

# 环氧树脂基辐射防护材料研究进展

张雅晖<sup>1</sup>, 张有为<sup>2</sup>, 杜中贺<sup>1</sup>, 曹可<sup>3</sup>, 陆永俊<sup>3</sup>, 王连才<sup>3</sup>, 刘平桂<sup>2</sup>, 张秀芹<sup>1</sup>, 马慧玲<sup>1\*</sup>

1. 北京服装学院材料设计与工程学院, 北京 100029

2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095

3. 北京市射线应用研究中心, 辐射新材料北京市重点实验室, 北京 100015

**摘要** 介绍了 $\gamma$ 射线和中子射线的特性及屏蔽机理, 阐述了具有 $\gamma$ 射线防护功能、中子防护功能、中子伽马混合场防护功能的环氧树脂基复合材料的研究进展, 展望了环氧树脂基屏蔽材料未来的发展与挑战。

**关键词** 环氧树脂; 辐射防护; 中子射线; 伽马射线

核能是一种清洁、安全、经济的能源, 正逐渐成为全球能源结构的重要组成部分。中国是世界上最大的能源消费国, 提高核能在能源消费结构中的比例对中国能源安全具有重大的战略意义。因此, 发展安全高效的核电技术成为中国调整优化现有能源结构, 建立“清洁低碳、安全高效”现代能源体系的重要措施。在此背景下, 核能应用过程中所涉及的安全问题得到越来越广泛的关注。核辐射是放射性物质的原子核发生能量转移和形态结构改变时所释放出的微观粒子流, 主要有X射线、 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线和中子射线。这些射线具有一定

的穿透性, 能与其他物体的原子核发生反应, 作用于人体上会造成不同程度的危害。在医学领域, 适当剂量的辐射可用于癌症的放射性治疗, 但在杀死癌细胞的同时, 辐射也会让患者出现恶心乏力和脱发等现象。而过量的辐射可诱发基因突变, 使人体细胞发生癌变, 造成血癌、皮肤癌等疾病, 辐射严重时甚至导致死亡<sup>[1]</sup>。做好核辐射的防护工作是确保核安全的关键。目前, 国内的核辐射防护设备主要依靠进口, 运营成本高昂, 因此开发具有自主知识产权, 且能规模化制备具有更轻、更薄和更优异屏蔽性能的防护材料是研究的重点<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 北京市科技新星项目(Z181100006218087); 北京市属高校“高水平教师队伍建设”——青年拔尖人才资助项目(CIT&TCD201904056); 北京市长城学者培育计划项目(CIT&TCD20180321); 北京服装学院“高水平教师队伍建设”——新进青年教师启动计划项目(NHFZ20190035)

作者简介: 张雅晖, 实习研究员, 研究方向为环氧树脂基复合材料, 电子信箱: fic1207@163.com; 张有为(共同第一作者), 高级工程师, 研究方向为特种功能材料, 电子信箱: ywzhang\_pku@163.com; 马慧玲(通信作者), 副教授, 研究方向为功能复合材料, 电子信箱: hlma@bift.edu.cn

引用格式: 张雅晖, 张有为, 杜中贺, 等. 环氧树脂基辐射防护材料研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(5): 115-121; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.05.013

传统的核辐射防护材料通常采用铅板、混凝土等,存在密度大、不便于移动等缺点,不适用于某些特殊场合的使用。通过向聚合物基体中添加具有防护功能的填料,如向聚丙烯中加入铅粉,可以制备具有中子防护功能的聚合物基复合材料。与传统防护材料相比,聚合物基复合防护材料具有质地轻、密度可控、易加工成型等优点,是辐射防护材料未来发展的重点和热点。聚合物基复合防护材料主要采用聚丙烯作为基体,但聚丙烯的长期使用温度在80℃左右,无法满足核电设备中高温部件及设施的使用需求。与聚丙烯相比,环氧树脂具有优良的拉伸性能、热稳定性能、较高的稳定使用温度(120~150℃)和尺寸稳定性,作为黏结剂制备的胶黏剂、涂料、结构材料和纤维增强复合材料广泛应用于化工、电子、机械以及航空航天等工业领域。此外,环氧树脂还具有良好的耐腐蚀、耐中子和耐 $\gamma$ 射线辐照等优点,可延长屏蔽材料的服役时间;富含氢元素,具有散射慢化中子的能力。因此,环氧树脂是辐射防护材料理想的聚合物基材,将其与屏蔽功能填料复合得到的辐射防护材料可广泛应用于核电站、核仪器和核装备的辐射防护。

