

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111041

# 内压作用下纤维混凝土预应力安全壳破坏机理研究\*

孙 晔, 郑 志, 苏春阳, 潘晓兰

(太原理工大学土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 核电厂安全壳作为防止核放射性物质泄漏的最后一道屏障,提升安全壳的承载力尤为重要。大量研究显示纤维混凝土在力学性能、耐久性等方面具有显著优势,为了探究纤维混凝土在安全壳结构上的适用性并准确描述内压作用下纤维混凝土预应力安全壳的破坏机理,利用ABAQUS有限元软件,建立钢纤维、钢聚丙烯纤维、钢聚乙烯醇纤维增强安全壳精细化模型,施加内压荷载进行有限元分析。结果表明:(1)纤维混凝土安全壳破坏机理及变形规律与普通混凝土安全壳类似,混凝土中不同纤维的掺入均能有效延缓混凝土裂缝出现的时间,抑制裂缝开展的速度,减少钢衬里塑性损伤,大幅提升安全壳的极限内压。(2)钢纤维具有最佳的增强效果,但恶劣的服役环境下混杂纤维值得优先考虑。(3)局部替换纤维混凝土尤其是洞口区域附近,更有利于保持安全壳结构经济性与安全性的平衡。

**关键词:** 纤维混凝土; 预应力混凝土安全壳; 数值模拟; 内压作用; 加固区域; 破坏机理

**中图分类号:** TU378.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0502-06

## Study on Failure Mechanism of Fiber-reinforced Prestressed Concrete Containments under Internal Pressure

SUN Ye, ZHENG Zhi, SU Chunyang, PAN Xiaolan

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The containment vessel of a nuclear containment is the last barrier to prevent the leakage of radioactive materials from a nuclear power plant. It is particularly important to enhance the bearing capacity of the containments in nuclear power plants. Numerous studies have shown that fiber-reinforced concrete has significant advantages in terms of mechanical properties and durability. To authenticate the applicability of the fiber-reinforced concrete and accurately determine the failure mechanism of the fiber-reinforced prestressed concrete containment vessels, finite element models of the containment structure are constructed using ABAQUS code, which are reinforced with different types of fibers including steel fiber, steel polyvinyl alcohol (S-PVA) hybrid fiber, and steel polypropylene (S-PP) fiber. Their responses are analyzed under the internal pressure. The results demonstrate that: (1) The deformation and failure modes of fiber-reinforced concrete containments were similar to those of con-

\* 收稿日期:2021-11-11;修回日期:2021-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51908397)、山西省青年科技研究基金项目(201901D211025)、中国博士后科学基金项目(2019M651075,2020M670695)资助

作者简介:孙晔(1997-),男,硕士研究生。主要从事纤维混凝土安全壳性能研究。E-mail: sunye199709@163.com

通讯作者:郑志(1986-),男,副教授,硕导,博士。主要从事核电厂安全壳抗震性能研究。E-mail: zhengzhi@tyut.edu.cn

ventional concrete containments. Incorporating different fibers in concrete can effectively postpone the onset of concrete cracks, inhibit the development speed of cracks, reduce the plastic damage to the steel liner, and greatly increase the ultimate internal pressure of the containment. (2) Steel fiber has the best reinforcement effect, but hybrid fibers should be given priority in adverse service environments. (3) Implementing a partial replacement of fiber-reinforced concrete, especially near the equipment hatch holes, is more conducive to maintaining the balance between the economic and safety aspects of the containment structure.

