

球墨铸铁汽车换挡拨叉的铸造工艺研究与实践

任现伟

(洛阳古城机械有限公司, 河南洛阳 471023)

摘要: 介绍了一种汽车用球墨铸铁换挡拨叉的铸造工艺方法。该工艺是在原来一型只能水平布置2个铸件的前提下, 在不改变造型设备的基础上, 通过采用垂直放置和每个铸件仅使用一个冒口的方法将一型布置为3件, 设计了满足质量要求的铸造工艺方法。经模拟分析和实践验证, 生产出的铸件均能符合客户指定标准的所有要求, 目前, 已具备投入批量生产的条件。

关键词: 球墨铸铁; 换挡拨叉; 铸造

本文研究的换挡拨叉是汽车变速箱实现换挡过程中的关键零件, 位于变速手柄下端, 与变速手柄相连, 在汽车行驶过程中, 换挡拨叉拨动变速轮, 使其变速箱内部的齿轮位置发生改变, 从而使输入和输出转速比改变, 实现换挡过程。因为齿轮在高速旋转时换挡拨叉是不转动的, 如果换挡拨叉力学性能不足, 或者磨损, 可能导致齿轮挂不到位而掉档, 或导致拨叉断掉^[1]。换挡拨叉有着较高的质量要求。因此, 在铸造工艺设计和生产过程中存在着很大的难度。

1 铸件主要技术要求

铸件外形属弓字型长条状结构, 材质为球墨铸铁, 牌号为EN-GJS-600-3, 相当于GB/T 1348—2009中的QT600-3材质; 铸件单重为3.05 kg, 最大长度365 mm, 平均宽度16 mm, 主要壁厚33 mm, 最厚处50 mm。铸件外形如图1所示。

主要技术要求:

(1) 金相组织。球化率 $\geq 85\%$; 渗碳体(体积分数) $< 1\%$; 基体组织为珠光体+铁素体, 珠光体(体积分数) $\geq 50\%$; 石墨大小: 5~8级。

(2) 力学性能。铸件本体试样抗拉强度 ≥ 600 MPa, 屈服强度 ≥ 380 MPa, 伸长率 $\geq 3\%$, 布氏硬度HBW: 200~250。

(3) 化学成分。除了其他化学成分要满足要求外, 客户特别要求Si含量 $< 2.80\%$, Ti含量必须 $< 0.03\%$, 禁用有害物质检测符合要求。

(4) 要求铸件经无损检测后, 铸件内部无裂纹、渣孔和气孔类缺陷; 铸件内部缺陷必须符合ASTM-E689标准中 ≤ 2 级的要求; 表面粗糙度 $R_a < 100$ μm , 表面不允许有任何影响装配和外观的渣孔、砂眼等缺陷。

(5) 铸件不允许有任何影响装配与外观的翘曲和扭曲变形缺陷。

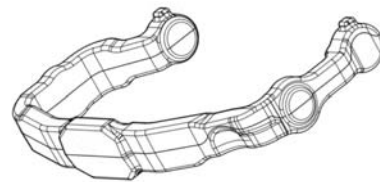


图1 铸件图
Fig. 1 Casting drawing

2 一型三件铸造工艺的优点

公司铸造生产采用DISA231垂直分型无箱射压造型机造型, 造型机型板尺寸为650 mm \times 535 mm, 中频感应电炉熔炼, 使用喂线法对金属液进行球化处理^[2-4]。

作者简介:

任现伟(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造工艺和材料的研究、开发与应用工作。电话: 13525453437, E-mail: lyrenxianwei@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)

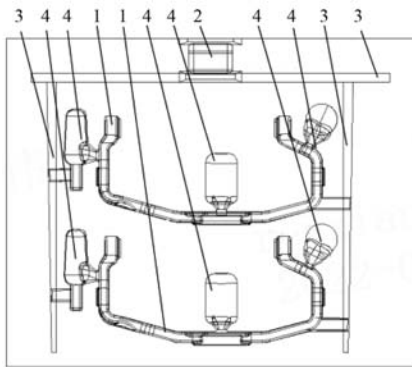
11-1426-06

收稿日期:

2022-09-28 收到初稿,

2023-10-21 收到修订稿。

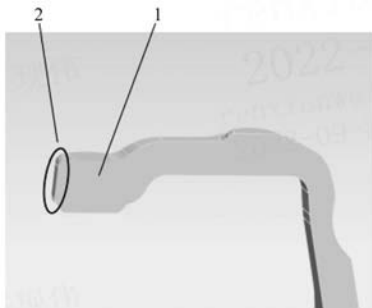
由于铸件长度尺寸偏大，加上两端补缩冒口后的尺寸已经达到了该DISA造型机造型室尺寸的上限，按以往设计经验，选择水平布局、每型只能放置两件铸件，图2是原设计工艺，金属液利用率仅36%；铸件叉脚顶面边缘部位2 mm以内存在有8%~12%左右的游离渗碳体缺陷，游离渗碳体缺陷在铸件上的位置和基体组织如图3、图4所示；由于垂直造型机所制作的铸型，型腔最下方部位紧实度较低，铸件底部机械粘砂严重；由于铸件自身结构原因，在湿型砂中凝固收缩时极易导致铸件首、尾两端相对于铸件中部明显翘曲变形；另外，金属液从被注入浇口杯开始，直到进入



1. 铸件 2. 浇口杯 3. 浇道 4. 冒口

图2 优化前铸造工艺图

Fig. 2 Casting process drawing before improving



1. 铸件耳朵部位 2. 游离渗碳体在铸件耳朵上的部位

图3 游离渗碳体在铸件上的位置

Fig. 3 The position of the free cementite on the casting

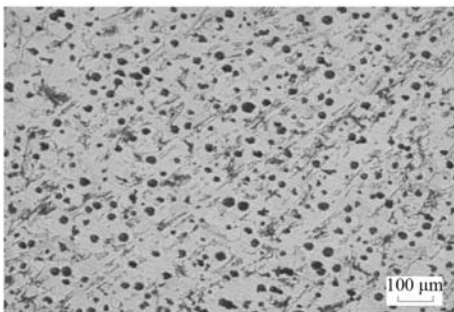
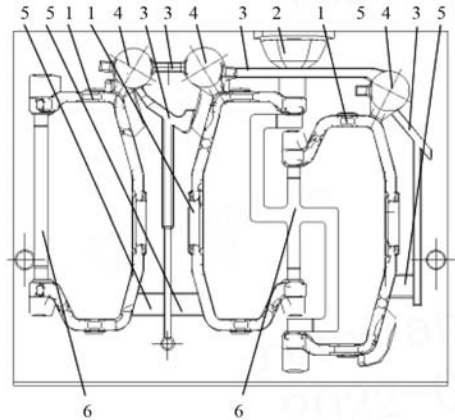


图4 游离渗碳体（侵蚀）

Fig. 4 The free cementite

铸件的这个过程的高度落差过大，金属液在浇注系统内出现紊流现象，导致铸件下方靠近冒口颈部位渣孔和砂眼严重，需要做报废处理^[5]。

经过计算、CAE模拟分析和评审对最初设计的工艺进行了修改，优化后的工艺如图5所示，主要是将最初水平放置的一型两件修改为垂直放置的一型三件。



1. 铸件 2. 浇口杯 3. 浇道 4. 冒口 5. 内浇道 6. 防变形拉筋

图5 优化后的铸造工艺图

Fig. 5 Casting process drawing after improving

为了解决铸件变形和个别叉脚部位内部疏松缺陷，新工艺在模具的每个模型的上、下端叉脚之间增加了一种防变形拉筋^[6]，防变形拉筋的尺寸为：厚度4 mm，宽度20 mm。第一个铸件（左侧）单独使用一个防变形拉筋，连接在铸件上下端的叉脚之间；第二个和第三个铸件共有二个防变形拉筋，呈十字交叉分布，防变形拉筋的4个末端分别连接在第二个铸件上、下端叉脚之间和三个铸件上、下端叉脚之间。为了便于从铸件上将防变形拉筋去掉，而不致使铸件带肉和保证尽可能少的残余打磨量，每个防变形拉筋末端与铸件上、下端叉脚连接处的厚度是防变形拉筋本体厚度的1/2，宽度保持不变。防变形拉筋的尺寸如图6所示。

