

知识介绍

防辐射材料的研究进展

马 涛¹, 刘宇艳^{1,2*}, 刘少柱^{1,2}, 刘振国¹

(1. 哈尔滨工业大学化工学院, 哈尔滨 150001;

2. 特种环境复合材料技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要:综述了 X 射线、 γ 射线和中子辐射屏蔽材料的研究现状, 其中在稀土高分子防辐射材料的设计与制备方面有所侧重, 并且对纳米技术的应用、屏蔽材料的优化设计等进行了简单分析、介绍, 指出了未来防辐射材料研究的可能的几个主要发展方向: 纳米技术及稀土材料在防辐射材料方面的应用及研究; 综合辐射屏蔽材料的设计与制备, 使材料兼具质轻、无毒、体积小、屏蔽范围广、屏蔽性能持久等性能; 屏蔽材料物理性能优化, 以提升材料拉伸强度、硬度、耐腐蚀性等; 屏蔽材料的优化设计方法、遗传算法、MCNP 程序、梯度材料设计等的研究与应用; 以上几个方向的交叉研究与应用。

关键词: 防辐射; 屏蔽; 复合材料; 高分子; 稀土

背景

随着国防科研、放射性医学和核技术应用的不断发展, 各种放射性射线被广泛应用, 射线对人体的伤害和对环境的破坏也逐渐为人类所认知, 对防辐射材料的研究成为材料研究的一个重要方向。然而, 近年来随着射线装置和核技术应用的进一步发展, 传统、单一的屏蔽材料已经不能满足诸如移动式反应堆和可携带辐射源等的防护要求, 如混凝土体积大、可移动性差; Pb 有毒, 存在“X 射线弱吸收区”, 对中子屏蔽效果差; 硼热中子吸收性能递减等, 为克服由此带来的挑战, 制备质轻、无毒、物理性质优异、屏蔽效果好且性能持久的新型防辐射材料具有重要意义。而稀土由于本身特殊的原子结构, 能有效弥补铅的“弱吸收区”、对热中子的 n, γ 反应截面比硼和镉高出几十倍, 对慢中子和中能中子的反应截面也比后者高出许多倍, 大多属重金属对 γ 射线屏蔽也具有较好效果, 因而稀土防辐射材料设计与制备成为当前防辐射材料一个研究热点。本文在常见防辐射材料的介绍中, 对于稀土高分子防辐射材料的设计与制备方面有所侧重, 并且对纳米技术的应用、屏蔽材料的优化设计等进行了简单介绍, 指出了未来防辐射材料研究的可能的几个主要发展方向。

1 防辐射材料研究现状

随着科技的发展, 辐射作为对人体伤害的“隐形杀手”逐渐为人们所认知, 对防辐射材料的研究亦成为当前材料研究的一个重要方向, 本文着重对三种常见防辐射材料-防 X 射线、防 γ 射线及防中子辐射材料进行了介绍。

收稿: 2011-03-31; 修回: 2011-04-24;

基金项目: 哈尔滨工业大学大学生创新性实验计划项目(201014121);

* 通讯联系人, 刘宇艳(1974—), 女, 教授, 主要从事空间环境下柔性复合材料设计与钢化技术、高分子材料的循环利用与资源化研究。Tel: 0451-86402368; E-mail: liuyy@hit.edu.cn.

1.1 防 X 射线屏蔽材料

X 射线是一种光子辐射,本质上是一种电磁波,具有很强的穿透性。其波长范围为 0.001~10nm,主要是由原子内层轨道电子跃迁或高能电子减速时与物质的能量交换作用产生,实验室常用具有高真空的 X 射线管来产生^[1]。

1.1.1 中低能 X 射线屏蔽材料 对于中低能 X 射线,如医用诊断射线防护领域,目前效果最好的是稀土元素制成的复合材料,对于稀土复合材料制备方面,主要有物理共混、化学共混及两者的结合三种制备方法,下面分别就这三方面进行相应介绍。

