

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.022

钨硼填充聚4-甲基-1-戊烯基复合材料的屏蔽性能和环境耐久性评估

余明^{1,2}, 徐晓辉¹, 文豪¹, 王益元^{1,2}, 吴荣俊¹, 李晓玲^{1,2},
陈祥磊^{1,2}, 郭智荣^{1,2}, 聂凌霄¹, 朱国华¹, 葛孟团^{1,2}, 代传波^{1,2}

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064; 2. 海上核应急辐射监测与防护技术创新中心, 武汉 430064)

摘要: 聚4-甲基-1-戊烯(PMP)因其出色的耐热性和极高的氢含量,具有替代聚乙烯作为耐高温中子屏蔽基体的潜力。为了满足新型轻质屏蔽材料耐200℃高温、中子和伽马综合屏蔽的使用要求,设计了W-B₄C-PMP复合屏蔽材料,首先通过熔融共混-高温模压工艺制备了该复合屏蔽材料,再利用模拟计算和试验评估了其屏蔽性能,最后基于复合屏蔽材料的典型环境工况试验评估了其环境耐久性。屏蔽性能评估结果表明,PMP基复合材料的熔融温度达到238.13℃,中子衰减倍数能够达到聚乙烯基的97.95%,伽马衰减倍数是聚乙烯基的98.61%,可以兼顾屏蔽性能和耐热性能。典型环境工况试验评估结果表明,200℃,2h的高温老化试验后失重率为0.47%,拉伸和弯曲强度保留率在84%以上,能够满足设计基准事故工况下的使用要求。根据求解到的PMP基复合材料的热降解活化能189.31 kJ/mol,设计了70℃,20d的加速老化方案,加速老化20d后,复合材料的性能保留率远远大于GB/T 7142-2002的50%,说明复合材料满足设计寿命40℃使用30年的要求。

关键词: 聚4-甲基-1-戊烯; 钨硼填充; 熔融共混-高温模压; 屏蔽性能; 环境耐久性

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0161-06

Shielding performance and environmental durability assessment of tungsten-boron filled poly(4-methyl-1-pentenyl) composites

YU Ming^{1,2}, XU Xiaohui¹, WEN Hao¹, WANG Yiyuan^{1,2}, WU Rongjun¹, LI Xiaoling^{1,2},
CHEN Xianglei^{1,2}, GUO Zhirong^{1,2}, NIE Lingxiao¹, ZHU Guohua¹, GE Mengtuan^{1,2}, DAI Chuanbo^{1,2}

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China;

2. Innovation Center for Ocean Nuclear Emergency Radiation Monitoring and Protection Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract : Poly (4-methyl-1-pentene)(PMP) has the potential to replace polyethylene as a high-temperature resistant neutron shielding matrix due to its excellent heat resistance and high hydrogen content. To meet the service requirements of new lightweight shielding materials, including resistance to high temperatures of 200 °C and comprehensive shielding against neutrons and gamma rays, a tungsten(W)/boron carbide(B₄C)/PMP composite shielding material was designed. First, the composite shielding material was prepared via melt blending-high temperature molding process. Then, its shielding performance was evaluated through simulation calculations and experiments. Finally, its environmental durability was assessed based on the typical environmental condition tests of composite shielding materials. Results of the shielding performance show that the melting temperature of the PMP-based composite reaches 238.13 °C, its attenuation multiple reaches 97.95% of that of polyethylene-based materials, and its gamma attenuation multiple is 98.61% of that of polyethylene-based materials, achieving a balance between shielding performance and heat resistance. Results of the typical environmental condition tests indicate that after the high-temperature aging test at 200 °C for 2 hours, the weight loss rate is 0.47%, and the retention rates of tensile and flexural strengths remain above 84%, meeting the service require-

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2023AFB425)

通信作者: 李晓玲, 博士, 研究员, 研究方向为核辐射防护与监测; 陈祥磊, 研究员, 硕导, 研究方向为核辐射防护与监测。

收稿日期: 2025-09-12

引用格式: 余明, 徐晓辉, 文豪, 等. 钨硼填充聚4-甲基-1-戊烯基复合材料的屏蔽性能和环境耐久性评估[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 161-166.

