



评述

力学反作用下Nb₃Sn高场超导线圈磁-热不稳定性研究现状和挑战

薛存^{1*}, 贾鹏¹, 汪庆渝², 任晗熹², 胡帅¹, 曹凯威¹, 雍华东³

1. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;

3. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000

*联系人, E-mail: xuecun@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-05; 接受日期: 2024-02-22; 网络出版日期: 2024-09-19

国家自然科学基金(编号: 12372210)和中央高校基本科研业务费(编号: lzujbky-2024-jdzz02)资助项目

摘要 Nb₃Sn线圈是高场磁体的关键核心部件, 在高能物理、先进医疗、磁约束核聚变等方面有重要应用. 然而国内外在Nb₃Sn高场磁体制备后的测试过程中, 遇到大量磁通跳跃, 导致超导载流能力急速下降, 严重影响失超保护, 容易诱发过早失超. 另外, 超导线圈在强磁场、大电流环境下发生明显力学变形, 而且超导电磁性能对力学变形很敏感, 所以力学应变下Nb₃Sn线圈磁-热不稳定性成为研制高场超导磁体亟待解决的难题之一. 在造价高昂和后期很难修补和改造的背景下, 发展Nb₃Sn超导线圈磁-热不稳定性数值模拟方法, 揭示电磁力对磁通跳跃和失超的影响机制, 对抑制超导线圈磁通跳跃的优化设计和加快高场Nb₃Sn磁体研制进度有重要意义. 本文回顾了Nb₃Sn高场磁体应用中涉及的力-电-磁-热多场耦合问题的研究现状, 梳理了Nb₃Sn超导线圈在应用中涉及的复杂本构关系、超导线圈磁-热稳定性和力学反作用这三个亟待解决的关键科学问题, 并探讨了其中的困难和挑战.

关键词 超导力学, Nb₃Sn高场磁体, 临界电流, 磁-热不稳定, 力学反作用

PACS: 46.25.Hf, 85.80.-b, 74.25.Ld, 84.71.Ba, 84.71.Mn

1 引言

作为一类特殊的电磁材料, 超导材料在极低温下具有零电阻效应^[1]、完全抗磁效应(Meissner效应)^[2]以及约瑟夫森效应^[3,4]等特性. 超导材料强大的载流能力(远大于铜)使其在大科学测试装置、医疗、高能物理、能源、交通、军事和信息技术等领域发挥着无可

替代的作用(图1)^[5-9]. 基于超导材料而发展起来的超导技术已成为21世纪具有战略意义的高新技术^[10]. 在新能源方面, 全超导可控磁约束核聚变能被公认为解决人类未来新能源问题的重要技术之一, 大型铌三锡(Nb₃Sn)磁体是全超导可控磁约束聚变堆的关键. 在交通方面, 超导磁悬浮列车主要运用超导线圈磁场间相互作用产生的电磁力进行悬浮和推进, 实现高速运

引用格式: 薛存, 贾鹏, 汪庆渝, 等. 力学反作用下Nb₃Sn高场超导线圈磁-热不稳定性研究现状和挑战. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 114601
Xue C, Jia P, Wang Q Y, et al. Research status and challenges related to thermal-magnetic instability of niobium-tin high-field superconducting coils (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 114601, doi: 10.1360/SSPMA-2023-0425

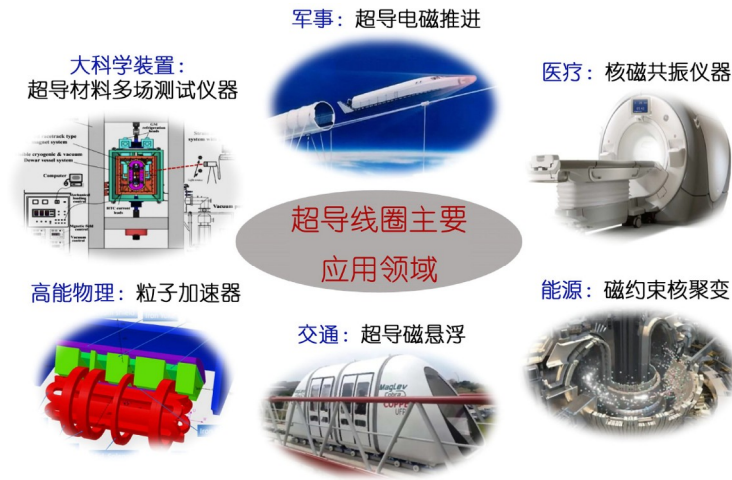


图 1 (网络版彩图)超导线圈的主要应用领域^[5-9]

Figure 1 (Color online) Main application areas of superconducting coils [5-9].

动. 在医疗方面, 由超导线圈作为关键部件的核磁共振成像仪已经成为高端医学检测手段之一, 被广泛应用于临床诊断与疾病治疗. 由于这些电磁设备的性能与磁场(B)成正相关(如高能粒子加速器对撞能量 $\propto B$, 先进核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)设备分辨率 $\propto B^2$, 磁约束核聚变反应的功率 $\propto B^4$), 所以在未来能源变革性发展、先进医用设备、大科学装置等重大需求牵引下对磁场强度的要求不断提高, 如我国拟自主建设聚变堆(CFETR)的线圈目标磁场高达 14.5 T^[11], 环形正负电子对撞机(CEPC-SppC)加速器二级磁体目标磁场范围为 12–24 T^[12], 未来核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)目标磁场为 24–27 T^[13]. 高场超导磁体技术日渐成为世界科技强国抢占的技术高地, 我国明确将超导材料的制备和应用研究列入《国家中长期科技发展规划纲要》, 大型超导磁体技术被列入重点突破领域发展方向¹⁾.

虽然迄今为止已经发现几千种超导材料, 但是由于临界性能、热稳定性以及制备难度等原因^[14], 目前已经实用化的超导材料并不多(图2和3)^[15,16]. 根据超导材料的临界温度, 可以将其分为低温超导材料(LTS)和高温超导材料(HTS). 低温超导材料有铌钛(Nb-Ti, $T_c = 9.2$ K)、Nb₃Sn ($T_c = 18.2$ K); 高温超导材料有钇系高温超导体Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ (Bi-2212)和Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀

(Bi-2223)、钕系高温超导体(REBa₂Cu₃O_{7-x}, RE = Y、Gd等稀土元素)、二硼化镁(MgB₂)以及铁基超导体^[10,17]. 在超导应用领域, 目前低温超导材料因其成熟的制备工艺牢牢占据着90%以上的市场份额. 随着各领域需要更高磁场(>10 T), 以往用Nb-Ti线材制成的超导磁体在性能上已经不能满足要求, 如大型强子对撞机的Nb-Ti偶极磁体在1.9 K下的最大工作磁场为 8.33 T^[18]; 另一方面, 尽管高温超导材料的上临界磁场很高, 但因为其力学脆性大、容易出现剥落和分层、失超保护困难、各向异性强等弱点, 也限制了其在工程中的大规模应用(常用超导材料优缺点对比见表1). 在此情况下, Nb₃Sn相比Nb-Ti有更好的临界电磁性能, 包括临界电流密度大(~ 1000 A mm⁻²@15 T, 4.2 K^[19])和上临界磁场高(28–30 T@4.2 K); 而且相较于高温超导材料, Nb₃Sn拥有更成熟的生产工艺, 这使得Nb₃Sn填补了Nb-Ti和昂贵且不太成熟的高温超导材料之间的空白^[20], 成为制备高场超导磁体(>10 T)的最佳材料. 所以, Nb₃Sn超导磁体应用范围很广, 可以用于粒子加速器的偶极、四极、六极及螺线管磁体^[7]、核聚变装置^[21,22]、磁共振成像^[23]及核磁共振(NMR)^[13]等领域. 在国内Nb₃Sn加速器磁体研发机构及其磁体有中国科学院近代物理研究所的FECR磁体^[24]、中国科学院高能物理研究所的LPF系列磁体(LPFI-LPF3)^[25]、中国

1) http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm.

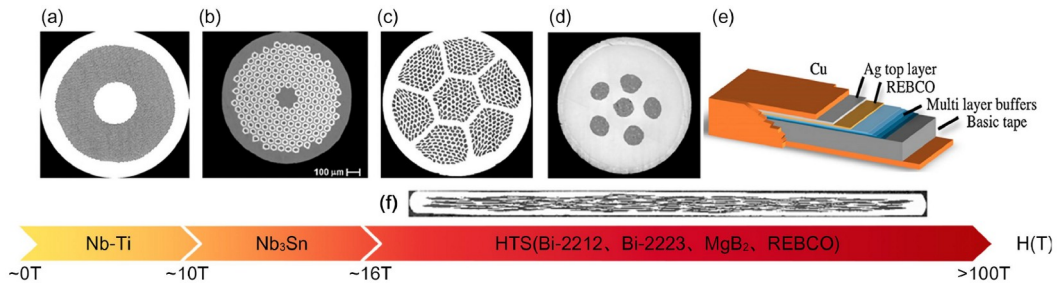


图 2 (网络版彩图)实用超导材料. (a) Nb-Ti, (b) Nb₃Sn, (c) Bi-2212, (d) MgB₂, (e) YBCO, (f) Bi-2223^[15,16]

Figure 2 (Color online) Practical superconducting materials. (a) Nb-Ti, (b) Nb₃Sn, (c) Bi-2212, (d) MgB₂, (e) YBCO, (f) Bi-2223 [15,16].

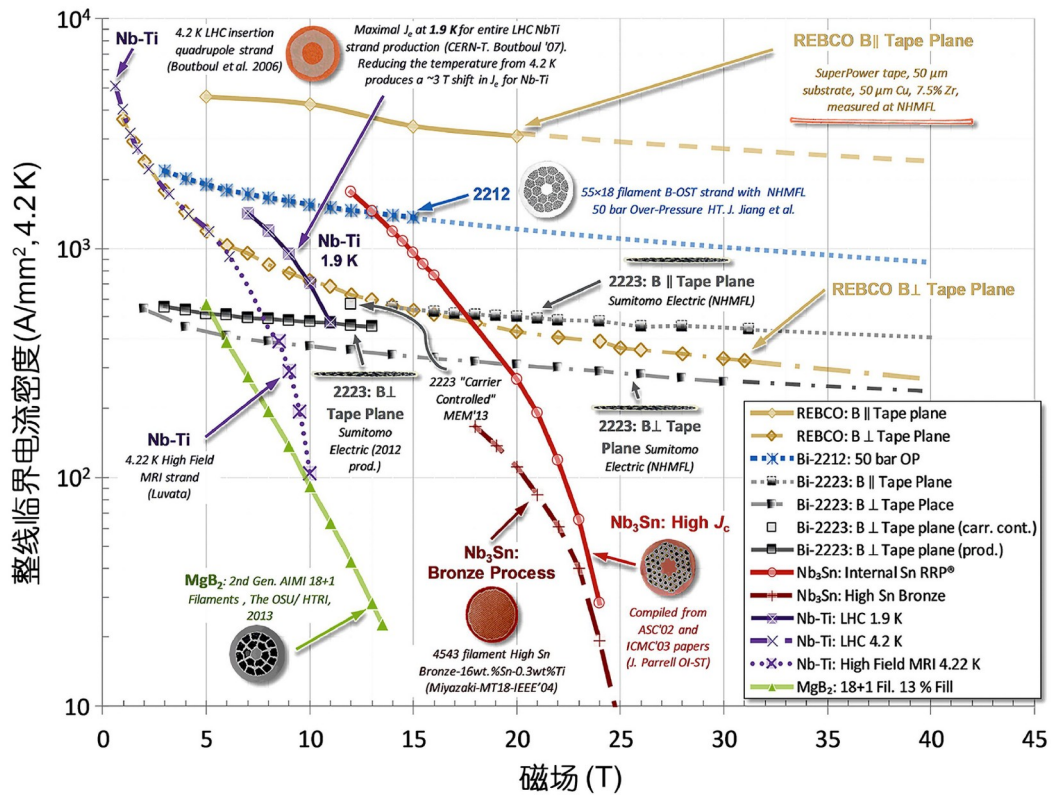


图 3 (网络版彩图)超导材料临界电流密度随磁场的变化²⁾

Figure 3 (Color online) Variation of critical current density of superconducting material with magnetic field.

科学院等离子体物理研究所的新型 14 TMRI 磁体^[26]等。

本文重点介绍 Nb₃Sn 高场磁体应用中涉及的力-电-磁-热多场耦合研究现状, 以及 Nb₃Sn 超导线圈在应用上的三个关键科学问题: Nb₃Sn 超导线的复杂电磁本构关系、Nb₃Sn 超导线圈运行中存在的大量磁-热不稳定现象以及高场 Nb₃Sn 超导线圈存在明显的力学反

作用效应, 重点论述了研究 Nb₃Sn 高场磁体多场耦合及其磁-热不稳定性问题所面临的难点和挑战。

首先, 从宏观数学物理方程角度研究超导材料和其他电磁材料都用到相同的电磁理论架构(即麦克斯韦方程), 而超导材料与其他电磁材料本质区别在于其复杂的电磁本构关系, 即电场 E 和电流密度 J 之间的关

2) By Peter Lee. <http://magnet.fsu.edu/lee/plot/plot.htm>.

表 1 实用化超导材料优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of practical superconducting materials

	Nb-Ti	Nb ₃ Sn	HTS (Bi-2212, REBCO...)
优点	力学性能好, 易于加工	J_c , H_{c2} 较高	H_{c2} 极高、 J_c 随温度 T 、磁场 H 衰减较慢, 用于超高场磁体
缺点	H_{c2} 低, 制备<10 T的超导磁体	力学敏感性高; 高场下 J_c 退化严重	力学性能差, 容易剥落和分层; 失超保护困难; 各向异性强

系. 超导的 E - J 本构形式目前有众多的物理模型: 如临界态模型、磁通蠕动模型和磁通流动模型等, 然而这些物理模型都有一定的应用范围, 目前很难有一种物理模型和 E - J 本构可以精确地描述从完全超导态经过失超后变为正常态的整个相变过程. 避开这些不谈, 实际上单从 E - J 本构关系中的一个临界参数(即临界电流密度 J_c), 我们就可以看出电磁关系的复杂性及其对超导应用的重要性. 超导线圈成为产生强磁场的关键核心部件就是利用超导强大载流能力, 临界电流密度 J_c 反映了超导的载流能力, 所以 J_c 是超导强电应用最重要的参数之一. J_c 不仅与材料、温度、磁场相关, 而且还与应变有关. 尤其是Nb₃Sn的临界电流密度对应变尤为敏感, 文献[19,27,28]报道, Nb₃Sn发生0.4%的应变就导致其临界电流降低达30%, 用RRP (Rod Restack Process)内锡方法制备的Nb₃Sn股线, 当应力达到150 MPa时, 临界电流下降甚至超过50%.

J_c 的复杂性和敏感性问题不仅给理论研究人员带来巨大的困难和挑战, 同时提高 J_c 也是超导线材研发人员最关心的问题. 随着未来强电应用领域对超导体磁场强度的要求不断增加, 例如, 在能源领域中, 我国拟自主建设聚变堆(CFETR)的线圈目标磁场高达14.5 T, 其所用Nb₃Sn线缆的临界电流密度在4.2 K, 12 T时高于2000 A mm⁻² [26]; 在大科学装置领域, 美国计划建造的目标磁场为16 T未来圆形对撞机磁体(FCC)需要在1.9 K, 16 T条件下达到2300 A mm⁻² [29]. 然而现有的先进Nb₃Sn导体材料的性能(根据欧洲核子研究组织和美国加速器计划确定的合格产品规格)与FCC导体材料的需求之间仍存在差距[20](差距约15%–50%不等). 满足稳定性要求的各种不同规格的Nb₃Sn超导导线在4.2 K, 15 T条件下的 J_c 普遍在1400–1700 A mm⁻²之间, 其中最优性能的Nb₃Sn超导导线距离FCC的需求指标仍有较大差距[30]. 再考虑到

线材品质控制的问题, 进一步提高Nb₃Sn超导线的临界电流密度是满足未来加速器需求的必要条件.

其次, 在高场Nb₃Sn超导磁体的测试过程中, 观测到大量磁-热不稳定现象(如磁通跳跃或失超). 而在超导磁体的运行过程中, 会经历各种形式的热扰动, 其中任何一种热扰动[31]都极易引起超导磁体的磁-热不稳定现象. 2021年, 中国科学院近代物理研究所报道了第四代电子回旋共振离子源(Fourth Electron Cyclotron Resonance, FECR)半长度样机Nb₃Sn磁体线圈中出现了大量的磁通跳跃现象, 主要特征为³⁾: 在给Nb₃Sn磁体励磁到677 A的过程中, 六极磁体发生约351次明显的磁通跳跃; 最大电压超过1 V, 尖峰波形; 励磁速率越大越明显, 电流稳定后消失. 在这之前, 还有如麻省理工学院在美国示范极化线圈(United States Demonstration Poloidal Coil, US-DPC)样品Nb₃Sn线圈[32]、费米国家实验室(Fermilab)的SR02[33,34]和HFDB01 Nb₃Sn跑道型线圈[34]、欧洲核子研究组织(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN)的高光度大型强子对撞机(High-Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC)升级的短模型MQXFS3和MQXFS5 Nb₃Sn线圈[35]、中国科学院等离子体物理研究所的Nb₃Sn线圈[26]等也出现了磁通跳跃现象(图4)[36]. 磁-热不稳定会严重影响超导线圈的安全稳定运行: 一方面, 磁通跳跃会使超导材料的载流能力急速下降[37], 严重影响超导设备的失超保护, 甚至诱发失超, 导致超导设备损坏; 另一方面, 磁通跳跃会导致能量损耗, 瞬间给制冷系统造成很大负担, 会给超导设备安全稳定运行带来很大挑战.

