

# Bi-2212 超导线材力学性能分析进展

张志超

扬州大学 建筑科学与工程学院 江苏扬州 225000

**【摘要】**Bi-2212线材是目前唯一能够制备成圆线的高温超导材料，因其具有高临界磁场、高电流密度等优异性能已成为超导科学与技术领域的研究热点。作为典型的多芯丝复合结构，Bi-2212超导线材其在极低温工况下受到电磁力往复加载时往往产生损伤并严重影响其超导性能，制约其工程应用。目前，针对这一问题的研究，存在低温极端工况下疲劳损伤机理及力电耦合失效关系不明确，低温条件下复合线材疲劳后剩余刚度、临界电流的多尺度分析建模困难等问题。目前，对于其力学性能的分析大多只能做到对线材的整体分析，对其内部多场耦合作用损伤及产生机理缺少系统性的研究。本文着重梳理了Bi-2212超导线材力学性能研究的主要成果，对后续研究具有指导意义。

Analysis of mechanical properties of Bi-2212 superconducting wire

Zhang Zhichao

Yangzhou University School of Building Science and Engineering Jiangsu Yangzhou 225000

**【Abstract】**Bi-2212 wire is the only high temperature superconducting material that can be prepared into round lines. It has become a research field in superconducting science and technology because of its excellent properties such as high critical magnetic field and high current density. As a typical multi-core wire composite structure, Bi-2212 superconducting wire is often damaged when the electromagnetic force reciprocates at very low temperature and seriously affects its superconducting performance, which restricts its engineering application. At present, according to this problem, there are problems such as unclear fatigue damage mechanism and force and electric coupling failure relationship under low temperature extreme conditions, difficult multi-scale analysis and modeling of critical current of composite wire after fatigue at low temperature. At present, the analysis of its mechanical properties can only do the overall analysis of wire, and the lack of systematic research on the internal multi-field coupling damage and production mechanism. This paper focuses on the main achievements of the mechanical properties of Bi-2212 superconducting wire, which is of guiding significance for the subsequent research.

## 1 引言

超导材料已在大型加速器、聚变装置磁体以及核磁共振磁体等结构中广泛应用。但是随着科学技术的发展，低温超导材料在高磁场中的应用已经逼近其性能极限，如 $Nb_3Sn$ 材料在磁场强度大于16T时载流性能急剧下降。相对于低温超导材料，高温超导材料具有更高的临界温度及上临界场，能够在液氮温区（77K）下稳定运行，是制造高场（>16T）超导磁体的理想材料[1]。目前，对高温超导材料的研究已经被世界上主要国家和地区作为重要的战略研究方向，我国更是将其作为《能源技术革命创新行动计划（2016-2030）》的重要攻关方向。

Bi-2212 ( $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ ) 作为目前唯一能够工作在液氮温区且制备成多芯复合材料圆线的高温超导材料，可以方便地绞制成电缆并制备成大规模的CICC（Cable in Conduit Conductor）导体，是制造未来聚变堆用磁体的潜在材料[2]。但作为一种多组分的复合材料，Bi-2212多芯线材中各组分不同的热胀系数使线材从热处理温度（~1000K）冷却到工作温度的过程中产生不可忽视的残余应力，在极低温（4.2K-77K）、大电流（>10kA）、强磁场（>10T）的极端工况下，温度应力与电磁力往复加载使得脆性的Bi-2212超导材料不可避免地产生损伤，造成不可逆的力学性能和超导性能退化。最近的实验结果表明，在轴向最大拉应力为100MPa的脉动荷载的作用下，Bi-2212线材临界电流仅在载荷循环

次数达到 4000 次时就发生显著下降,对疲劳周期敏感。目前关于 CICC 导体的研究表明,短截距的绞缆结构能显著提高绞缆的运行次数,这主要是由于短截距的绞缆结构孔隙率更低,使得温度应力和洛伦茨力引起的变形减小,限制了线材在电磁力往复加载的过程中产生材料损伤。这表明线材往复变形产生的交变应力是造成材料损伤和运行寿命降低的重要影响因素,然而,目前尚没有合理的理论模型能够很好地解释这一现象。在极低温、大电流、强磁场多物理场耦合的极端工况下,高温超导线材在多次电磁力循环加载后的力学性能和超导性的耦合退化将直接影响磁体结构的安全稳定运行,是未来磁体设计中必须考虑的重要因素。

