

低损耗 NbTi 线材制备技术研究^{*}

郭强^{1,2†}, 王瑞龙^{1,2}, 朱燕敏^{1,2}, 刘建伟^{1,2},
李建峰^{1,2}, 刘向宏^{1,2}, 冯勇^{1,2}, 张平祥^{1,2,3}

1. 西部超导材料科技股份有限公司, 西安 710018;

2. 超导材料制备国家工程实验室超导, 西安 710018;

3. 西北有色金属研究院, 西安 710016

收稿日期: 2019-04-18; 接收日期: 2019-05-22

【摘要】 国内重离子加速器(HIAF)磁体服役在高速脉冲电流下,要求超导磁体用超导线具有较低的损耗,并具有较高的临界电流,针对磁体的设计要求,本文研制了两种新型结构的 NbTi/Cu0.5Mn 超导线,通过两次组装、冷拉拔获得了线径 $\Phi 0.8$ mm、12960 芯和 10800 芯、铜比 2.0、芯丝小于 $5\ \mu\text{m}$ 的高临界电流、低损耗超导线,系统研究了两种新型结构超导线的截面形貌、芯丝形貌、磁滞损耗及不同时效热处理次数超导线的临界电流密度(J_c)和 n 值,最后获得了线材芯丝直径和磁滞损耗的变化关系. 研究表明,两种线材经过二次组装、挤压和冷拉拔后,单个亚组元成型良好,芯丝变形粗细均匀,尺寸大约 $4\ \mu\text{m}$. 随着时效热处理次数由 3 次增加到 5 次,线材芯丝表面有颗粒状的 CuTi 化合物生成,且 5 T、4.2 K 下临界电流密度由 $2295\ \text{A}/\text{mm}^2$ 增加到 $2958\ \text{A}/\text{mm}^2$,不同时效热处理次数的线材 n 值大小介于 30~60 之间,表明芯丝整体变形均匀. 线径 $\Phi 0.8$ mm、12960 芯和 10800 芯线材在 4.2 K、 ± 3 T 下的磁滞损耗分别为 $35.5\ \text{mJ}/\text{cm}^3$ 、 $42.8\ \text{mJ}/\text{cm}^3$,随着线材芯丝直径由 $4.6\ \mu\text{m}$ 减小至 $2.8\ \mu\text{m}$,磁滞损耗由 $42.8\ \text{mJ}/\text{cm}^3$ 降低至 $17.3\ \text{mJ}/\text{cm}^3$. 最后,通过优化工艺后获得了 J_c (5 T、4.2 K) 为 $2958\ \text{A}/\text{mm}^2$, Q_h (4.2 K, ± 3 T) 为 $37.5\ \text{mJ}/\text{cm}^3$ 的千米级 NbTi/Cu0.5Mn 超导长线,并可实现批量化生产.

关键词: NbTi 超导线材, 临界电流密度, 损耗

PACS: 74.70.-b, 07.10.Lw, 74.25.-q, 82.60.Fa

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.02.010

Study on High J_c and Low AC Losses NbTi/Cu0.5Mn Superconducting Wire for HIAF Magnets

GUO Qiang^{1,2†}, WANG Ruilong^{1,2}, ZHU Yanmin^{1,2}, LIU Jianwei^{1,2},
LI Jianfeng^{1,2}, LIU Xianghong^{1,2}, FENG Yong^{1,2}, ZHANG Pingxiang^{1,2,3}

1. Western Superconducting Technologies Co., LTD, Xi'an 710018;

2. National Engineering Laboratory for Superconducting Materials, Xi'an 710018;

3. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016

Received date: 2019-04-18; accepted date: 2019-05-22

【Abstract】 In view of the design requirements of the low losses wires for High Intensity Heavy-Ion Accelerator Facility (HIAF) magnets, the two new types of NbTi/Cu0.5Mn superconducting wires with high critical current

^{*} 陕西省国际科技合作计划项目基金项目(编号:2017KW-022)资助的课题.

