

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.008

含硼耐高温环氧树脂屏蔽材料的屏蔽、导热和力学性能

余明^{1,2}, 王益元^{1,2}, 吴荣俊¹, 聂凌霄¹, 朱国华¹, 贾靖轩¹, 徐晓辉¹, 陈成¹, 张多飞¹, 李晓玲^{1,2}, 陈祥磊^{1,2}, 郭智荣¹

(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:含硼耐高温环氧树脂具有耐高温、耐辐照、轻量化、结构化与高效中子屏蔽等综合优势,具备在苛刻工况下服役的潜力。为了研究含硼耐高温环氧树脂屏蔽材料的屏蔽、导热和力学性能,首先通过 MCNP5 程序对复合材料进行屏蔽性能计算,设计了多组配比并制备了复合材料,然后研究了碳化硼的表面改性工艺,并研究了碳化硼含量和粒径对复合材料导热性能和力学性能的影响。屏蔽计算结果表明,质量分数为 6% 的含硼环氧树脂中子屏蔽性能较优;碳化硼填料粒径越小,中子透射率越低;三种典型填料分布模型中,面心立方分布模型填料粒子数目更多且中子散射吸收的概率更高。表面改性测试表明粉料表面已成功接枝上硅烷偶联剂的官能团。导热性能和力学性能结果表明,含硼耐高温环氧树脂的热变形温度(HDT)大于 200 °C,随着碳化硼含量的增加,HDT 非线性增加,导热系数呈现 S 型增长,复合材料拉伸、压缩、弯曲强度和冲击强度等力学性能总体趋势都是下降的;随着碳化硼粒径的减小,复合材料拉伸、压缩、弯曲和冲击性能由于界面作用增强而增强。该工作为高性能环氧树脂基中子屏蔽材料的工程应用提供理论基础和技术支持。

关键词:耐高温环氧树脂;碳化硼;表面改性;屏蔽性能;导热性能;力学性能

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0059-07

Shielding performance, thermal conductivity and mechanical properties of boron containing high temperature resistant epoxy resin shielding material

YU Ming^{1,2}, WANG Yiyuan^{1,2}, WU Rongjun¹, NIE Lingxiao¹, ZHU Guohua¹, JIA Jingxuan¹, XU Xiaohui¹, CHEN Cheng¹,
ZHANG Duofei¹, LI Xiaoling^{1,2}, CHEN Xianglei^{1,2}, GUO Zhirong¹

(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 : Boron-containing high-temperature resistant epoxy resin possesses comprehensive advantages including high temperature resistance, radiation resistance, light weight, structuralization, efficient neutron shielding, and holds great potential for service under harsh working conditions. To investigate the shielding, thermal conductivity and mechanical properties of boron-containing high-temperature resistant epoxy resin shielding materials, firstly, the shielding performance of the composites was calculated using MCNP5 code, then multiple groups of formulations were designed and the composites were prepared. Subsequently, the surface modification process of boron carbide was studied, and the effects of boron carbide content and particle size on the thermal conductivity and mechanical properties of the composites were finally explored. The shielding calculation results show that the boron-containing epoxy resin with a boron content of 6% exhibits superior neutron shielding performance. Smaller particle size of boron carbide filler results in lower neutron transmittance. Among the three typical filler distribution models, the face-centered cubic model has a larger number of filler particles and higher probability of neutron scattering and absorption. Surface modification tests confirm that the functional groups of silane coupling agent have been successfully grafted onto the surface of the powder. The results of thermal conductivity and mechanical properties indicate that heat distortion temperature (HDT) of the boron-containing high-temperature resistant epoxy resin exceeds 200 °C. As the boron carbide content increases, HDT increases non-linearly and the

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: 2025-11-02

引用格式: 余明, 王益元, 吴荣俊, 等. 含硼耐高温环氧树脂屏蔽材料的屏蔽、导热和力学性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 59-65.

YU Ming, WANG Yiyuan, WU Rongjun, et al. Shielding performance, thermal conductivity and mechanical properties of boron containing high temperature resistant epoxy resin shielding material[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 59-65.

thermal conductivity shows an S-shaped growth. The mechanical properties (including tensile strength, compressive strength, flexural strength, and impact strength) of EP composites generally show a downward trend. With the decrease in boron carbide particle size, the tensile, compressive, flexural, and impact properties of the composites increase due to the enhanced interface interaction. This work provides a theoretical basis and technical support for the engineering application of high-performance epoxy resin-based neutron shielding materials.

