

# 伽马辐照诱导 Ti35 合金中 Ta 元素偏析及其对力学性能的影响

李欢<sup>1,2</sup>, 杨博海<sup>1,3</sup>, 徐建平<sup>1</sup>, 吴金平<sup>1</sup>

(1. 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(3. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 基于乏燃料后处理高放射性服役环境, 通过施加不同辐照剂量伽马射线, 研究了伽马辐照对于 Ti35 合金组织结构演变规律, 建立了辐照诱导组织-性能间构效关系。结果表明, 伽马辐照诱导 Ti35 合金产生大量缺陷, 且随辐照剂量升高, 缺陷密度也随之增加。辐照致使 Ti35 合金基体中 Ti 原子快速迁移, 导致晶内产生体心立方富 Ta 相, 且此相中 Ta 含量及尺寸变化与辐照剂量呈高度依赖关系。伽马辐照降低了 Ti35 合金的延伸率, 通过界面分析确定其与富 Ta 相主导的变形及界面失效机制有关。辐照前后 Ti35 合金均呈现韧性断裂模式, 通过观察断口形貌发现伽马辐照显著增大了断口微孔尺寸及密度。

**关键词:** Ti35 合金; 伽马辐照; 析出相; 力学性能; 乏燃料后处理

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)08-1929-06

## 1 引言

随着我国核电事业快速发展, 乏燃料堆积数量也逐渐增加, 有效利用压水堆乏燃料的铀及次锕系元素(如铀、钼及钍)等有用核素达到再循环, 并减少最终高放射性废物产生是关系到核能是否可持续发展的关键问题<sup>[1-3]</sup>。Ti35 合金(名义成分 Ti-6wt%Ta)是西安稀有金属材料研究院有限公司自主研发的一种近  $\alpha$  型钛合金, 具有优异力学、耐腐蚀及可加工性能, 已成功应用于我国乏燃料后处理关键设备(如溶解器和蒸发器等)的结构材料<sup>[4-6]</sup>, 该材料及设备长期服役于强硝酸腐蚀性、强放射性以及高温等综合性复杂条件<sup>[7-10]</sup>。

典型的压水堆燃料组件退役后冷却数月的伽马射线能谱主要以裂变产物<sup>137</sup>Cs 及活化产物<sup>60</sup>Co 为主, 其特征峰伽马射线能量范围为 0.6~1.33 MeV, 并且后处理设备用材在 40 年服役期结束后其伽马射线累积剂量将达到 30 MGy<sup>[11-14]</sup>。然而, 目前关于金属材料伽马辐照研究较少。Zahra 等人<sup>[15]</sup>采用 158 kGy 剂量对氮化硼纳米管进行伽马辐照实验, 发现伽马射线严重影响此纳米复合材料拉伸性能, 经辐照后伸长率降低 10 倍, 而抗拉强度没有表现出明显变化。Kumar 等人<sup>[16]</sup>采用伽马射线对 SS304 及 SS316 结构钢焊接接头进行长达 96 h 辐照实验。结果表明, 伽马辐照诱导了焊接接头发生相变现象。

长期伽马辐照显著降低了接头处铁素体密度, 奥氏体含量呈激增趋势。Björkbacka 等人<sup>[17]</sup>研究了不同伽马辐照剂量下纯 Cu 水腐蚀机制, 结果表明伽马辐照导致纯 Cu 在缺氧水腐蚀速率加剧, 表面氧化膜厚度显著提升。以上研究表明, 伽马辐照对于材料结构及性能产生严重影响。

作为乏燃料后处理用结构材料, 目前 Ti35 合金受伽马射线强辐照环境致使微观结构损伤及宏观力学性能演变机制尚未得到充分研究。因此本工作通过<sup>60</sup>Co 同位素设备进行了伽马射线辐照实验, 模拟了乏燃料短寿命裂变碎片的辐照放射性。采用透射电子显微镜及拉伸试验测试研究了伽马射线辐照剂量变化对 Ti35 合金组织结构及力学性能的影响规律。以期揭示级联过程对于 Ti35 合金组织结构稳定性变化机制, 建立辐照缺陷与宏观力学性能间构效关系。

