

铅-钢双金属复合材料的制备工艺及界面结构-性能关系研究现状

杨梦婷¹, 杨潘¹, 辜诚^{1, 2}, 王亚军^{1, 2}, 赵建华^{1, 2}

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 高端装备铸造技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 铅-钢双金属复合材料作为一种关键的结构-功能一体化材料, 通过结合钢的高强度、韧性与铅的优异辐射屏蔽及耐腐蚀性能, 在核工业、电化学及国防等领域展现出不可替代的应用价值。本文系统综述了铅-钢双金属复合材料的制备工艺、界面组织结构与关键性能的研究进展与应用现状。在制备技术方面, 重点分析了爆炸焊接、轧制复合和扩散焊接等固-固复合工艺, 以及铸造复合、增材制造等固-液复合法, 深入探讨了各类方法的结合机理、工艺窗口及优缺点, 指出实现牢固冶金结合是工艺发展的核心目标。在界面与性能方面, 本文阐明了不同工艺所形成界面的微观特征, 并揭示了界面结构对材料宏观力学性能、辐射屏蔽效能及电化学行为的决定性作用。最后, 总结了当前研究面临的界面结合强度优化、复杂构件成形等挑战, 展望了未来发展方向, 认为通过多工艺融合、智能化制备技术以及新型界面与结构设计, 有望突破现有瓶颈, 进一步推动铅-钢双金属复合材料在高端装备领域的应用进程。

关键词: 铅-钢双金属复合材料; 制备工艺; 界面组织; 界面性能; 核工业

中图分类号: TB331; TG249.9; TG113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0219-13

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0031

Research Status of Preparation Processes and Interface Structure-Property Relationships of Lead-Steel Bimetallic Composite Materials

YANG Meng-ting¹, YANG Pan¹, GU Cheng^{1, 2}, WANG Ya-jun^{1, 2}, ZHAO Jian-hua^{1, 2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Equipment Casting Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Lead-steel bimetallic composite materials, as critical structural-functional integrated materials, combine the high strength and toughness of steel with the excellent radiation shielding and corrosion resistance of lead, demonstrating irreplaceable value in nuclear industry, electrochemical engineering, national defense, and other fields. This paper systematically reviews the research progress and application status of lead-steel bimetallic composites in terms of preparation processes, interfacial microstructure, and key performance. In terms of fabrication techniques, solid-state bonding methods such as explosive welding, roll bonding, and diffusion welding, as well as solid-liquid processes including casting and additive manufacturing, are comprehensively analyzed. The bonding mechanisms, process windows, and advantages and limitations of these methods are discussed, emphasizing that achieving robust metallurgical bonding is the core objective of process development. Regarding interfacial and performance characteristics, this study elucidates the microstructural features of interfaces formed by different processes and reveals the decisive role of interfacial structure in macroscopic mechanical properties, radiation shielding effectiveness, and electrochemical behavior. Although significant achievements have been made in interfacial regulation and performance optimization, challenges remain in long-term interfacial stability and consistency in forming complex components. This paper also outlines future development directions, suggesting that breakthroughs can be achieved through multi-process integration, intelligent manufacturing technologies, and novel interface and structural designs, thereby further promoting the application of lead-steel bimetallic composite materials in high-end equipment fields.

Key words: lead-steel bimetallic composite material; preparation process; interfacial microstructure; interfacial performance; nuclear industry

基金项目: 国家自然科学基金(52205336); 中央高校基本科研业务费(2024CDJGF-041); 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0398)。

收稿日期: 2025-12-03 收到初稿, 2026-01-07 收到修订稿。

作者简介: 杨梦婷(2002-), 女, 硕士生, 主要研究方向为金属材料 and 特种材料。电话: 15125107227, E-mail: 20213024@stu.cqu.edu.cn

通信作者: 辜诚, 男, 博士, 副研究员/硕导。电话: 15077857283, E-mail: gucheng.90@cqu.edu.cn

引用格式: 杨梦婷, 杨潘, 辜诚, 等. 铅-钢双金属复合材料的制备工艺及界面结构-性能关系研究现状[J]. 铸造, 2026, 75(3): 219-231. YANG Mengting, YANG Pan, GU Cheng, et al. Research status of preparation processes and interface structure-property relationships of lead-steel bimetallic composite materials [J]. Foundry, 2026, 75(3): 219-231.

随着核能工业、国防军事及高端医疗装备等领域的飞速进步,对关键工程材料在极端服役环境下的综合性能提出了更为苛刻的要求。高性能先进材料的设计核心在于实现多维度性能的协同优化,在保证高强度、高韧性等优异结构力学性能的前提下,兼具高效辐射屏蔽能力与轻量化优势,并具备良好的工艺稳定性与耐腐蚀性^[1-2]。然而,传统单一材料受限于其固有属性,难以在所有关键性能之间实现均衡,因此,开发具备“结构-功能”一体化特性的金属复合材料,已成为当前材料学科的前沿与重点^[1-3]。

“结构-功能”一体化的材料需求,为双金属复合材料的研发提供了明确方向,铅-钢双金属复合材料凭借其独特的性能组合,匹配极端环境下的多性能需求,展现出显著的应用潜力与发展空间。其中,钢作为结构骨架,提供必要的力学支撑与加工成形性,具备优良的强度、韧性和焊接性能,且经济性较高^[4-6];铅则以其高密度、大原子序数和强射线衰减能力,成为辐射防护功能的核心载体^[6]。此外,铅合金还表现出良好的导热、导电特性与电化学稳定性,为其在特种电极与耐蚀环境中的扩展应用提供了可能^[5, 7]。

然而,铅与钢在物理与化学性质上存在显著差异,这种差异导致铅-钢界面结合质量成为实现性能协同的关键,同时也是当前研究的核心难点。采用复合技术实现铅与钢之间的冶金结合,虽可充分发挥两种材料潜力,为性能协同发挥奠定基础,但也不可避免地引入了界面调控的技术复杂性,需控制界面反应程度、避免有害脆性相生成。界面作为应力传递、元素交互及功能耦合的核心枢纽,其微观结构、相组成与结合强度直接决定复合材料的宏观性能与服役可靠性。因此,在制备过程中有效调控界面反应、抑制脆性相形成、提升界面稳定性,已成为突破铅-钢双金属复合材料走向工程化应用瓶颈的关键科学与技术问题。

本文系统梳理了铅-钢双金属复合材料的主流制备工艺、界面组织结构及其对力学性能、辐射屏蔽性能和电化学性能的影响机制,重点围绕“工艺-界面-性能”之间的内在关联展开论述,进而对未来研究方向作出展望,以期为该材料的设计开发与工程应用提供理论依据与技术路径。

1 铅-钢双金属复合材料的制备工艺与技术

铅与钢在物理及化学性质上存在本质差异,如图1所示的Fe-Pb二元相图^[8]及表1所列的铅合金和45钢热物性参数^[6],这导致二者在复合界面处相容性极差,实现

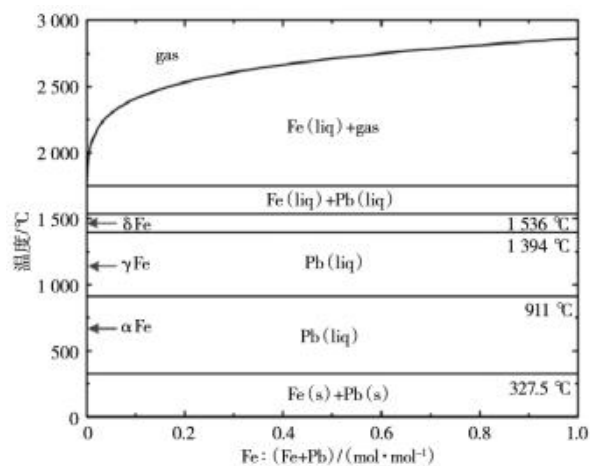


图1 Fe-Pb的二元相图

Fig. 1 Fe-Pb binary phase diagram

表1 铅合金与45钢的热物性差异

Tab. 1 Differences in thermophysical properties between lead alloys and 45 steel

项目	熔点 /°C	密度 /(kg·m ⁻³)	线膨胀 系数/K ⁻¹	比热容 /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
铅合金	283	8 947	15.7 × 10 ⁻⁶	212.9
45钢	1 495	7 850	11.59 × 10 ⁻⁶	502

牢固的冶金结合面临严峻挑战。具体而言,铅与铁两种元素不互溶,且纯铅的熔点较低(约327 °C),而铁的熔点高达约1 536 °C,二者温差超过1 000 °C,在复合过程或服役过程中极易因热膨胀行为不匹配(铅的线膨胀系数约为钢的1.4倍)引发显著残余应力,从而影响界面稳定性与结合强度^[6]。

