http://pmse.scu.edu.cn

硅橡胶基电离辐射屏蔽材料研究进展

陈艳君[1,2,3], 代 培[4]

(1. 宁波职业技术大学 宁波市高性能石油树脂制备工程与技术重点实验室, 浙江 宁波 315800;
2. 宁波职业技术大学院士工作站, 浙江 宁波 315800; 3. 宁波职业技术大学 化学工程学院, 浙江 宁波 315800;
4. 中国同位素与辐射行业协会, 北京 100089)

摘要: 电离辐射屏蔽材料在核工业、核应急、核医疗等领域有广泛而深入的应用,可以起到屏蔽 γ 射线、中子、X 射线等高能电离辐射,保护人体组织器官和仪器设备免受损伤的重要作用。硅橡胶具有良好的热稳定性、耐腐蚀性、电绝缘性和弹性,同时,硅橡胶工作温度窗口很宽,适合在严苛的工位温度环境中使用,因此,可以作为电离辐射屏蔽材料的基体。但是硅橡胶的耐辐射老化性能和力学性能较差,需要进行改性或者加入功能填料进行提高。文中综述了硅橡胶的改性手段和与各种功能填料复合制备屏蔽材料的方法及性能,可为相关领域的研究工作者提供参考。

关键词: 电离辐射;γ 射线;屏蔽材料;硅橡胶
中图分类号: TQ333.93 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)03-0159-10

随着核技术开发领域的快速发展,电离辐射屏蔽技术也越来越受到人们的重视,各应用场景对屏蔽材料的性能要求也越来越高。这是因为在辐射环境中,人体的生殖系统、免疫系统和神经系统都会受到不同程度的损伤,甚至造成死亡。对于仪器设备而言,高能射线会造成其内部的电子元器件电离损伤、位移损伤和单粒子效应,影响设备的正常稳定运行,甚至影响使用寿命[1,2]。

核反应产生的电离辐射主要有 α 射线、β 射线、γ 射线、X 射线、中子等高能射线。其中,α 射线和 β 射线穿透性差,分别用纸和铝板就可以阻挡,而 γ 射线、X 射线、中子穿透能力较强,需要进行屏蔽处理。屏蔽材料已有数十年的研发历史,根据 γ 射线与物质的相互作用规律,发现原子序数较大的金属可作为 γ 射线屏蔽材料,如钨(密度 19.35 g/cm^3)、铅(密度 11.34 g/cm^3)、镍(8.90 g/cm^3)、镉(8.65 g/cm^3)、铁(7.86 g/cm^3)和锡(7.31 g/cm^3)等,这些材料可以有效地降低 γ 射线的透过率,同时对快中子也有很好的慢化效果[3,4];根据中子与物质的相互作用规律,石蜡、石墨、硼、富氢材料等含高中子吸收截面元素或高中子散射截面元素的材料能够对中子的减弱或吸收起到较好的作用[5~7]。

随着核技术应用发展速度的加快,电子加速器和反应堆在军用和民用市场的使用场景越来越多,接触电离辐射的从业人员的数量也逐渐增加。为了保障从业人员的安全,确保各种设备在辐射环境中正常运行,目前使用较多的屏蔽材料有屏蔽混凝土、高硼钢、铅硼聚乙烯等[8]。屏蔽混凝土是现代辐射场最常用的材料,多用作大型核设施场所的建筑墙体,体积大、屏蔽效果好,但是无法移动,只能作为固定式屏蔽建筑使用[9]。含硼量超过 0.1% 的硼钢称为高硼钢,高硼钢以铁为基体,对 γ 射线具有较好的屏蔽作用,同时,硼具有良好的屏蔽热中子的作用,因此,高硼钢成为 γ/中子复合场屏蔽材料的重要成员。高分子材料的发展,为屏蔽材料的多功能化和轻量化提供了新思路[10]。高分子材料方便加工,可通过

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0040
收稿日期: 2025-03-22
基金项目: 2022 年度浙江省公益技术应用研究项目(LGN22C140010); 2021 年度宁波市公益类科技计划项目(2021S148)
通讯联系人: 代培, 主要从事功能高分子材料的制备与改性研究, E-mail: daipei008@126.com

挤出、注塑、模压等工艺与无机屏蔽填料复合，使复合材料既具有屏蔽能力又具有高分子的特性。铅硼聚乙烯就是复合屏蔽材料的典型代表，该材料以聚乙烯（PE）为基体，碳化硼（B_4C）和铅（Pb）为屏蔽填料，填料均匀分散在 PE 基体中，PE 含 H 量高，对快中子有良好的慢化作用，B_4C 能有效地吸收热中子，Pb 能有效地屏蔽 γ 射线。因此，铅硼聚乙烯对于中子/γ 复合场具有很好的屏蔽效果。

高分子基复合屏蔽材料也有其明显的缺点，最凸显的就是其工作温度低，铅硼聚乙烯的使用温度仅为 80~100 ℃。为了提高耐温性，可采用聚丙烯、聚氨酯或橡胶替代聚乙烯作为基体材料使用。高分子基屏蔽材料应用范围越来越广，除耐热性外，还需具备密封性、耐老化性、耐腐蚀性、阻燃性等。随着核设施设计结构的复杂化，对于狭小空间和异型结构的屏蔽需求也越来越多。硅橡胶（SR）的分子链主要由 —Si—O— 结构组成，这种特殊的半有机半无机的分子结构使得硅橡胶展现出很多有机和无机综合特性，如良好的耐温性、柔性、耐候性、耐腐蚀等，因而广泛应用于生产和生活的各个领域。且其加工性能优异，双组分液体硅橡胶可以室温硫化，可填充缝隙、孔洞；固体硅橡胶也可进行任意塑形，具有极好的韧性和结构适应性，可满足异型结构的使用需要。在核能工业和航天装备中具有重要的地位和应用价值。

