

钨靶在散裂中子源中的应用

Application of Tungsten Target in Spallation Neutron Sources

供稿|牛曼^{1,2}, 王广达^{1,2}, 史英丽³, 史瑛楠² / NIU Man^{1,2}, WANG Guangda^{1,2}, SHI Yingli³, SHI Yingnan²

内容导读

近年来,随着核聚变、散裂中子源等大科学装置建设和运行,钨作为一种具有优异性能难熔金属材料,其重要性更加显著。本文介绍了世界散裂中子源的发展情况,重点阐述了散裂中子源对于钨靶材的要求及其研发技术。中国散裂中子源用钨靶组件,创新性地通过钽包覆钨和高效散热结构的开发,成功解决了钨靶在高能量粒子辐照产热和冷却水腐蚀的技术难题,保证了散裂中子源设备的正常运行。

中子是研究物质结构和动力学性质的理想探针,中子不带电,穿透力强,具有磁矩,可用它作为探针研究物质的微观结构和运行状态。中子散射技术已在很多基础学科,如凝聚态物理、化学、生物工程、生命科学、材料科学等的研究中被广泛采用。中子源是能够产生中子的装置,是进行中子核反应、中子衍射等中子物理实验的必要设备。反应堆中子源中子通量高,应用最为广泛,但由于反应堆散热技术的限制,使其最大中子通量受到限制^[1-3]。

当快速粒子如高能质子轰击重原子核时,一些中子被“剥离”,或被轰击出来,在核反应中被称为散裂。散裂中子源的出现突破了反应堆中子源中子通量的极限,其特点是在比较小的体积内可产生比较高的中子通量、每个中子能量沉积是反应堆的1/8~1/4、单位体积的中子强度比裂变堆高4~8倍、可用较低功率产生与高通量堆相当或更高的平均中子通量。散裂中子源能提供的中子能谱更加宽广,它可以提供从电子伏特到几百 MeV 宽广能区的中

子,大大地扩展了中子科学研究的范围,拓深了中子科学研究的领域。发达国家正在把建设高性能散裂中子源作为提高科技创新能力的重要措施^[4-6]。

散裂中子源在材料科学上,可以研究储氢材料和电池的反应规律,为复合材料提供更精准的物相鉴定,开发铁电、压电材料和新型磁性材料,通过非表层深度计算机断层扫描(CT)指导材料加工工艺等^[1,4]。

钨是具有高熔点和高热导率的难熔金属材料,其低溅射率、低燃料滞留与低中子活化等优良特性,成为目前核聚变装置中面向等离子体的优选金属材料^[7-9]。钨在核聚变反应堆中的应用,已有较多文献进行了研究和报道^[10-13]。由于钨的优良特性,除在核聚变反应上的应用,在散裂中子源装置中也起到了关键作用。

散裂中子源介绍

近几十年来,散裂中子源装置不断涌现,目前国际上已建成的有4大脉冲散裂中子源:美国橡树

作者单位:1. 安泰科技股份有限公司,北京 100081; 2. 安泰天龙钨钼科技有限公司,北京 100081; 3. 北京安泰中科金属材料有限公司 北京 100094

岭国家实验室的散裂中子源 (SNS)、英国卢瑟福实验室的散裂中子源 (ISIS)、日本散裂中子源 (J-PARC), 和中国散裂中子源 (CSNS) (图 1)。正在建设中的有欧洲散裂中子源 (ESS), 如图 2 所示, 据报道建成后将是世界上最先进的散裂中子源和粒子物理实验室, 具体信息见表 1。