物理共混法方面,安骏等^[2]利用强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂制备了树脂纳米铈复合材料,铈粒径在 20nm 左右且分布均匀。由于纳米铈的小尺寸效应和特殊的轨道特征,树脂纳米铈复合材料还可作为增感屏使用,属多功能的防辐射材料。吴小飞等^[3,4]选用了五种填充物-氧化镧、氧化铈、氧化镨、氧化钕、氧化钐,分别按不同添加量加入到热塑性聚氨酯中,制备了稀土/聚氨酯复合材料。研究表明:复合材料的防辐射性能随填充物用量的增加而提高;随着稀土元素原子序数的递增,防辐射性能提高;相较 PbO/橡胶复合材料,稀土/橡胶复合材料具有无毒、质轻、高效的优点。董文敏等^[5]通过机械共混法制备了 $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$ 、 $\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_3$ 、 $\text{Pr}_2(\text{CO}_3)_3$ 、 $\text{Nd}_2(\text{CO}_3)_3$ /热塑性聚氨酯复合材料,并研究了复合材料的防辐射性能,讨论了添加 $\text{La}_2(\text{CO}_3)_3$ /TPU 回收料对材料力学性能和屏蔽性能的影响。

化学共混法应用方面,杨程等^[6,7]利用原位反应法制备了丙烯酸钆/天然橡胶复合材料,丙烯酸钆粒度低于 $1\mu\text{m}$,随着丙烯酸钆添加量的增加,材料防辐射性能显著提高,高填充下材料的力学性能仍能满足应用要求。董志华等^[8]研究了甲基丙烯酸钆 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$ 的合成工艺,并以 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$ 原生粒子为填料制备出了相应的有机稀土/橡胶复合材料,通过考察稀土有机配合物的添加量与种类、硫化剂的种类与用量等对原位反应的影响,发现只有在过氧化物引发条件下才能发生原位反应。

物理共混与化学共混综合运用方面,胡艳巧等^[9,10]采用重结晶法制备了 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$,将制备好的 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$ 与 NBR 机械共混,并分别采用过氧化物和硫黄为硫化体系交联成型的方法制成复合材料。结果表明:采用重结晶法制备的 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$ 原生粒子结构规整性好,粒径小,粒度分布均匀;随着 $\text{Gd}(\text{MAA})_3$ 添加量的增加,复合材料的射线屏蔽性能得到提高;同时,采用过氧化物硫化体系的复合材料的拉伸强度明显增强。刘力等^[11~14]采用物理共混与化学共混相结合的办法,以稀土混合物来代替铅,同时加入锡、钨、铋及相应化合物作为屏蔽主体材料,再与塑料或橡胶复合制备出了可在 40~170kVp 能量区间实现全屏蔽和完全无铅的复合材料。

1.1.2 高能 X 射线的屏蔽材料 对高能 X 射线的屏蔽,树脂/纳米铅复合材料和树脂/纳米硫酸铅复合材料^[14]是现在效果较好的一种屏蔽材料,具有密度小、铅含量少、对 X 射线屏蔽能力强的特点。安骏等^[14]研究发现复合材料中的铅和硫酸铅的纳米颗粒经 X 射线照射后趋于更稳定的状态,且纳米颗粒的小尺寸效应等特性没有降低。铅或硫酸铅颗粒越小、分布越均匀,对 X 射线屏蔽性能越好,纳米技术的应用对复合材料的屏蔽有利。

其它方面,Fan 等^[16]设计并制作了 BaPbO_3/Al 复合材料,结果表明该复合材料具有与铝相似的密度,但拉伸性能、弹性系数相比铝均有较大提高,并且其防 X 射线能力相比铝提高 40.63%,是一种兼具拉伸性与防 X 射线的理想材料。原小路等^[17]将表面经硬脂酸包覆的稀土盐粉体与热塑性聚氨酯共混制得防辐射复合材料,研究发现,适量硬脂酸的包裹改性,提高了复合材料的力学强度。刘力等^[18]以硫和过氧化物为反应交联剂,进行原位反应制备了 $\text{Sm}(\text{AA})_3/\text{NR}$ 防 X 射线复合材料,研究表明不同的原位反应程度对 $\text{Sm}(\text{AA})_3$ 在天然橡胶分散度及复合材料屏蔽性能有直接影响。胡艳巧等^[19]采用重结晶法制备了甲基丙烯酸钐盐,然后以偶氮二异丁腈为引发剂,通过本体聚合反应,制成出了具有防 X 射线和防紫外线的透明有机玻璃。结果表明材料不仅具有良好的 X 射线屏蔽性能,同时具有优异的透光率,并兼具较佳的紫外线吸收特性。