YU Ming, XU Xiaohui, WEN Hao, et al. Shielding performance and environmental durability assessment of tungsten-boron filled poly(4-methyl-1-pentenyl) composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 161-166.

ments under design basis accident conditions. Based on the obtained thermal degradation activation energy of 189.31 kJ/mol for the PMP-based composite, an accelerated aging scheme of 70 °C for 20 days was designed. After 20 days of accelerated aging, the performance retention rate of the composite is much higher than GB/T 7142-2002 50%, indicating that the composite meets the requirement for a service life of 30 years at 40 °C.

Keywords : poly (4-methyl-1-pentene) ; tungsten boron filling ; melt blending-high temperature molding ; shielding performance ; environmental durability

海洋浮动平台屏蔽材料是保障平台核反应堆安全运行的关键防护设施,主要用于阻挡从反应堆装置表面、一回路冷却系统及其设备辐射出的中子和 γ 射线,避免对人员产生辐射危害。不同于陆上核动力装置,海洋浮动平台因其质量、体积和机动性等因素的影响,对屏蔽材料提出了轻质和高效屏蔽的要求。此外,近些年随着先进反应堆技术的发展,海洋浮动平台对轻质复合屏蔽材料的耐温性能也提出了更高要求:核反应堆二次屏蔽材料耐高温性能需满足反应堆失水事故下的工况要求(190 °C以上)^[1];反应堆堆腔部分区域应用环境超过200 °C^[2-3]。传统的聚乙烯(PE)基复合屏蔽材料因其力学性能和服役温度较差,制约了其在耐200 °C领域的使用。因此,有必要研发一种新型耐200 °C的高温、轻质高效复合屏蔽材料。

目前,已有较多的科技人员研究了不同类型的耐高温聚合物基屏蔽材料,包括酚醛树脂基^[4-5]、高性能环氧树脂基^[6-7]、聚酰亚胺基^[8-9]、聚醚醚酮基^[10-11]和有机硅聚合物基^[12]等,这些耐高温聚合物基材普遍含有N、O或S等杂元素组成的刚性环状结构,能够显著提高耐温性,但是杂元素也会牺牲中子屏蔽性能,而聚4-甲基-1-戊烯(PMP)是个例外:PMP材料与PE分子式简式相同,熔点在233 °C左右,在基本不牺牲屏蔽性能前提下,兼顾耐高温性能和力学性能,具有替换PE基屏蔽材料的潜力^[13]。

中子屏蔽材料的设计原则是选择合适的快中子慢化剂和热中子吸收剂,最有效的中子慢化剂是低原子序数的元素,如富含H的PMP材料;而 γ 射线屏蔽材料的设计原则是选择密度大的、高原子序数材料,例如铅(Pb)和钨(W)等。因此,笔者以PMP为基体,同时添加热中子吸收剂和重核材料,构建中子和 γ 射线复合屏蔽体系。硼(B)-10在众多元素中具有较高的热中子吸收截面(3 837 b),并且其俘获 γ 射线能量较低,与其他镧系金属或贵金属相比,硼无毒且经济性较好,因此硼化物是常用的中子吸收剂^[14-15],其中使用最为广泛的是碳化硼(B_4C)。相

同屏蔽效能下,W与Pb相比,具有无毒环保、材料厚度更小等优势,可作为新兴的 γ 屏蔽功能粒子进行研究^[16]。

基于此,笔者拟采用W和 B_4C 作为功能填料,PMP作为基体,通过熔融共混-高温模压工艺制备新型的W- B_4C -PMP复合屏蔽材料。通过模拟计算和试验测试,评估W- B_4C -PMP复合屏蔽材料与相同配比的Pb- B_4C -PE产品在屏蔽性能方面的差异。最后基于复合屏蔽材料的两种典型环境工况试验——模拟设计基准事故[失水事故(LOCA)]环境条件试验和全寿期等效加速老化试验,系统研究了PMP基复合材料的环境耐久性,这对该类屏蔽材料服役寿命预测与工程应用可靠性提升提供了理论与工程参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PMP:RT18,白色透明颗粒,日本三井化学株式会社;

W粉:10~15 μm ,南宫市锐腾合金材料有限公司;