鉴于目前对相关研究缺乏系统性的总结，为了归纳该研究领域的发展需求，本文对硅橡胶基电离辐射屏蔽材料的研究工作进行了梳理。本文主要根据屏蔽填料的功能特性进行分类，从单一防护拓展到 γ 射线/中子混合场防护及硅橡胶的辐射效应。针对各种硅橡胶基复合屏蔽材料的结构与性能进行了简要的总结，为相关研究提供了借鉴和思路。

1 γ 射线屏蔽材料

1.1 硅橡胶/铅复合材料

金属铅密度大、价格低，具有很好的屏蔽效果和经济性，是最早应用于电离辐射的金属材料。随着高分子复合屏蔽材料的发展，金属铅及其氧化物颗粒可以与硅橡胶复合制备轻量化、柔性屏蔽材料。El-Kameesy[11]将氧化铅与硅橡胶复合，制备了不同氧化铅质量分数（15%~42%）的硅橡胶屏蔽材料，考察了其对不同能量 γ 射线的线性衰减系数和质量衰减系数，结果表明，对于 238 keV 的低能 γ 射线，随着氧化铅用量增加，屏蔽效果提高，对于高能量的 γ 射线，屏蔽效果甚微。但是含铅类物质具有一定的毒性，在后续的研发和应用过程中，逐渐被其他高原子序数的金属材料所替代。

1.2 硅橡胶/钨复合材料

金属钨（W）化学性质稳定，在射线防护过程中不产生二次电子辐射，具有良好的射线防护效果，是替代铅的理想材料。王超等[12]在聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）/硅橡胶中添加金属钨粉，制备了 PMMA/硅橡胶/钨粉复合材料，考察了不同钨含量的复合材料对 622 keV 和 1.25 MeV 2 种能量的 γ 射线的衰减作用。研究结果表明，对于低能量的 γ 射线，复合材料的屏蔽作用较好，这是由于低能量的 γ 射线与物质相互作用的概率更高，能量转移更多，且钨含量越高，复合材料的屏蔽作用越好，当钨质量分数大于 1% 后，复合材料的 γ 射线质量衰减系数与纯铅片近似，都在 9.0 cm^2/g 左右。

吴志锋等[13]在对手套箱管线辐射热点的屏蔽防护研究过程中发现，铅或柔性铅长时间处于高湿度

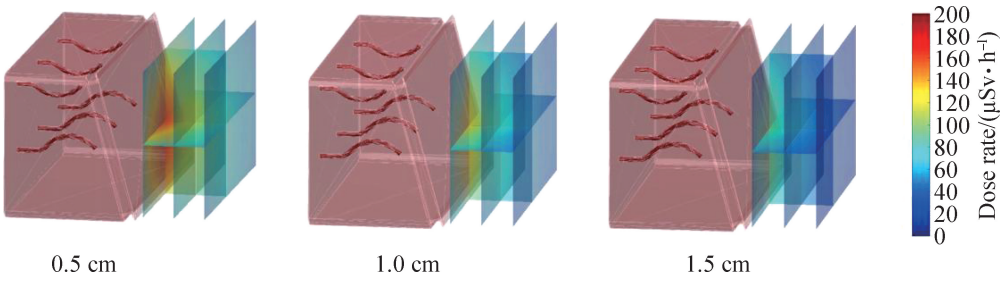


Fig. 1 Site dose rate information with 0.5~1.5 cm SR/W used to shield the glove box pipeline[13]

空气会因为氧化而变硬,影响手套箱管线的可操作性。通过将微米级 W 粉末加入硅橡胶基体中,研制出兼具柔软性和防护效果的屏蔽材料,在参考辐射场中对不同厚度的硅橡胶/W 粉复合材料的屏蔽效果进行了模拟和对比,如 Fig.1 所示,厚度越大,节省受照剂量也就越多,但是需综合考虑管道的柔软度和灵活性,以及厚度增加对取样造成的不便影响,优化出了 1 cm 厚的硅橡胶/W 粉复合材料用于手套箱放射性管线屏蔽。

钨酸铅($PbWO_4$)的密度高达 8.23 g/cm^3,该材料同时含有 Pb 和 W 2 种高原子序数金属元素,都是用于衰减 γ 射线的典型材料,并且可以产生协同效应以达到更好的 γ 辐射屏蔽。Lou 等[14,15]通过乳液自组装法和原位沉淀法,将有机相变材料封装到 $PbWO_4$ 壳体中,如 Fig.2 所示,石蜡@钨酸铅相变微胶囊兼具良好的 γ 射线屏蔽能力和潜热储存功能。将其添加到硅橡胶基体中,制备了温度调节型硅橡胶/相变微胶囊柔性 γ 射线屏蔽材料,当微胶囊的核壳比为 1∶2 时,复合材料的质量衰减系数最大为 2.05 cm^2/g,比同等条件的纯 SR 样品增长了 144.05%。

1.3　硅橡胶/铁复合材料

近年来,防护材料的应用场合和防护要求等的不同,对辐射防护材料的功能性要求越来越高[16]。选择防护材料时需要考虑到多种因素,如材料的成本、密度大小、是否具有合适的压缩强度以及材料的可使用空间等,铁材料具有良好的力学性能和防护效果、价格低廉、容易获得[17],其反向散射百分率仅为铅的 65%,以铁粉作为功能填料,添加到具有较优性能的硅橡胶中,可得到满足多样需求的铁/硅橡胶防辐射复合材料,且具有良好的力学性能。张晶晶等[18]以硅橡胶为基体,铁为填料,采用机械共混法,制备了不同铁含量的硅橡胶复合材料,研究发现,随着铁含量不断增加,复合材料对 γ 射线的屏蔽效率增大,30% 铁含量的硅橡胶复合材料各项性能最佳,比纯硅橡胶的屏蔽性能提高了 19.3%。