## 1 $\gamma$ 射线和中子射线屏蔽机理

核能是原子核中的中子或质子通过核聚变(重新组合)或核裂变(重新分配)2种方式所释放出来的能量。通常情况下原子不显电性,原子核呈稳态存在。而放射性核素(如铀-238、钍-234等)具有不稳定的原子核,可以从核内部释放出高能微观粒子流(如 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线等),这些微观粒子流可以激发物质产生电离,因此又被称为电离辐射<sup>[3]</sup>。核辐射主要包括 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、X和中子射线。不同射线由于其特征不同,对物体的辐射穿透能力也不同(图1)。 $\alpha$ 和 $\beta$ 射线分别是高速运转的氦原子核和电子,由于自身质量大、射程短且穿透能力低等原因,一般情况下无需多加防护。X射线、中子和 $\gamma$ 射线穿透能力较强,其辐射可使人的健康受到危害,严重时引起染色体突变或者细胞癌变等。X射线多用于医学领域,而在核电站建设或核能源开发过程

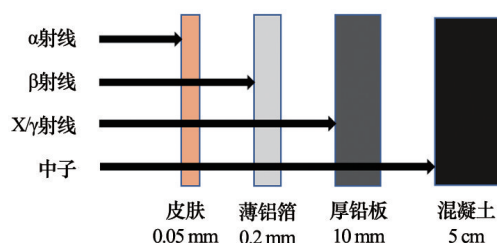


图1 不同射线和中子的穿透能力示意

中,则主要考虑 $\gamma$ 射线和中子的防护。

### 1.1 $\gamma$ 射线的屏蔽机理

$\gamma$ 射线是波长短于0.01 Å的电磁波,与物质相互作用时会产生光电效应、康普顿效应和电子对效应。一般来说,光电效应和康普顿效应是同时存在的,当 $\gamma$ 射线能量较高时( $E_\gamma \geq 1.02$  MeV),电子对效应较易发生。低能 $\gamma$ 射线通过高原子序数介质过程中,发生光电效应的几率较大;中能 $\gamma$ 射线以康普顿效应为主;高能 $\gamma$ 射线且高原子序数时,电子对效应起主要作用。因此, $\gamma$ 射线屏蔽材料屏蔽效果的好坏主要依赖于屏蔽材料对 $\gamma$ 光子的吸收和能量转化。金属铅密度大且原子序数大,对 $\gamma$ 射线有很好的屏蔽效果,是应用最早也是最广泛的防护材料,常以厚铅板或铅皮的形式应用于各种屏蔽设备。但由于铅存在粉尘和重金属污染等问题,基于环保需求,新型屏蔽材料(如镍-钨合金、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{BaO}_2$ 等)日益受到科学界的广泛关注<sup>[4]</sup>。

### 1.2 中子的屏蔽机理

中子本身不带电,不受物质原子核外部电子的影响,只与原子核反应,具有很强的穿透力。中子按所含能量的大小可分为快中子、中能中子和慢中子。中子与屏蔽材料的原子核发生作用的形式有3种:弹性散射、非弹性散射和能量吸收。慢中子与原子核发生反应主要以吸收为主;中能中子和快中子与原子核反应的主要形式为弹性散射;而对于能量大于10 MeV的快中子,发生的是非弹性散射。中子在与材料原子核发生碰撞过程中被慢化和吸收,并伴随产生次级粒子,如 $\gamma$ 射线、反冲质子、 $\alpha$ 粒子等。因此,中子屏蔽材料在设计过程中主要考虑如何实现对快中子慢化以及对慢中子的吸收。一般来说,可采用高原子序数的元素(如铅、铁、钨和

