● 青年π谈 π Forum ●
特邀论文
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5064

含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料研究进展

谭 斌[1],王龙飞[2],芦鹏彬[1],丁一耕[1],杨翠翠[1],王祺睿[1],余佳齐[1],刘志伟[1]
(1. 西安交通大学 材料科学与工程学院金属材料强度全国重点实验室, 陕西 西安 710049;2. 陕西至瑞检测科技有限公司,陕西 西安 710038)

摘 要:随着“碳达峰、碳中和”目标的推进,核能作为清洁低碳能源的重要性不断提升,乏燃料的安全防护问题也日益突出。中子屏蔽材料在乏燃料贮存和运输中起关键作用。传统乏燃料贮运用中子屏蔽材料主要包括硼钢、铝硼合金、B_4C/Al 复合材料等。当前,研发轻质高强易变形且兼具高中子吸收能力的屏蔽材料成为业界关注热点。含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料具有高比强度和良好的中子吸收性能,成为新型结构功能一体化屏蔽材料的首选。基于此,主要综述了含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料的组分设计及制备工艺相关研究,旨在分析此类中子屏蔽材料组分–制备–组织–性能之间的关系,推进我国乏燃料高效贮存及核工业的安全发展。

关键词:含 Gd 铝基材料;中子屏蔽;组分设计;制备工艺
中图分类号: TG146; TG2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)05-0405-11

Research Progress on Neutron Shielding Al–based Materials Containing Gd Element

TAN bin[1], WANG Longfei[2], LU Pengbin[1], DING Yigeng[1], YANG Cuicui[1], WANG Qirui[1], YU Jiaqi[1], LIU Zhiwei[1]
(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Zhirui Testing Technology Co., Ltd., Xi'an 710038, China)

Abstract: With the advancement of the “carbon peak and carbon neutrality” goals, the importance of nuclear energy as a clean and low-carbon energy source has been increasingly recognized, and the issue of spent fuel safety protection has become progressively more critical. Neutron shielding materials play indispensable roles in the storage and transportation of spent fuel. Traditional neutron shielding materials for spent fuel storage primarily include boron steel, aluminium-boron alloys, and B_4C/Al composites. However, these materials have certain limitations, such as high density and insufficient mechanical properties. Currently, the development of lightweight, high-strength, easily deformable, and highly neutron-absorbing shielding materials has become a focal point within industry. Al-based neutron shielding materials containing Gd exhibit high specific strength and superior neutron absorption performance, making them a preferred choice for new integrated structural and functional shielding materials. On this basis, this paper systematically reviews the research on the compositional design and preparation processes of Al-based neutron shielding materials containing Gd, aiming to analyse the interrelationship between the composition, preparation, microstructure, and performance of such neutron shielding materials, and to promote the efficient storage of spent fuel and the safe development of China's nuclear industry.

Key words: containing Gd aluminium base material; neutron shielding; composition design; preparation technology

随着“碳达峰,碳中和”目标的提出,清洁低碳已经成为全球能源发展的主基调。核能作为高效率、低排放的稳定基荷能源,成为世界能源向清洁低碳转型的重要选项。然而,核能发电产生的乏燃料会产

收稿日期:2025-04-13
基金项目:国家自然科学基金(52174372, 52474422)
作者简介:谭 斌,2002 年生,博士生.研究方向为铝合金及其凝固.Email: tanbintbbb@163.com
通信作者:刘志伟,1981 年生,博士,教授.研究方向为铝、镁合金及其复合材料,金属凝固/铸造,核能屏蔽材料.
Email: liuzhiwei@xjtu.edu.cn
引用格式:谭斌,王龙飞,芦鹏彬,丁一耕,杨翠翠,王祺睿,余佳齐,刘志伟.含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料研究进展[J].铸造技术,2025,46(5): 405-415.
TAN B, WANG L F, LU P B, DING Y G, YANG C C, WANG Q R, YU J Q, LIU Z W. Research progress on neutron shielding Al-based materials containing Gd element[J]. Foundry Technology, 2025, 46(5): 405-415.

中国知网 https://www.cnki.net

生热中子、伽马射线及其他高能射线[1],仍然具有较强的放射性，需进行有效贮存及后处理。截止2022年底,我国商运核电机组达到53台,发电量达4 177.8亿千瓦时，其中51台压水堆累计产生了8 931 tHM乏燃料,年增量为805 tHM[2],核电站乏燃料累计产生量预测见图1a。我国乏燃料处理采用封闭循环处理,先将乏燃料贮存在堆水池中以其降低放射性和温度,再置于贮存罐中进行长期贮存或运输到后处理厂回收高价值物质[3],典型乏燃料运输设备见图1b[4-5]。据统计,我国仅有3 000 tHM的贮存能力[2],乏燃料的安全贮存及后处理成为我国核电工业必须解决的关键问题。因此,发展高强可靠性中子屏蔽材料(中子吸收材料),是维护乏燃料处理全周期安全及促进我国核能发展的核心保障。

乏燃料产生的有害射线以中子和伽马射线为主。其中,中子是一种具有很强穿透能力的电中性粒子,根据中子能量的大小,可以将其分为热中子(0.025 eV)、慢中子(<5 keV)、中能中子(5~100 keV)以及快中子(0.1~500 MeV)[6]。中子屏蔽是先通过中子与原子核碰撞时发生的弹性散射和非弹性散射实现高能中子慢化,同时引起电离辐射[7];当中子能量降低为热中子后,通过中子吸收元素完成中子吸收,从而实现中子屏蔽。一般通过中子屏蔽系数(α_0)来评价材料的中子屏蔽性能,通过下式计算获得[8]:

$$\alpha_0=1-\frac{I_0}{I}=1-e^{-\Sigma_t t} \tag{1}$$

式中,I_0为中子透过量;I为中子入射量;$\Sigma_t t$为总宏观中子吸收截面。中子吸收截面是反映元素中子屏蔽性能的重要参数,中子吸收截面越大的元素具有更好的中子屏蔽性能。常见中子吸收元素及其中子吸收截面见表1。其中^{10}B因其价格相对低廉、原子序数小、无毒等特性,成为应用最广泛的中子屏蔽材料;而Gd具有最大的中子吸收截面,展现出优异的中子屏蔽性能,正逐渐被学者引入到中子屏蔽材料领域。Eu、Sm及Cd因价格过高或具有毒性等原因,还未得到充分研究。

表1 常见中子吸收元素的中子吸收截面[9]
Tab.1 Cross section of common neutron-absorbing elements[9]

Z	Element	Neutron-absorption cross section(barn)
5	^{10}B	3 840
48	Cd	2 529
62	Sm	5 594
63	Eu	4 300
64	Gd	49 177

