• 消失模铸造专栏 Lost Foam Casting Column •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.015

抽油机曲柄均衡凝固理论指导下的消失模型腔作浇道工艺

炊景辉[1],刘立中[2],张德文[3]
(1.上海瑟逸机电科技有限公司,上海 200000; 2. 杭州规矩铸造设备有限公司,浙江 杭州 311400;3. 大士河机修公司,山西 吕梁 033000)

摘　要:抽油机曲柄属长条状厚大铸铁件,按传统观念采用侧面偏低位浇注系统时,不仅铸件会呈弯弓状变形,上部碳缺陷也较明显。浇注系统调整为端头阶梯浇道后变形和碳缺陷得以克服。依据均衡凝固理论,实施型腔作浇道工艺,极致简化浇注系统,不仅使铁液利用率提高至97%,曲柄质量也得到进一步提高。

关键词:消失模铸造;均衡凝固;型腔作浇道
中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0958-07

Using Lost Foam Mold Cavity as Gate for Producing Pumping Unit Crank under Guiding of Proportional Solidification Theory

CHUI Jinghui[1], LIU Lizhong[2], ZHANG Dewen[3]
(1. Shanghai Seyi Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China; 2. Hangzhou Regular Casting Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311400, China; 3. Dashihe Maintenance of the Company, Lvliang 033000, China)

Abstract: Pumping unit crank casting is a long and thick casting, traditionally cast by using side and lower position gating. This may result in curved arch deformation and also up-section carbon defect. After changing pouring system to step gating at the end of casting, deformation and carbon defects were overcome. According to proportional solidification theory, using lost foam mold cavity as gating, poring system was extremely simplified, not only pattern yield increased to 97%, casting quality is improved as well.

Key words: lost foam casting, proportional solidification; using cavity as gate

1　铸件情况

铸件名称:6型抽油机曲柄;材质:HT250;几何尺寸:2 155 mm×450 mm×160 mm;单件重量750 kg;长方体一端似微开海带鱼嘴型厚大夹紧部,另一端为弧形面;(图1、图2)侧立上下两面有T形槽,T形槽一侧为平台,另一侧是齿条;曲柄在抽油机上起杠杆作用(图3、图4)。

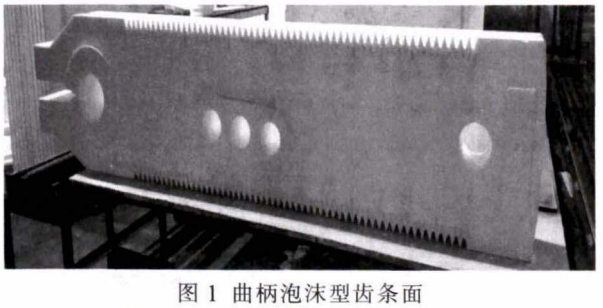

图1 曲柄泡沫型齿条面
Fig.1 Rack face of crank foam pattern

图2 曲柄泡沫型平台面
Fig.2 Platform plane of crank foam pattern

2　消失模初始工艺过程

2.1　泡沫型制作

选用密度16 g/L,珠粒融合良好的泡沫大板,切割160 mm厚板材入烘房烘烤,称重确定彻底干燥后手工配合数控切割机拼接泡沫型。

2.2　初始工艺浇注系统设计

侧立摆放泡沫型,平台一侧凹陷区域水平中线

收稿日期:2020-09-18
作者简介:炊景辉(1982-),陕西西安人,本科,工程师.主要从事机械设计及制造、铸造方法及工艺方面工作.
电话:13818209614,E-mail:cuanwenbo@163.com

中段设内浇道 2 处，相距 800 mm，内浇道截面积 40 mm×60 mm；2 处内浇道由相同截面积的横浇道连接，横浇道中间设直浇道，归属于“侧面 1/2 侧注”，内浇道切入方向与型腔呈垂直状(图 5)。

2.3　涂料烘干及树脂砂塞孔

外购粘结剂按比例加入高铝矾土与石英粉骨料自制水基涂料，要求涂层厚度≥1.5~2.0 mm，彻底烘干后 T 型槽、空洞处填塞树脂砂，防止发生铁瘤缺陷(图 6)。

图片中可见曲柄共有 5 个大孔和 2 个 T 型槽，空间都很大，平卧时除底部 T 型槽需树脂砂填塞外，其余的孔和槽只要确保涂层无露白和裂纹可以不用预填树脂砂；涂层有细小裂纹时预填砂也会从砂粒间隙发生钻铁，造成铁包砂，难以清理；如果一定要填塞，应该使用粉(末)，而不是用砂(粒)。

