DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4182

等温淬火球墨铸铁轨道交通壳体铸件研制

孙祥广,张宪华,秦　程,周正寿,李国龙
(江苏恒立液压股份有限公司 常州铸造分公司,江苏 常州 213166)

摘　要:传统的轨道交通铸件通常采用低牌号(QT400~QT600)球墨铸铁件。本文主要研究高牌号的等温淬火球墨铸铁 QT800-10 轨道交通壳体铸件。使用 MAGMA 模拟软件对轨道交通壳体铸件进行铸造工艺设计,通过增加冷铁的方式对工艺进行优化。采用金相、硬度和抗拉强度等测试方法,研究了不同合金元素对铸件组织和性能的影响。结果表明,加入 3.65%C、2.52%Si,0.38%Mn 和 0.44%Cu 并同时加入 0.15%(质量分数)含铋孕育剂试样的抗拉强度、屈服强度、延伸率达到最好状态。经等温淬火处理后,铸件性能提升,达到客户标准要求。

关键词:等温淬火球墨铸铁;轨道交通壳体;热处理

中图分类号: TG143.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)03-0301-06

Development of Austempered Ductile Iron Castings for Rail Transit Shells

SUN Xiangguang, ZHANG Xianhua, QIN Cheng, ZHOU Zhengshou, LI Guolong
(Jiangsu Hengli Hydraulic Co., Ltd., Changzhou Casting Branch Company, Changzhou 213166, China)

Abstract: Conventionally, rail transit castings have been fabricated from low-grade ductile iron (QT400~QT600). This paper focused on the research and development of rail transit housing castings made of high-grade austempered ductile iron (QT800-10). The process design of rail transit housing casting was carried out via the simulation software MAGMA and optimized via the addition of chills. Through microstructure examination, hardness testing, tensile strength testing, and other methods, the influence of different alloying elements on the microstructure and properties of the casting was investigated. The research results indicate that when the alloy composition is 3.65 wt.% C, 2.52 wt.% Si, 0.38 wt.% Mn, and 0.44 wt.% Cu, along with 0.15 wt.% bismuth-containing inoculant, the tensile strength, yield strength, and elongation of the sample reach peak values. After austempering, the casting properties are enhanced, meeting the standard requirements of customers.

Key words: austempered ductile iron; rail transit shell; heat treatment

随着时代的快速发展,轨道交通车辆铸件催生了轻量化要求。轻量化一方面可以减轻车辆自重和节约原材料;另一方面可以减少车辆的牵引力和制动力,实现节能降耗。可见,轻量化车辆铸件已经是铸造行业不断追求和努力的目标[1-4]。

等温淬火球墨铸铁(austempered ductile iron, ADI)作为一种新的应用材料,逐渐被行业了解和熟悉。其材料力学性能优越,质量比钢轻[5-6]。近年来,国内外研究人员不断进行材料创新,将不同的合金元素添加到铸铁中,以改善球墨铸铁的力学性能,使其能够更好地承受各种应力和载荷,保证设备的稳定性和寿命[7-8]。但是铸件强度和硬度还存在局限性。江苏某公司通过对成分设计、铸造工艺和热处理工艺优化深入研究,成功研制了高强度高韧性的轨道交通壳体铸件。

1　轨道交通壳体铸件分析

1.1　铸件结构分析

轨道交通壳体铸件结构示意图如图 1 所示,该铸件质量为 36.7 kg,壁厚最小处 9 mm,壁厚最大处 58 mm,壁厚不均匀且结构复杂,这不仅给铸造工艺的设计带来困难,而且不利于 ADI 的热处理。

1.2　ADI 球墨铸铁的成分设计

根据壳体性能要求,在球墨铸铁的化学成分设计时,尽量降低磷硫含量,并增加少量铜元素保证淬透性,提高机械性能。具体化学成分及性能要求见表

收稿日期: 2024-09-22

作者简介: 孙祥广,1987 年生,学士,工程师. 主要从事砂型铸造方面的工作. Email: sunxgok@126.com

引用格式: 孙祥广,张宪华,秦程,周正寿,李国龙. 等温淬火球墨铸铁轨道交通壳体铸件研制[J]. 铸造技术,2025, 46(3): 301-306.
SUN X G, ZHANG X H, QIN C, ZHOU Z S, LI G L. Development of austempered ductile iron castings for rail transit shells[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 301-306.

