汽车制动卡钳的铸造工艺研究与应用

任现伟[1, 2]

（1. 洛阳古城机械有限公司，河南洛阳 471023；2. 洛阳古城新材料科技有限公司，河南洛阳 471600）

摘要：针对球墨铸铁QT450-10制动卡钳（单重3.87 kg）传统铸造工艺中金属利用率低（46.54%）、单型充型时间长（8.9 s）、铸件硬度与定位点尺寸一致性差、冒口颈缩松缺陷频发等问题，开展了铸造工艺优化研究。在不更换现有造型设备与型腔布局的前提下，取消集中式中间大冒口，采用单铸件外侧独立过热冒口（模数7.67 mm，冒口颈模数3.0 mm）配合半封闭式浇冒系统（横浇道：直浇道：内浇口=1：0.7：1.2），利用MAGMAsoft进行充型、凝固与热节分布数值模拟，并开展工艺试验与批量验证。模拟及生产结果表明：优化后浇冒系统充型更顺畅，纯充型时间由8.9 s缩短至6.7 s，生产效率由1 384件/h提升至1 756件/h（+26.87%）；整型平均重量由33.20 kg降至26.57 kg，金属利用率由46.54%提升至58.26%（+11.72%）；X射线检测显示冒口颈附近铸件本体缩松缺陷彻底消除，硬度值由HB145~215 收窄至HB176~186 ，定位点尺寸误差由118.20~118.39 mm收窄至118.03~118.25 mm，表面粗糙度*Ra*由50~110 μm降至45~85 μm。该优化工艺在未改变现有生产线的条件下，显著提升了铸件质量与量产经济性，可为同类球铁铸件的铸造工艺设计提供参考。

关键词：制动卡钳；球墨铸铁；浇冒系统；数值模拟；金属利用率；生产效率；缩松缺陷

中图分类号：U463.51^{+2}；TG255　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1174-09

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0150

Research and Application of Casting Process for Automobile Brake Calipers

REN Xian-wei[1, 2]

(1. Luoyang Gucheng Machinery Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China;
2. Luoyang Gucheng New Materials Technology Co., Ltd., Luoyang 471600, Henan, China)

Abstract: To address the problems of low metal utilization rate (46.54%), long mold filling time per mold (8.9 s), poor consistency of hardness and positioning point dimensions, and frequent occurrence of shrinkage porosity defects at the riser neck in the traditional casting process of ductile iron QT450-10 brake calipers (unit weight 3.87 kg), an optimization study of the casting process was carried out. Without replacing existing molding equipment and cavity layout, the centralized large intermediate riser was eliminated, and an independent overheated riser for each casting (riser modulus 7.67 mm, riser neck modulus 3.0 mm)combined with a semi-closed gating and feeding system (run ner ： downsprue ： ingate=1 ： 0.7 ： 1.2)was adopted. MAGMAsoft was used for numerical simulation of mold filling, solidification and hot spot distribution, and process trials and batch production verification were conducted. Simulation and production results showed that the optimized gating and feeding system provided smoother filling, with pure mold filling time reduced from 8.9 s to 6.7 s, and production efficiency increased from 1 384 pieces/h to 1 756 pieces/h (+26.87%); the average total weight per mold decreased from 33.20 kg to 26.57 kg, and the metal utilization rate increased from 46.54% to 58.26% (+11.72%); X-ray inspection showed that shrinkage porosity defects in the casting body near at the riser necks were completely eliminated, and the hardness values were narrowed from HB145-215 to HB176-186, the positioning point dimensional errors were reduced from 118.20-118.39 mm to 118.03-118.25 mm, and the surface roughness was reduced from 50-110 μm to 45-85 μm. The optimized process significantly improves casting quality and production economy without changing the existing production line, providing a reference for the casting process design of similar ductile iron castings.

Key words: brake caliper; ductile iron; gating and feeding system; numerical simulation; metal utilization rate; production efficiency; shrinkage porosity defect

基金项目：高性能新能源汽车制动零部件研发项目（洛古机字 [2026]09 号，洛阳古城机械专项 [2026]02 号）。

收稿日期：2026–05–21 收到初稿，2026–07–01 收到修订稿。

作者简介：任现伟（1980– ），男，高级技师，高级工程师，主要研究方向为产品设计和材料成形工艺的研发。E-mail：lyrenxianwei@163.com

引用格式：任现伟 . 汽车制动卡钳的铸造工艺研究与应用 [J]. 铸造，2026，75（10）：1174–1182.

Ren Xianwei. Research and application of casting process for automobile brake calipers [J]. Foundry，2026，75（10）：1174–1182.

汽车制动卡钳是底盘制动系统的核心安全零部件，长期承受交变载荷与摩擦冲击，对铸件内部致密性、尺寸精度、硬度一致性及表面质量均有严苛要求[1]。球墨铸铁QT450-10凭借优良的强度、韧性及铸造成形性能[2]，广泛应用于乘用车型制动卡钳生产，仅少数新能源轻量化车型采用铸铝材质。

本课题研究的球墨铸铁制动卡钳配套高端新能源车型，量产初期采用传统浇冒系统工艺，生产过程暴露出诸多工艺缺陷：整模金属消耗量高、金属液利用率偏低且单型充型周期长，导致生产成本偏高、产能受限；同时铸件易产生缩松缺陷，产品定位点尺寸、支耳硬度波动较大，批次质量稳定性差，严重制约产品批量交付与市场竞争力提升。