为克服上述难题,目前已发展出多种制备铅-钢双金属复合材料的工艺。传统方法主要包括物理粘接、爆炸复合法、轧制复合法、铸造复合法以及扩散焊接等。近年来,随着先进制造技术的发展,增材制造与电磁成形等新兴方法也被探索应用于此类材料的制备,以寻求更优的界面控制与几何成形能力。各类工艺因其结合原理不同,在界面结合强度、工艺复杂度、适用结构及综合成本等方面各具特点。作者系统对比了上述主要制备技术的核心优势与现存不足,为后续深入分析与工艺选择提供框架,如表2所示。

1.1 固固复合

1.1.1 粘接连接技术

粘接连接技术是一种采用环氧树脂等有机胶粘剂,通过其粘附力与内聚力将铅层与钢层结合的机械式复合方法。该技术工艺简单、成本低廉,且无高温热影响,因此在早期研究及特定应用场景中具有一定价值。典型铅-钢粘接结构如图2所示^[9]。

表2 不同制备工艺的对比表
Tab. 2 Comparison table of different preparation processes

制备技术	优势	不足
粘接连接 ^[9-11]	工艺简单、设备要求低, 可实现多层/曲面壳体连接	结合强度低、长期稳定性差、环境适应性不足
爆炸焊接 ^[12-14]	界面结合强度高、导电性能优异, 生产效率高、成本低、厚度比适应范围广	工艺窗口极窄、参数控制难度高, 局部易出现未复合区, 铅层易受损, 大板制备易变形、厚度不均
轧制复合 ^[15]	轧制压下率提升后, 导电性、耐腐蚀性等性能同步优化	工艺参数敏感, 界面易受氧化影响
铸造复合 ^[16-17]	结合质量与性能优异, 工艺适应性与成形性好	工艺参数敏感, 易因冷却速度不均出现铅偏析
扩散焊接 ^[18-19]	可解决非互溶难题, 可用于多种金属及合金复合	难以实现复杂结构稳定成形, 设备成本高、周期长
增材制造 ^[4-6]	界面剪切强度远高于粘接结构, 适配复杂几何结构成形	界面IMCs层厚度不均且为脆性相; 存在“惰性润湿区”, 使局部结合强度低; 存在脆性风险, 应用场景受限
电磁复合 ^[20-22]	冶金-机械双重结合, 长期稳定性优于传统工艺	铅合金软脆、对电磁场响应差, 直接电磁成形易开裂

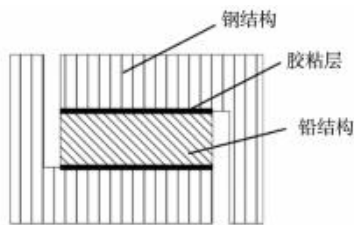


图2 铅-钢粘接结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the lead-steel bonded structure

为提升粘接接头的性能与可靠性, 研究人员从多个角度开展了改进工作。在粘接剂与工艺优化方面, 杨强等人^[9-10]针对E-51环氧树脂制备的钢-铅-钢粘接件强度低(平均4.2 MPa)、离散性大(剪切强度相对标准偏差达19%)等问题, 通过优化表面处理工艺, 将平均粘接强度提升至10.9 MPa, 并将离散性显著降低至3.3%, 有效提高了接头性能的一致性。在质量监控与缺陷检测方面, 李建文等人^[11]针对铅-钢两层壳体粘接结构, 开发了超声纵波多次反射法与透射法, 实现了脱粘缺陷的可视化精准检测。孙朝明等人^[23]利用有限元模拟分析了超声脉冲反射法的检测参数, 发现钢层一次与二次回波间的粘接层回波信号幅值可定量反映脱粘缺陷尺寸。夏嘉斌等人^[24]探索了激光超声检测技术, 证明该方法同样适用于铅-钢粘接结构脱粘的成像检测。在结构优化设计方面, 江晖等人^[25]通过ANSYS Workbench有限元分析发现, 铅-钢粘接结构的胶层直边处存在应力集中, 是服役中易发生脱粘的薄弱环节。为此, 他们提出采用高强度J-200-1D胶粘剂, 或在该区域加装45号钢嵌块的结构强化方案, 以改善应力分布, 延缓脱粘萌生。

尽管上述方法在一定程度上改善了粘接性能, 但该技术固有的局限性仍难以从根本上克服, 制约了其在苛刻环境下的应用。在长期服役或存储过程中, 环氧树脂粘接层在 γ 辐射、机械负载及环境因素作用下, 易发生局部剥离、老化与强度退化^[9, 25], 导致结合

强度低、长期稳定性差与环境适应性不足。此外, 未改性环氧树脂脆性较大, 胶层断裂以界面破坏为主, 内聚破坏占比低, 在振动或冲击载荷下易发生突发性断裂, 难以适应动态服役工况^[25]。可见, 虽然粘接连接技术经过多方面优化, 但其在结合强度、长期稳定性及动态承载能力方面的固有缺陷, 仍限制了其在核电、国防等高可靠性领域的应用。因此, 当前研究重点已转向能够实现原子间结合、形成更强更稳定界面的冶金复合技术。

1.1.2 爆炸焊接技术

爆炸焊接是一种利用炸药爆轰产生的高温、高压与高速冲击载荷, 使待复合金属在微秒量级内发生高速倾斜碰撞, 从而实现冶金结合的固态焊接技术^[26]。其原理如图3所示^[14], 在制备铅-钢复合板时, 铅板(复板)在炸药爆轰驱动下高速运动, 与固定的钢板(基板)发生碰撞。碰撞点附近金属因极高压力与塑性变形而瞬间呈现类流体行为, 并沿界面喷射形成射流, 清除表面氧化物, 促使纯净金属在高压下形成冶金结合。该方法具备结合强度高、厚度搭配适应范围广、生产效率高及成本相对较低等优点。

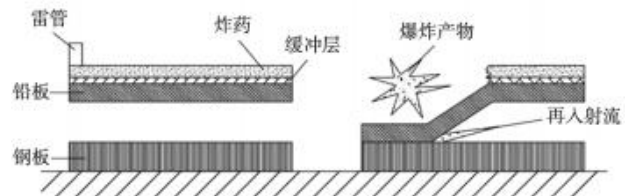


图3 铅-钢复合板爆炸焊接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of explosive welding for the lead-steel composite plates

在工艺研究与界面特性方面, 韩刚等人^[27]通过试验系统研究了爆炸焊接铅-钢复合板的界面结构与性能。结果表明, 其界面呈准正弦波形, 无熔融漩涡区, 实现了良好的冶金结合; 复合板剪切强度平均值

达19.0 MPa, 高于铅基体强度 (16.0 MPa); 界面导电性能优异, 电阻率低至 $2.13 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$; 元素扩散深度达微米级, 且钢侧铅元素含量下降更快, 表明元素扩散行为不对称; 界面微观组织为铁微晶与铅微晶的混合物。邓光平等^[12]通过理论计算与实验验证相结合, 明确了铅-钢爆炸焊接的关键参数范围, 为工艺制定提供了理论依据。李军等人^[13]针对铅、钢物性差异大、普通炸药不适用的问题, 成功研制出爆轰稳定、能量适中且流散性好的专用低爆速炸药。此外, 李军等人^[14]进一步计算并绘制了铅-钢爆炸焊接的工艺窗口图, 并针对“大板复合率低、铅板易损伤”等工程难题, 提出了包括铺设胶皮缓冲层、在起爆端添加高爆速炸药以改善爆轰传播, 以及加装延长铁皮等综合措施, 实现了合格铅-钢复合板的批量生产。尽管爆炸焊接技术优势显著, 但其本身也存在若干固有难点: 首先, 铅与钢的物理性质差异巨大, 导致工艺窗口极为狭窄, 对爆速、复板速度及碰撞角等关键参数的控制精度要求极高^[14]; 其次, 局部易出现未复合区, 初始复合率偏低, 常需后续工艺补救^[13]。铅层质地软、熔点低, 在爆炸过程中若无黄油涂抹、胶皮垫衬等有效保护, 表面易出现烧伤、坑蚀等缺陷^[14]。此外, 大尺寸复合板在爆炸载荷下易发生弧形变形, 且在后续校平时因铅、钢塑性差异显著, 易出现铅层延展不均与厚度控制难题^[13]。

1.1.3 轧制复合技术

轧制复合技术是一种通过轧制力使金属发生塑性变形, 破除表面氧化膜, 促使新鲜金属原子相互接触, 进而通过扩散退火实现界面冶金结合的固态复合方法, 如图4所示^[15]。根据是否预热, 该技术主要分为热轧法与冷轧法, 热轧法在轧制前对金属进行加热, 以促进界面扩散; 冷轧法则在室温下直接进行, 主要依赖剧烈塑性变形实现结合。

