● 今日铸造 Today Foundry ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3235

风电铸件球墨铸铁材料的发展现状与趋势

苏俊齐[1],张 伟[1],马金哲[1],曲迎东[1],周张松[2],张亚军[2],李广龙[1]

(1. 沈阳工业大学 辽宁省高校轻金属材料与工程重点实验室, 辽宁 沈阳 110870; 2. 江苏宏德特种部件股份有限公司, 江苏 南通 226000)

摘 要:风电铸件球墨铸铁材料在风能行业中具有重要地位,其发展现状与趋势备受关注。球墨铸铁作为一种高强度、高韧性、耐腐蚀的材料,已经成为风电铸件的首选之一,其具有可铸性好、可加工性强以及良好的综合力学性能。影响风电铸件球墨铸铁材料性能的因素众多,本文总结了风电用球墨铸铁件的发展现状及生产中存在的主要问题,并着重分析了化学成分、微量元素和球化孕育法对风电用球墨铸铁材料组织与性能的影响,最后对风电用球墨铸铁件所面临的挑战与发展方向进行了展望。

关键词:风电铸件;球墨铸铁;化学成分;组织与性能

中图分类号:TG255 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)12-1144-08

Development Status and Trend of Ductile Iron Materials for Wind Power Castings

SU Junqi[1], ZHANG Wei[1], MA Jinzhe[1], QU Yingdong[1], ZHOU Zhangsong[2], ZHANG Yajun[2], LI Guanglong[1]

(1. Key Laboratory of Light Metal Materials and Engineering in Colleges and Universities of Liaoning Province, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Jiangsu Hongde Special Parts Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: Ductile iron materials for wind power castings play an important role in the wind energy industry, and their development status and trends have attracted much attention. As a material with high strength, high toughness and corrosion resistance, nodular cast iron has become one of the first choices for wind power castings, and its advantages include good castability, strong machinability and good comprehensive mechanical properties. There are many factors affecting the properties of ductile iron materials for wind power castings. This paper summarizes the development status of ductile iron castings for wind power and the main problems in production. The effects of chemical composition, trace elements and spheroidizing inoculation methods on the microstructure and properties of ductile iron materials for wind power are emphatically analysed. Finally, the challenges and future development directions of ductile iron castings for wind power are proposed.

Key words: wind turbine casting; nodular cast iron; chemical composition; microstructure and properties

随着全球对绿色能源需求的不断增加,风能作为一种清洁、可再生能源受到了广泛关注。球墨铸铁材料由于综合性能良好,生产成本低,便于加工等优势,是风电行业中重要的铸件材料[1-2]。

在一些发达国家如欧洲、美国和日本等,风电行业相对成熟, 风电铸件球墨铸铁的产能相对稳定。而在一些新兴市场如印度、巴西等国家以及东南亚等地区,风电行业正在快速发展,对风电铸件球墨铸铁的需求逐渐增加,产能也在逐步扩张[3]。全球风能理事会(GWEC)预计,到 2024 年全球陆上风电新增装机将首次突破 100 GW;到 2025 年全球海上风电新增装机也将再创新高,达到 25 GW[4]。国内风电行业也处于高速发展阶段,2015 年至今, 在国家政策的推动下,中国风电铸件球墨铸铁产能进一步扩张。大

收稿日期:2023-09-20

基金项目:辽宁省自然科学基金(2022-BS-181)

作者简介:苏俊齐,2000 年生,硕士生.研究方向为球墨铸铁.Email: Sujunqi2000@163.com

通讯作者:李广龙,1990 年生,博士,副教授.研究方向为高性能球墨铸铁开发,碳纤维铝基复合材料制备.Email:liguanglong1990@163.com

引用格式:苏俊齐,张伟,马金哲,等.风电铸件球墨铸铁材料的发展现状与趋势[J].铸造技术,2023,44(12):1144-1151.

SU J Q, ZHANG W, MA J Z, et al. Development status and trend of ductile iron materials for wind power castings[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1144-1151.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量的风电项目投资和建设带动了风电设备的需求，推动了风电铸件球墨铸铁产能的持续增加[5]。

当前，国内外在该领域的研究和应用已经取得了很大进展，相关技术也在不断地进行创新和改进。柳哲[6]通过在球化孕育结束后铁液降至 1 380 ℃左右时采用 0.12%孕育剂进行二次孕育–浮硅孕育，发现畸形石墨减少，石墨球圆整度提高，抗拉强度从 510 MPa 提高到 538 MPa；李梅[7]通过对浇注系统的设计和优化，使铸件夹渣缺陷率从 18.8%降低到 4.2%，提高了铸件的强度和寿命。但随着风电机组不断向大型化和重型化发展，风电铸件的尺寸将不断增加[8]。风电用球墨铸铁铸件具有质量要求高，断面厚大等特点，其芯部凝固时间长，容易发生球化和孕育衰退，形成碎块状石墨。此外，在铸件芯部和热节处由于补缩通道的阻断，容易形成缩松缩孔等缺陷，降低铸件力学性能[9]。目前已经探索出多种消除碎块状石墨的方法，包括通过合金化方法提高风电铸件用球墨铸铁件的强度与韧性，解决由于铸件厚大、冷却速度缓慢造成的铸件质量问题；添加微量元素提高球化率，改善基体组织；使用长效孕育剂，延长孕育时间与效果等[10]。

本综述通过对风电铸件球墨铸铁材料的国内外发展与应用进行分析和总结，着重分析了化学成分、微量元素和球化孕育方法对风电铸件球墨铸铁材料的影响。希望为该领域的研究者和应用者提供参考和借鉴。

