

反应堆压力容器钢辐照硬化脆化的中子注量率效应

王荣山, 徐超亮, 黄平, 刘向兵

苏州热工研究院, 苏州 215004

摘要 针对中子注量率对核电站反应堆压力容器(RPV)钢辐照硬化脆化的影响,总结了不同铜含量RPV钢的辐照硬化脆化的中子注量率效应。结果表明,在低铜($\text{Cu} \leq 0.08\%$)和高铜($\text{Cu} > 0.08\%$)RPV钢中,中子注量率对辐照硬化脆化有不同的作用结果。在中子注量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$)的条件下,中子注量率对低铜RPV钢辐照硬化脆化无明显影响,在 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$)的条件下,尚无确定结论;高铜RPV钢辐照至富铜团簇硬化平台后,注量率对硬化脆化无影响,而达到辐照硬化平台之前,注量率对辐照硬化脆化有不同影响。

关键词 RPV钢;辐照硬化脆化;中子注量率

中图分类号 TL351⁺.6

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.31.012

Summaries of Neutron Fluence Rate Effects on Hardening and Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels

WANG Rongshan, XU Chaoliang, HUANG Ping, LIU Xiangbing

Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China

Abstract The effect of neutron fluence rate on hardening and embrittlement of nuclear reactor pressure vessel (RPV) is summarized. It is indicated that the effect of neutron fluence rate on hardening and embrittlement has different influences on low-Cu ($\text{Cu} \leq 0.08\%$) and high-Cu ($\text{Cu} > 0.08\%$) RPV steels. The irradiation hardening and embrittlement have no relationship with neutron fluence rate up to $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$) in low-Cu RPV steel, but do not show definite connection if the fluence rate $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$). The hardening and embrittlement have nothing to do with the fluence rate if the plateau in Cu-related hardening is reached. The behavior of Cu-containing steels is more complex at the pre-plateau fluence.

Keywords RPV steel; irradiation hardening and embrittlement; neutron fluence rate

反应堆压力容器(reactor pressure vessel, RPV)是核安全一级设备,是压水堆核电站寿期内不可更换的大型部件,直接影响核电站的安全与经济效益。核电站运行期间,处于高温高压和强中子辐照环境中的RPV钢性能逐渐退化,发生辐照硬化脆化现象。RPV钢辐照硬化脆化行为受到多种因素的影响和制约,包括材料化学成分^[1~3]、微观组织与晶粒尺寸^[4,5]、中子注量^[6~13]、中子能谱^[14,15]、辐照温度^[16,17]、中子注量率^[18,19]等。目前国际上对辐照硬化脆化的影响因素研究主要

集中在材料化学成分、中子注量与辐照温度等方面。而在中子注量率引起的辐照脆化,由于中子注量率与中子能谱对辐照脆化的影响相互交织在一起,导致中子注量率对辐照硬化脆化影响研究困难,目前缺乏系统性的认识。另一方面,由于商用堆辐照监督管空间有限,辐照监督数据缺乏,在评估RPV辐照脆化程度时,常采用试验堆(materials test reactor, MTR)加速辐照进行研究,但商用堆包括沸水式反应堆(boiling water reactor, BWR)和压水式反应堆(pressurized

收稿日期:2014-07-06;修回日期:2014-08-03

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA050901);苏州市科技发展计划项目(SYG201254)

作者简介:王荣山,博士研究生,研究方向为核电站延寿与关键部件老化管理,电子邮箱:cntsail@126.com;徐超亮(通信作者),工程师,研究方向为核电

关键部件材料老化管理,电子邮箱:xuchaoliang@cgnpc.com.cn

引用格式:王荣山,徐超亮,黄平,等.反应堆压力容器钢辐照硬化脆化的中子注量率效应[J].科技导报,2014,32(31):80-84.