1.1.3 X 射线屏蔽材料设计 在 X 射线屏蔽材料设计上,廖伶元等^[20]利用遗传算法,对衰减公式进行优化计算,得出各组分含量的最佳配比,并用 MCNP 程序对几种组分配比的材料进行 X 射线屏蔽模拟,

结果表明利用遗传算法计算出来的配比材料屏蔽效果最好。

1.2 防 γ 射线屏蔽材料

γ 射线与X射线一样,也属电磁波,波长较紫外线短的多,本身不带电,与物质相互作用主要以光电效应、康普顿效应和电子对效应为主,与物质发生一次相互作用会导致其损失大部分或全部能量。

1.2.1 无铅 γ 射线屏蔽材料 屏蔽 γ 射线的材料很多,如水、土壤、岩石、混凝土、铁、铅、铅玻璃、铀以及钨、铅硼聚乙烯、含硼聚丙烯^[21~23]等。这些材料对 γ 射线的屏蔽效果各不相同,其中重金属最有效,铅屏蔽性能优异通常被人们所采用,但铅有毒,近年来国际上为了防止公害、保护环境,提出了开发无铅的辐射屏蔽材料的要求。在无铅防 γ 射线材料制备方面,国内陈辛等^[24]研究发现钨-镍合金对 γ 射线的吸收远高于传统的屏蔽材料-铅,从而提出了钨-镍合金这一新型 γ 射线屏蔽材料。李江苏等^[25]通过用表面处理稀土氧化铪的方法制备了 Er_2O_3 /环氧树脂辐射防护材料。研究表明,制得的材料致密无间隙, Er_2O_3 粒子分布均匀,材料的力学性能得到了改善、防护射线的效果明显,其中稀土元素Er对低能 γ 射线防护效果更是明显强于铅。国外Kirdsiri等^[26~29]利用 Bi_2O_3 、 BaO 、 PbO 分别制备出硼酸基、磷酸基、硅酸基玻璃材料,并利用WinXCom软件进行了理论屏蔽效果测试,研究发现: Bi_2O_3 玻璃材料具有与 PbO 玻璃相近的显著 γ 射线屏蔽效果,但其本身屏蔽范围更大; BaO 玻璃屏蔽效果较差;用Bi取代Pb制备的防辐射材料是一种无毒、 γ 射线屏蔽效果显著并具有广泛应用前景的防 γ 射线复合材料。Korkut等^[30]首次研究了紫晶矿的 γ 射线屏蔽效果,发现:紫晶矿相较于屏蔽型混凝土, γ 射线屏蔽效果更佳。Mann等^[31,32]对一些低原子序数的硅石材料的屏蔽性能进行了研究,发现硅钙硼石、透辉石及白云石等具有良好的屏蔽效果。

1.2.2 物理性能优化的 γ 射线屏蔽材料制备 物理性能优化方面,李德安等^[33]设计并制备了一种结构均匀的新型 $\text{B}_4\text{C}/\text{Pb}$ 复合屏蔽材料,研究发现:材料能有效屏蔽快中子和 γ 射线,20mm厚度的屏蔽材料对热中子的吸收率达到95.9%,并且材料制备工艺简便,力学性能和耐热性能较传统的铅硼聚乙烯均有大幅度提升。Ochbelagh^[34]等制备了含铅混凝土材料,研究发现:含铅混凝土具有良好 γ 射线屏蔽性能;混凝土中铅、胶黏剂质量比为90%时,所制得混凝土压缩强度最大,而随铅含量的继续增加屏蔽效果增强但强度下降。Duan等^[35]利用浇铸的方法制备了一种新型Pb-B合金材料,研究发现:20mm厚的合金材料 γ 射线及中子射线屏蔽率分别达到了49.7%与92.7%,B质量分数1.0%的合金拉伸强度及硬度分别达到了116MPa、160HB。

1.2.3 γ 射线屏蔽材料的设计 在 γ 射线屏蔽材料的设计上,Hu等^[36]创造性地引入遗传算法,并对设计出的三种材料进行了MCNP软件检验。所设计的屏蔽材料与日本同类材料(XP3)相比有相当大的优势。在此基础上,Hu等^[37,38]设计制备出一种新型多层结构(铁-夹层-铅)屏蔽材料:首层铁慢化快中子;夹层氢、硼-10、钆为主体屏蔽成分,对中能中子慢化与吸收、热中子的吸收效果优异;末层铅的加入增强对 γ 射线及次级 γ 射线的屏蔽效果。并利用遗传算法与MCNP软件相结合的方式,对分层材料厚度比例进行了优化设计,结果表明相较PB202和KRAFTON-XP3^[39,40],材料的综合辐射屏蔽效果突出、耐热性和耐辐射性能优异。熊华等^[41]根据代价利益分析方法提出了辐射屏蔽措施的优化评估方法,引入遗传算法建立了组合屏蔽自动设计方法。经计算表明该评估方法与文献及MCNP模拟计算结果相符;设计出的组合屏蔽设计方法可以针对特定辐射环境和测点参数进行自动优化设计,对混合辐射场测量的方案设计和数据分析具有积极的作用。