中国知网　https://www.cnki.net

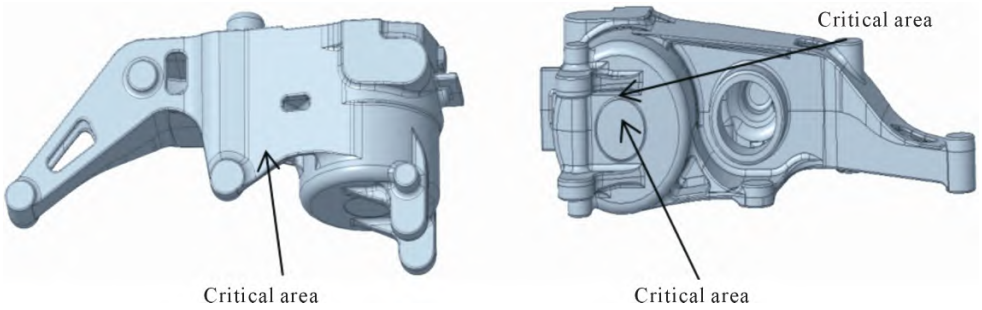

图 1 轨道交通壳体铸件结构图

Fig.1 Schematic diagram of the casting structure for rail transit shell

1 和 2。

2 工艺设计

2.1 铸造工艺

初步铸造工艺方案如图 2 所示。采用德国 KW 线机器造型线，一模两件，在铸件无法起模的中间孔处设计 4 个砂芯，在直浇道两侧各设计了过滤网，有效进行挡渣和避免紊流的产生。设有 3 个内浇道和 1 个冒口入水，采用开放式浇注系统，浇道面积 $F_{直}:F_{横}:F_{内}=1\ 156:1\ 935:2\ 212=1.00:1.67:1.91$，保证充型速度，避免铸件产生冷隔、砂眼等铸造缺陷。此外，基于铸件模数和计算所得冒口尺寸(冒口模数=铸件模数×1.2)[9-10]，在铸件顶部和侧面放置冒口对铸件进行补缩，保证铸件内部和外部质量。

2.1.1 铸造模拟分析及工艺优化

为验证工艺可靠性，采用 MAGMA 模拟软件对球墨铸铁轨道交通壳体铸件凝固过程进行模拟。首先把铸件、冒口和浇注系统等转为 STL 格式文件导入到 MAGMA，针对导入的每个零部件进行网格划分，为了加快计算速度且不失准确性，浇注系统的网格尺寸大于铸件部分，网格优化形成了 2 139 766 个节点，452 158 个单元。化学成分按照实际生产中值控制。因铸件壁厚整体较厚，铸件浇注温度参数设计为 1 400 ℃，砂型温度为 25 ℃，最后浇注时间参数为 10 s。MAGMA 模拟主要参数设置如表 3 所示。

2.1.2 方案模拟分析

图 3 为铁轨道交通壳体铸件的模拟结果。从图 3a 可以看出，在铸件内部有孤立液相，可能存在铸造缺陷，且在图 3b 热节示意图可以看出，铸件内部还存在热节，说明铸件出现缩松或缩孔的风险较大。通过 MAGMA 模拟结果看出，现有冒口的补缩距离不够。故突破传统工艺，增加冷铁来提升铸件的散热速度，以增加冒口的补缩距离，即可使用小冒口达到补缩的目的[11-13]。同时因为 QT800-10 的 Si 含量较高，

表 1 轨道交通壳体化学成分要求

Tab.1 Chemical composition requirements for rail transit shell

(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg
Pre-furnace chemical composition	3.85~3.95	1.90~2.00	0.3~0.5	≤0.05	0.006~0.018	0.4~0.7	-
Final chemical composition	3.60~3.80	2.35~2.55	0.3~0.5	≤0.05	0.006~0.018	0.4~0.7	0.035~0.055