1　风电用球墨铸铁材料的基体组织

风电用球墨铸铁铸件种类众多，主要包括风力发电设备的底座、装置叶片的轮毂、齿轮箱、箱体等，需满足 20 年不更换的高可靠性要求。因此对球铁铸件的质量要求很高，应具有良好的抗拉强度、伸长率和刚度，在低温条件下还要保持较好的冲击韧性[11]。风电球铁良好的力学性能不仅受石墨球数量与形态的影响，还与基体组织有关。风电球铁基体主要有铁素体和珠光体，其中以铁素体基体球铁为主。

铁素体基体球铁铸件主要有轴承盖、轴承座、齿轮箱、轮毂、底座等，要求铁素体含量在 90%以上。这些部件工作条件恶劣，需要承受较大的载荷而不发生变形和断裂，在保证强度的同时还要有较好的韧性，铁素体球墨铸铁能更好满足这一要求。铁素体球墨铸铁在低温下还能保持较好的冲击韧性，保证部件正常工作。珠光体球墨铸铁主要用于生产行星架，在工作时承受较大的随机扭转载荷，珠光体球墨铸铁的强度更高，耐磨性和减震性良好，适用于生产高强度部件。表 1 为目前不同风电球铁铸件所用材料及性能要求[12]。

2　合金元素对风电用球墨铸铁材料性能的影响

除常规化学成分外，合金元素及添加物对风电用球铁铸件也有重要影响，如 La、Bi、Sb、Nb 及改性粉体添加物等能有效改善铸件的组织结构与力学性能。合金元素通过与基体相互作用、固溶强化、阻碍元素扩散等方式，达到细化晶粒、减小石墨球尺寸、提高强度和韧性的目的，某些元素与稀土元素配合使用时还能起到球化孕育的作用。

2.1　Si 元素对球墨铸铁的影响

Si 是球墨铸铁中的一种重要合金元素，也是球化元素之一，可以促使球墨铸铁中的石墨形成球状。球状石墨可以提高材料的韧性和延展性，阻止裂纹扩展，从而提高材料的抗冲击和抗疲劳性能。适当提高 Si 含量能够增加石墨球数量，减小石墨球尺寸，使石墨球分布更加均匀，提高铸件的力学性能。而 Si 含量过高可能导致石墨畸变，这是由于高 Si 提高了凝固温度，延长了凝固时间与石墨生长时间。Franzen 等[13]研究了不同硅含量对球墨铸铁组织与性能的影响。图 1 所示为冲击断口形貌，当 Si 含量为

表 1 目前风电用球铁铸件的基本情况[12]

Tab.1 The basic situation of ductile iron castings for wind power at present[12]

牌号	壁厚/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率%	铁素体含量/%	珠光体含量/%	铸件
	≤30	350	220	22	≥90	-	轴承盖
QT350-22AL	>30~60	330	210	18	≥90	-	齿轮箱
	>60~200	320	200	15	≥90	-	轮毂、底座
QT350-22L	≤60	350	220	22	≥90	-	轴承盖
	≤30	400	240	18	≥90	-	轴承盖
QT400-18AL	>30~60	390	230	15	≥90	-	齿轮箱
	>60~200	370	220	12	≥90	-	轮毂、底座
QT400-18L	≤60	400	240	18	≥90	-	轴承盖
QT700-2A	>60~200	660	380	1	-	≥90	行星架

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

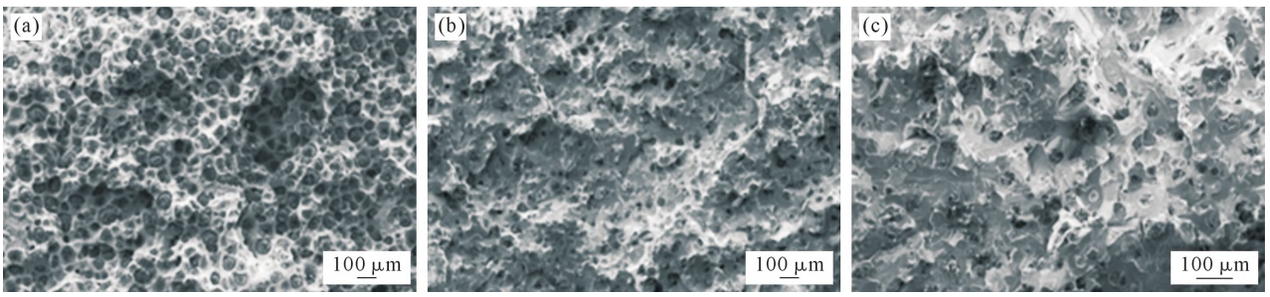


图 1 不同含 Si 量冲击断口形貌:(a) 2.1%, (b) 3.03%, (c) 3.64%[13]

Fig.1 Impact fracture morphology of different Si content: (a) 2.1%, (b) 3.03%, (c) 3.64%[13]

2.1%时,表现为完全韧性断裂,断口处石墨球数量与韧窝数量较多;当 Si 含量为 3.03%时,表现为韧脆混合断裂,韧窝数量较少,存在大量解理台阶和解理平面;当 Si 含量为 3.64%时,表现为完全解理断裂,并伴随石墨球破碎的现象。