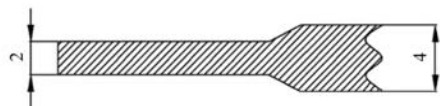


图6 防变形拉筋剖面图

Fig. 6 Sectional drawing of the anti deformation tie-bar

新工艺的主要优点有：

(1) 防变形拉筋的使用创造了更加利于铸件上、下端金属定向凝固收缩的条件，在铸件凝固收缩过程中可有效分解铸件发生扭曲变形的铸件内应力；浇注后金属在型腔内，从液态凝固到固态的过程中由于该

防变形拉筋的存在,能够使铸件不发生扭曲变形,原因是该防变形拉筋总体呈片状分布,在浇注后先于铸件凝固,防变形拉筋凝固后直接阻止了铸件上、下端叉脚向中间和上下变形的通道,起到了支撑和牵拉的作用,因此,铸件体收缩时不会发生扭曲变形。

(2) 浇注后随着金属温度的不断持续降低,直到接近室温前,防变形拉筋因为壁厚较薄可以提前凝固的原因,它的温度会一直比铸件低出很多,可以向外界传递铸件局部热量的作用,加速铸件相应部位的凝固速度,起到激冷片的作用,预防铸件叉脚部位内部疏松缺陷的产生。

(3) 由于防变形拉筋的使用,使得生产出的铸件不需要经过二次加热,更不需要采用专用夹具在高温状态下矫正其扭曲变形。在保证铸件质量的前提下,省去了电炉加热和矫正过程,节约了电能和人工成本。

(4) 防变形拉筋应用后,可将最先带入到型腔内的浮砂和过冷金属液排入到防变形拉筋内,从而进一步减少了铸件表面砂眼和渣孔缺陷,提高了铸件表面质量。

(5) 在铸件经过落砂、喷砂并冷却至室温后,防变形拉筋可与浇道、冒口一起被液压分离器去除,进入回炉料循环系统,无需额外单独处理。

(6) 采用防变形拉筋后,一型三件工艺与原工艺每型两件相比,冒口从原来的每型6个减少至3个,即每个铸件仅设置一个过热冒口。因此,金属液利用率可提高到54%,是最初一型两件的1.5倍。生产效率也增至原有生产效率的1.5倍。

3 CAE模拟和生产验证

3.1 计算机数值模拟

采用MAGMA模拟分析软件对设计的铸造工艺进行充型过程模拟,在MAGMA软件的DISA砂型铸造模块中,将转换为STL格式的3D图形导入软件中进行属性、边界条件和换热系数等参数化设置,并将所有组元的STL图形进行网格化剖分,总共剖分了2 100多万个网格。输入DISA 231造型线的基本条件和铸型厚度,以及调整好各组元的相对位置后,设置相关的模拟条件和输出结果要求。然后,导入设计的金属液化学成分、浇注温度、浇注时间和落砂温度等初始条件,在检查无误后启动软件进入数值模拟分析过程。浇注温度场分布、凝固速率和凝固时间,以及缩松缺陷分布状况分别见图7-10所示。数值模拟结果表明,最新设计的工艺符合铸造生产过程要求,在相关模具、芯盒和下芯框制作完毕后,进行实际的调试过程验证。