常见的中子吸收材料包括硼钢[10-12]、混凝土[13-15]、铝硼合金[16-17]、B_4C/Al复合材料[18-20]、铝钆合金[21-22]和聚合物基复合材料[23-24]。其中,铝基中子屏蔽材料因其良好的力学性能及较小的密度，能够满足结构功能一体化和轻量化要求[25-26]。因此,国内外学者针对Al基中子屏蔽材料进行了大量研究[27-29]，其中以B_4C/Al复合材料为主。然而,工业要求B_4C/Al复合材料中B_4C的含量不低于30%[28-29]，随着B_4C含量的提升,材料的塑性严重降低,恶化铝基复合材料的力学性能[30]。此外,B_4C与Al的润湿性较差,在熔体易团聚，且B_4C与Al熔体易发生界面反应生成B_2O_3[31]及Al-B-C三元化合物[32]。基于上述原因,目前B_4C/Al复合材料主要采用粉末冶金方法制备。Gd具有最大的中子吸收截面，有望取代^{10}B成为主流中子吸收元素,作为良好的中子吸收剂替代B_4C,Gd与B_4C之间的质量关系,可通过等效硼含量(B_{Eq})计算,其表达式为[25]:

$$B_{Eq}=\%B\times4.35(\%Gd) \tag{2}$$

式中,B_{Eq}为等效B的质量分数;$\%B$为B元素的质量分数;%Gd为Gd元素的质量分数。此外,还可以通过硼面密度计算(EBAD)来评价材料的材料中等效硼含量[8]:

$$EBAD=\rho\times t\times W_1\times E \tag{3}$$

式中,ρ为复合材料密度;t为复合材料厚度;W_1为

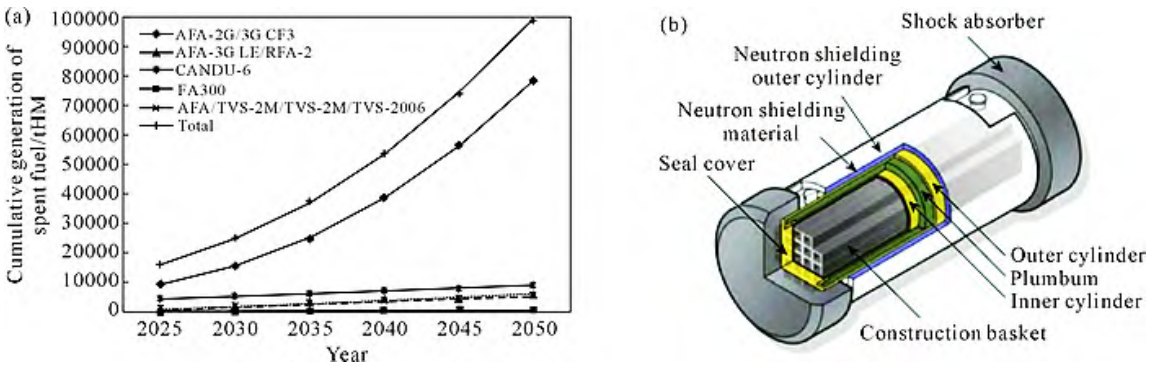

图1 我国乏燃料累计产生量预测与典型运输设备:(a)我国核电站乏燃料累计产生量预测;(b)典型乏燃料运输设备[4-5]
Fig.1 Prediction of cumulative spent fuel generation in China and typical transportation equipment: (a) forecast of the cumulative production of spent fuel from nuclear power plants in China; (b) typical spent fuel transportation equipment[4-5]

中国知网 https://www.cnki.net

复合材料中 B_4C 的质量分数;E 为 B_4C 中 B 元素的质量分数。此外,Gd 的引入可以改善 Al 基中子屏蔽材料的塑韧性[22,33-34],目前国内外学者针对含 Gd 元素 Al 基中子屏蔽材料的制备及性能强化进行了大量研究,包括含 Gd 元素中子屏蔽 Al 合金[22,34-39]及含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料。Gd 具有最大的中子吸收截面,理论上能够满足 Al 基中子屏蔽材料的中子吸收要求。为了验证 Gd 单屏蔽元素 Al 基中子屏蔽材料的可行性,徐天寒等[1]通过蒙特卡洛模拟对相同厚度下含 Gd 的 Al 基中子屏蔽合金和 B_4C/Al 复合材料的中子透射率进行比较,结果显示,含 Gd 的 Al 基中子屏蔽合金有着更优的中子屏蔽性能。此外,当材料厚度限制到 3 mm 时,Gd 的最佳添加量是 4%(质量分数,下同);当材料厚度缩小到 2 mm 时,Gd 的最佳添加量增加为 6%。然而,过量 Gd 元素的引入会导致 Al_3Gd 相粗大,恶化合金的力学性能[35]。

过量 Gd 对 Al 合金基体性能的恶性影响是影响含 Gd 的 Al 基中子屏蔽材料发展的关键因素。控制 Al_3Gd 相尺寸,减小溶质元素在晶粒间的富集是提高 Gd 的 Al 基中子屏蔽材料力学性能的有效途径。通过优化合金配比、引入增强颗粒或改进制备工艺,能够平衡 Gd 的 Al 基中子屏蔽材料的中子屏蔽性能和力学性能。本文从目前含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料的成分设计和制备工艺出发,主要阐述组分设计及制备工艺对含 Gd 元素中子屏蔽 Al 合金及含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料组织细化的影响,总结含 Gd 元素的 Al 基中子屏蔽材料力学性能强化机理,旨在为含 Gd 元素 Al 基中子屏蔽材料的前沿发展提供关键理论支撑与参考。

1　含 Gd 元素中子屏蔽 Al 合金

为了解决含 Gd 元素中子屏蔽 Al 合金在力学性能和中子屏蔽性能之间的矛盾,学者们主要从成分设计和制备工艺优化 2 个方面改善含 Gd 相在 Al 基体内的分布及尺寸,促进 Gd 元素的均匀分布,从而提升力学性能。Ghandvar 等[35-36]通过重力铸造法分别制备了 Al-Gd-Mg-Si 和 Al-Gd-Mg-Si-Sb 合金。引入适量 Gd 元素和 Sb 元素能够有效细化 Mg_2Si 相,并使 Mg_2Si 相的形貌由树枝状和片状转变为短棒状和八面体状。这是由于 Gd 和 Sb 会在 Mg_2Si 的生长前沿富集,阻碍其沿(100)面生长,导致 Mg_2Si 相的形貌发生改变。然而,当 Gd 的含量稍多时,Al_2Si_2Gd、AlSiGd 和 MgGd 金属间化合物开始析出。随着 Gd 含量进一步提升,含 Gd 相转变为针刺状和层片状,恶化了合金的性能。此外,热挤压导致材料发生剧烈塑性变形,从而促进 Mg_2Si 相和含 Gd 相的细化和形态转变。Khorshidi 等[34]同样通过重力铸造法制备了 Al-Gd-Mg-Si 合金,研究了 Gd 含量对合金性能的影响。发现 Gd 能够抑制 Mg_2Si 相生长,从而细化 Mg_2Si 相,而且 Gd 含量的提高会导致层状 MgGd 相加厚,导致合金性能发生恶化,不同 Gd 含量的 Al-Gd-Mg-Si 合金组织见图 2。以上结果与 Ghandvar 等研究相符。此外,当进一步引入过量 Gd 后,富集在 Mg_2Si 生长前沿的 Gd 元素开始向晶界处转移形成含 Gd 相,导致 Gd 对 Mg_2Si 相的细化效果减弱。

Yang 等[39]利用粉末冶金工艺制备了Al-6Mg-5Gd 合金,发现烧结态合金具有不均匀的微观结构,导致挤压态合金出现双峰晶粒结构,而烧结态和挤压态合金的显微组织与烧结粉末粒度和烧结温度有关。当烧结温度为 405 ℃时,纳米级 Al_4MgGd 晶粒通过 Orowan 机制阻碍位错运动,对合金力学性能有明显的提升作用,使材料的屈服强度达到 335 MPa,极限拉伸强度达到了 462 MPa,同时伸长率为 10.2%。然而,当烧结温度升高到 480 ℃时,Al_4MgGd 相发生相变,晶粒尺寸变大,丧失了双峰晶粒结构的优势。

Ding 等[38]研究了 Al-5Cu-6Gd-10Bi 中子–伽马射线双屏蔽材料,发现 Bi 元素的引入形成了一种 Bi@Gd_5Bi_3 核壳结构相(图 3),消耗了大量 Gd 元素,避免了本该在 Al-Cu-Gd 体系中生成的脆性 Al_3Gd 相,确保了增强相 Al_2Cu 的析出。此外,热轧使Al_2Cu相部分溶解,在基体内弥散分布,大幅提升材料力学性能,相较于铸态,轧制态材料的屈服强度由 90.2 MPa 提升到 133.3 MPa,极限抗拉强度由 139.4 MPa 提升到 204.9 MPa,伸长率由 1.9%提升到 13.4%,提升幅度分别为 47.8%、47.0%、13.4%。Bi 的引入还为材料提供了良好的 γ 射线屏蔽能力,该工作对含 Gd 元素 Al 基中子–伽马射线双屏蔽材料提供了研究思路。

