

船用铸钢件 12 万吨挂舵臂的 铸造工艺设计及生产

司东旭

(石钢京诚装备技术有限公司, 辽宁营口 115005)

摘要: 挂舵臂铸钢件毛坯重 57.5t, 本工艺采用地坑组芯造型, 计算机放样制作模型, 多种砂复合制作砂芯, 合理设置浇注系统、冷铁、冒口等方案生产出的铸件组织致密, 性能优良, 符合 LR 标准的要求。铸件工艺收得率为 60%。

关键词: 挂舵臂铸件; 工艺方案; 砂芯设计; 冒口; 浇注系统; 收得率

1 铸件的技术要求

1.1 大型船舶挂舵臂铸钢件的概况

挂舵臂是大型船舶的重要部件之一, 是支撑、吊挂舵结构的关键件, 受到海水的冲击, 承受较大的变载荷作用, 这就要求其不仅要外观质量好、尺寸精度高, 同时内在质量也必须保证, 要具有较佳的综合力学性能, 尤其是抗疲劳性能; 挂舵臂的性能和质量在船舶的使用过程中起到非常重要的作用, 其质量的好坏直接关系到整艘船舶下水点和建造质量。挂舵臂铸钢件大都为小批量生产, 铸件重量大 (单件重 80~157t), 耗用钢水多, 铸造工艺复杂, 铸件成形过程很难控制, 这就给传统铸造工艺的设计带来很大的困难。研究发现, 只要挂舵臂存在有微量的缩孔、缩松、裂纹、夹杂等缺陷, 都可能给船舶的运行带来巨大的危险。

挂舵臂铸坯最大外形轮廓尺寸为 7000mm×4400mm×1500mm, 单重约 50t, 铸件毛重 57.5t, 浇冒口重 38.5t, 钢水总重 96t。材质: ZG20Mn。

1.2 技术要求

(1) 本铸钢件材料、材料试验和检验应满足[LR]规范要求, [LR]负责监造、检验、并出据船检证书。

(2) 铸钢件材料采用精炼镇静钢。铸钢件热处理、取样、做力学性能试验按[LR]规范要求。铸钢件的轮廓线尺寸由放样决定。

轴孔及端面按图纸要求进行加工。

(3) 铸钢件化学成分满足要求: $w(\%)$ 为: C: $\leq 0.23\%$ 、Si $\leq 0.60\%$ 、Mn: $0.7\% \sim 1.60\%$ 、S $\leq 0.035\%$ 、P $\leq 0.035\%$ 、Al: $0.015\% \sim 0.080\%$ 。

允许的其它残余元素: Cu $\leq 0.30\%$ 、Gr $\leq 0.30\%$ 、Ni $\leq 0.40\%$ 、Mo $\leq 0.15\%$, (残余元素总含量 $\leq 0.85\%$)。

(4) 铸钢件力学性能应符合: 抗拉强度: $R_m \geq 400 \text{ N/mm}^2$, 屈服强度: $R_{eh} \geq 200 \text{ N/mm}^2$, 伸长率: $A_{50} \geq 25\%$, 断面收缩率 $\geq 40\%$, 冲击功: $A_{KV} \geq 27 \text{ J}(^\circ\text{C})$ 。

(5) 无损探伤: ①超声波探伤建议: [JCSS II-1978]或[ASTM A609]标准, 报船级社确认。②磁粉探伤建议: [JIS G565 1982]或[ASTM E709]标准, 报船级社确认。

无损探伤要达到现场验船师的满意。

(6) 划线: 划出对称中心线并分段打连续三点样冲眼, 在轴孔处应以对称中心为基准划出轴孔十字线, 并打上样冲眼, 所有标记用白漆框住。

(7) 承制方提供文件: ①制造厂质量合格证书, 化学成分单, 力学性能实验, [UT]检测单, [MT]

作者简介: 司东旭, 助理工程师, E-mail: sidongxu163@126.com。

检测单, 船检标识及验船师标记, 熔炼炉号, 标识钢印拓印单等。②[LR]船检证明书。

- (8) 铸件表面应整洁, 不应有气孔、裂缝、缩孔、冷隔、结疤等缺陷。
- (9) 铸件内部不应有不利于使用的缺陷。
- (10) 其余技术要求可见[船用铸件技术要求]。
- (11) 数量为每船一件。