为解决上述问题，本课题基于凝固成形理论，优化重构浇冒系统，依托MAGMAsoft软件开展铸件充型、凝固过程数值模拟[3-4]，对比分析优化前后工艺成形差异，结合工艺试验与批量生产验证优化效果，最终确定适配量产的最优铸造工艺，实现铸件质量、生产效率与经济效益同步提升[5]。

1 产品技术要求与原工艺缺陷

1.1 产品基本参数与技术指标

1.1.1 基本参数

材料：QT450-10；单重：3.87 kg；最大尺寸：长148.35 mm，宽170.42 mm，高165.85 mm；最大壁厚35 mm，最小壁厚6 mm，主要壁厚15 mm。产品结构如图1所示。

（a）3D俯视图　　（b）3D仰视图

图1 汽车制动卡钳产品结构

Fig. 1 Product structure of the automobile brake caliper

1.1.2 主要技术要求

（1）化学成分要求见表1。

表1 化学成分要求

Tab. 1 The chemical composition requirements

w_B/%

C	Si	Mn	P	S	Cu
3.3~3.9	2.2~3.2	0.1~0.4	≤0.08	≤0.02	≤0.2

（2）金相组织。基体组织：铁素体+珠光体，球化率≥85%，石墨大小：5~8级。

（3）力学性能和布氏硬度。抗拉强度≥450 MPa；屈服强度≥280 MPa；伸长率≥10%；布氏硬度：HB143~217。

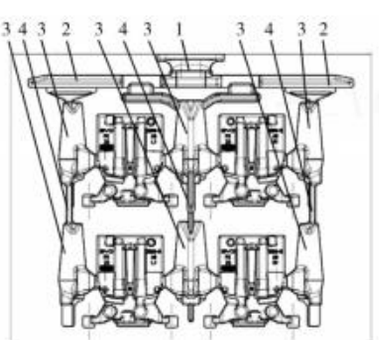
（4）内部质量要求。内部无任何孔洞类缺陷。

（5）外观质量要求。表面平均粗糙度Ra<100 μm，铸件表面平整光洁、轮廓清晰，无裂纹、冷隔、夹渣、砂眼、毛刺和飞边等有害铸造缺陷。

1.2 原浇冒系统核心弊端

本研究的汽车制动卡钳在DISA231造型线上生产，基于该型号造型机模板尺寸为650 mm × 535 mm的限制。每型只能布置4件产品，图2是最初设计的原浇冒系统，采用中间大体积冒口补缩结构，经长期量产验证，该设计存在明显缺陷，是导致产品质量波动与生产低效的核心原因[6]，具体问题如下：

（1）金属利用率低、生产成本高。原工艺整模浇注后平均重量达33.2 kg，金属利用率仅46.54%，大量金属液形成浇冒口废料，回炉料产出量大，熔炼与物



1. 浇口杯　2. 横浇道　3. 冒口　4. 直浇道

图2 原有浇冒系统

Fig. 2 The original gating and feeding system

料成本居高不下。

（2）充型效率低、产能受限。中间冒口占用金属液量大，单型充型时间偏长，浇注节拍缓慢，单位时间产能不足，无法满足大批量订单生产需求。

（3）铸件尺寸一致性差。大体积中间冒口导致铸型底部与深分型位置射砂不实，同时金属液对型腔底部冲刷力过大，造成各铸件定位点尺寸偏差超标，机械加工易出现孔偏缺陷，废品率较高。

（4）内部缩松缺陷频发。中间冒口体积过大，凝固过程中，冒口颈区域受到冒口的持续加热，局部散热滞后，造成冒口颈区域凝固晚于铸件基体；凝固结束后，导致靠近冒口颈位置的铸件本体频繁出现疏松缺陷。

（5）硬度均匀性差。局部冷却速率过缓，保温时间过长，造成铸件支耳部位布氏硬度偏低，同一产品内外支耳硬度差值过大，产品力学性能一致性不达标。

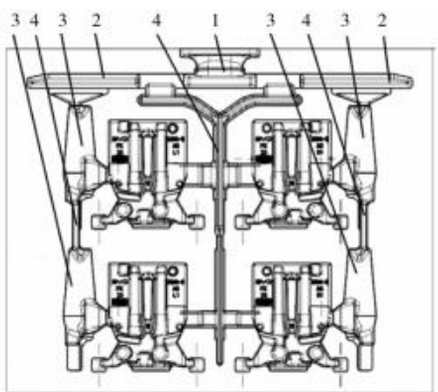
2 铸造工艺优化设计

2.1 冒口结构优化

针对原冒口的结构性缺陷，取消集中式中间大冒口，改为单产品外侧独立过热冒口结构，利用浇道自身保温特性实现辅助补缩，优化铸件凝固散热条件[7-8]。通过铸件模数计算，铸件本体模数$M_{件}$=5.27 mm，热节模数$M_{热节}$=5.9 mm，依据补缩设计准则，设定冒口模数$M_{冒口}$=1.3$M_{热节}$=7.67 mm。结合模具空间限制，采用上小下大圆柱形过热冒口，最大直径52 mm；冒口颈设计为上宽10 mm、下宽14 mm、高度10 mm的梯形结构，模数3.0 mm，满足铸件完全补缩需求，同时便于后期冒口剪切清理。

