

# 两种不同铸件一模铸造的工艺设计与实践

任现伟

(洛阳古城机械有限公司, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 介绍了一种防护杆和适配器的一模铸造工艺方法。该工艺是采用DISA230B垂直分型无箱造型机, 将两种不同铸件布置在一套模具上成型。此工艺经模拟分析和试生产验证, 制作的铸件满足客户要求, 可以投入批量生产。

**关键词:** 防护杆; 适配器; 铸造; 热处理

随着我国汽车装备制造业技术能力的不断提高, 汽车关键零部件的自主化生产和出口业务量也在不断地增长。本研究中的防护杆和适配器铸件是某款汽车底盘悬挂系统中的关键部件, 在系统中起着缓冲器的连接和保护作用, 有较高的技术质量要求。与目前生产的其他汽车同类铸件相比, 在铸件工艺设计和生产管控中存在着非常大的难度。

## 1 铸件主要技术要求

铸件材料: 符合DIN EN1563: 2005标准的EN-GJS-400-18-LT; 防护杆的单重为4 kg, 主要壁厚10 mm, 最厚处24 mm, 局部壁厚6 mm; 适配器的单重为0.4 kg, 主要壁厚7 mm, 最厚处32 mm, 局部壁厚仅为3 mm。主要技术要求如下。

(1) 金相组织: 球化率 $>85\%$ , 游离渗碳体和碳化物(体积分数) $<1\%$ ; 珠光体(体积分数) $<30\%$ 。

(2) 力学性能: 铸件本体试样抗拉强度 $R_m \geq 400$  MPa, 屈服强度 $R_{p0.2} \geq 240$  MPa, 伸长率 $A \geq 18\%$ , 硬度: HBW 130~175, 低温冲击吸收功 $A_{KV}$ (三个试样平均值) $\geq 12$  J, (个别值 $\geq 9$  J),  $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

(3) 化学成分: 除了其他成分要满足要求外, 客户特别要求Si含量必须 $<2.70\%$ , 禁用有害物质, 检测符合要求。

(4) 要求铸件做球化率声速测定、MT、PT和X-ray探伤检测, 铸件要求无裂纹、无缩孔、缩松; 表面不允许有任何影响镀锌和装配的砂眼、渣孔等缺陷, 铸件表面粗糙度 $<Ra25$ 。

## 2 一模两种铸件铸造工艺的优点

铸造生产采用中频感应电炉熔炼, 喂线法球化处理, DISA230B垂直分型无箱造型机造型<sup>[1]</sup>, 底注式浇注机浇注及台车型电阻热炉热处理。造型机型板尺寸为650 mm × 535 mm。

按以往设计, 每模只能放置一种铸件, 两种铸件就需要设计两种工艺, 制作两套模具。由于DISA造型机造型仓室尺寸的限制, 防护杆铸件每模只能放置两件, 见图1所示。适配器铸件虽能放下8件(见图2), 但每个铸件的型腔质量和充型压力却大为不同, 铸件产生砂眼、渣孔和局部机械粘砂缺陷几率较高。

新工艺每模设计为4件, 分别是2件防护杆和2件适配器, 每2个铸件之间共用一个过热冒口, 在每个铸件下方易产生缩松的部位另单独设置一个过热冒口, 见图3所示。

作者简介:

任现伟(1980-), 男, 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: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)11-1292-07

收稿日期:

2019-03-18 收到初稿,  
2019-06-11 收到修订稿。

重新设计新工艺是考虑到：防护杆的单重为4 kg，适配器的单重仅为0.4 kg，由于这两种铸件的重量差达到了10倍，铸件的总体壁厚都较薄，形状较为复杂，并且铸件热节部位较多，为了能够实现同时充型、顺序凝固，避免游离渗碳体和缩松等缺陷产生。新工艺设计为在一个大的铸件内侧上方放置一个小的铸件，这样的两个铸件称为一组铸件。相对模板垂直中心线，左侧的一组铸件主要部分放置在模具正压板，右侧的一组铸件主要部分放置在模具反压板，实现左右完全对称放置。由于大的和小的铸件下方均有一个无法完全靠自补缩的热节存在，故在每个铸件的热节处均设置了一个过热冒口。考虑到铸件表面质量要求较高，避免连接过热冒口的浇道带入金属熔渣，将所有连接过热冒口的浇道厚度设计为2 mm，同时也起到了减压和缓冲的作用。