使用宝珠砂埋型时将曲柄抬高一个角度，底部的 T 型槽也可以不预先填塞。

填塞树脂砂或粉时，一定要进烘房将其彻底烘干后才能装箱埋型和浇注。否则，水分遇高温铁液急剧膨胀会破坏涂层。

2.4　干砂埋型

2.4.1　设计曲柄专用砂箱，两侧壁气室，3 个真空接口位置在砂箱中上部，相当于与泡沫型平齐的的高度，符合“负压场顺向”的要求(图 7)。

2.4.2　底砂震实后放置泡沫型，每箱装 2 件模型；直浇道位置应与真空接口对称，模型调整位置后加砂固定(图 8~ 图 9)；本案例配置的是可以往复行走的震实台，方便放置大型模型和加砂(图 10、图 11)。

2.5　负压状态下浇注

真空度 0.04 MPa，厚大铸铁件浇注温度可以略低，1 380 ℃；为了防止浇注时铁液飞溅烫坏泡沫模，浇口杯周边可用挡渣棉保护；浇注操作应遵循如下原则：站好位→浇包嘴对准浇口杯→先小流→再大流→及时收流。

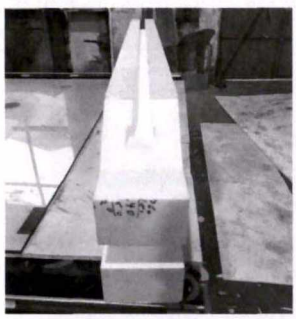

图 3　曲柄泡沫型鱼头端
Fig.3　Fish head end of crank foam pattern

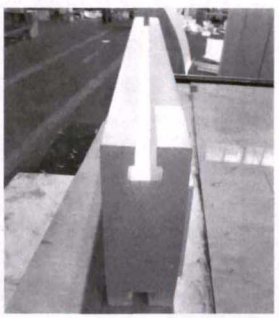

图 4　曲柄泡沫型弧形端
Fig.4　Arc end of crank foam pattern

图 5　6 型曲柄原工艺浇注系统
Fig.5　Original pouring system of Type 6 crank casting

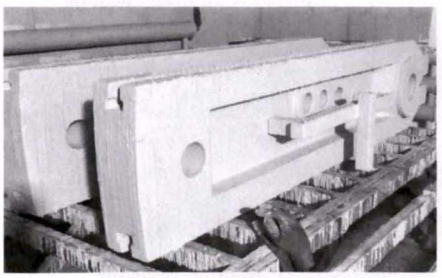

图 6　涂挂涂料后在烘房内烘干
Fig.6　Drying in drying room after coating applied on foam pattern

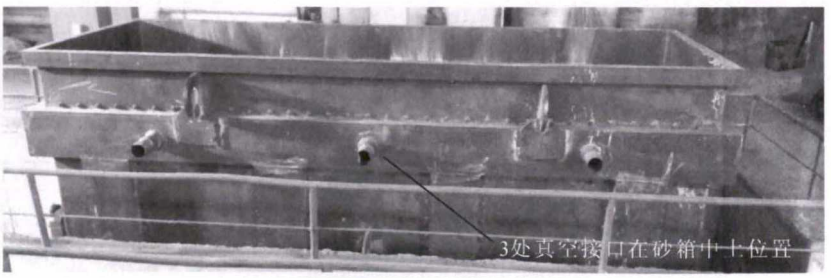

图 7　曲柄专用负压砂箱
Fig.7　Negative pressure sand box specially used for producing crank casting

图 8　放置泡沫型
Fig.8　Place foam pattern in sand box

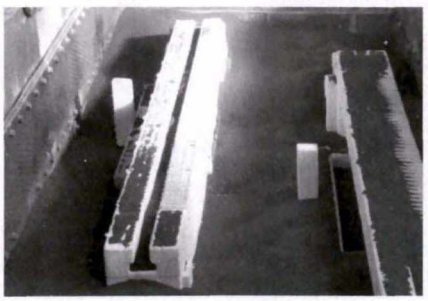

图 9　加砂固定模型
Fig.9　Add sand to fix foam pattern

图 10　行走震实台
Fig.10　Movable vibration compaction table

2.6 铸件清理

砂箱冷却 4 h 后落砂出件，孔和槽填塞的树脂砂溃散良好，未出现铁瘤和铁包砂；大部分涂料自动剥脱，其余经抛丸处理也全部清掉，铸件上部表面可见皱皮缺陷，个别齿尖融合不理想或充盈不全。测量尺寸发现所有曲柄铸件都轻度弧形弯曲，很有规律，浇道一侧是凹面位置(图 12~13)。

