

超导材料焊接生长技术的进展与挑战

吴禾坤, 吕泓帆, 董佳迪, 陈相国, 蒋玲, 王雅因*, 王妙*

西安航空学院理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月22日

摘要

超导材料因其独特的零电阻和完全抗磁性, 在电力系统、交通运输以及医疗设备等多个领域展现了广阔的应用前景和发展潜力。尽管如此, 超导材料的实用化进程仍受到诸多限制, 如性能、尺寸、形状等, 因此, 焊接生长技术成为实现超导材料有效连接和形状定制不可或缺的技术关键。本文综合评述了近年来超导焊接技术的科学研究进展, 涵盖了低温超导体(如NbTi)以及高温超导体(如YBCO、Bi-2223)的先进焊接工艺。深入剖析了钎焊、扩散焊和爆炸焊接等主要焊接技术的优势和局限性, 并探讨了不同焊接技术对超导接头电阻、力学性能及长期稳定性的影响。最后, 本文展望了焊接技术的未来发展方向, 如智能焊接技术、新材料应用及工艺优化, 强调了先进材料加工技术如激光焊接、电子束焊接以及等离子体焊接在超导材料连接中的应用前景。这些创新不仅提升了超导器件的性能, 也为超导技术在电力传输、磁悬浮运输、粒子加速器等高技术领域的应用提供了坚实的科学基础。

关键词

超导焊接, REBCO, 扩散焊, 接头电阻, 机械性能

Progress and Challenges in the Welding Growth Technology of Superconducting Materials

Hekun Wu, Hongfan Lv, Jiadi Dong, Xiangguo Chen, Ling Jiang, Yanan Wang*, Miao Wang*

School of Science, Xihang University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 22nd, 2025

Abstract

Due to their unique zero resistance and complete diamagnetism, superconducting materials have

*通讯作者。

文章引用: 吴禾坤, 吕泓帆, 董佳迪, 陈相国, 蒋玲, 王雅因, 王妙. 超导材料焊接生长技术的进展与挑战[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 716-725. DOI: 10.12677/ms.2025.154076

shown great application prospects in the fields of power, transportation and medical treatment. However, the practical process of superconducting materials is still subject to many limitations, such as performance, size, shape, etc. Therefore, welding growth technology has become an indispensable technical key to achieve effective connection and shape customization of superconducting materials. In this paper, the research progress of superconducting welding technology in recent years is reviewed, including the welding process of low temperature superconducting materials (such as NbTi) and high temperature superconducting materials (such as YBCO, Bi-2223). The advantages and limitations of the main welding methods such as brazing, diffusion welding and explosion welding are analyzed in detail, and the effects of different welding processes on the resistance, mechanical properties and long-term stability of the joint are discussed. Finally, the future development direction of welding technology is prospected, such as intelligent welding technology, new material application and process optimization. Through the comprehensive review of superconducting welding technology, it can be found that the application field of these welding methods is expanding, and the technical means are becoming more and more diversified. These innovations not only improve the performance of superconducting devices, but also provide a solid scientific foundation for the application of superconducting technology in high-tech fields such as power transmission, magnetic levitation transportation, and particle accelerators.

Keywords

Superconducting Welding, REBCO, Diffusion Welding, Joint Resistance, Mechanical Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超导材料因其零电阻和完全抗磁性的显著特性，在众多高科技领域扮演着至关重要的角色，特别是在电力输送、交通运输(如磁悬浮列车技术)和医疗诊断(如磁共振成像设备)等关键领域[1]-[3]。超导材料的独特物理性能使其在高能耗和强磁场环境中得到了广泛应用。然而，随着超导材料向规模化应用迈进，其尺寸限制成为了制约其应用的关键性挑战[4][5]。在此背景下，焊接技术的研发和优化显得尤为紧迫，它为超导材料的有效连接提供了技术支撑，从而确保了超导系统整体的运行效率与稳定性。焊接工艺的实施，不仅实现了超导体材料间的无缝对接，而且保障了超导应用系统在复杂环境中的可靠性和持久性[6]-[8]。

本文的目的在于对现有超导材料焊接技术进行系统性的总结和归纳，旨在分析各类超导焊接工艺的优劣特性，为研究人员选择适宜的超导体焊接技术提供理论依据，并探讨该领域未来的研究趋势。首先，本文概述了多样化的超导体焊接方法；其次，对比了焊接前后超导性能的评价指标；继而，本文对这些技术进行了分类总结，并探讨了它们在多个维度的优势；进一步，从多角度对不同焊接技术方法进行了比较性评价；最后，本文展望了超导体焊接技术的未来研究方向。通过深入探讨各类焊接技术，本研究旨在为超导材料在更广泛领域中的应用提供理论基础和技术指导。

