

# 大型曲轴的铸造工艺

海太铸造有限公司 (江苏海安 226652) 李光国

**【摘要】** 使用华铸模拟软件,对曲轴铸造的凝固过程进行了数值模拟,对比分析了原工艺产生缺陷的部位和原因。在此基础上,优化了铸造工艺。模拟分析显示,新工艺实现了曲轴的顺序凝固,消除了缩孔、缩松。生产实践表明,新工艺生产的曲轴内部组织致密,满足其技术要求。

曲轴是油田设备的关键部件,结构如图1所示,材质 ZG35CrMo,几何尺寸  $\phi 1220\text{mm} \times 1755\text{mm}$ ,重约 4100kg。工作时由其带动周围 7 个部件转动,工作载荷大,其铸造质量直接关系到整个设备的安全运行,不允许出现缩孔、缩松、裂纹和气孔等缺陷。超声波探伤检查,达到 GB7233—1987 标准的二级要求,生产批量较大。



图1 曲轴结构示意图

从结构看,铸件形状很复杂,存在较大的生产困难。要实现良好的顺序凝固,必须有顺畅的补缩通道,由于结构的特殊性,利用铸件自身结构作补缩通道,底部产生了较大的缩孔、缩松区域。通过数值模拟分析,采用随形网状内冷铁的措施,较好地解决了这一问题,既保证了产品质量,又创造了较好的经济效益。

## 一、浇注系统的设计

根据铸件的结构特点和技术要求,采用中间分型,分型面设在铸件中部,局部不能起模的部位做活块。采用两层式浇道,从铸件一侧方向引入钢液,使钢液充入型腔后平稳上升,利于渣、气的上浮。

采用完全开放式浇注系统,漏包浇注,包孔直径 55mm,直浇道直径 80mm,横浇道直径 80mm 共两道,

内浇道直径 60mm 共 4 道,如图 2 所示。

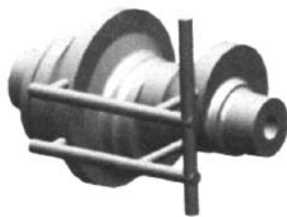


图2 浇注系统示意图

$\Sigma A_{包} : \Sigma A_{直} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{内} = 1.0 : 2.1 : 4.2 : 4.8$ ,从比例数据看,直浇道和横浇道的比例差较大,这是为了防止底部横浇道压力大,使上部浇道进入钢液,形成溢流,造成上部钢液从高处落入砂型,冲击砂型,或者引起钢液飞溅,形成夹铁豆缺陷。

采用包孔直径为 55mm 的漏包浇注,平均浇注速度为 72kg/s,充满型腔用时间为 57s。钢液在型腔中的上升速度为 21mm/s,满足要求。

## 二、补缩系统设计

### 1. 冒口设计

此铸件中间是空腔,而且形状不规则,砂芯形状如图 3 所示。

从铸件结构看,分为两个部分,直径较大的部位因位置高、体积大,必须考虑设置冒口。直径较小的部位结构厚实,模数大,也要考虑设置冒口进行补缩。因此初步设计冒口方案如图 4 所示。

用热节圆法对铸件进行分析,将铸件纵向剖开,如



图3 砂芯示意



图4 冒口方案示意

图5所示。中间砂芯部分热量散失慢，内侧的凝固速度要比外侧的小，实际上是增大了铸件的截面厚度，延长了铸件的凝固时间，在计算时应将此处的厚度增大。此处砂芯的平均直径是240mm，铸件的平均壁厚是128mm，经查有关资料，铸件壁厚增大1.1倍。据此作出左侧实际热节  $D_0 = 240\text{mm}$ ，计算热节  $d = D_0 \times 1.1 = 264\text{mm}$ 。右侧实际热节  $D_0 = 202\text{mm}$ ，计算热节  $d = D_0 \times 1.1 = 222\text{mm}$ ，同时从图5右侧的剖面分析，此处需要增加补贴来增大补缩通道。用滚圆法作图得出， $d_1 = d \times 1.1 = 244\text{mm}$ ， $d_2 = d_1 \times 1.1 = 269\text{mm}$ 。

