

轨道交通用大型铝合金齿轮箱铸件的研制

马俊成, 李向平, 孙亚晓, 查明晖, 万佳, 龚家林, 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: 根据高铁复兴号用大型铝合金齿轮箱铸件的结构特点和技术要求, 采用树脂砂造型及低压浇注方式, 合理地设计浇注系统、冒口、冷铁及低压浇注工艺, 并结合CAE仿真技术进行分析和工艺优化, 成功解决了缩孔、缩松和气孔缺陷。最终研制的铝合金齿轮箱力学性能良好, 内外在质量高, 能够满足速度160km/h动力集中型动车组列车运行的需要。

关键词: 低压铸造; 铸造工艺; 铸造模拟; AlSi7Mg0.3; 齿轮箱

Development of a large aluminum alloy gearbox casting for rail transit

MA Juncheng, LI Xiangping, SUN Yaxiao, ZHA Minghui, WAN Jia, GONG Jialin, MAO Hengjie, LI Junxi

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

Abstract: Based on the structural characteristics and technical requirements of the large aluminum alloy gearbox castings used in the high-speed railway of Fuxing, resin sand molding and low-pressure pouring method were adopted. Through the reasonable design of the pouring system, riser, chill, and low-pressure pouring process, combined with the optimization analysis of CAE simulation technology, the defects were successfully solved. The aluminum alloy gearbox with good mechanical properties and high internal and external quality has been developed, which can meet the needs of power concentrated high-speed train operation at a speed of 160 kilometers per hour.

Keywords: low-pressure casting; casting technology; casting simulation; AlSi7Mg0.3; gearbox

1 序言

随着现代工业的飞速发展, 大型复杂铝合金铸件在各个领域的应用越来越广泛。在汽车、轮船以及轨道交通等领域, 高性能的铝合金铸件对于提高设备的性能、降低重量、增强可靠性起着至关重要的作用^[1]。在轨道交通领域, 速度160km/h动力集中型复兴号动车组的齿轮传动系统对齿轮箱的要求极高。齿轮箱作为齿轮传动系统的承载体, 其工作性能直接关系到动车组的运行可靠性和安全性。而齿轮箱体作为传动装置的关键零部件, 其质量和性能更是至关重要。目前, 对于大型复杂铝合金齿轮箱

的研究主要集中在铸造工艺、力学性能、质量控制等方面。

本文所介绍的铝合金齿轮箱, 材质采用AlSi7Mg0.3合金, 该合金具有铸造性能良好、线收缩小、气密性高、耐蚀性高, 以及综合力学性能好等优点, 广泛应用于汽车、轮船及轨道交通列车制造领域^[2-6]。然而, 由于该齿轮箱外形尺寸大、结构复杂、铸造热节繁多, 同时又属于承载式齿轮箱, 受力较大, 因此对齿轮箱内部质量及力学性能要求极高, 这给铸造开发带来了很大的难度。本研究旨在通过对砂型低压铸造工艺的合理设计、铸造工艺

第一作者: 马俊成, 硕士, 高级工程师, 主要从事铸造铝合金材料及铸造工艺研究, E-mail: majuncheng@csrqsyri.com.cn。

仿真模拟, 以及精细生产过程控制等方面的研究, 保证该大型复杂铝合金齿轮箱的铸件质量, 开发出合格的铸件产品。同时, 通过对该铸件的技术难点进行分析, 为类似大型复杂铝合金铸件的生产提供参考和借鉴, 具有重要的现实意义和应用价值。

2 产品结构及要求

齿轮箱具体结构如图1所示。其外形轮廓尺寸为977mm×660mm×402mm, 质量265kg。齿轮箱壁厚分布如图2所示。其最小壁厚为12mm, 最大壁厚为116mm, 壁厚差异大, 热节分散, 外表面分布了多条加强筋, 内腔有复杂的油槽、油沟等结构。齿轮箱法兰、合箱面、吊挂和电动机安装面等关键区域需要进行X射线检测, 无损检测等级达到ASTM E155—2015《铝铸件和镁铸件检测用射线参考底片》的二级。同时齿轮箱关键区域力学性能要求高, 远高于欧标及国际标准, 具体力学性能要求见表1。综上所述, 这些高指标要求, 都给齿轮箱的铸造工艺开发带来了很大难度。