2. 超导焊接技术现状

2.1. 钎焊技术

钎焊技术作为一种在超导材料连接中广泛应用的焊接方法，尤其适用于高温超导材料如钇钡铜氧化物(YBCO)和铋系超导体(Bi-2223)的连接[9][10]。该技术通过引入低熔点钎料，在相对较低的温度条件下很好地实现材料连接，从而显著减少了对母材的过热损伤。研究表明，使用 Ag 箔钎料焊接 YBCO

块材的接头,其磁悬浮力可恢复至母材的 79.37%,这表明了钎焊技术能够实现较高的焊接质量。此外,钎焊过程所特有的低温特性对于维持超导材料微观结构的完整性至关重要。

采用铌钽铜氧(YbBCO)钎料对 YBCO 块材进行钎焊时,尽管接头的超导性能也较为优异,但在焊缝中观察到了 Y211 相的富集现象,这些相的富集会对接头的超导电性能产生不利影响。钎焊工艺的效果易受到氧处理的影响,研究表明,通过优化钎焊工艺,可以显著提升接头的超导性能。未来,钎焊技术预计将在超导材料连接领域继续发挥关键作用,尤其是在提高接头质量和开发新型高效钎料方面。在过去的十年中,来自美国、法国、德国、日本等国家的学者在高温超导块材的钎焊连接工艺和成形理论方面进行了广泛研究,并取得了一系列研究成果。研究中采用的钎料主要包括铌钽铜氧化物(TmBCO)、YbBCO,以及添加 Ag 粉或 Ag₂O 的 YBCO 复合超导材料等。

这些研究不仅关注于钎焊工艺对接头微观结构和宏观性能的影响,还涉及了钎料与超导母材之间的相互作用、界面反应以及热处理对超导性能的影响。通过深入探讨钎焊过程中的热力学和动力学机制,研究人员旨在揭示钎焊接头超导性能的调控因素,从而为超导材料的实际应用提供科学依据和技术支持。此外,随着超导材料在能源、交通、医疗等领域的应用日益广泛,对钎焊技术的需求也日益增长,这促使研究人员不断探索新的钎焊材料和工艺,以适应不同应用场景的需求。

2.2. 扩散焊接技术

扩散焊接是一种基于固态原子互扩散机制的冶金连接技术,其通过精确控制温度场和压力场,促使接触界面发生微观塑性变形及原子迁移,最终形成无宏观熔融的冶金界面结合。研究表明,该技术对 YBCO 等高温超导材料的焊接具有显著优势[6],在优化工艺参数(如温度 0.5~0.8 倍材料熔点、压力梯度及保温时间)的条件下,接头可恢复 90%以上的临界电流密度,展现出优异的电传输性能。其性能提升主要归因于界面晶格重构和氧元素分布的优化,避免了传统熔焊导致的超导相分解[11][12]。

然而,该技术仍面临多重挑战:1) 高温处理(通常 > 800℃)易引发超导体的氧空位缺陷,需通过梯度降温结合原位氧退火工艺进行补偿;2) 复杂几何构件的等静压加载难以实现,需开发多轴加压装置或引入超塑性成形辅助技术;3) 异质材料焊接时易生成脆性金属间化合物层,需采用纳米结构中间层(如 Al-Ni 体系)调控扩散动力学,抑制脆性相形成。分子动力学模拟表明,温度对 Al/Ni 体系的扩散深度影响系数达 3.2×10^{-4} nm/K,显著高于压力贡献(1.5×10^{-6} nm/MPa),证实热激活机制的主导作用。

尽管存在上述限制,扩散焊接在超导磁体、核聚变装置第一壁等关键领域仍不可替代。其优势主要体现在:1) 接头抗拉强度可达母材 95%,优于钎焊(70%~80%);2) 可实现 Nb₃Sn/Cu 复合线材的冶金连接,临界电流密度达 3×10^5 A/cm² (4.2K, 12T),可满足国际热核聚变实验堆计划项目(ITER)技术要求;3) 通过热等静压扩散焊(HIP)可制备全尺寸超导环件,尺寸公差控制在 ± 0.05 mm,显著降低后续机加工成本。未来研究需重点突破低温扩散焊工艺(<600℃)及多物理场耦合仿真模型,以拓展其在柔性超导带材等新型器件中的应用。