3 消失模铸造工艺调整

3.1 浇注系统设置位置的调整

铸件普遍存在弯曲变形，变形方向一致，肯定与浇注系统的设置有关，因此，进行浇注系统调整；产生应力的原因是铸件两侧存在温度差，即浇注通道一侧的温度高于对侧；若要消除铸件两侧的温度差，两侧都不可以设置浇道。

调整浇注系统的位置只有两端面和顶面可以选择：鱼头端厚大且开口，不宜设置浇道；留给选择的是微弧端面和顶面。

遵循消失模铸造浇注系统设计基本原则，选择微弧端面设置阶梯浇注系统；内浇口切入方向与型腔平行，充型无阻力，热量损失少；阶梯浇道热场也较合理，可以消除铸件两侧面温差，克服变形缺陷。符合消失模铸造浇注系统设计的基本原则（图 14~16）。

3.2 涂料工艺的调整

为使涂层既有理想的干强度，又有理想的耐火度，同时具有良好的剥脱性，实施“涂层着衣理念”：石墨粉涂底层，石英粉覆盖外层；涂层干强度、高温强度、剥脱性能俱佳(图 17、图 18)。

3.3 调整改进效果

图 19~22 显示埋型前用树脂砂只填塞底部的 T 形槽，做较大铸件慎重防范无可厚非；图 21 显示铸件清理后没有弧形变形，浇注系统改进达到理想效果；图 22 显示浇口杯已改成漏斗形，可以节约许多铁液；涂层剥脱效果比涂料改进前明显提高，可见大片石墨痕迹；铸件拆解后重量：740 kg，浇注系统重量：39 kg，铁液收得率 94.99%。(调整前浇注系统重量：79 kg，铁液收得率 90.35%)提高 4.5 个点。图 23

