

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0483

## 长期中子辐照 Al-Mg-Si 合金的压缩力学行为\*

胡 凌<sup>1</sup>, 郑 航<sup>2</sup>, 冯琦杰<sup>3</sup>, 周 韦<sup>3</sup>, 叶想平<sup>1</sup>, 卢 磊<sup>4</sup>

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999;
2. 中国科学技术大学近代力学系材料行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;
3. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621999;
4. 西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 利用材料试验机及分离式霍普金森压杆装置, 开展长期中子辐照后的 Al-Mg-Si 合金(反应堆内实际服役近 30 年的 LT21 铝合金)在不同温度和应变率下压缩力学行为的实验研究, 获得了实验温度、应变率对其屈服强度及流动应力的影响规律。结果表明: 材料在一定的温度区间(-40~300 ℃)和应变率区间(0.001~3 000 s<sup>-1</sup>)内, 分别呈现出较为明显的温度效应与正应变率效应; 其中在较低的温度(-80~-40 ℃)和较高的应变率(3 000~5 000 s<sup>-1</sup>)区间力学性能受温度和应变率变化的影响较小; 当温度升至 300 ℃ 时, 材料的塑性变形行为已趋于理想塑性流动。根据前述实验结果, 计及材料内部的微观辐照缺陷对力学性能的影响, 建立了考虑辐照损伤的 Zerilli-Armstrong 本构模型, 模型的计算结果与前述实验结果吻合较好。结合文献中高纯铝的微观辐照缺陷的演化数据, 对不同快中子辐照剂量 LT21 铝合金的屈服强度, 以及另两个来自反应堆内不同受辐照区域试样在不同应变率和温度下的屈服强度进行了计算。上述研究表明, 本文建立的考虑辐照损伤的 Z-A 本构方程不仅能较好地反映长期中子辐照后的 Al-Mg-Si 合金宏观应力和应变、应变率、温度等参数的关系, 也能针对位错运动及辐照硬化机制进行较好地描述, 并且能够为反应堆内相应结构元件的设计、运行和安全评估提供一定的参考。

**关键词:** 冲击动力学; 辐照损伤; Z-A 本构模型; SHPB; 中子辐照 Al-Mg-Si 合金

**中图分类号:** O341 **国标学科代码:** **文献标志码:** A

核反应堆中的金属结构元件在服役过程中, 受到大量的高能粒子或射线的照射, 发生显著的物理、力学性能及组织结构的变化, 使结构元件的完整性乃至反应堆运行的安全性受到影响。铝合金因其具有中子吸收截面较小、辐照感应放射能衰减快、反应堆壁溅蚀小以及较低温度下耐辐照等特性, 常被用于研究试验堆或生产堆的结构元件材料。反应堆内强度要求较高的结构元件通常为具有良好的耐蚀性、韧性、锻造性能及中等强度的 Al-Mg-Si 合金, 例如低温反应堆中的燃料包壳、堆芯围板、回路盖板等。反应堆内部各种高能粒子或射线对结构材料的影响中, 以中子的影响为最大<sup>[1]</sup>, 中子中能量较小的热中子( $E < 0.625$  eV)有一定几率会被 Al 原子核俘获, 发生 ${}^{27}_{13}\text{Al} + n_{\text{th}} \rightarrow {}^{28}_{13}\text{Al} + \gamma$ 核反应( $n_{\text{th}}$  为热中子,  $\gamma$  为  $\gamma$  射线), 其反应产物 ${}^{28}_{13}\text{Al}$  不稳定, 经过半衰期约为 2.31 min 的  $\beta$  衰变后转变为较稳定的嬗变产物 ${}^{28}_{14}\text{Si}$ , 使铝合金内部的溶质、杂质组分和形貌发生改变。而中子中能量较大的快中子( $E > 0.1$  MeV)会撞击晶格原子形成大量的离位原子, 并通过进一步的级联碰撞演化形成更复杂的辐照缺陷结构, 例如位错环和辐照空洞。热中子产生的嬗变元素 ${}^{28}_{14}\text{Si}$  和快中子引发的辐照缺陷与基体点阵排列的差异会导致晶格产生畸变, 阻碍位错运动, 在宏观上引起铝合金材料强度升高、韧性下降, 发生辐照硬化、辐照脆化和辐照肿胀等现象<sup>[1]</sup>, 从而影响到整个反应堆的寿命。

目前, 关于中子辐照对铝合金物理力学性能的影响研究较多。郁金南等<sup>[2]</sup> 分别从辐照条件(辐照温度和积分通量)和材料状态(铝合金内部的杂质、合金元素、冷加工和热处理等)两方面综述了辐照效应

\* 收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2019-05-24

基金项目: 科学挑战专题(TZ2018001)