1.4　硅橡胶/稀土复合材料

硅橡胶基复合屏蔽材料,以其轻量化和柔性的特点,在可穿戴屏蔽服的应用方面开展了一些有价值的研究工作。陈威[19]采用 WinX Com 软件对稀土元素的金属氧化物如氧化铋、氧化钆、氧化钐等的辐射屏蔽性能进行了理论模拟和分析讨论,通过优化筛选以及与室温硫化硅橡胶复合,得到稀土元素在低能段对高原子系数元素具有弥补弱吸收区的能力,对常见的放射医疗能量的射线具有高的质量衰减系数。利用稀土氧化物复配氧化钨与硅橡胶进行复合,对合金纤维进行包覆,如 Fig.3 所示。研究结果表明,稀土元素优化协同作用的屏蔽材料对 γ 射线的屏蔽在低能段有所提高,对^{137}Cs 产生的 γ 射线的防护比例为−74%,辐射防护不均匀性小于 10%,柔软适型、使用方便,保证屏蔽性能且兼顾良好的使用性能,这说明硅橡胶基复合材料对合金纤维进行

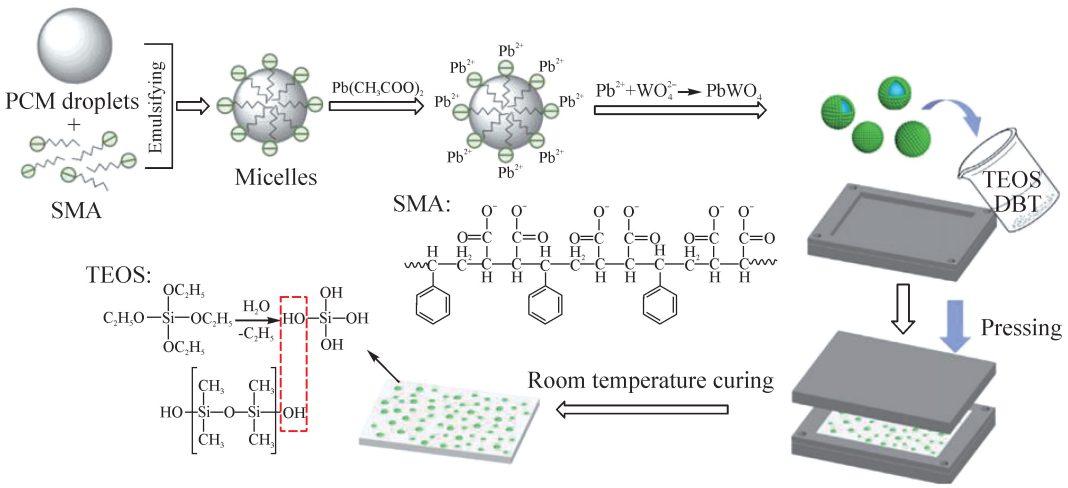


Fig. 2　Schematic formation of the MEPCMs with $PbWO_4$ shell and fabrication process of SR/$PbWO_4$ composites[14,15]

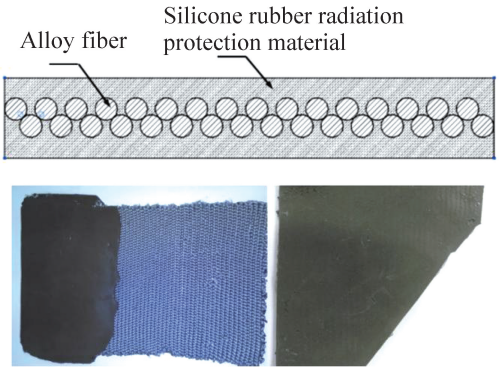


Fig. 3 Silicone rubber/rare earth/alloy fiber flexible radiation protection composite material[19]

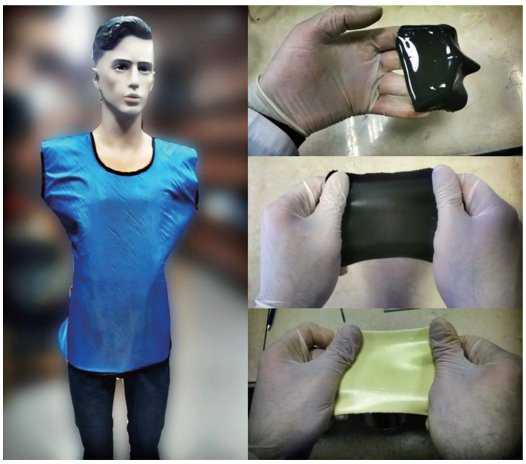


Fig. 4 Flexible γ-ray-shielding RTV silicone rubber composites and prepared cover sample[20]

封装是可行的。Atashi 等[20]将稀土金属氧化物氧化铋与重金属钨复配，与硅橡胶复合，制备了无毒、轻量化、柔性、低成本的屏蔽材料，如 Fig.4 所示。18.75% Bi_2O_3 和 18.75% W 的比例复配可实现与 76% Pb 含量的防护服相同的屏蔽效果。

2 X 射线屏蔽材料

随着科学技术的快速发展，核技术已经广泛应用在 X 射线检测部门，其中医用 X 射线个人辐射防护及安全已引起越来越多的关注。李龙等[21]采用甲基乙烯基硅胶，通过添加改性后的二苯甲酮、硼酸锌、钨粉、铅粉等功能性粒子设计制备了一种硅橡胶基屏蔽材料。2 mm 厚的屏蔽材料的铅当量为 0.362 mm Pb，实现了轻量化和柔性双目标，可应用于核电项目现场的紧急临时屏蔽。