**Keywords:** fiber-reinforced concrete; prestressed concrete containment vessels; numerical simulation; internal pressure; reinforcement region; failure mechanism

## 0 引言

随着习近平总书记“碳中和、碳达峰”目标的提出,中国核能发展出现了新的机遇。截至2021年一季度末,中国在运、在建核电机组数量分别居世界第三和第一<sup>[1]</sup>。然而核电安全不容忽视,核电厂一旦出现事故,将造成严重的后果。2011年福岛核电厂遭受地震后反应堆无法停堆,不断上升的内部压力引发安全壳爆炸,影响至今。安全壳作为防止核放射性物质泄漏的最后一道屏障,提升其在事故后内压作用下的承载力,对保障核电安全、减少事故对环境的危害具有重要意义。但在过去的几十年里,很少有学者进行改善安全壳在内压下抗裂性能的研究。在安全壳内压试验方面,N.K.Prinja等<sup>[2]</sup>进行了1:4缩尺安全壳模型的内压试验,结果显示超标准内压会引起安全壳内衬的撕裂,造成安全壳泄露和总体结构的失效。数值模拟方面,薛荣军等<sup>[3]</sup>利用有限元软件,对预应力安全壳结构在超设计基准内压下的力学性能进行了数值分析,给出了各项指标随压力增长的破坏规律。在混凝土中掺入不连续离散纤维,能够提高混凝土的力学性能和耐久性<sup>[4-6]</sup>,纤维混凝土也越来越多地被用于新的建筑或修复受损的基础设施。然而世界范围内还没有纤维混凝土安全壳建成,只有极少数学者进行了纤维混凝土加固安全壳结构的探究,Y.S.Choun等<sup>[7-8]</sup>开创性地进行了钢-聚酰胺纤维剪力墙(安全壳简化)的抗剪承载力试验和钢-聚酰胺纤维混凝土安全壳可承受极限压力的数值模拟,结果表明掺入纤维后可以提高安全壳抗剪承载力和完整性。现有研究使用的纤维类型有限,内压下纤维增强安全壳的失效机理、特别是混凝土的裂缝演化尚未得到系统地研究,极大地阻碍了纤维混凝土在安全壳结构上的适用性。

本文以中国第三代先进核电厂安全壳为研究对象,结合各学者在纤维混凝土本构领域的研究成果,利用ABAQUS有限元软件进行预应力安全壳精细化建模,研究内压作用下纤维混凝土安全壳的破坏机理和裂缝开展趋势,优选出复杂服役条件下适用于安全壳的最佳纤维类型。基于经济性及施工难易程度,进行安全壳局部替换纤维混凝土的方案探究,相关成果可供工程设计参考。

