DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5046

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

徐德安[1], 纪汉成[1], 肖志瑜[2]
(1. 广东金志利科技股份有限公司,广东 韶关 512100;2. 华南理工大学,广东 广州 510641)

摘　要:随着海上风电快速发展和装机容量攀升,市场对大型风电主轴需求激增,这对高性能主轴材料及其先进制造工艺的研发提出了迫切要求。针对大型海上风电主轴结构及使用需求,从铸造主轴材料、关键铸造及加工工艺 3 个方面进行创新研究。材料上,优化成分配方并创新球化和孕育处理工艺,获得了铸态高性能固溶强化铁素体球墨铸铁,满足了海上风电对主轴高强度、高韧性、抗低温冲击的严苛需求;铸造工艺集成无冒口自补缩等技术,提高了工艺出品率和成品率;采用立式多头数控机床和优化的机加工工艺,提高了加工精度和生产效率。本主轴生产技术降低了生产成本,并投入批量化工业生产,提高了主轴整体的成品率和经济效益。

关键词:海上风电机组;铸造主轴;关键工艺;批量生产;成本优化

中图分类号: TG143.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)05-0481-10

Research and Development on High-strength, High-toughness, Low-temperature Impact-resistant Nodular Iron Cast Main Shafts of Large Offshore Wind Turbines

XU Dean[1], JI Hancheng[1], XIAO Zhiyu[2]
(1. Guangdong Jinzhili Technology Co., Ltd., Shaoguan 512100, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With the rapid development and increasing installed capacity of offshore wind power, the market demand for large main wind power shafts has increased sharply, necessitating urgent requirements for the research and development of high-performance main shaft materials and advanced manufacturing processes. Focusing on the main shaft structure and usage requirements of large offshore wind turbines, innovative research has been conducted from three aspects: casting material, key casting technology, and machining technology. In terms of materials, by optimizing the chemical composition and innovating nodulizing and inoculation processes, high-performance solid solutions strengthened with as-cast ferritic ductile iron have been obtained, meeting the stringent requirements of the main shaft for high strength, high toughness, and low-temperature impact resistance. The integration of the casting process with self-feeding technology has improved the process yield and significantly decreased the product scrap rate. The use of vertical multihead CNC machine tools and optimized machining processes has improved machining accuracy and production efficiency. This main shaft production technology reduces production costs and has been put into large-volume industrial production, improving the overall production yield and economic benefits.

Key words: offshore wind turbines; cast main shafts; key process; volume production; cost optimization

收稿日期:2025-03-23

作者简介:徐德安,1968 年生,高级工程师.主要从事注压机械及风力发电核心部件的制造工艺技术研发及公司经营管理方面的工作.Email: jinzhili@jinzhilikj.com

通信作者:纪汉成,1966 年生.研究员级高工,总工程师.主要从事工程机械及风电零件部件的铸造工艺技术开发及质量管理方面的工作.Email:jihancheng@163.com

引用格式: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(5): 481-490.

XU D A, JI H C, XIAO Z Y. Research and development on high-strength, high-toughness, low-temperature impact-resistant nodular iron cast main shafts of large offshore wind turbines[J]. Foundry Technology, 2025, 46(5): 481-490.

中国知网 https://www.cnki.net

近年来，风力发电装备技术迅猛发展，风力发电机组从几兆瓦升至几十兆瓦，逐渐从陆上风电向海上风电发展，从近海向深远海推进。海上风力发电机组都是大兆瓦级风机，漂浮式海上风电机组成为未来发展重点。当前全球最大容量双馈海上风电机组已经发展至 26 MW。根据预测，海上风力发电机组装机容量年增长率保持在 20%以上，全球每年对大型海上风力发电机组传动链所需铸造主轴需求约 2~3 万多根，市场规模超百亿元，发展前景广阔。

主轴是风力发电机组传动系统的关键部件，是连接风轮和发电机的核心零部件，承载着风轮的重力和扭矩，其质量直接决定了风力发电机组系统运行的稳定性和可靠性，对性能有严格要求。因此开发高性价比、满足复杂工况和性能要求的高性能主轴材料及其先进制造工艺成为亟待解决的技术任务。

目前国内外大型海上风力发电机组通常采用锻造合金钢制作主轴，或采用铸造高硅固溶铁素体球墨铸铁 QT500-14 生产主轴。生产锻钢主轴需要大型锻造设备，生产周期长、成本高。硅固溶强化铁素体球墨铸铁由于高强度、高韧性和高伸长率及优良切削性能，在许多领域获得广泛应用[1-10]。Hartung 等[1]认为未来风能球墨铸铁件可能由 30%(质量分数，下同)的硅固溶球墨铸铁牌号生产。但是硅固溶强化铁素体球墨铸铁由于硅含量高，尤其在厚大断面处铸件容易出现碎块状石墨，影响性能，尤其是影响伸长率和疲劳性能[1-3]。此外，硅固溶强化铁素体球墨铸铁因硅含量较高，低温冲击值较低[4-5]，故其标准通常未规定低温冲击值。然而，部分设计部门基于应用条件，会对某些零件提出特定低温冲击值要求，此时生产部门需按要求生产具备抗低温冲击性能的硅固溶强化铁素体球墨铸铁件。

针对大型海上风电主轴的结构特点和使用要求，本研究在材料、工艺和加工方面实现创新。在材料上，优化成分配方，开发合成球墨铸铁熔炼技术，采用轻稀土与重稀土球化剂相结合及多次复合孕育工艺，以研制具有高强度、高韧性、高塑性及良好耐低温冲击性能的硅固溶强化铁素体球墨铸铁；在铸造工艺上，综合采用无冒口自补缩技术、全覆盖成型冷铁激冷技术、底注分散开放式浇注系统、多组泡沫陶瓷过滤器技术，以实现大型风电主轴铸造工艺的集成创新，提高主轴铸件合格率及工艺出品率；在加工上，研发立式多头数控加工工艺，以提高加工精度与效率，降低废品率，全方位满足大型海上风电主轴制造要求，降低生产成本，提高经济效益。

