

# 鞍座支架以铸代焊工艺设计与性能分析

王海啸<sup>1</sup>, 丛建臣<sup>1, 2</sup>, 丛子凌<sup>2</sup>, 王进玲<sup>1</sup>, 朱帅伦<sup>1</sup>, 袁伟<sup>1, 2</sup>, 池宝涛<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学, 山东淄博 255000; 2. 天润工业技术股份有限公司技术中心, 山东威海 264400)

**摘要:** 针对传统钢板焊接工艺生产的鞍座支架在焊缝处存在应力集中和晶粒组织粗大、易发生疲劳断裂等问题, 提出了以铸代焊工艺技术方​​案。通过对铸造充型和凝固过程仿真分析, 发现在限位挂钩处出现微小缩松、缩孔缺陷, 总体积约为 $0.32\text{ cm}^3$ 。进一步通过有限元方法对缺陷位置进行应力分析, 发现该缺陷处应力仅为 $5\text{ MPa}$ , 不会影响铸件整体性能。利用所提方案进行试铸试验, 并测试了试铸件的抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度等指标均符合设计要求, 珠光体含量为80%以上, 铸件承受的最大应力为 $60\text{ MPa}$ , 远小于材料的许用应力, 铸造鞍座支架疲劳寿命是钢板焊接鞍座支架的1.2倍。试验结果表明: 铸造鞍座支架整体性能优于钢板焊接鞍座支架。

**关键词:** 以铸代焊; 球墨铸铁; 鞍座支架; 铸造工艺; 性能分析

## 作者简介:

王海啸(1997-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铸造工艺优化。E-mail: haixiaow@163.com

## 通讯作者:

丛建臣, 男, 教授, E-mail: jhcong@tianrun.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)06-0724-07

## 基金项目:

国家自然科学基金(12202251, 51805299); 中国博士后科学基金(2022M712393, 2021M702024); 山东省重点研发计划项目(2019GGX104081和2019GGX104033)。

## 收稿日期:

2022-09-28 收到初稿,

2022-10-20 收到修订稿。

鞍座支架是橡胶悬架的重要连接部件, 其同时承受来自车身、底板等多个复杂作用力, 易发生疲劳断裂。因此, 鞍座支架可靠性能与寿命的提高对整体质量的提升具有显著效果。传统鞍座支架由多块钢板焊接组成, 整体稳定性较差。此外钢板材质一般采用低碳合金钢Q345B, 较为笨重。最为关键的是, 在焊接过程中不可避免产生热影响区, 晶粒组织变得粗大, 焊缝处极易产生应力集中和变形<sup>[1-2]</sup>, 造成脱焊甚至断裂。可以说, 焊接工艺直接影响鞍座支架寿命。而且, 焊接变形容易导致装配困难<sup>[3]</sup>, 极大提高了生产成本。受技术水平限制, 焊接工艺改进很难带动鞍座支架整体质量、可靠性、效益的全面提升。相反, 铸造构件一体化, 可避免焊接工艺带来的各种风险, 同时降低生产成本。因此, 本文提出以铸代焊制造球墨铸铁鞍座支架, 以提高其整体的质量和力学性能。

目前, 国内外学者对以铸代焊研究相对较少, 刘继广等<sup>[4]</sup>针对传统焊接工艺导致焊缝处力学性能不一致及焊接成本高等问题, 提出以铸代焊的工艺方法, 采用熔模铸造工艺, 一次铸造成形, 能够有效提高挂架的质量。武玉平<sup>[5]</sup>针对装甲装备在焊接部位容易造成应力集中和晶粒组织粗大, 提出无模一体化铸造的技术创新, 成功解决了原装甲装备“分体铸造, 一体焊接”加工过程存在的质量问题, 经检测符合重型装甲装备的工况要求。李明等<sup>[6]</sup>对三维静叶隔板以铸代焊的工艺方法进行研究, 试制检测结果表明: 各项参数达到技术生产要求。以上研究表明, 一体化铸造工艺可以代替焊接工艺。

因此, 本文针对鞍座支架尺寸大且薄壁的特点, 研究浇注工艺方案, 利用AnyCasting仿真对鞍座支架的充型和凝固过程进行模拟分析, 预测缩松、缩孔缺陷位置, 利用ABAQUS软件对缺陷位置进行应力分析, 通过力学性能检测、金相组织分析、静强度试验和疲劳试验, 验证工艺方案的合理性, 为其他产品生产过程中以铸代焊提供一定参考。