2.2 浇道系统优化

优化后采用半封闭式浇冒系统，截面比例设定为横浇道：直浇道：内浇口=1：0.7：1.2，各浇道截面积分别为500 mm^2、350 mm^{2}和600 mm^2。金属液由外侧冒口引入型腔，实现上下同步充型，有效规避局部充型压力过大、流速过快引发的金属液紊流现象，减少型壁冲刷、砂孔及氧化渣缺陷[9]。工艺参数设定：浇注温度1 370~1 420 ℃，单模理论充型时间7 s，充型平稳性显著提升。优化后的工艺如图3所示。



1. 浇口杯 2. 横浇道 3. 冒口 4. 直浇道

图3 优化后的浇冒系统

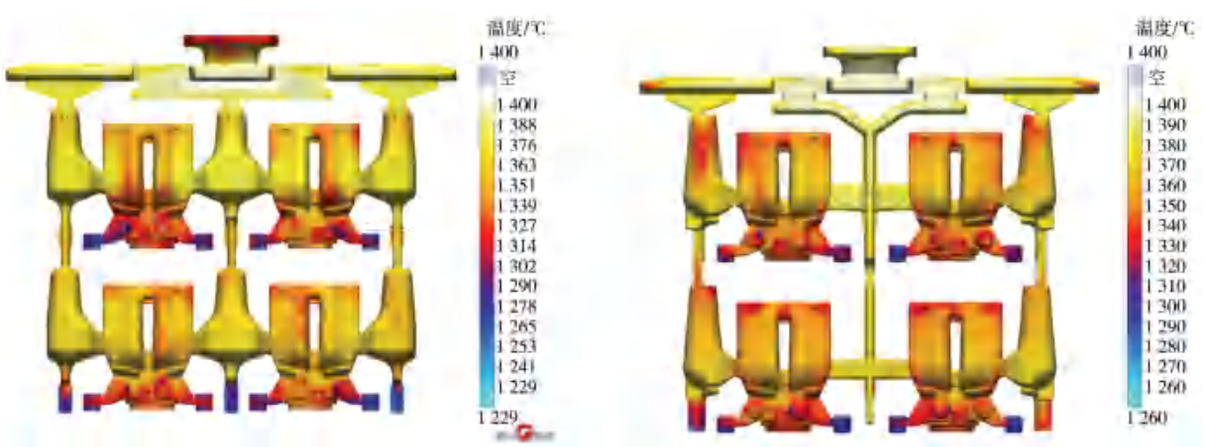
Fig. 3 The optimized gating and feeding system

2.3 基于 MAGMAsoft 的 CAE 模拟分析

为验证优化方案的可行性，采用MAGMAsoft软件，对工艺优化前后的铸件充型凝固过程分别进行模拟分析，探究成形机理[9]，并对比各自的优缺点。分析浇注结束时温度场、速度场、压力场、充型时间和热节分布以及凝固结束时的缩松分布，与原工艺模拟结果对比分别如图4、图5、图6、图7、图8和图9所示。

2.3.1 充型时间与效率对比分析

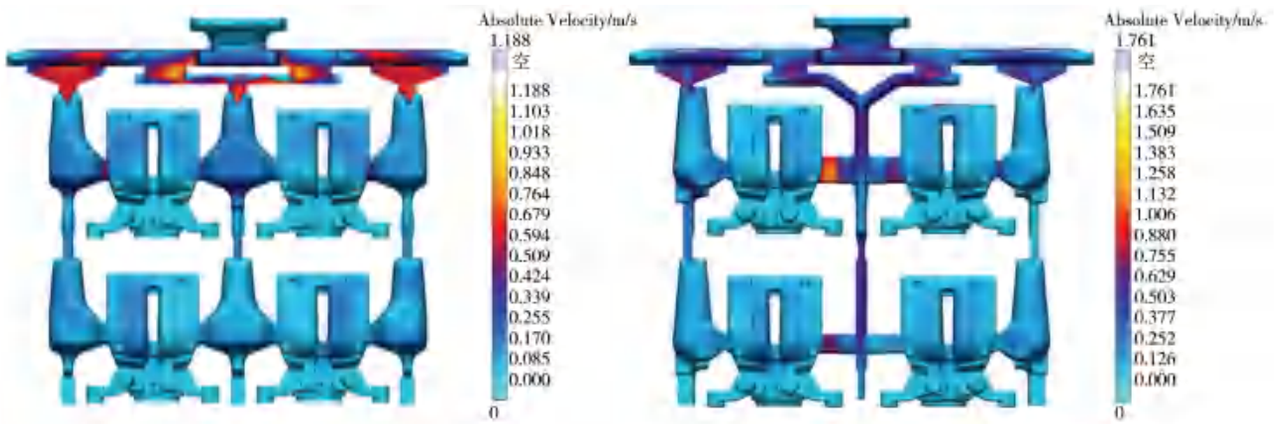
图7显示的充型时间场模拟结果表明，原浇冒系统纯充型时间为8.829 s，叠加1.5 s包体移动时间，单型总