## 2 Bi-2212 线材力学行为研究现状及发展动态分析

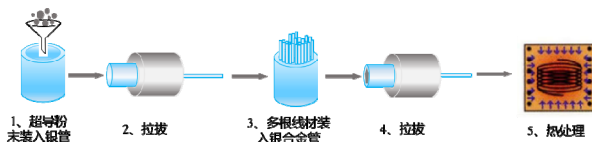


图 1 Bi-2212 线材生产的粉末装管法流程图

随着超导磁体技术的发展,低温超导材料已经逼近其性能极限。例如 ITER 所用的 Nb<sub>3</sub>Sn 超导导线在 12T 的磁场下临界电流密度大约为 1000A/mm<sup>2</sup>,而在 16T 的磁场下电流密度则迅速下降到 600A/mm<sup>2</sup>。要设计产生更高磁场的磁体就要求磁体制备时采用在高场下仍然具有较高电流密度的超导材料,如 Re 系和 Bi 系高温超导材料。这类超导材料的高场载流性能均高于 Nb<sub>3</sub>Sn 超导材料。而相比于其他高温超导材料,Bi-2212 超导多芯线材的成相机制和制备工艺相对简单,是唯一能够加工成各向同性的圆线高温超导材料,可以方便地绕制成传输大电流的 CICC 导体,具有更广泛的潜在应用场景。目前, Bi-2212 线材大多以粉末装管法进行制备 (Powder-In-Tube, PIT),主要流程如图 1 所示。将适当比例的前驱粉末装入银管之中进行拉拔,将拉拔之后的芯丝再装入银合金管中进行二次拉拔,最后在高温氧化环境中进行热处理最终烧结成芯丝[3],成品线材横截面如图 2 所示。制备成的 Bi-2212 超导体临界温度为 85K,在 4.2K 时上临界磁场为 100T,具有优异的低温高场载流性能 (1000A/mm<sup>2</sup>, 45T, 4.2K 和 2600A/mm<sup>2</sup>, 20T, 4.2K)。

在 2003 年,日本原子能研究机构设计的 Bi-2212 绞缆

已经能够在 20K 的工作温度和 12T 的背景磁场下获得 10kA 的载流。最近,以我国正在研制的中国聚变工程实验堆 CFETR 为潜在应用对象,中科院等离子体所与中国科学技术大学团队研发了 Bi-2212 线材绕制的 CICC 导体,在 15T 的背景磁场下获得了 51.84kA 的载流。然而,随着制造工艺的不断革新, Bi-2212 线材载流能力在不断提高的同时,强磁场环境中的高载流同样也造成较大的电磁力,低温环境下的温度应力和循环加载的电磁力使其载流能力在使用过程中迅速退化[4]。首先, Bi-2212 线材需要在富氧环境下进行高温热处理 (~1000),从热处理温度冷却到工作温度的过程中,线材各组分热胀系数的差异会造成超导丝受到较大的温度失配应力。其次, CICC 导体内部有较大的空隙率,使得超导线材在受到电磁力交变作用时极易发生相对的位移和变形。而粉末装管法生产出的 Bi-2212 线材本身存在大量的缺陷和夹杂,且 Bi-2212 是一种脆性陶瓷材料,线材中的芯丝尺寸很细,这使得 Bi-2212 线材的多芯丝复合结构在大幅变温和电磁力往复加载的工况下很容易出现芯丝损伤和断裂,导致其临界电流和临界磁场快速下降。虽然可以通过采用不同的绞缆截距或不同的导体结构来限制导线的变形并增加 CICC 导体的循环寿命,但是目前依然对 CICC 导体中超导线材的疲劳损伤机理缺乏深入的理解。

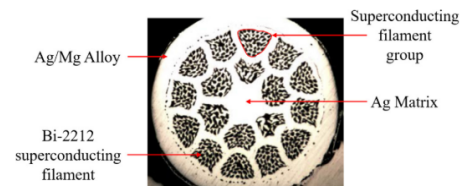


图 2 Bi-2212 线材横截面结构

对高温超导材料的研究受到各国科研单位的广泛关注,在国际热核聚变实验堆 (ITER) 等国际重大合作项目的推动下,欧洲、美国、日本、韩国以及国内的众多科研单位都开展了大量研究并做出了重要贡献。实验研究证实, Bi-2212 线材临界电流随轴向拉、压应变的退化过程可以分为三个阶段。在受到较小拉应变时,主要是应力造成的临界温度升高引起临界电流的可逆退化;在拉应变较大时 (>0.3%),沿材料晶界的微裂纹和芯丝的脆性断裂会造成临界电流的不可逆退化;而压应变会造成芯丝的屈曲破坏,导致临界电流的不可逆降低。不同的拉、压损伤机理导致了 Bi-2212 超导线材更加复杂的力学行为。研究者们通过调整粉末原料

