

核屏蔽用中子吸收材料研究现状与展望

陈洪胜^{1,2}, 王文先^{1,2}, 聂慧慧¹, 李宇力³, 刘瑞峰¹, 刘润爱¹, 杨 涛¹

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(2. 山西省先进镁基材料重点实验室, 山西 太原 030024)

(3. 西部新锆核材料科技有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 镉(Cd)、硼(B)和一些稀有元素具有较大的热中子吸收截面, 在核屏蔽吸收中子领域具有较广泛的应用前景。本文概述了用于核电站乏燃料“湿法”贮存用中子吸收材料的种类, 论述了各种中子吸收材料的优点和不足。阐述了铝基碳化硼(B₄C/Al)中子吸收材料的研究进展以及不同制备方法的优点和不足, 进一步介绍了搅拌摩擦焊方法和扩散焊方法在连接 B₄C/Al 中子吸收材料过程中的优势。在此基础上, 对新型中子吸收材料在成分、结构设计方面进行了分析, 对未来核屏蔽用中子吸收材料进行了展望。

关键词: 中子吸收; 铝基碳化硼; 屏蔽材料; 连接方法

中图分类号: TL344

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)12-4358-07

硼(B)的同位素 ¹⁰B 具有较大的热中子吸收截面 (3837 barn), 虽然 ¹⁰B 的自然丰度仅为 19.78%, 但使得天然硼的热中子吸收截面仍可达到 750 barn^[1,2]。碳化硼(B₄C)作为 B 的化合物, 具有价格低廉、衰变时无放射性同位素产生, 二次辐射能量低, 并且具有耐高温, 抗辐照等性能, 故成为广泛应用、理想的中子吸收材料。但由于 B₄C 属于陶瓷材料, 断裂韧性低、烧结温度高、抗氧化能力差以及对金属稳定性差等缺点, 常将碳化硼添加到金属或无机非金属材料当中制备成复合材料^[3-5]。

根据核反应临界条件, 只有当 B₄C 颗粒添加到金属或无机非金属材料中的含量高于某一临界值时, 才能满足核防护的要求。从耐腐蚀、抗辐照、中子吸收以及力学性能等方面考虑, 通常将 B₄C 颗粒添加到铝基体当中, 制备成铝基复合材料^[6,7]。然而, 高含量的 B₄C 颗粒添加到铝基体当中时, 由于金属基体与 B₄C 颗粒密度上的差异、界面缺陷、界面协调变形能力差以及界面键合类型不同、界面反应产物较为复杂等原因, 使得制备高含量 B₄C 颗粒添加的铝基复合材料较为困难^[8,9]。

因此, 本文针对目前核屏蔽用中子吸收材料的种类、存在问题等方面进行综合阐述, 重点介绍了铝基碳化硼中子吸收材料的研究进展以及制备方法, 论述

了不同制备方法的优点和存在的不足。对铝基碳化硼中子吸收材料的搅拌摩擦焊和扩散焊连接方法进行了概述分析, 对新型中子吸收材料的成分设计、结构设计等方面进行了介绍, 对未来新型核屏蔽用中子吸收材料进行了展望。

1 中子吸收材料的种类

1.1 镉板

镉(Cd)是良好的热中子吸收体, 具有 8 种稳定的同位素, 其中 Cd-108(截面: 700.77 barn)和 Cd-113(截面: 20 600 barn)的热中子吸收截面较大。同时镉具有良好的加工性和价格优势, 在很长一段时间被应用于核电站乏燃料贮存用中子屏蔽材料^[10]。

但是 Cd 在与热中子作用后主要发生(n, γ) 反应, 释放的 γ 射线份额较大, 半衰期较长, 同时具有较高的放射性。另外, 镉板作为乏燃料贮存用中子屏蔽材料在使用过程中是存放在硼酸水池溶液中, 硼酸具有一定的腐蚀性, 通常包覆在不锈钢材料内部使用, 在包覆过程中, 焊接产生的 Cd 的高温蒸气压及毒性对人体有害。因此, 镉板已经逐渐退出使用。

1.2 含硼聚乙烯复合材料

聚乙烯当中含有大量的氢元素, 氢元素是良好的中子慢化剂。因此, 将 B 或 B₄C 添加到聚乙烯当中制

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51805358, 51775366); 中国博士后科学基金(2018M631773); 山西省青年科技研究基金(201801D221122); 山西省高校科技创新项目(RD1900000633)

作者简介: 陈洪胜, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0431-6010076, E-mail: chenhongsheng@tyut.edu.cn

