浅谈风力发电铸件的铸造工艺

曾小弟

（江苏翔盟铸造有限公司，江苏 徐州 221138）

摘要：本文讲述了风力发电的轮毂在铸造方面容易造成石墨畸变、球数减少、组织粗大、石墨飘浮、化学成分偏析、缩松等问题。通过从造型、熔炼浇注工艺等方面来解决这些问题。保证了风力发电的轮毂、底座的铸造质量。

关键词：轮毂；低温冲击值；球状石墨数；铁素体；石墨畸变

风力发电设备的底座、装置叶片的轮毂、齿轮箱、机械台架等都是铸造件。1-2MW 的机组需 15-35 吨铸件。风力发电设备的铸件都是要求很高的铁素体球墨铸铁件，其材质在欧洲都是用 EN-GJS-400-18U-LT，DINEN 1563 或比其更高规格的球墨铸铁，应有良好的抗拉强度、伸长率和刚度，而且还要求在零下 20℃的夏氏 V 形切口的冲击韧度平均为 10J。风电设备铸件要具有在低温下的高冲击强度，而且随着风力发电设备大型化的发展，要求愈来愈高，需要厚 300mm 以上，形状更为复杂的大型铸件等。制造应用于风力发电设备的铸件是很困难的，要全面控制化学成分、显微组织、力学性能，为此，硅和磷要调整到很低，合金元素含量要低，而球化率要高。其构成的部件必须经过严格的超声波探伤、磁粉探伤和着色渗透探伤。装置叶片的轮毂要在开螺纹孔时从铸件本体取出试样检验，若查出有不符合规定的球状石墨的问题，这个轮毂即为不良品。因此在生产过程中要认真进行控制。要制造符合要求的合格的风力发电设备的铸件绝不是轻而易举的，要真正了解其要求、掌握生产技术，严格控制生产工艺过程。

风电球铁件在生产时，由于断面过厚，冷却速度缓慢，因而凝固时间过长，在铸件厚壁中心或热节处容易造成石墨畸变、球数减少、组织粗大、石墨飘浮和化学成分偏析等问题。因而导致铸件的机械性能下降，尤其是韧性更为明显，给大断面铸件的铸造带来一定困难。因此笔者依据中国特有的实际状况浅析风电铸件的造型工艺，熔炼与球化工艺。

1 风力发电球铁件的材质标准

风力发电球铁件的材质欧洲标准 EN-GJS-400-18LT，抗拉强度≥400MPa，屈服强度≥240MPa，延伸率≥18%，低温冲击值-20℃，三个试样平均值 12 J/cm^2，个别值允许 9 J/cm^2，铸件重量一般在 10 吨以上，壁厚大约在 100-180mm 渐变，金相基体组织要求： 球化率应在 90%以上，球状石墨数应大于 100 个/mm^2，100%的铁素体，生产中选择高纯的原材料是非常必要的，原材料中的 Si、Mn、S、P 含量要少（Si<1.0%, Mn<0.2% S<0.02%, P<0.025%），对 Cu、Cr、Mo、Ti、Sn、V、W 等一些合金元素要严格控制含量。钛对球化影响很大应加以控制，钛高是我国生铁的特点，解决的方法是在炉料中配入一定比例的 QIT 生铁，来稀释铁水的钛含量，同时也稀释所有促进碳化物的正偏析元素。

对铸件所有部位要进行磁粉探伤和超声波探伤检查，缺陷不允许超过规定的标准等级。铸件外表、粗糙度、非金属夹杂、气孔等都不能超过规定值范围。

2 产品概况

目前我国生产风力发电的轮毂、底座的铸造厂有二十多家，但成品率在 95% 以上却没有几家。由于轮毂、底座断面过厚，冷却速度缓慢，因而凝固时间过长，在铸件法兰或热节处容易造成石墨畸变、球数减少、组织粗大、石墨飘浮、化学成分偏析、缩松等问题。笔者针对这些缺陷进行分析。