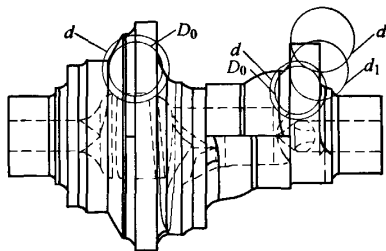


图5 剖面示意

根据以上分析，设计左侧冒口用腰圆形，尺寸为  $500\text{mm} \times 750\text{mm} \times 500\text{mm}$ 。右侧冒口用圆柱形，尺寸为  $\phi 400\text{mm} \times 900\text{mm}$ 。为了减少大冒口的接触热节，并且利于大冒口的切割，左侧冒口根部用腰圆  $350\text{mm} \times 525\text{mm} \times 100\text{mm}$  的冒口台，上部再接大冒口，杜绝根部产生缩松的隐患。

采用华铸 CAE 铸造模拟软件验证设计效果，模拟

时设定两个剖分面不散热，剖分网格 310 万，浇注温度  $1580^\circ\text{C}$ ，水玻璃砂造型。

通过模拟显示，钢液从铸件底部、中部开始凝固，在两个冒口区域逐渐顺序凝固到冒口内，冒口的尺寸和高度是合适的。但是，在大圆盘底部，由于补缩距离过长，凝固后期出现了钢液孤岛，最终形成了缩松、缩孔缺陷，如图6所示。

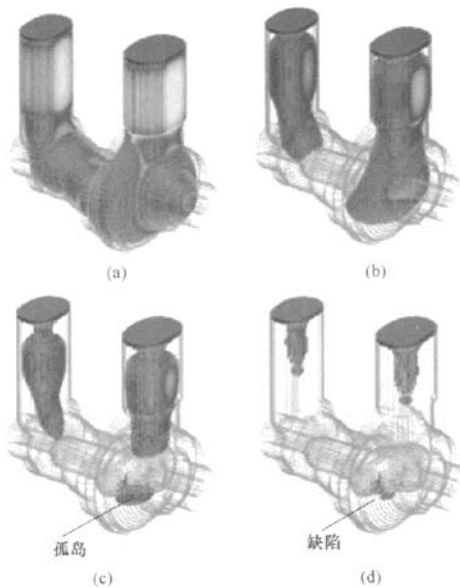


图6 凝固模拟截图

要解决这一问题，可以延长此处冒口长度方向的尺寸，增大冒口与铸件的接触区域，缩短补缩距离。但是，因铸件的形状不规则，增大冒口尺寸必然会增加切割难度，出现缺肉及加工量大等问题。

## 2. 冷铁设计

经过讨论，考虑采用冷铁激冷措施延长补缩距离。此件要求超声波二级探伤，内部质量要求很严格，通常考虑使用外冷铁，但是因铸件的形状很不规则，外冷铁不容易施放。

采用内冷铁可以解决这些难题，并且当内冷铁与铸件本体熔成一体时，在不引起铸造缺陷的前提下，它不但降低铸件的物理和力学性能，反而可提高铸件的质量，因为内冷铁的强烈激冷作用，可显著细化铸件晶粒，提高铸件的致密度。但是，怎样使内冷铁与铸件完全熔合是一大问题，这就给内冷铁的设计增加了难度，

内冷铁的材质、截面、重量、洁净程度等要完全达到要求，才能既完全熔合，又起到良好的激冷作用。

(1) 材质选取 以往铸件内冷铁的材质用普碳钢轧材，而曲轴铸件材质为 ZG35CrMo，为了不降低铸件的力学性能，因此内冷铁选用  $w_c < 0.35\%$  的铬钼钢材。