备成复合材料，兼具了具有慢化和吸收中子的双重作用，对屏蔽吸收中子具有优异的效果^[11]。

目前，具有代表性的有含硼聚丙烯和铅硼聚乙烯材料，是将 B_4C 粉末添加到聚乙烯和聚丙烯基体当中，在聚乙烯复合材料中添加铅元素可以屏蔽吸收 γ 射线，该类材料具有制造简单、结构简化、质量轻和体积小等优点^[12]。中国工程物理研究院张启戎教授团队采用聚乙烯(HDPE)为基体， B_4C 为中子吸收体，制备了颗粒含量为 10%、25%、45%的中子吸收材料^[13]。印度 Dokhale 等研制了高密度的含硼聚乙烯材料用于各种反应堆系统，并对其子辐照行为进行了研究^[14]。武汉大学徐凯研究员团队采用高温熔融玻璃固化方式实现了对铅硼聚乙烯的减容及固化处理，形成铅硼玻璃^[15]。

但由于含硼聚丙烯、铅硼聚乙烯材料在高温酸性介质和辐照环境下，材料极易发生老化、尺寸稳定性和力学性能较差，容易产生辐照损伤，服役寿命较短，在一定程度上限制了其使用^[15]。

1.3 硼钢

不锈钢具有良好的抗辐照和耐腐蚀性能，即使在剂量较大的中子场或 γ 场环境下使用也能保证其良好的稳定性^[16]。此外，不锈钢在高温环境下仍具有良好的尺寸稳定性和力学性能。因此，含硼不锈钢被应用于核电站乏燃料“干室贮存”和“湿室贮存”环境中。

目前，东北大学刘常升教授团队^[17]采用真空感应熔炼的方法制备出了 B 元素均匀分布的高硼钢，研究并分析了高硼钢在铸态和热轧态情况下的微观组织和力学性能。Kurban 和 Koganti 等人^[18,19]对钢中 B 含量（质量分数，下同）为 0.2%~2.25%的硼钢微观组织和力学性能进行了研究，研究了热处理工艺对硼钢微观组织和力学性能的影响。Östlund 等人^[20]研究了不同组织结构硼钢的失效行为，对材料的寿命进行了评估预测。研究表明：从加工性角度考虑，钢中硼含量以 2%为上限，过量的硼加入会析出硼化物，导致材料的热延性大大降低，加工性能变差。

虽然不锈钢具有诸多优点，但由于 B 元素在不锈钢中溶解度的限制($\leq 2.25\%$)，难以制备高含量的含硼钢，而且随着不锈钢中 B 含量的增加，硼钢的力学性能下降。因此，硼钢当中 ^{10}B 的面密度较小，难以满足吸收中子的要求，目前多采用添加富集 ^{10}B 的方法来提高硼钢的中子吸收性能，但富集 ^{10}B 的浓缩工艺复杂，价格昂贵。

1.4 硼铝合金

硼铝合金是通过熔炼或粉末冶金的方法将单质 B 添加到基体铝合金内部，形成硼铝合金。但由于 B 在

铝合金当中的溶解度较低，很难制备高 B 含量的硼铝合金。目前，制备出的硼铝合金自然硼含量为 4%，厚度为 2.54 mm。其中， ^{10}B 的面密度仅为 0.005 g/cm^2 ，很难达到核电站乏燃料贮存格架用中子吸收材料的使用要求。因此，多采用添加 ^{10}B 浓度较高的富集硼制备硼铝合金。

当 B 元素添加到铝合金基体当中时，容易在晶界处形成硼化物，使得材料的韧性降低。Abenojar 教授团队^[21]采用粉末冶金法制备了 B 含量为 10%~50%的硼铝合金，对硼铝合金的物相及弯曲性能进行了研究。研究表明：随着 B 含量的增加，硼铝合金的弯曲性能持续恶化。因此，硼铝合金中一般 B 含量较低，使得其中子吸收性能受限。

1.5 铝基碳化硼复合材料

基于性能和价格优势，铝基碳化硼(B_4C/Al)中子吸收材料应用较为广泛。目前，国外生产出来的 B_4C/Al 中子吸收材料主要有 3 种，分别为 California Consolidation Technology 公司生产的 Metamic 牌号、Talon Composites 公司开发生产的 Talbor 牌号材料和 DWA Technologies 公司研发生产的 Bortec 牌号材料^[22]。此外，Hitachi Zosen 公司也宣布生产出了作为核电站乏燃料贮存格架用 B_4C/Al 中子吸收材料。