## 1 鞍座支架结构

鞍座支架三维结构如图1所示, 外形轮廓为 $755\text{ mm} \times 580\text{ mm} \times 322\text{ mm}$ , 平均壁厚为 $10\text{ mm}$ , 型腔处最大壁厚为 $30\text{ mm}$ 。该鞍座支架内部型腔较大, 属于中大型复杂

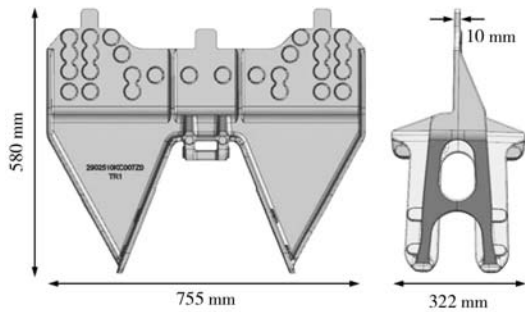


图1 鞍座支架三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of saddle support

薄壁件。铸造件材质设计为QT700-6，主要成分如表1所示。QT700-6属于珠光体型球墨铸铁，强度耐磨性较好，在韧性方面，虽略低于钢板材料Q345B，但高于普通球墨铸铁。经计算鞍座支架焊接件质量为69.5 kg，铸造件质量为60.3 kg，质量降低了13.2%，满足轻量化设计。

## 2 铸造工艺方案设计与可行性分析

### 2.1 铸造工艺方案设计

由于在浇注过程中产生的杂质会上浮，本文提

表1 QT700-6的化学成分  
Table 1 Chemical composition of QT700-6

| C       | Si      | Mn   | S          | P     | Mg          | Cr    | Cu      | Mo    | $w_B / \%$ |
|---------|---------|------|------------|-------|-------------|-------|---------|-------|------------|
| 3.5~3.9 | 1.8~2.1 | 0.35 | 0.006~0.02 | ≤0.05 | 0.035~0.055 | ≤0.05 | 0.4~0.6 | ≤0.15 |            |

出采用两箱造型，将装配面设计在下箱，以保证铸件质量。由于鞍座支架结构复杂且壁薄，冒口无安放位置。因此，设计采用无冒口铸造方式。同时，针对鞍座支架的薄壁特点，为保证浇注过程中平稳充型和顺序凝固，设计了底注式和分层注入式相结合的封闭式浇注系统，浇注时间为14 s。

由于鞍座支架尺寸较大且壁薄，为保证金属液快速充满铸件型腔，本文设计了6个内浇道，一个环形横浇道，一个直浇道。以内浇道为节流截面，由计算可得 $\sum A_{内}=15.6 \text{ cm}^2$ ，根据浇注系统各组元的比例范围和铸件的尺寸大小，确定各组元的截面积比例为 $\sum A_{内} : \sum A_{横} : \sum A_{直}=1 : 1.65 : 1.9$ ，可以计算出， $\sum A_{横}=25.74 \text{ cm}^2$ ， $\sum A_{直}=29.64 \text{ cm}^2$ 。

在金属液流动过程中，悬浮在金属液内的杂质会同时进入型腔，产生砂孔和夹渣等铸造缺陷。因此，本文在横浇道前端设计过滤网，以拦截较大的杂质；在横浇道的末端设计集渣包，防止聚集在末端的细小杂质回游。另外，针对鞍座支架尺寸较大造成排气量大、易形成气孔缺陷的问题，本文在铸件型腔上设计了3个排气孔，在砂芯边缘处设计4个排气孔，以保证金属液内部气体快速排出<sup>[7-8]</sup>。根据上述分析，本文设计的鞍座支架铸件浇注系统如图2所示。

鞍座支架原材料为废钢和回炉料，采用“一拖二”中频感应电炉进行熔炼，铁液出炉温度控制在1 480~1 500 ℃。采用冲入法进行球化处理工艺，球化剂为稀土镁硅铁合金，孕育剂为75%的硅铁<sup>[9]</sup>，采用德国KW线粘土砂造型。球化后的铁液除渣后，采用自动浇注机浇注，浇注过程中进行随流孕育，浇注温度控制在1 380~1 390 ℃。

