

## 中国抗中子辐照钢 CLAM 的研发进展

黄群英，凤麟团队

中国科学院核能安全技术研究所，安徽，合肥，230031

E-mail: [qunying.huang@inest.cas.cn](mailto:qunying.huang@inest.cas.cn)

**摘要：**低活化铁素体/马氏体钢具有中子活化残余放射性水平低、高强度和抗辐照等特性，被认为是聚变堆包层的首选结构材料。中国科学院核能安全技术研究所联合国内外四十余家科研院所和大学研发了具有我国自主知识产权的中国抗中子辐照钢 CLAM。目前，CLAM 钢已经完成了 100 多批次熔炼制备，突破了工业化制备技术，完成了系统化的辐照前后性能评估和加工技术攻关，建立了我国首个抗辐照钢标准，并针对中国 ITER-TBM 材料认证进行了材料数据库建设。本报告将主要针对工业规模 CLAM 钢的制备及其性能评估、高剂量中子辐照损伤机理和行为研究、以及面向未来更高服役条件要求的 CLAM 钢优化（即 ODS-CLAM）和面向复杂部件加工的新技术探索（3D 打印）等方面的最新进展进行介绍。

CLAM 钢的工业规模制备以及性能测试方面，完成了多批次 6 吨级工业规模 CLAM 钢制备，并进行了不同厚度尺寸规格板材的加工。目前已经完成了物理、拉伸、冲击和疲劳等性能的分析，并开展了 2 万小时以上的时效、系列参数下的蠕变和高通量堆及散裂中子源中子辐照等性能测试与分析。相关结果显示，工业规模 CLAM 钢铸锭及不同规格板材的成分和性能稳定，主要力学性能如强度、韧性、冲击达到或部分超过国际同类先进低活化钢（如 Eurofer97 和 F82H）性能。抗中子辐照性能方面，经过十余年的中子辐照及后测试，CLAM 钢获得了大量的中子辐照数据，散裂中子源最高中子辐照剂量已达 21dpa，反应堆内辐照剂量达到 3dpa。通过将大量中子辐照实验数据与模拟计算相结合，开展了中子辐照条件下 CLAM 钢性能演变规律及其机理的研究工作，并通过中子辐照后热处理进一步分析了辐照缺陷在高温回复条件下的演变及其对性能的影响规律。

另外，面向未来的新技术探索，在国家磁约束核聚变能发展研究专项的支持下，基于现有 CLAM 钢中子辐照数据，并结合国际上 RAFM 钢的最新研究进展，同时也为了进一步改善和提高 CLAM 钢在高剂量中子辐照条件下的服役性能，提出了以抗辐照纳米相选择性析出为核心，以高精度、大切变热机械处理为主要实现方式的性能优化思路，并在此基础上开展了纳米氧化物弥散强化 ODS-CLAM 钢的研发工作，以重点解决 ODS-CLAM 钢在优化设计及规模化制备方面的两大技术挑战：一方面，通过氧化物弥散强化方案，显著提高 CLAM 钢的高温强度，其上限使用温度可由目前的~550℃提高至~700℃，从而有效提高核能系统的热效率。另一方面，通过选区激光熔化和多电弧熔丝增材制造技术探索 CLAM 钢及 ODS-CLAM 钢复杂部件的一次性快速成型技术，以验证利用增材制造技术制备反应堆复杂部件的可行性。

**关键词：**抗中子辐照钢；低活化；CLAM；氧化物弥散强化；ODS-CLAM