我国相关的科研院校也对 B_4C/Al 复合材料进行了相关的研究。清华大学 Wei Liu 教授团队采用液态搅拌法，通过 Ti 为界面中间层，在界面处通过原位反应获得了连续分布的纳米 TiB_2 ，材料的抗拉强度可达 138.9 MPa ^[23]。沈阳金属所 Zongyi Ma 教授团队对 $B_4C/6061$ 复合材料的界面物相进行了详细研究，研究表明，界面物相由 Al_3BC ， $MgAl_2O_4$ ， MgB_7 ， $Mg_{0.78}Al_{0.75}B_{14}$ ， $AlB_{12}C_2$ 和 Al_4SiC_4 等组成^[24]。中国工程核物理研究院 Zhang Pengcheng 研究员团队对纳米颗粒增强 B_4C/Al 中子吸收材料的微观组织和力学性能进行了研究，纳米颗粒的加入有利于提高材料的力学性能，抗拉伸强度可达 306 MPa ^[25,26]。太原理工大学 W. X. Wang 教授团队采用粉末冶金方法(热压→挤压→轧制)方法制备了不同厚度的 B_4C/Al 中子吸收材料， B_4C 颗粒含量高于 30%^[27]。鉴于 B_4C/Al 中子吸收材料优异的中子吸收性能、耐腐蚀、抗辐照以及优异的力学性能，被广泛地应用于核电站乏燃料贮存用中子吸收材料。

2 铝基碳化硼中子吸收材料制备方法

目前，制备 B_4C/Al 中子吸收材料的方法主要有铸造法、压力浸渗法、喷射共沉积法和粉末冶金法。其中，粉末冶金法对于制备大尺寸、高含量 B_4C/Al 中子

吸收材料板材较为适用。

2.1 铸造法

铸造法具有工艺简单, 操作方便等特点。然而, 对于制备颗粒增强金属基复合材料, 特别是高颗粒含量金属基复合材料, 由于受溶解度以及颗粒/基体密度上的差异, 难以制备高颗粒含量金属基复合材料。在制备过程中容易出现颗粒聚集和分层现象。

清华大学 Wei Liu 教授团队^[23]采用搅拌铸造方法制备了 15%B₄C/Al 复合材料, 为了提高 B₄C 与基体铝的界面结合强度, 在制备过程中添加了不同含量的 Ti 元素作为界面过渡层, 在界面处生成 TiB₂ 层, 有效地提高了界面结合强度。南昌大学闫洪教授团队^[28]将超声波引入到铸造 Al₂O₃ 颗粒增强 7075 铝基复合材料中, 超声波的施加提高了 Al₂O₃ 颗粒等在基体铝合金中的分散, 提高增强体的分布均匀性。

搅拌铸造法对于制备低颗粒含量颗粒增强金属基复合材料较为实用, 对于高颗粒含量金属基复合材料, 通常需要施加额外的物理场(超声场/电磁场)等来提高颗粒分布均匀性。

2.2 浸渗法

浸渗法是预先将粉末颗粒在加热、加压的条件下制备成骨架结构, 内部形成联通的通道, 后续在施加压或不加压力的条件下, 通过毛细管力, 使得熔融的金属浸渗到骨架内部, 形成复合材料。

北方工业大学崔岩教授团队^[29]采用 2024、5056、6061 和 7075 铝合金通过无压浸渗方法制备了 20%和 80%的 B₄C 铝基复合材料, 对复合材料的界面物相和力学性能进行了分析研究, 研究表明, 界面物相主要有 Al₃BC 和 AlB₂, 抗弯曲强度最高可达 425 MPa。中南大学 Fanhao Zeng 教授团队^[30]采用无压浸渗法制备了 B₄C/2024Al 复合材料, 材料内部的物相为 B₄C、Al、Al₃BC、AlB₂ 和 Al₂Cu 相, 并探究了热处理工艺对复合材料力学性能的影响, 在 700 °C 处理 36 h 获得了综合性能优异的复合材料。

采用浸渗法可以制备高颗粒含量的金属基复合材料, 但制备工艺较为繁杂, 对设备要求较高, 难以制备高品质、大尺寸的颗粒增强金属基复合材料。

2.3 喷射共沉积法

喷射共沉积方法主要包括雾化和沉积 2 个过程, 是在金属基体高温雾化的过程中, 将颗粒增强体添加到基体内部, 沉积后形成复合材料。

湖南大学高文理等人^[31]采用 SiC_p 颗粒为增强体, 2024Al 合金作为基体材料, 采用喷射共沉积技术制备了 SiC_p/2024Al 复合材料坯料, 经过挤压轧制后复合材料的抗拉强度可达到 480 MPa。Li 等人^[32]采用喷射