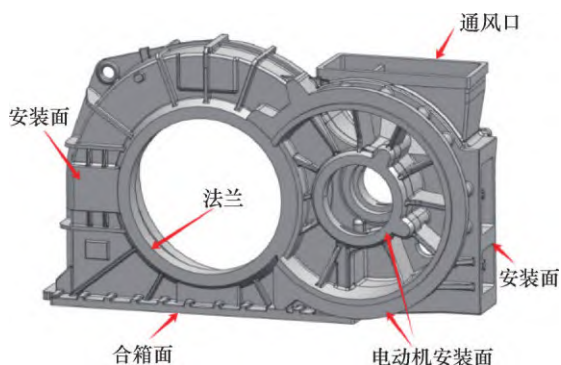


图1 齿轮箱结构

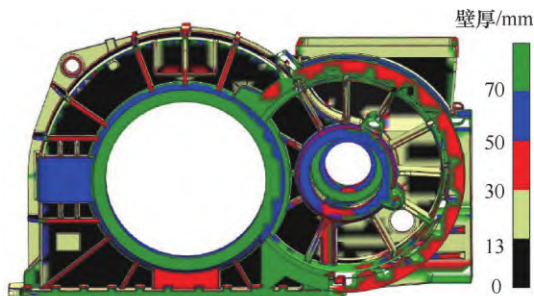


图2 齿轮箱壁厚分布

表1 齿轮箱力学性能要求

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A (%)	硬度 HBW
≥ 270	≥ 220	≥ 3.5	≥ 75

3 铸造工艺设计思路

为保证齿轮箱的质量, 采用砂型铸型配合低压浇注的铸造方式, 平铸立浇工艺方案, 即齿轮箱合箱面朝下, 铝液由合箱面引入铸型型腔。铸型采用自硬呋喃树脂砂, 型砂采用40/70目原砂, 树脂加入量1.0%~1.3%, 固化剂加入量为树脂量的30%~50%^[7]。采用低压浇注, 主要是因为低压浇注充型过程是通过电子元件控制, 铝液充型平稳, 减少了重力浇注时铝液对铸型的冲击和飞溅现象。同时, 低压浇注时铝液在压力作用下自下而上补缩铸件, 远离浇口的部位最先凝固, 浇口最后凝固, 从而使铸件在凝固过程中通过浇口得到补缩, 易实现顺序凝固, 提高铸件的补缩效果, 铸件组织均匀, 偏析少, 致密度高, 因此铸件的气密性、耐压性都得到提高, 力学性能比一般重力铸造可提高10%左右^[8-10]。为了保证齿轮箱充型平稳, 防止铝液氧化, 采用开放式浇注系统, 即 $\Sigma F_{\text{内浇道}} > \Sigma F_{\text{横浇道}} > \Sigma F_{\text{直浇道}}$ 。为了实现铸件凝固补缩, 浇注系统中每个单元的截面积应保证 $F_{\text{直浇道}} > F_{\text{横浇道}} > F_{\text{内浇道}}$ 。考虑到齿轮箱为大型铝合金铸件, 采用双升液管浇注方式, 利于充型及补缩。为保证顺序凝固, 在大热节部位布置工艺冷铁。由于齿轮箱尺寸大, 铝液流动距离远, 因此在铝液流动的最后部位设置溢流冒口, 在利于补缩的同时可收集最后质量较差的铝液。为防止充型过程中憋气, 在铸型上部分型面上开设多条1mm×20mm的出气缝隙, 以保证排气顺畅。

4 铸造CAE仿真模拟分析及工艺确定

为确保工艺设计的可靠性, 本研究采用MAGMA凝固模拟分析软件对设计的工艺方案进行深入分析及优化。将产品的工艺模型转换为Stl文件格式, 随后导入至铸造模拟软件中, 以便对充型以及凝固过程展开模拟分析。在预处理阶段, 将网格划分数量设定为1000万个。对于铸件材料, 选定为A1Si7Mg0.3合金, 补缩效率设置为35%。铝液的浇注温度设定为700℃。在造型材料方面, 采用呋喃树脂砂; 冷铁材料则选择钢材。砂型和冷铁的初始温度均为20℃。同时, 设置铸件与砂型之间的传热系数随温度变化而变化, 铸件与冷铁之间的传热系数同样设定为随温度变化。