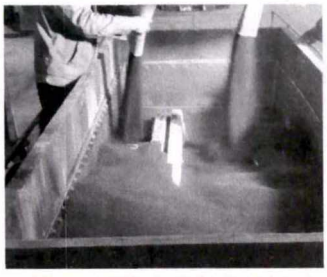

图 11 震实台边行走边加砂
Fig.11 Add sand while vibration Compaction table moving

图 12 落砂清理
Fig.12 Shakeout

图 13 抛丸清理
Fig.13 Shot blast cleaning

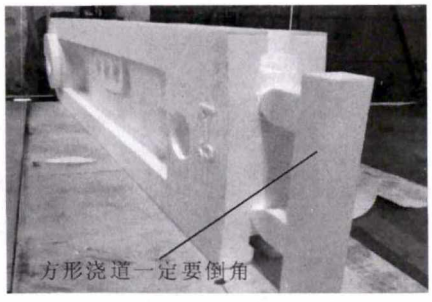

图 14 端面阶梯浇注系统
Fig.14 Stepped pouring system at end face of the casting

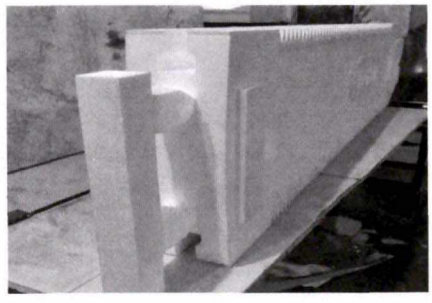

图 15 端面阶梯浇注系统
Fig.15 Stepped pouring system at end face of the casting

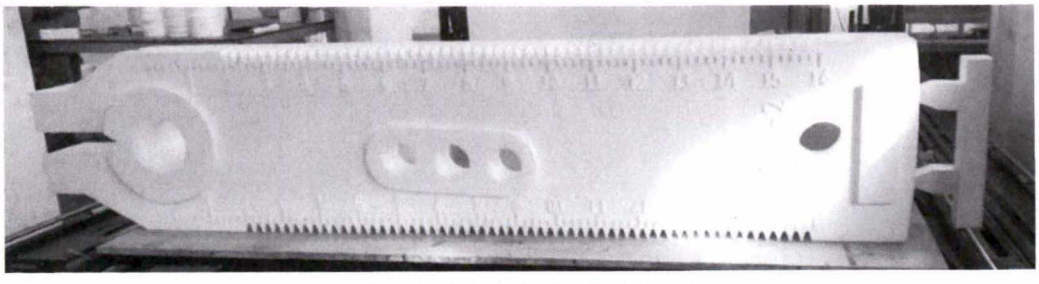

图 16 调整后的端面阶梯浇注系统
Fig.16 Adjusted stepped pouring system at end face of the casting

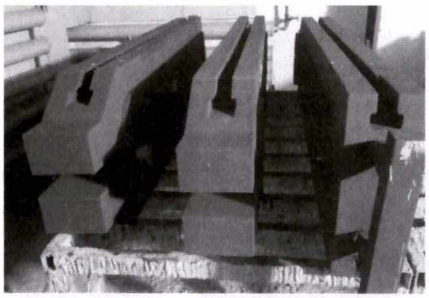

图 17 鳞片状石墨粉作底层涂料
Fig.17 Scale graphite is used as bottom layer coating

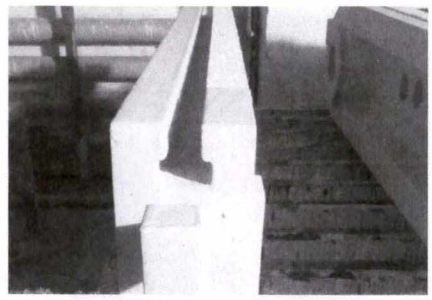

图 18 石英粉骨料作被覆层涂料
Fig.18 Quartz powder used as aggregate for back layer coating

图 19 埋型前依然树脂砂填塞
Fig.19 Fill resin sand on bottom before fill sand around foam patterns