钡等)慢化快中子;用含氢较多的化合物或聚合物(如聚乙烯、聚丙烯和石蜡等)进一步慢化较快的中子;用能量较高但体积相近的硼、锂元素(如氯化锂、溴化锂、氧化硼和碳化硼等)来实现对慢中子的吸收<sup>[5]</sup>。因此,通过对上述材料的设计与组合可以得到具有屏蔽中子功能的辐射防护材料。

## 2 环氧树脂基辐射防护材料研究进展

在辐射防护材料设计过程中,除了要考虑材料的辐射防护性能,还要兼顾材料的力学性能、热稳定性和辐照稳定性。环氧树脂作为一种通用热固性树脂,具有良好的力学性能、耐高温性能和耐腐蚀性,能适应各种恶劣环境。同时,环氧树脂含有丰富的氢元素,能对慢中子起到吸收作用。因此,环氧树脂是一种新型的辐射防护材料。

### 2.1 环氧树脂的辐照稳定性

环氧树脂具有很好的辐照稳定性。Eid等<sup>[6]</sup>研究了环氧树脂/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>复合材料的辐照稳定性,结果表明当氧化铅(Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)含量为20%时,复合材料可以保持良好的力学性能,经过500 kGy的辐照,复合材料的硬度几乎没有变化。Adeli等<sup>[7]</sup>研究了环氧树脂的中子辐射防护特性,并与Al 6061合金、聚乙烯等多种中子辐射防护材料进行了比较。研究发现,环氧树脂是很好的中子慢化剂,对快中子的衰减性能较好,并能降低作用过程中的二次辐射。Adeli等<sup>[8]</sup>采用红外光谱法研究了胺固化环氧树脂的中子辐照效应,在中子通量约为10<sup>13</sup>数量级(中子/cm<sup>2</sup>·s)条件下对环氧树脂辐照12 h后,环氧树脂的分子结构仍可以保持稳定。这些研究工作表明环氧树脂具有很好的辐照稳定性,在辐射防护材料中具有较好的应用前景。

### 2.2 $\gamma$ 射线防护材料

环氧树脂作为基体可用于制备具有优异 $\gamma$ 射线屏蔽性能的防护材料。Chang等<sup>[9]</sup>将不同重量比的钨粉与环氧树脂共混制备得到钨/环氧树脂复合材料,并系统地研究了填料比对复合材料屏蔽性能和力学性能的影响。结果表明,当钨粉质量分数含量达到80%时,材料的 $\gamma$ 射线衰减系数由纯环氧树

脂的0.08 cm<sup>-1</sup>增加至0.27 cm<sup>-1</sup>。张亚丽<sup>[10]</sup>发现PbO加入环氧树脂后可提高材料对 $\gamma$ 射线的屏蔽性能,用EGSnrc软件对材料的辐射屏蔽性能进行模拟,结果表明,能量在材料中的沉积主要取决于入射粒子的能量,对于一些低能的防护(1 MeV以下),没有必要刻意地追求材料中最大的铅含量,而是可以根据实际用途,合理地调控填料含量以兼顾材料的其他性能,从而实现最佳的防护效果。张红旭<sup>[11]</sup>在碳纳米管表面修饰具有辐射防护功能的氧化钨(WO<sub>3</sub>)和氧化钆(Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)粒子,并以此为填料制备了环氧树脂基复合材料,利用 $\gamma$ 谱仪测试复合材料的辐射防护性能,放射源能量分别为79.9 keV、167.6 keV、662 keV、1.17 MeV和1.33 MeV。结果表明,煅烧得到的WO<sub>3</sub>/碳纳米管/环氧树脂材料辐射防护性能要高于直接共混的WO<sub>3</sub>/碳纳米管/环氧树脂材料的辐射防护性能,在低能段的辐射防护性能提升效果尤为明显。WO<sub>3</sub>/碳纳米管/环氧树脂材料对79.9 keV的 $\gamma$ 射线的线性衰减系数和质量衰减系数比WO<sub>3</sub>/碳纳米管/环氧树脂复合材料线性衰减系数和质量衰减系数分别提升3.2%和3.1%。Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/环氧树脂复合材料对79.9 keV的 $\gamma$ 射线的线性衰减系数和质量衰减系数分别为纯环氧树脂材料线性衰减系数和质量衰减系数的3.4倍和3倍,样品厚度1 cm时的辐射防护比例为-44.5%。而在高能段时,两者辐射防护性能差别不大。这些研究表明环氧树脂作为基体在制备高性能 $\gamma$ 射线辐射防护材料方面的应用潜力。