Keywords: high temperature resistant epoxy resin ; boron carbide ; surface modification ; shielding performance ; thermal conductivity ; mechanical property

中子辐射因强穿透性和高生物危害性^[1-2],其屏蔽问题尤为复杂。中子经过靶材料屏蔽衰减时主要分为两个阶段:首先是快中子与原子核发生弹性散射和非弹性散射,降低了中子的能量;当快中子慢化减速成热中子时,将被靶材料中含有较高热中子吸收能力的功能元素捕获而吸收。因此,通常选用快中子慢化剂和热中子吸收剂来屏蔽快中子。最有效的中子慢化剂是低原子序数的元素,尤其是高含氢材料,包括水、石蜡、混凝土、聚乙烯和聚丙烯等。硼10 (¹⁰B)在众多元素中具有较高热中子吸收截面(3 837 barn),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^[3],其中使用最为广泛的是碳化硼(B₄C)。

环氧树脂(EP)以其优异的黏结性能、力学强度、加工成型性、耐化学腐蚀性和较高的氢含量^[4-5],成为制备复合屏蔽材料的理想基体。将屏蔽功能填料与EP复合,可制备出轻质、可设计性强的屏蔽材料,用于填孔、抹缝和异构件屏蔽安装,特别适用于特定场合下的施工安装要求^[6]。然而,常规EP固化物存在耐温性差(负荷热变形温度通常低于150 °C)的固有缺陷,在核设施高温工况下易发生软化、分解和屏蔽性能衰减,这已成为制约其广泛应用的关键瓶颈。因此,开发一种新型的含硼耐高温EP屏蔽材料,既保持EP优良的加工特性与屏蔽性能,又能在高温环境下保持结构稳定性和功能可靠性,具有十分重要的工程应用价值。

影响聚合物耐温性的因素主要有主价键(化学键,主要包括离子键、共价键和金属键)强度、共振结构的稳定性、次价键(物理键,即分子间作用力,包括氢键和范德华力等)强度、刚性链结构、分子量和分子量的分布以及分子上端基的稳定性。通常多数耐高温聚合物的结构特点是聚合物的分子链主要由含有杂环的芳香族链节或含有无间隔醚酮的芳香族链节构成。因此,需通过分子结构设计,如引

入刚性链段、芳香环结构,或与耐高温树脂共混改性以提升基体树脂的耐热性^[7-8],同时将高效中子吸收剂(B₄C)以微纳米尺度均匀分散到基体中,有望制备出集轻量化、结构化、耐高温与高效中子屏蔽于一体的多功能复合材料。本文旨在探讨含硼耐高温EP树脂屏蔽材料的制备工艺及屏蔽、导热和力学性能,为其在苛刻环境下的工程应用提供理论基础和技术支持。

1 材料配比设计

选择MCNP5程序对复合材料进行屏蔽性能模拟,计算模型为如图1所示的面源平板模型,模型中采用SDEF通用源卡,放射源为单向面源,imp定义了粒子权重与几何区域重要性之间的关系,从而优化模拟效率。

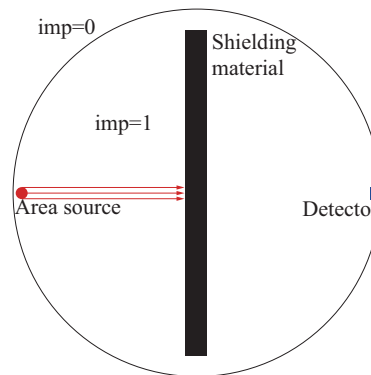


图1 面源平板模型

Fig. 1 Plane model of area source

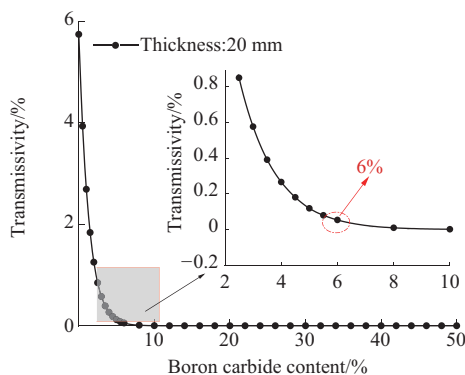
模型中采用SDEF通用源卡,放射源为单向面源,抽样方式为均匀抽样。屏蔽材料为方形平板,尺寸为2 cm×30 cm×30 cm,屏蔽材料垂直于源发射方向,入射面距离放射源15 cm,透射面距离探测器15 cm。采用F6计数卡,即计算探测器栅元的平均沉积能量。以中子穿过平板模型后的中子透射率来表征屏蔽效果。中子透射率定义见式(1)。