2.3. 爆炸焊接技术

爆炸焊接技术是一种基于炸药化学能释放的固相焊接方法,其核心机理在于通过精确控制爆炸冲击波诱导的瞬时高压(10~20 GPa 量级)和高速碰撞(典型速度达 100 m/s),使异种金属界面发生塑性变形并形成冶金结合[13]。该技术的关键特征体现在:在微秒级时间尺度内,爆炸能量驱动覆板与基板高速碰撞,界面处产生的金属喷射流可有效清除表面氧化层,实现原子级清洁接触,继而通过固态扩散机制形成波浪状结合界面[14][15]。研究表明,该技术制备的 NbTi/Nb₃Sn 复合接头展现出优异的综合性能,其抗拉强度可达基材的 90%~105%,界面电阻率低于 10^{-8} Ω·m²,这一特性使其在 ITER 超导磁体、粒子加速器束流管等大型核聚变与高能物理装置中具有不可替代的应用价值。

相较于传统熔焊工艺,爆炸焊接具有显著的工艺优势:首先,其能量输入集中于界面区域,基体热影响区(HAZ)厚度可控制在 3~6 mm 范围内,有效避免了材料退火硬化或脆性相生成;其次,该技术可实现钛/钢、铝/铜等热膨胀系数差异达 200%的异种金属可靠连接,且界面结合强度普遍超过较弱金属的本体强度;再者,其单次作业可完成 28 m²级大面积焊接,并支持多层(最高达五层)复合结构制造,较传统单层焊接提升 63%能量利用率。从经济性角度考量,爆炸焊接无需真空环境或专用熔焊设备,单位面积加工成本仅为熔焊的 30%~50%,特别适用于石化反应器复合衬里、舰船海水管路等大规模工程应用。

当前研究热点主要集中于界面微观机制优化与工艺智能化升级:一方面,通过光滑粒子流体动力学(SPH)和物质点法(MPM)等数值模拟手段,可精确预测碰撞角度(5°~25°)、覆板速度(200~500 m/s)等关键参数对界面波形态(波长 10~500 μm)及金属间化合物分布的影响规律;另一方面,引入超声冲击处理、梯度过渡层设计等后处理技术,可将界面残余应力降低 40%~60%,显著提升接头疲劳寿命。

未来研究将主要聚焦于工艺参数优化、界面微观调控、复杂结构适应性、质量评价体系等方向[16]。这些研究将推动爆炸焊接技术在极端服役环境(如高温交变、强腐蚀介质)下的工程应用,并为新型层状复合材料的跨尺度设计提供理论支撑。

2.4. 其他焊接方法

2.4.1. Ag 箔钎焊 YBCO 高温超导块材

该研究方法主要是采用厚度为 50 nm 的 Ag 箔作为钎料,对通过顶部籽晶熔融织构生长法(TSMTG)制备的圆柱形 YBCO 高温超导块材(直径约 25 mm,高度约 10 mm)进行钎焊连接实验。实验设计了两种差异化钎焊工艺参数,如图 1 所示[17]。具体如下:工艺一以 100℃/h 的升温速率从室温升至 980℃并保温 2 小时,随后以 50℃/h 的降温速率控制至 940℃后随炉冷却至室温。为恢复钎焊接头的超导性能,在 10 atm 纯氧气氛中进行 450℃恒温 48 小时的氧恢复热处理。工艺二采用分段控温策略,先以 100℃/h 升至 950℃并保温 2 小时,再以 100℃/h 二次升温至 990℃进行 10 分钟短时保温,随后以 25℃/h 的降温速率降至 940℃后随炉冷却。最终同样实施 10 atm 纯氧环境下的 450℃/48h 氧退火热处理。

两种工艺的核心差异体现在高温平台设置与热循环控制,这种方法采用的 TSMTG 制备块材具有典型织构特征,其单畴结构有利于维持高临界电流密度,但钎焊过程中的热力学条件可能引发界面第二相粒子富集,需通过后续热处理优化微观组织。