表 2 轨道交通壳体技术要求

Tab.2 Technical requirements for rail transit shell

Material	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Brinell hardness(HBW)	Microstructure
EN-GJS-800-10	>800	>500	>10	260~320	Austenite

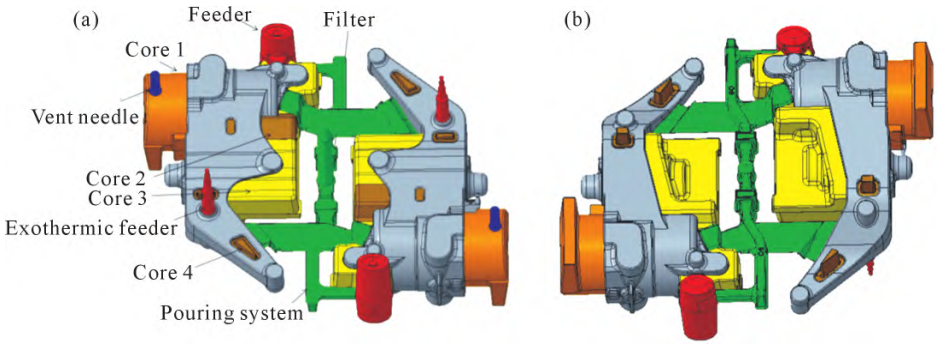

图 2 铸造工艺方案：(a) 上箱；(b) 下箱

Fig.2 Casting process: (a) upper box; (b) lower box

中国知网 https://www.cnki.net

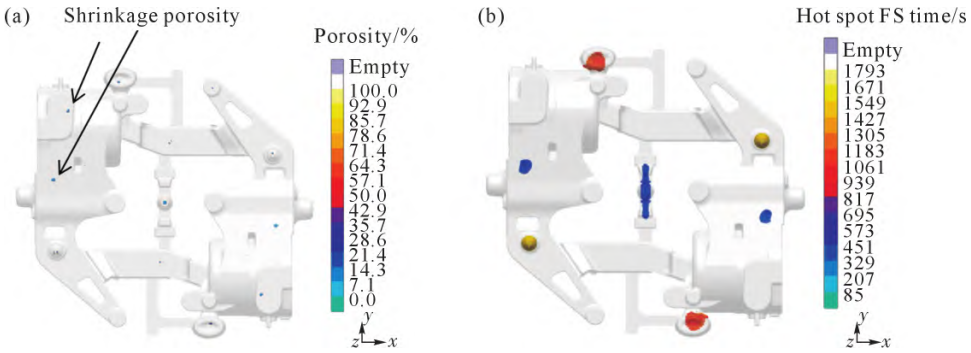

图 3 模拟结果：(a) 最终缩松模拟结果；(b) 最终热节模拟

Fig.3 Simulation results: (a) final simulation result of the shrinkage porosity; (b) final simulation result of the thermal center

表3 模拟参数设置

Tab.3 Setting of simulation parameters

Parameter	Casting material	Molding sand material	Intial pouring temperature/℃	Pouring time/s
Value	QT800	Tidal film sand	1 400	10

容易造成铸件组织石墨粗大，影响铸件伸长率，冷铁可有效改善和提高铸件组织和性能[5, 14-15]。

2.1.3 工艺方案优化

如图 4 所示，根据铸件结构、激冷效果和工艺性原则，在铸件壁厚较厚区域的下模，根据式(1)所示冷铁设计公式和铸件结构较厚区域放置了2 种型号的冷铁各 2 块 (冷铁 1：130 mm×70 mm×50 mm；冷铁 2：100 mm×70 mm×40 mm)。

$$\delta=G/(\rho\times A) \tag{1}$$

式中，G 为冷铁质量；ρ 为冷铁密度；A 为冷铁接触面积。

在图 4 所示各处设置冷铁，在温度场方面，冷铁的热导率高，能迅速吸收铸件的热量。当液态金属浇入铸型后，靠近冷铁部分的金属温度会因冷铁的吸热作用而快速下降。这使得铸件在冷铁附近的温度场梯度增大，温度降低加快。从凝固顺序来讲，由于冷铁加速了与之接触部分金属的冷却，这部分金属会率先凝固。进而改变了铸件原本的凝固顺序，让凝固从冷铁处开始向其他部位推进。这样可以使铸件实现顺序凝固，将缩孔、缩松等缺陷转移到冒口等补缩区域，从而有效提高铸件的致密度，减少内部缺陷。通过优化后的方案进行模拟可以证实，铸件内部没有孤立液相，最后液相全部处于冒口和浇注系统中，且如图 5b 所示，铸件内部没有热节且整个热节都在冒口中(图 5a)，说明铸件铸件内部不会产生缩