B_4C 粉:W1.5,3 000目(1~2 μm),牡丹江宏达碳化硼有限公司;

Pb粉:200目(75 μm),淄博火炬能源有限责任公司;

APTES偶联剂: γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550),上海麦克林生化科技股份有限公司;

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW):MII,北京燕山石油化工有限公司;

浓硝酸:浓度68%,天津市富宇精细化工有限公司;

无水乙醇:分析纯,佛山西陇化工有限公司。

1.2 主要仪器及设备

磁力搅拌器:IKA RCT basic,德国艾卡仪器设备有限公司;

电子天平:CN-LQC20002,昆山安特计量装备有限公司;

精密程控干燥箱:BPG-9156B,上海一恒科学仪器有限公司;

转矩流变仪:XSS-300,上海科创橡塑机械设备有限公司;

平板硫化机:SS-8160A,松恕检测仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:Q50,美国TA仪器公司;

万用拉力机:Instron 5969,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司。

1.3 试样制备

成分配比优化:利用平板面源模型,采用基于遗传算法的GENOCOP III程序结合MCNP5程序,计算优化出W、B₄C和PMP三种成分的最优配比(质量分数)为48.65%W-1.35%B₄C-50%PMP^[17],同时为了模拟和试验评估W-B₄C-PMP材料的屏蔽性能,选取了40%W-1.35%B₄C-58.65%PMP和30%W-1.35%B₄C-68.65%PMP,以及48.65%Pb-1.35%B₄C-50%PE-UHMW(某Pb-B₄C-PE产品)作为参考,进行对比研究。

材料制备:首先通过KH550偶联剂对W和B₄C进行预处理,其中W粉偶联处理前需要用浓硝酸酸洗活化,偶联处理结束备用;接着按照优化配比提前称量好各组分原材料,进行复合材料制备:将转矩流变仪温度设置为240℃,转子转速设置为50 r/min,保温1 min后,加入PMP,塑化时间为2 min,然后添加无机填料到转子的啮合区进行混合,3 min后,停止加热和转动,等到物料温度降到210℃时,拆开转矩流变仪体,将密炼的物料使用平板硫化机热压成片材以备后续测试表征。

屏蔽板材制备:将密炼的W-B₄C-PMP复合材料置于300 mm×300 mm×20 mm的模具中先在245℃下预热10 min,接着保温保压(245℃,50 MPa)15 min,然后停止加热保压10 min,随后停止保压,自然冷却。

拉伸试样制备:将密炼的W-B₄C-PMP复合材料

置于模具中在245℃下预热6 min后,保温保压(245℃,30 MPa)1 min,停止加热保压5 min后,停止保压,自然冷却。

弯曲试样制备:停止加热保压时间为10 min,其他过程及参数同拉伸试样。

1.4 测试表征

屏蔽性能的模拟计算采用MCNP5程序计算;屏蔽性能的试验测试场所在武汉第二船舶设计研究所的辐射防护中心的电离辐射实验室,分别采用⁶⁰Co源γ屏蔽测试和²⁴¹Am-⁹Be源快中子屏蔽测试。

复合屏蔽材料的环境耐久性评估包含两类工况下的性能测试:一是模拟设计基准事故工况(LOCA)环境条件,二是全寿期等效加速老化试验。两类试验均在精密程控干燥箱中开展,试验前后均需测量材料的拉伸强度与弯曲强度,从而计算强度保留率;其中模拟LOCA环境试验需要额外测量失重率。拉伸强度测试依据GB/T 1040.1-2025执行,测试速率为50 mm/min;弯曲强度测试依据GB/T 9341-2008执行,测试速率为1 mm/min。高温加速老化试验依据GB/T 7141-2008执行,失重率测量依据GB/T 1034-2008执行。

2 结果与讨论

2.1 屏蔽性能

复合材料(尺寸300 mm×300 mm×20 mm)屏蔽性能的实测值和模拟值见表1。可以看出,γ屏蔽透射率的实测值和模拟值的一致性较好,误差均在3%左右。模拟和试验差异的可能原因是:(1)试验装置的误差,如实验室⁶⁰Co源发射粒子没有达到模拟过程Co源的均匀性;(2)试验所用的材料可能混合不均匀和样板密实性与模拟的理想材料有差异。同样的,中子屏蔽透射率的实测值与模拟值的趋势一致性也较好,相对误差在11.74%~12.60%范围内。模拟和试验差异的可能原因有:(1)中子的散射^[18];(2)测试材料可能混合不均匀和样板密实性与模拟的理想材料有差异。