共沉积技术制备出了一种新型的铝基复合材料, 采用 Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ 为颗粒增强体, 制备 Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂/A356 复合材料, 制备出的复合材料抗拉强度可达 410.83 MPa, 具有优良的塑性加工性能。但该类制备方法生产效率较低, 设备昂贵, 工艺较为复杂。

2.4 粉末冶金法

对于制备颗粒增强金属基复合材料, 粉末冶金方法是较为常用的一种方法, 不受颗粒含量、形状及种类的限制, 通过后续的塑形变形可制备大尺寸的颗粒增强金属基复合材料。

中国工程物理研究院 Zhang Pengcheng 教授团队^[26]采用粉末冶金半固态热等静压方法制备了颗粒含量为 30%的 B₄C/Al 复合材料, 材料的抗拉强度可达 300 MPa。哈尔滨工业大学 Longtao Jiang 教授团队^[33]在烧结温度 650 °C, 压力 100 MPa, 2.5 h 的工艺参数下, 制备了 3%和 12%的 B₄C/6061Al 复合材料, 研究了热处理工艺对复合材料微观组织和力学性能的影响。沈阳金属所 Y. T. Zhou 教授团队^[34]采用粉末冶金方法制备了 26%B₄C/6061Al 复合材料, 研究了烧结温度对复合材料微观组织和力学性能的影响, 研究表明, 颗粒/基体界面处的反应产物 Mg(Al)B₂ 纳米棒可有效阻碍位错滑移和晶界移动, 有利于提高复合材料的抗拉强度。

随着烧结技术的发展, 在烧结制备颗粒增强金属基复合材料的方法中, 出现了放电等离子烧结、微波烧结、超声波辅助烧结等技术, 这些烧结方法的烧结原理不同于传统的采用电阻丝加热, 通过热传导的方式实现对材料的加热, 具有其独特的优势, 这些烧结方法的出现为制备高性能颗粒增强金属基复合材料提供了有效途径。

3 铝基碳化硼中子吸收材料的连接方法

3.1 搅拌摩擦焊连接

采用传统的熔化焊方法在连接 B₄C/Al 中子吸收材料的过程中, 由于热输入较大, 在颗粒/基体的异质界面处容易产生二次反应, 很难形成有效界面冶金结合。同时由于颗粒与基体合金在密度上的差异, 在熔池内部容易产生颗粒的“上浮”或“下沉”, 造成颗粒团聚现象。基体合金中陶瓷颗粒的加入, 降低了熔池内部的金属流动性, 容易在熔池内部产生气孔、裂纹和脆性金属间化合物等缺陷。

搅拌摩擦焊方法(FSW)属于固相焊连接方法。在焊接过程中, 搅拌针与被焊材料之间产生摩擦热, 使得被连接材料接近材料熔点, 母材发生熔化, 实现材料的焊接, 在连接颗粒增强金属基复合材料方面具有

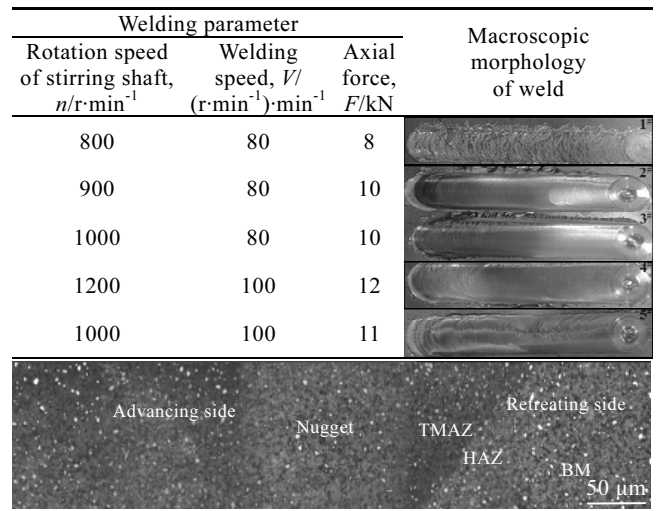
一定的优势。图 1 为本课题组采用搅拌摩擦焊方法在不同工艺参数下 30%B₄C/Al 焊缝表面形貌及微观组织形貌图，B₄C 颗粒均匀地分布在基体合金内部，未见明显的缺陷产生，焊接接头的抗拉强度可达母材的 85.7%^[35]。

