

含硼钢对慢中子衰减性能的蒙特卡罗模拟

魏强林 杨波 王毅 杨婷 刘义保

(放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 东华理工大学核工程与技术学院 抚州 344000)

摘要 用MCNP4C程序模拟了日本研制的KTA-304含硼钢对0.025 eV、1 eV、1 keV慢中子衰减吸收性能,并与传统的SUS304钢进行对比。在充分考虑生产加工条件及材料的防腐蚀性、热延性等因素下比较得出,硼浓度在1.13%左右的含硼钢具有较好的慢中子吸收能力,可有效降低次级射线效应,在达到辐射防护要求下可减少材料厚度。计算了不同含硼浓度下含硼钢对不同能量慢中子的衰减系数,为中子屏蔽材料的选择提供了合理依据。另外,还考虑了对中子俘获过程中放出射线的防护。

关键词 含硼钢,蒙特卡罗方法,中子屏蔽,衰减系数

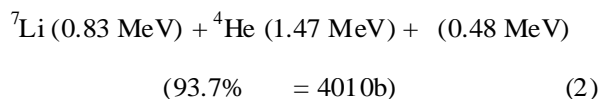
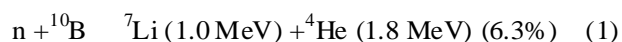
中图分类号 O571.42⁺¹, TL375.7

近年来,随着核电的发展,中子测井、散裂中子源等实验研究与应用研究工作的广泛开展,对中子屏蔽材料的需求量越来越快,国内外广泛开展了新屏蔽材料的研究工作,日本神户制钢所研制的含硼不锈钢板具有较强的热中子吸收能力和良好的力学性能,可进行弯曲加工及焊接,是中子屏蔽的极佳材料^[1],它的推广有助于优化屏蔽结构,减轻屏蔽体重量,缩小屏蔽体体积,在核电工业、核技术应用装置中得到广泛应用^[2]。本文运用蒙特卡罗方法,使用MCNP程序对该种钢材与慢中子的相互作用进行模拟,以确定对慢中子具有极佳吸收性能的含硼钢材料,满足对质地轻、体积小、耐高温等特点的新型核辐射屏蔽材料的迫切要求。

1 中子与物质相互作用机理

1.1 中子与含硼材料的相互作用

研究表明,天然硼包含¹⁰B(18.98%)和¹¹B(81.02%)两种元素^[3],其中¹⁰B(n, γ)⁷Li反应的热中子截面很大(为4010b),与中子发生如下反应:



反应产物⁷Li放出0.48 MeV的射线,但这对大部分中等重量原子或重原子所放出的射线来说是相当软的^[3]。在慢化剂中加入高吸收截面的物质

硼,能减少中子的扩散长度,优化屏蔽材料。

1.2 中子衰减系数

中子慢化吸收符合指数衰减规律,穿过厚度为d的屏蔽材料后的中子数 N_d 为:

$$N_d = N_0 \exp(-\Sigma_d) \quad \Sigma_d = \Sigma_a + \Sigma_s \quad (3)$$

式中, N_0 为未穿过屏蔽层前的中子数; Σ_a 为吸收材料的宏观总截面(cm^{-1}),即中子衰减系数; n 为每立方厘米屏蔽材料中的氢/硼等原子数(cm^{-3}); Σ_s 为微观总截面(10^{-24} cm^2)。

要通过实验手段得到准确的 Σ_d 的值,须有单能中子源,且材料厚度趋于无限薄,这些条件均难实现。更多情况下,中子源是裂变点源,有一定的能谱分布,材料也有一定厚度,由于实验误差的影响,实验测量的衰减系数往往和实际值有差异^[4],而蒙特卡罗方法能很好的解决这些问题。

2 模型建立及模拟

2.1 材料的选择

根据日本研制的KTA-304含硼钢成分中的范围^[1],本文采用含硼钢含11种元素,其中9种的成分(wt%)为:C, 0.045; P, 0.03; Si, 0.75; Cr, 18; Ni, 10; Co, 0.25; Al, 0.3; Mn, 2; S, 0.03;其余为B和Fe。本文研究硼浓度的变化对中子衰减吸收性能的影响,故只改变硼和铁的成分,如表1所示。天然硼又含¹⁰B(18.98%)和¹¹B(81.02%)两种元素,根据式(2)可

教育部科技重点项目(208067)资助,江西省教育厅科技项目(GJJ08310)资助,东华理工大学研究生创新基金(DYCA09003)资助

第一作者:魏强林,男,1984年出生,2008年毕业于兰州大学,现为东华理工大学硕士研究生,专业:核技术及其应用

通讯作者:刘义保

收稿日期:2009-12-21,修回日期:2010-03-11

知, ^{10}B 的热中子截面很大, 可很好吸收大量慢化后的中子。 ^{11}B 也可与中子发生核反应, 但反应截面比 ^{10}B 小得多, 故 ^{10}B 的含量具有很重要的意义, 虽然在实际生产中直接添加天然硼, 但在模拟中我们严格按照天然硼中的比例进行模拟。