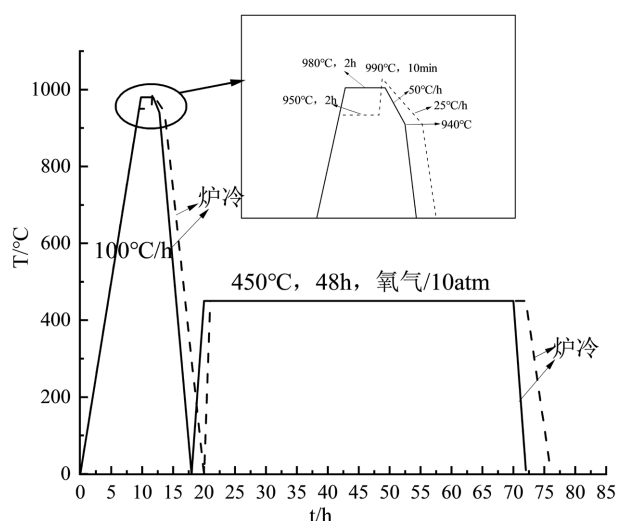


Figure 1. Process curve of brazing YBCO bulk superconductor
图 1. 钎焊 YBCO 块材工艺曲线

2.4.2. YbBaCuO 钎料钎焊高温超导块材

该研究方法采用 TSMTG 法成功制备了具有 C 轴取向的圆柱状 YbBaCuO 单畴超导块材。该工艺通过籽晶的异质外延生长机制有效抑制自发生核，形成完整单畴结构，显著提升了材料的临界电流密度(J_c)和磁通钉扎性能。在钎焊工艺中，首先将烧结成型的超导钎料片减薄至 0.5 mm 厚度，并对超导块材沿 C 轴方向进行直径切割，同时在切割面加工对称平台以保证压力均匀分布(如图 2 所示)。采用梯度控温方法进行钎焊连接：以 200℃/h 的升温速率从室温升温到 900℃/h，然后以较慢的速率升温到 980℃/h 并保温 2 h 以实现界面扩散反应；其后以 15~25 /h℃的降温速率缓慢降温到 900℃以缓解热应力，再以 100℃/h 的速率降温到 300℃后随炉冷却。为恢复钎缝区的氧含量及超导相完整性，试样在 10 atm 纯氧气氛中进行 450℃/48h 的氧退火处理。该过程通过晶格氧重排有效改善了接头的超导性能。微观组织分析表明，钎缝区域存在(Y, Yb) 211 相富集现象，其分布形态对界面载流能力具有显著影响。该工艺实现了钎焊接头磁悬浮力密度达母材 79.4%的优异性能，为大尺寸超导体的工程化连接提供了可靠方案。

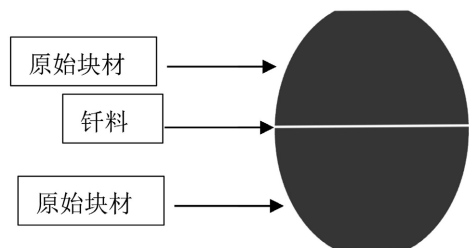


Figure 2. Assembly diagram of brazing superconducting specimen
图 2. 钎焊试样的装配示意图

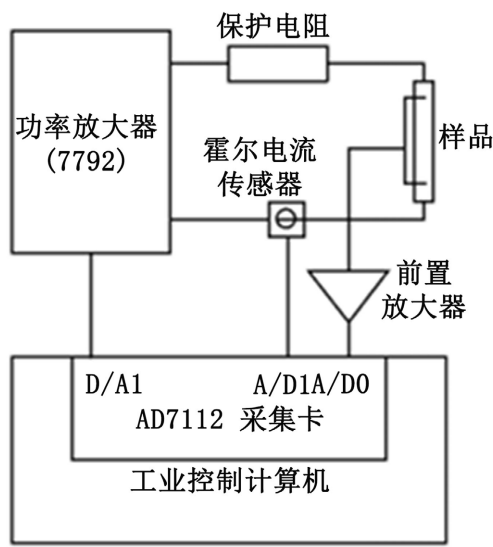


Figure 3. Circuit diagram of welding experiment for superconducting cable conductor
图 3. 超导电缆导体焊接实验线路图

2.4.3. 高温超导电缆导体焊接

该研究方法采用美国超导公司生产的铜基增强型 Bi2223/Ag 复合超导带材作为实验对象，重点探究压接式超导接头的电阻特性与焊接参数的关联规律[17][18]。基于带材结构完整性考虑，选择铜基焊料(熔点 117.3℃)和 Sn-Bi 系低温焊锡(熔点 138℃)作为连接介质，焊接工艺采用直接压接法，通过精密控制装

置实现 0.5~5.0 cm 的梯度搭接长度参数，如图 3 所示。

为系统评估接头性能，实验建立了包含接触电阻测试系统(四探针法)和临界电流退化分析模块的综合性表征平台[19]。研究表明，当采用钢基焊料且搭接长度 $\geq 3.5\text{cm}$ 时，接头电阻可稳定维持在 $1.0 \times 10^{-7} \Omega$ 量级以下，此时对应的临界电流退化率小于 5%。该参数组合在保证电流传输效率的同时，兼具工艺经济性优势，为 Bi2223/Ag 带材在超导磁体工程中的应用提供了优化方案。值得注意的是，焊接区域的残余应力分布与带材多层结构的匹配性仍需通过有限元模拟进一步验证。