（a）原浇冒系统 （b）优化后浇冒系统

图4 浇注温度场分布

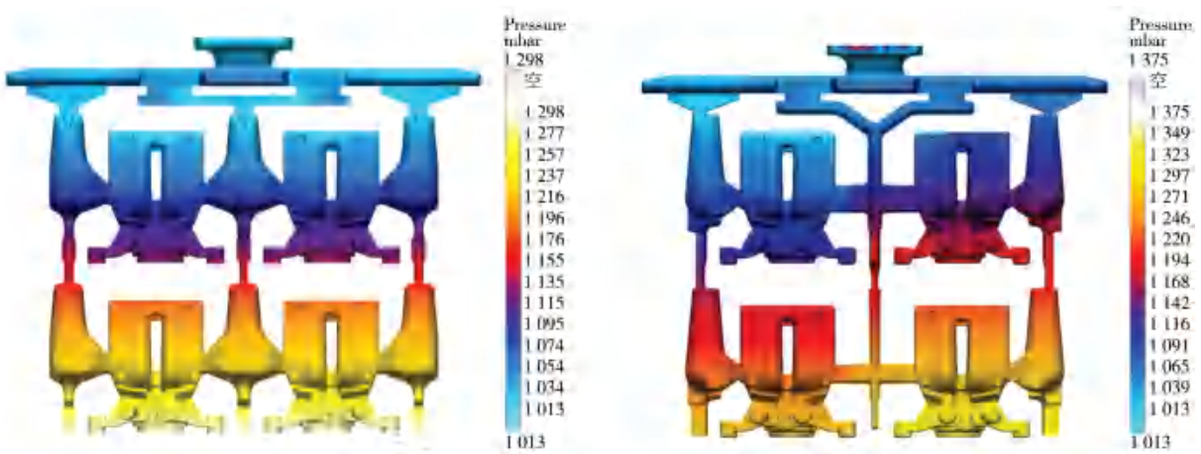
Fig. 4 Pouring temperature field distributions



（a）原浇冒系统　　（b）优化后浇冒系统

图5　浇注速度场分布

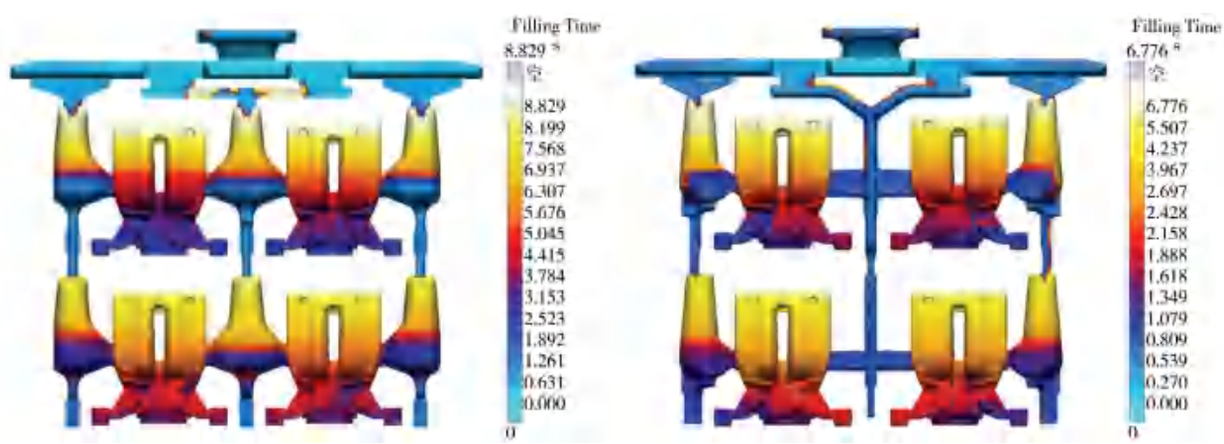
Fig. 5 Pouring velocity field distributions



（a）原浇冒系统　　（b）优化后浇冒系统

图6　浇注压力场分布

Fig. 6 Pouring pressure field distributions



（a）原浇冒系统　　（b）优化后浇冒系统

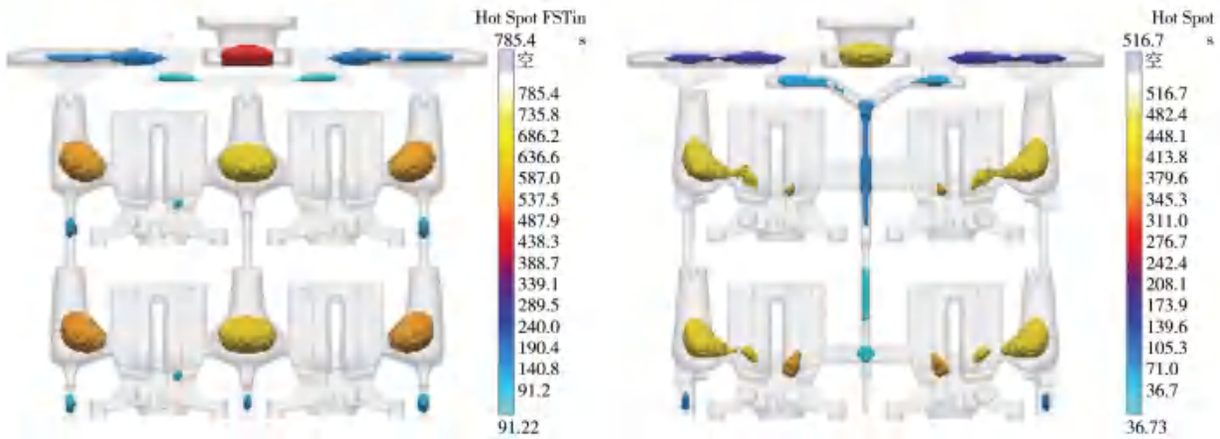
图7　充型时间场分布

Fig. 7 Mold filling time field distributions

浇注时长10.329 s，小时产能348型（1 392件）。优化后浇冒系统充型更顺畅，纯充型时间缩短至6.776 s，单型总时长8.276 s，小时产能提升至435型（1 740件），理论生产效率提升25%。优化后充型速率均匀提升，浇注节拍稳定性大幅改善。

