

常用超导材料接头技术研究进展

曹立坤¹, 杨芳¹, 师江涛², 贺一轩¹, 张胜楠², 闫果^{1,3}, 张平祥^{1,2}

(1. 西北工业大学 超导材料与应用技术研究院, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院 超导材料研究所, 陕西 西安 710016)

(3. 西安聚能医工科技有限公司, 陕西 西安 710028)

摘要: 超导材料在多个领域都有着广泛的应用前景, 因此自诞生以来就吸引了全球研究者投身其中。超导连接是超导线带材应用的关键一环, 也是形成持久模式接头的组成部分。但超导接头目前在临界参数、制备难度、环境影响等方面均存在不足, 为此各国学者不断创新和优化工艺方法。本文介绍了超导接头的结构以及近年来4类常见超导材料接头的制备方法和性能表现, 对不足和缺陷进行了汇总, 并对超导接头未来的发展进行了分析和展望, 为超导接头的发展提供参考。

关键词: 超导材料; 超导接头; 接头电阻

中图法分类号: TG132.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)10-2671-13

1 引言

1911年荷兰科学家昂内斯将金属汞冷却至4.2 K时发现超导现象。由于超导体具有零电阻、完全抗磁性(即迈斯纳效应)和量子隧穿效应等特性, 吸引了科研界和产业界的广泛关注。自超导现象发现至今, 已发现了近千种超导材料, 而实用化超导材料主要包括: 以NbTi和Nb₃Sn为代表的合金超导体, 以YBCO和BiSrCaCuO为代表的铜酸盐超导体, 以及近年来发现的MgB₂和铁基超导体。

然而, 受到工业生产制备的限制, 目前还无法在短时间内实现制备万米级超导长带^[1]。伴随着超导技术发展日趋成熟, 在诸如超导电缆、超导磁体等应用中对超导长线提出迫切的需求(如现在一些超导装置, 实用超导材料重达数十吨, 每根导体长度至少数千米^[2])。在超导带材的实际应用中, 往往通过制备超导接头的方式来满足对长线的需求^[3]。在实际的应用过程中, 对超导接头的电阻有高要求, 同时接头还应该具备一定的机械性能, 如接头部分在受到弯曲、拉伸和扭绞时, 不会对线带材造成损伤, 且其载流能力衰减较小^[4]。制备接头的另一个需求是磁体绕制, 超导磁体的形状和场强各异, 往往由多个线圈组成, 通过超导接头连接多级线圈。

超导接头的持久模式(persistent mode, PM), 即在闭合线圈中, 超导带材的电流几乎不衰减。这意味着超导接头的电阻要足够低(小于 10^{-12} Ω), 需要在母体导线之间建立真正的超导电流通路^[5]。目前主要的低温超导

材料为NbTi和Nb₃Sn, 针对它们的连接技术较为成熟且制造工艺相对简单, 最常用的方法包括冷压焊、点焊和钎焊等, 其中钎焊虽然制备工艺成熟, 制备的超导接头性能优异, 但是对环境不友好。因此研究人员开发了无铅焊料并对接头的连接方式进行了优化。高温超导材料主要包括REBCO、BSCCO(Bi-2212和Bi-2223线带材)和MgB₂线带材等^[6], 它们相比低温超导材料普遍具有更高的临界温度和更高的载流能力, 应用市场较为广泛。但其中超导成分属于化学敏感度高且易碎的陶瓷材料, 这意味着它们的连接并不像低温合金超导体那么简单, 需要高温、高压以及对环境中氧含量的控制等。因此开发易于制备、维护和具备高性能的超导接头是推动高温超导材料应用的重要一环。本文将从几种常见超导带材的超导接头方面介绍近年来研究人员取得的一些成果。

2 超导接头的结构

超导接头常见的结构如图1a~1c所示, 可分为以下几类:

对接接头, 即超导带材之间以头碰头的方式连接。此类接头要求两个导体间的接触面足够的平整以获得足够大的有效接触面积。但由于连接要求较高, 容易出现因结合面积小而导致传输电流偏小等问题, 在实际中并不常用。

搭接接头, 即一根超导带材重叠在另一根之上。虽然两根导体在几何和电学性能上不具有对称性, 但是

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(52372259); 国家重点研发计划(2021YFB3800200)

作者简介: 曹立坤, 男, 2001年生, 硕士生, 西北工业大学超导材料与应用技术研究院, 陕西 西安 710072, E-mail: caolikun@mail.nwpu.edu.cn

覆盖部分的接触面积足够大,能够提供较大的载流能力,并且缩短了电流路径,一定程度上降低了接头电阻。同时可以在连接中承受较大的单轴压力,不仅有利于接头连接稳定,同时也是制备陶瓷高温超导体连接接头的成熟工艺之一^[7]。

间接接头,即超导导线带材之间通过中间体连接,中间体可以是焊料、粉末浆料或是以一段导线本身形成的桥接^[5]。间接接头的优势在于制备工艺简单,尤其是针对钎焊连接。缺点在于中间体的性能往往不如母导体,成为限制其应用关键因素。

实际应用过程中还需要考虑两根超导导线带材的方向。多数情况下接头部分要放置在距离磁铁线圈一定距离外的低磁场区^[5]或需要额外做电磁屏蔽处理。如图 1d 所示,将要连接的超导母体并排连接末端,这样电流流经接头部分后反向流入线圈;若接头的目的是延伸或更换线圈绕组内的导体,则需采用如图 1e 这样的连接以保证电流流向不发生变化。

3 合金超导线材之间的接头

现有的 NbTi 多芯线材之间的连接方式包括:扩散焊接^[8]、点焊(spot welding)^[9]和焊料基质替代^[10],其中焊料基质替代最为简单可靠,PbBi 是工业上用于连接 NbTi 线材的标准超导焊料。Thornton 于 1986 年首次报道了使用焊料基质替代方法的高性能 Nb-Ti 接头,并获得了 4.2 K 自场下高达 $143 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的临界电流密度(J_c)^[11]。Liu 等人^[12]研发了一种连接制备方法:首先在 350 °C 下将 Cu 或 CuNi 基体浸泡于熔融 Sn 中 2 h,清除液态 Sn 表面氧化层后在 350 °C 的熔融 PbBi 中浸泡 40 min,再次取出并清除熔融 PbBi 表面氧化层,将线材端口头捻成接头,最后用细铜丝捆绑接头,在 200 °C 下浸入充满 PbBi 的铜管中。该超导接头在 0.6 T 磁场下的衰减曲线如图 2 所示,在 0 和 0.6 T 下的接头电阻分别是 $4 \times 10^{-15} \Omega$ 和 $1.5 \times 10^{-14} \Omega$,线材在 0.6 T 下的临界电流为约 1160 A。相较于其他 NbTi 接

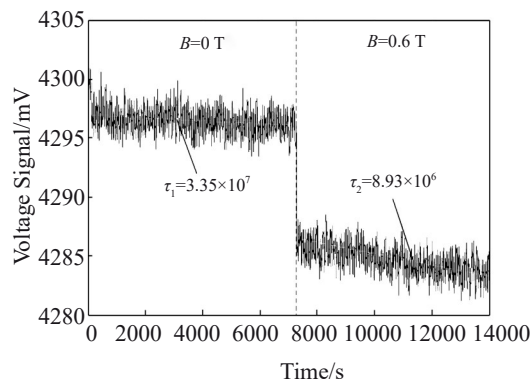


图2 样品在 0 和 0.6 T 磁场下的电流衰减

Fig.2 Current decay of the sample under 0 and 0.6 T magnetic field^[12]

头连接方式,通过超导焊料连接得到的接头质量较优。因此该类制备接头的方式得到广泛的应用和研究。但因其焊料中含有环境不友好的铅料,因此使用无铅焊料及开发新的超导接头焊接工艺成为亟待解决的问题。

点焊是研究无铅焊料的一个重要途径。早在 20 世纪 70 年代,就有研究者提出可以通过点焊暴露的 NbTi 芯丝获得 PM 接头^[13]。点焊也称电阻焊(resistive welding),将工件夹在两个电极之间,并通过一个短时大电流的脉冲,使电阻产生大量热以在界面处瞬间熔化并粘合材料^[14]。常见的点焊接头是将芯丝排列在 Nb 或 NbTi 箔上,并在多个位置焊接数次,以求获得较好的 I_c ,点焊接头示意图如图 3 所示。

Phillip 等人^[15]研究了点焊技术在制备 NbTi 超导接头上的应用:剥离绝缘层并将线材浸入硝酸(用水 1:1 稀释)中以去除铜包层。水洗后将细丝浸入硝酸和氢氟酸的水溶液中。随后使用 15~20 J 的脉冲能量将 NbTi 线材点焊到 0.13 mm 厚的铌箔上,在 1.5 cm 的长度上点焊 8 个点。在 4.2 K 下单芯点焊接头的 I_c 为 26 A。点焊接技术应用用于 NbTi 螺线管线圈中,在 0.5 T, 5 A 的工作电流下运行 36 h 后,线圈中电流为 4.5 A,接头电阻小于 250 p Ω 。

