

特约专栏

Ni 对 RPV 模拟钢中富 Cu 原子团簇析出的影响

周邦新¹, 王均安¹, 刘庆东², 刘文庆², 王伟¹,
林民东¹, 徐刚¹, 楚大锋¹

(1. 上海大学材料研究所, 上海 200072)

(2. 上海大学微结构研究重点实验室, 上海 200444)

摘要: 用原子探针层析技术和时效模拟方法, 研究了不同 Ni 含量并且提高了 Cu 含量的反应堆压力容器(RPV)用模拟钢中富 Cu、富 Ni 和富 Mn 原子团簇的形成。结果表明, 提高钢中的 Ni 含量会促使富 Cu 原子团簇的析出, 富 Cu 原子团簇中含有 Ni 和 Mn。实验检测到富 Ni 的原子团簇, 团簇中含有 Cu 和 Mn, 富 Ni 原子团簇可以作为富 Cu 原子团簇析出时的形核区。实验还检测到富 Mn 原子团簇, 当 Mn 原子团簇中含有较高的 Ni 时, 它也可以成为富 Cu 原子团簇析出时成核的地方。由于钢中的合金元素 Ni 在形成富 Ni 原子团簇后会成为富 Cu 原子团簇析出时成核区, 因而提高 Ni 的含量将促进富 Cu 原子团簇的析出, 这是合金元素 Ni 会增加压力容器钢中子辐照脆化敏感性的本质原因。

关键词: 压力容器钢; 原子探针层析技术; 富 Cu 原子团簇; 富 Ni 原子团簇; 富 Mn 原子团簇

中图分类号: TL341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)05-0001-06

Effect of Nickel Alloying Element on the Precipitation of Cu-Rich Clusters in RPV Model Steel

ZHOU Bangxin¹, Wang Jun'an¹, LIU Qingdong², LIU Wenqing²,
WANG Wei¹, LIN Mindong¹, XU Gang¹, CHU Dafeng¹

(1. Institute of Materials, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(2. Key Laboratory for Advanced Micro-Analysis, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The effect of nickel alloying element on the precipitation of Cu-rich clusters in RPV model steel has been investigated by means of atom probe tomography. 40 kg ingots of RPV model steel were prepared by vacuum induction furnace melting with two different Ni contents (0.79 wt.% and 1.52 wt.%) and with higher Cu content (0.5 wt.%). The specimens of 50 × 40 mm², 4 mm in thickness, were heat-treated by 880 °C - 20 min water quenching, 660 °C - 10 h tempering, and 400 °C aging, different from 100 h to 2 000 h. The results show that the increase of nickel content in RPV model steels will promote the precipitation of Cu-rich clusters. The contents of Ni and Mn were detected in the Cu-rich clusters at the early stage of the precipitation. Ni-rich clusters containing Cu and Mn were detected, and they could act as the nucleation sites for the precipitation of Cu-rich clusters. Mn-rich clusters could also be detected. Mn-rich clusters were not the nucleation sites for the precipitation of Cu-rich clusters, but the segregation of Cu atoms in those Mn-rich clusters containing much higher Ni could be found. Ni-rich clusters would act as the nucleation sites during the precipitation of Cu-rich clusters; therefore the increase of nickel content in RPV steels could promote the precipitation of Cu-rich clusters. This is the essential reason that the presence of nickel in PRV steel could increase its sensitivity to neutron irradiation embrittlement.

Key words: reactor pressure vessel steel; atom probe tomography; Cu-rich clusters; Ni-rich clusters; Mn-rich clusters

1 前言

压水堆核电站的压力容器(RPV)一般用 Mn-Ni-Mo

低合金铁素体钢(A508-III)制造, 添加合金元素 Ni 可以增加钢的淬透性, 提高韧性, 降低韧脆转变温度, 但是却增加了中子辐照脆化的敏感性, 因而对这种合金的研究受到广泛关注。国际原子能机构为此组织了国际间的合作研究, 研究结果已经汇编成册^[1]。目前已经认识到由于中子辐照诱发析出了富 Cu 原子团簇^[1-6]和其它 Ni, Mn 等原子团簇^[1,4,6-7]是促使 RPV 钢发生辐照脆化的主要原因。提高钢中 Ni 的含量会促使富 Cu 原子团簇

收稿日期: 2011-2-01

基金项目: 国家重点基础研究计划(2006CB605003); 国家自然科学基金(50931003); 上海市重点学科建设(S30107)