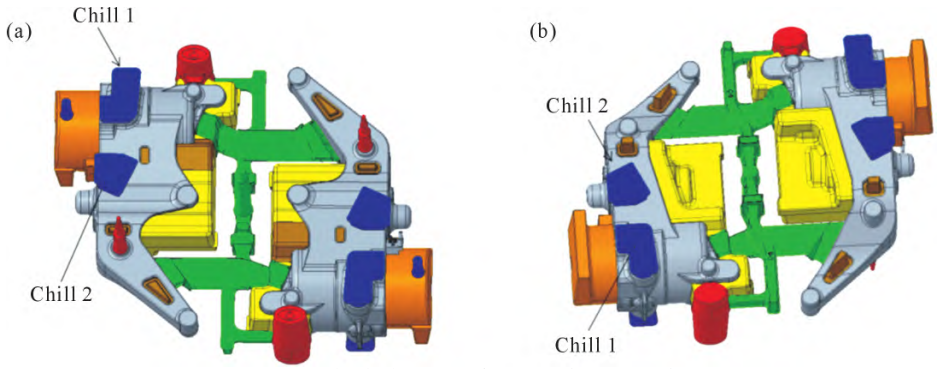

图 4 增加冷铁工艺方案：(a) 上箱；(b) 下箱

Fig.4 Optimized process by adding chills: (a) upper box; (b) lower box

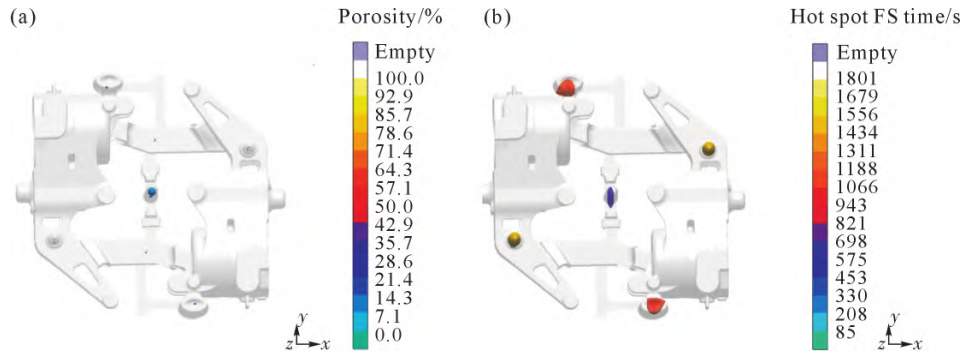

图 5 优化后模拟结果：(a) 最终缩松模拟结果；(b) 最终热节模拟

Fig.5 Simulation result after optimization: (a) final simulation result of the shrinkage porosity; (b) final simulation result of the thermal center

中国知网 https://www.cnki.net

松、缩孔等铸造问题，达到优化目的[16-19]。

2.2 ADI 热处理工艺

轨道交通壳体铸件采用周期式等温淬火炉，首先，对铸件进行预热，然后将球墨铸铁升温至奥氏体化温度(860~920 ℃)，保温 2~3 h，以确保铸件完全奥氏体化。随后，将铸件迅速淬入到温度范围为 350~400 ℃的盐浴中。这个过程中，铸件从后室到盐槽的转移速度必须快，以防止发生珠光体转变。在盐浴中，根据铸件的壁厚和合金含量，将其在等温温度下保温 1~2 h。期间需要确保盐浴温度的稳定，通过机械搅拌和加入适量水来增加盐浴的流动性及冷却烈度。最后将铸件从盐浴中取出，并在空气中冷却至室温。具体热处理曲线见图 6。

