

• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4172

等温淬火球墨铸铁轮毂的研制

贾霏雨¹,李欣然²,李平¹,樊沙沙³,赵丕峰¹,李朝霞⁴

(1. 河南理工大学材料科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 焦作市产品质量检验检测中心, 河南 焦作 454003; 4. 焦作固德联合机械制造有限公司, 河南 焦作 454150)

摘要:针对轮毂结构较复杂、壁厚差异大及材质技术要求高的特点,需要进行合理的铸造工艺和等温淬火热处理工艺设计,以生产出优质轮毂铸件。通过确定合适的浇注位置和分型面,进行了砂芯、模样布置及浇冒系统设计。为满足轮毂本体不同部位硬度的差异性要求,将轮毂齿轮中心孔设计为不铸出孔(热处理后加工出齿轮孔),并缩短等温淬火保温时间,即 900 ℃×2 h 奥氏体化后,在硝酸盐池中进行 280 ℃×35 min 等温淬火处理。开发的轮毂铸件外观质量好,未发现明显缩孔缩松、夹杂、气孔等铸造缺陷。

关键词:球墨铸铁;轮毂;铸造工艺;等温淬火热处理

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)01-0081-06

Development of Austempered Ductile Iron Wheel Hub

JIA Feiyu¹, LI Xinran², LI Ping¹, FAN Shasha³, ZHAO Pifeng¹, LI Zhaoxia⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Jiaozuo City Product Quality Inspection and Testing Center, Jiaozuo 454003, China; 4. Jiaozuo Gude United Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jiaozuo 454150, China)

Abstract: On the basis of the complex structure, large differences in wall thickness, and stringent material technology requirements of wheel hubs, rational casting and isothermal quenching heat treatment processes for the production of high-quality wheel hub castings are necessary. In this study, the appropriate pouring position and parting surface were determined, followed by the design of the sand core, pattern layout, and gating system. To meet the hardness requirements in different parts of the wheel hub, the gear hole in the center of the wheel hub is designed as a non-cast hole (machining into a gear hole after heat treatment), and the holding time of isothermal quenching is shortened; that is, after 900 ℃×2 h austenitization, it is subjected to 280 ℃×35 min isothermal quenching treatment in a nitrate pool. The developed wheel hub casting has good appearance quality, and no obvious casting defects such as shrinkage cavities, porosity, inclusions, and gas pores have been found.

Key words: ductile iron; wheel hub; casting process; austempering heat treatment

轮毂是一种轴对称动力传动部件,其中心是连接轴的位置。轮毂是机械装置上一个关键零部件^[1-2]。在机械运转过程中,轮毂受到机械制动和转动过程中的冲击、振动和摩擦等强载荷作用,对轮毂铸件材质要求高。轮毂大多采用球墨铸铁材质,朱爱军等^[3]和刘冰^[4]针对出口双槽轮毂和风电发电机轮毂使用要求,材质分别选取 QT450-12 和 GGG35.3 球墨铸铁。随着设备功率和转速的增大,轮毂承受的载荷

加大,对轮毂的强度、韧性、硬度等提出了更高要求^[5-6],等温淬火球铁具有高强、高韧、耐磨等优异性能,近年来得到越来越广泛应用^[7-8]。等温淬火时间通常在 60 min 以上(最高达 3 h),以保证工件的淬透性,刘慧玲等^[9]对 QTD800-10 轮毂进行了热处理工艺研究,确定出最佳热处理工艺为奥氏体化温度 920 ℃、时间 120 min,等淬温度 370 ℃、时间 60 min。而此次生产的轮毂铸件不同部位硬度要求有很大差

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 河南省重点研发专项(241111231300);河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF170502)

作者简介: 贾霏雨,2001 年生,硕士生。研究方向为铸造工艺和材料腐蚀磨损。Email: jfy0425@163.com

通信作者: 李平,1968 年生,博士,教授。研究方向为先进成形技术,材料腐蚀、磨损和断裂理论及防护。Email: leeping68@163.com

引用格式: 贾霏雨,李欣然,李平,樊沙沙,赵丕峰,李朝霞. 等温淬火球墨铸铁轮毂的研制[J]. 铸造技术, 2025, 46(1): 81-86.

JIA F Y, LI X R, LI P, FAN S S, ZHAO P F, LI Z X. Development of austempered ductile iron wheel hub [J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 81-86.

