

乏燃料贮存格架结构改进设计研究

陈广军, 王国民, 王 健, 杨秀华

中核四〇四有限公司第三分公司, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年9月15日; 录用日期: 2023年1月13日; 发布日期: 2023年1月20日

摘 要

乏燃料贮存格架是后处理厂贮存水池用于接收离堆组件的重要设备, 近年来地壳运动频繁, 后处理厂对于乏燃料贮存设备的抗震性能提出了新要求, 尤其是福岛地震后, 各国将乏燃料水池的抗震设防烈度增大, 地震载荷SL-2由0.209 g提升至0.309 g, 对贮存格架有了更高的抗震要求。在保证原有贮存格架性能的基础上, 对贮存格架进行了结构改进, 对改进后的贮存格架在正常、异常和事故工况下进行了抗震性能分析。分析结果表明: 优化改进后的贮存格架在抗震性能和贮存容量两方面都有很大提升。

关键词

乏燃料, 贮存格架, 抗震分析, 异常工况

Research on Structural Improvement Design of Spent Fuel Storage Grid

Guangjun Chen, Guomin Wang, Jian Wang, Xiuhua Yang

The 404 Ltd., CNI, Lanzhou Gansu

Received: Sep. 15th, 2022; accepted: Jan. 13th, 2023; published: Jan. 20th, 2023

Abstract

Spent fuel storage framework is reprocessing plant storage pool used to receive from the pile of component important equipment. In recent years, because of frequent crustal movements, the reprocessing plant has put forward new requirements for the seismic performance of spent fuel storage equipment. Especially after the Fukushima earthquake, countries have increased the seismic forecasting intensity of spent fuel pools and increased the seismic load SL-2 from 0.209 g to 0.309 g, which has higher seismic requirements for storage grid. On the basis of ensuring the performance of the original storage lattice, the structure of the storage lattice was improved, and

the seismic performance of the improved storage lattice under normal, abnormal and accident conditions was analyzed. The analysis results show that the seismic performance and storage capacity of the optimized storage lattice are greatly improved.

Keywords

Spent Fuel, The Storage Framework, Earthquake Resister Analysis, Abnormal Condition

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

乏燃料是核电站反应堆内经中子轰击发生核反应后, 经一定时间从堆内卸出产生的, 有大量未用完的可增殖材料 ^{238}U 或 ^{232}Th , 未烧完的和新生成的易裂变材料 ^{239}Pu 、 ^{235}U 或 ^{233}U 以及核燃料在辐照过程中产生的镓、锃、镅等超铀元素, 另外还有裂变元素 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{99}Tc 等, 种燃料的铀含量降低, 无法继续维持核反应, 所以叫乏燃料。核反应堆运行产生的乏燃料中包含大量的放射性物质, 并伴随着大量的衰变热, 一般需在离堆乏燃料贮存水池储存一段时间, 待冷却一段时间后再进行处理[1] [2]。乏燃料贮存格架是用于离堆乏燃料贮存的设备, 与水池系统一起保证乏燃料贮存时的临界、热工、屏蔽、结构等安全。

贮存格架放置在乏燃料贮存水池底部, 与水池底部和侧部无机械连接, 其在地震作用下会产生变形、碰撞、滑移、跳动、倾倒等现象, 可能会给格架自身结构、乏燃料组件以及水池带来损害, 必须确保贮存格架在地震作用下的安全[3] [4] [5]。在福岛核电站未发生事故前, 某设施的乏燃料贮存格架抗震校核按 SL-2 为 0.209 g 进行计算, 能够保证贮存的安全。日本福岛地震后, 为进一步提高运行设施的安全性, 将该地区的地震载荷 SL-2 提升至 0.309 g , 原设计的贮存格架结构已不满足新地震载荷要求。为保证运行的安全性, 贮存格架减容运行, 造成资源浪费。

为扩大贮存容量, 该设施拟在未配备贮存格架的水池中新配置贮存格架。由于原贮存格架结构不满足新抗震要求, 需对原贮存格架进行优化改进, 在增大贮存容量的同时, 满足新的抗震要求。