第一作者: 胡 凌(1982—), 男, 硕士, 研究实习员, huling@ustc.edu。

对不同状态的铝合金拉伸力学性能的影响,并建立了积分中子通量与宏观力学性能的经验关系。Packan<sup>[3]</sup>系统研究了在较宽辐照中子通量和辐照温度下,高纯铝内部微观辐照缺陷(位错环和空洞)尺寸及密度的演变以及对力学性能的影响。Farrell等<sup>[4]</sup>和刘建章<sup>[5]</sup>则以6061铝合金为主研究了Al-Mg-Si合金在不同能谱的中子辐照下力学性能的变化,其中Farrell等<sup>[4]</sup>主要研究了热中子通量和快中子通量分别对于6061-T6铝合金力学性能(屈服强度、抗拉强度和延伸率)的影响,刘建章<sup>[5]</sup>则针对具体反应堆中不同比例的热中子/快中子组合对6061-T651铝合金力学性能的影响进行了研究。上述相关研究均以维护反应堆常规运行时的结构稳定性为主要工程背景,重点关注辐照金属材料的准静态拉伸力学性能,而对于辐照后的铝合金在动态加载下塑性流动行为的研究却少见相关报道。当发生灾难和意外,如金属材料处于地震、爆炸及冲击等动力荷载作用时,其力学特性与准静态荷载作用下有着本质的差别,具体表现在更复杂的应力-应变关系,以及屈服强度、延性、弹性模量、阻尼比等特征参数出现的趋势性的差异。因此,在核反应堆的结构设计中,同样需要对结构材料在较宽温度、较宽应变率范围和大变形下的性能进行全面深入的研究,并据此建立相应的本构模型,以获得更高的结构设计极限。国内外对于未经辐照的Al-Mg-Si合金在不同温度和应变率下的力学性能及本构模型研究较多,但主要侧重于温度效应和应变率效应中的一个方面,如6061铝合金在200~600℃的高温流变行为通常用Arrhenius双曲正弦模型描述<sup>[6-8]</sup>,而在不同应变率下的动态力学性能常用Johnson-Cook模型描述<sup>[9-10]</sup>,目前尚未报道过关于中子辐照后Al-Mg-Si合金在较宽温度和应变率范围内的力学性能实验及本构模型的研究。同时,反应堆内真实服役的金属材料与随堆辐照或辐照模拟技术获得的辐照金属材料在辐照环境及辐照时长等方面存在明显的差异,通过对反应堆内真实服役的Al-Mg-Si合金的实验及本构模型研究,不仅能够获得极度稀缺的力学性能数据,也可为反应堆的设计、运行,以及抗震、抗爆和抗冲击性能的评估提供参考。

为了揭示长期中子辐照后的Al-Mg-Si合金在极端环境下的力学行为,本文利用材料试验机和分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置,开展长期中子辐照后的Al-Mg-Si合金在较宽温度(-80~300℃)以及较宽应变率范围( $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ )下压缩力学行为的实验研究,讨论材料的应变率效应以及温度效应;同时,考虑微观辐照损伤对材料力学性能的影响,建立位错动力学本构模型,模型的计算结果与实验结果能够较好的吻合,并结合微观数据对反应堆内同一结构元件不同区域(不同辐照剂量)的屈服强度进行预测。

## 1 实验材料与方法

本文所使用的长期中子辐照后的Al-Mg-Si合金来自中国工程物理研究院核物理与化学研究所,国产牌号为LT21(前苏联对应牌号为CAB-1),取自某反应堆靠近堆芯活性区的上联板围箱东侧某区域,实际服役近30年,承受了较高的积分中子通量,主要功能为包围反应堆堆芯燃料及其他组件,形成冷却通道,使冷却剂流过堆芯时带走堆芯运行所产生的热量。冯琦杰等<sup>[11]</sup>通过“堆芯归并”的等效计算方法求得本材料在整个服役期间所经受的总积分中子通量约为 $2.33 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ,其中快中子( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )通量约占20%为 $4.66 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ,热中子通量( $E < 0.625 \text{ eV}$ )约占55%为 $1.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 。

在进行力学实验前,使用电子探针分析技术(electron probe micro analyzer, EPMA)对材料进行化学元素成分分析,获得其主要的化学成分如表1所示。值得一提的是,表1中的Fe元素来自于冶炼过程,在所有铝合金中均存在,与辐照无关。使用X射线衍射分析技术(X-ray diffraction, XRD)对材料进行物相分析,结果表明,除了主峰为基体Al外,确认材料内部非基体元素以第二相Mg<sub>2</sub>Si、AlSiFe和单质Si三种形式存在。使用背散射衍射技术(electron backscatter diffraction, EBSD)获

表1 被辐照LT21铝合金主要化学元素成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of main chemical elements in irradiated LT21 aluminum alloy

主要元素	Mg	Si	Fe	Mn	Al
质量分数	0.69%	0.68%	0.013%	—	—

得材料的晶体取向成像图如图 1 所示。由图 1 可知, 材料内部无明显织构, 可视为(伪)各向同性材料。使用同步辐射三维 X 射线断层摄影技术(3D X-ray computed tomography, XCT)经三维重构后获得材料内部亚微米级孔洞(绝大部分为辐照空洞)的体积分数为 0.005 3%, 由于材料内部的孔洞所占体积比非常小, 可认为经典塑性力学里的塑性体积不可压假定仍然成立。使用脉冲波发射/接受装置, 分别测量并求得材料的纵波声速和横波声速, 通过计算求得杨氏模量和剪切模量分别为 75.86 和 28.48 GPa。以上实验的具体过程将另文再述。



图 1 EBSD 获得的服役 30 年的 LT21 铝合金晶体取向成像图

Fig. 1 Inverse pole figure map of decommissioned LT21 aluminum alloy obtained from EBSD characterization