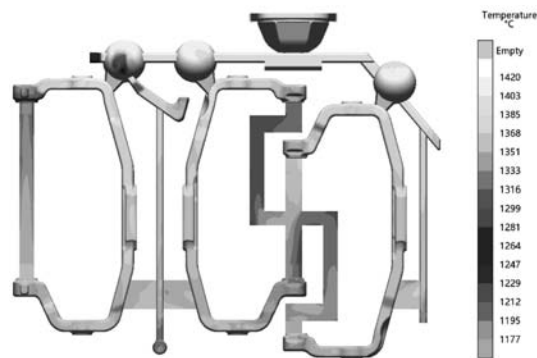


图7 浇注温度场分布

Fig. 7 Pouring temperature field of casting

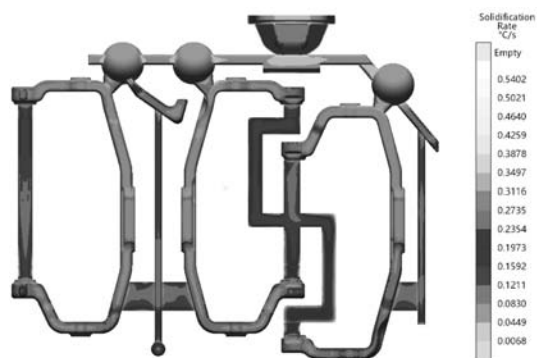


图8 凝固速率

Fig. 8 Solidification rate of casting

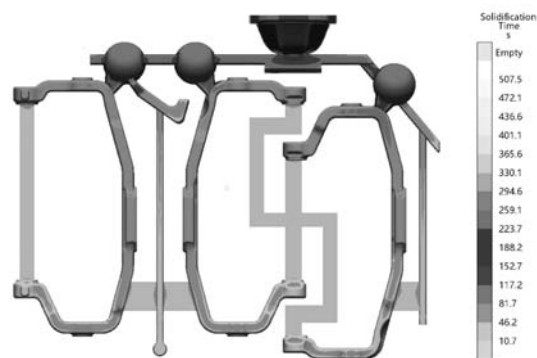


图9 凝固时间

Fig. 9 Solidification time of casting

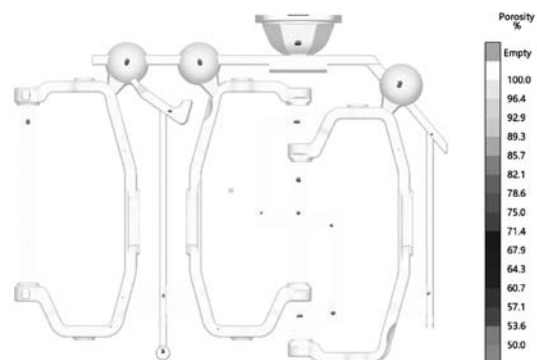


图10 缩松缺陷

Fig. 10 Porosity of casting

3.2 熔炼和金属液处理工艺

采用4 t中频感应电炉熔炼。采用QT600-3材质的浇、冒系统和废品铸件作为回炉料，回炉料经完全抛丸处理去除表面粘砂和污渍；使用牌号为Q10的生铁，废钢全部采用低Cr、低Mn，无锈迹的成捆冲压钢板边角料；为了增碳剂能被金属液完全溶解和充分吸收、确保增碳效果，使用低S、吸收率高的石墨增碳剂，与废钢、生铁和回炉料一起入炉^[9-10]。炉料配方为：50%废钢+40%回炉料+10%生铁+增碳剂。主要的熔炼过程参数如表2所示。

表2 熔炼过程参数
Table 2 Melting process parameters

取样 温度/℃	静置 温度/℃	静置 时间/min	出炉 温度/℃	出铁 质量/kg
1 430~1 480	1 530~1 540	3~4	1 510~1 520	596~604

采用包芯球化线做为球化剂对金属液进行球化处理。其中RE含量为10.0%~13.0%、Mg含量为7.5%~8.5%，球化前铁液中的S含量控制在<0.025%。为保证球化后必要的残留Mg含量，应确保包芯球化线中的芯粉加入量控制在0.60%左右。出铁过程中必须注意确保每包铁液的出铁重量、出炉温度和铁液周转时间的一致性^[11]。同时，为了防止残余Mg超标引起的铸件内部缩松类缺陷的产生，还必须严格控制球化温度在1 460~1 480℃之间，球化反应时间在45~65 s之间，

