# 铸态 QT700-8 重卡前接梁支架 铸造工艺设计及生产实践

丁以刚<sup>1, 2</sup>, 刘生发<sup>1</sup>, 王 振<sup>1</sup>, 郭元洲<sup>2</sup>, 汪国昌<sup>2</sup>, 何 强<sup>2</sup>, 王 欣<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院,湖北武汉 430070;

2. 湖北丹江口志成铸造股份有限公司,湖北丹江口 442700)

**摘要:**借助CAE软件对铸造工艺进行模拟优化,采用传统的粘土砂铸造工艺结合Si、Cu、Sn 复合合金化成功生产了铸态QT700-8球墨铸铁重卡前接梁支架。使用光学显微镜(OM)及扫 描电镜(SEM)等表征其显微组织和断口形貌。研究结果表明,基于CAE模拟结果对铸造工 艺进行优化能减少样件调试次数,缩短铸件开发周期;采用静压造型线生产铸态QT700-8球 墨铸铁件,其本体球化级别为1~2级,石墨大小6~7级,珠光体含量65%~70%,珠光体片间距 约为0.33 μm,力学性能满足要求。

关键词:铸态QT700-8;显微组织;力学性能;轻量化

球墨铸铁具有良好的力学性能,密度比铸钢小,生产成本明显低于铸钢,在汽车领域具有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。汽车轻量化发展对铸态球墨铸铁强韧性提出了更高的要求,如何在铸态条件下获得汽车用新一代高强韧球墨铸铁以代替铸钢,达到在保障 汽车行驶安全的前提下尽可能减轻其自重目的,引起了铸造工作者的广泛研究<sup>[3-7]</sup>。

重卡前接梁支架是车架和驾驶室联结的关键部位,与方向机支架、板簧支座、 摆臂支架、驾驶室悬置等多个零部件存在装配关系,因此,其结构的综合力学性能 直接影响重卡汽车行驶安全。本工作针对重卡前接梁支架铸件热节多且分散的特 点,借助华铸CAE软件对其铸造工艺方案进行模拟优化,采用传统的粘土砂铸造工 艺并结合Si、Cu、Sn复合合金化成功开发了铸态QT700-8球墨铸铁重卡前接梁支架, 并对其显微组织和力学性能进行表征。

# 1 铸造工艺分析与数值模拟

#### 1.1 铸件结构分析

重卡前接梁支架材质为QT700-8,重量 38 kg,外形尺寸710 mm×460 mm×265 mm,主 要壁厚8~15 mm。铸件中安装凸台较多且分 散,凸台厚度40~84 mm,与壁厚相差较大, 孤立热节较多,形成缩孔缩松倾向较大,产 品结构如图1所示。



图1 前接梁支架零件三维图 Fig. 1 3D drawing of front beam support parts

#### 1.2 工艺设计

采用粘土砂静压线造型,一型一件,在铸件无法脱模的部位设计砂芯3个, 铸造工艺方案如图2所示。采用封闭式浇注系统,浇道截面积比为*F*<sub>a</sub>:*F*<sub>横</sub>:*F*<sub>内</sub> =1.9:1.5:1,同时在直浇道底窝处设置陶瓷过滤网,具有档渣和减少紊流作用。浇 注系统开设在铸件一侧,采用3个内浇道分散引入铁液,保证快速充型,防止铸件出 现冷隔缺陷。

作者简介:

丁 以 刚(1987-), 男, 工程师,主要研究方向为 高强韧球墨铸铁铸造工艺 及铸造模拟分析。电话: 15549969658,E-mail: 49861840@qq.com 通讯作者: 刘生发,男,教授。电话: 15907110958,E-mail: liusfa@163.com

中图分类号:TG244; TG255 文献标识码:B 文章编号:1001-4977(2023) 08-1031-06

收稿日期: 2022-10-26 收到初稿, 2023-03-03 收到修订稿。



图2 铸造工艺方案 Fig. 2 The casting process

#### 1.3 数值模拟分析及工艺优化

采用华铸CAE对前接梁支架铸件进行凝固模拟分析,导入STL文件,新建计算任务,选择重力铸造中的 "基于耦合的凝固计算",材质选择球铁,合金的化 学成分按中限设置,合金物性参数采用默认值,设定 铸件初始温度为1510℃,铸型和砂芯初始温度为20℃。