异,给等温淬火工艺提出了高要求。本文对轮毂技术要求 and 结构特点进行分析,设计出合适的铸造工艺和热处理工艺方案,成功开发生产出合格的轮毂产品。

1 轮毂结构分析和技术要求

1.1 结构分析

轮毂的整体结构如图 1 所示,其轮廓尺寸为 $\phi 230 \text{ mm} \times 103.5 \text{ mm}$,零件质量约为 10.4 kg。图 1a 所示轮毂中心有一高度 45.5 mm、节圆直径 $\phi 52.5 \text{ mm}$ 的齿轮孔,齿数为 35 个、齿宽为 2.75 mm,齿轮的高度、节圆直径和齿宽的公差范围为 $\pm 0.2 \text{ mm}$,轮盘两边有 2 个椭圆形通孔(长径为 21.5 mm、短径为 20 mm)。图 1b 所示轮毂底部有一与三个圆孔相切,长度为 150 mm 的浅凹槽。图 1c 所示轮毂中部有 1 个宽为 112 mm、高为 17.5 mm 的深孔,深孔直穿轮毂中部。轮毂上部为一圆柱,圆柱的直径为 89.5 mm,齿轮上部为漏斗形的凹槽,凹槽斜度为 30° ,高度为 12.8 mm。第 1 个平面和第 2 个平面之间的高度为 12.8 mm,直径为 102.2 mm。第 2 个面到第 3 个面的距离为 19.7 mm。由剖面图(图 1d)可以清晰看出轮毂的内部结构:齿轮孔贯穿零件中心,零件左右两端有 2 个圆柱形孔洞,左右两侧各有 1 个方形耙齿孔。由此可见,该零件结构较复杂,对造型过程要求比较高^[8-9]。

1.2 技术要求

客户要求的轮毂材料强度和伸长率按国标 GB/T 24733-2023 中的 QTD 1400-2,对轮毂不同硬度有特殊要求,轮毂下表面硬度要求在 380~420 HB 之间, $\phi 52.5 \text{ mm}$ 齿轮面拉削前的毛坯表面硬度要求低于

330 HB(芯部硬度要求也低于 330 HB),铸件尺寸公差按 CT11 要求^[10-11],零件齿轮面和上部喇叭口面粗糙度要求高($Ra 3.2 \mu\text{m}$),为满足齿轮面硬度、尺寸精度和粗糙度要求^[12],此处齿轮面孔为不铸出孔,即做成实心(不包含喇叭口),需要后续机加工达到,其它面的粗糙度要求为 $Ra 12.5 \mu\text{m}$,铸件质量约为 12.4 kg^[13]。

2 铸造工艺设计

2.1 造型方案的确定

黏土湿型砂铸造所用原材料来源广、成本低,造型方式的适应性好,生产效率高,适用于多种合金材质,有害气体排放少,旧砂容易回收再利用,是一种绿色环保的铸造方法,该轮毂生产采用黏土湿型砂铸造工艺。所用黏土砂配比为(质量分数,%,下同):新砂加入量为 10%,煤粉加入量为 1.3%,膨润土加入量为 2.4%,水分加入量为 3%~4%,一箱 4 件。

2.2 浇注位置和分型面的确定

由图 1c 和 d 可以看出,轮毂铸件两侧有方形大耙齿孔,造型时起模不利,故需要采用砂芯成形,为便于造型起模,在垂直于齿轮主轴的耙齿孔中间位置进行分型,轮毂大平面朝下,内浇道设置在轮缘外侧分型面处,如图 2 所示。

