

# 环境诉讼

王怡昕博士 上海财经大学

2021 年 3 月 11 日



# 内容简介

本书主要是讲。。。。



# 目录

内容简介	i
第一篇 前言	1
第一章 现状 . . . . .	1
第二章 分析 . . . . .	1
索引	9



# 第一篇 前言

本书主要研究环境公诉和私诉两种诉讼类型。。。

## 第一章 现状

现状

## 第二章 分析

分析

选题依据

Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材自从发现以来，已经经历了多代工艺的发展，主要可以分为粉末装管法 (Powder in Tube Process, PIT)、青铜法 (Bronzen Process) 和内锡法 (Internal Tin Process, IT) 等考虑到加工工艺可行性以及载流能力等因素，目前工业商业应用上最为广泛的工艺技术主要为青铜法和 IT 工艺，但对于具有很高磁场和临界载流能力 (通常 4.2K，大于 10T) 的应用场景，比如 ITER 项目，CFETR 项目，高磁场基础科研大装置等，虽然高温超导线材的载流能力在很高磁场需求下可以实现，比如钇系和铋系高温超导线材，但高温线材的工业化制备面临的工艺复杂性、成本和大规模生产等还不能跟低温线材形成竞争局面。因此，面对不同的高磁场需求，目前能够保证其需求的工艺路线基本全部采用内锡法工艺，全球范围内也催生了几条主要的内锡法超导线材制备路线，比如 Ta 单阻隔层内锡法、改进型 Jelly Roll 工艺 (MJR)，分布式 Nb 阻隔层高 J<sub>c</sub> 线材工艺等等。相比之下，单阻隔层内锡设计和分布式阻隔层设计的线材在工业化大批量制备路线上具有很大的优势，其结构线材的易加工性和性能大范围的可调节性，使得这两种技术路线成为了当下高磁场应用最为广泛的选择。目前，采用分布式阻隔层设计线材实现了最高性能，已经达到 3000A/mm<sup>2</sup>(4.2K, 12T, 美国 OST 公司拥有这种最高性能线材的知识产权)。虽然国内对分布式阻隔层 Nb<sub>3</sub>Sn



图 1.1: 哈哈。大概就这些内容了。有其他新的想法了我来给你扔进书里面，可以先看看这些加在书里面后，书的整体的感觉。



超导线材研究和工业化制备也来到了  $2800\text{A}/\text{mm}^2$  (4.2K, 12T) 的水平, 但这种高  $J_c$  线材的长线加工工艺仍不稳定, 其长线的获得仍然是进一步的深入研究探索的主要方向之一。另一方面, 分布式阻隔层设计的  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材仍处于国外技术专利阶段, 为了更好的形成产品竞争力和超导产品选择, 对于专利技术的突破已经迫在眉睫, 如何突破分布式阻隔层设计, 且同时获得具有较高载流能力的新型  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  结构线材, 已经成为了未来超导产品开发必须回答和选择的必经之路。因此, 设计新型高  $J_c$   $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材, 不仅可以更加深刻的认识到高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材的关键设计参数, 为进一步提高超导线材性能提供可行的设计思路 and 方案, 使国内在高性能超导线材领域具有更深的技术积累。同时, 新型结构的高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材将具有完全自主研发技术和方案, 进一步提升在超导线材领域的国际竞争力。而对新型结构线材长线加工工艺探究, 可以为不同型号超导线材的长线加工研究提供一定的普适研究方法, 进一步夯实国内在超导线材长线加工工艺方面的技术深度。

研究内容 (研究对象拟解决的关键科学问题研究目标)2000 研究对象: 新型高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材结构设计, 和与新结构对应的长线加工研究。