上述新工艺的主要优点为：

(1) 采用每模两种铸件各2件共4件，与原工艺相比，节省1块模板。同时，原工艺因为两种铸件之间的壁厚差异较大，需要分别设计不同的化学成分球化铁液浇注，现在只需要一种铁液，方便了生产管理。

(2) 在凝固过程中，因为两种铸件壁厚的差异较大，大铸件对小铸件起到了保温作用，有利于大铸件和小铸件同时凝固，避免大铸件冷却过慢产生缩松缺陷，同时缓解小铸件（适配器最小壁厚只有3 mm）冷却过快产生边缘游离渗碳体和碳化物缺陷。

(3) 采用过热冒口可以在减小冒口体积的同时避免冒口热量不足，引起补缩效果不佳产生微观疏松缺陷；与过热冒口连接的过热浇道厚度设计为2 mm，在减少铸件产生砂眼、渣孔缺陷的同时也有利于浇、冒口的分离。

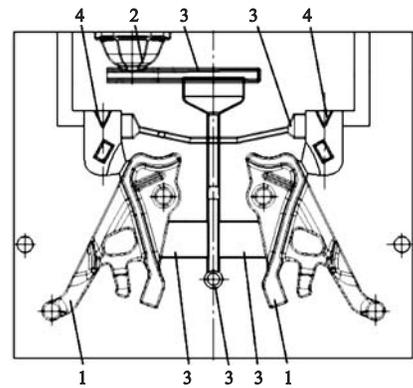
### 3 试生产验证

#### 3.1 铸造工艺过程

铸件铸造工艺过程从砂处理、熔炼等到最终的成品包装入库、交付<sup>[2]</sup>，共设计为18道工序，具体的铸造过程流程图见图4。

#### 3.2 计算机数值模拟

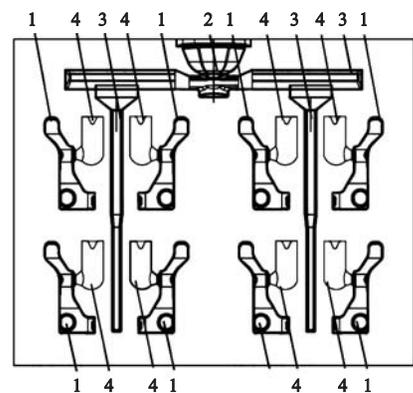
使用大型工作站计算机，采用MAGMA模拟软件对设计的铸件铸造工艺进行充型和凝固过程数值模拟。该方法是利用有限元分析技术对所建立的三维CAD模型进行数值化模拟，主要是对充型过程、凝固过程和缩孔、缩松、冲砂等缺陷的过程和结果的模拟分析<sup>[3]</sup>。在选择了DISA生产线的基本条件后，将所有导入的STL文件进行网格化的剖分，总共剖分了1 200多万个网格。输入设计的金属液化学成分、浇注温



1. 铸件 2. 浇口杯 3. 浇道 4. 冒口

图1 防护杆原始铸造工艺图

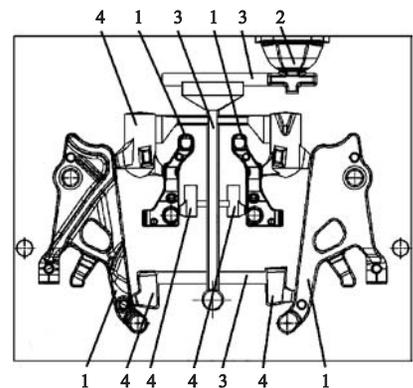
Fig. 1 Original casting process of crash bar