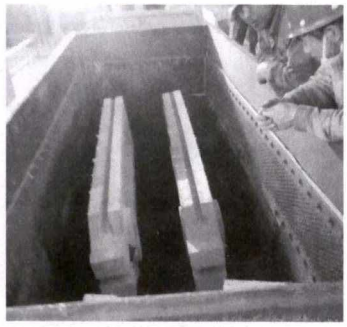

图 20 每箱埋型 2 件
Fig.20 Two foam patterns in one sand box

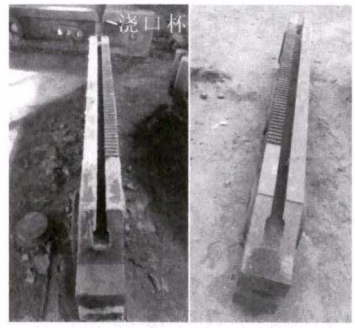

图 21 铸件不再有变形
Fig.21 Casting has no deformation

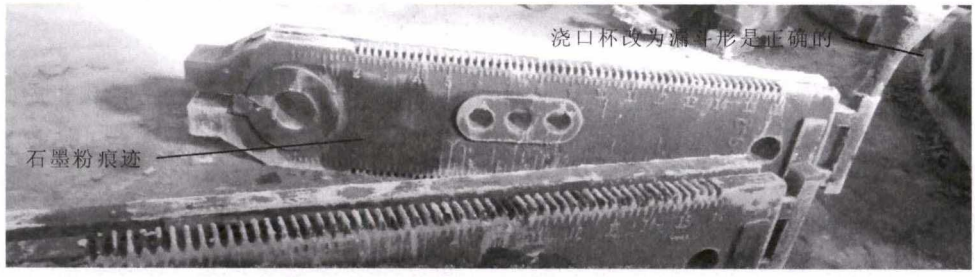

图 22 浇口杯改为漏斗形
Fig.22 Pouring cup changed to funnel shaped

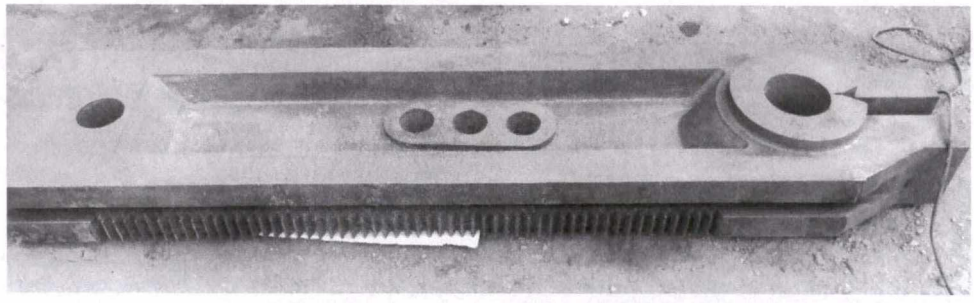

图 23 抛丸后铸件表面光洁，较浇注系统改进前明显提高
Fig.23 Smooth and clean casting surface, much better that the surface quality before pouring system improvement

显示抛丸后铸件棱角清晰，表面平整光滑，齿牙饱满，无任何瑕疵。

4 消失模铸造浇注系统再次调整

浇注系统位置调整到端头后，结构简化了许多，弧形变形得到克服，铁液收得率提高到 94.99%，应该得到肯定了！但是，用“用型腔做浇道，极致简化浇注系统”的新理念审视，浇注系统设计工艺还有提升空间，还没有达到极致简化的层次，还应作进一步的调整。

4.1 浇注系统极致简化再移位置，用型腔做浇道

内浇口切入位置上移至顶面端头，为避免铁液流冲刷 T 型槽，内浇道设计成马鞍型，其上直浇道、浇口杯；直浇道 ϕ50 mm，浇口杯上口 ϕ150 mm；为保证铁液有足够压头，全高 350 mm（图 24、图 25）。

图 26 是粘好浇道的泡沫模，方形浇道必须倒角！

4.2 涂料实行着衣理念，底层涂料石墨粉作骨料，外涂石英粉涂料

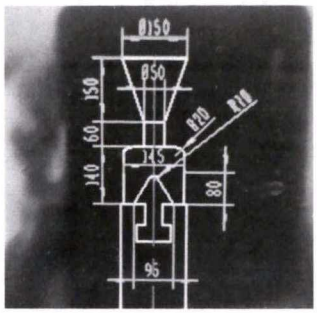

图 24 用型腔作浇道浇注系统设计
Fig.24 Design in which mold cavity was used as pouring system

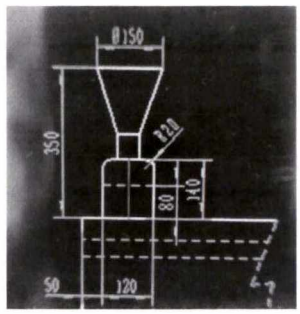

图 25 用型腔作浇道浇注系统设计
Fig.25 Design in which mold cavity used as pouring system

图 26 粘好浇注系统的泡沫模
Fig.26 Foam pattern adhered with pouring system

4.3 浇注系统再次简化改进后，埋箱操作较简化前方便，浇注顺畅；铸件出箱后涂料自我剥脱性能良好，沟槽及大孔均无粘砂现象发生；表面未见明显缺陷；抛丸后铸件可称精品(图 27~29)。

5 浇注系统再次缩身

5.1 调整只限于内浇道部分，将原宽 145 mm 减为 130 mm，长 120 mm 减为 100 mm；浇口杯也由 ϕ150 mm 缩小至 ϕ130 mm，考虑目前浇包嘴尚未改造，暂予保留(图 30、图 31)。

5.2 调整后的浇口杯形状(图 32、图 33)

5.3 涂料实施着衣理念常态化

5.4 加砂埋型操作，简单方便(图 34)

5.5 开箱出件，目测未见明显缺陷，齿条充型饱满，T 型槽无粘砂(图 35，图 36)

