

磁约束聚变用超导材料研制进展

李建峰^{1,2}, 郭强², 刘建伟², 武博², 史一功², 朱燕敏², 张科², 刘维涛², 秦星², 张凯林², 王瑞龙², 刘向宏², 冯勇², 张平祥^{1,2}

¹西北有色金属研究院, 西安 710016

²西部超导材料科技股份有限公司, 西安 710018

Email: ljf@c-wst.com

摘要: 西部超导材料科技股份有限公司在国际热核聚变实验堆 (ITER) 项目中承担了极向场第 2、3、4、5 号线圈以及矫正场线圈和补偿线圈所需的 NbTi 超导线材生产任务, 占项目所需 NbTi 超导线材总量的 69%, 已经于 2017 年 3 月完成共计约 174 吨 NbTi 超导线材的全部交付任务。同时, 西部超导在 ITER 项目中承担了环向场第 2、3、4 号线圈所需的 Nb₃Sn 超导线材生产任务, 占项目所需 Nb₃Sn 超导线材总量的 6.9%。已经于 2015 年 9 月份完成共计约 35 吨 Nb₃Sn 超导线材的全部交付任务。

在向 ITER 项目供货期间及 ITER 项目之后, 西部超导公司持续开展高临界电流密度, 低损耗内锡法 Nb₃Sn 超导线材, 高性能青铜法 Nb₃Sn 超导线材, 以及高性能 NbTi 超导线材的研制, 并在以上各个研究方向取得了较大的进展。

随着中国聚变工程实验堆 (CFETR) 等项目的陆续启动, 科研院所对高场高临界电流密度 Nb₃Sn 线材的需求更加迫切。西部超导公司在 ITER 项目获得的经验基础之上, 通过优化成分设计, 使热处理后的 Nb₃Sn 超导相占有尽可能高的体积分数, 从而提高股线的载流能力; 研究了热处理成相阶段温度对 Nb₃Sn 超导线材最终性能的影响, 分析不同热处理温度下的微观形貌、相成分和演变规律, 优化出成相阶段最佳的热处理温度。目前, Nb₃Sn 超导线材在 12 T & 4.2 K 下的临界电流密度 J_C 可以达到 2500 A/mm² 以上, 并可实现千米级以上的长线加工。

通过一系列的结构设计和优化, 增加 Cu 隔断使热处理后的 Nb₃Sn 芯丝无法连接成闭合的环, 耦合程度大幅降低, 股线的磁滞损耗 ($\pm 3T$, 4.2K) 降低到 300mJ/cm³ 以下, 较目前 ITER 线材 470mJ/cm³ 的平均值降低 36%。但 Cu 隔断结构同时降低了临界电流密度。因此为了提高芯丝的反应程度, 在线材结构中额外增加 Sn 含量, 提高最外层芯丝的反应程度。最终线材在 12T, 4.2K 下的临界电流 (I_c) 最高达到 320A, 比 ITER 项目的平均水平提高了 20%。

青铜法 Nb₃Sn 超导线材青铜/Nb 复合体变形过程的主要难点在于, 为了提高临界电流需要增加青铜基体中 Sn 的含量, 而过饱和高 Sn 青铜的加工硬化现象非常显著, 不利于青铜法 Nb₃Sn 超导线材的连续加工和获得千米级长线。通过增加青铜中 Sn 含量, 优化线材结构以及优化退火工艺解决了青铜/Nb 复合体加工硬化和同步变形问题, 青铜法 Nb₃Sn 超导线材从几十米提高到 1000 米以上, 临界电流从 230A-250A 水平提高至 310-320A 水平。

此外, 西部超导公司研制的 Cu5Ni 基 NbTi 超导线材 4.22K & 5T 下 J_c 达 2900A/mm², 磁滞损耗 (4.22K, $\pm 3T$) 为 21~23mJ/cm³, 达到国际先进水平。

在 ITER 项目的带动下, 西部超导公司建成了世界先进水平的超导线材生产线, 圆满完成了 ITER 项目线材的交付任务。ITER 项目之后, 西部超导继续开展高场强聚变堆用超导线材的研发和生产。Nb₃Sn 和 NbTi 超导线材高场下性能水平不断提高, 为 CFETR 的研发和建设提供了材料保障。

关键词: 聚变用超导材料; Nb₃Sn 超导线材; NbTi 超导线材; 临界电流密度; 磁滞损耗