## 1 安全壳模型结构参数及设置

### 1.1 预应力安全壳结构模型尺寸

某核电预应力混凝土安全壳结构立面和平面如图1所示,结构由混凝土部分(筒体、穹顶、扶壁柱

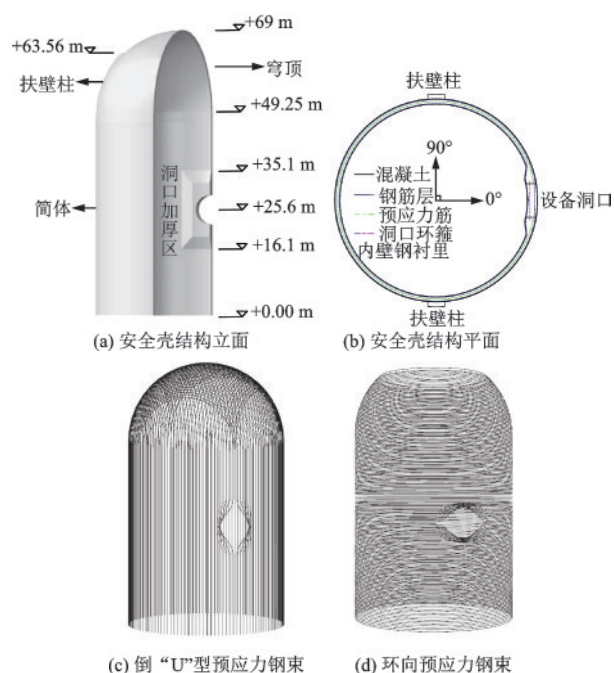


图1 安全壳结构组成

Fig.1 Composition of the containment structure

柱)、普通钢筋层、预应力钢束、洞口环箍、钢衬里组成。安全壳内径20 m,筒体壁厚1.1 m,穹顶壁厚1 m,底面至穹顶的高度为69 m,筒体高度49.25 m。高度+25.6 m处0°方位角留有半径为3.5 m的设备洞口,洞口四周设置加厚加密区。安全壳外侧设置2根成180°高度为63.56 m的扶壁柱。预应力钢束采用1860级钢绞线,整体由一层环向钢束、倒“U”型钢束组成,分别锚固于扶壁柱和底板上。环向预应力钢束筒身部分横截面积为7 800 mm<sup>2</sup>,数量105根,穹顶部分横截面积为5 400 mm<sup>2</sup>,数量32根;倒“U”型钢束横截面积为5 400 mm<sup>2</sup>,数量144根。普通钢筋有两层,单根横截面积为800 mm<sup>2</sup>,环向间距0.133 m,竖向间距0.146 m。壳体内壁还有一层与混凝土紧密连接的钢衬里,厚度为6 mm。

### 1.2 有限元分析模型

利用有限元软件ABAQUS建立安全壳结构精细化有限元模型。混凝土使用三维八节点实体缩减积分单元(C3D8R)对混凝土进行网格划分。钢衬里使用具有四节点缩减积分壳单元(S4R)表示,通过节点位移约束到安全壳内表面。预应力钢筋束使用两节点桁架单元(T3D2)进行网格划分,不考虑预应力钢束与周围混凝土的相对滑移。钢筋使用表面元素(SFM3D4R)表示,并将其完全嵌入混凝土中。建成后的有限元模型及钢衬里如图2所示。

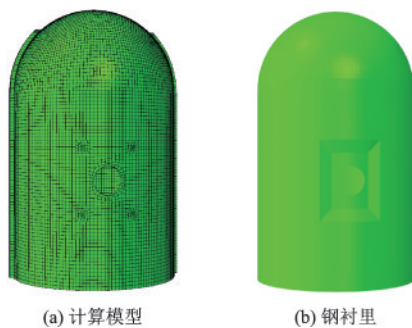


图2 安全壳计算模型  
Fig.2 Numerical model of the containment

### 1.3 材料属性

(1) 普通混凝土强度等级为C50;弹性模量为34 500 MPa;泊松比为0.2,密度为2 500 kg/m<sup>3</sup>,混凝土采用弹塑性损伤模型,单轴应力应变关系由GB 50010-2002<sup>[9]</sup>规定的公式确定。

(2) 钢纤维混凝土、钢聚乙烯醇S-PVA混杂纤维混凝土、钢聚丙烯S-PP混杂纤维混凝土单轴拉压应力应变关系分别采用高丹盈<sup>[10]</sup>、焦楚杰等<sup>[11]</sup>、钟光淳等<sup>[12]</sup>、C.Yin等<sup>[13]</sup>、徐礼华等<sup>[14]</sup>提供的研究成果及相关参数,并基于他们试验得出的综合力学性能确定了本文模型模拟时选用的长径比、体积率,相关参数见表1、表2。

(3) 预应力筋、普通钢筋和钢衬里的应力应变关系均采用理想弹塑性模型,材料参数见表3。

表1 纤维性能参数

纤维类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
钢纤维	7 800	1 345	200
S-PP	Steel	PP	Steel
	7 800	910	>400
S-PVA	Steel	PVA	Steel
	7 800	1 300	1 560

表2 纤维长径比及体积率

纤维类型	长径比	体积率/%
钢纤维	60	2
S-PP	Steel	PP
	60	167
S-PVA	Steel	PVA
	65	300

表3 预应力筋、普通钢筋和钢衬里材料参数

Table 3 Material parameters of the tendon, bar and steel liner

类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
预应力筋	7 850	0.3	200 000	/	1 860
钢筋层	7 800	0.3	195 000	400	/
钢衬里	7 800	0.3	200 000	320	/