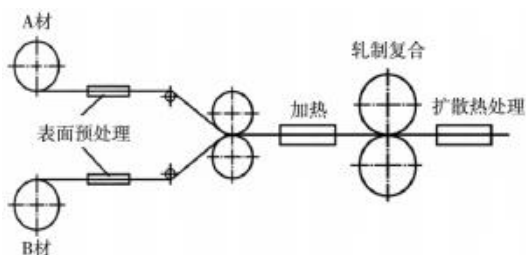


图4 双金属轧制复合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the bimetallic roll bonding

林超^[15]采用感应热镀法在钢板表面预镀媒介金属层, 随后通过轧制实现与铅板的复合。研究结果表明, 随着轧制温度与轧制压下率的提高, 界面扩散区逐渐扩大, 最终形成由钢侧 α -Pb固溶体与 β -Sn固溶

体, 以及钢侧Pb-Sn-Fe三元合金过渡层所组成的复合界面, 界面完整且无明显缺陷。拉伸断口呈现典型韧性断裂特征, 铅侧可见明显塑性韧窝, 证实已实现良好冶金结合。界面平均剪切强度达18~23 MPa, 高于铅基体强度, 满足工程应用要求。XU等人^[28]利用轧制复合法成功制备了铅-钢复合电极材料。微观结构分析表明, 热浸镀钢与铅板之间实现了冶金结合。随着轧制压下率的增加, 材料的导电性、电催化活性及耐腐蚀性能均同步提升, 显示出轧制工艺参数对复合材料功能特性的显著影响。

1.1.4 扩散焊接技术

扩散焊接技术是一种在真空或保护气氛下, 通过施加高温与压力使待连接金属表面紧密接触, 依靠界面原子相互扩散实现冶金结合的固相连接方法, 如图5所示^[18]。该过程不发生母材熔化, 尤其适用于物理性质差异显著的金属组合。

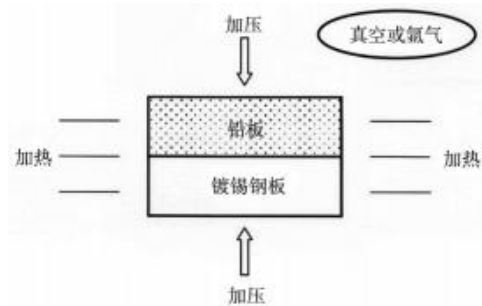


图5 铅-钢双金属热压扩散焊接原理图

Fig. 5 Schematic principle diagram of the lead-steel bimetallic hot-pressing diffusion welding

梁方等人^[18-19, 29]采用锡合金作为中间过渡层, 成功实现了铅与钢的扩散焊接。其技术路径为: 首先通过热浸镀在钢板表面制备锡合金镀层, 随后将镀层钢板与铅板置于真空热压炉中, 在特定温度与压力下进行扩散焊接。锡合金的引入有效降低了铅-钢界面的结合自由能, 促进了界面原子的互扩散, 从而形成冶金结合的铅-钢双金属复合材料。扩散焊接能够有效解决铅-钢体系互溶性差的问题, 并适用于多种金属组合^[18], 但该技术仍存在一定局限性: 其一, 该方法更适用于结构简单的构件连接, 对于大接触面积或复杂曲面构型, 难以保证界面压力与扩散的均匀性, 实现高质量结合存在挑战^[19]; 其二, 设备要求高、工艺周期长及生产成本较大, 制约了其在大规模工业场景中的应用^[18]。

1.1.5 电磁复合技术

电磁成形复合是一种利用瞬态电磁力驱动金属构件高速变形并与另一构件实现结合的先进制造技术, 其典型工艺流程如图6所示^[30]。该技术通过电磁成形设备对工作线圈瞬时放电, 在周围空间激发强脉冲磁

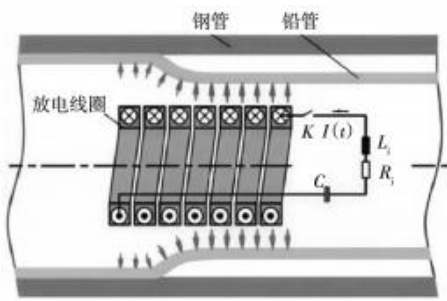


图6 电磁成形复合示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the electromagnetic forming composite

场，进而在金属构件中感应出涡流，产生足够强度的电磁力使其发生塑性变形并与基体材料贴合，常用于复合管材的制备。

杨川等人^[20]为克服传统粘接结构易老化脱粘的不足，提出了一种铅-钢复合管的电磁成形方法。该工艺包括将钢管预热至50~300℃，将放电线圈与铅管、钢管同轴装配并固定，随后通过电容放电使铅管扩径变形，与钢管内壁实现复合。该方法结合了冶金结合与机械结合的双重机制，预热促进了界面元素的相互扩散，有助于形成冶金结合界面，同时利用钢与铅热膨胀系数的差异，在冷却过程中形成过盈配合，进一步增强界面机械结合力。为改善内衬式复合中铅管变形过程难以观测与参数调节滞后的问题，汪炳叔等人^[30]提出了外覆式电磁复合成形方法。该方法将线圈与集磁器置于管件外部，驱动铅管缩径贴合于钢管外壁。其优势在于可直接观察铅管变形过程，便于实时调控工艺参数，同时外置线圈结构灵活，有助于减少磁场损耗，提高碰撞速度与冶金结合质量。针对铅管导电性差、电磁响应弱导致的变形不均问题，杨川等人^[21]引入铝管作为中间驱动层，实现了无预热的铅-钢复合管成形。铝的高电磁响应特性可有效带动铅管高速撞击钢管，形成结合强度更高、可靠性更优的复合结构，同时避免了高温操作风险，缩短了生产周期。为进一步解决高温铅管转移过程中温度流失快、线圈易损坏等问题，杨川等人^[22]还开发了集成式高温电磁成形工装，实现了加热、转移与夹持的一体化操作，有效保护线圈绝缘层，提升了工艺稳定性与操作安全性。

1.2 固液复合

1.2.1 铸造复合技术

铸造复合技术是一种基于传统铸造工艺的固液结合方法，其过程为将金属熔化至液态，在达到浇注温度后注入铸型，使液态金属与固态基体在凝固过程中形成牢固的冶金结合界面。常见的铸造复合方法包括镶铸法、包覆铸造法、低压铸造法、离心铸造法、电

渣熔铸和连续浇注复合铸造等^[31]。该方法成本较低，操作简单且金属结合良好^[32]，尤其适用于在结构件内、外表面制备功能覆层，其中低压铸造复合的典型原理如图7所示^[33]。

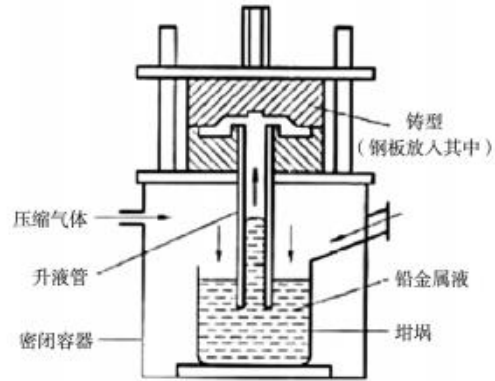


图7 低压铸造复合原理图

Fig. 7 Schematic principle diagram of the low-pressure casting composite

崔竞择^[17]针对钢与巴氏合金（铅基合金）之间润湿性差、物性差异显著的难点，提出了一种“钢表面活化→热浸镀锡铅合金过渡层→浇注巴氏合金”的三步复合工艺。该工艺的关键在于：采用化学活化液去除钢表面天然氧化膜（如 Fe_2O_3 ），以暴露具有高反应活性的Fe原子，为后续结合创造洁净界面；通过热浸镀方式在活化后的钢表面制备锡铅合金过渡层，该过渡层可有效克服钢与铅之间固有的热力学不润湿障碍，实现初步的界面冶金结合；在已镀覆过渡层的钢表面浇注巴氏合金，利用其与过渡层之间的良好相容性与元素互扩散行为，完成钢与铅合金的最终结合，形成稳定可靠的复合结构。

1.2.2 增材制造技术

增材制造技术作为一种先进的近净成形方法，通过高能束热源（如电弧、激光、电子束）按预设路径逐层熔化并沉积金属材料，可实现异种金属在界面处的冶金结合，为构建具有特定功能的多材料构件提供了可能。为实现铅与钢这两种物性差异显著金属的复合制造，杜军等人^[6]提出了基于钨极惰性气体保护电弧的熔滴沉积成形方法，原理如图8所示^[6]，验证了45钢与铅合金实现冶金结合的可行性。研究表明，铅合金沉积层的几何尺寸随电弧热输入呈非线性变化，并随基板移动速度增大而减小。界面处形成了厚度为30~70 μm的金属间化合物层，平均剪切强度达28.4 MPa，远高于传统粘接方式，且断裂均发生于铅合金侧。