2. 贮存格架结构对比

2.1. 原贮存格架结构

原贮存格架由支撑立柱、围板、横筋、底板、可调支腿和栅板组成。其格架结构如图 1 所示。该贮存格架结构简单、重量轻、易于加工制造、成本低, 但该格架贮存孔仅有四根立柱, 对贮存内容物覆盖面较小; 且无中子吸收体, 贮存容量低; 而且贮存孔上方无导向段, 不利于贮存吊篮的装载。

2.2. 新贮存格架结构

新设计的贮存格架与原贮存格架结构外形一致, 由支撑立柱、围板、底板、可调支腿、栅板和贮存孔组成, 见图 2 所示。与原贮存格架相比, 贮存孔四周用不锈钢板包覆, 以防止贮存吊篮在贮存时受到其他意外伤害, 同时增加支撑的刚度。而且, 贮存孔上设置了导向段, 便于贮存吊篮的装载。贮存孔贮存段设置有中子吸收材料, 采用包覆设计, 见图 3 所示, 进一步提升了临界安全。

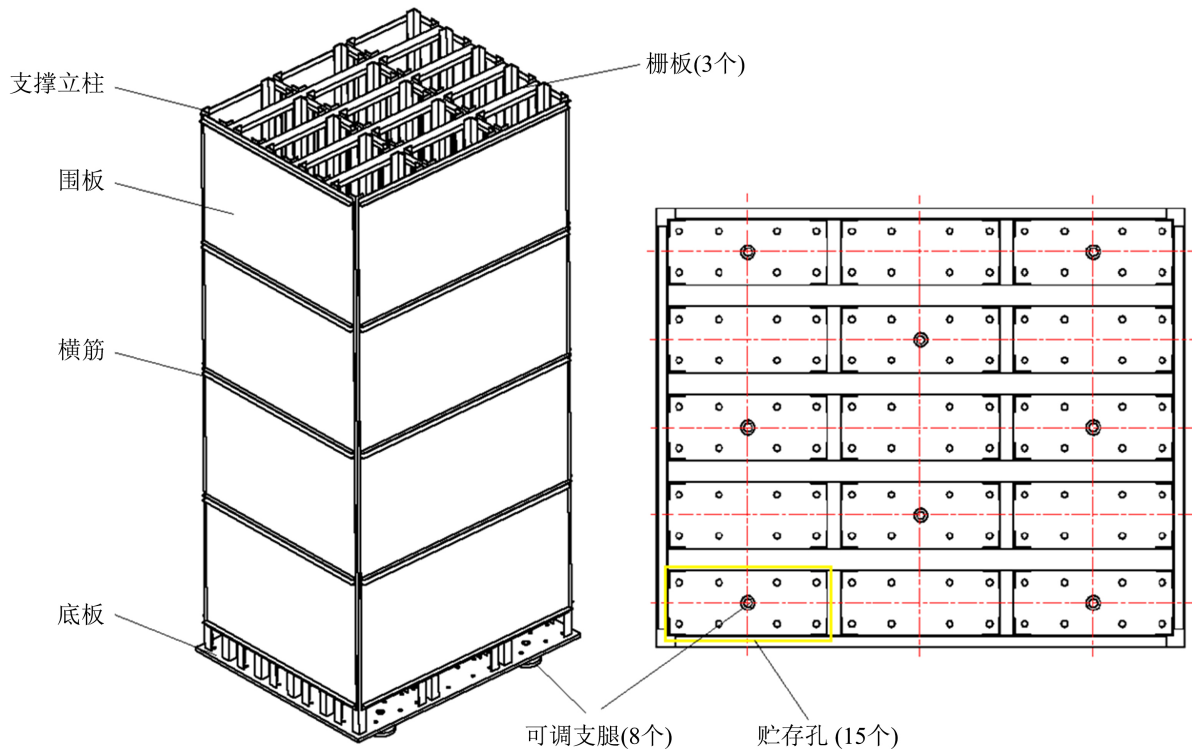


Figure 1. Original spent fuel storage lattice structure

图 1. 原乏燃料贮存格架结构

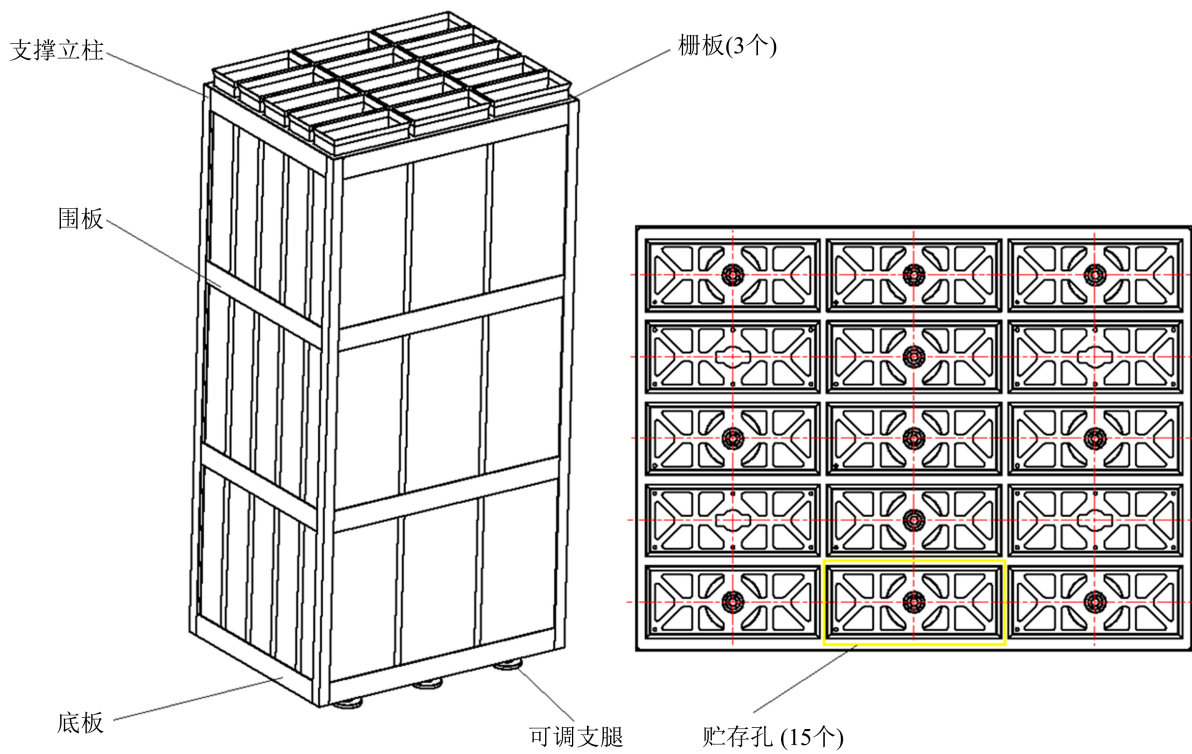


Figure 2. Structure of new spent fuel storage grid