针对个人辐射防护用品对于新型柔性无铅射线防护材料的需求，Chai 等[22]采用钨粉、氧化铋（Bi_2O_3）粉及甲基乙烯基硅胶（VMQ）为基本原料制备出一种新型柔性无铅 X 射线屏蔽复合材料，研究对比了新研制的无铅射线防护材料与具有相同填料质量分数的 W/VMQ 复合材料、Bi_2O_3/VMQ 复合材料、PbO/VMQ 复合材料的 X 射线屏蔽性能，结果如 Fig.5 所示。当 X 射线管电压为 100 kV 时，Bi_2O_3/VMQ 和 PbO/VMQ 的 X 射线透射率较高，这是因为该电压下发出的 X 射线能量为 87 keV，处于 Bi_2O_3 和 PbO 的弱屏蔽区。然而 W 对 87 keV 的 X 射线屏蔽作用较强，因此，将 W 与 Bi_2O_3 混合可以弥补 Bi_2O_3 的不足，W/Bi_2O_3/VMQ 复合材料 X 射线屏蔽性能明显优于 Bi_2O_3/VMQ 复合材料和 PbO/VMQ 复合材料。

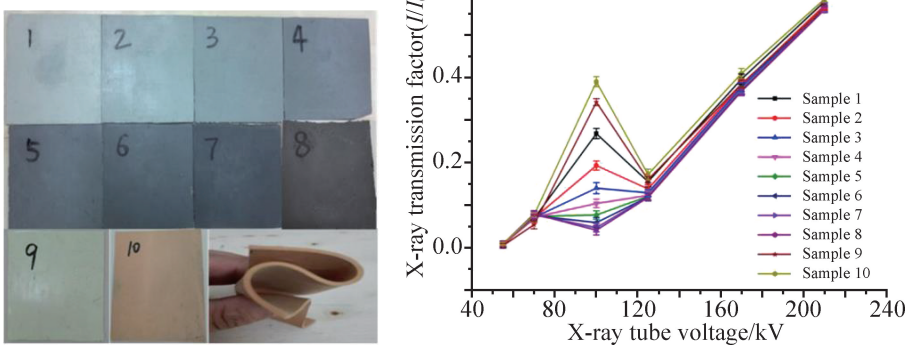


Fig. 5 Flexible X-ray-shielding VMQ composite samples and X-ray transmission factor versus X-ray-tube voltage for the VMQ samples. (samples 1~7 were W/Bi_2O_3/VMQ composites, sample 8 was W/VMQ composite, sample 9 was Bi_2O_3/VMQ composite, and sample 10 was PbO/VMQ composite)[22]

3　中子屏蔽材料

文全东等[23]制备了硅橡胶/B_4C 复合材料,为了增加无机 B_4C 与有机硅树脂界面相容性,将硅烷偶联剂 KH-550 接枝到了 B_4C 表面,降低了二者界面张力,增加了 B_4C 在硅橡胶基体中的分散效果。中子屏蔽分为快中子的慢化和慢中子的吸收,热硫化耐辐射苯基硅生胶由于苯基的存在,具有较高的含氢量,是良好的中子慢化材料[24]。B 元素的热中子截面为 3837b,非常适合热中子的吸收,将二者结合,可以对 2 种类型的中子起到屏蔽作用。吴鹏等[25]首先通过阴离子催化共聚方法成功制备出了公斤级苯基硅橡胶,合成路线如 Fig.6 所示。之后通过捏合和热硫化工艺将苯基硅橡胶和碳化硼(B_4C)混合制备了苯基硅橡胶中子屏蔽复合材料,研究结果表明,苯基结构单元含量为 30%,B 元素质量分数为 20%~30%之间时,材料屏蔽效果最好。

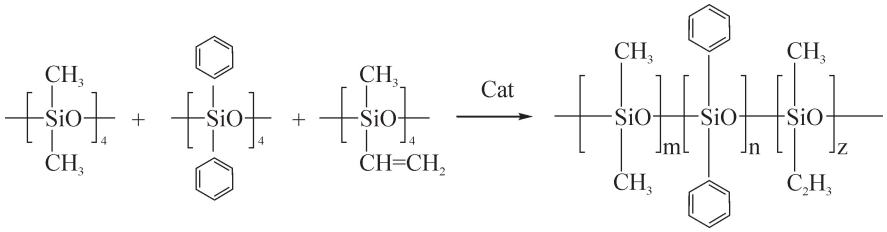


Fig. 6　Schematic diagram of benzyl silicone rubber synthesis

Li 等[26]以兼具优异中子屏蔽性能和导热性能的氮化硼(BN)为填料,硅橡胶(SR)为基体,制备了中子屏蔽用氮化硼/硅橡胶纳米复合材料。首先使用硅烷偶联剂 KH-580 对 BN 进行表面处理,使得 BN 表面接枝有可与 SR 基体中乙烯基(—CH═CH_2)发生化学反应的巯基(—SH),将 BN 纳米粒子与 SR 基体通过“巯-烯”点击反应进行化学键合,从而使 BN 均匀分散在 SR 中,改善了二者的界面相容性,如 Fig.7 所示。其拉伸强度达到了 5.15 MPa,比纯 SR 提高了约 520%;断裂伸长率为 911%,比纯 SR 增加了约 50%。此外,其热导率约为 0.55 W/(m·K),热中子透过率仅为 17.8%。