拟解决的关键科学问题: 1 新结构  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材的高性能来源, 获得非分布式阻隔层的高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材。  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  超导线材性能包括承载临界电流  $I_c$ 、电流密度  $J_c$ 、剩余电阻率  $\text{RRR}$ 、磁滞损耗  $Q_h$  和  $n$  值等, 这些参数主要跟线材中元素原子比例、元素间距、线材热处理制度、线材尺寸等相关, 因此要获得高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材就需要从这些参数方面出发。本项目新结构  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材研究的主要出发点在元素比例、元素间距和热处理制度等方面, 主要从这三个方面来实现新结构的设计。需要注意的是, 同一种结构线材在不同线径下晶粒特征在热处理后会有所区别, 本项目暂不考虑与线径的关系, 新结构设计时采用相同线径。因此, 本项目研究性能相关的拟解决的关键科学问题有: 1) 不同原子比例的  $\text{Cu}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Sn}$  等元素对热处理生成  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  晶粒结构的影响, 比如  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  晶粒的大小和分布等, 并获得特定新型高性能  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  结构线材与元素比例的关系。  $\text{Cu-Sn}$ 、 $\text{Nb-Sn}$  等元素原子比与最终热处理后的  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材性能紧密相关, 在不同的原子比下会形成多种复杂的合金结构, 这些复杂的结构会改变元素的扩散效率, 从而影响最终  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  的生成。另外, 高  $J_c$   $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材的研究结果表明,  $\text{Sn}$  不足导致没有的  $\text{Sn}$  来生成  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Sn}$  过量则可能导致过多的  $\text{Sn}$  生成其它合金相从而降低  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  线材的整体性能, 而  $\text{Nb}$  的量直接决定了生成  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  晶粒量的多

少, Cu 不足可能导致 Nb<sub>3</sub>Sn 大晶粒过多或者 Sn 元素扩散通道变窄, Cu 的过量则可能会消耗更多的 Sn 而间接导致 Nb<sub>3</sub>Sn 生成量减少等等。因此, 新结构线材需合理选择元素比例, 尽量获得具有类似高性能线材的 Nb<sub>3</sub>Sn 晶粒特征, 比如分布式阻隔层结构高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 线材的晶粒大小和分布, 以此来保证新结构线材的性能。2) 不同 Cu、Nb、Sn 等元素的相对间距对 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材性能的影响。在不同热处理阶段 Cu、Nb、Sn 等元素的扩散速度会有所不同, 元素间距的不同会形成不同的元素扩散梯度, 从而在不同位置形成不同的元素原子比, 影响元素间最终能够形成合金结构。因此, 元素间距的合理选择可能会影响 Nb<sub>3</sub>Sn 线材热处理时的各个阶段, 这也是新结构线材设计时必须考虑和解决的问题, 具体包括 Nb 芯丝间距、Nb-Sn 元素间距等。3) 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 线材热处理制度的研究, 以及影响热处理制度的关键参数探究。为了使由纯金属元素以特定结构构成的线材能够在热处理制度下生成具有高载流能力的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导晶粒, 不同结构设计的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材对应着不同的元素原子比、扩散间距等, 其热处理过程也需要根据结构的改变在原有热处理制度上做出调整。而为了能获得更为有效和合理的调整方案, 对影响热处理的关键参数的探究具有更现实和迫切的需要, 比如元素扩散通道的宽度、距离、原子比、晶粒大小和生长、芯丝搭接范围等等, 这些参数研究也是本项目研究的一个重点方向。

## 2 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材长线加工工艺的研究。

目前采用分布式阻隔层结构的高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 线材通过挤压、拉伸等工艺, 使线材加工成型时其内部 Nb 芯丝的尺寸在 1 μm ~ 3 μm 之间, 亚组元尺寸在 50 μm ~ 80 μm 之间 (跟线材直径相关)。这种微米尺度的金属线材极限拉拔加工过程本身具有很大的挑战性, 要获得百米级甚至千米级的 Nb<sub>3</sub>Sn 长线, 根据本单位对高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 线材长线的研究基础, 主要从加工工艺、原材料、结构设计等方面考虑, 这些方面所涉及的具体研究内容包括必须严格、准确地控制线材在各个工艺阶段的加工质量, 控制 Nb 芯丝在长线加工时变形在合理的范围内并且不断芯丝, 以及控制住线材中亚组元在微米级别的变形和完整性等。因此, 对于长线加工工艺的研究, 根据之前的研究部基础, 本项目主要需要解决以下几个问题: 1) 影响长线加工关键工艺研究。主要包括线材拉伸速率、加工率等, 保证加工时线材结构中的各个构成部件能够较协同一致的产生变形。2) 亚组元变形研究。结构设计的不同, 会使加工时线材受力分布产生改变, 这种受力的改变会使亚组元尺度的结构产生不均匀的变形。为了保证亚组元在不均匀受力时内部结构不受到破坏, 合理的结构设计具有一定的研究价值, 主要包括亚组元结构对称