1 大型风力发电机组铸造主轴结构特点及技术要求

风力发电机组核心关键零部件装配如图 1 所示，其中主轴是风力发电机组传动系统的关键部件。

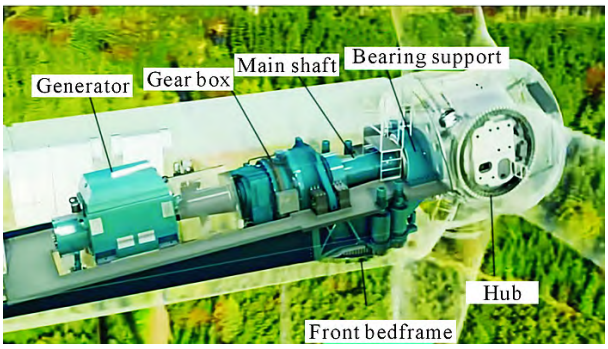

图 1 典型风电机组主要构件
Fig.1 Main components of a typical wind turbine

1.1 主轴铸件结构

大型海上风力发电机组 M17 铸造主轴铸件轮廓尺寸 ϕ 3850 mm×ϕ2 380 mm×4 680 mm，铸件质量为 48 950 kg，结构如图 2 所示。具有中空结构的长轴锥台型，其最大壁厚在主轴大端、小端及轴承挡位置，重要壁厚 300 mm，主要壁厚 80 mm 为最小壁厚，属于壁厚差较大类厚大断面球墨铸铁件[12]。

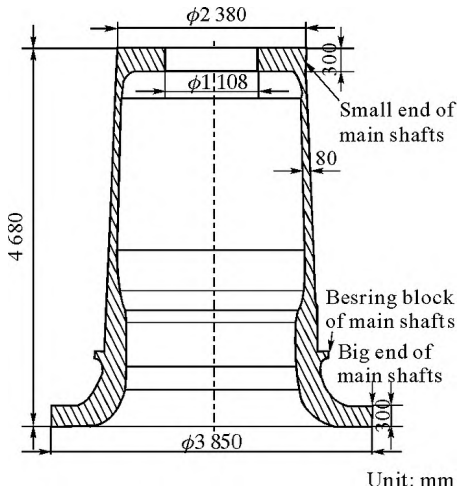

图 2 M17 风电机组主轴铸件结构示意图
Fig.2 Schematic structure of the M17 offshore turbine main shaft

1.2 技术要求

1.2.1 力学性能

主轴铸件要求 U70 附铸试块和本体取样的力学性能。附铸试块的室温力学性能和 V 型缺口试样室温及 -20 ℃低温冲击吸收能量需满足如表 1 所示的性能要求。首件需本体取样检验力学性能，本体只要求常规力学性能和 V 型缺口试样室温的冲击值，性能要求见表 1。

中国知网 https://www.cnki.net

表 1 主轴铸件力学性能

Tab.1 Mechanical property requirements for cast-on samples and samples cut from the main shaft

Sample	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Average hardness (HB)	Impact energy, KV_2/J			
					23 ℃		-20 ℃	
					Ave.	Indiv.	Ave.	Indiv.
Cast-on samples	≥480	≥380	≥12.5	170~200	≥10	≥8	≥6	≥4
Sample cut from casting	≥430	≥360	≥10.0	170~200	≥8	≥6	-	-

1.2.2 金相组织

附铸试块和铸件本体的金相组织要求如表 2 所示。主轴本体需每件检测表面金相组织，采用便携式显微镜检测，位置在主轴大端面、小端面及大端面喇叭口内侧。

表 2 附铸试块和铸件本体的石墨和基体组织要求

Tab.2 Requirements of graphite and the metal matrix from cast-on samples and samples cut from the main shaft

Sample	Ferrite /wt.%	Carbide+steadite /wt.%	Nodularity /%	Nodule size/grade
Cast-on sample	≥95	≤1	≥90	5~7
Sample cut from casting	≥95	≤1	≥85	5~7

1.2.3 主轴铸件毛坯尺寸以及零件质量公差要求

铸件毛坯尺寸公差按照 ISO 8062-3: 2007《铸件尺寸公差》标准的 CT11 级执行，壁厚公差达到 CT12 级，铸件加工后零件实际质量不得超过理论质量的±3%。

1.2.4 无损检测要求

超声波探伤(ultrasonic test, UT)检测内部缺陷。UT 探伤要求：按照 EN12680-3: 2012《超声检测：球墨铸铁》标准，关键区域 II 级，非关键区域 III 级。

磁粉探伤 (magnetic test, MT) 表面缺陷检验要求：使用荧光介质，按照 EN 1369: 2012《磁粉检测》标准进行磁粉探伤检验，关键区域 II 级，非关键区域 III 级。

2 主轴材料选择和实验验证

2.1 主轴化学成分选择和控制

通常情况下，低温铁素体球墨铸铁虽具备优良的低温性能，但其强度仅为 400 MPa，无法达到 500 MPa 的指标要求。硅固溶强化铁素体球墨铸铁 500-14 强度高，可以满足要求，但是低温冲击性能不能满足平均值≥6 J，单个值≥4 J 的要求，如图 3 所示[4]，GJS-500-14 的 -20℃ V 型缺口试样冲击值通常小于 3J。

对于需满足超厚断面且低温冲击性能要求的高硅固溶铁素体球墨铸铁，化学成分的精准选择与严格控制，对其生产质量起着决定性作用。鉴于主轴断面较厚，碳含量不宜过高，否则易引发石墨漂浮现象，致使力学性能降低。硅能提高强度，提高室温伸长率，但是硅含量高会提高韧性-脆性转变温度，降低低温冲击值，所以硅含量不宜过高[10-11]；锰促进珠光体形成，且容易偏析，产生碳化物，其含量应尽可能低[12]；硫是反球化元素，直接影响球化率，并引起铸件夹渣缺陷的产生，在低温球铸铁中显著提升韧-脆转变温度，含量过多易在晶界处形成硬脆的磷共晶，因此要求 Mn≤0.2%，S≤0.015%，P≤0.04%。需特别注意原材料中微量反球化干扰元素与碳化物形成元素的含量限制。部分反球化干扰元素不仅会损害石墨形状，还能促进珠光体与碳化物生成，于最后凝固区域偏析，形成晶间碳化物和夹杂物。碳化物和