表1 复合材料屏蔽性能的实测值和模拟值

Tab. 1 Measured and simulated values of shielding properties of composites

Samples	Neutron shielding transmittance			γ shielding transmittance		
	Measured value	Calculated value	Error/%	Measured value	Calculated value	Error/%
48.65%W-1.35%B ₄ C-50%PMP	0.809 5	0.714 5	11.74	0.887 0	0.861 2	2.91
40%W-1.35%B ₄ C-58.65%PMP	0.814 3	0.716 2	12.05	0.904 7	0.877 3	3.03
30%W-1.35%B ₄ C-68.65%PMP	0.821 4	0.717 9	12.60	0.919 0	0.891 7	2.97
48.65%Pb-1.35%B ₄ C-50%PE-UHMW	0.792 9	0.696 8	12.12	0.874 7	0.847 5	3.10

48.65%W-1.35%B₄C-50%PMP 材料与同配比的 48.65%Pb-1.35%B₄C-50%PE-UHMW 产品相比, PMP 基的中子衰减倍数实测值是 PE 基的 97.95%, 模拟值是 PE 基的 97.52%; PMP 基的伽马衰减倍数实测值是 PE 基的 98.61%, 模拟值是 PE 基的 98.41%。两种材料的熔融温度(T_m)见表 2, PMP 基材料的 T_m 为 238.13 °C, 远远大于 PE 基材料的熔融温度, 因此, PMP 基复合材料可以兼顾屏蔽性能和耐热性能, 替换 PE 基屏蔽材料。

表 2 复合材料的熔融温度

Tab. 2 Melting temperature of composites	
Composites	$T_m/^\circ\text{C}$
48.65%W-1.35%B ₄ C-50%PMP	238.13
48.65%Pb-1.35%B ₄ C-50%PE-UHMW	135.53

2.2 模拟设计基准事故工况环境条件性能

高温老化和设计基准事故工况温度曲线如图 1 所示, 显然以 200 °C, 2 h 的高温老化试验可包络模拟设计基准事故工况试验。对 PMP 基复合材料在 200 °C, 2 h 高温老化前后分别进行失重率、拉伸强度和弯曲强度测试, 以拉伸强度和弯曲强度的性能保持率 50%^[19]作为材料失效的临界点, 判定材料是否满足模拟设计基准事故工况下的使用要求。

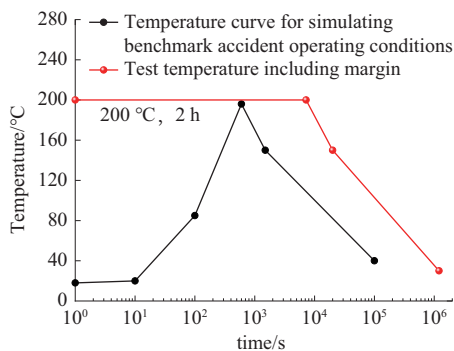


图 1 高温老化与设计基准事故工况温度曲线对比

Fig. 1 Comparison of temperature curves for high-temperature aging and design basis accident condition

PMP 基复合材料在 200 °C, 2 h 高温老化后的失重率以及拉伸强度、弯曲强度保留率如图 2 所示。结果显示: 保温 2 h 后, 复合材料平均失重率为 0.47%, 这主要源于水分损失。水分损失主要发生在 100 °C 和 200 °C 之间, 包括复合材料表面蒸发水以及材料内物理吸附的水分^[20-21]。PMP 基复合材料老化后的拉伸强度是老化前的 84.8%, 弯曲强度是老化前的 91.05%, 表明拉伸和弯曲强度保留率在 84% 以上, 能够满足设计基准事故工况下的使用要求。