性设计、异型亚组元长线加工变形及可行性、亚组元中 Cu 元素比例控制 (Cu 元素增加可以增加长线可加工性) 等。3) Nb 芯丝变形及芯丝断线研究。本单位的研究发现, 高  $J_c$  Nb<sub>3</sub>Sn 长线获得目前最主要的困难在于控制 Nb 芯丝单根芯丝的断线和变形, 因此在新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 线材中如何控制单根 Nb 芯丝的断线问题和变形问题也将是主要的研究重点。

研究目标: 1 设计新型结构的高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 的超导线材, 获得性能超过 2300A/mm<sup>2</sup>(4.2K, 12T), 且具有自主知识产权的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材, 并获得性能相关的 Nb<sub>3</sub>Sn 线材结构设计的关键设计参数信息。2 研究新型结构 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材的长线加工工艺关键参数信息, 能够制备出线材长度 > 500m 的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材。

研究方案 2000 新型高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材设计研究设计原则: 1) 避免采用分布式阻隔层 Nb<sub>3</sub>Sn 结构。2) Nb<sub>3</sub>Sn 线材中 Nb 元素含量决定线材性能上限, 设计接近高  $J_c$  线材的元素比例。3) 新结构的获得尽量在当前线材加工工艺下能实现。

方案设计关键参数: 1) 阻隔层分布。阻隔层在 Nb<sub>3</sub>Sn 线材中的作用主要在于控制 Cu、Sn 等元素的扩散距离, 以此来保证线材的性能, 新结构中亚组元 Nb 阻隔层形式的结构设计必须避免, 可选的研究方案有: a) 内锡法线材亚组元无阻隔层、复合线单 Ta 阻隔层设计, b) 无阻隔层线材设计, 或者 c) 分布式阻隔层变形结构设计。根据本单位实际情况, 本项目主要集中在 a 方案阻隔层分布形式的新结构设计研究上。2) Nb 与 Sn 原子比。Nb<sub>3</sub>Sn 中接近 3:1 的 Nb/Sn 原子比根据具体结构来选择大于或者小于这个原子比, 比如高  $J_c$  Nb<sub>3</sub>Sn 中比值一般为 3.3 3.6 之间, 而内锡法线材中比值通常接近或者小于 2.8。3) Cu 区与非 Cu 超导区体积比 CuSc。主要是包括考虑相同  $J_c$  下线材  $I_c$  性能的问题, 线材可加工性问题等。4) Nb 芯丝尺寸  $\Phi$ 。直接与线材性能相关, 且不同 Nb 芯丝尺寸对应的热处理过程不同, 通常需要保证 Nb 芯丝直径大于 1 m。5) Nb 芯丝间距  $\Delta$ 。芯丝间距对影响 Cu、Sn 等元素的扩散效率, 影响最终热处理 Nb<sub>3</sub>Sn 晶粒质量。6) Nb<sub>3</sub>Sn 晶粒大小。主要与大晶粒 Nb<sub>3</sub>Sn 对线材  $I_c$ 、 $J_c$  等性能的影响相关。7) 亚组元尺寸。对继续采用亚组元结构的新结构线材, 需考虑最终线材中的亚组元尺寸, 其对应着一定的 Nb 芯丝大小和芯丝间距。

单 Ta 阻隔层复合线、无阻隔层亚组元设计的 Nb<sub>3</sub>Sn 线材, 拟采用实验方案及可行性分析: 1) 结构设计及对应工艺路线: 线材加工主要采用高  $J_c$  和内锡法