对于环氧树脂基辐射防护材料来说,功能填料的尺寸对复合材料的辐射防护性能影响很大,纳米粒子具有特殊的表面与界面效应、小尺寸效应和量子尺寸效应,如果填料的粒径可以达到纳米数量级,可赋予材料更为优异的辐射防护性能。张瑜<sup>[12]</sup>等采用辐射接枝共聚方法制备了聚丙烯酸铅纳米粒子/环氧树脂基防辐射材料,并进行了 $\gamma$ 能谱测量。结果表明,该复合材料具有海岛双相结构,可作为低密度的辐射防护材料。聚丙烯酸铅粒子以纳米级尺寸均匀分散,增大了复合材料与 $\gamma$ 射线的反应截面,增强了材料屏蔽率,在1.17 MeV的<sup>60</sup>Co放射源下,质量吸收系数 $\mu_m$ 可达到0.068 cm<sup>2</sup>/g,该

材料可应用于航空航天辐射防护领域或电子元器件封装的辐射防护玻璃。Li 等<sup>[13]</sup>以分散的微、纳米氧化钆( $Gd_2O_3$ )颗粒为填料制备了环氧树脂基复合材料,并讨论了 $Gd_2O_3$ 粒径对复合材料屏蔽性能的影响。纳米 $Gd_2O_3$ 填充的复合材料的性能更为优异,在添加质量分数都为5%时,对59.5 eV的 $\gamma$ 辐照的屏蔽性能比微米 $Gd_2O_3$ 填充的复合材料提高了28%。Dong 等<sup>[14]</sup>采用固化成型的方法制备了2种不同尺寸的 $WO_3$ 和环氧树脂(E44)复合样品,同样发现纳米 $WO_3$ 在环氧树脂基辐射屏蔽材料中的屏蔽效果优于微米 $WO_3$ 。

此外,填料的种类对 $\gamma$ 射线防护材料的性能也有很大的影响。Li 等<sup>[15]</sup>制备的含二氧化铪( $Er_2O_3$ )的玄武岩纤维增强环氧树脂基复合材料,在31、59.5和80 keV这3个 $\gamma$ 能量下的衰减值,与金属铝相比分别提升了42.9%、162.4%和98.9%,说明材料在31~80 keV的较低能量范围体现出较好的 $\gamma$ 射线屏蔽性能。这种三相复合材料具有重量轻、力学性能高等优点,在辐射屏蔽结构中具有广阔的应用前景。Mohammed<sup>[16]</sup>研究了水泥、铝和铅填充的环氧聚合物屏蔽体对 $^{137}Cs$ (辐射源能量:0.662 MeV)的屏蔽性能,线性衰减系数和累积系数均随样品厚度的增加而增大,与刚性材料以及单独一种粉体增强的复合材料相比,多种粉体填充的复合材料具有更好的屏蔽性能。Zhang 等<sup>[17]</sup>以丙烯酸铅/ $Er_2O_3$ /环氧树脂(A层)和 $WO_3$ / $Er_2O_3$ /环氧树脂(B层)为主要原料,制备了4种结构不同的多层复合材料(组合形式分别为AABB、ABAB、BABA和BBAA),在79.9 keV的 $\gamma$ 射线能量下,4种材料的辐射屏蔽率都在80%以上,表明多层复合材料具有更好的低能量 $\gamma$ 射线屏蔽能力。