浇注温度控制在1 370~1 420℃。喂线球化反应过程中必须将包盖盖严，避免和减少球化反应过程中富含Mg和RE等元素的金属液溅出包外，造成球化不良或球化衰退，同时有利于车间环保设备的抽风和除尘效果，避免环境污染。喂线球化处理工艺参数见表3。

表3 喂线球化处理工艺参数
Table 3 Spheroidizing process parameters

喂线 长度/m	喂线速度 /(m·min ⁻¹)	喂线前 温度/℃	反应 时间/s	喂线后 温度/℃
13±0.15	18±0.2	1 455~1 490	45~65	1 430~1 445

孕育处理分三次进行。处理前原铁液的Si含量控制在1.30%~1.40%，出炉过程中进行一次孕育，加入0.30%的75SiFe孕育剂；喂线球化处理后，在将金属液倒入浇注包的同时，采用随流方式进行二次孕育，加入0.30%的75SiFe孕育剂；浇注时采用瞬时随流孕育的方式进行第三次孕育，加入0.10%的75Si，4%Ba孕育剂。

3.3 化学成分、金相组织及力学性能检测

(1) 化学成分。依据设计的铸件化学成分要求，在试生产的铸件本体上取样，采用PDA5500IV光谱分析仪对试样进行化学成分检测。实际化学成分的检测结果见表4所示。

表4 化学成分检测结果
Table 4 Chemical composition testing results

序号	C	Si	Mn	Cu	P	S	Cr	Ni	Ti	V	Al	残Mg	残La	残Ce	w _B /%
1	3.751	2.451	0.490	0.431	0.027	0.011	0.016	0.010	0.020	0.011	0.010	0.032	0.007	0.010	
2	3.760	2.463	0.483	0.470	0.028	0.008	0.020	0.013	0.021	0.013	0.012	0.030	0.006	0.01	
3	3.770	2.454	0.460	0.469	0.026	0.010	0.018	0.012	0.017	0.010	0.011	0.031	0.005	0.014	
4	3.790	2.421	0.456	0.437	0.025	0.009	0.017	0.010	0.023	0.015	0.012	0.030	0.007	0.013	
5	3.763	2.461	0.480	0.450	0.029	0.012	0.021	0.013	0.022	0.014	0.010	0.033	0.006	0.015	

(2) 金相组织：使用BM4XA II金相显微镜，依据ASTM1245—2003标准，在试生产的铸件本体上取样，对铸件进行金相组织检验，图11结果显示：石墨球化率为90%。图12结果表明，基体组织主要为细铁素体，珠光体≥50%，未发现碳化物存在。

此外，还使用声速在线测定仪对铸件球化率进行检测，表明铸件的球化率均在90%~95%之间。

(3) 力学性能：在试生产的铸件本体上取样，使用XYA105C万能拉力试验机对机加工完毕的试样进行力学性能检测；使用HB-3000B布氏硬度机对铸件本体进行硬度检测。力学性能和布氏硬度检测结果见表5所示。

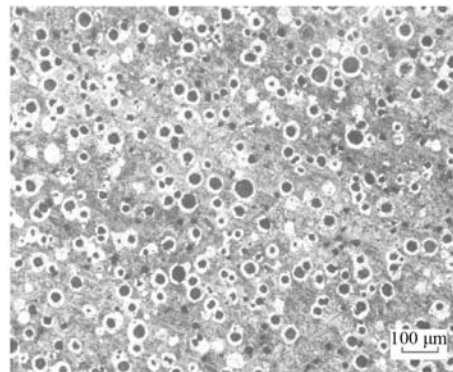


图11 球化率和石墨大小(未侵蚀)
Fig. 11 Vermicularity and graphite size

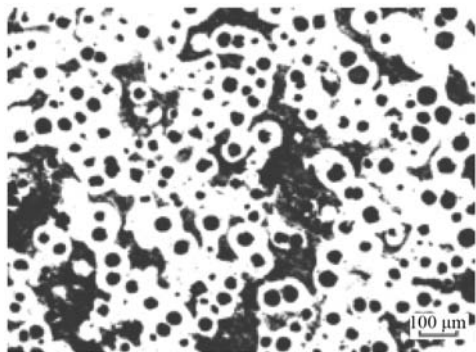


图12 基体组织(侵蚀)
Fig. 12 Metallographic structure

表5 力学性能检测结果
Table 5 Mechanical properties of tested results

试样号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	表面硬度HB
1	675	413	6.3	220
2	734	441	5.3	230
3	733	420	6.6	222
4	710	403	7.6	203
5	665	406	5.1	218