Kalaiselvan 等人^[36]采用 FSW 技术研究了铸态方法制备的 12%B₄C 颗粒增强 AA6061 复合材料的焊接行为，研究了不同的焊接工艺参数对焊接接头微观组织及力学性能的影响。研究表明：在焊接接头区域晶粒细小，B₄C 颗粒均匀地分布在焊接接头部位，焊接接头的抗拉强度可达母材的 93.4%，但焊接接头的塑性下降，同时建立了相关的数学模型对复合材料的极限强度进行预测。Chen 等人^[37]研究了体积分数为 6%和 10.5%B₄C 颗粒增强 AA6063 金属基复合材料的 FSW 焊接接头的微观组织和力学性能。综合上述分析，搅拌摩擦焊方法对于高颗粒含量 B₄C/Al 中子吸收材料板材的焊接是一种较为适宜的连接方法。

3.2 扩散焊连接

扩散连接包括固态扩散连接和液相扩散连接。瞬态液相扩散焊(TLP)兼具了固态扩散焊和钎焊的优点，利用能够与基体发生共晶反应的中间层材料，在低于母材熔点的条件下，实现复合材料的连接。

哈尔滨工业大学 J. C. Yan 教授团队^[38]采用超声波辅助扩散焊方法实现了高体积分数的 SiC_p/A356 复合材料的连接，随着超声波施加时间的延长，有利于提高复



Note: HAZ-heat affected zone; TMAZ-thermomechanical affected zone; BM-base materials

图 1 搅拌摩擦焊 B₄C/Al 工艺参数、宏观和微观相貌图

Fig.1 Friction stir welding parameters, macroscopic and microscopic profiles of B₄C/Al

合材料的连接接头强度。清华大学 Guisheng Zou 教授团队^[39]采用超声波辅助瞬态液相扩散焊方法实现了 SiC_p/Mg 基复合材料的连接，连接接头的抗剪切强度可达 104.6 MPa，接近于母材强度。图 2 为本课题组采用脉冲电流加热方法，采用钛(Ti)作为中间层，实现了 30%B₄C/Al 中子吸收材料的连接，获得了良好的焊接接头。

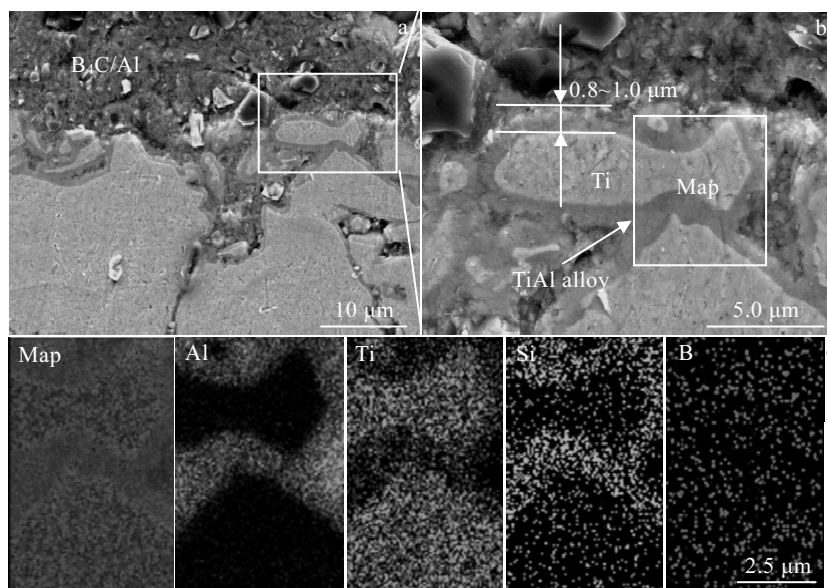


图 2 脉冲电流加热 B₄C/Al 中子吸收材料扩散焊接头微观组织及元素分布图

Fig.2 Microstructures (a, b) and element distribution (c) of diffusion welding joint of B₄C/Al neutron absorbing material heated by pulse current

4 新型中子屏蔽材料

4.1 成分设计

随着对核防护要求的提高，中子吸收复合材料向着多功能、高效率 and 高温高强度的方向发展。因此，在中子吸收材料组分上进行优化设计，可制备出不同种类的中子吸收材料。

哈尔滨工业大学 Gaohui Wu 教授团队^[40,41]通过在铝合金基体当中添加稀有元素 Gd 来降低 B₄C/Al 复合材料内部的 B₄C 颗粒含量，而不降低 B₄C/Al 的中子吸收性，提高复合材料的塑性。

本课题组通过粉末冶金方法制备了具有吸收/慢化中子、吸收中子/γ 射线等双重功能的屏蔽复合材料，微观形貌如图 3 所示，图 3a 为吸收/慢化中子的(B₄C-Cf)/Al 复合材料微观形貌，图 3b 为吸收中子/γ 射线(B₄C-W)/Al 基复合材料微观形貌。

