区域之间力学性能的差异。所有焊缝区域的损伤效应大小相似,室温仍表现为脆性断裂。因此,在高温中子辐照下的Mo-Re结构中应用电子束焊接不会限制此类结构的寿命。

4.2.2 辐照硬化

Mo-Re合金辐照硬化行为呈现显著铼含量依赖性,如图4所示^[19]。低铼合金($\leq 5\text{ Re}$)以位错环和空洞主导硬化,辐照后硬度增量较低(100~300 HV)且应力消除态保留塑性;高铼合金(如Mo-41Re)则因辐照诱导 σ 和 χ 相沉淀发生显著硬化(增量300~500 HV),并在 $\leq 874\text{ K}$ 时引发严重脆化(压痕开裂)。低温($\leq 874\text{ K}$)下硬化随Re含量增加而增强,高温(1072 K)因沉淀相粗化而减弱。组织调控表明:去应力处理细化亚结构可抑制 σ 相粗化并减轻脆化,而再结晶处理加剧 σ 相长大恶化性能。综上,低铼合金配合应力消除是优化抗辐照性能的有效策略,高铼合金需通过降铼($<30\%$)或掺杂(如HfC)抑制脆性相提升辐照稳定性^[19]。

空间核反应堆的燃料包壳和结构材料长期暴露于高能中子辐照中,辐照硬化会导致材料难以承受热应力或机械冲击;脆化则可能引发裂纹扩展,导致泄漏或破裂。空间核反应堆需在极端热-机械循环下运行(如变轨、启停),辐照硬化与脆化叠加会加速材料疲劳,缩短服役寿命。某些材料(如不锈钢)在辐照下同时发生肿胀(体积膨胀)和脆化,导致部件几何变形与应力集中,加剧结构失效风险^[61-62]。

4.3 物理性能的改变

4.3.1 电阻率

俄罗斯埃夫雷莫科学研究所Fabritsiev等^[18]系统研

表 2 Mo-Re 合金辐照前后拉伸性能
Table 2 Tensile properties of Mo-Re alloys before and after irradiation

Material	Test temperature/K	State	σ_s /MPa	σ_b /MPa	ε /%	Test reactor	Ref.	
Mo-41Re	1073	Annealed	303	503	30.0	High flux isotope reactor	[14]	
		Irradiation (0.72 dpa)	772/862	1130/1180	13.4/12.6			
		Irradiation (1.46 dpa)	1264	1602	5.2			
	1223	Annealed	275	393	39.0			
		Irradiation (0.67 dpa)	765/790	1019/987	12.2/16.3			
	1373	Annealed	228	275	50.5			
Mo-47.5Re	1073	Annealed	270	510	25.0	BOR-60	[15]	
		Irradiation (0.72 dpa)	1370/1030	1720/1480	8.3/9.1			
		Irradiation (1.46 dpa)	920/-	1304/1081	11.0/-			
	1223	Annealed	300	464	29.6			
		Irradiation (0.67 dpa)	1180	1500	4.3			
	1373	Annealed	223	326	62.9			
Mo-1Re	573–973	Stress-relieved	-	400–600	>10%	SM-2	[52]	
			Mo-5Re	723–823	Irradiation (5 dpa)			-
Mo-9Re	1033–1073	Irradiation (5–10 dpa)						-
			Mo-120Re	1033–1073	Irradiation (5–10 dpa)			-
Mo	Stress-relieved	-						400–850
		Mo-5Re	373–603	Irradiation (0.5–2 dpa)	-			400–1100
Mo-13Re	High temperature				Recrystallization	240 (Mo-14Re)	20–30	20–30
		Mo-21Re	1023–1073	Irradiation (5.5×10^{21} – 7.3×10^{21} cm ⁻²)		420 (Mo-14Re)	-	-
Mo-32Re	295				Unirradiation	575	706	7
		Mo-44Re	373	Unirradiation		798	927	10.2
Mo-50Re	373				Irradiation (320 K/0.16 dpa)	-	1425	0.29
		EB welds	373	Unirradiation		920	934	1.02
EB welds	373				Irradiation (320 K/0.16 dpa)	-	1239	0.32