为了保证铝液充型平稳，并保证充型上部温度，通过对充型过程的模拟仿真，可以了解金属液在型腔内的流动情况及温度变化情况，从而调整浇注系统的设计及冷铁设置。如优化浇口及冷铁的位置、大小和数量，以确保金属液能够平稳、快速地充满型腔，减少卷气、夹渣等缺陷的产生。图3所示

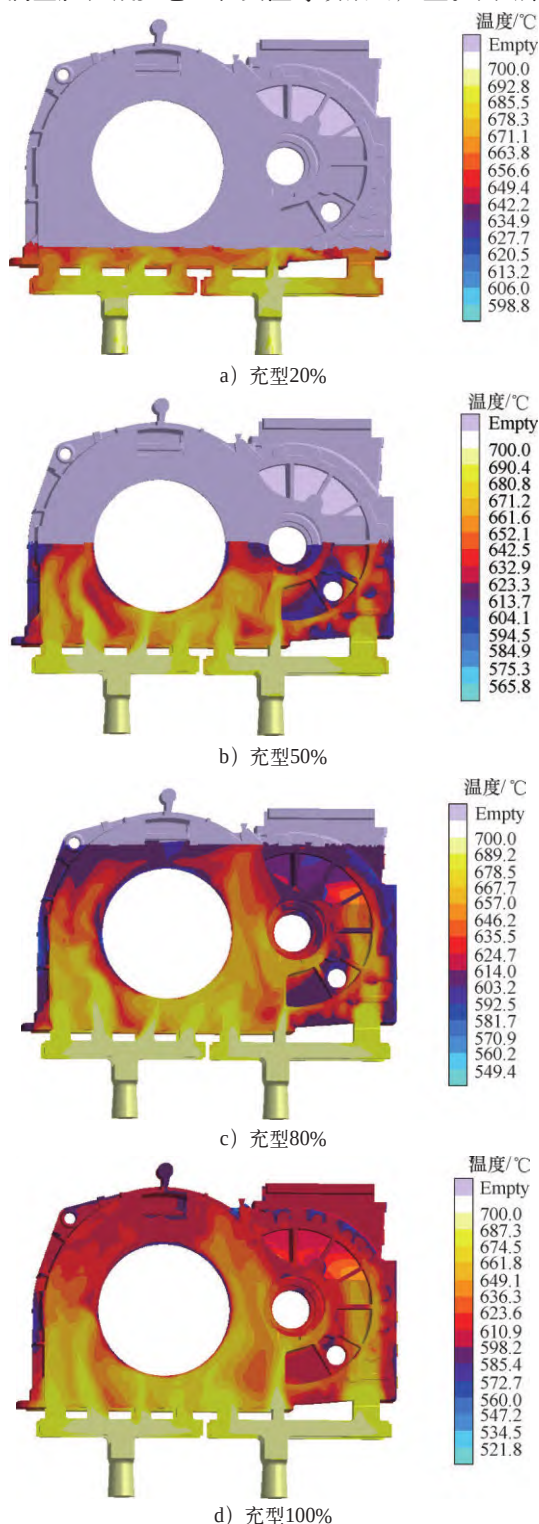


图3 箱体流动场计算

为工艺优化后充型仿真分析。从图3可看出，充型过程平稳，液面保持在同一水平面。同时，充型过程中各区域温度基本维持在液相线温度613℃以上，内部金属液温度高于外部，上部金属液温度低于下部且均高于液相线温度。这种合理的温度场分布不仅有利于形成科学的补缩温度场，还能使铸件在凝固过程中组织更加均匀，减少内部应力，从而提高铸件的强度和耐久性，为铸件的高质量成形提供了坚实保障。

为了得到合理的凝固温度场，适当调整冷铁的位置和数量，以加快局部区域的冷却速度，实现更好的顺序凝固。同时，浇冒口的设计也根据仿真结果进行优化，确保能够有效地补缩，减少缩松等缺陷。图4所示为优化后的凝固过程的仿真分析。结果表明，通过双升液管、冷铁和冒口的配合使用，实现了铸件的顺序凝固。经缩松判据分析，虽然铸件局部存在小缩松，但关键区域无缩松缺陷。这一结果为实际工艺的优化提供了重要指导。