2.3 砂芯设计

轮毂铸件两侧方形大耙齿孔采用砂芯形成,砂芯使用酚醛树脂覆膜砂制芯,砂芯两侧设计有方形芯头定位,确保造型下芯和浇注过程中砂芯稳固。

2.4 浇冒系统的设定

采用半封闭中注式浇注系统,浇注时金属液充型

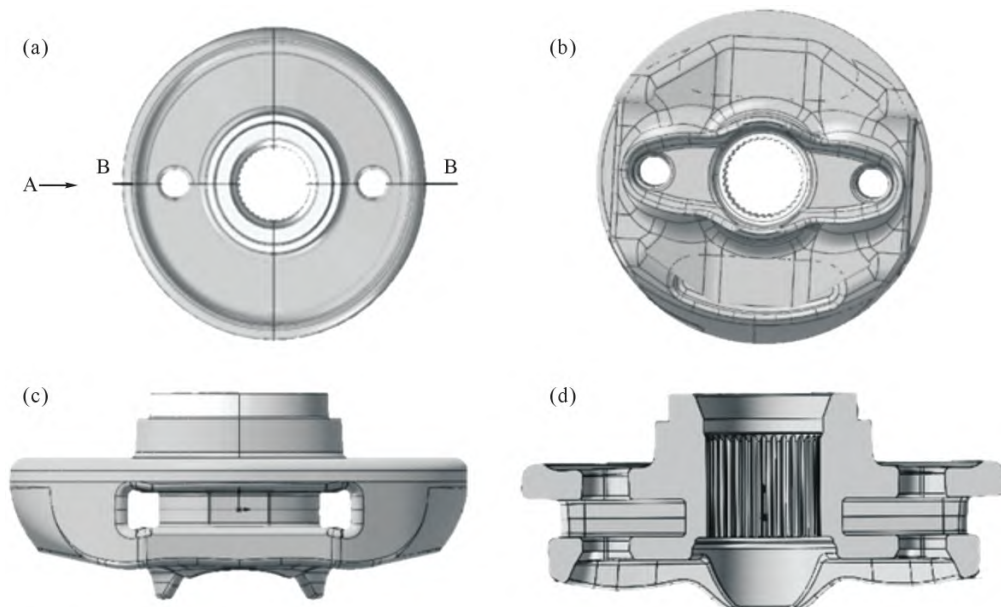


图 1 轮毂三维图:(a) 顶面;(b) 底面;(c) 侧面(A 向);(d) 剖面(B-B)
Fig.1 3D diagrams of the wheel hub: (a) top surface; (b) bottom surface; (b) side (A direction); (d) section (B-B)

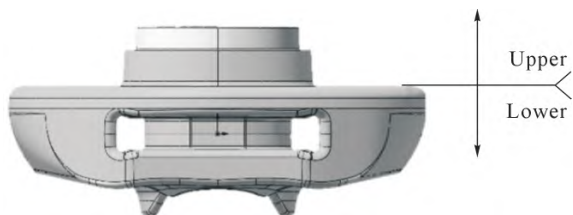


图2 浇注位置和分型面的选取

Fig.2 Selection of the pouring location and parting surface

平稳,浇注系统挡渣效果好,利于型腔内气体排出^[14]。每个轮毂铸件各设置了两道扁薄内浇口,间隔180°,可有效避免多道内浇口相距过近导致的铸件局部过热^[15],横浇口末端设置冒口,金属液通过冒口流经内浇口进入铸件型腔,不仅起到补缩作用,还可起到集渣、防止卷气等作用^[16]。单个内浇道尺寸为60 mm×4 mm,共8个内浇口,总截面积19.2 cm²,4个横浇道总截面积为30.0 cm²;直浇道尺寸为φ40 mm,截面积12.56 cm²;浇注系统截面比例 $\Sigma A_{直}:\Sigma A_{横}:\Sigma A_{内}=1:2.38:1.53$,冒口尺寸为(mm):φ80(下)/φ70(上)×150(高)。轮毂的模具布置和砂芯、浇冒口系统如图3。

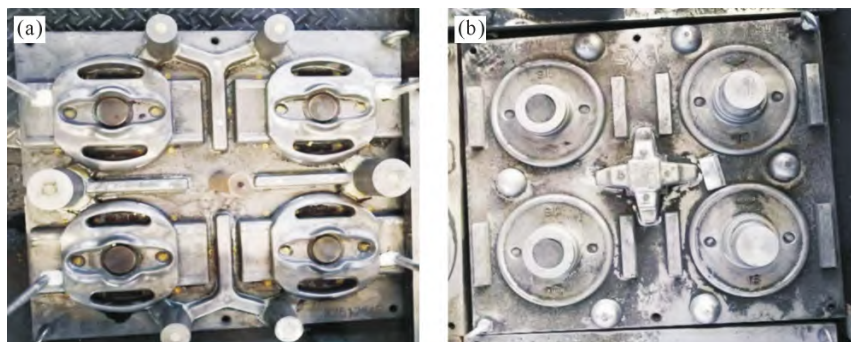


图3 轮毂模具布置及浇冒口系统:(a) 模具布置;(b) 浇冒口系统

Fig.3 Mold layout and gating-feeding system of the wheel hub: (a) mold layout; (b) gating-feeding system