water reactor, PWR)与MTR的中子注量率差异较大(图1),商用堆与MTR注量率差异性对RPV钢的硬化脆化影响程度一直未得到确定结论。如果直接将MTR获得的力学性能数据用于RPV钢辐照脆化评估,将导致RPV结构完整性评估不准确。因此,研究中子注量率对辐照硬化脆化的影响规律有迫切的现实需求意义。

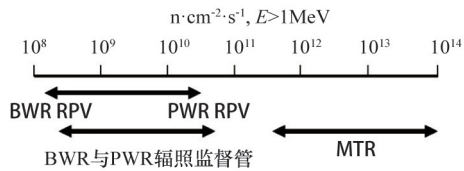


图1 PWR与BWR核电站RPV、辐照监督管与MTR中子注量率分布

Fig. 1 Neutron fluence rate of BWR and PWR RPV, irradiation surveillance capsule and MTR

中子辐照RPV钢将导致材料微观结构发生变化,主要包括空位与自间隙原子及其演化形成的位错、位错环等基体缺陷(matrix damage, MD)和在辐照作用下基体中铜迁移形成的富铜团簇(copper rich precipitation, CRP)。随着国际上对RPV钢辐照硬化脆化研究的深入,已将其机理归结为MD导致的硬化脆化和CRP导致的硬化脆化。在低铜($\text{Cu} \leq 0.08\%$)RPV钢中,MD硬化是导致辐照硬化脆化的主要因素;在高铜($\text{Cu} > 0.08\%$)RPV钢中,MD与CPR共同影响RPV钢的硬化脆化。由于中子注量率对MD与CPR的影响十分复杂,对于低铜和高铜RPV钢有不同的表现,本研究分别讨论低铜和高铜RPV钢的注量率效应。

1 低铜RPV钢

先前辐照监督数据与MTR数据表明,在中子辐照注量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$,下同)的条件下,未出现中子辐照硬化脆化的注量率效应。如美国加州大学和日本中央电力研究院在不同的辐照注量($10^{18} \sim 10^{19} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$)和注量率($7 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下对A533B板材(含0.06%的Cu)和A508-3锻件(含0.063%的Cu)的拉伸和夏比冲击性能进行比较研究^[20],研究表明,在标准偏差范围内,注量率对低铜RPV钢韧脆转变温度(ductile-brittle transition temperature, DBTT)和屈服强度不产生影响(图2、图3)。Ryuta等^[21]采用JMTR(Japanese materials test reactor)反应堆研究了中子注量率在 $1.4 \times 10^{11} \sim 6.3 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,RPV钢辐照至 $9.3 \times 10^{17} \sim 1.1 \times 10^{20} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的注量率效应(图4),研究表明,RPV钢的归一化韧脆转变温度增量在 $< 2 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下不随注量率的增加而变化,未表现出中子的注量率效应。此外,美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)^[22]、Suzuki等^[23]都得到相似结论。

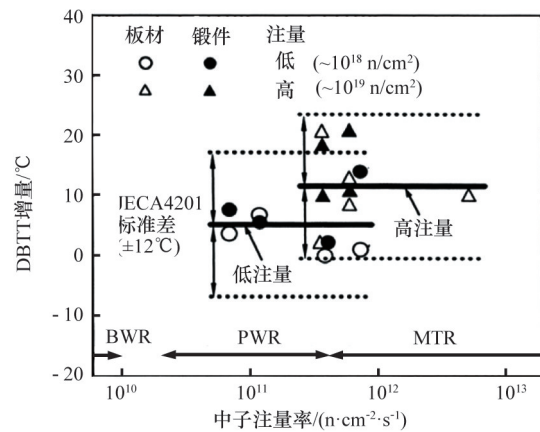


图2 A533B板材和A508-3锻件经不同注量与注量率中子辐照后的韧脆转变温度(DBTT)变化

Fig. 2 The DBTT variations of A533B and A508-3 with different neutron fluences and fluence rates