Si 的增加对球铁性能有两方面影响:①Si 的增加会使铁素体的含量增加,从而提高球铁的冲击性能[14];②Si 以固溶形式置换铁素体中的元素,引起固溶体点阵的畸变,这种畸变使得铁素体变脆,降低了球铁的低温冲击韧性[15-17]。

2.2 改性纳米碳化钒粉体对球墨铸铁的影响

改性纳米粉的加入可以在球墨铸铁基体中形成均匀的分散相,并通过与基体的相互作用增强材料强度。纳米粉体的加入有助于晶粒细化,纳米尺寸的颗粒在球墨铸铁基体中起到晶界阻碍剂的作用,限制晶粒长大,使晶粒尺寸变小[18],还能阻碍裂纹传播,从而提高材料的强度和塑性,并改善其抗疲劳性能。

大连交通大学秦升等[19]为了提高球墨铸铁材料的强度和韧性,并改善其低温冲击性能制备了一种添加 0.1%的改性纳米碳化钒粉体(20~80 nm)的新型材料。这种改性纳米碳化钒粉体能够以固溶形式置换铁素体中的元素,引起固溶体点阵畸变,从而在材料中产生强化效果。如图 2 所示,添加改性纳米粉体后,石墨球数量增加,平均直径减小,晶粒显著细化。对添加改性纳米粉体球墨铸铁试样的EDS 分析, 可以清晰观察到 V 元素在基体中的密集分布。这有效地验证了 V 粉体作为异质核心或外来夹杂物对球墨铸铁晶粒的细化作用, 说明改性纳米粉体中的 V 相能够促进晶粒细化,使球墨铸铁晶粒更加细小。虽然纳米粉体对改善球铁铸件性能有积极作用,但还需要解决颗粒团聚和界面结合等问题。

2.3 含 La 球化剂对球墨铸铁的影响

La 具有促进铁素体,抑制珠光体的作用,可用于生产铁素体基球墨铸铁。使用含 La 球剂能够促进石墨球数量的增加,减少石墨尺寸,使其在铁素体基体中分布更加均匀, 有利于提高球墨铸铁的韧性和伸长率,但屈服强度有所降低[20]。

如图 3 所示,La 的存在对石墨结核的尺寸也有积极影响, 导致石墨尺寸减小和单位面积石墨的数量增加,石墨显著细化,圆整度提高,在基体中分布更加均匀[21]。以上石墨形态的改变有利于阻碍裂纹的形成和扩展,提高球墨铸铁的韧性和塑性。但是该种工艺对于厚大断面风电球墨铸铁铸件影响效果不明显或不适用。

2.4 微量元素对球墨铸铁的影响

除主要化学成分外, 微量元素 Bi、Sb、Ce、Ti 等对厚大断面球铁件石墨形态的影响作用也不可忽视, 尤其是他们与稀土元素间的相互作用关系更是目前的研究重点。

(1)铋(Bi) Bi 曾被认为是干扰元素,具有反球化作用。研究表明 Bi 可以与稀土元素结合形成高熔点的稳定化合物,作为石墨的异质核心,增加石墨球数量。在厚大断面球铁铸件的生产中可以通过复合添加 Bi、Ce 和稀土来改善石墨形态,Bi 的反球化作用被稀土元素中和, 在保证石墨球不发生畸变的同

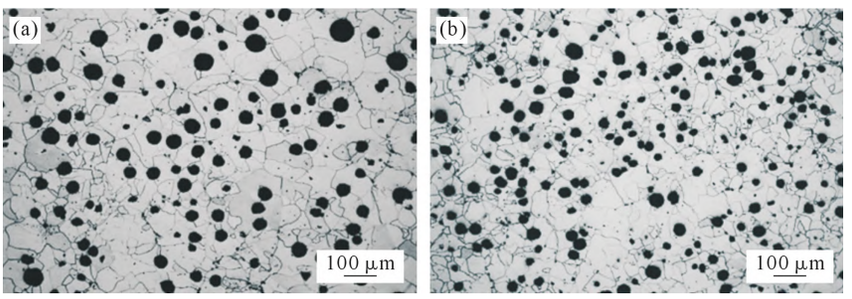


图 2 添加改性纳米粉体前后球墨铸铁显微组织:(a) 原始试样,(b) 添加粉体试样[19]

Fig.2 Microstructure of ductile iron before and after adding modified nano-powders: (a) original sample, (b) powder added sample[19]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

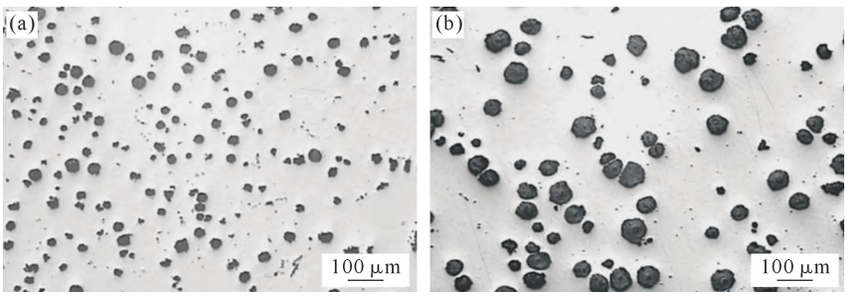


图 3 La 含量对石墨的影响：(a) 含 La 试样，(b) 不含 La 试样[21]

Fig.3 Effect of lanthanum content on graphite: (a) lanthanum-containing samples, (b) lanthanum-free sample[21]

