DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.012

一种复杂薄壁齿轮箱体的铸造工艺设计

穆彦青，肖恭林，杨志刚，徐小辉
（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：设计一种适用于复杂薄壁箱体的铸造工艺，并对其技术要求及结构进行了分析，并基于 MAGMA 分析软件对其成型过程流动场、凝固场进行 CAE 分析，设计了 1 种复杂薄壁箱体的双侧底注工艺。结果表明，该工艺完全满足该类复杂薄壁箱体的技术要求。

关键词：复杂薄壁；箱体；铸造工艺；CAE 分析

中图分类号：TG255　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2021)06-0493-04

Casting Process Design of a kind of Complex Thin-walled Gearbox Housing

MU Yanqing, XIAO Gonglin, YANG Zhigang, XU Xiaohui
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract: A casting process suitable for complex thin-walled gearbox housing was designed, and its technical requirements and structure were analyzed. CAE analysis of the flow field and solidification field in the forming process was carried out based on the analysis software MAGMA, and a two-side bottom pouring process for complex thin-walled gearbox housing was designed.The results show that the casting process can meet the technical requirements of this kind of complex thin-walled gearbox housing.

Key words: complex thin-walled; gearbox housing; casting process; CAE analysis

中国轨道交通装备制造业经过十余载的快速发展，整车集成技术已达国际领先水平，已成为中国高端制造的“黄金名片”，尤其是动力驱动装置作为整车最为关键核心的零部件之一，也迎来了前所未有的发展机遇和挑战。齿轮箱作为整个动力驱动装置的载体，在轨道车辆运行过程中，承受着苛刻的载荷工况和环境气候，其性能好坏直接影响着列车的安全性和稳定性。伴随齿轮箱结构的轻量化设计，齿轮箱铸件逐步向集成化、复杂化和薄壁化转变，铸造成型过程更易产生夹渣、冷隔、气孔、缩孔缩松等缺陷，严重影响产品质量稳定性。本文作者旨在对一种复杂薄壁箱体的铸造工艺进行研究探索，以开发一种适用于复杂薄壁箱体的铸造工艺。

1　产品技术要求及结构分析

箱体材料为 EN-GJS-400-18LT，其力学性能要求，如表 1。齿轮箱体磁粉探伤要求不低于 EN 1369:1997 规定的 2 级要求；射线探伤要求不允许存在裂纹、冷豆和冷隔；气泡、非金属夹杂、缩孔等缺陷根据壁厚按 ASTM E 446 或 ASTM E 186 规定的 3 级质量等级进行评定。

从产品结构分析，如图 1，箱体轮廓尺寸达 1 000 mm×550 mm×400 mm，主体壁厚仅 8 mm，成型难度大；球墨铸铁球化、孕育处理易形成夹渣物，影响金属液的纯净度；厚大的关键区域遍布，孤立热节难以补缩等特性，易导致夹渣、冷隔、气孔、缩孔、缩松等缺陷。

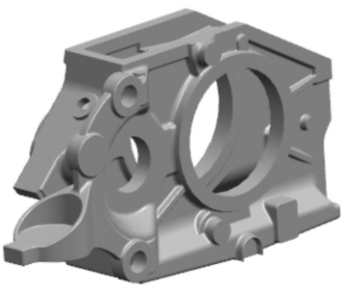


图 1 产品结构图
Fig.1 Product structure diagram

2　熔炼工艺

2.1　原材料选择

配料用 Q10 生铁、废钢、回炉料、高碳锰铁。采用球化剂、孕育剂和覆盖剂等对铁液进行炉前处理，其中球化剂粒度选用 5~25 mm，孕育剂选用 2~5 mm。

收稿日期：2021-04-12

作者简介：穆彦青（1985—），山西阳泉人，硕士，高级工程师. 主要从事轨道交通关键零部件的铸造工艺设计方面的工作. 电话：18761187689，
Email：muyanqing209@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 材料力学性能要求
Tab.1 Requirements for mechanical properties of materials

材料牌号	抗拉强度 R_m/MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 A(%)	-40℃冲击吸收能量 K_v2/J	
EN-GJS-400-18LT	≥400	≥240	≥18	≥12(三个试样平均值)	≥9(单独试样)

2.2 熔炼工艺

采用3T中频电炉熔炼铁液,生铁、废钢和回炉料的配比大约为12.0∶2.5∶1.0,熔炼温度控制在1 500~1 550 ℃。采用复合强效孕育,包底孕育+倒包孕育+瞬时孕育,提高形核率,细化晶粒度;出铁温度控制在1 500±10 ℃[1-3]。