2 铸件结构及铸造特性分析

2.1 挂舵臂铸造时的复杂性

挂舵臂每个断面尺寸均不相同, 而且所有面均为曲面, 线条为流线型, 尺寸公差要求严格; 铸件高度大, 补缩较困难; 需用多炉、多包钢液合浇, 组织冶炼钢水难度大, 而且要实现连续浇注; 铸件生产过程中容易出现铸件壁厚不均、裂纹、变形、铸件粘砂、抬箱跑火等缺陷。为确保铸件尺寸精度, 提高表面质量, 防止缩孔缩松缺陷, 实现连续浇注, 防止抬箱是该铸件生产应解决的主要问题。

2.2 需要满足的铸造要求

- (1) 按通用操作规程打出砂床, 并用 300t 铁静压 24h。保证强度, 摆芯平面必须用水平测平, 保证各部位在同一水平面上。
- (2) 型芯面砂均用铬铁矿砂, 所有转角及冷铁间面砂厚度大于 100mm, 型芯必须撞制紧实均匀, 特别是撞角和刮板挂制部位, 各预埋点保证支撑强度, 支撑点与芯骨焊接连在一起。
- (3) 4#、5#、6# (见图 1) 芯注意排气, 造型时留出排气道。
- (4) 制芯时芯骨必须放置在合适位置, 起吊点要定准, 以防起吊时芯子偏斜。
- (5) 浇注系统按工艺要求位置、数量卧放。要保证内浇口与活件接触部位有圆角。
- (6) 除 4#、5#、芯外, 其余芯在撞制前必须要绑好拍子。立钩挂紧最好能垂直, 然后焊在芯骨上。
- (7) 为保证让硬顶子和支撑点强度, 必须与芯骨焊在一起, ▲标记为硬顶点, 硬顶直径 $\Phi 50\text{mm}$, 长度由模型提供数据。
- (8) 6#芯内除卧放芯骨外, 还要在上部放 2 根钢管 $\Phi 20\text{mm}$, 芯骨与钢管要焊在一起, 芯骨与钢管接触面要尽可能的大, 最好平直焊点多。
- (9) 冒口盖芯盖上后应压牢以防跑火。上部出气孔位置必须与冒口最高点一平。
- (10) 下芯时必须以中心线和坐标线为准, 并校正各部位尺寸, 皮厚不得偏斜, 下 6#芯时要验型, 以确定尺寸合理, 缝隙大的部分必须堵严。
- (11) 盖芯上部可套砂箱圈撞砂, 但压铁背点要预先设定好, 撞砂也要紧实, 合芯后长度方向两侧砂子必须撞实, 以防跑火。
- (12) 下芯时要严防砂子和其他杂物进入型腔, 合芯后必须保证型腔干净。
- (13) 单包浇注, 钢水量 96t, 包孔直径 $\Phi 110\text{mm} \times 2$, 钢水 VD 处理 P 小于 0.02%, S $\leq$ 0.015%, 浇注时双孔齐开, 一次浇满中间不许停留, 然后撒保温剂。厚度 $>200\text{mm}$ 。
- (14) 热割冒口, 割温 $\geq 250^\circ\text{C}$, 以测温为准, 冒口下增肉及补贴热处理后热割去除。
- (15) 本体试验料按位置、数量要求卧放。造型时必须保证其质量, 本体试验料切割时必须有船检师在场, 否则无效。
- (16) 接板线位置修整和表面打磨量按图纸和船级社要求执行, 接板口厚度只能大不能小, 划线必须以铸造毛坯全线为准。
- (17) 现场清砂, 切割冒口。

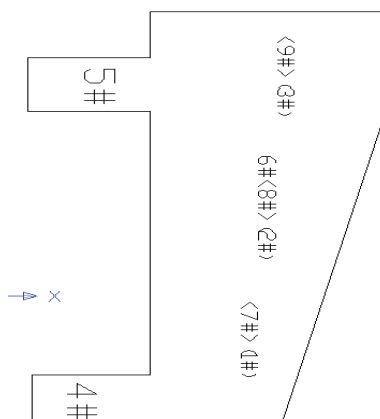


图1 挂舵臂组芯分布图

3 挂舵臂的工艺设计

3.1 造型方案确定

挂舵臂造型方式确定为组芯与多材质实体相结合，地坑与砂箱相结合的复合式造型方式。综合考虑压重设置和座包浇口的引出，盖箱选砂箱造型。

3.2 地坑准备

地坑排除干净坑内积水，以防漏钢后爆炸。造型前将地坑底部背砂用风吹或大钢锭模均匀冲压紧实，以保证铸型底部的强度，防钢水压力大砂型外胀，整个铸型下陷。同时，做好背砂层和其上部面砂层的排气，保证透气畅通。

