

不同稀土元素对钢材焊接性能的影响及优化策略

王杰^{1,3} 栗志翔^{1,3} 金振军^{2,3} 白洋^{2,3} 张新房^{2,3}

1. 包头稀土研发中心(鹿城实验室) 内蒙古包头 014060

2. 包头稀土新材料技术研发中心 内蒙古包头 014060

3. 鹿城实验室 内蒙古包头 014060

摘要: 钢材在现代工业中的广泛应用使其焊接性能对工程质量和材料稳定性至关重要。为改善钢材在焊接过程中的性能,本研究聚焦于不同稀土元素对钢材焊接性能的影响及相关优化策略。首先,稀土元素以其独特的化学和物理特性能够显著改善钢材焊接过程中产生的显微结构,优化焊缝组织,提高焊接强度及耐磨性能。通过系统分析钕(Nd)、铈(Ce)、镧(La)以及其他稀土元素的功能性作用,研究明确了不同稀土元素在显微组织优化中的具体机制及表现。其次,针对不同钢材类型,本研究提出了一套稀土元素掺杂的优化策略,包括稀土元素的添加量、添加方法以及与钢材基体的结合条件等优化参数。结果表明,适当掺杂稀土元素不仅能够提升钢材的焊接性能,还在一定程度上降低了焊接过程中产生裂纹和气孔的风险。研究的意义在于为钢材焊接性能的优化提供新的技术思路,同时为稀土资源的高效利用以及高性能钢材的开发提供理论支持和实践参考。

关键词: 稀土元素; 钢材焊接性能; 显微组织优化; 焊接强度; 优化策略

引言

钢材在工业领域中广泛应用,其焊接性能直接影响结构质量和使用寿命。优化焊接性能是材料科学的重要研究方向,其中稀土元素因其独特的化学和物理特性备受关注。研究表明,稀土元素如钕(Nd)、铈(Ce)和镧(La)能显著改善钢材焊接过程中的显微组织,提高焊缝强度、耐磨性及抗裂性能。然而,其具体作用机制及不同稀土元素的性能差异尚未充分揭示。根据钢材类型选择最优的稀土元素及添加策略对于稀土资源高效利用及性能优化至关重要。本研究旨在探讨稀土元素对钢材焊接性能的影响机制,提出适配不同钢种的稀土元素掺杂优化策略,为提升钢材焊接性能提供理论支持,并助力高性能钢材的开发和稀土资源的合理应用。

一、稀土元素对钢材焊接性能的重要性

1. 稀土元素在冶金工业和材料改性中的地位

稀土元素作为冶金工业中不可或缺的资源,以其独特的物理化学特性在材料改性领域发挥了重要作用^[1]。这些元素具备优异的电子结构和氧化还原特性,能够有效调控金属材料的显微组织和力学性能,在钢材制备与应用过程中展现出广泛的适配性。稀土元素在冶金过程中常被用作合金添加剂,通过影响微观结构实现晶粒细

化和杂质去除,从而显著增强材料的机械强度、韧性及耐腐蚀性。这些作用延伸至钢材的焊接性能优化领域,稀土元素能够改善焊缝组织结构,提高焊接过程中金属的流动性与热稳定性,有效降低裂纹及气孔的生成风险。稀土元素的功能性作用不仅推动了现代冶金技术的发展,还促成了高性能钢材的持续优化,为工程材料的提质赋能提供了理论支撑与技术保障。

2. 钢材焊接性能对工程应用的技术要求

钢材焊接性能是工程应用中确保结构质量稳定性与使用寿命的重要技术指标,其直接决定了焊接区的力学性能、耐环境性及使用安全性^[2]。在高强度、大负荷的工业应用场景中,焊接性能的不足可能导致焊缝区域产生缺陷,如裂纹、气孔和热影响区弱化,进而影响整体结构的机械强度与耐久性。焊接性能要求包括焊缝的致密性、强度、耐磨损性以及与基体材料的相容性,以实现优异的力学性能和耐热腐蚀能力。焊接过程中的显微组织优化和化学稳定性是提升焊缝质量的关键,满足工程应用对高精度和高可靠性的需求。稀土元素的应用为提升钢材焊接性能提供了有效的物质基础,通过微合金化作用优化焊接性能,有助于解决传统钢材焊接中的技术瓶颈。