通信作者: 周邦新, 男, 1935年生, 研究员, 博士生导师

的析出^[1,8], 但是其根本原因还不十分清楚。

富 Cu 原子团簇的大小只有几纳米, 即使用高分辨率透射电子显微镜观察研究, 也难于弄清楚其形核过程, 而原子探针层析技术是研究这类问题的非常理想的方法^[9-11]。原子探针层析技术可以对原子的种类和它们在空间的位置逐个进行分析, 因而可以探测到只有几个溶质原子发生团聚时的情况, 还可以精确测定团簇中不同元素原子的分布和含量^[10-11]。过去采用这种方法分析了压力容器钢的辐照监督试样中富 Cu 原子团簇析出的情况, 以及用热时效模拟方法研究富 Cu 原子团簇析出的过程, 并且获得了不少的结果, 如观察到富 Cu 原子团簇析出时的清晰图像, 还能分析只有几纳米大小团簇中的化学成分^[1-9,12]。本研究工作采用热时效模拟的方法研究了 Ni 含量不同并且提高了 Cu 含量的压力容器模拟钢中富 Cu 原子团簇的析出, 以及富 Ni 和富 Mn 原子团簇的形成, 并根据这些团簇中溶质原子之间距离大小的差别, 判断它们在析出和形成过程中的先后次序, 分析并研究它们之间成分的变化规律, 可以了解溶质原子间的相互作用及其对富 Cu 原子团簇析出的影响。

2 实验方法

参照 A508 - III 钢的化学成分, 用真空感应电炉冶炼了 Ni 含量分别为 0.79% (质量分数, 下同) 和 1.52% 2 种成分不同的 RPV 模拟钢, 为了能够用热时效处理研究富 Cu 原子团簇的析出过程, 将 Cu 含量提高到 0.5%, 样品的化学成分列于表 1 中。铸锭质量约 40 kg, 经过热锻和热轧得到 4 mm 厚的板材。50 mm × 40 mm 大小的样品经过 880 °C, 30 min 加热, 水淬, 再经过 660 °C, 10 h 回火调质处理, 然后在 400 °C 时效 100 ~ 2 000 h, 选取富 Cu 原子团簇刚析出时的样品, 以便研究富 Cu 原子团簇析出的过程, 以及钢中其它溶质原子对富 Cu 原子团簇析出的影响。

表 1 实验用 RPV 模拟钢的化学成分 (w/%)

Table 1 Composition of experimental PRV model steels (w/%)

Specimen number	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cu
7	0.21	0.31	1.51	0.025	0.006	0.01	0.79	0.56
8	0.24	0.34	1.58	0.033	0.007	0.02	1.52	0.62

经过时效处理后的样品用电火花线切割法从样品中心截取截面为 0.5 mm × 0.5 mm 的棒状样品, 样品长度不小于 20 mm, 然后在显微镜下进行显微电解抛光, 制备曲率半径小于 100 nm 的针尖状样品。利用 Oxford NanoScience 公司生产的三维原子探针对样品进行分析, 数据采集时样品冷却至 50 K, 直流脉冲电压频率为 5 kHz, 脉冲分数为 20%, 所得数据用 PoSAP 软件进行

分析。

为了能够准确分析原子团簇的存在以及团簇中的成分, 应用了最大分离包络法 (MSEM, maximum separation envelope method) 对获得的数据进行了处理^[10], 得到了每个团簇中各种原子的数量和团簇的化学成分。这种方法首先需要设置溶质原子之间 (如 Cu, Ni 或 Mn 原子) 的最大距离 d_{\max} , 还要设置满足 d_{\max} 条件下最少的溶质原子数量 N_{\min} , 在探测到能满足这样条件的溶质原子分布时, 就得到了该种溶质原子的团簇。如果固定 N_{\min} 值 (如 $N_{\min} = 10$), 改变 d_{\max} 值 (如 $d_{\max} = 0.4, 0.5, 0.6$ nm 等), 并使其逐渐增大, 这样探测到的几个团簇, 由于其中溶质原子的距离不同, 也就是溶质原子间的“松散”程度不同, 它们应该处于析出过程的不同阶段, 溶质原子之间距离稍大的团簇应该比溶质原子之间距离更小的团簇处于析出过程的更早期, 比较这些团簇之间的成分差别, 可以研究 Ni, Mn 等合金元素对富 Cu 原子团簇析出过程的影响, 这涉及到富 Cu 原子团簇析出时成核机理方面的问题。