3.3 型砂选择

为增强砂芯质量，选用水玻璃含量比平时高出 2% 左右的水玻璃石英砂制芯。为了便于清砂，形成挂舵臂筒体的 6# 芯子使用石英砂、铬矿砂两种复合制作。形成两孔的钢管件芯子填充石灰石砂。铸件拐角及厚大热节部位均使用铬铁矿砂防止粘砂，型腔表面刷锆英粉醇基涂料后烘干。

3.4 制芯

整个铸件主要有 1#—9#，九块砂芯。木模、芯盒均采用计算机放样来确定铸件各截面尺寸。其中挂舵臂铸件 6# 芯为 8~9m 长的管腔，采用一个大约长 9m，宽约 5m，高约 2m 的木模芯盒，图 2 所示为制芯过程。



(a) 6# 芯盒



(b) 内部冷铁



(c)砂芯面



(d)刷涂料

图2 制芯过程

3.5 组芯

依据图纸划线定出铸型底面轮廓和下层各芯尺寸轮廓，按组芯图组芯。下好底层芯子，测量控制好整体尺寸后，依据定位中心线定位两管件中心，保证两圆孔同心和圆孔端面有加工余量。为了防止浇注过程中中部6#砂芯浮动，上部芯撑采用钢柱直径 $\phi 50\text{mm}$ 制作专用硬顶柱，6#芯底部和上部的芯撑高度验芯后确定。

3.6 合箱

盖箱直接压在盖板芯上，盖箱对接处用面砂填实，在面砂中埋放几组耐火砖做支撑点，将造型用平台平面朝下压在两盖箱中部的砂台上，背箱时背住，防止从此处抬箱跑火。

4 浇注系统设计

对于大型铸钢件，一般应优先选用阶梯式浇注系统。阶梯式浇注系统金属液充型平稳，型腔内气体排出顺利。充型后，上部金属液温度高于下部，有利于顺序凝固和冒口的补缩。易避免缩孔、缩松、冷隔及浇不到等铸造缺陷。为保证钢液在型腔中平稳流动和顺利充型，挂舵臂采用阶梯式浇注系统（见图3），设双层的多内浇道，可大大减轻内浇道附近的局部过热现象。

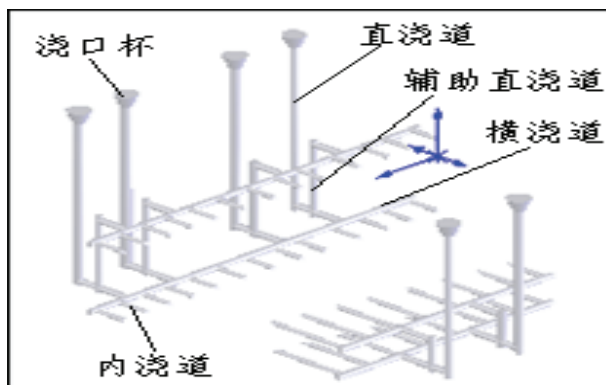


图3 浇注系统

4.1 冷铁设置

在铸型下部冒口补缩不到的厚大部位分别放置三种随型内冷铁。内冷铁采用网状删格式方法焊接，要除去焊渣、油污，进行抛丸处理。内冷铁各段用 $\phi 12\text{mm}$ 圆钢焊接在一起，防止浇注过程中松动。图4中阴影部分为冷铁。

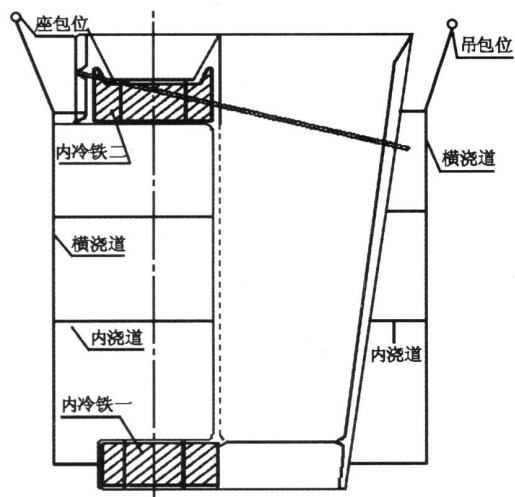


图4 挂舵臂浇注系统、内冷铁布置

表1 冷铁

序号	规格 (mm)	数量 (件)	材质	单重 (kg)	总重 (kg)	规格 (mm)	数量 (件)	单重 (kg)	备注
NO1	500×300×300	2	ZG270-500	351	702				
NO2	500×300×150	2	ZG270-500	175	350	650×615×150	1	365	铸后割开
NO3	500×300×330	2	ZG270-500	386	772				
NO4	500×300×150	2	ZG270-500	175	350	500×615×150	1	365	铸后割开
NO5	300×220×150	9	ZG270-500	77	693	930×690×150	1	750	铸后割开

