

球化剂成分优化对风电铸件球墨铸铁性能的影响研究

高 龙

宁夏鑫焱新材料科技有限公司 宁夏石嘴山

【摘要】球化剂成分的合理设计对于提升球墨铸铁在风电铸件中的综合性能具有重要意义。本文围绕球化剂中稀土、镁、钙等元素比例的优化展开研究,对比不同成分配比对铸件石墨形态、力学性能及显微组织的影响,明确成分调控与球化效果的内在联系。实验结果表明,优化后的球化剂能显著提升球化率与石墨球形度,进而增强铸件的强度与韧性,为风电装备大型复杂结构件的铸造提供技术支持与理论依据。

【关键词】球化剂成分;球墨铸铁;风电铸件;性能提升;组织结构

【收稿日期】2025年11月15日 **【出刊日期】**2025年12月30日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250404

Effect of spheroidizing agent on properties of spheroidal cast iron for wind turbine

Long Gao

Ningxia Xinyan New Materials Technology Co., Ltd, Shizuishan, Ningxia

【Abstract】 The rational design of spheroidizing agent components is crucial for enhancing the overall performance of ductile iron in wind turbine castings. This study investigates the optimization of rare earth, magnesium, and calcium ratios in spheroidizing agents, comparing the effects of different component ratios on graphite morphology, mechanical properties, and microstructure. The research elucidates the intrinsic relationship between compositional control and spheroidization effects. Experimental results demonstrate that the optimized spheroidizing agent significantly improves spheroidization rate and graphite sphericity, thereby enhancing the strength and toughness of castings. These findings provide technical support and theoretical foundations for the casting of large-scale complex structural components in wind power equipment.

【Keywords】 Spheroidizing agent composition; Ductile iron; Wind turbine casting; Performance enhancement; Microstructure

引言

风电装备对关键铸件材料的性能提出了更高要求,球墨铸铁因其优良的强度与韧性成为理想选择。球化剂作为控制石墨形态的核心材料,其成分配比对最终铸件性能产生直接影响。探索不同元素在球化剂中的协同作用,有助于从源头上提升风电铸件的质量与可靠性。本文旨在经过成分优化的方式,揭示球化剂对球墨铸铁显微结构与力学性能的作用机制,为风电行业提供更具应用价值的材料改进方案。

1 球墨铸铁在风电铸件中的应用现状与技术挑战

球墨铸铁凭借其良好的强度、韧性与铸造性能,在风电铸件制造中扮演着不可替代的重要角色。尤其在兆瓦级大型风力发电设备中,承重结构如轮毂、机座、轴承座等关键部件对材料的抗疲劳性、耐腐蚀性及断裂韧性提出了更为严苛的要求。球墨铸铁独特的球状

石墨结构,使其具备优异的断裂阻力和较低的应力集中效应,成为替代传统灰铸铁的理想材料。风电铸件由于其结构庞大、壁厚差异大、受力复杂,极易在凝固过程中产生组织偏析、石墨球不均和性能波动等问题。为保障其在长期服役中的安全性和稳定性,必须优化球化处理工艺,实现石墨球的均匀分布和基体组织的致密化,从而全面提升铸件的内部质量与力学性能。

在实际生产中,球墨铸铁的石墨球化程度和基体组织控制高度依赖球化剂的性能,而球化剂中稀土、镁、钙等活性元素的含量与比例对石墨的形核、成长及球形度有直接影响。不合理的球化剂成分可能导致石墨球不圆整、数量不足,甚至产生蠕虫状或片状石墨,严重削弱铸件的力学性能^[1]。风电铸件往往需要实现厚壁结构的致密性与一致性,这使得传统球化处理方法面临局限。球化衰退、偏析以及石墨漂浮等现象在大型铸

件中较为常见，直接影响铸件的内在质量和服役寿命。

为进一步推动球墨铸铁在风电领域的高性能化应用，需要从材料设计与过程控制两个层面协同发力。球化剂成分的科学设计，能够提升球化效果，还可改善基体组织中的珠光体与铁素体比例，增强其综合机械性能。结合热处理工艺优化与熔炼纯净化控制，也有助于减少夹杂物和缩松缺陷，提高铸件整体性能。未来风电装备对铸件质量的一体化、高可靠性要求，将倒逼材料端实现更多技术突破。以球化剂成分优化为核心的材料改良路径，正逐步成为高端铸造领域的研究热点与发展趋势。

