

# 中子屏蔽材料防护层设计

葛 锋<sup>1,2</sup>, 王春光<sup>2</sup>, 张玉碧<sup>2</sup>

1. 西南大学材料科学与工程学院, 重庆 400715

2. 重庆材料研究院国家仪表功能材料工程技术研究中心, 重庆 400707

**摘 要** 随着中子核技术的迅速发展, 辐射屏蔽材料在越来越多的领域得到了广泛的应用, 对辐射屏蔽材料的性能要求也越来越高, 传统的辐射屏蔽材料很难满足应用要求。根据中子屏蔽原理, 针对现有的辐射屏蔽材料的不足, 对其存在的主要问题进行了探讨, 并提出了新型辐射屏蔽材料防护层设计。

**关键词** 中子;  $\gamma$  射线; 辐射屏蔽材料; 工艺设计; 实施方案

中图分类号 TG174.44

文献标识码 A

文章编号 1674-6708(2013)96-0193-02

## The Design of Neutron Shielding Material Protective Layer

GE Feng<sup>1,2</sup>, WANG Chunguang<sup>2</sup>, ZHANG Yubi<sup>2</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. National Instrument Engineering Technology Research Center for Functional Materials, Chongqing Materials Research Institute, Chongqing 400707, China

**Abstract** With the rapid development of the neutron nuclear technology, radiation shielding material has been widely used in more and more areas. Requirements for radiation shielding material have become more sophisticated and traditional radiation shielding material is difficult to satisfy the application requirements. In this paper, we discussed the main problems of the existing radiation shielding materials and put forward a new type of protective layer designing for radiation shielding material based on the principle of neutron shielding and the deficiencies of the existing radiation shielding material.

**Keywords** neutrons; gamma rays; radiation shielding materials; process design; implementation plans

### 0 引言

近年来, 原子能工业、放射医学和国防科研有了迅速的发展, 在中子领域的研究(包括实验研究和应用研究)也同样得到了极大的开展, 同时, 有关的技术和研究成果在许多产业已经投入使用并且取得不错成绩<sup>[1-3]</sup>。中子本身呈电中性, 与物质原子核直接发生作用, 不与物质核外电子发生作用。中子穿透能力很强, 和质量、能量相同的带电粒子相比, 中子强得多, 因此, 和同样剂量的  $\gamma$  射线、 $\chi$  射线相比, 中子对人体产生的危害严重得多。为了让中子技术更好地服务人类, 对中子进行有效的屏蔽的必不可少的。所以, 研究并开发新型的、综合性能更好的中子屏蔽材料是非常必要的; 研究实用、高效、安全的中子屏蔽材料方案也是必需的。选择合适的屏蔽材料, 制定合理的方案可以减小屏蔽的经济成本和屏蔽体的体积和重量。因此, 对各种新型辐射屏蔽材料的研究便成为一项十分重要和迫切的课题。鉴于此, 笔者提出了新型辐射屏蔽材料防护层设计。

### 1 中子辐射屏蔽原理

中子分为四大类<sup>[4]</sup>, 根据其能量高低分别是高能中子( $> 10\text{MeV}$ )、快中子( $100\text{keV}-10\text{MeV}$ )、中能中子( $1\text{keV}-100\text{keV}$ )以及慢中子( $0\text{eV}-1\text{keV}$ )。事实上, 中子辐射屏蔽的原理是将能量在  $0\text{eV}-1\text{keV}$  的慢中子吸收, 将能量在  $1\text{keV}$  以上的中能中子、快中子以及高能中子减速。

### 2 中子辐射屏蔽材料

重元素保护层的作用是屏蔽入射的  $\gamma$  射线, 减速快中子, 从而达到屏蔽因吸收、减速中子时产生的二次  $\gamma$  射线; 轻元素吸收层的作用是吸收慢中子。吸收、减速中子时会产生二次  $\gamma$  射线, 而  $\gamma$  射线又能辐射、损伤高分子材料, 所以, 为了能够对中子和  $\gamma$  射线同时屏蔽、吸收, 材料结构设计就应该包括重元素保护层和轻元素吸收层。

通常来说, 对快中子屏蔽的方法是开头用铁、铅等重核素进行非弹性散射, 把中子能量慢化到  $1\text{MeV}$  以下, 然后用氢等轻核素进行弹性散射使其进一步慢化, 接下来用吸收截面大的核素吸收其剩余能量。

中子散射截面随元素种类和中子能量的变化不简单, 其中原子序数小的元素经弹性散射以达到中子能量大幅度减小的效果, 因为原子序数小的元素很容易进行类似辐射俘获反应的吸收反应, 特别是那些含有大量氢的物质, 如聚丙烯、硼、石蜡和聚乙烯, 中子屏蔽效果更好, 成为了优秀的中子屏蔽材料。它们反应截面较大, 能够使中子的能量迅速降至  $1\text{MeV}$  以下<sup>[4]</sup>。

