

一种复杂薄壁低温球铁齿轮箱体铸造工艺研究

肖恭林, 穆彦青

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 针对一种复杂薄壁低温球铁齿轮箱体进行了技术要求及结构分析, 并对其熔炼工艺和铸造工艺进行了研究。基于MAGMA分析软件对其液态成形过程流动场、凝固场进行CAE分析, 成功完成了其铸造工艺开发。

关键词: 低温球铁; 齿轮箱; 铸造工艺; CAE分析

伴随着中国轨道交通装备的快速发展, 我国在高铁、地铁、轻轨、单轨等整车车辆制造水平都走在了世界的前列。齿轮驱动装置作为轨道交通车辆转向架最为核心的零部件之一, 其在车辆高速运行过程中, 负责实现电机与动力轮对之间的动力传递。对于运输距离长、区域跨度大的高速列车, 不仅需要在结构设计上满足高集成化、轻量化, 更需要满足箱体低温运行环境下的可靠性和安全性, 最低使用环境温度 ≤ -40 °C。本文研究了一种复杂薄壁低温球铁箱体的铸造工艺, 并成功完成了样件生产, 满足了其技术要求。

1 产品技术要求及结构分析

试验箱体材料牌号选取QT400-18L, 力学性能要求见表1。通过单铸试样进行检验验收, 石墨球化率不低于ISO 945中规定的85%, 石墨大小为5级以上。箱体三维图见图1, 箱体轮廓尺寸1 100 mm × 850 mm × 400 mm, 铸件重256 kg, 主体壁厚仅10 mm, 箱体外表面设计众多10 mm加强筋。轮廓尺寸大, 重量大, 浇注系统流程长, 浇注时间长, 壁薄区域容易出现冷隔、冷豆、气孔、夹渣缺陷, 壁厚区域易出现石墨漂浮、球化衰退等组织异常。

2 熔炼工艺

炉料以生铁、废钢、回炉料为主, 采用中频感应电炉进行熔炼, 原铁液目标成分为: 3.7%~4.0% C、0.7%~0.9% Si、Mn < 0.25%、P < 0.05%、S < 0.04%。根据料单称取炉料; 向中频感应电炉中加入生铁、废钢及回炉料启炉熔炼, 熔清后, 取炉前试样, 检测C、Si、Mn、P、S含量, 根据结果调整炉内铁液中各元素的含量; 当炉内温度升到1 520~1 550 °C, 准备出炉进



图1 箱体三维图
Fig. 1 3D drawing of box

表1 材料力学性能要求
Table 1 Mechanical properties of materials

材质	抗拉强度 /MPa	规定塑性延伸 强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A/%	-40 °C冲击 吸收能量/J
QT400-18L	≥ 400	≥ 240	≥ 18	≥ 12 (三个试样平均值) ≥ 9 (单独试样)

作者简介:

肖恭林(1971-), 男, 教授级工程师, 主要研究方向为铸造材料及工艺技术。E-mail: 1362374393@qq.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)10-1281-04

收稿日期:

2022-03-29 收到初稿,
2022-05-16 收到修订稿。

入球化、孕育工序；浇注温度取1 400~1 420 ℃。

2.1 原材料准备

(1) 生铁。选用抚顺罕王生铁，化学成分为：4.37% C、0.66% Si、0.07% Mn、0.025% P、0.019% S。生铁中S元素应尽可能低，应低于0.04%，避免其在球化过程中与镁、稀土元素反应生成镁或稀土的硫化物，不仅可减少球化合金的浪费，减少球化衰退速度，而且减少夹渣、皮下气孔等缺陷的生成。P元素应尽可能低，保证在0.05%以下，以避免磷共晶，特别是三元或符合磷共晶的析出，材料脆性转变温度的提高。

