

基于非晶合金的高电热组件的制备及其性能研究

单金龙 夏小鹏 窦开心 耿其润 王议振

南京工程学院 材料科学与工程学院, 江苏南京, 211167;

摘要: 电热材料在工业、家电及高科技领域具有关键作用, 传统 Fe-Cr-Al、Ni-Cr 合金电热材料存在发热不均、高温脆化等局限, 石墨烯等碳基材料则因制备复杂、成本高难以产业化。非晶合金凭借优异的力学、热学性能及均匀发热特性, 成为新型电热材料研究热点。本文综述了基于非晶合金的高电热组件研究背景与意义, 梳理了铁基、非铁基非晶合金的发展历程及国内外研究进展 (国外在成分设计、薄带制备及商业化应用领先, 国内在工艺完善与性能优化上发展迅速), 指出当前存在材料设计经验化、制备参数波动、微观机制与长期可靠性研究不足、高端应用待突破等问题, 并提出 AI 驱动设计、智能制造、多尺度仿真及政产学研协同等未来方向, 为高性能电热器件开发及产业化提供理论与实验支撑。

关键词: 非晶合金; 高电热组件; 电热性能; 制备工艺; 铁基非晶合金; 热稳定性

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 12. 069

1 研究背景

随时代进步与科技发展, 科研向高精密、高效率演进, 电热材料在工业、家电及高科技领域至关重要, 推动新型设备应用与性能提升。传统以 Fe-Cr-Al、Ni-Cr 合金为代表的电热材料, 虽工艺成熟、电热性能稳定, 但存在发热不均、高温脆化、耐久性差、寿命短等问题, 难满足高性能设备对稳定性、效率及结构可靠性的更高要求。研究者为突破其限制探索新型体系, 如石墨烯、碳纳米管等碳基纳米材料虽具轻质、高效、柔性优势, 却因制备复杂、成本高未实现稳定产业化。近年, 兼具金属导电性与玻璃态非晶结构的非晶合金 (金属玻璃), 因力学、热学、耐蚀性能优异, 且电阻率高、热稳定性与抗氧化性好, 可通过合金设计和热处理精确调控电阻温度特性, 原子结构均匀使发热稳定, 适合高温、高精度及恶劣环境, 成为研究新方向, 相比传统在能效、可靠性、寿命上具潜在优势, 故围绕其高电热组件制备及性能的研究, 既具重要理论意义, 也为高性能电热器件开发提供新的材料基础与应用前景。

2 研究意义

非晶合金凭借独特的无序原子结构及高强度、高硬度、良好导电性与优异热稳定性等物理化学性能, 已成为材料科学与工程领域的重要研究方向, 且随着制备工艺改进其成本持续降低, 加之均匀无晶界结构、低表面

粗糙度带来的均匀发热分布, 以及更高比电阻、更低热膨胀系数的特性, 为高精度、高可靠性电热组件开发提供了新的材料基础; 同时, 基于非晶合金的高电热组件研究, 对提升电热系统能量利用率与热响应速度意义显著, 通过合理的合金设计与热处理可有效调控其电阻温度特性及抗氧化性能, 使其在高温、腐蚀等复杂环境下长期稳定工作, 还能深入理解非晶合金电热转化过程中的结构演化机制与性能变化规律, 为其在电热领域的工程化应用提供理论支撑与实验依据。

3 国内外研究现状

非晶合金自 20 世纪 60 年代首次被制备以来, 经历了从基础理论研究到功能性应用的发展过程。根据材料体系的不同, 非晶合金可大致分为铁基体系和非铁基体系。铁基体系以 Fe、Co 等过渡金属为主, 早期研究主要集中于其磁性和力学性能的表征, 随后逐步拓展至电热器件及柔性加热组件等应用领域; 非铁基体系则以 Zr、Ti、Mg 等金属为主要组成元素, 早期研究重点在大块非晶合金 (Bulk Metallic Glass, BMG) 的制备及高强韧性材料开发, 近年来在微型加热器、高性能柔性电热器件等方面取得了显著进展。表 1 按时间顺序汇总了铁基体系与非铁基体系非晶合金的典型材料、出现年代及主要研究方向, 为后续非晶合金在电热组件领域的研究提供了直观参考和理论依据。