轮毂主要尺寸为 3175 ㎜、主要壁厚 150 ㎜，材料牌号 QT400-18L，毛重 12300 ㎏，出铁液重约 17500 ㎏。

3 主要技术要求

（1）力学性能要求：抗拉强度≥400MPa，屈服强度≥250MPa；室温伸长率≥18％；低温冲击韧度（-20℃）＞12J/cm^2，提供附铸试块作检测用。

（2）不允许有缩松、裂纹、夹渣、缺角等缺陷，用呋喃树脂砂型铸造。

（3）铸件应进行局部磁粉探伤、超声波探伤检查，在各对接孔的区域做 X 光探伤，并提供探伤报告。

（4）铸件尺寸及加工余量应按标准符合图纸尺寸要求，壁厚应均匀，不加工的壁厚公差为±5 ㎜。

4 对原材料的技术要求

原材料中的 Si、Mn、S、P 含量要少（Si<0.9%, Mn<0.3%，S<0.025%, P<0.04%），对 Cu、Cr、Mo、Ti、Sn、V、W 等一些合金元素要严格控制含量，钛控制在 0.04%以下。

（1）生铁：采用中国优质生铁。生铁化学成分微量元素控制总和≤0.10。

（2）废钢：采用碳素废钢。质量要求：（1）所有废钢不得混入污物。有色金属或任何类别的外来材料，不得有过量的铁锈和腐蚀。（2）P、S 含量均不大于 0.040％。Ni 的质量分数不大于 0.2％，Cr 的质量分数不大于 0.1％。Cu 的质量分数不大于 0.1％。

（3）球化剂：球化剂采用 52%龙钇钇基重稀土球化剂 DY-7B 和 48%埃肯 5800 低硅轻稀土的混合料。

（4）孕育剂：采用硅钡孕育剂，一次孕育粒度 20～30 ㎜（预先烘烤），随流孕育粒度 1～2 ㎜（预先烘烤）。孕育剂要求具有强烈的促进石墨化作用，并能维持时间较长，吸收率高而稳定，所以孕育分为炉前孕育和瞬时孕育，两者缺一不可。炉前使用含 Ba 的防衰退，长效孕育剂，浇注随流使用特殊成分的孕育剂，主要是表面活性元素的应用，其中应用于风力发电铸件时配入适量 Bi 元素，即改善断面中心部位的球化状况，使得球径小，球数多，并能提高铁素体含量，提高铸态性能。

5 主要工艺方案

5.1 造型工艺

（1）浇注系统

采用底注浇注系统，为了增加冲型速度，使型腔温差减少，我们采用二个直浇道。铁液平稳进入型腔；直浇道∅110 ㎜；横浇道厚度为 50 ㎜；内浇道为披风式厚度为 20 ㎜；顶部设瓶式冒口；冒口尺寸为∅350 ㎜×700 ㎜ 3 个。

（2）壁厚偏差和避免质量控制

采用呋喃树脂自硬砂和相应的醇基涂料，保证尺寸精度和表面质量；采用定位芯头，下芯时检查样板，以保证提高尺寸精度。

（3）为了保证型砂强度和发气量，外型和芯子在前一天做好，第二天配模。

5.2 熔炼及浇注工艺

（1）球化剂：Mg 使球墨圆整，对大断面球铁能减缓球化衰退，Mg 阻碍石墨析出，残 Mg 量高，增加收缩和脆性，Mg 易氧化，在铁水表面形成氧化膜，进入砂型易使铸件产生夹渣和皮下气孔。残 Mg 量应控制在保证球化的前提下越低越好，但考虑大件凝固时间长，应提高抗衰退能力，Mg 量应高些，使最终含 Mg 控制在 0.04～0.06%。

（2）稀土：RE 是通过抵消干扰元素的有害作用，而间接地起球化作用，但在厚大铸件中，RE 留量高容易造成碎块状石墨增多。为了提高抗衰退能力，所以采用混合球化剂，既可以保证起球化作用的 Mg 的含量，同时也可以保持较高的抗衰退能力。在球化处理时，为了提高镁的吸收率，控制反应速度及提高球化效果，采用特有的球化工艺。对球化处理的控制，主要是在反应速度上进行控制，控制球化反应时间在 1.5～2 分钟左右，RE 我们一般控制在 0.025%以下。