计算团簇数量密度的公式为: $N_v = N_p \times \zeta / (N \times \Omega)$, 其中 N_v 为团簇数量密度; N_p 为分析体积内所检测到的团簇数量, 由 MSEM 分析数据得出; ζ 为检测原子场蒸发后的效率参数, 取决于设备的探测器, 采用 0.6; N 为所搜集的原子总数; Ω 为原子的平均体积。体心立方结构的铁原子 Ω 为 $1.178 \times 10^{-2} \text{ nm}^3$, 由于搜集的所有原子中主要为铁原子, 所以这里用铁原子的体积来计算。

3 结果和讨论

根据硬度值和原子探针的分析结果, 选取了经 100 h 和 1 000 h 时效的 2 组样品进行对比分析, 这组样品能够反映富 Cu 原子团簇析出早期的情况, 也容易观察到 Ni 对富 Cu 原子团簇析出时的影响。图 1 是用原子探针层析技术获得的 Cu 原子分布图, 图中每一个小点是仪器检测得到的一个 Cu 原子空间位置。由于几个样品的针尖曲率半径不同, 收集的原子数量不同, 得到的分析体积也有差异。直接观察 Cu 原子在空间的分布, 可以看出 2 组样品经过 1 000 h 时效后, 都析出了富 Cu 原子团簇, 团簇非常小, 大约只有 1 ~ 2 nm。但是经过 100 h 时效后的样品很难用肉眼观察来判断是否有富 Cu 原子团簇析出, 需要用 MSEM 进行数据处理, 这正是富 Cu 原子团簇析出的初期, 是研究 Ni, Mn 合金元素影响富 Cu 原子团簇析出的最好时机。

在用 MSEM 分析数据时, 设置团簇中最少的溶质原子数量为固定值, $N_{\min} = 10$, 但是设置 d_{\max} 值时要根据具

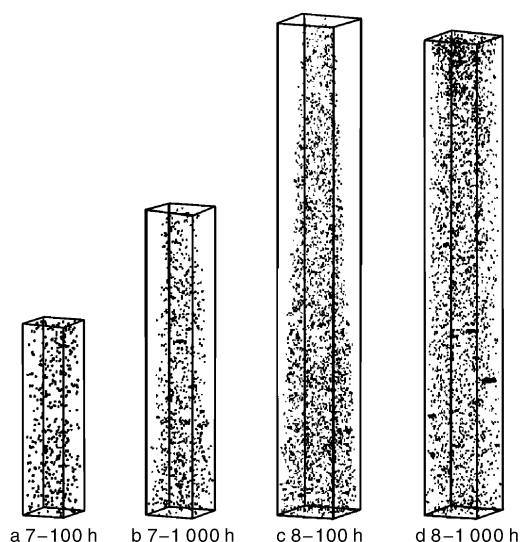


图1 7#和8#样品经过 400 °C, 100 h 和 1 000 h 时效处理后 Cu 原子的空间分布图。空间大小为: (a) 11 nm × 13 nm × 43 nm, (b) 14 nm × 15 nm × 75 nm, (c) 20 nm × 21 nm × 147 nm, (d) 18 nm × 20 nm × 112 nm

Fig. 1 Copper atom maps of 7# and 8# specimens aged at 400 °C, 100 h and at 400 °C, 1 000 h. The box volume: (a) 11 nm × 13 nm × 43 nm, (b) 14 nm × 15 nm × 75 nm, (c) 20 nm × 21 nm × 147 nm and (d) 18 nm × 20 nm × 112 nm

体情况在 0.3 ~ 1.0 nm 之间变化, 这是因为根据 d_{\max} 值的大小, 也就是团簇中原子的“松散”程度, 可以判断团簇在析出过程中所处的不同阶段。用这种方法分析了 7#和 8#样品经过 400 °C 时效 100 h 和 1 000 h 后的 4 种样品, 结果表明 7#样品经过 100 h 时效后并没有富 Cu 原子团簇析出, 而经过 100 h 时效后的 8#样品只有在设置 d_{\max} 值大于 0.7 nm 后才能检测出存在富 Cu 原子团簇, 这是富 Cu 原子团簇析出的早期阶段, 团簇中的 Cu 原子还没有聚集得“十分紧密”, 还没有形成由 Cu 原子单独构成的晶体点阵, 因为 Cu 的晶胞常数为 0.361 5 nm。经过 1 000 h 时效后的 7#和 8#样品在设置 d_{\max} 值为 0.3 ~ 0.4 nm 时就可以检测到富 Cu 原子团簇的存在, 这时已经形成了由 Cu 原子构成的晶体点阵。分析结果说明, 提高钢中的 Ni 含量可以促使富铜原子团簇的析出。