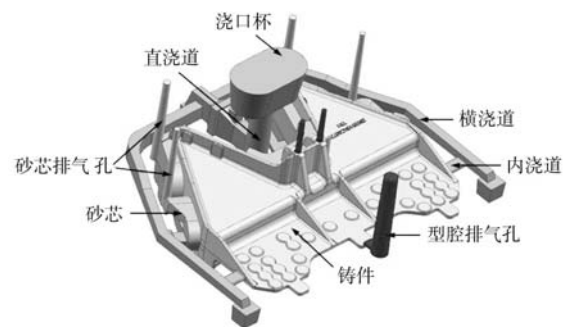


图2 浇注系统结构图

Fig. 2 Gating system structure diagram

### 2.2 充型和凝固过程数值模拟分析

#### 2.2.1 前处理设置

将铸件和浇注系统的三维模型导入AnyCasting软件的AnyPRE模块进行网格划分和参数设置。网格划分是否合理直接影响模拟分析结果，网格的数量和质量决定模拟分析的精确度<sup>[10-11]</sup>。因此，本文采用非均匀网格划分，得到网格总数约为2 500万。为提高模拟准确性，在薄壁处网格层数大于3层。铸型和型砂的初始温度设置为25 ℃，铸件与铸型间的换热系数设置为随温度变化，如表2所示。空气与铸件、铸型及型芯间的换热系数为 $41.87 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ <sup>[12]</sup>。材料的固相线温度为1 149 ℃，液相线温度为1 186 ℃。

表2 铸件与铸型的换热系数  
Table 2 Heat transfer coefficient between casting and mold

| 温度/℃   | 1   | 600 | 1 149 | 1 186 |
|--|-----|-----|-------|-------|
| 换热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 300 | 500 | 600   | 800   |

### 2.2.2 铸件充型和凝固过程分析

(1) 充型过程分析。鞍座支架充型过程如图3所示。当金属液在重力作用下由浇口杯通过直浇道、横浇道和六条内浇道进入型腔,即图3a和3b。此过程金属液流动速度较快,型腔处3个排气孔、砂芯处4个排气孔设计可使得型腔内气体顺利排出,防止气孔缺陷产生。当充型至70%时(图3c),铸件下型腔已全部充满,充型至加强筋上处,金属液在上升过程中无明显波动,充型过程平稳。随后,金属液充满铸型,如图

3d所示。从图3可看出,整个充型过程速度较快,无金属液飞溅、卷气和浇不足等现象。从充型过程温度场分布可以看出,在鞍座边缘处,金属液的温度仍在液相线以上,有利于后期顺序凝固。

(2) 凝固过程分析。通过对凝固过程模拟分析可以观察鞍座支架的凝固顺序和孤立液相区的位置,为预测缩松、缩孔缺陷提供一定参考<sup>[13-14]</sup>。本文鞍座支架的凝固过程如图4所示。由于鞍座支架型腔处砂芯存在透气性且壁厚较薄,在凝固初始阶段(图4a、b),型