最后, 高场Nb₃Sn超导线圈在极端工作环境下运行, 如大变温环境(从高达几百近千K的反应温度降温至4.2 K)、高载流(100–7000 A)及强磁场环境(8–45 T)等, 在这样的极端环境下, 超导磁体在运行过程中会承

3) 陈玉泉. FECR Nb₃Sn磁体样机及线材磁通跳跃现象讨论. 兰州, 2021.

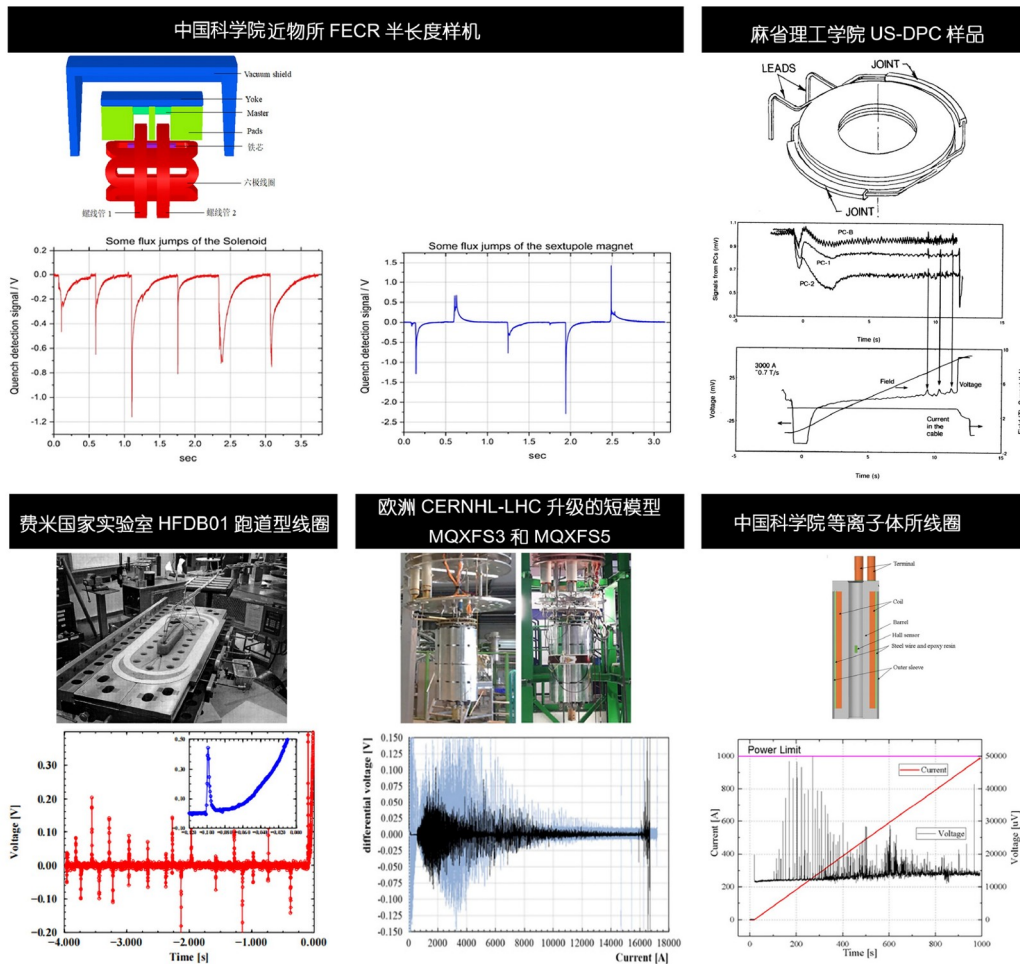


图 4 (网络版彩图)各单位 Nb_3Sn 超导线圈的磁通跳跃^[26,32,34–36]

Figure 4 (Color online) Flux jumps of Nb_3Sn superconducting coils in various scientific research institutions ^[26,32,34–36].

受巨大的电磁力作用, 并且线圈结构会发生显著力学变形^[38], 例如我国拟自主建设聚变堆(CFETR)的超导磁体纵场线圈的最大应力相比国际热核聚变实验堆(ITER)计划的磁体将提高约50%^[39]. 国内外大量研究表明, 在超导磁体的缠绕、冷却和励磁过程中, 力学作用会使超导线产生裂纹、孔洞以及芯丝断裂^[40–42], 并使超导线之间会发生相互移动, 裂纹的产生伴随着大量能量的释放. 缺陷、裂纹和芯丝断裂还会造成超导线力学性能下降, 使超导磁体产生严重的结构问题. 而且由于 Nb_3Sn 临界电流密度的应变敏感性以及裂纹、孔洞和芯丝断裂对超导材料载流性能造成的严重不可逆退化, 还将导致超导材料出现磁-热不稳定现象. 兰州大学周又和团队^[43]明确指出, 力学因素, 如材料的应变或损伤, 会导致超导材料失超, 在2022年《国

家科学评论》(NSR)专访中, 李建刚院士^[39]指出, 力学反作用是聚变磁体面临的关键问题之一, 也是影响磁体载流性能稳定的主要因素, 文献^[34]表明超导线之间相互移动的距离达到 $1\ \mu\text{m}$ 就能够造成超导磁体的失超. 因此, 高场 Nb_3Sn 超导线圈在力学反作用下的磁-热不稳定性成为研制高场超导磁体的核心关键问题之一.

因此, 在 Nb_3Sn 超导线众多复杂的电磁本构关系中找到合适的超导本构关系和进一步提高 Nb_3Sn 超导线的载流能力, 解决在极端工作环境下超导线圈频繁的磁通跳跃现象, 揭示电磁力对磁通跳跃和失超的影响机制是一个巨大的挑战. 目前制备高场 Nb_3Sn 超导磁体系统的费用高昂, 通常在几百万元至几千万元之间. 然而, 一旦超导磁体制备完成, 若出现磁-热不稳定性问题很难通过后期修补进行改造, 从而显著提高

制造成本, 造成巨大的经济损失. 因此, 针对高场 Nb_3Sn 超导线圈结构的磁-热不稳定性问题, 开发快捷、高效的力-电-磁-热多场耦合数值分析工具至关重要. 这不仅能够校验超导磁体能否安全稳定运行, 而且反过来为超导磁体优化设计、制备和运行提供技术支撑, 有力推动我国高场超导磁体的研发进程和技术进步, 助力我国在国际上抢占超导技术高地.

2 超导复杂电磁本构和磁-热不稳定研究现状

2.1 超导复杂 E - J 本构关系

作为特殊电磁介质的超导材料, 除了满足宏观意义上的电磁场方程组之外, 它与其他电磁介质最大的区别就在于其复杂的电磁本构关系. 因此, 处理超导电磁场问题的基础便是寻找合理而有效的电磁本构关系. 通常, 描述电磁现象的超导电磁本构关系可由电场强度 E 、磁感应强度 B 和电流密度 J 组成. 类比于一般电磁材料所满足的欧姆定律(见式(1)), 并考虑温度 T 的影响, 超导电磁本构关系可以表示为以下函数关系:

$$E = \rho(B, J, T)J, \quad (1)$$

其中, ρ 被称为超导材料的等效电阻率.

总体上讲, 超导电磁本构模型按 $E(J)$ 函数关系可分为两类: 非连续 $E(J)$ 本构和连续 $E(J)$ 本构. 非连续 $E(J)$ 本构一般指临界态模型^[44,45]; 而经典的连续 $E(J)$ 本构一般指幂函数模型^[46]、磁通流动模型^[47,48]以及磁通流动与蠕动模型^[49,50]. 下面, 我们将对这几种典型的超导本构模型进行分类介绍(图5)^[51].

(1) 非连续 $E(J)$ 本构

非连续 $E(J)$ 本构一般指临界态模型, 在介绍临界态模型前, 我们需要先介绍临界状态的概念. 非理想 II 类超导体处于混合态时 ($H_{c1} < H < H_{c2}$), 来源于外加磁场的 Lorentz 力(其力密度用 F_D 表示)以及磁通线受到来自于钉扎中心的钉扎力(其力密度用 F_P 表示)始终相等^[45], 处于临界稳定状态(又称临界态).

$$F_D + F_P = 0. \quad (2)$$

在所有临界态模型中, Bean 临界态模型应用最为广泛, 它假设体临界电流密度 J_c 始终为一常量, 即^[45]

$$J_c = \text{cons}. \quad (3)$$

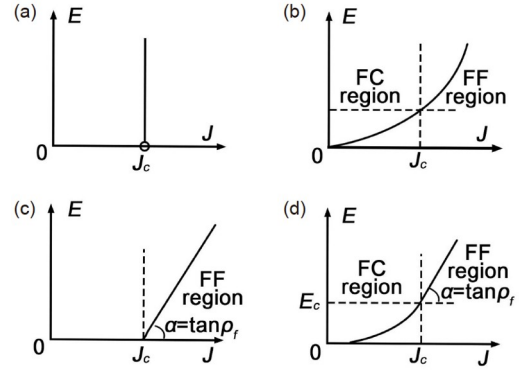


图 5 超导本构模型示意图(图中 FC 和 FF 分别为磁通蠕动(Flux Creep)和磁通流动(Flux Flow)的简写): (a) 临界态模型; (b) 幂函数模型; (c) 磁通流动模型; (d) 磁通流动与蠕动模型^[51]

Figure 5 Schematic diagram of superconducting constitutive model (FC and FF are shorthand for Flux Creep and Flux Flow, respectively): (a) critical state model; (b) power function model; (c) flux flow model; (d) flux flow and creep model [51].

这一模型虽然表述简单, 但使用起来很不方便, 无法描述 J_c 同磁场的关系. 在此基础上, Kim 等人^[52]考虑了 J_c 同局部磁场的依赖性关系, 提出了超导临界态的 Kim 模型:

$$J_c = \frac{\text{cons}}{1 + \frac{|B|}{B_0}}, \quad (4)$$

其中, B_0 是一个确定磁场依赖性强弱的常数. 随后, Fietz 等人^[53]根据实验数据的拟合提出了临界态指数模型:

$$J_c = \frac{\text{cons}}{\exp\left(-\frac{|B|}{B_0}\right)}. \quad (5)$$

(2) 连续 $E(J)$ 本构

Anderson-Kim 磁通蠕动理论^[54]指出, 在高温超导体中磁通量子有一定概率跳过有效钉扎势垒, 该概率为

$$\omega = \omega_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (6)$$

其中, ω_0 , k 和 T 分别为尝试频率、Boltzmann 常数和温度. U 为与电流密度 J 相关的有效势, 它们之间的关系可写为

$$U_+ = U_0 \left(1 - \frac{J}{J_c}\right), \quad U_- = U_0 \left(1 + \frac{J}{J_c}\right), \quad (7)$$

其中, U_+ 和 U_- 分别表示沿Lorentz力方向相同和相反的势垒高度, U_0 为势垒的平均高度; 而临界电流密度 $J_c = BVd/U_0$, 这里 B , V 和 d 分别为磁通密度、磁通束的体积和磁通束跳跃的距离. 考虑磁通跳跃的方向(即存在正负方向), 磁通蠕动的净速度为

$$v = 2\omega_0 d \sinh\left(\frac{U_0 J}{kT J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right). \quad (8)$$

于是, 由于磁通蠕动产生的电场 E 可表示为

$$E = vB = 2B\Omega d \sinh\left(\frac{U_0 J}{kT J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right). \quad (9)$$

将磁通蠕动流阻的定义 $\rho_c = B\Omega d/J_c$ 代入, 式(9)可简化为

$$E = vB = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0 J}{kT J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right), \quad 0 < J < J_c. \quad (10)$$

在磁通流动区域($J/J_c \ll 1$)时, 式(10)可等价于

$$E = \rho_f J_c \left(\frac{J}{J_c} - 1\right), \quad (11)$$

其中, ρ_f 为磁通流阻, 式(11)给出了描述磁通流动区域内电场 E 与电流密度 J 的本构关系.

为了保证电场强度的连续性和便于计算, 可将磁通蠕动和磁通流动区域电场强度的表达式统一表示为如下形式^[49]:

$$E = \begin{cases} 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0}{kT J_c} \left|\frac{J}{J_c}\right|\right) \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \frac{J}{|J|}, & 0 \leq |J| < J_c(|B|, T), \\ \left[\rho_c J_c + \rho_f (|J| - J_c(|B|, T))\right] \frac{J}{|J|}, & |J| \geq J_c(|B|, T). \end{cases} \quad (12)$$

此外, Zeldov等人^[55]根据不同电流密度 J 下 ρ 的实验结果, 简化方程, 推出了目前高温超导研究中广泛应用的幂函数公式: $E = E_c (J/J_c)^n$.

对绝大多数物理模型的 E - J 本构关系中, 其电阻率都是电流密度 J 和临界电流密度 J_c 的函数, J_c 的准确性对于宏观超导的数值模拟研究就显得尤为重要. 超导线的实际性能取决于其无阻载流能力, 即 E - J 本构关系中的临界电流密度 J_c 随应变、磁场、温度的变化.

Nb_3Sn 是一种脆性金属间化合物, 具有明显的断裂倾向, 并且 Nb_3Sn 超导线的临界电流会因为超导芯丝的断裂和残余应力出现不可逆的退化^[56-58], 当

Nb_3Sn 发生0.4%的应变时, 其临界电流将降低30%, 因此有必要得到 Nb_3Sn 电磁本构与力学因素之间的关系. 最早用于测试导体对机械载荷响应的实验装置由Ekin^[59]在20世纪80年代初设计, 他测量了轴向拉伸应变作用下 Nb_3Sn 短样的临界电流(图6), 随后大量的经验公式、半经验公式和本征模型等被用来描述力学因素和电磁本构之间的关系, 如Ekin的幂律模型^[59]. Valentinis等人^[60]提出了一种基于非谐波声子产生的 Nb_3Sn 应变依赖临界场理论, Jing等人^[61]采用Mori-Tanaka方法分析了超导线在热应力和外加荷载作用下临界电流的分布情况, 高配峰^[62]基于Weibull分布提出了轴向变形下超导多芯线材轴向变形下临界电流退化的唯相理论模型, 在微观层面, Loria等人^[63]基于密度泛函理论(DFT)分析了 Nb_3Sn 在静水压力和轴向应变^[64]下超导临界性能的变化, Qiao和Zheng^[65]建立了 Nb_3Sn 中临界电流密度与应变关系的三维本构模型并考虑了在外加荷载下 Nb_3Sn 晶格畸变引起的电子带结构的演化, 罗威^[66]基于电子散射机制研究了 Nb_3Sn 中临界电流密度的退化, Zhang等人^[67]基于第一性原理研究了变形对 Nb_3Sn 电磁本构的影响, Ding和Gao^[68]利用有限元方法分析了多晶 Nb_3Sn 电磁本构的应变依赖性. 尽管从实验标度率的角度, 依靠大量的实验数据, 已经归纳出不同超导材料的临界电流与力学变形的依赖关系, 但是对于应变影响超导材料临界电流的微观机理仍不清楚. Lipavský等人^[69]基于TDGL (Time-Dependent Ginzburg-Landau)理论引入了应变对自由能的影响, 推导出了含力学应变的TDGL方程. 但Lipavský仅考虑原子晶格体积变化, 没有考虑力学引起的缺陷导致的磁通涡旋钉扎. Yong等人^[70,71]利用GL方程推导出了超导材料的临界电流密度曲线, 然而该曲线为拆对临界电流密度, 与在工程上常用的涡旋脱钉扎临界电流密度之间存在较大的差异. 此后, van der Laan等人^[72]、Luo等人^[73]、Yue等人^[74]分别对晶界位错对超导电子的影响进行了研究, 并从电子散射和透射的角度分析了晶界对超导电性的抑制作用. 然而, 在这些研究中, 所采用的模型相对简单, 未考虑外加磁场的影响, 并且模型中的晶界位错无法传导电流. 这些研究对于深入了解 Nb_3Sn 电磁本构与力学因素间的关系具有重要意义.

对于 Nb_3Sn 超导线而言, 其临界电流大小主要受到三个因素的影响: 截面上 Nb_3Sn 的占比、超导体材

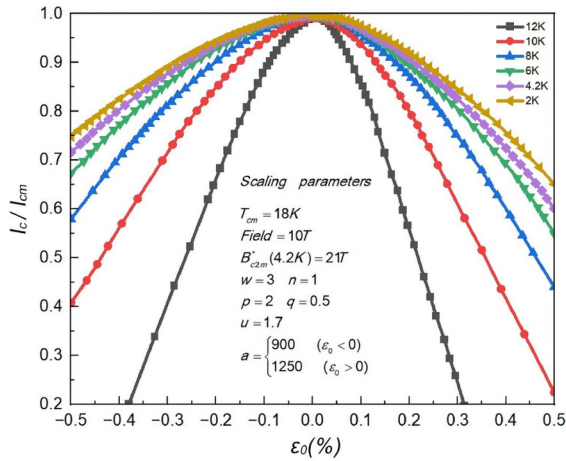


图 6 (网络版彩图) 10 T 时 Nb₃Sn 短样临界电流在不同温度下(2–12 K)的应变相关性^[59]

Figure 6 (Color online) Strain correlation of Nb₃Sn short sample critical current at 10 T at different temperatures (2–12 K) [59].

料的上临界磁场 H_{c2} 以及最大体钉扎力密度. 这三个因素都与超导体的微观结构和化学成分(Nb₃Sn相的占比)密切相关. 例如, 影响上临界磁场 H_{c2} 的主要因素包括Nb₃Sn相成分占比^[75]、杂质含量^[76]以及应变状态^[77]; 最大体钉扎力密度则主要取决于磁通钉扎密度^[77](对Nb₃Sn超导磁体而言以晶界为主). 对于Nb₃Sn超导线材来说, 制备原材料的化学成分、加工工序等都会对最终的微观结构产生影响. 例如, 在热处理阶段, 通过提高热处理温度可以改变化学成分(减小Nb₃Sn相的占比分数), 从而增加上临界磁场 H_{c2} . 然而, 这样做会导致磁通钉扎密度的减小(增大Nb₃Sn晶粒尺寸), 从而不利于提高最大体钉扎力密度^[78].