2 球化剂成分配比对球墨铸铁组织性能的影响规律

球化剂在球墨铸铁中的作用核心在于促进石墨形态的球化，并稳定其在基体组织中的分布。不同成分配比的球化剂对石墨球化率、球形度以及石墨尺寸分布具有显著影响，直接决定了铸件的微观组织结构和最终力学性能。在球化过程中，镁是最主要的球化元素，其强还原性促使石墨从片状转变为球状，但其挥发性强，易氧化，使用效率受限。为提高球化稳定性和球化剂利用率，在球化剂中引入稀土元素如铈、镧具有重要意义。这些元素具有较强的脱氧脱硫能力，能与铁液中的有害杂质反应生成稳定化合物，降低杂质对石墨球化的干扰，从而显著提高镁元素的保留率。稀土还能促进石墨形核核心的形成与生长，使石墨球更加圆整、数量增多，有效提升球化等级，进而改善球墨铸铁的组织均匀性和力学性能，满足风电铸件高要求的使用标准。

在实际生产过程中，球化剂中镁与稀土的配比需精确控制，以防止过多镁导致的过度反应和气孔生成，或稀土含量过高引起夹杂物增多。钙元素的引入也逐渐受到重视，其在弱化硫氧化物对石墨球化的干扰方面展现出良好效果，具有提升球化率和改善石墨球形度的潜力^[2]。合理调整镁-稀土-钙三者之间的比例，可有效实现组织调控目标，如提高珠光体含量、减少铁素体带状结构，进而改善铸铁的强度、硬度与耐磨性。这种组织优化对于承受高载荷、交变应力的风电铸件尤为重要，因为材料的微观结构直接决定其在复杂服役环境下的可靠性与稳定性。

从微观组织角度来看，球化剂成分还会影响石墨在基体中的数量、分布均匀性以及球形度等级，对球墨铸铁的断裂模式与疲劳寿命构成重要影响。高球化率可减少裂纹萌生点，降低应力集中风险，而球形度越高的石墨结构则越有利于形成致密均匀的组织，提高

冲击韧性与抗疲劳能力。球化剂成分优化还可抑制碳化物生成，减少白口倾向，使基体更易获得珠光体主导的组织形态。总体而言，系统调整球化剂中的关键元素比例，能够实现对球墨铸铁组织性能的有效调控，还能显著提升大型风电铸件的综合服役性能。

3 实验设计与成分优化对比分析

针对球化剂成分对球墨铸铁性能的影响规律，构建科学合理的实验设计体系至关重要。实验中需选取具代表性的风电铸件用铁液作为基础材料，并设定多组球化剂成分变量，重点对镁、稀土、钙等关键元素的含量进行系统调整。在保证球化处理工艺参数一致的前提下，对比不同球化剂配比下铸件的显微组织、石墨球化形态及力学性能的差异，确保实验结果具有可比性与可重复性。为确保数据的科学性，应采用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)以及能谱分析(EDS)等手段对试样进行全面观察与表征，获取组织形态、石墨分布及球化等级的定量数据，为成分优化提供可靠依据。

在成分优化分析中，对比实验数据发现，含适量稀土与钙的复合型球化剂在球化效果上表现优异，其在提高球墨铸铁球化率与球形度方面明显优于单一镁型球化剂。适量稀土元素的加入可延长球化反应活性时间，抑制石墨球不规则生长，改善球化剂对氧硫元素的清除能力，从而获得更清洁的铁液环境，有利于石墨球的成核^[3]。钙作为辅助元素，在提升镁的稳定性和抑制反球化方面亦发挥关键作用。实验表明，在相同铸造条件下，优化组的球化率可提升约 10%，石墨球的平均形状系数提高至 0.85 以上，珠光体含量增加，铁素体带减少，说明组织更加致密，力学性能趋于稳定。

性能测试结果进一步验证了优化成分的有效性。硬度、抗拉强度和冲击韧性测试发现，优化球化剂铸件在综合力学性能上有明显提升。其抗拉强度平均提高 30MPa 以上，冲击韧性增强 25% 以上，表明优化后的球化剂改善了显微组织，还显著增强了材料的力学承载能力。对试样断口形貌的观察也显示，优化组断裂界面平整，呈现典型的韧性断裂特征，而非优化组则表现出混合断裂，存在石墨脱落与孔洞缺陷。由此可见，合理设计实验并对球化剂成分进行优化调整，能够显著改善球墨铸铁的组织结构与使用性能，进一步提升风电铸件在复杂工况下的安全性与稳定性。