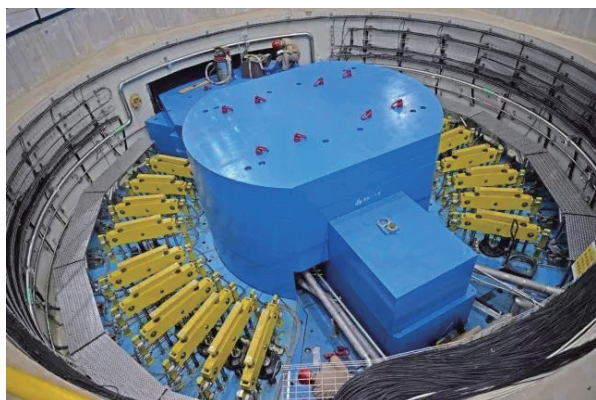


图 1 中国散裂中子源内部

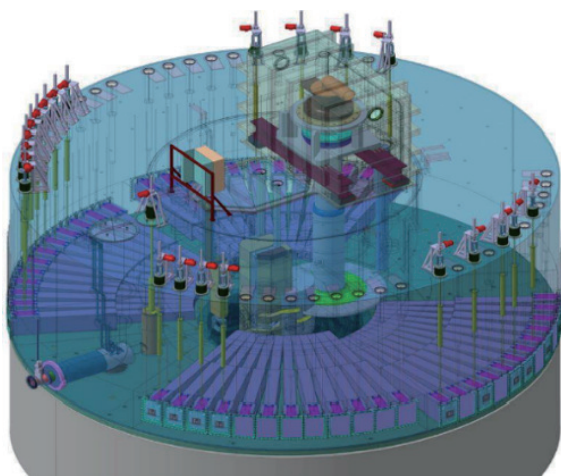


图 2 欧洲散裂中子源结构图

表 1 世界脉冲散裂中子源

国家	名称	功率/MW	建成时间
美国	SNS	2	2006
英国	ISIS	160	1985
日本	J-PARC	1	2008
中国	CSNS	100	2017
欧盟	ESS		在建

从建成一直到 2007 年, 英国 ISIS 是世界上功率最高的散裂中子源。靶材采用金属钨制成, 其脉冲

中子通量已高出通量最高的反应堆近一个量级, ISIS 的第二靶站也已建成运行。SNS 由美国橡树岭国家实验室为主的能源部六大国家实验室携手合建而成, 是以加速器为基础的中子源。日本原子能研究所与高能加速器研究机构合建了强流质子加速器研究联合装置 J-PARC, 其中一台 3 GeV 的快循环同步加速器将提供设计束流功率为 1 MW 的质子束流用于驱动散裂中子源。中国 CSNS 束流功率为 100 kW, 将为国内外科学家提供世界一流的中子科学综合试验装置。

靶站是散裂中子源的核心组成部分, 是将加速器系统输出的高能质子束打靶产生的散裂中子转化为可开展散射实验的中子束的装置。靶站吸收质子并通过散裂过程释放出高能中子, 这个过程会产生高温, 以及携带辐射的同位素副产品, 包裹在靶周围的慢化器用来给生成的中子减速^[14-15]。钨靶是靶站产生中子的核心部件。

散裂中子源对钨的要求

钨具有非常高的熔点、模量、密度、质量数和较高的热导能力。一个动能为 1 GeV 的质子轰击钨靶发生散裂反应时, 能产生出 20 个高能中子, 同时发出 55 MeV (每个中子) 的热量和少量 γ 射线。钨元素在发生散裂反应后转化成的同位素系列均为短寿命的, 几周后即失去放射性^[1,4,6], 这些特点使钨成为最具优势的中子靶材料。国际上的散裂中子源都采用或曾经采用钨来作为靶材料, 如日本高能加速器研究机构和美国的洛斯阿拉莫斯实验室在项目均采用钨靶^[14]。

钨靶是散裂中子源的核心部件, 是产生中子的源头。钨靶的性能决定散裂中子源系统整体的稳定性、可靠性和中子源的效率。它需要满足高功率的运行要求, 兼具升级能力, 能完全满足在散裂中子源装置内高温热循环应力下长期服役的要求。

钨靶在高能质子束轰击下面临三个问题^[14-16]:

- (1) 强辐照环境下的辐照损伤, 使钨性能变差;
- (2) 质子束轰击钨靶产生大量热, 需要对钨靶进行水冷散热, 要求钨具有很好的抗热震性能;
- (3) 钨靶片在水流冲刷条件下会腐蚀开裂, 影响钨靶的寿命。

因此钨靶应满足以下要求：

- (1) 致密度高、各项性能均一、较好的疲劳性能，同时具有极高的抗热震性能等；
- (2) 可以高效移除靶体内产生的热量；
- (3) 钨靶片耐冲刷腐蚀性能好。

中国散裂中子源用钨靶的研发

钨靶制备

中国散裂中子源靶体材料的选择，综合考虑了中子产生效率、密度、导热性能以及其它经济与技

术条件，选用钨作为靶体材料^[16-18]，欧洲散裂中子源也选用了钨作为靶体材料。

为获得高性能钨靶，国内安泰科技创新研发钨板制备工艺，改进致密化工艺和优化变形制度等，研发的钨靶具有稳定的杨氏模量、力学强度等性能，成功应用在中国散裂中子源和欧洲散裂中子源上。从图3钨靶材的显微组织可以看出，通过最新的制备工艺，钨靶材内部晶粒细小而均匀。这种细小均匀的晶粒结构，能显著提升钨靶材的力学性能和抗疲劳性能。