3.4 禁用有害物质检测

对从铸件本体上取下的试样,通过分光光度计辅以化学分析法进行检测,检测结果表明各有害元素含量均符合禁用物质要求,具体数值如表6所示。在IMDS系统中创建了该汽车换挡拨叉的材料数据库,IMDS报告已获得客户书面批准。

表6 禁用物质
Table 6 Prohibited substances w_B /%

项目	镉	六价铬	铅	汞
规定值	< 0.01	< 0.10	< 0.10	< 0.10
实测值	0.007	< 0.038	0.019	< 0.021

3.5 外观检查和内部质量

(1) 外观检查:采用通过式悬挂型抛丸机作为抛丸设备,向抛丸机内加入粒度为0.8~1.2 mm的合金钢丸,加入量为钢丸总重量的50%,再向抛丸机内加入粒度为0.7~1.0 mm的切丝钢丸,加入量也为钢丸总重量的50%。然后启动抛丸机对铸件进行抛丸处理。抛丸后,对每批生产的铸件实行100%目视检测,对比粗糙度样块,铸件表面平均粗糙度可以达到35~65 μm ,满足客户在铸件图纸上规定的< 100 μm 的要求。

(2) 球化率声速测定仪检测。声速测定仪又称球化率检测仪,是利用超声波原理将铸件作为导体材料,通过已知被测铸件部位的厚度,声速测定仪就会

测出声波穿过铸件的具体速度,这个速度即是我们通常所说的声速,然后,通过声速值推导出实际铸件的球化率^[12]。因为该汽车换挡拨叉铸件的主要壁厚在33 mm左右,声速测定仪检测的铸件平面部位的厚度为16 mm,通过大量试验结果数据对比分析,最终将声速值范围控制在:5 350~5 500 m/s,测出的声速值如果在这个范围内,即表明铸件的球化率达到了90%~95%之间。使用声速测定仪对每个铸件进行声速值测定时,还可间接得出所测铸件部位内部组织是否致密无缺陷,如果所测铸件的声速值过低,即表明铸件内部有孔洞类缺陷的存在。

(3) X光射线检测。采用通过式X光射线检测设备,针对铸件进行无损探伤检测,检测结果表明,所有铸件内部缺陷均符合ASTM-E689标准中 ≤ 2 级的要求,实际通过X光流水线射线检测,均未发现铸件内部有缩松类缺陷的存在。X光射线检测结果如图13所示。

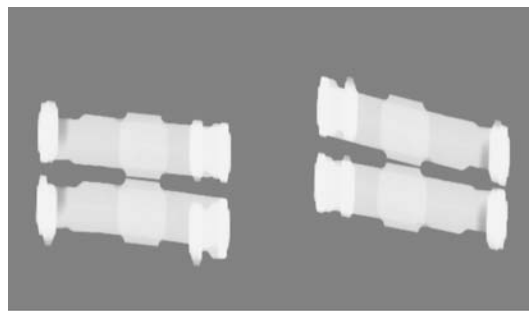


图13 X光射线检测结果
Fig. 13 X-ray result

(4) 磁粉探伤检测。为了检测铸件上是否有肉眼无法识别的裂纹类缺陷存在,采用通过式磁粉探伤机,针对铸件所有部位进行检测。该磁粉探伤机不管是对凝固过程中产生的热裂纹还是在凝固结束后因为应力等因素导致的冷裂纹,都能得到明确的识别,检测结果表明所有铸件均未发现有裂纹和其他裂痕类缺陷。磁粉检测结果如图14所示。