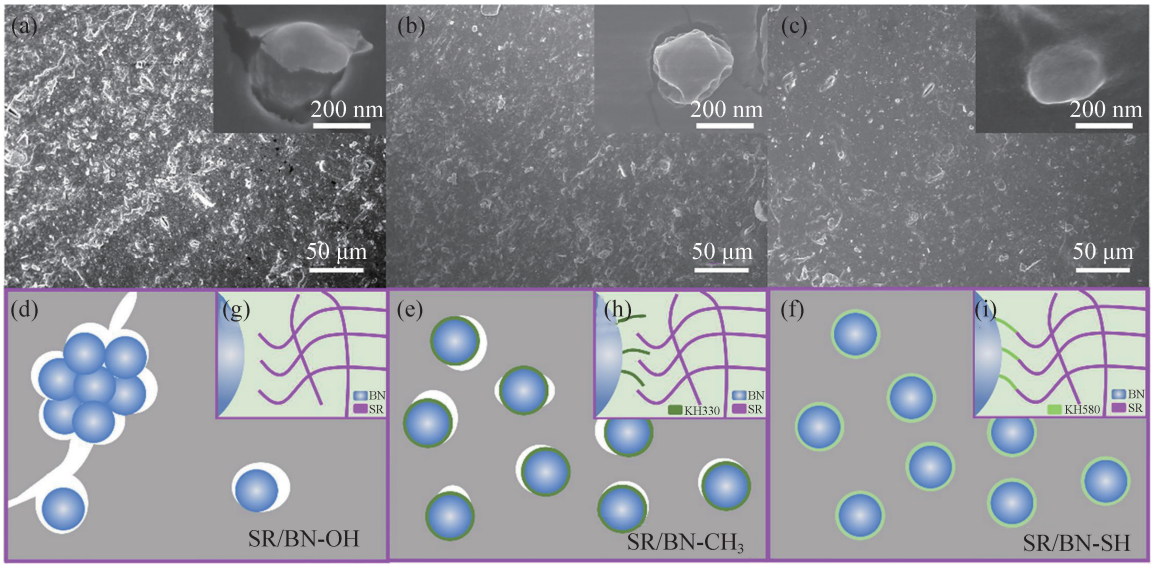


Fig. 7　Cross-sectional SEM and schematic illustration of the nanocomposites at 30% BN nanoparticles with different surface modifications: (a, d) hydroxylation; (b, e) modification with KH-330; (c, f) modification with KH-580; (g, h and i) topological chains of SR on the surfaces of BN at the interfaces[26]

为了提高中子源系统等设备设施抵抗火灾风险能力,包覆在设备设施外围的辐射防护材料除了应具备良好的柔韧性和中子屏蔽性能,还应具备良好的阻燃性能,此外,中子防护材料还应具有一定的隔热性能,在发生火灾时能减小被包覆中子源系统仪器设备的升温速率,降低仪器设备受高温损坏风险。Chai 等[27]以甲基乙烯基硅橡胶为基体,以 B_4C 为中子屏蔽填料,并在此基础上添加了硼酸锌(ZB)作为阻燃剂,提高了阻燃性能,而且增加了硼的含量。另外,为了提高隔热性,还以一定量的中空玻璃微珠(HBM)作为隔热组分,使该复合材料兼具屏蔽、阻燃和隔热的功能。为了提高无机填料的分散效果,对 B_4C,ZB 和 HBM 表明进行了表面改性,实验结果表明,当中空微珠质量分数达到 3.5% 以上时,复合材料隔热性能显著提升;硼酸锌质量分数大于 12% 时,复合材料达到难燃级别;2 cm 厚的复合材料中子透射率仅为 47.8%。Yao 等[28]采用原位共沉积的方式制备了苯基膦酸钆/氮化硼(BN-GdPP)多功能填料。通过 BN-GdPP/SR 复合材料的峰值热释放速率、总放热量和总产烟量阻燃性能测试发现,BN-GdPP 的加入使这三项指标较纯硅橡胶分别降低了 40.82%,39.76% 和 32.60%。厚度为 6 mm 的 BN-GdPP/SR 样品的热中子屏蔽率为 89%。这说明 BN-GdPP 具有阻燃和中子屏蔽的双重功效,是一种优良的多功能中子屏蔽填料。硼酸对于热中子也有较高的屏蔽效果,El-Kameesy 等[29]将硼酸(H_3BO_3)与硅橡胶通过双辊开炼机复合,并进行了屏蔽测试,硼含量为 17% 时,可以屏蔽 70% 以上的热中子。

4 混合场屏蔽材料

乏燃料后处理等过程中,会同时产生中子和 γ 射线,这就要求防护材料对中子和 γ 线有优秀的综合屏蔽能力。又由于乏燃料储运设备设施可能处于较狭小的空间,且需包覆防护的核设备形状不一,因此,防护材料应具有良好的柔性,从而能更好地贴付在形状不规则的设备构件外部进行更好地辐射防护。张政[30]采用电子束辐照法制备了纳米氧化铅和稀土元素改性的有机硅橡胶复合材料,对其辐照前后的力学性能(拉伸强度、断裂伸展率、硬度)进行了测试,探究出该复合材料的最佳改性剂量为 100 kGy。采用不同放射源(Am-241,Co-60,Cs-137,Pu-238 及中子源)对其辐射屏蔽性能进行了测试分析。通过对元素配比和辐照剂量进行优化分析,结果表明,该改性硅橡胶复合材料具有良好的力学性能和辐射屏蔽性能,在辐射防护领域具有潜在应用。

Gong 等[31]以甲基聚乙烯硅胶和双铂金硫化剂为基体材料,碳化硼(B_4C)粉末、氧化铅(PbO)粉末为功能填料,二苯甲酮(BP)为耐辐照改性剂,采用粉末表面改性工艺、粉末与甲基乙烯基硅胶混炼工艺及热压成型工艺制备了一种柔性耐辐照中子/γ 射线屏蔽材料。2 mm 厚的复合材料对锔铍中子源中子透射率仅为 0.12,对于能量分别为 0.662 MeV,1.173 MeV 和 1.332 MeV 的 γ 射线透射率分别为 0.7,0.782 和 0.795,表现出良好的中子和 γ 射线屏蔽性能。二苯甲酮可以有效降低硅胶基体辐照交联反应,改善辐照后的材料力学性能衰退。Liu 等[32]制备了硼酸铅@聚多巴胺(PBO@PDA)核壳结构功能粒子,并通过化学键的形式与硅橡胶分子结合,有效地提高了功能粒子在硅橡胶基体中的分散性。研究结果表明,当 PBO@PDA 质量分数为 40% 时,硅橡胶复合材料的力学拉伸性能提升明显,对于 γ 射线的质量衰减系数可达 2.35,对于热中子的屏蔽率可达 76.9%,表现出了良好的复合场屏蔽效果,同时充分考虑了橡胶复合材料的辐射屏蔽和柔韧性之间的平衡,这为制造用于屏蔽混合中子和 γ 射线的柔性材料提供了思路。