设计为实心(不铸出孔,后续加工得到齿轮孔),对等温淬火热处理工艺方案进行优化设计:通常情况下等温淬火热处理时间控制在1 h以上,但为了得到铸件表面硬度380×420 HB、芯部硬度小于330 HB的工艺要求,采用900℃×2 h奥氏体化,然后在硝酸盐池盐浴中进行280℃×35 min的等温淬火处理^[18]。采用不铸出孔,铸件先短时等温淬火热处理^[19-20],然后机加工齿轮孔。这样的工艺设计有以下2个好处:①表面淬硬层能保证耐磨;②先热处理,然后加工的花键孔与齿轮轴配合精度更好,花键硬度适中和主轴配合安全系数高^[21]。

3.3 材质检测结果

按照上述铸造工艺和热处理工艺方案进行了批量生产,轮毂铸件未发现明显的缩孔缩松、夹渣、气孔等铸造缺陷,图4为某次生产的铸件实物。

3 生产验证

3.1 熔炼和浇注工艺

在生产过程中采用1 t中频感应电炉熔炼铁液^[17],熔炼所用主要原材料有Q10或Q12生铁、打包废钢、回炉料,其比例为0.30%:0.30%:0.40%。炉前化学成分控制范围为:3.60%~3.95% C、1.2%~1.4% Si、0.20%~0.40% Mn、≤0.05% P、≤0.03% S、≤0.3% Mo、≤0.8% Cu。球化处理采用包内冲入法,球化剂为稀土镁球化剂(FeSiMg8RE3),加入量为1.2%;采用75SiFe中间包和浇包内二次孕育,孕育剂加入量各为0.2%~0.25%。出炉温度控制在1 550℃左右,由于轮毂结果较复杂、壁厚不均匀,故浇注温度控制在(1 380±20)℃。

3.2 热处理工艺

根据产品高强、高韧、耐磨材质技术要求,抗拉强度和伸长率为QTD1200-4或QTD1400-2,轮毂本体不同部位硬度有特殊要求,芯部硬度应小于330 HB,表面硬度范围为380×420 HB。为满足轮毂本体不同部位硬度要求,故在前期铸造时把轮毂齿轮中心孔



图4 轮毂铸件实物

Fig.4 Wheel casting

图6和7分别为轮毂外表面和心部的金相组织图,两个样品的位置分别位于图5a和b。样品经过打磨和抛光后通过4%(体积分数)的硝酸酒精溶液进行腐蚀后可以通过金相显微镜观察轮毂外表面与芯

部基体组织的区别^[20,22]。可以看出,外表面组织为奥铁体,心部为细片状珠光体。外表面奥铁体满足轮毂使用过程中具有好的耐磨性,心部珠光体组织有利于后续加工齿轮孔。

采用钢研纳克检测技术有限公司 SparkCCD 6500 直读光谱仪进行化学成分分析检测,采用上海蔡康光学仪器有限公司 SHBRV/187.5 数显布洛维硬度计进行硬度测试,铸件外表面硬度检测部位为图 5b 位置,芯部硬度检测部位为图 5c 位置,各检测 3 次。采用济南时代试金仪器有限公司 JB-300 摆锤冲击试验机和广州材料试验机厂 WE-30 万能材料试验机进行冲击性能和拉伸性能测试,批量生产轮毂铸件的化学成分、金相组织和力学性能等检测结果如表 1~4 所示。从轮毂中心处经线切割得到尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的方块形试样用于化学成分分析,从表 1 检测结果可以看出,化学成分符合材质标准要求。图 6 可以看出轮毂的球化级别为 2 级,球体半径为 6 级,基体组织为奥氏体+针状铁素体

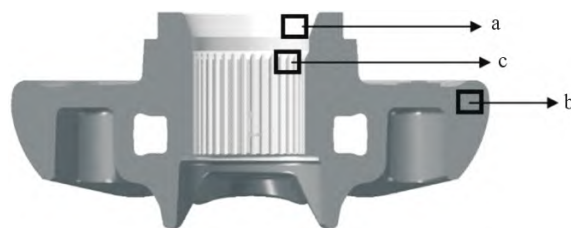


图 5 轮毂剖面
Fig.5 Profile diagram for wheel hub

(奥铁体);图 7 可以看出轮毂的球化级别为 2 级,球体半径为 6 级,基体组织为片状珠光体和少量奥铁体。经多次检验后,从表 2 和 3 可以看出轮毂材质性能符合客户技术要求。铸件经后续机加工齿轮孔等位置显示,刀具磨损未发现异常现象,刀具的使用寿命在 1 000 件以上。