3 铸造工艺设计

采用呋喃树脂砂造型工艺,树脂加入量1.0%~1.2%,固化剂加入量为树脂量的30%~50%;浇注时间为17~20 s;根据阻流断面设计法确定,$A_{阻}$=12 cm²;采用底注式浇注系统,浇注系统比例为:$\Sigma A_{内}$:$\Sigma A_{横}$:$\Sigma A_{直}$=1.2∶1.4∶1.0[1-5]。基于以上工艺参数,设计了两种工艺方案,如图2、图3。

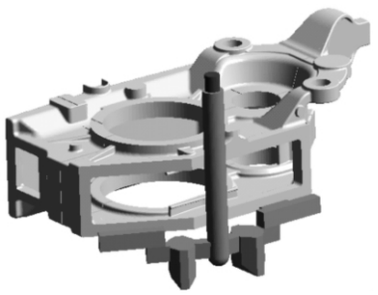


图2 浇注系统设计方案一
Fig.2 Gating system design scheme 1

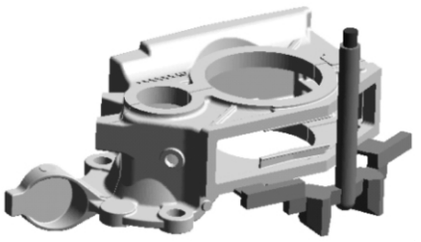


图3 浇注系统设计方案二
Fig.3 Gating system design scheme 2

基于Magma铸造仿真软件,对以上两种工艺方案进行流动场仿真分析,如图4、图5。根据流动温度场分析,方案一由于铸件局部壁厚太薄和底注工艺时上型温度场低,易造成充型末期铸件A区域两处铸件充型温度太低,存在形成冷隔、气孔的较大风险;相较方案一,方案二在整个充型过程中不存在明显的低温充型区,但在充型末期,气体会汇集于图中所示B区域,易造成局部憋气的风险。综合考虑,工艺方案二更佳。

基于工艺方案二,采用分区设计法,根据铸件结构,对铸件划分为多个独立区域,针对不同区域采用发热冒口+冷铁的工艺方法,设计了铸造工艺方案,并对流动场进行分析,如图6。充型前期,浇注系统采用合箱面双侧底注工艺进水,铁液充型阻力小,铁水沿着底面箱壁平稳充入型腔,整个薄壁区域温度场均衡;充型中期,铁液液面沿着侧面箱壁平稳上升,利于型腔中气体和金属前沿液面氧化夹渣的上升排出;充型末期,气体、夹渣将汇集于工艺冒口区域,从冒口排出型腔。