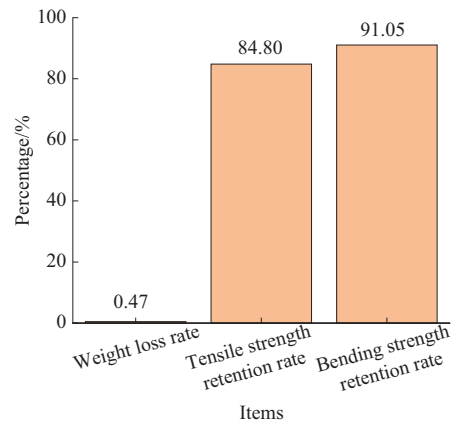


图 2 PMP 基复合材料高温老化性能

Fig. 2 High-temperature aging performances of PMP-based composites

2.3 全寿期等效加速老化试验

全寿期等效加速老化试验的主要目的是在短时间内模拟产品在长期自然使用或储存条件下的老化过程, 从而快速评估产品的可靠性、性能衰减及寿命。由于屏蔽材料的设计寿命是 40 °C 使用 30 年, 为了验证其 30 年的使用寿命, 有必要对其高温加速寿命试验进行验证。

2.3.1 加速模型

通过对加速老化试验所获得的产品寿命指标进行分析和处理, 推算出在正常环境工况下产品实际的使用寿命, 以此为基础, 构建加速应力水平和寿命指标之间的分析模型, 该模型则称为加速模型。Arrhenius 模型就属于典型的温度加速模型, 该模型描述了温度和化学反应速率间的关系。老化反应速率 K 与温度 T 的关系服从 Arrhenius 公式^[22], 见式(1)。

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (1)$$

式中: A 为频率因子, 单位与老化反应速率 K 一致; E_a 为热降解活化能, 单位 J/mol; R 为气体常数, 取值 8.314 J/(K·mol); T 为热力学温度, 单位 K。

2.3.2 E_a 计算

根据 Arrhenius 公式, 可以设计加速老化试验方案。设计加速老化试验方案之前, 需要计算出 PMP 基复合材料的热降解活化能 E_a 。笔者通过 Kissinger 法和 Friedman 法交叉验证算出 PMP 基复合材料的 E_a 。

图 3 为在氮气气氛下不同加热速率 (5, 10, 20 °C/min) PMP 基复合材料的 TG 曲线。随着加热速率的增加, 所有复合材料的热降解曲线都向更高的温度移动。热稳定性的变化可以使用热动力学

方法进行详细研究。复合材料的热降解动力学主要分为两大类,即微分法和积分法。微分方法包括 Kissinger 法和 Friedman 法,积分方法包括 Coats-Redfern 法、Ozawa-Flynn-Wall 法和 Kissinger-Akahira-Sunose (KAS)法^[23-24]。其中 Kissinger 法和 Friedman 法通常用于确定复合材料的 E_a 。

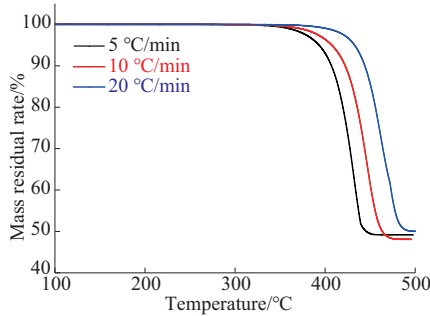


图3 不同加热速率下PMP基复合材料的TG曲线

Fig. 3 TG curves of PMP matrix composites under different heating rates

Kissinger 法的公式见式(2)。

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_{\max}^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) + \ln\left[n(1 - \alpha_{\max})^{n-1}\right] - \frac{E_a}{RT_{\max}} \quad (2)$$

式中: β 为升温速率; $T_{\max}$ 为DTG曲线的最高温度; n 为反应级数; $\alpha_{\max}$ 为 $T_{\max}$ 对应的转化率。

通过绘制 $\ln\left(\frac{\beta}{T_{\max}^2}\right)$ 对 $1/T_{\max}$ 的直线,得到斜率 $k = -E_a/R$,可计算出 E_a 。