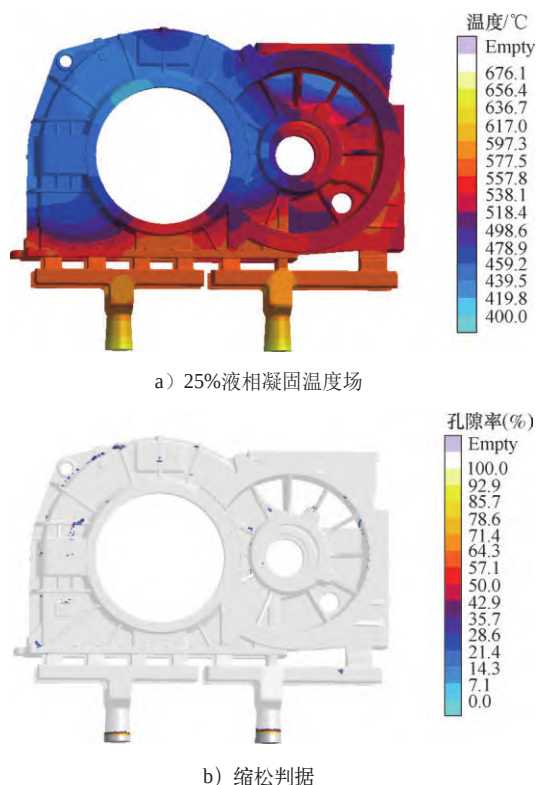


图4 凝固场分析、缩松判据

通过对仿真结果的深入分析，可更好地理解铸造过程中的温度场和凝固过程，从而有针对性地对实际工艺进行优化。这种以仿真指导实际工艺的方法，可大幅提高铸造工艺的可靠性和铸件质量，降

低生产成本，为大型复杂铝合金铸件的生产提供有力的技术支持。经工艺优化后，最终的齿轮箱铸造工艺如图5所示。

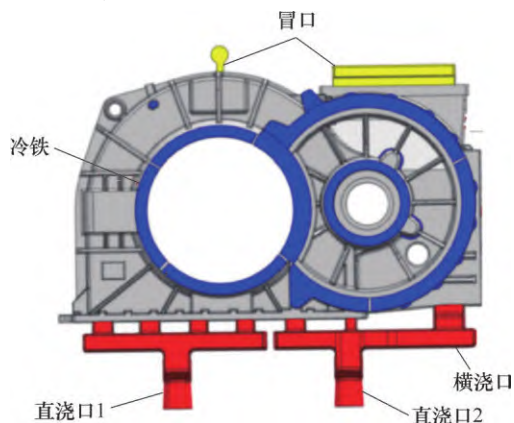


图5 铸造工艺

5 熔炼及浇注

5.1 熔炼

熔炼设备为电阻坩埚炉，熔炼时加入AlSi7Mg0.3合金锭，将铝液温度升至720~750℃，然后采用FOSECO旋转喷吹除气机对铝液进行精炼，同时加入变质剂Al-10Sr合金，其加入量为铝液重量的0.2%~0.4%。除气时间要求为30min。根据密度法对铝液除气效果进行检测，规定抽真空凝固的铝块密度 $\rho_s > 2640 \text{ kg/m}^3$ 时，铝液质量合格。

5.2 浇注曲线

低压铸造中，正确选择和控制浇注工艺参数是保证获得合格铸件的关键。低压铸造的浇注过程包括升液、充型、结壳、保压结晶凝固和卸压等几个阶段，其中升液、充型和保压结晶凝固阶段尤为关键。低压铸造中的浇注压力对浇注质量影响很大，压力过低时金属液不能顺利充满型腔，而压力过高则会造成合金液在升液和充型时发生紊流、卷气现象，从而导致铸件中出现缺陷。充型时以保证金属液平稳上升为前提，理论上液面上升越慢充型越平稳，能够避免或减少紊流的出现；然而，若充型速度过慢，则会延长充型时间，容易产生冷隔、疏松等缺陷；若充型速度过快，则会在型腔中产生反压力，同时还要考虑金属液对砂芯的冲击力，避免冲断砂芯。在实际生产中，该齿轮箱充型升压速度选择800Pa/s。

5.3 浇注温度

考虑到铸件尺寸较大、壁厚不均匀、结构复

杂，以及AlSi7Mg0.3合金的特点，并结合不同季节气温变化等因素，确定当环境温度 $< 10^\circ\text{C}$ 时，浇注温度设定为700~720℃，当环境温度在10~40℃时，浇注温度设定为690~710℃。