张永恒等人^[34]进一步比较了铅合金熔滴冲击冷基板与表面熔池的差异，指出“仅当冲击熔池时才能实现有效冶金结合”，并明确了界面金属间化合物（Intermetallic Compound，简称IMC）的微观特征，测

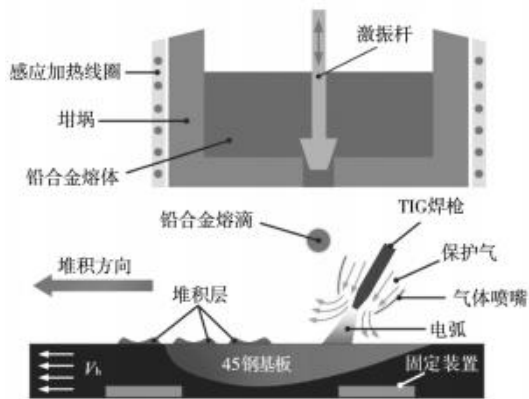


图8 熔滴沉积复合TIG电弧增材制造工艺原理图

Fig. 8 Schematic principle diagram of the droplet deposition and TIG arc composite additive manufacturing process

得界面最高硬度达HV785.3。在后续研究中，张永恒等人^[4]系统揭示了熔池温度对IMC层生长的影响规律，进一步完善了钢-铅界面的形成理论。李志强等人^[5]对熔滴-TIG电弧复合增材工艺进行了参数优化，并结合显微硬度梯度测试与拉剪试验，发现界面IMC区域存在硬度峰值（最高达HV746），显著高于钢基体（约HV300~700）与铅基体（约HV24）。优化后界面剪切强度最高提升至49.6 MPa。

该技术成功实现了铅-钢双金属界面的冶金结合，但其核心瓶颈在于IMC层的不可控性：界面IMC层厚度分布不均，且本身为脆性相，易在局部厚区引发应力集中，影响构件整体稳定性^[4, 6]。此外，界面存在“惰性润湿区”，该区域未形成有效IMC结合，并伴随微孔隙缺陷，导致局部结合强度偏低，在服役过程中可能成为裂纹萌生源。值得注意的是，铅-钢双金属结构的拉伸与剪切断裂均发生于铅合金侧，呈典型脆性断裂特征^[5-6]，限制了其在需高韧性场景中的应用前景。

1.3 其他方法

除前述主流复合工艺外，部分非传统方法在实现铅-钢材料复合方面亦展现出独特潜力，尤其适用于

制备具有特殊微观结构或非平衡态组织的材料体系。机械合金化是一种通过高能球磨或振动研磨，使Fe与Pb粉末颗粒在反复断裂、冷焊过程中形成微细叠层结构，并借助机械能诱导界面原子扩散，最终形成亚稳态合金或纳米晶复合材料的固态制备技术。Freitas等人^[35]采用机械合金化工艺处理Fe-Pb混合粉末，成功制备出含有纳米晶Pb的复合材料。研究表明，球磨导致Pb熔点降低且熔融峰宽化，严重时球磨样品中出现双熔融吸热峰。热处理过程中伴随缺陷弛豫、晶粒长大、Pb原子扩散及尺寸依赖性熔融/凝固行为，最终形成Pb-Fe合金结构。气相淬火法则采用热蒸发手段，在极低温衬底上共蒸发Fe与Pb金属，随后实施快速淬火，以抑制原子扩散与相分离，从而获得非平衡态薄膜合金。Nunes等人^[36]结合机械合金化与气相淬火两种技术，制备了不同成分的Pb-Fe合金，突破了传统平衡态下的固溶度限制。研究结果显示，气相淬火制备的富Pb薄膜中，Fe在Pb中的最大固溶度可达3at.%；而通过机械合金化获得的富Fe粉末中，Pb在Fe中的固溶度扩大至6at.%，展现出非平衡制备技术在拓展材料成分范围方面的显著优势。

2 铅-钢双金属复合材料的界面组织

铅-钢双金属复合材料的界面组织结构强烈依赖于所采用的制备工艺，其结合机制与形貌特征存在显著差异，如表3所示。深入理解不同工艺下的界面形成规律与微观特征，是优化材料性能与服役可靠性的关键。

粘接连接形成的界面为典型的“钢-胶层-铅”三层结构，其结合主要依赖机械咬合与物理化学吸附，未形成冶金结合组织。爆炸焊接界面通常呈现为准正弦波形，如图9所示^[14]，波形清晰且无熔融漩涡区。波形参数可作为评估结合质量的直接依据，当平均波高约0.11 mm、波长约0.40 mm、波形比在0.24~0.27范围内时，界面处于最佳结合状态，可实现高质量的冶金结

表3 不同制备工艺下铅-钢界面结合机制与形貌特征

Tab. 3 Bonding mechanisms and morphological characteristics of the lead-steel interfaces under different preparation processes

制备工艺	结合机制	界面形貌
粘接结合	机械结合	
爆炸焊接	机械+冶金结合	呈准正弦波形，无漩涡区
轧制复合	机械结合→冶金结合	直线状→锯齿状→波浪状
低压铸造	机械结合→冶金结合	断续直线状缝隙→连续细窄扩散层→波浪状咬合
扩散焊接	冶金结合	四层梯度结构→三层结构→枝晶状异质结构
增材制造	冶金结合	呈清晰直线状，界面无明显孔隙、裂纹等宏观冶金缺陷
电磁复合	机械+冶金结合	平整形态→波浪状

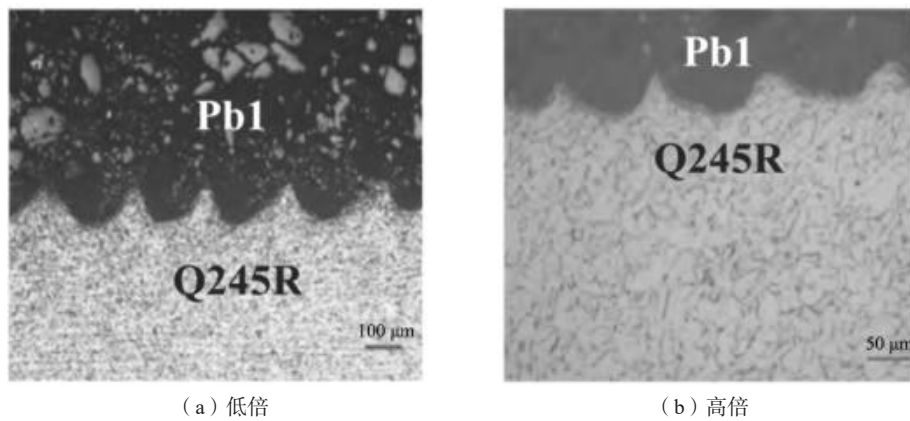


图9 铅-钢复合板爆炸焊接界面形貌

Fig. 9 Interface morphologies of the lead-steel composite plates prepared by explosive welding

合^[27]。界面区域因经历高应变率塑性变形，组织显著细化，形成细晶区、亚晶粒与孪晶结构，并可观察到动态再结晶组织与变形亚结构^[37]。

轧制复合界面结构受工艺参数影响显著。如图10所示^[15]，在低温（ $\leq 183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）与低压下率（ $\leq 20\%$ ）条件下，界面存在明显裂隙，呈直线状分离，铅层中可见细小孔洞，结合方式以机械嵌合为主。在中温（ $183\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）与中压下率（ $20\%\sim 35\%$ ）条件下，裂隙消失，形成连续细窄的扩散层（ $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ ），铅侧与媒介金属呈锯齿状交错结合。在高温（ $\geq 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）与高压下率（ $\geq 35\%$ ）条件下，界面形成宽幅梯度扩散层（ $15\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ ），呈波浪状咬合形态，实现完全冶金结合。

低压铸造界面同样受温度参数控制。如图11所示^[16]，

当充型温度 $\leq 380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、铸型温度 $\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，界面存在断续直线缝隙，铅侧分布圆形孔洞，结合以机械嵌合为主，无明显扩散行为。在中等温度区间（充型 $380\sim 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，铸型 $200\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），缝隙消失，形成连续细窄扩散层，界面趋于平整，铅侧与过渡层呈锯齿状交错，结合机制为机械嵌合与原子扩散共同作用。在高温条件下（充型 $\geq 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，铸型 $\geq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），扩散层进一步增厚，界面呈波浪状咬合，铅、钢及媒介金属原子深度互扩散，形成完全冶金结合的梯度过渡区。

扩散焊接通过引入Sn、Pb-Sn或Pb-Sn-Zn等媒介金属克服铅与钢互溶性差的难题，形成层次分明的冶金界面^[18-19]。具体特征因过渡层成分而异：采用纯Sn时，界面呈“钢/Fe-Sn金属间化合物/Sn层/铅”四层梯度结