近年来, 研究人员通过实验研究发现, 掺杂、施加应变、改变热处理温度等一系列手段^[20,77–81]可以改变Nb₃Sn相的占比并调节临界磁场 H_{c2} . 然而, 现有Nb₃Sn相的占比和临界磁场 H_{c2} 与理想值非常接近, 如表2所

示. 因此, 通过改变芯丝中Nb₃Sn相的占比和 H_{c2} 来改善临界电流的方法已没有太大的提升空间. 同时需要注意的是, Nb₃Sn相含量、 H_{c2} 和钉扎密度这三个因素并不是相互独立的, 在改变化学和加工过程时, 这三个因素会同时受到影响. 在许多情况下, 为改善其中一个因素可能会对其他因素产生负面影响, 例如, 提高反应温度有利于提升 H_{c2} , 但会降低钉扎密度. 因此, 这些因素之间需要进行权衡. 在继续改善Nb₃Sn相含量和 H_{c2} 的过程中, 面临许多矛盾和困难, 相比之下, 钉扎密度(主要是晶粒尺寸)还有着相当大的调节空间. 因此, 为了进一步显著提高超导体的临界电流密度 J_c , 专注于提高钉扎密度是一个不错的选择, 如采用减小晶粒尺寸、引入人工钉扎等方法.

对于Nb₃Sn而言, 磁通钉扎主要来源于多晶体的晶界. 因此通过减小晶粒尺寸来提高Nb₃Sn的临界电流密度是一种非常有效的方法^[82,83]. 降低热反应温度是一种可以有效减小晶粒尺寸的实验方法, 在文献[78]中, 两类不同型号的Nb₃Sn超导线(Sn线(SS)和掺Ta线(ST))在热反应过程中, 较高的温度会导致晶粒尺寸增大. 除了影响晶粒尺寸, 热反应温度还会对晶粒形状产生影响. 在不同热反应温度下, 两类不同型号的Nb₃Sn超导线在615°C热反应时, 样品中晶粒主要呈柱状, 纵横比约为2.1; 随着热反应温度的升高, 晶粒的纵横比逐渐降低, 到650°C时降为1.8; 在700°C及以下的温度范围内, 晶粒主要呈等轴状, 纵横比大多低于1.5.

通过降低热反应温度可以有效减小晶粒尺寸, 从而改善磁通钉扎力密度, 但考虑到热反应温度同样会影响Nb₃Sn相的化学计量关系, 这并不利于提高上临界磁场 H_{c2} ^[78]. 然而, 近年来, Xu等人^[84,85]提出在Nb-1Zr合金中提供足够的氧气, 并通过SnO₂粉末进行内部氧化的方式, 可以进一步细化Nb₃Sn晶粒. 根据图7显示的情况, 在不改变热反应温度的前提下, 含有

表 2 目前 RRP、PIT 和 TT 导体的最佳 Nb₃Sn 分数、 B_{c2} 和钉扎特性以及预估的极限^[20]

Table 2 The best Nb₃Sn ratios, B_{c2} values, pinning characteristics, and estimated limits of RRP, PIT, and TT conductors are currently being compared [20]

	Fine-grain Nb ₃ Sn fraction (%)	B_{c2} (4.2 K), (T)	Flux pinning	
			Grain size (nm)	$F_p(B)$ peak
Present best RRP	~60	25–27	120–150	~0.2 B_{c2}
Present best PIT, TT	40–45	25–27	100–150	~0.2 B_{c2}
Limits or optimum	~65	~28	<15	0.5 B_{c2}

SnO₂粉末的样品具有更小的晶粒尺寸. 同时, 由于该方法对Nb₃Sn相占比和上临界磁场 H_{c2} 的影响较小, 因此, 如图8所示, 在使用该方法时, 临界电流得到了显著的改进, 钉扎力的峰值也移动到 $0.3H_{ir}$ (不可逆场). 虽然已经在实验中取得了显著成果, 但为了满足更高临界电流密度的要求, 我们应该进一步改善Nb₃Sn导体中的磁通钉扎密度以提高超导线的 J_c .

除了使用降低热反应温度、含SnO₂的内部氧化法来减小晶粒尺寸外, 还可以通过引入人工钉扎来调控Nb₃Sn磁通钉扎密度. 例如, 可以通过中子辐照, 或者加入纳米尺寸Nb-Cu颗粒作为钉扎中心来提高Nb₃Sn钉扎力或引入金属元素. 其中最常用的是添加Ti、Ta、Mg等金属元素. 实验证明, 加入Mg元素不仅能够产生人工钉扎, 还可以抑制晶粒生长^[86], 显著提高单位面积的钉扎力从而提高 J_c . 而Ti、Ta等元素除了能够实现人工钉扎外, 还可以提高 H_{c2} ^[76,87], 这些金属元素都能够促进 J_c 的提升. 然而, 对于Ti而言, 由于Nb-Ti合金的延展性较纯Nb有所下降, 给加工带来不

便. 而Sn-Ti合金不仅成本较高, 加工过程中还容易形成坚硬的Sn/Ti金属间化合物, 使得芯丝断裂的可能性大大增加. 因此, 在实际应用中, 通过引入金属元素来提高 J_c 的方法仍然存在一系列待深入研究的问题.

除了在实验方面取得的成果之外, 在理论方面晶界对 J_c 影响的研究也取得了一系列进展. 一些研究者基于TDGL理论研究了人工钉扎对Nb₃Sn磁体线圈临界电流密度的影响^[88], 并得出了与实验结果相符的结论, 证明了这种仿真方法的可靠性. 相较于实验, 数值模拟可以节省大量成本, 然而之前的研究并未考虑Nb₃Sn内部的晶粒晶界结构, 同时也仅能模拟小尺寸的Nb₃Sn磁体. 随着计算机技术的发展, 美国阿贡国家实验室的Sadovskyy和Koshelev等人^[89]发展了GPU大范围模拟的数值方法, 来模拟高温超导材料静态钉扎磁通涡旋排列形貌. 如图9所示, 他们利用此方法进一步研究了在大范围内引入人工钉扎(纳米颗粒)对高温超导材料临界电磁性能的影响^[90].

此外, 学者们在数值模拟中引入晶粒/晶界结构,

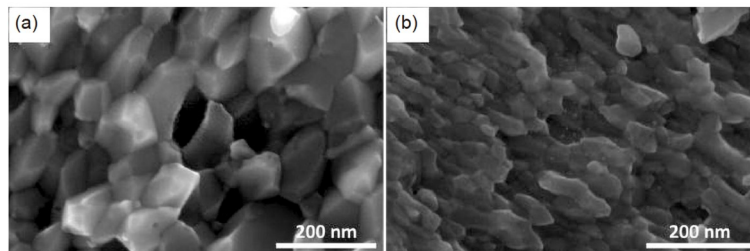


图 7 (a) 样品(含NbO₂)和(b) 样品(含SnO₂)在650°C下反应150 h的断口SEM图像^[84]

Figure 7 Fracture SEM images of (a) sample (with NbO₂) and (b) sample (with SnO₂) reacted at 650°C for 150 h [84].

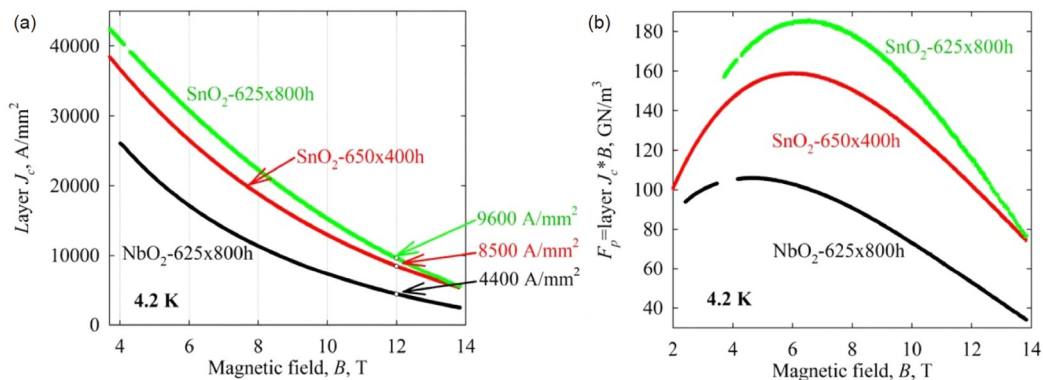


图 8 (网络版彩图) (a) 不同晶粒尺寸的超导线 J_c 随磁场的变化; (b) 不同超导线由晶界引起的钉扎力随磁场的变化^[85]

Figure 8 (Color online) (a) Variation of superconducting wires J_c with different grain sizes with magnetic field. (b) Variation of the pinning force of different superconducting wires caused by grain boundaries with magnetic field [85].

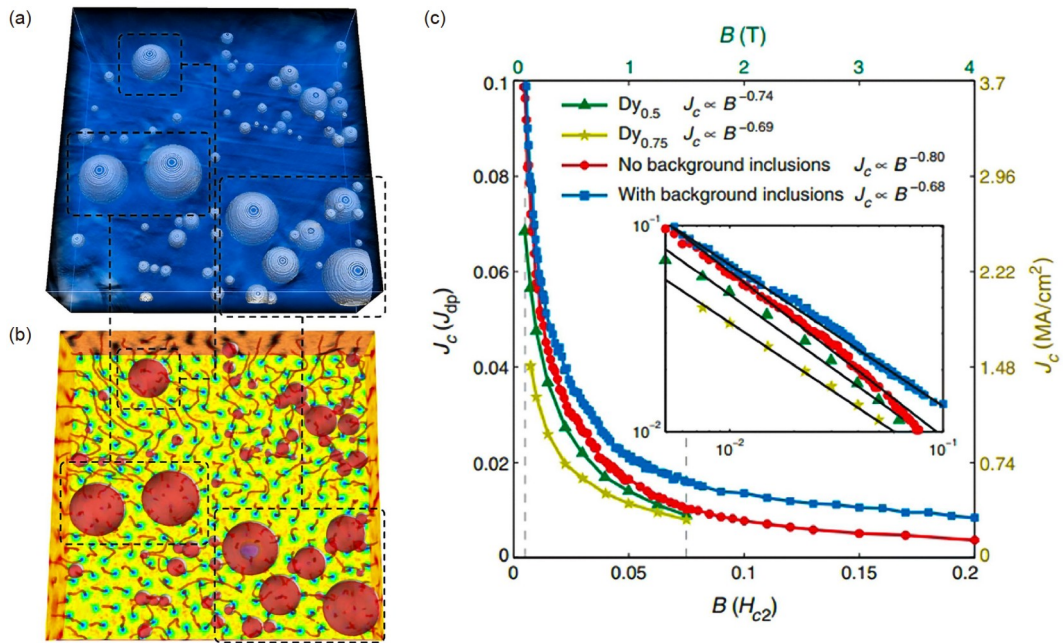


图 9 (网络版彩图) (a) 掺杂YBCO样品的3D STEM断层图(含纳米颗粒)和(b) 在电磁场下的磁通涡旋示意; (c) 使用大范围计算方法模拟所得不同掺杂样品 J_c 随磁场的变化模拟图. 插图: 双对数尺度来显示指数. 详见文献[90]

Figure 9 (Color online) (a) 3D STEM sectional image of YBCO sample with embedded nanoparticles and (b) illustration of magnetic flux vortices under electromagnetic field. (c) Simulation graph of the variation of J_c with magnetic field for different doped samples obtained using a large-range computation method. Inset: Double-logarithmic scale to show the exponents, see ref. [90] for details.

并研究了晶粒/晶界结构对Nb₃Sn超导体临界电流的影响^[91–93]. 这些研究包括晶粒尺寸、晶界强度等对临界电流密度的影响. 然而, 这些研究的数值计算范围十分有限(一般数值模型只包括单个晶界或几个晶粒), 因此存在较高的人为随机性, 使得结论具有一定的偶然性.

除了TDGL方法之外, 国内的兰州大学课题组利用晶界位错模型^[74]研究了高温超导体中应变下小晶界角对临界电流的影响. 他们的研究角度是从晶界对超导电子的影响的角度出发. 太原理工的乔力等人^[94,95]则通过建立三维晶界, 从实验标度律角度, 通过数据拟合的方式总结出不同超导材料的临界电流与力学变形之间的依赖关系, 目前尚缺乏对实际超导导线(如Nb₃Sn)中的涡旋钉扎和脱钉扎系统以及提高 J_c 的系统优化方案的深入研究. 近年来, 我们利用TDGL方法结合GPU并行计算在大范围内引入人工钉扎、晶粒/晶界, 以深入研究晶界对磁体超导性能的影响^[96,97]. 通过另辟蹊径, 从晶界的超导电性角度出发, 从理论上研究了大规模多晶Nb₃Sn超导体中的涡流钉扎和临界电流密度. 如图10所示, 从数值模拟结果中发现, 与点状

钉扎系统有显著不同, 通过抑制晶界的钉扎势并不能一直提高临界电流密度. 当晶界的超导电性受到过多抑制时, 磁通涡旋容易沿晶界移动, 从而形成磁通通道. 最大临界电流密度的晶界的最佳钉扎势很大程度上取决于磁场. 此外, 根据图11中的展示, 我们对晶粒尺寸的变化进行了研究, 以探究其对临界电流的影响. 通过图12发现, 在低磁场下通过减小晶粒尺寸可以显著提高临界电流密度, 而在高磁场下减小晶粒尺寸并不能一直观察到临界电流密度的增加. 在实际工程中, 可以通过热压, 晶界析出Cu、Ti等方法来对晶界的超导电性进行调控, 从而实现超导导线临界电流的提升.

2.2 超导线圈磁-热不稳定性

超导体的磁通跳跃是一种典型的磁和热耦合作用下出现的不稳定性现象, 20世纪60年代开始, 学者开始探索其物理机理^[52]. 从微观角度, 磁场以量子化涡旋的形式进入II类超导体, 这些磁通涡旋运动受到超导体内大量微观缺陷钉扎效应的影响. 当磁通涡旋受到的洛伦兹力小于缺陷提供的最大钉扎力时, 磁通涡旋被钉扎而不运动; 反之, 磁通涡旋将在超导体内运动.

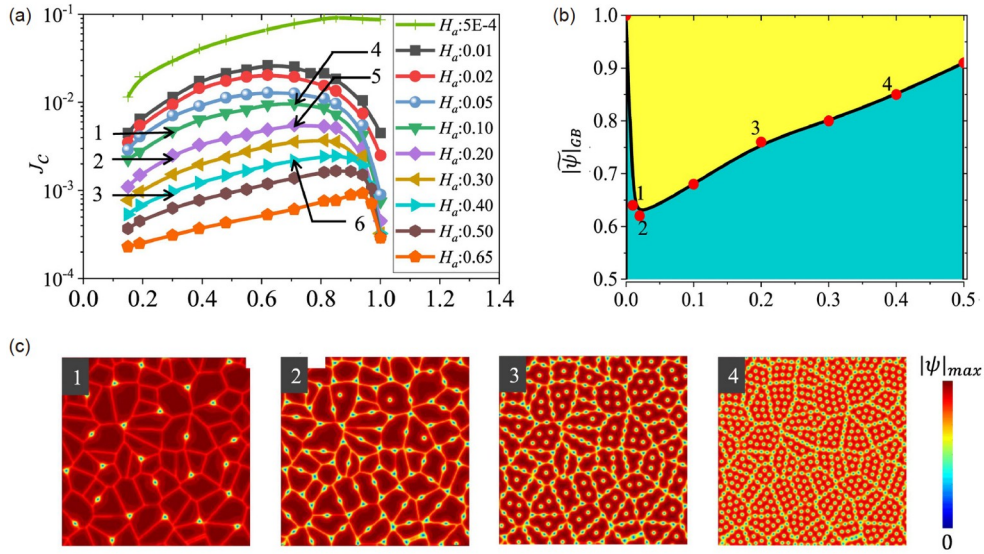


图 10 (网络版彩图) (a) 不同磁场下 J_c 与晶界强度的变化关系; (b) 最佳晶界处超导电性随磁场的变化及 (c) 对应点的涡旋分布形貌图 [97]

Figure 10 (Color online) (a) Variation of J_c with grain boundary strength at different magnetic fields. (b) Variation of superconductivity at the optimal grain boundary with magnetic field. (c) Corresponding vortex distribution morphology at the corresponding point [97].

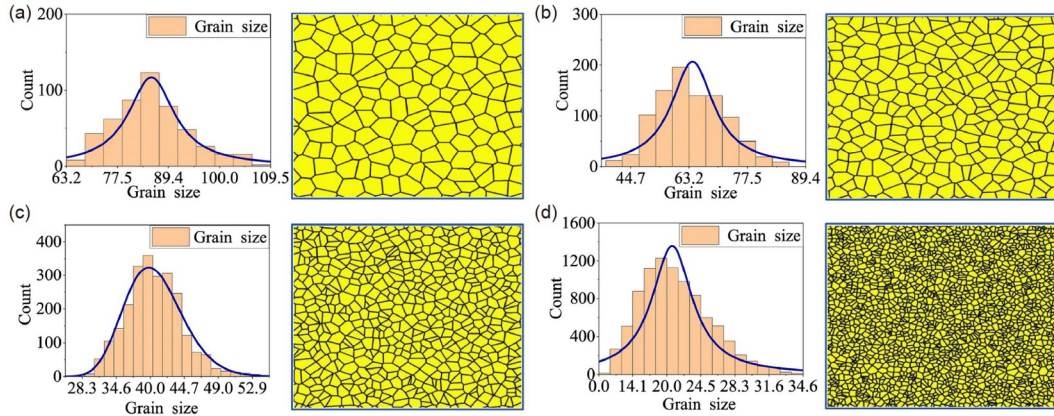


图 11 (网络版彩图) 大范围计算晶粒示意图和不同平均晶粒大小在 80 (a), 70 (b), 40 (c), 20 (d) 的统计分析 [97]

Figure 11 (Color online) Large-range computation grain schematics and statistical analyses of average grain sizes at 80 (a), 70 (b), 40 (c), and 20 (d) [97].