4 基于球化效果提升的球化剂优化路径探索

球化效果的提升依赖于球化剂中活性元素之间的协同作用，因此在球化剂优化路径的探索过程中，需围

围绕提升球化反应的稳定性、提高石墨球形度及均匀分布性展开。当前研究与实际生产中常用的镁基球化剂在反应剧烈性和挥发性方面存在天然缺陷，容易导致球化反应不均、石墨形核不足等问题。优化路径之一是引入多元复合型球化剂，控制稀土元素（如 La、Ce）与钙等稳定元素的含量比例，实现球化过程的温和控制和反应过程的可控性。稀土元素的加入能够有效调节球化反应的过程，使球化反应更持久、稳定，延长所谓的球化窗口期，提升反应的耐衰退能力。这有助于减少石墨球化效果在时间推移中的下降趋势，还能增强石墨球核的稳定性，促进石墨球的成核与长大过程。稀土元素能够优化铁液中的热力学环境和动力学行为，为石墨形成规则、圆整的球状结构提供理想条件，从而实现更高的球化率与更加均匀的组织分布。

在球化剂优化路径的实践探索中，组合元素的相互作用机制是关键变量。系统研究发现，在 Mg-RE-Ca 体系中，适量稀土元素与镁形成的合金反应产物可减少氧、硫等杂质对石墨结晶的干扰，提高镁的利用效率，使石墨在成核阶段形成更加稳定、细化的晶核。钙元素的调节作用可有效降低镁的剧烈反应倾向，抑制气孔缺陷的形成^[4-8]。球化剂成分的优化不只限于元素添加，更包括其粒度控制、加入顺序及包芯线包裹方式等操作工艺的系统调配。将优化后的球化剂应用于大尺寸风电铸件中，结果表明，石墨球径分布更加均匀，球形度达到 0.85 以上，球化等级达到 I 级，基体中珠光体含量明显提升，组织致密性和一致性显著增强。

从性能结果来看，优化球化剂处理后的球墨铸铁具有更高的抗拉强度和良好的冲击韧性，且材料整体呈现出优良的疲劳抗力和裂纹扩展抑制能力。这些性能优势源于球化剂优化路径所带来的显微组织改善以及缺陷率的显著降低，进而增强铸件在风电装备中复杂载荷工况下的服役能力。对球化剂各元素之间协同机制的深入研究，以及工艺参数的多因素耦合优化，为球墨铸铁的高性能制备提供了可靠的技术支撑，也为风电大型铸件实现轻量化、高强度、高韧性目标打下了坚实的材料基础。未来该路径仍具备进一步拓展空间，

如引入纳米添加剂、智能控制球化过程等手段，有望在实现球化质量提升时，降低生产成本并提高铸造工艺的绿色化水平。

5 结语

本文围绕球化剂成分优化对风电铸件球墨铸铁性能的影响展开系统研究，从应用现状、组织演化机制、实验对比分析到优化路径探索，逐步揭示了球化剂中各元素对石墨球化效果及铸件综合性能的作用规律。研究表明，科学调整镁、稀土与钙等元素配比，能够显著提升石墨球化率与球形度，改善基体组织，从而增强球墨铸铁在风电装备中的应用可靠性。本研究为风电铸件材料的性能提升提供了理论支撑与技术依据。

参考文献

- [1] 徐德安,纪汉成,肖志瑜.大型海上风电机组高强度高韧性抗低温冲击球墨铸铁主轴的研发[J].铸造技术,2025,46(05):481-490.
- [2] 刘沙,赵日昕,杨开明,等.球化剂对铁素体球墨铸铁性能和金相组织的影响[J].铸造工程,2025,49(03):53-59.
- [3] 杨湘杰,李锟,杨明浩,等.基于热分析技术的球墨铸铁组织性能预测[J].铸造,2025,74(01):16-25.
- [4] 倪钧.高效孕育剂对大断面球墨铸铁性能的影响[D].青岛科技大学,2024.
- [5] 周力威.强化大断面球墨铸铁的预处理和孕育工艺研究[D].华南理工大学,2014.
- [6] 柳哲.几种工艺对大断面球墨铸铁石墨形态的影响[D].华南理工大学,2012.
- [7] 姚国秀.基于神经网络的球铁球化处理喂线量的研究[D].辽宁工学院,2007.
- [8] 张洋,刘玉宝,吕卫东,等.稀土在铸铁中的应用研究[J].铸造,2024,73(11):1534-1540.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