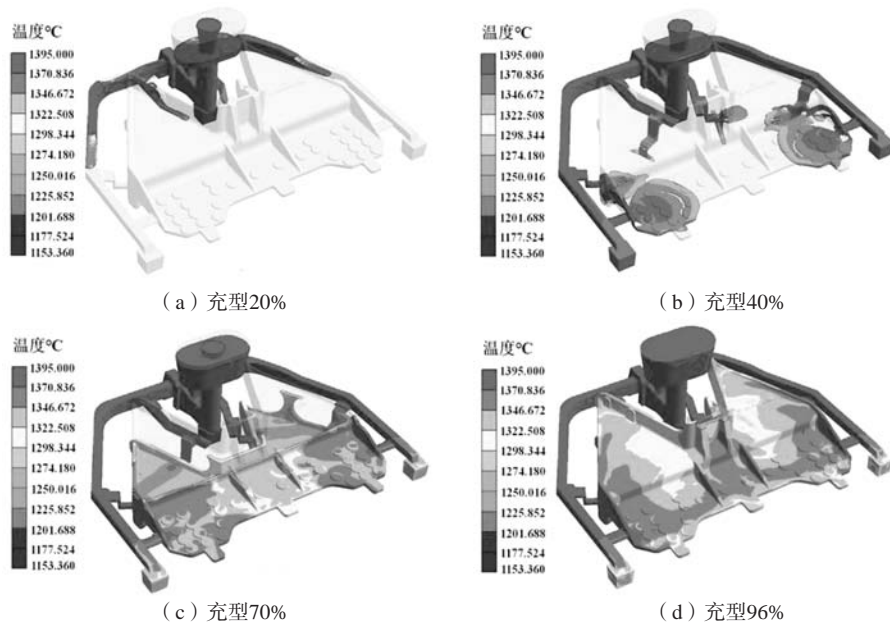


图3 充型过程温度场模拟

Fig. 3 Simulation of temperature field in filling process

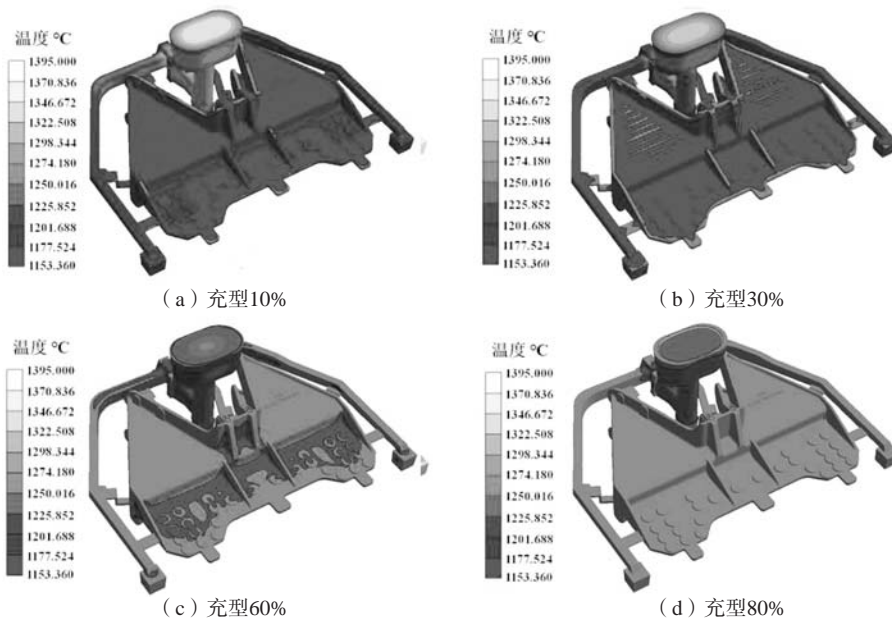


图4 凝固过程温度场模拟

Fig. 4 Temperature field Simulation of solidification process

腔处温度最先开始下降,随后铸件型腔和边缘位置开始凝固;当凝固至60%时,如图4c所示,由于铸件限位挂钩处厚度较厚且处于最高部位无法得到补缩会造成孤立熔池区,该位置容易形成缩松、缩孔缺陷。后期,对铸件的缩松、缩孔缺陷分析与测试,应主要关注此区。当凝固至80%时(图4d),鞍座支架铸件已全部凝固完成,浇注系统的直浇道和浇口杯最后凝固。从对整个凝固过程分析,本文设计的浇注系统及工艺方案是合理的,铸造过程中能够实现顺序凝固,除铸件限位挂钩处均能实现有效补缩。

### 2.2.3 缩松缩孔预测

利用RMM (Retained Melt Modules) 分析进一步判断缩松、缩孔缺陷的分布情况,该方法基于金属液在收缩时无法得到有效补缩而导致缩孔缺陷原理<sup>[15-16]</sup>。图5为铸件出现缩松、缩孔缺陷位置的预测结果。从图5可看出,在限位挂钩处确实出现微小缩松、缩孔缺陷,总体积约为 $0.32\text{ cm}^3$ 。结合凝固过程模拟结果,判断凝固后期限位挂钩处形成孤立液相区是造成此缺陷的主要原因。这是由于在凝固后期限位挂钩处形成孤立液相区导致的,这与凝固过程模拟结果相符合。

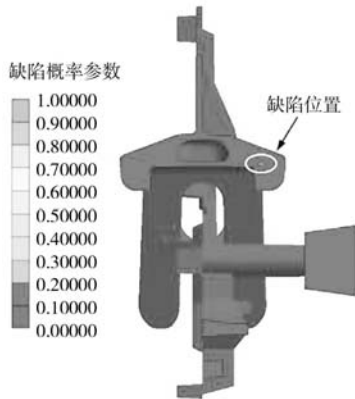


图5 模拟的铸件缩松、缩孔缺陷分布  
Fig. 5 Simulated shrinkage defect distribution in the casting