5.6 图 36、37 显示浇注系统缩身后未影响铸件质量。瘦身成功，浇注系统可以暂时确定此尺寸，以后择机再减小浇口杯尺寸。

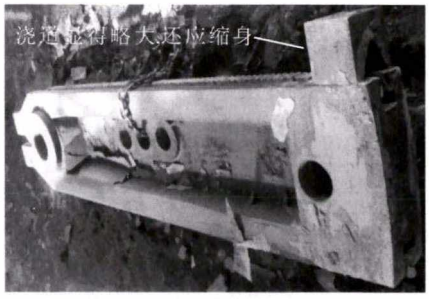

图 27 出箱后涂料剥脱效果良好
Fig.27 After shakeout, most coatings peeled off automatically

6 讨论

曲柄铸件不复杂，做成也不难，但不同做法差距很大。

本案例浇注系统从侧面调整到端面，再上调至顶面，是在几天内完成的。然而，在对消失模铸造工艺内涵的不断认识过程中，这个移动却用了至少 15 年时间。

把本案例浇注系统位置的调整从理论上讲清楚，在实践中得到验证，值得笔者花费笔墨，也值得

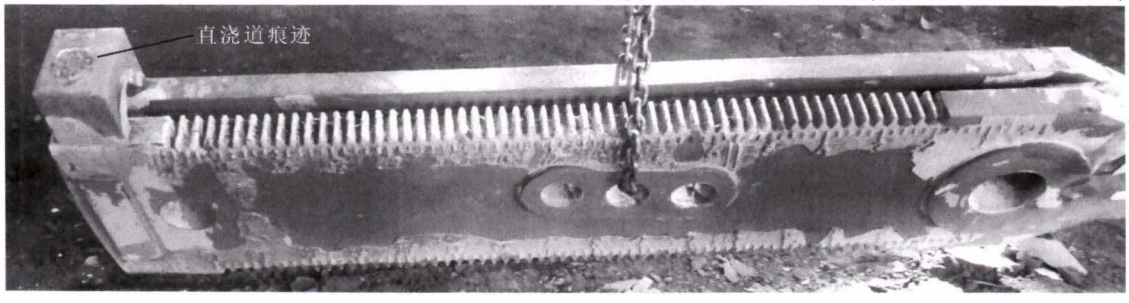

图 28 铸件大表面光滑，浇道的远端也无瑕疵
Fig.28 Good surface on the large plane and location far from gate