时增加石墨球数量。Bauer 等[22]研究了 Bi 含量对高 Si 球墨铸铁的影响，发现 Bi 可以减少 Si 对石墨形态的负面影响，在 0%~0.01%(质量分数)范围内，随着 Bi 含量的增加，石墨球数量不断增加，圆整度提高，碎块状石墨和片状石墨不断减少。当 Bi 含量为 0.01%时，试样中几乎没有碎块状石墨，可见元素 Bi 对于改善石墨形态，抑制碎块状石墨具有积极影响(图 4)。

Glavas 等[23]研究了 Bi 含量对不同壁厚球墨铸铁的影响，如图 5 所示。结果表明，球化率与球化等级均随 Bi 含量的增加而提高，且壁厚越大添加的 Bi 含量越多。当壁厚达到 100 mm 时，仅需 0.01%Bi 就可使球化率达到 80%以上，石墨细小且圆整度高。

综上，添加微量元素 Bi 不仅可以提高球化率和圆整度，还可以增加铁素体含量，抑制珠光体生成，减少自由渗碳体含量，还能有效消除厚大断面球墨铸铁因为冷却速度慢而产生的碎块状石墨。

(2)锑(Sb)　针对厚大断面球墨铸铁件芯部凝固时间长，易出现碎块状石墨的情况，通过添加微量 Sb 元素可以有效避免石墨畸变，增加石墨球数量。

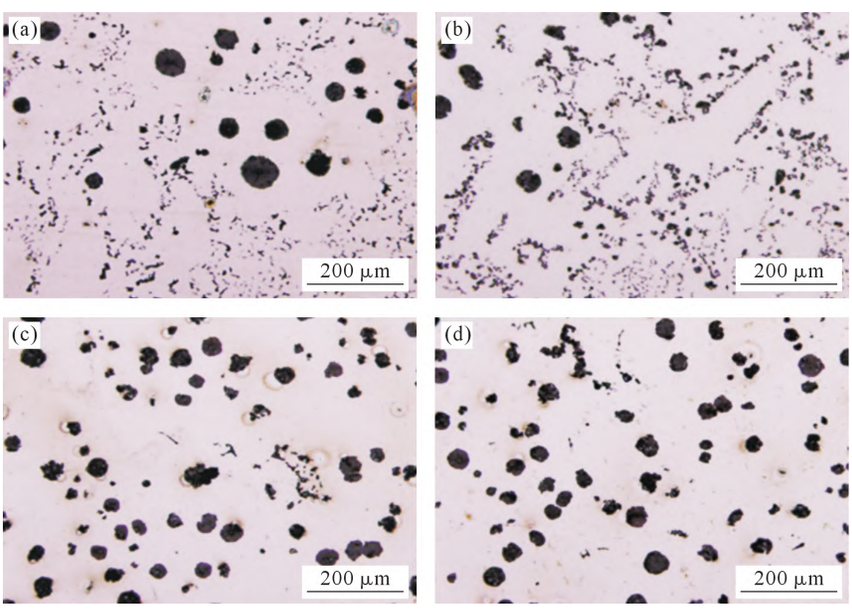


图 4 不同 Bi 含量的石墨球显微组织：(a) 0%, (b) 0.002%, (c) 0.006%, (d) 0.01%[22]

Fig.4 Microstructure of graphite spheres with different Bi contents: (a) 0%, (b) 0.002%, (c) 0.006%, (d) 0.01%[22]

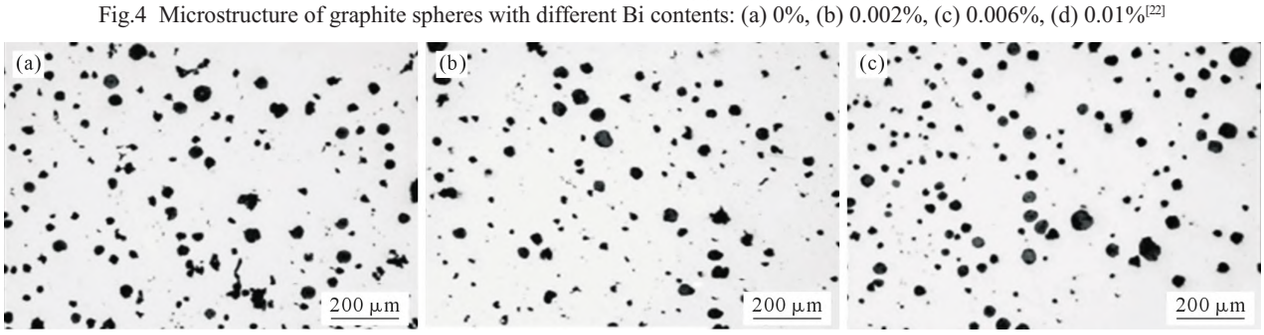


图 5 不同 Bi 含量下壁厚为 100 mm 的石墨球显微组织：(a) 0.000 42%, (b) 0.003 9%, (c) 0.01%[23]

Fig.5 Microstructure of graphite spheres with 100 mm wall thickness under different Bi contents: (a) 0.000 42%, (b) 0.003 9%, (c) 0.01%[23]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同时 Sb 还是强烈的珠光体稳定元素，基体中珠光体的含量随着 Sb 含量的升高而升高，强度和硬度增大但伸长率降低，适用于生产珠光体基体球墨铸铁。

曹伟康等[24]在珠光体基球铁中加入 0.01%~0.02%Sb，并控制 $RE_{残}$/Sb 在 1.5~2.5 的范围内，可使性能达到最佳。加入 Sb 元素后，珠光体含量明显增加，强度和硬度显著增加，0.015%Sb 可使珠光体含量由 60%增至 90%。然而 Sb 元素加入量过多不仅严重恶化石墨形态，降低强度，而且还会在基体中产生白口组织，降低加工性能。