5 硅橡胶辐射效应

硅橡胶是辐照交联型聚合物,可利用 γ 射线或电子束对硅橡胶进行辐照硫化,使其交联[33~35]。但是长期暴露在电离辐射极端环境中,材料会变硬,失去弹性,甚至出现开裂或破碎等现象,其性能将面临严峻挑战,因此,提高硅橡胶的耐辐射老化性能具有实际应用价值[36]。沈航等[37]采用无定型硼粉与硅橡胶进行复合,结果表明,0.3 phr B 的加入,就可显著提高材料的断裂伸长率保持率和热稳定性,当吸收剂量为 200 kGy 时,其断裂伸长率保持率可维持在 49.4%±3.1%,比纯硅橡胶高了 1 倍左右,热分解温度也提高了将近 20 ℃。这是因为无定形硼粉(B)外层存在的空轨道能够提供 1 个与自由基相互作用

的空轨道,并与辐照产生的自由基反应,从而保护硅橡胶减少辐射损伤。另有研究表明,GO 对辐照产生的自由基有猝灭作用,氧化石墨烯(GO)也可以提高硅橡胶的耐辐照能力,当 GO 的添加量为 2 phr 时,经 500 kGy 辐照后,材料的力学性能下降最少[38]。

从分子设计角度出发,在硅橡胶分子侧链上引入苯环结构,可提高分子链的刚性,使分子间作用力增强以防止二甲基硅氧烷单元交联,延缓辐射交联效应,从而提高硅橡胶的抗辐照能力[39]。费楚然等[40]研究了高剂量下,苯基硅橡胶的辐射老化性能,结果表明,辐照剂量不超过 500 kGy 时,样品的断裂伸长率明显下降,从 482% 降至 65%;辐照剂量超过 1000 kGy 后,交联程度降低,导致拉伸强度明显减小,从 6.2 MPa 降至 0 MPa;回弹率和硬度随着辐照剂量增加而增加,但当剂量超过 2000 kGy 后开始减弱。另外,向硅橡胶中添加联苯、萘、菲、二苯乙炔等具有芳香结构的添加剂也可以起到提高硅橡胶耐辐照能力的作用[41]。

硅泡沫材料除了橡胶材料本身的优点外,还具有轻质、高柔韧性和高弹性的优点。作为一种具有宏观多孔结构的硅橡胶,其辐照后与硅橡胶发生相同的化学变化,即交联密度提高,材料变硬[42,43]。黄玮等[44,45]对硅泡沫材料的辐射效应进行了深入研究,考察了吸收剂量、剂量率、气氛等因素对辐解反应的影响,确定了硅泡沫力学性能从优转劣的阈值以及高剂量率短时间与低剂量率长时间辐射效应等效的规律。

6　结语与展望

核工业、医疗放射技术及核应急等领域的快速发展,对电离辐射屏蔽材料的需求日益增长。硅橡胶由于具有良好的柔韧性、耐高低温性能、化学稳定性及成型加工性,成为制备电离辐射屏蔽材料的理想基体。以硅橡胶为基础,通过添加各种具有辐射屏蔽能力的填料,可制备出性能优异的屏蔽材料,在核设施防护、医疗放射防护及突发核事故应急防护等场景发挥关键作用。

未来需要进一步探索和开发新型的屏蔽填料,以满足对电离辐射屏蔽材料更高性能的要求。一方面,研发具有更高原子序数、更优异辐射屏蔽性能且环境友好的金属或金属氧化物填料;另一方面,深入研究新型功能材料如二维材料、纳米复合材料等在电离辐射屏蔽领域的应用潜力,通过设计和调控材料的微观结构,提高其对电离辐射的屏蔽效率和多功能性。目前,硅橡胶基电离辐射屏蔽材料在实验室研究阶段已取得了一定成果,但实现大规模工业化生产和广泛应用仍面临一些挑战。未来需要加强产学研合作,优化生产工艺,降低生产成本,提高产品质量稳定性,推动该材料在各个领域的大规模应用,为保障人类健康和安全、促进相关产业发展提供有力支持。

参考文献:

[1] Sun X, Meng X, Dai P, *et al*. Enhancement of nuclear radiation shielding properties of silicone rubber with γ-ray irradiation induced graphene oxide modified carbonyl iron powder hybrid fillers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140: e54363.

[2] Zeng C, Kang Q, Duan Z, *et al*. Development of polymer composites in radiation shielding applications: a review[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2023, 33: 2191-2239.

[3] 杨文锋, 刘颖, 杨林, 等. 核辐射屏蔽材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 82-85.
Yang W F, Liu Y, Yang L, *et al*. Research progress in nuclear radiation comprehensive shielding materials[J]. Materials Reports, 2007, 21(5): 82-85.

[4] Gouda M M, Zard K. An extensive investigation on gamma shielding properties of dimethylpolysiloxane modified with nano sized SnO_2 and CdO[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 218: 111588.

[5] Gaier J R, Hardebeck W C, Bunch J R T, *et al*. Effect of intercalation in graphite epoxy composites on the shielding of high energy radiation[J]. Journal of Materials Research, 2011, 13: 2297-2301.