$$f_n = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

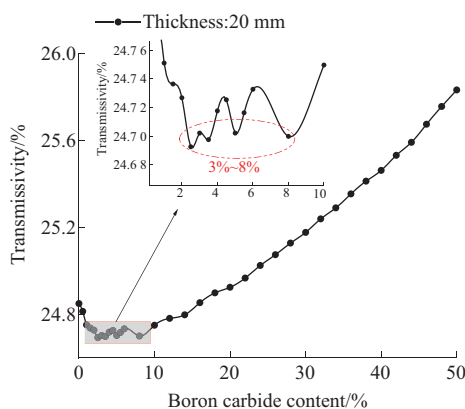
式中: f_n 代表中子透射率; ε_p 为穿过屏蔽材料后探测器栅元的平均沉积能量; ε_0 为没有屏蔽材料同

一位置处的平均沉积能量。

选择0.025 3 eV和0.1 MeV中子源,选择 B_4C 质量分数为0%~50%范围内梯度增加,进行多种材料的中子透射率对比。复合材料在多种中子源和多种配比下的中子透射率结果如图2所示。结果表明:综合比较多种中子源和 B_4C 含量,6% B_4C /94%EP复合材料的中子透射率较低,因此6%的含硼EP树脂的中子屏蔽性能较优。



(a) Transmissivity of EP composites under 0.025 3 eV neutron sources



(b) Transmissivity of EP composites under 0.1 MeV neutron sources

图2 EP复合材料在0.025 3 eV和0.1 MeV中子源下透射率

Fig. 2 Transmissivity of EP composites under 0.025 3 eV and 0.1 MeV neutron sources

为了研究 B_4C 的粒径和分布对中子屏蔽性能的影响,建立3种刚性球分布基体模型(图3):简单立方分布模型(SC)、体心立方分布模型(BCC)和面心立方分布模型(FCC),选取的 B_4C 粒径分别为1、10、50、100 μm 和1 mm, B_4C 粒径和分布对透射率影响如图4所示。结果表明:填料粒径越小,透射率越低,但是在微米尺度内粒径对透射率影响较小;相同填料粒径下,透射率大小顺序为:FCC分布<BCC分布<SC分布,这是由于一个晶胞内FCC、BCC、SC的填料粒子数目比为4:2:1,填料粒子数目越多,中子与功能粒子碰撞散射吸收的概率越高^[9]。

综上所述:6%的含硼EP树脂中子屏蔽性能较

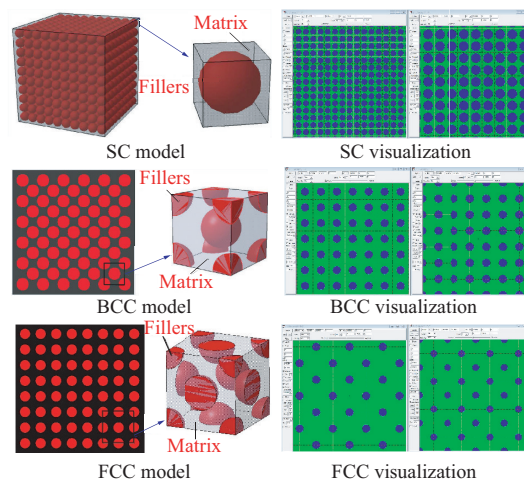


图3 三种刚性球填充模型

Fig. 3 Three rigid ball filling models

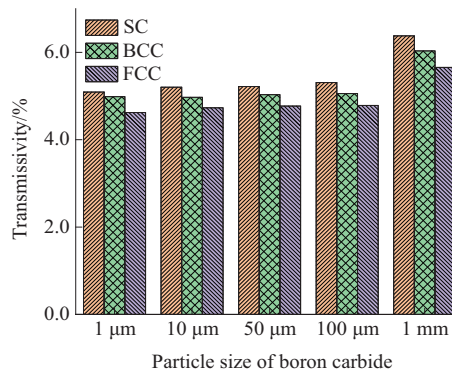


图4 B_4C 粒径和分布对EP复合材料透射率影响

Fig. 4 Influence of B_4C particle size and distribution on transmissivity of EP composites

优,填料粒径越小,透射率越低。

2 材料制备与性能测试

2.1 主要原材料

EP:MF-3102L,淡黄色透明液体,湖北珍正峰新材料有限公司;

纳米核壳粒子改性EP:ICAM8601,东莞初创应用材料有限公司;

B_4C 粉[W1.5, 3 000目(1~2 μm); W7, 1 000目(5~7 μm); 325[#](0~44 μm); 180[#](63~80 μm):牡丹江宏达碳化硼有限公司;

高分子量阴离子分散剂:M4036,佛山鸿昶新材料有限公司;