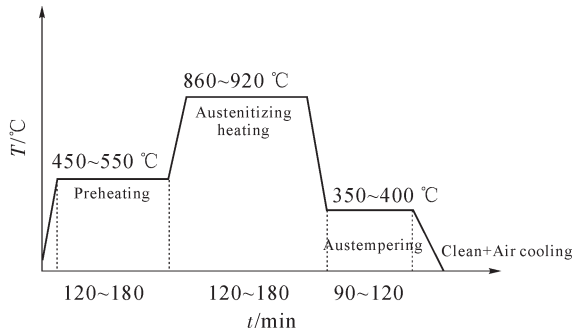

图 6 ADI 热处理工艺曲线

Fig.6 Heat treatment curve of the ADI

3 铸件检验及分析

通过一定炉料配比，改变合金元素 Mn、Cu 的添加量和含铋孕育剂的加入量制备了轨道交通壳体铸件，具体方案如表 4 所示。采用美国赛默飞世尔直读光谱仪测量其化学成分。根据图 7 要求，在轨道交通壳体铸件截取试块，制成金相、硬度和拉伸试棒。采用美国 MTS 型号 E45.305 万能拉伸试验机对 ADI 球墨铸铁的抗拉强度、屈服强度及伸长率进行测试。参照 ISO945，使用美国徕卡金相显微镜，对其腐蚀前后的金相组织进行观察。腐蚀前的试样主要观察石墨的数量、尺寸及圆整度；经浓度为4%的硝酸酒精溶液腐蚀后的试样主要观察其基体组织

表 4 铸件化学成分

Tab.4 Chemical composition of the castings

(mass fraction/%)

Project	Location	C	Si	Mn	Cu	Bi
1	T1	3.75	2.35	0.49	0.66	-
	T2	3.75	2.35	0.49	0.66	-
2	T1	3.69	2.52	0.47	0.53	0.10
	T2	3.69	2.52	0.47	0.53	0.10
3	T1	3.65	2.52	0.38	0.44	0.15
	T2	3.65	2.52	0.38	0.44	0.15

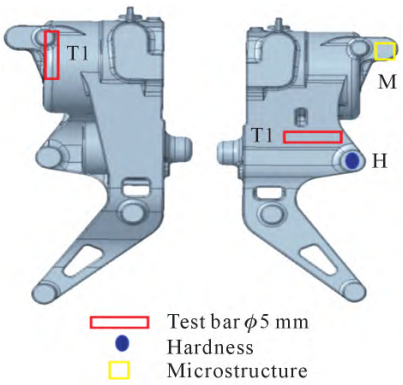

图 7 铸件取样位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of the sampling locations for castings

组成、晶粒尺寸等。在拉伸试样上截取硬度试样，使用 400HBS-3000A 布氏硬度计测量 ADI 球墨铸铁的布氏硬度，轨道交通壳体铸件化学成分、性能及组织分析。

由表 4 和 5 及图 8 可知，方案 1 采用锰铜合金化保证铸件的淬透性，但球化率仅 80%，石墨球数量 166 个/mm^2，还有一定的碎块状石墨出现，大大影响了其抗拉强度和伸长率(仅 6%)。方案 2 在保证淬透性的基础上降低锰铜的含量，加入 0.1%含铋孕育剂促进铸铁中的石墨化过程，助于形成细小、均匀分布的石墨，改善铸铁的力学性能，提高强度和韧性，降低硬度。球化率和石墨球数量显著增加，石墨球数量增加到 300 个/mm^2 以上，满足 QT800-10 的要求。方案 3 是在方案 2 保证 ADI 淬透性的基础上再次降低了锰铜含量并增加含铋孕育剂的加入量(0.15%)，使球化率达到 95%，石墨数量到达 345 个/mm^2，抗拉强度