的比例、芯丝重熔,采用滚压、高压热处理等方式使芯丝更加致密,减少内部缺陷从而提高线材的机械强度和临界电流密度。仍需指出的是,如此获得的 Bi-2212 线材依然是一种存在大量缺陷的多相复合材料,其电磁学特性严重依赖于其力学变形。实际工况下, Bi-2212 线材除温度应力外还受到电磁力的往复循环加载,导致线材内部作为载流结构的超导芯丝发生渐进损伤,造成线材载流性能的逐步退化。因此低温多场下超导线材疲劳行为是复杂荷载作用下的多模式力电耦合退化行为。但是,目前对 Bi-2212 线材疲劳特性的研究资料较少,仅 ten Haken 等人[5]以及 Zhang 等人[6]分别对 Bi-2212 线材受到轴向拉伸脉动荷载时临界电流的退化现象进行了实验研究,得到了在特定荷载下临界电流随循环加载次数退化的关系。

超导材料的实验研究需要在极低温、强磁场、大电流的极端工况下进行,这不仅对疲劳实验带来了较大的难度,同时也造成了经济和时间成本居高不下。因此,有必要采用理论分析的办法对 Bi-2212 线材的疲劳进行研究。Bi-2212 多芯线材属于多相介质复合材料,但是其疲劳行为并不能通过现有的传统理论分析方法解决。这主要是由于 Bi-2212 线材本身的结构特点以及多场耦合的极端工况共同决定的。首先, Bi-2212 芯丝具有更加复杂的细观结构。Bi-2212 线材通过粉末装管法生产的过程中需要进行高温热处理,以便前驱粉末通过化学反应生成 Bi-2212 超导材料。反应过程中产生的气泡造成 Bi-2212 芯丝内部存在大量的微孔洞缺陷;熔融状态的反应物在孔隙之间流动使得在横向上造成芯丝之间形成大量桥连结构,在纵向造成芯丝沿长度方向的性能不

均匀性。其次, Bi-2212 多芯线材的工作环境更加复杂,属于多场耦合的极端工况。低温环境下,交变电磁力的加载会造成 Bi-2212 线材疲劳损伤,导致其载流能力退化,使得在下次加载时线材上的电流和作用在线材上的电磁力进一步降低,一定程度上抑制了损伤的进一步产生;导线在载流时电流分布的不均匀性导致各芯丝所受的电磁力也有所不同。

需要指出的是,对于 Bi-2212 超导线材而言,超导芯丝断裂是造成其载流能力降低的最为直接和关键的影响因素。因此,在分析 Bi-2212 线材的疲劳行为时,应主要考虑极低温、大电流、强磁场的极端工况造成的线材内部的纤维损伤和断裂。对于力、电、磁以及极低温多场耦合工况的 Bi-2212 超导线材疲劳后的力学性能分析,传统理论模型不能考虑多物理场相互耦合的影响,需要在此基础上提出新的分析模型。

### 3 结论

综上所述, Bi-2212 高温超导多芯复合线材低温环境下的多场耦合疲劳是下一代高温超导 CICC 导体的研发和极端多场环境下运行可靠性分析而面临的交叉领域的基础科学问题。目前,针对 Bi-2212 线材多场耦合疲劳行为的研究尚处于探索阶段,特别是对超导线材极低温和电磁力多周期循环加载工况下超导芯丝疲劳损伤的累积规律、疲劳后 Bi-2212 线材剩余强度、刚度以及载流能力的预测分析模型的建立,已成为国内外超导科学与工程应用领域广泛关注的课题。

### 参考文献

- [1]刘建华,程军胜,王秋良,等.高场超导磁体研究进展及其应用.电工电能新技术,2017(11):1-13.
- [2]黄素贞,秦经刚,朱雅兰,李建刚.未来聚变堆用高温 CICC 导体发展现状及工程质量控制.低温与超导,2016,44(6):27-33.
- [3]Zhang H Y, Chen W, Hao Q B, et al. Fatigue Properties for Bi-2212 High Temperature Superconducting Round Wires Under Axial Tensile Loading. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2020.
- [4]毛哲华,戴超,刘方,秦经刚,郝清滨.不同热处理条件下 Bi-2212 超导线材的临界性能研究.低温与超导,2017(06):33-36.
- [5]蒋华伟,武松涛.周期载荷下 Nb<sub>3</sub>Sn 温度裕度及变形研究.低温与超导,2019,47(10):29-33.
- [6]Ten Haken B, Godeke A, Schuver H J, et al. Descriptive Model for the Critical Current as a Function of Axial Strain in Bi-2212/Ag Wires. Magnetism IEEE Transactions on, 1996, 32(4):2720-2723.