

核辐射环境下混凝土力学性能演化研究进展

张伟平^{1,2}, 刘 辉^{1,2}, 廖开星^{1,3}, 周 勇^{1,2}, 黄 瑛³

(1. 同济大学土木工程学院建筑工程系, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要: 长期辐射环境作用下, 混凝土力学性能会发生退化影响堆坑混凝土结构乃至核电站的长寿期运行。以核辐射环境下混凝土及其组分的体积和力学性能的多尺度演化为主线, 回顾分析相关研究成果。现有研究对核辐射诱导矿物组分、骨料、硬化水泥浆及混凝土的体积变化和力学性能演化机理和规律有了基本的认识, 建立了混凝土体积膨胀和力学性能多尺度演化的基本数值模型。为可靠预测辐照混凝土力学性能, 需要充分关注骨料的随机分布和不同组分的辐照效应差异, 建立基于矿物组成的辐照混凝土力学性能退化的多尺度模型。

关键词: 混凝土; 中子辐射; γ 辐射; 体积膨胀; 性能退化; 多尺度模型

中图分类号: TU528.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-2054-08

网络出版时间: 2023-05-05



Review on Mechanical Property Evolution of Concrete under Nuclear Radiation Environment

ZHANG Weiping^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, LIAO Kaixing^{1,3}, ZHOU Yong^{1,2}, HUANG Ying³

(1. Department of Structural Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu, China)

Abstract: The mechanical properties of concrete under the effect of long-term radiation are significantly degraded, affecting the long-term operation of existing nuclear power plants. The state-of-the-art on multi-scale evolution of the volume and mechanical properties of concrete under radiation was reviewed and analyzed. It was indicated that the evolution mechanism of volume and mechanical properties of minerals, aggregates, hardened cement paste, and concrete have been understood, and the multi-scale numerical model to predict the performance degradation of irradiated concrete has been developed. However, it was suggested that the multi-scale model of irradiated concrete based on mineral composition should be developed for reliable prediction of the volume and mechanical property, considering the randomly distributed aggregates at the mesoscale level and the differences in irradiation effects of the components.

Keywords: concrete; neutron radiation; γ radiation; swelling; performance degradation; multi-scale model

在核电站快速发展时期, 混凝土屏蔽墙的抗辐射能力是研究重点。近年来, 核电站长寿期运行已成为世界核电发展的主要趋势, 其能否延寿主要取决于不可更换构筑物或设备的可靠性, 因此国内外学者对堆坑混凝土在核电站长寿期运行条件下的性能演化进行了更为深入的研究。试验数据表明, 混

凝土性能的退化程度和离散性会随中子注量增加而显著增大^[1]。混凝土构件截面内材料的力学性能不均匀退化引起的应力重分布, 会导致构件开裂并影响其屏蔽性能^[2-3]。认识核辐射环境下混凝土性能的演化规律是对既有堆坑混凝土结构进行延寿论证, 以及完善新建核设施设计方法的基础。混凝土的体

收稿日期: 2023-03-03。 修订日期: 2023-03-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1901500)。

第一作者: 张伟平(1973—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-03-03. Revised date: 2023-03-24.

First author: ZHANG Weiping (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: weiping_zh@tongji.edu.cn

积膨胀和力学性能退化是由中子辐射、 γ 辐射以及热效应对混凝土中不同组分的多种机制作用综合导致的。中子辐射主要诱导矿物非晶化,进而引起骨料体积膨胀以及骨料和硬化水泥浆力学性能退化^[4-6];而 γ 辐射以及加热干燥作用主要引起硬化水泥浆的收缩和力学性能退化^[7]。混凝土组分间的应变失配引起的高应力和微裂纹,与组分自身微结构演化导致的力学性能退化,共同造成了混凝土宏观的体积膨胀和力学性能退化^[1, 8-9]。由于骨料随机分布和不同矿物组分辐照效应的差异,宏观预测模型不能可靠预测辐照混凝土力学性能^[10],需要从多尺度的角度研究其力学性能的演化机理和时变规律。本工作以核辐射环境下混凝土及其组分的体积变化和力学性能的多尺度演化为主线,分 5 个方面对已有研究进行回顾分析,发现关键问题,明确未来研究方向。

1 中子和 γ 光子在混凝土生物屏蔽墙中的传输

核反应堆芯中产生的高能中子和 γ 光子在沿堆芯径向的输运过程中衰减^[11]。中子和 γ 光子都是不带电的中性粒子,主要在混凝土结构内散射并扩散以耗散能量。高能粒子与混凝土中原子的相互作用方式,取决于粒子类型、粒子能量等级和靶原子的原子序数^[11]。中子与非裂变靶原子间有非弹性散射、弹性散射和吸收俘获 3 种相互作用方式; γ 光子与屏蔽材料有光电效应、Compton 散射和电子对效应 3 种相互作用方式^[12]。根据能量守恒,上述传输过程可用 Boltzmann 输运方程描述^[13]。将混凝土视为均质材料,可通过粒子输运确定性计算程序和蒙特卡洛模拟软件^[4],计算混凝土生物屏蔽墙内中子和 γ 光子通量场。

混凝土生物屏蔽墙内的中子通量场与压水堆(PWR)类型及运行条件、中子能量范围和混凝土屏蔽能力有关^[4]。不同核电机组混凝土生物屏蔽墙内表面的中子注量差异较大^[4, 14-15],但中子和 γ 光子能谱基本相同^[16]。沿堆芯径向,中子和 γ 光子通量随距混凝土生物屏蔽墙内表面的距离增加而快速下降^[16]。快中子通量在生物屏蔽墙深度的前 20~35 cm 处会迅速减小 1 个数量级^[4],同时中子能谱的快中子比例迅速减小^[17]。在核辐射传输和热湿传输的多场耦合作用下,随着混凝土的密度变化、含水量下降以及裂缝的发展^[2],其对中子和 γ