磁通涡旋的运动会引起超导体内部的损耗, 一旦磁通涡旋运动所产生的焦耳热不能通过热传导及时扩散出去, 将引起局部温度升高. 而这将显著降低超导体的钉扎效应, 从而进一步促进内部磁通涡旋运动, 产生大量焦耳热并形成正反馈导致超导体磁-热不稳定(图13). 从宏观角度, 局部温度扰动会引起超导临界电流退化, 从而影响磁通钉扎并引起磁通运动, 磁通运动又产热进而引起温度上升, 形成一种循环. 如果循环是负反馈, 温度扰动很快变小并恢复到工作温度, 超导呈现

磁-热稳定状态; 反之, 如果循环是正反馈, 磁通很快进入超导体内部, 伴随温度快速上升, 出现磁-热不稳定 [31].

磁通跳跃和磁通崩塌都是超导体磁-热不稳定性的表现形式. 目前研究表明, 磁通跳跃主要发生在块状超导体 [98,99] 或超导线 [100,101] 中, 由于块状超导体中焦耳热的耗散只能通过温度梯度以热传导的形式传播到边界进行散热, 因此磁通跳跃需要毫秒级的时间尺度才能恢复到工作温度 [102]. 根据磁通跳跃时局部温度是否

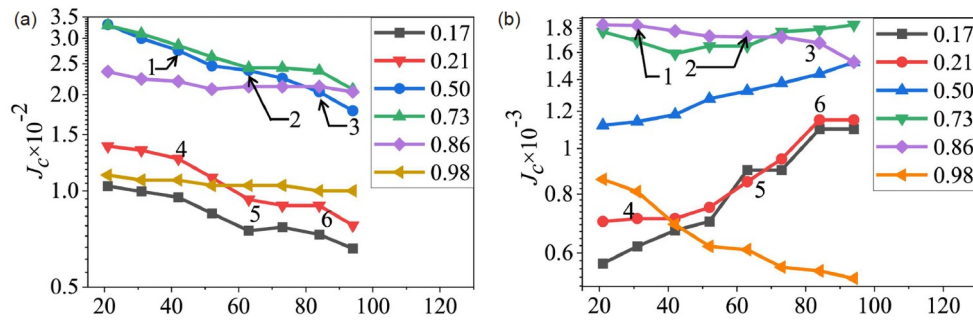


图 12 (网络版彩图) (a) 在低磁场下获得的不同晶界强度的模拟临界电流密度 J_c 与晶粒尺寸的函数关系; (b) 在高磁场下获得的不同晶界强度的模拟临界电流密度 J_c 与晶粒尺寸的函数关系 [97]

Figure 12 (Color online) (a) Function relationship between simulated critical current density J_c and grain size at different grain boundary strengths obtained under low magnetic field. (b) Function relationship between simulated critical current density J_c and grain size at different grain boundary strengths obtained under high magnetic field [97].

高于临界温度, 磁通跳跃可分为完全磁通跳跃和非完全磁通跳跃, 还可以分为全局磁通跳跃和局部磁通跳跃, 这取决于磁通量子是否穿透整个超导体。实验研究超导块材主要通过超导量子干涉器(SQUID)、Hall 探针或探测线圈的方式来记录励磁过程中的磁化曲线或电压信号。通过大量的实验研究, 发现外磁场速率、环境温度、超导体形状等都会影响超导材料的磁通跳跃 [102–104]。国内兰州大学周又和教授团队 [105] 数值模拟了换热条件下超导块材磁通跳跃现象, Gou 等人 [106]、Huang 等人 [107] 研究了磁通跳跃与超导块材磁悬浮稳定性的关联性。在薄膜系统中, 磁通运动产生的焦耳热以热交换形式通过基底快速释放, 因而磁通崩塌的传播速度极快, 每秒可达几十至数百公里 [108], 磁通崩塌之后仅需要纳秒至微秒量级恢复到工作温度。且崩塌形貌各异, 有树枝状、指状或针状等特征形态 [109, 110],

由于大量磁通突然穿透超导薄膜形成的现象与自然界雪崩现象相似, 所以超导薄膜内的磁热不稳定行为又被称为“磁通崩塌” [111]。对于磁通崩塌的实验研究主要借助于磁光成像(MOI)的技术手段, 研究发现崩塌阈值依赖于温度、外加磁场速率、传输电流、超导膜的几何形状、应变和膜上的边缘缺口等因素 [112, 113]。除实验研究外, 对超导薄膜的理论研究已经发展了线性摄动分析法、快速傅里叶变换(FFT)等数值研究方法, 成功实现了对磁通崩塌产生的临界条件的预测和演变过程的模拟 [114, 115]。

目前关于 Nb_3Sn 超导线和超导线圈结构的磁通跳跃主要以实验测试为主, 如图 4 所示。与超导块材、超导薄膜相比, Nb_3Sn 超导线最大的不同在于它是一个由超导材料、基底等绝缘材料组合成的复合材料。在 Nb_3Sn 从超导态过渡到正常态的情况下, 基于对减少磁通跳跃和保护超导磁体的要求, 提出了复合超导线的概念, 如图 14 所示。在复合超导线中, 细超导丝分布在正常的低电阻、高导热性的金属基体中, 这样能在超导体转变为正常态时降低焦耳热的产生。为了提高线材的稳定性, Nb_3Sn 超导线常采用小尺寸截面的圆导线、较小的芯丝尺寸和较高的剩余电阻率比(RRR) [20, 37, 101, 116]。为了减少由变化的外部磁场引起的涡流(交流损耗)并提高复合线对磁通跳跃的稳定性, 通常会采用三维绞扭设计的 Nb_3Sn 超导芯丝。但是 Nb_3Sn 超导线在低磁场下仍然会表现出磁-热不稳定性, 甚至在低场下当电流远小于 I_c 时, Nb_3Sn 超导线还会过早失超 [117]。低温下 Nb_3Sn 超导线的磁化测试表明, Nb_3Sn 在低场下的“磁”不稳定性(即磁通跳跃)将引发

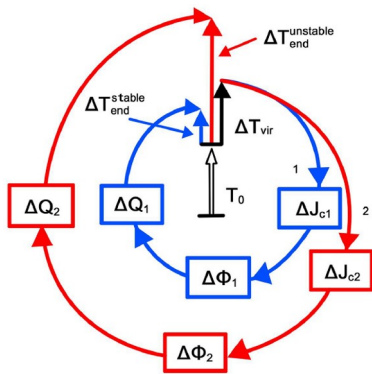


图 13 (网络版彩图) 超导体磁-热稳定/不稳定机理示意图 [31]

Figure 13 (Color online) Schematic diagram of magnetic-thermal stability/instability mechanism of superconductors [31].

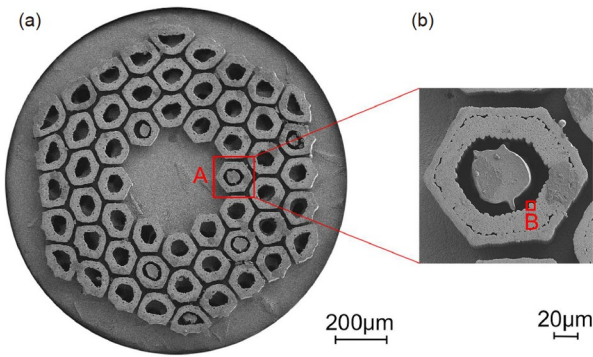


图 14 (网络版彩图) Nb_3Sn 超导导线电子显微镜图. (a) 超导导线中的 54 个亚组元; (b) 亚组元中的芯丝

Figure 14 (Color online) SEM image of Nb_3Sn superconducting wire. (a) 54 subcomponents in superconducting wire and (b) filament in a subcomponent.

超导磁体在低温低场下过早失超, 并且粗芯丝更容易表现出磁-热不稳定性^[118]. 通过在复合超导导线中特殊位置引入高比热物质(如 Gd_2O_3)可以吸收很大一部分热量, 另外引入良好导热性物质也可以快速导出热量^[119–122], 从而增强 Nb_3Sn 超导导线的磁-热稳定性; 通过提高冷却物质的导热性, 可以更好地将热量从超导导线表面传导出, 提高 Nb_3Sn 超导导线的稳定性^[123]. 实验表明当液氮的温度低至 2.10 K 时, 能够使 Nb_3Sn 超导导线在低场下避免磁通跳跃, 然而使用极低温的液氮会极大地增加冷却成本. 同时, 由于超导导线励磁过程中磁通跳跃现象的存在, Nb_3Sn 超导导线仍然没有达到其理论磁场极限.

超导磁体的服役环境非常极端(极低温、高载流、强磁场、高应力), 在运行过程中, 由于自身磁场以及超导线圈复杂的结构等原因, 磁场及电流分布必然出现非均匀性, 导致产热的非均匀性, 因此超导线圈内发生磁通跳跃的次数远多于块材和薄膜. 有实验表明, 在 Nb_3Sn 螺线管中的磁通跳跃次数比在 Nb-Zr 螺线管中观察到的要多, 并且可以通过改变电流加载速率, 以及外部磁场加载速率来改变磁通跳跃频率和次数^[124]. 有实验研究表明, “磁化不稳定性”^[125]或“自场不稳定性”^[37]可能是超导体磁通跳跃的根源, 也是困扰 Nb_3Sn 高场磁体设计和开发的难题. 此外, 如图 4 所示的麻省理工学院、费米国家实验室、欧洲核子研究组织、中国科学院等离子体物理研究所和中国科学院近代物理研究所都通过电压信号监测到了各自的 Nb_3Sn 磁体的磁通跳跃现象, 而且观察到因低场的磁-

热不稳定性导致磁体线圈过早失超的情况^[126]. 针对不同规格的 Nb_3Sn 超导导线, 研究者们做了很多实验^[127–130], 从实验中发现较大芯丝尺寸和较高临界电流密度的超导导线的磁化曲线宽度更大, 而波折大的磁化曲线和相关的磁通跳跃导致超导线圈提供的磁场质量恶化, 造成加速器磁体在低磁场下的磁场不稳定. 除此之外, 一些研究者们还将应变与磁-热不稳定性相结合, 提出了通过应变变化来检测超导线圈的失超现象的理论^[131–133].

目前国际上用来描述磁-热不稳定现象的数值模型主要是针对超导块材、薄膜, 对于超导导线及超导线圈, 之前的研究主要关注多丝绞扭超导导线的交流损耗^[134–136], 如 Amemiya 等人^[136]建立的二维超导体数值模型来模拟交流损耗; Zhao 等人^[135]提出了一个三维有限元模型来计算多芯丝线中的交流损耗; Zhou 等人^[137,138]计算模拟了 CFETR 的 Nb_3Sn CSMC (中心螺线管模型线圈)的交流损耗. 相比之下, 针对 Nb_3Sn 超导导线及其所绕制线圈结构的磁通跳跃的理论研究相对较少. Kashikhin 等人^[101]建立了一种模拟 Nb_3Sn 超导导线磁不稳定性的绝热模型, 该模型预测在低场下, 具有大芯丝尺寸和高临界电流密度的先进 Nb_3Sn 线和电缆的载流能力将显著降低, 并在线和电缆样品上进行了实验验证, 定量地解释了在费米实验室和其他地方测试的基于 MJR 导体的一些 Nb_3Sn 磁体的过早失超现象. 但该模型忽略了自场对临界电流密度的影响, 假设当磁扩散系数大于热扩散系数时线内的温度是均匀的, 假设在超导体中产生的热量在不改变体积和压力的情况下增加了其内能, 并将圆形的细丝近似为相同面积的正方形. Bordini 等人^[37]建立了一种基于有限元法模拟磁-热稳定性的数值模型, 模拟了超导导线截面上磁通跳跃的整个演变过程. 在对整个超导线圈的模拟中, 如图 15 所示, 国外学者 Martino 等人^[139]通过建立等效电路模型研究超导线圈的磁通跳跃. 但是模型中没有进行磁-热耦合, 模拟磁通跳跃信号全部需要通过人为设置一个电感扰动来激发, 不能预测磁通跳跃出现时间, 而对于超导线圈的失超研究, 主要是采用等效电路模型, 将每一根超导导线等效为一个回路, 进而研究超导线圈的最小失超能量和失超传播速度.

近年来, 我们提出了一种代表性单胞元数值模型, 如图 16(a)和(c)所示, 用于研究超导线圈的磁-热耦合. 通过使用 COMSOL 软件或自编代码, 应用 H 法、A-V 法对 Nb_3Sn 超导线圈中的单根超导导线进行力-电-磁-热

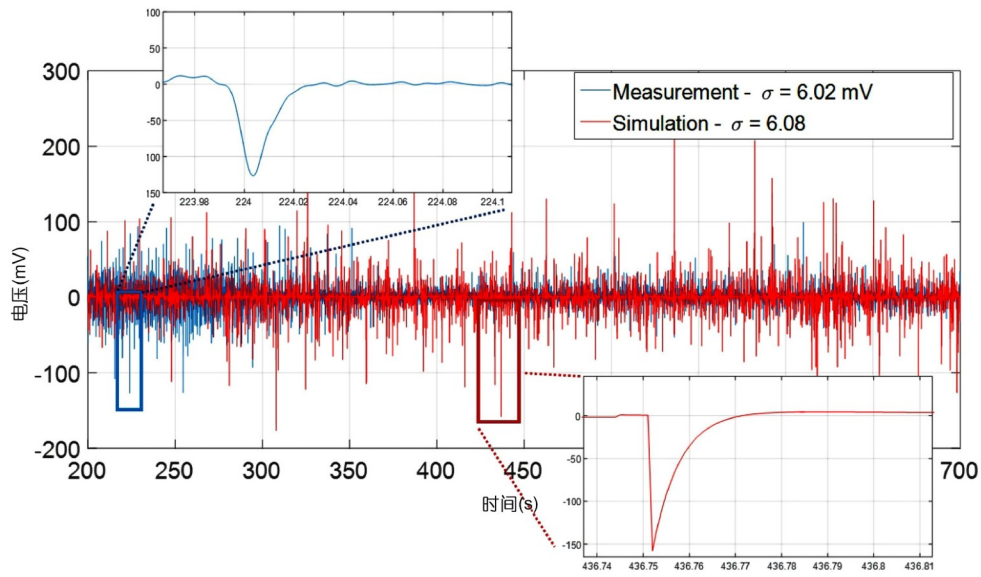


图 15 (网络版彩图)等效电路模型的仿真与测量结果对比^[139]

Figure 15 (Color online) Comparison of simulation and measurement results of equivalent circuit model^[139].

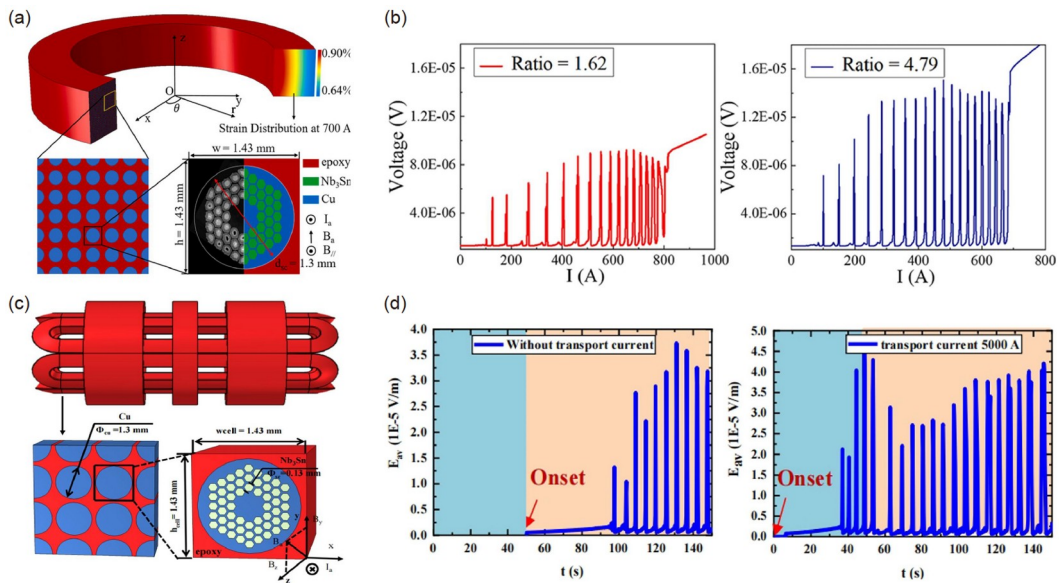


图 16 (网络版彩图) (a), (c) 超导线圈的原理图和代表性单元; (b), (d) 螺线管线圈和跑道型线圈中单根超导导线的磁通跳跃^[140,144]

Figure 16 (Color online) (a), (c) Schematic diagrams and representative unit of superconducting coils. (b), (d) Flux jumps of single superconducting wire in solenoid-type coils and racetrack coils^[140,144].

部分或全部的多场耦合^[140–144], 探索了不同参数对超导导线磁通跳跃和失超的影响规律, 并且数值模拟与实验结果符合很好, 目前我们正在大力开展上千匝超导线圈的磁-热不稳定理论模拟研究。

2.3 力学反作用

由于Nb₃Sn超导磁体在缠绕、热处理、预压缩和低温冷却过程中所受的热应力以及操作过程中由于过

高的磁场和载流密度引起的电磁力的综合作用, 峰值应力往往能达到150 MPa以上^[38,145]. 在10 T以上磁场产生的洛伦兹力下保持Nb₃Sn线圈的机械完整性将是一个重大挑战.