2.3.2　温度场、流速场与压力场分析

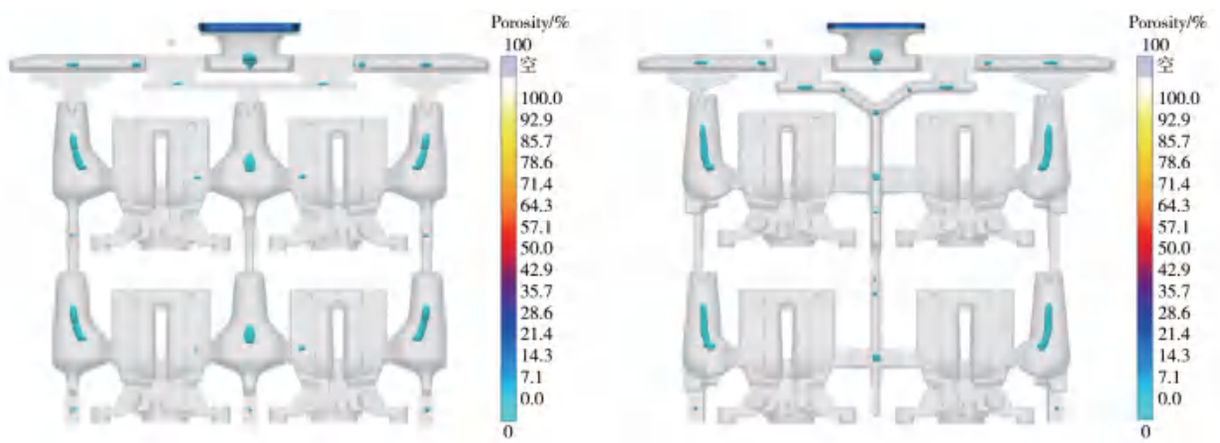
从图4、图5和图6优化后浇冒系统及铸件的温度场、流速场和压力场分布来看，充型比较均匀，无局



（a）原浇冒系统　　（b）优化后浇冒系统

图8　热节分布

Fig. 8 Hot spot distributions



（a）原浇冒系统　　（b）优化后浇冒系统

图9　缩松分布

Fig. 9 Shrinkage porosity distributions

部高温、高速冲刷及压力骤变问题，说明优化方案未破坏铸件基础成形条件。优化后金属液同步充型，温度梯度合理，流速与压力分布均匀，有效避免了充型不均引发的各类缺陷。

2.3.3　热节与缩松缺陷对比分析

图8热节分布模拟结果显示，原工艺中间冒口颈位置存在集中热节，凝固滞后于基体，是缩松缺陷的核心诱因；优化后取消集中冒口，热节分散均匀化，铸件整体凝固顺序更加合理。从图9缩松判据结果来看，原浇冒系统4个产品靠近中间冒口颈部位均出现不同程度的缩松缺陷，优化后的浇冒系统由于没有设计中间冒口、直接通过浇口补缩的方法完全避免了产品缩松缺陷的产生。

3　生产工艺控制与批量验证

3.1　型砂制备工艺控制

为满足汽车制动卡钳铸造对湿型砂的技术要求，确保型腔具备足够强度，混制完成后，湿型砂的具体性能指标如表2所示。

3.2　熔炼、球化和孕育处理

熔炼作业采用4 t中频感应电炉，炉料配比设定为：50%废钢+45%回炉料+5%生铁+适量石墨增碳剂[10]，熔炼过程中的最高温度需控制在1 600 ℃以下，金属液经调质处理达到出炉标准后（未进行孕育及球化处理），其化学成分需控制在表3规定的范围内。

表2　型砂性能

Tab. 2 Molding sand properties

湿压强度/MPa	湿拉强度/MPa	抗裂强度/MPa	湿抗拉强度/MPa	紧实率/%	透气性	破碎指数/%
0.17~0.21	> 0.02	> 0.03	> 0.002	35~44	100~140	⩾75

采用三次复合孕育工艺：出炉一次孕育添加0.20%的75SiFe孕育剂[11-12]；倒包二次随流孕育添加0.30%的Si-Ba孕育剂；浇注瞬时三次随流孕育细化晶粒[13]。球化处理采用Φ13 mm高镁低稀土包芯线，控制球化温度1 460~1 485 ℃、反应时间45~65 s，稳定残留镁含量，保障球化率达标，喂线球化处理的具体工艺参数如表4所示。

表3 原金属液化学成分控制范围
Tab. 3 Control range of chemical composition for the base iron w_B/%

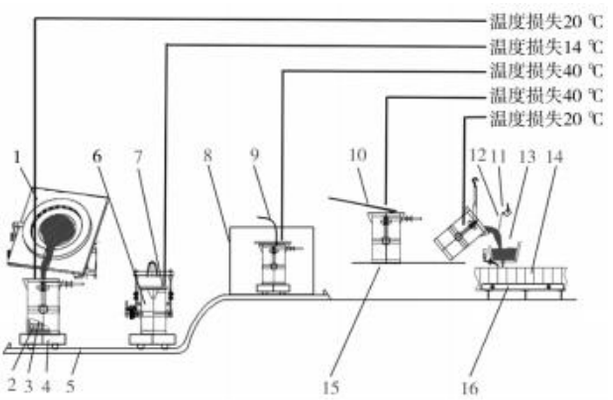
C	Si	Mn	P	S	Cu
3.80~3.85	2.00~2.10	0.25~0.30	≤0.06	≤0.025	0.1~0.2