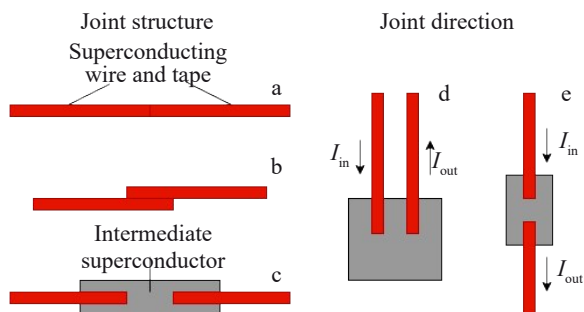


图1 几种常见的超导接头结构及线材取向

Fig.1 Some common basic joint structures and wire orientations: (a) butt joint, (b) lap joint, (c) indirect joint, (d) termination joint, and (e) continuation joint^[5]

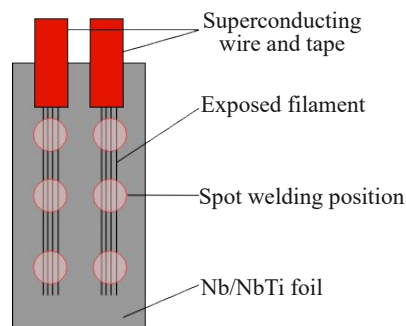


图3 将 NbTi 丝点焊到 Nb/NbTi 箔上的典型示意图

Fig.3 Schematic of typical NbTi spot welded joint with NbTi filaments spot welded to a Nb/NbTi foil^[5]

然而如此强烈的瞬间热量对 NbTi 材料的微观结构和超导性能可能造成负面影响。Brittles 等人^[16]研究了点焊技术对 NbTi 线材超导性能与显微组织的影响。与 Phillip 等人方案的区别在于,使用了 24 根的多芯丝结构且在腐蚀过程中没有使用氢氟酸。图 4 为接头截面的显微结构,从图 4a 中可以看到点焊突破了表面氧化物的阻碍,芯丝之间形成了很好的连接。图 4b 中观察到接头中存在两种不同的结构,即中心熔合区(fusion zone, FZ)和热影响区(heat affected zone, HAZ),FZ 区具有铸造的粗枝晶微观结构,在图 4c 中可见,枝晶在 HAZ 区边缘形核。FZ 区的熔化表明,温度高于 2000 ℃对接头区的均匀性产生影响,且 Cu 从电极中渗入样品,作者预测 H_{c2} 可能不受影响,但截面部分的 J_c 将降低。点焊法具有不需要中间低性能超导材料直接实现 NbTi-NbTi 连接的优势,接头具有最佳的超导性能,明显优于目前使用的 PbBi 焊料,但从工业角度来看,该技术缺乏再现性^[17]。

NbTi 线材作为一种合金超导体,相比陶瓷类超导材料具备塑性好等优点,这使得它除了可以使用陶瓷类超导材料的连接方法外,还可以通过冷压焊(cold pressing)进行连接,这是一种常温下的直接连接法,具有高度可重复性。Cheng 等人^[18]采用冷压法制备了 NbTi 多芯丝接头,使用硝酸去除铜基体并清洁和干燥芯丝,将芯丝插入 NbTi/Cu 复合管中一起放入液压机压制,研究了芯丝在挤压过程中的变形演化、芯丝与套管的粘合情况以及接触电阻等。实验结果表明,接头的电阻小于 $10^{-12} \Omega$,且随着压力增大,接头电阻逐渐下降,接头电阻的压力依赖性及其拟合后的结果如图 5 所示。根据电接触理论,接触电

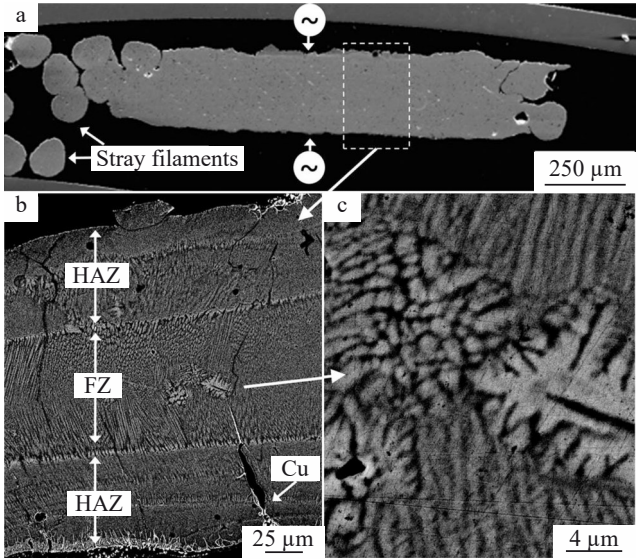


图4 多芯丝接头的截面 SEM 照片
Fig.4 Transverse cross-sectional SEM images of joint: (a) secondary electronic diagram of a solder joint, (b) center of the weld seam area, and (c) partially enlarged image^[16]

阻是两导体接触时表面产生的电流阻力引起的。假设表面电阻率恒定的情况下接触电阻 R_k 的满足如下的关系:

$$R_k = KF_k^{-m}$$

(1)

式中, K 为常数, m 为取值 0.33~3 的系数, m 值越大说明接触界面的破碎程度越大。图 5 中第一阶段 m 值高达 4.66, 第二阶段斜率下降, 说明破碎程度减小, 最后 m 值降至 0.36, 接头界面的形貌较为完好。

电磁成型(electromagnetic forming, EMF)是利用洛伦兹力的高速金属成形技术,配合碰撞面,金属的碰撞点压力为约 15 Mpsi (103.4 GPa),它属于磁脉冲焊接技术(magnetic pulse welding, MPW),其结构示意图如图 6 所示,根据洛伦兹定律,局部产生强磁场,在飞片内产生二次涡流。高且极快的电流在线圈和外部工件之间产生磁力,使工件形成固态冷焊^[19]。该技术相比起冷压焊更可靠,能施加更大的压力,且压力是全方向的,具有效率高和重复性好等优点。Cheng 等人^[20]研究了 EMF 法在 NbTi 超导多芯线材中的应用。用酸腐蚀铜基体直至留下一束 NbTi 芯丝,将清洁后的所有芯丝放入 NbTi 的矩形槽内,用铜管套在槽外,将接头组装到 EMF 系统上,将芯丝嵌入管内形成接接头。实验结果表明,即使电磁力

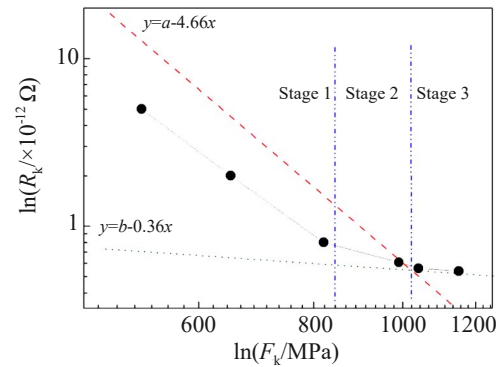


图5 接头电阻的压力依赖性
Fig.5 Pressure dependence of the joint resistance^[18]

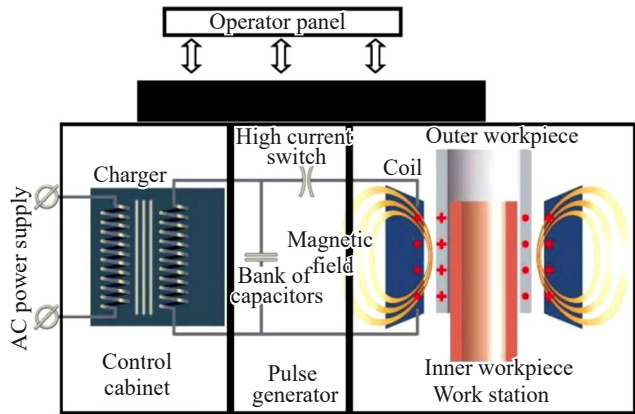


图6 磁脉冲系统布局示意图
Fig.6 Layout diagram of magnetic pulse system^[19]

增大也没有损伤超导芯丝,当初始放电电压为 7.0 kV 时,临界电流最大为 129.2 A,电阻为 $1.8 \times 10^{-13} \Omega$,满足 PM 接头要求,其超导电性的仿真模拟结果与实验一致。EMF 技术制备的 NbTi 超导接头超导电性优于冷压焊接技术,具有极大的研究价值。

核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)广泛采用 Nb₃Sn 和 NbTi^[21]材料,以 Nb₃Sn 作为内插磁体, NbTi 作为外部线圈和内部线圈,以期获得大电流和高共振频率^[22]。两种不同超导材料的连接主要受到材料本身的限制: Nb₃Sn 是一种高脆性金属间化合物^[23],无法采用冷压等方法制备;当 NbTi 芯丝暴露在高于 Nb₃Sn 相形成的高温下时,临界电流特性会迅速恶化,因此也无法通过化学反应连接。常用的连接方法是钎焊,通过超导焊料连接母导体。大多数超导焊料都是两相共晶合金,其中至少一相是超导的,常用的钎料含有铅和锡,考虑到它们的毒性,开发高性能无毒焊料或是连接法是目前急需解决的问题。