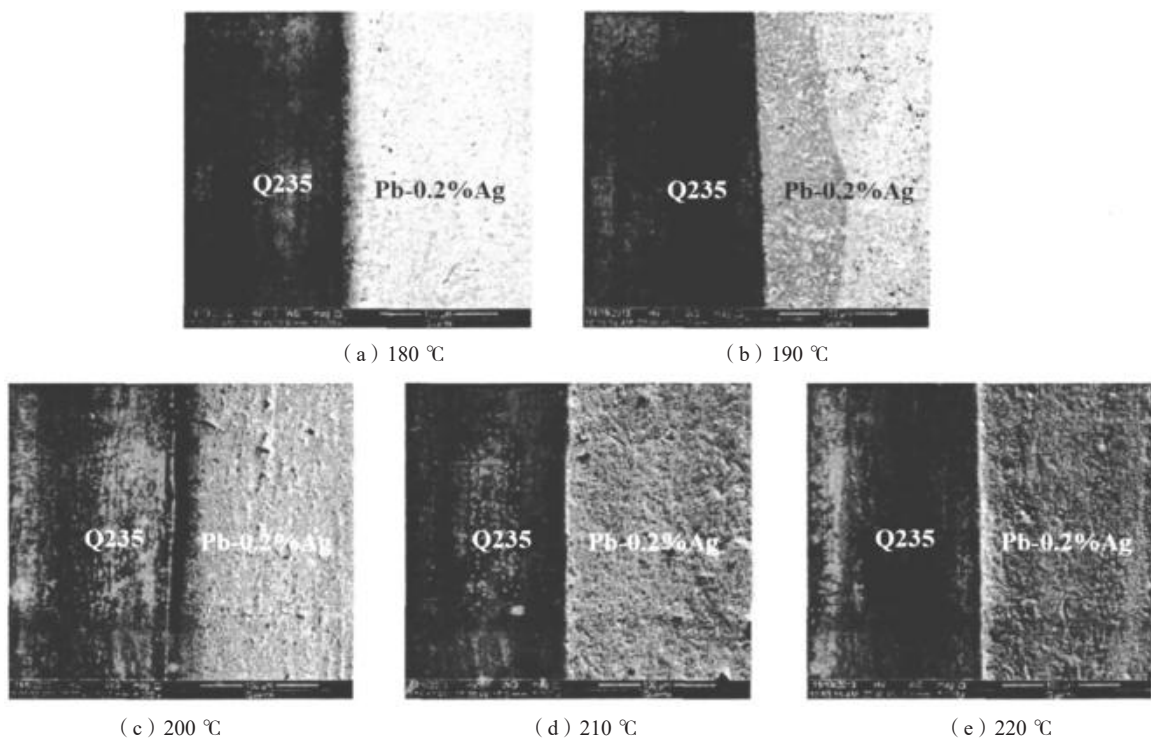


图10 不同轧制温度的轧制复合铅-钢界面SEM图

Fig. 10 SEM micrographs of the roll-bonded lead-steel interfaces under different rolling temperatures

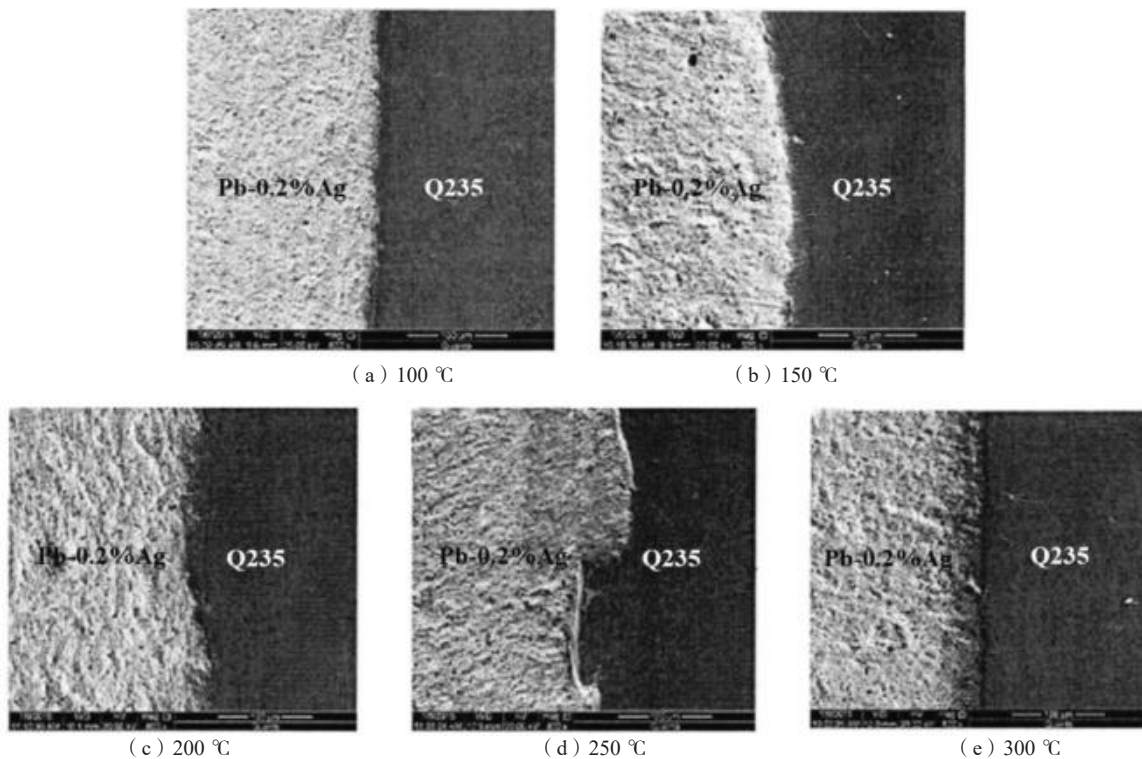


图11 不同铸型温度的低压铸造铅-钢界面SEM图

Fig. 11 SEM micrographs of the low-pressure cast lead-steel interfaces under different mold temperatures

构，伴随金属间化合物与共晶组织生成；采用60Pb-40Sn合金时，界面简化为“钢/过渡层/铅”三层结构，无明显脆性化合物（图12）^[18]；采用60Pb-35Sn-5Zn合金时，界面出现枝晶状异质结构，但结合性能有所下降。

TIG电弧-熔滴沉积界面呈清晰直线状（图13）^[4]，无裂纹、气孔等缺陷，表明形成了良好的冶金结合^[38]。界面区域呈现典型三层结构：钢侧为热影响区，中间为连续的金属间化合物层（主要物相为FeSn₂和FeSb₂），铅侧为Pb基体与β-Sn固溶体混合区（图14）^[6]。

电磁成形界面主要受能量输入的控制。能量输入适中（放电电压10.5 kV，径向间隙1.6 mm）时，电磁成形界面形态较为平整（图15）^[39]，形成连续、宽度约6 μm的过渡层。能谱分析表明该层为Fe-Pb过饱和固溶体，是高速碰撞过程中瞬态高温高压促使元素互

扩散所致，界面完整，无明显缺陷^[39]。能量输入过高（放电电压11 kV，径向间隙1.6 mm）时，界面形态呈现为波浪状，过渡层的宽度扩大至9 μm，但该过渡层不均匀，并且伴随有微裂纹、孔洞等缺陷。

3 铅-钢双金属复合材料的界面性能

3.1 力学性能

铅-钢双金属复合材料的力学性能，尤其是界面结合强度，是评价其制备工艺成功与否并判断其能否满足工程应用要求的关键指标。不同制备工艺通过形成各异的界面微观结构，直接影响复合材料的宏观力学行为与失效模式，其性能对比如表4所示。

在传统粘接连接工艺中，界面结合主要依赖环氧树脂的粘附作用，其强度通常处于较低水平。未优化条件下，粘接接头的剪切强度仅为4.2 MPa，难以满足实际工程需求^[10]。通过表面处理工艺的改进，剪切强度可提升至10.9 MPa^[25]，但该强度仍远低于冶金复合界面，且存在胶层老化引起的长期可靠性问题。进一步通过胶粘剂种类的优化，如采用J-200-1D等高强度胶粘剂，其剪切与拉伸强度均可提升至25 MPa以上^[25]，界面承载能力得到显著增强。