(2) 废钢。废钢用于调整原铁液的碳、硅量并改变生铁遗传性；废钢不应含有反球化元素以及产生偏析和碳化物的合金元素；废钢表面不应有油污、锈蚀等。

(3) 回炉料。优先选用同牌号的回炉料，且使用前需对回炉料进行强力抛丸处理，以防止回炉料带入硅、硫等，形成夹渣物。不得采用灰铁回炉料，以防止硫、磷过高^[1]。

2.2 球化工艺

采用冲入法球化工艺，凹坑式处理包形式，一次在凹坑内加入球化剂、孕育剂、覆盖剂及压板。使铁液盖过球化剂一定高度后，球化剂才开始与铁液进行球化反应，增加了球化剂与铁液反应的均匀性，提高了球化剂的吸收率。采用稀土镁球化剂，加入比例为1.1%~1.3%，成分（质量分数）为：40%~50% Si、5.5%~7.5% Mg、1.5%~2.5% RE、2.5%~3.0% Ca，其余为Fe，保留了稀土和镁两种球化元素的优点，稀土和镁起到了相辅相成的作用，由于稀土的净化和抗干扰作用，较低的残余镁量，就可获得圆整度较佳的球形石墨。

2.3 孕育工艺

采用三次孕育法，多元素复合孕育剂，孕育剂成分（质量分数）为：70%~75% Si、1%~1.5% Ca、Al≤1%，其余为Fe。在球化剂上放入出炉铁液质量的0.4%~0.6%的孕育剂，进行一次孕育；球化反应结束后立即将球化包内铁液转至浇注包，倒包过程中向铁液中加入出炉铁液质量的0.4%~0.6%的孕育剂，进行二次孕育；在浇注过程中随流孕育，孕育剂加入量为出炉铁液质量的0.05%~0.1%，进行三次孕育。通过三次孕育法，促进石墨化，获得石墨细小圆整度高的石墨球，同时消除游离渗碳体，细化共晶团。

3 铸造工艺

采用40/70目木质改性呋喃树脂砂手工造型、固

化剂配比为65wt.% A型固化剂+35wt.% B型固化剂，树脂加入量1.0%~1.2%，固化剂加入量为树脂量的30%~50%^[2-4]。

3.1 浇注时间

根据三维模型分析，上箱体铸件重量153 kg，浇注铁液重量215 kg；下箱体铸件重量103 kg，浇注铁液重量165 kg。浇注时间根据形状复杂的薄壁件经验公式(1)^[5]确定；

$$t=S \cdot (G_L)^{1/2} \quad (1)$$

式中： t 为浇注时间（s）； G_L 为型内金属液总重量，包括浇冒口系统重量（kg）； S 为系数，根据铸件主体壁厚及球墨铸铁材质特性，取1.2。计算得上箱体 $t=16$ s，下箱体 $t=14$ s。

3.2 浇注系统尺寸

铸型采用半封闭式浇注系统， $\sum A_{内} : \sum A_{横} : \sum A_{直} = 0.8 : 1.3 : 1$ 。

浇注系统尺寸的确定，采用阻流断面设计法，计算公式为^[5-6]：

$$A_{阻} = \frac{G_L}{0.31\mu t \sqrt{H_p}} \quad (\text{cm}^2)$$

式中： $A_{阻}$ 为浇注系统最小断面面积（ cm^2 ）； G_L 为流经 $A_{阻}$ 断面的金属液总重量（kg）； μ 为流量损耗系数，取0.55； t 为浇注时间（s）； H_p 为平均静压力头高度（mm）。计算得上箱体 $A_{阻}=17 \text{ cm}^2$ ，下箱体 $A_{阻}=15 \text{ cm}^2$ 。