4 结论

(1)采用半封闭式中间引入浇注系统,横浇道末端设置侧冒口,每个轮毂铸件两道内浇口呈 180°布

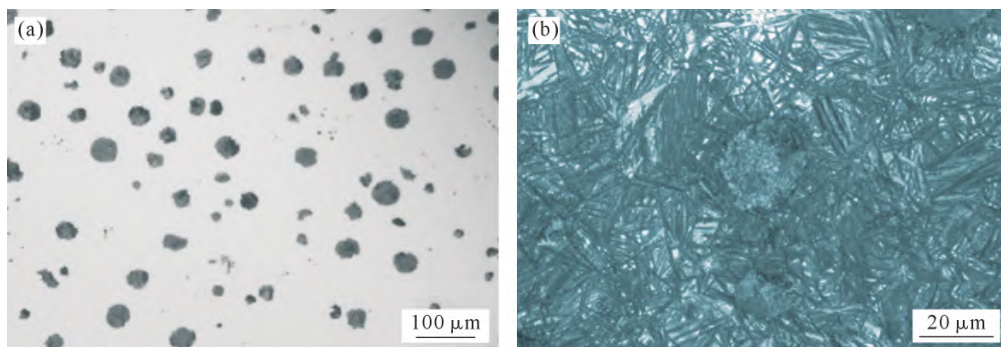


图 6 轮毂外表面金相组织:(a) 腐蚀前;(b) 腐蚀后
Fig.6 Metallographic structure of the austempered wheel hub: (a) before etching; (b) after etching

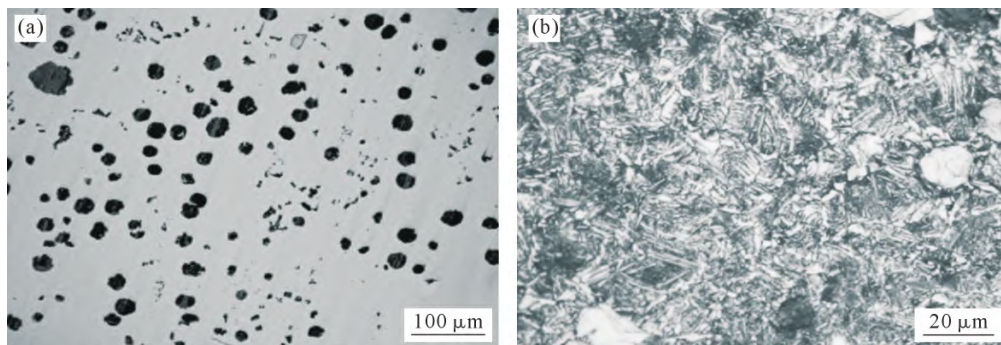


图 7 轮毂心部金相组织:(a) 腐蚀前;(b) 腐蚀后
Fig.7 Metallographic structure of the central part of the austempered wheel hub: (a) before etching; (b) after etching

表 1 铸铁的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the cast iron

Detection items	(mass fraction/%)						
	C	Si	Mn	S	P	Mg	RE
Target value	3.3~3.8	2.0~2.8	0.2~0.4	≤0.03	≤0.05	0.03~0.06	0.01~0.04
	3.66	2.52	0.35	0.017	0.032	0.041	0.012
Actual value	3.60	2.68	0.31	0.018	0.028	0.045	0.012
	3.52	2.54	0.35	0.017	0.036	0.050	0.012

表 2 试块的金相组织
Tab.2 Metallographic structure of the test block

Detection items	Spheroidization level (level)	Ball diameter size (grade)	Matrix
Actual value	2	6	Orferrite (austenite+ acicular ferrite)

表3 附铸试块的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of the attached cast test block

Detection items	Tensile strength/MPa	Elongation /%	Impact toughness /(J·cm ⁻²)	Brinell hardness(HB)
Target value	≥1 400	≥2.0	≥60	380~480
Actual value	1 572	4.0	70	415
	1 461	5.1	83	401
	1 485	4.8	86	404

表4 轮毂本体硬度
Tab.4 Hardness of the produced wheel hub

Detection items	Brinell hardness on the outer surface(HB)	Brinell hardness of the core(HB)
Target value	380~420	≤330
	398.1	305.4
Actual value	406.0	306.0
	406.2	304.3