### 2.3 鞍座支架缺陷位置应力分析

为判断缺陷对鞍座支架性能影响,进一步进行鞍座支架整体应力分析。根据鞍座支架的真实受力情况,设计鞍座支架和工装组合三维模型如图6所示。将此三维模型导入ABAQUS软件进行应力分析。为提高网格精度,采用四面体自由网格,划分网格的单元类型为C3D10,网格大小设置为 $4\text{ mm}$ ,单元总数为 $947\ 428$ ,节点总数为 $207\ 125$ 。根据鞍座支架实际工况载荷,对工装1施加竖直向下 $325\text{ kN}$ 的载荷约束,仿真得到的应力云图如图7所示。由图7可看出,在缺陷位置处无应力集中,局部应力值仅为 $5\text{ MPa}$ 。由此,认为该位置处的缩松、缩孔缺陷对鞍座支架整体性能影响不大。

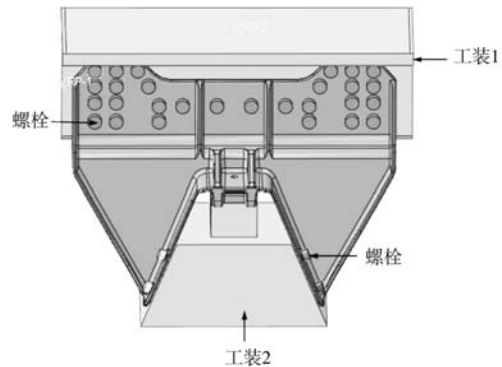


图6 鞍座支架和工装组合的三维模型

Fig. 6 Three dimensional model of saddle bracket and tooling combination

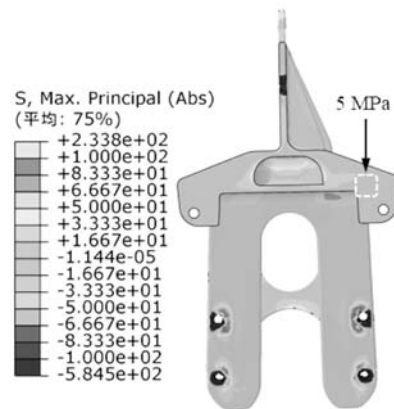


图7 鞍座支架缺陷位置应力云图

Fig. 7 Stress diagram of saddle support defect position

## 2.4 试铸件试验分析

采用以上铸造工艺方案进行试制浇注,得到的铸件成品如图8所示。试制铸件表面质量良好,无气孔、砂眼和夹杂等宏观缺陷。根据图4c凝固后期孤立液相区出现的位置,选取三个切割面(切割示意图如图9所示),从同批次的铸件中随机抽取进行切割检测。A位置截面(限位挂钩)发现缩松、缩孔缺陷,如图10所示,B、C位置截面均未发现缩松、缩孔缺陷,这与模拟预测的缺陷位置基本一致(对比图5),证明充型和凝固过程模拟分析的可信性。上文缩松、缩孔位置应力仿真分析结果表明,该缺陷处应力不集中且应力值较小,微小缺陷不会影响鞍座支架整体力学性能。因此,铸造过程充型、凝固、缺陷处应力仿真分析,以及试铸件剖切试验均证明了本文所提铸造工艺方案是可行的。