[†] guoqiang@c-wst.com

and low losses were developed. The research result shows, the filament of the NbTi/Cu0.5Mn superconducting wire with filaments of 12960 and 10080 have a uniform thickness and a size of about $4\text{ }\mu\text{m}$ which were fabricated by double stacking method. When the aging time increases from 3 to 5, the critical current density increases from 2295 to 2958 A/mm² at 5 T&4.2 K. The 'n' value with different aging times are between 30 and 60 under different magnetic fields. This indicates that the overall deformation of the filaments are uniform. The hysteresis loss of the 12960 and 10800 filaments are 35.5 mJ/cm³ and 42.8 mJ/cm³ at $\pm 3\text{T}\&4.2\text{ K}$ which the wire diameter is $\Phi 0.8\text{ mm}$. Meanwhile, when the diameter of NbTi filament reduces from 4.6 to 2.8 μm , the hysteresis losses reduces from 42.8 to 17.3 J/cm³ at $\pm 3\text{T}\&4.2\text{ K}$. After the process optimization, the NbTi/Cu0.5Mn superconducting wire with the critical current density of 2958A/mm² at 5 T&4.2 K, with the hysteresis of 37.5 J/cm³ at $\pm 3\text{ T}\&4.2\text{ K}$, with the length more than 1000m per piece, was achieved in mass production.

Keywords: NbTi, Critical current density, AC losses

PACS: 74.70.-b, 07.10.Lw, 74.25.-q, 82.60.Fa

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.02.010

Reference method: GUO Qiang, WANG Ruilong, ZHU Yanmin, LIU Jianwei, LI Jianfeng, LIU Xianghong, FENG Yong, ZHANG Pingxiang, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0142 (2019)

1 引言

随着国内重离子加速器项目(HIAF)的启动^[1-2],相应的一系列配套设施陆续处于设计及研发阶段,其中主要的核心器件之一超导磁体对 NbTi 超导线提出了高的要求,由于该磁体服役在高速脉冲电流下,采用常规 NbTi/Cu 超导线绕制的磁体,在交变的磁场下超导线损耗较高,能量损失较大,不但影响磁体的稳定性,而且液氦消耗较多.因此,降低 NbTi 超导线的交流损耗并同时提高临界电流将是研发的重点.交流损耗包括超导线磁滞损耗、基体涡流损耗、自场损耗及其它附加损耗^[3].为了降低 NbTi 超导线的损耗,各国均在损耗理论、超导线结构设计及磁体的设计做了一系列研究.在德国 FAIR 项目配套的 SIS100 和 SIS300 磁体的设计中,要求 NbTi 超导线有较低的损耗,并具有较高的临界电流密度,G. P. Vedernikov 等人^[4,5]采用常温电阻较大的 Cu5Ni 合金基体获得了芯丝 3~4 μm 、铜比 1.8、线径 $\Phi 0.65\text{ mm}$ 的 NbTi 超导线,经过扭绞之后, J_c 在 4.2 K、5 T 下为 2700 A/mm².在国内,随着 HIAF 项目的启动,近代物理研究所对 NbTi 超导线提出了新的要求,因此在不降低其 J_c 的前提下,尽可能去减小超导线的扭绞节距,降低涡流损耗,同时为了保证较小的磁滞损耗,芯丝尽可能细芯化.

本文以新型高电阻材料 Cu0.5Mn 合金为基体,制备了两种新型结构的 NbTi 超导线材,系统分析了两种新型结构超导线的截面形貌、芯丝形貌、磁滞损耗及不同时效热处理次数下的临界电流密度和 n 值.此外,还研究了芯丝直径和磁滞损耗的变化关系.

2 实验方法

两种新型结构的 NbTi 超导线的整个加工过程

均在西部超导材料科技股份有限公司完成,采用两次组装、冷拉伸的方法获得了 12960 芯和 10800 芯、线径 $\Phi 0.8\text{ mm}$ 的超导线.首先将 360 支 NbTi/Cu0.5Mn 单芯棒整齐的排列在无氧铜内,通过热等静压、热挤压和冷加工获得不同规格的复合棒,然后将 36 支和 30 支复合棒分别整齐排列在无氧铜管内进行二次组装,将线材冷拉伸至 $\Phi 0.8\text{ mm}$,在冷拉伸过程中进行不同次数时效热处理,线材扭矩为 9~11 mm,最终将线材在 210~250 $^{\circ}\text{C}$ 进行退火,表 1 为两种超导线的结构设计参数.