## 2 实验

采用真空电弧熔炼制备 Ti35 合金, 并通过 850 °C 高温锻造及 650 °C 退火工艺破碎粗大组织, 产生完全等轴状晶粒。伽马辐照实验过程中, <sup>60</sup>Co 射线装置采用 46 根棒(3.09×10<sup>4</sup> Ci), 在室温下, 以 3.2 kGy/h 的剂量率, 对尺寸为 15 mm×15 mm×2 mm 的 Ti35 样品进行了伽马射线辐照, 采用液相剂量测量系统进行了辐照剂量测量。所

收稿日期: 2025-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(12205242); 西安英才计划菁英人才项目(XAYC250059)

作者简介: 李欢, 男, 1990 年生, 博士, 西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016, E-mail: lihuan@nuaa.edu.cn

有样品分别接受 5000 及 10 000 kGy 剂量的伽马射线辐照作为乏燃料后处理过程伽马射线辐照的短期累积剂量。

采用线切割将伽马辐照后不同剂量 Ti35 合金加工成尺寸为 50 mm×12 mm×3 mm(平行段尺寸为 17 mm×4 mm×2 mm)的拉伸试样。采用 HY-A-JC-007 型电子万能试验机进行拉伸性能测试,拉伸速率控制在 1 mm/min。

采用 SU5000 场发射扫描电子显微镜对原始 Ti35 合金进行电子背散射衍射(EBSD)及断口形貌表征,观察其显微组织及相分布。通过 Talos F200X 场发射透射电子显微镜(TEM)对不同剂量辐照 Ti35 合金组织进行观察。采用 X 射线衍射仪(XRD)对未辐照 Ti35 合金进行物相分析。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 辐照前组织形貌

图 1 为未辐照 Ti35 合金显微组织、晶粒尺寸分布、TEM 照片、EDS 元素面分布及 XRD 图谱。经过高温锻造及 650 °C 退火后, Ti35 合金呈现完全再结晶状态,大角度晶界占比达到 78.6%,小角度晶界占比为 21.4%,如图 1a 所示。可以观察到伽马辐照前 Ti35 合金晶粒呈等轴状分布,通过图 1b 晶粒数据统计分析确定,平均晶粒尺寸约为 18.6 μm。通过图 1c 相图确定, Ti35 合金呈单相密排六方结构,表明前期变形及热处理工艺并未对其相结构产生变化。采用 TEM 对伽马辐照前 Ti35 合金元素分布分析,确定 Ti 及 Ta 元素均匀分布,并无元素偏析现象,

如图 1d 和 1e 所示。通过 XRD 物相检测分析可知(图 1f),辐照前 Ti35 合金仅存在 α 相,无其余物相产生。

通过 TEM 对伽马辐照前 Ti35 合金显微结构进行研究,如图 2 所示。通过图对 2a 和 2b Ti35 合金晶界、基体及孪晶处 TEM 分析,可确定辐照前 Ti35 合金并无明显位错缺陷产生。通过详细表征 Ti35 合金孪晶结构,如图 2b~2d 所示。可发现该孪晶尺寸约为 278 nm,通过对其衍射标定,确定该孪晶为 {10 $\bar{1}$ 2}<10 $\bar{1}$  $\bar{1}$ > 拉伸孪晶。

#### 3.2 辐照后组织形貌

图 3 为 5000 kGy 剂量下伽马辐照 Ti35 合金微观结构分析。通过对其缺陷表征可知,伽马辐照后致使基体产生大量位错缺陷。图 3a 为 5000 kGy 剂量伽马辐照后 Ti35 合金基体明场形貌,可以发现相比于辐照前无缺陷特征,辐照后基体产生大量位错缺陷。众多位错线相互交汇缠结,形成大量小尺寸位错墙。Li 等人<sup>[18]</sup>采用 Monte Carlo 模拟发现, Ti35 合金经过伽马射线辐照之后产生的二次电子,其能量远高于合金初级 Ti 或 Ta 原子的离位阈能,从而导致空位和间隙转变为 Frank 位错环,大量位错环聚集产生位错纠缠。值得注意的是,经伽马辐照后 Ti35 合金基体出现椭圆形析出相,如图 3b 所示。通过对其进行 EDS 元素面分析可发现,大量 Ta 元素富集于此相区域, Ti 元素大致均匀分布。基于此,对此富 Ta 相进行 EDS 线扫描及点元素分析,确定其 Ta 含量约为 37.0wt%。根据 Ti-Ta 相图以及对该富 Ta 相进行选区衍射标定,综合确定该相为体心立方结构。在 高能伽马辐