（3）为保证铁液质量，要求炉膛内洁净，无残留铁液。利用直读光谱仪、热分析仪进行炉前快速分析和炉后分析。

（4）根据化学成分和组织要求，采用国内优质生铁，碳素废钢，要求无泥砂和油污。采用高的过热温度，提高金属液的纯净度，即在出炉温度的基础上增加 300～400℃的过热。

（5）熔化工艺

用优质生铁启炉，熔清后加入碳素废钢，炉内铁液温度在（1460±10）℃时，停电、用去渣剂进行扒渣处理、并进行原铁水成分化验，检测 C、Si、P、S、Mn 含量。根据炉前分析结果来调整炉内原铁液化学成分。继续提温至 1520±5℃停电降温，再次取炉前试样，检测 C、Si、P、S、Mn 含量。当炉内温度降至 1440℃-1450℃出炉，冲入铁水包进行球化处理，要求原铁液化学成分：C 3.6%～3.75%；Si 0.8%～1.0%；Mn≤0.25%；P≤0.025%；S≤0.02%；铸件终成分控制： C 3.52～3.65 %，Si 1.9～2.00 %，Mn 0.15～0.20 %，S≤0.015 %，P≤0.03 %，Sb 0.008～0.010 %， 残余 Mg0.040～0.055 %，残余 RE≤0.025 %。

（6）球化孕育处理过程

球化采用堤坝冲入法，将 5～30mm 粒度的钇基重稀土球化剂 52%+轻稀土球化剂 48%放入用 20 吨的处理包底的一侧凹槽内，加入量 1.65 %，略加紧实，上面覆盖孕育剂总量的 0.4%，上面再加入覆盖剂。铁水冲入另一侧，当炉内温度降至 1440℃～1450℃出炉，冲入铁水进行球化处理，同时将粒度为 5～12mm 炉前孕育剂随铁水流入冲入铁水包（或在包内另一侧）加入量 0.3%，进行铁水孕育，反应时间应在 1.5 分钟左右，待反应将结束后扒渣 2～3 次。

（7）浇注工艺

厚大断面铸件的特点是低温处理、低温浇注， Ca 元素可以比常规产品较低，在电炉熔炼的条件下，可控制在 1.5%以下，以适当地脱氧、脱硫，Ca 的溶解性差，很容易形成夹渣等铸造缺陷。因此，必须有针对性的充分考虑，一方面延缓球化衰退，另一方面促进异质形核。

在铸件浇口上设置专用 18 吨定量包，为加强孕育在定量包内预埋 4 块 150×100×50 ㎜的定制孕育块（或者在定量包底内加入孕育剂总量的 0.2%），浇注温度 1310-1320℃（定量包内拔塞拔出温度），一边浇注，一边将粒度为 1～3mm 瞬时孕育剂通过特制的漏斗随流加入，加入量 0.1%，依据浇注时间控制瞬时孕育剂的加入速度。为进一步保证铸件质量，工艺规定浇注时要有一定的多余铁水从冒口溢流出去。然后在冒口表面覆盖保温剂。浇注结束后在 150～160 小时，即铸件温度约 250℃以下开箱。

5.3 清理

清除浇冒口、分型面及芯头披缝，同时打磨。铸件表面粗糙度要达到 Ra12.5～25。

清理工序清理后的铸件，经检查员检查合格，按规定的颜色涂上合格标记，产品库负责对入库铸件的检验标记进行检查，无标记或标记不清的铸件应拒绝入库。

6 风力发电用球墨铸铁主要研究

6.1 铸造过程数值模拟

球铁由于其糊状凝固的特征决定所生产的铸铁由于补缩不良产生缩孔、缩松等缺陷，为了能在铸件生产之前预测这些缺陷情况，开展了铸造过程数值模拟。铸造过程数值模拟是使用数值模拟技术，在计算机虚拟的环境下模拟实际铸件形成过程，包括金属液体的充型过程、冷却凝固过程、应力形成过程、判断成型过程中主要因素的影响程度，预测组织、性能和可能出现的缺陷，为优化工艺减少废品提供依据。