图 2. 新乏燃料贮存格架结构

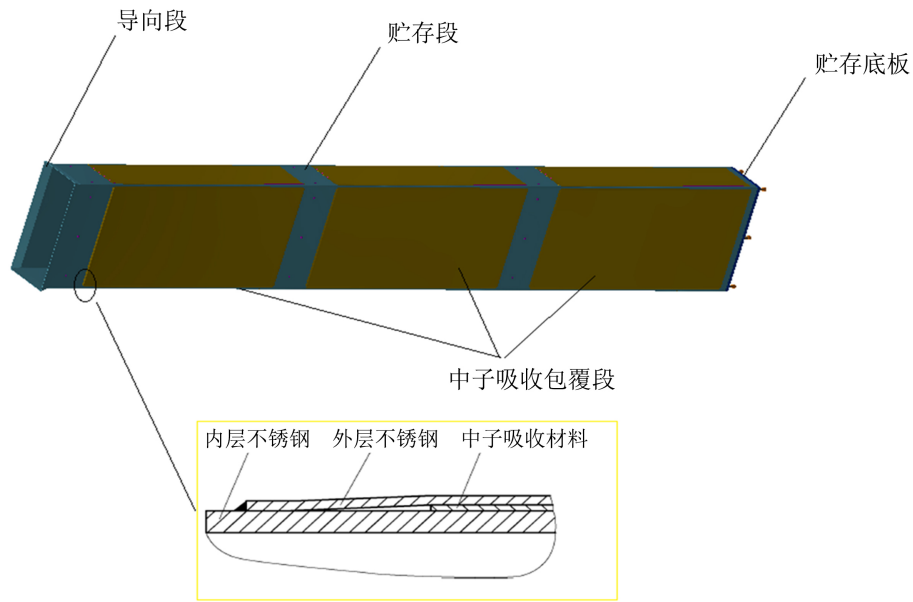


Figure 3. Neutron absorbing material coating structure
图 3. 中子吸收材料包覆结构

3. 抗震性能分析

3.1. 计算工况及评定准则

根据乏燃料贮存设施的设计(HAD301/02-1988)、乏燃料离堆贮存水池安全设计准则(EJ/T 878-2011)的要求, 贮存格架抗震分析考虑正常、异常和事故三种工况, 三种工况的载荷类型和判定准则见表 1 所示。

Table 1. Seismic analysis conditions and stress assessment criteria
表 1. 抗震分析工况以及应力评定准则

工况	载荷	应力评定 准则	许用应力			
			原贮存格架		新贮存格架	
			00Cr19Ni10	05Cr16Ni4Mo	06Cr18Ni11Ti	05Cr16Ni4Mo
正常工况	自重(含贮存物项)	$\leq 0.2\sigma_b$	95.4	180	108	180
异常工况	自重 + OBE 地震	$\leq 0.3\sigma_b$	143.1	270	162	270
事故工况	自重 + SSE 地震	$\leq \sigma_s$	165	700	220	700