辐射的屏蔽能力降低^[18],因此需进一步考虑混凝土生物屏蔽墙内中子、 γ 辐射场的时变性和空间分布特征^[4, 15, 19]。

2 骨料的体积膨胀和力学性能

中子辐射对骨料中造岩矿物的非晶化作用会导致骨料体积膨胀和力学性能退化^[20]。由于 γ 辐射达到很高剂量时($>10^9$ Gy)才会对骨料产生轻微影响^[21],现有研究不考虑 γ 辐射对骨料性能的影响^[1]。

2.1 中子辐照下造岩矿物及骨料的体积膨胀

矿物的中子辐射效应取决于矿物化学组成、原子结构以及辐照条件(如中子注量、辐照平均温度)。高能中子通过弹性散射和非弹性散射,与混凝土中矿物晶体晶格中的原子碰撞导致中子级联,产生离位峰和热峰^[22]。中子散射过程会在晶格原始位置产生空位,在新位置产生间隙,即 Frenkel 缺陷。随着辐照暴露时间的持续,点缺陷聚集演化形成空洞和位错环等辐照缺陷,使矿物晶体结构无序化,并改变其原子网络的拓扑约束^[23],此过程称为非晶化。中子辐射对矿物的非晶化作用改变矿物原子结构,造成其物理性质和力学性能的变化^[24]。在较高的沉积能量下,矿物晶体内缺陷的产生和湮灭会达到平衡,缺陷数量趋于饱和^[25],即完全非晶化。根据化学成分的不同,骨料中造岩矿物主要可分为硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和氧化物矿物。已有的造岩矿物体积膨胀试验数据主要局限于石英,关于长石、云母、方解石和白云石等代表性矿物的研究较少^[26]。其中石英的最大体积膨胀可达到 18%,而自然长石类矿物的最大体积膨胀约为 7%~8%。分子动力学模拟表明,辐射诱导硅酸盐矿物体积膨胀取决于矿物的固有原子结构和化学组成,不同硅酸盐矿物的体积膨胀机制并不相同。中子级联作用下,硅氧四面体的变形、硅氧四面体网络的无序化和坍塌、以及金属阳离子的配位数变化,会导致不同硅酸盐矿物晶体的体积膨胀或收缩^[27-30]。硅酸盐矿物的密度变化与其无序化过程中内部弱原子约束的数量变化成正比^[23]。与硅酸盐矿物相比,碳酸盐矿物晶体结构以岛状结构为主,具有较多的离子键。离子键具有更低的键能和更弱的方向性,更容易重组并保持原子的拓扑约束,故碳酸盐矿物的最大体积膨胀一般小于 1%^[31-34]。随着辐照平均温度的升高,硅酸盐矿物晶格中点缺陷扩散和恢复的速率更高^[35],较高的温度会导致较低的体积

膨胀^[24]，即热愈合效应。硅酸盐矿物对温度变化最敏感，而 30~270 °C 范围内的温度变化对碳酸盐体积膨胀的影响很小^[36]。

现有研究大多基于已有文献中的造岩矿物体积膨胀试验数据，将矿物体积膨胀作为中子注量和辐照平均温度的函数进行描述，直接建立不同矿物体积膨胀的经验模型。除层状硅酸盐以外的硅酸盐矿物体积膨胀可通过 S 型曲线描述^[4, 37]如式：

$$\theta(\Phi, T = T_{\text{ref}}) = \theta_{\text{max}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\Phi}{\Phi_{\text{C}}}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\Phi - \Phi_{\text{L}}}{\Phi_{\text{C}}}\right)} \quad (1)$$

其中： θ 为预测的体积变化； Φ 为该矿物受到中子辐照的注量； T 为该矿物的辐照温度； θ_{max} 为最大体积变化； Φ_{C} 为特征注量，主要控制 S 型曲线拐点处的膨胀率； Φ_{L} 为潜在注量，对应于 S 型曲线拐点处的注量； T_{ref} 为任意的参考温度。特征通量和潜在注量参数取决于辐照温度，考虑到硅酸盐矿物的热愈合效应，可采用 Arrhenius-like 活化模型描述：

$$\Phi_k(T) = \Phi_k(T_{\text{ref}}) \exp\left(-\frac{E_{\text{a},k}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}}\right)\right) \quad (2)$$

式中： Φ_k 为公式(1)中的特征注量或潜在注量， k 为 C 或 L； $E_{\text{a},k}$ 为活化能； R 为通用气体常数。此外，也有学者采用 KJMA 模型^[4]和 Logistic 模型^[26]描述矿物的 S 型曲线体积膨胀。由于缺乏高中子注量和低温下的辐照试验数据，除石英外其他代表性矿物的体积变化规律还需进一步研究和验证。基于分子

动力学方法可模拟中子辐照下矿物原子结构的无序化过程^[25]，并计算其密度和弹性性能^[23, 38]，但分子动力学模拟只涉及初级离位原子产生位移级联和原子扩散过程，不直接模拟中子的散射行为，中子辐照试验与分子动力学模拟的辐照损伤指标间的对应关系还需进一步明确^[39–40]。