Friedman 法的公式见式(3)。

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) &= \ln\left(\beta \frac{d\alpha}{dT}\right) \\ &= \ln A + n \ln(1 - \alpha) - \frac{E_a}{RT} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: α 为转化率; $d\alpha/dt$ 为在某一时刻的瞬时降解速率。绘制 $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ 对 $1/T$ 的直线,可以从斜率推导出 E_a 。

通过 Kissinger 法和 Friedman 法交叉验证算出 PMP 基复合材料的平均 E_a 为 189.31 kJ/mol。

2.3.3 试验方案设计

加速因子(K_{AF})满足式(4)。

$$K_{AF} = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (4)$$

式中: E_a 为热解活化能,189.31 kJ/mol; T_1 为使用温度,313.15 K (40 °C); T_2 是加速试验温度,单位 K。

加速试验方案见表3。显然,80 °C温度过高,加速过快,3 d结束试验,不予考虑。因此,可选择通过 70 °C/20 d 或 60 °C/140 d 的加速试验,均可等效模拟 40 °C 下 30 年的老化效果。考虑到时间协调问题,加速试验最终采取了 70 °C/20 d 的加速方案。分别各选取拉伸和弯曲样条 6 个置于精密鼓风干燥箱,在 70 °C 下恒温加热 20 d 后,进行拉伸和弯曲性能测试。

表3 加速试验方案

Tab. 3 Accelerated test scheme

$T_2/^\circ\text{C}$	T_2/K	K_{AF}	Test timeconversion/d
60	333.15	78	140
70	343.15	570	20
80	353.15	3 723	3

2.3.4 加速试验结果与分析

图4为PMP基复合材料经过70 °C,20 d加速老化前后的拉伸强度和弯曲强度。PMP基复合材料老化后的拉伸性能是加速老化前的86.19%,弯曲性能是加速老化前的93.69%。显然,经过70 °C/20 d加速老化,复合材料的性能保留率远远大于标准的50%,说明两种复合材料满足设计寿命40 °C使用30年的要求。

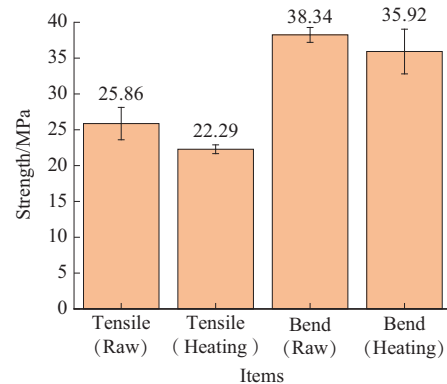


图4 复合材料加速老化试验前后的拉伸强度和弯曲强度

Fig. 4 Tensile strength and bending strength of composites before and after accelerated aging test

3 结论

(1)对于复合材料的屏蔽性能, γ 屏蔽透射率的实测值和模拟值的一致性较好,相对误差均在3%左右,中子屏蔽透射率的实测值与模拟值的趋势一致性也较好,相对误差在11.74%~12.60%。PMP基屏蔽材料的中子衰减倍数实测值是PE基的97.95%,模拟值是PE基的97.52%, γ 衰减倍数实测值是PE基的98.61%,模拟值是PE基的98.41%,PMP基复合材料可以兼顾屏蔽性能和耐热性能,替

换PE基屏蔽材料。

(2)通过200℃,2 h的高温老化试验来包络模拟设计基准事故工况试验,结果表明:复合材料平均失重率为0.47%,保温后的拉伸强度是保温前的84.8%,弯曲强度是保温前的91.05%,表明拉伸和弯曲强度保留率在84%以上,能够满足设计基准事故工况下的使用要求。

(3)通过不同加热速率方法计算热降解活化能 E_a 为189.31 kJ/mol,设计了70℃,20 d的加速方案。经过70℃,20 d加速老化,复合材料的性能保留率远远大于标准的50%,说明两种复合材料满足设计寿命40℃使用30年的要求。