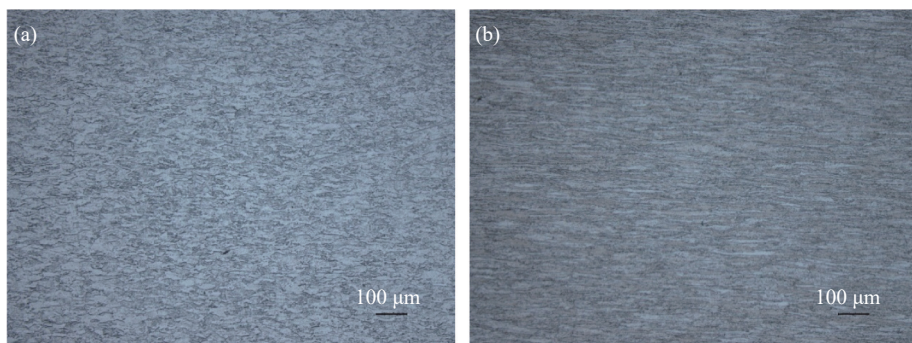


图3 钨靶材的显微组织：(a) 横向；(b) 纵向

靶体插件制备

钨靶在高剂量辐照环境下会被高压冷却水严重腐蚀，影响钨靶的正常使用。难熔金属钽具有

与钨相近的中子学性能以及良好的耐腐蚀性能，因此以钽作为钨靶的包覆层（图4），作为靶体插件材料^[19-20]。

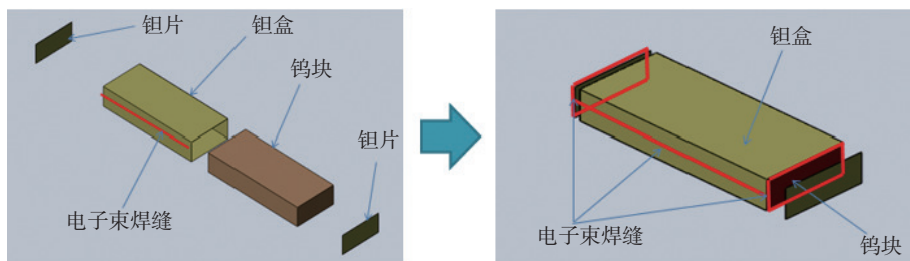


图4 钽包覆钨靶的示意图

为了防止钨块在高速水流冲刷下腐蚀开裂，文献[21]研究了钽包覆保护层的制备方法，利用包套抽真空密封和热等静压扩散焊的新工艺，同时实现了钨与钽以及钽与钽的冶金连接，制备出目前世界上应用于散裂中子源固体靶的厚度0.3 mm的最薄的六面钽包覆层。钨与钽的扩散连接界面没有发现明显的缺陷（图5），同时钽与钽之间已看不出存在明显的界面，可以认为达到了良好的冶金结合。

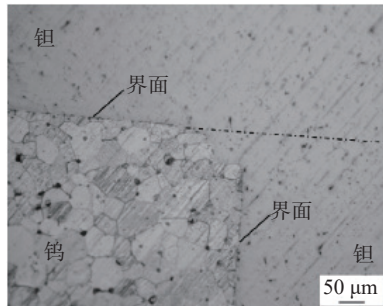


图5 钨与钽结合界面显微组织

散热结构设计

根据中国散裂中子源的物理设计、高斯分布沉积热的散热控制和钨靶插件长期可靠运行等要求,研究靶容器主流道和钨靶块间多通道并行流的稳定性问题、高能中子产额下的靶块分片及其温度控制和热应力问题,为钨靶插件的冷却结构设计提供了理论和试验依据^[17-21]。

通过靶体结构设计和散热模型计算,靶材分成了11片,每片之间的间隙为1.2 mm,采用一出一进的并行水流冷却结构(图6),在100 kW的质子束功率运行状况下,冷却水温升仅为7℃(图7),完全满足CSNS的运行需求。

影像涂层制备

为了实时监控质子束流位置,防止异常束流对靶体的轰击伤害,检测束流打靶位置和束流强度分布,研究了质子影像涂层的粉体配方和喷涂方法及工艺^[22]。该影像涂层涂覆于被轰击的靶体前窗外表面,影像涂层的主要活性成份为 Cr^{3+} 掺杂的 Al_2O_3 粉体,以低功率火焰喷的方式将 Cr^{3+} 掺杂的 Al_2O_3 粉体涂覆到靶体前窗外表面,形成影像涂层,能够准确判断高能等粒子束轰击时靶体的束流及强度分布,