## 2 内压下纤维混凝土安全壳破坏机理

为了探究内压作用下纤维混凝土预应力安全壳的破坏机理、增益效果,纤维混凝土预应力安全壳采用的加载方式与普通混凝土预应力安全壳保持一致。首先对安全壳模型施加自身重力荷载,接着利用降温法给预应力钢束施加预应力,最后在壳体内表面施加线性增加的内压,直至预应力钢束达到屈服强度判定结构失效。计算结果显示安全壳普通混凝土替换为纤维混凝土,可以提高结构安全裕度与性能,普通混凝土与纤维混凝土预应力安全壳内压下不同性能指标的比较见表4。

表4 普通混凝土与纤维混凝土预应力安全壳内压下不同性能指标的比较

Table 4 Comparison of the internal pressure between conventional and fiber-reinforced containments

单位:MPa

安全壳	设计内压	混凝土开裂	钢衬里屈服	极限内压
普通混凝土	0.4	0.585	0.950	1.643
钢纤维	0.4	0.749	1.057	1.848
S-PP	0.4	0.718	1.036	1.812
S-PVA	0.4	0.672	1.019	1.814

### 2.1 变形模式

随着内压荷载的不断增大,安全壳结构整体变形呈现出安全壳设备洞口附近收缩(上下洞壁内收缩较大),筒体和穹顶向外膨胀的特点。为了更清晰地阐述安全壳结构变形规律,并比较普通混凝土与纤维混凝土预应力安全壳的变形,分别在4种安全壳有限元模型相同位置上选取A点、B点、OC剖切线,绘制洞口径向位移图(图3)、穹顶竖向位移图(图4)、洞口中心线处剖面变形图(图5)。结果表明:普通混凝土安全壳与纤维混凝土安全壳具有一致的整体变形规律,但在混凝土中掺入钢纤维、钢聚乙烯醇纤维、钢聚丙烯纤维后,安全壳刚度的下降程度明显减缓,变形位移显著降低。极限内压前期,钢纤维混凝土安全壳具有潜在的位移优势,而在极限内压时,钢聚乙烯醇纤维混凝土预应力安全壳