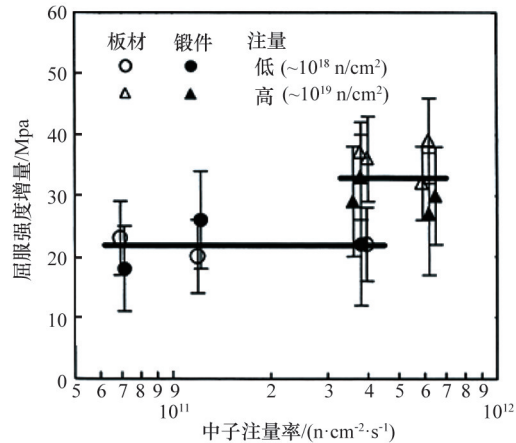


图3 中子注量率对低铜RPV钢屈服强度的影响

Fig. 3 The influence of neutron fluence rate on yield strength of low Cu RPV steel

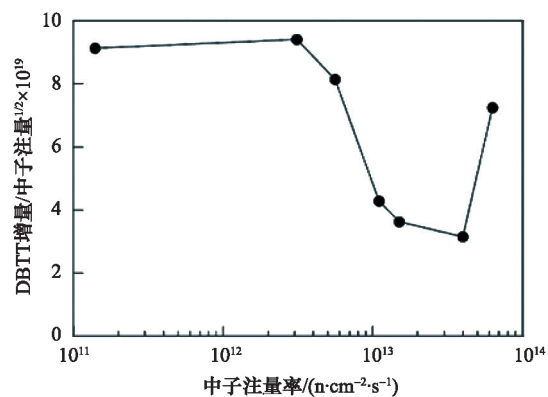


图4 归一化DBTT增量与中子注量率的变化关系
Fig. 4 Normalized DBTT with neutron fluence rate variations

由于在低铜 RPV 钢中,MD 硬化是导致辐照硬化脆化的主要因素,辐照缺陷的特征参数(缺陷浓度与缺陷演化后的尺寸等)成为影响硬化脆化关键因素。虽然在一定注量率范围内辐照缺陷浓度随注量率的增加逐渐升高,但随着缺陷迁移率的增加,空位和间隙原子复合自湮没的概率升高,导致缺陷中实际存在的缺陷浓度基本保持不变,所以在中子辐照注量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,未出现中子辐照硬化脆化的注量率效应。

在中子注量率 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,中子注量率对 RPV 钢辐照硬化脆化的影响目前尚无确定的结论。如 Suzuki 等^[23]利用 JMTR 研究低铜 A533-B 板材的辐照硬化性质,注量率分别为 $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.5 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,研究表明,在标准偏差之内,材料的力学性能变化有不规律性,无法给出中子注量率对 RPV 钢力学性能的影响规律。Odette 等^[18,24]采用 MTR,研究了中子注量率 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 RPV 钢的注量率效应,由于产生的中子注量率效应不明显,且夏比冲击实验本身测量误差较大($\pm 10^\circ\text{C}$),不能直接得出低铜 RPV 钢在中子注量率 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下存在注量率效应的结论。Ryuta 等^[21]在利用 JMTR 反应堆研究了经不同中子注量率与注量中子辐照的 RPV 钢的注量率效应(图 4),研究表明,在 $2 \times 10^{12} \sim 6.3 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,中子注量率对韧脆转变温度增加的影响呈现减小后增加的规律;Hinkle 对注量率从 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内作了类似的试验,未发现注量率的影响^[25]。因此,目前对中子注量率 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下对低铜 RPV 钢的注量率效应认识不足,很多文献结果误差较大,部分结果相互矛盾,至今没有统一的结论。

因此,低铜 RPV 钢的辐照监督数据与 MTR 数据表明,在中子辐照注量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($E > 1 \text{ MeV}$)的条件下,中子注量率对辐照硬化脆化无显著影响,而在 $> 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,鉴于实验条件控制精度和实验误差,目前没有统一的结论,这与 EPRI 的研究结果相一致^[22]。所以,在低铜 RPV 钢中采用注量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐照监督数据或实验堆数据进行在役 RPV 评估时,不需要对中子注量率差异引起的硬化脆化进行修正。