1977年, Larbalestier等人^[146]通过实验给出了4.2 K时Nb₃Sn超导线在拉伸作用下完整的应力-应变曲线, 研究人员对Nb₃Sn超导线的力学行为开展了大量的实验研究. 为观测某一种或多种作用力对超导线力学性能的影响, 设计出Pacman^[147], WASP^[148]以及TAR-

SIS^[149]等实验装置. van den Eijnden等人^[150]在4.2 K时测得了四种不同类型Nb₃Sn超导线在拉伸作用下的应力应变曲线, Allen等人^[151]研究了纯弯曲下Nb₃Sn超导线的力学行为, 兰州大学周又和团队^[8]开发了针对超导材料的多场性能测试仪器(图17), 同时组内对Nb₃Sn的力学性能进行了系统的测试研究^[8,152,153](图18), 并且建立了相应的力学参数基础数据库, 目前也有少量实验直接对Nb₃Sn超导线圈进行力学响应测试^[133,145,154].

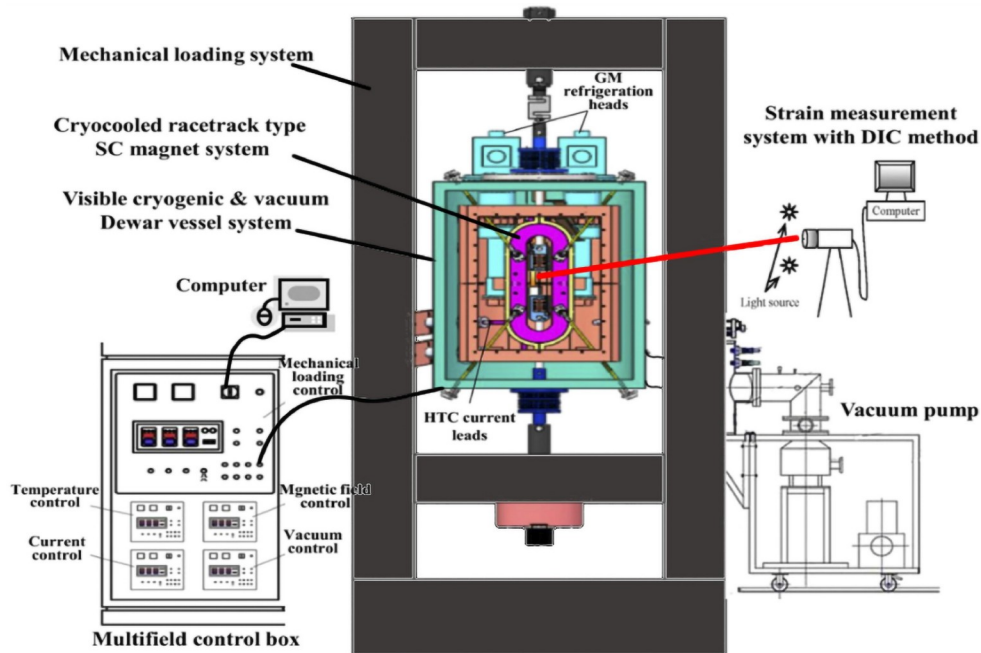


图 17 (网络版彩图)多场性能测试仪器^[8]

Figure 17 (Color online) Multi-field performance test instrument [8].

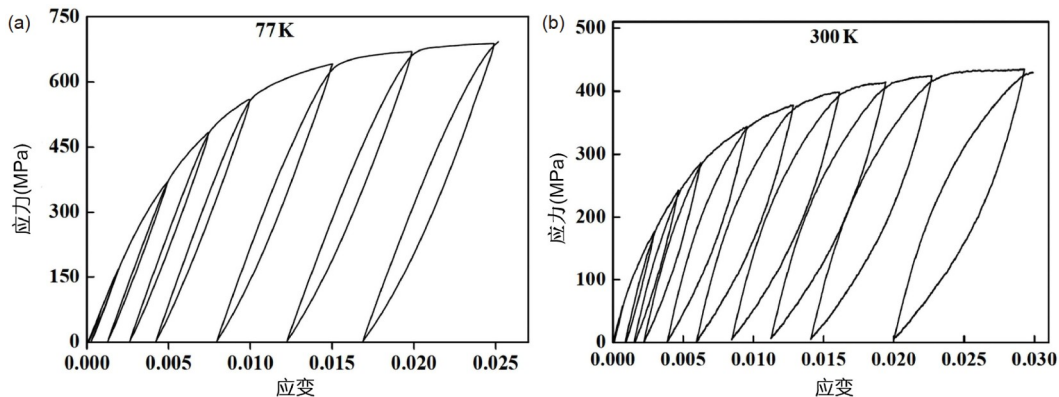


图 18 温度分别为(a) 77 K和(b) 300 K的Nb₃Sn 超导线的应力-应变曲线^[152]

Figure 18 Stress-strain curve of Nb₃Sn superconducting wires with temperature of (a) 77 K and (b) 300 K [152].

通过实验可以对 Nb_3Sn 超导线和超导磁体在复杂力学作用下的力学响应进行直接的测试, 但是截至目前, 还无法通过实验手段获取单根超导线内部各组分的受力情况. 为了降低磁体制造成本, 在磁体设计的早期阶段和磁体励磁到目标磁场之前, 对 Nb_3Sn 超导线和 Nb_3Sn 超导线圈进行有力的有限元分析(FEA)是至关重要的. Easton等人^[155]基于复合材料的应力平衡原理提出了一个可以预测 Nb_3Sn 超导线残余应变的简单解析方法. Mitchell^[156–158]建立了一维的弹塑性有限元模型分析了温度对 Nb_3Sn 超导线力学行为的影响. Ahoranta等人^[159]于2008年建立了 Nb_3Sn 超导线横截面的二维弹塑性有限元模型. Boso等人^[160–162]基于复合材料中的自洽方法提出了GSCL (Generalized Self-Consistent Like)理论计算方法计算超导导线的力学行为. Wang等人^[163]给出了考虑芯丝螺旋结构后的超导线在横向荷载作用下的应变状态. Ahoranta等人^[164]基于三维力学平衡方程分析了在轴向拉伸载荷作用下扭矩和热应力对芯丝应变的影响. Jing等人^[61,165]采用复合材料细观力学中的Mori-Tanaka方法分析了 Nb_3Sn 超导导线的轴向力学行为和绞扭效应. 由于 Nb_3Sn 材料的脆性,

大量实验观测到在力学作用下超导线芯丝会出现损伤断裂^[40–42,164], Luo和Zheng^[166]基于Curtin-Zhou理论研究了二维超导线截面考虑芯丝损伤断裂后的力学行为, Wang等人^[167]建立了多芯丝绞扭模型研究了考虑芯丝绞扭、断裂以及拔出的情况下单根超导线在横向载荷作用下的力学响应(图19), Wang^[168]基于芯丝束破坏的半解析方法给出了多芯丝超导线材的拉伸曲线, Jiang等人^[152]建立了 Nb_3Sn 超导导线的损伤演化模型, 分析了疲劳试验的能量耗散规律. Ru等人^[169]提出了基于TEMLOP和FEMCAM的三维螺旋模型, 以模拟在横向载荷下 Nb_3Sn 股线之间的接触力, 并采用圆柱体二维接触模型计算了接触应力引起的最大线应变和压痕深度, 分析了压痕深度与交叉角和接触力的关系. Zhu等人^[170]提出了一种新的二维离散元法(DEM)和相关模拟方法, 分析横向电磁力作用下ITER CICC结构力学特性, 以定量表征横向电磁载荷下CICC截面中 Nb_3Sn 股线的接触力行为. Jiang等人^[171]分析了 Nb_3Sn 卢瑟福电缆在轴向拉伸、循环拉伸和横向压缩条件下的力学行为, 结果表明摩擦系数、铺设角度和电缆芯对电缆力学性能有重要影响. 超导磁体力学有限元分

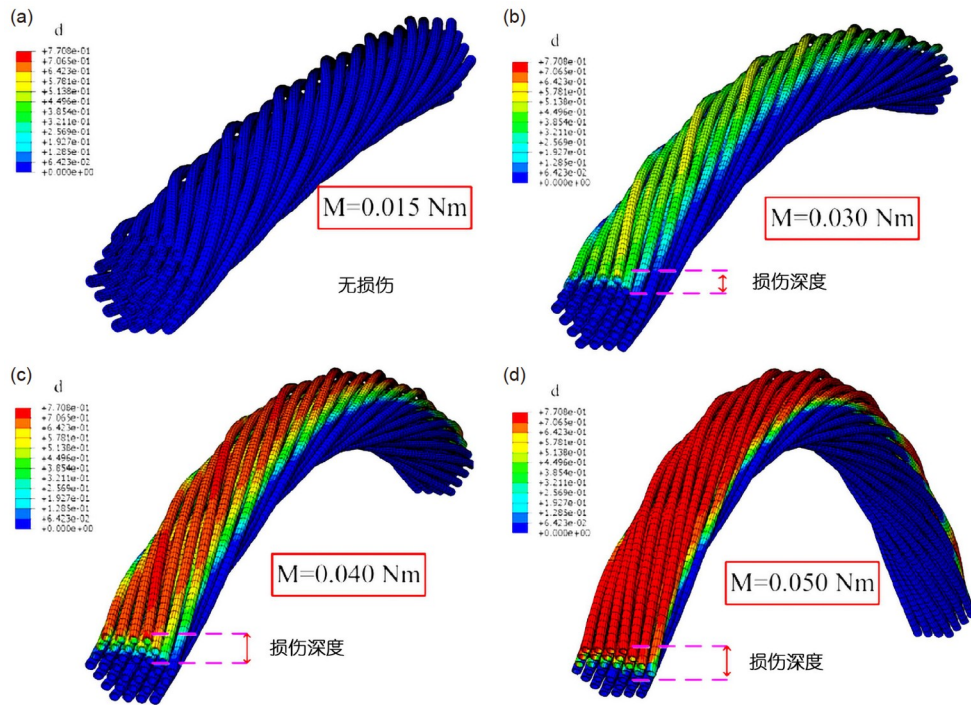


图 19 (网络版彩图) Nb_3Sn 超导线芯丝在 0.015 Nm (a), 0.030 Nm (b), 0.040 Nm (c)以及0.050 Nm (d)载荷下的损伤演化分布^[186]
Figure 19 (Color online) Damage evolution distribution of the filament of Nb_3Sn superconductor wires and its expansion with increasing load of 0.015 Nm (a), 0.030 Nm (b), 0.040 Nm (c), and 0.050 Nm (d) [186].

析主要有三种方法: 第一种方法是假设线圈是二维(2D)的; 第二种方法是使用弯曲的块表示对整个三维(3D)线圈进行建模^[154]; 第三种方法是采用多尺度均质化方法分析超导磁体的力学响应. 二维分析是超导磁体工程分析的主要工具^[172-175], 由于网格数量不大, 可以成功地对电缆和绝缘层超导线圈的细节进行建模, 然而二维模型无法模拟线圈的纵向热收缩, 且只适用于几何形状呈轴对称的磁体, 如果用于跑道型线圈, 可能导致二维模型对线圈的应力估计出现偏差. 三维分析在许多项目中被用于超导线圈的应力和应变计算^[176-178]. 三维分析使用弯曲的块对单个线圈进行建模, 能够模拟线圈冷却期间的热收缩. 这些块虽然能够捕获线圈的整体形状, 但它们不能在超导线和超导芯丝的水平上捕捉局部的真实应力-应变状态. 国内外学者提出使用多尺度均质化方法来分析超导磁体或线圈, 以克服上述第一种和第二种方法的不足. 目前许多科研单位, 如美国托马斯杰斐逊加速器实验室、欧洲

核子研究中心、东京国家核聚变科学研究所、兰州大学、中国科学院电工研究所、中国科学院近代物理研究所、中国科学院等离子体物理研究所等单位的学者使用有限元软件并结合均质化方法对超导磁体线圈在缠绕、热处理、预压缩、冷却和励磁过程中的力学行为展开了广泛的研究^[154,179-184], 最近, 西北工业大学薛存与长安大学何安等人^[185]提出了一种快速的双向均质化分析方法, 如图20所示, 该分析方法可在3D尺度上实现对 Nb_3Sn 超导磁体不同组分材料的应力-应变分布的精确模拟.

Nb_3Sn 超导体的损伤断裂是其临界性能不可逆退化的主要原因. 为了评估 Nb_3Sn 超导体脆性断裂行为的不利影响, 研究人员进行了大量的实验. 这些实验包括 Nb_3Sn 单根芯丝(图21)、各种 Nb_3Sn 线、卢瑟福电缆和线圈的力学性能的测试, 以及在耦合场下关键性能的测试^[41,187-189]. 引起 Nb_3Sn 超导体断裂的因素有很多, 包括制造工艺的不同^[190]、微观结构的缺

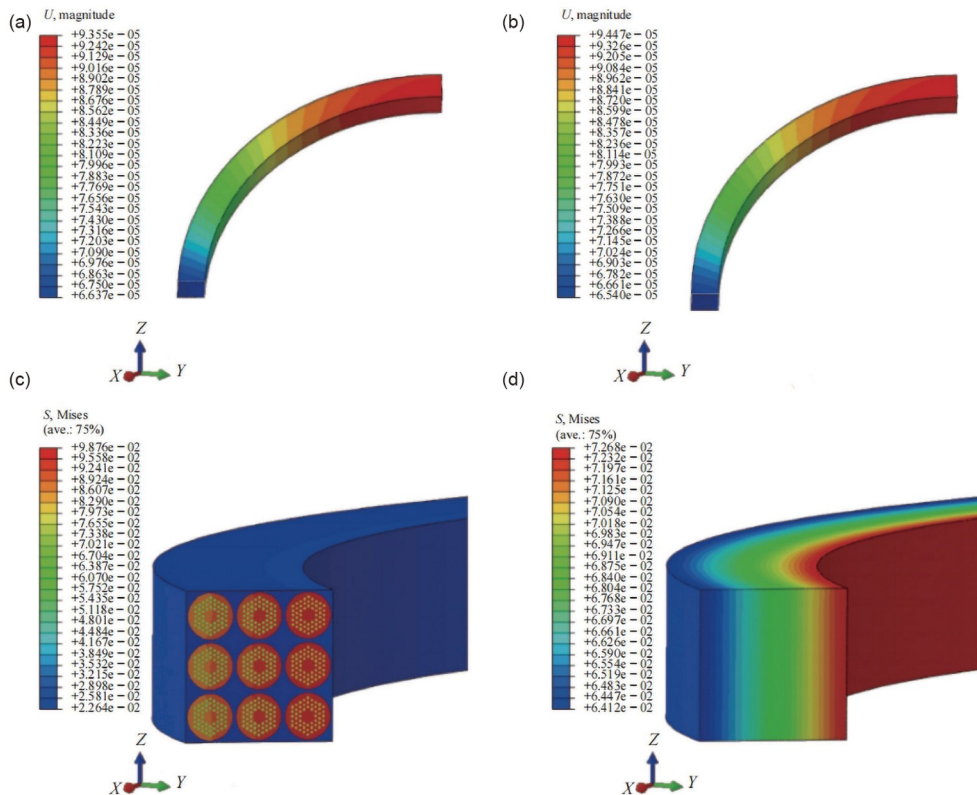


图 20 (网络版彩图) Nb_3Sn 超导线的力学分析: 线圈模型的真实结构(a)和等效模型(b)的位移场云图; 真实结构(c)和等效模型(d)的Mises应力云图^[185]

Figure 20 (Color online) Mechanical analysis of Nb_3Sn superconducting wires: displacement distributions of (a) actual structure and (b) equivalent model of superconducting coils. Mises stress distributions of (c) actual structure and (d) equivalent model ^[185].

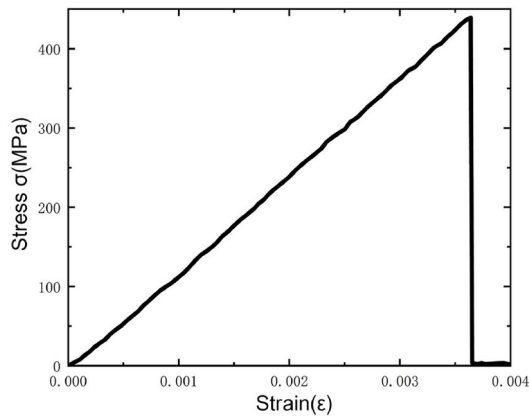


图 21 单根Nb₃Sn芯丝轴向拉伸应力-应变曲线^[188]

Figure 21 Axial tensile stress-strain curve of a single Nb₃Sn filament [188].