3. 稀土元素改善钢材焊接性能的理论基础

稀土元素通过独特的化学和物理特性,在钢材焊接

过程中显著改善焊缝显微组织。其在冶金反应中的活性可降低焊接区域的氧化作用，细化晶粒、改善组织分布，提升焊接强度与耐磨性能。稀土元素还可通过净化作用减少夹杂物和气孔的形成，增强焊缝质量和整体稳定性，为钢材焊接性能的优化提供关键理论依据。

二、不同稀土元素对焊缝显微组织的影响

1. 钕 (Nd) 铈 (Ce) 镧 (La) 的作用机制

稀土元素钕 (Nd)、铈 (Ce)、镧 (La) 在改善钢材焊缝显微组织特性方面具有重要作用，其主要机制体现在显微结构的调控和物理性能的优化。钕在焊接过程中能够通过变质作用细化晶粒结构，提高钢材焊缝的均匀性和强度，其活化作用使焊缝抗裂性能显著增强。铈具有强还原性，能够有效去除金属中的氧化物和硫化物夹杂物，提高钢材纯净度，其在焊接中的作用体现在改善焊缝区域的界面结合强度与显微组织优化。镧则通过改变钢材中的晶格常数和扩散行为，提高焊缝显微组织的稳定性和耐磨性。综合分析表明，三者的协同作用能够显著提升钢材焊缝的性能和稳定性，为深入研究焊接过程中显微组织的优化机制提供理论支持。

2. 稀土元素对焊缝晶粒细化及组织均匀性的影响

稀土元素在焊缝显微组织中的应用能够显著改善晶粒细化及组织均匀性。稀土元素具有独特的化学活性与表面张力调控作用，可抑制焊接熔池内晶粒的过度生长。通过晶界处的界面化学作用，稀土元素能有效降低合金组分偏析，提高焊缝组织的均匀性。钕 (Nd)、铈 (Ce)、镧 (La) 等元素在焊接过程中能够与杂质组分发生反应，生成稳定化合物，从而减少非金属夹杂物的数量，优化金属基体的显微结构。稀土元素对过冷奥氏体的孕育效应使焊缝晶粒细化显著，并在焊接区形成致密而均匀的晶格排列。这类优化效果不仅提高了焊缝的物理稳定性，还减少了结构内部因不均匀造成的性能弱化问题，为高性能焊接提供了可靠的材料基础^[3]。

3. 稀土元素对焊接强度与耐磨性能的提升效果

稀土元素掺杂通过改变焊缝显微组织，有效提升钢材的焊接强度与耐磨性能。稀土元素能够促进焊缝区域晶粒的细化，使其内部组织更加均匀，从而增强材料的结构稳定性。稀土元素还能降低焊接热影响区形成的脆弱组织比例，改善钢材承受外部荷载时的抗疲劳性能。在耐磨性能方面，稀土元素通过调整焊缝中化合物分布和显微硬度，提高钢材表面抵抗机械损伤和摩擦磨损的能力。这些作用机制展现了稀土元素在焊接性能优化中

的关键价值。

三、钢材类型与稀土元素掺杂策略

1. 钢材基体与稀土元素的相容性分析

钢材基体与稀土元素的相容性是决定稀土元素掺杂效果的关键因素。稀土元素在钢材基体中的分布及相互作用直接影响焊接性能的改善效果^[4]。研究表明，不同类型钢材基体具有不同的晶体结构和化学组成，而稀土元素的添加会通过铁基体中的合金元素发生化学作用，形成稳定化合物或扩展元素的固溶度，从而优化钢材的性能。在弱合金钢中，稀土元素能够有效降低合金元素的偏析，从而减少焊缝区域的组织缺陷^[5]。在高强度钢中，稀土元素通过与碳、氮形成稀土碳化物或氮化物的方式，有助于提高材料的硬度及耐磨性能。不同稀土元素与钢材基体的相容性存在差异，关键在于选择合适的稀土元素种类及添加条件，以实现性能的最佳优化效果。这一相容性分析为后续掺杂策略的制定提供了科学依据。

2. 稀土元素的优化添加量与方法

稀土元素的优化添加量与方法在改善钢材焊接性能过程中具有关键意义。钢材焊接工艺中，稀土元素的添加量需要依据钢材类型、焊接环境以及性能要求进行合理设置。研究显示，稀土元素在添加量达到一定范围时，可显著改善焊缝的显微结构及力学性能，过量添加可能导致材料脆化及资源浪费。添加方法方面，通过稀土元素与中间合金的复合添加，或采用直接掺杂技术，可更有效地提升其在钢材基体中的扩散性能与化学结合效果。稀土元素在熔池中的分布均匀性可通过调整焊接工艺参数加以控制，以减少气孔和裂纹的形成。优化添加策略应满足钢材的功能性需求，并助力焊接性能的增强与资源效益的最大化。