表 1 不同浓度的天然硼对应含硼钢中铁的成分
Table 1 The iron component varies with concentration of natural boron in boron-containing steel (%)

B	^{10}B	^{11}B	Fe
0	0.000	0.000	68.545
0.25	0.046	0.204	68.295
1.13	0.209	0.921	67.415
2	0.370	1.630	66.545

2.2 几何模型的建立

模拟使用美国 Los Alamos 国家实验室开发的

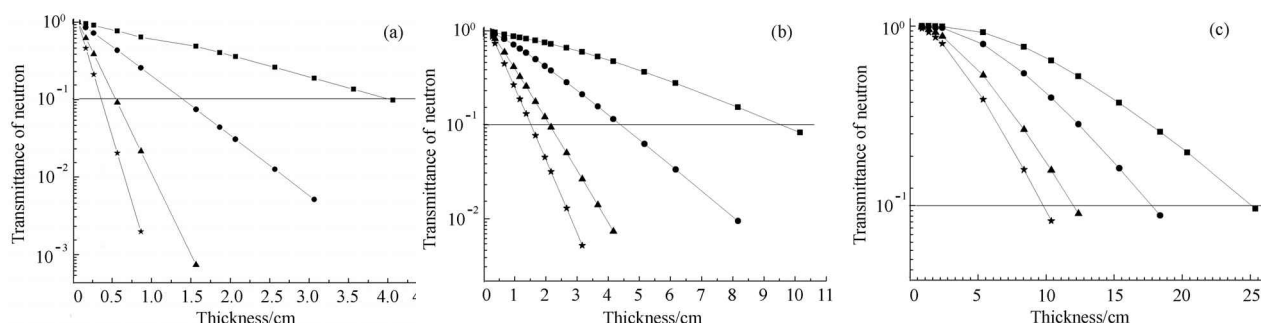


图 1 不同浓度的含硼钢对 0.025 eV(a)、1 eV(b)、1 keV(c)热中子的衰减性能
Fig.1 Attenuation of thermal neutrons at (a) 0.025 eV, (b) 1 eV and (c) 1 keV in steel containing different boron contents. SUS304, KTA-304+0.25B, KTA-304+1.13B, KTA-304+2B

由图 1(a), 硼浓度的变化对 0.025 eV 热中子的吸收效果显著, 将中子衰减 90%, SUS304 需 40 mm 厚, 含硼 1.13% 和 2.0% 的 KTA-304 钢板分别仅需 4.7 mm 和 2.8 mm。这表明在不锈钢中加入一定含量的硼, 可很快俘获吸收热中子, 减少扩散长度, 有助于提高其中子吸收性能。

由图 1(b), 硼浓度的变化对 1 eV 的慢中子的吸收性能效果也很显著, 将中子衰减 90%, SUS304 需 9.34 cm 厚, 含硼 1.13% 与 2.0% 的 KTA-304 钢板仅需 1.93 cm 和 1.35 cm。

如图 1(c), 硼含量对 1 keV 中子的衰减性能还是有很大影响, 将中子衰减 90%, SUS304 需 24.8 cm 厚, 含硼 1.13% 和 2.0% 的 KTA-304 钢板需 11.6 cm 和 9.38 cm。

3.2 含硼钢中子衰减系数的计算

不同浓度硼含量的钢对中子的衰减吸收性能有较大影响, 研制含硼钢时如由实验确定选用何种浓

MCNP 程序, 球体模型的半径为 R , 内为空气空腔, 半径 20 cm, 球心置各向同性点中子源, 中子能量为 0.025、1、1000 eV; 球壳为含硼钢, 厚度为 $(R-20)$ cm, 球外为真空。在外表面使用球面探测器进行计数。

3 模拟结果及分析

3.1 不同硼浓度对含硼钢中子衰减性能的影响

上述三种能量的中子与含硼量为 0.25%、1.13% 和 2.0% 的硼钢 (分别表示为 KTA-304+0.25B、KTA-304+1.13B、KTA-304+2B) 及不含硼的 SUS304 钢的衰减情况如图 1 所示。

度的钢材, 耗材巨大, 周期较长, 且要确定钢材中硼浓度为多少时具有最佳衰减性能^[5,6], 并确定其中子衰减系数, 都有一定困难。由式(3), 中子衰减系数 $\kappa = (\ln N_0 - \ln N_d)/d$, 则其半对数坐标的直线斜率的绝对值即衰减系数。MC 模拟时对初始中子计数 $N_0=1$, 则可简化为 $\kappa = -\ln N_d/d$ 。由图 1 算出三种能量的中子与含硼钢相互作用时的中子衰减系数 (表 2)。