表 5 铸件性能及组织分析

Tab.5 Properties and microstructure analysis of the castings

Project	Location	HBW	Ultimate tensile property, R_m/MPa	Yield strength, $R_{p0.2}$/MPa	Elongation, A/%	Nodularity/%	Graphite quantity /mm^{-2}	Ausferrite/%
1	T1	318	770	487	6.5	80	166	100
	T2	321	801	502	6.0	-	-	-
2	T1	309	897	572	10.5	90	307	100
	T2	309	918	581	13.5	-	-	-
3	T1	296	984	610	20.0	95	345	100
	T2	293	971	602	16.5	-	-	-

中国知网 https://www.cnki.net

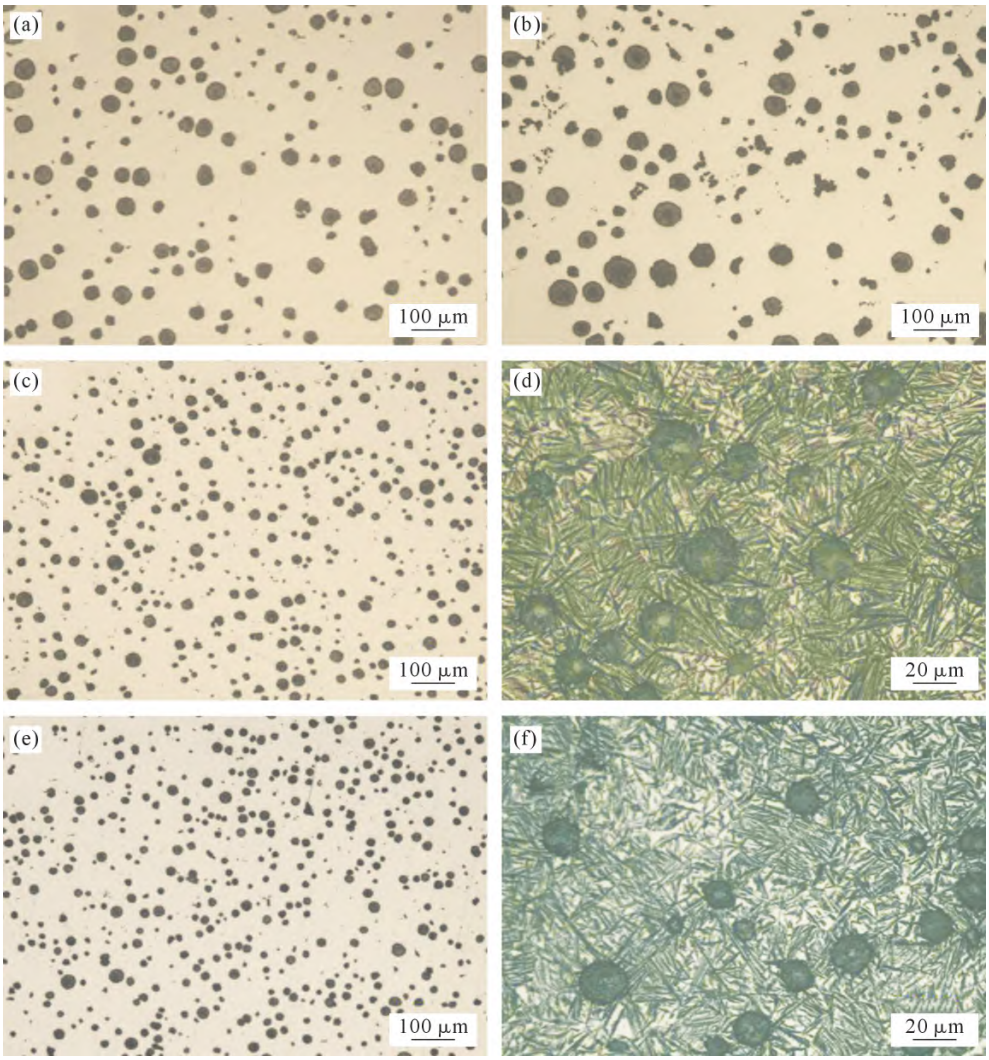

图 8 铸件金相显微组织：(a) 方案 1；(b) 方案 1–碎状石墨；(c, d) 方案 2；(e, f) 方案 3

Fig.8 Metallographic microstructure of the castings: (a) project 1; (b) project 1-crushed graphite; (c, d) project 2; (e, f) project 3