由于 $\gamma$ 射线屏蔽性能测试实验存在较大风险,因此很多研究都是通过模拟计算分析来指导屏蔽材料的设计,常用的有蒙特卡罗(MCNP)计算。蒋丹枫<sup>[18]</sup>利用MCNP对Bi、Pb、Ta、Fe、Cu、W、Sn等元素的 $\gamma$ 射线防护性能进行了模拟计算,并利用WinXCom软件对La、Ce、Sm、Gd、Er等稀土元素的质量衰减系数进行了理论模拟。结果表明,Gd和W的组合可以很好的屏蔽 $\gamma$ 射线,其中W起到了屏

蔽 $\gamma$ 射线和慢化中子的双重作用,而Gd起到了吸收热中子和弥补W的 $\gamma$ 射线弱吸收区的双重作用。Malekie 等<sup>[19]</sup>用MCNP研究了质量分数50%的 $WO_3$ /E44环氧树脂复合材料在80 keV~1.33 MeV各种 $\gamma$ 射线能下的辐射屏蔽特性,结果表明纳米粒子大小为50 nm的材料具有更好的 $\gamma$ 射线衰减性能。李江苏<sup>[20]</sup>等用表面处理稀土材料 $Er_2O_3$ 的方法制得了 $Er_2O_3$ /环氧树脂,并运用基于MCNP方法的EGSnrc程序模拟了射线在材料中的传输衰减过程,结果表明 $Er_2O_3$ 的防护性能强于传统元素Pb。

### 2.3 中子防护材料

中子射线防护材料需兼具快中子慢化和慢中子吸收的功能,通常来说氢元素含量较高的材料(如水、石蜡、聚乙烯、聚丙烯以及稀土等)具有慢化快中子的功能,而含硼元素的化合物可以吸收慢中子。由于环氧树脂本身富含氢,因此碳化硼/环氧树脂复合材料是一种理想的中子防护材料。Ruhollah 等<sup>[21]</sup>研究了碳化硼( $B_4C$ )颗粒尺寸对 $B_4C$ /环氧树脂复合材料中子屏蔽性能的影响,发现降低 $B_4C$ 填料尺寸可提高复合材料的中子衰减系数。陈飞达等<sup>[22]</sup>研制了一种新型玻璃纤维/ $B_4C$ /环氧树脂复合材料,材料厚度5 cm时中子透射率仅19.6%,并且样品具有高强度高模量,在核电站燃料储存方面有巨大应用潜力。陈飞达等<sup>[23]</sup>还基于MCNP设计并制备出一种高强度、低密度的玻璃纤维/ $B_4C$ /环氧树脂复合材料,并分析了复合材料 $B_4C$ 质量分数对不同能量中子屏蔽性能的影响,表明MCNP方法在中子屏蔽材料的优化设计中是可行的,其结果为新型中子屏蔽材料的设计和制备提供了理论依据。

由于未经处理的 $B_4C$ 在环氧树脂中的分散较差,不利于复合材料屏蔽性能的提高,因此学者们在促进 $B_4C$ 在环氧树脂基体中的分散方面作了许多研究。Jun 等<sup>[24]</sup>通过超声分散法将 $B_4C$ 颗粒分散在环氧树脂中,得到了 $B_4C$ 分布更均匀、力学性能更好的 $B_4C$ /环氧树脂中子屏蔽材料。Rodrigues 等<sup>[25]</sup>采用硅烷偶联剂对 $B_4C$ 进行改性,提高了填料与环氧树脂的结合能力。改性 $B_4C$ /环氧树脂材料的剪切强度较未改性前提高24%~56%。Abenojar