压缩实验在 MTS810 材料试验机上完成, 加载应变率为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 实验温度范围为  $-80 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。待加载试样安装完毕, 在 30 min 内达到规定的温度, 并保温 15 分钟后开始实验。动态压缩实验在  $\varnothing 14.5 \text{ mm}$  的 SHPB 装置上完成, 试样尺寸设计为  $\varnothing 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的圆柱体, 应变率范围为  $1.2 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。通过测量得到的入射波  $\varepsilon_{\text{in}}(t)$ 、反射波  $\varepsilon_{\text{re}}(t)$  和透射波  $\varepsilon_{\text{tr}}(t)$ , 可依据如下公式计算材料在一维应力加载下的工程应力  $\sigma_e$  和工程应变  $\varepsilon_e$  和应变率  $\dot{\varepsilon}_e$ :

$$\begin{cases} \sigma_e = \frac{A_0}{2A_s} E_0 [\varepsilon_{\text{in}}(t) + \varepsilon_{\text{re}}(t) + \varepsilon_{\text{tr}}(t)] \\ \varepsilon_e = \frac{C_0}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_{\text{in}}(\tau) - \varepsilon_{\text{re}}(\tau) - \varepsilon_{\text{tr}}(\tau)] d\tau \\ \dot{\varepsilon}_e = \frac{C_0}{L_s} [\varepsilon_{\text{in}}(t) - \varepsilon_{\text{re}}(t) - \varepsilon_{\text{tr}}(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_0$ 、 $C_0$  及  $A_0$  分别为压杆材料的杨氏模量、一维应力弹性纵波声速及压杆的横截面积,  $A_s$  和  $L_s$  分别为实验试样的横截面积及长度。在压缩加载下, 材料的工程应力和工程应变可以通过以下公式转化为真应力和真应变:

$$\begin{cases} \sigma_t = (1 - \varepsilon_e) \sigma_e \\ \varepsilon_t = -\ln(1 - \varepsilon_e) \end{cases} \quad (2)$$

## 2 实验结果与分析

反应堆内服役 30 年的 LT21 铝合金在宽温度范围 ( $-80 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 下的准静态压缩实验的真应力-真应变曲线如图 2 所示, 可知材料在应变率为  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的压缩变形过程中展现出了良好的塑性。图 3 为固定塑性应变下, 对应的流动应力随实验温度的变化趋势。结合图 2 和图 3 可知, 在  $-40 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内, 材料的屈服强度、流动应力和加工硬化行为随温度升高而有降低的趋势, 表现出明显的温度软化效应, 当温度至  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 材料的大部分塑性变形行为已经趋于理想塑性流动。然而在  $-80 \sim -40 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内, 材料的屈服强度和流动应力却表现出对温度不敏感甚至出现略微的相反趋势。



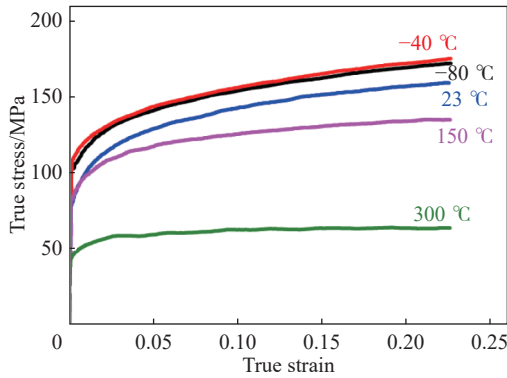


图 2 准静态条件下材料的真应力-真应变曲线  
Fig. 2 Quasi-static compressive true stress-strain curves at different temperatures

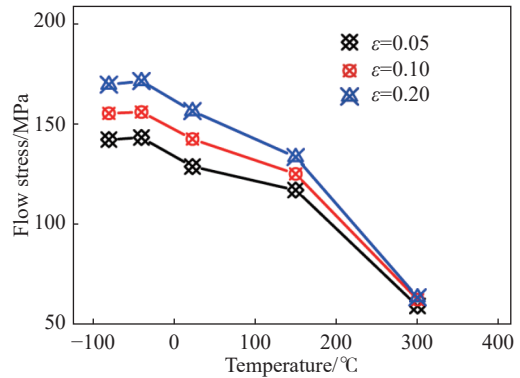


图 3 准静态下材料流动应力随温度变化曲线  
Fig. 3 Quasi-static flow stress as a function of temperature at different strains

图 4 为反应堆内服役 30 年的 LT21 铝合金在常温宽应变率 ( $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ) 范围内的 SHPB 实验结果。图 5 为在不同应变率下, 材料发生固定塑性应变所对应的流动应力。结合图 4 和图 5 可知, 材料在  $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  的应变率范围内, 屈服强度和流动应力随应变率的升高而上升, 表现出较明显的正应变率效应, 而当应变率提高至  $3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$  的范围时, 应变率敏感性骤然降低。

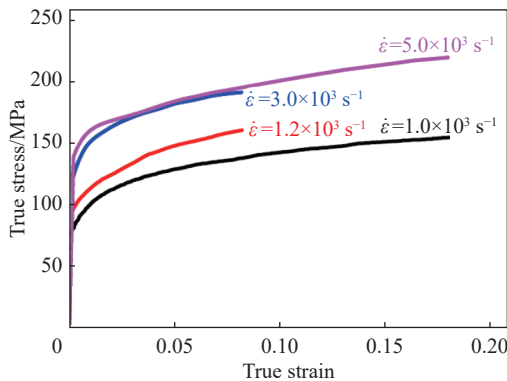


图 4 常温时不同应变率下材料的真应力-真应变曲线  
Fig. 4 True stress-strain curves under different strain-rate compression at room temperature

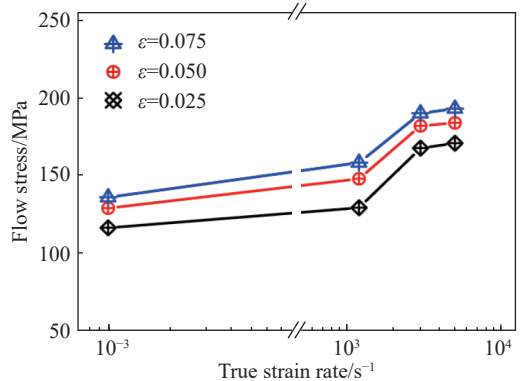


图 5 动态压缩下材料流动应力随应变率变化曲线  
Fig. 5 Dynamic flow stress as a function of strain rate at different strains