注: σ_b 为材料屈服强度, σ_s 为材抗拉强度。

3.2. 计算假设

- 1) 导向筒、中子吸收板、覆面板、吊耳、螺栓单个质量较轻, 对结构影响较小, 忽略上述结构的影响, 质量通过附加质量的方式加载。
- 2) 因贮存格架孔道与水池相通, 未形成密闭空间, 内外承受的流体静压相同, 无压差, 则忽略流体静压的影响。
- 3) 根据离堆乏燃料水池冷却能力, 可将乏燃料水池温度可保持在 40℃ 以下, 故忽略温度对结构的影响。

4) 水的影响

贮存格架在水池中流固耦合效应通过使用水动力质量来考虑，水动力质量的大小与贮存格架间的间隙和与墙面的间隙有关，其水动力质量分析示意图如图4所示。

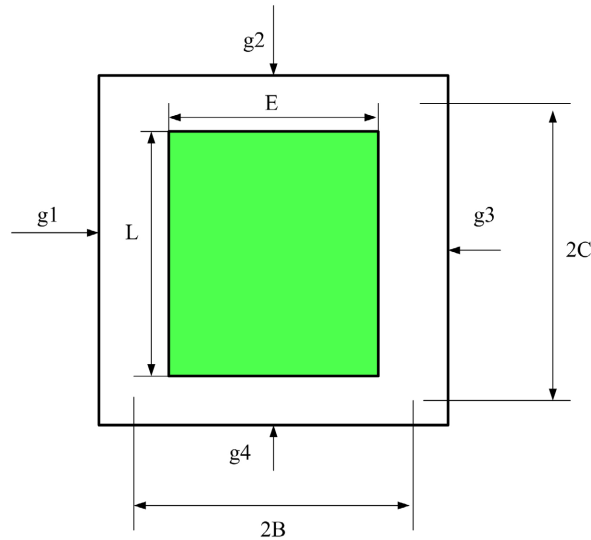


Figure 4. Schematic diagram of hydrodynamic quality analysis
图4. 水动力质量分析示意图

假设内部为格架，外部为水池。则附加质量计算如下[3] [6]:

$$M_{Hx} = \rho h L^2 \left[\frac{L}{12g_1} + \frac{L}{12g_3} + \frac{E}{4g_2} + \frac{E}{4g_4} \right] \quad (1)$$