等<sup>[26]</sup>对 B<sub>4</sub>C 做了增强处理,发现增强 B<sub>4</sub>C/环氧树脂比氧化铝/环氧树脂具有较强的耐磨性。

此外,也可以选择添加其他种类的填料来制备中子辐射防护材料。Okuno 等<sup>[27]</sup>研制了一种以环氧树脂为基体,硬硼酸钙石为中子屏蔽功能填料的新型复合材料,通过 252Cf 中子源测试了样品(厚度为 40 cm)的屏蔽性能,发现此复合材料对中子的衰减系数(0.7 cm<sup>-1</sup>)明显优于添加了 10% 氧化硼的混凝土/聚乙烯的材料(0.065 cm<sup>-1</sup>)。Büyükyıldız M<sup>[28]</sup>等利用 FLUKA 和 GEANT4 蒙特卡罗程序设计了钨粉/环氧树脂新型中子防护材料,根据 MCNP 模拟结果,与未添加钨粉的环氧树脂相比,新材料的总中子宏观截面值由 0.1597 cm 增加到 0.4522 cm,等效剂量率衰减提高了约 12%。

#### 2.4 中子伽马混合场防护材料

实际上,对于核电站的工作人员来说,通常面临的是多种辐射叠加的复杂环境,因此防护材料的设计也应从实际出发,研制中子伽马混合场防护材料。El-Sayed 等<sup>[29]</sup>研究了钛铁矿/环氧复合材料的复合材料在 500 mm 厚度下具有更高效的热中子和  $\gamma$  射线衰减性能,对热中子的吸收截面和对  $\gamma$  光子的衰减系数分别达到 0.1965 和 0.1007 cm<sup>-1</sup>。Korkut 等<sup>[30]</sup>制备了 5 种不同质量比例的铬铁渣/环氧树脂复合材料,并进行了 X 射线、 $\gamma$  射线和中子粒子透射实验,结果表明,随着体系中铬铁渣含量的增加,材料的防辐射性能提高,在加入量分别为 50%、60%、70% 和 80% 时,测试得到的中子吸收截面分别为 0.228、0.287、0.291 和 0.356 cm<sup>-1</sup>, $\gamma$  衰减系数分别为 0.128、0.139、0.162 和 0.208 cm<sup>-1</sup>,说明 80% 的填料比性能最好。El-Sarraf<sup>[31]</sup>研究了钛铁矿/环氧树脂复合材料作为辐射防护材料和生物混凝土防护材料的可用性,分别通过 MCNP 方法和测试得到了快中子通量率和  $\gamma$  通量的理论值与计算值,两者结果一致。Elmahroug 等<sup>[32]</sup>研究了 K 树脂(丁苯透明抗冲树脂)、250WD 树脂、普通树脂和环氧树脂 4 种树脂的  $\gamma$  射线和中子屏蔽性能,利用 WinXCom 软件计算了总衰减系数,得出 250WD 树脂比其他树脂更适合中子辐射屏蔽,而环氧树脂对  $\gamma$  射线的防护

效果比其他树脂要好。Canel 等<sup>[33]</sup>用 GEANT4 等仿真程序研究了添加不同比例的 Fe、Bi、Ta 和碳化物(WC)的环氧树脂基复合材料的辐射屏蔽性能,其中钽/环氧树脂样品的屏蔽性能最好,但与文献中已有的结果相比,所有研究样品的中子和  $\gamma$  屏蔽性能都较好。Hu 等<sup>[34]</sup>采用遗传算法(GA)和 MCNP 相结合的方法,对中子辐射和伽玛辐射屏蔽材料进行了优化设计,得到了一系列重量轻、结构紧凑、耐高温的屏蔽材料。

### 3 结论

环氧树脂具有机械强度高、体积收缩率低、质量轻、耐化学品性能等诸多优点,常作为聚合物基体制备多种功能复合材料。本文分别探讨了具有  $\gamma$  射线防护功能、中子防护功能以及中子伽马混合场防护功能的环氧树脂基复合材料的研究情况,可以推断,环氧树脂在  $\gamma$  射线和中子辐射防护材料领域具有十分广阔的应用前景。