## 3 鞍座支架性能与疲劳寿命测试分析

### 3.1 力学性能测试分析

对焊接件和铸造件分别进行取样检测,拉伸试验在MTS型万能拉伸试验机上进行,硬度试验在布氏硬



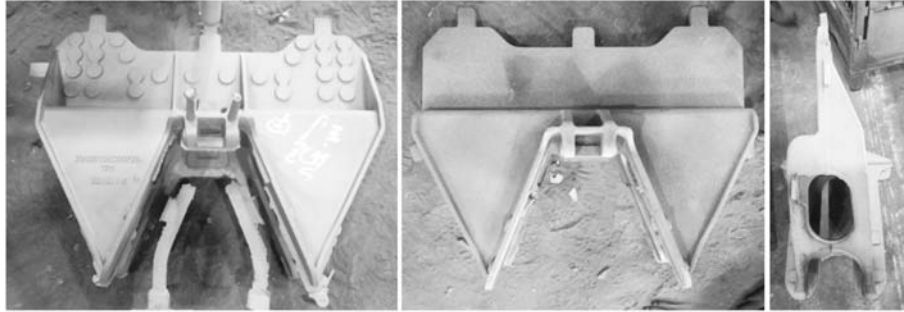


图8 铸件成品展示

Fig. 8 Exhibition of finished casting

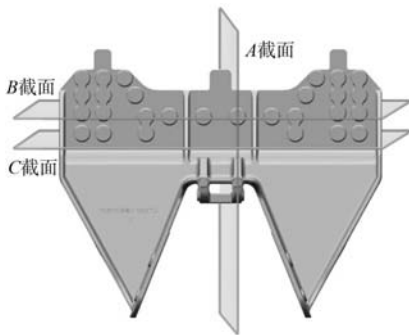


图9 铸件切割面示意图

Fig. 9 Casting cutting surface schematic diagram



图10 铸件实际缺陷位置

Fig. 10 Actual defect location of casting

度计HB-3000上进行。检测结果如表3所示，鞍座支架铸件的抗拉强度747 MPa，大于焊接件的490 MPa；屈服强度为425 MPa，大于焊接件370 MPa；伸长率为

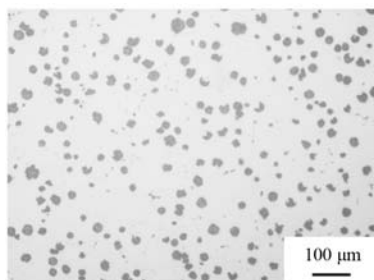
表3 鞍座支架铸造件和焊接件力学性能检测结果  
Table 3 Test results of mechanical properties of saddle bracket castings and weldments

| 生产工艺 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率A/% | 硬度HBW |
|------|----------|----------|--------|-------|
| 铸造   | 747      | 425      | 11     | 250   |
| 钢板焊接 | 490      | 370      | 17     | 160   |

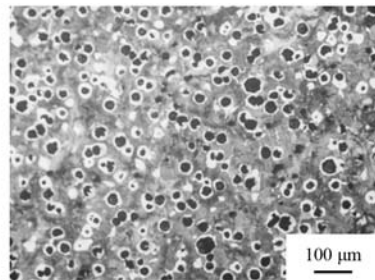
11%，小于焊接件17%；硬度为HBW 250，大于焊接件的HBW 160。综上所述发现，铸造鞍座支架的抗拉强度、屈服强度、硬度均高于焊接件，伸长率略低于焊接件，但大于设计要求6%。鞍座支架铸件总体力学性能符合设计要求。

### 3.2 金相组织检测分析

根据国标《球墨铸铁金相检验》(GB/T 9441—2009)要求，对试样打磨、抛光后，利用OLYMPUS型金相显微镜，观察组织球化情况，如图11a所示。可看出石墨球细小均匀，石墨大小等级为6级，球化率为85%。然后用4%硝酸酒精溶液腐蚀试样，观察其金相组织形态和珠光体含量，如图11b所示。可看出，基体组织主要由球状石墨、铁素体和珠光体组成，珠光体含量为80%。因此，腐蚀前后铸件能够满足鞍座支架生产金相要求。



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀后

图11 QT700-6材料腐蚀前后微观组织

Fig. 11 Microstructure of QT700-6 before and after corrosion

### 3.3 静强度测试分析

通过贴片试验获取鞍座支架上的应力分布情况, 试验在进口MTS六通道悬架试验装置上进行, 如图12a所示。应力贴片试验选取24个点测试应变, 位置如图12b所示, 在应变测量仪器上读取各测量点的应变, 由公式(1)计算测试点的应力。

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ 为应力;  $\varepsilon$ 为应变;  $E$ 为弹性模量。

静强度评价标准为: 在正常运行工况下, 最大应力不超过材料的许用应力<sup>[17]</sup>, 即

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (2)$$

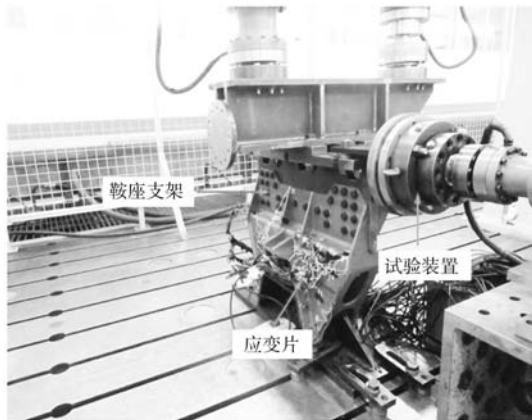
式中:  $\sigma_{\max}$ 为最大应力;  $[\sigma]$ 为许用应力, 由下式