线材加工工艺路线 a) 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 单芯棒采用高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 线材的单芯棒，可以根据新结构元素比例等设计要求来具体调整单芯棒 Cu/Nb 体积比。因此，新结构线材的单芯棒加工工艺和高 J<sub>c</sub> 线材的工艺一致。b) 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 复合棒由采用高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 复合棒设计，但高 J<sub>c</sub> 复合棒的 Nb 筒层被相应的 CuNb 单芯棒和 Cu 单芯棒所代替所代替。新结构线材复合棒组装和高 J<sub>c</sub> 线材基本一致，但减少了 Nb 筒的制备与组装。c) 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 亚组元由采用高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 亚组元设计，但高 J<sub>c</sub> 亚组元的 Nb 阻隔层被相应的 CuNb 单芯棒和 Cu 填充。由于非铜超导区 Cu 元素相比高 J<sub>c</sub> 结构线材的增加，更多的 Sn 会被多余的 Cu 消耗，因此亚组元的 Nb/Sn 原子比应当小于 3，使线材处于富 Sn 结构。新结构线材亚组元制备和高 J<sub>c</sub> 线材工艺一致。d) 新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 复合线由 Cu 包套、Ta 阻隔层、以及无阻隔层亚组元单元等共同构成。结构上，这种复合线结构类似于内锡法线材，相比之下，新结构设计复合线具有高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 线材的 Nb 芯丝尺寸 (1 m ~ 2 m) 和亚组元尺寸 (50 m ~ 80 m)、更多的亚组元数量、更小的 Cu 含量、更高的 Nb 含量等。性能上，新结构设计线材由于具有高 J<sub>c</sub> Nb<sub>3</sub>Sn 线材的芯丝结构，它因此相较内锡法线材也会有更高的 I<sub>c</sub>、J<sub>c</sub> 等设计性能，但更大体积的非铜超导区则使得新结构 J<sub>c</sub> 会低于高 J<sub>c</sub> 线材的 J<sub>c</sub>。由于 Ta 阻隔层的圆形结构，类似于内锡法 Nb<sub>3</sub>Sn 复合线的设计方案，新结构同样需要采用三种不同形状的亚组元，分别为六方、圆形和扇形内锡法形状亚组元，新结构复合线加工工艺与内锡法的一致。e) Nb<sub>3</sub>Sn 线材仍通过对拉伸至最终尺寸的复合线金属元素结构线材进行合适的热处理过程获得。

2) 可行性分析：a) 结构设计上 Nb 含量接近高 J<sub>c</sub> 线材结构，理论上可以获得较高性能的材料。b) 由于新结构中超导区 Cu 致 Sn 过多的消耗问题，Sn 含量的合理选择需要解决来保证设计性能的获得。c) 线材可以通过对亚组元的优化很容易获得不同的性能。d) 加工工艺基本采用目前本单位成熟的加工工艺，线材长线的获得可能更多的与新结构的设计相关。

3) 关键参数验证实验：主要为单参数改变对比实验，实验线材的选择可以是亚组元，或者最终的复合线。a) 相同结构不同 Nb/Sn 原子比实验，解决 Sn 合理选择的问题。b) 调整 CuNb 单芯棒 Cu/Nb 比，获得不同 Nb 芯丝间距对性能的影响过程，以及 Nb 芯丝间距的合理范围。c) 同一设计结构、相同热处理制度不同线径实验，研究不同线径对线材结构设计的关键参数，包括芯丝直径、芯丝间距等。d) 同一设计结构、不同线径充分热处理反应实验等，研究不同线径线材下热处理制度的调整关键参数。e) 线材加工时改变加工率，获得加工率对线材变

形、断芯等的影响，以及加工率的合理选择范围参数。f) 研究不同线径下芯丝的变形情况，通过变形分析反馈调整新结构的设计。g) 其它在研究过程中可能需要补充设计和研究的实验。

