

CR400AF齿轮箱铸造工艺开发及优化

马俊成, 李向平, 查明晖, 龚家林, 黄宜俊, 孙亚晓, 毛恒杰, 李俊熹

中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司 江苏常州 213001

摘要: 详细介绍了动车组齿轮箱的铸造工艺开发及优化过程。通过对产品结构、要求及重要部位的深入分析, 制定了科学合理的整体铸造工艺方案, 并借助仿真软件进行了模拟优化。针对生产过程中出现的气孔及缩松缺陷, 采取了一系列行之有效的解决措施。实践结果表明: 优化后的工艺不仅显著提高了齿轮箱的成品率, 还使其质量完全满足产品的技术要求。

关键词: 低压铸造; 铸造工艺; 铸造模拟; 齿轮箱

Development and optimization of casting process for CR400AF gearbox

MA Juncheng, LI Xiangping, ZHA Minghui, GONG Jialin, HUANG Yijun,

SUN Yaxiao, MAO Hengjie, LI Junxi

CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213001, Jiangsu, China

Abstract: This article provides a detailed introduction to the development and optimization process of casting technology for high-speed train gearboxes. Through in-depth analysis of product structure, requirements, and important parts, a scientific and reasonable overall casting process plan was developed, and process optimization was carried out using simulation software. A series of effective measures have been taken to address the porosity and shrinkage defects that occur during the production process. The practical results show that the optimized process not only significantly improves the yield of the gearbox, but also makes its quality fully meet the technical requirements of the product.

Keywords: low pressure casting; casting process; casting simulation; gearbox

1 序言

动车组齿轮箱传动装置是动车组的关键部件之一, 其主要作用是将电动机的转速和转矩传递给车轮, 以驱动动车组运行。齿轮箱作为齿轮箱传动装置的载体, 如果齿轮箱出现故障, 可能会导致动车组失去动力, 甚至引发严重的安全事故。因此, 齿轮箱质量的好坏关系到整个列车的运行安全。本项目研制的CR400AF齿轮箱铸件, 应用于350km/h标准动车组列车, 因此必须严格保证齿轮箱的质量,

确保其符合相关标准和要求^[1-4]。

该齿轮箱的材质选用具有优良铸造性能的AlSi7Mg0.3合金, 该合金具有良好的铸造性能、较高的强度、良好的耐蚀性和可加工性, 因此广泛应用于汽车、航空航天、船舶、轨道交通等领域^[5-8]。经不断工艺优化, 该齿轮箱铸造成品率从开发初期的50%提升到90%以上, 目前该齿轮箱累计生产已超过10000余套。

2 产品结构、技术要求

该齿轮箱的铸件毛坯重量70kg，其外形尺寸为1050mm×228mm×608mm（长×宽×高），壁厚在13~130mm之间。其中，上部排油孔附近的厚度最厚，整体厚度超过80mm。此外，法兰壁厚为43mm，合箱面厚度为36mm，法兰侧面圆弧壁厚为13mm，整体壁厚分布不均匀，局部存在厚大热节。较大的壁厚差异给铸造工艺设计带来了一定的难度。

齿轮箱对内部和外部质量的要求极高，产品需要100%进行DR检测，不允许进行补焊，加工面的缺陷尺寸≤1mm。这些严格的要求虽然为生产带来了一定的挑战，但也为制造出高质量的产品提供了有力保障。

图1所示为齿轮箱运行过程中的模拟应力云图。从图1可知，吊挂及挡油板部位是受力最大的部位，因此在工艺设计时需要重点考虑，以确保该部位的内部质量和组织性能。同时，齿轮箱的大圆弧部位正对着车辆行驶的方向，在列车高速运行过程中，该部位存在被飞石等杂物撞击的风险，因此在工艺上也需要重点保证。齿轮箱工艺重点保护区域如图2所示。