表4 喂线球化处理工艺参数
Tab. 4 Wire injection nodularization process parameters

喂线长度/m	喂线速度/（m·min^{-1}）	喂线前温度/℃	反应时间/ s	喂线后温度/℃
12 ± 0.15	18 ± 0.2	1 460~1 485	45~65	1 425~1 445

3.3 浇注工艺管控

严格管控金属液转运、保温和浇注全流程温降，全程加盖保温，确保球化孕育后8 min内完成浇注，避免孕育衰退、球化失效[14]。稳定浇注温度1 370~1 420 ℃，避免温度过高引发的缩松、晶粒粗大及温度过低导致的冷隔、浇不足和渣孔缺陷[15]。图10为生产汽车制动卡钳过程中，经大量试验研究绘制的金属液出炉至浇入型腔前各环节对浇注温度的影响曲线。由图10可知，科学管控各转运环节是保证浇注温度稳定的关键。



1. 感应电炉 2. 一次孕育剂 3. 碎钢片 4. 转运小车
5. 轨道 6. 转运包 7. 包盖 8. 定点球化站 9. 球化包芯线
10. 除渣装置 11. 孕育装置 12. 随流孕育剂 13. 浇注盆
14. 铸型串 15. 浇注平台 16. 自动铸型输送机
图10 金属液处理各过程对浇注温度的影响
Fig. 10 Effects of each process of molten iron treatment on the pouring temperature

4 产品检测与优化效果对比

4.1 金属利用率与生产效率对比

表5为浇冒系统优化前后，各随机抽取10整型产品的称重结果（整型产品指浇注完成、经抛丸处理后，包含完整浇冒系统的产品）。称重数据显示，工艺优化后，整型产品平均质量仅为26.57 kg，金属利用率达到58.26%，较原浇冒系统46.54%的金属利用率提升了11.72%。

表6显示了浇冒系统优化前后随机各抽查10整型产品的充型时间。抽查结果表明浇冒系统优化后，实际生产过程中不包括浇注包移动时间，每一型的平均纯充型时间从8.9 s减少至目前的6.7 s，减少2.2 s；生产效率从每小时浇注346型，合计1 384件提升至目前的每小时浇注439型，合计1 756件产品，生产效率提升了26.87%。具体的实际浇注结果如表7所示。

4.2 化学成分

依据设计的铸件化学成分要求，在生产的产品本体上取样，采用PDA5500IV光谱分析仪对试样进行化学成分检测。实际化学成分的检测结果见表8所示。由于该光谱检测设备检测通道的不足，不能对试样中氧、氮等微量元素进行检测，但检测出的化学成分类别足以满足该汽车制动卡钳对化学成分的要求。

表5 整型质量
Tab. 5 The individual weights of the entire models kg

状态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
原浇冒系统	32.58	33.04	33.30	33.38	32.64	32.95	33.23	32.82	32.68	33.38	33.20
浇冒系统优化后	26.30	26.79	26.62	26.75	26.63	26.20	26.75	26.35	26.78	26.53	26.57

表6 充型时间
Tab. 6 Mold filling times s

状态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
原浇冒系统	8.8	9.1	9.0	8.8	8.7	8.9	8.9	8.9	9.1	8.8	8.9
浇冒系统优化后	6.8	6.6	6.8	6.6	6.7	6.5	6.8	6.7	6.8	6.7	6.7

表7 浇注结果
Tab. 7 The pouring results

状态	平均整型质量/kg	金属利用率/%	平均纯充型时间/s	浇注包移动时间/s	生产效率/（件·h^{-1}）
原浇冒系统	33.00	46.54	8.9	1.5	2 076
浇冒系统优化后	26.57	58.26	6.7	1.5	2 634

表8 化学成分检测结果
Tab. 8 Chemical composition test results w_B/%

序号	C	Si	Mn	Cu	P	Cr	Ni	Ti	V	Al	残Mg	残La	残Ce
1	3.780	2.760	0.300	0.176	0.028	0.020	0.010	0.020	0.011	0.010	0.030	0.006	0.011
2	3.740	2.740	0.290	0.158	0.033	0.025	0.011	0.023	0.012	0.013	0.033	0.007	0.011
3	3.790	2.810	0.280	0.163	0.028	0.022	0.012	0.018	0.010	0.010	0.032	0.005	0.012
4	3.800	2.790	0.300	0.160	0.035	0.026	0.011	0.022	0.015	0.011	0.030	0.006	0.012
5	3.790	2.760	0.299	0.158	0.036	0.020	0.013	0.025	0.014	0.011	0.033	0.006	0.011

4.3 金相组织

按照图11所示的取样位置，在产品本体上选取金相试样，依据GB/T 9441—2021球墨铸铁金相检验标准，采用BM4XA Ⅱ金相显微镜分别对腐蚀前后的产品本体试样进行金相组织检验，结果如表9所示。检测腐蚀前试样的球化率和石墨大小如图12所示，球化率为95%。使用硝酸酒精腐蚀液腐蚀后，检测的基体组织见图13，基体组织以细铁素体为主，珠光体含量低于30%，未发现碳化物存在。