异构十醇聚氧乙烯醚:XP50,大连连晟贸易有限公司;

气硅触变剂:HB151,湖北汇富纳米材料股份有限公司;

芳香胺固化剂:E-100,滁州盛惠电子材料有限

公司;

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

冰醋酸、无水乙醇:分析纯,佛山西陇化工有限公司。

2.2 主要仪器及设备

电动搅拌器:JB200-SH,上海标本模型厂;

真空干燥箱:DZF-6020,上海一恒科学仪器有限公司;

万能拉力机:Instron 5969,英斯特朗(上海)试验设备贸易有限公司;

激光闪射仪:LFA-467,耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司;

冲击试验机:JJ-20,长春市智能仪器设备有限公司;

热变形维卡温度测量仪:WKW-300,长春市智能仪器设备有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):MIRA3,捷克泰斯肯公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析仪:INVENIO,德国布鲁克公司;

X射线光电子能谱(XPS)仪:ESCALAB 250,美国赛默飞世尔科技公司。

2.3 复合材料制备

B_4C 表面改性:取适量乙醇水溶液(乙醇与水体积比为4:1)于烧杯中,添加适量的KH550偶联剂(KH550与水体积比为1:3)与乙醇水溶液混合,搅拌混合均匀后,逐滴加入适量的冰醋酸后pH值约为4,充分水解2h;称取适量的 B_4C ,加入无水乙醇没过粉料,超声振荡1h后倒入偶联剂水解液中,80℃(油浴)×5h后,离心得到沉淀,去离子水水洗后80℃×10h烘干备用。

复合材料制备过程:按比例将EP树脂和ICAM8601增韧剂置于烧杯中高速搅拌2min后,添加适量的分散剂M4036和消泡剂XP50后,再高速搅拌2min,然后添加改性的 B_4C 并高速搅拌3min,继续加入触变剂HB151并高速搅拌5min后,抽真空脱泡,最后加入称量的E-100芳香胺固化剂并低速搅拌5min,抽真空脱泡后浇注到指定形状的模具中,最后按照145℃/2h、190℃/3h和235℃/1.5h固化工艺固化试样。为了研究 B_4C 含量和粒径对复合材料热学和力学性能的影响,分别制备了质量分

数分别为0%、2%、4%、6%、8%和10% B_4C (牌号均为W1.5,含量不同)填充EP复合材料,以及6%W1.5、6%W7、6%325[#]和6%180[#] B_4C (含量相同,牌号不同)填充EP复合材料。

2.4 性能测试

结构表征:采用SEM对改性前后 B_4C 粉料进行了SEM测试,加速电压为10keV;采用FTIR仪对 B_4C 粉料进行了FTIR测试,扫描范围400~4000 cm^{-1} ,分辨率为2 cm^{-1} ,扫描次数32次;采用XPS仪分析 B_4C 粉料改性前后表面元素的组成及化学态变化。

热性能测试:采用激光闪射仪,参考GB/T 22588-2008,测量复合材料的导热系数;采用热变形维卡温度测量仪,参考GB/T 1634.2-2019测试复合材料的负荷热变形温度(HDT),载荷为0.45MPa,升温速率为2℃/min。

力学性能测试:采用万能拉力机,参考GB/T 2567-2021,测试了复合材料的拉伸、压缩和弯曲性能,拉伸、压缩、弯曲试验速率分别为50、5、10mm/min;采用冲击试验机,参考GB/T 1843-2008,测试了复合材料的冲击强度。

3 结果与讨论

3.1 B_4C 表面改性表征

图5为改性前后 B_4C 粉末SEM照片。通过SEM照片发现:未改性 B_4C 粉明显团聚,改性的 B_4C 粉末团聚大大减小,经过KH550改性的粉料明显减缓了团聚,且粉料表面边缘变得粗糙圆润。表面改性能显著地降低粉末团聚的机理:(1)由于分散介质和表面改性剂在粉料团聚体中的渗透和吸附,降低了Hamaker常数^[10],减弱了粉料颗粒之间引力,从而在机械力作用下,容易有效地发生解聚作用;(2)粉料表面吸附了一层表面改性剂,降低了粉末表面的自由能,有效地防止了粉末的团聚。