6.2 低温冲击性能

风力发电机铸件要求要求铸件在低温-20℃和-40℃环境下有较好的冲击性能。在我国由于原材料纯度上与发达国家有很大的差异，球化干挠元素和碳化物形成元素含量高，难以达到金相组织要求。采用进口生铁，成本很高，由于运输原因，也难保证供货。所以，采用国产材料、研究适合国内生产条件的工艺技术，是我们无法避开的课题。国内也只有少数几家在做这方面的研究。

6.3 无损检测技术

对于球墨铸件的内部缺陷，常用的无损检测方法是射线检测和超声检测。其中射线检测效果最好,能够得到反映内部缺陷种类、形状、大小和分布情况的直观图像，但对于厚大型的铸件，超声检测是很有效的，可以比较精确地测出内部缺陷的位置、当量大小和分布情况。

超声检测技术不仅可用于球墨铸铁内部缺陷的检测，也可用于球墨铸铁球化质量的评定，球墨铸铁的力学性能与石墨球化率相关，球化率越高，机械性能越好，而且声波传播速度也越高,通过测定超声波传播速度，就可以判别铸件的球化级别。达到无损快速的目的。

7 生产过程中的分析与总结

（1）应选用纯净度高的炉料，铁液中杂质越少越好。

（2）铁水成分方面：生产风力发电铸件时，控制要点是低 CE、低 Mn、S、P 以及尽可能低的 Cu、Cr、Mo、Ti、Sn、V 等，残余 Mg 要高、残余 RE 要低。

（3）球化处理方面：低温处理、低温浇注、多次孕育、瞬时孕育是关键。

（4）采用混合球化剂、比使用单一的轻稀土球化剂以及常规孕育如硅铁，球化率、石墨数量提高，尤其是中心部位的石墨畸变几率大大减少，组织相对致密，铸件综合机械性能相应提高。

（5）球化处理时，球化沸腾反应持续多长时间为好？ 球化处理时，球化反应非常剧烈，除了强烈闪光外还有铁液沸腾喷溅。这时，除了球化剂的氧化烧损外，在铁液内部进行着强烈的脱氧脱硫反应。铁液中的硫和氧，除了以微量元素的高熔点化合物质点形式存在而起有力作用之外，大部分多余的硫，氧含量在铁液中以溶解的状态存在，它们是使石墨不能成球的主要因素，封住石墨螺旋位错的生长台阶，阻碍晶向的生长，通过层叠错位造成旋转孪晶，促使石墨沿孪晶的不灭台阶侧向分枝生长成片状。因此，铁液的充分脱氧后的充分脱硫是保证石墨良好球化的先决条件，通常沸腾反应持续 1～2 分钟。如果反应过快，从一出铁就开始沸腾，而且持续时间不足半分钟，则可以肯定会导致球化不良。为此，在生产中要注意反

应持续时间，此段时间不可太短。

8 结束语

由于风力发电机工作环境的特殊性（高空，部分时间工作于低温下），因此维修非常困难，并且代价非常高，因此对铸件内在质量及机械性能要求极为严格。解析铸造生产全过程，其核心环节是熔炼合格的铁水，注到合格的铸型中成形，合格的铸型主要保证铸件的形状和尺寸精度。合格的铁水内在质量，是保证铸件的使用性能，保证使用寿命，使用的可靠性。故铁水的熔炼质量是铸造生产过程中的关键环节。

目前我国铸件产量很大，但其铸件在国际上的竞争能力还有待加强。现在我们不是喊口号，空谈什么“达到国际先进水平”。不少企业挂出了“研究开发中心” “某某大学试验基地”等的牌子，实际上连企业的基础铸造技术工作都不做，这种徒有虚名的情况应尽快改变。