

关于B10在核电的运用

杜晓娟 冯文凤 梁镇镇 胡丹华 刘晓晓
多氟多新材料股份有限公司 河南 焦作 454191

摘要: B10 (硼-10) 作为硼的稳定同位素, 凭借优异核物理特性成核工业关键材料。其热中子吸收截面大, 中子吸收反应高效稳定, 产物无害。在核反应堆中, B10用于反应性控制, 如可溶性硼酸调节、作可燃毒物及控制棒材料; 还用于核辐射屏蔽与安全防护, 涵盖中子屏蔽、乏燃料处理及应急事故处理。另外, 介绍了B10材料的制备与浓缩技术, 包括天然硼提取、浓缩及含硼功能材料制备。

关键词: B10; 硼-10; 中子吸收; 反应性控制; 核反应堆; 可燃毒物

引言: 在核能领域, 有效控制中子数量与活动是保障核反应堆安全稳定运行、做好核辐射防护的核心要点。中子吸收材料在这一过程中扮演着举足轻重的角色。B10作为硼元素的重要稳定同位素, 具备独特且卓越的核物理特性, 在中子吸收方面表现突出。深入研究B10在核电领域的运用, 对于提升核能利用的安全性、稳定性与经济性, 推动核电事业持续发展意义重大。

1 B10 的核物理特性与中子吸收机理

1.1 B10的核物理参数

B10是硼元素的稳定同位素之一, 其核物理参数决定了其优异的中子吸收性能, 是核工业中核心功能材料的关键基础。B10的同位素质量为10.012937u, 天然丰度约为19.8%, 剩余部分主要为另一种稳定同位素B11。其最核心的参数是热中子吸收截面, 可达3840靶恩 (barn), 远高于B11的0.005靶恩, 也远超自然丰度硼的平均吸收截面。B10的核自旋为3+, 磁矩约为1.8006μN, 具有良好的核自旋特性, 便于进行核物理检测与分析^[1]。B10无放射性, 化学性质稳定, 常温下不易与其他物质发生反应, 熔点约为2076℃, 沸点为3927℃, 具备在核反应堆高温、强辐射环境下稳定工作的物理基础, 这些参数共同奠定了其在中子吸收领域的独特优势, 成为核工业中不可或缺的关键同位素。

1.2 中子吸收反应机理

B10的中子吸收反应机理主要基于热中子俘获反应, 其核心反应过程为 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)^7\text{Li}$, 这是一个高效且稳定的核反应。当B10原子核吸收一个低能量的热中子后, 会形成激发态的 $^{11}\text{B}^*$ 复合核, 该复合核半衰期极短, 仅约 10^{-12} 秒, 随后迅速裂变分解为α粒子 (^4He 原子核) 和锂-7 (^7Li) 原子核, 并释放出2.79MeV的能量。该反应主要分为两个分支, 93.7%的反应会生成激发态的 ^7Li , 随后释放0.48MeV的γ光子衰变至基态; 6.3%的反应直接生成基

态 ^7Li 。反应产生的α粒子和锂离子具有高线性能量转移和短射程 (约5-9μm), 不会产生二次放射性污染, 能有效将中子能量转化为无害粒子的动能, 从而实现中子的高效俘获与中和, 这一机理是B10应用于核控制与屏蔽的核心原理。

1.3 B10与其他中子吸收材料的对比

B10相较于其他中子吸收材料, 在性能、安全性和经济性上具有显著优势, 是核工业中应用最广泛的中子吸收材料之一。与镉 (Cd) 相比, B10无放射性, 不会因自身衰变产生放射性污染, 且热中子吸收截面 (3840靶恩) 高于镉的2450靶恩, 吸收效率更优, 同时B10化学稳定性更强, 不易在高温环境下氧化失效。与hafnium (Hf) 相比, B10的制备成本更低, 且密度仅为2.34g/cm³, 远低于铪的13.31g/cm³, 可制备轻量化的中子吸收部件, 降低设备整体重量。与传统屏蔽材料混凝土、铅相比, B10的中子吸收效率是混凝土的500多倍, 且无铅的毒性污染, 也避免了混凝土体积庞大、安装受限的缺陷。B10反应产物无害, 后续处理简单, 相较于其他材料更符合核安全与环保要求, 综合优势突出。

2 B10 在核反应堆反应性控制中的应用

2.1 可溶性硼酸 (H₃BO₃) 控制

可溶性硼酸 (H₃BO₃) 是核反应堆反应性控制中最常用的可溶性中子吸收剂, 其核心功能成分便是B10, 主要应用于压水堆的反应性调节。将富含B10的可溶性硼酸注入反应堆冷却剂中, 通过调节硼酸浓度来控制堆芯中子数量, 进而稳定反应堆功率。当反应堆反应性过高时, 增加硼酸浓度, B10会高效俘获热中子, 抑制核裂变链式反应的强度; 当反应性不足时, 降低硼酸浓度, 减少中子吸收, 维持链式反应稳定。B10的高中子吸收截面确保了低浓度硼酸即可实现有效控制, 富集B10的硼酸还能大幅减少用量, 降低硼酸结晶风险和对冷却系统的腐蚀,