1. 铸件 2. 浇口杯 3. 浇道 4. 冒口

图2 适配器原始铸造工艺图

Fig. 2 Original casting process of adapter



1. 铸件 2. 浇口杯 3. 浇道 4. 冒口

图3 改进的铸造工艺图

Fig. 3 Improved casting process with crash bar and adapter in a mold

度和浇注时间等初始条件,定义各组元之间的换热系数、材料边界条件、热物理参数以及落砂温度等参数后,启动历时10 h左右的模拟过程。模拟结束后的温度场分布和铸件缩孔缩松状况见图5和图6所示。数值模拟结果表明,模板工艺设计可行。

### 3.3 熔炼、球化孕育处理

采用酸性炉衬的4 t中频感应电炉熔炼。废钢全部采用低Mn、低Cr、无油污、无锈迹的冲压钢板边角料,一般废钢长度不超过300 mm;生铁为Q10;回炉料用QT400-15和QT400-18材质的浇注系统和废品铸件,而且需经完全抛丸处理,未经抛丸处理的回炉料也可在清理滚筒中,采用相互撞击的方法去除表面粘砂;增碳剂用低S、吸收率高的石墨<sup>[4]</sup>。炉料配方为:50%废钢+40%回炉料+10%生铁+增碳剂,增碳剂随废钢一起加入电炉,确保完全溶解和充分吸收。主要的熔炼过程参数如表1所示。

采用600 kg铁液包喂线球化处理。选用高Mg低RE包芯线做为球化剂<sup>[5]</sup>,Mg含量为30%~32%,RE含量为2.0%~2.5%,必须严格控制球化前铁液中的S含量<0.025%。使用直径为 $\Phi 13$  mm、密度为380~420 g/m的包芯球化线,为保证球化必须的残留Mg量,应确保

包芯球化线中的中芯粉的加入量控制在0.60%。由于铸件热节部位多,为防止残留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 °C,反应时间在40~60 s,浇注温度控制在1 420~1 360 °C。喂线球化过程中必须盖严包盖,减少球化反应过程中富含Mg元素的铁液溅出包外并有利除尘、抽烟,保证残留Mg含量在0.03%~0.04%。此外,还必须注意确保每包铁液的出炉温度、出铁重量和铁液周转时间的一致性。喂线球化处理工艺参数见表2。

孕育处理:分三次孕育。处理前原铁液Si控制在1.50%~1.60%,达到出铁温度时,出炉过程中进行一次孕育,加入粒度为2.60~4.5 mm的70SiFe孕育剂0.40%;球化处理后铁液倒入浇注包,随流进行二次孕育,加入粒度为0.60~2.5 mm的75SiFe0.40%;浇注时瞬时随流孕育加入粒度为0.2~0.5 mm的75SiFe0.25%。

### 3.4 热处理

为了分解珠光体、增加获得塑性高的铁素体组织,提高伸长率,缩小铸件不同部位及表面和心部的硬度差,消除铸造应力,在退火后最终获得铁素体为主+少量珠光体+石墨的铸件金相组织,将热处理退火温度设计在790~810 °C范围内。铸件入炉加热至退火

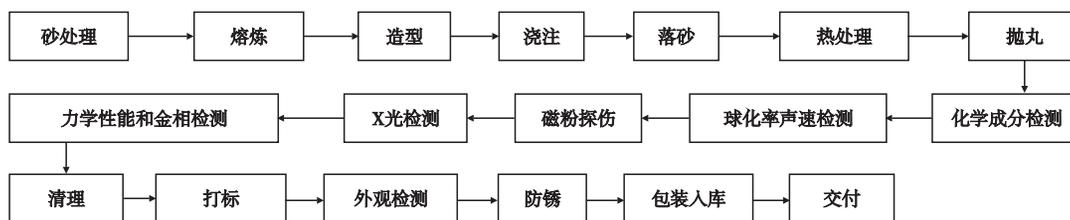


图4 铸造过程流程图

Fig. 4 Casting process flow chart



图5 温度场模拟

Fig. 5 Temperature field simulation



图6 缩孔缩松分布模拟结果

Fig. 6 Simulation results of shrinkage and dispersed shrinkage distribution

温度，待保温时间到达之后，关闭炉内加热电源，随炉冷却<sup>[6]</sup>，采用缓冷是为了避免冷却过快再次产生新的应力。随炉冷却降温速度为每小时60~80℃，当温度降至300℃的时候，出炉空冷。退火热处理工艺见图7所示。