2021 年 Banno 等人^[24]开发了一种利用铌基韧性超导合金作为中间体的新方法,他们首先制备了一种耐高温 Nb 合金作为连接体,再将两导线与该连接体连接制成接头。连接体的制备中加入 Hf 元素,其理论依据来源于 1966 年 Goodman 所提出铌合金的 Ginzburg-Landau-Abrikosov-Gorkov (GLAG) 理论^[25],根据该理论,0 K 时的上临界场 B_{c2} 满足如下关系:

$$B_{c2} = 3.11 \times \rho_n \gamma T_c \quad (2)$$

式中, ρ_n 、 γ 和 T_c 分别为常态电阻率、电子比热系数和临界温度。Nb 合金固溶相的剧烈变形导致多晶 Nb 合金晶粒形貌在形成择优取向或织构后出现密集的位错结构,精细的纳米级微观结构增加了 ρ_n 和 B_{c2} , 同时也有助于磁通钉扎性能的提高,而磁通钉扎性能的提高本质上与 J_c 有关。在 Nb₃Sn 的连接上,用 HNO₃ 去除 Nb₃Sn 外部 Cu 包

套并用机械抛光暴露 Nb₃Sn 前驱体芯丝。然后将 Nb₃Sn 前驱体芯丝的末端缠绕在耐高温 (high-temperature-tolerable, HTT) 铌合金带的末端,然后用支撑金属管将其压紧,连接细丝的活性面与带芯。最后,在 685 °C 真空条件下进行 100 h 的热处理以形成 Nb₃Sn 层。在连接 NbTi 上,化学刻蚀暴露芯丝并将 NbTi 导线嵌入 Cu 基体后,将芯丝和 HTT Nb 合金冷压连接,两者末端缠绕压紧。图 7 显示了开发的连接过程和制造的连接样品示意图。结果表明,含有 3wt%Hf 的接头合金在热处理后 B_{c2} 值仍有 1.15 T。0.8 T 时,长度为 1 cm 的 NbTi 丝/Nb-3Hf 带/Nb₃Sn 丝接头的 I_c 值超过 150 A,电阻大约为 $6.55 \times 10^{-13} \Omega$,即使在 0~0.9 T 磁场下,接头电阻依然处于 $10^{-14} \sim 10^{-13} \Omega$ 数量级。

Sun 等人^[26]也报道了与上述相似的中间体连接法,在液氦温度和 1.25 T 背景场下测得的接头电阻为 $1.5 \times 10^{-13} \Omega$ 。这种以超导合金作为中间体的方法避免了由于二者特性导致直接连接的不便,同时性能优异,中间体也可以做到和线材同等的尺寸,目前主要是围绕精简中间体制备步骤展开研究。

2023 年, Sun 等人^[21]利用电阻焊制备了 Nb₃Sn-NbTi 接头。用硝酸去除 Nb₃Sn 和 NbTi 丝末端稳定层并用酒精和水清洗,利用原位反应在 Nb₃Sn 丝一端制备 Nb-Sn 前驱体块,经热处理后利用电阻焊与 NbTi 丝焊接在一起,共焊接 6 个点位。在 1.5 T 背景场下, Nb₃Sn 和 NbTi 的接头电阻为 $1.3 \times 10^{-13} \Omega$, 与使用超导焊料制备的接头相比,该接头具有更好的抗磁场能力。

4 REBCO 超导线材之间的接头

REBCO 涂层导体 (coated conductor, CC), 具有较高的临界温度且在高场下具有优异的超导电性, 广泛应用于电力设备和大科学装置等。REBCO CCs 为多层结构, 包括衬底、中间缓冲层、REBCO 超导层和银保护层^[27], 其

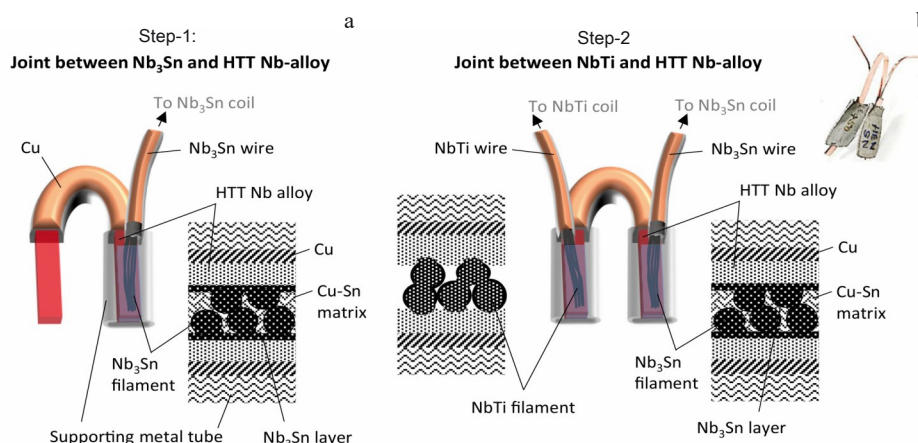


图7 连接工艺示意图和制作的连接样品

Fig.7 Schematic illustration of the developed joining process (a) and picture of a fabricated joint sample (b)^[24]

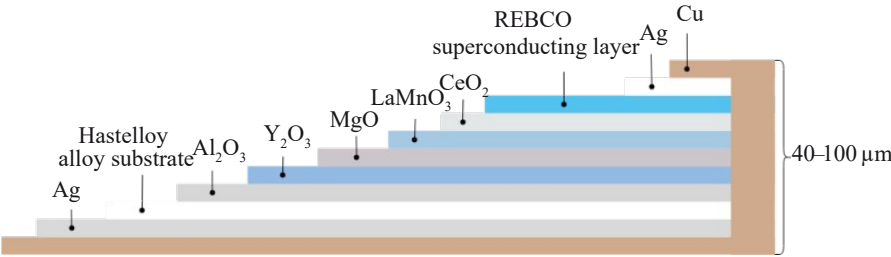


图 8 REBCO 样品带的结构示意图
Fig.8 Schematic of structure of the REBCO sample tapes^[27]

结构示意图如图 8 所示。针对其现有的接头方法大致可以分为超导接头和低阻接头两种。低阻接头不论是钎焊法^[28]、机器压接法^[29]还是银扩散法^[30]，目前的电阻普遍在 $10^{-9} \Omega$ 数量级，比起 PM 接头小于 $10^{-12} \Omega$ 的要求相差甚远，但其实现连接的难度和成本更低，在某些对带长要求高但对电阻值相对要求较低的领域具有更大的应用价值。近期，麻省理工学院开发的 SPARC 环形场线圈使用了低阻接头，REBCO 线圈饼间的接头电阻在 $0.5\sim 2.0 \text{ n}\Omega$ 之间^[31]。

韩国高丽大学的 Park 等人^[7]早在 2014 年提出 REBCO 超导接头的制备方案，通过对 GdBCO 的原子扩散和两个 GdBCO 超导层之间的部分熔化来实现连接，接合区域和界面内无裂纹或大空隙。初始场衰减稳定在 2.74 mT ，对应的 I_c 为 26.61 A ，电阻小于 $10^{-17} \Omega$ ，但热处理时间长达 350 h 。针对此问题，Ohki 等人^[32]开发了 REBCO CC 之间的中间生长超导 (intermediate grown superconducting, iGS) 接头方法，iGS 法的优势在于热处理时间小于 1 d ，且接头 I_c 高。采用 Gd:Ba:Cu 摩尔比为 $1:2:3$ 的无氟金属有机化合物醇溶液，通过旋涂形成前驱膜，前驱膜在 500°C 下分解，在 100% 氧气气氛下加热至 800°C 结晶形成 GdBCO 层。随后如图 9a 所示，用等比例的双氧水和氨水溶液蚀刻以暴露 GdBCO 层，将连接带和 GdBCO CC 夹在两个不锈钢块之间。在氧气中以 800°C 加热 20 min ，冷却至 500°C 后，引入 100% 氧气并在 6 h 内冷却至 200°C ，总的热处理和氧退火时间不到 1 d 。测得接头处 I_c 为 75 A （为 GdBCO CC 的 48% ），如图 9b 所示，接头电阻在 3×10^{-12} 到 $5\times 10^{-13} \Omega$ 之间，性能达到 PM 需求的同时大大缩短了热处理时间，但是工艺流程过于繁琐。