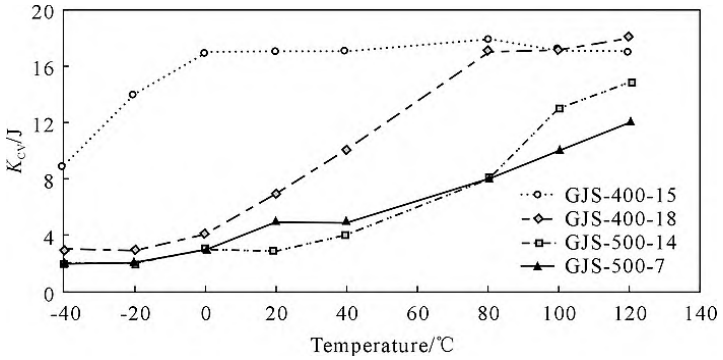

图 3 3 种随着硅固溶体强化铁素体球墨铸铁(高达 3.8%Si)以及中等抗拉强度铁素体-珠光体球墨铸件在不同温度下的冲击能量(夏比 V 型缺口)比较[4]

Fig.3 Comparison of impact energies (Charpy V-notch) at various temperatures among three ferritic spheroidal graphite cast irons, a solid solution strengthened with increasing silicon content (up to 3.8 wt.% Si), and ferritic-pearlitic spheroidal graphite cast iron with intermediate tensile strength[4]

中国知网 https://www.cnki.net

夹杂物的存在会削弱球墨铸铁的力学性能，尤其是冲击韧性与疲劳性能[12]。鉴于铸件断面厚大，残余镁含量不宜过低，宜将 Mg 含量控制在0.045%~0.055%；残余稀土过高易催生碎块状石墨，故含量不宜过高，应使 Re≤0.015%。

微量元素锑可在一定程度上抑制大断面石墨畸变，防止碎块状石墨产生[13]，使石墨形态保持较好的球状，从而提高球墨铸铁的力学性能；锑的加入可在一定程度上改善球墨铸铁的抗衰退性，使球化效果在较长时间内保持稳定。过量的锑会导致石墨形态恶化，降低强度，产生白口组织等。在大断面球墨铸铁铸造主轴中，锑的加入量控制在 0.005%以下。微量元素铋可促进大断面球墨铸铁石墨的形核和生长，使石墨形态更加圆整、均匀[13-14]，提高球墨铸铁的球化率，其加入量控制 0.02%以下[15]。

经综合分析和生产经验，大型海上风力发电机组球墨铸铁铸造主轴化学成分(%) 确定为：3.0~3.5 C，3.6~3.8 Si，Mn≤0.2，P≤0.04，S≤0.015，0.045~0.055 Mg，Sb≤0.005，Bi≤0.02，Cr≤0.05，Ti<0.02，RE≤0.015，Al≤0.04。其他促进珠光体和碳化物的元素及促进碎块状石墨和其他非球状石墨的干扰元素尽可能低。

2.2 试块尺寸

采用立方形试块进行了材料试验，试样尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm，取样位置见图 4，该立方体试块可以代表主轴铸件的壁厚。

2.3 原材料、熔炼、球化、孕育处理及浇注

采用 30 t 中频感应电炉熔炼，主要采用废钢合成球墨铸铁配料[16]，炉料配比中压块型优质碳素废钢的质量比例≥90%，其余为高纯生铁、回炉料，优质增碳剂、铁合金等。加入 0.5%~1.0%的碳化硅进行预处理。当原铁液化学成分调整到位后，将铁液升温至 1 490~1 510 ℃高温静置 10~15 min。

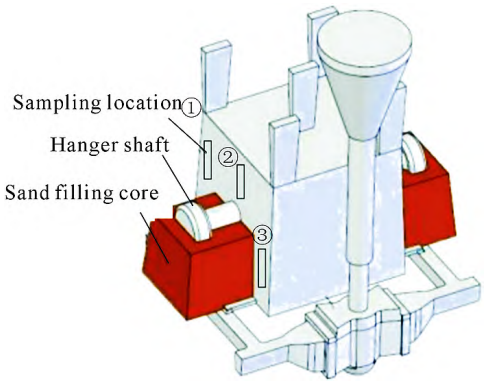

图 4 立方体试块取样位置示意图
Fig.4 Schematic diagram of cube specimen extraction location

球化处理采用新开发的专用混合球化剂 (轻稀土 50%和重稀土 50%)[17-18]，冲入法球化处理。球化剂总加入量为铁液重量的 1.2%~1.3%。覆盖剂选用成分合格的细小碳钢废钢片(加入量为铁液重量的 1.0%~1.5%)和中钡高效复合孕育剂(加入量为铁液重量的 0.3%~0.4%)。出炉铁液温度控制在1 430~1 450 ℃，浇注温度控制在1 340~1 360 ℃。

孕育处理采用冲入法球化处理，具体过程为：预孕育时在覆盖剂中添加 0.3%~0.4%的中钡高效复合孕育剂；倒包时进行二次孕育，加入 0.3%~0.4%的中钡高效复合孕育剂。此外，运用先进的自动随流孕育装置，选用低钡孕育剂，其成分(%)为：68~72 Si、1.0~3.0 Ba、1.0~2.0 Ca、1.0~2.0 Bi、1.0~1.5 Al，随流孕育剂加入量为铁液质量的 0.15%~0.2%。

2.4 实验结果

化学成分检测采用德国 OBLF-GS1000 直读光谱仪进行分析，立方体试样的化学成分见表 3，可见立方体试块的化学成分符合预期的设计要求。力学性能采用 WAM-300B 拉力试验机及 JB-300W 低温冲击试验机进行检测，性能结果见表 4。金相组织分析采用 TM-200 金相分析仪进行，结果见表 5 和图 5。由实验结果可见，立方体试块的金相组织、力学性

表3 立方形试块化学成分
Tab.3 Composition of the cubic test block

(mass fraction/%)