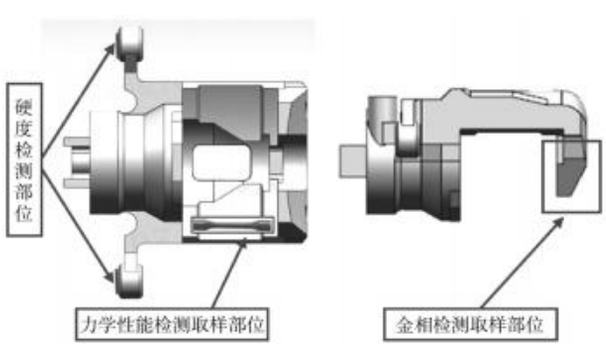


图11 检测部位示意图
Fig. 11 Schematic diagrams of the testing locations

表9 金相组织检测结果
Tab. 9 Metallographic structure examination results

球化率	石墨形态	基体组织	碳化物
95%	VI+V	75F+25P	无

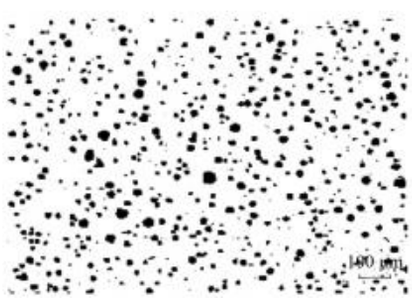


图12 球化率和石墨大小
Fig. 12 Nodularity and graphite size

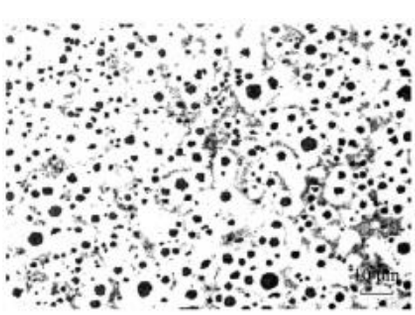


图13 基体组织（腐蚀后）
Fig. 13 Matrix structure （after corrosion）

4.4 力学性能

在产品本体上选取试样，采用微机控制电液伺服万能试验机对加工完毕后的本体试样进行力学性能检测。选用10 mm × 10 mm × 55 mm V型缺口试样，在冲击试验机上测定常温冲击吸收功。具体力学性能检测

结果均为3个试样的平均值，如表10所示。

使用布氏硬度设备对产品本体的布氏硬度进行检测。表11显示了浇冒系统优化前后随机抽样各10件产品的布氏硬度。检测结果表明浇冒系统优化后的硬度一致性比优化前更好，基本上都稳定在中值180HB左右，且无任何超差现象。

4.5 定位点尺寸

按照图14所示的取样位置，对经抛丸、打磨和精修后的汽车制动卡钳采用游标卡尺和尺寸卡板检测其两定位点之间的相对尺寸。表12显示了浇冒系统优化前后随机各抽检5件产品的定位点尺寸检测结果。检测结果表明浇冒系统优化后的产品定位点尺寸一致性比优化前更好，且无任何超差现象。

4.6 外观质量

浇冒系统优化后，原中间过热冒口经设计调整改为过热浇道，显著提升了该部位铸型抵抗金属液冲刷与渗透的能力，进而改善了产品该部位的表面粗糙度，缩小了同一产品不同部位的粗糙度差值。对比粗糙度样块可知，优化后产品表面平均粗糙度稳定在*Ra*40~85 μm之间，符合客户铸件图纸中*Ra*<100 μm的技术要求。表13为浇冒系统优化前后，各随机抽取5件产品不同部位的表面粗糙度检测结果。

表10 力学性能检测结果
Tab. 10 Mechanical properties of tested results

试样号	抗拉强度R_m/MPa	屈服强度$R_{p0.2}$/MPa	伸长率A/%	常温冲击吸收功KV_2/J
1	476	336	15.6	10
2	479	331	13.3	12
3	485	327	13.3	11
4	472	331	18.6	13
5	462	321	20	12

表11 布氏硬度
Tab. 11 Brinell hardnesses **HB**

状态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
原浇冒系统	195	215	195	160	145	210	150	214	186	158
浇冒系统优化后	182	176	185	178	180	186	180	176	184	180

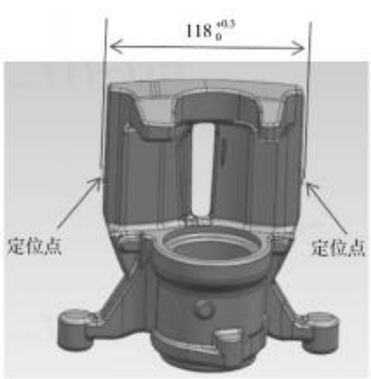


图14 定位点尺寸要求
Fig. 14 The positioning point dimensional requirements

表12 定位点尺寸
Tab. 12 The positioning point dimensions **mm**

状态	1	2	3	4	5
原浇冒系统	118.33	118.31	118.24	118.20	118.39
浇冒系统优化后	118.19	118.04	118.03	118.25	118.07