究了铼含量对Mo-Re合金的辐照损伤电阻率的影响。在BOR-60反应堆中辐照,480~565 °C, $0.8 \times 10^{26} \sim 1.55 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ 剂量下辐照,结果如图5a,除Mo-13Re合金略有增加外,其电阻率在整个辐照剂量-温度范围内呈系统性降低。在770~800 °C的辐照温度下,只有纯Mo、Mo-9Re和Mo-0.5Re合金的电阻率 ρ 略有提高,Re含量较高的合金表现出 ρ 降低。在500~800 °C范围内,Mo-47Re合金因辐照引起的电阻率增益 $\Delta\rho_{\text{irr}}$ 急剧下降,结合相图分析得出,辐照温度为700~800 °C时,出现了二次富铼相(χ 相)的密集沉淀,导致了高铼含量合金(47%Re)的极端强化和电阻率的下降。

在SM-2反应堆中, $4.3 \times 10^{25} \sim 5.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$, 260~536 °C温度范围内辐照,电阻率增加。如图5b,随着Re含量的增加,这种效应显著增强。Mo-Re合金辐照电阻率增益的结果仅归因于热中子嬗变,Re发生共振反应,生成并累积嬗变产物(Os),从而降低了合金的导电性^[18]。

4.3.2 密度

辐照引起的密度增加效应在Mo-Re合金中也得到了证实。Mo-Re合金的密度变化受合金起始状态、辐照温度、辐照诱导相变及嬗变效应等共同影响。辐照对密度变化机制主要有辐照诱导偏析,即Re原子在辐照时向缺陷(位错、晶界)富集,驱动非平衡相形成;以及 σ 相和hcp相等高密度相的均匀形核致使密度增大。低铼合金辐照响应更敏感,Morito等^[58]研究显示低铼合金(Re含量为16%~21%)辐照后密度增长($\Delta d/d_{\text{ini}}$)为8.9%~9.1%。这主要是因为辐照诱导了 σ 富Re相的均匀形核,消除了焊缝不同区域(熔合区、热影响区和母材)的机械性能差异,提高了材料的整体强度和密度。作者认为这种辐照强化效应有助于延长材料在高温辐照环境下的使用寿命。而高Re合金(Re含量>21%)因相变复杂性,如可能

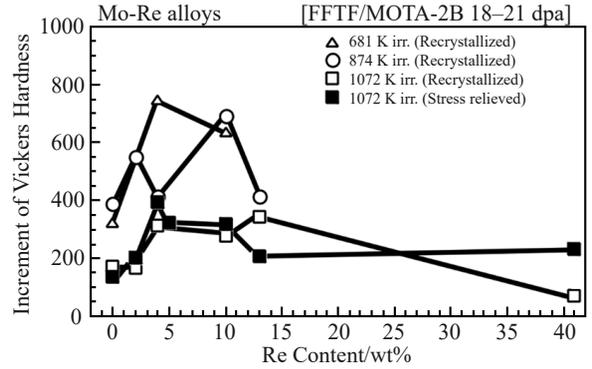


图4 据显微组织观察数据计算铼含量对辐照硬化的影响

Fig.4 Effect of Re content on radiation hardening calculated from the data obtained by microstructural observation^[19]

因已接近相平衡态或形成其他竞争相(如 χ 相)致使密度增长得到抑制。高温辐照(1023~1073 K)时,Mo-Re合金电子束焊接(EB)焊缝的密度增长机制源于辐照诱导的 σ 相均匀形核。中低温辐照(470~730 °C)因hcp相与嬗变效应导致密度非单调变化,需权衡相变脆化风险。初期密度下降由辐照诱导偏析(Re原子富集形成低密度区)主导。后期密度回升是由于Re向Os的嬗变(Os密度更高)及高密度hcp相(Re-Os-Mo固溶体)形成,抵消初期密度下降。最终密度变化取决于辐照剂量和温度,如表3所示,其中E为中子能量。

密度增加可能导致材料体积膨胀或收缩,影响部件的尺寸稳定性和几何完整性,燃料包壳或结构支撑部件的密度变化可能导致应力集中或变形,进而引发裂纹或失效。其次,密度变化通常伴随着微观结构的改变,如相变、析出相的形成或缺陷(如空位、位错)的积累。微观结构的变化会直接影响材料的机械性能,如辐照硬化与脆化,增加脆性断裂的风险,缩短材料的使用寿命,甚至导致突发性失效。此外,密度的非均匀变化可能引起材料