3.3 铸造工艺方案

齿轮箱上、下箱体的铸造工艺方案如图2-3所示。

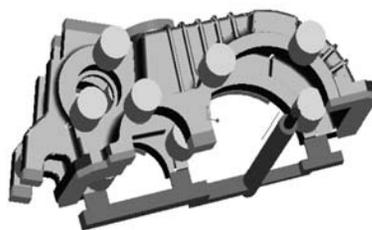


图2 上箱体铸造工艺方案

Fig. 2 Casting process plan of upper box

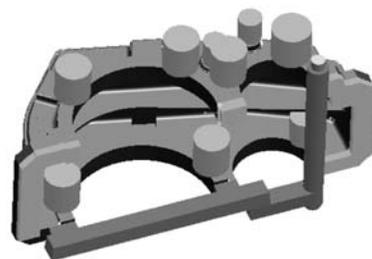


图3 下箱体铸造工艺方案

Fig. 3 Casting process plan of lower box

上箱体浇注系统尺寸分别为： $\Sigma A_{内}=17\text{ cm}^2$ ，三个内浇道面积均为 5.7 cm^2 ； $\Sigma A_{横}=28\text{ cm}^2$ ； $\Sigma A_{直}=21.25\text{ cm}^2$ ，直浇道直径=52 mm；下箱体浇注系统尺寸分别为： $\Sigma A_{内}=15\text{ cm}^2$ ，两个内浇道面积均为 7.5 cm^2 ； $\Sigma A_{横}=24\text{ cm}^2$ ； $\Sigma A_{直}=19\text{ cm}^2$ ，直径=50 mm。针对箱体的不同部位，设置了冒口和冷铁，控制金属液凝固过程，冒口采用富士科发热保温冒口7/10K和5/8K，冷铁采用灰铸铁或石墨冷铁，冷铁厚度取被激冷部位铸件壁厚的0.8~1.2倍。

3.4 流动场 CAE 分析

图4-5为齿轮箱铸件仿真模型，通过Magma仿真分析，直浇道采用下小上大的锥度，铁液快速充满直浇道底部，减小了铁液在直浇道中的紊流，使直浇道中不会产生负压区，避免铁液的吸气氧化，且能使渣子浮在直浇道上表面；横浇道采用大截面积，减缓了铁液在横浇道中的流动速度，紊流减轻，有利于渣子的

上浮；采用薄而宽的内浇道，使横浇道内液面充分高出内浇道顶部后，内浇道才开始充型，这时渣子将高于内浇道从而得到良好的阻渣效果。

3.5 凝固场 CAE 分析

图6-7为齿轮箱凝固场CAE分析，通过对铸件环节、缩松分布图分析，通过对箱体的不同部位设置冒口和冷铁，控制金属液凝固过程，使箱体重要部位均无缩松缺陷，满足质量要求。

4 样件试制

根据齿轮箱体仿真结果进行样件试制，试制铸件的力学性能、金相、磁粉探伤、射线探伤均达到技术条件要求，材料化学成分如表2所示，力学性能如表3所示，金相组织及硬度如表4所示，成品图如图8所示。由此可见，齿轮箱体铸件力学性能和金相组织满足技术要求。