2017 年，Pan 等人^[33]通过银扩散法研究了带材重叠长度对电阻的影响，他们将两个待连接的带以搭接形式堆叠在一起，如图 10 所示，重叠长度为 $1\sim 200 \text{ mm}$ 。然后将重叠区域安装在两个模具间，施加约 20 MPa 压力并在 673 K 管式炉的纯氧气氛下退火 2 h ，随后炉冷却至室温。作者同时建立了三维数值模型，模拟结果与实验结果吻合较好，如图 11 所示。结果表明，随着重叠长度的增加，接头阻值趋于下限值，约为 $8.5 \text{ n}\Omega$ 。

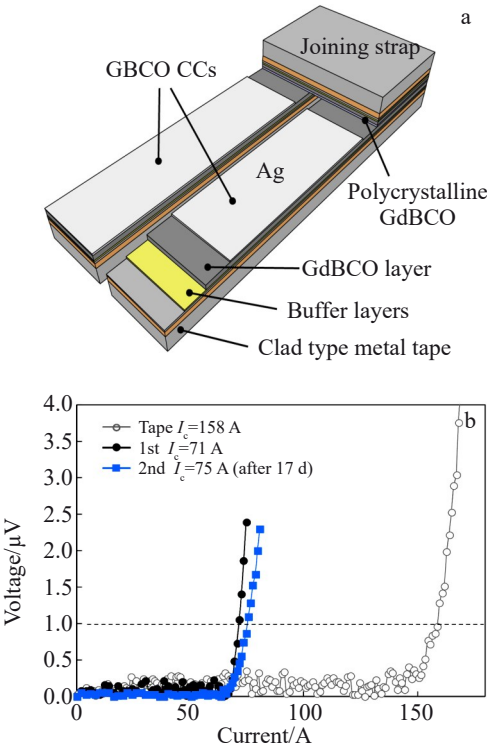


图 9 GdBCO CC 的 iGS 超导接头示意图以及自场中 77 K 下超导接头样品的电压-电流特性

Fig.9 Schematic diagram of the intermediate grown superconducting (iGS) joint between GdBCO CC (a), and voltage versus current characteristic of a sample of the superconducting joint at 77 K in a self-field (b)^[32]

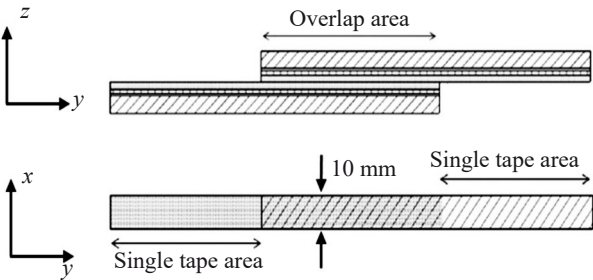


图 10 银扩散接头示意图
Fig.10 Schematic diagram of silver diffusion joints^[33]

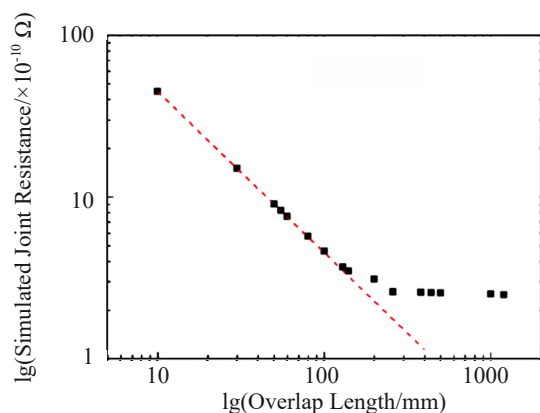


图 11 无界面阻力时重叠长度与模拟接头阻力的关系

Fig.11 Plots of relationship between overlap length and simulated joint resistance without interfacial resistance^[33]

超声焊接(ultrasonic welding, UW)是一种可以在室温下应用的固态连接技术,在不熔化母体材料的情况下,通过局部高频超声振动(约 20 kHz)的能量和压力来获得固态冶金连接^[34]。2019 年, Ito 等人^[35]利用 UW 法制备了银护套 BSCCO 带和铜稳定的 REBCO 带材接头样品。经砂纸打磨和乙醇清洗后,用 UW 机器在 19.15 kHz 的超声频率下将它们连接。图 12 给出了该实验过程的示意图,作者考察了两种金属板放置方式,即 BP(bottom-plate)和 TBP(layered between top- and bottom-plate)。实验结果上,连接时间>0.11 s 的 BP 排列使 I_c 降低,而连接时间直到 0.16 s 的 TBP 排列才引发 I_c 降低;大于 $15 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的能量可以获得稳定的较低接头电阻;得到的最小银保护层接头电阻值 $14.0 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$,铜稳定接头电阻值 $36.1 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$,连接快速但仍然高于以往报道的电阻值。

2023 年, Kato 等人^[36]提出了一种在 REBCO 带中使用 Cu 稳定层的低温扩散键合法,其示意图如图 13 所示。抛光待连接样品的表面,然后将样品的氧化层用酸去除,酸的温度在 $25 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化。随后通过加压力处理,使铜稳定层之间结合面紧密接触,促进铜原子的扩散。将样品重叠 20 mm(=接头长度),夹入金属管件,在不同压力下实验。结果表明,在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 优化条件下得到的电

阻率在 $50 \sim 80 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$,与已有报道的其他低阻接头处在同一量级。同时发现,虽截取自同一条带材,但不同位置样品的结果差异巨大,最大差可达 $350 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$,作者推测与 GdBCO 稳定金属层固有的 GdBCO 带的界面电阻的变化有关。考虑到该方法可以在 30 min 内制备完成,且不需要特殊设备,在应用中具有显著优势。

5 BSCCO 超导线材之间的接头

Bi 系超导体通常是由 Bi、Sr、Ca、Cu、O 几种元素组成,其中 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) 和 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) 是最常用的两种超导线带材。Bi-2212 的临界温度在 $80 \sim 90 \text{ K}$ ^[37],在高场下具有优异的性能,也是已知超导线带材中唯一具有各向同性结构的材料^[38],具有高达 100 T 的不可逆场,是唯一以圆线形式制造的高温超导材料^[39]。Bi-2223 的临界温度超过 110 K ^[40],可以在液氮温区下工作。虽然具备各向异性,但是其在场载流能力较 YBCO 衰减较小,缺点是反应速度较慢,且需要金属包套既要有良好加工性,又要有一定抗氧化能力和氧穿透能力。

Bi-2212 线材的常用的方法包括超导焊料连接以及管内粉末熔体加工法等。对超导焊料的要求包括:熔点低,以防止高温连接对超导芯丝的破坏;对超导芯丝有良好的浸润性;合适的液相粘度;足够的超导性能等。作为目前用于低温超导线间超导接头的 Pb 基超导焊料的潜在替代品, Mousavi 等人^[41]研究了不同组成的二元 Sn-In 和三元 Sn-In-Bi 合金的显微组织和超导电性,将纯 Sn、In 和 Bi 在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下熔化,冷却后制备一系列成分不同的二元 Sn-In 和三元 Sn-In-Bi 合金。对比二元合金,发现富 In 的 β 相比富 Sn 的 γ 相具有更好的性能,其中 In 含量 65wt%+Sn 含量 35wt% 的样品性能最优,随着溶质含量的增加, β 相和 γ 相的 B_{c2} 和 J_c 值均增大。在冷却方法上,淬火的 T_c 值略高于风冷, 4.2 K 时 B_{c2} 提高了约 70%, J_c 则显著提高。伴随着溶质含量增加, β 相含量的减少,晶界长度减小,使得 B_{c2} 和 J_c 值显著降低。三元 Sn-In-Bi 合金比二元 Sn-In 合金表现出更好的超导性能, $\text{Sn}_{35}\text{In}_{50}\text{Bi}_{15}$ 的 T_c 、 B_{c2} (4.2 K) 和 J_c (4.2 K , 0.01 T) 分别为

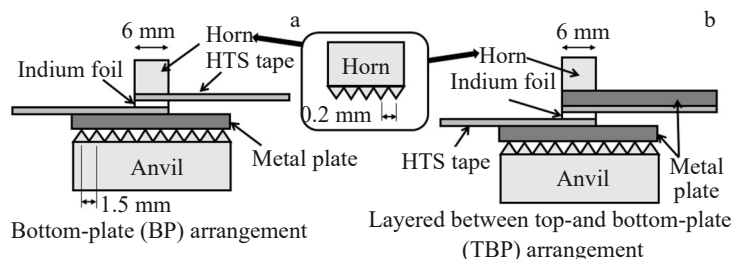


图 12 HTS 带材的 UW 工艺示意图

Fig.12 Schematic diagram of UW process of high-temperature superconducting (HTS) tapes^[35]

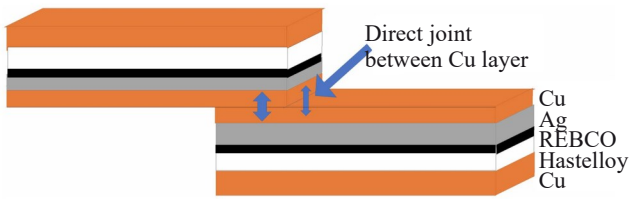


图 13 利用 Cu 层间直接连接的 REBCO 带接头示意图

Fig.13 Schematic illustration of joint structure of REBCO tape using the direct joint between Cu layer^[36]