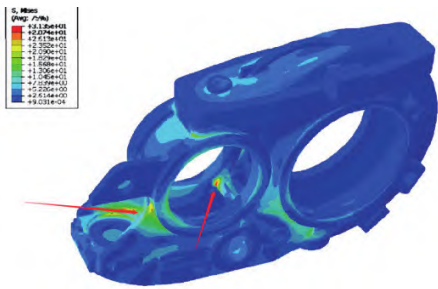


图1 齿轮箱应力云图

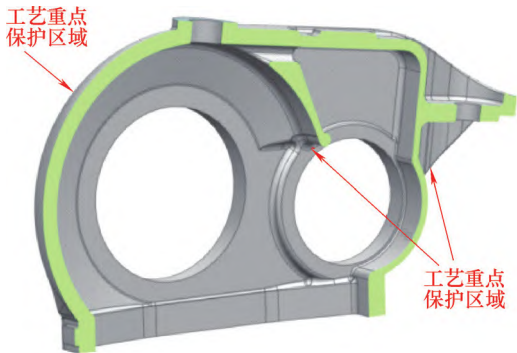


图2 齿轮箱工艺重点保护区域

3 整体工艺设计

选择低压铸造工艺，树脂砂造型，需综合考虑铸造工艺性、分型，以及便于打磨和加工等多方面因素。浇注系统设计在合箱面上，采用开放式分散内浇道，其比例为直浇道：横浇道：内浇道=1：2：3，采用水平造型竖直浇注方式。因该箱体壁厚差异较大，结合结构和壁厚分析，在顶部厚大部位设置了发热冒口。对于齿轮箱的重要部位，要求确保无铸造缺陷，并使其组织致密、力学性能高，故在工艺设计中需着重保证这些部位有良好的补缩效果，同时采用冷铁激冷等措施，达到细化晶粒、提升力学性能的目的。在工艺设计完成后，利用Magma软件对充型和凝固过程进行模拟。图3所示为凝固50%的温度场模拟结果。由图3可知，该工艺具有良好的凝固温度场，整体呈现顺序凝固，即远离浇冒口的部位先凝固，浇冒口部位最后凝固，这样有利于保证良好的补缩效果。同时，关键部位的冷却速度较快，可提前实现补缩，有效保障了这些部位的内部质量和组织性能。

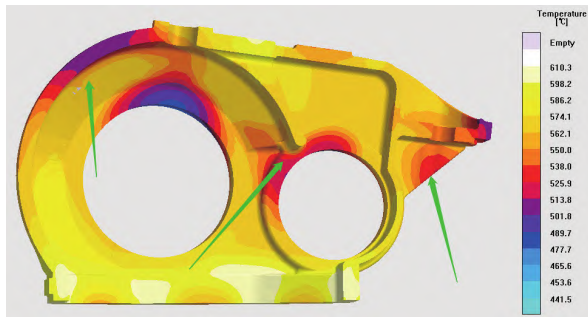


图3 凝固50%时的温度场

对开发的齿轮箱进行射线检测后，发现其内部质量整体状况良好，关键区域不存在任何铸造缺陷。对齿轮箱进行水压气密性检测时，各个部位均未出现渗漏的情况。通过本体解剖，关键区域的力学性能表现十分优异，其中抗拉强度≥290MPa，伸长率≥5%，远超技术条件中对抗拉强度≥230MPa、伸长率≥2%的要求。采用这种工艺生产的齿轮箱，不仅完全满足技术要求，还显著加强了关键区域的质量。

4 关键难点解决

在该齿轮箱的大规模生产过程中，气孔和缩

松是主要的缺陷类型。其中，气孔缺陷主要集中在齿轮箱的上部，而缩松缺陷则主要集中在内浇口附近。为了提升产品质量和成品率，这些缺陷需要得到妥善解决。

4.1 气孔缺陷

气孔缺陷一直是该齿轮箱主要缺陷，缺陷主要集中在齿轮箱上部的吊挂和大圆弧等区域，图4所示为齿轮箱射线检测发现的气孔缺陷。



图4 齿轮箱射线检测吊挂区域气孔

借助Magma软件，对齿轮箱的充型过程的温度场进行了深入分析，图5所示为齿轮箱充型95%时的温度场。由图5可知，当充型达到95%时，箭头所指的部位温度较低，已经低于该材料的液相线温度 613°C ，呈现出液-固状态。在这种情况下，铝液的黏度较大，使得在浇注过程中卷入的气体和砂芯产生的气体很难从铝液中逸出。因此，在该部位形成气孔缺陷的概率大幅增加。



图5 充型95%时的温度场

为了更有效地解决气孔缺陷问题，采取了以下3项措施。

(1) 增设溢流冒口 在气孔高发区域增加溢流冒口，以便让铝液中包裹的气体能够顺利排出，如图6所示。

(2) 优化冷铁使用 在保证补缩效果良好的前提下，尽量减少冷铁的数量，并缩小冷铁与铝液的接触面积。这样做主要是为了提高充型过程中铝液的温度。

(3) 增强排气效果 通过增加分型面排气条和在铸型上增设排气孔等方式，进一步提升排气效果。通过以上措施的实施，气孔缺陷比例由原先的10%降低到2%以下，气孔缺陷比例显著降低。

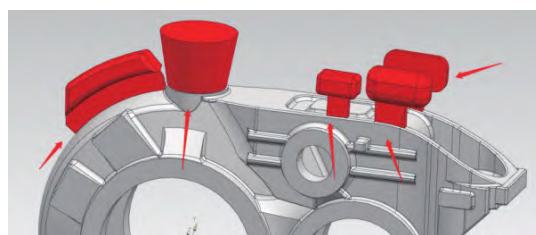


图6 齿轮箱溢流冒口

4.2 缩松缺陷

合箱面缩松问题也是该类齿轮箱的主要缺陷之一。从工艺角度来看，合箱面部位靠近内浇道，通常情况下，该部位的补缩效果良好，不应出现缩松缺陷。然而，在实际生产过程中，发现合箱面浇口部位粘砂情况特别严重，形成了明显的铝包砂现象，如图7所示。经过成分检测，该粘砂中的铝含量（质量分数）约为20%。分析认为，这种粘砂现象增加了合箱面缩松部位的热节，使其热节增大，从而导致补缩不足，最终形成了海绵状的缩松缺陷。