2 高铜 RPV 钢

在高铜 RPV 钢中,辐照硬化脆化与富铜团簇的形成密切相关。先前研究表明^[22],富铜团簇析出将导致屈服强度增加并逐步达到饱和值,并随着辐照注量的增加保持稳定(图 5)。根据是否达到富铜团簇硬化平台,注量率对高铜 RPV 钢硬化脆化的影响以平台注量为界分别进行讨论。

国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)报告^[26]指出,在达到富铜团簇硬化平台注量后,辐照硬化脆化与中子注量率不相关。Langer 等^[27]采用含铜量为 0.10%、0.15%、0.22% 和 0.26% 的 22NiMoCr3-7 在标准辐照监

督管($7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、高超前因子监督管($3.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和 MTR($3.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)中辐照至硬化平台注量后,未观察到注量率对硬化平台注量的影响。因此,在高铜钢中,采用低注量率的实验堆数据或辐照监督数据评估在役 RPV 硬化脆化时,在平台注量以上的注量范围不需要进行注量率效应修正。

在达到辐照硬化平台之前,不同中子注量率将导致达到硬化平台的注量不同(图 5),因此,将注量率对高铜 RPV 钢硬化脆化的影响分别在低注量率区、高注量率区和中间注量区域进行讨论。

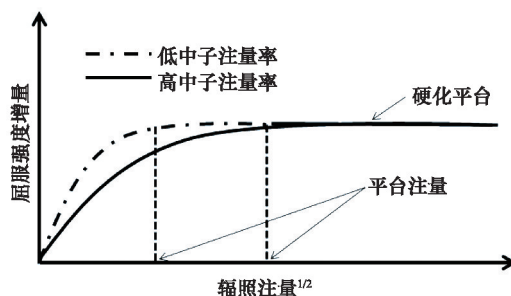


图5 注量率与注量对富铜团簇硬化平台影响

Fig. 5 Fluence rate and fluence dependence of the increase in yield strength due to the formation of Cu-rich clusters

1) 在高注量率条件下($> 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),达到富铜团簇硬化平台的注量随注量率的增加逐渐降低^[22]。Williams 等^[28]借助小角中子散射分析富铜团簇的尺寸和数密度,研究了中子注量率对富铜团簇硬化的影响规律(图 6),实验表明,在 6×10^{-10} 和 $6 \times 10^{-9} \text{ dpa/s}$ 的条件下达到硬化平台的注量分别为 10×10^{-3} 和 $20 \times 10^{-3} \text{ dpa}$ 。因此得到,在达到富铜团簇硬化平台之前,富铜团簇硬化脆化随着注量率的增加逐渐降低。

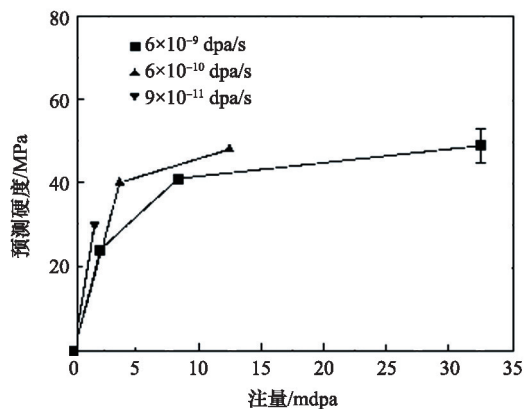


图6 通过富铜团簇尺寸与数密度预测的硬化与中子注量、注量率关系

Fig. 6 Fluence and fluence rate dependence of the irradiation-induced hardness, predicted from the experimentally determined number density and size

Odette 等^[18]研究了铜含量为 0.38% 的 RPV 钢在 4×10^{12} 、 $4.6 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 剂量率条件下,在达到辐照硬化平台之前硬化量随辐照剂量变化规律(图 7)。研究表明,在相近剂量率范围内,低剂量率样品的硬化程度明显低于高剂量率样品的硬化程度。这是由于,在高剂量率条件下点缺陷在尾端(Sinks)处的相互湮灭复合增强,降低了基体中空位的浓度,导致溶质原子扩散速率和溶质原子团簇的生成速率降低(特别是富铜团簇),使达到硬化平台的剂量升高。