$$M_{Hy} = \rho h E^2 \left[\frac{E}{12g_2} + \frac{E}{12g_4} + \frac{L}{4g_1} + \frac{L}{4g_3} \right] \quad (2)$$

$$M_{HVx} = \rho h^4 \left[\frac{C}{6h} \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_5} \right) + \frac{BC}{h^2 g_3} \right] \quad (3)$$

$$M_{HVy} = \rho h^4 \left[\frac{B}{6h} \left(\frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_5} \right) + \frac{BC}{h^2 g_4} \right] \quad (4)$$

$$M_{Hxp} = \frac{M_{Hx}}{1 + M_{Hx}/M_{HVx}} \quad (5)$$

$$M_{Hyp} = \frac{M_{Hy}}{1 + M_{Hy}/M_{HVy}} \quad (6)$$

式中 h 为贮存格架底板及其以上高度； ρ 为去离子水密度； E 为贮存格架宽度； L 为贮存格架长度； g_1, g_2, g_3, g_4 分别为贮存格架与四周相连格架或水池壁的间隙； g_5 为贮存格架底板距水池的高度。

在水中，乏燃料贮存格架自然频率降低，同时地震激励加速度也变小，减小系数通过公式(7)和(8)计算[7]。

$$\alpha_x = \frac{M + M'' - M_1}{M + M'' + M_{Hpx}} \quad (7)$$

$$\alpha_y = \frac{M + M'' - M_1}{M + M' + M_{Hpy}} \quad (8)$$

式中 M 为贮存格架和贮存物项的重量； M'' 为格架内包含水的重量； M_1 为格架排开水和包含水的质量之和。

5) 地震载荷

根据《核燃料后处理厂建(构)筑物、系统和部件的分级原则》的规定建(构)筑物以外的其他 I 类抗震物项按 SL-2 地震动设计和论证。应能在 SL-1 地震动下，保证可运行；在 SL-2 地震动应能保证安全功能(完整性/或运行性)。

乏燃料贮存格架为 I 类抗震物项，安装在水池底部，安装标高为-13.1 m，使用该楼层反应谱作为计算输入。

6) 计算设置

贮存孔道、围板、底板、栅板、贮存支撑板等格架本体采用壳单元(SHELL181)；燃料组件及吊篮、横筋采用梁单元(BEAM188)；支腿调节螺母、支腿采用实体单元(SOLID186)。中子吸收板、覆面板、吊耳、螺栓等对格架整体影响较小，使用质量单元进行建模。地震引起的液体与贮存格架之间的耦合效应也通过质量单元(MASS21)进行模拟。原贮存格架和新贮存格架单元大小设置保持一致，其有限元模型见图 5 所示。