骨料体积膨胀是由其组成矿物的体积膨胀和矿物间的裂缝引起的，取决于岩石矿物组成和微观结构^[31, 36]。普通混凝土中常见骨料主要可分为硅酸盐骨料和碳酸盐骨料。硅酸盐骨料的耐中子辐照性较低，在非晶化过程中有明显的各向同性体积膨胀，并与硅含量相关^[36]。不同硅酸盐骨料的组成和物理力学性能退化试验数据如表 1 所示，其中石英砂岩骨料的膨胀最高，其最大线膨胀可达 7%，相应的体积膨胀会高达 23%^[36]。虽然高硅含量骨料表现出较高的体积膨胀，但低硅含量骨料由于矿物类型较多，相邻矿物间的裂隙产生较多，可能会产生更大比例的裂缝体积，最大会达到总体积变化的 67%^[20]。石灰石等碳酸盐骨料由于其主要组成矿物具有离子晶体结构，故几乎不膨胀^[1]。此外，粗晶粒骨料体积膨胀通常高于细晶粒骨料^[31, 36]。由于矿物组成和辐照条件差异，骨料体积膨胀的辐照试验数据表现出较大的离散性^[36]。有学者采用模糊逻辑建模基于骨料矿物组成对骨料体积膨胀进行了区间估计^[26]，但对辐照过程中骨料微观结构建模并预测骨料体积膨胀(包括组成矿物的体积膨胀和骨料裂缝发展)，需要进行复杂的弹塑性数值模拟，是未来一项具有挑战性的课题^[41–42]。

表 1 硅酸盐骨料的组成和物理力学性能退化试验数据^[26]

Table 1 Siliceous aggregates composition and observed radiation-induced changes in properties^[26]

Aggregate	Main mineral	Volumetric expansion/%	Mechanical properties decrease/%
Granite, granodiorite, diorite, quartzitic syenite, sandstone, aleurolite	Quartz, feldspar	23.0	90.0–100.0
Gabbro, basalt, diabase, pyroxenite	Pyroxene, hornblende	7.7	14.0
Olivinite, dunite, serpentine	Olivine, serpentine, silica ceramic containing glass	3.0	No significant changes

2.2 中子辐照下造岩矿物及骨料的力学性能

中子辐照下造岩矿物的力学性能研究以分子动力学模拟为主，且局限于弹性性能。不同晶系的矿物晶体具有不同数量的独立弹性常数，其各向异性的弹性性能可用四阶张量描述，即弹性张量。矿物的有效弹性模量(矿物单晶对应的随机取向多晶的有效弹性模量)变化与体积膨胀相关^[43]，主要硅酸盐

矿物完全非晶化后的有效弹性模量变化与密度变化之间的近似关系为^[39]：

$$E_{\text{d}} / E_0 \approx (\rho_{\text{d}} / \rho_0)^3 \quad (3)$$

式中： E_0 为矿物的初始弹性模量； E_{d} 为辐照矿物的弹性模量； ρ_0 为矿物的初始密度； ρ_{d} 为辐照矿物的密度。

造岩矿物非晶化会导致其弹性张量的各向同性

变化,不同硅酸盐矿物的有效弹性模量可能下降或提高^[39],完全非晶化后弹性模量相对变化范围为-60%~20%^[39]。现有石英的有效弹性模量随中子注量的试验研究^[28],仍需明确其他代表性矿物有效弹性模量退化规律。此外,纳米硬度与矿物非晶化程度相关,且受温度影响较小^[44]。石英的纳米硬度在 $1.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ (中子能量 E 大于 0.1 MeV)中子注量下开始下降,并在 $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 中子注量下完全非晶化,其纳米硬度降低 35%;白云石的纳米硬度随中子注量的增加而降低,而方解石的纳米硬度随中子注量呈弱增加趋势^[44]。

中子诱导骨料中造岩矿物发生不同程度的体积和刚度变化,矿物晶粒之间的应变失配会导致骨料开裂和体积膨胀,而矿物自身弹性模量的下降以及骨料内部的裂缝开展,会导致骨料力学性能退化。岩石的弹性模量和强度随中子注量增加而降低,裂缝开展是其力学性能下降的主要原因^[36, 45]。火成岩和沉积岩的弹性模量宏观上随其体积膨胀呈指数形式下降^[20, 36]:

$$E_{\text{ad}} / E_{\text{a0}} = \exp(-\theta_{\text{a}} / \theta_{\text{ref}}) \quad (4)$$

其中: E_{a0} 为矿物的初始弹性模量; E_{ad} 为矿物的辐照弹性模量; θ_{a} 为骨料的体积膨胀; θ_{ref} 为针对不同骨料类型拟合的特征参数。

在相同的体积膨胀程度下,中等硅含量的骨料因不同矿物间的应变失配,空隙产生较多,导致其弹性模量可能会相对高硅含量骨料下降更多^[20]。有学者采用自洽方法基于矿物组成预测辐照骨料的弹性模量退化,骨料弹性性能的损失取决于矿物体积分数和缺陷形态^[20],但未能考虑骨料组成矿物的弹性模量退化对骨料弹性性能的影响。骨料的强度退化程度相对较小^[26],但为明确辐照骨料的强度退化规律,仍需开展更多的辐照试验。此外,即使是同产地的骨料,其矿物组成仍有一定的变异性,辐照骨料开裂行为和力学性能退化的随机性仍需进一步研究。

3 硬化水泥浆的体积变化和力学性能

与造岩矿物类似,中子和 γ 辐射会诱导硬化水泥浆中的矿物晶体相的非晶化,但硬化水泥浆不会发生明显的体积变化^[46]。现有研究集中于中子和 γ 辐射对水化硅酸钙(C-S-H)的影响,对其他矿物的研究较少。中子和 γ 辐射还会电离辐射分解硬化水泥浆中的水^[1],硬化水泥浆的体积由于辐射加热和水的辐射分解而收缩^[7],其力学性能的变化与组成矿物的体积变化和孔隙特性改变有关。