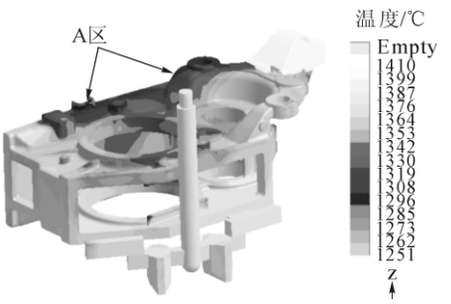


图4 浇注系统设计方案一的流动场
Fig.4 Flow field of gating system design scheme 1

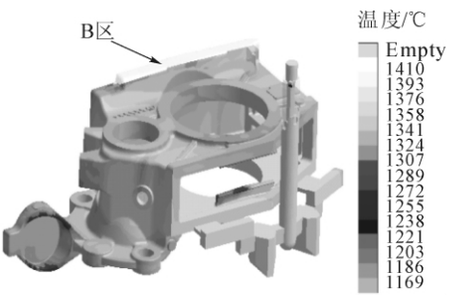


图5 浇注系统设计方案二的流动场
Fig.5 Flow field of gating system design scheme 2

如图7,从其凝固场分析,通过合理设计发热保温冒口和冷铁,实现了铸件不同区域的顺序凝固,从缩松判据分析,铸件的关键键部位均未见缩松缺陷,满足技术要求。

4 样件试制

通过样件试制,铸件的力学性能、磁粉探伤、射线探伤均达到技术条件要求,材料力学性能如表2,箱体铸件,如图8。

5 结论

(1)选用合理的原材料,采用复合强效孕育,包底孕育+倒包孕育+瞬时孕育,提高形核率,细化晶粒度,保证了低温球铁材料EN-GJS-400-18LT的综

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

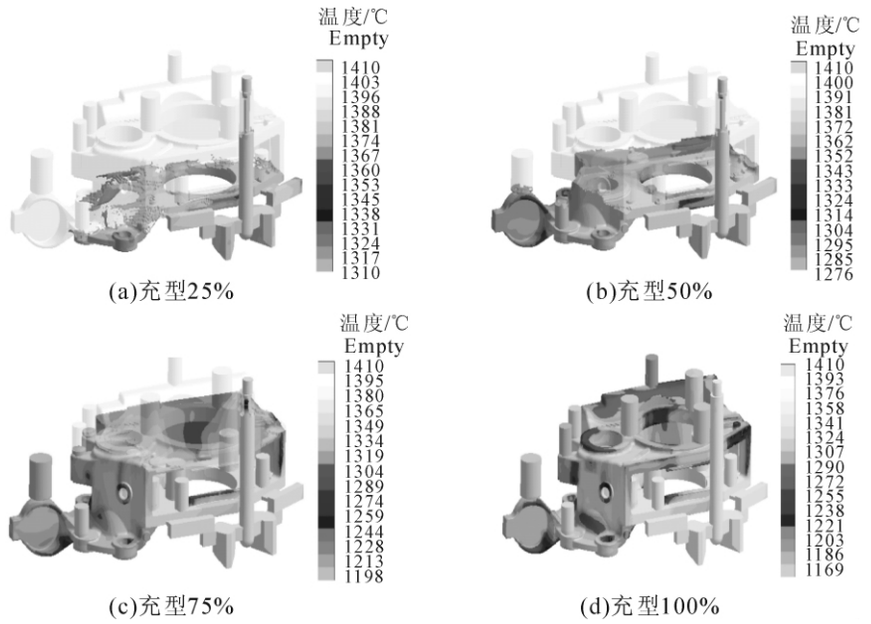


图 6 流动场分析

Fig.6 Flow field analysis

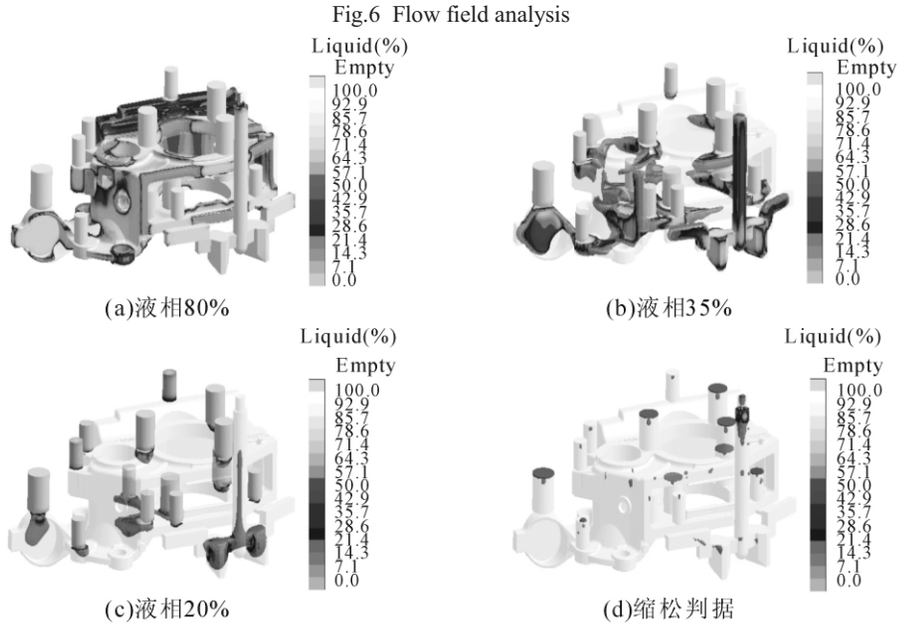


图 7 采用改进后的浇冒系统模拟的凝固场分析和缩松判据

Fig.7 Solidification filed analysis and shrinkage criteria simulated with improved gating and riser system

表2 力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of piston skirts (single cast specimens)

材料牌号	抗拉强度 R_m/MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$/MPa	断后伸长率 A(%)	室温 冲击吸收能量 K_v2/J		
EN-GJS-400-18LT	412	285	23	14	14	15

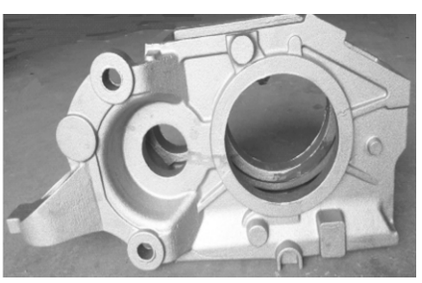


图 8 箱体铸件图

Fig.8 Box casting

合力学性能。

(2)采用合箱面双侧底注工艺,采用分区设计法,根据铸件结构,对铸件划分为多个独立区域,针对不同区域采用发热冒口+冷铁的工艺方法,解决了铸件关键部位的缩孔缩松缺陷。