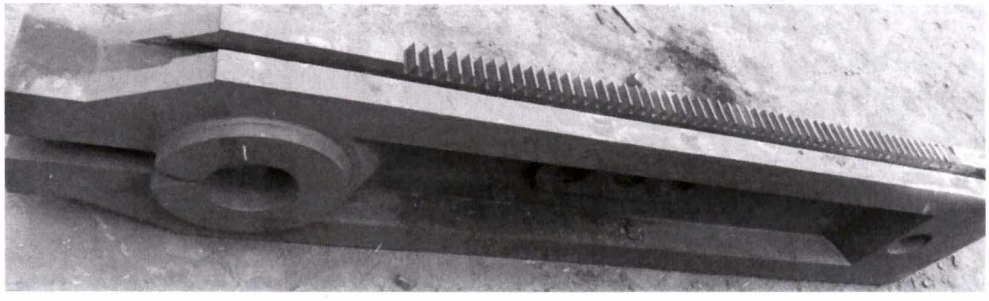

图 29 抛丸后铸件表面属精品水平
Fig.29 Excellent surface after shot blast cleaning

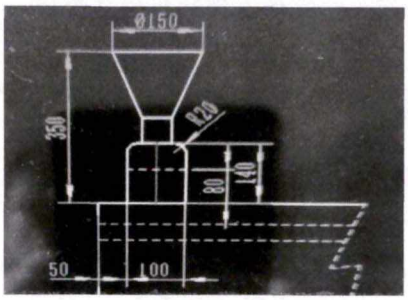

图 30 调整内浇道尺寸
Fig.30 Change inner gate size

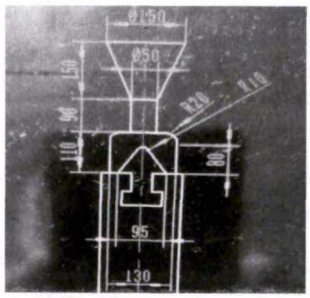

图 31 调整内浇道尺寸
Fig.31 Change inner gate size

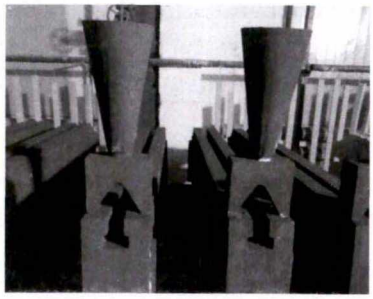

图 32 调整后的浇注系统
Fig.32 Adjusted pouring system

图 33 浇道尺寸缩短
Fig.33 Gate length was shorted

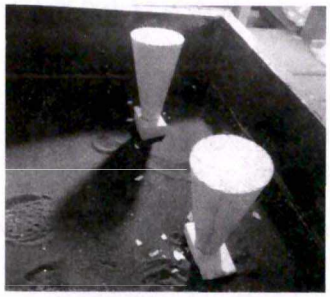

图 34 加砂埋型处理浇口杯
Fig.34 Filling sand to fix foam pattern and pouring cup patterns

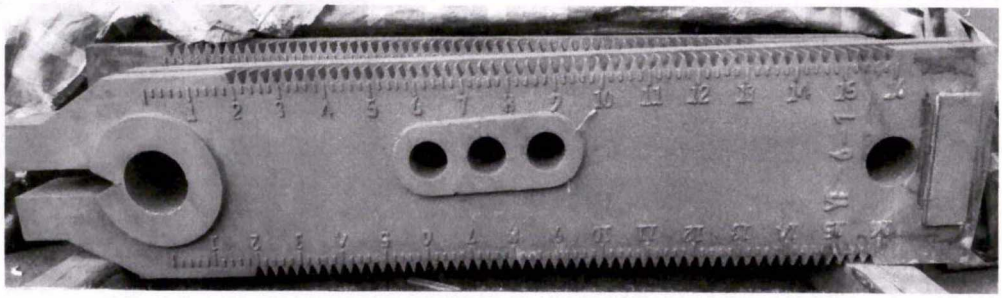

图 35 浇注系统改进后抛丸清理前的铸件
Fig.35 Casting made with improved pouring system and before shot blast cleaning

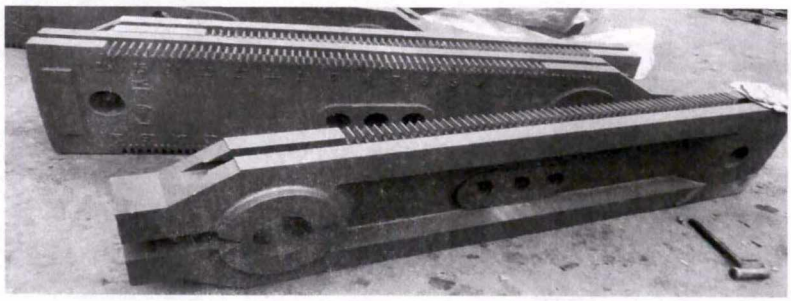

图 36 批量生产，质量稳定
Fig.36 Crank castings volume produced with good and stable quality

读者细读评头品足。

6.1 浇注系统位置解析

6.1.1 侧面设置浇注系统是受消失模铸造早期理念影响，认为从下 1/3 位置多点切入会把铁液携带热量均散分开，符合同时凝固要求。本案例是厚大较长铸铁件，侧立位摆放时有高度差、有充型时间差。必定会产生铸件上下温度差，因此，虽然是铸铁件，客观上改变了凝固方式：有同步凝固变为顺序凝固。

本案例浇注系统开在一侧面时，较长的浇注时间使横浇道和铸件间型砂吸收较多热量，从而延缓浇道一侧凝固时间，使铸件两个侧面产生凝固时间差；浇注系统对称面降温快，先凝固，尺寸得以确定；浇注系统一面降温慢，稍迟凝固，在已经相对固定尺寸上收缩，势必导致向浇注系统一侧弯曲。简言之，曲柄弯曲是两侧有明显的温度差(水平温度差)造成的。

本案例浇注系统开在一侧面时，铁液充型至内浇口水平以上时，变成了底注，呈现 U 字形充型，热场开始倒置，越向上温度越低，所以，曲柄顶部出现铁液温度低的表现很正常。曲柄上部缺陷是上下温度差(垂直温度差)倒置导致的。