1.3 防中子屏蔽材料

中子是一种不带电的粒子,中子通过物质时与原子核外电子几乎不发生相互作用,主要与原子核相互作用,其本身具很强穿透力,对人体造成的伤害较同计量的其它射线更大。对中子的屏蔽作用实际上就是快中子减速、慢中子的吸收^[23]。

1.3.1 中子射线屏蔽原理 中子的质量与质子接近,因此,含氢量较高的石蜡、聚乙烯、聚丙烯等材料是优良的快中子慢化材料,而含锂元素的氟化锂、溴化锂、氢氧化锂,含硼元素的氧化硼、硼酸和碳化硼等是优良的慢中子吸收物质^[23,42]。同时吴文圣^[41]也指出,对快中子的屏蔽用W效果很好,因其10cm厚度

的材料对中子的屏蔽率可达93%，但是W较贵，可用Cu代替。

1.3.2 防中子射线混凝土材料 混凝土成本低、对多种辐射各能段均有较好屏蔽效果，是现代辐射场中最常用的屏蔽材料，对固定式反应堆和加速器的屏蔽来讲应用更是普遍^[44]。在混凝土研究方面，Akkurt等^[45~47]利用重晶石、普通碎石配制出不同密度的C30级防辐射混凝土，并研究了冻融循环对混凝土屏蔽性能的影响，发现随着冻融循环次数的增加，混凝土的屏蔽性能有所下降，同时指出了以沸石为骨料对提升混凝土防辐射性能不利。Sharma等^[48]通过往混凝土中掺入铅纤维、钢纤维制备出力学性能增强的防辐射混凝土，发现只有铅纤维能同时增加混凝土的防辐射性能，并且效果明显，但铅的热膨胀系数与水泥石相差较大，混凝土的耐久性有待进一步的研究。Kharita等^[49~51]采用普通砾石、白云石、赤铁矿石、蛇纹石配制出一系列防辐射混凝土，并研究了水灰比、碳粉和温度对防辐射混凝土屏蔽性能的影响。Yilmaz等^[52]发现在混凝土制备中从屏蔽效果角度，用粉煤灰、硅粉和高炉炉渣来作为补充性胶结材料，相比硅酸盐水泥混凝土屏蔽性能相近，是一种环境友好且经济的混凝土。

1.3.3 其它类中子射线屏蔽材料 除混凝土外，目前用得较多的中子屏蔽材料是铅硼聚乙烯、含硼聚丙烯，相关研究表明^[39]，该类材料具有良好的工程性能、尺寸稳定性和较好的耐 γ 辐照性能，使用温度可达到80~100℃。其屏蔽 γ 射线、快中子和热中子的屏蔽性能明显。此外，杨文锋等^[53]对 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 非晶薄带的微观结构、力学性能进行了初步研究，并测试了材料对高能 γ 射线的屏蔽效果，结果表明这种非晶带材有极好的热中子吸收能力。李清华等^[54]应用物理交联法制备出不同厚度的单纯和含有金属离子的PVA/PEO水凝胶，结果发现，PVA/PEO水凝胶对快中子辐射具有良好的屏蔽作用，含金属组的中子屏蔽效果明显优于单纯组。Mülazim等^[55]合成了一种 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ /聚酰亚胺复合材料，结果表明：随着 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 含量的提高，材料的阻热系数提高；材料的热中子屏蔽性能取决于 ^{10}B 的含量及分散度。Kurudirek等^[56]研究了一系列以Pb、Th、U为组分的化合物，结果发现： $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ThF}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Th}(\text{OH})_4$ 和 PbNO_3 有更高快中子反应截面，因此可以作为优选的快中子吸收剂和高能射线吸收材料。