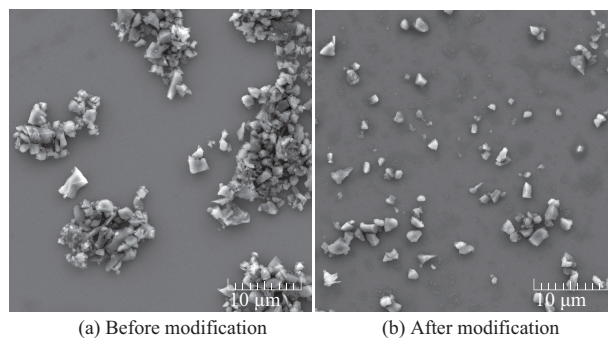


图5 改性前后 B_4C 粉末SEM照片

Fig. 5 SEM photos of B_4C powder before and after modification

图6为改性前后 B_4C 粉末的FTIR谱图。如图6所示,相比于未改性的 B_4C 原料,经表面改性 B_4C 的红外光谱在 2924 、 2854 cm^{-1} 处有2个较弱的吸收峰出现,应该是 $-CH_3$ 和 $-CH_2-$ 的C—H伸缩振动叠加峰。 1562 cm^{-1} 处刚好处于 NH_2 与B—C键重叠区域, 1087 cm^{-1} 处则刚好处于Si—O键与B—C键重叠区域,结果表明改性后的 B_4C 粉面接枝上了KH550。

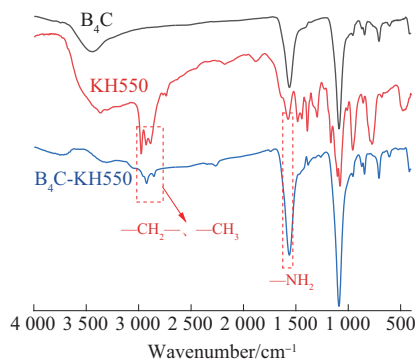


图6 改性前后 B_4C 粉末的FTIR谱图

Fig. 6 FTIR spectra of B_4C powder before and after modification

为了探索 B_4C 粉改性前后表面化学成分和化学元素价态的变化,对改性前后粉末进行XPS测试,如图7所示。从图7可以看出:在 $99\sim 104\text{ eV}$ 和 $151\sim 155\text{ eV}$ 的电子结合能附近有两个峰值,分别对应于

Si 2p 和 Si 2s。用硅烷偶联剂处理的粉末表面上Si的相对含量不同程度地增加,表明硅烷偶联剂中的Si原子成功地引入到 B_4C 表面。综上所述,偶联改性的 B_4C 粉经过一系列的表征测试,结果表明粉料表面已成功接枝上硅烷偶联剂的官能团。

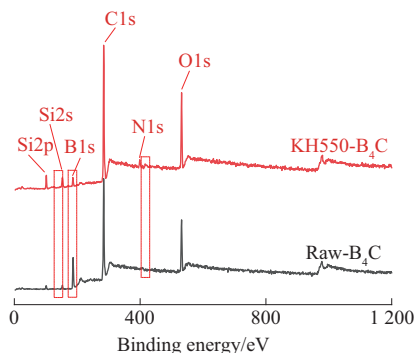


图7 B_4C 粉料改性前后XPS谱图

Fig. 7 XPS spectra of B_4C powder before and after modification

3.2 B_4C 含量的影响

聚合物内部无自由电子,热传导以声子为主。聚合物导热系数普遍较低,一方面是聚合物材料内部缺乏完整导热网络,导致热量难以传递;另一方面聚合物难以结晶形成完整晶格,分子间化学键剧烈振动会对声子导热产生散射作用^[11]。选用W1.5规格 B_4C ,其含量对EP复合材料性能影响如图8所