目前的研究表明,添加 Mg 元素可通过形成 Al_4MgGd 复合相替代 Al_3Gd 相。Bi 元素的引入可形成 Bi@Gd_5Bi_3 核壳结构,将 Gd 元素固定于复合相中,抑制 Al_3Gd 相生成。Mg 及 Bi 元素的引入能够形成新的含 Gd 相,促进 Gd 元素分布的均匀性,避免大块 Al_3Gd 相析出,有利于改善 Gd 元素在晶界富集导致合金性能恶化的情况。在铸造工艺方面,超声辅助铸造通过空化效应和声流效应可细化 Al_3Gd 相平均尺寸,促进 Gd 元素均匀分布。粉末冶金工艺中,烧结温度控制在 405~480 ℃可使 Al_3Gd 相保持纳米级析出,烧结温度过高时会导致析出相粗化至

中国知网　https://www.cnki.net

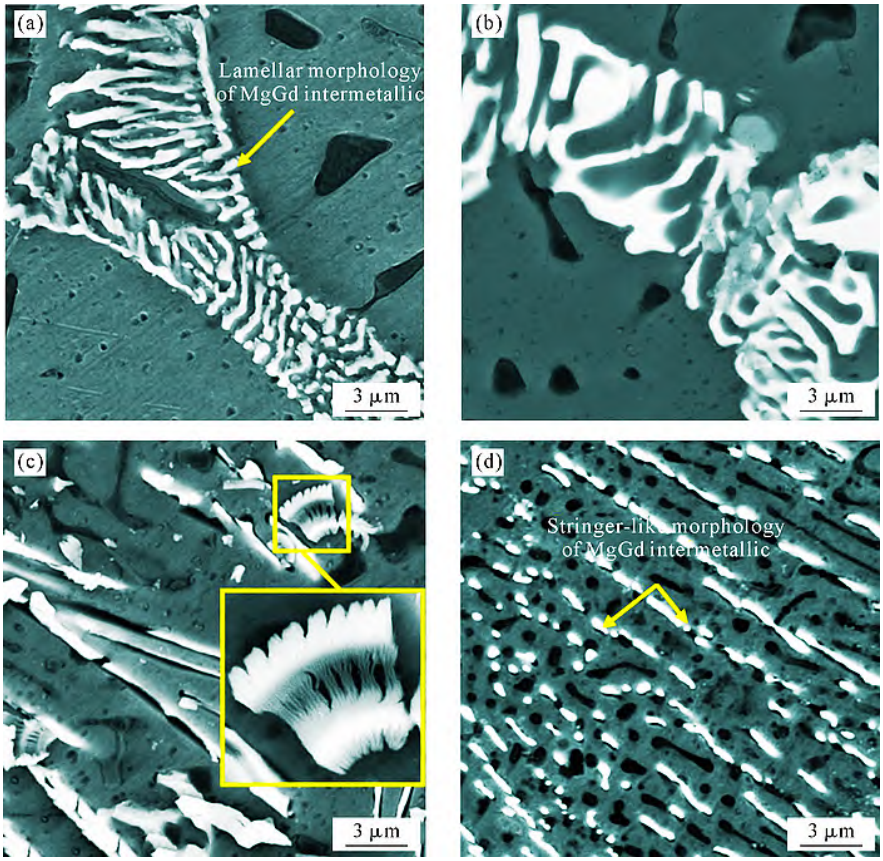

图 2 不同 Gd 含量 Al-15%Mg_2Si 合金形貌变化的高倍 FESEM 显微照片：(a) 0.5%; (b) 1%; (c) 2%; (d) 4%[34]

Fig.2 High-magnification FESEM micrographs showing the morphological changes in the Al-15 wt.% Mg_2Si composites containing various Gd contents: (a) 0.5 wt.%; (b) 1 wt.%; (c) 2 wt.%; (d) 4 wt.%[34]

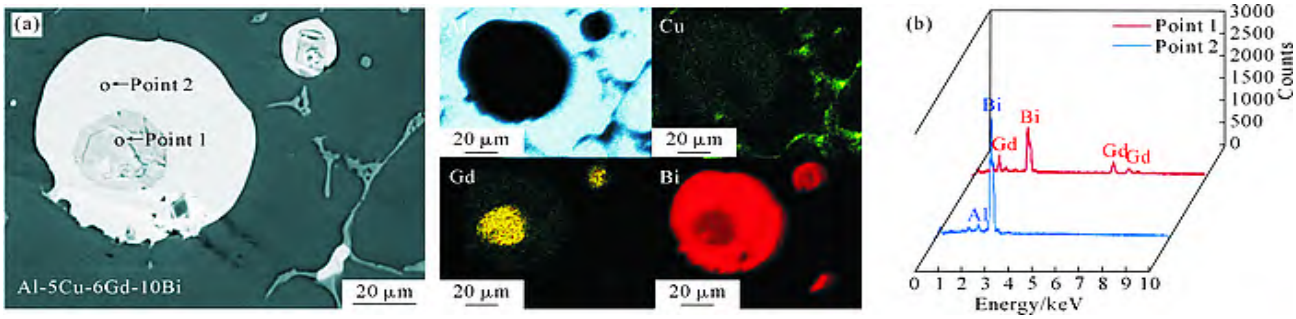

图 3 Bi@Gd_5Bi_3 核壳结构显微组织表征和相分析：(a) SEM 像及 EDS 谱；(b) 点 1 和 2 的 EDS 分析[38]

Fig.3 Microstructure characterization and phase analysis of the Bi@Gd_5Bi_3 dual phase: (a) SEM observation and related EDS mapping; (b) EDS analysis of points 1 and 2[38]

微米级。热变形工艺方面，热挤压和热轧都能显著细化 Al_3Gd 相，提升材料的力学性能。

2 含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料

引入增强颗粒提升材料的力学性能是常用的强化手段，对于含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料而言，增强颗粒能够细化含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料的组织，控制含 Gd 相的大小和分布，从而提高材料的力学性能。除了常规的增强颗粒外，Gd_2O_3 作为 Gd 的天然氧化物，其开采难度更低，成本与 B_4C 相近，远低于纯 Gd，具备良好的中子吸收性能。Gd_2O_3 可作为增强颗粒引入 Al 基体中，在保证材料中子屏蔽性能，提升材料力学性能的同时降低材料制备成本。下面将根据 Gd 元素在材料中的形态分别讨论成分设计和制备工艺对含 Gd 单质中子屏蔽 Al 基复合材料及含 Gd_2O_3 颗粒中子屏蔽 Al 基复合材料的力学性能及变形性能的影响。

2.1 Gd–Al 基复合材料

为了解决 Gd 元素富集带来的不利影响，可以从减少 Gd 含量或者细化含 Gd 相 2 个角度考虑。通过引入同样具有中子吸收能力的 B_4C 颗粒能够减少 Gd 元素的用量，避免过量 Gd 富集和过量 B_4C 团聚的问题，实现材料力学性能的提升，不少学者已经成功制备了(B_4C+Gd)/Al 基屏蔽材料[40-43]。西安交通