8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效后, 用 MSEM 分析 Cu 原子团簇的分布, 结果如图 2 所示, 图中将 Cu 原子的本底去除, 只留下了 Cu 原子团簇的分布。从图中可以看出, 当设置 $d_{\max} = 0.4$ nm 时, 只得到 1 个 Cu 原子团簇, 当设置 $d_{\max} = 0.5$ nm 时, 得到 4 个 Cu 原子团簇, 依次增加 d_{\max} 值至 0.7 nm, 共得到了 6 个 Cu 原子团簇, 将团簇编号 1 至 6, 表示它们的先后次序。图 3 是这 6 个富 Cu 原子团簇中 Cu, Ni 和 Mn 元素的成分分布, 这些 Cu 团簇中都含有 Ni 和 Mn, 并且常常倾向偏

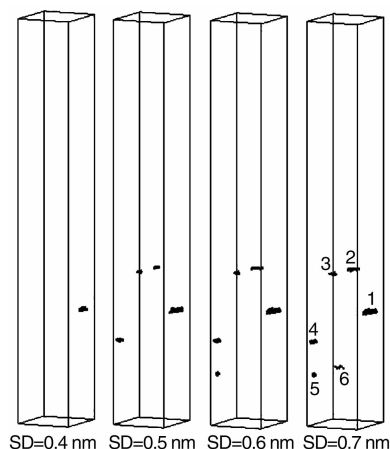


图2 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效处理后, 富 Cu 原子团簇的分布图(当设定 $N_{\min} = 10$, 改变 d_{\max} 值(SD)时可以检测到不同数量的富 Cu 原子团簇, 依次编号为 1 ~ 6)

Fig. 2 Maps of Cu-rich clusters obtained at different d_{\max} values with the same $N_{\min} = 10$ for 8# specimen aged at 400 °C, 1 000 h. The matrix solute atoms have been eliminated based on MSEM

聚在 Cu 团簇和 α -Fe 基体的界面处。应用同样的方法分析了富 Ni 和富 Mn 原子团簇存在的情况, 结果如图 4 所示。当设置 Ni 原子之间的 $d_{\max} = 0.35$ nm 时就可探测到 6 个富 Ni 原子团簇(图 4a), 而设置 Mn 原子之间的 $d_{\max} = 0.6$ nm 时才探测到 5 个富 Mn 原子团簇(图 4b), 这说明形成富 Ni 原子团簇的倾向比形成富 Mn 原子团簇的更明显。这些富 Ni 和富 Mn 原子团簇中 Ni, Cu 和 Mn 成分的分布给出在图 5 和图 6 中。在 Ni 原子间距比较小的富 Ni 原子团簇中($d_{\max} = 0.3$ nm), 都可以探测到 Cu 原子的存在, 这时 Cu 原子的数量还不满足统计富 Cu 原子团簇 $N_{\min} = 10$ 的最低要求, 因而这种含 Cu 的富 Ni 团簇并没有包含在富 Cu 原子团簇的统计中, 但是它们更像是富 Cu 原子团簇析出时的成核阶段, 这说明富 Ni 原子团簇可以作为 Cu 团簇析出时的成核位置。从富 Mn 原子团簇的成分分布图(图 6)中可以看出, 在富 Mn 原子团簇中 Ni 含量较高时, 也可以探测到 Cu 原子的存在。虽然单一的富 Mn 原子团簇与富 Cu 原子团簇的析出不一定有直接的关系, 但是在 Ni 含量较高的富 Mn 原子团簇处也可以作为富 Cu 原子团簇析出时的成核位置。

富 Cu, 富 Ni 和富 Mn 原子团簇的数量密度随 d_{\max} 值的变化如图 7 所示, 模拟钢中 1% ~ 2% 的 Ni 和 Mn 在 400 °C 加热时虽然都可以固溶在 α -Fe 中, 但是由于浓度起伏, 仍然可以形成富 Ni 和富 Mn 的原子团簇, 富 Ni 原子团簇中 Ni 原子之间的距离比 Mn 团簇中 Mn 原子之间的距离更近, 形成富 Ni 团簇的趋势更大。随着时效时间从 100 h 增加到 1 000 h, 不仅富 Cu 原子团簇的数量密度增加, 富 Ni 原子团簇的数量密度增加更加明