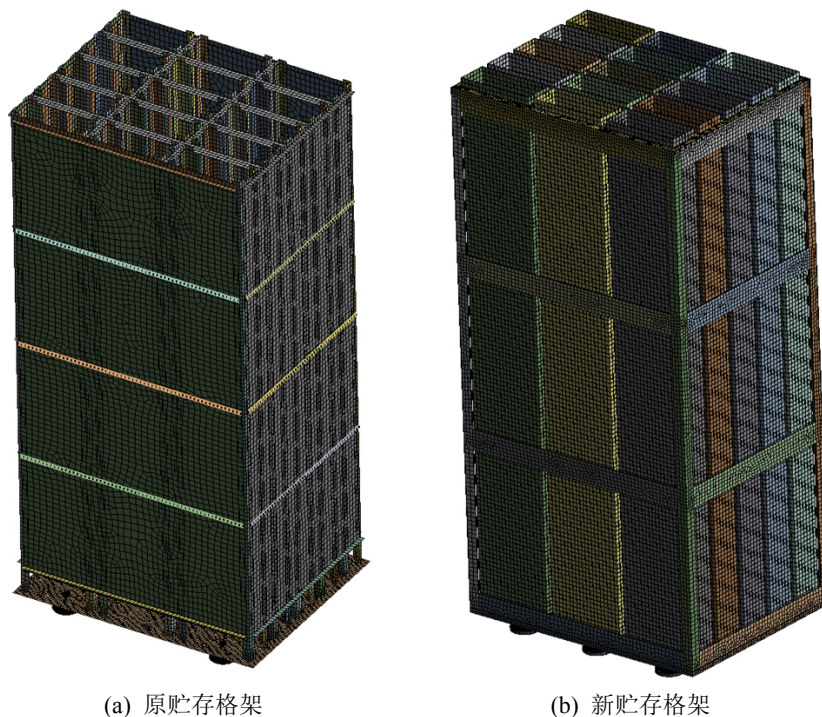


Figure 5. Finite element model diagram of storage lattice
图 5. 贮存格架有限元模型图

4. 模拟计算结果及讨论

正常工况下，原贮存格架和新贮存格架应力分布见图 6 所示，其中原贮存格架的最大应力为 61.8 MPa，新贮存格架最大应力为 15.8 MPa，均小于许用应力，强度满足要求。

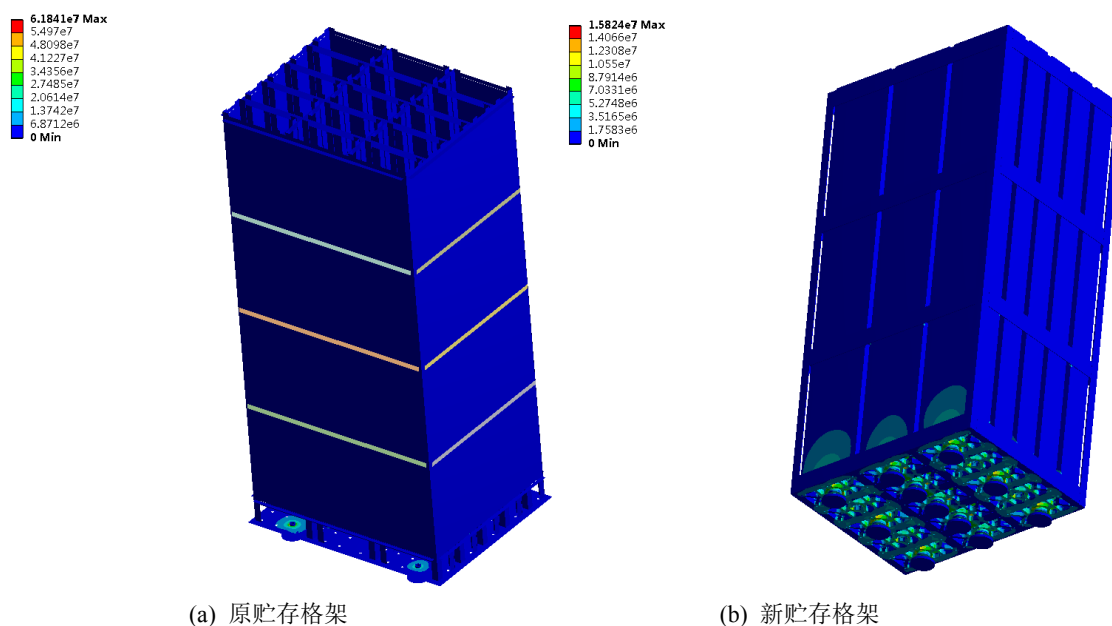


Figure 6. Stress distribution under normal working conditions
图 6. 正常工况应力分布图

在异常工况下原贮存格架的应力分布见图 7(a)所示, 其表明围板、支撑立柱、栅板等结构件应力较小, 支腿、支腿螺母、底板等支撑件应力较大, 最大应力为 273.8 MPa, 出现在支腿螺母上, 支腿螺母对应位置的底板强度也较大, 超过了应力许用限值(见表 2)。与原贮存格架相比, 因新贮存格架贮存孔四周用不锈钢板进行了包覆, 贮存格架应力分布更均匀(图 7(b)), 支腿、支腿螺母、底板等支撑件应力变小, 未超过应力许用应力值(见表 2), 强度满足要求。