中国知网 https://www.cnki.net

大学刘志伟教授团队[42-43]通过超声辅助铸造法制备了(10%B_4C+3.6%Gd)/Al6061，B_4C 颗粒在超声空化作用下均匀分布在基体内，Gd 的引入导致晶界处形成 Al_3Gd 相，使得复合材料的平均晶粒尺寸由 144 μm 细化到 44 μm。热压缩试验分析表明，(B_4C+Gd)/Al 复合材料的主要变形机理是位错蠕变，而且通过对热加工图的分析得出，Gd 元素添加能够促进 Al 基体的动态再结晶过程，有助于提升材料的塑性变形能力。此外，热挤压改性使得晶界处 Al_3Gd 破碎为小颗粒（图 4），平均晶粒细化到 33 μm，改性消除了由粗大 Al_3Gd 导致的应力集中，提高了复合材料的强度和塑性，改性复合材料的极限抗拉性能达到了 342 MPa，伸长率达到 2.4%。

相较于铸造法，粉末冶金工艺更容易制备成分均匀、增强颗粒弥散分布的复合材料，学者们针对粉末冶金制备含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料开展了大量的研究。哈尔滨工业大学姜龙涛教授团队通过粉末冶金制备了(15%B4C+1%Gd)/Al[25,41]及(15%B_4C+1%Gd)/Al6061[8,40]。蒙特卡洛模拟及热中子屏蔽实验表明，用 Gd 取代部分 B_4C 制备的复合材料具有与 B_4C/Al 几乎相同的屏蔽性能。研究还发现 Gd 与 Al 形成了 Al_2Gd_3 相、$Al_5Gd_3O_{12}$ 相及 $Al_{11}GdO_{18}$ 相，$Al_5Gd_3O_{12}$ 的弹性模量和纳米压痕硬度分别达到 312 和 20 GPa[44]，能够作为增强相提高 Al基体的性能。此外，在 B_4C 颗粒界面处还发现了 GdB_{66} 相，能够改善 B_4C 颗粒与基体的界面结合强度，从而改善材料变形性能。通过热挤压之后，含 Gd 相得到了充分细化，且细化效果随着挤压比提高而提高，不同挤压比细化效果见图 5，挤压比由 10:1 提升到 54:1 后，含 Gd 相(黄圈)显著细化，而 B_4C(红圈)形态和尺寸并未发生明显改变。此外，热挤压还改善了其与基体的界面结合强度，使得材料的裂纹扩展方式由沿晶扩展转变为近界面扩展，大大提升了材料的力学性能。热挤压之前，(15%B_4C+1%Gd)/Al 的伸长率由 4%提升到了 9%，但抗拉强度由 300 MPa 降低到了 170 MPa。通过热挤压细化组织以后，(15%B_4C+1%Gd)/Al 表现出了良好的力学性能，与 15%B_4C/Al 相比，其抗拉强度达到 260 MPa，提升了约 15%，而塑性稍有降低，从 8%降低到 7%。(15%B_4C+1%Gd)/Al6061 中含 Gd 相主要以$Al_5Gd_3O_{12}$存在，通过热轧能够充分细化含 Gd 相，使其分布均匀化，从而提高中子屏蔽性能及力学性能，相比与热轧之前的复合材料，热轧之后抗拉强度由 350 MPa 提升到 380 MPa，伸长率由 2.5%提升到 5%左右。与相同轧制工艺下的 B_4C/Al6061 相比，含 Gd 的复合材料具有更良好的中子屏蔽性能及略优的力学性能，这是由于含 Gd 相的强度较低且缺陷较多，在相同的变形条件下更容易发生破碎细化，提高材料的性能。

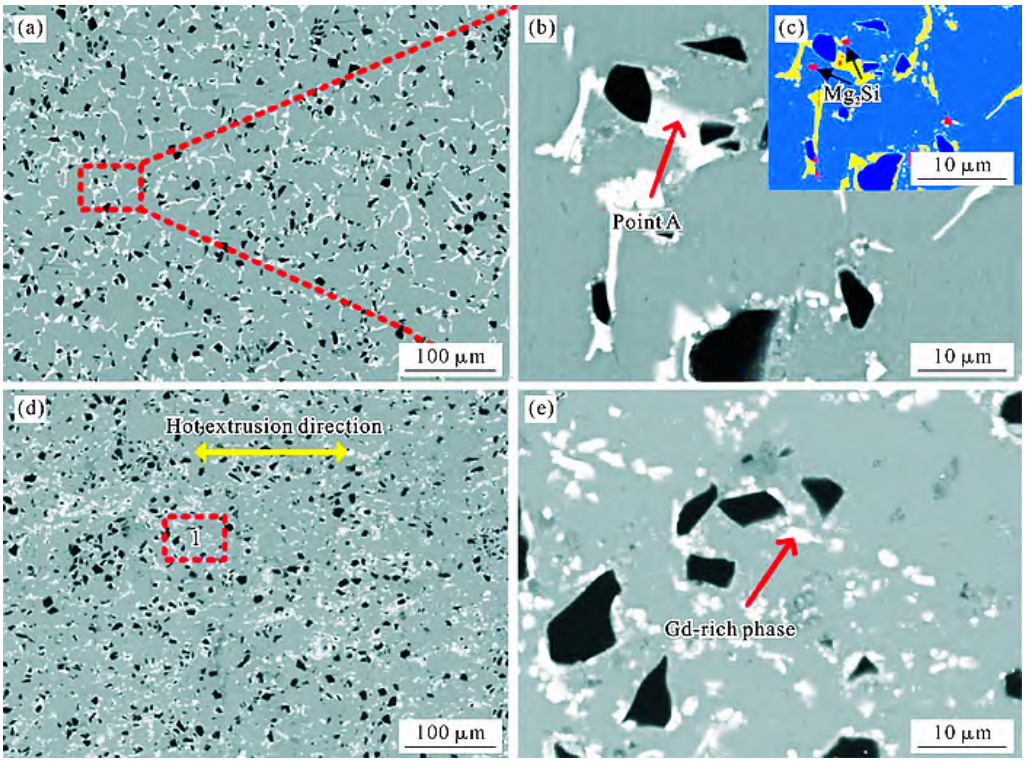

图 4 (B_4C+Gd)/Al6061 显微组织表征：(a~c) 铸态复合材料 SEM 像及 EDS 分析；(d, e) 热挤压及热处理改性复合材料 SEM 像[43]
Fig.4 Microstructure characterization and phase analysis of (B_4C+Gd)/Al6061: (a~c) SEM images and related EDS analyses of the as-cast composite; (d, e) SEM images of the modified composite[43]

中国知网　https://www.cnki.net

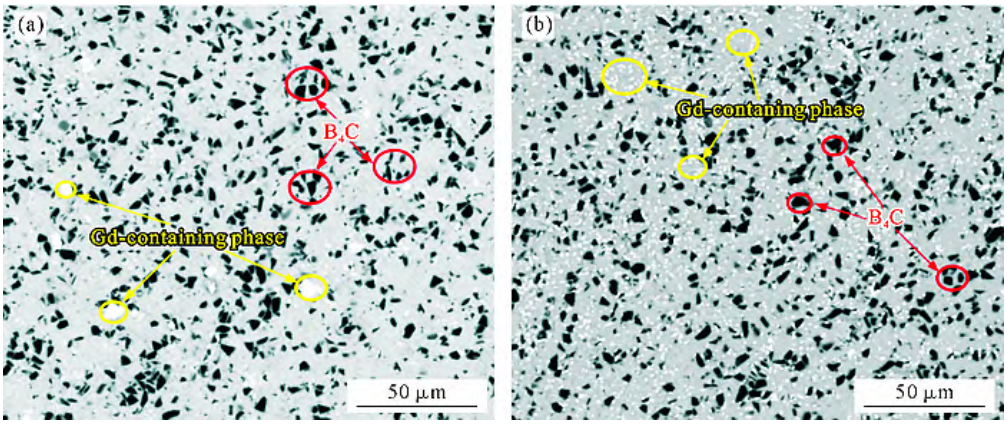

图 5 不同挤压比下(15%B_4C+1%Gd)/Al 复合材料的 BSE 像:(a) 10:1;(b) 51:1[41]

