

高场 Nb₃Sn 超导线材长线加工技术及热处理成相研究

史一功¹, 武博¹, 郭强¹, 刘建伟¹, 李建峰², 王少林¹, 陈建亚¹, 刘向宏¹, 冯勇¹,
张平祥^{1, 2}

¹西部超导材料科技股份有限公司, 超导材料制备国家工程实验室, 西安 710018

²西北有色金属研究院, 西安, 710016

Email: shiyigong@c-wst.com

摘要: Nb₃Sn 是典型的第II类超导体, 具有 A15 晶体结构, 其超导转变温度 T_C 达到 18.3 K, 具有高的上临界磁场 H_{C2} , 并且在高场下具有较高的临界电流密度, 是制作高场超导磁体的最理想材料之一, 在实用化超导材料中具有重要的地位。欧美国家在 Nb₃Sn 理论研究及工业化生产方面长期处于领先地位, 制备的 Nb₃Sn 超导线材的非铜区临界电流密度 J_C 在 12 T, 4.2 K 条件下最高达到 3000 A/mm² 以上^[1], 批量化制备的应用于大科学工程上的高场 Nb₃Sn 超导线材的 J_C 也达到 2700 A/mm²。在 ITER 项目的支持下, 我国在中等临界电流密度、低磁滞损耗 Nb₃Sn 超导线材研究方面取得较大进展, 实现了线材的批量化生产, 各项性能完全满足 ITER 要求^[2], 掌握了 Nb₃Sn 超导线材批量化制备技术, 并于 2015 年顺利完成了全部线材的交付^[3]。但在高场 Nb₃Sn 超导线材研究方面起步较晚, 与国际领先水平仍有一定差距。随着中国聚变工程实验堆 (CFETR) 等项目的陆续启动, 基于获得更高场强的磁体设计要求, 对高场 Nb₃Sn 线材的需求更加迫切, 同时对线材的性能指标提出了更高要求。

本文介绍了西部超导公司在 ITER 项目获得的经验基础之上, 通过优化线材设计, 提高股线中的 Nb、Sn 含量, 使得热处理后的 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; 研究了线材结构及加工工艺参数对截面变形及拉伸断线的影响, 获得了可实现长线加工的超导线材加工工艺; 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。结果表明: 将 Nb₃Sn 超导线材中的 Nb 含量从 ITER 线材的 25% 提高至 50% 以上, 同时提高线材中的 Sn 含量, 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, 但随着 Nb、Sn 含量得增加, 线材中的 Cu 基体含量降低, 线材加工难度大幅增加; 通过优化芯丝分布、线材结构和加工工艺参数, 芯丝及亚组元变形均匀性明显改善, 断线次数降低, 实现了千米级长线加工; 优化了热处理温度和时间, 热处理后粗大晶粒得到抑制, 获得了均匀细小的 Nb₃Sn 晶粒组织。

关键词: Nb₃Sn; 临界电流密度; 热处理; 粗大晶粒

参考文献

- [1] J. A. Parrell *et al.*, Advances in Nb₃Sn strand for fusion and particle accelerator applications. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2005, 15 (2), 1200.
- [2] P. X. Zhang *et al.*, Fabrication and characterization of internal Sn and bronze-processed Nb₃Sn strands for ITER application. *Supercond. Sci. Technol.*, 2010, 23, 034013
- [3] J. F. Li *et al.*, New Progress of Nb₃Sn Strand Production for ITER in WST, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016, 26 (3), 1.

基金项目: 国家重点研发计划 (217YFE0301401)