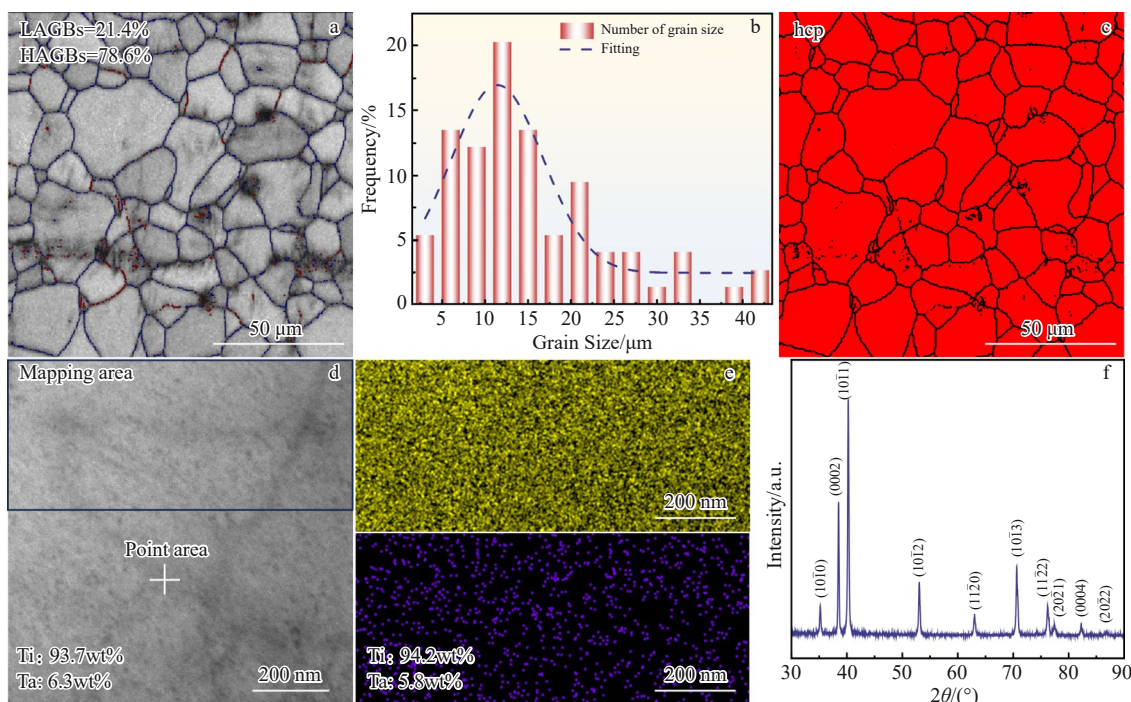


图 1 未辐照 Ti35 合金显微组织、晶粒尺寸分布、TEM 照片、EDS 元素面分布及 XRD 图谱

Fig.1 Distribution of BC and grain boundary angles (a), grain size distribution (b), TEM image (c), EDS element mappings (d-e), and XRD pattern (f) of unirradiated Ti35 alloy

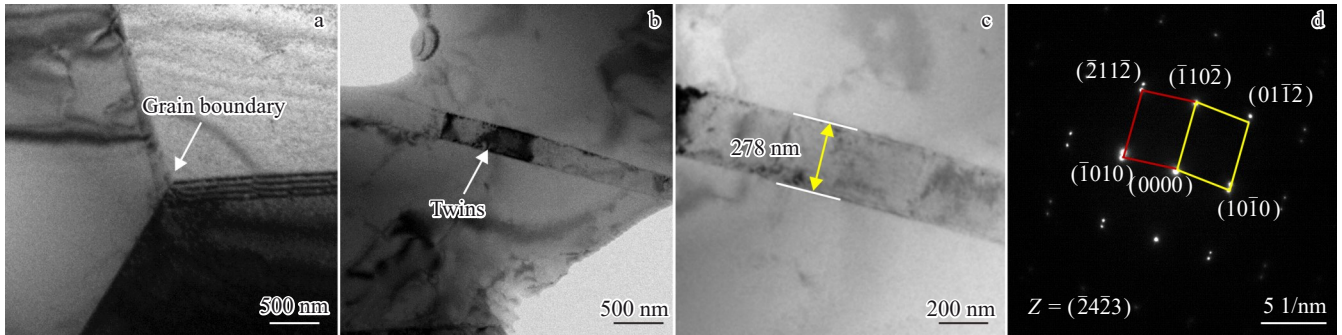


图2 未辐照 Ti35 合金显微结构

Fig.2 Microstructures of unirradiated Ti35 alloy: (a) grain boundary morphology; (b) twin distribution; (c) twin size; (d) SAED pattern of twins