Fig.5 BSE images of the (15 wt.% B_4C+1 wt.% Gd)/Al composite with different extrusion ratios: (a) 10:1; (b) 51:1[41]

除引入 B_4C 颗粒以减少 Gd 含量外，通过引入增强颗粒细化含 Gd 相组织，促进 Gd 元素均匀分布也是提升含 Gd 单质中子屏蔽 Al 基复合材料力学性能的重要手段。TiB_2 是 Al 合金中常用的晶粒细化剂，能作为 α-Al 的异质形核核心实现晶粒细化。上海交通大学陈哲教授团队[45-46]在 Al-Mg-Gd 合金中引入 TiB_2，通过粉末冶金制备了超细等轴晶的 6TiB_2/Al-5Mg-1Gd 复合中子屏蔽材料，晶粒尺寸约为 1.79 μm，增强相 Al-Mg-Gd 相的平均晶粒为 89 nm。TiB_2 与亚微米级的 Al-Mg-Gd 相共同作用，抑制晶粒长大，通过细晶强化机制提升了材料的力学性能，与未添加 TiB_2 的工作(Al-6Mg-5Gd)对比，复合材料伸长率由 10%提升到了 15%左右，强度基本不变。

2.2 Gd_2O_3–Al 基复合材料

Gd_2O_3 与 Gd 同样具备中子吸收能力，而且 Gd_2O_3/Al 复合材料的变形性能优于 B_4C/Al 复合材料[47]，与纯 Gd 相比，Gd_2O_3 还能作为提高材料强度的增强颗粒引入基体中，这使得含 Gd_2O_3 颗粒中子屏蔽 Al 基复合材料得到广泛关注。Zhang 等[48]通过粉末冶金制备了 10%Gd_2O_3/Al6061，通过中子屏蔽实验验证了 10%Gd_2O_3/Al 与 30%B_4C/Al 具有相当的中子屏蔽性能。Gd_2O_3 的引入在 Al 基体中生成了 $Al_5Gd_3O_{12}$ 相，这与姜龙涛教授团队的研究结果一致。$Al_5Gd_3O_{12}$ 相有利于改善 Gd_2O_3 颗粒与 Al 基体的界面结合强度，与 30%B_4C/Al6061 相比，该复合材料的塑性得到大幅提高，由 4%提升到 16%，拉伸强度相当；Gd_2O_3 的引入也强化了 Al6061 基体，拉伸强度由 155 MPa 提升到了 240 MPa。

Gaylan 等[49]通过粉末冶金制备(B_4C+Gd_2O_3)/Al 及(B_4C+Gd)/Al 复合材料，重点研究了 Gd_2O_3 和 Gd 对 Al 基复合材料耐蚀性能的影响。结果表明，Gd 的添加会促进材料的电化学腐蚀，恶化材料的耐蚀性能，而 Gd_2O_3 可以避免材料由于电位差导致的电化学腐蚀，(B_4C+Gd_2O_3)/Al 相比于(B_4C+Gd)/Al 具有更好的耐蚀性能，但是硬度有所降低。Li 等[21]通过粉末冶金制备了 10%Gd_2O_3/Al6061 复合材料，并利用热轧工艺提升材料性能。烧结之后 Gd_2O_3 颗粒沿晶界分布，形成连续多边的网状结构(图 6a)。轧制过程中，大晶粒破碎细化导致了小角度晶界增加(图 6b)。当轧制变形量进一步增加时，一部分小角度晶界通过吸收位错转变为大角度晶界，而且位错运动到 Gd_2O_3 周围后受到阻碍，从而在 Gd_2O_3 附近形成位错环(图 6c)。此外，晶界处的 Gd_2O_3 颗粒在变形过程中阻碍晶界移动，导致大量位错产生，部分位错甚至进入 Al 晶粒中，形成再结晶晶粒和亚晶粒，使得 Al 晶面滑移受阻，从而促进了动态再结晶形核，这表明热轧通过晶界调控实现了 Gd_2O_3/Al6061 复合材料力学性能优化。

碳化硅(SiC)是一种低密度高硬度的增强颗粒，广泛应用于 Al 基复合材料中。Lian 等[50]在 Gd_2O_3/Al6061 中引入 SiC 颗粒，发现材料的拉伸强度随着 SiC 含量的提高而升高，而伸长率则随 SiC 含量的提高先增高后降低。SiC 与 Al 基体生成 Al_4SiC_4 相，能够抑制网状 Gd_2O_3 的形成，促进 Gd_2O_3 均匀分布，增强了 Al 基体之间的连通性，从而改善了材料的塑性。

乏燃料在贮存及运输过程中除了中子以外还会产生大量的伽马射线，然而 Gd 仅具有中子吸收能力，如何妥善处理伽马射线是 Al 基屏蔽材料面临的问题之一。W 作为高原子序数元素，对高能射线具有良好的屏蔽性能，是常用的伽马射线屏蔽元素。Kursun 等[51]通过粉末冶金制备了(W+Gd_2O_3)/Al 复合材料，蒙特卡洛 N 粒子模拟结果表明，W 的引入为 Gd_2O_3/Al 基复合材料提供了良好的伽马射线屏蔽性能。Wang 等[52]同样通过粉末冶金制备了(25%W+10%Gd_2O_3)/Al 复合材料，对烧结工艺及材料的耐蚀性能进行了测试，得出最佳烧结工艺是

中国知网 https://www.cnki.net

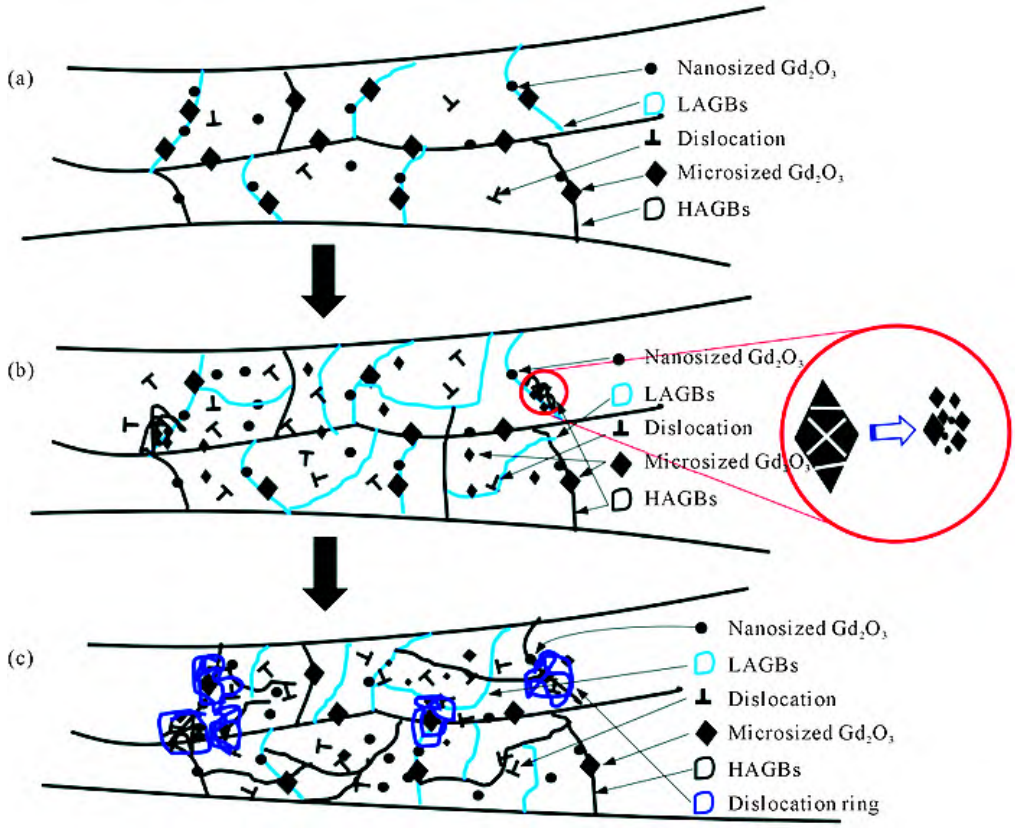

图 6 轧制过程中组织演变示意：(a) 烧结态；(b) 小变形量轧制态；(c) 大变形量轧制态[21]