4.2 结构设计

随着 B₄C/Al 中子吸收材料内部 B₄C 颗粒含量的

升高，吸收材料的中子吸收性能提高，然而材料的塑性性能降低，通过改变中子吸收材料的结构，可以调高复合材料的成形性能。图 4 为 B₄C/Al 中子吸收材料在热挤压和轧制过程中产生的边裂现象。

为了提高 B₄C/Al 中子吸收材料的塑性成形性能，制备成层状复合材料，例如三明治结构，在高含量 B₄C/Al 中子吸收材料表面包覆铝层，可以提高中子吸收板材的塑性成形性能，制备过程及结构如图 5 所示。然而该结构复合材料在制备以后不能进行挤压变形。

基于三明治层状结构的特点，本课题组设计并制备了“年轮状”结构，如图 6 所示^[42]。该结构的中子吸收材料在热压烧结后，可进行后续的挤压、轧制变形，挤压、轧制变形后，B₄C 颗粒分布均匀性和力学性能提高，B₄C 颗粒含量由外到内逐渐增加。该结构也可应用于制备外强内韧，颗粒含量由外至内逐渐降低的复合材料，例如制备耐磨材料、防冲击材料等。

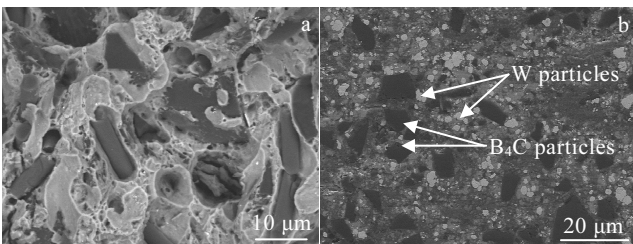


图 3 双重功能屏蔽材料

Fig.3 Dual function shielding material: (a) (B₄C-Cf)/Al and (b) (B₄C-W)/Al

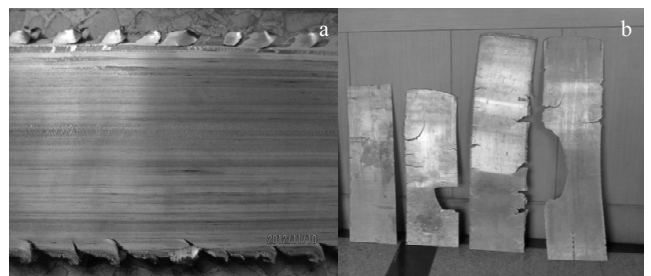


图 4 B₄C/Al 中子吸收材料塑性变形过程中产生边裂

Fig.4 Edge cracks of B₄C/Al neutron absorbing materials during plastic deformation: (a) extrusion and (b) rolling

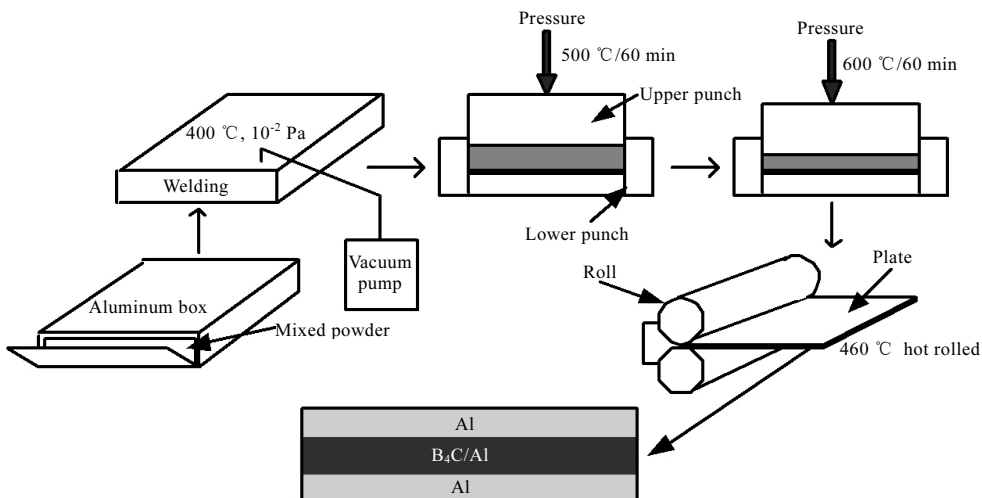


图 5 三明治结构 B₄C/Al 中子吸收材料制备过程

Fig.5 Preparation process of sandwich structured B₄C/Al neutron absorbing material