Dekker 等[25]研究了 Sb 含量对石墨球数量和形态的影响，结果发现，与不添加 Sb 元素相比，添加 0.26%Sb(质量分数)试样中石墨数量从 156 mm^2 增加至 197 mm^2，石墨球圆整度明显提高。通过SEM-EDX 对石墨球核心分析显示，除常见的 Mg、S 和 Si元素外，还存在 Sb 元素，说明 Sb 能够与其他元素形成稳定化合物作为石墨异质核心，增加石墨球数量。

(3)铌(Nb)　由 Nb 形成的碳化物 NbC 能作为石墨和基体组织的成核位点，提高石墨球数量，细化晶粒，缩小层片间距，强化基体组织[26]。添加微量 Nb 有利于形成细小的珠光体组织，在提高石墨球数量的同时对石墨球圆整度影响不大，得到较好的力学性能。Ahmed 等[27]研究了 Nb 含量在 0%~0.1%(质量分数）范围内对珠光体组织的影响，发现随着 Nb含量的增加，珠光体层片间距不断减小，如图 6 所示，可见 Nb 对于细化晶粒，减小层片间距具有显著作用。

吴家栋等[28]研究了 Nb 含量(0.2%~0.7%)对石墨形态与基体组织的影响，结果发现随着 Nb 含量的增多球化率降低，铁素体含量减少，且层片间距和组织变得细小。球化率及铁素体含量与 Nb 含量关系如图 7~8 所示。这是由于 Nb 含量增加，导致 NbC 增多，影响了石墨化时碳原子的扩散，导致球化率降低。风电用珠光体基球墨铸铁件较少，主要应用于行星架，所以在生产其他风电球铁铸件时要注意 Nb 的添加量。

3　球化孕育对风电用球墨铸铁材料的影响

球化孕育是厚大断面球铁生产的关键环节，对球墨铸铁件的组织与性能起着至关重要的作用。球化剂中的球化元素如 Mg 等可以去除铁液中的 S、O 等表面活性元素，使石墨球状生长[29]。孕育处理能够有效的提高石墨球数量和圆整度，消除白口，改善铸件的组织性能。

3.1　球化剂及球化处理

目前生产中使用的球化剂通常是 Mg、Ca 和 RE 等球化元素与 Fe、Si 等元素组成的合金。国外多以镁系球化剂为主，少部分国家采用钙系球化剂，如日本信越生产的钙系合金；美国国际镍公司生产的镍镁合金，Mg 含量在 15%左右，Ni 含量在 55%左右，

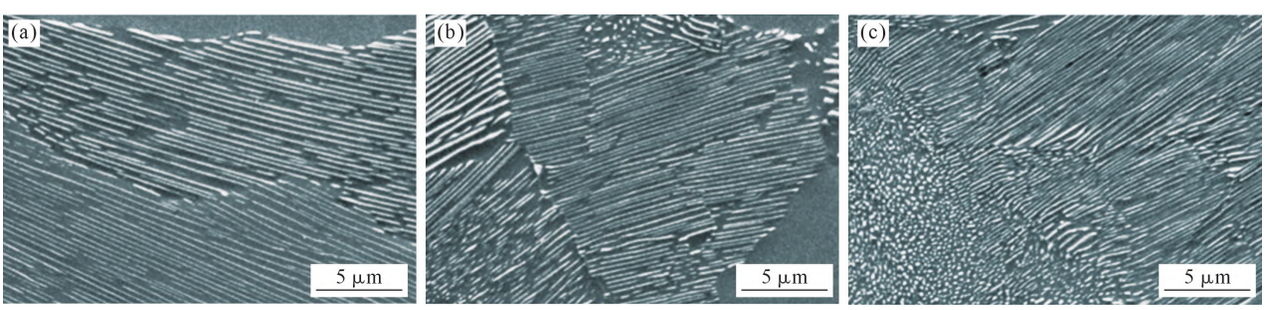


图 6 不同 Nb 含量的 SEM 珠光体显微照片：(a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.1%[27]
Fig.6 SEM images of pearlite with different Nb contents: (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.1%[27]

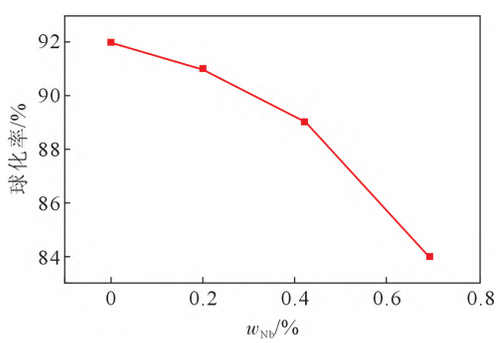


图 7 球化率与 Nb 含量的关系[28]
Fig.7 The relationship between the spheroidization rate and niobium content[28]

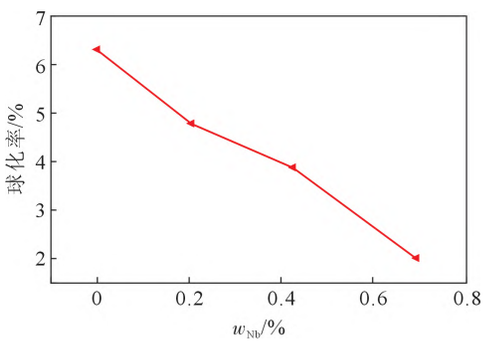


图 8 铁素体含量与 Nb 含量的关系[28]
Fig.8 Relationship between ferrite content and niobium content[28]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