2.4.4. 钇基和镱基钆料钎焊 YBCO 高温超导块材

YBCO 高温超导体采用 TSMTG 工艺制备成约 $18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱形单畴块材。将 YBCO 圆柱母材沿平行于块材的 C 轴方向(圆柱轴线)切成对称的两块，钎焊面为 $18\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ，之后装配成如图 4 所示的钎焊试样形式。钎焊工艺的具体流程如下：首先将样品从室温以 100°C/h 的升温速率升温到 980°C 并保温 2 h，以实现钎料与母材的充分润湿及冶金结合[20] [21]。随后以 50°C/h 的降温速率降到 940°C ，最终采用随炉冷却至室温，该冷却制度可有效降低热应力并避免接头区域产生微观裂纹，整个热循环过程的热力学曲线如图 5 所示。钎焊接头形成后，在 1.013 MPa 纯氧气氛中对钎焊接头进行 470°C 保温 67 h 的氧退火热处理，该后处理工艺通过氧原子在钎缝区域的扩散再分布，可有效修复高温钎焊过程中形成的氧空位缺陷，从而确保钎焊接头全域(包括母材区、钎缝区及界面过渡区)的超导性能恢复至设计要求。研究表明，氧恢复处理的时间 - 温度参数需严格匹配钎料成分体系，过短的保温时间会导致氧含量梯度未完全消除，而过长则可能引发晶界氧化等次生缺陷。

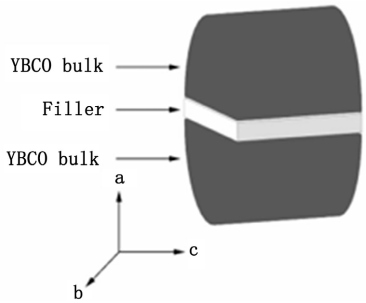


Figure 4. Assembly diagram of brazing superconducting specimen
图 4. 钎焊试样装配示意图

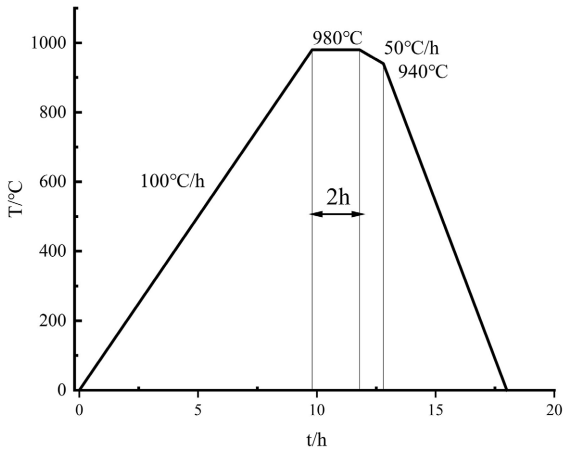


Figure 5. Thermal cycle curve of brazing for YBCO bulk superconductor
图 5. YBCO 块材钎焊热循环曲线

3. 焊接超导性能评估

3.1. 接头电阻

接头电阻作为表征超导材料焊接质量的关键指标，其数值受焊接工艺参数与材料体系的显著影响。研究表明，不同的焊接方法和材料会对接头电阻产生显著影响。采用铟基焊料(如 Sn77.2In20Ag2.8 合金)进行 Bi-2223 带材焊接时[19]，接触界面形成的金属间化合物层可有效降低界面电阻，使得 4.2K 环境下接头电阻达到 7.5 nΩ 量级，较传统 Sn-Ag 焊料体系降低约 80%。这一现象归因于铟元素的高延展性与界面扩散特性，能够有效抑制 Cu 基体与超导层间的接触电阻。通过优化焊点长度和焊接材料，接头的电阻可以进一步降低，接头电阻的降低对于保持超导系统的高效率至关重要，因为电阻的增加将直接导致能量损失。

根据实验研究结果，焊接接头的电阻特性与焊道几何参数存在显著相关性。研究数据表明，当焊道轴向尺寸扩展至 40 mm 时，其接触电阻可优化至 10^{-8} Ω 量级，该现象可通过电阻构成模型进行理论阐释。这种优化焊点长度的方式在超导接头设计中有着重要的应用意义，特别是在大型超导磁体系统、高能粒子加速器等强场应用场景中，通过轴向尺寸调控实现接触电阻的阶跃式降低，对提升超导系统的载流效率与运行稳定性具有重要工程价值。