4.7 内部质量

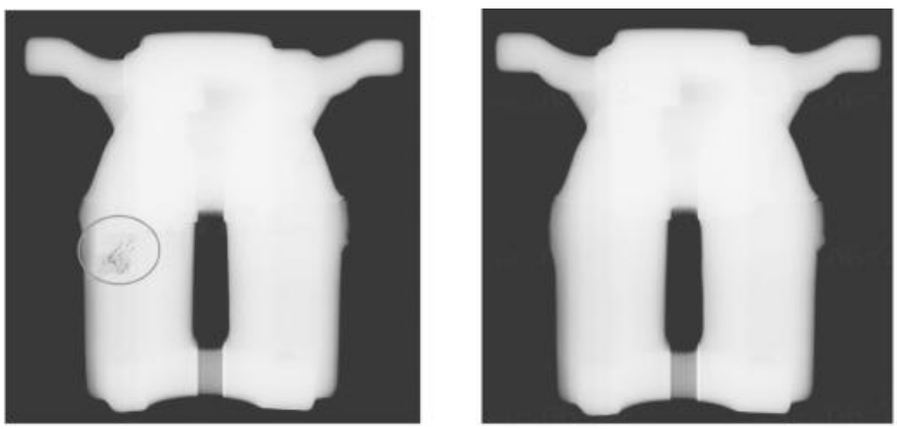
采用通过式X射线检测设备进行无损探伤，结果显示，工艺优化后所有产品内部缺陷均符合ASTM-E689标准中≤2级的要求，未发现内部疏松类缺陷。图15为

表13 表面粗糙度
Tab. 13 The surface roughnesses **μm**

状态	1	2	3	4	5
原浇冒系统	60~90	50~105	45~85	52~75	70~110
浇冒系统优化后	50~75	45~80	55~85	55~70	50~80

浇冒系统优化前后的X射线检测结果。

从上述产品各项检测结果来看，浇冒系统优化后生产的产品，其化学成分、金相组织、硬度、尺寸以及外观和内部质量等均符合客户在供货质量合同、技术协议中的具体要求，在长期生产过程中能够稳定地保持质量的一致性。



（a）原浇冒系统（疏松） （b）优化后浇冒系统（无疏松）

图15 X射线检测结果

Fig. 15 X-ray testing result

5 结论

（1）针对球墨铸铁制动卡钳传统浇冒系统的结构缺陷，取消集中式中间大冒口，采用单铸件外侧独立冒口+浇道辅助补缩的优化结构，配合半封闭式浇冒系统，有效改善了铸件充型与凝固顺序，从工艺根源消除了铸件靠近冒口颈部位的缩松缺陷。

（2）经CAE数值模拟与批量生产验证，工艺优化后显著提升生产经济性，铸件金属利用率提升11.72%，生产效率提升26.87%，有效降低熔炼与检测成本，量产经济效益显著。

（3）工艺优化后，铸件硬度、关键尺寸、表面质量及内部致密性大幅改善，批次质量稳定性显著提升，各项性能指标均满足新能源汽车主机厂技术标准，工艺适配性与实用性强。

参考文献：

[1] 崔杰，邓杨全，王峰，等. 新能源汽车电池盖一体化压铸模具设计 [J]. 铸造，2026，75（5）：528–534.

[2] Zhao X，Diao S，Nan Y，et al. Influence of nodular graphite on microstructure，mechanical properties and wear behavior of austempered ductile iron [J]. China Foundry，2025，22（4）：374–384.

[3] 陈煌. 计算机模拟辅助技术在铸造工艺设计中的应用 [J]. 铸造，2023，72（10）：1387.

[4] 胡占军，白图雅，贺金祥. 垂直分型无箱射压造型线设计问题探讨 [J]. 铸造，2009，58（7）：750–751.

[5] 任现伟. 球墨铸铁汽车换挡拨叉的铸造工艺研究与实践 [J]. 铸造，2023，72（11）：1426–1431.

[6] 任现伟. DISA线生产优质铸件的工艺技术与应用 [J]. 铸造，2019，68（7）：777–781.

[7] Li L，Yin Y，Fan B，et al. Automatic gating and riser system design and defect control for K4169 superalloy guide blade casting based on parametric 3D modeling-simulation integrated system [J]. China Foundry，2026，23（1）：20–30.

[8] Zhang X，Hou H，Pei X，et al. Designing the counter pressure casting gating system for a large thin-walled cabin by machine learning [J]. China Foundry，2025，22（4）：395–406.

[9] 陈国宝，高通旺，赵程斌，等.阀体铸造工艺设计及优化 [J]. 铸造技术，2025，46（10）：1019–1026.

[10] 段平昌，黄涛. 中频感应电炉熔炼灰铸铁的工艺与质量控制 [J]. 铸造技术，2020，41（5）：450–455.

[11] 杨涛，郭毅，孙永功，等. 中频感应电炉熔炼铸铁应用及展望 [J]. 金属加工（热加工），2019（3）：8–10.

[12] 马洪亮. 比较几种孕育剂降低球铁缩孔缩松缺陷的效果 [J]. 铸造设备与工艺，2022（3）：28–32.

[13] 全真，徐锦锋，赵新武，等. 孕育增硅对铁素体球铁微观组织及力学性能的影响 [J]. 铸造技术，2021，42（5）：333–336.

[14] 周义. 铸铁件的浇注技术 [J]. 铸造技术，2011，32（3）：423–424.

[15] Huang G，Dang Q，Su C，et al. Effect of pouring time on microstructure and mechanical properties of centrifugal cast Ti-46Al alloy tubes [J]. China Foundry，2025，22（1）：65–74.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）