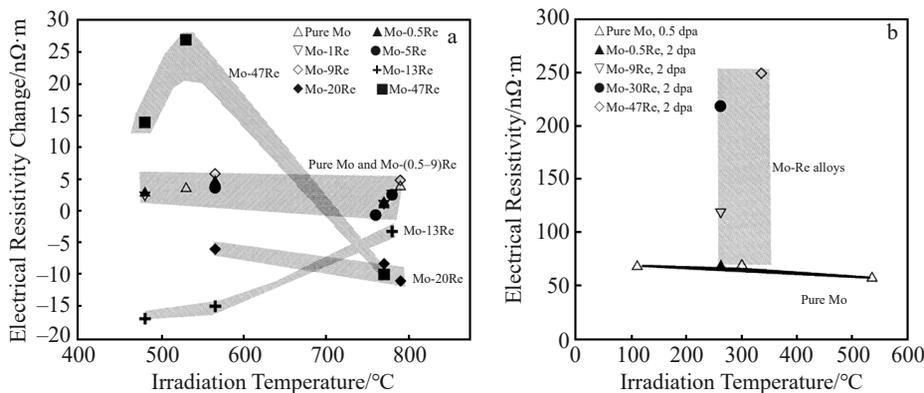


图5 BOR-60快中子堆5~10 dpa辐照Mo-Re合金电阻率($\Delta\rho_{\text{irr}} = \rho_{\text{irr}} - \rho_{\text{unirr}}$)随辐照温度的变化和SM-2反应堆中0.5~2 dpa辐照Mo-Re合金的电阻率 ρ_{irr} 随辐照温度的变化

Fig.5 Measured change in electrical resistivity ($\Delta\rho_{\text{irr}} = \rho_{\text{irr}} - \rho_{\text{unirr}}$, $T_{\text{test}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) vs. irradiation temperature for Mo-Re alloys irradiated in BOR-60 fast neutron reactor up to 5–10 dpa (a); measured electrical resistivity ρ_{irr} vs. irradiation temperature for Mo-Re alloys irradiated in SM-2 mixed spectrum reactor up to 0.5–2 dpa (b)^[18]

表3 Mo-41Re的密度降低量
Table 3 Density decrement measured in Mo-41Re alloy^[16]

T/°C	Fluence ^a	Fe/dpa	Mo/dpa	Density decrement	
				Annealed/%	Cold-worked/%
471	8.45	32.2	28	2.26	0.06
471	11.8	43.7	38	-0.28	-0.25
420	12.3	47.2	41	0.33	-0.08
420	27.6	110.8	96	0.11	0.28
569	10.6	40.8	35	0.72	1.14
569	16.9	65.8	57	0.82	0.12
645	10.6	40.8	35	0.66	0.043
645	16.9	65.8	57	1.41	0.15
730	10.6	40.8	35	1.45	0.47
730	15.9	61.5	53	0.07	-0.49

^a Fluences quoted in units of 10^{22} n/cm², $E > 0.1$ MeV

内部应力的不均匀分布,进一步促进裂纹的萌生和扩展。尤其是在高温和辐照环境下,材料需要承受热循环和辐照损伤的叠加作用,密度变化带来的应力问题会更加显著。最后,从工程应用的角度来看,密度变化可能导致设计和维护策略的调整。例如,如果材料在辐照后密度显著增加,可能需要重新评估其热膨胀系数、热导率等热物理性质,以确保系统在长期运行中的稳定性和安全性。

5 总结与展望

Mo-Re合金因其优异的高温强度、抗蠕变性能和抗辐照性等成为空间核反应堆结构材料的首选。近年来,围绕其辐照损伤行为的研究取得重要进展,但仍面临理论与技术挑战。本文针对空间核反应堆用Mo-Re合金的辐照损伤行为的研究现状,系统综述材料的辐照损伤与效应、微观结构演变、辐照损伤与服役性能的变化。Mo-Re合金微观结构和化学成分会因辐照诱导偏析与嬗变发生显著变化,进而影响材料服役性能,限制其在核能领域中的应用。目前,国内关于Mo-Re合金的辐照损伤行为研究较少,尚存在许多科学及技术问题亟需探究。(1)优化材料设计与后处理工艺,提升抗辐照能力,为长期深空探测任务提供技术支撑。(2)发展多尺度计算模型,结合机器学习解析成分-缺陷-性能映射关系;(3)开发多粒子协同辐照-热力耦合原位实验平台,实现空间环境高保真模拟;(4)明确辐照-应力-温度多场耦合作用机制,分析长周期辐照损伤演化规律。