考虑到实际应用需求,环氧树脂基辐射防护材料还存在一些挑战。首先,如何通过填料的增强改性进一步提高环氧树脂的力学性能,以解决防护材料耐久性的问题有待进一步研究。其次,如何通过多种填料的协同作用和复合材料多层结构设计来提升防护材料的屏蔽性能也是未来需要关注的重点。最后,国内目前对于环氧树脂基辐射屏蔽材料的制备仍需在实现规模化生产的基础上,提高实用性和各项性能指标,早日实现自主研发产品的标准化和系列化,打破国外对环氧树脂基屏蔽材料的生产和技术垄断,从而降低国内对辐射防护的投入成本,促进核电站建设和核能源应用的快速发展。

#### 参考文献(References)

- [1] 张桂敏, 郭建梅, 周成飞, 等. 医用射线防护屏蔽材料的研究及应用[J]. 中国辐射卫生, 2005, 14(3): 184-185.
- [2] 袁微微. 当前我国核电站辐射防护需要重点考虑和解决的问题[J]. 科技视界, 2019, 22: 95-96.
- [3] 孙天, 赵晓明. 电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2018, 35(2): 118-122.

- [4] 马涛, 刘宇艳, 刘少柱, 等. 防辐射材料的研究进展[J]. 高分子通报, 2012, 9: 81-86.
- [5] 何林, 蔡永军, 李强. 中子和伽马射线综合屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7): 1107-1113.
- [6] Eid Gh A, Kany A I, El-Toony M M, et al. Application of epoxy/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite for gamma ray shielding[J]. Journal of Nuclear Science and Applications, 2013, 46(2): 226-233.
- [7] Adeli R, Shirmardi S P, Mazinani S, et al. Nuclear characteristics of epoxy resin as a space environment neutron shielding[J]. Kerntechnik, 2017, 82(1): 125-131.
- [8] Adeli R, Shirmardi S, Abbasi H, et al. Effect of neutron irradiation on neat epoxy resin stability in shielding applications[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, 25(4): 725-729.
- [9] Chang L, Zhang Y, Liu Y J, et al. Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for  $\gamma$ -rays radiation shielding[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 356-357: 88-93.
- [10] 张亚丽. 环氧树脂基辐射防护材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [11] 张红旭. 功能化碳纳米管/环氧树脂辐射防护材料制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [12] 张瑜, 戴耀东, 李江苏, 等. 聚丙烯酸铅/环氧树脂辐射防护材料的制备及性能研究[J]. 高分子学报, 2010, 5: 582-587.
- [13] Li R, Gu Y Z, Wang Y D. Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite[J]. Materials Research Express, 2017, 4: 035035.
- [14] Dong Y, Chang S Q, Zhang H X, et al. Effects of WO<sub>3</sub> particle size in WO<sub>3</sub>/epoxy resin radiation shielding material[J]. Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd Chinese Physics Letters, 2012, 29(10): 108102.
- [15] Li R, Gu Y Z, Zhang G L, et al. Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide[J]. Composites Science and Technology, 2017, 143: 67-74.
- [16] AL-Dhuhaibat Mohammed Jebur Resen. Study of the shielding properties for some composite materials manufactured from polymer epoxy supported by cement, aluminum, iron and lead against gamma rays of the cobalt radioactive source (Co-60) [J]. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 2015, 4(6): 90-98.
- [17] Zhang H X, Chang S Q, Kang B, et al. Preparation of functional particles modified epoxy multilayer composite and their radiation shielding properties[J]. Advanced Materials Research, 2014, 900: 150-153.
- [18] 蒋丹枫. 橡塑合金辐射防护材料的制备及优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [19] Malekie Shahryar and Hajiloo Nahid. Comparative study of micro and nano size WO<sub>3</sub>/E44 epoxy composite as gamma radiation shielding using MCNP and experiment [J]. Chinese Physics Letters, 2017, 34(10): 108102.
- [20] 李江苏, 戴耀东, 张瑜, 等. 氧化钨/环氧树脂辐射防护材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2010, 38(5): 48-52.
- [21] Adeli R, Shirmardi S P, Ahmadi S J. Neutron irradiation tests on B<sub>4</sub>C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 127: 140-146.
- [22] 陈飞达. 新型纤维增强环氧树脂基复合材料研制及其中子屏蔽性能研究[C]//北京核学会. 第八届(2012年)北京核学会核应用技术学术交流会论文集. 重庆: 北京核学会, 2012: 715-719.
- [23] 陈飞达, 汤晓斌, 王鹏, 等. 基于蒙特卡罗方法的中子屏蔽材料设计[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 3016-3010.
- [24] Jun J, Kim J, Bae Y, et al. Enhancement of dispersion and adhesion of B<sub>4</sub>C particles in epoxy resin using direct ultrasonic excitation[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 416(3): 293-297.
- [25] Rodrigues D D, Broughton J G. Silane surface modification of boron carbide in epoxy composites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 46: 62-73.
- [26] Abenojar J, Martínez M A, Velasco F, et al. Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin[J]. The Journal of Adhesion, 2009, 85(4/5): 216-238.
- [27] Okuno K. Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2005, 115(1-4): 258-261.
- [28] Büyükyıldız M, Taşdelen M A, Karabul Y, et al. Measurement of photon interaction parameters of high-performance polymers and their composites[J]. Radiation Effects & Defects in Solids, 2018, 173(5/6): 474-488.
- [29] El-Sayed Abdo A, El-Sarraf M A, Gaber F A. Utilization of ilmenite/epoxy composite for neutrons and gamma rays attenuation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2003,