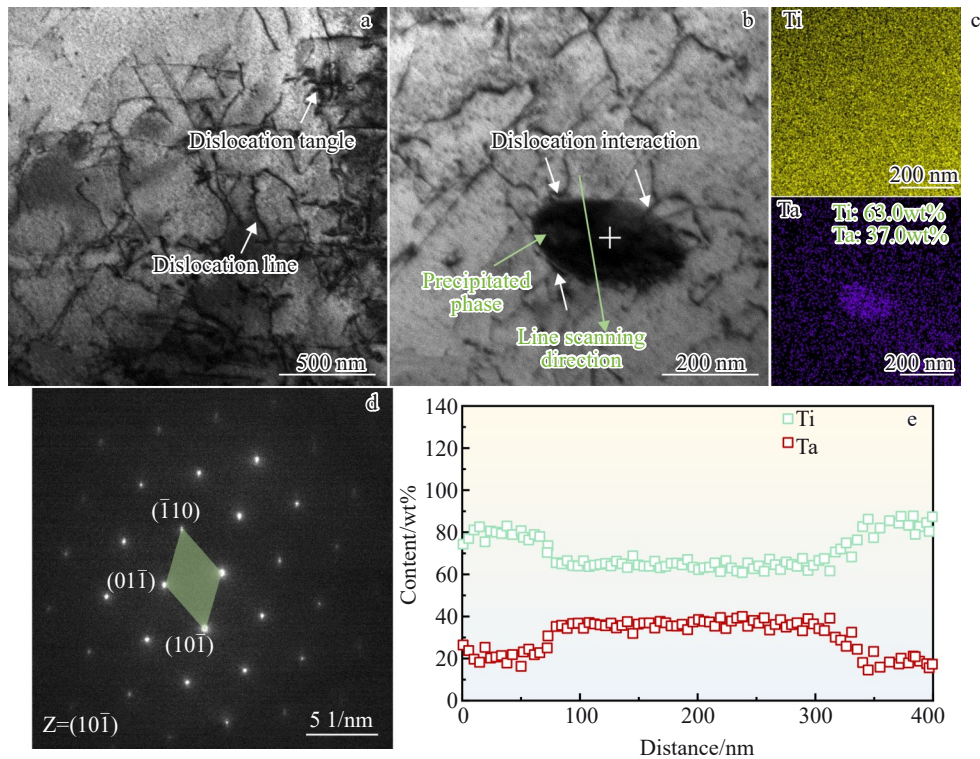


图3 5000 kGy 剂量辐照后 Ti35 合金微观结构

Fig.3 Microstructures of Ti35 alloy after 5000 kGy dose irradiation: (a) dislocation distribution; (b) morphology of the second phase; (c) element mappings of Ti and Ta; (d) SAED pattern; (e) Ta-rich phase line scanning

照作用下,过饱和点缺陷逐步生成并汇聚。Ti 原子因其具有较小原子半径,在随点缺陷扩散时快速向晶界等区域迁移,而 Ta 原子作为慢扩散组元,逐步在晶粒内部富集成富 Ta 第二相<sup>[19-20]</sup>。此外,通过图 3b 可观察到,辐照诱导富 Ta 相与位错产生明显交互作用,其显著阻碍了位错滑移,表明其对 Ti35 合金基体起到一定硬化效果。

图 4 为 10 000 kGy 剂量下伽马辐照后 Ti35 合金显微组织分析。经更高剂量伽马辐照后,Ti35 合金基体位错含量显著增加,大量位错缠结形成长条状位错墙,如图 4a 所示。进一步统计了不同伽马辐照剂量 Ti35 合金基体位错密度及分布,如图 4d 所示。结果表明 10 000 kGy 剂量其分布频率及密度均大于 5000 kGy 剂量辐照样品。