#### 1.3.1 缩孔缩松分析

图3为前接梁支架凝固模拟结果,凝固160 s后壁厚 较薄的筋已经凝固,远离浇口的凸台尺寸比较厚大, 冷却速度较慢,已出现孤立液相,如图3a。凝固210 s 后铸件中间的凸台开始出现孤立液相,冒口补缩通道 已经失去作用,如图3b。凝固400 s后铸件大部分已经 凝固,缩孔缩松位于厚大凸台部位,铸件缩孔缩松风 险较大,如图3c箭头所示。通过CAE模拟结果发现, 受前接梁支架结构限制,仅靠传统冒口补缩工艺很难 对铸件中间的孤立热节进行有效补缩,根据过往的生产经验,在缩孔缩松风险较大的凸台部位增加冷铁,加速凸台部位的散热速度,在补缩通道封闭前提供更多的液态补缩量,可有效减小缩孔缩松倾向。

#### 1.3.2 工艺方案优化

根据缩孔缩松分析结果,在缩孔缩松风险较大的 凸台的下模放置外冷铁,如图4所示,冷铁直径32 mm, 高度90 mm,同时对冒口颈尺寸进行优化,加强冒口补 缩作用。对优化后的方案再次进行凝固模拟分析,再 次凝固模拟结果表明,除两处内圆角根部存在轻微缩 孔倾向外,铸件其他部位未出现内部缺陷,如图5所示。

根据上述模拟结果,采用华铸CAE对优化后的方 案进行凝固过程模拟(图6)。由模拟结果可知,在凝 固前期,增加冷铁的凸台在凝固过程中的温度明显低 于其他凸台,随着凝固过程的推进,冷铁附近的铁液 散热速度较快,远离浇冒口的一侧铸件先凝固,冒口 最后凝固,整体上实现了顺序凝固,凝固过程中没有 在铸件中形成孤立液相区,工艺设计达到了预期效果。

# 2 试验方法

#### 2.1 熔炼工艺

原材料选用优质Q12生铁、同材质回炉料、优质 碳素废钢,按一定配比加入感应电炉熔炼。铁液处理 采用冲入法球化并进行三次孕育处理,先在球化包底 依次加入FeSiMg8Re5球化剂和FeSi75孕育剂,然后加





图4 优化后铸造工艺方案 Fig. 4 The optimized casting process



图5 改进后缩孔缩松模拟结果 Fig. 5 The Simulation results of shrinkage cavity and porosity after optimization



Fig. 6 The solidification process simulation

入同材质球墨铸铁铁屑并将包底捣实,最后放置纯铜 棒;倒包时在包底加入FeSi75和纯Sn粒进行二次孕育 处理,由于锡熔点偏低,在倒包时加入可减少损耗; 浇注时采用0.1 % SiBi合金进行随流孕育。出炉温度为 1 500~1 520 ℃,选用1 t铁液包进行浇注,浇注温度为 1 370~1 430 ℃,每箱浇注时间控制在25 s以内,开箱时 间60 min。铁液化学成分控制范围如表1所示。

#### 2.2 显微组织观察

采用光学显微镜(OM,型号为Nikon Eclipse LV100 POL)观察试样腐蚀前的石墨形态、大小和腐蚀 后的基体组织。按照GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相 检验》标准进行球化级别和石墨大小等级的评定。使 用扫描电镜(SEM,型号为QUANTA-400)观察珠光 体片间距及拉伸试样断口形貌。

	Table 1 Chemical composition of the QT700-8 front beam support									
 С	Si	Mn	Р	S	Cu	Sn	Ce	Mg		
3.5~3.8	2.4~2.8	< 0.3	< 0.04	< 0.02	0.5~0.9	< 0.025	0.03~0.05	0.02~0.04		

OT700 8前按沙士加的化学成公

#### 2.3 力学性能测试

室温拉伸性能测试使用的设备为Instron-5966电子 万能材料实验机,拉伸试棒尺寸如图7所示,从铸件本 体取样,取样部位如图8a所示。按照GB/T 228.1—2021 《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》进行测 定。使用布氏硬度计(HB-3000型)测定硬度,按照 GB/T 231.1—2018《金属材料 布氏硬度试验 第1部分: 试验方法》进行测定。