置等措施,有效控制了铸件中缩孔缩松、气孔和冷隔等缺陷。

(2)通过将轮毂齿轮中心孔设计为不铸出孔,并对等温淬火热处理工艺方案进行优化设计,采用 900℃×2 h 奥氏体化,后在硝酸盐池盐浴中进行 280℃×35 min 等温淬火处理,满足了轮毂本体不同部位硬度等材质技术要求,轮毂尺寸形状满足图纸要求。

(3)按照本研究设计的铸造工艺和等温淬火热处理工艺,实现了轮毂铸件的批量生产。

参考文献:

[1] 刘俊江,姬刚,高鑫,冀强,贾磊.一种车用铝合金轮毂锻件工艺优化及仿真分析[J].锻造与冲压,2024(17): 59-61.
LIU J J,JI G,GAO X,JI Q,JIA L. Process optimization and simulation analysis of aluminum alloy wheel forgings for automobiles [J]. Forging & Metalforming, 2024(17): 59-61.

[2] 李新宇,苏小平.某低压铸造铝合金轮毂成形工艺设计及优化[J].特种铸造及有色合金,2024,44(7): 987-991.
LI X Y,SU X P. Design and optimization of forming process for low pressure casting aluminum alloy wheel hub[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(7): 987-991.

[3] 朱爱军,高军,袁东洲,袁森,朱铭,魏兵.球铁双槽轮毂铸件的生产技术[J].铸造,2004(12): 1050-1052.
ZHU A J,GAO J,YUAN D Z,YUAN S,ZHU M,WEI B. Production technology of ductile iron double-groove hub castings [J]. Foundry, 2004(11): 1050-1052.

[4] 刘泳. 2MW 风电轮毂低温球铁的生产工艺[J]. 中国铸造装备与技术,2013(4): 42-47.
LIU Y. Production technology of 2MW wind power hub of ductile iron with low temperature impact resistance[J]. Chinese Foundry Machinery & Technology, 2013(4): 42-47.

[5] 冯恩浪,罗礼营,卢叶,覃文东,黄东妮,何红岩.基于质量改善的汽车轮毂模具工艺设计研究[J].内燃机与配件,2024(12): 41-43.
FENG E L,LUO L Y,LU Y,QIN W D,HUANG D N,HE H Y. Research on process design of automotive wheel hub mold based on quality improvement[J]. Internal Combustion Engines & Parts, 2024(12): 41-43.

[6] 陈家平.重载汽车轮毂轴承的设计与应用[J].机电产品开发与创新,2024, 37(3): 45-46, 52.
CHEN J P. Design and application of hub bearings for heavy duty vehicles[J]. Development & Innobation of Machinery & Electrical Products, 2024, 37(3): 45-46, 52.

[7] DA SILVA A E, LOPES J C, DANIEL D M, DE MORAES D L, GARCIA M V, RIBEIRO F S F, DE MELLO H J, DE ANGELO SANCHEZ L E, AGUIAR P R, BIANCHI E C. Behavior of austempered ductile iron (ADI) grinding using different MQL dilutions and CBN wheels with low and high friability[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 4373-4387.

[8] 刘慧玲,侯晓华. ADI CADI 产品的生产与应用[A]. 聚焦新质生产力 加快铸造行业高质量发展——二十届中国铸造协会年会论文集[C]. 上海:中国铸造协会,2024. 4.
LIU H L,HOU X H. Production and Application of ADI CADI Products[A]. Focusing on New Quality Productivity and Accelerating the High-quality Development of the Foundry Industry-Proceedings of the 20th Annual Meeting of the China Foundry Association[C]. Shanghai: China Foundry Association, 2024. 4.

[9] 章德平,吕俊成,莫易敏,胡强,徐铁,高勇.轮毂轴承性能对后桥传动效率影响的试验研究[J].机械研究与应用,2024, 37(3): 5-7, 11.
ZHANG D P,LYU J C,MO Y M,HU Q,XU T,GAO Y. Experimental study on the influence of hub beraing performance on transmission efficiency of drive axle[J]. Mechanical Research & Application, 2024, 37(3): 5-7, 11.