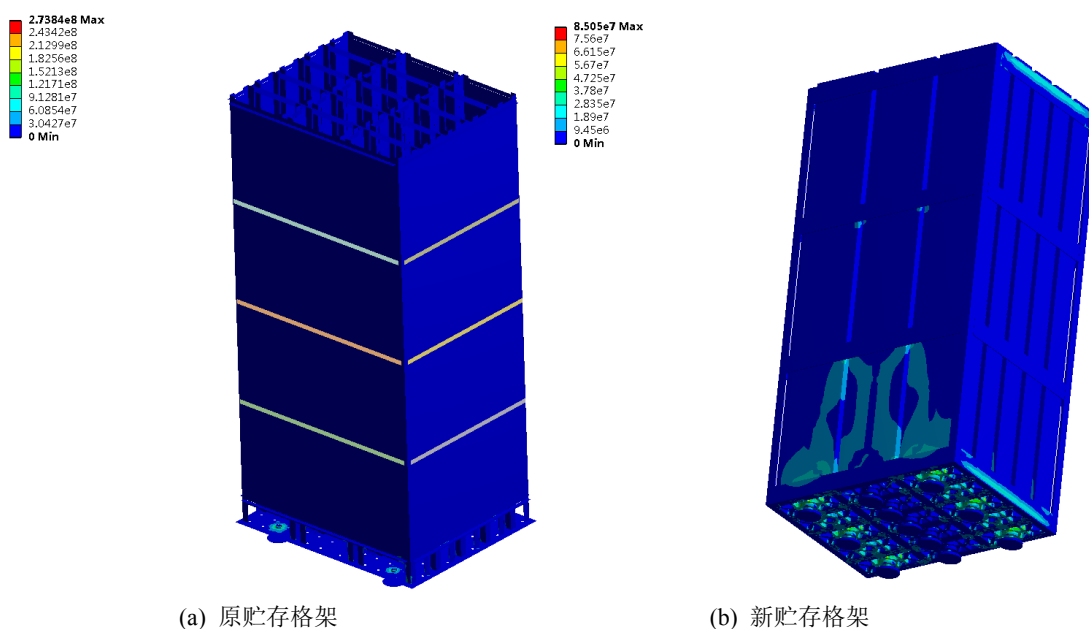


Figure 7. Stress distribution in abnormal working conditions
图 7. 异常工况应力分布图

Table 2. Stress values of each component in abnormal conditions
表 2. 异常工况各部件应力值

贮存格架	部件	最大应力	许用应力	评定结论
原贮存格架	支腿	184.9	270	满足要求
	支腿螺母	273.8	270	不满足要求
	底板	208.8	143.1	不满足要求
	围板	33.6	143.1	满足要求
	支撑立柱	127.2	143.1	满足要求
	栅板	28.8	143.1	满足要求
	新贮存格架	支腿	54.4	270
支腿螺母		72.3	270	满足要求
底板		85.1	162	满足要求
围板		35.5	162	满足要求
贮存单元		53.4	162	满足要求
支撑立柱		12.6	162	满足要求
栅板		32.4	162	满足要求

事故工况下，新、旧贮存格架的有限元分析结果见图 8 和表 3 所示。在事故工况下，贮存格架的应力分布与异常工况下基本一致。原贮存格架的底板最大应力达到 241.2 MPa，大于了许用应力，强度不满足要求。新贮存格架的最大应力也是出现在底板处，各部件的最大应力均小于许用应力值，强度满足要求。