进一步表明,随伽马辐照剂量升高,缺陷总密度和缺陷间的相互作用急剧增强。因此,Ti35 合金基体为了降低由大量缺陷引起的高内能,会自发进行位错重排和自组织,进行形成大尺寸位错墙<sup>[21-23]</sup>。图 4b 为 10 000 kGy 剂量伽马辐照后 Ti35 合金基体诱导富 Ta 相形貌,基于衍射标定(图 4e)确定此相仍为体心立方结构。通过观察不同剂量辐照致析出相等效面积可确定,提高辐照剂量导致析出相尺寸显著增大,且通过测量(等效面积)确定增幅约为 97%。根据图 4c 及 4f 中元素分析确定富 Ta 相中 Ta 原子占比为 51.2wt%,相比于 5000 kGy 辐照剂量下,提升辐照剂量显著提高了 Ta 原子富集程度。表明,辐照剂量升高进一步诱导 Ti 原子迁移行为,导致 Ta 原子在晶内富集

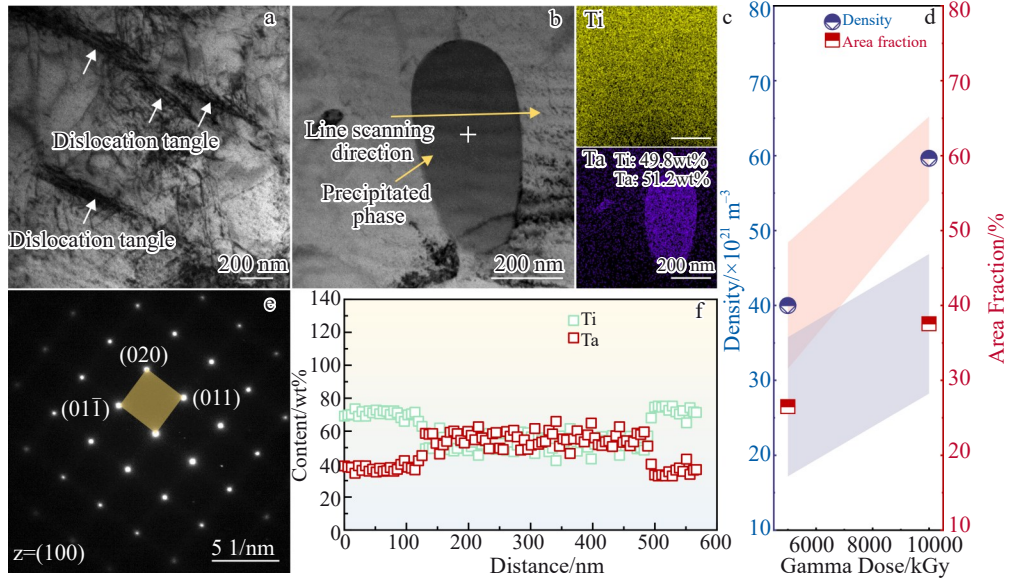


图4 10 000 kGy 剂量辐照后 Ti35 合金微观结构

Fig.4 Microstructures of Ti35 alloy after 10 000 kGy dose irradiation: (a) dislocation distribution; (b) morphology of the second phase; (c) element mappings of Ti and Ta; (d) dislocation density and area fraction; (e) SAED pattern; (f) Ta-rich phase line scanning

数量及富 Ta 相尺寸显著提升。

图 5a 为 Ti35 合金内部富 Ta 相与基体界面高分辨透射显微(HRTEM)分析,通过对其界面进行傅里叶快速变化可确定,该区域为基体密排六方结构与富 Ta 相体心立方结构共存界面。通过对其进行几何相位分析(GPA)可发现,此界面处存在大量缺陷(图 5b),这与前文明场像观察结果一致。由于两相晶体结构(体心立方和密排六方)及原子间距(图 5c 和 5d)差异,辐照产生的过饱和点缺陷会趋向于界面迁移。间隙及空位缺陷的非平衡聚集

会显著放大界面固有的内应力场,在界面附近产生极高的局部应力集中。并且,界面处高密度的位错缠结使得该区域变得非常脆,极易成为微裂纹的萌生地。裂纹会优先沿着这些被位错弱化的界面扩展。

### 3.3 力学性能分析

通过图 6 对不同剂量辐照下 Ti35 合金拉伸性能进行检测分析。图 6a 为不同伽马辐照剂量下 Ti35 合金应力应变曲线,可以发现随辐照剂量升高,Ti35 合金延伸性显著降低,抗拉强度略有提高。通过对不同剂量伽马辐照