3.1 中子及 γ 辐照下水化硅酸钙和其他水化产物的性能演化

中子辐射会导致 C-S-H 原子结构各向同性转变^[47],但由于 C-S-H 的非晶质特征,C-S-H 的体积膨胀很小,而柔性 C-S-H(钙硅比大于 1.5)的耐中子辐照性较高^[47]。由于硅氧四面体链的平均链长缩短以及裂纹和孔隙数量的增加,C-S-H 沿面内方向的强度和刚度都会降低;同时由于硅氧四面体链在高应力条件下的重组和再聚合,C-S-H 的延性增加^[48]。目前尚不明确中子辐照下 C-S-H 的钙硅比和辐照温度对其力学性能的影响。

由于可蒸发水的辐射分解和辐射加热效应,C-S-H 的微观结构因加热干燥作用而动态变化^[49-50]。 γ 辐照剂量小于 1 MGy 时,C-S-H 的微观结构没有明显变化^[51]。低 γ 辐照剂量(0.784 MGy)下,C-S-H 的弹性模量和应力松弛也没有明显变化^[52],但在较高 γ 辐照剂量下(130 MGy),硬化水泥浆内的水合物开始分解、化学结合水分离,假晶出现并逐渐致密化^[46],高 γ 辐照剂量对 C-S-H 和其他水化产物的影响需要进一步研究。

3.2 中子及 γ 辐照对硬化水泥浆中水的影响

中子辐照下硬化水泥浆中的可蒸发水会辐射分解并产生氢气^[7],用制氢产率(G 值,每吸收 100 eV 能量所产生的氢气分子数)衡量^[1]。含水量较高时,中子辐射的 G 值会是 γ 辐射最大 G 值(0.45)的 2~5 倍,氢气和氧气的产生比例保持在 2:1;随着干燥的进行,氢气产生相对逐渐增加,可能是由于氧气被八水合过氧化钙的沉淀所消耗,其平衡机制仍需进一步研究^[1]。核电运行 60 a 时中子注量对化学结合水的分解不超过 2%^[1]。 γ 辐射的 G 值随可蒸发水含量的增大而增大^[7, 53-54],但 γ 辐射对化学结合水几乎没有影响^[51]。随着 C-S-H 钙硅比的降低,其比表面积增加可导致更多的氢气释放^[55]。

3.3 中子及 γ 辐照下硬化水泥浆的性能演化

硬化水泥浆具有弱结晶度和多孔隙特征,抗中子辐射能力较高。中子辐照下硬化水泥浆除干燥引起的收缩外,体积变化较小^[1]。在中子注量达到 $8.09 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)时,硬化水泥浆的强度未发现退化^[1]。 γ 辐射对硬化水泥浆中可蒸发水的辐射分解和 γ 加热效应,导致硬化水泥浆因干燥加热而收缩,但收缩应变较小^[7]。 γ 辐射对硬化水泥浆物理性能的影响几乎与加热干燥相同^[7]。当 γ 辐照剂量达到 85.7 kGy 时,硬化水泥浆的抗压强度和抗弯强度均会下降^[56]。

4 混凝土和砂浆的体积膨胀和力学性能

中子辐射诱导骨料体积膨胀并引发周围砂浆内的裂缝开展, 是混凝土体积膨胀和力学性能退化的主要机制^[1]。现有文献中的辐照混凝土体积膨胀和力学性能数据基本上均是从加速辐照试验获得, 很多辐照试验条件的中子能量范围、辐照平均温度不一致甚至缺失, 有些与核电站的辐射环境相差甚远^[1, 4, 6, 36]。混凝土的骨料矿物组成差异较大, 试验数据少且试件尺寸不一^[4], 导致了辐照混凝土力学性能的试验数据高度离散。

4.1 中子及 γ 辐照下砂浆的性能演化

现有关于中子辐照下砂浆体积膨胀和力学性能退化的研究较少。与混凝土类似, 中子辐射会诱导砂浆体积膨胀^[4], 而砂浆体积膨胀与细骨料体积膨胀及其引起的裂缝有关。砂浆抗压强度会随其体积膨胀而降低^[9], 基于试验数据拟合公式如下:

$$f_{cm}/f_{cm0} = -0.184\varepsilon_m^2 - 0.149\varepsilon_m + 1 \quad (5)$$

其中: f_{cm0} 为砂浆初始抗压强度; f_{cm} 为砂浆辐照抗压强度; ε_m 为砂浆线膨胀。

γ 辐射的加热干燥作用主要对砂浆的水泥净浆相产生影响^[56]。 γ 辐照下(257 kGy), 砂浆的硬度显著增加, 弹性模量没有明显变化^[57]。 γ 辐照剂量达到 287 kGy 时, 砂浆抗压强度的下降与水泥净浆中水的辐射分解和孔隙演化有关^[58], 并与中值孔径的下降成正比^[56]。

4.2 中子及 γ 辐照下混凝土的性能演化

由于骨料和砂浆体积变化差异, 微裂纹会在混凝土试件内的界面过渡区萌生并逐渐向砂浆发展, 随着骨料体积不断膨胀, 微裂纹逐渐扩展桥接最终形成宏观裂纹, 造成混凝土宏观体积膨胀和力学性能退化。不同骨料类型的混凝土即使暴露在相同的中子辐照条件下, 也会产生不同程度的损伤。当中子注量超过 $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ($E > 10 \text{ keV}$) 时, 砂岩、变凝灰岩和燧石(石英含量超过 90%)等硅酸盐骨料混凝土的体积膨胀会接近甚至超过 10%^[4]; 当中子注量处于 $1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ 间, 由上述骨料以及蛇纹石、含石英砂岩(石英含量超过 50%)等硅酸盐骨料混凝土的体积膨胀一般超过 1%^[4]; 而纯碳酸盐骨料混凝土的体积几乎不膨胀^[4]。排除不适用于核辐射环境的试验数据后, 快中子注量对混凝土抗压强度的影响如图 1 所示^[1]。现有研究一般认为 $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

