3MW风电行星架铸造工艺

哈尔滨电机厂有限责任公司 （黑龙江 150040） 李祖良 刘忠仁 李 鹏 冯秀民

【摘要】3MW大行星架具有尺寸大，结构复杂，力学性能要求高等特点，铸造过程容易出现缩松、砂眼、裂纹等铸造缺陷，其制造难度很大，同行业在试制过程中废品率很高。利用计算机仿真模拟软件进行模拟，预知缺陷的位置，从而优化铸造工艺。实际产品与计算机模拟基本一致，而且质量满足图样要求，为3MW大行星架的铸造工艺提供了参考。

风力发电作为绿色清洁的高新技术，近年来发展迅速。行星架为主要的风电配套产品，为主要支撑构件。我们前期已经对1.5MW行星架作了初步的工艺研究，而3MW大行星架与1.5MW相比尺寸更大，结构复杂，力学性能要求比较高，并且为大批量产品，铸造过程容易出现缩松、砂眼、裂纹等铸造缺陷，制造难度很大，同行业在试制过程中，废品率很高。

该产品如果研发成功，大批量投入生产后，由于吨位大，数量多，可为我公司创造巨大的经济效益和社会效益。

3MW行星架铸件的生产在我公司尚属首次，因此掌握该产品的铸造工艺，是今后开发风电市场的关键。

1. 产品简介

行星架工作环境恶劣，长期承受较大应力，强度要求高，其材质为G18NiMoCr3-6，抗拉强度＞950MPa，屈服强度＞700MPa，伸长率≥12%，20℃时A_K≥40J，－40℃时A_K≥27J。

铸件需经磁粉和超声波检测，其中磁粉检测按DIN EN 1369标准2级执行，超声波检测按JB/T5000.14—1998标准2级执行。

零件重量5500kg，铸件重量8000kg，结构如图1所示。

图1 行星架三维实体

2. 技术难度

3MW行星架与1.5MW行星架相比结构更加复杂，内部和表面质量要求高，极易产生裂纹、缩松、砂眼等铸造缺陷，铸造难度大；热节大且分散，结构不利于补缩，各个热节之间的补缩通道不畅通，很难获得组织致密的产品；尺寸精度要求高，表面质量要求特殊；结构上小下大，型腔内的气体、夹渣、浮砂不易上浮，从而易在铸件内部形成缺陷；高强度结构钢对有害元素P、S和钢中N_2、H_2、O_2等气体含量十分敏感，熔炼难度高。

3. 工艺措施

铸造工艺如图2所示。

（1）冒口设计 这是铸造工艺设计的核心，只有合理的冒口设计才能有效地防止铸件内部产生缩孔、缩松缺陷，确保产品的致密度，同时兼有排气

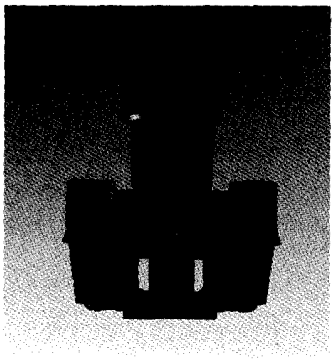


图2 行星架工艺

和集渣作用，防止产生砂眼、气孔、夹渣等缺陷。如果铸件同时存在多个热节，必须在每个热节上放置足够大的冒口，或采用冒口补贴在热节间建立具有一定温度梯度的补缩通道，或采用内外冷铁来降低热节的模数。

由于该行星架存在3处孤立的热节，分别是上部轴段热节、中部5个立柱热节，以及下部法兰L形热节。经计算，该铸件顶部热节尺寸为ϕ281mm，中间热节圆尺寸为ϕ220mm，末端热节圆尺寸为ϕ110mm。由于热节之间通道尺寸远小于热节圆尺寸，因此依靠外冷铁已无法使热节处的模数降低来达到顺序凝固的要求，而对于检测要求较高的铸件，不允许放置内冷铁，因此只能在热节处放置模数合理的冒口，或在热节间建立具有一定温度梯度的补缩通道，以实现铸件内部的顺序凝固。

通过计算顶部冒口，决定采用环状圆形保温明冒口，确保上部重点部位的致密度，同时保证钢液内部的夹杂物顺利上浮至冒口。中部5个立柱采用ϕ450mm福士科发热暗冒口，并在立柱上设计宽度300mm并带有一定补缩角度的补缩通道，实现铸件内部的顺序凝固。下部法兰L形热节在1.5MW行星架的工艺中是利用暗冒口实现补缩，但在实际生产中存在着补缩效率不稳定、冒口不易切割等问题，经过计算，在此铸件的工艺思想中，利用设计合理的补缩通道与冷铁相结合，在铸件本体建立通畅的补缩通道，并降低热节处的凝固模数，从而形成合理的温度梯度。

（2）浇注系统设计 根据铸件特点，如果单纯采用底返式内浇道，钢液直接冲击外皮的砂型，局部砂型会被破坏甚至脱落，严重影响铸件质量。实际工艺设计中采用了阶梯式浇注系统，下层内浇道使用阶梯底返式浇注系统，即保证钢液充型平稳，又保证型腔的排渣、排气作用，上层内浇道对冒口进行补浇，调整冒口温度，提高冒口补缩效率，保证铸件组织致密。浇注温度控制在1540～1550℃，低温快速，浇注前在型腔内充填氩气。