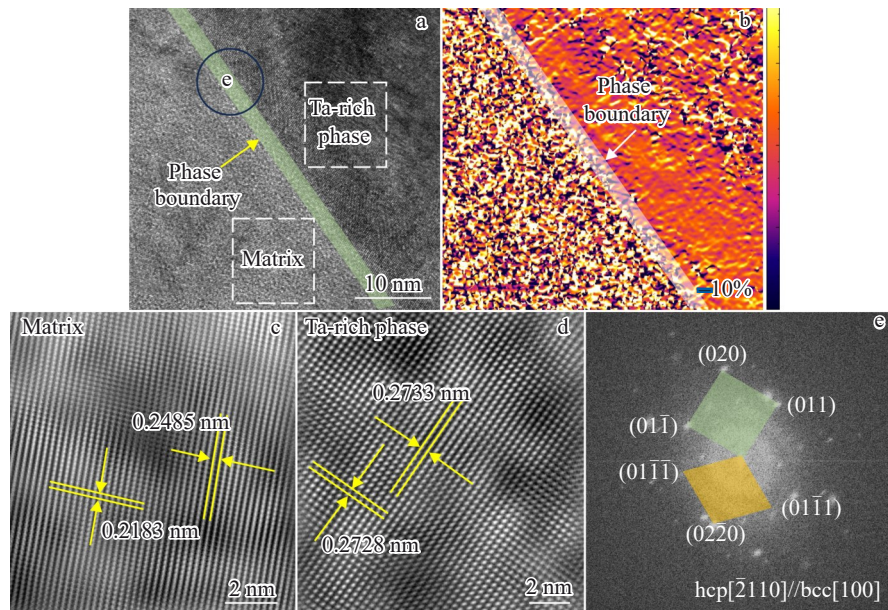


图5 富 Ta 相高分辨 TEM 分析

Fig.5 HRTEM analysis of Ta-rich phases: (a) Ta-rich phases and interface structure; (b) GPA map at the interface; (c) HRTEM image of matrix; (d) HRTEM image of Ta-rich phase; (e) Fourier transform calibration at the interface

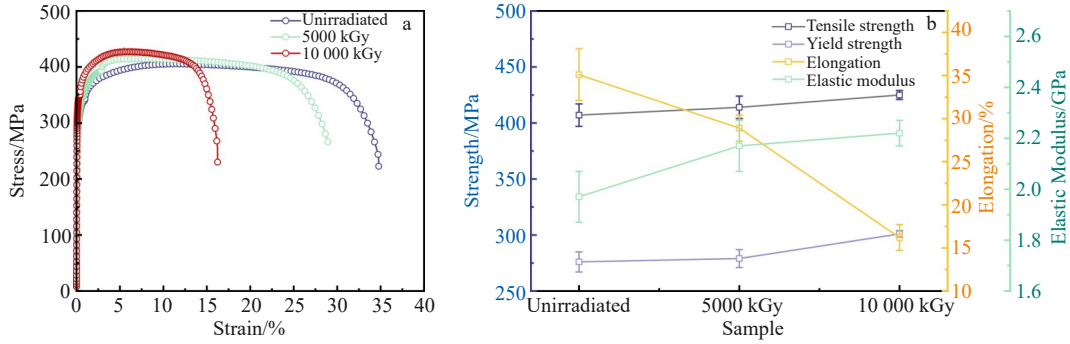


图6 不同伽马辐照剂量对力学性能的影响

Fig.6 Effects of different gamma irradiation doses on mechanical properties: (a) stress-strain curves and (b) statistics on mechanical properties