6 缺陷分析及解决

在齿轮箱批量生产中，产品主要铸造缺陷为内浇口附近缩孔、缩松，以及通风口顶部气孔。

6.1 缩孔、缩松缺陷

在齿轮箱浇口附近时常出现缩孔、缩松缺陷，如图6所示。



图6 缩孔、缩松缺陷

经分析认为，内浇口附近砂型紧实度不足是导致缩孔、缩松缺陷的重要原因之一。在长期高温冲刷下，金属液容易进入砂型间隙，形成粘砂或铝包砂现象，如图7所示。这不仅会破坏砂型的结构完整性，还会减缓铝液的凝固冷却速度。由于凝固过程中铝液的冷却速度变慢，其收缩时间延长，因此增加了产生缩孔、缩松的倾向。

与此同时，结合浇注系统分析，认为内浇道尺寸偏小可能导致其补缩能力不足。在铸造过程中，内浇道的作用是为铸件提供液态金属，并在凝固过程中对铸件进行补缩。如果内浇道尺寸偏小，内浇道的横截面积就会减小，从而限制了液态金属的流量和补缩能力。当铸件在凝固过程中发生收缩时，内浇道无法及时提供足够的液态金属进行补缩，就容易在内浇口附近形成缩孔、缩松缺陷。

为了解决内浇口附近缩孔、缩松缺陷，采取了以下工艺调整措施。

1) 将内浇道与合箱面之间部位砂型由呋喃树脂砂优化更改为强度和致密度更高的覆膜砂砂型。覆膜砂砂型具有更高的紧实度和强度，能够有效避免因粘砂缺陷造成的局部过热，从而降低缩松缺陷的形成风险。通过提高砂型质量，可以减少金属液与



a) 合箱面内浇口附近粘砂



b) 吊挂内浇口附近粘砂

图7 内浇口附近铝粘砂

砂型之间的相互作用，保证铝液在凝固过程中的正常冷却速度。

2) 对浇注系统进行优化设计，将原有的浇注系统内浇道厚度由原来的25mm优化为35mm。增加内浇道的厚度可提高低压铸造过程中内浇道对铸件合箱面的补缩能力。这样，在铸件凝固收缩时，内浇道能提供更多的液态金属进行补缩，可有效地减少缩孔、缩松缺陷的产生。

6.2 气孔缺陷

在通风口顶部主要为气孔缺陷，如图8所示。分析认为，造成气孔的主要原因为通风口顶部位于充型远端，在浇注过程中，铝液需要经过长距离流动才能到达通风口顶部。由于长距离流动会导致铝液温度降低、流动性变差。在这种情况下，铝液中的气体不易从铝液中逸出，容易在通风口顶部形成气孔缺陷。此外，通风口顶部的气压较高，也会阻碍气体的排出，进一步增加了气孔形成的可能性。

为了解决通风口气孔缺陷，采取了以下工艺调整措施。

1) 在通风口附近增加侧面浇注系统。这样可以提升通风口附近铝液的温度，改善铝液的流动性，使气体更容易从铝液中逸出。同时，侧面浇注系统



图8 顶部气孔缺陷

还可以缩短铝液到达通风口顶部的流动距离，减少铝液在流动过程中的降温，降低气孔形成的风险。

2) 增加两处排气溢流冒口。排气溢流冒口可以提高顶部位置的排气、排渣能力，减小箱体顶部的气压，加强型腔气体的逸出能力。通过及时排出型腔中的气体和杂质，可以有效地避免气孔缺陷的形成。

通过对缺陷形成机理的深入分析和针对性的工艺调整，成功解决了齿轮箱批量生产中产生的缩孔、缩松和气孔缺陷问题，提高了产品的质量和生产效率。

7 齿轮箱实物质量

对2套齿轮箱吊挂关键部位进行了本体取样性能检测，结果见表2。齿轮箱铸件经X射线检测，关键区域均能满足ASTM E 155—2015规定的二级要求。同时，采用电子成像DR系统进行检测，箱体内部质量整体良好，未发现超标铸造缺陷，结果如图9所示。另外，对精加工后的齿轮箱进行0.1~0.15MPa水压气密性试验，齿轮箱各部位均未出现渗漏现象，气密性符合技术要求。通过一系列工艺和质量控制措施，生产的齿轮箱箱体可完全满足技术要求。

表2 箱体本体力学性能

项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 A (%)	硬度HBW
技术要求	≥ 270	≥ 220	≥ 3.5	≥ 75
本体1实测值	295	246	5.0	99
本体2实测值	311	253	8.0	103