铁之所以能普遍作为屏蔽材料<sup>[5]</sup>, 是因为铁具有密度大, 力学强度高优良性能, 但其俘获热中子后将放出大量  $10\text{MeV}$  以下的二次  $\gamma$  射线, 从严格意义上来说, 不能作为优良的中子屏蔽材料; 和铁相比, 不锈钢屏蔽中子和  $\gamma$  射线的性能要更好, 同时, 由于不锈钢的非弹性散射截面大, 其屏蔽快中子比铁更明显, 不可避免的是, 受中子辐照后, 锰、镍、铬等元素在不锈钢中要活化, 限制使用人员必须远离停堆后的反应堆。硼钢是中子吸收材料<sup>[4-7]</sup>, 是在铁中加入了硼, 这样能增强对热中子的屏蔽效果, 但往往因为硼含量的不足, 未能达到理想的中子吸收效果, 以至于不得不增加硼钢的厚度, 但这样做会导致屏蔽系统的体积和质量的增加, 与此同时, 硼含量的增加还会导致硼钢力学性能<sup>[8-9]</sup>的下降, 如冲击抗力和延展性, 是其成为优秀的结构材料的短板, 大大削弱其在设备运输以及储存燃料方面的应用。

### 3 现有辐射屏蔽材料存在的问题

现有辐射屏蔽材料存在以下问题<sup>[10]</sup>: 难以选择在空间环境应用的基体材料; 制备工艺和方法存在问题, 多存在结构复杂、屏蔽体体积大、质量重等难以普及应用的问题, 力学性能

也有待提高,需要往可用作结构材料方向发展;吸收效果不高,使其综合性能不高;同时,仍有其他性能与屏蔽性能难以共存的问题,对于实际应用存在很大挑战。

#### 4 屏蔽结构设计

由于在屏蔽吸收中子过程中会产生二次射线,所以非常有必要考虑  $\gamma$  射线的影响,基于此,笔者提出材料的第一层设为快中子减速层,第二层设为屏蔽  $\gamma$  射线层,第三层设为热中子吸收层,第四层设为屏蔽  $\gamma$  射线层。