爆炸焊接作为一种典型的冶金复合工艺，旨在实现铅层与钢层的“等强结合”，即界面强度接近或略高于铅基体强度。其界面剪切强度平均值通常在

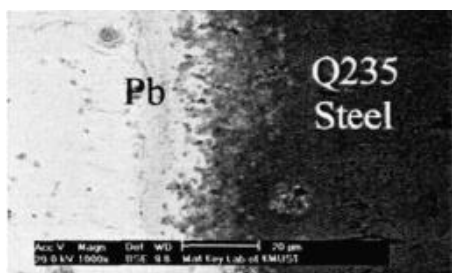


图12 扩散焊接下铅-钢界面显微组织

Fig. 12 Microstructure of the lead-steel interface under diffusion welding

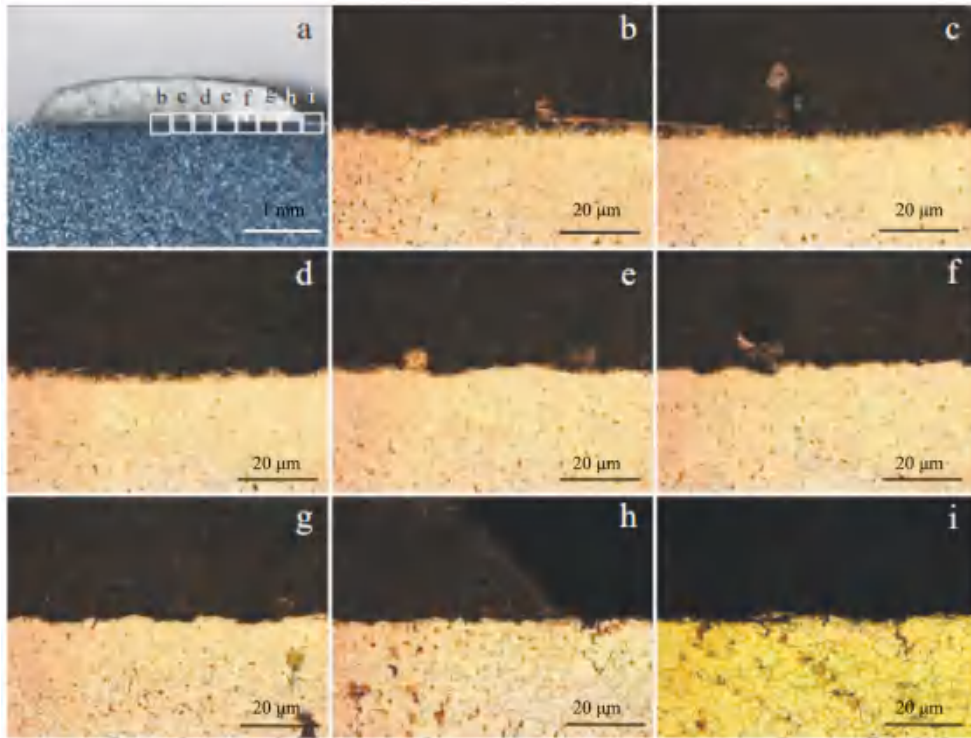
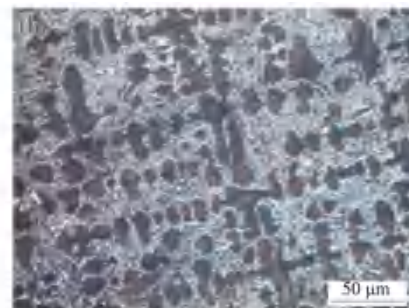


图13 TIG电弧复合熔滴沉积工艺下铅-钢界面组织

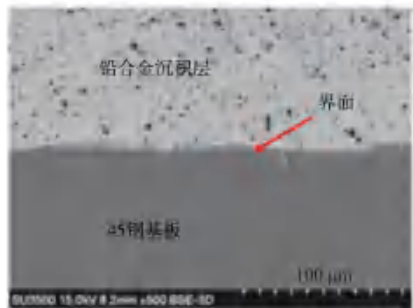
Fig. 13 Structures of the lead-steel interfaces under TIG arc and droplet deposition composite process



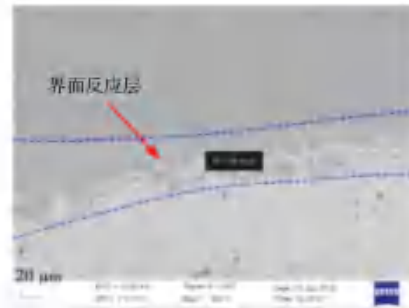
(a) 界面区域宏观组织形貌光镜图



(b) 铅合金沉积态微观组织 (图14(a)中I区)



(c) 界面区域微观组织SEM图 (图14(a)中II区)



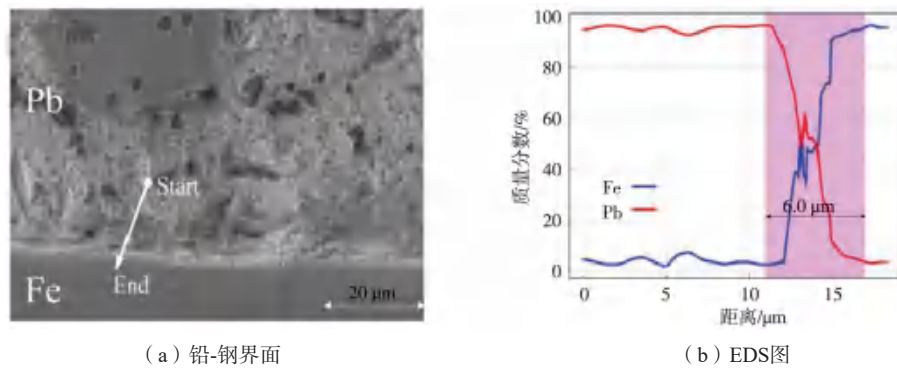
(d) 界面反应层的高倍SEM图

图14 铅-钢双金属结构界面微观组织特征

Fig. 14 Microstructural characteristics of the lead-steel bimetallic structure interfaces

12.7~19.0 MPa之间, 略高于纯铅的抗拉强度 (约 16 MPa) [27]。轧制复合成形过程中, 铅层承担主要塑性变形, 钢层则提供结构支撑, 使复合板的弯曲强度较纯铅板提升40%以上[15]。在拉伸试验中, 复合板的抗拉强度为19.12~23.92 MPa, 断裂均发生于铅基体,

界面未出现分层; 反复弯曲次数超过20次, 表明其具备优良的界面结合与抗变形能力[15]。扩散焊接试样在三点弯曲试验中表现出优异的抗弯性能。在230 °C、2 h 工艺条件下制备的试样, 其抗弯强度达114.5 MPa, 较 Pb-0.2%Ag合金 (77.7 MPa) 提高45.4%; 即使保温时



(a) 铅-钢界面

(b) EDS图

图15 电磁成形复合工艺下铅-钢界面SEM和EDS图

Fig. 15 SEM and EDS images of the lead-steel interface under electromagnetic forming composite process

表4 不同制备工艺下铅-钢复合材料的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of the lead-steel composite materials under different preparation processes

制备工艺	铅-钢双金属	剪切强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	参考文献
	铅/环氧树脂/45 [#] 钢	10.9			[10]
粘接连接	铅/E51/45 [#] 钢	13.0	17.0		[25]
	铅/J-200-1D/45 [#] 钢	≥25	≥25		[25]
爆炸焊接	Pb1/20 [#] 钢	≥10			[13]
	Pb1/Q245R	19			[12, 14, 27]
轧制复合	铅/Pb/Sn合金/钢	≥19			[15]
铸造复合	铅/Pb/Sn合金/Q235		9.58		[16]
扩散焊接	铅/锡合金/Q235			114.5	[18-19]
增材制造	铅合金/45 [#] 钢	28.4			[4-6]
电磁复合	铅合金/1045钢	7.6			[39]

间延长至3 h, 强度仍保持在104.6 MPa, 提升幅度达34.6%^[18]。

以TIG电弧熔滴沉积为代表的增材制造技术, 实现了铅-钢界面的直接冶金结合, 其界面平均剪切强度为28.4 MPa, 最高可达49.6 MPa, 远高于传统粘接结构^[4-6]。拉伸、剪切试验中, 断裂均发生在铅合金侧, 表明界面结合强度已超过铅基体强度。显微硬度测试结果显示, 界面IMC层硬度峰值达HV746~785.3, 钢侧热影响区平均硬度为HV343.7, 铅侧平均硬度仅为HV24.3^[5]。这种显著的硬度梯度是导致断裂发生于铅侧的根本原因, 也反映出界面区域的高强度特性。电磁成形工艺利用脉冲电磁力实现铅管与钢管的瞬时高速复合, 其界面剪切强度亦高于铅管自身强度^[20]。通过工艺优化(如钢管预热), 可进一步提高结合强度, 并改善铅管变形均匀性, 有效抑制开裂^[22]。

铅-钢双金属复合材料的力学性能高度依赖于其制备工艺及所形成的界面结构。从粘接到爆炸焊接, 再到各类先进冶金复合技术, 界面结合强度实现了从兆帕级到数十兆帕级的跨越。当界面实现高强度冶金结合后, 材料的力学行为由强度较低的铅基体主导。因