(2) 截面选取 内冷铁截面的选取非常重要，太粗不能熔合，太细完全熔化起不到激冷作用。众所周知，使用内冷铁的目的是减小使用部位的模数，通过详细计算，产生钢液孤岛处的模数  $M_0 = 3.2\text{cm}$ ，其上部铸件的模数  $M_1 = 2.0\text{cm}$ ，则需要减小模数  $M_i = M_0 - M_1 = 3.2 - 2.0 = 1.2\text{cm}$ 。实际生产中浇注温度一般在  $1580^\circ\text{C}$  左右，内冷铁截面使用圆形，经查有关资料中的列线图（如图 7 所示），得出最佳的圆形内冷铁直径是  $16\text{mm}$ 。

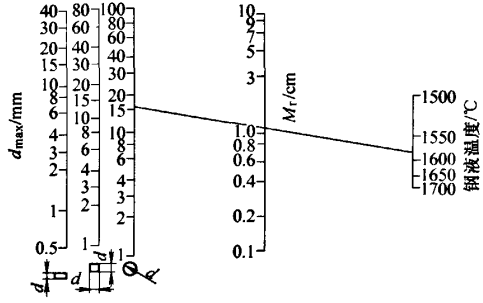


图 7 内冷铁截面列线图

(3) 重量选取 内冷铁的重量也是设计的关键因素。如果过重，则吸收的热量多，钢液的热量不能加热内冷铁到熔化的温度，就会出现熔合不良，不能通过超声波探伤检验。如果过轻，则内冷铁完全熔化，不能达到足够的激冷效果，还会出现缩孔、缩松缺陷。

查有关资料，内冷铁的重量与产生钢液孤岛处的模数  $M_0$  及需要减小的模数  $M_i$  有关，依据  $M_0 = 3.2\text{cm}$ ， $M_i = 1.2\text{cm}$ ，查内冷铁重量列线图（如图 8 所示），得出内冷铁的单位体积重量系数为  $0.52\text{kg}/\text{dm}^3$ ，乘以缺陷部分的体积后，确定内冷铁的最佳重量是  $37\text{kg}$ 。

根据以上计算结果，设计制作的内冷铁如图 9 所示。

(4) 洁净度处理 内冷铁的表面清理也很重要，如果表面带有锈蚀、焊渣等杂质，很容易造成熔合不良，而导致缺陷产生。内冷铁制作完成后，需进行抛丸处理，打出金属光泽。砂型放置内冷铁后要及及时浇注，防止内冷铁表面凝结水汽而产生铸件气孔。

内冷铁的工艺设计完成后，再用华铸 CAE 铸造模

拟软件验证效果，如图 10 所示。

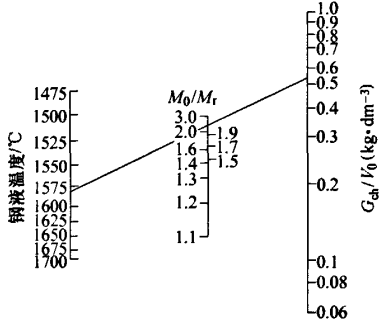


图 8 内冷铁重量列线图

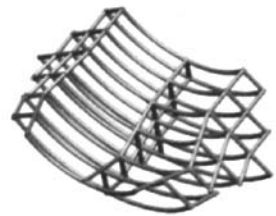


图 9 内冷铁示意

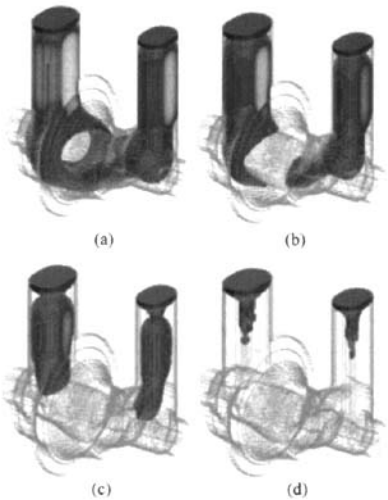


图 10 凝固模拟截图

从图 10 的几个阶段可以看出，钢液顺序凝固到冒口内结束，没有在大圆盘底部产生钢液孤岛，使用内冷铁的部位也没有出现激冷过量而提前凝固截断补缩通道的现象，这说明内冷铁的设计是合适的。