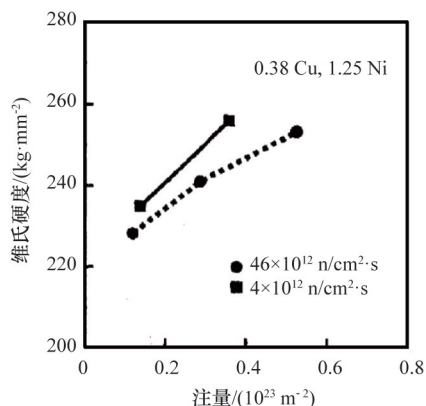


图 7 含铜量为 0.38%RPV 模拟钢硬化效应随剂量与剂量率的变化曲线

Fig. 7 Effect of dose rate on the hardening as a function of fluence for a model plate containing 0.38% Cu

2) 在低剂量率条件下 ($< 3 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),辐照导致的空位浓度远低于热激活空位对溶质原子团簇的影响。如 Williams 等^[29]采用理论模拟的方法研究了相对空位浓度随剂量率的变化规律。相对空位浓度定义为 $n_{\text{rel}} = \frac{n_{\text{thermal}} + n_i}{n_{\text{thermal}}}$, 其中 n_{thermal} 为热空位浓度, n_i 为辐照空位浓度。研究表明,在低剂量率条件下,由于辐照缺陷浓度非常低,导致相对空位浓度为 1,表明辐照空位浓度远小于热空位浓度;随着剂量率的增加,辐照产生的空位浓度升高,使相对空位浓度迅速增加(图 8)。所以,低剂量率条件下,辐照剂量率并不会显著影响材料中的空位浓度,材料中的空位主要以热空位为主。热空位将改变铜在材料中的迁移率,影响富铜团簇的尺寸与数密度。在退火效应的作用下,高温辐照环境中的作用时间成为影响材料硬化脆化的主要因素,其作用时间可以通过达到某一剂量的剂量率间接得出。所以,在某一确定剂量,低剂量率(长时退火)条件下有利于富铜团簇的形成,硬化脆化将随着剂量率的增加而增加(图 9)^[22]。

3) 在中间剂量率范围 ($3 \times 10^9 \sim 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),剂量率对空位浓度影响和退火效应相互补偿,并没有富铜团簇硬化脆化的剂量率效应(图 9)^[22]。压水堆 RPV 和辐照监督样品都处于此剂量率范围。因此,在富铜团簇硬化平台剂量前,利用辐照监督数据评估在役 RPV 辐照脆化程度时,不需要进行剂量率效应相关的数据修正。

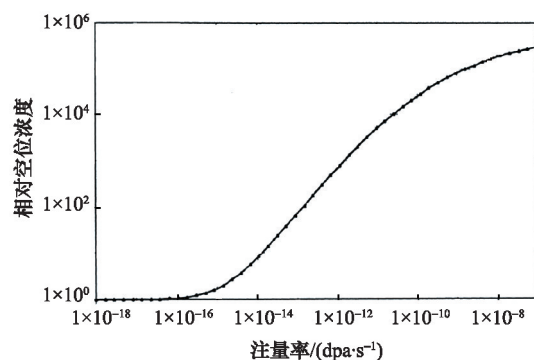


图 8 相对空位浓度 n_{rel} 与剂量率的变化关系

Fig. 8 Fit between data and expression for (relative) free vacancy concentration

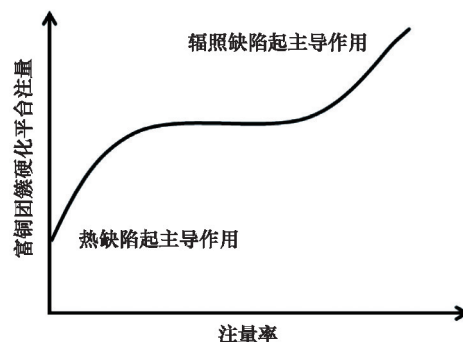


图 9 富铜团簇硬化平台剂量与剂量率变化示意图

Fig. 9 Dependence of the fluence required to reach the Cu plateau on the dose rate