4.2 冒口设计

该挂舵臂热节主要出现在大、小舵轴孔、筒体与侧向伸出部分交接处及脊背部位。由于各部分热节不均， 应在其不同的位置分别设置相应的冒口， 以满足补缩需要。根据铸件的尺寸和冒口的延续度， 采用模数法计算得出各部位的模数。共设置了 2 个明冒口， 6 个暗冒口， 位置见图 5。

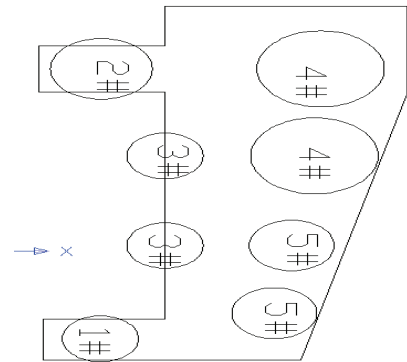


图5 冒口布置

在大、小头舵轴孔上面设置 1# $\Phi 900\text{mm}$ ，2# $\Phi 1000\text{mm}$ 的明冒口， 木高为 1680mm，浇高为 1 500 mm；沿筒体长度方向， 设置 2 个 3# $\Phi 700\text{ mm}$ 的暗冒口，两个 4# 500mm×700mm，高 750mm 的暗冒口，两个 5# $\Phi 400\text{mm}$ ，高为 650mm 的暗冒口，其中暗冒口上面砂型盖芯厚度均为 150mm。

铸件所需金属液量= $(G_{\text{件}} + \Sigma G_{\text{冒}}) = (57500 + 38500) = 96000\text{kg}$

铸件收得率= $G_{\text{件}} / (G_{\text{件}} + \Sigma G_{\text{冒}}) = 57500 / 96000 \times 100\% = 60\%$

式中： $G_{\text{件}}$ 为铸件的重量， $\Sigma G_{\text{冒}}$ 为所有冒口的重量。

4.3 浇注

开浇温度要求 $1550\sim 1565^{\circ}\text{C}$ 。出钢后直接到座包点座好包，对正好水口后及时进行吹氩搅拌，使包内钢水温度均匀，利于滑动水口自开。盛满钢液的座包注口必须与其下面流钢槽引出的浇口杯对正。若浇口不能自开，必须同时割包开浇。座包全流浇注，全流开浇后 2 分 30 秒逐渐减流至浇完，下渣时关闭水口，以防钢渣流入铸型本体；在浇完本体后，吊包减流。合理的点浇冒口是保证缩裂区不能延伸到冒口根部的关键措施。当钢液上升至明冒口一定高度处减流加入覆盖剂。停浇一定时间改用浇冒口系统进行浇注，浇至一定高度停浇。图 6 是实际浇注过程照片，由于钢液比重大，在型腔内部有大芯子，为了防止大芯子漂浮，压铁 300t，浇注前用风干机对型腔进行烘烤，使其干燥。浇包下有石英砂和引流砂，再对眼，然后用液压泵打开下边的阀门，浇注。如图 6d 所示，浇注时间大约为 $2\sim 3\text{min}$ ，开始浇注时速度慢，保证充型平稳后，中间浇注速度加快，当钢水上升到明冒口 300mm 时（或钢水淹没暗冒口），改用补浇冒口进行浇注，加入覆盖剂后，能够延长冒口钢水的凝固时间，使冒口起到很好的补缩作用^[1]，避免铸件产生缩孔、缩松等铸造缺陷，并且能提高工艺出品率。



(a) 干燥型腔



(b) 座包



(c) 引流



(d) 浇注

图6 现场浇注过程

5 清理

5.1 清理工艺

大型船用铸钢件的清理工艺流程：保温后期利用余热割除大冒口—清砂—正火—热割浇冒口—回火—修边—划线、缺陷标记—矫正变形、热清缺陷—打磨、复划线—超声波探伤和磁粉探伤检查—清除缺陷并记录—预热焊补—焊后回火—质量复检—船检—交货（见图 7）。尺寸检查必须严格遵照标准^[2]。