### 3 铸件试制

#### 3.1 铸件内部质量

按优化后方案进行小批量试生产,生产的样件加 工后孔内无缩孔缩松缺陷,为了进一步验证内部缩孔 缩松情况,将加工后的样件按图8a所示的位置进行解 剖,检查内部缺陷,缩孔缩松倾向较大的A-A、B-B、





*C-C*、*D-D*解剖截面如图8b所示,解剖结果显示,铸件内部组织致密,所有凸台的内部未出现缩孔缩松缺陷,与CAE模拟结果相一致。

#### 3.2 显微组织和力学性能

铸态Q700-8球墨铸铁拉伸实验结果如图9所示,其

1034 病世 FOUNDRY 工艺技术



图8 铸态Q700-8球墨铸铁前接梁支架零件解剖图 Fig. 8 The section drawing of as-cast Q700-8 front beam support

抗拉强度为732 MPa, 屈服强度为 441 MPa, 断后伸长 率为9.3 %。硬度测试结果为HB229, 呈现较好的强韧 性能组合。图10为QT700-8球墨铸铁的典型显微组织, 借助IPP(Image-Pro Plus)图像分析软件进行统计,石 墨球化率达到95%,石墨球平均直径为24.1 μm,石墨 球数为196个/mm<sup>2</sup>。基体组织中珠光体和铁素体的含量 分别为69%和31%,珠光体片间距约为0.33 μm。

为了验证铸件性能的稳定性,选取同一包铁液浇 注前、中、末期铸件各一件,在同一部位取样进行拉 伸试验和金相检验,结果如表2所示。3根试样力学性 能均达到QT700-8要求,浇注中后期试样的珠光体含量 略低于浇注前期,试样的抗拉强度和硬度与基体中珠 光体含量成正比,浇注前期试样珠光体含量高,抗拉



图9 铸态QT700-8球墨铸铁拉伸曲线 Fig. 9 Tensile curve of as-cast QT700-8 ductile iron

强度和硬度数值也较大。

图11是QT700-8球墨铸铁试样拉伸断口形貌。由

1 µm



(a) 石墨形态



 (с) 基体组织
 (d) 珠光体片间距

 图10 铸态QT700-8球墨铸铁显微组织

Fig. 10 The microstructure of as-cast QT700-8 ductile iron

图可知,基体上分布着石墨球和石墨脱落后形成的空 洞,存在明显的撕裂棱,解理面及少量韧窝,如图11a 所示。解理面上存在河流花样和台阶,裂纹扩展形成 穿晶断裂,如图11b所示。铸态Q700-8球墨铸铁断裂机 制呈现为韧性和脆性混合断裂<sup>[9-10]</sup>。石墨形态、大小、 数量、珠光体片间距均会影响球墨铸铁力学性能,在 铁液中加入合金元素Si、Cu及微量合金元素Sn、Bi, 能提高基体中石墨球数量和圆整度,其中Si促进铁素体 形成,Cu、Sn促进珠光体形成,合金元素的调控保证 珠光体与铁素体的比例约为7:3,以满足铸态球墨铸 铁的高强度高韧性相协调<sup>[8]</sup>。因此,铸态Q700-8球墨铸 铁的高强韧性能归结于:①合金元素Si、Cu及微量合 金元素Sn调控珠光体与铁素体的合适比例;②合金元 素Si、Cu的固溶强化;③Si、Sn、Bi复合孕育引起的细 晶强化。

表2 QT700-8前接梁支架的试验结果 Table 2 Experimental result of the QT700-8 front beam support

编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HB	球化级别	石墨大小	珠光体含量/%	备注	
1#	756	8.5	246	1~2	6~7	70	前期	
2#	732	9.3	229	1~2	6~7	65~70	中期	
3*	730	9.0	228	1~2	6~7	65	末期	

#### 3.3 生产验证

在静压造型线上对前接梁支架进行批量试产,砂箱尺寸900 mm×700 mm,一型一件,生产了8个批次共120件,其中112件合格,合格率为93.3%,不同批次

的铸件组织和性能检测结果如表3所示,从表3可见, 不同批次的铸件本体试样性能均满足QT700-8要求,珠 光体含量在65%~70%之间的试样综合力学性能更加均 衡,更利于自动生产线批量稳定生产。