表 1 NbTi/Cu0.5Mn 超导线结构设计

设计参数	设计 1	设计 2
线径/mm	$\Phi 0.8$	$\Phi 0.8$
芯丝直径/ μm	4.1	4.4
铜比	2.0	2.0
芯数	12960	10800
S/D	0.165	0.157

样品的截面形貌在金相显微镜上完成,芯丝形貌在 JASTEC6460 扫描电镜上完成.截取 1.5 m 长样品进行 2~5 T、4.22 K 下的临界电流 I_c 测试,临界电流判断标准为 $E = 0.1\text{ }\mu\text{V/cm}$;根据 IEC 61788-13 标准,样品在宁波材料研究所 VSM 上进行磁滞损耗测试,测试磁场为 $\pm 3\text{ T}$.

3 结果与讨论

3.1 线材截面和芯丝形貌分析

两种新型结构 NbTi 超导线的截面形貌如图 1 所示,(a)和(b)分别为线径 0.8 mm、12960 芯截面形貌及单个亚组元形貌,(c)和(d)为线径 0.8 mm、10800 芯截面形貌及单个亚组元形貌,两支复合线经过二次组装冷拉拔后,亚组元整体分布均匀,芯丝变形良好,单个亚组元成型良好,六边形形貌棱角分明,清晰可见.

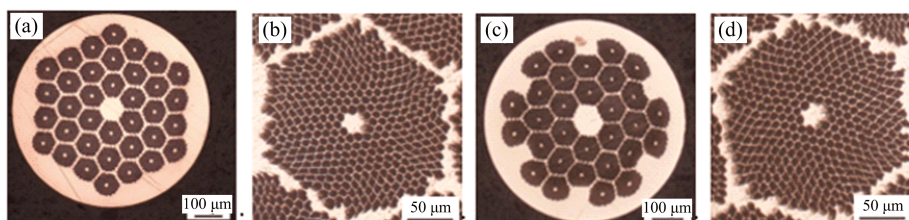


图 1 12960 芯(360×36)、10800 芯(360×36)NbTi/Cu0.5Mn 超导线截面形貌

图2为两种新型结构 NbTi 超导线的不同放大倍数下的芯丝 SEM 照片,(a)、(b)和(c)、(d)分别为 12960 芯、10800 芯线材 2000 倍和 5000 倍下的芯丝形貌. 4 次时效热处理后,线材成型后芯丝表面

整体光滑平整,粗细均匀,无香肠状形貌,芯丝尺寸约 $4\ \mu\text{m}$. 随着时效热处理次数的增加至 5 次,芯丝表面有颗粒状的 CuTi 化合物生成.

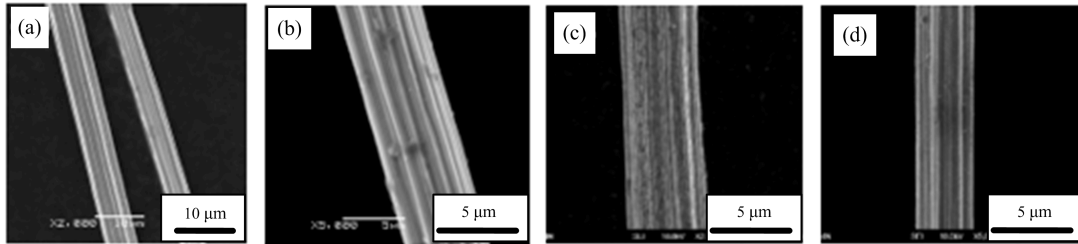


图2 12960 芯、10800 芯 NbTi/Cu0.5Mn 超导线不同放大倍数下芯丝形貌

3.2 不同时效热处理次数线材低温性能分析

图3(a)、(b)和(c)、(d)所示分别为 10800 芯和 12960 芯线材临界电流密度和 n 值与时效热处理次数的变化关系,随时效热处理次数由 3 次增加至 5 次,10800 芯线材 J_c (4.2 K, 5 T) 由 $2295\ \text{A}/\text{mm}^2$ 提高到 $2958\ \text{A}/\text{mm}^2$, 12960 芯线材 J_c (4.2 K, 5 T)

由 $2493\ \text{A}/\text{mm}^2$ 提高到 $2781\ \text{A}/\text{mm}^2$, 当时效热处理次数为 5 次时,两支线材均具有最高的 J_c . 两支线材不同时效热处理次数的 n 值在 5 T 下均介于 30~60 之间,表明两种类型的线材芯丝整体变形良好,芯丝分布均匀.