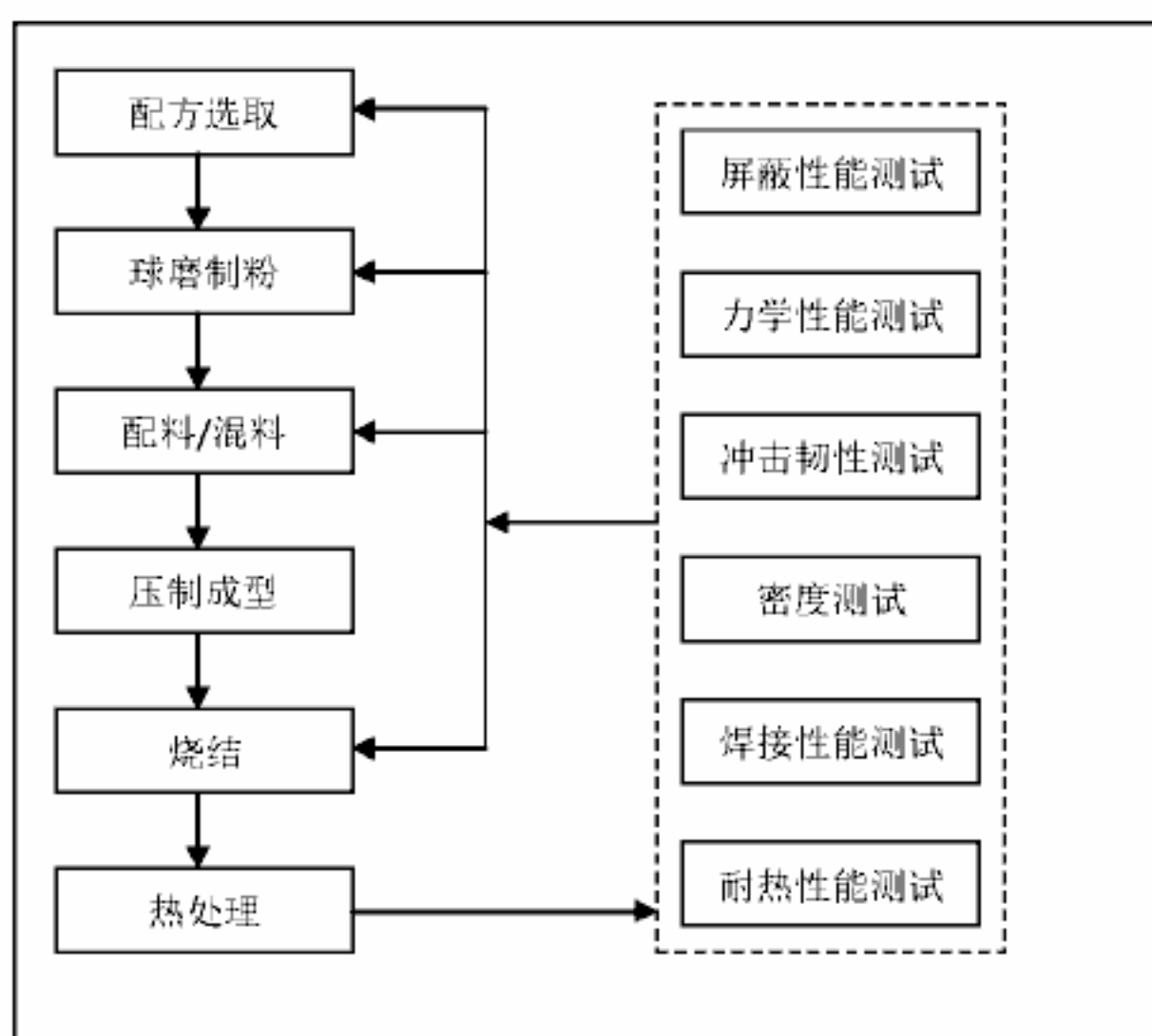
#### 5 实施方案

重元素对于屏蔽  $\gamma$  射线元素特别有效,但是其密度大,轻元素对屏蔽中子射线效果理想,笔者希望开发兼具两类射线屏蔽效果,且密度  $\leq 7\text{g/cm}^3$ ,所以欲利用密度和屏蔽  $\gamma$  射线效果均适中的金属元素作为基体,加入适量的强屏蔽效果元素 W 提高屏蔽  $\gamma$  射线,对应加适中的轻元素材料屏蔽吸收中子,且中和降低材料的密度。

##### 5.1 粉末冶金实施方案

首先确定组成金属基复合材料成分元素 Cu、W、B、C、H、Li,参照二元合金相图,尽可能形成高温相,以增强各类合金元素的结合力,保障其具备一定的机械强度和后续加工性。然后按照射线屏蔽性能要求和密度要求,设计优化配料方案,进行制备金属基复合材料试样。

根据密度要求和屏蔽性能要求,在  $\gamma$  射线为 1.5MeV 时, W 线吸收系数为  $0.929\mu/\text{cm}$ , Cu 线吸收系数为  $0.423\mu/\text{cm}$ ,控制 Cu 和 W 的比例只要小于 63.5,屏蔽  $\gamma$  射线吸收系数将不小于  $0.423\mu/\text{cm}$ ,但其密度较大,为了达到中子屏蔽作用和降低密度要求,而又不降低对  $\gamma$  射线屏蔽性能,需要提高强屏蔽效果 W 的含量,降低 Cu 的含量,加入密度较小的金属 Al、Li,根据机械理想混合方法计算,设计 Cu 含量约为 65%~80%、Al 含量约为 3%~7%、W 含量为 13%~21%、Li 含量为 1%~3%、B4C 含量为 5%~7% 及少量的聚乙烯。