提升反应堆运行的安全性和经济性。这种控制方式具有调节灵活、连续稳定的特点，是反应堆正常运行期间反应性控制的核心手段，广泛应用于各类商用压水堆中^[2]。

2.2 可燃毒物 (Burnable Poison)

B10作为可燃毒物，主要用于核反应堆启动阶段和运行初期的反应性控制，解决堆芯初始过剩反应性过大的问题，同时展平功率分布、降低功率峰值。可燃毒物通常将富含B10的材料（如 B_4C ）均匀分散在燃料元件或石墨基体中，随反应堆运行逐步消耗，其消耗速度与中子注量率密切相关，可通过调整B10含量和分布优化消耗速率。在球床高温气冷堆中，B10可燃毒物主要有均匀填充和颗粒填充两种方式，颗粒填充可通过调整颗粒尺寸优化消耗速度，获得更优的功率分布。与其他可燃毒物相比，B10的中子吸收效率高，消耗过程稳定，反应产物无害，不会产生额外放射性废物，且能与燃料元件协同工作，无需额外复杂的控制设备，是反应堆初始反应性控制的关键材料。

2.3 控制棒材料

控制棒是核反应堆紧急停堆和功率快速调节的核心部件，B10因其优异的中子吸收性能，成为控制棒材料的核心成分之一。控制棒通常以B10富集的硼化物（如 B_4C 、BN）为核心吸收体，与不锈钢、锆合金等结构材料复合制成，兼具高强度和高中子吸收效率。当控制棒插入堆芯时，B10会快速俘获大量中子，迅速抑制核裂变链式反应，实现反应堆紧急停堆；通过调整控制棒插入深度，可精准调节堆芯中子数量，控制反应堆功率输出。与镉、铪材质的控制棒相比，B10基控制棒无放射性，使用寿命更长，且化学稳定性强，能在反应堆高温、强辐射环境下保持结构完整，不易失效。B10基控制棒的制备工艺相对成熟，成本可控，广泛应用于各类核反应堆，是保障反应堆安全运行的关键设备。

3 B10 在核辐射屏蔽与安全防护中的应用

3.1 中子屏蔽材料

B10作为中子屏蔽材料的核心功能成分，凭借其卓越且高效的中子吸收性能，在核相关领域的中子屏蔽防护中占据着举足轻重的地位，广泛应用于核反应堆、核实验室、核医疗等场所。常用的B10基中子屏蔽材料丰富多样，主要有硼聚乙烯、硼carbide、硼玻璃等。它们的工作原理精妙且科学，材料中的B10能够精准俘获热中子，与此同时，依托基体材料（如聚乙烯）里丰富的氢原子，将能量较高的快中子逐步慢化为热中子，构建起“慢化-吸收”双层防护机制。其中，含10%硼的硼聚乙烯材料应用最为广泛，其热中子屏蔽效率高达99%以上。

相较于传统混凝土、石蜡等屏蔽材料，它优势显著，不仅质量轻，便于搬运与安装，成型也极为方便，能满足不同场景的形状需求，而且屏蔽效率高，不会产生二次污染^[3]。B10基屏蔽材料可灵活制成板材、管材、容器等多种形态，用于反应堆舱体、实验室墙体、辐射防护门等部位，切实有效地阻挡中子辐射泄漏，为人员和环境安全筑牢坚实防线，是核辐射防护体系中不可或缺的重要组成部分。

3.2 乏燃料贮存与运输

乏燃料蕴含着大量放射性核素，会持续不断地释放中子和 γ 射线，这使得其贮存与运输过程中的安全防护工作至关重要，而B10在其中发挥着关键的中子屏蔽和临界安全保障作用。在乏燃料贮存容器和运输容器的设计中，通常采用含B10的硼聚乙烯作为屏蔽层。B10能够高效地俘获乏燃料释放的中子，有效防止中子积累引发临界事故，为安全贮存和运输提供坚实保障。同时，聚乙烯基体可慢化快中子，进一步提升屏蔽效果。这类容器中的B10含量通常精准控制在10%左右，既能同步实现中子吸收与 γ 射线辅助屏蔽，又具备诸多优势。它们可一体成型，结构稳固，耐候性强，能在各种恶劣环境下稳定工作，且免维护，使用寿命可达30年以上。另外，B10均匀分布于屏蔽材料中，即便容器局部受损，也不会出现屏蔽失效的情况，能有效防止放射性泄漏，全方位保障乏燃料贮存和运输过程的安全，完全符合核废料管理的可持续要求。