Fig.6 Schematic diagram of microstructure evolution during the rolling process: (a) sintered state; (b) low-strain rolled state; (c) high-strain rolled state[21]

600 ℃下烧结 2 h，烧结温度偏低或烧结时间过短导致材料致密度降低，而过高的烧结温度和过长的烧结时间会导致严重的团聚，恶化材料力学性能和耐蚀性能。此外，浸泡腐蚀实验结果表明，该复合材料在硼酸环境下的腐蚀产物是 Al_2O_3，但 Gd_2O_3 和 W 导致钝化膜并不致密，使得材料发生了严重的点蚀。

Cong 等[53]研究了(25%W+25%Gd_2O_3)/Al 复合材料的耐蚀性能，观察到 Al_2O_3 的生成能够提高材料的耐蚀性，但 Gd_2O_3 周围的氧化膜疏松且薄，氧化膜的致密性遭到破坏，从而发生了剧烈的点蚀，这与 Wang 等[54]的研究结果一致。由于 Gd_2O_3 的耐蚀性较强，而且烧结产物 Al_3Gd 和 $Al_5Gd_3O_{12}$ 也具有较强的耐蚀性能，这使得材料的耐蚀性能随着 Gd_2O_3 的增加而提高。此外，他们还对材料进行了 Fe^+ 辐照实验，高能 Fe^+ 粒子的撞击导致 Al 基体发生非晶化转变，形成大量辐照缺陷和快速通道，降低了材料的耐蚀性能。

Wang 等[54]制备了(7%W+7%Gd_2O_3)/Al6061 复合材料，并重点研究了 H^+ 原位辐照下材料辐照缺陷的演变。在 H^+ 辐照作用下，Al 基体中先形成位错环，随后出现氢致气泡，位错环的密度和尺寸随着辐照持续作用逐渐增加并趋于稳定，氢致气泡也随辐照作用不断增加扩大，最后形成快速生长的隧道结构。大量的位错环及隧道能够提高材料的力学性能，在 2.885×10^{17} H_2^+/cm^2 辐照后，位错环的增加可以为材料提高约 75.5 MPa 的屈服强度。

基于当前含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基复合材料的研究进展，学者们通过多元素复合协同强化、第二相颗粒引入及微观结构优化等策略，有效实现了材料中子屏蔽性能与力学性能的协同提升。其中，Gd 元素与 B_4C 颗粒协同吸收在保证中子屏蔽效率的同时，通过细化晶粒、形成 Al-Gd-O 强化相及改善 B_4C 颗粒界面结合等机制显著增强了材料塑性；而 Gd_2O_3 的替代应用不仅降低了原料成本，其与 Al 基体原位生成的 $Al_5Gd_3O_{12}$ 相更通过抑制晶界腐蚀、优化颗粒分布等方式提升了材料的综合性能。γ 射线屏蔽元素引入含 Gd 的 Al 基中子屏蔽复合材料中有望实现中子–伽马射线双屏蔽，是有良好发展前景研究方向之一。然而颗粒的分散性及界面结合问题，目前针对含 Gd_2O_3 颗粒中子屏蔽 Al 基复合材料的研究只针对粉末冶金工艺，如何提高粉末冶金制备板材的效率或者开创铸造法制备含 Gd_2O_3 颗粒中子屏蔽 Al 基复合材料是该材料面临的主要问题。文中提及主要研究的力学性能对比见表 2。

中国知网　https://www.cnki.net

3 总结与展望

3.1 总结

基于含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料引入过量 Gd 导致材料力学性能恶化的特点，综述了近年来组分设计和制备工艺对含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料力学性能和变形性能的相关研究。

(1)在组分设计方面，Mg、Si、Cu 等合金元素及 B_4C、TiB_2、Gd_2O_3、SiC 等增强颗粒能够细化含 Gd相，部分研究发现 Gd 还能与增强颗粒和元素发生协同细化效果，有利于材料力学性能提升，但是含 Gd 相种类繁多，相关机制还未进行深入探讨研究；Gd_2O_3 具有成本低、耐蚀性能好、力学性能良好等优势，但针对 Gd_2O_3-Al 基中子屏蔽复合材料的研究集中于粉末冶金领域。

(2)制备工艺方面，针对粉末冶金工艺研究最多，大量研究表明粉末冶金能制备组织细小的含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料；铸造法的研究相对较少，目前超声辅助铸造法能够满足材料成分均匀、增强颗粒弥散分布的要求。热挤压、轧制等塑性变形工艺可以细化含 Gd 相，促进动态再结晶，同时改善第二相颗粒与 Al 基体的界面结合强度，其中热挤压具有更大的变形量，晶粒细化更为明显，对材料力学性能影响更显著。

(3)通过系统分析可知，含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料性能提升基于“组织强化主导、多相协同增效、界面缺陷调控”的多级强化机制。其中，纳米析出相与微米增强颗粒协同强化、热变形加工诱导的动态再结晶以及 Gd 元素特有的界面改性作用，是含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料力学性能和变形性能提升的主要机制。

3.2 展望

含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料作为乏燃料贮存及运输过程的防护材料，需要综合考虑屏蔽性能、力学性能和变形性能，目前研究均是采用合金化、引入增强颗粒或改善制备工艺实现组织细化，促进含 Gd 相均匀分布，从而提升中子屏蔽材料力学性能。在实际服役过程中，乏燃料贮存罐一般采用多层结构，内层材料以屏蔽性能为主，外层材料则以力学性能为主，较少贮存罐外壳层数是实现乏燃料贮存及运输轻量化的有效途径之一。梯度功能材料通过空间连续变化的结构设计，可以制备内部性能和外部性能不一致的材料[55-56]，为解决屏蔽性能与力学性能的协同优化提供了新思路。制备 Gd 元素含量由内层向外层逐渐降低的含 Gd 元素中子屏蔽 Al 基材料，有望能兼顾内部的高屏蔽性能要求和外部的高力学性能要求，从而减少乏燃料贮存罐外壳层数。此外，双屏蔽或多屏蔽也能减少贮存罐外壳层数，目前该领域主要聚焦于(W+Gd_2O_3)/Al 复合材料的开发，通过 Gd_2O_3 的中子吸收能力与 W 的高原子序数特性实现双重防护，Bi[57]和 Pb[58]等元素因具备高密度与强光电效应，在 γ 射线屏蔽领域展现出独特优势，具有制备含 Gd 元素多屏蔽 Al 基材料的潜力。

在乏燃料贮存及运输过程中，中子屏蔽材料的运用以板材为主，粉末冶金和热挤压成本高，难以制备大块板材，需探索大尺寸的粉末冶金和热挤压工艺，或提高铸造法及热轧板材的力学性能。3D 打印技术为复杂结构屏蔽材料的制备提供了新思路，通过激光选区熔化或多材料打印技术，可实现 Gd_2O_3、B_4C 等吸收相的空间精准调控，同时结合热挤压或热轧后处理，进一步优化材料组织与性能。未来需重点突破多材料兼容打印、界面结合强化等关键技术，推动高性能双屏蔽材料的工程化应用。

参考文献：

[1] 徐天寒，张叶，戴耀东. 热中子防护 Gd/Al 复合材料的设计[J]. 材料导报，2021, 35(22): 22121-22124.
XU T H, ZHANG Y, DAI Y D. The design of Gd/Al composite material for thermal neutron protection[J]. Materials Reports, 2021, 35(22): 22121-22124.