- 30(2): 175–187.
- [30] Korkut T, Gencel O, Kam E, et al. X-Ray, gamma, and neutron radiation tests on epoxy-ferrochromium slag composites by experiments and Monte Carlo simulations [J]. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2013, 18(3): 224–231.
- [31] El-Sarraf M A, El-Sayed A A, Abdul-Wahab M A. Usability of epoxy/ilmenite composite material as an attenuator for radiation and a restoration mortar for cracks[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 60: 362–367.
- [32] Elmahroug Y, Tellili B, Souga C. Determination of shielding parameters for different types of resins[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 63: 619–623.
- [33] Canel A, Korkut H, Korkut T. Improving neutron and gamma flexible shielding by adding medium-heavy metal powder to epoxy based composite materials[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, 158: 13–16.
- [34] Hu H, Wang Q S, Qin J, et al. Study on composite material for shielding mixed neutron and gamma-rays[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 55(4): 2376–2384.

## Research progress of epoxy resin based materials for radiation shielding

ZHANG Yahui<sup>1</sup>, ZHANG Youwei<sup>2</sup>, DU Zhonghe<sup>1</sup>, CAO Ke<sup>3</sup>, LU Yongjun<sup>3</sup>, WANG Liancai<sup>3</sup>, LIU Pinggui<sup>2</sup>, ZHANG Xiuqin<sup>1</sup>, MA Huiling<sup>\*</sup>

1. School of Materials Design & Engineering, Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, China
2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China
3. Beijing Key Laboratory of Radiation Advanced Materials, Beijing Research Center for Radiation Application, Beijing 100015, China

**Abstract** In this paper, the characteristics and radiation shielding mechanisms of  $\gamma$  ray and neutron are introduced. The latest research development of epoxy resin based composites for  $\gamma$  ray shielding, neutron shielding and  $\gamma$ -ray/neutron shielding are then reviewed. Finally, the future development and challenges of epoxy resin based radiation shielding composites are prospected.

**Keywords** epoxy resin; radiation protection; neutron shielding;  $\gamma$  ray shielding ●



(责任编辑 王丽娜)