3 结论

中子剂量率是影响 RPV 钢辐照硬化脆化的重要因素。低铜 RPV 钢中,在中子剂量率 $\leq 1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,中子剂量率对辐照硬化脆化无显著影响,在高于 $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,目前没有统一的结论。在高铜 RPV 钢中,在达到富铜团簇硬化平台后,辐照硬化脆化与中子剂量率不相关,而在达到辐照硬化平台之前,在低剂量率、高剂量率和中间剂量率范围有不同的作用结果:在高剂量条件下 ($> 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),富铜团簇硬化脆化随剂量率的增加逐渐降低;在低剂量率条件下 ($< 3 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),富铜团簇硬化脆化随剂量率的增加而增加;在中间的剂量率范围 ($3 \times 10^9 \sim 10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),无富铜团簇硬化脆化的剂量率效应。理论分析认为剂量率差异引起的辐照硬化脆化差别较小,且由于中子剂量率与能谱影响交织在一起,导致剂量率与能谱对辐照性能的影响很难区分,目前相关资料还比较缺乏,仍需进行更深入的研究。

参考文献 (References)

[1] Odette G R, Lucas G E. Recent progress in understanding reactor

- pressure vessel steel embrittlement[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 1998, 44(1-4): 189-231.
- [2] Meslin E, Radiguet B, Pareige P, et al. Kinetic of solute clustering in neutron irradiated ferritic model alloys and a french pressure vessel steel investigated by atom probe tomography[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 399(2/3): 137-145.
 - [3] Nikolaeva A V, Nikolaev Y A, Kryukov A M. The contribution of grain boundary effects to low-alloy steel irradiation embrittlement[J]. Journal of Nuclear Materials, 1995, 218: 85-93.
 - [4] Hawthorne J R, Steele L E. Metallurgical variables as possible factors controlling irradiation response of structural steel[C]. Effects of Radiation on Structural Metals, Atlantic, June 26-July 1, 1966.
 - [5] Miller M K, Burke M G. An atom probe field ion microscopy study of neutron-irradiated pressure vessel steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1992, 195: 68-82.
 - [6] Kocik J, Keilova E, Cizek J, et al. TEM and PAS study of neutron irradiated VVER-type RPV steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 303: 52-64.
 - [7] Lee T H, Kim Y O, Kim S J. Crystallographic model for Bcc-to-9R martensitic transformation of Cu precipitates in ferritic steel[J]. Philosophical Magazine, 2007, 87(2): 209-224.
 - [8] Monzen R, Iguchi M, Jenkins M L. Structural changes of 9R copper precipitates in an aged Fe-Cu alloy[J]. Philosophical Magazine Letters, 2000, 80: 137-148.
 - [9] Glade S C, Wirth B D, Odette G R, et al. Positron annihilation spectroscopy and small angle neutron scattering characterization of nanostructural features in high-nickel model reactor pressure vessel steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 351(1-3): 197-208.
 - [10] Takeuchi T, Kuramoto A, Kameda J, et al. Effects of chemical composition and dose on microstructure evolution and hardening of neutron-irradiated reactor pressure vessel steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 402(2/3): 93-101.
 - [11] Carter R G, Soneda N, Dohi K, et al. Microstructural characterization of irradiation-induced Cu-enriched clusters in reactor pressure vessel steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 298(3): 211-224.
 - [12] Bergner F, Ulbricht A, Viehrig H W. Acceleration of irradiation hardening of low-copper reactor pressure vessel steel observed by means of SANS and tensile testing[J]. Philosophical Magazine Letters, 2009, 89: 795-805.
 - [13] Chaouadi R, Gérard R. Copper precipitate hardening of irradiated RPV materials and implications on the superposition law and re-irradiation kinetics[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 345: 65-74.