稀土材料在中子射线屏蔽材料制备中的应用方面，刘力等^[57,58]研究发现含硼类复合材料虽然具有良好屏蔽中子的能力，但屏蔽性能递减，针对此提出添加稀土元素的方法，并从理论上推断，稀土高分子复合材料应是目前屏蔽中子辐射的最理想材料。曹晓舟等^[59]将 Sm_2O_3 经偶联剂处理、高能球磨，最后热压成型制备出分散度、拉伸强度、硬度等均较好，并且具有良好中子慢化与吸收的UHMWPE/ Sm_2O_3 复合材料。

1.3.4 中子屏蔽材料设计 在中子屏蔽材料设计上，张显鹏等^[59]为标定薄膜厚度大于0.1mm的闪烁薄膜探测器灵敏度，采用MCNP程序建模优化设计了适用于中国原子能科学研究院5SDH-2串列加速器的中子屏蔽体。结果表明，该屏蔽体可将偏离通道的中子注量减弱到通道中子注量的十分之一以下。

2 防辐射材料发展趋势

防X射线、防 γ 射线及防中子辐射的材料是常见的三种防辐射材料，上文对其分别进行了简单介绍，结合此内容，笔者对未来辐射屏蔽材料发展可能存在的几个重要方向进行了分析。

目前稀土辐射屏蔽材料作为防辐射材料一个新兴研究方向，国内研究较多，尤其在中低能X射线屏蔽方面研究较为系统且全面，对于在中子射线屏蔽材料方面，刘力等^[57,58]指出稀土高分子复合材料应是目前屏蔽中子辐射的最理想材料，然而对其研究尚少，而进一步对于具有综合屏蔽效果的稀土防辐射材料研究更少，稀土在中子辐射屏蔽材料及综合屏蔽材料方面的应用具有重要意义，并有待于进一步研究。

纳米材料具有的小尺寸效应、表面与界面效应和量子尺寸效应等对提高材料物理性能及屏蔽效果有很好的促进作用，其在屏蔽材料制备方面已有所应用，并取得了不错的效果，本身的应用为传统防辐射材料性能进一步优化提供一个重要指引方面，是未来防辐射材料制备的一个很好潜力的发展方向。

物理性能优化及综合屏蔽材料制备角度，进一步提高材料的物理性能，如拉伸强度、硬度、透光率等，制备出屏蔽范围更广、屏蔽性能更持久、无毒等性能的屏蔽材料，以拓展屏蔽材料应用范围及使用时间等，此方面研究具有重要价值与意义。

材料设计角度及以上内容的交叉研究方面,遗传算法、MCNP 程序、梯度材料设计等的应用为防辐射材料优化设计提供了一定的方向,进一步结合纳米技术、稀土材料等手段进行材料设计,有利于设计出更加灵活、高效、适应性强的防辐射材料,对此方面进一步研究与应用必然成为未来防辐射材料发展的一个重要方向。

3 结语

本文主要对常见防辐射材料-防 X 射线、防 γ 射线及防中子辐射的材料进行了介绍,其中着重突出了稀土高分子复合材料在防辐射材料中的应用,指出了其所具有的独特优势。与此同时,指出了未来防辐射材料的几个重要发展方向:纳米技术及稀土材料在防辐射材料方面的应用及研究;综合辐射屏蔽材料的设计与制备,使材料兼具质轻、无毒、体积小、屏蔽范围广、屏蔽性能持久等性能;屏蔽材料物理性能优化,以提升材料拉伸强度、硬度、耐腐蚀性等;屏蔽材料的优化设计方法、遗传算法、MCNP 程序、梯度材料设计等的研究与应用;以上几个方向的交叉研究与应用。

参考文献:

- [1] 刘粤惠,刘平安. X 射线衍射分析原理与应用. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 安骏,刘吉华,辛寅昌. 工程塑料应用, 2006, 34(8): 20~23.
- [3] 吴小飞. 新型热塑性防辐射材料的研究. 北京: 北京化工大学, 2007.
- [4] 刘力,吴小飞,范丽,张立群. 合成橡胶工业, 2008, 31(1): 54~57.
- [5] 董文敏,董志华,徐东太,刘力. 合成橡胶工业, 2009, 32(4): 313~316.
- [6] Liu L, He L, Yang C, Zhang W, Jin R G, Zhang L Q. *Macromol Rapid Commun*, 2004, 25: 1197~1202.
- [7] 杨程,刘力,隋铁巍,贺磊,张立群. 合成橡胶工业, 2004, 27(1): 49.
- [8] 董志华. 稀土/高分子射线屏蔽复合材料的制备与研究. 北京: 北京化工大学, 2009.
- [9] 胡艳巧,胡水,刘力. 第五届全国橡胶助剂生产和应用技术研讨会, 2009: 302~307.
- [10] 董志华,胡水,姚巍,刘力. 合成橡胶工业, 2010, 33(3): 224~228.
- [11] 刘力,张立群,魏宗源,伍社毛. 中国专利. 200410096790.4, 2006, 06.
- [12] 刘力,张立群,魏宗源,伍社毛. 中国专利. 200410098610.6, 2006, 06.
- [13] 刘力,张立群,魏宗源,臧立伟,胡水,温世鹏. 中国专利. 200910086453.X, 2009, 11.
- [14] 刘力,张立群,魏宗源,臧立伟,胡水,温世鹏. 中国专利. 200910086454.4, 2009, 11.
- [15] 安骏,吴海霞,辛寅昌. 工程塑料应用, 2004, 32(12): 14~17.
- [16] Fan G H, Geng L, Wang G S, Zheng Z Z. *Mater Des*, 2009, 30(3): 862~866.
- [17] 原小路,胡水,张法忠,温世鹏,刘力. 塑料工业, 2010, 38(6): 52~55.
- [18] Liu L, He L, Zhang W, Yang C, Liu Y D, Jin R G, Zhang L Q. *J Rare Earth*, 2004, 22(z3): 85~90.
- [19] 胡艳巧,胡水,张法忠,温世鹏,刘力. 塑料工业, 2010, 38(3): 78~82.
- [20] 廖伶元,邱小平. 核电子学与探测技术, 2010, 30(1): 118~120.
- [21] 徐希杰,吕坤祥,邹新农,邹美芬,朱钧清,周杏琴,金坚,王博诚. 中国辐射卫生, 2001, 10(1): 23~24.
- [22] Mahmoud H M, Armia E. *J Radiat Res Radiat Process*, 2001, 19(2): 81~91.
- [23] Schaeffer N M. 核反应堆屏蔽工程学. 华平. 北京: 原子能出版社, 1983, 285.
- [24] 陈辛. 江西能源, 2008, (4): 25~28.
- [25] 李江苏,戴耀东,张瑜,孙浩,常树全. 化工新型材料, 2010, 38(5): 48~52.
- [26] Kirksiri K, Kaewkhao J, Pokaipisit A, Chewpraditkul W, Limsuwan P. *Ann Nucl Energ*, 2009, 36(9): 1360~1365.
- [27] Kaewkhao J, Pokaipisit A, Limsuwan P. *J Nucl Mater*, 2010, 399(1): 38~40.
- [28] Kaewkhao J, Limsuwan P. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2010, 619(1~3): 295~297.
- [29] Kirksiri K, Kaewkhao J, Chanthima N, Limsuwan P. *Ann Nucl Energ*, 2011, 38(6): 1438~1441.
- [30] Korkut T, Korkut H, Karabulut A, Budak G. *Ann Nucl Energ*, 2011, 38(1): 56~59.
- [31] Mann K S, Sidhu G S. *Ann Nucl Energ*, 2012, 40(1): 241~252.
- [32] Mann K S, Singla J, Kumar V, Sidhu G S. *Radiat Prot Dosim*, 2012, 149(1): 1~13.
- [33] 李德安,刘颖,杨文锋,杨林,李军,李梦. 材料导报, 2006, 20(10): 154~158.
- [34] Ochbelagh D R, Azimkhani S, Mosavinejad H G. *Nucl Eng Des*, 2011, 241(6): 2359~2363.
- [35] Duan Y H, Sun Y, Peng M J, Guo Z Z. *Adv Mater Res*, 2011, 150~151: 56~63.