Type of iron	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE	Cr	Ti	Sb	Bi
Base iron	3.31	2.58	0.15	0.03	0.015	-	-	0.03	0.02	0.004	0.015
Ductile iron	3.22	3.72	0.15	0.03	0.008	0.055	0.006	0.03	0.02	0.004	0.015

表 4 立方形试块力学性能
Tab.4 Mechanical properties of samples taken from the cubic test block

No.	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Average hardness (HB)	Impact energy, KV_2/J			
					23 ℃		-20 ℃	
					Ave.	Indiv.	Ave.	Indiv.
1	536	413	15.5	187	12.0	13, 12, 11	8.0	7.0, 9.0, 8.0
2	525	408	17.5	182	11.6	10, 12, 13	7.0	7.0, 6.0, 8.0
3	530	410	16.0	185	11.7	11, 12, 12	8.5	8.0, 9.0, 8.5

中国知网 https://www.cnki.net

表 5 立方体试块金相组织

Tab.5 Metallographic structure of samples taken from the cubic test block

No.	Ferrite/wt.%	Pearlite/wt.%	Carbide+steadite/wt.%	Nodularity/%	Nodule size/grade	Nodule count/m^{-2}
1	≥95%	≤3%	≤1%	≥90%	6	159
2	≥96%	≤2%	≤1%	≥90%	6	131
3	≥98%	≤2%	≤1%	≥90%	6	150

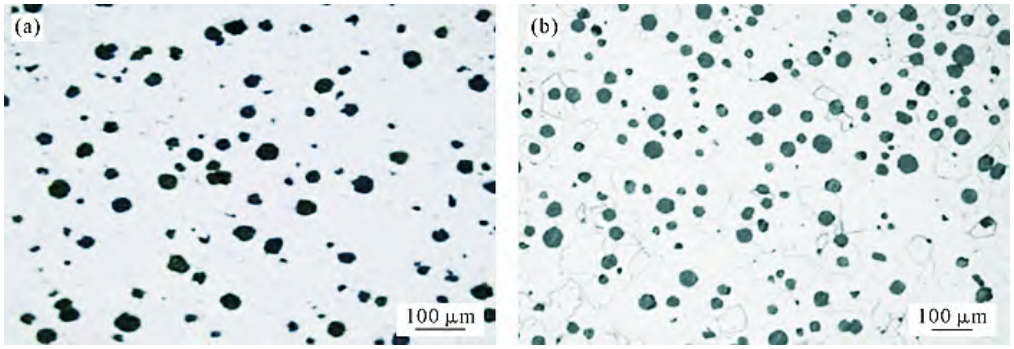

图 5 立方体试块金相组织：(a) 石墨组织；(b) 基体组织

Fig.5 Metallographic structure of samples taken from the cubic test block: (a) graphite structure; (b) matrix structure

能完全满足 M17 风电主轴的要求。

由表 3 可见，立方体试块的化学成分达到了预期的控制范围，微量元素 Cr、Ti 及其它微量元素含量≤0.1。

由表 4 可见立方体试块的力学性能的各项指标都超过了大型海上风力发电机组球墨铸铁主轴的要求，尤其是 -20 ℃平均值和个别值冲击都远超平均值 6 J、个别值 4 J 性能要求。

由表 5 和图 5 可见金相组织的各项指标，图 5a 为石墨组织，球化率≥90%，石墨尺寸 6 级，石墨球数 150 个/m^2，图 5b 为基体组织，铁素体≥95%，未见碳化物和夹杂物。可知，包括铁素体含量、珠光体含量、渗碳体+磷共晶含量、球化等级、球化率、石墨大小、石墨球数都符合规定要求。

3 主轴生产实验

根据立方体试块实验结果进行主轴生产实验验证。主轴的原材料、熔炼、球化处理和孕育处理和立方形试样完全一样，以下只论述造型工艺和浇注、打箱落砂。

3.1 铸造工艺设计

3.1.1 分型面设计

采用 4 箱分型造型方案，大端面法兰置于下箱且朝下，主轴主体分布于中下箱与中上箱，小端位于上箱，上箱设置出气片与出气孔(图 6)。主轴内腔轴孔由整体砂芯成型，大砂芯以底侧芯头定位，浇注系统布置于底部及底箱芯头座。铸件外轮廓由下型、中下型、中上型和上型构成，其中中下型采用下上双砂箱造型(两砂箱尺寸相同，先以大砂箱制作主轴大尺寸外型，填入树脂砂后插入小砂箱完成小尺寸外型制作)，内腔采用整体砂芯。该方案铸型与砂芯装配简便、次数少，尺寸精度高，同时在主轴大断面分型面处设置 3 块附铸试块。

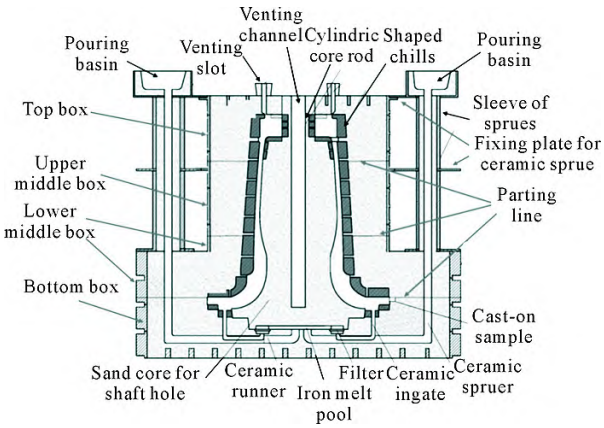

图 6 主轴铸件分型及工艺设计

Fig.6 Molding parting and process design of the main shaft casting

3.1.2 浇注系统、排气系统设计

采用底注开放式浇注系统[19-20]，见图 6。铁液经过两个陶瓷直浇道自上而下进入储液池，通过贮液池分流进入 3 个陶瓷横浇道(设置有陶瓷过滤网)，再从过滤装置处分流 30 个陶瓷内浇道(每个内浇道设置 10 ppi 高效扇形陶瓷过滤片对铁液进行整流和过滤)从底部法兰端面进入型腔，横浇道及过滤装置整体位于轴孔大砂芯下方，实现浇注系统快速充满，铁液平稳充型，抑制紊流、飞溅，有效减少二次氧化渣的产生。根据魏兵的大孔出流理论[21]设计计算及 Magma 模拟验证，浇注时间控制在(225±20) s，浇注系统比例$\sum F_{直}:\sum F_{贮液池}:\sum F_{横}:\sum F_{内}$=1.0:5.0:1.2:3.0，内浇道流速控制在 0.5 m/s 以内。大孔出流开放式浇注系统往往存在内浇道截面积大的问题，因此在铸