($E > 0.1 \text{ MeV}$) 是中子辐照下混凝土性能开始显著退化的注量阈值^[1, 59]; 当中子注量超过 $4.5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ 后, 混凝土的弹性模量和抗压强度分别可下降到原来的 30% 和 55%^[1]。相比抗压强度, 混凝土的抗拉强度试验数据数量较少, 但对中子注量更敏感^[4], 最大可退化 $\sim 80\%$ ^[6]。相比无约束条件, 有约束条件下辐照混凝土的体积膨胀和力学性能退化程度明显较小^[1]。此外, γ 辐射对混凝土力学性能的影响几乎等同于加热干燥, 不会对混凝土的刚度和强度产生明显影响^[1, 60–61]。

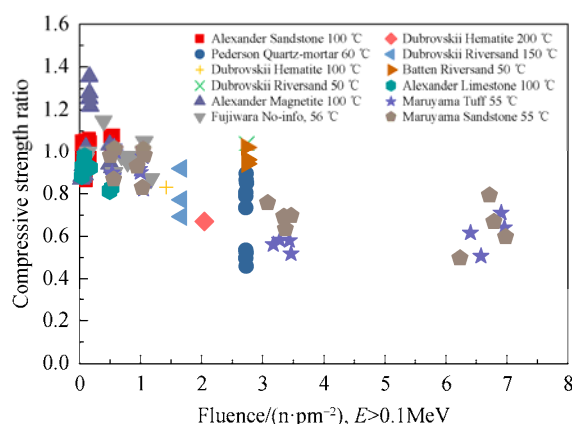


图 1 快中子注量对混凝土抗压强度比的影响^[1]

Fig. 1 Compressive strength ratio of irradiated concrete as a function of fast neutron fluence^[1]

基于有限的试验数据仅能从宏观上考虑辐照混凝土性能演化, 许多学者通过数值方法在细观尺度上对混凝土试件进行模拟。均质化方法只能预测混凝土体积膨胀、弹性性能以及内部相对损伤^[8, 19, 62–65]; 而细观有限元或离散元方法可考虑骨料几何特征和空间分布的影响, 实现混凝土裂缝发展和强度退化的预测^[9, 66–69]。离散元数值结果表明, 粗骨料的弹性性能退化对混凝土弹性模量影响很大, 对抗压强度影响较小^[9]。混凝土的细观模拟需要全面考虑粗骨料的形状和随机分布特征, 砂浆和骨料的体积膨胀和力学性能退化, 以及砂浆与骨料间的相互作用。不同骨料形状对混凝土力学性能演化的影响有待进一步研究^[67]。辐照骨料由于矿物体积膨胀会萌生初始裂纹, 在轴压荷载作用下, 其裂纹可能进一步开展, 但由于缺乏骨料强度的退化研究, 目前的数值模拟中一般只考虑骨料的弹性退化, 并且未能考虑砂浆的体积膨胀和强度退化^[69]。同时, 目前未见由骨料随机分布导致的辐照混凝土力学性能随机演化的研究成果。此外, 辐照混凝土力学性能试验结果分析时未考虑宏观混凝土试件内部辐射场和

温度场的不均匀性^[67],由此获得的力学性能实质上均为名义值,可基于细观数值模拟获得辐照混凝土力学性能演化的真实值。

目前对于受核辐射影响的混凝土结构性能的评估方法一般为:首先判断结构中的最大中子注量是否超过 $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$;若超过此阈值,则需要考虑混凝土性能退化的结构数值模拟^[1, 3]。对长期辐射环境作用下混凝土结构性能演化过程进行可靠的分析,需要准确了解具体反应堆的混凝土结构布置、辐射场以及核辐射对混凝土材料的影响^[70]。现有研究主要基于具体结构中的中子注量和温度场,通过考虑构件不同深度处混凝土随中子注量不均匀的宏观体积膨胀、弹性模量和强度退化,分析结构内应力应变场变化及开裂情况,进而判断其是否仍符合设计标准^[1, 3],但此分析方法还依赖于对辐照混凝土材料性能预测的可靠程度。

5 辐照混凝土力学性能演化的多尺度研究

建立核辐射环境下混凝土力学性能退化的多尺度模型,需要明确各尺度上不同组分的变形、力学性能退化规律以及组分间的相互作用。以矿物、骨料、硬化水泥浆、砂浆和混凝土的体积变化和弹性性能退化规律为主线,可实现跨尺度分析,但尚难以预测其塑性行为。在原子尺度上,可通过分子动力学模拟中子辐射诱导矿物非晶化过程^[71],研究不同矿物的体积变化和弹性性能退化规律。在微观尺度上,采用均质化方法,基于骨料、硬化水泥浆及砂浆的矿物组成,可预测其体积变化和弹性性能退化规律^[72],但对骨料矿物组成变异性导致的辐照骨料性能的离散性尚缺乏研究。在细观尺度上,采用有限元或离散元等方法^[69],可根据组成相(如骨料、砂浆)辐照后弹性性能与强度等力学性能指标的相关关系,预测混凝土宏观体积膨胀、弹性性能和强度退化,从而建立基于矿物组成预测其体积膨胀、力学性能退化规律及其随机性的多尺度模型。