### 三、铸件生产情况

由于此件成本高、批量大，为了进一步验证工艺

（下转第 72 页）

在铸造生产的实际工作中，对设备的定期维护一定要结合生产的计划安排合理调节，既要做到设备维护，又不影响生产。

### 三、建立设备的目标管理体系

铸造企业设备所涉及的种类较多，在生产运转中的磨损也是比较大的。作为企业管理层的设备管理人员应建立设备的目标管理体系。就是在企业为之努力奋斗的总目标下，根据组织机构的层次，将总目标逐级分解，下级的奋斗目标是上级目标待实现的保证。这样各级都能明确自己在为实现总目标而努力工作的职责范围。目标管理包括：目标的制定、分解，目标实现的时间、规划和措施，以及目标管理的检查评估等内容。

企业对设备维护的目标在于确保设备系统在生产过程中正常发挥它的基本功能。但是由于设计、制造、安装和使用中的各种原因，导致某些设备发生故障，暂时丧失了它们的基本功能，关键设备的故障对整个生产系统的影响会比较大，于是我们根据设备发生故障后对企业设备系统功能影响程度的大小，将设备分为一般设备和关键设备。

铸造生产系统中熔炼设备、造型设备是生产的核心设备，必然就是关键设备；像车床、清理所用的砂轮机，即使发生故障，也不要影响生产的正常运转，故而就可以定为一般设备。目标管理就要将这些设备系统的功能状况作为设备维护的总的技术目标，日常的设备维护工作就是去实现所制定的目标。

### 四、设备功能检查

建立设备的目标管理体系后，就需要对设备功能进行检查，掌握设备的技术状态，以判断是否达到设备管理的目标。通过功能检查，可以按检查方式的不同分为以下几类：

- (1) 按检查周期可分为随机检查和定期检查。
- (2) 按检查项目可分为性能检查和精度检查。
- (3) 按检查方法可分为停机静态检查和不停机动态检查。
- (4) 按检查手段可分为一般检查和设备诊断仪器检查。

设备操作人员与设备的接触最多，能够直接感知设备功能的状况。对设备检查的第一步也是由操作人员进行的，作为操作人员应该负有高度的责任心，在设备的

日常运转中，要经常性的进行检查，以能够及时掌握各种状况信息。每一个班组或工段负责人也要随时对设备进行检查，同时也能对设备操作人员起到监督和促进的作用。设备维修人员要根据生产情况，以及设备的使用频率定期或不定期对设备进行检查，必要时使用设备诊断仪器。每一次检查都要做好详细的记录，以便管理人员进行检查、掌握数据和做出判断。

日常点检主要包括设备的下列部位：直接与产品质量有关的部位；设备的保险、保护装置；设备的调整控制部位；容易磨损的零部件；容易堵塞、卡死和腐蚀的部位；在运行中应力状况易损的零部件；设备功能状况的指示装置；经常出现不正常现象的部位等。

熔炼设备系统是功能检查的重点，一方面是因为熔炼设备系统在生产运转中负荷较高，发生故障的频率也较高；另一方面是因为熔炼设备系统存在的危险系数较大。作为整个铸造设备系统的核心，熔炼设备操作人员必须相当熟练地掌握操作技术，同时要具备高度的责任心，这样才能够保证设备的正常运转和生产的顺利进行。MW (20100320)

(上接第 69 页)

合理性，试生产一件。从生产过程看，造型、合箱、气割及修整等工序都较容易操作。经过超声波探伤和磁粉探伤检验，都达到了要求，铸件表面光洁，内部组织致密，这说明铸造工艺是合理的。

随后进行了批量生产，铸件实物质量情况如图 11 所示。



图 11 曲轴成品

### 四、结语

在此件的设计生产中，采用传统的铸造工艺和计算机模拟的手段，较好地解决了生产难题，既没有造成产品缺陷，也没有过多的增加生产成本，实现了质量、效益的双赢。MW (20100208)