通常认为, 金属材料的塑性流动是位错克服各种障碍的滑移运动过程, 该过程依赖于应力、温度、应变率和材料的微观结构。位错运动学和动力学理论以及实验研究均表明, 铝合金塑性流动应力所受应变率和温度的影响, 被认为是短程障碍对热激活位错运动的影响, 在宏观力学性能上体现为温度效应和正应变率效应。对于本文中的材料在某些较低温度区间内出现温度效应不明显甚至略微异常的情况, 目前机理尚不明确, Bochirol 等<sup>[12]</sup>认为在较高中子通量辐照后的铝合金的低温拉伸实验中出现类似的“弱化”现象, 与滑移位错和内部辐照缺陷在低温下的演化特性有关。而对于本文中的材料在较高应变率区间内出现应变率效应不明显的情况, 与某些未经辐照的铝合金相似, 郭伟国等<sup>[13-14]</sup>将此类现象归结为“第三类动态应变时效”现象, 并认为该现象主要由合金内部的溶质原子与位错发生交互作用, 以及应变率和温度同时作用导致的结果。合金内部溶质原子的增加会导致该现象更容易发生。

### 3 本构模型

为了从理论上描述金属材料在动态加载下的力学行为, 在工程应用领域通常使用经验性宏观本构

模型, 例如应用较广泛的 Johnson-Cook 模型等。上述模型主要基于对实验数据的数学归纳, 并不能从金属材料塑性变形的物理本质上描述其动力学行为, 也未考虑金属材料的微观结构及其演化过程, 因而难以普适地描述不同微结构的金属材料在不同加载条件下的动力学行为。因此, 本文尝试从材料塑性变形微观机理出发, 同时考虑微观辐照损伤对宏观力学性能的影响, 构建物理型本构模型, 使之不仅能够较好地反应宏观应力和应变、应变率、温度等参数的关系, 也能较好的描述位错运动和辐照硬化机制, 并具备一定的预测能力。

Zerilli 等<sup>[15-17]</sup> 基于热激活位错动力学理论建立的 Zerilli-Armstrong 本构模型(Z-A 模型)是应用较为广泛的物理型本构模型之一。与其他物理模型相比<sup>[18]</sup>, 该模型物理意义明确、表达形式相对简单, 且对于金属材料的应变、应变率和温度效应及其耦合作用均进行了相应的考量。最初的 Z-A 模型分别由根据面心立方晶格结构(FCC)和体心立方晶格结构(BCC)的微观变形机理推导出的两类不同形式表达式组成<sup>[15-16]</sup>, 之后进一步发展为统一形式的 Z-A 模型<sup>[17]</sup>:

$$\sigma = \sigma_a + B \exp(-\beta T) + A \varepsilon^{\frac{1}{2}} \exp(-\alpha T) \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为流动应力,  $\varepsilon$  为等效应变,  $\sigma_a$  为流动应力的非热激活部分, 表达式为

$$\sigma_a = \sigma_G + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_G$  为考虑初始位错密度和固溶作用相关的非热应力部分,  $k$  为表征微结构应力强度的晶粒尺寸系数;  $d$  为晶粒平均直径, 式(4)第二项即为 Hall-Petch 项, 用于计算低温下晶界流动应力相关的非热应力部分。

式(3)中等号右边的前两项相加, 即为材料在相应温度以及应变率下的屈服应力, 表达式为

$$\sigma_Y = \sigma_a + B \exp(-\beta T) \quad (5)$$

式中:  $T$  为绝对温度,  $B$  为材料参数,  $\beta$  与应变率相关, 表达式为

$$\beta = \beta_0 - \beta_1 \ln \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为等效应变率,  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为应变率相关的材料参数。

式(3)第三项中的  $A$  为材料参数,  $\alpha$  与应变率相关, 表达式为

$$\alpha = \alpha_0 - \alpha_1 \ln \dot{\varepsilon} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为等效应变率,  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  为应变率相关的材料参数。

本文所用真实服役的 LT21 铝合金所取自的上联板围箱, 在反应堆内仅作包围之用, 在整个服役过程中所受应力影响因素较小, 且始终处于温度 (30±10) °C 的流动水中, 因此中子为主的高能粒子辐照对材料的力学性能影响最为重要。材料被热中子辐照后, 会产生嬗变元素, 对于金属内部的溶质组分、分布及形貌等固溶作用产生影响, 从而使 Z-A 模型中参数  $\sigma_G$  的数值发生变化。而快中子辐照在材料基体中产生微观辐照缺陷所导致的辐照硬化机制在原 Z-A 模型中并未得到考虑。此部分可根据 Seeger 等提出的弥散障碍硬化 (dispersed barrier hardening, DBH) 模型<sup>[19]</sup> 得到, 基于 Orowan<sup>[20]</sup> 的强度理论框架, 金属内部微观辐照缺陷阻碍位错滑移对屈服应力的贡献可表示为

$$\Delta \sigma = \alpha' \mu b (N d_0)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中:  $\mu$  和  $b$  分别为受辐照金属的剪切模量和伯格斯矢量的大小,  $N$  和  $d_0$  分别为材料内部辐照缺陷的个数密度和平均尺寸,  $\alpha'$  为表征辐照缺陷强度的参数, 用于描述材料内部不同种类的辐照缺陷对辐照硬化的贡献。实验数据表明, 当材料内部的主要辐照缺陷为位错环时  $\alpha' \approx 0.3$ , 为层错四面体时  $\alpha' \approx 0.2$ , 为辐照空洞时  $\alpha' \approx 1.0$ 。