(3) 计算得到。

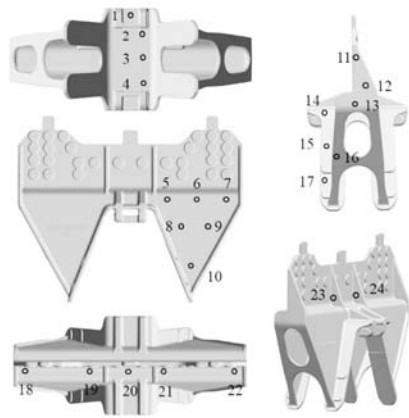
$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{\beta} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_s$ 为屈服强度, 本文测得该值为425 MPa (参考表3);  $\beta$ 为安全系数, 取值为2.5;

根据鞍座支架实际受力情况, 在竖直方向施加325 kN的载荷, 受力情况与有限元仿真相同, 测试点的应力检测结果如图13所示, 最大应力出现在测试点20位置, 其最大应力为60 MPa, 远小于材料的许用应力170 MPa。由此认为, 本文以铸代焊工艺制造的鞍座支架静强度满足设计要求。



(a) 鞍座支架应力试验装置



(b) 贴片位置

图12 静强度检测试验  
Fig. 12 Static strength test

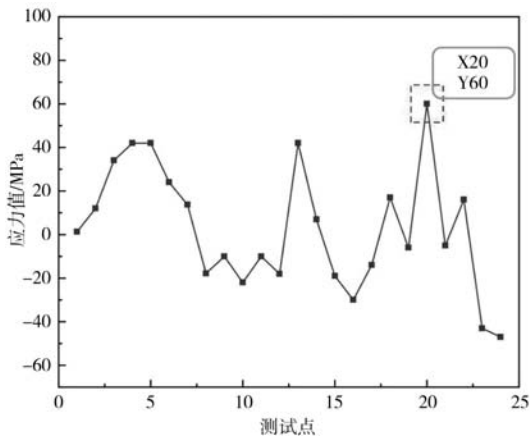


图13 各测试点的应力值

Fig. 13 Stress value of each test point

### 3.4 疲劳寿命测试分析

疲劳试验在进口MTS六通道悬架试验装置上进行, 如图12a所示。试件上下端均与工装固定, 在竖直方向上施加60~325 kN的往复交变载荷, 载荷波形为正弦波, 对称循环, 频率为1 Hz。当往复交变载荷加载次

数为61.2万次时, 钢板焊接工艺生产的传统鞍座支架出现轻微的疲劳裂纹。在相同的测试条件下, 鞍座支架铸造件承受的循环加载次数为75.6万次, 为钢板鞍座的1.2倍。由此认为: 相比钢板焊接工艺, 本文提出的以铸代焊工艺可提高鞍座支架的疲劳寿命。

## 4 结论

(1) 采用无冒口工艺, 设计了底注式和分层注入式相结合的封闭式浇注系统, 铸件材料选用QT700-6, 质量可比钢板焊接件降低13.2%, 满足轻量化设计要求。为保证金属液快速充满铸件型腔, 设计了6个内浇道, 1个环形横浇道, 1个直浇道; 为有效排出金属液气体、避免气孔缺陷, 在铸件型腔上设计了3个排气孔, 在砂芯边缘处设计了4个排气孔。

(2) 通过对充型和凝固过程仿真分析, 发现铸件充型过程速度较快、无金属液飞溅、卷气和浇不足等现象。利用RMM分析, 发现在限位挂钩处出现微小疏松、缩孔缺陷, 总体积约为0.32 cm<sup>3</sup>。进一步通过有限元方法对缺陷位置进行应力分析, 发现该缺陷处应力

仅为5MPa,并未出现应力集中,不会影响铸件整体性能。

(3)通过试生产,发现实际缺陷位置与模拟结果一致。经测试,铸造鞍座支架的抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度等指标均符合性能要求;珠光体含

量为80%以上,能够满足鞍座支架生产金相要求;铸件承受的最大应力为60 MPa,远小于材料的许用应力179 MPa。施加循环交变载荷试验发现,铸造鞍座支架的疲劳寿命是钢板焊接鞍座支架的1.2倍。