6.9 K、0.18 T 和 $1.3 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但这些值仍然远低于含铅焊料，Mousavi 等人^[42]发现 SnInBi 焊料合金润湿 Bi-2212 线材的效果远不及 PbBi，因此，要想创造一种无铅的替代品以取代目前用于超导接头的标准焊料材料，还有很长的路要走。实际上不只是针对 Bi-2212 线材，所有的超导钎焊材料中，普遍性能比母导体更差，而且差距极大，超导钎料的 H_c 一般只有不到 1 T，个别含铅钎料 H_c 能达到 1~2 T^[43]和稍高的临界温度（一般不超过 10 K）^[5]，如果不含有铅元素则一般难以超过 0.5 T。同时，研究焊料与工艺参数（如温度、压力、持续时间、表面处理）对不同带材接头电学和力学性能的影响也是十分必要的^[44]。

Chen 等人^[45]采用了管内粉末熔体加工法制备 Bi-2212 圆线之间超导接头的方法，实验过程示意图如图 14 所示。将两根弯曲的线浸入腐蚀液中除去银包套，摆放成图 14a 的“祈祷手”（praying-hands）样并用银丝固定。将其放进模具中，装入预混合的 Bi-2212 粉末（2wt% Ag），在约 700 MPa 下压制，最后于 10^5 Pa 流动氧气中对接头进行热处理。通过差热分析发现，纯 Bi-2212 粒状粉末的熔化温度（890 °C）明显高于 Bi-2212 线圈的熔化开始温度（873 °C），而 Ag-CuO 反应的温度在其之下，因此加入 2wt% 的 Ag 后，熔化温度下降至 883 °C，防止接头与 Bi-2212 芯丝之间热膨胀系数失配，从而避免超导界面的分层，在图 15 所示的 SEM 图像中可见，两根圆线之间的 Bi-2212 超导界面没有明显的分层。所制接头在 $0.1 \mu\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的判据下自场 I_c 约为 900 A，在 14 T 时降至约 480 A，与导线

单独的 I_c 特性几乎相同。在场衰减测试中，在 4.2 K 和自场下，Bi-2212 超导接头的电阻低于 $5 \times 10^{-12} \Omega$ ，说明该方法制备的 Bi-2212 接头可以达到 PM 的要求。

Bi-2223 带材通常采用粉末装管法（powder in tube，PIT）制备，装管后经挤压、拉伸和轧制工艺，制备出包裹有银稳定层的多芯带，再经热处理和轧制制成带材^[46]。这种机械变形不仅在导体中诱导获得高 I_c 值所需的晶粒排列，而且还会破坏烧结材料，帮助缓慢反应得到所需的 Bi-2223 相，并有助于致密化^[5]。

Takeda 等人^[47]最早提出了 PIT 法制备单芯 Bi-2223 带接头的标准化流程：机械剥离或化学腐蚀暴露出芯丝进行搭接，用冷压焊将带材压紧，然后对压紧处进行热处理，将超导结构连接并修复与变形相关的损坏，制备出的接头 I_c 最高能达到 16.4 A。接头的载流能力取决于接头的几何形状、热机械过程中使用的压力、热处理时间和连接前的退火工艺，经过接头的电流往往受到接头附近的微裂纹和截面大小等的影响，如何通过对冷加工和热处理工艺的优化减轻负面影响对于 Bi-2223 带材的 PIT 接头的应用具有实际意义。

针对压紧这一步骤中压力大小对材料密度和电流密度的影响，Takeda 等人^[48]进行了探索。首先将 Bi-2223 粉末与 EtOH/1-BuOH 溶剂混合来获得浆料，滴到 Ag 片上并在空气中干燥，随后进行约 200 MPa 的单轴压制。其他样品覆盖有 30 μm 银箔并对它们进行第 1 次热处理。对中间压制后剩余的样品进行第 2 次热处理，两次热处理温度均在 3 kPa 氧分压的 813 °C 环境下加热 36 h。结果表明，施加压力有助于致密化，当压力为 $2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 时，对应的密度最大，为 4.21 g/cm^3 ， I_c 和 n 的取值范围分别为 22.8~42.6 A 和 13.1~18.9，而先前报道的超导接头中， n 值为 6~10^[49]，说明施加压力可以提高致密度和晶间 J_c 。多晶 Bi-2223 材料在热处理过程中会随着晶粒长大而膨胀，导致密度降低，热压可有效抑制这种膨胀。

同年 Takeda 等人^[50]又研究了热压对接头性能的影响，采用如图 16 所示热处理流程，过程中施加 0、5 和 13 MPa 压力并缓慢冷却。结果表明，在 $0.2 \mu\text{V}$ 电压判据

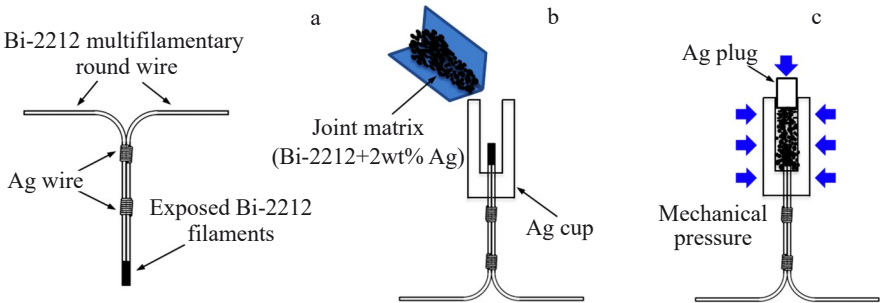


图 14 Bi-2212 圆线超导接头的制备方法

Fig.14 Fabrication procedure for a superconducting joint between Bi-2212 round wires^[45]

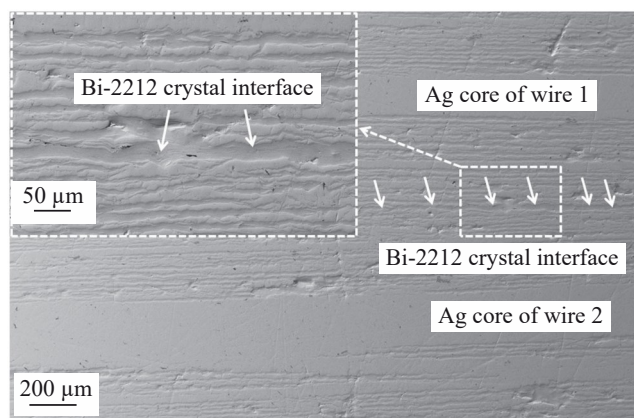


图 15 典型 Bi-2212 超导接头纵向截面的 SEM 图像

Fig. 15 SEM images of a longitudinal cross section of a typical Bi-2212 superconducting joint^[45]

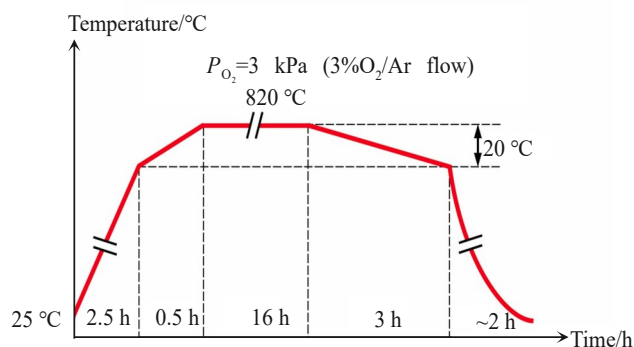


图 16 实验采用的 24 h 热压流程

Fig. 16 24 h heat treatment process used in the experiment^[50]

下,热压样品在 77 K 自场中测得 57.8 A 的 I_c 。在自场 4.2 K 时,闭环样品中的超导接头电阻为 $7.3 \times 10^{-15} \Omega$,闭环样品中可以流动的持续电流的最大值约为 170 A。热压工艺应该是一种有前途的方法,需要解决的问题是中间层的纯化和进一步致密化,这可能有效地改善热压超导接头的 I_c ,包括在磁场中的 I_c 。

2019 年, Jin 等人^[51]发明了一种接头的不均匀熔炼法 (joint by incongruent melting, JIM), 原理是对样品中的一部分进行热处理,使 Bi-2223 相不一致地融化为固体 Bi-2212 相和液相,两带表面的 Bi-2212 相在液相内接合,其结构如图 17 所示。首先暴露出 Bi-2223 芯丝,打磨掉焊料与银层。接着用 Pt 箔包裹芯丝并在 1163 K 下加热 1 min。最后将样品于 623 K 下 10^5 Pa 的氧气下退火 10 h 恢复超导性。经测量,接头在 4.2 K 时显示出 177 A 的高临界电流,是 77 K 时的 15 倍,电阻约为 $10^{-12} \Omega$,这是由于接头高温区存在 Bi-2223-Bi-2212-Bi-2223 结构,低温区可能存在 Bi-2223-Bi-2223 结构,通过 XRD 证实,如图 18 所示。图 18a 中 Bi-2223 相和 Ag 相清晰存在,高温区中的峰主