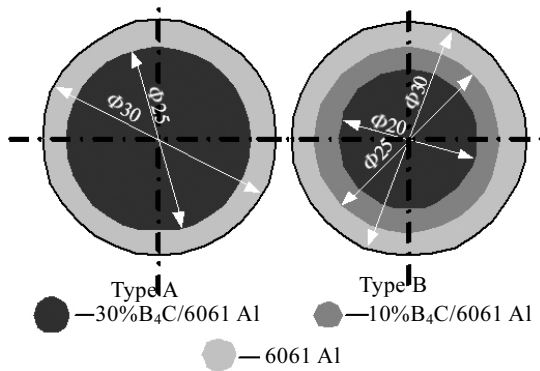
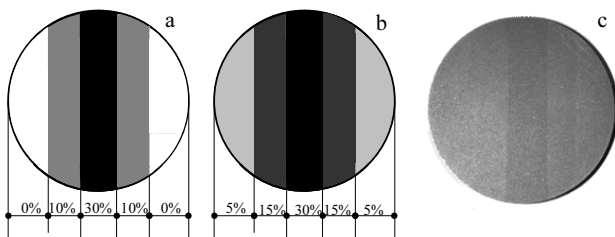
图 6 年轮状 B_4C/Al 中子吸收材料结构示意图Fig.6 Schematic diagram of ring-shaped B_4C/Al neutron absorbing material^[42]

图 7 为层片状 B_4C/Al 中子吸收材料, 该结构的 B_4C/Al 中子吸收材料在挤压板坯的过程中, 需要不同的 B_4C 颗粒含量层平行于挤压模具的出口^[43]。在经过挤压、轧制后也可获得优异力学性能的 B_4C/Al 中子吸收材料, 抗拉强度可达 260 MPa。因此, 通过改变材料内部结构, 可提高中子吸收材料的塑性成形性能。

图 7 层片状 B_4C/Al 中子吸收材料结构示意图Fig.7 Schematic diagram of laminated B_4C/Al neutron absorbing material^[43]

5 结 语

随着核防护用中子吸收材料的发展, 提高中子吸收材料在高温环境下的服役性能, 乏燃料“干式”贮存用耐高温中子吸收材料将成为未来的发展主流。研究设计集结构/功能一体化的屏蔽吸收材料是未来发展的趋势, 如屏蔽中子/ γ 射线双重功能的防护材料的研发、稀土合金以及稀土掺加的中子吸收材料。在产业化应用中核防护用异形构件, 采用激光 3D 打印颗粒增强金属基复合材料具有潜在的应用前景, 例如超声波辅助激光打印颗粒增强金属基复合材料构件, 大尺寸板材制备采用粉末冶金方法是一种较为合适的方法。

参考文献 References

- [1] Zhang P, Li Y L, Wang W W. *Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 437: 350
- [2] Li Y Z, Wang Q Z, Wang W G et al. *Materials Chemistry & Physics*[J], 2015, 154: 107
- [3] Huang Y P, Zhang W J, Liang L et al. *Chemical Engineering Journal*[J], 2013, 220: 143
- [4] Shibata H, Sakamoto K, Ouchi A et al. *Journal of Nuclear Science & Technology*[J], 2015, 52(10): 1313
- [5] Liu Yue(刘越), Qu Guang(屈光). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 2950
- [6] Mohanty R M, Balasubramanian K, Sesadri S K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 498: 42
- [7] Yuan M N, Yang Y Q, Li C et al. *Materials and Design*[J], 2012, 38: 1
- [8] Chen H S, Nie H H, Zhou J et al. *Journal of Nuclear Materials* [J], 2019, 517: 393
- [9] Chen Hongsheng(陈洪胜). *Thesis for Doctorate*(博士学位)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016
- [10] Robino C V, Michael J R, DuPont J N. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2003, 12(2): 206
- [11] Lv Jixin(吕继新), Chen Jianting(陈建廷). *Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 1994, 15(4): 370
- [12] Shin J W, Lee J W, Yu S et al. *Thermochimica Acta*[J], 2014, 585: 5
- [13] Zhang Qirong(张启戎), Tang Changliang(唐常良), Chen Xiaoyuan(陈晓媛) et al. *Chemical Engineer*(化学工程师)[J], 2009, 168(9): 67
- [14] Dokhale P A, Bhoraskar V N, Vijayaraghavan P R. *Materials Science & Engineering B*[J], 1998, 57(1): 1
- [15] Li Kunfeng(李坤锋), Wang Zifan(王子凡), Liu Chunyu(刘春雨) et al. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐通报)[J], 2020, 39(2): 552
- [16] Joaching B, Lothar S, Karl W. *Foreign Nuclear Power*(国外核动力)[J], 1999, 3: 30
- [17] Liu Changsheng(刘常升), Cui Hongwen(崔虹雯), Chen Suiyuan(陈岁元) et al. *Journal of Northeastern University*(东北大学学报)[J], 2004, 25(3): 247
- [18] Kurban M, Erb U, Aust K. *Scripta Materialia*[J], 2006, 54(6): 1053
- [19] Koganti R, Joaquin A, Kretschmar T. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*[J], 2010, 4: 509
- [20] Östlund R, Oldenburg M, Häggblad H Å et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(3): 592
- [21] Abenojar J, Martínez M A, Velasco F. *Journal of Alloys and*