这种合金比重大，反应平稳，Ni 还能起到合金化的作用，缺点是生产成本高。国内以稀土镁球化剂为主，这种稀土镁球化剂主要分为 3 类：轻稀土(铈组)硅铁镁合金、重稀土(钇组)硅铁镁合金和混合稀土硅铁镁合金[30]。对于普通球铁，主要使用以铈、镧为主的轻稀土球化剂；对于厚大断面球铁，重稀土硅铁镁合金具有更好的抗衰退能力。球化处理的方法有多种[31]，常见的有冲入法、型内球化处理、盖包处理法和喂丝法。冲入法是目前国内外最常用的球化处理工艺，其优点是操作简便，所需设备和处理方式简单，生产成本低，但镁的吸收率较低，一般为 30%~50%。

郭二军等[32]研究了 Ce-Mg-Si(轻稀土)和Y-Mg-Si(重稀土)球化剂对大断面球墨铸铁组织和力学性能的影响。结果表明，重稀土处理试样的抗拉强度、伸长率和冲击韧性均高于轻稀土处理试样，断口形貌如图 9 所示。可以看出重稀土试样撕裂岭大部分处于闭合状态，这有利于阻碍裂纹的扩展和裂纹在石墨周围处相连接，这正是重稀土试样具有较好韧性的原因。

3.2　孕育剂及孕育处理

由于厚大断面球铁芯部凝固时间长，孕育衰退严重，容易造成石墨畸变，所以选择合适的孕育剂及孕育方法就显得尤为重要。孕育剂常用的有硅铁孕育剂、硅钡孕育剂和稀土孕育剂等，厚大断面球铁铸件经常使用含 Ba 长效孕育剂，Ba 阻碍了 C 和 Si 在铁液中的扩散，延缓了石墨生长速度，因此具有很强的球化能力和抗衰退能力。孕育剂加入过多会导致稀土元素增多，使碎块状石墨数量增多，而孕育不充分则会降低石墨球圆整度，促进渗碳体形成，因此大型铸件孕育剂添加量大约在 0.7%~1.0%[33]。

孕育处理与球化处理配合使用，其主要作用有提高石墨球数量，改善石墨形态及分布；细化共晶团，减小偏析。孕育处理主要包括随流孕育、型内孕育、孕育丝孕育等。厚大断面铸件由于质量大[34]，所以孕育处理后难以进行搅拌且随流孕育困难，因此可以采用浇口盆中的孕育块孕育，孕育量约为 0.10%~0.15%，这种孕育方式的好处是大流量铁液孕育均匀持久，且避免了孕育剂融化，使与空气接触，减少夹渣缺陷。

Lia 等[35]研制了 Sb-Ba-Ce-Si-Fe 孕育剂，探究其含量对球铁组织的影响，孕育与球化处理同时进行，发现当孕育剂含量为 0.2%时性能最好，此时基体组织由 90%珠光体和 10%铁素体组成。孕育处理后基体的 SEM 图像如图 10 所示，铁素体含量明显下降，珠光体为基体主要相，并且珠光体层片间距变薄。

4　总结与展望

风电用球墨铸铁铸件的生产要综合考虑化学成分、生产工艺和球化孕育等多方面因素的影响。选择合适的化学成分是获得优质厚大断面球铁铸件的基础条件，化学成分的设计应与基体组织和壁厚尺寸相匹配，同时，配合球化孕育法能够改善铸件组织，提高力学性能，有效保证铸件质量的一致性和稳定性。下面对风电铸件球墨铸铁材料面临的挑战与

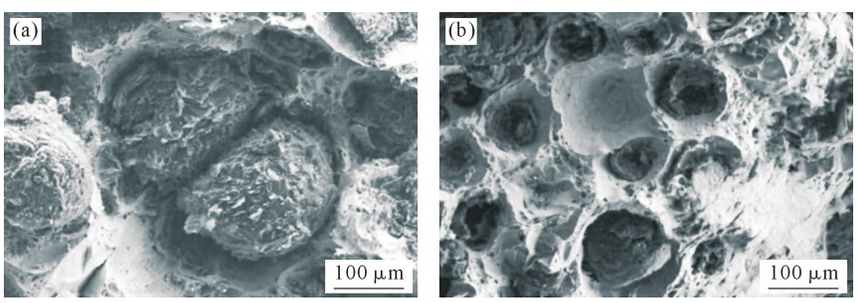


图 9　不同稀土球化剂处理后试样的拉伸断口形貌：(a) 轻稀土，(b) 重稀土[32]

Fig.9　Tensile fracture morphology of samples treated with different rare earth nodulizers: (a) light rare earth, (b) heavy rare earth[32]

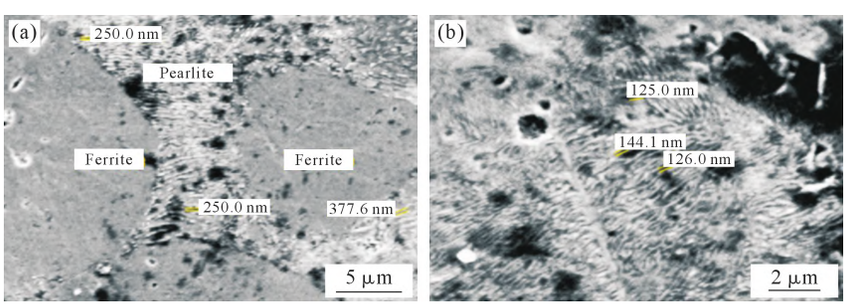


图 10　铸态珠光体球墨铸铁基体的 SEM 图像：(a) 接种前，(b) 接种后[35]