6 结论及展望

现有研究对核辐射诱导矿物、骨料、硬化水泥浆及混凝土的体积变化和力学性能演化机理和规律有了基本的认识,建立了混凝土体积膨胀和力学性能多尺度演化的基本数值模型。但尚存在以下不足:

1) 现有矿物体积膨胀的试验数据较少且主要

局限于石英,需要进一步研究混凝土中其他主要矿物的体积变化机理、膨胀潜力和弹性性能的变化规律。

2) 骨料体积膨胀引起混凝土内部裂缝的产生和发展是混凝土力学性能退化的主要机制。为准确预测骨料的体积膨胀和弹性性能退化,需明确中子辐照下骨料的开裂行为,以及主要组成矿物的弹性性能退化对骨料弹性性能的影响。此外,需开展更多的高中子注量辐照试验,研究辐照骨料和硬化水泥浆的强度等力学性能指标的退化。

3) 现有辐照混凝土力学性能的多尺度研究主要集中于预测混凝土的体积膨胀、弹性性能和内部损伤,且未能较全面地考虑细观组分的体积、力学性能变化和空间几何特征。需要进一步考虑混凝土试件内部辐射场、温度场的不均匀性,充分关注细观尺度上骨料的随机分布以及不同组分的辐照效应差异,建立基于矿物组成预测其体积膨胀、力学性能退化规律及其随机性的多尺度模型,以可靠预测辐照混凝土性能随机演化过程。

4) 现有的知识体系几乎完全基于在加速辐照条件下获得的数据,需要针对加速辐照和在役轻水堆辐照条件下混凝土性能退化机理、规律的相似性进行研究,未来还需要从退役的核电站中获取混凝土物理力学性能数据,以验证现有模型的有效性。

参考文献:

- [1] MARUYAMA I, KONTANI O, TAKIZAWA M, et al. Development of soundness assessment procedure for concrete members affected by neutron and gamma-ray irradiation[J]. J Adv Concr Technol, 2017, 15(9): 440–523.
- [2] KAMBAYASHI D, SASANO H, SAWADA S, et al. Numerical analysis of a concrete biological shielding wall under neutron irradiation by 3D RBSM[J]. J Adv Concr Technol, 2020, 18(10): 618–632.
- [3] BRUCK P M, ESSELMAN T C, ELAIDI B M, et al. Structural assessment of radiation damage in light water power reactor concrete biological shield walls[J]. Nucl Eng Des, 2019, 350: 9–20.
- [4] FIELD K G, REMEC I, LE PAPE Y. Radiation effects in concrete for nuclear power plants—Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects[J]. Nucl Eng Des, 2015, 282: 126–143.
- [5] GIORLA A, VAITOVÁ M, LE PAPE Y, et al. Meso-scale modeling of irradiated concrete in test reactor[J]. Nucl Eng Des, 2015, 295: 59–73.
- [6] HILSDORF H, KROPP J, KOCH H J. The effects of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete[J]. Spec Publ, 1978, 55: 223–254.
- [7] ISHIKAWA S, MARUYAMA I, TAKIZAWA M, et al. Hydrogen production and the stability of hardened cement paste under gamma irradiation[J]. J Adv Concr Technol, 2019, 17(12): 673–685.