采用整体装框热处理方式，将铸件均匀整齐码放于热处理专用框内，高度以不超过热处理框上边沿为准。小件放置于大件之间可以垫平大件，有利于顺序码放，并且可以合理利用框内空间。码放过程中，对热处理框上层的四角和下层的四角以及中心部位的共计9件铸件做好标记，用于热处理后本体力学性能的检测，标记部位见图8所示。

使用台车型电阻炉，微机控制程序控制炉内每一根热电偶的加热温度，确保炉内温度均匀性的前提下，保证热处理时候的升温速度、保温温度、保温时间以及降温速度、降温温度、降温时间。正式送电升温前，要确保每个热电偶处于可正常工作状态。关闭炉门后，检查炉门与炉体密封处的密封状态符合最小间隙范围要求，避免间隙过大，导致局部温度下降。送电升温开始后，升温和保温过程中应通过计算机输出显示屏，注意观察炉内各个部位的炉温变化；出炉后，在铸件降至室温前，必须做好防护处理，避免接触到比车间环境温度更低的任何物体。

### 3.5 化学成分、金相组织及力学性能检测

(1) 化学成分。按照设计的化学成分要求，采用PDA5500IV光谱分析仪对生产的铸件本体试样进行了化学成分检测。化学成分实际检测结果见表3所示。由于检测设备检测通道的不足，不能对试样中氮、氧等微量元素进行检测。

(2) 金相组织。使用BM4XA II金相显微镜，依据ASTM1245-2003标准，对铸件本体金相进行检验，图9结果显示：石墨球化率为90%，石墨大小：5~7级。图10结果显示：基体组织主要为细铁素体，珠光体（体积分数）<30%，未发现有游离渗碳体和碳化物存在。

此外，还进行球化率声速测定仪在线检测，表明

表1 熔炼过程参数  
Table 1 Melting process parameters

取样温度 /℃	静置温度 /℃	静置时间 /min	出炉温度 /℃	出铁重量 /kg
1 430 ~ 1 490	1 535 ~ 1 545	3 ~ 5	1 510 ~ 1 530	595 ~ 605

表2 喂线球化处理工艺参数  
Table 2 Spheroidizing process parameters

喂线长度 /m	喂线速度 / (m · min <sup>-1</sup> )	喂线前温度 /℃	反应时间 /s	喂线后温度 /℃
14 ± 0.15	20 ± 0.2	1 460 ~ 1 480	40 ~ 60	1 425 ~ 1 445

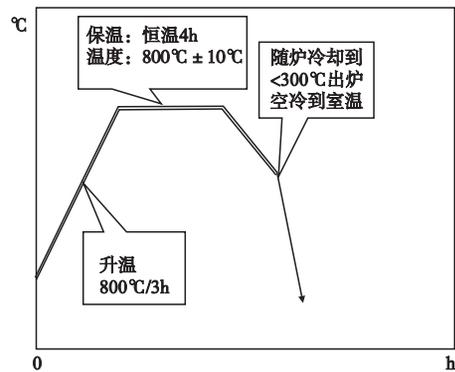


图7 退火处理工艺  
Fig. 7 Annealing heat treatment process

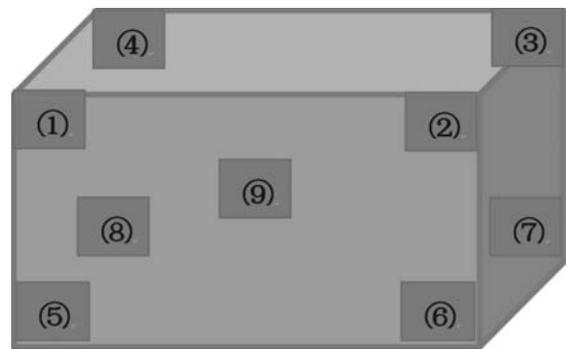


图8 检测力学性能的铸件在热处理框中的位置  
Fig. 8 Locations of castings placed in heat treatment box