显,但是富 Mn 原子团簇的数量密度却有减少的趋势。这种变化趋势不同的原因还有待进一步研究。

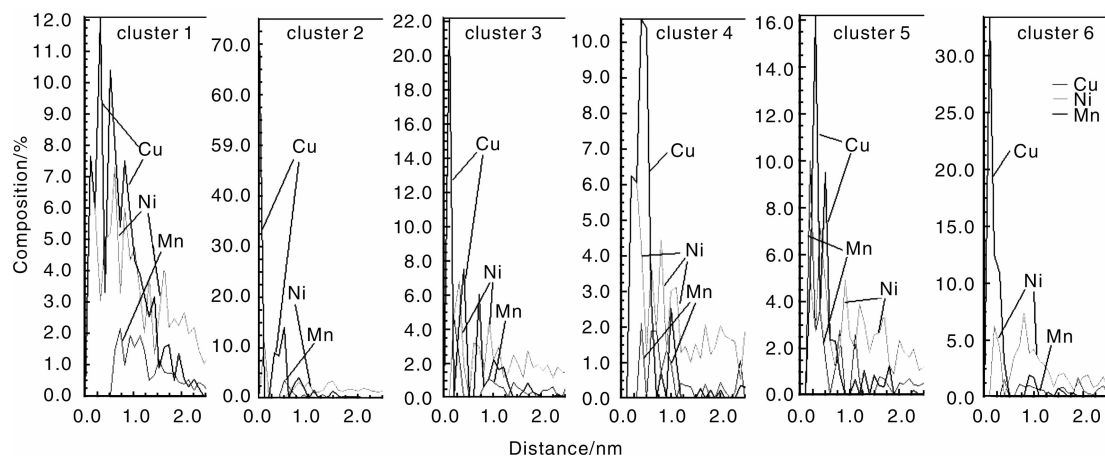


图 3 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效处理后检测到 6 个富 Cu 原子团簇的 Cu, Ni, Mn 成分分布

Fig. 3 Concentration profiles of Cu, Ni and Mn elements in 6 Cu-rich clusters detected in 8# specimen aged at 400 °C for 1 000 h

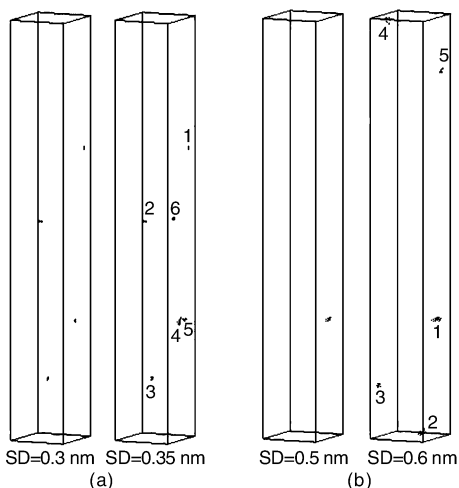


图 4 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效处理后的富 Ni 原子团簇分布图(a)和富 Mn 原子团簇分布图(b) (当设定 $N_{\min} = 10$, $d_{\max} = 0.3$ nm 时检测到 4 个富 Ni 原子团簇, $d_{\max} = 0.35$ nm 时检测到 6 个富 Ni 原子团簇; 当设定 $d_{\max} = 0.5$ nm 时检测到 1 个富 Mn 原子团簇, $d_{\max} = 0.6$ nm 时检测到 5 个富 Mn 原子团簇)

Fig. 4 Maps of Ni-rich and Mn-rich clusters obtained at different d_{\max} values with the same $N_{\min} = 10$ for 8# specimen aged at 400 °C for 1 000 h. The matrix solute atoms have been eliminated based on MSEM

用同样的方法还分析了经过 400 °C, 100 h, 1 000 h 时效的 7#样品和经过 400 °C, 100 h 时效后的 8#样品, 由于篇幅的关系, 这些数据在文章中不再列出。仔细比较这些富 Cu, 富 Ni 和富 Mn 团簇中 Cu, Ni, Mn 的成分随 d_{\max} 值增大时的变化规律, 可以得出这样一些结果:

(1) 在 Cu 原子团簇析出的初期就可以检测到其中含有 Ni, 在大多数情况下还有 Mn。Ni(Mn) 的富集应该

在 Cu 原子发生扩散聚集之前就已经存在, 它们不应该是与 Cu 原子一起扩散而发生聚集的结果。如果是这样, 就应该能够检测到富 Ni 和富 Mn 原子团簇的存在, 实验结果证明了这一推论。