( a )

(b)

图11 铸态QT700-8球墨铸铁拉伸断口形貌 Fig. 11 Tensile fracture morphology of as-cast QT700-8 ductile iron

表3 QT700-8组织和性能检测结果 Table 3 Structure and performance test results of the QT700-8

编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HB	球化级别	石墨大小级别	珠光体含量/%	
1#	752	8.2	246	1~2	6~7	70	
2#	740	8.6	242	2	6	65~70	
3#	780	8.5	252	1~2	6~7	70	
4#	727	9.0	232	2	6~7	65	
5#	734	9.0	239	1~2	6~7	65~70	
6#	745	8.8	244	1~2	6~7	65~70	
7#	718	9.6	225	2	6~7	65	
8#	736	9.0	228	1~2	6	65~70	

## 4 结论

(1)对于前接梁支架这种热节多且分散的复杂铸件,借助CAE模拟预判缩孔缩松产生部位,再采用相应措施改进铸造工艺方案,能减少样件调试次数,缩

短铸件开发周期。

(2) 在粘土砂静压线生产条件下,铸态QT700-8 铸件的球化级别为1~2级,石墨大小6~7级,珠光体含 量65%~70%,力学性能可满足要求。

#### 参考文献:

- [1] KNIEWAILNER L, PRUKNER S, FISCHER G. Castings conquer the realm of forgings [J]. Casting Plant and Technology International, 2008, 24 (2): 2–7.
- [2] NICHOLS J W. Lightweighting with iron [J]. Automotive Engineering International, 2013, 121 (8): 24–27.
- [3] LACAZE J, SERTUCHA J, MAGNUSSON ABERG L. Microstructure of As-cast Ferritic-pearlitic Nodular Cast Irons [J]. ISIJ International, 2016, 56 (9): 1606–1615.
- [4] GONZAGA R.A. Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 567: 1–8.
- [5] 张军, 解戈奇. 铸态球墨铸铁QT600-7重卡桥壳的生产 [J]. 铸造, 2018, 67(10): 936-938.
- [6] 张欠欠,陈礼年. 铸态QT700-10球墨铸铁的研制 [J]. 现代铸铁,2021,41(5): 1-3.
- [7] 肖海波. 铸态QT600-10材料的生产应用 [J]. 铸造, 2018, 67(8): 732-736.
- [8] 曾大新,何汉军,张元好.铸态高强度高伸长率球墨铸铁研究进展 [J].铸造,2017,66 (1):38-43.
- [9] LIU Y Z, LI Y F, XING J D, et al. Effect of graphite morphology on the tensile strength and thermal conductivity of cast iron [J]. Materials Characterization, 2018, 14 (4): 155–165.
- [10] GAO M Q, QU Y D, LI R D, et al. Refinement and fracture mechanisms of as-cast QT700-6 alloy by alloying method [J]. China Foundry, 2017, 14 (1): 16-21.

# Casting Process Design and Production Practice of As-Cast QT700-8 Heavy Truck Front Beam Support

DING Yi-gang<sup>1, 2</sup>, LIU Sheng-fa<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>, GUO Yuan-zhou<sup>2</sup>, WANG Guo-chang<sup>2</sup>, HE Qiang<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Danjiangkou Zhicheng Foundry Co., Ltd., Danjiangkou 442700, Hubei, China)

#### Abstract:

CAE software was used to simulate and optimize the casting process. The traditional sand casting process combined with Si, Cu and Sn composite alloying was used to produce as-cast QT700-8 ductile iron heavy truck front beam support successfully. Optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were used to characterize the microstructure and fracture morphology. The Optimization of casting process based on CAE simulation results can reduce the sample debugging times and shorten the casting development cycle. QT700-8 nodular cast iron was produced by static pressure molding line. Its spheroidization grade is 1-2, graphite size is 6-7, pearlite content is 65%-70%, pearlite sheet spacing is about 0.33 µm, and mechanical properties meet the requirements.

#### Key words:

as-cast QT700-8; microstructure; mechanical properties; lightweight