和伸长率达到 984 MPa 和 20%。ADI 球墨铸铁的基体组织为奥铁体，球化率达到 90%，碳质量分数控制在 3.65%~3.75%、硅在 2.35%~2.55%、碳当量在 4.43%~4.60%时，石墨球数量处于 307~345 个/mm^2 之间，满足淬透性基体组织为奥铁体，抗拉强度、伸长率均达到表 2 中标准要求。

通过对比发现，当 C 质量分数 3.65%、Si 质量分数 2.52%、Mn 质量分数 0.38%、Cu 质量分数 0.44%时，加入 0.15%含铋孕育剂可改善石墨形态，增加石墨球数量为 345 个/mm^2，试样抗拉强度、屈服强度、伸长率达到最好状态，为 984 MPa 和 20%。表明合适的碳当量有助于提高壳体的韧性和塑性，而降低锰、铜的含量，并利用含铋孕育剂改善孕育效果，细化铸铁的晶粒，可使组织更加致密。细小的晶粒可以改善材料的强度和硬度，同时提高其韧性。通过增加石墨的形核点，含铋孕育剂能够控制石墨的生长尺寸，从而达到细化晶粒的目的，石墨球化率达到 95%，改善了铸件的基体组织，从而提高试样的抗拉强度，并保证了较高的伸长率。通过实验数据可以发现，研制的 ADI 球墨铸铁轨道交通壳体铸件的球化率和机械性能均稳定，达到了标准要求。

4 结论

(1)采用 MAGMA 模拟分析，最终采用优化后的顶冒口+冷铁工艺方案进行生产，铸件内部无缩松。

(2)加入 3.65%C、2.52%Si，0.38%Mn，0.44%Cu 时，同时加入 0.15%含铋孕育剂试样的抗拉强度和伸长率达到 984 MPa 和 20%。

(3)通过 2 个阶段的等温淬火热处理，实现铸件性能提升。ADI800-10 轨道交通壳体通过检测与使用得到客户认可。

参考文献：

[1] 刘慧玲，侯晓华，刘文刚. 等温淬火球墨铸铁在商用车轮毂上的应用实例[J]. 铸造工程，2022, 46(1): 47-51.
LIU H L, HOU X H, LIU W G. Application examples of austempered ductile iron on commercial wheel hubs[J]. Foundry Engineer-

中国知网 https://www.cnki.net

ing, 2022, 46(1): 47-51.

[2] 谭银元. 薄壁高强韧铸态球墨铸铁排气管的研制[J]. 机械工程材料,2003, 27(10): 31-33.
TAN Y Y. Production research on thin section exhaust pipes with high strength and toughness nodular cast iron[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(10): 31-33.

[3] WANG X, DU Y Z, LIU B J, JIANG B L. Enhanced plasticity of austempered ductile iron (ADI) by partitioning treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 804: 140513.

[4] 张忠仇,李克锐,吴建基. 我国等温淬火球铁的现状及前景[J]. 铸造,2004, 53(2): 87-92.
ZHANG Z C, LI K R, WU J J. Situation and prospect of austempered ductile iron(ADI) in CHINA.[J]. Foundry, 2004, 53(2): 87-92.

[5] HAYRYNEN K L. The production of austempered ductile iron (ADI) [A]. Proceedings of 2002 World Conference on ADI [C]. Louisville: American Foundry Society, 2002: 1-6.

[6] 穆彦青,肖恭林,杨志刚,徐小辉,付玉龙. 一种球墨铸铁活塞裙的铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2020, 41(1): 48-50.
MU Y Q, XIAO G L, YANG Z G, XU X H, FU Y L. Research on casting technology of a nodular cast iron piston skirt[J]. Foundry Technology, 2020, 41(1): 48-50.

[7] SHI J P, SHAN Z D, YANG H Q, DONG S J, LIU Q J. Advancing sustainable casting through cryogenic gradient forming of frozen sand molds: Design, error control, and experimental validation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 203: 211-226.