参考文献 References

- [1] Yao Chengzhi(姚成志), Hu Gu(胡古), Zhao Shouzhi(赵守智) et al. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2016, 50(8): 1449
- [2] Yu Hongxing(余红星), Ma Yugao(马誉高), Zhang Zhuohua(张卓

- 华) et al. *Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 2019, 40(4): 1
- [3] Zhu Anwen(朱安文), Liu Lei(刘磊), Ma Shijun(马世俊) et al. *Journal of Deep Space Exploration*(深空探测学报)[J], 2017, 4(5): 397
- [4] El-Genk M S, Tournier J M. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2005, 340(1): 93
- [5] Poston D I, Kapernick R J, Guffee R M. *AIP Conference Proceedings*[J], 2002, 608(1): 578
- [6] Chang Tian(常恬), Gao Xuanqiao(高选乔), Lin Xiaohui(林小辉) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(1): 388
- [7] Qiu Xi(邱玺), Gao Shixin(高士鑫), Li Quan(李权) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2023, 37(2): 101
- [8] El-Genk M S. *Energy Conversion and Management*[J], 2008, 49(3): 402
- [9] King J C, El-Genk M S. *Nuclear Engineering & Design*[J], 2006, 236(17): 1759
- [10] Hu Binhe(胡彬和), Li Long(李龙), Wu Xiaochun(吴晓春) et al. *Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2016, 50(10): 1813
- [11] Kambe M, Tsunoda H, Mishima K et al. *Nuclear Technology*[J], 2003, 143(1): 11
- [12] Wan Farong(万发荣). *Irradiation Damage on Metal Materials*(金属材料的辐照损伤)[M]. Beijing: Science Press, 1993
- [13] Liu Wei(刘伟), Chen Wanqi(陈婉琦), Ma Menghan(马梦晗) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2023, 59(8): 986
- [14] Li Shiqing(李世清), Yan Heping(鄢和平). *Nuclear Physics Review*(原子核物理评论)[J], 1995(3): 40
- [15] Singh B N, Horsewell A, Toft P et al. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1994, 212-215: 1292
- [16] Garner F A, Greenwood L R, Edwards D J. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1994, 212-215: 426
- [17] Busby J T, Leonard K J, Zinkle S J. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2007, 366(3): 388