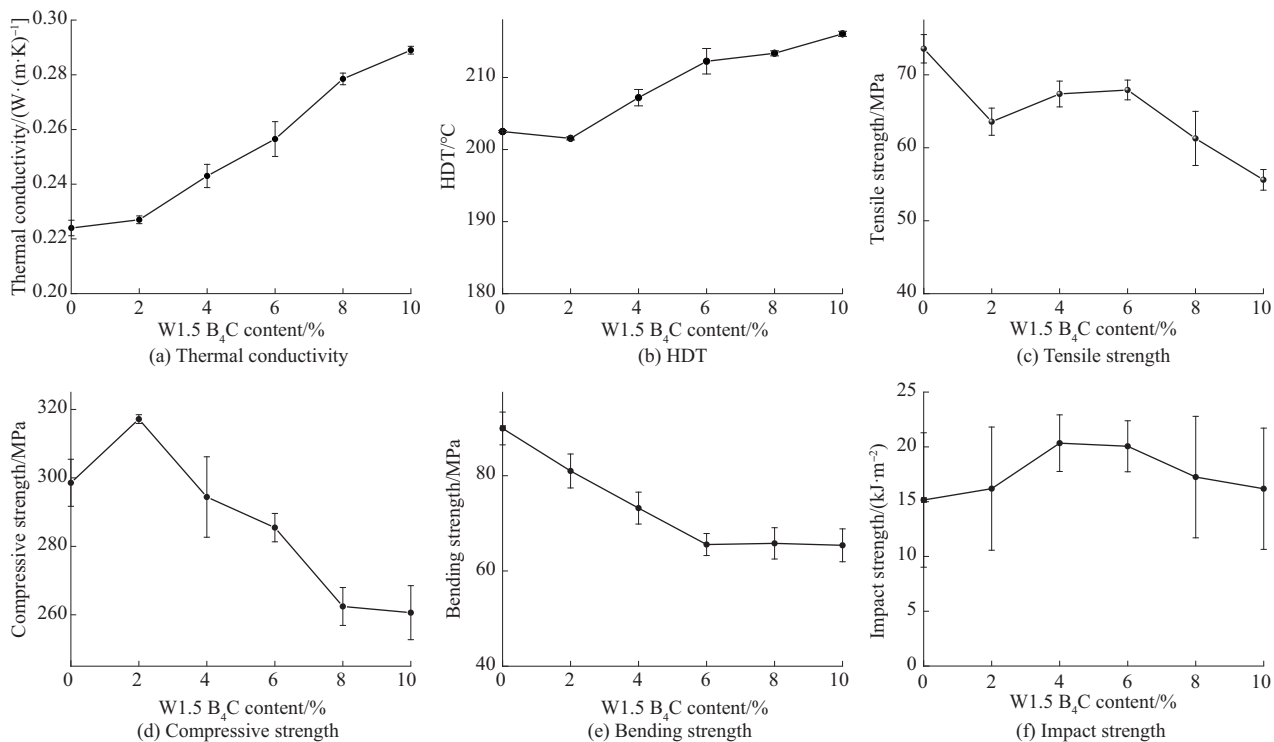


图8 B_4C 含量对EP复合材料性能的影响

Fig. 8 Effects of B_4C content on properties of EP composites

示。由图可知,当填料填充量较少时,导热填料在复合材料内部难以形成导热网络,从而使复合材料导热系数提升并不显著;当填充量适宜时,填料在基体内可形成较完整导热网络,此时导热系数提升明显;当导热填料含量达到某一饱和阈值时,导热系数提升趋于平缓,因此复合材料导热系数随着 B_4C 含量呈现S型增长,如图8a所示。

HDT指材料在特定载荷和温度变化下发生特定变形量所对应的温度,是衡量聚合物材料在热负荷作用下抵抗变形能力的指标,常用于评估聚合物材料在高温环境下的稳定性和可靠性。图8b为 B_4C 含量对复合材料HDT的影响,HDT随填料含量增加明显呈非线性上升趋势。聚合物复合材料的HDT值与其刚性(模量)有关^[12],颗粒填充可显著提高聚合物材料的模量,即提升复合材料的刚性;且填料均匀分散在聚合物基体中,能阻碍聚合物分子链的热运动^[13],进而使HDT值升高,在一定范围内填充量越大,HDT值越大。

图8c、图8d和图8e分别表示 B_4C 含量对EP复合材料拉伸、压缩和弯曲的影响。当 B_4C 填充量超过某一阈值(该阈值含量较低)时,随着填充量增加,EP复合材料的拉伸、压缩和弯曲强度等呈下降趋势。大量文献^[14-17]表明,只有低填充量填充剂才可能对力学性能有所提升,一般低填充量不超过5%,

甚至更低。图8d和图8f对应的压缩强度和冲击强度分别在 B_4C 2%含量和5%含量时达峰值,随后逐渐下降,这也印证了低填充量对性能的提升作用。

3.3 B_4C 粒径的影响

B_4C 粒径对材料性能的影响如图9所示。图9a显示,随着 B_4C 平均粒径的降低,复合材料的导热系数随之降低。这是由于有机-无机复合界面存在声子散射现象:粉体粒径越小,形成的复合界面面积越大,声子散射越剧烈,最终导热系数降低^[18]。在 B_4C 含量相同的条件下,填料粒径越小,其数量和比表面积越大,形成的有机-无机两相界面也越多,声子散射随之加剧,因此填料粒径越大,其导热性能越优。图9b表明, B_4C 粒径越小,复合材料的HDT越高。图9c至图9f分别为 B_4C 粒径对复合材料拉伸、压缩、弯曲和冲击性能的影响:显然, B_4C 粒径越小,复合材料的拉伸、压缩、弯曲和冲击性能总体上越优,这是由于随着填充粒子粒径减小,其比表面积增大,填料与聚合物基体之间的相互作用(如界面吸附作用)也随之增强,进而提升复合材料的力学性能^[19-20]。