此, 未来材料设计的重点应在于获得高强度、高稳定性的界面结构, 而非单纯追求远超铅基体承载能力的界面强度。

3.2 辐射屏蔽性能

辐射屏蔽性能是铅-钢复合材料作为防护结构的关键功能指标。理想情况下, 界面结合良好的铅-钢双金属结构在具备优于纯铅的力学性能的同时, 可保持与纯铅相当的辐射屏蔽效果, 从而实现结构-功能一体化。刘江心^[40]采用铸铅工艺实现了铅与钢板的紧密结合, 开发出用于防辐射挖掘机驾驶室的高强度复合铅钢板。通过模拟 γ 射线(核环境屏蔽设计的主要考量)在材料中的衰减行为发现, 当铅层厚度为20 mm, 并结合放射源与驾驶室距离(4~6 m)的综合屏蔽效应, γ 射线的总衰减倍数超过800倍, 驾驶室内辐射剂量被有效控制, 核应急作业人员个人受照剂量控制在62.5 mSv/h以下, 满足《核设施退役安全要求》中核级作业的防护阈值。DE等人^[41]实验评估了由铅与弹道钢组成的复合结构对电离电磁辐射的屏蔽效能。研究使用Cs-137(662 keV)与Co-60(1 170 keV

与1 330 keV)放射源产生的准直伽马射线,测量了不同铅厚度与三种不同厚度弹道钢组合的辐射透射系数。结果表明,该复合材料对低能伽马射线(如Cs-137的662 keV)屏蔽效果显著,透射系数随铅厚度增加呈指数下降,且钢层越厚,透射系数越低;对于高能伽马射线(如Co-60的1 170 keV与1 330 keV),尽管受探测器分辨率限制导致数据存在一定偏差,但仍可明确钢层厚度的增加有助于提升整体屏蔽性能。

3.3 电化学性能

电化学性能是评估铅-钢双金属复合材料作为电极或电解槽构件适用性的核心依据,直接关系到其在电化学工业中的电解效率、能耗水平与服役寿命。不同制备工艺所形成的界面结构与成分,对材料的导电性及耐腐蚀性具有决定性影响,进而导致其电化学性能呈现显著差异,如表5所示。

表5 不同制备工艺下铅-钢复合材料的电化学性能
Tab. 5 Electrochemical properties of the lead-steel composite materials under different preparation processes

制备工艺	铅-钢双金属	电化学性能				参考文献
		平均电阻率/($\Omega \cdot m$)	电导率/($S \cdot m^{-1}$)	腐蚀率/($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	极化电位/V	
爆炸焊接	Pb1/Q245R	2.13×10^{-7}	4.70×10^6			[27]
轧制复合	铅/Pb-Sn合金/钢	9.506×10^{-6}		0.366		[15]
铸造复合	铅/Pb-Sn合金/Q235	13.96×10^{-6}		17.2		[16]
	铅/Sn/Q235	8.893×10^{-6}			2.01	
扩散焊接	铅/Pb-40%Sn合金/Q235	9.123×10^{-6}			2.03	[18-19, 42]
	铅/Pb-35%Sn-5%Zn合金/Q235	11.033×10^{-6}		7.506	2.19	

韩刚等人^[27]对爆炸焊接制备的Pb1-Q245R复合板进行了测试,结果显示其界面电阻率低至 $2.13 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,与纯铁的电导率(约 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$)处于同一数量级,表明该工艺可获得优异的界面导电性能。此外,铅(Pb1)本身对稀硫酸及典型电解液具备良好耐蚀性,而钢(Q245R)作为支撑结构,能有效避免纯铅电极因易变形、开裂所导致的局部腐蚀加剧问题^[14]。朱坤亮^[16]采用低压铸造工艺实现了铅-钢界面的冶金结合,避免了纯铅构件在焊接处易发生的“缝隙腐蚀”问题。梁方等人^[19]以锡为过渡层,结合热浸镀与扩散焊接工艺,促使锡与铅、锡与钢之间形成良好结合,并在界面处生成Pb-Sn-Fe三元合金过渡层。该结构有效降低了界面接触电阻(较无过渡层试样降低约35%),同时提升了整体的导电性与耐腐蚀性能。崔竞择^[17]通过乳酸调节的活化液对钢表面进行处理,彻底清除了其表面氧化膜,暴露出新鲜活性表面。该处理使锡铅过渡层与钢的润湿性由“不润湿”改善为“部分润湿”,增强了界面结合的致密性,从而有效抑制电解

液沿界面的渗透侵蚀,保障了材料在电化学环境中的长期稳定性。

4 应用领域与展望

铅-钢双金属复合材料通过结合铅的高密度、优异辐射屏蔽与耐腐蚀性能,以及钢的高强度与良好刚性,在对防护性能和结构强度均有严苛要求的多个领域中得到广泛应用。如表6所示,该类材料已应用于核工业^[5-9]、化工防腐、医疗辐射防护^[20-22]、电化学工程^[12, 27]及建筑抗震减震^[43-44]等重要领域。在核工业与医疗辐射防护方面,铅-钢复合材料被用于反应堆屏蔽体、核废料贮存容器,以及X光室、CT室的防护墙板与防护门等结构,在满足精确辐射屏蔽要求的同时,实现了结构的轻量化与集成化。在化工防腐与电化学领域,其卓越的耐腐蚀性与良好导电性使其成为化工设备内衬、管道、储罐以及铅酸蓄电池、电解槽衬里等的理想选材,能够有效抵抗强酸等苛刻介质的长期侵蚀。在建筑结构抗震减震领域,利用铅对振动与声

表6 铅-钢复合材料的应用领域
Tab. 6 Application fields of the lead-steel composite materials

应用领域	核心性能	服役环境	具体应用
核工业	辐射屏蔽	高温、长期静态载荷	反应堆屏蔽层、核废料储存装置
化工防腐	耐腐蚀性	常温、强化学介质浸泡	化工设备、管道、储罐的内衬
医疗辐射防护	精准辐射屏蔽、轻量化、易加工	常温、洁净环境	X光室、CT室的防护墙板、门窗
电化学	耐腐蚀性、导电性	强酸环境	铅酸蓄电池、电解槽衬里
建筑结构抗震减震领域	铅对振动、声波的强衰减能力	低频率、反复循环荷载	建筑结构减震系统、结构抗震控制系统

波能量的强吸收与耗散特性, 将其用于制作建筑减震装置与结构抗震控制系统, 以应对低频、反复循环荷载, 提升建筑安全性与耐久性。

尽管铅-钢复合材料凭借其铅、钢性能协同优势, 在核能、国防和电化学等关键领域展现出重要应用价值, 但其进一步发展仍面临一系列挑战。受铅与钢之间物理与化学性质差异大的制约, 界面结合强度的提升仍存在瓶颈。此外, 传统复合工艺在复杂形状构件成形方面存在局限: 铸造方法难以精确控制构件的尺寸精度与组织均匀性; 增材制造则面临铅易飞溅、界面结合质量波动大等问题, 导致特殊复杂结构的成形难度大、质量一致性难以保证。为推进铅-钢双金属复合材料的进一步发展与应用拓展, 未来可从以下方向重点突破:

(1) 推进多工艺融合。将具备复杂结构成形能力的增材制造与能够强化界面结合的轧制复合相融合, 通过预成形设计、轧制参数与增材成形精度的适配优化, 可在保证构件结构完整性的同时提升界面质量, 兼顾几何定制性与力学可靠性, 满足多样化场景对材料性能与形状的综合需求。

(2) 发展智能化制备体系。借助数值模拟技术优化工艺参数, 降低实验试错成本; 在制备过程中集成温度、压力等传感器, 结合人工智能算法实时优化并调控轧制力、冷却速率等关键参数, 以抑制铅层不均、界面缺陷等问题, 该智能化调控逻辑还可拓展至其他复合工艺, 通过算法模型的参数适配实现不同工艺场景下的缺陷管控; 构建集成设计、制造与检测的智能平台, 实现从参数输入到成品检验的全流程数字化与自动化, 提高生产效率和产品一致性。

(3) 优化界面结构与材料组分。通过设计梯度界面、引入中间层或对铅、钢基体进行合金化改性, 进一步优化材料的综合性能, 在保持其优良辐射屏蔽能力的基础上, 同步提升力学强度与耐腐蚀性, 拓展其在核反应堆关键部件、高功率电极等高端装备领域的应用。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 沈军, 谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用 [J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(5): 737-740.
- [3] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景 [J]. 航天器环境工程, 2013, 30(2): 115-121.
- [4] 张永恒, 杜军, 郭鑫鑫, 等. 钢/铅双金属结构熔滴沉积复合TIG电弧增材制造与界面组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 1079-1086.