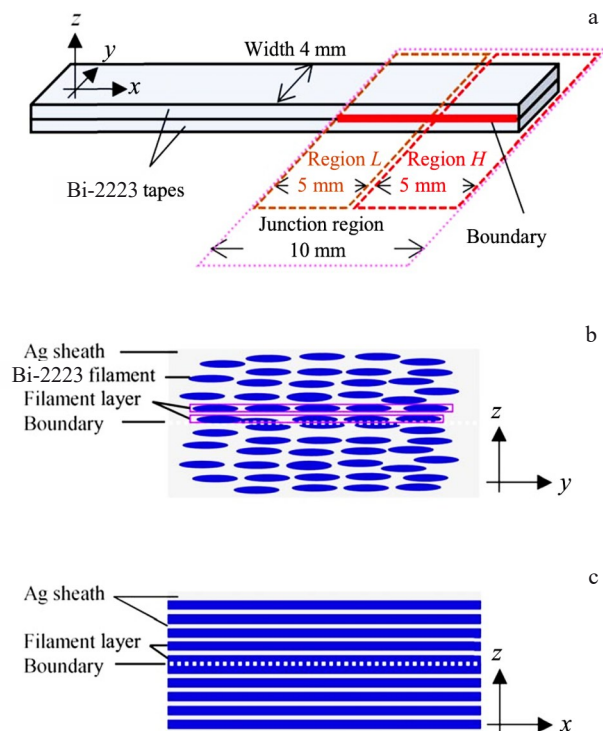


图 17 两根多芯 Bi-2223 带的接头结构示意图

Fig. 17 Schematic diagrams of joint structure with two multi-filamentary Bi-2223 tapes: (a) entire joint sample having two junction regions H (high-temperature) and L (low-temperature), (b) cross-section of junction region (y - z plane), and (c) cross-section of junction region (x - z plane)^[51]

要归属于 Bi-2212 相和 Ag 相,如图 18b 所示,而图 18c 中显示的低温区中峰分别归属于 Bi-2223、Bi-2212 和 Ag 相。2024 年, Kanazawa 等人^[52]也报道了类似原理和方法制备的接头,临界电流在 77 K 时为 40~50 A。不一致熔融形成的 Bi-2212 是一种良好的超导介质,因此不需要通过其他处理或晶体生长来获得超导边界。而且连接效率高,在熔点以上加热几分钟就足够了。如果使用点加热装置,可以在 1 h 内完成连接。

6 MgB_2 超导线材之间的接头

MgB_2 自从被 Nagamatsu 等人^[53]发现以来,其 39 K 的超导转变温度使得大多数 MgB_2 超导器件能够在液氮温区以上工作^[54],相比一些具有较高 T_c 值的材料, MgB_2 线材的制造成本也要低得多^[55],同时,其较大的载流密度、各向同性、多晶体中强连接晶界的特性使得其具有极大的优势和应用前景。 MgB_2 熔点较高,在高温下容易分解成非超导体,因此对反应后的 MgB_2 导线进行加热再结晶并不是形成高质量超导接头的有效方法。通过冷焊的方法同样无效,因为 MgB_2 是脆性陶瓷材料,比金属保护套更硬。此外, MgB_2 在 773 K 以上的温度下与氧气和水

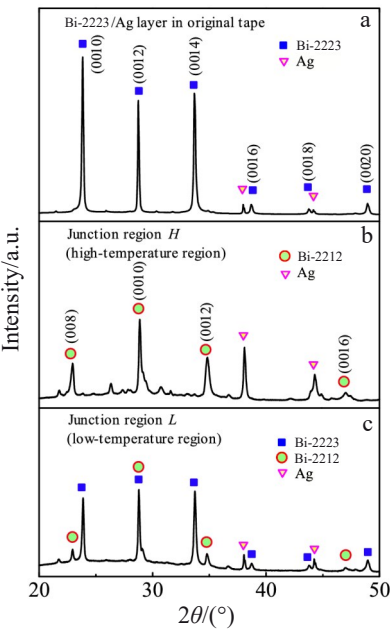


图 18 样品的 XRD 图谱

Fig.18 XRD patterns of samples: (a) exposed Bi-2223/Ag layer in original tape, (b-c) joined samples at junction regions *H* and *L*^[51]

反应,这意味着热处理必须在高纯保护气氛中进行^[56]。

最有希望的途径是利用液态 Mg 和固体 B 在 650 和 1090 °C 之间的快速反应,模拟在原位丝制造中的热处理过程^[5],即原位法,利用此方法制造接头的报道不多,但效果优秀。例如 2008 年, Li 等人^[56]就利用该方法制造 MgB₂ 接头。结果表明有接头的样品临界电流密度 *J_c* 可以达到无接头的样品 90% 以上,其中最佳样品的 *J_c* 约为 6.94×10⁴ A·cm⁻², 电阻为 7.44×10⁻¹² Ω。为使接头具有良好的连通性和较高的临界电流,接头区域的密度应尽可能高,最好将带材和接头一次烧结,避免二次烧结,更高的烧结温度和更长的持续时间可能有利于形成的 MgB₂ 晶粒的反应^[57]。

然而,利用原位法制备出的 MgB₂ 由于体积收缩而产生孔隙,影响电流传输的横截面积。Luo 等人^[58]采用 Mg 扩散法连接 MgB₂ 超导芯丝,将 MgB₂ 单芯导线在 700 °C 和流动的超高纯氢气中热处理 4 h,加热前后的示意图如图 19 所示,芯丝做成楔形以增加接触面积。随后对两块体施加不同的压力制备 B 块,参数如表 1 所示,在 470 MPa 下将 Mg 粉制成 Mg 块,随后在高纯氢气中热处理。在 940 和 392 MPa 压实压力下,接头的 *J_c* 分别为 5.86×10⁵ 和 4.74×10⁵ A·cm⁻², 其 *I_c* 分别为 46 A 和 51 A (20 K), 最高 *T_c* 值为 39 K。Mg 扩散法制备的连接体具有较高的 *J_c*, 并且初始 B 块体的密度越大,接头的 *J_c* 越高。这是由于改进了连接 MgB₂ 块在接头中的焊剂钉扎,增加了电流传输的横截面积,今后可通过优化接头结构获得更高的 *I_c* 值。

而 Liang 等人^[59]提出了使用单轴热压 (hot uniaxial

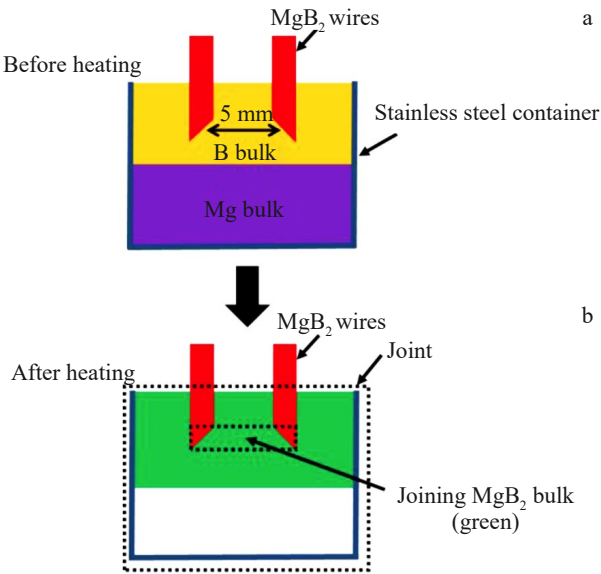


图 19 加热前和加热后的超导接头示意图

Fig.19 Schematic diagram of superconducting joint before (a) and after (b) heating^[58]

pressing, HUP) 法减少接头的孔隙,其流程为:将处理好的芯丝插入模具,填充混合粉末并进行密封防止氧化和 Mg 蒸发,施加压力并在 Ar 气氛中进行热处理保持压力下冷却至室温。HUP 能够促进芯丝表面形成 MgB₂ 相,减小孔隙,在原位反应中确保好的连通性。结果表明,室温加压 45 MPa,在 HUP 系统中加压 13.78 MPa,在 650 °C 下烧结 4 h 得到的接头在 12、15、20 和 25 K 时, *I_c* 分别为 47.6、47.3、40.3 和 30.1 A。所有接头的 *T_c* 均在 33.5 ~ 35.2 K。在显微结构上,性能最好的接头样品孔径小于 100 μm,观察到一些小晶体,推测是样品的碎片,通过 EDS 确认其中包含未反应的 Mg。作者表示后续的工作应放在测量接头的临界电流保持率 (critical current retention, CCR) 值和不同磁场下的 *I_c* 和 *n* 值上,测试接头在高场下的性能,以及优化工艺减少未反应的 Mg 相。