中国知网 https://www.cnki.net

件底部法兰端面陶瓷内浇道处设置成型冷铁激冷，减小内浇道与铸件连接位置的接触热节，从而降低内浇道位置缩松倾向。尽量使内浇道均布并同时进流，使温度场均匀。

在轴孔大砂芯的内部设置 ϕ350 mm 筒型芯骨，在筒型芯骨的整体表面设有多个孔眼并缠绕排气绳，便于浇注铁液时排气绳燃烧形成排气通道，大砂芯及型腔产生的气体及时经过筒型芯骨及上箱排气孔排出铸型外，保证铁液充型排气通畅[22]，防止浇注呛火及铸件产生气孔缺陷。

此分型和随型砂箱设计以及双直浇道底注分散式大孔出流开放式浇注系统，大大节约了造型树脂砂用量，降低了生产成本。

3.1.3 补缩、激冷系统设计

如图 6 所示，为保障铸件内部质量，在铸件锥形台体的整个表面均匀布置 20 排成型冷铁，冷铁厚度为 100 mm，每排冷铁及相邻两排冷铁的间距控制在 20~30 mm。在铸件轴孔砂芯(型腔大厚断面处)设置 5 排成型冷铁，冷铁厚度为 100 mm，每排冷铁及相邻两排冷铁的间距控制在 20~30 mm。在主轴喇叭口交接位置的内侧、上端面内侧均采用冷铁加速金属液补缩。在铸件上端面设置 4 个出气片、4 个出气孔以及 1 个排气孔。此设置在浇注冷却时可提升铸型激冷能力，减少铁液液态补缩量，实现均衡凝固与自补缩无冒口补缩，提高金属液利用率及铸件表面硬度与耐磨性，有效防止铸件产生缩孔、缩松等缺陷[23-24]，提升铸造主轴铸件的合格率与工艺出品率。

3.1.4 模拟分析

采用 Magma 凝固模拟软件进行了充型和凝固模拟。首先建立主轴铸造工艺三维模型，将三维模型导入 Magma 铸造模拟软件。设定主轴充填时间、金属液流动速度、金属液温度及压力、凝固时间、铸型温度。设置对称边界条件，利用 Magma 软件的网格划分功能划分网格，网格大小设置要合理，网格太小计算速度慢，网格太大模拟精度太低，主轴的网格划分完成后节点数为 35517232 个，单元数为 4439654 个。按照铸造经验，此网格可以保证铸件的模拟精度。在 Magma 软件中设置相关参数，包括所选定并且经过验证的的化学成分，主轴表面成型冷铁及砂芯成型冷铁的尺寸，呋喃树脂砂型砂，铸型温度 25 ℃，孕育效果选择良好，收缩倾向选择一般。

通过 Magma 模拟软件分析可知，主轴充型过程平稳，无飞溅、喷射现象，随着浇注时间推移，金属液呈均匀稳定上升趋势。整个充型过程中，浇道始终充满铁液，有效阻隔气体和夹渣侵入，避免夹渣缺陷产生，验证了底注浇注工艺的合理性，可确保铸造质量。浇注 50 s 时的充型状态如图 7a 所示。 通过模拟结果可以看出，主轴自浇注充型结束至完全凝固(温度降至 1 161.6 ℃)，耗时 7 h 25 s。主轴完全凝固后，仅在大端喇叭口位置及小头端内侧位置出现少量缩孔、缩松，且分布较为分散，尺寸均小于规定缺陷尺寸，模拟结果见图 7b，表明主轴铸造后的整体质量良好，仅有少量孔隙率。孔隙率可直观呈现缩松、缩孔等缺陷的位置与大小。依据 Magma 软件模拟结果，主轴缩松、缩孔位置分散，体积较小，较大缺陷位于大端喇叭内侧及小头端内侧。为规避模拟中出现的铸造缺陷，实际铸造时在喇叭口内侧、小头端内侧设置冷铁，加速金属液冷却，降低热节出现，避免缩孔、缩松铸造缺陷。

充型过程中，金属液不断均匀稳定上升。在整个充型过程中，浇道一直充满铁液，可防止气体和夹渣的进入，避免夹渣缺陷的产生，因此采用自下而上的浇注工艺比较合理，可以保证铸造质量。

3.1.5 浇注和打箱

将两个盛有倒包孕育后的铁液经过随流瞬时孕育同时浇入两个浇口盆(图 6)，进入型腔，浇注温度为 1 340~1 360 ℃。铁液从球化处理结束到浇注完毕时间≤15 min，浇注时间为(225±20) s，浇注质量

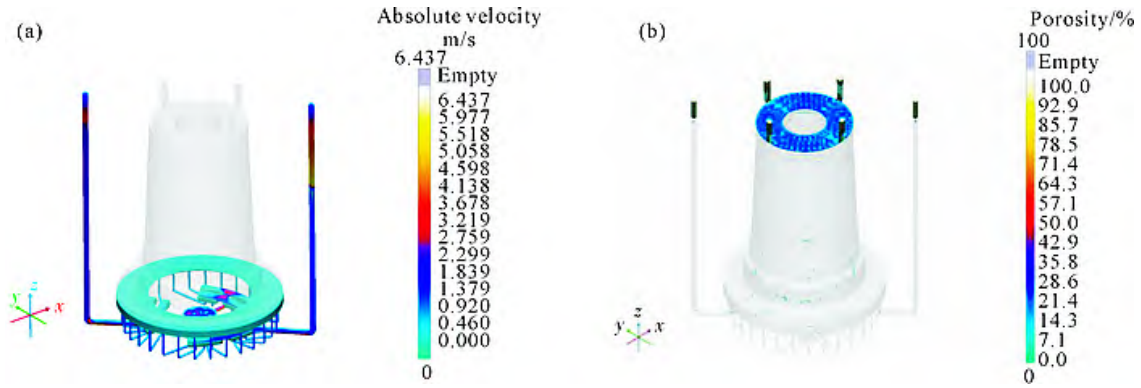

图 7 Magma 软件模拟结果：(a) 充型 50 s；(b) 凝固结束

Fig.7 Simulated results of the Magma software: (a) filling status at 50 s; (b) complete solidification