[2] 张廷克，李闽榕，白云生，王毅韧，曹述栋，高立刚，王俊，张涛，

表 2 主要研究课题的力学性能对比

Tab.2 Comparison of the mechanical properties of the main studies mentioned in this paper

Matertials	Preparation technology	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Source
30 wt.%B_4C/Al	powder metallurgy	297	2.5	Zhang[28]
Al-6Mg-5Gd	powder metallurgy	462	10.2	Yang[39]
Al-5Cu-6Gd-10Bi	Casting	204.9	13.4	Ding[38]
(10 wt.%B_4C+3.6 wt.%Gd)/Al6061	Casting	342	2.4	Chen[43]
(15 wt.%B_4C+1 wt.%Gd)/Al	powder metallurgy	260	15	Xu[41]
(15 wt.%B_4C+1 wt.%Gd)/Al6061	powder metallurgy	380	5	Jiang[8]
6TiB_2/Al-5Mg-1Gd	powder metallurgy	464	15.6	Yang[45]
10 wt.%Gd_2O_3/Al6061	powder metallurgy	240	16	Zhang[48]

中国知网 https://www.cnki.net

郑玉辉. 中国核能发展报告(2023)[M]. 北京：社会科学文献出版社，2023.
ZHANG T K, LI M R, BAI Y S, WANG Y R, CAO S D, GAO L G, WANG J, ZHANG T, ZHENG Y H. The report on the development of China's nucleat energy(2023)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press(China), 2023.

[3] QI Z, YANG Z, LI J, GUO Y, YANG G, YU Y, ZHANG J. The advancement of neutron-shielding materials for the transportation and storage of spent nuclear fuel[J]. Materials, 2022, 15(9): 3255.

[4] 史惠杰，宋晓鹏，陈勇，刘继连，马敬. 我国乏燃料离堆贮存需求分析及技术路线选择 [J]. 产业与科技论坛，2022, 21(3): 31-33.
SHI H J, SONG X P, CHEN Y, LIU J L, MA J. Demand analysis and technical route selection of spent fuel in China [J]. Estate and Science Tribune, 2022, 21(3): 31-33.

[5] 李仕元，李精精，王莉君. 乏燃料运输容器中子屏蔽层等效导热性能研究[J]. 包装工程，2024, 45(21): 22-27.
LI S Y, LI J J, WANG L J. Effective thermal conductivity of spent fuel transport cask neutron shielding layer[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(21): 22-27.

[6] 张羽白. 氧化钆中子吸收材料制备及性能研究[D]. 济南：山东大学，2017.
ZHANG Y B. Study on preparation and properites of gadolinium oxide ceramics for neutron absorption materials[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[7] 李长园. 铝基碳化硼复合材料中子屏蔽性能研究[D]. 上海：中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所)，2021.
LI C Y. Research on neutron shielding performance of B_4C/Al composites[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physic, 2021.

[8] JIANG L T, XU Z G, FEI Y K, ZHANG Q, QIAO J, WU G H. The design of novel neutron shielding (Gd+B_4C)/6061Al composites and its properties after hot rolling[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 183-194.

[9] 王征宇. 核辐射屏蔽用 W-B_4C/Al 复合材料设计与性能研究[D]. 西安：西京学院，2023.
WANG Z Y. Design and performance study of W-B_4C/Al composites fornuclear radiation shielding[D]. Xi'an: Xijing University, 2023.

[10] QI Z D, YANG Z, MENG X F, YANG X G, LIANG M X, LI C Y, DAI Y. Microstructure, thermophysical properties and neutron shielding properties of Gd/316 L composites for spent nuclear fuel transportation and storage [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107315.

[11] PEI Y, QU X, GE Q, WANG T. Evolution of microstructure and elements distribution of powder metallurgy borated stainless steel during hot isostatic pressing[J]. Metals, 2022, 12(1): 19.

[12] 黄蓉. 新型高硼奥氏体不锈钢中子吸收材料的制备、微结构和性能研究[D]. 上海：上海大学，2020.
HUANG R. Preparation, microstructure and properties of new high boron austenitic stainless steel neutron absorbing materials [D]. Shanghai: Shanghai University, 2020.

[13] GASHTI M F, MOUSAVINEJAD S H G, KHALEGHI S J. Evaluation of gamma and neutron radiation shielding properties of the GGBFS based geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: 130308.

[14] ZALEGOWSKI K, PIOTROWSKI T, GARBACZ A, ADAMCZEWSKI G. Relation between microstructure, technical properties and neutron radiation shielding efficiency of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117389.

[15] 尹俊红，燕鸽，吕亚军，朱晨辉，齐玉玄. 新型碳化硼混凝土中子屏蔽性能研究[J]. 混凝土，2024(12): 22-28.
YIN J H, YAN G, LYU Y J, ZHU C H, QI Y X. Study on neutron shielding properties of new boron carbide concrete[J]. Concrete, 2024(12): 22-28.

[16] QIAO J, XU L W, WANG Y J, WU G H. Fabrication and properties of (W+B)/Al hybrid composites for nuclear radiation shielding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 969: 172292.

[17] ABENOJAR J, MARTINEZ M A, VELASCO F. Effect of the boron content in the aluminium/boron composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 422(1-2): 67-72.

[18] CHEN H S, WANG W X, LI Y L, ZHOU J, NIE H H, WU Q C. The design, microstructure and mechanical properties of B_4C/6061Al neutron absorber composites fabricated by SPS [J]. Materials & Design, 2016, 94: 360-367.

[19] GAYLAN Y, AVAR B, PANIGRAHI M, AYGÜN B, KARABULUT A. Effect of the B_4C content on microstructure, microhardness, corrosion, and neutron shielding properties of Al-B_4C composites[J]. Ceramics International, 2023, 49(3): 5479-5488.

[20] LI C Y, XIA X B, CAI J, ZHANG Z H, WANG J H, QIAN Z C, WANG X H, DAI Y. Influence analysis of B_4C content on the neutron shielding performance of B_4C/Al[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2023, 204: 110684.

[21] LI J, ZHANG P, WANG W X, TAN X Y, MA Y F, JIA C P. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Gd_2O_3/6061Al neutron shielding composite during rolling[J]. Vacuum, 2020, 172: 109098.

[22] WANG Z X, PAN J, LIU A, ZHANG L, SUN Z Y, WANG Z, LI J, XIAO X S. Microstructure and properties controlling of Al-xGd alloys for thermal neutron absorbing[J]. Journal of Nuclear Materials, 2025, 603: 155447.

[23] ÖZCAN M, KAM E, KAYA C, KAYA F. Boron-containing nonwoven polymeric nanofiber mats as neutron shields in compact nuclear fusion reactors [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(6): 7441-7450.

[24] TAKEDA H, HASHIMOTO S, MATSUI H, HONDA S, IWAMOTO Y. Rapid fabrication of highly dense geopolymers using a warm press method and their ability to absorb neutron irradiation [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 82-86.

[25] XU Z G, JIANG L T, ZHANG Q, QIAO J, GONG D, WU G H. The design of a novel neutron shielding B_4C/Al composite containing Gd[J]. Materials & Design, 2016, 111: 375-381.

[26] LI Y, LI Q L, LI D, LIU W, SHU G G. Fabrication and characterization of stir casting AA6061-31%B_4C composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(9): 2304-2312.

[27] JUNG Y, LEE M, KIM K, AHN S. $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ reaction-induced gas bubble formation in Al-B_4C neutron absorber irradiated in spent nuclear fuel pool[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 533: 152077.