6.1.2 端面设置浇注系统很合理

端面阶梯浇道可以彻底消除水平温度差；基本纠正倒置的垂直温度差，所以，可以克服弧形变形和顶部低温缺陷。

端面阶梯浇道符合消失模铸造浇注系统设计基本原则关于内浇道切入位置的要求：与型腔平行切入的原则；高度升高 300 mm 加一阶梯浇道的阶梯切入原则。

本案例铸件的结构特点也支持由端面切入内浇道，因为远距离的对称端是厚大鱼嘴，内浇道切入区域相对较薄，这一点符合内浇道从薄处切入的原则。

6.1.3 浇注系统置顶最高明

本案例内浇道置顶是依据均衡凝固理论和型腔作浇道，极致简化浇注系统最新理念。

均衡凝固的目的是要实现大型铸铁件自补缩。大型铸铁件均衡凝固的过程实际是顺序凝固，希望铸件最底层率先凝固，其上随之降温；在铁液降温过程，体积收缩；铁液凝固时，体积膨胀，补充了收缩的空间，实现降温凝固过程体积未变，这种自补缩的过程就是均衡凝固。均衡凝固需要正向垂直热场：即底部温度低于上部温度。

型腔作浇道如图 37 所示，虽然浇口开在铸件顶部，却是真正的底注；铁液进入型腔后直接落底，型腔做了浇道；似有 N 个阶梯浇道呈水平上升状态充型；先落底的铁液先镇静先降温先凝固，其后进入型腔的铁液随其后；底部温度低顶部温度高，热场正向，满足均衡凝固要求。

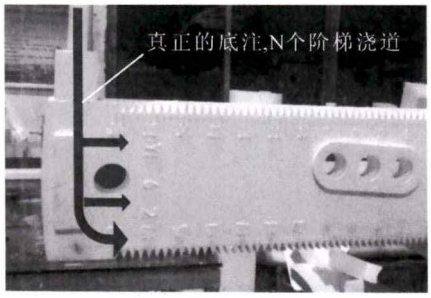

图 37 粘好浇注系统的泡沫型
Fig.37 Foam pattern adhered with pouring system

型腔作浇道极致简化浇注系统，不仅减少了浇注系统的铁液浪费，更重要的是减少了热量的丢失，使有限的热量都作用到型腔泡沫，使其彻底消失，不发生低温缺陷。事实证明型腔作浇道提高了铸件品质和成品率、提高了铁液的利用率、也提高了员工的劳动效率，降低生产成本，是企业最大限度受益。所以说本案例顶部设置浇注系统是高明的设计。浇注系统再次缩身后，铸件：750 kg，浇道：20 kg；铁液收得率高达：97.36%。

6.2 消失模铸造厚大铸铁件必须注重细节管理

铸造是细活，特别是消失模铸造更是内涵丰富，要特别注重细节管理和细节操作的技术活。在远程指导过程中认为在工艺管理上应该继续加强：

(1)彻底屏弃大浇口杯，抓紧时间改造浇包嘴，实行精细浇注；

(2)制定一条规章制度，所有方形浇道必须倒角，R10 mm；

(3)超过 320 kg 的厚大铸铁件要依据“均衡凝固”和“型腔作浇道”理论设计浇注系统，极致简化浇注系统，实现石墨膨胀自补缩；

(4)厚大铸铁件实施“均衡凝固”和“型腔作浇道”工艺过程中要注意：使用冷铁、超高压头、控制速度、低温浇注、尽早封颈 5 个环节。

6.3 各型曲柄均可采用此种形式浇注系统，尺寸要做调整(图 38、39)

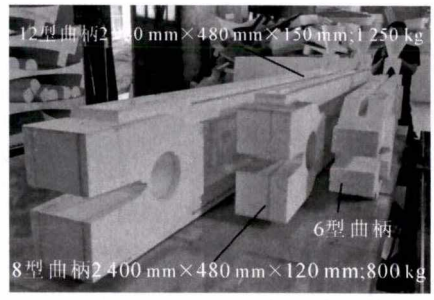

图 38 各种型号曲柄都可以选用此工艺
Fig.38 The casting method suitable for all types of crank castings

图 39 浇注系统尺寸适当调整
Fig.39 Size of pouring system properly adjusted

参考文献：

[1] 刘立中，刘宁. 消失模铸造工艺学[M]. 北京：化学工业出版社，1919.

[2] 刘立中，史可器. 消失模铸造型腔作浇道工艺[M]. 北京：化学工业出版社，2020.

[3] 刘立中，贾建基，戴申梅. 消失模铸造借用型腔作浇道研究院[J]. 铸造技术，2019，9(40)：846-854.

[4] 李传栻. 铸铁件凝固后的控制冷却工艺 [J]. 现代铸铁，2020，1(40)：34-38.

[5] 纪汉成，葛修亚. 空心配重块的铸造工艺设计 [J]. 现代铸铁，2019，3(39)：6-8.