图7 齿轮箱浇口附近粘砂

为了解决合箱面缩松缺陷，必须解决粘砂问题。为此，采取了以下改进措施。

1) 提升浇口附近型砂紧实度，同时在铸型中加大该部位的涂料层厚度。

2) 降低浇注过程中的保压压力，将保压压力从820mbar (82kPa) 调整为680mbar (68kPa)，以降低铝液冲进型砂间隙的压力，减少粘砂可能性。

(下转第136页)

框沿、导轨侧沿等薄壁部位硬度，最高硬度值为238HBW。对工作台各部位的形状误差、尺寸精度进行检测，均在误差技术要求范围内，合格。

后又生产多批，效果良好，废品率基本控制在3%以内。

6 生产效果

1) 结构改进后，工作台铸件导轨硬度符合设计要求，各部位硬度相对比较均匀。对机械加工过程进行跟踪了解，发现导轨面组织致密，金属光泽理想，矩形方框沿及其他薄壁部位加工性能良好，未出现加工困难或无法加工现象。

2) 结构改进后，工作台铸件重量由原来的190kg变为145kg，每件减重45kg，按每吨5000元计，每件节省225元。

3) 结构改进后，铸件内腔空间高度增大，1#、2#砂芯两翼部位增厚，强度增高，制作更容易。另外，内腔高度增大后，砂芯清理更方便，制芯、清理工时明显减少。

7 结束语

1) 改进不合理的铸件结构，可降低铸造生产的

难度，降低生产成本。

2) 在结构设计中，应尽量避免壁厚悬殊情况的出现，尤其是对硬度有严格要求的机床类铸件。

3) 设计的铸件内腔，要便于铸件型芯制作，易于砂芯清理；内腔的高度（即砂芯的厚度）应大于两边壁厚的总和。

参考文献：

- [1] 李彬，蔡良福，张光政，等. 机床工作台铸造工艺设计及优化[J]. 铸造，2020，69（7）：764-768.
- [2] 徐兴卫，毛进学. 铸件结构设计对铸件质量的影响[J]. 现代铸铁，2017（4）：67-70，74.
- [3] 茅庆余. 灰口铸铁的牌号、化学成分、机械性能、铸件壁厚间的关系[J]. 机车车辆工艺，1965（2）：1-8.
- [4] 施延藻. 铸造实用手册[M]. 沈阳：东北工学院出版社，1988.
- [5] 美国铸造师协会. 铸件缺陷分析[M]. 武达兼，陈嵩生，译. 北京：机械工业出版社，1982.
- [6] 隋进. 湿型砂灰铁件冒口设计[J]. 铸造技术，1993（S1）：11-13.

MW 20240410

（上接第131页）

经过以上工艺调整，杜绝了齿轮箱合箱面浇口处粘砂的现象，合箱面缩松问题也得到彻底解决。

5 结束语

1) 采用低压铸造工艺与树脂砂造型，通过优化设计浇注系统、合理设置冒口和冷铁，成功开发出内部质量高、力学性能优异的高速动车组铝合金齿轮箱。

2) 通过采取增设溢流冒口、优化冷铁使用和增强排气效果等措施，显著降低了气孔缺陷比例。

3) 通过提升浇口附近型砂紧实度、加厚涂料层厚度，以及降低浇注过程中的保压压力等措施，成功解决了合箱面缩松问题。

参考文献：

- [1] 金思勤，赵永强，李枫，等. 高速动车组齿轮箱加载试验及故障诊断研究[J]. 机车车辆工艺，2014（4）：1-3.
- [2] 张建超，陈湘松，郝如江，等. 高速动车齿轮箱故障诊断技术研究[J]. 综述机械传动，2023，47

（3）：133-140.

- [3] 李秋泽，单巍，张英春，等. 中国高速动车组转向架技术发展及展望[J]. 机车电传动，2023（2）：14-35.
- [4] 邵帅，张开林，姚远，等. 动车组锥齿轮箱飞溅润滑特性及箱体结构改进[J]. 浙江大学学报（工学版），2024，58（5）：1060-1071.
- [5] 陈红圣，徐贵宝，董雯，等. 高速动车组铝合金齿轮箱低压铸造工艺研究[J]. 铸造，2017（1）：6-10.
- [6] 徐贵宝，马俊成，梁超. 孔洞缺陷对高铁动车组铝合金齿轮箱疲劳性能的影响[J]. 失效分析与预防，2021（5）：333-338.
- [7] 金泰木，高艳丽，黄粒，等. ZL101A 合金摇枕座铸件铸造工艺研究[J]. 铸造技术，2020，41（6）：640-644.
- [8] 冀晓磊，郝圆亮，孟晓东，等. 铝合金某薄壁壳体件铸造工艺数值模拟及优化[J]. 铸造，2023，72（10）：1363-1368.

MW 20240516