Fig.10　SEM images of the as-cast pearlite ductile iron matrix: (a) before inoculation, (b) after inoculation[35]

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

发展提出一些建议：

(1)材料性能的提升　风电铸件球墨铸铁材料的性能要求包括高强度、高韧性、良好的抗疲劳和抗腐蚀性能。未来的发展方向是进一步提升材料的力学性能，以满足更高要求的风电设备工作环境和负荷。如何降低铁液中 P、S、O 等有害元素，得到纯净的铁液是我们需要认真重视的问题。此外，探究厚大断面中碎块状石墨的形成机理，研究出适用于厚大断面球铁件的长效孕育剂与孕育方法也显得尤为重要。

(2)工艺创新与优化　通过工艺创新和优化，改善材料的组织结构和性能分布，是提升风电铸件球墨铸铁材料性能的关键。未来的发展方向包括改进熔炼工艺、优化铸造参数和热处理工艺，以实现材料的均匀性和稳定性，减少缺陷和内部应力的产生。同时优化生产装备与技术，减少污染。在全球能源转型的大背景下，风电铸件球墨铸铁材料的绿色制造和可持续发展也成为关注焦点。降低材料生产过程中的能耗和环境影响，推动循环经济和资源利用，将是未来发展的方向之一。

参考文献：

[1] 王星，闫兴义，陈玉芳，等. 大断面风电球墨铸铁铸件的技术控制[J]. 现代铸铁，2015, 35(1): 23-28.
WANG X, YAN X Y, CHEN Y F, et al.Technical control of heavy section wind power nodular iron castings[J]. Modern Cast Iron, 2015, 35(1): 23-28.

[2] 齐涛，郭向南. 风电机组球墨铸铁件质量要求及其质量控制[A]. 中国农业机械工业协会风能设备分会 2010 年度论文集(下)[C]. 北京：中国农业机械工业协会风力机械分会，2010, 8: 67-70.
QI T, GUO X N. Quality requirements and quality control of ductile iron parts for wind turbines[A]. 2010 annual papers of wind energy equipment branch of china agricultural machinery industry association(II)[C]. Beijing: Chinese Wind Energy Equipment Association, 2010. 23-26.

[3] GUO E J, SONG L, WANG L P,et al. Effects of forced cooling on mechanical properties andfracture behavior ofheavy section ductile iron[J]. China Foundry, 2015, 12(6): 398-405.

[4] 俞旭如，李川度，蔡佳佳. 风电球墨铸铁件生产技术及最新发展[J]. 现代铸铁，2011, 31(3): 21-26.
YU X R, LI C D, CAI J J. Production technology and its latest development of wind power nodular iron castings[J]. Modern Cast Iron, 2011, 31(3): 21-26.

[5] CESCHINI L, MORRI A, MORRI A, et al. Microstructure and mechanical properties of heavy sectionductile ironcastings: Experimental and numerical evaluation of effects of cooling rates[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2015, 28 (6): 365-374.

[6] 柳哲. 几种工艺对大断面球墨铸铁石墨形态的影响[D]. 广州：华南理工大学，2012.
LIU Z. Effects of several processes on graphite morphology of large section ductile iron[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[7] 李梅. 风电铸件夹渣缺陷分析及解决方案[D]. 徐州：中国矿业大学，2020.
LI M. Slag inclusion defect analysis and solution of wind power castings[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[8] 沙嘉熹，余勇，吴玉斌，等. 不同壁厚行星架附铸试块力学性能研究[J]. 铸造技术，2022, 43(4): 307-310.
SHA J X, YU Y, WU Y B, et al. Study on mechanical properties of test blocks with different wall thickness attached to planetary carrier[J]. Foundry Technology, 2022, 43(4): 307-310.

[9] 薛强军，王仲钰，王智明. 风电装备整机与铸件生产的现状及展望[J]. 现代铸铁，2009, 29(3): 18-22.
XUE Q J, WANG Z Y, WANG Z M. Current production situation and prospects of complete machine and castings of wind power generation equipments[J]. Modern Cast Iron, 2009, 29(3): 18-22.

[10] 王雪涛. 风电球墨铸铁件铸造工艺及组织数值模拟的优化[D]. 济南：山东大学，2017.
WANG X T. Optimization of numerical simulation of casting process and microstructure of nodular cast iron for wind power[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[11] 方曼力. 风电叶片复合材料疲劳损伤多尺度分析研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.
FANG M L. Multi-scale analysis of fatigue damage of wind power blade composites[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

[12] BACKWELL B, DYRHOLM M, GANNOUM E, et al. Global Wind Report 2023[R]. Brazil: Global Wind Energy Council, 2023.

[13] FRANZEN D, PUSTAL B, BÜHRIG-POLACZEK A. Mechanical properties and impact toughness of molybdenum alloyed ductile iron[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15: 983-994.

[14] 黎振华，李言祥，周荣，等. 原铁液硅含量对厚大断面球墨铸铁件石墨形态与力学性能的影响[J]. 铸造，2007, 56(5): 513-515.
LI Z H, LI Y X, ZHOU R, et al. Effect of Si in base iron on graphite morphology and mechanical properties of heavy section ductile iron[J]. Foundry, 2007, 56(5): 513-515.