表3 化学成分检测结果  
Table 3 Chemical composition analysis results

序号	C	Si	Mn	Cu	P	S	Cr	Ni	Ti	V	Al	Mg <sub>残</sub> /%
1	3.883	2.462	0.381	0.572	0.034	0.015	0.023	0.016	0.022	0.014	0.011	0.038
2	3.885	2.470	0.404	0.538	0.037	0.016	0.022	0.017	0.025	0.011	0.012	0.036
3	3.880	2.541	0.341	0.627	0.039	0.019	0.027	0.016	0.028	0.010	0.010	0.039
4	3.890	2.520	0.403	0.609	0.038	0.014	0.026	0.018	0.027	0.017	0.012	0.034
5	3.872	2.518	0.408	0.602	0.036	0.018	0.025	0.019	0.026	0.013	0.013	0.035

铸件的球化率达到了85%以上。

(3) 力学性能。使用微机控制电液伺服万能试验机对热处理后的铸件进行力学性能检测，拉伸试样的尺寸见图11所示；采用10 mm×10 mm×55 mm V型缺口试样，在冲击试验机上检测低温冲击吸收功。力学性能检测结果见表4。

### 3.6 禁用有害物质检测

通过化学分析辅以分光光度计检测，经过测定，有害元素含量符合禁用物质要求，具体数值如表5所示。在IMDS系统中创建了我公司的材料数据库，IMDS报告已得到了批准。

### 3.7 外观检查和内部质量

(1) 外观检查。对于热处理后的铸件，采用通过式悬挂型抛丸机，使用粒度为0.8~1.2 mm的合金钢丸对热处理后的铸件进行抛丸。抛丸后，对每批生产的铸件实行100%目测检查，以防表面粗糙度不合格和表面带有砂、渣孔缺陷的铸件发往客户，造成客户镀锌不良。对比粗糙度样块，铸件表面平均粗糙度可达到15~22 μm，满足客户规定的<25 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，通过声速值推导出实际铸件的球化率<sup>[7-8]</sup>。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。

由于所实测的铸件壁厚较薄，通过试验结果数据对比分析，最终将声速值范围控制在：5 510~5 700 m/s，测出的声速值在这个范围内，即表明铸件的球化率达到了85%以上。

(3) X射线检测。采用通过式X射线检测设备，针对铸件热节部位进行无损探伤，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，实际铸件内部缺陷均能达到该标准的1级要求。X射线

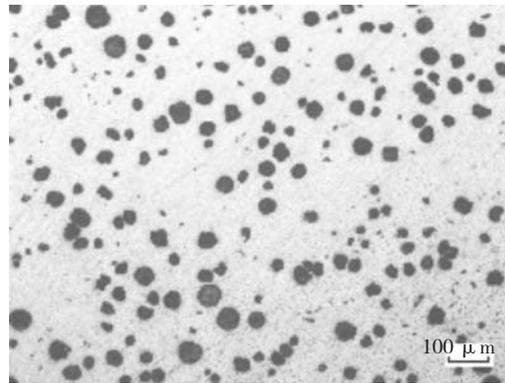


图9 球化率和石墨大小(未侵蚀)  
Fig. 9 Nodularity and graphite size (unetched)

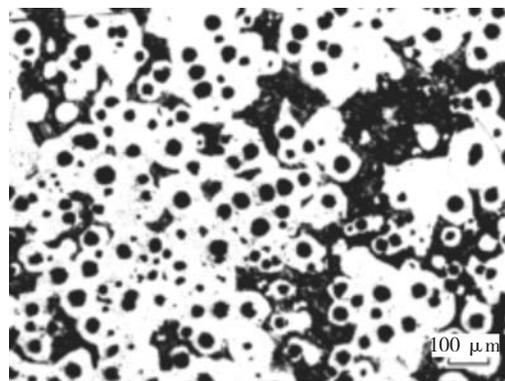


图10 基体组织(侵蚀)  
Fig. 10 Metallographic structure (etched)