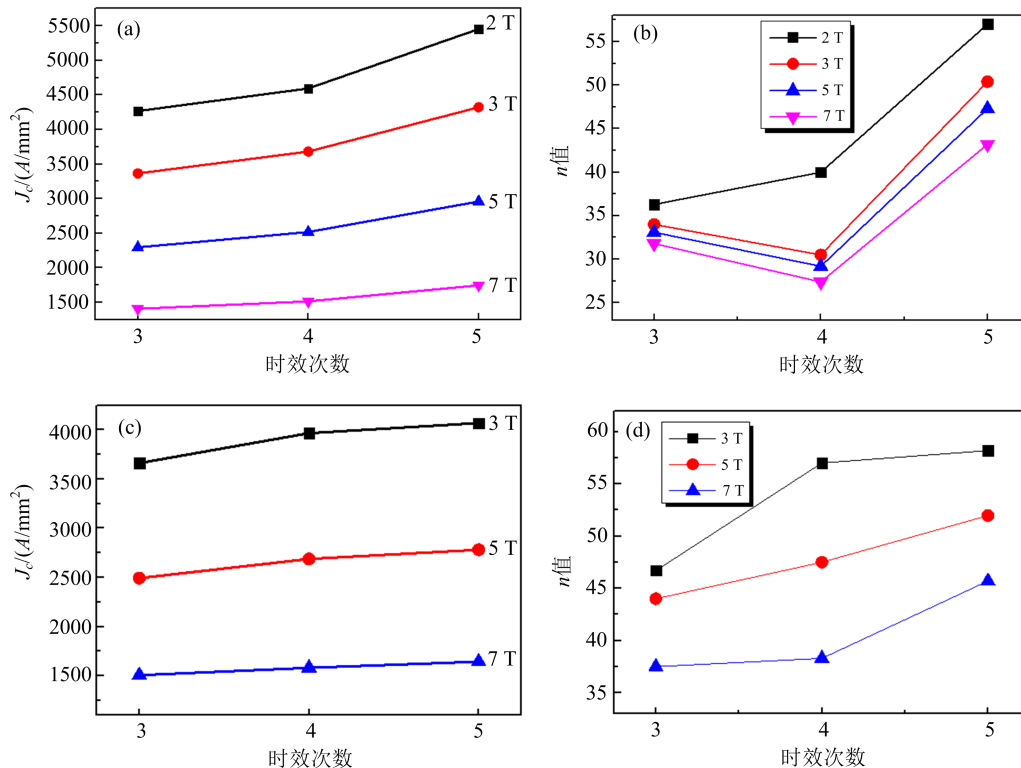


图3 10800 芯、12960 芯 NbTi/Cu0.5Mn 超导线 J_c 和 n 值与时效次数变化关系

3.3 线材磁滞损耗性能分析

图4(a)和(b)分别为 10800 芯和 12960 芯线材在

4.2 K、 $\pm 3\ \text{T}$ 下的 $M-H$ 曲线图,从图可以看出两种新型结构的 Cu0.5Mn 基 NbTi 超导线材在外加磁场

为 3 T 下, $M-H$ 曲线仍没有闭合, 表现出良好的抗磁性. 通过拟合 $M-H$ 曲线面积和理论计算, 获得了两支

线材 ± 3 T 下的磁滞损耗 Q_h . 10800 芯和 12960 芯线材的 Q_h 分别为 42.8 mJ/cm^3 和 35.5 mJ/cm^3 .