[8] 闫亮亮,刘佳敏,薛帅,李军,段昭,张蓬涛,薛卫卫,鲁猛飞. 大型复杂齿轮箱壳体差压铸造工艺的优化[J]. 热加工工艺,2022, 51(17): 63-65.
YAN L L, LIU J M, XUE S, LI J, DUAN Z, ZHANG P T, XUE W W, LU M F. Optimization of differential pressure casting process for large complex gearbox case[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(17): 63-65.

[9] 郭平,李洪应. 球墨铸铁支架铸件的铸造工艺改进[J]. 现代铸铁,2021, 41(3):13-17.
GUO P, LI H Y. Process improvement of nodular iron bracket casting[J]. Modern Cast Iron, 2021, 41(3): 13-17.

[10] 党云鹏, 曹岩. 基于 ProCAST 的 ZL205A 合金弹体传动件铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(2): 162-166.
DANG Y P, CAO Y. Casting process optimization of ZL205A alloy projectile transmission parts based on ProCAST software [J]. Special Casting ＆Nonferrous Alloys, 2022, 42(2): 162-166.

[11] 周正寿. 液压后盖铸造工艺优化及 MAGMA 模拟分析[J]. 现代机械,2023(6): 23-26.
ZHOU Z S. Optimization of casting process and MAGMA simulation analysis of hydraulic rear cover[J]. Modern Machinery, 2023 (6): 23-26.

[12] 韩宝,贾枝树,张挨元,林涛,李卫国. 基于 Pro-CAST 的底座铸件缺陷分析及铸造工艺优化[J]. 铸造技术,2021, 42(1): 29-33.
HAN B, JIA Z S, ZHANG A Y, LIN T, LI W G. Defect analysis and casting process optimization of pedestal casting based on Pro-CAST[J]. Foundry Technology, 2021, 42(1): 29-33.

[13] 张军,解戈奇. 铸态球墨铸铁 QT600-7 重卡桥壳的生产[A]. 2019 山东铸造年会论文集[C]. 曲阜：山东省铸造协会,2019: 246-249.
ZHANG J, XIE G Q. Production of as-cast QT600-7 ductile iron axle housings for heavy trucks[A]. Proceedings of the 2019 Shandong Foundry Annual Conference [C]. Qufu: Shandong Foundry Association, 2019: 246-249.

[14] 张聚涛,张涛,赵悦光,宫显辉,颉向旭,景高楼. 球铁内燃机机身缩松缺陷的工艺改进[J]. 铸造技术,2023, 44(10): 972-976.
ZHANG J T, ZHANG T, ZHAO Y G, GONG X H, XIE X X, JING G L. Technological improvement on shrinkage defects of ductile iron internal combustion engine body [J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 972-976.

[15] 方圆,周吉祥,于赟,魏伟,胡静. 耐热钢排气歧管熔模铸造的工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2013, 33(6): 539-542.
FANG Y, ZHOU J X, YU Y, WEI W, HU J. Optimization design of improving the quality and yield of the investment casting heat resistant steel exhausting manifold [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(6): 539-542.

[16] ZHANG A, LIANG S, GUO Z, XIONG S. Determination of the interfacial heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface in low pressure sand casting [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 472-482

[17] 孙斐,庄晔,邱永宁,孙祥广,周正寿,胡静. 碳当量对高压油缸端盖球铁件组织性能的影响[J]. 铸造技术,2015, 36(12):2927-2929.
SUN F, ZHUANG Y, QIU Y N, SUN X G, ZHOU Z S, HU J. Effects of carbon equivalent on microstructure and properties of high pressure oil cylinder cover of ductile[J]. Foundry Technology, 2015, 36(12): 2927-2929.

[18] 李改玲,吕家禹,曹玉亭. Cr、Sn 对灰铸铁组织和性能的影响及应用[J]. 现代铸铁,2019, 39(3): 22-25.
LI G L, LYU J Y, CAO Y T. Effect of Cr and Sn on microstructure and propertied of gray iron and its application[J]. Modern Cast Iron, 2019, 39(3): 22-25.

[19] KAILA V N, DAVE I B. The influence of coating sand materials on shell mold properties of Investment casting process[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 800-804.

中国知网 https://www.cnki.net