(2) 在富 Ni 原子团簇中, 尤其是在那些 Ni 原子 d_{\max} 值更小一些的团簇中, 都可以检测到 Cu 原子的存在, 这决不是 Cu 原子随机分布的结果。我们用嵌入原子势做过理论上的估算, 当 α -Fe 中存在 1% (原子分数) Ni 时, 这时 Cu 原子发生聚集时所需的能量比没有 Ni 时要低^[12]。在富 Ni 原子团簇中能够检测到 Cu 原子, 说明了富 Ni 原子团簇本身可以作为富 Cu 原子团簇析出时的成核位置。

(3) 在富 Mn 原子团簇中一般都可以检测到 Ni, 在 Ni 含量较高的富 Mn 原子团簇中, 还可以检测到 Cu 原子的存在。富 Mn 原子团簇本身不一定是富 Cu 原子团簇析出时成核的位置, 但是当团簇中 Ni 含量高时, 富 Mn 原子团簇也可以作为富 Cu 原子团簇析出时成核的位置, 因而在富 Cu 原子团簇析出的早期, 在团簇中检测到 Ni 原子时, 也经常可以检测到 Mn 原子。

(4) 富 Cu 原子团簇析出后, 在团簇与 α -Fe 基体的界面处总是含有较高的 Ni 和 Mn, 文献中曾讨论过这种现象^[1,3,6,8], 认为 Ni 和 Mn 的存在降低了 Cu/ α -Fe 之间的界面能, 因而钢中的合金元素 Ni 可以促使富 Cu 原子的析出^[8]。如果富 Ni 原子团簇可以作为富 Cu 原子析出时的成核位置, 而富 Ni 原子团簇中总是含有 Mn, 当 Cu 原子扩散进入 Ni 原子团簇中并在 d_{\max} 值逐渐减小后, 会将 Ni 和 Mn 原子排挤至 Cu 原子团簇的四周, 最后形成了富 Cu 原子团簇被富 Ni 和 Mn 层包裹的“壳层”结构, 这是必然的事情。“包裹着”Ni 或 Mn 的富 Cu 原

子团簇,比单一的富 Cu 原子团簇不易长大,尺寸也更小^[3-4],这种现象说明在 Cu 团簇和 α -Fe 基体界面上存

在 Ni 和 Mn 时应该是增加了界面能,而不是降低了界面能。

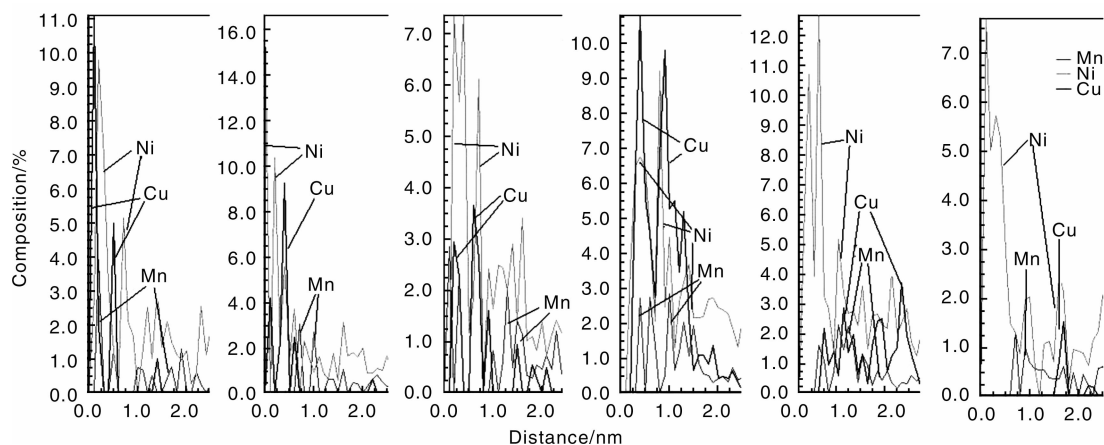


图5 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效处理后检测到 6 个富 Ni 原子团簇的 Ni, Cu, Mn 成分分布

Fig. 5 Concentration profiles of Ni, Cu and Mn elements in 6 Ni-rich clusters detected in 8# specimen aged at 400 °C for 1 000 h