- [8] LE PAPE Y, FIELD K G, REMEC I. Radiation effects in concrete for nuclear power plants, Part II: Perspective from micromechanical modeling[J]. *Nucl Eng Des*, 2015, 282: 144–157.
- [9] SASANO H, MARUYAMA I, SAWADA S, et al. Meso-scale modelling of the mechanical properties of concrete affected by radiation-induced aggregate expansion[J]. *J Adv Concr Technol*, 2020, 18(10): 648–677.
- [10] LE PAPE Y. Structural effects of radiation-induced volumetric expansion on unreinforced concrete biological shields[J]. *Nucl Eng Des*, 2015, 295: 534–548.
- [11] MURTY K L, CHARIT I. An introduction to nuclear materials: fundamentals and applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [12] KONTANI O, ICHIKAWA Y, ISHIZAWA A, et al. Irradiation effects on concrete structures[C]//*Infrastructure Systems for Nuclear Energy*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013: 459–473.
- [13] 谢仲生, 邓力. 中子输运理论数值计算方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [14] ESSELMAN T, BRUCK P, ROSSEEL T. Light water reactor sustainability program[R]. Expected condition of concrete exposed to radiation at age 80 years of reactor operation, ORNL/TM-2018/769, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2018: 15–29.
- [15] MARUYAMA I, HABA K, SATO O, et al. A numerical model for concrete strength change under neutron and gamma-ray irradiation[J]. *J Adv Concr Technol*, 2016, 14(4): 144–162.
- [16] REMEC I. Light water reactor sustainability program[R]. Radiation environment in concrete biological shields of nuclear power plants, TWE-LPI-001, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2013: 6–10.
- [17] REMEC I, ROSSEEL T M, FIELD K G, et al. Characterization of radiation fields in biological shields of nuclear power plants for assessing concrete degradation[J]. *EPJ Web Conf*, 2016, 106: 02002.
- [18] JING Y X, XI Y P. Long-term neutron radiation levels in distressed concrete biological shielding walls[J]. *J Hazard Mater*, 2019, 363: 376–384.
- [19] 荣华, 荆玉翔, 王誉林, 等. 高温辐照对混凝土结构性能损伤影响研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(11): 133–138.
RONG Hua, JING Yuxiang, WANG Yulin, et al. *Ind Constr* (in Chinese), 2022, 52(11): 133–138.
- [20] LE PAPE Y, SANAHUJA J, ALSAID M H F. Irradiation-induced damage in concrete-forming aggregates: Revisiting literature data through micromechanics[J]. *Mater Struct*, 2020, 53(3): 1–35.
- [21] DENISOV A. Radiation changes of concrete aggregates under the influence of gamma radiation[J]. *Mag Civ Eng*, 2020, 96: 94–109.
- [22] BRINKMAN J A. Production of atomic displacements by high-energy particles[J]. *Am J Phys*, 1956, 24(4): 246–267.
- [23] ANOOP KRISHNAN N M, LE PAPE Y, SANT G, et al. Disorder-induced expansion of silicate minerals arises from the breakage of weak topological constraints[J]. *J Non Cryst Solids*, 2021, 564: 120846.
- [24] SILVA C M, ROSSEEL T M, KIRKEGAARD M C. Radiation-induced changes in quartz, A mineral analog of nuclear power plant concrete aggregates[J]. *Inorg Chem*, 2018, 57(6): 3329–3338.
- [25] OKADA N, OHKUBO T, MARUYAMA I, et al. Characterization of irradiation-induced novel voids in α -quartz[J]. *AIP Adv*, 2020, 10(12): 125212.
- [26] VAITOVÁ M, ŠTEMBERK P, ROSSEEL T M. Fuzzy logic model of irradiated aggregates[J]. *Neural Netw World*, 2019, 29(1): 1–18.
- [27] LUU V N, MURAKAMI K, SAMOUH H, et al. Swelling of alpha-quartz induced by MeV ions irradiation: critical dose and swelling mechanism[J]. *J Nucl Mater*, 2020, 539: 152266.
- [28] PRIMAK W. Fast-neutron-induced changes in quartz and vitreous silica[J]. *Phys Rev*, 1958, 110(6): 1240–1254.
- [29] MA C, FITZGERALD J D, EGGLETON R A, et al. Analytical electron microscopy in clays and other phyllosilicates: Loss of elements from a 90-nm stationary beam of 300-keV electrons[J]. *Clays Clay Miner*, 1998, 46(3): 301–316.
- [30] MARUYAMA I, MUTO S. Change in relative density of natural rock minerals due to electron irradiation[J]. *J Adv Concr Technol*, 2016, 14(11): 706–716.
- [31] ALSAID M H. Toward the understanding of irradiation effects on concrete: the irradiated minerals, aggregates, and concrete database(in Chinese, dissertation). Tennessee: University of Tennessee, 2017.
- [32] PIGNATELLI I, KUMAR A, FIELD K G, et al. Direct experimental evidence for differing reactivity alterations of minerals following irradiation: the case of calcite and quartz[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 20155.
- [33] SEYDOUX-GUILLAUME A M, MONTEL J M, WIRTH R, et al. Radiation damage in diopside and calcite crystals from uranothorianite inclusions[J]. *Chem Geol*, 2009, 261(3–4): 318–332.
- [34] SILVA C M, ROSSEEL T M, HOLLIDAY K S. Radiation-induced changes in single crystal calcite and dolomite: mineral analogues of light water reactor, nuclear power plant concrete aggregates[J]. *J Phys Chem C*, 2022, 126(1): 634–646.
- [35] ZHOU S, JU J W. The damage and healing of quartz under radiation at high temperatures[J]. *Int J Damage Mech*, 2020, 29(6): 923–942.
- [36] DENISOV A, DUBROVSKII V, SOLOVYOV V. Radiation resistance of mineral and polymer construction materials[M]. Moscow: ZAO MEI Publ. House, 2012: 32–108.
- [37] LE PAPE Y, ALSAID M H F, GIORLA A B. Rock-forming minerals radiation-induced volumetric expansion–revisiting literature data[J]. *J Adv Concr Technol*, 2018, 16(5): 191–209.
- [38] ANOOP KRISHNAN N M, LE PAPE Y, SANT G, et al. Effect of irradiation on silicate aggregates' density and stiffness[J]. *J Nucl Mater*, 2018, 512: 126–136.
- [39] ANOOP KRISHNAN N M, RAVINDER R, KUMAR R, et al. Density–stiffness scaling in minerals upon disordering: Irradiation vs. vitrification[J]. *Acta Mater*, 2019, 166: 611–617.
- [40] WANG B, ANOOP KRISHNAN N M, YU Y T, et al. Irradiation-induced topological transition in SiO₂: Structural signature of networks' rigidity[J]. *J Non Cryst Solids*, 2017, 463: 25–30.
- [41] KHMUROVSKA Y, ŠTEMBERK P. Catalogue of radiation-induced damage of rock aggregates identified by RBSM analysis[J]. *J Adv Concr Technol*, 2021, 19(6): 668–686.
- [42] KHMUROVSKA Y, ŠTEMBERK P. RBSM-based model for prediction of radiation-induced volumetric expansion of concrete aggregates[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 294: 123553.
- [43] LUU V N, MURAKAMI K, SAMOUH H, et al. Changes in properties of alpha-quartz and feldspars under 3 MeV Si-ion irradiation[J]. *J Nucl Mater*, 2021, 545: 152734.
- [44] ROSSEEL T M, GUSSEV M N, MORA L F. The Effects of Neutron Irradiation on the Mechanical Properties of Mineral Analogues of Concrete Aggregates[C]//JACKSON J, PARAVENTI D, WRIGHT M. *Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*. Cham: Springer, 2019: 1367–1377.