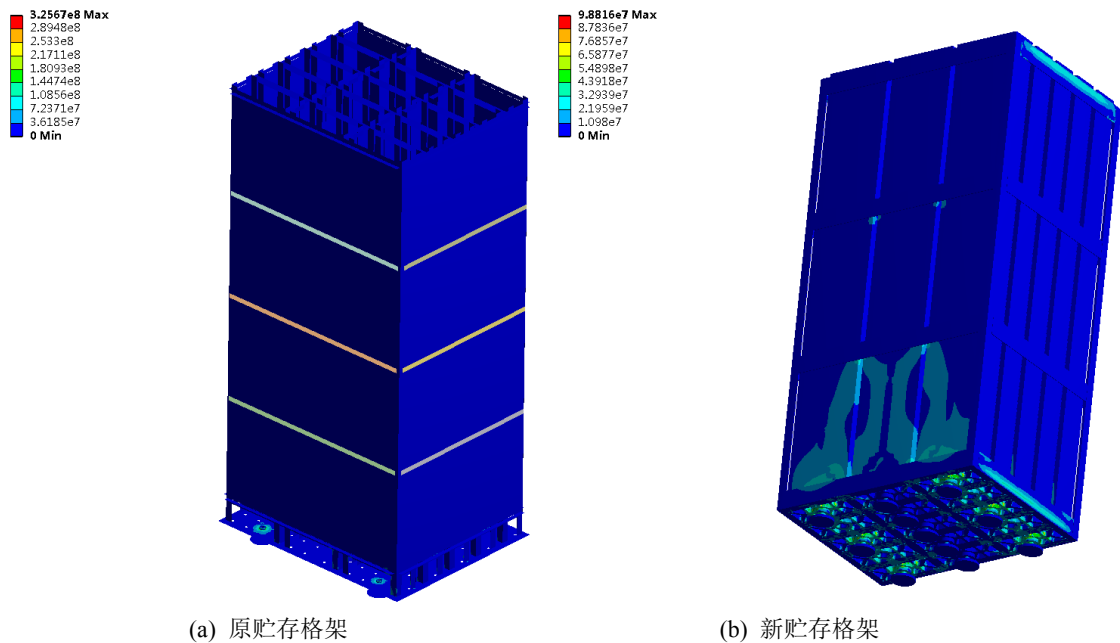


Figure 8. Stress distribution in abnormal working conditions
图 8. 异常工况应力分布图

Table 3. Stress values of each component in abnormal conditions**表 3.** 事故工况各部件应力值

贮存格架	部件	最大应力	许用应力	评定结论
原贮存格架	支腿	222.6	700	满足要求
	支腿螺母	325.7	700	满足要求
	底板	241.2	165	不满足要求
	围板	39.9	165	满足要求
	支撑立柱	150.4	165	满足要求
	栅板	32.4	165	满足要求
新贮存格架	支腿	66.1	700	满足要求
	支腿螺母	86.7	700	满足要求
	底板	98.8	220	满足要求
	围板	63.5	220	满足要求
	贮存单元	53.4	220	满足要求
	支撑立柱	15.0	220	满足要求
	栅板	38.5	220	满足要求

5. 结论

1) 新贮存格架正常工况下最大应力为 15.8 MPa 小于原贮存格架的 61.8 MPa，强度满足要求。

2) 在异常工况下新贮存格架贮存孔四周用不锈钢板进行了包覆，贮存格架应力分布更均匀。其支腿、支腿螺母、底板、支撑立柱等支撑件应力变小，未超过应力许用应力值。

3) 事故工况下，新、旧贮存格架的有限元分析结果表明：新旧贮存格架最大应力均出现在底板处，但优化后的新贮存格架满足抗震安全要求。

参考文献

- [1] 苏晓斌, 侯龙, 王琦, 等. B₄C-Al 材料中子吸收性能检测技术研究[J]. 原子核物理评论, 2019, 36(4): 462-470.
- [2] 李刚, 简敏, 王美玲, 等. 反应堆乏燃料贮存用中子吸收材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(7): 110-113.
- [3] 李晨, 钱浩, 张锴, 等. 乏燃料贮存格架时程分析方法[J]. 核技术, 2013, 36(4): 1-4.
- [4] 赵登山, 李福春, 张雨果, 等. 乏燃料贮存格架在装载井中的抗震分析[J]. 机械, 2019, 46(9): 64-69.
- [5] 李成业, 王万金, 吴伟, 廖佳涛. 研究堆乏燃料贮存架抗震计算[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 202-204+208.
- [6] 伍时建, 尚尔涛, 刘攀, 等. 基于超单元技术的乏燃料贮存格架多自由度非线性抗震分析[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 79-82.
- [7] 杨树民, 李嘉石, 徐宇, 等. 窄间隙流固耦合结构抗震分析流程规范化研究[J]. 标准研究, 2021(2): 15-19.