[6] Badhwar G D, Huff H, Wilkins R, *et al*. Comparison of graphite, aluminum, and TransHab shielding material characteristics in a high-energy neutron field[J]. Radiation Measurements, 2002, 35: 545-549.

[7] Huang G, Gong J, Xia W, *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: 4695-4704.

[8] Bilici l, Ayg N B, Deniz C U, *et al*. Fabrication of novel neutron shielding materials: polypropylene composites containing

colemanite, tincal and ulexite[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 141: 103954.

[9] Ayg N B, Sakar E, Agar O, *et al*. Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 133: 103645.

[10] El-khatib A M, Zard K, Abbas M I, *et al*. Novel composite based on silicone rubber and a nano mixture of SnO_2, Bi_2O_3, and CdO for gamma radiation protection[J]. Scientific Reports, 2024, 13: 1578.

[11] El-kameesy S U, El-nashar D E, El-fiki S, *et al*. Development of silicone rubber/lead oxide composites as gamma ray shielding materials[J]. International Journal of Advanced Research, 2015, 3: 1017-1023.

[12] 王超, 陈忠宇, 韩毅. PMMA/硅橡胶/钨粉复合材料的辐射防护性能及力学性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(4): 32-35.
Wang C, Chen Z Y, Han Y. Radiation protection and mechanical properties of PMMA/silicone rubber/tungsten powder composites[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(4): 32-35.

[13] 吴志锋, 韩毅, 杨明明, 等. 柔性钨橡胶对手套箱管线辐射热点的屏蔽效果研究[J]. 材料导报, 2020, 34(z2): 572-575.
Wu Z F, Han Y, Yang M M, *et al*. Research on the shielding effect of flexible tungsten rubber for the glove box pipeline hotspots[J]. Materials Reports, 2020, 34(z2): 572-575.

[14] Lou L, Jiang Z, Zhang Q, *et al*. Phase change microcapsules with lead tungstate shell for gamma radiation shielding and thermal energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43: 8398-8409.

[15] Lou L, He Z, Li Y, *et al*. Multifunctional silicone rubber/paraffin@PbWO phase-change composites for thermoregulation and gamma radiation shielding[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44: 7674-7686.

[16] 王莉, 周元林, 李迎军. PWO 橡胶复合材料制备及 γ 射线辐射防护性能研究[J]. 功能材料, 2014, 45(18): 18120-18124.
Wang L, Zhou Y L, Li Y J. Preparation and study of γ-ray protective properties of lead tungstate rubber composite[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(18): 18120-18124.

[17] 闫玮, 钱子明, 张伟健, 等. 锂瓷石粉或硼砂增强陶瓷化硅橡胶复合材料的制备与性能[J]. 功能高分子学报, 2017, 30(4): 464-470.
Yan W, Qian Z M, Zhang W J, *et al*. Preparation and properties of ceramic silicone rubber composites improved by lithium porcelain or borax[J]. Journal of Functional Polymers, 2017, 30(4): 464-470.

[18] 张晶晶, 司明强, 任金秋. 铁/硅橡胶防辐射复合材料的制备及性能[J]. 宁夏师范学院学报, 2019, 40(7): 29-32.
Zhang J J, Si M Q, Ren J Q. Preparation and properties of iron/silicone rubber anti-radiation composite materials[J]. Journal of Ningxia Normal University, 2019, 40(7): 29-32.

[19] 陈威. 柔性核辐射防护复合材料制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Chen W. Preparation and properties of flexible radiation shielding composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[20] Atashi P, Rahmani S, Ahadi B, *et al*. Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi_2O_3 for gamma ray shielding application[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29: 12306-12322.

[21] 李龙, 康文凯, 温毅, 等. 铅钨掺杂硅橡胶基柔性材料的制备及研究[J]. 化工管理, 2020(34): 119-120.
Li L, Kang W K, Wen Y, *et al*. Preparation and study of lead/tungsten/silicone rubber flexible materials[J]. Chemical Enterprise Management, 2020(34): 119-120.

[22] Chai H, Tang X, Ni M, *et al*. Preparation and properties of novel, flexible, lead-free X-ray-shielding materials containing tungsten and bismuth(Ⅲ) oxide[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133: 43012.

[23] 文全东, 邓志华, 杨文彬, 等. 碳化硼/有机硅复合材料的制备及相关性能研究[J]. 功能材料, 2018, 49(1): 01097-01100.
Wen Q D, Deng Z H, Yang W B, *et al*. Preparation and properties of boron carbide/organic silicone composites[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(1): 01097-01100.

[24] 文全东, 邓志华, 邓建国, 等. 热硫化苯基硅生胶/碳化硼复合材料的制备及相关性能研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(4): 47-50.
Wen Q D, Deng Z H, Deng J G, *et al*. Preparation and property of heat vulcanized phenylsilicone rubber/boron carbide composite[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(4): 47-50.

[25] 吴鹏, 刘淼, 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 P, Liu M, Fu J J, *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.

[26] Li J L, Zhang Q P, Liu X, *et al*. High loading boron nitride chemically bonded with silicone rubber to enhance thermal neutron shielding and flexibility of polymer nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 50774.

[27] Chai H, Tang X, Ni M, *et al*. Preparation and properties of flexible flame-retardant neutron shielding material based on methyl vinyl silicone rubber[J]. Journal of Nuclear Materials: Materials Aspects of Fission and Fusion, 2015, 464: 210-215.

[28] Yao C, Dai Y, Xie Q, *et al*. Simultaneous improvements in the

flame retardancy and neutron shielding properties of silicone rubber through gadolinium phenylphosphonate-boron nitride heterostructures[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 216: 110508.

[29] El-kameesy S U, Kansouh W A, Salama E, *et al*. A developed material as a nuclear radiation shield for personal wearing[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2017, 5: 596-605.