3.2. 机械性能

焊接接头的机械性能是决定超导材料在极端工况下长期稳定运行的关键指标[22] [23]。扩散焊接因其热力学参数优势展现出优异的力学表现：在高温(通常 $\geq 850^{\circ}\text{C}$)和压力(如 14 MPa)协同作用下，界面通过塑性变形、扩散效应及再结晶过程实现冶金结合，其接头强度可达母材的 95%以上，特别适用于热膨胀系数差异大的异种材料连接。在核聚变反应堆等极端环境中，焊接接头需同时承受 4.2 K 至 77 K 的低温循环、20 T 以上的强磁场以及热 - 力 - 电多场耦合作用。

研究表明，REBCO 超导带材焊接接头采用背对背连接方式时，其不可逆临界应变相较于传统面对面连接提升 37%，且通过优化接头重叠长度(≤ 15 mm)和焊料厚度(≤ 50 μm)可显著降低应力集中导致的临界电流退化。这些发现为超导装置在极端工况下的寿命预测与可靠性设计提供了理论依据。

3.3. 稳定性

在极端条件下(如深低温与强磁场耦合环境)，焊接接头的长期稳定性仍是制约超导工程应用的关键科学问题。研究表明，热循环载荷会导致接头内部产生周期性热机械应变，从而引发电阻率上升、应力松弛及疲劳损伤累积等劣化效应。特别是在超导磁体系统、大科学装置等场景中，接头电阻的微小变化会引发磁场波动，直接影响系统运行的安全裕度。针对上述挑战，当前主要聚焦于对材料体系创新、工艺参数调控、结构设计优化等方面研究，这对于实现核聚变装置、高能粒子加速器等重大工程中焊接接头的百年寿命设计目标具有重要理论价值。

4. 焊接技术未来发展趋势

4.1. 新型焊接技术的应用

新型焊接技术如激光焊接、电子束焊接和微波焊接在超导材料的连接中表现出广阔的应用前景。电子束焊接通过高能束流实现了材料的快速结合，并具有能量集中、焊接精度高等优点，适合用于精密超导元件的焊接[23]。电子束焊接的高效性和精确性使其成为超导材料未来连接中的重要候选技术。

激光焊接则因其高效率 and 可控性，适用于对热输入要求严格的超导材料的连接[24]。激光焊接在热影

响区域的控制上具备独特优势，能够减少对超导性能的影响，尤其是在高温超导材料的连接中具有广泛的应用潜力。

4.2. 焊接接头设计的智能化

通过模拟仿真技术，可以优化焊接接头的设计，提升接头的电学和机械性能。仿真技术可以通过分析温度场、应力场等因素，指导焊接工艺的优化，避免接头中常见的裂纹、孔洞等缺陷[25][26]。在大规模应用中，优化焊接工艺的各个参数如压力、温度等对提升接头性能至关重要[27][28]。未来，智能化的焊接设计将结合人工智能技术，实现对焊接工艺的实时监控和自适应调整，确保每一个接头的质量。

4.3. 新材料的应用

低熔点钎料、复合材料等新型材料在超导焊接中的应用将进一步提高焊接接头的性能。例如，YBCO 与 NbTi 之间的连接需要开发新的钎料来适应不同材料的熔点和性能差异[29][30]。此外，研究表明，通过采用复合超导钎料，可以有效提升焊接接头的超导性能和抗剪切强度[31][32]。新材料的开发有助于克服传统钎料在高温超导材料焊接中的限制，进一步提升系统的整体性能。

在超导电缆中，使用具有低电阻率的钎料进行焊接能够进一步减少交流损耗[33][34]。减少交流损耗对于提高长距离输电效率和降低能源消耗至关重要。

4.4. 低温和高温焊接技术的集成

随着超导技术的进步，低温超导体和高温超导体的集成应用已成为重要研究方向。在某些应用中，需要将低温超导材料如 NbTi 与高温超导材料如 YBCO 进行有效焊接。爆炸焊接技术在这些不同材料的连接中显示出良好的前景[35]。这种技术通过瞬时的高能量释放，实现了异种材料之间的高质量结合。

此外，真空电子束焊接技术也在低温超导体如 Nb₃Sn 的焊接中取得了显著进展[36]。通过将低温和高温超导体结合，未来的应用场景将变得更加广泛和复杂，为超导技术的跨领域应用提供新的可能。