中国知网 https://www.cnki.net

54 t，压铁重量 80 t，凝固完成后，待铸件温度降低≤300 ℃，开箱落砂。

3.2 主轴铸件的化学成分和性能

主轴铸件化学成分(质量分数，%)：3.22 C，3.75 Si，0.15 Mn，0.04 P，0.008 S，0.052 Mg，0.004 Sb，0.015 Bi，0.04 Cr，0.015 Ti，0.008 RE，符合预期设计范围。附铸试样和铸件本体的性能见表 6 和 7。由表 6 和 7 可见附铸试样和铸件本体的性能远超要求。附铸试样和铸件本体的微观组织见图 8。图 8 显示球化率达到 90%以上，石墨尺寸达到 5~7 级。铁素体≥95%，未见碳化物和其它夹杂物。主轴铸件的尺寸符合要求。主轴铸件一次浇注实验成功。

4 主轴铸件的批量生产

根据主轴生产试验的工艺和数据，批量生产了 M17 铸造主轴 100 根。主轴化学成分(质量分数，%)范围为：3.0~3.5 C，3.3~3.8 Si，Mn≤0.2，P≤0.04，S≤0.015，0.045~0.055 Mg，Sb≤0.005，Bi≤0.02，Cr≤0.05，Ti<0.02，RE≤0.015，Al≤0.04。M17 主轴批量生产的附铸试块性能见表 8，由表 8 可见力学性能远超所要求的性能。

对所生产的 100 根 M17 主轴进行金相组织检验，结果均完全符合要求。铸件表面质量、铸件毛坯尺寸及质量公差、无损检测结果也全部合格，表明所

表 6 铸件附铸试块力学性能

Tab.6 Mechanical properties of the cast-on sample

Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Average hardness (HB)	Impact energy, KV_2/J			
				23 ℃		-20 ℃	
				Ave.	Indiv.	Ave.	Indiv.
515	394	18.5	180	11.2	12.0, 11.1, 10.5	6.43	6.8, 6.0, 6.5

表 7 铸件本体力学性能

Tab.7 Mechanical properties of samples cut from the main shaft

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Average hardness(HB)	Impact energy, KV_2/J	
				23 ℃	
				Ave.	individual
492	375	15.5	175	9.9	9.8, 9.9, 10.0

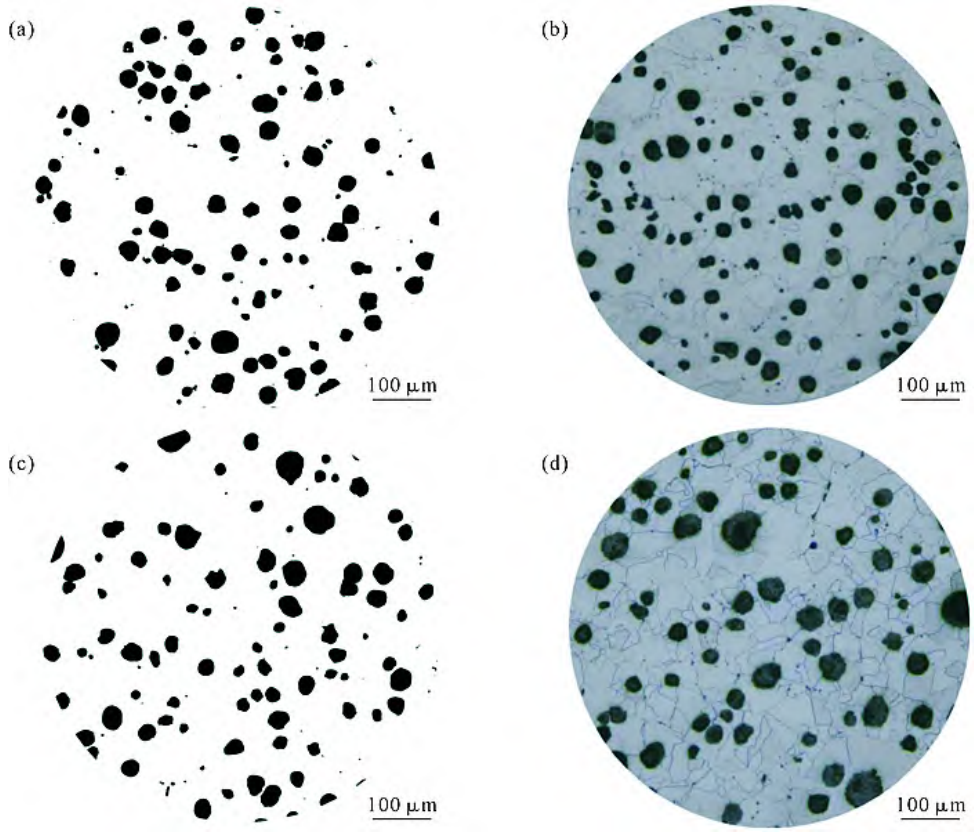

图 8 附铸试样和本体石墨组织和金属基体组织：(a, b) 附铸试样；(c, d) 本体

Fig.8 Graphite and matrix structure of the cast-on sample and the casting: (a, b) cast-on sample; (c, d) the casting

中国知网 https://www.cnki.net

表8 M17主轴批量生产的附铸试块性能
Tab.8 Mechanical properties of cast–on samples of M17 main shafts for volume production

Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Average hardness (HB)	Impact energy, KV_2/J			
				23 ℃		KV_2/J(-20 ℃)	
				Ave.	Indiv.	Ave.	Indiv.
490~536	390~430	13.5~22.5	170~200	11.0~14.0	9.0~15.0	7.0~9.0	5.0~10.0

生产的 100 根 M17 铸造主轴均满足质量要求。M17 主轴造型砂铁比为 2.3∶1.0，工艺出品率达 90.65%。

目前，笔者公司生产的大型主轴铸件有十余种型号，结构相似且铸件重量在 20~50 t 之间，均属于厚大断面铸件。通过采用相同的化学成分设计、类似且优化的工艺设计及浇注系统比例，累计铸造生产各类主轴 500 件，总生产重量 17 500 t，其中铸造废品 3 件，废品重量 108 t，铸造废品率为 0.62%。废品具体情况为，1 件因浇注漏箱报废，1 件因铸件探伤不合格报废，1 件因附铸试块低温冲击性能不合格报废。

5 主轴铸件的数控加工

5.1 数控加工设备选型与配置

采用国产大连 CK5275 数控双柱立式车床加工主轴外圆，采用进口尼古拉斯 MAGNA-75 落地铣镗床加工中心加工主轴小端大端孔位及螺纹孔。应用 CK52 系列数控双柱立式车床，配置国内、外先进的功能部件，结构性能上实现了强力切削，工作台超重载荷、机床动、静态刚度高，各项运动安全可靠，使用寿命长，加工效率高的高科技机电一体化产品；根据加工需求，选择功率、转速和扭矩等参数合适的动力头，并确保其能够与加工设备完美匹配；配置左侧刀架与右侧刀架、左侧立刀架为西门子 828D 数控系统(三套)，实现对三个动力头的精确控制和协同工作，如数控系统和后处理软件。采用 Machining 数控仿真软件，对机床操作全过程和加工运行全环境进行仿真模拟，避免碰撞与干涉，优化加工过程，提高编程准确性，提高加工效率和质量。

5.2 数控加工工艺优化

采用三个动力头同时加工工艺如图 9 所示，在单位时间内完成多项加工任务，减少加工周期，显著提升整体加工效率，降低生产成本。对加工铸造主轴的结构、尺寸、精度要求等进行详细分析，确定 3 个动力头的最佳加工位置和加工顺序；考虑铸造主轴的球墨铸铁材料特性和加工难度，选择合适的刀具和切削参数，以确保加工质量和效率。应用先进立式数控车铣镗设备加工风电主轴，减少重力影响，提高了刀具的稳定性及加工精度，且加工设备效率高，操作方便，适应性强。

5.3 数控加工检测结果

按照客户要求的标准对机加工的 M17 球墨铸铁主轴进行了尺寸、表面光洁度、UT 和 MT 检测。所有检验结果均合格。试验生产合格后，批量生产 100 根，全部合格。

目前，大型主轴铸件有十余种型号，统计累计数控加工主轴 500 件，总生产重量 17 500 t，加工尺寸偏差废品 1 件，废品重量 30 t，废品率 0.17%。考虑铸造废品，合计大型主轴综合废品率<1%。

6 结论

(1)通过优化主轴化学成分(%)：3.0~3.5 C，3.3~3.8 Si，Mn≤0.2，P≤0.04，S≤0.015，0.045~0.055 Mg，Sb≤0.005，Bi≤0.02，Cr≤0.05，Ti<0.02，RE≤0.015，Al≤0.04，采用合成球墨铸铁配料，专用混合球化剂、预处理剂和高效复合三次孕育处理可获得满足大型海上风电机组主轴高强度、高韧性、耐低温冲击性能的要求。

图 9 CK52 系列数控双柱立式车床加工：(a) 三把车刀正在车削主轴；(b) 加工完成的主轴
Fig.9 Machining of the CK52 series CNC double column vertical lathe: (a) three cutters turning the main shaft; (b) machined main shaft

中国知网 https://www.cnki.net

(2)采用随型砂箱及底注分散式大孔出流开放式浇注系统，主轴表面采用全覆盖成型冷铁，无冒口自补缩系统及多组泡沫陶瓷过滤片，节约了造型树脂砂用量，提高了铸造主轴铸件的合格率及工艺出品率。生产出高质量高性能大型海上风电球墨铸铁铸造主轴，其砂铁比为 2.5:1.0 以下，工艺出品率达到≥85%，铸造成品率≥99%，生产成本同工艺改进前下降了 20%~30% 。

(3)采用国产大连 CK52 系列数控双柱立式车床和进口尼古拉斯 MAGNA-75 落地铣镗床加工中心，配置国内、外先进的功能部件以及优化的机加工工艺，主轴铸件的数控加工精度和效率提高，加工废品率为千分之一。

参考文献：

[1] HARTUNG C, LOGAN R, PLOWMAN A, WILKINSON D, HOEL E G, OTT E. Research on solution strengthened ferritic ductile iron (SSFDI) structure and properties using different treatment and inoculation materials[J]. International Journal of Metalcast, 2020, 14: 1195-1209.

[2] BAER W. Chunky graphite in ferritic spheroidal graphite cast iron: Formation, prevention, characterization, impact on properties: An overview[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14: 454-488.

[3] SUJAKHU S, CASTAGNE S, SAKAGUCHI M, KASVAYEE K A, GHASSEMALI E, JARFORS A E W, WANG W. On the fatigue damage micromechanisms in Si-solution-strengthened spheroidal graphite cast iron[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 41(3): 625-641.

[4] Founding. Spheroidal graphite cast irons: BS EN 1563: 2011 [S/OL]. https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030214941.

[5] BJÖRKEGREN L E, HAMBERG K. Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability[J]. Foundryman, 2001, 94: 42-51.

[6] 吕乐华，张杰琼，范随长，许海铎，郭亚辉，王世杰，张毅，蔚磊磊. 高硅固溶强化球墨铸铁的试制[J]. 铸造技术，2021, 42(9): 777-779.
LYU L H, ZHANG J Q, FAN S C, XU H D, GUO Y H, WANG S J, ZHANG Y, WEI L L. Experimental production of high silicon solid strengthened duction iron[J]. Foundry Technology, 2021, 42(9): 777-779.