特色与创新 1000 1) 本项目致力于获得具有自主结构设计新型高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材,研究具有一定创新开创性,新结构线材设计性能达到 2300A/mm<sup>2</sup>(4.2K, 12T) 以上, 本项目的设计成功将为国内外高磁场应用场景提供新的具有完全自主知识产权的高性能超导线材,进一步提升本单位在高磁场性能超导线材应用领域的技术和产品竞争力。2) 本项目研究通过对 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材性能关键设计参数的研究,会进一步加深和拓展对 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材高性能来源的认知,并为未来更高性能超导线材设计研究提供新的有效的研究思路和方法,本研究项目具有基础机理性研究的特性。3) 对长线加工工艺关键参数的研究,旨在现有生产工艺基础上,进一步深入研究不同结构的高性能 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材从结构性能设计到工程实现的关键问题,对超导线材加工工艺进一步完善具有很强的现实指导意义。

研究计划与预期成果 500 1) 2021.02-2022.01: 第一年度完成方案 a,即单 Ta 阻隔层复合线、无阻隔层亚组元设计的 Nb<sub>3</sub>Sn 线材,设计性能大于 2000A/mm<sup>2</sup>,并通过相应加工工艺完成 2-3 批次新结构线材的加工制备,预期获得对应批次的新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 线材的加工工艺信息。完成新结构对应的 Nb/Sn 比的研究实验,完成线径参数对结构设计关键参数研究实验。获得不同结构线材 Nb/Sn 比、Cu/Nb 比、芯丝间距、芯丝尺寸等关键参数的调整规律。进行新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 长线加工工艺的探究,根据之前批次的线材加工信息,研究线材加工率、线材变形等问题,获得新结构线材加工率、变形等对结构调整的影响。2) 2022.02-2023.01: 设计性能达到 2300A/mm<sup>2</sup> 的线材,进行 2-3 批次的关键参数调整后的新结构制备,获得对应批次 Nb<sub>3</sub>Sn 线材。对 2000A/mm<sup>2</sup> 线材进行线材热处理制度方面的实验设计和研究,获得结构调整对应的热处理制度调整策略。进一步完善性能和工艺加工等关键参数与 Nb<sub>3</sub>Sn 线材结构的关系,获得稳定制备高性能新结构超导线材的结构设计规律和长线加工工艺技术。

研究基础 (已取得工作已具备该科研条件尚缺少的科研条件和你解决路径正在承担的与本项目相关的科研项目情况) 1000 已取得的工作: 1) 完成第一批次单 Ta 阻隔层复合线、无阻隔层亚组元结构的 Nb<sub>3</sub>Sn 线材的模型设计,设计性能超过 1800A/mm<sup>2</sup>。2) 本批次新结构线材的 I<sub>c</sub>、J<sub>c</sub> 等性能测量结果为设计性能的

大约 60%，目前正在进行这种性能偏差的实验研究。3) 目前，已经在本单位完成这种结构线材的加工工艺验证和制备，获得百米级别的第一批次新结构线材，表明本单位现有的加工工艺能够满足新结构线材的最终制备。新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 线材加工时的断线被发现来源于线材中单根 Nb 芯丝的断裂 (单根 Nb 芯丝断线直径集中在 16.6  $\mu$ m ~ 5  $\mu$ m，最大发现 28  $\mu$ m 时单根 Nb 芯丝的断线)，正在进行断线信息的更详细分析和分析工作。

已具备科研条件：1) 线材形貌表征，比如金相、SEM 等。2) 线材性能表征，具有 4.2K，12T 低维超导性能测量能力等。3) 本单位已经具有丰富的超导线材设计和加工数据，可以为本项目研究提供丰富的原始数据的支持。4) 本单位具有完整的力学表征手段。5) 本单位具有完整的超导线材加工工艺技术。

尚缺少的科研条件：1) 本单位线材成分表征技术较为欠缺，联系研究所和大学机构进行所需测量，比如进行 EBSD、XRD 等。正在承担的相关项目：1) 承担本单位新结构 Nb<sub>3</sub>Sn 超导线材制备技术研究项目，为本项目课题研究主要负责人。

# 索引