中国知网 https://www.cnki.net

[28] ZHANG P, LI Y L, WANG W X, GAO Z P, WANG B D. The design, fabrication and properties of B_4C/Al neutron absorbers [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 437(1-3): 350-358.

[29] CHEN H S, WANG W X, LI Y L, ZHANG P, NIE H H, WU Q C. The design, microstructure and tensile properties of B_4C particulate reinforced 6061Al neutron absorber composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 632: 23-29.

[30] YUE X Y, WANG J J, LI Y S, RU H Q. Properties of B_4C/Al-B_4C composite with a two-layer structure [J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(4): 1720-1724.

[31] ZHANG Y B, YU Y S, XU G Y, FU Y, LI T J, WANG T M, GUO Q T. Microstructure and performance of a three-layered Al/7075-B_4C/Al composite prepared by semi continuous casting and hot rolling[J]. Metals, 2018, 8(8): 600.

[32] LEE K B, SIM H S, CHO S Y, KWON H. Reaction products of Al-Mg/B_4C composite fabricated by pressureless infiltration technique[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 302(2): 227-234.

[33] ZHANG X G, MEI F Q, ZHANG H Y, WANG S H, FANG C F, HAO H. Effects of Gd and Y additions on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 552: 230-235.

[34] KHORSHIDI R, HONARBAKHSH-RAOUF A, MAHMUDI R. Microstructural evolution and high temperature mechanical properties of cast Al-15Mg2Si-xGd in situ composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 700: 18-28.

[35] GHANDVAR H, IDRIS M H, AHMAD N. Effect of hot extrusion on microstructural evolution and tensile properties of Al-15% Mg_2Si-xGd in-situ composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 751: 370-390.

[36] GHANDVAR H, IDRIS M H, ABU BAKAR T A, NAFARI A, AHMAD N. Microstructural characterization, solidification characteristics and tensile properties of Al-15% Mg_2Si-x (Gd-Sb) in-situ composite[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 3272-3291.

[37] SHI Z M, WANG Q, SHI Y T, ZHAO G, ZHANG R Y. Microstructure and mechanical properties of Gd-modified A356 aluminum alloys[J]. Journal of Rare Earths, 2015, 33(9): 1004-1009.

[38] DING Y G, YANG C C, ZHENG Q L, LIU Z W, YANG W T. Design, fabrication and mechanical properties of a novel Al-5Cu-6Gd-10Bi alloy potentially used for shielding both thermal neutron and γ-ray [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1014: 178670.

[39] YANG C, HUANG J, WANG K B, LI Y, WANG M L, CHEN Z, ZHONG S Y, LI X F, WANG H W. Microstructural design to Al-6Mg-5Gd alloy for the unification of structural and neutron shielding properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 988: 174236.

[40] XU Z G, JIANG L T, ZHANG Q, QIAO J, ZHANG L C, HE P, MA J, WU G H. The formation, evolution and influence of Gd-Containing phases in the (Gd+B_4C)/6061Al composites during hot rolling [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 714-725.

[41] XU Z G, JIANG L T, ZHANG Q, QIAO J, WU G H. The microstructure and influence of hot extrusion on tensile properties of (Gd+B_4C)/Al composite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729: 1234-1243.

[42] CHEN M, LIU Z W, TAO L, PENG C, SUN Q Q. Effects of Gd addition on the hot deformation behaviors of B_4C_p/Al6061 neutron absorber composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2023, 54(4): 1379-1397.

[43] CHEN M, LIU Z W, YANG C C, XIAO P, YANG W T, HU Z L, SUN L, JIA Y D. A novel (B_4C_p+Gd)/Al6061 neutron absorber material with desirable mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 861: 144376.

[44] 马杰,张鹏,樊文浩,廉旭鹏,戎婕. W 增强 Al/Gd_2O_3 双屏蔽复合材料的制备与性能研究[J]. 现代化工,2024, 44(3): 136-139, 44.
MA J, ZHANG P, FAN W H, LIAN X P, RONG J. Preparation of W reinforced Al/Gd_2O_3 double shielding composite and study on its property[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(3): 136-139, 44.

[45] YANG C, WANG K B, DAN C Y, HUANG J, WANG M L, CHEN Z, ZHONG S Y, LI X F, WANG H W. Fabrication of equiaxed ultrafine-grained structures in TiB_2/Al-Mg-Gd neutron shielding composites by powder metallurgy routines[J]. Materials Characterization, 2023, 200: 112889.

[46] YANG C, HUANG J, DAI J, WANG K B, WANG M L, CHEN Z, ZHONG S Y, LI X F, WANG H W. Multiple semi-coherent particles strengthened ultra-fine-grained Al composites for neutron shielding materials[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 211: 226-238.

[47] 徐文瑞. SiC 颗粒增强 Gd_2O_3/6061Al 中子屏蔽复合材料设计、制备及性能研究 [D]. 太原:太原理工大学,2022.
XU W R. Design, preparation and performance of Gd_2O_3/6061Al neutron shielding composites reinforced with SiC particles [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

[48] ZHANG P, LI J, WANG W X, TAN X Y, XIE L, GUO F Y. The design, microstructure and mechanical properties of a novel Gd_2O_3/6061Al neutron shielding composite[J]. Vacuum, 2019, 162: 92-100.

[49] GAYLAN Y, AVAR B. Al-B4C-(Gd, Gd_2O_3) composite materials: Synthesis and characterization for neutron shielding applications [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(12): 5201-5211.

[50] LIAN X P, XU W R, ZHANG P, WANG W X, XIE L, CHEN X P. Design and mechanical properties of SiC reinforced Gd_2O_3/6061Al neutron shielding composites [J]. Ceramics International, 2023, 49 (17): 27707-27715.

[51] KURSUN C, GAYLAN Y, YALCIN A O, PARREY K A, GAO M. Advanced neutron and γ-ray shielding characteristics of nanostructured (90-x)Al-xGd_2O_3 composites reinforced by tungsten[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177372.

[52] WANG Y L, XIAO W W, HUANG J H, ZOU S L, LIU J, REN Z H, LIU S H, LIU Y L, HUANG Y C. Microstructure, mechanical and corrosion property of neutron and γ-ray shielding (Gd_2O_3+W) /Al composites[J]. Ceramics International, 2024, 50(21): 41448-41460.

[53] CONG S, RAN G, LI Y P, DONG S G, HUANG X Y. Early-stage corrosion behavior of Al-based Gd_2O_3-W shielding composites in a

中国知网 https://www.cnki.net

simulated spent fuel wet storage environment[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 137: 103787.

[54] WANG Z J, CAO Z Q, WU M J, LI Y M, RAN G. Evolution and characteristics of defect clusters in H_2^+ irradiated Al-based Gd_2O_3-W composites used as spent fuel shielding materials[J]. Materials Today Energy, 2023, 34: 101295.

[55] NAEBE M, SHIRVANIMOGHADDAM K. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties[J]. Applied Materials Today, 2016, 5: 223-245.

[56] SALEH B, JIANG J H, FATHI R, AL-HABABI T, XU Q, WANG L S, SONG D, MA A B. 30 years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, applications and future Challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 201: 108376.

[57] YANG C C, CHEN M, SU X Y, ZHENG Q L, LIU Z W. The active regulatory effects of magnesium on the preparation, microstructure and mechanical properties of a novel Al-Bi based γ-ray shielding material by casting method[J]. Scripta Materialia, 2024, 251: 116281.

[58] MAJEED E I, NAJAM L A, HAMOOD M A, MAHMOUD K A. A Comprehensive study on the γ-ray shielding performance of Al-Cu-PbO alloy: Experimental and simulation studies[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2025, 57(1): 103124.

(责任编辑:李亚敏)

中国知网　https://www.cnki.net