[30] 张政. 核用纳米功能材料的辐照制备及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Zhang Z. Study on radiation preparation and their properties of functional nanomaterials for nuclear application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics The Graduate School, 2018.

[31] Gong P, Ni M, Chai H, *et al*. Preparation and characteristics of a flexible neutron and γ-ray shielding and radiation-resistant material reinforced by benzophenone[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2018, 50: 470-477.

[32] Liu X, Zhang Q P, Li J L, *et al*. Lead borate@polydopamine core-shell particles chemically bonded with silicone rubber for neutron and γ-rays shielding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139: 51914.

[33] 韦伟, 邹华维, 刘鹏波, 等. 电子束辐射交联硅橡胶的力学性能及导热性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(5): 113-115.
Wei W, Zou H W, Liu P B, *et al*. The mechanical properties and thermal conductivity of silicone rubber crosslinked through electron beam irradiation[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(5): 113-115.

[34] 杨明成, 朱军, 宋伟强, 等. 硅橡胶辐射硫化工艺研究[J]. 橡胶工业, 2003, 50(1): 39-41.
Yang M C, Zhu J, Song W Q, *et al*. Study of radiation vulcanization process of silicone rubber[J]. China Rubber Industry, 2003, 50(1): 39-41.

[35] 索晋玄, 罗世凯, 张长生. 硅橡胶辐射交联研究[J]. 化工新型材料, 2007, 35(11): 62-64.
Suo J X, Luo S K, Zhang C S. Study on radiation crosslink of silicone rubber[J]. New Chemical Materials, 2007, 35(11): 62-64.

[36] 陈洪兵, 秦梓铭, 王浦澄, 等. 硅橡胶辐射老化的研究进展[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, 38(3): 1-9.
Chen H B, Qin Z M, Wang P D, *et al*. Recent progress in irradiation-induced aging of silicones[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, 38(3): 1-9.

[37] 沈杭, 吴志豪, 林铭章. 无定型硼粉/硅橡胶复合材料的耐 γ 辐射老化性能[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(4): 22-31.
Shen H, Wu Z H, Lin M Z. Resistance of amorphous boron powder/silicone rubber composites to gamma radiation aging[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(4): 22-31.

[38] 杨勃. 氧化石墨烯与苯基对硅橡胶辐射效应影响的对比研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
Yang B. Comparative study of radiation effects of graphene oxide and phenyl on silicone rubber[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.

[39] 王鹏, 王儒华, 苏建波, 等. 空间辐射对甲基苯基乙烯基硅橡胶胶料性能的影响[J]. 橡胶工业, 2024, 71(8): 577-582.
Wang P, Wang R H, Su J B, *et al*. Effect of space radiation on properties of MPVQ compound[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(8): 577-582.

[40] 费楚然, 胡纯, 文艳辉, 等. 苯基硅橡胶高剂量辐射老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(5): 7-10.
Fei C R, Hu C, Wen Y H, *et al*. Study on high dose radiation aging performance of phenyl silicone rubber[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2023, 52(5): 7-10.

[41] 姜志钢, 张洁, 冯圣玉. 添加剂对高温硫化硅橡胶耐辐射性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2006, 24(3): 141-144.
Jiang Z G, Zhang J, Feng S Y. Effects of additives on the radiation resistance of heat-curable silicone rubber[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2006, 24(3): 141-144.

[42] Liu P, Liu D, Zou H, *et al*. Structure and properties of closed-cell foam prepared from irradiation crosslinked silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113: 3590-3595.

[43] Huang W, Fu Y, Wang C, *et al*. Radiation effects on methyl vinyl polysilicon foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 89: 3437-3441.

[44] 黄玮, 傅依备, 邢丕峰, 等. γ 辐射场中硅橡胶泡沫的辐射效应研究[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(6): 503-507.
Huang W, Fu Y B, Xing P F, *et al*. The irradiation effect of methyl vinyl polysilicon foam in γ-irradiation field[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(6): 503-507.

[45] 黄玮, 熊洁, 高小铃, 等. 特种核环境中甲基乙烯基硅橡胶泡沫材料的辐射效应研究[C]//中国核学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国核学会 2009 年学术年会, 2009: 4205-4210.

Progress in Research of Silicone Rubber Shielding Materials for Ionizing Radiation

Yanjun Chen[1, 2, 3], Pei Dai[4]

(*1. Ningbo Key Laboratory of High Performance Petroleum Resin Preparation Engineering and Technology, Ningbo Polytechnic University, Ningbo 315800, China;*
2. Ningbo Polytechnic Academician Workstation, Ningbo Polytechnic University, Ningbo 315800, China;
3. College of Chemical Engineering, Ningbo Polytechnic University, Ningbo 315800, China;
4. China Isotope & Radiation Association, Beijing 100089, China)

ABSTRACT: Ionizing radiation shielding materials have extensive and in-depth applications in nuclear industry, nuclear emergency response, nuclear medical care and other fields. They can play an important role in shielding high-energy ionizing radiation such as gamma rays, neutrons and X-rays, protecting human tissues and organs as well as instruments and equipment from damage. Silicone rubber has good thermal stability, corrosion resistance, electrical insulation and elasticity. Meanwhile, the working temperature window of silicone rubber is wide, making it suitable for use in harsh working temperature environments. Therefore, it can be used as the matrix of ionizing radiation shielding materials. However, the radiation aging resistance and mechanical properties of silicone rubber are poor, and they need to be improved by modification or adding functional fillers. This review introduced the modification methods of silicone rubber and the methods of preparing shielding materials by combining with various functional fillers, as well as the performance research. It is hoped that this article can provide reference information for researchers in related fields.

Keywords: ionizing radiation; γ-ray; shielding materials; silicone rubber