表 2 表明: (1) 厚度 < 10 cm 的相同含硼浓度的硼钢, 慢中子的衰减系数 κ 基本不随厚度发生变化; (2) 中子衰减系数随硼浓度增大, 对于热中子尤为明显, 含 1.13% 硼的 KTA-304 的热中子衰减性能为不含硼的不锈钢板的三倍以上; (3) 含硼浓度过低对中子吸收性能有较大影响, 过量的硼又会析出硼化合物, 导致热延性大大降低^[5], 综合考虑热加工条件、耐热性、防腐性、热延性等特点, 在选择屏蔽材料时可采用含硼浓度在 1.13% 左右的 KTA-304 钢板, 用作慢中子吸收材料。

3.3 对俘获中子产生次级 射线的防护

根据硼与中子反应式可知，硼每俘获一个中子都会放出一个 0.48 MeV 的 射线 ,但这相对于中子与氢作用产生的 射线能量要小得多，我们模拟了产生的 射线，根据模拟结果，在满足中子衰减比为 90%的情况下，出射的 射线衰减比在 10^{-5} - 10^{-6} 量级。所以，对于中子屏蔽而言， 射线是二级剂量的，这是因为在 SUS304 钢加入硼后，放出的射线能量相对较小，用硼钢本身就能对次级 射线起到一定的防护，这也是使用含硼钢屏蔽中子的又一大优越之处。

表 2 三种不同能量的中子与含硼钢相互作用时的中子衰减系数 μ_a 值
Table 2 Attenuation coefficient μ_a of thermal neutrons at different energies in boron-containing steels

中子能量 Neutron energy /eV	硼浓度 Boron content /%	衰减系数 Attenuation coefficient /cm ⁻¹
0.025	0	0.571 ±0.013
	0.25	1.758 ±0.005
	1.13	4.811 ±0.005
	2.0	7.780 ±0.002
1	0	0.240 ±0.008
	0.25	0.582 ±0.008
	1.13	1.234 ±0.009
	2.0	1.756 ±0.010
1000	0	0.091 ±0.007
	0.25	0.135 ±0.009
	1.13	0.207 ±0.010
	2.0	0.262 ±0.011

4 结语

本文研究了含硼钢对慢中子的衰减吸收性能，表明硼浓度的改变对慢中子吸收性能的影响较大，实际屏蔽中可采用硼浓度在 1.13%左右的含硼钢，用于核废料处置和运输的容器等材料吸收慢中子，计算了不同含硼钢中子衰减系数，验证了中子与物质相互作用的指数衰减规律，模拟结果与理论符合较好。

参考文献

1 汲长松. 中子探测试验方法. 北京: 原子能出版社, 1998. 173-174
JI Changsong. Neutron detection methods. Beijing: Atomic Energy Press, 1998. 173-174

2 Bast ūka M, Arztmannb J, Jerlichb W, et al. J Nucl Mater, 2005, 341: 189-200

3 王零森, 方寅初, 吴 芳, 等. 粉末冶金材料科学与工程, 2000, 5(2): 113-120
WANG Lingsen, FANG Yingchu, WU Fang, et al. Powder Metall Mater Sci Eng, 2000, 5(2): 113-120

4 邱 东. 中国工程物理研究院科技年报. 2004, (1): 47
QIU Dong. Annual Report of China Academy of Engineering Physics. 2004, (1): 47

5 于 光. 钢铁研究学报. 1989, (2): 90
YU Guang. J Iron Steel Res, 1989, (2): 90

6 Basturk M, Kardjilov N, Lehmann E, et al. Nucl Sci, 2005, 52: 394-399

M-C simulation of slow neutron attenuation in boron-containing stainless steel

WEI Qianglin YANG Bo WANG Yi YANG Ting LIU Yibao

(Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology, School of Nuclear Engineering and Technology,
East China Institute of Technology, Fuzhou, 344000, China)

Abstract In this paper, boron-containing KTA-304 stainless steel for slow neutron absorption and attenuation is studied by Monte Carlo method, and compared with the traditional SUS304 stainless steel. Taking into account some factors, such as processing conditions, corrosion resistance, hot ductility, etc. we may reasonably come to the conclusion that boron content of about 1.13% in the steel has a better absorption capacity to the slow neutron and can effectively reduce the secondary γ -ray effect, meeting the request of radiation protection with reduced material thickness. Besides, slow neutron attenuation coefficient was calculated at different boron concentrations of the steel in different energies, providing a reasonable basis for selecting the neutron shielding materials. The γ -rays released in the neutron capture process were considered, too.

Key words Boron-containing steel, Monte Carlo method, Neutron shielding, Attenuation coefficient

CLC O571.42⁺1, TL375.7