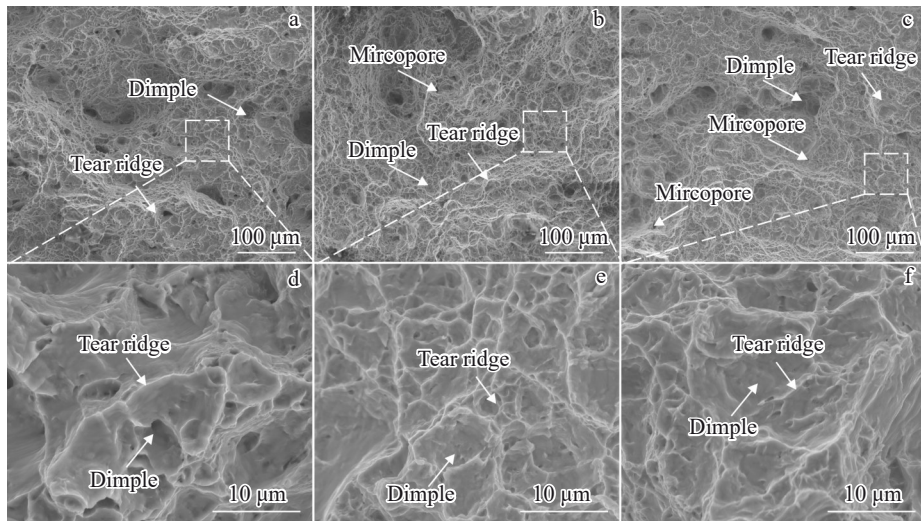


图7 不同辐照剂量 Ti35 合金断口形貌

Fig.7 Fracture morphologies of Ti35 alloy: (a, d) unirradiated, (b, e) 5000 kGy, and (c, f) 10 000 kGy

作用下 Ti35 合金力学性能统计,可确定未辐照状态下 Ti35 合金抗拉强度为 407 MPa,经 5000 kGy 及 10 000 kGy 剂量辐照后仅略微增加为 414 及 425 MPa,但延伸率由 35.1% 急剧降低为 28.9% 及 16.2%。结合前文对于富 Ta 相及其界面分析,此现象归因于伽马辐照诱导富 Ta 软相主导的变形及界面失效机制。Wang 等人<sup>[24]</sup>通过对 Ti-Ta 合金强化机理研究发现,富 Ta 相对于 Ti 基体存在软化行为,对于 Ti35 合金强化效果不明显。因此不同伽马辐照剂量致使 Ti35 合金抗拉强度增幅较小与此存在重要联系。根据图 5b 中富 Ta 相与基体界面存在高密度缺陷可确定,较软富 Ta 相界面产生巨大应力集中。变形过程裂纹易沿此界面网络迅速扩展,从而导致延伸率急剧降低。

图 7 为不同伽马辐照剂量下 Ti35 合金拉伸断口形貌。可以发现 3 种样品均呈现韧性断裂模式。其中图 7a 为未辐照 Ti35 合金断口形貌,可以其发现断裂面表现出大量韧窝与撕裂棱共存特征。即未辐照 Ti35 合金断裂模式为以韧性断裂为主,但伴随有明显的局部塑性受限特征。其韧窝尺寸大小不一、分布相对均匀,表明在断裂前经历了显著塑性变形。图 7d 为未辐照 Ti35 合金断口

形貌放大图像,可以看出其韧窝较深,撕裂棱较高且明显。经 5000 kGy 伽马辐照后,根据其宏观断口形貌(图 7b)可发现仍存在大量韧窝及撕裂棱。值得一提的是,在此样品断口处发现较多数量微孔,这与其经辐照后高密度缺陷或富 Ta 相界面断裂模式有关。通过观察 5000 kGy 伽马辐照 Ti35 合金断口形貌放大图像可发现,其韧窝及撕裂棱均存在明显变浅趋势,此为该试样延伸率降低的直观表现之一。图 7c 为经 10 000 kGy 伽马辐照后 Ti35 合金断口宏观形貌,可以发现微孔数量明显增加,且尺寸略有增大。通过观察其断口放大图像可发现,韧窝数量降低,撕裂棱再次变浅,并且可以观察到韧窝内部存在撕裂痕迹。这一现象进一步证明了高剂量伽马辐照 Ti35 合金延伸率急剧下降。

#### 4 结论

- 1) Ti35 合金经伽马辐照后产生大量缺陷,随辐照剂量升高,经位错缠结产生位错墙尺寸及密度显著增加。
- 2) 伽马辐照致使 Ti 原子随点缺陷快速迁移,导致晶内产生体心立方结构富 Ta 第二相,且此相随辐照剂量的

增大呈现 Ta 含量增加及尺寸增大趋势。

3) 随辐照剂量增加, Ti35 合金强度略有增加, 但延伸率显著降低。这与伽马辐照诱导富 Ta 软相主导的变形及界面失效机制有关。

4) 不同伽马辐照剂量下 Ti35 合金断口均呈现韧性断裂模式。随辐照剂量的增加, 断口处微孔尺寸及密度逐步提升, 韧窝及撕裂棱浅化程度加剧, 这是诱导其延伸率显著降低的主要原因。