图14 磁粉检测结果
Fig. 14 MPI result

从上述对铸件本体的各项检测结果来看,该汽车换挡拨叉铸件的化学成分、金相组织和力学性能以及外观和内部质量等,均符合客户要求。

4 结束语

(1)从模拟分析和铸件本体检测结果表明:采用优化的铸造工艺所生产的换挡拨叉铸件的力学性能和内部质量检测结果等均符合客户提出的各项要求。通过对多个月份多批次铸件本体的相关检测验证和可靠性分析,均确定该工艺生产的铸件符合铸件设计的初始要求。

(2)从整体结果来看,虽然各项指标均满足客户的要求。铸造工艺系统从最初的一型两件改为三件,经过了两次改善但最终的金属液利用率也只有54%。

下一步,公司考虑在不改变现有造型设备的基础上,浇注系统工艺计划沿用首次更改后的一型三件形式,在两个铸件之间放置覆膜砂隔板芯,这样就可以将一型三件改为一型六件;同时,由于覆膜砂隔板芯的应用提高了铸型强度,可有效防止铸件扭曲变形,这样还可以将连接铸件上、下端叉脚部位的防变形拉筋去掉,减少金属液消耗、进一步提高金属液利用率。通过计算,使用覆膜砂隔板芯,虽然可将工艺布局从一型三件改为一型六件,也势必要在满足浇注条件的情况下加大浇注系统中各组元的体积,但是,如果以上两种方案能够同时实施的话,最终金属液利用率至少可达66%以上。必要的情况下,拟通过更多的方法进一步探讨和试验满足客户要求的球墨铸铁换挡拨叉的生产可行性。

参考文献:

- [1] 任现伟. 浅析铸件设计对铸造企业的重要性[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(4): 54-57.
- [2] 任现伟. 高韧球墨铸铁离合器飞轮铸造工艺设计与实践[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 696-700.
- [3] 胡占军, 白图雅, 贺金祥. 垂直分型无箱射压造型线设计问题探讨[J]. 铸造, 2009, 58(7): 750-751.
- [4] 任现伟. 蠕墨铸铁离合器压盘的铸造工艺研究与实践[J]. 铸造, 2020, 69(5): 533-540.
- [5] 任现伟. DISA线生产优质铸件的工艺技术与应用[J]. 铸造, 2019, 68(7): 777-781.
- [6] 任现伟. 两种不同铸件一模铸造的工艺设计与实践[J]. 铸造, 2019, 68(11): 1292-1298.
- [7] 梁冰利, 叶根. 基于MAGMA的耐磨铸球凝固过程温度场数值模拟[J]. 铸造, 2017, 66(5): 489-490.
- [8] 任现伟. 粘土湿型砂质量的研究与控制[J]. 铸造技术, 2019, 40(12): 1307-1309.
- [9] 任现伟. 增碳剂选择对合成铸铁组织性能影响的研究[J]. 中国金属通报, 2019(1): 178-179.
- [10] 任现伟. 高强度灰铸铁的生产技术[J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54(4): 51-54.
- [11] 张军, 解戈奇, 权国英, 等. 喂丝球化工艺在球墨铸铁生产线上的应用[J]. 铸造, 2019, 68(2): 128-131.
- [12] 刘鹏, 石德全, 李强, 等. 基于超声波的球铁球化率快速检测系统[J]. 铸造, 2015, 64(4): 321-324.

Research and Practice of Casting Process of Ductile Iron Gearshift Fork for Vehicle

REN Xian-wei

(Luoyang Gucheng Machinery Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract:

This paper introduced a casting process of ductile iron gearshift fork for vehicle. This process is based on the premise that only two castings can be placed in one mold, and the mold is arranged into three pieces by using the method of vertical placement and single feeder for each casting without changing the molding equipment. And a casting process is designed to meet the requirements of customers, through simulation analysis and practice verification, the castings meet all the requirements of customer specified standards. Currently, the conditions for mass production have been met.

Key words:

ductile iron; gearshift fork; casting