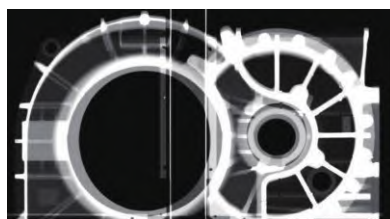


图9 齿轮箱X射线DR 检测结果

(下转第9页)

击吸收能量都有提高。较高的硬度能抵抗磨粒侵入试样表面,使得磨痕表面的犁沟较浅;较高的冲击吸收能量可减少裂纹拓展造成的材料脱落,降低试样的磨损量。

表5 ZGMn13试样的磨损量 (g)

未添加纳米陶瓷	添加纳米陶瓷
0.19	0.15

4 结束语

综上试验和分析研究,得出以下结论。

1) 加入TiN纳米陶瓷后,铸态和固溶处理后ZGMn13试样的晶粒组织均明显细化。

2) 添加TiN纳米陶瓷后,ZGMn13试样的硬度和冲击吸收能量均有所提升。

3) 添加TiN纳米陶瓷后,ZGMn13试样的磨损量降低了21.1%,摩擦磨损性能得到明显改善。

参考文献:

[1] 曹菊艳,李杨,李志翔.高锰钢铸件生产过程中常

见缺陷分析及相关预防措施[J].金属加工(热加工),2016(5):46-47.

[2] 石帅,赵燕青,高云哲,等.混合稀土La、Ce对铸造高锰钢组织及夹杂物变性的影响[J].铸造,2024,73(5):653-659.

[3] 李文生,路阳.高锰钢铸件的缺陷与对策[J].铸造,2004,53(6):476-478.

[4] 曹菊艳,李志翔.铸造工艺对高锰钢耐磨性的影响[J].金属加工(热加工),2014(23):21-22.

[5] 邱伟男,周东帅,王健,等.纳米TiC颗粒增强Al-Cu-Li基复合材料摩擦磨损性能的研究[J].铸造,2023,72(4):401-408.

[6] 李洪运,任良,乐启炽,等.纳米ZrO₂颗粒增强Mg-6Zn合金复合材料组织及性能[J].铸造,2022,71(7):862-867.

[7] 于仁红,蒋明学.TiN的性质、用途及其粉末制备技术[J].耐火材料,2005,39(5):386-389.

MW 20240828

(上接第5页)

8 结束语

1) 该大型铝合金齿轮箱采用低压砂型铸造、开放式浇注系统、双升液管等工艺措施,有效地减少了充型过程形成的夹渣、卷气和冷隔等铸造缺陷,同时保证了良好的补缩。

2) 采用MAGMA仿真计算,通过合理设计浇注系统、冷铁和冒口来控制铸件的充型及凝固温度场,保证了箱体的顺序凝固。

3) 对生产中出现的缩孔、缩松和气孔等典型缺陷,进行了工艺优化并成功解决。

4) 通过相关检测,齿轮箱力学性能、X射线检测结果及规格尺寸等均满足技术条件要求。

参考文献:

[1] 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.

[2] 周斌,龚家林,李富强.高速列车用AlSi7Mg合金的应力腐蚀性能研究[J].轻合金加工技术,2020,48(7):45-47.

[3] 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.

[4] 刘振亭,高巍,金耀华,等.铸造铝合金A356.0细节疲劳性能的研究[J].铸造技术,2008(11):1530-1533.

[5] 莫德锋,何国求,胡正飞,等.孔洞对铸造铝合金疲劳性能的影响[J].材料工程,2010(7):92-96

[6] 徐贵宝,周峰,马俊成,等.机车铝合金齿轮箱体选材及低压铸造工艺研究[J].铸造,2014,63(10):987-990.

[7] 穆彦青,肖恭林,杨志刚,等.一种整体式齿轮箱铸造工艺及模具设计研究[J].铸造,2024(1):86-90.

[8] 朱慧明,苏小平.工艺参数对低压铸造铝合金轮毅缩孔形成的影响[J].热加工工艺,2022,51(15):62-64,73.

[9] 董秀琦.低压及差压铸造理论与实践[M].北京:机械工业出版社,2003.

[10] 林枫,叶锦瑞,刘志红,等.铝合金后副车架低压铸造成形工艺设计与试验验证[J].特种铸造与有色合金,2023(9):1225-1229.

MW 20240828