针对单芯丝的接头制造技术研究较早,发展得较为

表 1 不同压实压力下 B 块的密度和尺寸

Table 1 Densities and dimensions for the B bulks under different compaction pressures^[58]

Pressure/MPa	Density/g·cm ⁻³	Dimension/mm ³
392	1.20	25.0×6.0×4.1
470	1.23	25.0×6.0×4.0
548	1.26	25.0×6.0×3.9
627	1.28	25.0×6.0×3.8
784	1.34	25.0×6.0×3.6
940	1.39	25.0×6.0×3.5
1411	1.64	25.0×6.0×3.0

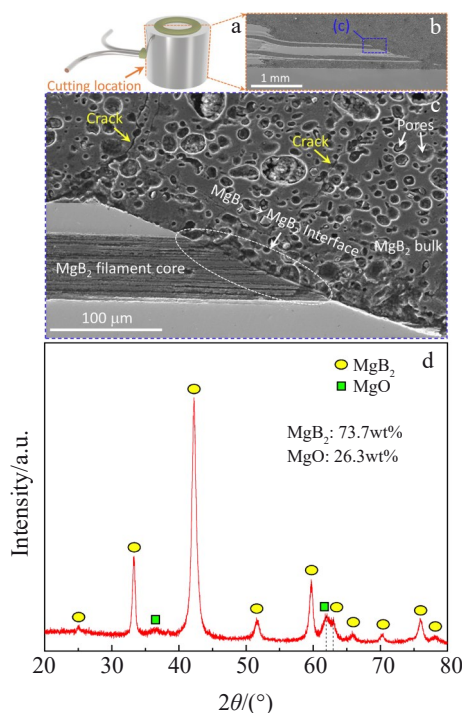


图20 接头的切割位置、接头的横截面及放大以及从接头的MgB₂块体中获得的粉末试样XRD图谱

Fig.20 Cutting location of the joint (a), SEM cross-sectional image of the joint (b), magnified SEM cross-sectional image of the selected location in Fig.20b (c), and XRD pattern of the powder specimen obtained from the MgB₂ bulk of the joint (d)^[60]

完善,相关报道非常多,但在MRI磁体中使用多芯MgB₂导体可以减少交流损耗,这对于实际应用中是十分必要的。Patel等人^[60]采用未反应的多芯丝MgB₂线制备接头,他们使用硝酸腐蚀掉壳层,在不锈钢模具中对齐并填充Mg和B粉,压实密封后在惰性气氛中进行热处理。结果表明,在20 kN的压力和650 °C温度下进行30 min热处理,获得了10 K的自场中193.5 A的 I_c ,在20 K的1 T中43.7 A的 I_c ,场衰减法测得接头电阻为 $5.48 \times 10^{-15} \Omega$ 。在20 K的自场中,这是目前MgB₂接头的报道中的最低值。通过扫描电镜观察接头的结果,如图20c所示,接头横截面的SEM观察到一些裂纹,并且对从MgB₂块体获得的粉末样品的XRD分析显示出高达26.3wt%的MgO杂质含量,作者认为这两个因素是降低接头 I_c 的原因。HUP的反应温度可能不足以使Mg从固态转变为液态,进而导致反应不完全,因此优化反应温度和压力,在减小孔隙率、提高样品纯度、增大反应生成率方面会有很大提升。

另外,已报道的硼化物相分解反应温度范围在850~1550 °C,过程为 $2\text{MgB}_2(\text{s}) \rightarrow \text{MgB}_4(\text{s}) + \text{Mg}(\text{g})$ 。该过程是在较低的Mg分压下进行的,Brutti等人^[61]通过实验发现气态Mg在低至610 °C温度下的损失严重。Ishiwata等人^[62]通过将MgB₄添加到原位(Mg:B=1:2)材料的烧结实

验显示了这种添加剂小比例添加的积极作用:在775 °C下,用2wt%的MgB₄粉末原位工艺制备的MgB₂样品在自场25 K时的临界电流密度比纯MgB₂样品高40%。但当进一步增加至10wt%时,Mg的过量使得MgB₄的快速形成,进而导致超导性能降低。

应用硼化物分解反应的原理,Glowacki等人^[63]使用PIT技术在Mg+B粉末下制备原位反应导线超导接头,其结构示意图如图21所示。在连接腔内填充Mg+B粉末后,将两丝固定,在垂直于接触芯含区域的方向上施加0.5 GPa的压力。最后在氩气常压炉中,900 °C的温度下烧结30 min,炉冷至室温,相关参数根据Mg-B二元相图选择。实验结果所得到的接头形貌和纤维

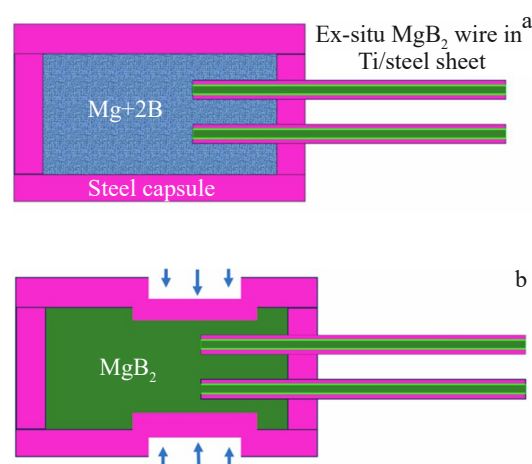


图21 实验所采用的接头结构示意图

Fig.21 Schematic diagram of the joint structure used in the experiment: (a) assemble the in-situ reacted MgB₂ wire into a cavity filled with a precompressed Mg+2B mixture with the same composition as the manufactured wire; (b) apply 0.5 GPa uniaxial pressure to the connection area^[63]

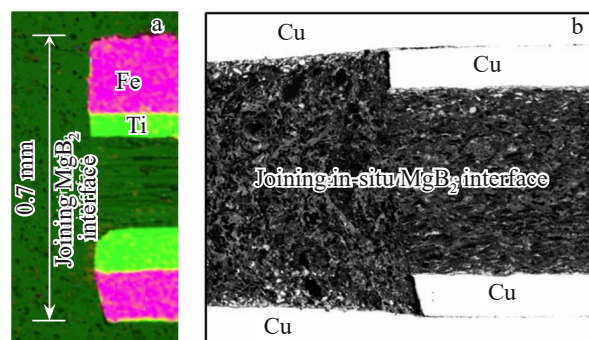


图22 焊丝与填充物在腔室内横截面图和SEM图像

Fig.22 SEM image of the cross-sectional interface between the wire and filler in the joining capsule: (a) EDS image, dark green represents MgB₂; (b) cross-sectional microstructure of the initial fully in-situ formed joint^[63]

组织如图22所示。图22a中深绿色代表 MgB_2 , 由于粉末的冷变形, 原丝具有明显的纤维状结构, 填料非常均匀。用22b中压实后在导线和填料之间的界面区域产生屈曲效应。25 K下接头的临界电流测量值为50 A, 而导线的临界电流测量值为100 A, 接头的 I_c 值在25 K自场下为导线的15%。

7 结束语

借助先进的计算机模拟、材料测试和分析技术, 超导材料及其应用正在飞速发展, 对公里级超导导线带材提出严格的要求。为实现超导导线带材的无损运行, 制备PM超导接头十分必要, 目前仍存在以下问题:

1) 对NbTi超导接头, 氧化问题在几种连接方法中都有出现, 但在钎焊连接中最严重, 高温下难以控制的氧化问题对钎焊的应用造成了阻碍, 且钎焊链接接头体积更大。冷压焊操作简单、可重复性好, 但常常需要使用到Hf或其他危险化学品。在NbTi-Nb₃Sn接头上常用钎焊法, 但含铅焊料不环保, 不含铅的焊料性能又相差很大, 未来的研究一定是突破无铅焊料的性能限制。点焊技术在使用上更加方便, 且可以获得良好键合, 代价是会改变NbTi的微观结构, 对此的研究偏少。

2) 制备性能优秀的REBCO CC接头, 需考虑压力、热处理时间、连接材料等, 其中调整表面抛光和表面放置角度最为简单。制备清洁的REBCO表面可以从消除REBCO表面的非超导沉淀和金属层去除方法的优化入手。此外, 一些REBCO CC表面覆盖非超导析出物, 需消除沉淀以获得更好的连接效果。

3) BSCCO超导体之间的连接通常是使用与制造其本身相同的方法, 比如PIT法、熔化法等。目前已有的工艺技术尚不稳定, 不同工艺下制备出的接头表面形貌与微观组织存在差异, 而且针对多芯的连接往往比不上单芯连接的性能, 还需对连接的机理进行深入探索。如果可以通过控制热处理参数等条件来控制晶体生长, 预期可以增加临界电流^[64]。

4) 已报道了多种单芯 MgB_2 的接头工艺, 多芯 MgB_2 能够减少交流损耗, 在大型磁体应用中以多芯为主, 但目前对于多芯 MgB_2 的报道偏少, MgB_2 在大型磁体中的应用非常有前景, 因此在这方面的工艺有待进一步探索。并且目前已经报道的内容中, 未反应 MgB_2 导线的超导接头比反应导线的超导接头表现出更好的性能^[65], 在其机理上可以更进一步探索。