5 结语

铅-钢双金属复合材料作为核辐射防护与电化学等关键领域的重要功能-结构一体化材料, 近年来在界面控制与先进制备工艺方面取得了显著进展。在制备技术上, 固-固复合法中的爆炸焊接实现了铅-钢界面的高效冶金结合, 界面剪切强度达到19 MPa; 轧制复合与扩散焊接在界面强度调控与性能优化方面持续完善, 轧制复合通过调控轧制温度与轧制压下率优化界面结合质量, 当轧制温度为260 °C、轧制压下率控制在30%~40%时, 界面可实现充分冶金结合; 扩散焊接则通过控制焊接温度、保温时间及焊接压力调控结合效果, 当焊接温度为230 °C、保温时间3 h、焊接压力5 MPa时, 材料性能最佳, 抗拉强度可达114.5 MPa; 电磁复合成形则凭借非接触力加载优势, 成功制备出壁厚均匀的铅-钢管状构件, 为管状构件提供了可靠的工程制造方案。在固-液复合方面, 铸造复合与以TIG电弧-熔滴沉积为代表的增材制造技术, 为复杂构型的铅-钢复合部件成形开辟了新途径。

在界面组织与性能研究方面, 通过调控媒介金属种类和工艺参数, 微观结构的主动调控取得重要突破; 力学性能从粘接连接的10.9 MPa到轧制复合的19 MPa再到增材制造的28.4 MPa, 逐步实现“等强结合”并不断超越; 辐射屏蔽性能依托铅的本征衰减特性, γ 射线到驾驶室内总衰减倍数远超800倍, 核应急作业人员个人受照剂量控制在62.5 mSv/h以下, 满足核级防护要求; 电化学性能展现出低界面电阻、高催化活性等优势, 铅-钢复合试样平均电阻率比Pb-0.2%Ag低35.5%且极化电位负移、致钝性优, 适配高端电化学低能耗、长寿命和高稳定性的装备需求。

尽管成果显著, 铅-钢双金属复合材料仍面临界面长期稳定性不足与复杂构件成形一致性难控等挑战。未来, 通过推动多工艺融合、发展智能化制备体系、持续推进材料高性能化, 有望系统突破现有技术瓶颈, 进一步拓展铅-钢双金属复合材料在下一代核能装备与高端电化学装置等领域的应用深度, 为核能、电化学及相关产业的持续创新注入材料基础与工程动能。

- [5] 李志强, 杜军, 崔鹭, 等. 熔滴复合电弧增材制造钢/铅双金属结构界面特性与剪切失效分析 [J/OL]. 中国机械工程, 1-11[2025-11-02]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1294.TH.20250702.1734.007>.
- [6] 杜军, 蒋敏博, 张永恒, 等. TIG电弧复合熔滴沉积增材制造45钢/铅合金双金属结构工艺研究 [J]. 材料导报, 2022, 36(2): 144-148.
- [7] DU J, ZHANG Y, HE L, et al. Investigating steel/lead bimetallic structure fabricated by tungsten inert gas welding

- arc-assisted metal droplet deposition [J]. *Materials Today Communications*, 2025, 43: 111798.
- [8] GU S, LING H, LIU W, et al. Synchronous extraction of Pb, Zn, and Fe from Pb-rich slag via a hybrid reductive smelting/fuming approach [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2025, 56 (3): 3092–3108.
- [9] 杨强, 袁明康, 李明珍, 等. γ 辐照对环氧树脂钢铅钢粘接件力学性能的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2005, 23 (6): 371–372.
- [10] 杨强, 袁明康, 李明珍, 等. 环氧树脂钢铅钢粘接工艺优化程度评价方法 [J]. *材料科学与工艺*, 2007, 15 (6): 839–843.
- [11] 李建文, 王增勇, 汤光平. 金属壳体粘接结构件的超声检测 [J]. *无损检测*, 2010, 32 (4): 283–285.
- [12] 邓光平, 侯发臣, 徐宇皓, 等. 铅 (Pb1) + 钢 (Q245R) 爆炸焊接试验研究 [J]. *材料开发与应用*, 2012, 27 (4): 16–20.
- [13] 李军, 刘金涛, 韩刚, 等. 铅-钢爆炸焊接用低爆速炸药的研制与应用 [J]. *材料开发与应用*, 2018, 33 (5): 44–47.
- [14] 李军, 张丽华, 李亚, 等. 铅-钢复合板的开发研究 [J]. *铁合金*, 2023, 54 (5): 14–19.
- [15] 林超. 轧制法制备铅/钢层状复合材料的技术与性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [16] 朱坤亮. 低压铸造法制备铅-钢层状复合材料的技术与性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [17] 崔竞择. 钢表面活化液设计及涂层制备工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [18] 梁方. 铅-钢层状复合材料制备及其性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [19] 梁方, 竺培显, 周生刚, 等. 锡对改善铅-钢层状复合材料结合界面及其性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22 (11): 3094–3099.
- [20] 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所. 一种钢铅复合管的电磁成形方法: CN2021110033557. 5 [P]. 2021-06-01.
- [21] 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所. 一种高效可靠的钢铅复合管电磁成形方法: CN202411848940. 6 [P]. 2025-03-14.
- [22] 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所. 一种钢铅复合管高温电磁成形工装及方法: CN202510193762.6 [P]. 2025-04-01.
- [23] 孙朝明, 汤光平, 李建文. 脉冲反射法检测粘接缺陷的有限元模拟 [J]. *无损检测*, 2014, 36 (7): 6–10.
- [24] 夏嘉斌, 孙广开, 宋潮, 等. “钢-铅”粘接结构非接触激光超声检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47 (1): 226–232.
- [25] 江晖, 徐东鸣, 宋志坤. 一种钢-铅-环氧树脂粘接结构的优化研究 [J]. *制造业自动化*, 2015, 37 (24): 85–87.
- [26] KUMAR P, GHOSH S K, SARAVANAN S, et al. Significance of the interlayer in explosive welding of similar and dissimilar materials [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2023, 59 (3): 253–278.
- [27] 韩刚, 邓光平, 李军, 等. Pb1-Q245R爆炸焊接复合板结合界面研究 [J]. *材料开发与应用*, 2011, 26 (6): 12–16.
- [28] XU Y, HAN Z, ZHU P, et al. Lead-steel layered composite electrode for adiponitrile production: preparation and electrochemical properties [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51 (3): 1330–1341.
- [29] 昆明理工大学. 一种铅-钢层状复合电极: CN201220187025. 3 [P]. 2012-12-05.
- [30] 福州大学. 一种外覆式钢铅复合管的电磁复合成形方法: CN202311828362. 5 [P]. 2024-03-22.
- [31] 陈玉娥, 仲红刚, 张申, 等. 双金属复合材料铸造成形工艺综述 [J]. *铸造*, 2021, 70 (6): 646–650.
- [32] 姚鹏鹏, 尹延国, 方小亮. 表面处理对液固复合铜合金/球墨铸铁双金属界面结合性能的影响 [J]. *铸造*, 2024, 73 (12): 1659–1666.
- [33] 辜诚, 程进, 闻福林, 等. 固-液复合铸造制备双金属复合材料的研究进展 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42 (6): 681–687.
- [34] 张永恒, 杜军, 王勇超, 等. 铅合金熔滴冲击45钢冷基板与45钢表面熔池的对比试验 [J]. *焊接*, 2022 (6): 24–32.
- [35] FREITAS J C C, NUNES E, PASSAMANI E C, et al. Structure and melting of Pb nanocrystals produced by mechanical alloying of Fe/Pb powder mixtures [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54 (19): 5095–5102.
- [36] NUNES E, PASSAMANI E C, LARICA C, et al. Extended solubility in non-equilibrium Pb/Fe system [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 390 (1–2): 13–18.
- [37] LIANG H, CHEN Y, LUO N, et al. Experimental and numerical investigation on interface microstructure and phase constitution of radiation resistant Pb/316L stainless steel explosive welded composite plate [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 2562–2574.
- [38] DU J, WANG D, XU S. Gas tungsten arc welding assisted droplet deposition manufacturing of steel/lead bimetallic structures [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 292: 117069.
- [39] YANG C, JIANG R, WU H, et al. Microstructure and mechanical properties of steel/lead Bi-metal tubes produced by magnetic pulse welding [J]. *Coatings*, 2024, 14 (12): 1542.
- [40] 刘江心. 防辐射挖掘机驾驶室复合钢铅板结构设计与力学分析 [D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
- [41] DE AZEVEDO A M, LOPES T J, DE Medeiros M P C, et al. Calculation of the experimental transmission factor for ionizing electromagnetic radiation for composite materials composed of ballistic steel and lead [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2025: 112985.
- [42] 梁方, 竺培显, 周生刚, 等. 不同媒介金属层的铅/钢层状复合材料的性能 [J]. *材料研究学报*, 2013, 27 (1): 60–64.
- [43] 卢智成, 曹万林, 王敏, 等. 内藏X形软钢板铅复合耗能器的力学性能及减震分析 [J]. *世界地震工程*, 2006, 22 (4): 13–17.
- [44] 卢智成, 曹万林. 内藏X形软钢板铅复合耗能器的试验研究 [J]. *世界地震工程*, 2005, 21 (3): 45–51.