另外, 许多研究表明, 中子辐照对于非裂变金属的晶粒尺寸和织构并无明显的影响<sup>[5]</sup>, 即对于 Z-A 模型中的 Hall-Petch 项没有影响。综上, 考虑辐照损伤的 Z-A 本构方程可表示为

$$\sigma = \sigma_G + kd^{-\frac{1}{2}} + B \exp[(\beta_1 \ln \dot{\epsilon} - \beta_0) T] + \alpha' \mu b (Nd_0)^{\frac{1}{2}} + A \epsilon^{\frac{1}{2}} \exp[(\alpha_1 \ln \dot{\epsilon} - \alpha_0) T] \quad (9)$$

令  $\sigma_0 = \sigma_G + kd^{-\frac{1}{2}} + \alpha' \mu b (Nd_0)^{\frac{1}{2}}$ , 在金属材料的成分和中子辐照通量确定时, 可知  $\sigma_0$  可视为与热激活无关的材料常数, 与 Z-A 模型中的  $\sigma_a$  相比, 增加了微观辐照缺陷的影响。则式 (9) 可简化为

$$\sigma = \sigma_0 + B \exp[(\beta_1 \ln \dot{\epsilon} - \beta_0) T] + A \epsilon^{\frac{1}{2}} \exp[(\alpha_1 \ln \dot{\epsilon} - \alpha_0) T] \quad (10)$$

对于上述表达式, 根据实验数据结合参数的物理意义作多变量非线性拟合求得参数值, 方法如下:

(1) 热激活无关参量  $\sigma_0$  不受温度和应变率的影响或影响较小, 通常由高温区的力学性能作为参考;

(2) 设  $\sigma_Y = \sigma_0 + B \exp(\beta T)$ , 其中  $\beta = \beta_1 \ln \dot{\epsilon} - \beta_0$ , 取  $\sigma_Y = \sigma_{0.2}$ , 使用不同温度准静态加载下材料  $\sigma_Y$  与  $T$  的关系拟合参数, 依函数  $y = y_0 + A \exp^{kx}$  作非线性拟合, 可得  $\sigma_0$ 、 $B$  以及准静态加载下的  $\beta$  值;

(3) 同上, 使用不同应变率常温动态加载下材料  $\sigma_Y$  与  $T$  的关系, 及已经拟合得到的  $\sigma_0$  和  $B$  的值, 可分别求得不同应变率下对应的  $\beta$  值, 再通过线性拟合  $\beta$  和  $\ln \dot{\epsilon}$  的关系得到  $\beta_1$  和  $\beta_0$  值;

(4) 设  $Z = A \exp(\alpha T)$ , 其中  $\alpha = \alpha_0 - \alpha_1 \ln \dot{\epsilon}$ , 则本构关系式可简化为  $\sigma = \sigma_Y + Z \epsilon^{0.5}$ , 依函数  $y = a + bx^c$  作非线性拟合, 可求得每条真应力-真应变曲线对应的  $Z$  值, 再通过不同温度准静态加载下的  $Z$  值拟合  $A$ , 不同应变率常温动态加载下的  $Z$  值拟合  $\alpha_1$  和  $\alpha_0$ 。考虑辐照损伤的 Z-A 本构模型参数值如表 2 所示。

表 2 考虑辐照损伤的 Z-A 本构模型参数

Table 2 Parameters for the modified Zerilli-Armstrong model

$\sigma_0$ /MPa	$B$ /MPa	$\beta_1$	$\beta_0$	$A$ /MPa	$\alpha_1$	$\alpha_0$
40.00	148.58	0.000 127	0.002 86	237.838	0.000 101	0.001 52

采用考虑辐照损伤的 Z-A 本构模型计算结果与实验结果对比如图 6 所示。可以看出, 通过本构模型计算得到的真应力-真应变曲线能够较好地描述反应堆内服役 30 年的 LT21 铝合金在环境温度、应变、应变率下的压缩变形行为。需要指出的是, 本模型中将特定应变率和温度区间出现的应变率或温度不敏感甚至异常情况, 处理为材料在该区间内对于应变率或温度的敏感性较弱, 在工程应用中并不会引起较大的误差<sup>[13-14]</sup>。与其他 Al-Mg-Si 合金常见本构模型相比, 本模型除了能够反映材料塑性变形的微观机理外, 对于 Arrhenius 双曲正弦模型不能描述的动态变形行为, 以及 Johnson-Cook 模型描述效果较差的“第三类动态应变时效”等现象, 均能较好地描述。

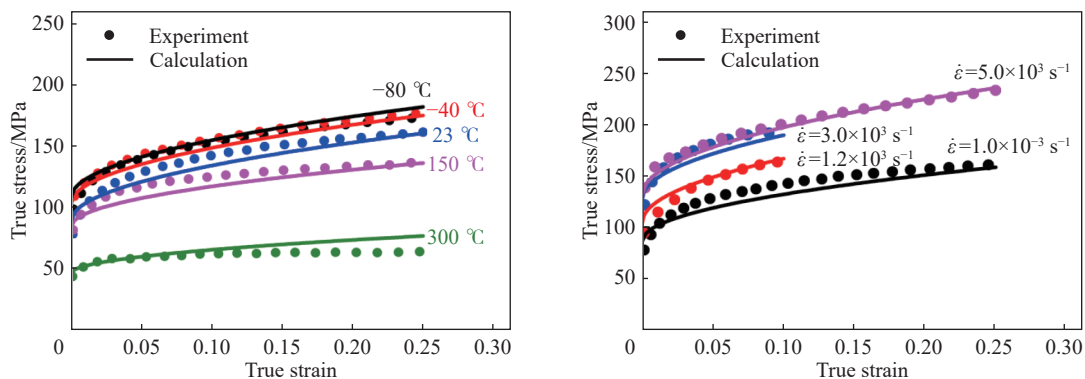


图 6 考虑辐照损伤的 Z-A 本构模型计算结果与实验结果对比

Fig. 6 Comparison between experimental results and modified Zerilli-Armstrong model prediction