3.3 应急事故处理

在核反应堆应急事故（如堆芯熔毁、中子泄漏）处理过程中，B10凭借其高效的中子吸收能力，成为控制事故扩大、降低辐射危害的关键材料。当核应急事故突发时，可迅速向堆芯注入富含B10的硼酸溶液，或者喷洒B10基粉末。这些物质能快速吸收泄漏的中子，有力抑制核裂变链式反应的持续进行，防止事故进一步恶化，为后续的救援和修复工作争取宝贵时间。在应急防护装备方面，B10基屏蔽材料可制成防护服、防护面罩等，为应急救援人员提供可靠防护，使其免受中子辐射伤害。在核事故后期的去污洗消和环境修复工作中，含B10的吸附材料可发挥重要作用，用于吸附环境中的中子源，有效降低环境辐射剂量。而且，B10具有无放射性、反应产物无害等显著特点，在应急处理中不会产生额外污染，能够紧密配合核应急专业组的处置工作，最大程度控制事故损失，为核应急处理提供有力支持。

4 B10 材料的制备与浓缩技术

4.1 天然硼资源与提取

天然硼资源是B10制备的基础,全球硼矿资源主要分布于太平洋沿岸和地中海沿岸,土耳其、美国、俄罗斯、智利和中国是主要产地,其中土耳其储量占全球73%。中国硼矿储量约2400万t,位列世界第五,主要分布于柴达木盆地、辽吉裂谷带等地区,矿床类型包括盐湖型、沉积变质型、地下卤水型等。天然硼矿的主要矿物有硼镁石、水硼石、硼砂等,提取工艺主要根据矿种特性选择,常用方法有酸浸法、碱熔法和浮选法。酸浸法主要用于处理硼镁矿,通过盐酸、硫酸等酸液溶解矿石,分离杂质后获得硼酸;碱熔法适用于难溶性硼矿,通过高温碱熔使硼转化为可溶性硼酸盐,再经浸出、结晶提纯;浮选法用于分离硼矿与脉石,提高矿石品位。提取后的天然硼中B10丰度约为19.8%,需进一步浓缩才能满足核工业应用需求。

4.2 B10浓缩技术

B10浓缩技术意义重大,其核心在于把天然硼中B10的丰度从原本的19.8%大幅提升到核工业所需的高水平,通常要达到70%以上。目前,成熟且常用的技术主要有低温精馏法、化学交换法和电磁分离法,其中低温精馏法的应用最为广泛。低温精馏法以氟化硼(BF_3)作为工作介质,巧妙利用 B^{10}F_3 与 B^{11}F_3 相对挥发度的差异,在低温精馏塔内开展多次蒸馏分离操作。经过这一系列精细流程,最终能够获得高丰度的B10产品。值得一提的是,中国中核集团在该领域成绩斐然,已成功打通低温精馏法的全套工艺,能够稳定产出丰度70%的B10产品,并且拥有完全自主知识产权。化学交换法借助硼化合物在不同相态中的同位素分馏效应来实现分离,具有能耗低、设备简单的优点,不过分离效率相对较低。电磁分离法则是利用同位素质量差异进行分离,可获取高丰度B10,但能耗高、成本高,一般仅用于有特殊需求的场景。

4.3 含硼功能材料制备

含硼功能材料的制备堪称B10应用的关键核心环节。由于不同应用场景对材料性能要求差异显著,所以需要

依据具体需求,将浓缩后的B10与其他适配材料进行复合,精心打造出具备特定性能的功能材料。目前,常用的制备工艺丰富多样,主要有粉末冶金法、烧结法、聚合反应法等。粉末冶金法在制备B10基陶瓷材料(如 B_4C)方面表现出色。操作时,先把B10粉末与粘结剂充分混合,接着压制成型,随后进行高温烧结,最终获得高强度、高中子吸收效率的陶瓷部件,这类部件常用于控制棒和屏蔽材料^[4]。烧结法则专注于硼聚乙烯复合材料的制备,将B10粉末与聚乙烯颗粒混合后,经高温烧结成型,并且能够根据实际需求灵活调整B10含量,以满足中子屏蔽的不同要求。聚合反应法可制备硼嗪基聚合物材料,借助硼嗪的特殊结构,巧妙地将B10引入聚合物骨架,制成具有优异热稳定性和中子吸收性能的材料,广泛应用于核反应堆密封件、防护涂层等领域,有力地满足了不同核工业场景的功能需求。

结束语

B10凭借自身独特的核物理特性,在核电领域展现出多方面的重要应用价值。从核反应堆的反应性控制,到核辐射屏蔽与安全防护,再到相关材料的制备,B10都发挥着不可替代的作用。随着核电技术的不断进步,对B10的研究与应用也将持续深入,进一步优化其制备与浓缩技术,开发更多高性能含硼功能材料,将为核电事业的安全高效发展提供更有力的支撑。

参考文献

- [1]刘臻,王澄瀚.秦山第二核电厂反应堆冷却剂中 ^{10}B 丰度对反应堆监督的影响分析[J].中国核电,2022,15(2): 204-208.
- [2]孙世栋,占路遥.核电站一回路 ^{10}B 丰度测量方法优化[J].中国科技信息,2023(11): 80-82.
- [3]苏兴.压水堆核电厂一回路 ^{10}B 丰度调节方法研究[J].广东化工,2024,51(15):26-28.
- [4]费罗杰.漳州能源富集 ^{10}B 应用的可行性分析[J].中国核电,2022,15(6): 888-892.