4 结论

(1)设计的6%含硼EP树脂中子屏蔽性能较优, B_4C 填料粒径越小,中子透射率越低,三种典型填料分布模型中,FCC模型中填料粒子数目更多且中子

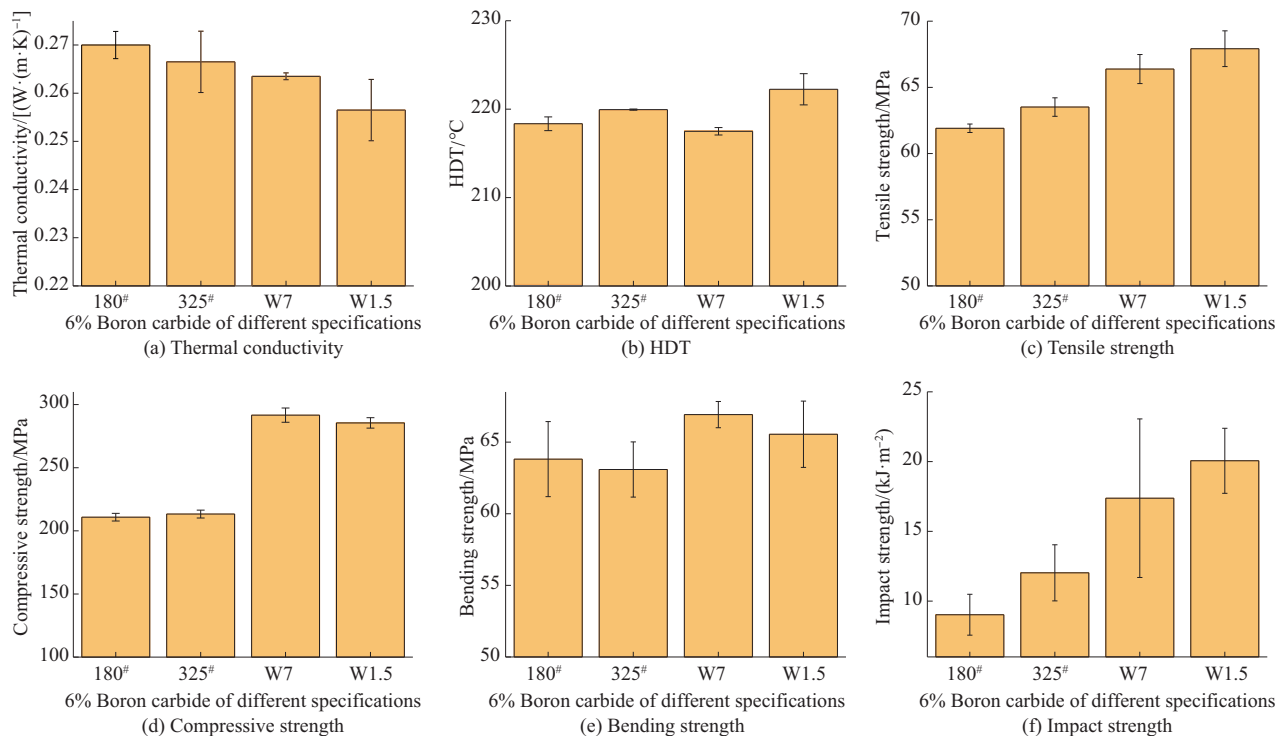


图9 B_4C 粒径对EP复合材料性能的影响

Fig. 9 Effects of B_4C particle size on properties of EP composites

散射吸收的概率更高。

(2)改性前后 B_4C 粉料的SEM、FTIR和XPS测试表明 B_4C 粉料表面已成功接枝上硅烷偶联剂的官能团。

(3)随 B_4C 含量的增加,EP复合材料导热系数呈现S型增长,HDT随着填料含量增加而非线性增加,含硼复合材料的拉伸、压缩、弯曲强度和冲击强度等力学性能总体呈下降趋势,只有低填充量的 B_4C 填充剂才可能对复合材料力学性能有所提升。

