

第一壁钨基材料研究新进展

刘长松

中国科学院固体物理研究所，安徽省合肥市蜀山湖路 350 号，230031

Email: cslu@issp.ac.cn

摘要：钨（W）材料以其高熔点、高导热率、良好的抗中子辐照和抗溅射腐蚀等优异性能，被视为未来核聚变装置中最有前景的面向等离子材料。然而，对于未来中国聚变工程实验堆CFETR，PFM面临苛刻的服役环境（中子辐照 $\sim 50\text{dpa}$ ， $\sim 10^{24}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 低能等离子流， $\sim 20\text{MW}/\text{m}^2$ 稳态热流， $\sim \text{GW}/\text{m}^2$ 瞬态热流），而纯W存在低温脆性、再结晶脆性、辐照脆化、高热熔化及H/He致改性等问题，无法满足未来需求。因此，研究钨材料的辐照损伤与氢氦效应引起性能退化的微观机理以及探索开发新型抗辐照W基第一壁材料变得十分迫切。

本报告主要介绍近年来研究团队在计算模拟和实验研发 W 基第一壁材料的最新进展。在计算模拟方面，**揭示了一种新的钨表面起泡机制**，即在聚变堆中的高通量氢辐照环境下，金属中会积累起高浓度的氢，氢能自发的偏聚形成一种二维片层状的氢团簇，使得不依赖辐照缺陷也能完成氢气泡的初始形核。基于计算得到的氢偏聚结合能，研究人员通过进一步的宏观热力学分析，对聚变环境下金属表面起泡所需的氢等离子体能量以及通量给出了定量的预测，发现预测结果与相关的氢等离子体实验数据高度吻合。此外，针对氢与中子辐照孔洞的相互作用问题，采用多尺度模拟技术，**我们建立了钨中纳米孔洞俘获氢的定量预测模型**，解决了长期以来无法准确描述和预测氢在孔洞中的结构与能量的基本问题。发现氢原子在表面的组态结构以及五个俘获能级，建立了孔洞表面和芯部氢的能量方程，提出了一种普适的物理模型，可定量描述纳米孔洞中氢的构型、占据能级、成核、起泡过程以及热脱附行为，为理解 H 致金属材料损伤提供了寻求已久的关键性信息。

在W-ZrC材料研发方面，基于晶界/相界面调控和纳米结构设计，我们通过对粉体、烧结、热轧等制备工艺进行优化，研制出了若干体系高性能、大尺寸（10~20 公斤/块）的细晶W基材料。其中，W-ZrC材料具有优异的力学性能、高温稳定性、抗热负荷冲击和抗辐照性能，其综合性能先进。**W-ZrC的力学性能：**室温抗弯强度达 2.5GPa、抗拉强度 $>1\text{GPa}$ ，500°C时的抗拉强度 $\sim 580\text{MPa}$ 、伸长率 $\sim 45\%$ ，韧脆转变温度（DBTT） $\sim 100^\circ\text{C}$ ；W-ZrC材料的再结晶开始温度 1400~1500°C，与纯W相比得到了大幅提升。**抗瞬态热冲击性能：**室温抗瞬态热负荷开裂阈值约为 $0.88\text{GW}/\text{m}^2$ ，比纯W提高一倍。**抗等离子刻蚀性能：**抗低能高通量（250eV， $10^{22}\text{atoms}/\text{m}^2\text{s}$ ）等离子刻蚀能力要优于同类W合金材料；**氢同位素滞留：**具有较高的氢扩散系数及较低的氢滞留。**中子辐照性能：**在 600°C和 1dpa中子辐照后，W-ZrC材料和ITER级纯W均发生明显脆化，但W-ZrC合金的抗辐照性能显著优于ITER级纯钨（奥地利Plansee公司）：辐照后W-ZrC在 500°C为塑性（DBTT $\leq 500^\circ\text{C}$ ），而ITER级纯W在 600°C仍为脆性（DBTT $>600^\circ\text{C}$ ）。W-ZrC材料微结构表明：W晶粒平均尺寸 $\sim 1\mu\text{m}$ ，第二相ZrC颗粒的平均尺寸 $\sim 50\text{nm}$ 。纳米ZrC颗粒不仅能够提高W基材料的强度和高温性能，还能与钨中的微量杂质氧形成稳定的化合物，从而减少杂质氧对W的脆化作用，提高材料韧性。此外，ZrC与W基体能够形成共格/半共格界面，具有良好的界面结合力。该研究成果为新型W基合金在CFETR中的可能应用打下了坚实的基础。

关键词：第一壁材料；W-ZrC；纳米孔洞；氢泡；力学性能；抗辐照性能。

基金项目：国家重点研发计划磁约束核聚变能发展研究专项（2015GB112001；2017YFE0302400）和国家自然科学基金（11735015；U1832206）等