(3)通过样件试制,铸件的磁粉探伤、射线探伤均达到了技术要求,成功开发了一种复杂薄壁箱体铸造工艺。

(下转第 498 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

轴代表该过程中的裂纹实时张开位移(COD)。按照标准 GB/T 4161-2007 中规定的方法从 P-V 曲线上作图得出试样 1# 和 2# 的 FQ 值（裂纹失稳载荷力值）分别为 22.46 kN 和 25.00 kN。试验结果说明，1# 试样的 FQ 值相对更低，裂纹更容易在长针状富铁相试样中扩展，说明危害性更大。

一般情况下（排除缺陷的影响），细小的裂纹尖端遇到富铁相（与裂纹扩展方向斜交或正交）时，裂纹沿富铁相边缘扩展，产生裂纹偏析，从而使裂纹扩展速度下降。但若长条状的富铁相金属间化合物与裂纹扩展方向一致，则裂纹扩展速度不会降低[4]。鱼骨状枝晶结构较针状更加复杂，裂纹扩展相对较慢。铁在铝硅合金中以针状相形式存在，该金属间化合物对合金性能造成严重的损害[5-6]，因而针状的富铁相，对基体产生严重的割裂作用，降低材料的性能。

3 工艺优化

高速列车齿轮箱结构复杂，在设计低压铸造过程时，需要采用浇冒口和冷铁相结合的措施调节凝固时温度场，实现铸件顺序凝固方式，从而减小铸造缺陷，得到组织致密的齿轮箱铸件。而冷铁激冷措施可以让接触部位迅速凝固，浇冒口部位则延缓凝固时间。根据研究结果，对于吊挂座、安全托等受到拉应力的关键区域，不能设置浇冒口，防止出现长针状铁相。并且应尽量采取冷铁激冷措施，除了细化晶粒提升性能外，也可以让富铁相以鱼骨状存在，降低开裂敏感性，提升产品的安全系数。

4 结语

（1）高速列车铝合金齿轮箱材料中微观夹杂物为富铁相，其形态有鱼骨状和长针状两种。

（2）在齿轮箱铸造过程中，快速凝固部位富铁相呈现鱼骨状析出，而在冷却较慢的部位，出现长针状富铁相。

（3）P-V 曲线表明，长针状富铁相试样的 FQ 值相对更低，更容易造成裂纹的扩展，对零件的危害性更大。

（4）设计齿轮箱铸造工艺时，关键区域不能设置浇冒口，并应尽量采取激冷措施，降低铁元素的危害，提升齿轮箱的安全系数。

参考文献：

[1] 贾银翠. 铝熔体中氢与夹杂物的研究 [D]. 沈阳: 东北大学材料学，2010:10-13.
[2] PARK D S, NAM S W. Effects of manganese dispersoid on the mechanical properties in Al-Zn-Mg alloys [J]. J Mater Sci, 1995, 30 (5):1313-1320.
[3] GALL K, YANG N, H orstemey er M, et al. The inf luence of modified intermetallics and Si part icles on fatig ue crack paths in a cast A356 Al alloy [J]. Fat igue Fract Eng Mater Struct, 2000, 23: 159.
[4] 范宋杰，何国球，张卫华，等. A356 铸造铝合金疲劳性能影响因素概述[J]. 材料导报，2007，21（9）：59-62.
[5] HYUN Y K，TEA Y P，SANG W H，et al. Effects of Mn on the crystal structure of α-Al （Mn，Fe）Si particles in A356 alloys [J]. Journal of Crystal Growth，2006，291：207-211.
[6] MURALI S, RAMAN K S, MURTHY K S S. Morphological studies on β-FeSiAl5 phase in Al-7Si-0.3Mg alloy with trace additions of Be,Mn, Cr, and Co [J]. Materials Characterization,1994,33：99-112.

(上接第 495 页)

参考文献：

[1] 李新亚. 铸造手册. 第 5 卷，铸造工艺[M]. 北京：机械工业出版社，2011.
[2] 王文清，李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
[3] 穆彦青，封雪平，鲍飞，等. 基于 Magma 的球铁齿轮箱铸造工艺设计[J]. 铸造技术，2014，35(12): 3051-3052.
[4] 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.
[5] 董鹏，封雪平，刘宇，等. 城轨用轴承座铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2015，36(11): 2807-2809.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 **2021** 年《铸造技术》杂志
国内邮发代号：**52–64**　国外发行号：**M855**　国内定价：**25** 元/本　海外定价：**25** 美元/本

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net