(a) 打箱



(b) 切割冒口



(c) 落砂前



(d) 落砂



(e) 正火



(f) 回火



(g) 焊补



(h) 打磨

图7 清理工艺

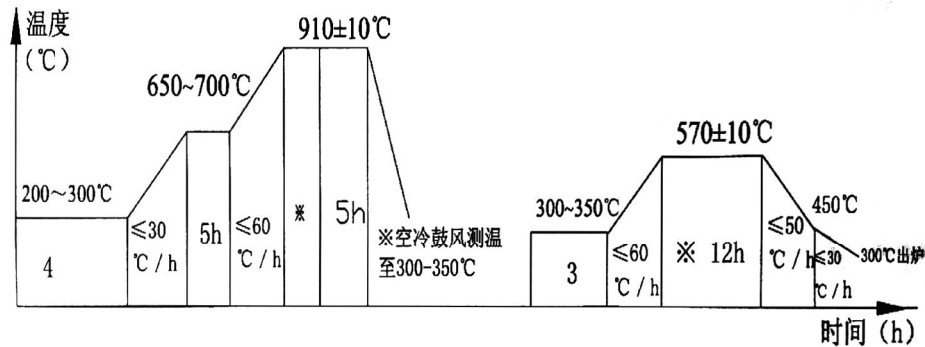
5.2 冒口切割

铸件打箱后，在原地趁热切割冒口，割温 $\geq 250^{\circ}\text{C}$ 以测温为准，冒口下增肉及补贴热处理后热

割去除。冒口根切割留余量 30~40mm，不允许一次切割完毕；冒口切割完后立即进行去应力处理。铸件进行去应力处理，清铲进行全面清砂。

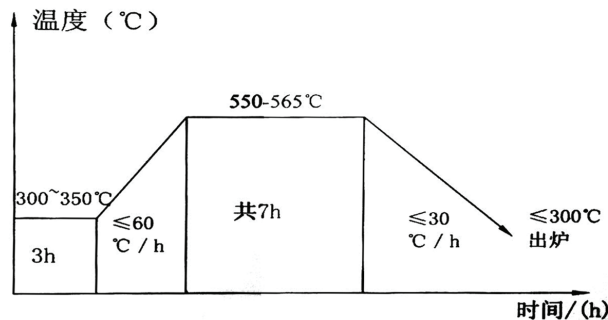
5.3 热处理

第一次热处理完毕后，彻底清理完内腔砂后热割残余浇冒口，然后进行二次热处理，二次热处理工艺为 $910\pm 10^{\circ}\text{C}$ 正火+ $570\pm 10^{\circ}\text{C}$ 回火，热处理工艺如图 8、图 9 所示。正火处理的目的是细化晶粒，使奥氏体在较低的温度下发生共析转变，得到分散度更大的珠光体，从而提高钢的力学性能。正火后回火，可进一步提高钢的性能。



- (1) 工件放在垫铁上垫平垫实，缝隙处用耐火砖、楔铁等垫实防止变形。
- (2) 工件前、后各敷一支热电偶，※ 910 ± 10 、 570 ± 10 段炉温均匀且偶温进入工艺范围后开始保温。
- (3) ※空冷鼓风后测最厚部分温度，温度需至 $300\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，以实测温度为准。
- (4) 垫铁高度 700mm，铸件距炉门距离及烧嘴和台车后端部距离等未尽事宜严格按《铸钢件热处理规程》执行。

图8 铸后热处理工艺



具体要求及注意事项

- (1) 垫铁高度 $\geq 700\text{mm}$ ，工件垫在垫铁上垫平垫实，缝隙处用楔铁垫实防止变形。
- (2) 其它未尽事宜严格按《铸钢件热处理规程》。

图9 焊后热处理工艺

5.4 检测

随体试棒，进行检测，其屈服强度、抗拉强度、伸长率、断面收缩率值是否满足协议要求。对大、小舵轴孔外 100 mm 范围处进行超声波探伤，满足 LR 质检标准。

6 结论

按照上述工艺，生产了 2 件挂舵臂，铸件表面平整，尺寸符合图纸要求，对图纸要求部位进行超声波探伤合格。采用地坑组芯造型，设置浇注系统、冒口、冷铁大小和位置等，保证铸件顺序凝固，防止在铸件内部出现缩孔、缩松缺陷。为生产出符合船级社质检要求的挂舵臂提供了依据。

参考文献:

- [1] 张慧敏, 谢敬佩, 王爱琴, 等. 挂舵臂铸钢件冒口覆盖剂保温机理研究[J]. 铸造技术, 2007, 27(6): 598-600.
- [2] 段伟勋, 赵永让, 岳宗格. 船用铸钢件铸造技术与产品开发[J]. 铸造技术, 2004, 25(1): 518-519.