 - [14] Hawthorne J R. Irradiation embrittlement[J]. Treatise on Materials Science & Technology, 1983, 25: 461-524.
 - [15] Serpan C Z. Damage-function analysis of neutron induced embrittlement in A302-B steel at 550 F[C]. Effects of Radiation on Substructure and Mechanical Properties of Metals and Alloys, Los Angeles, USA, June 26-28, 1972.
 - [16] Haggag F M. Effects of irradiation temperature on embrittlement of nuclear pressure vessel steels[C]. Effects of Radiation on Materials: 16th International Symposium, Aurora CO, USA, June 23-25, 1992.
 - [17] Kupca L, Beno P. Analysis of the results from the surveillance specimen program for reactor pressure vessels on nuclear power plant V-2 in Jaslovske Bohunice[C]. Radiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels: An International Review (4th Volume), Balatonfüred, Hungary, September 26-29, 1990.
 - [18] Odette G R, Mader E V, Lucas G E, et al. The effect of flux on the irradiation hardening of pressure vessel steels[C]. Effects of Radiation on Materials: Sixteenth International Symposium, Aurora CO, USA, June 23-25, 1992.
 - [19] Odette G R, Yamamoto T, Klingensmith D, et al. On the effect of dose rate on irradiation hardening of RPV steels[J]. Philosophical Magazine, 2005, 85: 779-797.
 - [20] Dohi K, Soneda N, Onchi T, et al. Dose rate effect in low copper steels irradiated in FNR[C]. Workshop on Dose Rate Effects in Reactor Pressure Vessel Materials, Squaw Creek, Canada, November, 2001.
 - [21] Ryuta Kasada, Takeshi Kudo, Akihiko Kimura, et al. Effects of neutron dose, dose rate, and irradiation temperature on the irradiation embrittlement of a low-copper reactor pressure vessel steel[C]. Effects of Radiation on Materials: 22nd Symposium, Boston Massachusetts, USA, June 8-10, 2004.
 - [22] Electric Power Research Institute (EPRI). Review of dose rate effects on RPV embrittlement[R]. California, USA, EPRI, 2002.
 - [23] Suzuki M, Onizawa K, Kizaki M. Effects of neutron flux and irradiation temperature on irradiation embrittlement of A533B steels [J]. Effects of Radiation on Materials: 17th International Symposium, Idaho Sun Valley, USA, June 20-23, 1994.
 - [24] Odette G R. Microstructure of irradiated materials[J]. Materials Research Society Symposia Proceedings, 1995, 373: 137-146.
 - [25] 杨文斗. 反应堆材料学[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 173-174.
Yang Wendou. Nuclear materials[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 173-174.
 - [26] International Atomic Energy Agency (IAEA). Integrity of reactor pressure vessels in nuclear power plants: assessment of irradiation embrittlement effects in reactor pressure vessel steels[R]. Vienna: IAEA, 2009.
 - [27] Langer R, Bartsch R, Foehl J. Irradiation results for different reactors [C]. Workshop on Dose Rate Effects in Reactor Pressure Vessel Materials, Squaw Creek, Canada, November, 2001.
 - [28] Williams T J, Phythian W J. Electron microscopy and SANS study of the effect of irradiation dose and dose rate on copper precipitation in low alloy steel submerged-arc welds[C]. Effects of Radiation on Materials: 17th International Symposium, Idaho Sun Valley, USA, June 20-23, 1994.
 - [29] Williams T, Ellis D, Connell W O. Dose rate effects in high and low nickel welds[C]. Workshop on Dose Rate Effects in Reactor Pressure Vessel Materials, Squaw Creek, Canada, November, 2001.

(编辑 陈华姣)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。