另外, 由于本文研究材料所取自的上联板围箱距反应堆堆芯较近, 不同相对位置与辐射源的距离不一, 因此整块板材不同区域所经受的积分中子通量并不相同。根据冯琦杰等<sup>[11]</sup>的计算结果, 上联板围箱

东侧板材在服役期间所受总中子通量在  $1.90 \times 10^{20} \sim 2.46 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (总中子通量中热中子通量约占 55%, 快中子通量约占 20%) 范围内呈同心圆连续分布。假设热中子所致嬗变反应的截面完全等于 Al 原子的热中子俘获截面 (0.23 靶), 易知 LT21 铝合金在经受  $1.05 \times 10^{20} \sim 1.35 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  的热中子通量的辐照后, 一个  ${}_{13}\text{Al}^{27}$  原子嬗变为  ${}_{14}\text{Si}^{28}$  的几率约为 0.002 4%~0.031%, 即嬗变生成的 Si 远小于表 1 中所测 Si 含量。因此, 本文主要考虑快中子通量在  $3.80 \times 10^{19} \sim 4.92 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  范围内所产生的微观辐照缺陷对 LT21 铝合金力学性能的影响。由于 30 年前同批次未经辐照的 LT21 铝合金以及相关微观实验数据的缺乏, 同时考虑到未辐照的 LT21 铝合金基体近似于高纯铝<sup>[2]</sup>, 本文参考 packan 等<sup>[3]</sup> 给出的快中子通量在  $1.51 \times 10^{19} \sim 1.54 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  范围内高纯铝内部辐照缺陷个数密度  $N$  和平均尺寸  $d_0$  的演化数据, 并采用指数形式拟合高纯铝  $(Nd_0)^{0.5}$  与快中子通量  $\Phi_f$  在该区间的对应关系, 得到:

$$(Nd_0)^{\frac{1}{2}} = 53\,583 - 50\,691 \exp(-6.95 \times 10^{22} \Phi_f) \quad (11)$$

拟合结果如图 7 所示。由于所受快中子通量在  $2.56 \times 10^{19} \sim 2.70 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$  范围时, 高纯铝内部的辐照缺陷以空洞为主, 则在  $\sigma_0$  的表达式中取  $\alpha' = 1.0$ , 伯格矢量模  $b = 2.86 \times 10^{-8} \text{ cm}$ , 剪切模量  $\mu = 28.48 \text{ GPa}$ , 由 (11) 式可得模型中考虑辐照损伤的热激活无关项  $\sigma_0$  及 LT21 铝合金在常温准静态下加载的屈服强度  $\sigma_Y$  与快中子通量  $\Phi_f$  的关系如图 8 所示。由图可知,  $\sigma_0$  和  $\sigma_Y$  的值均受到材料内部辐照缺陷变化的影响, 随快中子通量  $\Phi_f$  的增加而增加, 并在快中子通量接近  $10^{22} \text{ n/cm}^2$  时达到饱和。 $\sigma_Y$  与文献中不同快中子通量辐照后高纯铝<sup>[4]</sup> 的屈服强度相比, 其随快中子通量的变化趋势是相似的。因此, 本模型同样能够较好地描述 LT21 铝合金在一定快中子通量范围内的辐照硬化机制。

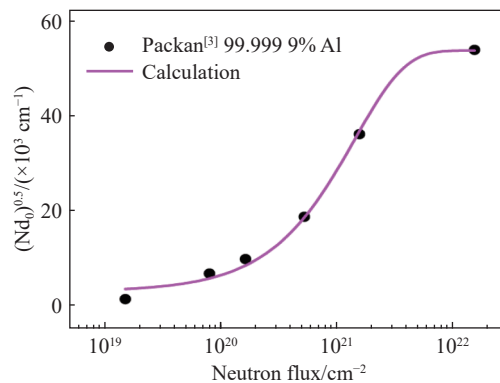


图 7 高纯铝内部的辐照缺陷的  $(Nd_0)^{0.5}$  值与快中子通量的关系 ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )

Fig. 7  $(Nd_0)^{0.5}$  as a function of fast neutron fluence in high-purity Al ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )

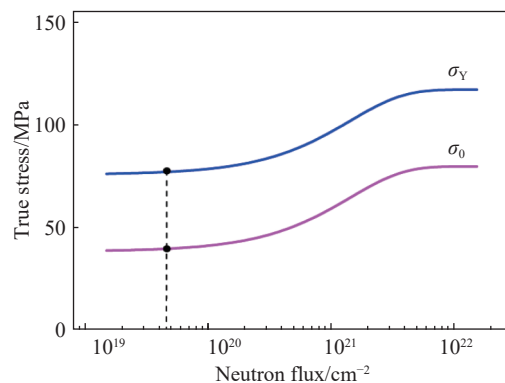


图 8 本构模型中  $\sigma_0$  和  $\sigma_Y$  的值随快中子通量的变化关系 ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )

Fig. 8  $\sigma_0/\sigma_Y$  as a function of fast neutron fluence ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )

根据式 (10) 可知, 在考虑辐照损伤的 Z-A 本构方程中, 热中子导致的嬗变产物和快中子导致的辐照缺陷, 都只与热激活无关的材料常数  $\sigma_0$  相关, 而与温度效应和应变率效应无关。基于此, 本文利用考虑辐照损伤的 Z-A 本构方程研究反应堆内服役 30 年的上联板围箱东侧内部三个具有典型意义的受辐照区域<sup>[11]</sup>(三个区域的总中子通量  $\Phi_t$  分别为  $2.33 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.02 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  以及  $2.15 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ , 快中子通量约占 20%) 的屈服强度, 结合式 (11) 高纯铝  $(Nd_0)^{0.5}$  与快中子通量  $\Phi_t$  的对应关系, 可分别对总中子通量为  $1.02 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  和  $2.15 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  区域的屈服强度及随应变率以及温度的变化进行预测, 如图 9 所示。通过对不同辐照中子通量下屈服强度的应变率效应以及温度效应的预测, 可为反应堆内部服役中的相应结构元件在遭受地震、爆炸及冲击等动力荷载作用时的抗震、抗爆和抗冲击性能相关的安全评估提供一定的参考。

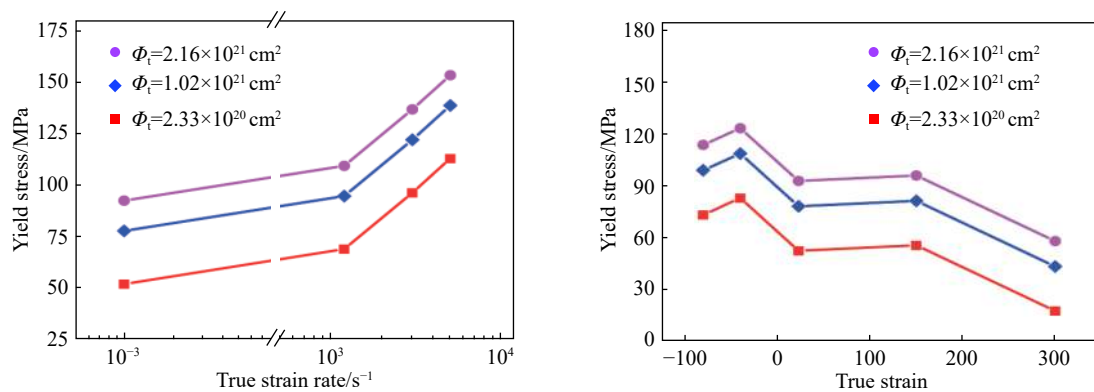


图 9 三个典型受辐照区域试样的屈服强度及随应变率以及温度的变化

Fig. 9 Yield strength of three samples from typical irradiated regions as a function of strain rate and temperature

## 4 结 论

本文研究了较宽实验温度和应变率范围内长期中子辐照后的 Al-Mg-Si 合金的压缩力学行为。通过对服役 30 年的 LT21 铝合金开展的动静态压缩实验研究表明, 材料的屈服强度和流动应力在一定的温度和应变率区间呈现出较为明显的温度效应及正应变率效应, 而在较低的温度和较高的应变率区间力学性能受温度或应变率变化的影响较小。根据实验结果与基于位错动力学的 Z-A 本构模型的统一形式, 结合材料内部的微观辐照缺陷对于材料屈服强度的影响因素, 建立了考虑辐照损伤的位错动力学本构模型, 模型的计算结果能够与前述实验结果较好吻合, 并能够较好地描述位错运动和辐照硬化机制。同时, 参考高纯铝微观辐照缺陷的相应数据, 对 LT21 铝合金屈服强度随快中子辐照剂量的变化以及另两个典型受辐照区域的屈服强度随应变率和温度的变化进行了计算, 结果表明, 本文建立的考虑辐照损伤的 Z-A 本构方程能够为反应堆内类似的结构元件的设计、运行和安全评估提供参考。

## 参考文献:

- [1] 郁金南. 材料辐照效应 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 2-3.
- [2] 郁金南, 顾叔钊. 铝及铝合金拉伸机械性能的辐照效应 [J]. 原子能科学技术, 1962(10): 743-757, 761.
- [3] PACKAN N H. Voids in neutron irradiated aluminum [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1971. DOI: 10.2172/4080358
- [4] FARRELL K. A spectral effect on phase evolution in neutron-irradiated aluminum [C] // Microstructure of Irradiated Materials, The Materials Research Society Symposium Proceedings, 1995, 373: 165-170.
- [5] 刘建章. 核结构材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 483-486.
- [6] 赵培峰, 任广升, 沈智, 等. 6061 铝合金热压缩变形条件对流变应力的影响及其本构方程的研究 [J]. 塑性工程学报, 2007,