表 1 典型非晶合金的出现和发展年代

年代	铁基体系非晶合金	非铁基体系非晶合金	主要研究方向 / 应用
1960 年代	—	Au-Si	首次制备非晶合金薄带（快速凝固法）
1970 年代	Fe-B、Co-B、Fe-Si-B	Co-Si-B	铁基及过渡金属非晶的磁性和机械性能研究
1980 年代	Fe-Ni-B 系列	Zr-Ti-Cu-Ni-Be、Mg-Cu-Y	大块非晶合金（BMG）制备，厚度超过 1 mm
1990 年代	Fe ₄₀ Ni ₄₀ B ₂₀	Zr-Cu-Ni-Al 系列	电热性能研究，非晶合金在加热器中的应用初探
2000 年代	Co-Fe-Si-B	Zr-Ti-Cu-Ni-Be 改良型	微型加热器及柔性加热器研究，材料热稳定性分析
2010 年代	Fe-Co-B 系列薄膜	Zr-Cu-Al-Ni 系列薄膜	高速加热、柔性加热器、薄膜应用
2020 年代	高性能 Fe-Ni-B 系列	高性能 Zr-Cu-Ni-Al 系列	高温稳定性、机械柔性、多功能电热组件

3.1 国外研究现状

2013 年汪院士探讨了非晶态物质的本质及其特性，指出非晶态物质具有独特的结构和性能，其分子排列无序，与晶态物质的有序排列相比，更加符合现代材料科学的需求。强调了非晶态材料在光电、磁性及催化等领域的应用潜力，展示了其作为新一代材料的重要性。2016 年 W. Pilarczyk^[4]重点研究了铁基碳带的结构和热性能，有关热稳定性和结晶过程的发现为 Fe 基非晶合金在高热组件中的应用有着至关重要的作用。

2018 年 Koshiba Hisato^[2]提出了一种不含磷且具有玻璃化转变温度 Fe 基非晶合金可以应用于电气、电子等元件。Akihisa Inoue 介绍铁基软磁块状金属玻璃电感器的开发和应用，由于其独特的磁性能，这些电感器与高电热元件息息相关。这些合金具有低磁芯损耗和高磁导率，因此适用于电感应用中的高效能量转换。该研究强调了它们相对于传统材料的潜在优势，特别是在提高性能和减少高频运行中的能量损失方面，这对于现代电加热技术至关重要。

2022 年 I. E. Permyakova^[3]研究铁基非晶合金的力学行为，尤其是其韧脆转变和热作用后的强化机制。发现 CoFeCrSiB 合金表现出较高的电阻率和较低的反向磁化损耗，2024 年研究员 P. Rezaei-Shahreza 使用动态力学光谱研究了一种新型铁基非晶合金的结构特性，揭示了由于结构异质性和负混合熵而增强的可塑性和 β -松弛，活化能为 164 kJ/mol 和 295 kJ/mol，进一步表明其适用于需要在热应力下改善机械性能的工业应用。

除了学术上的研究发现国外也有许多非晶应用的典型案例，如法国巴黎的埃菲尔铁道，英国爱丁堡大学，日本爱知县都在使用非晶制成的地暖，相比于传统的地暖，由于非晶态薄带加热元件在运行时温度较低，无明

火，没有氧气或粉尘燃烧带来的危险和异味、窒息等不适感觉，可以提供更加健康、舒适、安全的取暖环境。非晶态加热元件的质量轻、发热惯性小，其性能远远超过常规的加热元件。在快速转换（开/关）的使用模式下，由于薄带的传热惯性小且传热效率高，会带来明显的节能效果。而且，非晶态薄带开始加热其周围环境时，要比传统类型的加热手段更快达到理想温度。这也意味着，非晶态的电热技术比其他加热系统更加节能，从而节省电费。这个技术在使用寿命方面具有巨大优势，其主要原因是其加热元件的运行温度低，机械强度高，以及耐腐蚀性强，从而降低电地暖系统在使用过程中的损耗。

3.2 国内研究现状

2012 年 cheng 等人研究了铁基非 Fe₈₀xCOXP12B₄Si₄ 的热和电气特性，重点介绍了它们良好的玻璃成型能力和独特的电阻率行为。该研究表明，电阻率随温度而增加，表现出正的温度系数，这与典型的铁基非晶合金形成鲜明对比。研究结果表明，无序的原子结构和电子-声子相互作用会显著影响电阻变化，因此这些合金有可能适用于高电热组件。