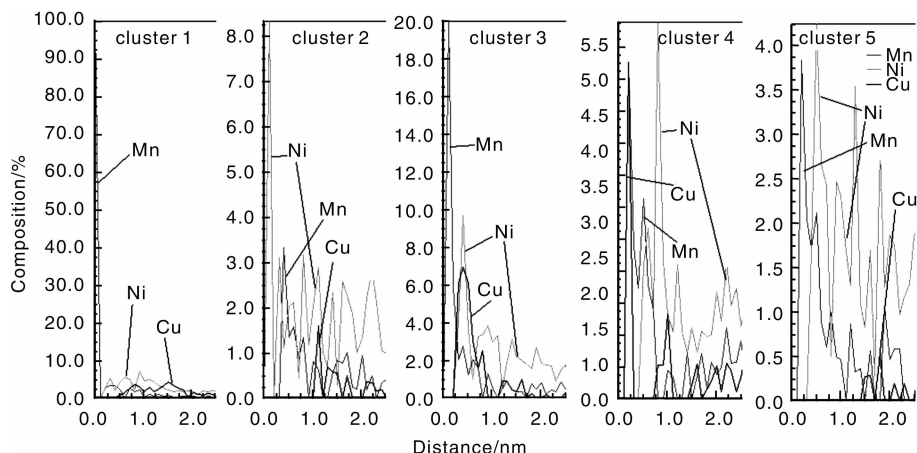


图6 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 时效处理后检测到 5 个富 Mn 原子团簇的 Mn, Ni, Cu 成分分布

Fig. 6 Concentration profiles of Mn, Ni and Cu elements in 5 Mn-rich clusters detected in 8# specimen aged at 400 °C for 1 000 h

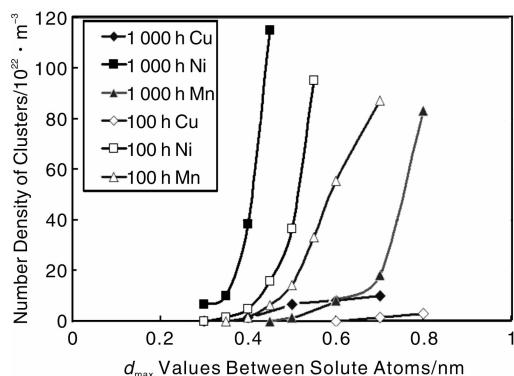


图7 8#样品经过 400 °C, 1 000 h 和 400 °C, 100 h 时效处理后富 Cu, 富 Ni 和富 Mn 原子团簇数量密度随 d_{\max} 值不同的变化

Fig. 7 The variation of Cu-rich, Ni-rich and Mn-rich cluster density with the different d_{\max} values for 8# specimens aged at 400 °C for 1 000 h and at 400 °C for 100 h

(5) 富 Cu 原子团簇析出时,除了容易在 α -Fe 基体中的界面、位错等能量较高处形核之外,还会在富 Ni 原子团簇处成核。增加钢中的 Ni 含量后,会增加富 Ni 原子团簇的数量密度,因而会促使富 Cu 原子团簇析出。这就阐明了合金元素 Ni 会增加 RPV 钢中子辐照脆化敏感性的原因,也许这是最重要的本质原因。

4 结 论

采用原子探针层析技术和热处理模拟方法,研究了压力容器模拟钢中合金元素 Ni 对富 Cu 原子团簇析出的影响,得到了如下一些结论:

(1) 压力容器模拟钢中的合金元素 Ni 从 0.8% (质量分数) 提高至 1.5% 后,会明显促使富 Cu 原子团簇的析出。析出初期的富 Cu 原子团簇中都含有 Ni 和 Mn。

(2) 含有 0.8% ~ 1.5% Ni 的模拟钢在 400 °C 时效

处理时,检测到存在富 Ni 的原子团簇,团簇中的 Ni 含量一般在 10% (原子分数) 以上。在 Ni 原子之间距离 d_{\max} 值比较小的富 Ni 原子团簇中,还可以检测到 Cu 和 Mn。富 Ni 原子团簇可以作为富 Cu 原子团簇析出时的形核位置。

(3) 含有 1.5% (质量分数) Mn 的模拟钢在 400 °C 时效处理时,检测到存在富 Mn 原子团簇,团簇中的 Mn 含量一般在 8% (原子分数) 以上。当 Mn 原子团簇中含有较高的 Ni 时,它也可以成为富 Cu 原子团簇析出时成核的位置。