[10] 王国辉,雷良育,孙崇昆,荆家宝,胡峰.汽车轮毂轴承内圈尺寸公差综合检测与分析[J].南阳理工学院学报,2019, 11(4): 60-63.
WANG G H,LEI L Y,SUN C K,JING J B,HU F. Comprehensive inspection annd analysis of dimensional tolerance of inner hub of automobile wheel bearings [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2019, 11(4): 60-63.

[11] 郭坤龙.轧机轴承座中尺寸公差与形位公差的选择初探[J].科技信息,2013(20): 436.
GUO K L. A preliminary study on the selection of dimensional tolerances and geometric tolerances in rolling mill bearing housings [J]. Scientific & Technical Information, 2013(20): 436.

[12] TALON A G, DE SOUZA RODRIGUES M, GARCIA M V, LOPES J C, RIBEIRO F S F, DE MELLO H J, DE ANGELO SANCHEZ L E, AGUIAR P R, BIANCHI E C. Comparative evaluation of CBN wheels with abrasive grains of different friability

- applied to steel and ductile iron grinding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(9-10): 2547-2564.
- [13] 刘天平,蔡梅芹,李泽同,王爱丽,李泽嘉,王健,王洋. 新型球墨铸铁汽车轮毂的研制开发[J]. 现代铸铁, 2022, 42(4): 1-4, 9.
LIU T P, CAI M Q, LI Z T, WANG A L, LI Z J, WANG J, WANG Y. Development of new type nodular iron automotive wheel hub[J]. Modern Cast Iron, 2022, 42(4): 1-4, 9.
- [14] 史文东,陈毅,石云,程兆虎. 某轮毂垂直造型工艺砂孔问题的分析和解决[J]. 铸造设备与工艺, 2023(6): 24-25, 28.
SHI W D, CHEN Y, SHI Y, CHENG Z H. Analysis and solution of sand hole in vertical modeling process of a wheel shell[J]. Foundry Equipment & Technology, 2023(6): 24-25, 28.
- [15] 郭新光,徐国强,张守全,王洪涛. 球墨铸铁件表面缺陷的形成机理及预防措施[J]. 铸造设备与工艺, 2015(5): 47-50.
GUO X G, XU G Q, ZHANG S Q, WANG H T. Surface defects formation mechanism of ductile iron casting and prevention measures[J]. Foundry Equipment & Technology, 2015(5): 47-50.
- [16] 贺增光. 下芯盘铸造工艺的改进[A]. 聚焦新质生产力 加快铸造行业高质量发展——第二届中国铸造协会年会论文集[C]. 上海:中国铸造协会, 2024. 2.
HE Z G. Improvement of lower core disc casting process[A]. Focusing on New Quality Productivity and Accelerating the High-quality Development of the Foundry Industry-Proceedings of the 20th Annual Meeting of the China Foundry Association[C]. Shanghai: China Foundry Association, 2024. 2.
- [17] 崔一正,杨明磊,丁新征. 中频炉熔炼在球墨铸铁生产中的应用[J]. 现代铸铁, 2016, 36(2): 77-80.
CUI Y Z, YANG M L, DING X Z. Application of intermediate frequency furnace in nodular iron production[J]. Modern Cast Iron, 2016, 36(2): 77-80.
- [18] WANG X, DU Y Z, LIU C, HU Z T, LI P C, GAO Z J, GUO H, JIANG B L. Relationship among process parameters, microstructure, and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 857: 144063.
- [19] 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.
- [20] 赵强,张元华,王玲玲,许晓坤,武玉海. 耐磨高韧性球墨铸铁的研制及应用[J]. 科技创新导报, 2016, 13(28): 57-58.
ZHAO Q, ZHANG Y H, WANG L L, XU X K, WU Y H. Development and application of wear-resistant and high-toughness ductile iron[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(28): 57-58.
- [21] 古毅康,康晋辉,李平,李朝霞. 高强韧性球墨铸铁轮盘铸件的试制[J]. 铸造, 2023, 72(11): 1493-1496.
GU Y K, KANG J H, LI P, LI Z X. Trial production of high strength and toughness ductile iron wheel disc casting[J]. Foundry, 2023, 72(11): 1493-1496.
- [22] 宋延沛,冯志明,陈丹萍,周汉,林小丽. 高强韧珠光体球墨铸铁的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(2): 62-66.
SONG Y P, FENG Z M, CHEN D P, ZHOU H, LIN X L. Research of pearlite ductile cast iron with high strength and toughness[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2023, 46(2): 62-66.