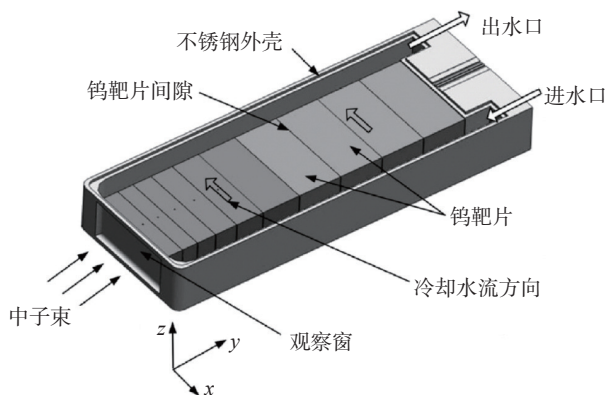


图6 CSNS 钨靶内部结构

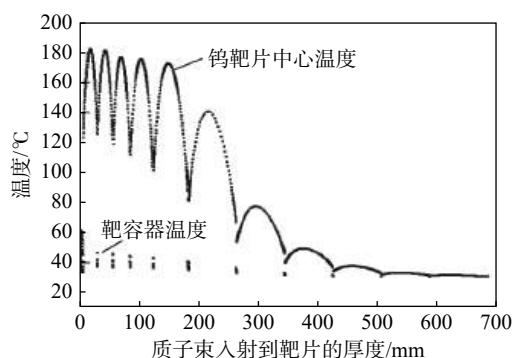


图7 钨靶各位置的温度分布

提升了CSNS的研究能力(图8)。

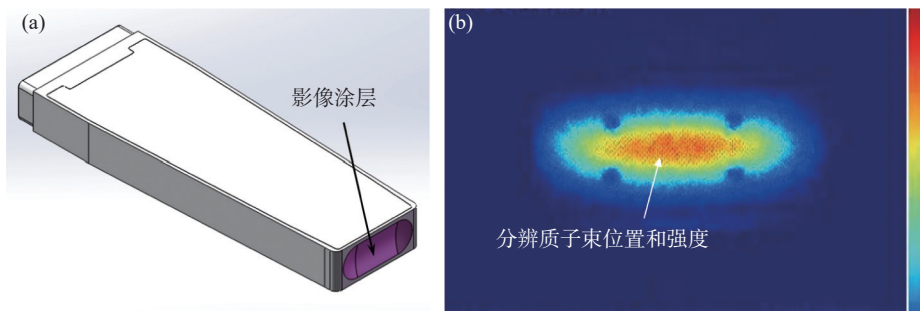


图8 靶材前窗影像涂层设计: (a) 靶体前窗外表面; (b) 高能等粒子束轰击时质子束位置和强度

结束语

散裂中子源的钨靶在脉冲高能质子的轰击下承受变化的瞬时脉冲热应力冲击,同时受到高能粒子的辐照以及高压冷却水对靶材料的冲刷腐蚀等,这些因素都严重影响着靶体的使用寿命,所以高性能钨靶材的研制,钼包覆钨插件及散热结构的设计等创新技术开发,满足了我国首台散裂中子源的运行需求。

我国的中子源的功率目前只有100 kW,升级后可以达到500 kW,国际上运行的中子源功率在MW以上,大功率的中子源对靶材的性能要求更加苛刻。钨靶散热是首要考虑的技术问题,同时功率的增大,钨靶的尺寸随着改变,辐照效应更加明显^[23-24]。这些需求和指标,需要我们继续深入开展超细晶粒尺寸钨制品的制备,提高其韧性和抗辐照能力^[25],同时还可以在固溶强化、弥散强化以及变形强化等新型钨材料的制备技术方面^[26-29]继续深入