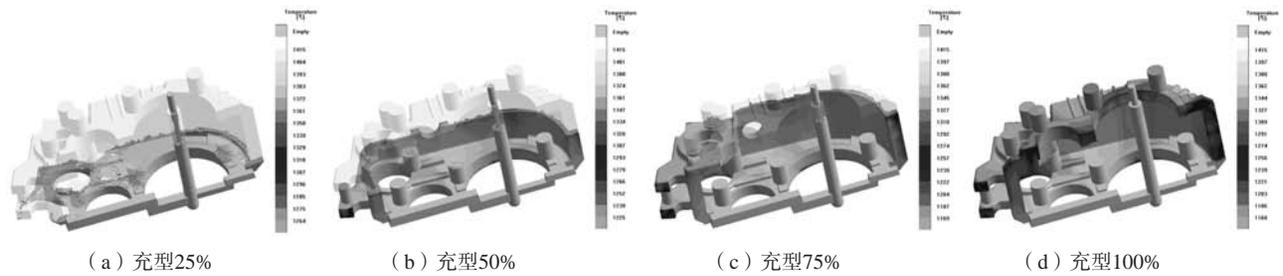


图4 上箱体流动场计算

Fig. 4 Flow field calculation of upper box

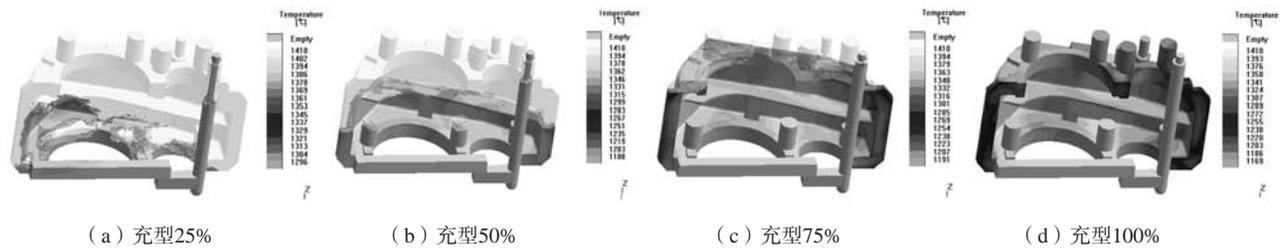


图5 下箱体流动场数值计算

Fig. 5 Flow field calculation of lower box



图6 上箱体缩松判据

Fig. 6 Shrinkage porosity criterion of upper box

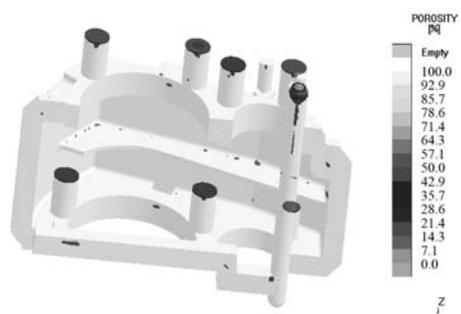


图7 下箱体缩松判据

Fig. 7 Shrinkage porosity criterion of lower box

表2 材料化学成分

Table 2 Chemical composition of materials $w_B/\%$

材质	C	Si	Mn	P	S	Mg	Re
QT400-18L	3.71	2.18	0.18	0.025	0.008	0.040	0.020

表3 材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of materials

材质	抗拉强度	规定塑性延伸	断后伸长	-40 °C冲击吸收
	R_m /MPa	强度 $R_{p0.2}$ /MPa	率A/%	能量Kv2/J
QT400-18L	412	286	24.8	15 15 14

表4 材料的金相组织和布氏硬度

Table 4 Metallographic structure and Brinell hardness of materials

材质	石墨情况	基体组织	布氏硬度 (HBW5/750)
QT400-18L	85%VI6/7+15%V6/7	铁素体	152

5 结论

(1) 通过控制生铁、废钢、回炉料的成分及质



图8 齿轮箱样件

Fig. 8 Gearbox sample

量, 采用稀土镁球化剂凹坑式球化工艺, 三次孕育工艺, 保证了材料的力学性能、金相组织要求。

(2) 采用半封闭式底注工艺, 上大下小直浇道、大截面积横浇道、扁平内浇道等工艺措施, 有效地降低了铸件中夹渣、卷气等缺陷的产生。

(3) 基于Magma仿真计算, 合理设计了冒口和冷铁控制铸件的凝固温度场, 获得了内部致密的合格产品。

参考文献:

- [1] 唐玉林, 王云昭. 球墨铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 董鹏, 朱正锋, 封雪平, 等. 木质素改性呋喃树脂性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 512-515.
- [3] 韩文. 铸造用中氮低游离甲醛自硬呋喃树脂的研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1452-1454.
- [4] 张集滕, 李瑞. 树脂和固化剂含量对自硬呋喃树脂砂抗拉强度的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1361-1362.
- [5] 穆彦青, 肖恭林, 杨志刚, 等. 大轴重机车齿轮箱铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (3): 286-291.
- [6] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 190-203.

Research on Casting Process of a Complex Thin-Walled Low-Temperature Ductile Iron Gear Box

XIAO Gong-lin, MU Yan-qing

(CRRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

In this paper, the technical requirements and structural analysis of a complex thin-walled low-temperature ductile iron gear box are carried out, and its melting and casting process are studied. At the same time, based on the CAE analysis of the flow field and solidification field of its liquid forming process, the development of its casting process was successfully completed.

Key words:

low temperature ductile iron; gearbox; casting process; CAE analysis