- [36] Hu H S, Xu H, Zhang G G, Wang Q S, Xie Z S, Zhu J, Zhang J F. *At Energ Sci Technol*, 2005, 39(4): 363~366.
- [37] Hu H S, Wang Q, Qin J, Wu Y, Zhang T, Xie Z, Jiang X, Zhang G, Xu H, Zheng X, Zhang J, Liu W, Li Z, Zhang B, Li L, Song Z, Ouyang X, Zhu J, Zhao Y, Mi X, Dong Z, Li C, Jiang Z, Zhan Y. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2008, 55(4): 2376~2384.
- [38] Hu H S. *Advances in Composite Materials for Medicine and Nanotechnology*, Rijeka, Croatia, In Tech, 2011: 565~592.
- [39] 吕继新, 陈建廷. *核动力工程*, 1994, 15(4): 370~374.
- [40] Hattori K, Anayama Y, Hibanuma S K, Ueki K, Murakami S. *Advancements and Applications in Radiation Protection and Shielding*, La Grange Park, IL, USA: American Nuclear Society, 1996, 1~2: 880~887.
- [41] 熊华, 范如玉, 康克军. *辐射防护*, 2006, 26(1): 29~34.
- [42] K. H. 穆辛(俄). *原子核物理学*. 沈志通, 殷雄, 张法通, 汲长松. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [43] 吴文圣. *核电子学与探测技术*, 2004, 24(1): 24~26.
- [44] 刘璞. *设施与技术*, 2005, (3): 39.
- [45] Akkurt I, Basyigit C, Kilincarslan S, Mavi B, Akkurt A. *Cem Concr Compos*, 2006, 28(2): 153~157.
- [46] Basyigit C, Akkurt I, Altindag R, Kilincarslan S, Akkurt A, Mavi B, Karaguzel R. *Build Environ*, 2006, 41(8): 1070~1073.
- [47] Akkurt I, Akyildirm H, Mavi B, Kilincarslan S, Basyigit C. *Radiat Meas*, 2010, 45(7): 827~830.
- [48] Sharma A, Reddy G R, Varshney L, Bharathkumar H, Vaze K K, Chosh A K, Kushwaha H S, Krishnamoorthy T S. *Nucl Eng Des*, 2009, 239(7): 1~6.
- [49] Yousef S, AlNassar M, Naom B, Alhajali S, Kharita M H. *Prog Nucl Energ*, 2008, 50(1): 22~26.
- [50] Kharita M H, Yousef S, AlNassar M. *Prog Nucl Energ*, 2009, 51(2): 388~392.
- [51] Kharita M H, Yousef S, AlNassar M. *Prog Nucl Energ*, 2010, 52(5): 491~493.
- [52] Yilmaz E, Baltas H, Kiris E, Ustabas I, Cevik U, El-Khayatt A M. *Ann Nucl Energ*, 2011, 38(10): 2201~2212.
- [53] 杨文锋, 刘颖. *材料导报*, 2009, 23(5): 52~55.
- [54] 李清华, 岳凌, 杨淑琴. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2010, 28(2): 98~102.
- [55] Mülazim Y, Kızılkaya C, Kahraman M V. *Polym Bull*, 2011, 67(9): 1741~1750.
- [56] Kurudirek M, Özdemir Y, El-Khayatt A M. *Radiat Phys Chem*, 2011, 80(8): 855~862.
- [57] 刘力, 孙朝晖, 吴友平. *合成橡胶工业*, 2001, 24(3): 188~190.
- [58] Liu L, Zhang L, Zhao S H, Jin R G, Liu M L. *J Rare Earth*, 2002, 20(4): 241~248.
- [59] Cao X Z, Xue X X, Jiang T, Li Z F, Ding Y F, Li Y, Yang H. *J Rare Earth*, 2010, 28: 482~484.
- [60] 张显鹏, 李宏云, 张忠兵, 张建福, 张国光. *原子能科学技术*, 2010, 44(6): 730~734.

Research Progress of Radiation-proof Material

MA Tao¹, LIU Yu-yan^{1,2*}, LIU Shao-zhu^{1,2}, LIU Zhen-guo¹

(1. School of Chemical Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Center of Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper mainly reviews the status of some common anti-radiation materials-X, γ and neutron, where introducing emphatically the research progress of the rare-earth high polymer protective materials. Several design methods of radiation-proof materials such as the application and research of nanotechnology and the design and preparation of anti-radiation materials are analyzed and introduced. Meanwhile, several hot spots of current radiation-proof materials are prominently pointed out: the application of nanotechnology and rare-earth materials; the design and preparation of anti-radiation materials having outstanding comprehensive shielding effectiveness such as lightweight, non-toxic, compactness, wide shielding scope, sustaining shielding properties et al.; the optimization of materials for physics performance to improve tensile strength, hardness, corrosion resistance and other physical properties; the application of optimized design method based on genetic algorithm, MCNP code, the design methods of gradient materials and so on; at last, the intersecting studies and application of the above content.

Key words: Radiation protection; Shielding; Composite; Polymer; Rare earth