[15] 朱能山，孙元状，鹿志刚，等. 铸态 QT400-18 铁素体球铁的生产应用[J]. 铸造，2000, 49(1): 41-42.
ZHU N S, SUN Y Z, LU Z G. Production and application of as-cast ferrite ductile iron QT400-18[J]. Foundry, 2000, 49(1): 41-42.

[16] 孙玉福，于广文，崔金鹤，等. 硅对铸态厚断面高韧性球墨铸铁组织及性能的影响[J]. 铸造，2008, 57(2): 114-116.
SUN Y F, YU G W, CUI J H, et al. Effect of silicon on microstructure and properties of as-cast heavy section ductile iron with high toughness[J]. Foundry, 2008, 57(2): 114-116.

[17] SONG L, GUO E J, WANG L P, et al. Effects of silicon on mechanical properties and fracture toughness of heavy-section ductile cast iron[J]. Metals, 2015, 5(1):150-161.

[18] 杨军，常秀文，陈美玲. 改性纳米粉体对风电机组用 QT400-18L 低温冲击韧性影响的研究[J]. 铸造，2017, 66(5): 455-458.
YANG J, CHANG X W, CHEN M L. Effect of modified nano-powders on low temperature impact toughness of QT400-18L for wind turbines[J]. Foundry, 2017, 66(5): 455-458.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[19] 秦升. 改性纳米粉体对球墨铸铁组织及力学性能的影响[D]. 大连：大连交通大学，2018.
QIN S. Effect of modified nano powder on microstructure and mechanical properties of ductile iron[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.

[20] ANTOLIŃ J F Á, LOZANO J A. Optimization of the mechanical behaviour under tensile stress of spheroidal cast iron with ferritic matrix used in the manufacture of wind turbine hubs[J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 11: 513-522.

[21] Jose F Á A, Lozano J A. Optimization of the mechanical behaviour under tensile stress of spheroidal cast iron with ferritic matrix used in the manufacture of wind turbine hubs[J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 11(3): 1-10.

[22] BAUER B, MIHALIC POKOPEC I , PETRI M, et al. Effect of bismuth on preventing chunky graphite in high-silicon ductile iron castings[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14: 1052-1062.

[23] GLAVAS Z, STRKALJ A, MALDINI K, et al. Effects of antimony and wall thickness on graphite morphology in ductile iron castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B，2016, 47: 2487-2497.

[24] 曹伟康，张杰. 微量铋、锑元素对大断面球墨铸铁的影响[J]. 中国铸造装备与技术，2013(6): 23-26.
CAO W J, ZHANG J. The influence of trace elements of Bi and Sb on S.G. iron with large section[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2013(6): 23-26.

[25] DEKKER L, TONN B, LILIENKAMP G, et al. Effect of antimony on graphite growth in ductile iron[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14: 827-835.

[26] 谢源甫，黄杏蓉，李范才，等. 含锑、铝、钛铸态球墨铸铁曲轴材料的研究[J]. 湖南大学学报，1981, 8(2): 56-66.
XEI Y F, HUANG X R, LI F C, et al. A study on as-cast nodular cast iron containing Sb, Al and Ti in crankshaft production[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 1981, 8(2): 56-66.

[27] AHMED M, SOLIMAN M, YOUSSEF M, et al. Effect of niobium on the microstructure and mechanical properties of alloyed ductile irons and austempered ductile irons[J]. Metals, 2021, 11(5): 703.

[28] 吴家栋，陈杨珉，刘海宁，等. 铌对球墨铸铁共晶温度和铸态组织的影响[J]. 上海金属，2021, 43(2): 49-53, 60.
WU J D, CHEN Y M, LIU H N, et al. Effect of niobium on eutectic temperature and microstructure of nodular iron[J]. Shanghai Metals, 2021, 43(2): 49-53, 60.

[29] FRÁS E, GÓRNY M, KAWALEC M. Effect of small additions of vanadium and niobium on structure and mechanical properties of ductile iron [J]. Archives of Foundry Engineering，2007, 7(1): 89-92.

[30] 董艳君. 厚大断面球墨铸铁件孕育效果研究[D]. 济南：山东大学，2014.
DONG Y J. Study on inoculation effect of thick and large section nodular cast iron[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[31] MOURAD M, EL-HADAD S, IBRAHIM M. Influence of inoculant type on the microstructure characteristics and mechanical properties of ductile iron[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73: 1027-1041.

[32] GUO E J, SONG L, WANG L P. Effect of Ce-Mg-Si and Y-Mg-Si nodulizers on the microstructures and mechanical properties of heavy section ductile iron[J]. Journal of Rare Earths, 2014, 32(8): 738-744.

[33] 王敬华. 厚大断面球墨铸铁齿圈的材质与工艺研究[D]. 武汉：华中科技大学，2009.
WANG J H. Study on material and technology of thick and large section nodular cast iron gear ring[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[34] 黎振华. 厚大断面球墨铸铁件凝固过程热模拟与石墨畸变预测研究[D]. 北京：清华大学，2005.
LI Z H. Thermal simulation and prediction of graphite distortion during solidification of thick and large section nodular cast iron [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.

[35] LIA B G, SIM K H, KIM R C. Effect of Sb-Ba-Ce-Si-Fe post inoculants on microstructural and mechanical properties of as-cast pearlitic ductile iron[J]. Steel Research International, 2019, 90(5): 1800530.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net