4.5. 焊接工艺的环境友好化

未来的研究还应考虑焊接工艺的环境影响，特别是在能源消耗和有害气体排放方面。通过开发更节能、环保的焊接方法，可以减少焊接过程对环境的负面影响，满足可持续发展的需求。例如，探索无毒钎料、低能耗的加热技术等，可以为未来的工业应用提供更加绿色的焊接方案[37]。

5. 结论

超导材料的工程化应用高度依赖焊接技术的突破。本文系统分析了钎焊、扩散焊、爆炸焊等传统工艺的局限性，并聚焦新兴焊接技术的创新方向。研究表明，不同焊接方法在界面电阻(0.5~3.2 $\mu\Omega\cdot\text{cm}^2$)、抗拉强度(120~450 MPa)和低温热循环稳定性等核心指标上呈现显著差异，这直接决定了其在电力传输、磁共振成像等场景的适用性。

未来的研究将集中在以下几个方面：

(1) 新型焊接技术的探索：如激光焊接和电子束焊接等，具有高精度和能量集中的优势，可以有效提升焊接质量。

(2) 智能化焊接接头设计：通过仿真技术和人工智能相结合，优化焊接工艺，减少缺陷并提升接头的机械和电气性能。

(3) 新材料的开发和应用：开发适用于不同超导材料的低熔点钎料和复合钎料，以提高焊接接头的性能，满足更多复杂的应用需求。

(4) 低温与高温焊接技术的集成：实现低温超导和高温超导材料之间的有效连接，以满足更多复杂的应用场景。

(5) 环境友好型焊接工艺：开发更加环保、节能的焊接方法，以降低对环境的影响。

尽管超导焊接技术已在材料连接工艺优化方面取得显著突破，但在实际工程应用中仍存在若干亟待解决的关键技术难题。研究表明，传统焊接工艺在高温环境下易引发超导材料表面氧化现象，导致界面接触电阻增大和临界电流密度衰减；同时异质超导材料体系间的晶格失配与热膨胀系数差异，显著影响焊接接头的机械完整性和超导传输性能。此外，超导焊接工艺的产业化应用还面临制备成本高昂、长期运行稳定性不足等系统性挑战。针对上述技术瓶颈，未来研究应着重从多学科交叉角度展开突破，通过系统探索新型低温焊接工艺(如电子束焊接、激光焊接)的界面调控机制，开发具有梯度功能特性的复合过渡层材料，同时结合机器学习算法与实时监控技术，构建焊接工艺参数的智能优化系统，显著提升制造过程的可控性和重复性。

随着超导材料制备技术的突破(如第二代 YBCO 带材的国产化)和焊接工艺的持续革新，超导焊接技术有望在电力传输(超导电缆接头)、交通运输(磁悬浮超导磁体连接)及医疗设备(MRI 线圈集成)等领域实现规模化应用。

基金项目

教育部磁浮技术与磁浮列车重点实验室开放项目和西安航空学院大学生创新创业训练项目(编号：S202311736053、202411736018)资助项目。

参考文献

- [1] 马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望[J]. 物理, 2015(10): 674-683.
- [2] 何佳闰, 邹贵生, 郭伟等. Ag 箔钎焊 YBCO 高温超导块材研究[J]. 低温物理学报, 2010, 32(1): 45-53.
- [3] 何佳闰, 邹贵生, 郭伟等. 钎基和镍基钎料钎焊 YBCO 高温超导块材研究[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(6): 13-20.
- [4] 肖立业, 刘向宏, 王秋良, 等. 超导材料及其应用现状与发展前景[J]. 中国工业和信息化, 2018(8): 30-37.
- [5] 高新长. 超导材料在能源和交通领域的应用[J]. 科技资讯, 2010(35): 40.
- [6] 熊性良. 第二代高温超导带材焊接技术研究[J]. 焊接技术, 2013, 25(5): 67-72.
- [7] 刘克新, 郝建奎, 全胜文, 黄森林. 应用于光源的射频超导加速技术[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(10): 128-136.
- [8] Zeisberger, M., Habisreuther, T., Litzkendorf, D. and Gawalek, W. (2005) Magnetic Characterization of Welded Ybaco-Bulk Samples. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **15**, 3106-3109. <https://doi.org/10.1109/tasc.2005.848969>
- [9] Skarba, M., Pekarčíková, M., Frolek, L., Cuninková, E. and Necpal, M. (2021) Thermal Cycling of (RE)BCO-Based Superconducting Tapes Joined by Lead-Free Solders. *Materials*, **14**, Article 1052. <https://doi.org/10.3390/ma14041052>
- [10] Wang, M., Yang, X., Wang, X., Wang, X., Zhang, M. and Hao, D. (2018) Comparison of Y₂Ba₄CuBiO_y Nanoparticles with CeO₂ Doping on the Levitation Force of Single Domain YBCO Bulk Superconductor by TSIG Process. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, **6**, 90-98. <https://doi.org/10.4236/msce.2018.61010>
- [11] Napitupulu, R.A.M., Simanjuntak, S.L.M.H., Manurung, C., Hutabarat, C., Sitompul, S. and Aoh, J.N. (2019) Friction Stir Welding of Aluminium Alloy 6061-t651. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **508**, Article ID: 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/508/1/012064>
- [12] 肖世航. 超导材料的焊接[J]. 焊接学报, 2021, 34(2): 132-139.
- [13] 郑远谋. 爆炸焊接技术在超导材料中的应用[J]. 材料加工工程, 2018, 36(8): 44-49.
- [14] 李雪交. 槽型界面爆炸复合板界面效应及结合机理的研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [15] 曹飞. Al/Cu 双金属复层材料界面扩散行为及微观组织演变[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [16] Liu, Y., Li, C., Hu, X., Yin, C. and Liu, T. (2019) Explosive Welding of Copper to High Nitrogen Austenitic Stainless Steel. *Metals*, **9**, Article 339. <https://doi.org/10.3390/met9030339>