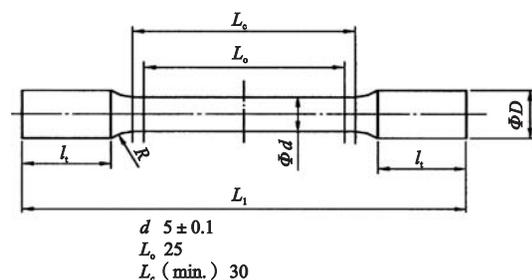


图11 拉伸和冲击试样尺寸  
Fig. 11 Dimensions of tensile and impact specimens

表4 力学性能检测结果  
Table 4 Mechanical properties of heat treated specimens

试样号	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 $A$ /%	冲击吸收功 $A_{KV}$ /J	表面硬度HB	心部硬度HB
1	498	343	20	15	160	146
2	511	339	21	16	165	153
3	492	330	22	17	168	162
4	502	345	20	16	165	152
5	489	360	19	15	158	149

注：1.铸件本体试样检测结果；2.冲击吸收功为三个试样平均值。

检测结果如图12和图13所示。

(4) 磁粉探伤检测。采用通过式磁粉探伤机, 针对铸件所有位置进行检测。从检测结果看, 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和图15所示。

(5) 热节部位PT探伤。按照检测作业指导书的要求, 将铸件从易产生疏松的热节中间部位切开, 通过着色检测的方法进行破坏性检测试验。从实际生产中被检测铸件的检测结果来看, 没有发现有任何缩孔、缩松和疏松类缺陷。从铸件本体的检测结果来看, 两

表5 禁用物质

Table 5 Prohibited materials				$w_B/\%$
项目	铅	镉	汞	六价铬
规格值	< 0.10	< 0.01	< 0.10	< 0.10
实测值	0.010	0.004	< 0.010	< 0.021

种铸件的化学成分、金相组织和力学性能以及外观和内部质量等, 均符合客户在供货合同中指定的具体要求和图纸中规定的材料标准要求。



图12 防护杆X射线检测结果

Fig. 12 X-ray inspection result of crash bar

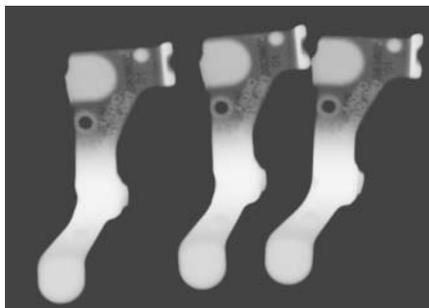


图13 适配器X射线检测结果

Fig. 13 X-ray inspection result of adapter



图14 防护杆磁粉检测结果

Fig. 14 MPI result of crash bar



图15 适配器磁粉检测结果

Fig. 15 MPI result of adapter

## 4 结束语

使用新设计的铸造工艺所生产的防护杆和适配器两种铸件力学性能和探伤质量检测等均符合客户的供货合同和材料标准要求。通过对多批铸件本体的相关检验验证和可靠性分析, 以及随着客户对PPAP资料的批准, 该工艺已经能够投入批量生产。

从整体结果来看, 虽然各项指标均满足客户要

求, 但最终铸件本体的抗拉强度为489~511 MPa、屈服强度为330~360 MPa, 较大地超过了标准要求的 $\geq 400$  MPa和 $\geq 240$  MPa, 然而伸长率却较低, 为19%~22%。下一步, 将从铸件力学性能的实际要求和降低生产成本出发, 调整目前的化学成分和热处理工艺, 以适当降低抗拉强度和屈服强度, 提高伸长率和低温冲击韧性。必要的情况下, 拟进一步探讨和试验满足出口要求的铸态低温球墨铸铁件的可能性。

**参考文献:**

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 《热处理手册》编委会. 热处理手册: 第2卷 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2001: 9-18.
- [7] 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.
- [8] 喻光远, 肖恭林, 陈琳, 等. 高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (3): 258-263.

---

## Design and Practice of Casting Process for Two Different Castings in One Mold

REN Xian-wei

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

**Abstract:**

The paper presents the casting process of the crash bar and the adapter in one mold, in which two different castings were arranged on a set of mold when the molding was conducted on the DISA230B vertical parting flaskless molding machine. Through simulation analysis and trial production verification, the castings produced can meet customer requirements. It is feasible for mass production.

**Key words:**

crash bar; adapter; casting; heat treatment

---