2018 年人王寅岗等人^[5]设计了一款专为用作电加热材料的 Fe 基非晶合金。它具有较低的电阻温度系数和较低的线性膨胀系数，此外，该合金具有高耐磨性、高耐腐蚀性和良好的韧性。蔡明东提出了一种包括铝、硅、B、C、铬、钼和钨等元素的 Fe 基非晶合金，增强了它们在电加热应用中的性能。这些合金的远红外波段发射率为 0.94，比电阻率为 185 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ，适用于需要高效发热和传热的应用。

2023 年裴延旭利用 XRD、DSC、电化学工作站对其热力学性能和耐腐蚀性能进行了研究。结果表明：

Fe₇₃Si₇B₉P₁₀Cu₁ 非晶合金具有良好的耐腐蚀性和热稳定性。

2024 年 sheng 等人提出了一种结合高电热和机械性能的非晶合金加热器相比与传统合金它具有更优越的电热和机械性能,更加适用与于为各种低温加热应用。国内也有许多厂家将 Fe 基合金的电热性能付诸实践,如江苏暖晶科技有限公司推出的一款以 Fe 基非晶合金为发热源的地暖产品已经广泛应用于市场

4 文献评述

高电热组件作为新能源技术体系中的关键单元,正处于从“材料突破”向“系统集成”的发展阶段。当前研究虽已在成分优化、工艺控制和性能提升方面取得显著进展,但总体上仍存在若干亟需突破的关键问题与发展趋势。

首先,从材料设计角度看,Fe 基非晶体系已成为主流方向,其优异的电热性能、耐蚀性和成本优势使其在新能源领域具有广泛潜力。但当前设计仍主要依赖经验与试验,缺乏系统化的多尺度设计体系。未来研究应建立以人工智能(AI)驱动的合金成分预测模型,结合第一性原理计算与机器学习算法,对非晶形成能力(GFA)、电阻率及热稳定性进行定量预测,实现从“经验型”向“数据驱动型”设计转变。例如,基于深度神经网络的多元特征映射模型,可将成分设计时间从数月缩短至数小时,大幅提升研发效率。

其次,在制备技术方面,国内外普遍采用的“真空熔炼-熔体旋转-连续退火”路线已较为成熟,但制备参数波动、带材厚度不均及表面缺陷仍是影响电热性能稳定性的关键因素^[6]。未来应重点发展智能制造与实时监控技术,实现工艺参数(温度、转速、气氛)的闭环控制。例如,利用红外测温与激光测厚的自适应反馈系统,可将带材厚度偏差控制在±0.5 μm 以内。

此外,在性能优化与可靠性研究方面,国内研究多集中于宏观电热特性,对微观机制及长期服役可靠性研究仍不足。国外研究已通过同步辐射、原位 XRD 等手段

揭示 Fe 基非晶的 β-松弛机制与晶化动力学规律,国内可在此基础上建立微观机理-宏观性能映射模型,通过多尺度仿真(原子-介观-宏观)分析材料退化机制,为寿命预测与可靠性设计提供理论支撑。同时,应发展高通量测试平台,对组件在高温、高湿、盐雾等环境下的老化规律进行系统评估,形成数据库化标准体系。

最后,从产业化与应用拓展角度看,国内企业已在 Fe 基非晶地暖、电热膜、伴热带等方向实现批量生产,但在新能源汽车热管理、光伏除雪、储能系统热控等高端应用上仍需进一步验证与优化。未来应推动标准化、模块化与系统化集成,建立高电热组件性能标准、测试规范与寿命评估体系,实现从“实验室样机”向“产业级产品”转化。同时,应加强政产学研协同,构建“设计-制备-验证-应用”一体化创新链,加快产业落地。

参考文献

- [1] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. 物理学进展, 2013, 33(05): 177-351.
- [2] Allia P, Baricco M, Tiberto P, et al. Joule-heating effects in the amorphous Fe₄₀Ni₄₀B₂₀ alloy [J]. 1993, 47(6): 3118.
- [3] Suryanarayana C, Inoue A. Iron-based bulk metallic glasses [J]. International Materials Reviews, 2013, 58(3): 131-166.
- [4] Pilarczyk W, Zarychta A J J o T A, Calorimetry. The influence of heat treatment on the structure and thermal properties of metallic glasses [J]. 2016, 1(25): 453 - 459
- [5] 黄建刚, 刘让苏, 吴凤英. 金属玻璃的电学性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2000, (02): 22-26.
- [6] 北京能佳科技有限公司. 非晶态合金电加热材料及其制备方法: CN00106101.1[P]. 2001-11-07.

基金项目: 南京工程学院研究生科技创新基金项目(TB202517069)。