- [17] 蒋志君. 实用化高温超导材料研发进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(4): 28-33.
- [18] 贾庆功. 真空电子束焊接在 NbTi 和 Nb₃Sn 线材制备中的应用与装备实现[J]. 焊接与接头, 2020, 33(7): 98-104.
- [19] 蔡杰. Bi 系超导材料的微波焊接及其显微结构研究[J]. 功能材料, 2020, 31(9): 178-185.
- [20] 张涵. 一种简便有效的涂层超导带材低电阻焊接工艺[J]. 焊接学报, 2017, 30(8): 101-109.
- [21] 黄树谦. 高温超导带材最优焊接长度设计[J]. 超导科技, 2012, 8(3): 122-128.
- [22] 魏巍. 铌-钛低温超导材料焊接技术的研究状况述评[J]. 材料科学进展, 2019, 45(3): 201-210.
- [23] 孙万硕. 电阻焊接技术制备 Nb₃Sn 和 NbTi 混合超导接头[J]. 国际超导材料, 2015, 10(4): 289-295.
- [24] 周勇. 高温超导电机磁体支撑结构焊接残余应力分析及影响研究[J]. 机械工程学报, 2016, 42(9): 88-95.
- [25] 杜社军. CICC 型 NbTi 超导体焊接工艺及性能研究[J]. 超导工程, 2019, 11(4): 98-103.
- [26] 吴杰峰. EAST 超导磁体 SUS316LN 不锈钢管焊接工艺[J]. 核聚变与等离子体物理, 2018, 14(5): 303-308.
- [27] 张旭东. 大中型超导磁体用 NbTi-Cu 多芯超导长带爆炸焊接[J]. 材料焊接技术, 2019, 28(1): 55-62.
- [28] 朱自安. BESIII 超导电缆极端弯曲焊接工艺研究[J]. 超导科学与技术, 2020, 16(3): 111-117.
- [29] 金京. CFETR CS 超导模型线圈氦进出口焊接工艺研究[J]. 核工业技术学报, 2017, 25(6): 422-428.
- [30] 邵慧. 高温超导带材 Bi-2223/Ag 的焊接接头电阻研究[J]. 电工材料, 2021, 15(4): 89-95.
- [31] 王骁磊. 第二代高温超导带材的连接技术研究进展[J]. 超导材料杂志, 2019, 12(5): 345-352.
- [32] 祝乐. 高温超导冷凝器焊接加工工艺改进[J]. 机械制造, 2015, 23(6): 120-126.
- [33] 叶立阳. MgB₂带材超导接头焊接工艺的实验研究[J]. 材料科学与工程, 2014, 35(6): 144-149.
- [34] 郭伟. 高温超导电缆导体焊接工艺研究[J]. 电线电缆技术, 2019, 18(1): 24-30.
- [35] 祝乐. 爆炸焊接技术在 NbTi 与 YBCO 连接中的应用[J]. 材料科学杂志, 2020, 34(3): 210-215.
- [36] 孙敏. YBCO 高温超导带材的焊接与并联研究[J]. 材料科学技术学报, 2018, 19(4): 188-193.
- [37] 张涵. 环境友好型焊接工艺在超导材料中的应用[J]. 绿色制造技术, 2022, 15(2): 98-105.