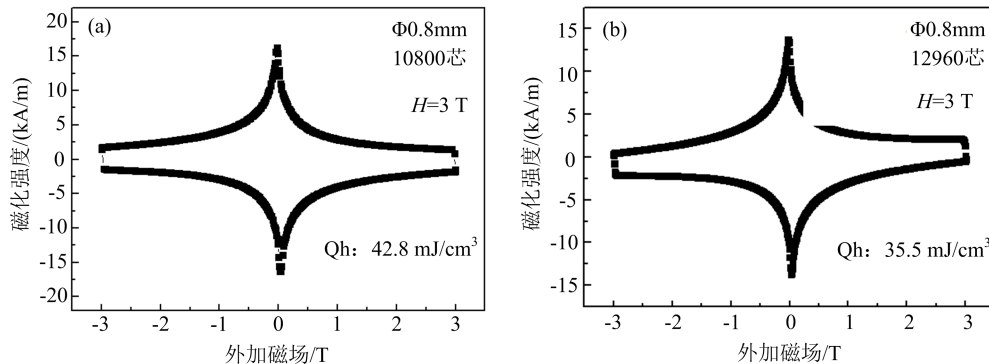


图 4 10800 芯、12960 芯 NbTi/Cu0.5Mn 超导线 $M-H$ 曲线图

将两种新型结构的 Cu0.5Mn 基 NbTi 超导线材拉伸至不同规格, 获得了不同芯丝直径 Cu0.5Mn 基 NbTi 超导线材, 对其进行磁滞损耗测试, 获得了线材芯丝直径和磁滞损耗的变化关系, 如图 5 所示, 随着线材芯丝直径的减小, Q_h 逐渐降低, 当线材芯丝直径由 $4.6 \mu\text{m}$ 减小到 $2.6 \mu\text{m}$ 时, 磁滞损耗由 42.8 mJ/cm^3 降低至 17.3 mJ/cm^3 , 因此, 通过减小线材的芯丝直径, 可有效降低线材的磁滞损耗.

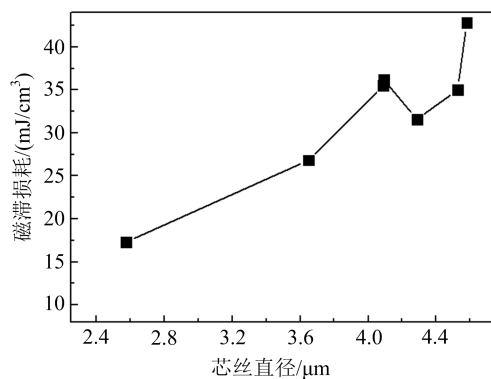


图 5 线材芯丝直径和磁滞损耗的变化关系

4 结 论

本文设计了两种新型结构的 Cu0.5Mn 基 NbTi 超导线材, 获得了千米级 12960 芯和 10800 芯的高临界电流、低损耗超导线材, 研究结果表明, 随着时效热处理次数由 3 次增加到 5 次, 5 T、4.2 K 下临界电流密度由 2295 A/mm^2 增加到 2958 A/mm^2 , 不同时效热处理次数的线材 n 值大小介于 30~60 之间, 表明芯丝整体变形均匀. 线径 $\Phi 0.8 \text{ mm}$ 、12960 芯和 10800 芯线材在 4.2 K、 $\pm 3 \text{ T}$ 下的磁滞损耗分别为 35.5 mJ/cm^3 、 42.8 mJ/cm^3 , 随着线材芯丝直径由 $4.6 \mu\text{m}$ 减小至 $2.6 \mu\text{m}$, 磁滞损耗由 42.8 mJ/cm^3 降低至 17.3 mJ/cm^3 . 通过优化工艺后获得了 J_c (5 T、4.2 K) 为 2958 A/mm^2 , Q_h (4.2 K, $\pm 3 \text{ T}$) 为 37.5 mJ/cm^3 的千米级 NbTi/Cu0.5Mn 超导长线, 并可实现批量化生产.

参 考 文 献

- [1] Y. Chen, L. Ma, H. Yu, et al. *Cryogenics & Superconductivity*, 2015.
- [2] J. C. Yang, J. W. Xia, G. Q. Xiao, et al. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research B*, **317**(2013), 263.
- [3] F. Borgnolutti, B. Auchmann, L. Bottura, et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **22**(2012), 4001604.
- [4] G. P. Vedernikov, A. K. Shikov, L. V. Potanina, et al. *Aip Conference*. American Institute of Physics, (2004), 330.
- [5] L. Potanina, V. Pantsyrny, A. Shikov, et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **20** (2010), 1395.