3. 焊接工艺中稀土元素添加的关键技术参数

在焊接工艺中稀土元素的添加需要关注多个关键技术参数，包括稀土元素的添加形式、熔融温度和时间控制，以及与焊材的配比比例。稀土元素应以粉末或合金形式进行添加，确保其在熔融状态下充分混合，避免团聚现象。合理设计熔融温度和时间可以增强稀土元素与钢材基体的结合效果。稀土元素添加量需控制在合适范围，以确保焊接性能提升的避免对材料组织造成负面影响。

四、技术意义与应用价值

1. 提升钢材焊接性能的工业化推进潜力

稀土元素在提升钢材焊接性能方面展现出显著的工业化应用潜力。基于其在优化焊接显微组织、细化晶粒

结构及增强焊缝强度方面的优异表现，稀土元素掺杂技术为钢材焊接性能的高效改善提供了广阔的应用空间。这种技术能够有效降低焊缝中的裂纹和气孔缺陷，提高焊接过程的稳定性与一致性，满足现代工业对高品质焊接连接的严苛要求。在实际工程应用中，稀土掺杂钢材焊接工艺具有良好的可操作性，可在船舶制造、桥梁建设、能源设备及航空航天领域得到广泛推广。通过精确控制稀土元素的添加量与工艺参数，还能够进一步提高生产效率，减少生产成本，实现材料性能与经济效益的双赢。该技术为传统焊接方法的改良以及新型钢材的开发提供了重要的技术支持，为推动绿色制造和智能焊接技术发展奠定了重要基础。

2. 稀土资源高效利用与材料性能优化的结合

稀土资源的高效利用与钢材性能优化的结合在工业和材料领域具有深远意义。稀土元素凭借独特的化学特性和细化晶粒的能力，可有效改善钢材焊缝的显微组织，提高焊接性能和材料的稳定性。通过合理地掺杂钕、铈、镧等元素，不仅能够优化钢材的机械性能，还能降低焊缝缺陷的发生概率。从资源利用的角度看，稀土元素在钢材焊接中的应用开辟了高附加值材料开发的方向，推动了资源由单一功能向多层次应用的转化。这种结合方式为高性能钢材的可持续发展和稀土资源的高效开发提供了新的技术路径。

3. 优化策略对高性能钢材开发的启示与未来方向

优化策略为高性能钢材的开发提供了重要启示。通过掺杂稀土元素，焊缝的微观组织得以优化，显著提升了焊接接头的机械性能和耐久性，为新型钢材的研发奠定了基础。合理利用稀土元素可以在降低生产成本的同时提高资源利用效率，为钢材的定制化开发提供更多可能性。这项研究揭示出稀土元素在新材料设计中的潜力，推动

高性能、低合金成本的钢材研发，并为未来材料科学的跨领域应用开辟新路径。

结束语

本研究探讨了稀土元素对钢材焊接性能的影响及优化策略，重点分析了钕（Nd）、铈（Ce）、镧（La）等稀土在显微组织优化中的作用机制。结果表明，合理设计稀土添加比例与工艺可显著改善钢材焊缝的均匀性、强度和耐磨性，降低裂纹和气孔风险，同时推动稀土资源的精细化利用。然而，研究存在局限，例如稀土对不同钢合金体系的普适性及成本优化关系需深入研究，实际工程中的环境、应力等影响也未完全揭示。未来可聚焦稀土动态作用机制，探索其与其他微量元素协同效应，结合智能化焊接技术精准控制稀土添加，为钢材焊接性能的提升提供更加系统的理论支持和技术方案。

参考文献

- [1] 孟利, 刘凯华, 邓姜哲, 郭松阳, 张波, 孙铭璇. 稀土元素对耐热镁合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国体视学与图像分析, 2021, 26(04): 407-412.
- [2] 白明辉, 韩海舰, 朱艳. 稀土元素对铝合金钎焊接头组织和性能的影响[J]. 焊接技术, 2020, 49(08): 70-75.
- [3] 原超. 稀土元素对钢材性能的影响[J]. 山西冶金, 2020, 43(04): 41-43.
- [4] 任思蒙, 杨阳, 吴浩, 路丽英, 赵丕植, 宋小雨. 稀土元素对新型Al-Mg合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接, 2022, (12): 55-61.
- [5] 本刊综合. 稀土元素[J]. 发明与创新(高中生), 2022, (05): 61-61.