(4) 富 Cu 原子团簇析出时会在富 Ni 的原子团簇中成核,由于 Ni 原子团簇中总是含有 Mn,当 Cu 原子扩散进入 Ni 原子团簇中并在 d_{\max} 值减小后,逐渐将 Ni 和 Mn 原子排挤至 Cu 原子团簇的四周,最后形成了富 Cu 原子团簇被富 Ni 和 Mn 层包裹的“壳层”结构。

(5) 由于钢中的合金元素 Ni 会形成富 Ni 原子团簇, Ni 原子团簇又是富 Cu 原子团簇析出时成核的地方,因而增加钢中的 Ni 含量会促使富 Cu 原子团簇的析出。这是合金元素 Ni 会增加 RPV 钢中子辐照脆化敏感性的本质原因。

参考文献 References

- [1] IAEA-TECDOC-1441. *Effects of Nickel on Irradiation Embrittlement on Light Water Reactor Pressure Vessel Steels* [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005.
- [2] Auger P, Pareige P, Welzel S, *et al.* Synthesis of Atom Probe Experiments on Irradiation-Induced Solute Segregation in French Ferritic Pressure Vessel Steels [J]. *J Nucl Mater*, 2000, 280: 331–344.
- [3] Miller M K, Wirth B D, Odette G R. Precipitation in Neutron-Irradiated Fe-Cu and Fe-Cu-Mn Model Alloys: a Comparison of APT and SANS Data [J]. *Mater Sci Eng*, 2003, A353: 133–139.
- [4] Miller M K, Sokolov M A, Nanstad R K, *et al.* APT Characterization of High Nickel RPV Steels [J]. *J Nucl Mater*, 2006, 351: 187–196.
- [5] Toyama T, Nagai Y, Tang Z, *et al.* Nanostructural Evolution in Surveillance Test Specimens of Commercial Nuclear Reactor Pressure Vessel Studied by Three Dimensional Atom Probe and Positron Annihilation [J]. *Acta Mater*, 2007, 55: 6 852–6 860.
- [6] Miller M K, Russel K F, Embrittlement of RPV Steels: an Atom Probe Tomography Perspective [J]. *J Nucl Mat*, 2007, 371: 145–160.
- [7] Miller M K, Chernobaeva A A, Shtrombakh Y I, *et al.* Evolution of the Nanostructure of VVER-1000 PRV Materials under Neutron Irradiation and Post Irradiation Annealing [J]. *J Nucl Mat*, 2009, 385: 615–622.
- [8] Cerezo A, Hirisawa S, Rozdilsky I, *et al.* Combined Atomic-scale Modeling and Experimental Studies of Nucleation in the Solid State [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 2003, A361: 463–476.
- [9] Lozano-Perez S, Sha G, Titchmarsh J M, *et al.* Comparison of the Number Density of Nanosized Cu-Rich Precipitates in Ferritic Alloys Measured Using EELS and EDX Mapping, HREM and 3DAP [J]. *J Mater Sci*, 2006, 41: 2 559–2 565.
- [10] Miller M K. *Atom Probe Tomography: Analysis at the Atomic Level* [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.
- [11] Zhou Bangxin (周邦新), Liu Wenqing (刘文庆). 三维原子探针及其在材料科学研究中的应用 [J]. *Materials Science and Technology* (材料科学与工艺), 2007, 15 (3): 405–408.
- [12] Lin Mindong (林民东), Zhu Juanjuan (朱娟娟), Wang Wei (王伟), *et al.* 核反应堆压力容器模拟钢中富 Cu 原子团簇的析出与嵌入原子势计算 [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2010, 59(2): 1 163–1 168.

科学家发明依靠光照可自我修复的新型塑料

手机漂亮的塑料外壳被刮擦了一条深痕怎么办? 将来也许不用更换, 只要用一束光照照受损部位, 擦痕就会消失。

瑞士弗里堡大学科学家在最新一期英国《自然》杂志上报告了一种具有神奇自我修复能力的塑料。与塑料通常由长链分子构成不同, 这种塑料的成分是较短的分子。同时, 塑料中掺杂了一些锌离子和镧离子, 这些离子把这些较短的分子连成长链。

锌离子和镧离子的特点是能够吸收紫外线。当这种新型塑料出现伤痕时, 只需要用紫外线照射受损部位, 这一局部就会受热融化并自动修复损伤。

实验显示, 在一块厚度为 0.4 mm 的新型塑料板上划出一条深 0.2 mm 的痕迹, 只需要经过 2 次短时间的紫外线照射, 划痕就会消失。

(来源: 科学网)