超导连接技术是超导体应用中的重要一环, 未来连接技术一定是向着更加优秀的性能、更加简单的步骤、更加容易的热处理环境、更少使用有害化学品和有毒化学元素发展。相信通过科研工作者的不懈努力, 超导连接技术一定能更加完善。

参考文献 References

- [1] Cui Chunyan(崔春艳), Lei Yuanzhong(雷沅忠), Wang Qiuliang(王秋良). *Cryogenics & Superconductivity*(低温与超导)[J], 2011, 39(10): 33
- [2] Wei Wei(魏巍), Feng Yong(冯勇), Wu Xiaozu(吴晓祖) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 1999, 16(1): 12
- [3] Shao Hui(邵慧), Yan Zhongming(严仲明), Fu Lei(付磊) *et al.* *Cryogenics & Superconductivity*(低温与超导)[J], 2011, 39(3): 30
- [4] Wang Xiaolei(王骁磊), Yuan Wen(袁文), Zhang Teng(张腾) *et al.* *Cryogenics & Superconductivity*(低温与超导)[J], 2020, 48(11): 41
- [5] Brittles G D, Mousavi T, Grovenor C R M *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2015, 28(9): 093001
- [6] Xiong Zhikun(熊志坤), Yang Fang(杨芳), Jin Lihua(金利华) *et al.* *Materials China*(中国材料进展)[J], 2025, 44(3): 253
- [7] Park Y, Lee M, Ann H *et al.* *NPG Asia Materials*[J], 2014, 6(5): e98
- [8] Swenson C A, Markiewicz W D. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 1999, 9(2): 185
- [9] Williams J E C, Pourrahimi S, Iwasa Y *et al.* *IEEE Transactions on Magnetism*[J], 1989, 25(2): 1767
- [10] Cheng J S, Liu J H, Ni Z P *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2012, 22(2): 5
- [11] Patel D, Kim S H, Qiu Wenbin *et al.* *Scientific Reports*[J], 2019, 9(1): 14287
- [12] Liu S Y, Jiang X H, Chai G *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2013, 23(3): 4400504
- [13] Karvonen E, Rayroux J M. US Patent, US3527876 A[P], 1967
- [14] Zhang H Y, Senkara J. *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001: 5
- [15] Phillip S, Porto J V, Parpia J M. *Journal of Low Temperature Physics*[J], 1995, 101(3-4): 581
- [16] Brittles G D, Aksoy C, Grovenor C R M *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2016, 26(3): 1
- [17] Mousavi T, Darby W, Aksoy C *et al.* *MRS Advances*[J], 2016, 1(51): 3483
- [18] Cheng J S, Li L K, Zhou F *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2015, 25(3): 1
- [19] Chen S J, Jiang X Q. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2015, 19: 14
- [20] Cheng J S, Wang Q L, Zhou F *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2016, 26(7): 1
- [21] Sun W S, Cheng J S, Wang L *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(12): 4040
- [22] Banno N, Kobayashi K, Uchida A *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2022, 32(6): 1
- [23] Müller H, Schneider T. *Cryogenics*[J], 2008, 48(7-8): 323
- [24] Banno N, Kobayashi K, Uchida A *et al.* *Journal of Materials*

- Science*[J], 2021, 56(36): 20197
- [25] Goodman B B. *Reviews of Modern Physics*[J], 1964, 36(1): 12
- [26] Sun W S, Cheng J S, Wang L *et al.* *Journal of Low Temperature Physics*[J], 2023, 214(1–2): 68
- [27] Furuse M, Fuchino S, Yoshida Y *et al.* *Cryogenics*[J], 2022, 121: 103405
- [28] Ki S C, Hyounkyu K, Dong K P *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2008, 18(2): 1220
- [29] Seino Y, Ito S, Oguro H *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2015, 25(3): 1
- [30] Kato J, Sakai N, Miyata S *et al.* *Physica C-Superconductivity and Its Applications*[J], 2007, 463: 747
- [31] Hartwig Z S, Vieira R F, Dunn D *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2024, 34(2): 1
- [32] Ohki K, Nagaishi T, Kato T *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2017, 30(11): 115017
- [33] Pan Y, Sheng J, Wu W *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2017, 27(4): 1
- [34] Shin H S, Jung C H, Nisay A R. *Superconductor Science & Technology*[J], 2020, 33(11): 115007
- [35] Ito S, Hayasaka R, Yuki K *et al.* *Journal of Physics Conference Series*[J], 2020, 1559(1): 012065
- [36] Kato S, Chikumoto N. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2023, 33(5): 1
- [37] Subramanian M A, Torardi C C, Calabrese J C *et al.* *Science*[J], 1988, 239(4843): 1015
- [38] Malagoli A, Bernini C, Braccini V *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2013, 26(4): 045004
- [39] Zagura P, Kim I, Follows F *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2024, 37(5): 8
- [40] Scanlan R M, Malozemoff A P, Larbalestier D C. *Proceedings of the IEEE*[J], 2004, 92(10): 1639
- [41] Mousavi T, Aksoy C, Grovenor C R M *et al.* *Superconductor Science and Technology*[J], 2016, 29(1): 015012
- [42] Mousavi T, Davies T, Melhem Z *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2018, 28(4): 1
- [43] Warren W H, Bader W G. *Review of Scientific Instruments*[J], 1969, 40(1): 180
- [44] Zhang S, Li F, Yang G *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2019, 29(5): 1
- [45] Chen Peng, Trociewitz U P, Davis D S *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2017, 30(2): 025020
- [46] Tkaczyk J E, Arendt R H, Bednarczyk P J *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 1993, 3(1): 946
- [47] Takeda Y, Kobayashi K, Uchida A *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2022, 35(2): 02LT02
- [48] Takeda Y, Nishijima G, Kobayashi K *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2023, 33(5): 1
- [49] Mousavi T, Santra S, Melhem Z *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2021, 31(5): 1
- [50] Takeda Y, Nishijima G, Inoue K *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2023, 36(3): 035004
- [51] Jin X Z, Suetomi Y, Piao R Z *et al.* *Superconductor Science and Technology*[J], 2019, 32(3): 035011
- [52] Kanazawa S, Sekine C. *Superconductor Science & Technology*[J], 2024, 37(3): 5
- [53] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T *et al.* *Nature*[J], 2001, 410(6824): 63
- [54] Lvovsky Y, Stautner E W, Zhang T. *Superconductor Science & Technology*[J], 2013, 26(9): 093001
- [55] Parizh M, Lvovsky Y, Sumption M. *Superconductor Science & Technology*[J], 2017, 30(1): 014007
- [56] Li X H, Ye L Y, Jin M J *et al.* *Superconductor Science and Technology*[J], 2008, 21(2): 025017
- [57] Braccini V, Nardelli D, Penco R *et al.* *Physica C-Superconductivity and Its Applications*[J], 2007, 456(1–2): 209
- [58] Luo W H, Huang Z G, Cai X W *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2019, 29(5): 1
- [59] Liang H, Morawski A, Patel D *et al.* *Superconductor Science & Technology*[J], 2023, 36(12): 125011
- [60] Patel D, Matsumoto A, Kumakura H *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2020, 178: 198
- [61] Brutti S, Ciccioli A, Balducci G *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2002, 80(16): 2892
- [62] Ishiwata J, Muralidhar M, Inoue K *et al.* *Physics Procedia*[J], 2015, 65: 69
- [63] Glowacki B A. *Materials*[J], 2023, 16(19): 6
- [64] Ebara Y, Tsurudome T, Morie T *et al.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2018, 28(4): 1
- [65] Liang H, Patel D, Shahbazi M *et al.* *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2023, 11(7): 2217

Research Progress in Superconducting Joint Technology

Cao Likun¹, Yang Fang¹, Shi Jiangtao², He Yixuan¹, Zhang Shengnan², Yan Guo^{1,3}, Zhang Pingxiang^{1,2}

(1. Institute of Superconducting Materials and Applied Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Superconducting Materials Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(3. Xi'an Juneng Medical Engineering Technologies Co., Ltd, Xi'an 710028, China)

Abstract: Superconducting materials have broad application prospects in multiple fields, thus attracting global researchers to invest in them since their inception. Superconductive connection is a crucial part of the application of superconducting tapes and is also a component of forming persistent mode joints. However, superconducting joints currently have shortcomings in critical parameters, preparation difficulty, environmental impact, and other aspects. Therefore, scholars are constantly innovating and optimizing process methods. The structure of superconducting joints and the preparation methods and performance of four common types of superconducting material joints in recent years were introduced. The shortcomings and defects were summarized, and the future development of superconducting joints was analyzed, providing reference for the development of superconducting joints.

Key words: superconducting materials; superconducting joints; joint resistance

Corresponding author: Shi Jiangtao, Ph. D., Superconducting Materials Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, E-mail: shijiangtaohy@163.com