研发,提升钨的综合性能,以缓解或消除钨材料的辐照脆化、开裂、腐蚀等问题,满足其长期服役要求。

我国散裂中子源装置的建设与运行,将拓展中子科学在技术创新中的作用,提升我国在材料、化学等领域的基础研究能力。我国作为钨资源的大国,通过不断的技术创新,在难熔金属方面深耕细作,突破各项技术难题,为国家大科学装置和国际同类设备的运行做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 张杰. 中国散裂中子源(CSNS): 多学科应用的大科学平台. *中国科学院院刊*, 2006(5): 415
- [2] 陈延伟. 中国散裂中子源(CSNS). *中国科学院院刊*, 2011, 26(6): 726
- [3] 王芳卫. 中国散裂中子源. *科学*, 2014, 66(4): 16
- [4] 程贺, 张玮, 王芳卫, 等. 中国散裂中子源的多学科应用. *物理*, 2019, 48(11): 701
- [5] 魏少红, 张锐强, 史英丽, 等. 中国散裂中子源靶体研制. *原子能科学技术*, 2019, 53(12): 2441
- [6] 唐靖宇. 白光中子源及其多学科应用. *中国基础科学*, 2020, 22(4): 22
- [7] 刘凤, 罗广南, 李强, 等. 钨在核聚变反应堆中的应用研究. *中国钨业*, 2017, 32(2): 41
- [8] 赵乙楞, 雷鸣, 张旭, 等. 聚变反应堆钨基等离子体材料研究进展. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(9): 3399
- [9] Xu Y, Xie C Y, Qin S G, et al. Preliminary R&D on flat-type W/Cu plasma-facing materials and components for Experimental Advanced Superconducting Tokamak. *Phys Scr*, 2014, T159: Art No. 014008
- [10] Li Q, Qin S G, Wang W J, et al. Manufacturing and testing of W/Cu mono-block small scale mock-up for EAST by HIP and HRP technologies. *Fusion Eng Des*, 2013, 88(9/10): 1808
- [11] Li Q, Chen H, Qi P, et al. Modeling of heat deposition on the W/Cu movable limiter in HT-7. *Fusion Eng Des*, 2010, 85(1): 126
- [12] Luo G N, Li Q, Chen J M, et al. Overview of R&D on Plasma-Facing Materials and Components in China. *Fusion Sci Technol*, 2012, 62(1): 9
- [13] Luo G N, Li Q, Liu M, et al. Coating materials for fusion application in China. *J Nucl Mater*, 2011, 417(1/2/3): 1257
- [14] Kawai M, Kikuchi K, Kurishita H, et al. Fabrication of a tantalum-clad tungsten target for KENS. *J Nucl Mater*, 2001, 296(1/2/3): 312
- [15] Mach J, Johns K, Gorti S, et al. Fatigue analysis of the Spallation Neutron Source 2 MW target design. *Nucl Instrum Meth A*, 2021, 1010: Art No. 165481
- [16] Hao J H, Chen Q, Xu Y C, et al. Target thickness optimization design of a spallation neutron source target cooling system. *Appl Therm Eng*, 2013, 61(2): 641
- [17] 郝俊红, 陈群, 许云超, 等. 散裂中子源靶体散热系统的流场优化设计. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(6): 699
- [18] 郝俊红, 陈群, 陆友莲, 等. 散裂中子源靶体系统的散热设计. *工程热物理学报*, 2013, 34(8): 1515
- [19] 李继红, 冯光, 倪晓晔, 等. 中国散裂中子源关键设备安装技术探讨. *机电工程技术*, 2020, 49(2): 179
- [20] 贾成厂, 周武平. 钨: 熔点最高的稀有金属. *金属世界*, 2012(6): 11
- [21] 魏少红, 纪全, 张锐强, 等. 热等静压对钨基体表面等离子喷涂钨层组织及性能的影响. *材料保护*, 2013, 46(11): 6
- [22] 梁天骄, 纪全, 魏少红, 等. 一种散裂中子源用的粒子束影像涂层及其制备方法: 中国, 201510185400.9. 2018-04-16
- [23] 李天富, 武梅梅, 焦学胜, 等. 中国先进研究堆中子科学平台发展现状及展望. *原子核物理评论*, 2020, 37(3): 364
- [24] 孙凯, 李天富, 陈东风. 中子散射及相关技术的发展与应用. *原子能科学技术*, 2020, 54(S1): 35
- [25] 刘凤, 李强, 王万景, 等. 超细晶/纳米晶钨: 未来聚变堆面向等离子体材料. *材料导报*, 2011, 25(19): 43
- [26] Zhao S X, Liu F, Qin S G, et al. Preliminary results of W fiber reinforced W (W_f/W) composites fabricated with powder metallurgy. *Fusion Sci Technol*, 2013, 64(2): 225
- [27] 朱玲旭, 郭双全, 张宇, 等. 新型钨基面向等离子体材料的研究进展. *材料导报*, 2011, 25(15): 42
- [28] 朱玲旭, 燕青芝, 郎少庭, 等. 钨基面向等离子体材料的研究进展. *中国有色金属学报*, 2012, 22(12): 3522
- [29] 刘豪, 龙海川, 郑鹏飞, 等. 基于弥散强化钨基面向等离子体材料研究进展. *表面技术*, 2022, 51(8): 168

作者简介: 牛曼(1983—), 女, 硕士, 工程师, 长期从事难熔金属在核电、半导体领域的产品 and 市场开发。
通信地址: 北京市海淀区永丰基地永澄北路10号C区;
E-mail: niuman@atmcn.com。