[7] 宋光密，徐文利，王垒，费洪祥.固溶强化球墨铸铁 QT500-14 工艺试验与分析[J]. 中国铸造装备与技术，2019, 54(4): 65-68.
SONG G M, XU W L, WANG L, FEI H X. Process test and analysis of solid solution strengthened ductile iron QT500-14[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2019, 54(4): 65-68.

[8] 杨万虎，周文军，张守全，陈孝先，孙升，王洪涛，薛蕊莉，原晓雷. QT500-14、QT600-10 高硅球墨铸铁研究[J]. 铸造，2014, 63(8): 831-835.
YANG W H, ZHOU W J, ZHANG S Q, CHEN X X, SUN S, WANG H T, XUE R L, YUAN X L. Investigation on high Si ductile iron of QT500-14 and QT600-10[J]. Foundry, 2014, 63(8): 831-835.

[9] 陈鹏辉，柯志敏. 铸态 QT500-14 射台前板铸件熔炼工艺浅析[J]. 铸造设备与工艺，2019(5): 17-19, 37.
CHEN P H, KE Z M. Production technology and application of as-cast QT500-14 ductile iron[J]. Foundry Equipment and Technology, 2019(5): 17-19, 37.

[10] 高博，张涛，杨霄峰，陈园社. 高硅固溶强化铁素体球墨铸铁的工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术，2017(5): 15-17.
GAO B, ZHANG T, YANG X F, CHEN Y S. Technology study of high silica solution strengthening of ferrite and nodular cast iron[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2017(5): 15-17.

[11] 曾大新，何汉军，张元好，张战场，肖海波. 铸态高强度高伸长率球墨铸铁研究进展[J]. 铸造，2017, 66(1): 38-43, 49.
ZENG D X, HE H J, ZHANG Y H, ZHANG Z C, XIAO H B. Development of as-cast ductile iron with high strength and high elongation[J]. Foundry, 2017, 66(1): 38-43, 49.

[12] 尤明. 大型风电主轴球铁铸件的生产工艺和质量控制[J]. 现代铸铁，2012(6): 23-26.
YOU M. Production process and quality control of wind power-used heavy rotor shaft nodular iron casting[J]. Modern Cast Iron, 2012(6): 23-26.

[13] BOUDOT A, GERVAL V, OQUAB D, LACAZE J, SANTOS H. The role of manganese and copper in the eutectoid transformation of spheroidal graphite cast iron[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28: 2015-2025.

[14] 苏俊齐，张伟，马金哲，曲迎东，周张松，张亚军，李广龙. 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, QU Y D, ZHOU Z S, ZHANG Y J, LI G L. Development status and trends of ductile iron materials for wind power castings[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1144-1151.

[15] 江苏吉鑫风能科技股份有限公司. 一种改善高硅固溶厚大断面风电球墨铸铁件金相组织的工艺：CN113699432B[P]. 2022-04-05.
Jiangsu Sinojit Wind Energy Technology Co., Ltd. A process for improving the metallographic structure of high silicon solid solution thick section wind turbine ductile iron castings: CN113699432B[P]. 2022-04-05.

[16] 田苗，贺焱，刘海涛，刘建浩，刘延坪. 风电用 QT400-18AL 合成球墨铸铁的力学性能研究[J]. 热加工工艺，2017, 46(9): 118-121, 126.
TIAN M, HE Y, LIU H T, LIU J H, LIU Y P. Study on mechanical properties of QT400-18AL synthetic nodular cast iron for wind power[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 118-121, 126.

[17] 李仕林，杨清，朱福生，张财淦，廖志金. 钇基重稀土复合球化剂和球化包芯线在厚大断面球墨铸铁件中的应用[J]. 铸造，2023, 72(9): 1127-1133.
LI S L, YANG Q, ZHU F S, ZHANG C G, LIAO Z J. Application of yttrium-based heavy rare earth composite nodulizer and nodularizing core-wire to thick large section ductile iron castings[J]. Foundry, 2023, 72(9): 1127-1133.

中国知网 https://www.cnki.net

[18] 郝石坚，宋绪丁. 球墨铸铁[M]. 北京：化学工业出版社，2015.
HAO S J, SONG X D. Ductile cast iron[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.

[19] 刘龙. 复杂液压铸件的铸造工艺设计[J]. 现代铸铁，2022, 42(2): 31-34, 39.
LIU L. Casting method design of complex hydraulic castings[J]. Modern Cast Iron, 2022, 42(2): 31-34, 39.

[20] 苏飞，汪东红，薛菁，邓小明，龚潜海，陈寅，疏达. 6MW 大型风电主机架铸造工艺数值模拟与优化[J]. 铸造，2025, 74(1): 91-97.
SU F, WANG D H, XUE J, DENG X M, GONG Q H, CHEN Y, SHU D. Numerical simulation and optimization of the casting process for a 6 MW large-scale wind turbine main frame[J]. Foundry, 2025, 74 (1): 91-97.

[21] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[22] 杨宗明，侯屹，王世良，蔡波，杨建雄. 防止大型横梁铸件呛火的工艺改进[J]. 铸造工程，2022, 46(3): 58-60.
YANG Z M, HOU Y, WANG S L, CAI B, YANG J X. Improvement of technology to prevent crossbeam casting from choking[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(3): 58-60.

[23] 汪兴娟，何顺荣，李伟，李丹. 球铁箱盖件的无冒口铸造工艺设计及数值模拟[J]. 中国铸造装备与技术，2014(3): 47-50.
WANG X J, HE S R, LI W, LI D. Technology design and numerical simulation of ductile iron cover by head-free casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2014(3): 47-50.

[24] 程宏伟. 大型风电主轴铸造工艺探讨[A]. 2014 重庆市铸造年会[C]. 重庆：重庆铸造协会，2014. 112-114.
CHENG H W. Exploration of casting process for large wind power spindle[A]. Proceedings of Chongqing Casting Annual Conference [C]. Chongqing: Chongqing Foundry Association, 2014. 112-114.

(责任编辑：杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net