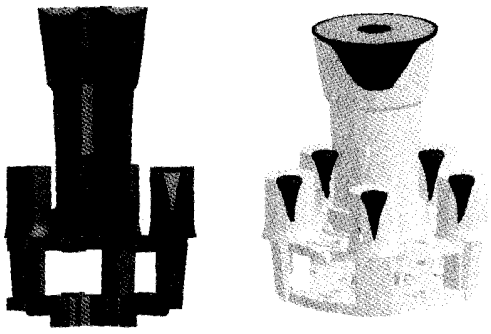
（3）造型工艺设计 为提高砂型的强度，降低表面粗糙度值，保证尺寸精度，模样结构外皮采用整体实样，1#芯盒为定位整体式，2#芯盒为对开式。由于该产品极易产生气孔缺陷，并且砂芯都被高温钢液包裹在型腔里，所以排气就显得特别重要，直接影响产品质量，为此我们确定了专用的排气通道，设计5个主排气通道，并与暗冒口和砂芯的排气道相连。

（4）型砂工艺 外皮面砂采用酯硬化铬铁矿砂，厚度20～30mm，背砂采用酯硬化石英砂，厚度100～120mm，填充砂采用水玻璃石灰石砂；1#芯砂面砂采用酯硬化铬铁矿砂，厚度20～30mm，其余采用水玻璃石灰石砂；为避免2#芯砂产生烧结，采用高温强度和溃散性较好的碱性酚醛树脂铬铁矿砂。另外，为提高型砂的退让性和溃散性，避免铸件收缩过程中应力较大而产生裂纹，在砂芯中间填充干砂块。

由于上轴段内圆尺寸较小，不易除砂，工艺在2#砂芯的制作中采用薄壁钢管做成钢管芯。

（5）计算机数值模拟技术的应用 为了验证工艺设计的准确性，结合计算机数值模拟进行分析，并根据模拟结果和工艺人员的经验优化工艺。

模拟结果如图3所示。



(a) (b)

图3 铸造工艺数值模拟结果

4. 生产过程控制

行星架用所有模样按一级模样及一级尺寸精度

生产。造型过程严格按作业指导书生产，并且工艺员现场进行技术指导。所有芯骨及砂芯内部均按排气布置图（见图4）放置排气绳，以提高砂芯的排气性。

图4 芯骨、排气设计

合箱时要有尺寸记录，并对关键尺寸严格控制。砂型、砂芯合箱前用煤气烘烤，合箱后用热风机烘烤，直到浇注前停止，保证型腔干燥。为保证钢液纯净度，使用精炼包精炼，控制残留 w_{Al}= 0.03%～0.06%，控制钢液中气体含量（体积分数）要求：$\varphi_{H_2}<3\times10^{-6}$、$\varphi_{O_2}<5\times10^{-5}$、$\varphi_{N_2}<15\times10^{-5}$。

为防止裂纹缺陷产生， 浇注完毕后，原地保温3天后方可移箱，打箱时间为9～10天。打完箱清砂后进行热处理完全退火，温度在150～200 ℃之间切割冒口，然后马上装炉进行低温去应力退火。

5. 结语

我公司采用上述工艺措施现已成功地浇注了两件产品，尺寸精度和内部质量均满足图样技术要求，无损检测结果也符合技术要求。

（1）实际生产验证了该工艺方案的可行性，设计合理，符合批量生产的要求，能够满足产品技术要求，保证产品质量。

（2）钢管砂芯在特定的结构下能有效地解决清砂困难的问题，大幅提高了表面质量和生产效率。

（3）由于产品生产难度大，附加值高，因此为我公司进军风电铸件及整机市场打下了坚实的基础。**MW** （20120226）

（上接第53页）

镁合金在汽车上典型应用的压铸件是：传动系统的齿轮箱、离合器、变速器的外壳；发动机系统的气缸盖、气缸体、油泵外壳、阀盖、轮盖、进气歧管及油盆；车体系统的仪表板、座椅架、移动式车顶架、车门、车顶板、加油桶盖、车灯外壳、车身骨架；底盘系统的转向架、锁架外壳、转向盘、轮圈、制动器及离合器踏板托架等。在航空上的应用如：砂型铸造的大型铸件飞机发动机支架、框骨架、门骨架、支座，金属型铸造的轮毂、壳体等。在3C产品上的应用如嘉瑞集团生产的笔记本电脑外壳，采用添加稀土镁合金压铸，平均壁厚0.8mm，重量仅150g。

五、钛合金铸件

采用钛合金铸件，可以大幅减轻飞行器重量，提高飞行器飞行能力和运载能力。由于钛合金的高化学活性能，要与常用的耐火材料发生化学反应，其铸造加工难度大，需借助高科技手段来实现，世界上几个工业发达国家从20世纪60年代开始研究钛和钛合金的铸造技术。一开始钛合金铸造工艺是采用机加工石墨型，生产成本高，生产周期长，后研究了捣实石墨型。以往生产钛铸件的单位90%以上其熔炼与铸造设备都采用真空自耗电极电弧凝壳加离心铸造。80年代初，我国从德国（当时西德）引进了钛合金熔模精铸技术，经过几年研究与创新，自行发展了几种新的钛合金熔模精铸氧化物陶瓷型壳系统，生产了宇航用的各种大、中、小型钛合金精铸件和高尔夫球头。近年来，随着钛合金精铸“高尔夫球头热”的出现，大幅促进了我国钛合金精铸行业的发展。

目前，我国钛合金叶片铸造技术，已突破世界难题，使制造成本大幅度下降，利用该项技术与英国公司合作生产的飞机发动机钛合金叶片，将应用于下一代空客飞机A350。

六、结语

随着科学技术和国民经济的发展，各行各业都对铸造生产提出新的更高要求，如高质量、轻量化、节能环保、绿色生产、少切削与无切削，以及节约原材料，降低成本等，这都对有色合金铸造，针对不同产品零件要求，采取不同的铸造方法，带来了有利的发展空间。**MW** （20111216）