#### 参考文献:

- [1] 张笈玮,李宏佳,冯忠志,等.大面积拼焊平台结构的焊接变形预测[J].焊接学报,2019,40(3):118-122,166.
- [2] 徐志强,李志敏,朱平,等.高速列车司机室前窗框焊接变形[J].上海交通大学学报,2012,46(7):1088-1091.
- [3] 王锡军,刘德勇,王斌,等.小尺寸环形焊缝对接焊管焊接变形控制研究[J].组合机床与自动化加工技术,2022(3):145-148,152.
- [4] 刘继广,王殿飞,方晓刚,等.高铁挂架熔模铸造工艺优化[J].铸造,2021,70(8):968-975.
- [5] 武玉平.多品种、小批量装甲装备铸件无模铸造的创新与实践[C]//2019中国铸造活动周论文集,2019:494.
- [6] 李明,刘正方,陈华.汽轮机三维静叶隔板以铸代焊工艺探索[J].中国铸造装备与技术,2002(1):30.
- [7] 尹起.基于AnyCasting的滑块铸造模拟仿真及工艺优化[D].淄博:山东理工大学,2017.
- [8] QIN Shanpeng, LV Peng, LI Sirun, et al. Casting process of gate valve steel based on ProCAST simulation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1798(1): 012013.
- [9] 丛建臣,倪培相,邵诗波,等.高冲击韧性QT900-6材料的开发与应用[J].铸造,2022,71(3):02-309.
- [10] 史东丽,曹松,朱宇,等.高速列车牵引支架的铸造工艺优化[J].铸造,2021,70(12):1476-1480.
- [11] 张稳,郭莹.滑轨工作台铸造工艺数值模拟及优化[J].热加工工艺,2022,51(13):64-70.
- [12] 姚柳,杜航,杨维殊,等.基于AnyCasting的轴承座铸造工艺优化[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2021,35(1):40-45,50.
- [13] 张军强,米国发,王有超,等.球铁平衡轴壳型铸造工艺优化[J].铸造,2015,64(9):874-878.
- [14] 赵红乐,张纬,孟少峰,等.一种铸钢行星架产品的铸造工艺优化[J].铸造,2021,70(11):1356-1360.
- [15] 孙义,赵玉刚,刘广新,等.基于AnyCasting的减速器下箱体铸造模拟及工艺优化[J].热加工工艺,2020,49(7):60-62+67.
- [16] 张振波,盛文斌,孙策,等.大型球墨铸铁下箱体铸造过程数值模拟及工艺优化[J].热加工工艺,2019,48(7):113-116,120.
- [17] 李旭娟,缪炳荣,史艳民,等.CZ170型跨坐式单轨作业车转向架构架结构分析与测试[J].铁道机车车辆,2016,36(2):107-111.

## Process Design and Performance Analysis of Casting Substitute Welding for Saddle Bracket

WANG Hai-xiao<sup>1</sup>, CONG Jian-chen<sup>1,2</sup>, CONG Zi-ling<sup>2</sup>, WANG Jin-ling<sup>1</sup>, ZHU Shuai-lun<sup>1</sup>, YUAN Wei<sup>1,2</sup>, CHI Bao-tao<sup>1</sup>

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shangdong, China; 2. Tianrun Industry Technology, Limited, Company, Weihai 264400, Shangdong, China)

#### Abstract:

The saddle bracket produced by traditional steel plate welding process had the problems of stress concentration, coarse grain structure and fatigue fracture at the weld. The process technology of casting instead of welding is proposed. Through the simulation analysis of casting filling and solidification process, it was found that there were small shrinkage cavity and porosity at the limit hook, and the total volume was about 0.32 cm<sup>3</sup>. Further, the stress analysis of the defect position was carried out by the finite element method. It was found that the stress at the defect was only 5 MPa, which would not affect the overall performance of the casting. The casting test was carried out by using the proposed scheme, and the tensile strength, yield strength, elongation, hardness and other indicators of the test castings were tested to meet the design requirements. The pearlite content was more than 80%, and the maximum stress of the casting was 60 MPa, which was far less than the allowable stress of the material. The fatigue life of the casting saddle bracket was 1.2 times that of the steel plate welding saddle bracket. The test results show that the overall performance of casting saddle bracket is better than that of steel plate welding saddle bracket.

#### Key words:

casting instead of welding; ductile iron; saddle bracket; casting process; performance analysis