(4)随着 B_4C 粒径的减小,复合材料界面越大,散射越严重,导致导热系数下降,复合材料拉伸、压缩、弯曲和冲击性能则随着粒径减小而增大。

参考文献

- BIORDI C, SARCHIAPONE L, GALLO S. Characterization of tracks from alpha-particles in PADC detectors for passive environmental monitoring of fast neutron radiation field[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(24). DOI: 10.1088/1361-6463/ad3379.
- HU N, SUZUKI M, MASUNAGA S I, et al. Experimentally determined relative biological effectiveness of cyclotron-based epithermal neutrons designed for clinical BNCT: in vitro study[J]. *Journal of Radiation Research*, 2023, 64(5):811–815.
- PÉREZ S, TAMAYO P, RICO J, et al. Effect of fibers and boron carbide on the radiation shielding properties of limestone and magnetite aggregate concrete[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2024, 175. DOI:10.1016/j.pnucene.2024.105320.
- ABU SALEEM R, ABDELAL N, ALSABBAGH A, et al. Effect of lead nanoparticles on the radiation shielding characteristics of carbon fiber/epoxy composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023, 42(9/10):483–493.
- 翟玉涛,王洪庆,黄群英. 碳纳米纤维增强含钐环氧树脂中子屏蔽材料制备及性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2025, 59(3):734–744.
ZHAI Yutao, WANG Hongqing, HUANG Qunying. Preparation and property of carbon nanofibers-reinforced Sm_2O_3 -added epoxy resin neutron shielding material[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2025, 59(3):734–744.
- 韩志鹏,秦冲,周金向,等. 浇注型环氧树脂基耐高温中子屏蔽复合材料[J]. *应用化学*, 2023, 40(10):1 420–1 429.
HAN Zhipeng, QIN Chong, ZHOU Jinxiang, et al. High temperature resistant epoxy resin-based composites by casting process for neutron shielding[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(10):1 420–1 429.
- 曹东风,陈新昌,冀运东,等. 硅烷烷改性环氧树脂基复合材料层间力学性能与耐热性[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(11):6 098–6 109.
CAO Dongfeng, CHEN Xinchang, JI Yundong, et al. Interlaminar mechanical properties and heat resistance of silicone modified epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11):6 098–6 109.
- 贾园,蒋懿,刘振,等. 高耐热EP的开发及其应用研究进展[J]. *中国塑料*, 2020, 34(1):102–111.
- JIA Yuan, JIANG Xie, LIU Zhen, et al. Research progress in development and application of heat-resistant epoxy resins[J]. *China Plastics*, 2020, 34(1):102–111.
- SUN W Q, HU H S, YU B, et al. Random model for radiation shielding calculation of particle reinforced metal matrix composites and its application[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2020, 166. DOI:10.1016/j.apradiso.2020.109299.
- DOKMAI V, SINTHIPHARAKOON K, PHUTHONG W, et al. Anisotropic robustness of talc particles after surface modifications probed by atomic force microscopy force spectroscopy[J]. *Particulology*, 2021, 58:308–315.
- 胡泊洋. 高性能聚合物基导热复合材料的制备与研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
HU Boyang. Preparation and study of thermal-conductive polymer composites with high performance[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- LIU W J, DRZAL L T, MOHANTY A K, et al. Influence of processing methods and fiber length on physical properties of kenaf fiber reinforced soy based biocomposites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(3):352–359.
- PUTFAK N, LARPKASEMSUK A. Wollastonite and talc reinforced polypropylene hybrid composites: Mechanical, morphological and thermal properties[J]. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2021, 31(3):92–99.
- JOY J, GEORGE E, THOMAS S, et al. Effect of filler loading on polymer chain confinement and thermomechanical properties of epoxy/boron nitride (h-BN) nanocomposites[J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(11):4 494–4 503.
- MURALIDHARA B, KUMARESH BABU S P, SURESHA B. The effect of boron carbide on the mechanical properties of bidirectional carbon fiber/epoxy composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27:2 340–2 345.
- KOSTROMINA N, ZAWOO H, OSIPCHIK V, et al. The influence of the geometric shape of carbon nanoparticles on the strength properties of nanocomposite materials obtained by filling an epoxy matrix[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2020, 59(10):648–658.
- NAEBE M, WANG J, AMINI A, et al. Mechanical property and structure of covalent functionalised graphene/epoxy nanocomposites[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4. DOI:10.1038/srep04375.
- ZHANG Y J, WANG L H, HAO J P, et al. Effect of diamond particle size on thermal conductivity and thermal stability of Zr-diamond/Cu composite[J]. *Diamond and Related Materials*, 2024, 146. DOI:10.1016/j.diamond.2024.111257.
- RAJKUMAR K, NAMBIKARAJ K M, RAMRAJI K, et al. Influence of silicon filler size and concentration on thermal stability and erosion wear resistance of polymer composite[J]. *Silicon*, 2022, 14(15):9 595–9 608.
- NAMBIKARAJ K M, RAJKUMAR K, SABARINATHAN P. A novel approach on reusing silicon wafer kerf particle as potential filler material in polymer composite[J]. *Silicon*, 2022, 14(4): 1 537–1 548.