- [18] Fabritsiev S A, Pokrovsky A S. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 252(3): 216
- [19] Nemoto Y, Hasegawa A, Satou M *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 324(1): 62
- [20] Hasegawa A, Ueda K, Satou M *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258–263: 902
- [21] Qiu Xi, Pang Hua, Ran Guang *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2022, 559: 153443
- [22] Han Miaomiao(韩苗苗). *Preliminary Study on Molecular Dynamic Simulation of Radiation Damage for 4H-SiC(4H-SiC 辐照损伤分子动力学模拟初步研究)* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014
- [23] Yu Jinnan(郁金南). *Radiation Effect in Effects(材料辐照效应)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007
- [24] Du Yufeng(杜玉峰). *Studies on the Irradiation Damage in Iron Based Binary Alloys and the Behavior of Gas Bubbles Under Electron Irradiation(铁基二元合金辐照损伤及气泡在电子束辐照下的行为研究)* [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019
- [25] Ou Yidian(欧诒典). *The Study of Formation and Stability of Irradiation-Induced Defects in Yttria by First Principles(氧化钇中辐照缺陷形成及稳定性的第一性原理研究)* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011
- [26] Zhu Wei(祝威). *The Study of Properties of Heavy-Dose Neutron-Irradiated Single Crystal Material(大剂量中子辐照单晶材料的特性研究)* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [27] Chai Maosheng(柴茂盛). *Effect of Xenon Ion Irradiation on Microstructure and Properties of Zr Alloy and Austenitic Stainless Steels(氙离子辐照对锆合金和奥氏体不锈钢微结构和性能的影响)* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012
- [28] Ma K, Décamps B, Fraczkiewicz A *et al.* *Acta Materialia*[J], 2021, 212(6): 116874
- [29] Ishino S. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1997, 251(11): 225
- [30] Zinkle S J, Snead L L. *Scripta Materialia*[J], 2018, 143(1): 154
- [31] Chakin V P, Morito F, Kazakov V A *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, 258–263: 883
- [32] Garin J L, Mannheim R L. *Key Engineering Materials*[J], 2001, 189–191: 394
- [33] Osadnik M, Staszewski M, Czepelak M. *Solid State Phenomena*[J], 2010, 163: 191
- [34] Wu W S, Yang Q K, Zhang W *et al.* *Acta Materialia*[J], 2025, 291(6): 120994
- [35] El-Atwani O, Esquivel E, Efe M *et al.* *Acta Materialia*[J], 2018, 149: 206
- [36] Hung C Y, Vetterick G, Hopkins E *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2022, 566(8): 153761
- [37] Bai X M, Voter A F, Hoagland R G *et al.* *Science*[J], 2010, 327(5973): 1631
- [38] El-Atwani O, Esquivel E, Aydogan E *et al.* *Acta Materialia*[J], 2019, 165: 118
- [39] Liu X, Hao L Y, Shen S K *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2025, 212: 312
- [40] Bian Y N, Lu Y, Zhang J *et al.* *Acta Materialia*[J], 2023, 253: 118964
- [41] Liu Feng(刘凤), Li Qiang(李强), Wang Wanjing(王万景) *et al.* *Materials Reports(材料导报)*[J], 2011, 25(19): 43
- [42] Sun C, Song M, Yu K Y *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2013, 44: 1966
- [43] Kaoumi D, Motta A T, Birtcher R C. *Journal of Applied Physics*[J], 2008, 104(7): 288
- [44] Offidani D F, Martinez E, Marquis E A. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2025, 605: 155533
- [45] Okamoto P R, Harkness S D, Laidler J J. *Transaction of the American Nuclear Society*[J], 1973, 16: 70
- [46] Marwick A D. *Journal of Physics*[J], 1978, 8(9): 1849
- [47] Wiedersich H, Okamoto P R, Lam N Q. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1979, 83(1): 98
- [48] Jia L X, Cao J L, Dou Y K *et al.* *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*[J], 2024, 551: 165340
- [49] Erck R A, Rehn L E. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1989, 168(3): 208
- [50] Wang J, Han C X, Zong H X *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2025, 250: 113704
- [51] Jiang L, Peng Q, Xiu P Y *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2020, 187: 291
- [52] Greenwood L R, Garner F A. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1994, 212–215: 635
- [53] Wu Yucheng(吴玉程). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2019, 55(8): 939
- [54] Edwards D J, Garner F A, Gelles D S. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2008, 375(3): 370
- [55] Odette G R, Yamamoto T, Rathbun H J *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2003, 323(2–3): 313
- [56] Cao Peipei(曹培培). *Tuning Mechanical Properties and Irradiation Resistance of fcc-based Multi-principal Element Alloys via Nano-precipitation(基于纳米析出调控 fcc 系多主元合金的力学性能和辐照性能)* [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022
- [57] Tian Zhen(田震), Li Congcong(李聪聪), Wu Yuan(吴渊) *et al.* *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2024, 52(1): 1
- [58] Morito F, Chakin V P, Danylenko M I *et al.* *Journal of Nuclear Materials*[J], 2011, 417(1–3): 976
- [59] Krajnikov A V, Morito F, Danylenko M I. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2014, 444(1–3): 404
- [60] Krajnikov A, Morito F, Danylenko M. *Universal Journal of Materials Science*[J], 2014, 2(2): 19
- [61] Olander(奥兰德), Li Hengde(李恒德). *Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements(核反应堆燃料元件基本问题)* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1983
- [62] Li Guanxing(李冠兴), Wu Sheng(武胜). *Nuclear Fuel(核燃料)* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007

Research Progress on Irradiation Damage Behavior of Molybdenum-Rhenium Alloys for Nuclear Reactors

Chang Tian, Lin Xiaohui, Zhang Weiwei, Xin Tian, Xue Jianrong, Liang Jing, Gao Xuanqiao, Zhang Wen
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The structural materials of space nuclear reactors need to withstand extreme service environments such as high temperature and high-flux neutron irradiation, and their performance greatly affects the safety and economy of reactor operation. This paper focuses on the irradiation damage behavior of Mo-Re alloys used in space nuclear reactors, reviews irradiation damage effects, microstructure evolution caused by irradiation, and degradation of service performance. It provides a theoretical basis for the microstructure optimization, performance prediction, and service life evaluation of Mo-Re alloys as reactor materials.

Key words: irradiation damage; Mo-Re alloy; space nuclear reactor; microstructure evolution; mechanical properties

Corresponding author: Chang Tian, Master, Engineer, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231082, E-mail: changtian1994@126.com