参考文献

- [1] 聂凌霄,贾靖轩,吴荣俊,等.典型生物屏蔽结构及屏蔽材料耐高温性能研究[J].舰船科学技术,2019,41(19):103-107.
NIE Lingxiao, JIA Jingxuan, WU Rongjun, et al. Research on high temperature resistance on the typical biological shielding structure and biological shielding materials[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(19):103-107.
- [2] 庄亚平,马柏松.反应堆压力容器屏蔽组件设计改进[J].核动力工程,2020,41(5):185-188.
ZHUANG Yaping, MA Baisong. Design improvement of reactor vessel shielding component[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(5):185-188.
- [3] 刘晓强,邓志华,毛飞,等.反应堆堆腔用中子屏蔽材料耐热性能研究[J].核技术,2021,44(8):87-92.
LIU Xiaoqiang, DENG Zhihua, MAO Fei, et al. Investigation on the heat resistance of neutron shielding materials for reactor cavity [J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(8):87-92.
- [4] MORIOKA A, SAKURAI S, OKUNO K, et al. Development of 300℃ heat resistant boron-loaded resin for neutron shielding[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367/368/369/370:1 085-1 089.
- [5] 刘云福.新型耐高温中子屏蔽材料的结构设计与制备研究[D].南京:南京航空航天大学,2022.
LIU Yunfu. Structural design and preparation of a new type of high-temperature resistant neutron shielding material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [6] HEI D Q, CHEN R Y, LIU F, et al. A novel design of neutron shielding composite materials with three-dimensionally interwoven structure and excellent properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.156328.
- [7] WANG H Q, HUANG Q Y, ZHAI Y T. Influences of modified Sm₂O₃ on thermal stability, mechanical and neutron shielding properties of aminophenol trifunctional epoxy resin[J]. Polymers, 2022, 14(3). DOI:10.3390/polym14030638.
- [8] LI X M, WU J Y, TANG C Y, et al. High temperature resistant polyimide/boron carbide composites for neutron radiation shielding [J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 159:355-361.
- [9] BAYKARA O, İRİM Ş G, WIS A A, et al. Polyimide nanocomposites in ternary structure: "a novel simultaneous neutron and gamma-ray shielding material" [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31(11):2 466-2 479.
- [10] 王海滨.氧化钆/聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D].长春:吉林大学,2013.
WANG Haibin. Preparation and properties of gadolinium oxide/polyetheretherketone composites[D]. Changchun:Jilin University, 2013.
- [11] CAO Y, YANG H, WAN K, et al. High-performance PEEK composite materials research on 3D printing for neutron and photon radiation shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 185. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108352.
- [12] 吴鹏,刘森,付俊杰,等.新型柔性硼基苯基硅橡胶中子屏蔽材料的制备和性能研究[J].化工新型材料,2018,46(4):51-54.
WU Peng, LIU Miao, FU Junjie, et al. Preparation and property of novel flexible silicone rubber neutron shielding material with boron and phenyl[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(4): 51-54.
- [13] HUANG G, GONG J J, XIA W M, et al. Preparation and properties of high temperature resistant neutron shielding poly(4-methyl-1-pentene)/boron carbide composite materials[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2022, 331(11): 4 695 - 4 704.
- [14] OZDOĞAN H, KACAL M R, KILICOĞLU O, et al. Experimental, simulation, and theoretical investigations of gamma and neutron shielding characteristics for reinforced with boron carbide and titanium oxide composites[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2025, 226. DOI:10.1016/j.radphyschem.2024.112167.
- [15] ZHU C H, LI G, WANG J L, et al. Performance improvement in neutron-shielding ultra-high performance mortar prepared with alkaline-treated boron carbide[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71. DOI:10.1016/j.job.2023.106435.
- [16] GILYS L, GRIŠKONIS E, GRIŠKEVIČIUS P, et al. Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding[J]. Polymers, 2022, 149. DOI:10.3390/polym14091696.
- [17] YU M, LUO F, LI X L, et al. Design and fabrication of high-temperature-resistant poly(4-methyl-1-pentene) loaded with tungsten and boron carbide particles against neutron and gamma rays [J]. Polymers, 2025, 17(17). DOI:10.3390/polym17172306.
- [18] LI S F, QIU S Z, ZHANG Q H, et al. Fast-neutron multiplicity analysis based on liquid scintillation[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2016, 110:53-58.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局.塑料长期热暴露后时间-温度极限的测定:GB/T 7142—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of time-temperature limits for plastics after prolonged exposure to heat: GB/T 7142—2002[S]. Beijing:Standards Press of China,2002.