陷^[42,191]、冷却产生的残余应力^[192]和高洛伦兹力引起的股线运动^[193]等。Yong等人^[194]基于断裂力学一般理论和裂纹桥接模型,研究了Nb₃Sn超导导线中细丝的中心裂纹问题。为了进一步观测和研究Nb₃Sn线的内部特征,Bagni等人^[195]将X射线显微断层扫描与机器学习相结合,能够表征Nb₃Sn线在热处理过程中产生的孔洞的分布和形态,为建模和预测Nb₃Sn绞线的力电行为提供了有力的分析工具。Nb₃Sn超导体具有复杂的多尺度结构特征,因此需要从微观尺度对Nb₃Sn超导体的断裂行为进行模拟。太原理工大学乔力团队^[196]采用分子动力学模拟方法,研究了在拉伸载荷作用下Nb₃Sn单晶的断裂机制和裂纹扩展。West和Rawlings^[197]通过透射和扫描电子显微镜观察到,多晶Nb₃Sn以晶间断裂方式失效,并且没有观察到任何先前存在的位错。基于这一观测结果,Ding等人^[198]开发并验证了考虑晶间断裂的多晶Nb₃Sn有限元模型和两种Nb₃Sn超导线材的详细有限元模型,使用的模拟方法可以推广到不同布局和制造工艺的Nb₃Sn超导线材的断裂和损伤分析。

超导磁体在运行过程中受力学反作用的影响,超导材料性能出现退化并且出现材料破坏,进而导致超导磁体的失超甚至装置损坏^[199–201]。Ghosh等人^[202]将Nb₃Sn线材轧制成不同厚度的绞线,通过光学显微镜观察到超导导线边缘的过度变形导致芯丝的严重变形和其扩散屏障的破裂,测量了这些绞线的临界电流和磁化性能。发现轧制之后的绞线临界电流严重退化,并导致发生磁通跳跃的磁场区间增大,且使得原本幅度

较大的磁通跳跃转化为高频次、小幅度的磁通跳跃。Barzi等人^[101]研究了Nb₃Sn超导导线变形对磁化强度的影响,同样也是将反应前的Nb₃Sn超导导线轧制成不同尺寸。通过测量分析变形前后样品的磁化曲线,发现0.5和0.6 mm轧制Nb₃Sn线的磁化强度大于未轧制的超导导线,验证了这种变形水平下发生了芯丝合并的假设。Sumption等人^[203]研究了超导电缆边缘变形对Nb₃Sn的RRR和磁化的影响,得出了边缘部分的磁化强度小于直线部分,且电缆边缘变形对边缘处Nb₃Sn超导导线RRR值的影响大于边缘磁化的影响。Zhou等人^[204]研究了不可逆应变和芯丝断裂对Nb₃Sn超导导线交流损耗的影响,发现施加周期性循环弯曲应变的超导导线磁化强度明显降低。Freda等人^[205]研究了大变形对Nb₃Sn超导导线超导性能的影响,将Nb₃Sn超导导线轧制不同厚度,发现随着变形的增大,Nb₃Sn超导导线整体磁化性能逐渐增强。我们进一步通过数值模型研究了力学应变对超导导线磁-热稳定性的影响^[140],由于Nb₃Sn极强的应变敏感性,其临界电流密度会随着应变的增大而迅速衰减^[56,151],并且在高磁场下临界电流密度衰退程度越显著,这就会对Nb₃Sn超导线圈的磁-热稳定性造成很大的负面影响。

在超导磁体的研发设计过程中,电工界将力学响应作为整个过程的输出量从而对超导线圈结构进行强度校核,以此来保证线圈结构不发生破坏,而力学因素作为影响超导材料电磁性能的关键因素,会反作用于超导线圈,可能导致超导磁体提前失超,这也从侧面证明了力学反作用导致的磁体临界电流下降是磁体设计制备中遇到的最核心棘手问题,严重情况甚至会导致超导磁体的失超和破坏。而目前缺少力学变形下Nb₃Sn超导线圈磁-热不稳定性的研究。为了更好地研发设计出达到预期目标的超导磁体,必须要在数值理论分析过程中考虑力学反作用对超导磁体磁-热稳定性的影响。

3 Nb₃Sn超导线圈磁-热稳定性研究的困难和挑战

目前制备高场Nb₃Sn超导磁体系统,大多数造价几百万元至几千万元。然而,超导磁体一旦制备完成,出现磁-热不稳定性问题很难通过后期修补进行改造,从而显著提高制造成本,造成巨大的经济损失。因此,

超导磁体设计完成后, 对超导磁体损耗以及磁-热稳定性进行精细的数值模拟, 不仅能够校验超导磁体能否安全稳定运行, 而且反过来为超导磁体优化设计提供重要的理论基础. 因此, 数值模拟高场超导磁体的磁-热稳定性, 为超导磁体的设计、制备和运行提供技术支撑, 不仅具有重要的科学意义, 而且有重要的工程应用价值.

然而, 超导强非线性电磁本构关系, 以及高场超导磁体复杂结构, 给数值模拟全尺寸超导线圈电磁响应、热损耗和磁-热稳定性带来了巨大挑战, 具体难点体现在以下5个方面.

(1) Nb_3Sn 复杂的电磁本构关系及临界电流对力学的敏感性

工程临界电流由磁通涡旋钉扎决定, 从微观磁通涡旋研究超导电磁的难点主要有: ① 磁通涡旋尺寸很小, 对于 Nb_3Sn 材料来说, 涡旋尺寸大于3–4 nm; ② 宏观的临界电流是由大量涡旋行为的宏观统计决定; ③ 磁通涡旋与多物理因素相互作用, 如钉扎缺陷、其他涡旋、边界、电流等. 从宏观上, Nb_3Sn 超导线的本构关系式是一个力-电-磁-热多场耦合的复杂关系式. 运行于高磁场和大载流环境下的超导线圈, 强大的洛伦兹力产生的显著应力、应变会导致超导材料性能衰减问题变得尤为严重. 而当 Nb_3Sn 材料发生力学变形后, 出现复杂的临界电流与应变相关性, 如可逆性和不可逆性, 其背后更深的物理机理仍然不明确. 应变不仅影响临界电流, 而且还会进一步影响超导线圈的磁-热稳定性. 如图22所示, 超导线圈的磁-热稳定性问题是一个力-电-磁-热多物理场耦合问题, 涉及的物理量众多, 各物理量之间相互耦合, “牵一发而动全身”.

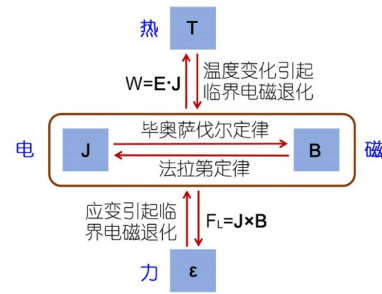


图 22 (网络版彩图)超导材料的多物理场耦合示意图

Figure 22 (Color online) Diagram of multi-physical field coupling for superconducting materials.

(2) 跨尺度几何结构

为了增强磁-热稳定性, 目前工程上常见的超导线都采用了多芯丝结构, 芯丝的数量几十至上百根. 超导线圈中除了 Nb_3Sn 之外, 芯丝周围的基体材料是铜, 而超导线与超导线之间又采用了玻璃纤维进行绝缘处理, 并经过环氧树脂固化成米级结构的超导线圈. 如图23所示, 从微米级超导芯丝通过绞扭形成毫米级超导线, 然后几千匝超导线经过绕制固化成米级的超导线圈, 是非常复杂的跨尺度复合结构问题.

(3) 电磁计算不能等效处理

由于超导线圈里面不同匝超导线之间是绝缘的, 如图24所示, 超导线圈实际励磁过程中每一根超导线都存在电流分布, 而如果将超导线圈横截面等效为一个块材的横截面进行研究, 那么电流就从边缘开始逐渐往里边穿透, 这样会导致电磁响应和热损耗的分析不正确. 因此, 针对块材、薄膜的多物理场数值模型不适用于分析超导线圈相互绝缘的多匝结构, 不能简单进行等效处理. 此外, 超导线圈中超导线的芯丝一

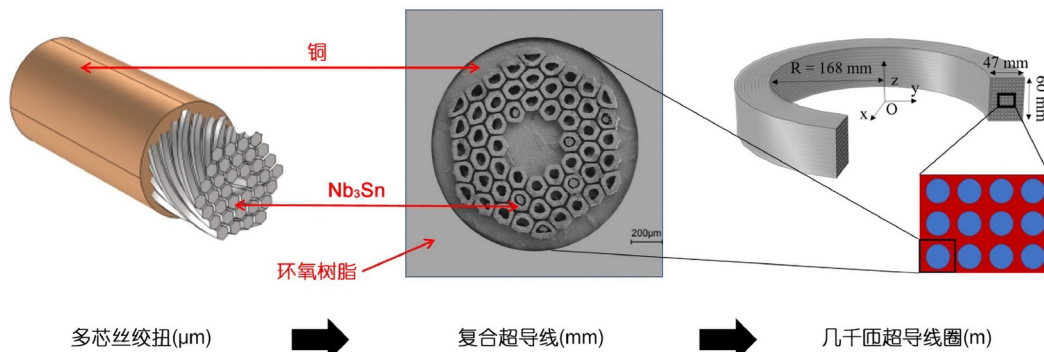
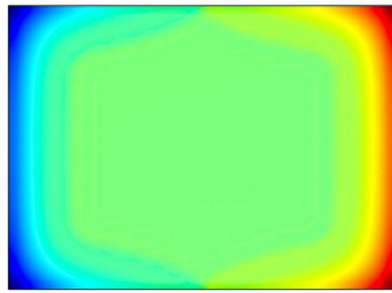
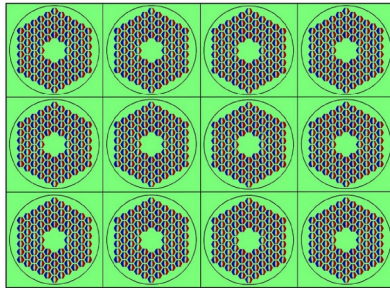


图 23 (网络版彩图)超导线横截面多芯丝结构图

Figure 23 (Color online) Multi-filament wire structure diagram in cross section of superconducting wire.



等效方法下电流密度分布



非等效方法下电流密度分布

图 24 (网络版彩图)均质化等效方法不适用分析超导线圈相互绝缘的多匝结构

Figure 24 (Color online) The homogenized equivalent method is not suitable for analyzing multi-turn structures in which superconducting coils are insulated from each other.

般采用绞扭方式, 所以还需要考虑超导芯丝的绞扭效应对超导线圈横截面电磁计算的影响。

(4) 强非线性

超导材料的电磁本构方程具有强非线性(图25), 当网格单元电流接近 J_c 时, 磁通蠕动系数 n 越大, 电阻、电场变化越剧烈, 数值计算很难收敛。此外, 强非线性还导致热损耗精度会急速下降, 如当 $n = 80$, 电流相对误差为1%时, 发热功率相对误差达到120%。

(5) 温度梯度效应明显

超导线圈由 Nb_3Sn 、铜以及环氧树脂组成, 三种材料之间的导热系数如表3所示, 铜的导热系数在 $300\text{--}1000\text{ W/(m K)}$, 而环氧树脂的导热系数在 $0.03\text{--}0.05\text{ W/(m K)}$, 当磁通跳跃发生时, 热量由超导导线向环氧树脂传导, 由于环氧树脂的导热系数很低, 因此超导线圈的温度分布会出现明显的梯度效应, 如

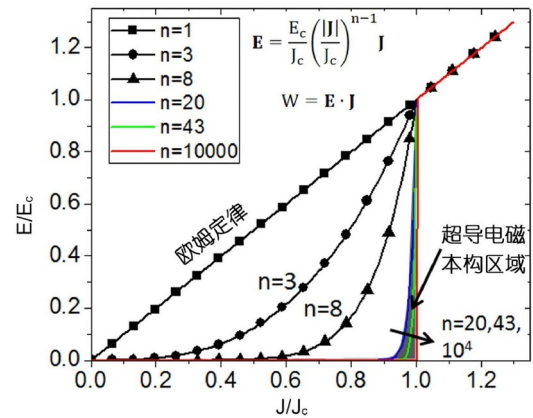


图 25 (网络版彩图)超导电磁本构的强非线性

Figure 25 (Color online) Strong nonlinearity of superconducting electromagnetic constitutive.

表 3 材料的导热系数

Table 3 Heat conductivity of materials

铜	环氧树脂	Nb_3Sn
300–1000 W/(m K)	0.03–0.05 W/(m K)	0.04–0.1 W/(m K)

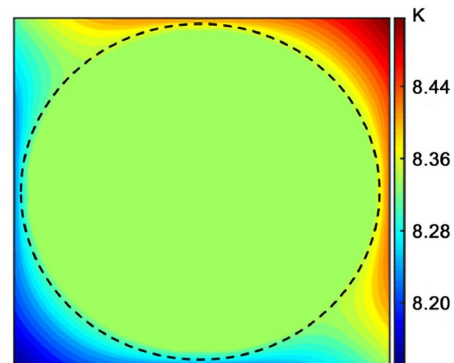


图 26 (网络版彩图)超导导线的温度梯度效应

Figure 26 (Color online) The temperature gradient effect of superconducting wire.

图26所示, 准确计算出磁通跳跃时的温度分布对数值模拟超导线圈的磁通跳跃至关重要。

4 结论

未来能源变革、先进医疗、重大科学仪器装备对磁场的要求不断提高, Nb_3Sn 线圈是制备高场磁体($>10\text{ T}$)的关键核心部件。然而目前国内外在研制 Nb_3Sn 高场磁体时观测到大量磁通跳跃现象, 导致超

导载流能力急速下降,严重影响失超保护,甚至诱发失超. 由于临界电流密度对力学应变敏感,所以力学反作用下 Nb_3Sn 线圈磁-热不稳定性成为制约高场超导磁体研制的的关键问题,而数值模拟方法是研究该问题最为经济有效的思路,避免研制过程中低效的磁体训练和高昂的试错成本.

本文阐述了从 Nb_3Sn 临界电流对力学敏感性、

Nb_3Sn 线圈的磁-热不稳定性以及力学反作用等方面开展深入研究的重要性,并回顾了目前的研究现状,分析了理论研究力学反作用下 Nb_3Sn 线圈磁-热不稳定所面临的困难和挑战,有助于今后理论研究 Nb_3Sn 线圈磁-热不稳定性并探索进一步抑制磁通跳跃,助力我国早日攻克 Nb_3Sn 高场磁体难题,实现 Nb_3Sn 高场磁体的大规模商业应用.

参考文献

- 1 Kamerlingh O H. On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears. *Commun Phys Lab Univ Leiden*, c, 1911, 124
- 2 Meissner W, Ochsenfeld R. Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 1933, 21: 787–788
- 3 Josephson B D. Possible new effects in superconductive tunnelling. *Phys Lett*, 1962, 1: 251–253
- 4 Josephson B D. Supercurrents through barriers. *Adv Phys*, 1965, 14: 419–451
- 5 Bray J W. Superconductors in applications; some practical aspects. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2533–2539
- 6 Song Y T, Wu S T, Li J G, et al. Concept design of CFETR Tokamak machine. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 503–509
- 7 Zhao H W, Sun L T, Guo J W, et al. Superconducting ECR ion source: From 24–28 GHz SECRAL to 45 GHz fourth generation ECR. *Rev Sci Instruments*, 2018, 89: 052301
- 8 Wang X, Zhou Y, Guan M, et al. A versatile facility for investigating field-dependent and mechanical properties of superconducting wires and tapes under cryogenic-electro-magnetic multifields. *Rev Sci Instruments*, 2018, 89: 085117
- 9 Bernstein P, Noudem J. Superconducting magnetic levitation: Principle, materials, physics and models. *Supercond Sci Technol*, 2020, 33: 033001
- 10 Zhang P X, Yan G, Feng J Q, et al. Development status and prospects of superconducting materials for electric power applications (in Chinese). *Chin J Eng Sci*, 2023, 25: 60–67 [张平祥, 闫果, 冯建情, 等. 强电用超导材料的发展现状与展望. *中国工程科学*, 2023, 25: 60–67]
- 11 Xu Y, Lu K, Shen G, et al. Qualification activities of the spliced joint for CFETR. *Ann Nucl Energy*, 2022, 178: 109336
- 12 Zimmermann F. LHC/FCC-based muon colliders. In: *The Ninth International Particle Accelerator Conference*. Vancouver: Tri-University Meson Facility, 2018
- 13 Wang Y, Wang Q, Liu J, et al. Insert magnet and shim coils design for a 27 T nuclear magnetic resonance spectrometer with hybrid high and low temperature superconductors. *Supercond Sci Technol*, 2020, 33: 064004
- 14 Zhang P X, Yan G, Feng G Q, et al. Development status and prospects of superconducting materials for electric power applications. *Strategic Study Chin Acad Eng*, 2023, 25: 60–67
- 15 Scanlan R M, Malozemoff A P, Larbalestier D C. Superconducting materials for large scale applications. *Proc IEEE*, 2004, 92: 1639–1654
- 16 Fietz W H, Barth C, Drotziger S, et al. Prospects of high temperature superconductors for fusion magnets and power applications. *Fusion Eng Des*, 2013, 88: 440–445
- 17 Ma Y W. Recent developments of practical superconducting materials (in Chinese). *Physics*, 2015, 44: 674–683 [马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望. *物理*, 2015, 44: 674–683]
- 18 Rossi L. The LHC main dipoles and quadrupoles toward series production. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2003, 13: 1221–1228
- 19 Parrell J A, Field M B, Zhang Y, et al. Advances in Nb_3Sn strand for fusion and particle accelerator applications. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 1200–1204
- 20 Xu X. A review and prospects for Nb_3Sn superconductor development. *Supercond Sci Technol*, 2017, 30: 093001
- 21 Liu X, Zheng J, Du S, et al. Eddy current loss of CFETR TF case during plasma disruption. *Fusion Eng Des*, 2020, 161: 111915
- 22 Devred A, Backbier I, Bessette D, et al. Status of ITER conductor development and production. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2012, 22: 4804909
- 23 Reda R, Zanza A, Mazzoni A, et al. An update of the possible applications of magnetic resonance imaging (MRI) in dentistry: A literature review. *J Imag*, 2021, 7: 75