壳在变形性能上的效果最佳(A点径向位移和B点竖向位移分别较普通混凝土安全壳降低了12%、40.9%)。

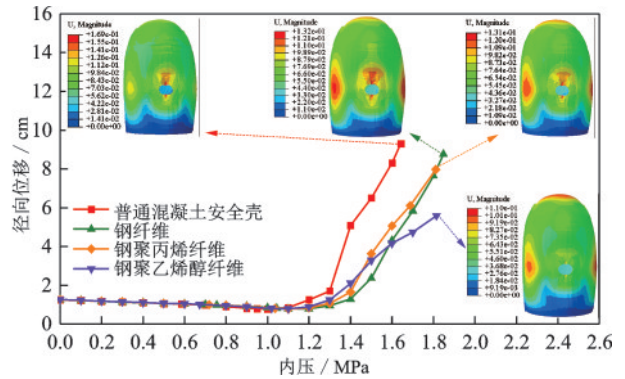


图3 A点径向位移的比较

Fig.3 Comparison of radial displacement of point A

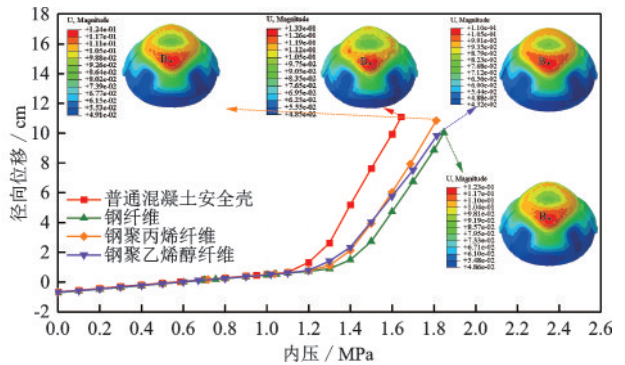


图4 B点竖向位移的比较

Fig.4 Comparison of vertical displacement of point B

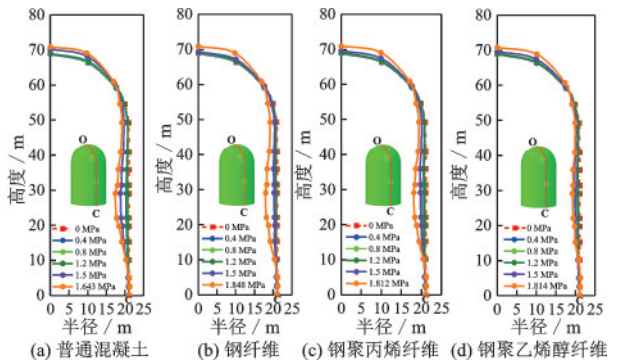


图5 安全壳剖面变形图

Fig.5 Deformation profiles of containments on a large scale of 1:25

### 2.2 混凝土主拉应变及开裂过程

混凝土开裂将大幅降低截面刚度,是安全壳力学性能的一个重要过渡点。图6显示了安全壳混凝土最大主拉应变的增长及开裂过程,设计内压

0.4 MPa时,所有类型的安全壳混凝土主拉应变均低于安全壳的最大开裂应变,没有裂缝产生。随着内压继续增长,纤维混凝土安全壳中裂缝的演化趋势与普通混凝土安全壳相似。裂缝首先出现在复杂应力分布的设备洞口附近,接着筒身、穹顶顶部产生斜裂缝,穹顶底部、筒体底部产生水平裂缝,直至极限内压时严重裂缝大量出现导致结构破坏。混凝土中钢纤维、钢聚丙烯纤维、钢聚乙烯醇纤维的掺入均有效减缓了裂缝出现的时间,抑制了裂缝开展的速度,初裂内压分别提高28.0%、22.7%、14.9%。

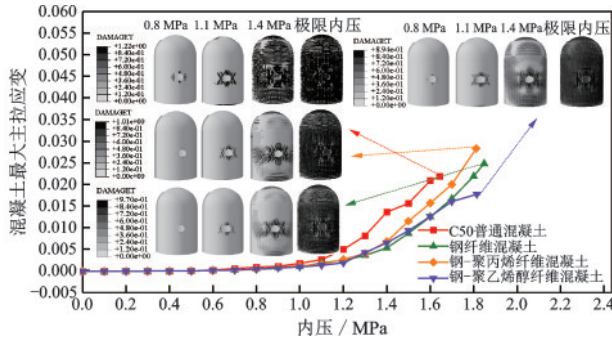


图6 安全壳混凝土最大主拉应变及开裂过程

Fig.6 Maximum principal tensile strains and cracks of concrete for the containments

### 2.3 钢衬里应变分析

钢衬里保证了安全壳的密闭性,防止安全壳内的辐射物质在发生事故时出现泄漏。

如图7所示,内压低于1.1 MPa时,普通混凝土安全壳与纤维混凝土安全壳的钢衬里最大主拉应变基本保持不变,表明钢衬里在此阶段存在弹性区域。内压超过1.1 MPa后,钢衬里最大主拉应变迅速增加,而纤维混凝土安全壳的钢衬里最大主拉应变值及增长幅度均低于普通混凝土安全壳钢衬里。与此同时,纤维混凝土安全壳的钢衬里屈服可承受的内压为1.057 MPa(钢纤维)、1.036 MPa(钢聚丙烯纤维)、1.019 MPa(钢聚乙烯醇纤维),较普通混凝土安全壳钢衬里屈服内压0.95 MPa分别提升了11.3%、9.0%和7.3%,优势显著。极限内压时钢衬里的等效塑性应变云图可以看出纤维混凝土安全壳钢衬里洞口塑性损伤区域小于普通混凝土安全壳钢衬里,因此纤维混凝土安全壳在防止辐射物质泄漏方面具有潜在应用前景。