#### 参考文献 References

- [1] Qi Boyi(齐博毅), Liu Chengze(刘承泽), Yang Qinghao(杨庆浩) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(12): 4483
- [2] Wang C, Yu G, Wang J. *Nuclear Engineering and Design*[J], 2024, 422: 113138
- [3] Wu Junyu(吴俊宇), Xu Jianping(徐建平), Liu Houlong(刘后龙) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(7): 1992
- [4] Xu Jianpin(徐建平), Su Hangbiao(苏航标), Guo Dizi(郭荻子), *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(4): 1124
- [5] Xu J P, Lv J, Liu C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2025, 940: 148526
- [6] Li H, Yang B, Xu J *et al. Vacuum*[J], 2025, 238: 114259
- [7] Jia Tianyi(贾天一). *Study on the Speciation Analysis Method of <sup>129</sup>I in Spent Fuel Solution*(乏燃料溶解液中<sup>129</sup>I 的形态分析方法研究) [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2024
- [8] Luo Tianjun(罗天骏). *Research on Real-Time Simulation Model of Continuous Dissolution Process of Spent Fuel Pellets*(乏燃料芯块连续溶解过程实时仿真模型研究) [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022
- [9] Shen Shuo(沈 烁), Zhang Yukai(张裕凯). *Shandong Chemical Industry*(山东化工)[J], 2024, 53(12): 263
- [10] Qu Yisen(屈义森), Song Pinling(宋品玲), Zhang Cheng(张 成) *et al. Chemical Equipment Technology*(化工装备技术)[J], 2016, 37(6): 32
- [11] Sayyed I M, Almuqrin H A. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*[J]. 2025, 14(8): 083005
- [12] Avşar G S, Gökmen U. *Radiation Physics and Chemistry*[J], 2025, 237: 113130
- [13] Souza C A, Aristone F, Cortez A A M *et al. Nuclear Technology*[J], 2025, 211(8): 1609
- [14] Soltanifar F, Ebrahimbasabi E, Shahidi M M. *Ceramics International*[J], 2025, 51: 21461
- [15] Zahra Y, Hung H, Michael J *et al. Journal of Materials Research*[J], 2022, 37(24): 4566
- [16] Kumar P, Soni R K, Dehiya B S *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2021, 47(19): 6545
- [17] Björkbacka Å, Hosseinpour S, Johnson M *et al. Radiation Physics and Chemistry*[J], 2013, 92: 80
- [18] Li H, Liu C Z, Xu J P *et al. Journal of Materials Science*[J], 2022, 57(43): 20521
- [19] Lin H Q, Ling J F, Chen W M *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2022, 32(12): 3963
- [20] Song T, Tang H, Li Y *et al. Corrosion Science*[J], 2020, 169: 108600
- [21] Demirci K, Ozalp A, Gurbuz S *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2025, 923: 147702
- [22] Wei L, Teng X, Ding Z *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2024, 186: 1
- [23] Geng Y J, Wang C Y, Yan J X *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2022, 35(11): 1787
- [24] Wang C F, Cai Q, Liu J X *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2022, 21: 2868

## Gamma Irradiation Influence on Ta Element Segregation and Mechanical Properties of Ti35 Alloy

Li Huan<sup>1,2</sup>, Yang Bohai<sup>1,3</sup>, Xu Jianping<sup>1</sup>, Wu Jinping<sup>1</sup>

(1. Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd, Xi'an 710016, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(3. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the highly radioactive service environment of spent fuel reprocessing, the influence of gamma irradiation on the structure of Ti35 alloy was studied by applying gamma rays at different irradiation doses, and the structure-activity relationship between irradiation-induced structure and performance was established. The results show that gamma irradiation induces a large number of defects in Ti35 alloy, and the defect density increases with the increase in irradiation dose. The rapid migration of Ti atoms in the Ti35 alloy matrix caused by irradiation results in the formation of a body-centered cubic Ta-rich second phase in the granules, and the Ta content and size of this phase further increase with the increase in irradiation dose. Gamma irradiation significantly reduces the elongation of Ti35 alloy, which is related to the deformation and interface failure mechanism dominated by Ta-rich soft phase according interface analysis. The Ti35 alloy shows ductile fracture mode before and after irradiation, and it is found that gamma irradiation significantly increases the size and density of fracture micropores by observing the fracture morphology.

**Key words:** Ti35 alloy; gamma irradiation; precipitated phase; mechanical properties; spent fuel reprocessing