- 24 Sun L, Wu W, Wu B, et al. Development of a 1/2-length prototype high field Nb₃Sn magnet for the 4th generation ECR ion source. *Acta Mech Sin*, 2024, 40: 723376
- 25 Wang C, Wang Y, Shi J, et al. Development of superconducting model dipole magnets beyond 12 T with a combined common-coil configuration. *Supercond Sci Technol*, 2023, 36: 065006
- 26 Xu A, Zhu Y, Wang J, et al. Experimental research of the new developed high-J_c Nb₃Sn superconducting strand for 14 T MRI magnet. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2021, 31: 1–4
- 27 Matthias B T, Geballe T H, Geller S, et al. Superconductivity of Nb₃Sn. *Phys Rev*, 1954, 95: 1435
- 28 Nijhuis A, Ilyin Y, Wessel S, et al. Summary of ITER TF Nb₃Sn strand testing under axial strain, spatial periodic bending and contact stress. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 1516–1520
- 29 Tommasini D, Toral F. Overview of magnet design options: Deliverable D5.1. Technical Report. European Circular Energy-Frontier Collider Study, 2016
- 30 Parrell J A, Youzhu Zhang J A, Field M B, et al. Internal tin Nb₃Sn conductors engineered for fusion and particle accelerator applications. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2573–2579
- 31 Chabanenko V V, D'yachenko A I, Zalutskii M V, et al. Magnetothermal instabilities in type II superconductors: The influence of magnetic irreversibility. *J Appl Phys*, 2000, 88: 5875–5883
- 32 Vysotsky V S, Takayasu M, Jeong S, et al. Voltage spikes in superconducting Cable-In-Conduit Conductor under ramped magnetic fields. Part 2: Analysis of loop inductances and current variations associated with the spikes. *Cryogenics*, 1998, 38: 387–395
- 33 Feher S, Bordini B, Carcagno R, et al. Sudden flux change studies in high field superconducting accelerator magnets. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 1591–1594
- 34 Bordini B. Thermo-magnetic Instabilities in Nb₃Sn Superconducting Accelerator Magnets. Dissertation for Doctoral Degree. Washington DC: Department of Energy, 2006
- 35 Bajas H, Ambrosio G, Ballarino A, et al. Test result of the short models MQXFS3 and MQXFS5 for the HL-LHC upgrade. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 1–6
- 36 Steeves M M, Hoenig M O, Minervini J V, et al. The US-DPC, a poloidal coil test insert for the Japanese demonstration poloidal coil test facility. *IEEE Trans Magn*, 1988, 24: 1307–1310
- 37 Bordini B, Rossi L. Self field instability in high-J_c Nb₃Sn strands with high copper residual resistivity ratio. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2470–2476
- 38 Juchno M, Zhu L, Hafalia A, et al. Mechanical design of a Nb₃Sn superconducting magnet system for a 45 GHz ECR ion source. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2017, 28: 1–6
- 39 Zhang X, Qin J. Mechanical effects: Challenges for high-field superconducting magnets. *Natl Sci Rev*, 2023, 10: nwac220
- 40 Shen F, Zhang H, Huang C, et al. Experimental study on strain sensitivity of Internal-Tin Nb₃Sn superconducting strand based on non-destructive technology. *Physica C-Supercond its Appl*, 2021, 584: 1353784
- 41 Jewell M C, Lee P J, Larbalestier D C. The influence of Nb₃Sn strand geometry on filament breakage under bend strain as revealed by metallography. *Supercond Sci Technol*, 2003, 16: 1005–1011
- 42 Nijhuis A, Miyoshi Y, Jewell M C, et al. Systematic study on filament fracture distribution in ITER Nb₃Sn strands. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2628–2632
- 43 Zhou Y H, Liu C, Shen L, et al. Probing of the internal damage morphology in multilayered high-temperature superconducting wires. *Nat Commun*, 2021, 12: 3110
- 44 Kim Y B, Hempstead C F, Strnad A R. Critical persistent currents in hard superconductors. *Phys Rev Lett*, 1962, 9: 306–309
- 45 Bean C P. Magnetization of hard superconductors. *Phys Rev Lett*, 1962, 8: 250–253
- 46 Paasi J, Lahtinen M. AC losses in high-temperature superconductors: Revisiting the fundamentals of the loss modelling. *Phys C-Supercond*, 1998, 310: 57–61
- 47 Sugiura T, Fujimori H. Mechanical resonance characteristics of a high-T_c superconducting levitation system. *IEEE Trans Magn*, 1996, 32: 1066–1069
- 48 Sugiura T, Tashiro M, Uematsu Y, et al. Mechanical stability of a high-T_c superconducting levitation system. *IEEE Trans Appl Supercond*, 1997,

- 7: 386–389
- 49 Yoshida Y, Uesaka M, Miya K. Magnetic field and force analysis of high- T_c superconductor with flux flow and creep. *IEEE Trans Magn*, 1994, 30: 3503–3506
 - 50 Yoshida Y. Evaluation of dynamic magnetic force of high T_c superconductor with flux flow and creep. *Int J Appl Electromagn Mater*, 1993, 5: 301–304
 - 51 Gou X F. Analysis of Static and Dynamic Characteristics of High-Temperature Superconducting Suspensions (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2004 [苟晓凡. 高温超导悬浮体的静、动力特性分析. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2004]
 - 52 Kim Y B, Hempstead C F, Strnad A R. Magnetization and critical supercurrents. *Phys Rev*, 1963, 129: 528–535
 - 53 Fietz W A, Beasley M R, Silcox J, et al. Magnetization of superconducting Nb-25%Zr wire. *Phys Rev*, 1964, 136: A335–A345
 - 54 Anderson P W, Kim Y B. Hard superconductivity: Theory of the motion of abrikosov flux lines. *Rev Mod Phys*, 1964, 36: 39–43
 - 55 Zeldov E, Amer N M, Koren G, et al. Optical and electrical enhancement of flux creep in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ epitaxial films. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 3093–3096
 - 56 Calzolaio C, Mondonico G, Ballarino A, et al. Electro-mechanical properties of PIT Nb_3Sn wires under transverse stress: Experimental results and FEM analysis. *Supercond Sci Technol*, 2015, 28: 055014
 - 57 De Marzi G, Bordini B, Baffari D. On the mechanisms governing the critical current reduction in Nb_3Sn rutherford cables under transverse stress. *Sci Rep*, 2021, 11: 7369
 - 58 Puthran K, Barth C, Ballarino A, et al. Onset of mechanical degradation due to transverse compressive stress in Nb_3Sn rutherford-type cables. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2023, 33: 1–6
 - 59 Ekin J W. Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part 1: Basic relationship and application to Nb_3Sn conductors. *Cryogenics*, 1980, 20: 611–624
 - 60 Valentinis D F, Berthod C, Bordini B, et al. A theory of the strain-dependent critical field in Nb_3Sn , based on anharmonic phonon generation. *Supercond Sci Technol*, 2013, 27: 025008
 - 61 Jing Z, Yong H D, Zhou Y H. Theoretical modeling for the effect of twisting on the properties of multifilamentary Nb_3Sn superconducting strand. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 23: 6000307
 - 62 Gao P F. A Study on the Mechanical Behavior and Influence of Deformation on Critical Characteristics of High Temperature Superconducting Composite Strips (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2017 [高配峰. 高温超导复合带材力学行为及变形对临界特性影响的研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2017]
 - 63 Loria R, De Marzi G, Anzellini S, et al. The effect of hydrostatic pressure on the superconducting and structural properties of Nb_3Sn : *Ab-initio* modeling and SR-XRD investigation. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 27: 1–5
 - 64 De Marzi G, Morici L, Muzzi L, et al. Strain sensitivity and superconducting properties of Nb_3Sn from first principles calculations. *J Phys-Condens Matter*, 2013, 25: 135702
 - 65 Qiao L, Zheng X. A three-dimensional strain model for the superconducting properties of strained International Thermonuclear Experimental Reactor Nb_3Sn strands. *J Appl Phys*, 2012, 112: 113909
 - 66 Luo W. Research on Several Mechanical and Electrical Properties of Nb_3Sn Materials and Their Strands (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2012 [罗威. Nb_3Sn 材料及其股线的若干力学—电性能研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2012]
 - 67 Zhang R, Gao P, Wang X, et al. First-principles study on elastic and superconducting properties of Nb_3Sn and Nb_3Al under hydrostatic pressure. *AIP Adv*, 2015, 5: 107233
 - 68 Ding H, Gao Y. Analysis of the strain dependence of the superconducting critical properties of single-crystal and polycrystalline Nb_3Sn . *Supercond Sci Technol*, 2021, 34: 075006
 - 69 Lipavský P, Morawetz K, Koláček J, et al. Nonlinear theory of deformable superconductors: Ginzburg-Landau description. *Phys Rev B*, 2008, 78: 174516
 - 70 Yong H, Xue F, Zhou Y. Effect of strain on depairing current density in deformable superconducting thin films. *J Appl Phys*, 2011, 110: 033905
 - 71 Yong H, Zhou Y. Depairing current density in superconducting film with shear deformation. *J Appl Phys*, 2012, 111: 053929
 - 72 van der Laan D C, Haugan T J, Barnes P N. Effect of a compressive uniaxial strain on the critical current density of grain boundaries in

- superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 027005
- 73 Luo W, Zhu L-L, Zheng X-J. Grain size effect on electrical conductivity and giant magnetoresistance of bulk magnetic polycrystals. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 117502
- 74 Yue D, Zhang X, Zhou J, et al. Current transport of the [001]-tilt low-angle grain boundary in high temperature superconductors. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 232602
- 75 Godeke A. A review of the properties of Nb_3Sn and their variation with A15 composition, morphology and strain state. *Supercond Sci Technol*, 2006, 19: R68–R80
- 76 Suenaga M, Welch D O, Sabatini R L, et al. Superconducting critical temperatures, critical magnetic fields, lattice parameters, and chemical compositions of “bulk” pure and alloyed Nb_3Sn produced by the bronze process. *J Appl Phys*, 1986, 59: 840–853
- 77 Godeke A. Performance Boundaries in Nb_3Sn Superconductors. Dissertation for Doctoral Degree. Enschede: University of Twente, 2005. 90–365
- 78 Xu X, Sumption M D, Collings E W. Influence of heat treatment temperature and Ti doping on low-field flux jumping and stability in $(\text{Nb-Ta})_3\text{Sn}$ strands. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 095009
- 79 Kramer E J. Scaling laws for flux pinning in hard superconductors. *J Appl Phys*, 1973, 44: 1360–1370
- 80 Ghosh A K, Sperry E A, D’Ambra J, et al. Systematic changes of the Nb-Sn reaction with time, temperature, and alloying in restacked-rod-process (RRP) Nb_3Sn strands. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2580–2583
- 81 Xu X, Sumption M D, Bhartiya S, et al. Critical current densities and microstructures in rod-in-tube and tube type Nb_3Sn strands—Present status and prospects for improvement. *Supercond Sci Technol*, 2013, 26: 075015
- 82 Scanlan R M, Fietz W A, Koch E F. Flux pinning centers in superconducting Nb_3Sn . *J Appl Phys*, 1975, 46: 2244–2249
- 83 Schauer W, Schelb W. Improvement of Nb_3Sn high field critical current by a two-stage reaction. *IEEE Trans Magn*, 1981, 17: 374–377
- 84 Xu X, Sumption M, Peng X, et al. Refinement of Nb_3Sn grain size by the generation of ZrO_2 precipitates in Nb_3Sn wires. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 082602
- 85 Xu X, Sumption M D, Peng X. Internally oxidized Nb_3Sn strands with fine grain size and high critical current density. *Adv Mater*, 2015, 27: 1346–1350
- 86 Togano K, Asano T, Tachikawa K. Effects of magnesium addition to the Cu–Sn matrix in the composite-processed Nb_3Sn superconductor. *J Less Common Met*, 1979, 68: 15–22
- 87 Kurahashi H, Itoh K, Matsumoto S, et al. Effect of third-element additions on the upper critical field of bronze-processed Nb_3Sn . *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 3385–3388
- 88 Moshchalkov V V, Baert M, Metlushko V V, et al. Pinning by an antidot lattice: The problem of the optimum antidot size. *Phys Rev B*, 1998, 57: 3615–3622
- 89 Sadovskyy I A, Koshelev A E, Phillips C L, et al. Stable large-scale solver for Ginzburg-Landau equations for superconductors. *J Comput Phys*, 2015, 294: 639–654
- 90 Sadovskyy I A, Koshelev A E, Glatz A, et al. Simulation of the vortex dynamics in a real pinning landscape of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors. *Phys Rev Appl*, 2016, 5: 014011
- 91 Blair A I, Hampshire D P. Time-dependent Ginzburg-Landau simulations of the critical current in superconducting films and junctions in magnetic fields. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 1–5
- 92 Blair A I, Hampshire D P. Modeling the critical current of polycrystalline superconducting films in high magnetic fields. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 1–5
- 93 Blair AI, Hampshire DP. The critical current density of SNS Josephson junctions and polycrystalline superconductors in high magnetic fields. arXiv: 211002053
- 94 Zhang X. Calibration of Magnetic Flux Pinning Force in Deformed Nb_3Sn Composite Superconductors (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019 [张鑫. 变形 Nb_3Sn 复合超导体磁通钉扎力的标定. 博士学位论文. 太原: 太原理工大学, 2019]
- 95 Yang X J, He Y X, Zhang X, et al. Multiscale simulation of mechanical deformation effects on critical properties of Nb_3Sn high field composite superconductors. *Chin J Theor Appl Mech*, 2022, 54: 719–731 [杨绪佳, 何宇新, 张鑫, 等. Nb_3Sn 高场复合超导体临界性能力学变形效应的

多尺度模拟. 力学学报, 2022, 54: 719–731]

- 96 Alexander B. Simulations of Critical Currents in Polycrystalline Superconductors Using Time-Dependent Ginzburg-Landau Theory. Dissertation for Doctoral Degree. Durham: Durham University, 2021
- 97 Ren H X, Xue C. Improving critical current density of Nb₃Sn by optimizing pinning potential of grain boundary and grain size. *Supercond Sci Technol*, 2022, 35: 075001
- 98 Mints R G, Rakhmanov A L. Critical state stability in type-II superconductors and superconducting-normal-metal composites. *Rev Mod Phys*, 1981, 53: 551–592
- 99 Wipf S L. Review of stability in high temperature superconductors with emphasis on flux jumping. *Cryogenics*, 1991, 31: 936–948
- 100 Shiiki K, Kudo M. Anomalous hysteresis loss in superconducting wire due to flux jump. *J Appl Phys*, 1974, 45: 4071–4075
- 101 Kashikhin V V, Zlobin A V. Magnetic instabilities in Nb₃Sn strands and cables. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 1621–1624
- 102 Chabanenko V V, Nabialek A, Puźniak R, et al. Avalanche dynamics of magnetic flux in the Nb-Ti superconducting ring. *Supercond Sci Technol*, 2023, 36: 035010
- 103 Romero-Salazar C, Morales F, Escudero R, et al. Flux jumps in hot-isostatic-pressed bulk MgB₂ superconductors: Experiment and theory. *Phys Rev B*, 2007, 76: 104521
- 104 McHenry M E, Lessure H S, Maley M P, et al. Systematics of flux jumps and the stabilizing effect of flux creep in a La_{1.86}Sr_{0.14}CuO₄ single crystal. *Physica C-Supercond*, 1992, 190: 403–414
- 105 Zhou Y H, Yang X. Numerical simulations of thermomagnetic instability in high- T_c superconductors: Dependence on sweep rate and ambient temperature. *Phys Rev B*, 2006, 74: 054507
- 106 Gou X F, Zheng X J, Zhou Y H. Drift of levitated/suspended body in high- T_c superconducting levitation systems under vibration—Part I: A criterion based on magnetic force-gap relation for gap varying with time. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 3795–3802
- 107 Huang Y, Zhang X, Zhou Y H. Thermal properties of a cylindrical YBa₂Cu₃O_x superconductor in a levitation system: Triggered by nonlinear dynamics. *Supercond Sci Technol*, 2016, 29: 075009
- 108 Vestgård J I, Johansen T H, Galperin Y M. Nucleation and propagation of thermomagnetic avalanches in thin-film superconductors. *Low Temp Phys*, 2018, 44: 460–476
- 109 Johansen T H, Baziljevich M, Shantsev D V, et al. Dendritic flux patterns in MgB₂ films. *Supercond Sci Technol*, 2001, 14: 726–728
- 110 Blanco Alvarez S, Brisbois J, Melinte S, et al. Statistics of thermomagnetic breakdown in Nb superconducting films. *Sci Rep*, 2019, 9: 3659
- 111 Vestgård J I, Shantsev D V, Galperin Y M, et al. Lightning in superconductors. *Sci Rep*, 2012, 2: 886
- 112 Baruch-El E, Baziljevich M, Shapiro B Y, et al. Dendritic flux instabilities in YBa₂Cu₃O_{7-x} films: Effects of temperature and magnetic field ramp rate. *Phys Rev B*, 2016, 94: 054509
- 113 Jiang L, Xue C, Burger L, et al. Selective triggering of magnetic flux avalanches by an edge indentation. *Phys Rev B*, 2020, 101: 224505
- 114 Vestgård J I, Shantsev D V, Galperin Y M, et al. Dynamics and morphology of dendritic flux avalanches in superconducting films. *Phys Rev B*, 2011, 84: 054537
- 115 Vestgård J I, Galperin Y M, Johansen T H. The thermomagnetic instability in superconducting films with adjacent metal layer. *J Low Temp Phys*, 2013, 173: 303–326
- 116 Cooley L D, Chang S P, Ghosh K A. Magnetization, RRR and stability of Nb₃Sn strands with high sub-element number. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 2706–2709
- 117 Goodrich L F. Voltage versus magnetic field measurements on Nb₃Sn wires. In: *Advances in Cryogenic Engineering*, Colorado: Keystone, 2006
- 118 Ghosh A, Robins K, Sampson W. Magnetization measurements on multifilamentary Nb₃Sn and NbTi conductors. *IEEE Trans Magn*, 1985, 21: 328–331
- 119 Hancox R. Enthalpy stabilized superconducting magnets. *IEEE Trans Magn*, 1968, 4: 486–488
- 120 Rosenblum S S, Sheinberg H, Steyert W A. High Specific Heat Metals for Use in Superconducting Composites. Technical Report, Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, 1976
- 121 Xu X, Li P, Zlobin A V, et al. Improvement of stability of Nb₃Sn superconductors by introducing high specific heat substances. *Supercond Sci Technol*, 2018, 31: 03LT02
- 122 Kwasnitza K, Barbisch B, Hulliger F. Metallic materials for superconductor stabilization with very high specific heat and good thermal