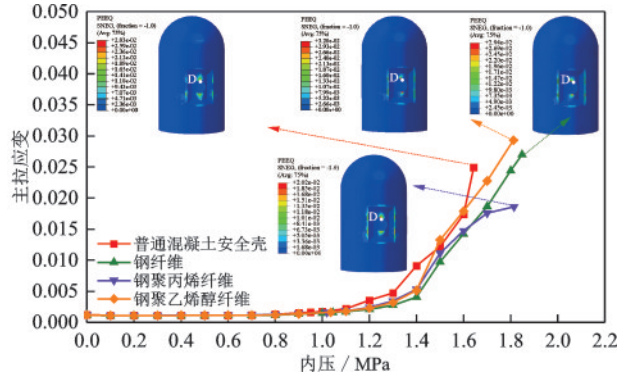


图7 普通混凝土和纤维混凝土安全壳钢衬里应变

Fig.7 Strains of steel liners for conventional and fiber-reinforced concrete containments

### 2.4 预应力钢束的Mises应力分析

图8展示了内压作用下不同类型预应力钢束最大Mises应力值变化趋势,所有类型(环向与倒“U”型)预应力钢束最大Mises应力值达到屈服强度对应的内压即为安全壳的极限内压。当内压为0 MPa时,预应力钢束的应力值约为1488 MPa(张拉控制应力 $0.8f_{pk}$ )。内压超过0.9 MPa后,普通混凝土安全壳与纤维混凝土安全壳环向预应力钢束最大Mises应力值均高于倒“U”型预应力钢束。由于纤维混凝土安全壳具有更优异的变形位移控制能力,预应力钢束拉伸程度的减少进一步降低了预应力钢束的Mises应力,致使安全壳极限内压的提高,钢纤维、钢聚丙烯纤维、钢聚乙烯醇纤维混凝土安全壳极限内压分别比普通混凝土安全壳增长了12.5%、10.3%、10.4%。因此若要保证安全壳具备最高的极限内压,钢纤维混凝土安全壳应被优先考虑。

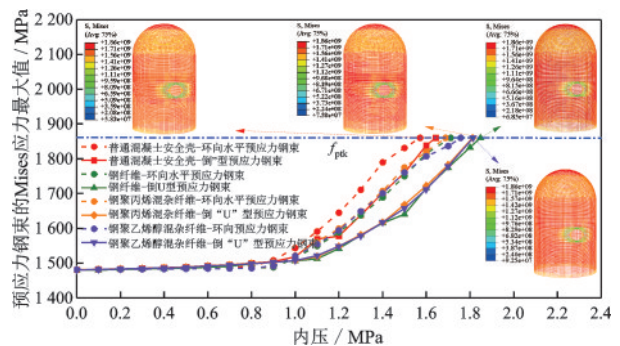


图8 预应力钢束最大Mises应力的对比

Fig.8 Comparison of maximum values of von Mises stress of prestressing tendons.

## 2.5 局部替换纤维混凝土方案探究

结构设计的安全性和经济性越来越受到研究人员的关注,安全壳混凝土整体替换为纤维混凝土后各项性能得到极大的提升,但考虑到经济性和施工难易程度,局部替换纤维混凝土方案也值得我们探究。混凝土开裂云图显示安全壳洞口附近、穹顶、筒体底部裂缝演化较为严重,因此拟替换位置如图9所示,共分为洞口(TR)、洞口+穹顶(TDR)、洞口+穹顶+筒体底部(高度为整体的1/10)(TBDR)等三种方案。具体性能指标计算结果见表5,结果表明仅加固洞口(TR)是延缓混凝土早期裂缝的开展与增强钢衬里屈服内压最优的方案。