- 14(6): 130–133. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2007.06.029.
- ZHAO Peifeng, REN Guangsheng, SHEN Zhi, et al. Influence of hot compressive deformation conditions of 6061 aluminum alloy on flow stress and research on its constitutive equation [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2007, 14(6): 130–133. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2007.06.029.
- [7] 赵锡龙, 乔及森, 陈剑虹. 6061 铝合金热变形行为的研究 [J]. *热加工工艺*, 2009, 38(2): 10–12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3814.2009.02.003.
- ZHAO Xilong, QIAO Jisen, CHEN Jianhong. Hot compression behavior of 6061 aluminum alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(2): 10–12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3814.2009.02.003.
- [8] 李凤娇, 翟月雯, 边翊, 等. 6061 铝合金高温流变行为 [J]. *塑性工程学报*, 2015, 22(2): 95–99. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2015.02.017.
- LI Fengjiao, ZHAI Yuewen, BIAN Yi, et al. Study of plastic deformation behavior on 6061 aluminum alloy [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2015, 22(2): 95–99. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2015.02.017.
- [9] 刘再德, 王冠, 冯银成, 等. 6061 铝合金高应变速率本构参数研究 [J]. *矿冶工程*, 2011, 31(6): 120–123. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2011.06.032.
- LIU Zaide, WANG Guan, FENG Yincheng, et al. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2011, 31(6): 120–123. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2011.06.032.
- [10] 刘军, 杨黎明, 谢书港, 等. 6061 铝合金的动态拉伸性能及其本构模型 [J]. *机械工程材料*, 2017, 41(3): 49–53. DOI: 10.11973/jxgccl201703010.
- LIU Jun, YANG Liming, XIE Shugang, et al. Dynamic tensile properties and constitutive model of 6061 aluminum alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(3): 49–53. DOI: 10.11973/jxgccl201703010.
- [11] 冯琦杰, 刘耀光, 杨万奎, 等. 300#研究堆寿期内上联箱铝材中子注量分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 301–305.
- FENG Qijie, LIU Yaoguang, YANG Wankui, et al. Calculating the accumulative neutron fluence rate of Al alloy on upper link chest of Swimming Pool Research Reactor-300 [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 301–305.
- [12] BOCHIROU L, BRAUNS P, CLAUDET G. Effects of neutronic irradiations at 27 K on the tensile properties of aluminum at 27 K [J]. *Progress in Refrigeration Science and Technology*, 1973, 1: 643–650.
- [13] GUO W G. Dynamic strain aging during the plastic flow of metals [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 340/341: 823–828. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.340-341.823.
- [14] 郭伟国, 田宏伟. 几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流动本构模型 [J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(1): 56–61. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2009.01.010.
- GUO Weiguo, TIAN Hongwei. Strain rate sensitivity and constitutive models of several typical aluminum alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(1): 56–61. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0609.2009.01.010.
- [15] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816–1825. DOI: 10.1063/1.338024.
- [16] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(4): 1580–1591. DOI: 10.1063/1.346636.
- [17] ZERILLI F J, ARMSTRONG R W. Constitutive equation for HCP metals and high strength alloy steels [C] // *High Strain Rate Effects on Polymer, Metal and Ceramic Matrix Composites and other Advanced Materials*. San Francisco, CA: ASME, 1995: 121–126.
- [18] 刘旭红, 黄西成, 陈裕泽, 等. 强动载荷下金属材料塑性变形本构模型评述 [J]. *力学进展*, 2007, 37(3): 361–374. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2007.03.004.
- LIU Xuhong, HUANG Xicheng, CHEN Yuze, et al. A review on constitutive models for plastic deformation of metal materials under dynamic loading [J]. *Advances in Mechanics*, 2007, 37(3): 361–374. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2007.03.004.
- [19] 肖厦子, 宋定坤, 楚海建, 等. 金属材料力学性能的辐照硬化效应 [J]. *力学进展*, 2015, 45(1): 141–178. DOI: 10.6052/1000-0992-14-071.
- XIAO Xiazi, SONG Dingkun, CHU Haijian, et al. Irradiation hardening for metallic materials [J]. *Advances in Mechanics*, 2015, 45(1): 141–178. DOI: 10.6052/1000-0992-14-071.
- [20] OROWAN E. A type of plastic deformation new in metals [J]. *Nature*, 1942, 149(3788): 643–644. DOI: 10.1038/149643a0.

## Mechanical behavior of long-term neutron-irradiated Al-Mg-Si alloy under compression

HU Ling<sup>1</sup>, ZHENG Hang<sup>2</sup>, FENG Qijie<sup>3</sup>, ZHOU Wei<sup>3</sup>, YE Xiangping<sup>1</sup>, LU Lei<sup>4</sup>

(1. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,

CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, CAS, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

3. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China;

4. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** The mechanical behavior of Al-Mg-Si alloy after long-term neutron irradiation (i.e. LT21 aluminum alloy served in the reactor for nearly 30 years) under compression loading with different temperature and strain rates is experimentally studied using material test system and split Hopkinson pressure bar. The effects of temperature and strain rate on its yield strength and flow stress are obtained. The results show that the material exhibits obvious temperature effect within a temperature rang from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  and positive strain rate effect in a strain rate rang from  $0.001$  to  $3\ 000\text{ s}^{-1}$ , respectively. At a lower temperature range (from  $-80$  to  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and higher strain rates (from  $3\ 000$  to  $5\ 000\text{ s}^{-1}$ ), the mechanical properties are insensitive to changes in temperature and strain rate. When the temperature reaches  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the plastic deformation behavior of the material tends to ideal plastic flow. Based on the above experimental results, a modified Zerilli-Armstrong constitutive model considering irradiation damage is established by taking into account the effect of microscale irradiation defects on the mechanical properties of materials. The Zerilli-Armstrong model predictions are in good agreement with the experimental results. Furthermore, the yield strength of LT21 aluminum alloy with different fast neutron irradiation doses and the yield strength of another two samples obtained from different irradiated regions within the reactor at different strain rates and temperature are calculated by reference to the evolution of microscale irradiation defects of high purity aluminum. The above research shows that the Zerilli-Armstrong constitutive equation considering radiation damage established in this paper can not only establish the relationship between macroscale stress and strain, strain rate and temperature of the Al-Mg-Si alloy after long-term neutron irradiation, but also describe the dislocation motion and the mechanism of irradiation hardening. It can provide reference for the design, operation and safety evaluation of the corresponding structural elements in the nuclear reactor.

**Keywords:** impact dynamics; irradiation damage; Zerilli-Armstrong constitutive model; SHPB; neutron-irradiated Al-Mg-Si alloy

(责任编辑 王小飞)