- conductivity. *Cryogenics*, 1983, 23: 649–652
- 123 Goldfarb R B, Goodrich L F, Taeyoung Pyon L F, et al. Suppression of flux jumps in marginally stable niobium-tin superconductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2001, 11: 3679–3682
 - 124 Rosner C H. Flux-jumping behavior of some niobium-tin solenoids. *J Appl Phys*, 1965, 36: 1175–1176
 - 125 Swartz P S, Bean C P. A model for magnetic instabilities in hard superconductors: The adiabatic critical state. *J Appl Phys*, 1968, 39: 4991–4998
 - 126 Lietzke A F, Mattafirri S, McInturff A D, et al. Differentiation of performance—limiting voltage transients during Nb₃Sn magnet testing. In: *Advances in Cryogenic Engineering*. Keystone, 2006
 - 127 Sumption M D, Peng X, Lee E, et al. Analysis of magnetization, AC loss, and d_{eff} for various internal-Sn based Nb₃Sn multifilamentary strands with and without subelement splitting. *Cryogenics*, 2004, 44: 711–725
 - 128 Ghosh A K, Cooley L D, Moodenbaugh A R, et al. Magnetization Studies of High J_c Nb₃Sn Strands. Technical Report, Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, 2005
 - 129 Barzi E, Zlobin A V. Research and development of wires and cables for high-field accelerator magnets. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2016, 63: 783–803
 - 130 Barzi E, Limon P J, Yamada R, et al. Study of Nb₃Sn strands for Fermilab's high field dipole models. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2001, 11: 3595–3598
 - 131 Guan M, Wang X, Ma L, et al. Magnetic field and strain measurements of a superconducting solenoid magnet for C-ADS injector-II during excitation and quench test. *J Supercond Nov Magn*, 2013, 26: 2361–2368
 - 132 Wang X, Guan M, Ma L. Strain-based quench detection for a solenoid superconducting magnet. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 095009
 - 133 Guan M Z, Ma L Z, Wang X Z, et al. Stress and strain measurements on a 5 T superconducting magnet during coil excitation. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 22: 9002404
 - 134 Takahashi N, Nakata T, Fujii Y, et al. 3-D finite element analysis of coupling current in multifilamentary AC superconducting cable. *IEEE Trans Magn*, 1991, 27: 4061–4064
 - 135 Zhao J, Li Y, Gao Y. 3D simulation of AC loss in a twisted multi-filamentary superconducting wire. *Cryogenics*, 2017, 84: 60–68
 - 136 Amemiya N, Murasawa S, Banno N, et al. Numerical modelings of superconducting wires for AC loss calculations. *Physica C-Supercond*, 1998, 310: 16–29
 - 137 Zhou W, Fang J, Liu B, et al. AC loss analysis of central solenoid model coil for china fusion engineering test reactor. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–6
 - 138 Zhou W, Fang X Y, Fang J, et al. Numerical and experimental analysis of AC loss for CFETR CS model coil. *Nucl Sci Tech*, 2017, 28: 142
 - 139 Martino M, Arpaia P, Ierardi S. Impact of flux jumps on high-precision powering of Nb₃Sn superconducting magnets. In: *10th International Particle Accelerator Conference*. Melbourne, 2019
 - 140 Wang Q Y, Li J B, He A, et al. Impact of strain and field ramp functional form on thermomagnetic instabilities in composite Nb₃Sn wires with multi-filaments inside the superconducting coil. *Physica C-Supercond Appl*, 2022, 599: 1354091
 - 141 Wang Q Y, Xue C, Zhou Y H. Mechanical strain triggering flux jumps of multi-filamentary Nb₃Sn wires. *Superconductivity*, 2022, 4: 100031
 - 142 Wang Q Y, Xue C, Chen Y Q, et al. Thermomagnetic instabilities of Nb₃Sn wires inside the superconducting solenoid. *Physica C-Supercond Appl*, 2022, 593: 1354002
 - 143 Dong S Q, He A, Liu W. Tunable flux-jump characteristic of multifilamentary composite Nb₃Sn superconducting wires in maglev systems. *Acta Phys Sin*, 2023, 72: 303–314 [董石泉, 何安, 刘伟, 等. 磁悬浮系统中多芯复合Nb₃Sn超导线磁通跳跃的可调性研究. *物理学报*, 2023, 72: 303–314]
 - 144 Li L, Xue C. Fast time-varying current triggering flux jumps of multi-filamentary Nb₃Sn wire exposed to oblique magnetic field. *Phys Scr*, 2023, 98: 035818
 - 145 Chichili D R, Arkan T T, Rice J A. Niobium-tin magnet technology development at Fermilab. In: *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference (Cat No 99CH36366)*. New York: The Institute of Electrical and Electronics, 1999
 - 146 Larbalestier D, Magraw J, Wilson M. The influence of tensile stress on the critical current of filamentary Nb₃Sn magnet conductor. *IEEE Trans Magn*, 1977, 13: 462–465
 - 147 Godeke A, Dhalhe M, Morelli A, et al. A device to investigate the axial strain dependence of the critical current density in superconductors. *Rev Sci Instruments*, 2004, 75: 5112–5118

- 148 Nijhuis A, Wessel W A J, Ilyin Y, et al. Critical current measurement with spatial periodic bending imposed by electromagnetic force on a standard test barrel with slots. *Rev Sci Instruments*, 2006, 77: 054701
- 149 Wessel W A J, Nijhuis A, Ilyin Y, et al. A novel “Test Arrangement for Strain Influence on Strands” (TARSIS): mechanical and electrical testing of ITER Nb₃Sn strands. In: Transactions of the International Cryogenic Materials Conference, Alaska: Anchorage, 2004
- 150 van den Eijnden N C, Nijhuis A, Ilyin Y, et al. Axial tensile stress-strain characterization of ITER model coil type Nb₃Sn strands in TARSIS. *Supercond Sci Technol*, 2005, 18: 1523–1532
- 151 Allen N, Mallon P, King J, et al. Wide range pure bending strains of Nb₃Sn wires. *Supercond Sci Technol*, 2014, 27: 065014
- 152 Jiang L, Zhang X, Zhou Y H. Nonlinear static and dynamic mechanical behaviors of Nb₃Sn superconducting composite wire: Experiment and analysis. *Acta Mech Sin*, 2023, 39: 122322
- 153 Jiang L, Zhang Z, Yu Z, et al. Fatigue behaviors and damage mechanisms for Nb₃Sn triple-helical structure at liquid nitrogen temperature. *Superconductivity*, 2023, 8: 100065
- 154 Guan M, Wang X, Ma L, et al. Magneto-mechanical coupling analysis of a superconducting solenoid magnet in self-magnetic field. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2014, 24: 1–4
- 155 Easton D S, Kroeger D M, Specking W, et al. A prediction of the stress state in Nb₃Sn superconducting composites. *J Appl Phys*, 1980, 51: 2748–2757
- 156 Mitchell N. Finite element simulations of elasto-plastic processes in Nb₃Sn strands. *Cryogenics*, 2005, 45: 501–515
- 157 Mitchell N. Modeling of the effect of Nb₃Sn strand composition on thermal strains and superconducting performance. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2005, 15: 3572–3576
- 158 Mitchell N. Operating strain effects in Nb₃Sn cable-in-conduit conductors. *Supercond Sci Technol*, 2005, 18: S396–S404
- 159 Ahoranta M, Lehtonen J, Tarhasaari T, et al. Modelling of local strain and stress relaxation in bronze processed Nb₃Sn wires. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 025005
- 160 Boso D P, Lefik M, Schrefler B A. Homogenisation methods for the thermo-mechanical analysis of Nb₃Sn strand. *Cryogenics*, 2006, 46: 569–580
- 161 Boso D P, Lefik M, Schrefler B A. A multilevel homogenised model for superconducting strand thermomechanics. *Cryogenics*, 2005, 45: 259–271
- 162 Boso D P, Lefik M, Schrefler B A. Multiscale analysis of the influence of the triplet helicoidal geometry on the strain state of a Nb₃Sn based strand for ITER coils. *Cryogenics*, 2005, 45: 589–605
- 163 Wang T, Chiesa L, Takayasu M, et al. A novel modeling to predict the critical current behavior of Nb₃Sn PIT strand under transverse load based on a scaling law and Finite Element Analysis. *Cryogenics*, 2014, 63: 275–281
- 164 Ahoranta M, Lehtonen J, Tarhasaari T. Modelling the effect of twisting on electro-mechanical properties of Nb₃Sn conductors. *Cryogenics*, 2009, 49: 694–699
- 165 Liu B, Jing Z, Yong H, et al. Strain distributions in superconducting strands with twisted filaments. *Composite Struct*, 2017, 174: 158–165
- 166 Luo W, Zheng X J. Initial damage influence of stiffness reduction for bronze route Nb₃Sn strands. *Phys C-Supercond*, 2011, 471: 558–562
- 167 Wang X, Gao Y, Zhou Y. Electro-mechanical behaviors of composite superconducting strand with filament breakage. *Physica C-Supercond Appl*, 2016, 529: 26–35
- 168 Wang Z Y. Study on the Mechanical and Electrical Properties of Bi2212 Multi core Wire Superconducting Wire (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2018 [王智洋. Bi2212多芯丝超导线材的机电性能研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2018]
- 169 Ru Y, Yong H, Zhou Y. Mechanical behavior of Nb₃Sn strands under transverse electromagnetic loads. *Fusion Eng Des*, 2016, 112: 393–403
- 170 Zhu J Y, Luo W, Zhou Y H, et al. Contact mechanical characteristics of Nb₃Sn strands under transverse electromagnetic loads in the CICC cross-section. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 125011
- 171 Jiang L, Zhao J, Gao Y, et al. Geometrical modeling and mechanical behavior analysis of Nb₃Sn Rutherford cable. *Cryogenics*, 2021, 119: 103361
- 172 Orozco C, Carmichael J, Novitski I, et al. Assembly and tests of mechanical models of the 15-T Nb₃Sn dipole demonstrator. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2019, 29: 1–4

- 173 Ferracin P, Ambrosio G, Anerella M, et al. Magnet design of the 150 mm aperture low-beta quadrupoles for the high luminosity LHC. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 24: 1–6
- 174 Ambrosio G, Andreev N, Chichili D R, et al. Mechanical design and analysis of the Fermilab 11 T Nb₃Sn dipole model. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2000, 10: 306–309
- 175 Caiffi B, Bellomo G, Fabbriatore P, et al. Update on mechanical design of a cos θ 16-T bending dipole for the future circular collider. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 1–4
- 176 Pan H, Felice H, Cheng D W, et al. Assembly tests of the first Nb₃Sn low-beta quadrupole short model for the Hi-Lumi LHC. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–5
- 177 Vallone G, Ambrosio G, Anderssen E, et al. Mechanical Performance of Short Models for MQXF, the Nb₃Sn Low- β Quadrupole for the Hi-Lumi LHC. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2017, 27: 1–6
- 178 Sun E Q. Multi-scale nonlinear stress analysis of Nb₃Sn superconducting accelerator magnets. *Supercond Sci Technol*, 2022, 35: 045019
- 179 Zhang H, Wang Q, Li X, et al. Study on the stress of 500 MHz NMR magnet coils with detailed FE model. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2010, 21: 2304–2307
- 180 Tamura H, Yanagi N, Takahata K, et al. Multiscale stress analysis and 3D fitting structure of superconducting coils for the helical fusion reactor. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–5
- 181 Daly M, Loffler C H, Smekens D, et al. Multiscale approach to the mechanical behavior of epoxy impregnated Nb₃Sn COils for the 11 T dipole. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2018, 28: 1–6
- 182 Hu Q, Wang X, Guan M, et al. Magneto-mechanical coupling analysis of a superconducting solenoid using FEM with different approaches. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2020, 30: 1–5
- 183 Li Z, Wei W, Liangting S, et al. Mechanical design of the half-length prototype for a superconducting FECR ion source. *Rare Metal Mat Eng*, 2020, 49: 3177–81
- 184 Feng Y, Yong H, Zhou Y. Efficient multiscale investigation of mechanical behavior in Nb₃Sn superconducting accelerator magnet based on self-consistent clustering analysis. *Composite Struct*, 2023, 324: 117541
- 185 He A, Li J B, Xue C. Bidirectional homogenization method for accurate analysis of mechanical behaviors of Nb₃Sn superconducting coils (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2022, 54: 1274–1290 [何安, 李健博, 薛存. Nb₃Sn超导线圈力学性能精确分析的双向均质化方法. *力学学报*, 2022, 54: 1274–1290]
- 186 Wang X. Multilayer Modeling and Study of Force Electric Magnetic Behavior of Superconducting Cables (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2016 [王旭. 超导线缆的多层级建模及力-电-磁行为研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2016]
- 187 Scheuerlein C, di Michiel M, Buta F. Synchrotron radiation techniques for the characterization of Nb₃Sn Superconductors. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2653–2656
- 188 Dylla M T, Schultz S E, Jewell M C. Fracture strength distribution of individual Nb₃Sn filaments. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–7
- 189 Balachandran S, Cooper J, Van Oss O B, et al. Metallographic analysis of 11 T dipole coils for High Luminosity-Large Hadron Collider (HL-LHC). *Supercond Sci Technol*, 2021, 34: 025001
- 190 Sheth M K, Lee P J, McRae D M, et al. Study of filament cracking under uniaxial repeated loading for ITER TF strands. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 22: 4802504
- 191 Easton D, Kroeger D. Kirkendall voids—A detriment to Nb₃Sn superconductors. *IEEE Trans Magn*, 1979, 15: 178–181
- 192 Boso D P. A simple and effective approach for thermo-mechanical modelling of composite superconducting wires. *Supercond Sci Technol*, 2013, 26: 045006
- 193 Sanabria C, Lee P J, Starch W, et al. Evidence that filament fracture occurs in an ITER toroidal field conductor after cyclic Lorentz force loading in SULTAN. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 075007
- 194 Yong H, Yang P, Xue C, et al. Fracture behavior of filament in Nb₃Sn strands with crack-bridging model. *Fusion Eng Des*, 2016, 102: 66–73
- 195 Bagni T, Bovone G, Rack A, et al. Machine learning applied to X-ray tomography as a new tool to analyze the voids in RRP Nb₃Sn wires. *Sci Rep*, 2021, 11: 7767
- 196 Wang HY, Wei Y, Qiao L. Simulation of dynamic crack propagation in superconducting Nb₃Sn at extreme low temperature (in Chinese). *Chin J*

- High Pressure Phys, 2022, 36: 100–110 [王豪阳, 卫颖, 乔力. 极低温下Nb₃Sn超导体单晶裂纹动态扩展模拟. 高压物理学报, 2022, 36: 100–110]
- 197 West A W, Rawlings R D. The microstructure and mechanical properties of Nb₃Sn filamentary superconducting composites. *J Mater Sci*, 1979, 14: 1179–1186
- 198 Ding H, De Marzi G, Gao Y. Numerical simulation of mechanical behaviors and intergranular fracture of polycrystalline Nb₃Sn and superconducting filaments. *Supercond Sci Technol*, 2023, 36: 095001
- 199 Hahn S, Kim K, Kim K, et al. 45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet. *Nature*, 2019, 570: 496–499
- 200 Brumfiel G. Cable test raises fears at fusion project. *Nature*, 2011, 471: 150
- 201 Bajko M, Rossi L, Schmidt R, et al. Report of the Task Force on the Incident of 19th September 2008 at the LHC, 2009
- 202 Ghosh A K, Cooley L D, Dietderich D R, et al. Transport and magnetization properties of rolled RRP Nb₃Sn strands. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2008, 18: 993–996
- 203 Sumption M D, Susner M, Collings E W, et al. Effect of cable edge deformation on RRR and magnetization of strands extracted from Nb₃Sn rutherford-type cables. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 2481–2485
- 204 Zhou C, Bink D, Liu B, et al. Magnetization measurements on ITER Nb₃Sn CICC and strands subjected to irreversible strain degradation. *Supercond Sci Technol*, 2012, 25: 075004
- 205 Freda R, Chiarelli S, Corato V, et al. Performance test of superconducting wires subject to heavy deformations. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2015, 25: 1–4

Research status and challenges related to thermal-magnetic instability of niobium-tin high-field superconducting coils

XUE Cun^{1*}, JIA Peng¹, WANG Qing-Yu², REN Han-Xi², HU Shuai¹,
CAO Kai-Wei¹ & YONG Hua-Dong³

¹ School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

² School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

³ College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

*Corresponding author (email: xuecun@nwpu.edu.cn)

Niobium-tin, or Nb₃Sn, coils are the key components of high-field magnets and have important applications in high-energy physics, advanced medical treatment, magnetic constraint nuclear fusion, and other fields. However, after the preparation of niobium-tin high-field magnets, many flux jumps are encountered during the testing process. These jumps cause the superconducting current-carrying capacity to drop rapidly, affecting quench protection and inducing premature quenching. In addition, the superconducting coils undergo significant mechanical deformation in a strong magnetic field and high current environment. The superconducting electromagnetic performance is sensitive to mechanical deformation. Therefore, magnetic-thermal instability of niobium-tin coils during the development of high-field superconducting magnets is an urgent problem to be solved. Development of numerical simulation methods for resolving magnetic-thermal instability of niobium-tin superconducting coils, as well as revealing the influence mechanism of electromagnetic forces on flux jumps and quenching, is of great significance. As the earlier methods were difficult and costly, the optimization design development for inhibiting the flux jump of superconducting coils will help accelerate the development of high-field Nb₃Sn magnets. This article reviews the research status of the multi-field coupling problems related to force-electric-magnetic-thermal involved in Nb₃Sn high-field magnet applications; shares the solutions to three key scientific problems in the application of Nb₃Sn superconducting coils, namely complex constitutive relations, magnetic-thermal stability, and mechanical reaction; and discusses the difficulties and challenges involved.

superconducting mechanics, Nb₃Sn high field magnets, critical current, magnetic-thermal instability, mechanical reaction

PACS: 46.25.Hf, 85.80.-b, 74.25.Ld, 84.71.Ba, 84.71.Mn

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0425](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0425)