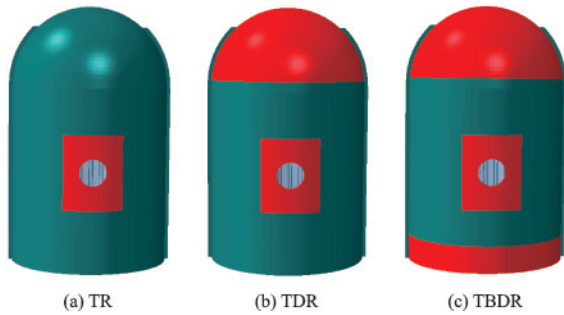


图9 局部加固区示意图

Fig.9 Detailed description of different reinforcement regions

表5 普通混凝土与纤维混凝土预应力安全壳内压下不同性能指标的比较

Table 5 Comparison of the internal pressure of containments with different reinforced regions

单位:MPa

纤维类型	加固方案	设计内压	混凝土开裂	钢衬屈服	极限内压
钢纤维	TR	0.4	0.749	1.025	1.678
	TDR	0.4	0.749	1.025	1.684
	TBDR	0.4	0.749	1.035	1.730
S-PP	TR	0.4	0.709	1.012	1.686
	TDR	0.4	0.709	1.013	1.692
	TBDR	0.4	0.709	1.023	1.716
S-PVA	TR	0.4	0.676	1.012	1.751
	TDR	0.4	0.676	1.013	1.747
	TBDR	0.4	0.676	1.012	1.753

## 3 结论

(1) 纤维混凝土安全壳的破坏机理与普通混凝

土安全壳类似,整体变形呈现出安全壳设备洞口附近收缩,筒体和穹顶向外膨胀的特点。钢纤维、钢聚丙烯纤维、钢聚乙烯醇纤维的掺入,均能明显减少安全壳的变形。

(2) 纤维混凝土安全壳可以有效减缓裂缝出现的时间,抑制裂缝开展的速度,减少钢衬里塑性损伤,提高安全壳的极限内压。其中钢纤维混凝土具有最好的综合提高能力,但考虑到安全壳复杂的服役环境,较高的腐蚀退化风险,混杂纤维(钢聚丙烯纤维混凝土、钢聚乙烯醇纤维混凝土)可能是更好的选择。

(3) 保证安全性的同时,兼顾经济性、施工难易程度,局部加固方案也能达到令人满意的效果。洞口附近应力复杂,计算发现仅洞口附近替换纤维混凝土的效益最好,是延缓混凝土早期裂缝的开展与增强钢衬里屈服内压最优的方案。

## 参考文献:

- [1] 王海洋,荣健.碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J].中国电力,2021,54(6):86-94.  
Wang H Y, Rong J. Analysis on China's nuclear energy development path under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality [J]. Electric Power, 2021,54(6):86-94.(in Chinese)
- [2] Prinja N K, Shepherd D, Curley J. Simulating structural collapse of a PWR containment [J]. Nuclear Engineering & Design, 2003, 235(17-19):2033-2043.
- [3] 薛荣军,王洪良,褚濛,等.预应力安全壳内压作用下的有限元研究[J].建筑结构,2018,48(8):77-82.  
Xue R J, Wang H L, Chu M, et al. Finite element research on prestressed concrete containment under inter pressure [J]. Building Structure, 2018, 48(8):77-82. (in Chinese)
- [4] Mukherjee A, Joshi M. FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation[J]. Composite Structures, 2005, 70(2):185-199.
- [5] Afroughsabet V, Biolzi L, Ozbakkaloglu T. High-performance fiber-reinforced concrete: a review [J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(14):6517-6551.
- [6] Triantafyllou G G, Rousakis T C, Karabinis A I. Corroded RC beams patch repaired and strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 112B(Mar.): 125-136.

(本文编辑:周小潭)

(下转第558页)