- Compounds*[J], 2006, 422(1-2): 67
- [22] Li Gang(李刚), Jian Min(简敏), Wang Meiling(王美玲) *et al. Materials Review A(材料导报 A)*[J], 2011, 25: 110
- [23] Ruan Qing, Jia Yuzhen, Zheng Jiyun *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(6): 1777
- [24] Li Y Z, Wang Q Z, Wang W G *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2015, 154: 107
- [25] Pang X X, Xian Y J, Wang W *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 768: 476
- [26] Pang Xiaoxuan, Xian Yajiang, Luo Hao *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(10): 3102
- [27] Chen H S, Wang W X, Nie H H *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 730: 342
- [28] Ji Shun(吉顺), Wu Qingjie(吴庆捷), Yang Hong(闫洪) *et al. Forging and Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2018, 43: 132
- [29] Cao Leigang(曹雷刚), Wang Xiaohe(王晓荷), Cui Yan(崔岩) *et al. Materials China(中国材料进展)*[J], 2020, 39(2): 156
- [30] Tan Xiaofen, Zeng Fanhao, Wang Shuqiu *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(7): 2359
- [31] Gao Wenli(高文理), Su Hai(苏海), Zhang Hui(张辉). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2010, 20(1): 49
- [32] Li X P, Xu Z. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2006, 16: 1362
- [33] Xue Wei, Jiang Longtao, Zhang Bin *et al. Materials Characterization*[J], 2020, 163: 110 305
- [34] Zan Y N, Zhang Q, Zhou Y T *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2019, 526: 151 788
- [35] Chen Hongsheng(陈洪胜), Wang Wenxian(王文先), Nie Huihui(聂慧慧) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(2): 392
- [36] Kalaiselvan K, Murugan N. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23: 616
- [37] Chen X G, Silva M D, Gougeon P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 518: 174
- [38] Yan J C, Xu Z W, Shi L *et al. Materials & Design*[J], 2011, 32(1): 343
- [39] Huang Z Y, Du H Q, Liu L *et al. Ultrasonics Sonochemistry* [J], 2018, 43: 101
- [40] Xu Z G, Jiang L T, Zhang Q *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 775: 714
- [41] Jiang L T, Xu Z G, Fei Y K *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2019, 168: 183
- [42] Chen H S, Wang W X, Nie H H *et al. Vacuum*[J], 2017, 143: 363
- [43] Chen H S, Nie H H, Wang W X *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 806: 1445

Research Progress and Development of Neutron-Absorbing Materials for Nuclear Shielding

Chen Hongsheng^{1,2}, Wang Wenxian^{1,2}, Nie Huihui¹, Li Yuli³, Liu Ruifeng¹, Liu Run'ai¹, Yang Tao¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-Based Materials, Taiyuan 030024, China)

(3. Western Energy Material Technologies Co., Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: Cadmium (Cd), boron (B) and some rare elements possess a large thermal neutron absorption cross section, which have a wide application prospect in the field of nuclear shielding neutron absorption. In the present paper, the types of neutron-absorbing materials currently used for wet storage of spent fuel in nuclear power plants were summarized and the advantages and disadvantages of these materials were discussed. The research progress of B₄C/Al neutron absorbing material, and the merits and demerits of different preparation methods were presented. Besides, the connecting methods of neutron absorbing material were introduced, especially the advantages of friction stir welding and diffusion welding in fabricating metal matrix composites with high particle contents. Composition and structure design of neutron absorbing materials were analyzed, and future nuclear shielding neutron absorption material was prospected.

Key words: neutron absorption; B₄C aluminium matrix composite; shielding material; joining methods

Corresponding author: Chen Hongsheng, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-431-6010076, E-mail: chen hongsheng@tyut.edu.cn