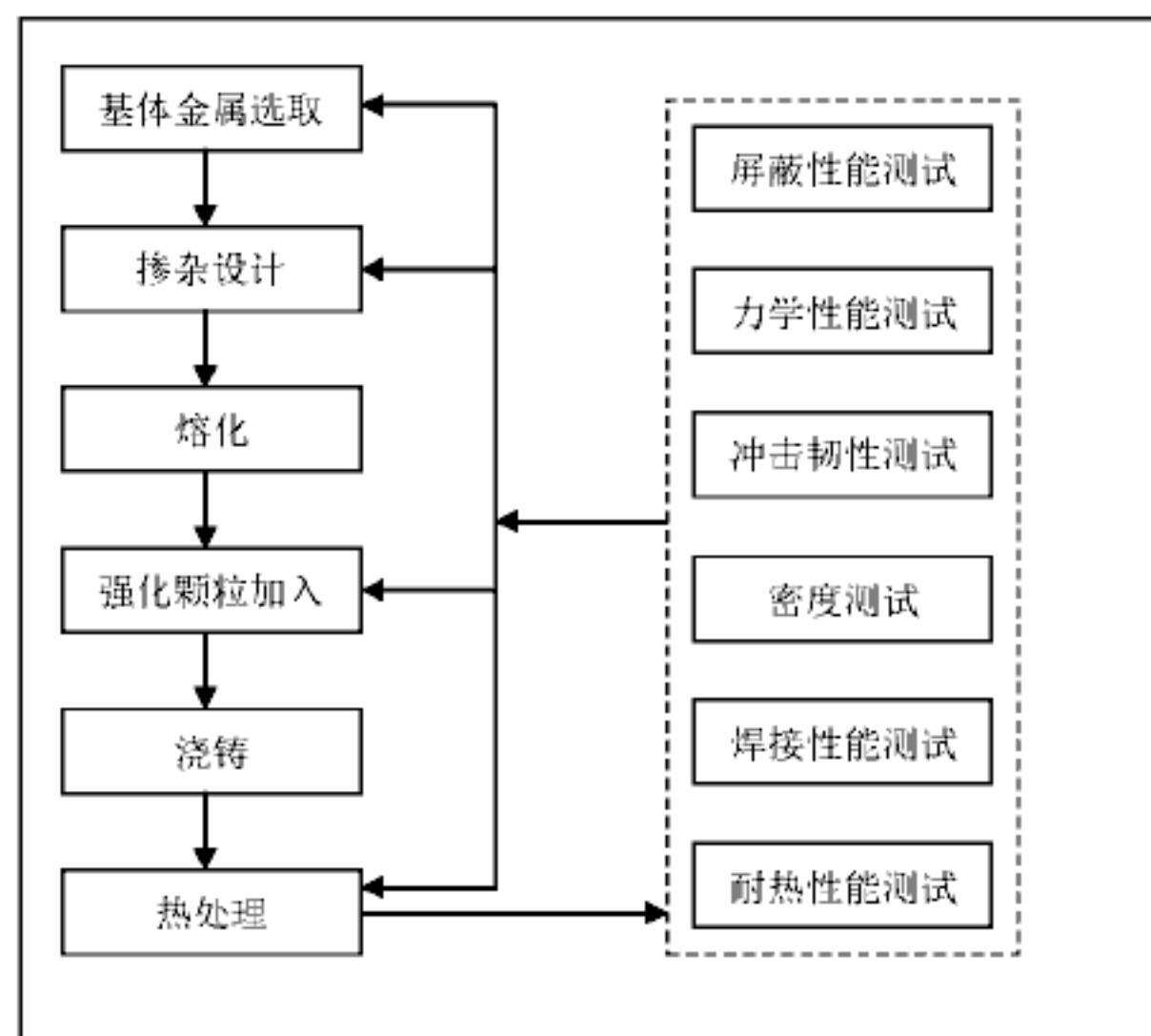


##### 5.2 铸造凝固实施方案

拟采用密度较小的 Al-Si 合金为主要成分,  $\gamma$  射线屏蔽材料选取适量的粉末 W、Cu,中子射线屏蔽材料选取适量 Li、B4C、聚乙烯等,在密度不超过  $7.0\text{g/cm}^3$  情况下,尽可能的提高射线屏蔽元素的含量,同时通过工艺的优化,最终制备出合格的产品。

根据 Al、Si、Li、Cu 两两相互的二元合金相图,在  $300^\circ\text{C}$  以上均有一定的相容性,所以拟在熔融的 Al-Si-Li-Cu (Al

含量约为 20%~30%、Si 含量约为 10%~20%、Cu 含量约为 5%~10%) 熔体中,粉末状 W 含量约为 15%~20%、B4C 含量为 5%~8%、及适量的纤维状聚乙烯, W、Cu、Al 的大量加入既保证了  $\gamma$  射线和中子的屏蔽吸收要求,而 Li、B、C 的加入一方面可以屏蔽吸收中子,另一方面可以降低材料的密度,最终制备出高屏蔽性能材料。



铸造技术工艺路线

#### 参考文献

- [1]何建洪、孙勇、段永华,等.射线与中子辐射屏蔽材料的研究进展[J].材料导报,2011,25(18):347-351.
- [2]徐军、康青、沈志强,等.核防护用水泥基中子屏蔽材料的研究进展[J].材料开发与应用,2011,26(5):92-100.
- [3]李星红.辐射防护基础[M].北京:原子能出版社,1982:28.
- [4]Loria E A, Isaacs H S.Type 304 stainless steel with 0.5% boron for storage of spent nuclear fuel[J].J Metal,1980,11(1):10.
- [5]Acosta P, Jimenez J A, Frommeyer G, et al.Microstructure characterization of an ultrahigh carbon and boron tool steel processed by different routes[J].Mater Sci Eng,1996,A206(2):194.
- [6]Sercombe T B. Sintering of free formed maraging steel with boron additions[J].Mater Sci Eng,2003,A363(3):242.
- [7]Liu C S, He C L, Chen S Y, et al.Effect of boron on spot welding fatigue of coldrolled IF sheet steels[J].J Northeastern University (Natural Science),2000,21(2):187.
- [8]刘常升,等.高硼钢的组织与性能[J].东北大学学报:自然科学版,2004,25(3):247.
- [9]罗伯特S布朗.A级含硼不锈钢[J].国外核动力,1995(6):53.
- [10]刘延坤.一体化电磁屏蔽及辐射防护材料的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005:3.