- [45] ELLEUCH L, DUBOIS F, RAPPENEAU J. Effects of neutron radiation on special concretes and their components[J]. *Spec. Publ.*, 1972, 34: 1071–1108.
- [46] ŁOWIŃSKA-KLUGE A, PISZORA P. Effect of gamma irradiation on cement composites observed with XRD and SEM methods in the range of radiation dose 0–1409 MGy[J]. *Acta Phys Pol A*, 2008, 114(2): 399–411.
- [47] KRISHNAN N M A, WANG B, SANT G, et al. Revealing the effect of irradiation on cement hydrates: evidence of a topological self-organization[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(37): 32377–32385.
- [48] ZHOU Y, CHEN Y, JIN M, et al. Insights at the neutron irradiation-induced structural homogenization effect of calcium silicate hydrates and degradation mechanism of mechanical properties: A molecular dynamics study[J]. *J Sustain Cem Based Mater*, 2023, 12(2): 116–128.
- [49] MARUYAMA I, OHKUBO T, HAJI T, et al. Dynamic microstructural evolution of hardened cement paste during first drying monitored by ^1H NMR relaxometry[J]. *Cem Concr Res*, 2019, 122: 107–117.
- [50] MARUYAMA I, RYMEŠ J. Temperature dependency of short-term length-change and desorption isotherms of matured hardened cement[J]. *J Adv Concr Technol*, 2019, 17(5): 188–194.
- [51] TAJUELO RODRIGUEZ E, HUNNICUTT W A, MONDAL P, et al. Examination of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. Part I: Chemical-structural properties[J]. *J Am Ceram Soc*, 2020, 103(1): 558–568.
- [52] YIN C, DANNOUNX-PAPIN A, HAAS J, et al. Influence of calcium to silica ratio on H_2 gas production in calcium silicate hydrate[J]. *Radiat Phys Chem*, 2019, 162: 66–71.
- [53] HUNNICUTT W, RODRIGUEZ E T, MONDAL P, et al. Examination of gamma-irradiated calcium silicate hydrates. part II: Mechanical properties[J]. *J Adv Concr Technol*, 2020, 18(10): 558–570.
- [54] CHARTIER D, SANCHEZ-CANET J, BESSETTE L, et al. Influence of formulation parameters of cement based materials towards gas production under gamma irradiation[J]. *J Nucl Mater*, 2018, 511: 183–190.
- [55] DENISOV A, ALEKSANDR D. Analytical description of the hydrogen evolution from concrete under the effect of gamma radiation[J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2020, 869(3): 32013–32023.
- [56] ROBIRA M, HILLOULIN B, LOUKILI A, et al. Multi-scale investigation of the effect of γ irradiations on the mechanical properties of cementitious materials[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 186: 484–494.
- [57] HILLOULIN B, ROBIRA M, LOUKILI A. Coupling statistical indentation and microscopy to evaluate micromechanical properties of materials: application to viscoelastic behavior of irradiated mortars[J]. *Cem Concr Compos*, 2018, 94: 153–165.
- [58] GLINICKI M A, DĄBROWSKI M, ANTOLIK A, et al. Gamma irradiation sensitivity of early hardening cement mortar[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 126: 104327.
- [59] MARUYAMA I, NISHIOKA Y, IGARASHI G, et al. Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 58: 20–34.
- [60] RECHES Y. A multi-scale review of the effects of gamma radiation on concrete[J]. *Results Mater*, 2019, 2: 100039.
- [61] POTTS A, LEAY L. Evidence for pore water composition controlling carbonate morphology in concrete and the further effect of gamma radiation[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 275: 122049.
- [62] JING Y X, XI Y P. Theoretical modeling of the effects of neutron irradiation on properties of concrete[J]. *J Eng Mech*, 2017, 143(12): 04017137.
- [63] TORRENCE C E, GIORL A B, LI Y J, et al. MOSAIC: an effective FFT-based numerical method to assess aging properties of concrete[J]. *J Adv Concr Technol*, 2021, 19(2): 149–167.
- [64] LI Y, LE PAPE Y, TAJUELO RODRIGUEZ E, et al. Microstructural characterization and assessment of mechanical properties of concrete based on combined elemental analysis techniques and Fast-Fourier transform-based simulations[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 257: 119500.
- [65] CHEN F, SANAHUJA J, BARY B, et al. Effects of internal swelling on residual elasticity of a quasi-brittle material through a composite sphere model[J]. *Int J Mech Sci*, 2022, 229: 107390.
- [66] GIORLA A B, LE PAPE Y, DUNANT C F. Computing creep-damage interactions in irradiated concrete[J]. *J Nanomech Micromech*, 2017, 7(2): 04017001.
- [67] CHEN F, GAO C, JIN L, et al. Numerical investigations on the viscoelastic-damage behaviors of RIVE-induced concrete[J]. *Int J Mech Sci*, 2023, 239: 107899.
- [68] LE PAPE Y, GIORLA A, SANAHUJA J. Combined effects of temperature and irradiation on concrete damage[J]. *J Adv Concr Technol*, 2016, 14(3): 70–86.
- [69] 陈凤娟, 高成琛, 金浏, 等. 快中子诱发蛇纹石混凝土力学性能退化研究[J]. *工程力学*, 2023, 40: 1–12.
- CHEN Fengjuan, GAO Chengchen, JIN Liu, et al. *Eng Mech (in Chinese)*, 2023, 40: 1–12.
- [70] BIWER B, MA D, XI Y, et al. Review of radiation-induced concrete degradation and potential implications for structures exposed to high, long-term radiation levels in nuclear power plants[R]. US: Nuclear Regulatory Commission, 2020: 147–155.
- [71] ZHANG Y, ZHOU Q, JU J W, et al. New insights into the mechanism governing the elasticity of calcium silicate hydrate gels exposed to high temperature: A molecular dynamics study[J]. *Cem Concr Res*, 2021, 141: 106333.
- [72] JING Y X. Deterioration of multi-functional cementitious materials in nuclear power plants(in Chinese, dissertation). Boulder: University of Colorado Boulder, 2018.