

高速列车铸钢制动盘铸造工艺研究

孙 逊^{1,2}, 时 坚^{1,2}, 税国彦^{1,2}, 张鹏程¹, 李宝治¹, 汤忭江³, 左玲立³, 宋佳健⁴

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 3. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083; 4. 锦州捷通铁路机械股份有限公司, 辽宁锦州 121116)

摘要: 针对高速列车用铸钢制动盘铸件国产化试生产过程中存在的摩擦工作面硬度不均、裂纹和缩松等铸造缺陷, 开展了制动盘砂型铸造工艺研究。首先采用无损检测等方法对比了进口和国产制动盘铸件质量, 分析了原铸造工艺方案存在的问题, 然后对其进行工艺改进, 并采用ProCAST软件对多个设计方案进行了数值模拟对比研究, 优选了最佳方案。工艺实施结果表明, 采用新方案生产的铸件质量与进口件近似, 可以满足制动盘铸件技术条件要求。

关键词: 铸钢; 制动盘; 砂型铸造工艺; 数值模拟

制动盘是确保高速列车安全的关键产品之一, 其功能是吸收制动动能并将其转化为热能散发到空气中, 在此过程中, 制动盘的材料、结构和性能不能被破坏。随着铸造技术的不断进步, 铸钢制动盘的性能得到很大提高, 并逐步在高速列车上得到广泛应用, 如德国ICE高速列车、中国CRH2型和CRH3型速度350 km/h高速列车应用了铸钢制动盘。目前, 我国高速列车铸钢制动盘依赖进口。相关研究文献表明, 350~400 km/h高速列车制动系统铸钢制动盘采用低合金耐磨铸钢铸造成形, 热疲劳开裂和磨损是制动盘失效主要形式^[1-3]。制动盘两个摩擦工作面硬度均匀可提高铸件服役过程耐磨性; 无缩孔缩松缺陷有利于防止铸件服役过程产生应力裂纹; 无夹杂(渣)缺陷有利于防止铸件补焊过程产生硬质点。这些因素与铸造工艺密切相关, 是铸钢制动盘产品关键, 也是铸钢砂型铸造技术难点。

350 km/h高速列车用某型号轴装制动盘(以下简称制动盘)铸件的材质为耐磨低碳钢, 轮廓尺寸 $\Phi 655 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$, 主要由两个工作摩擦面和中间的多个连接散热柱构成, 如图1所示, 具有热节弥散分布的结构特征, 平均壁厚在17~33 mm, 最大厚度50 mm左右。在前期研制过程中发现制动盘铸件存在缩松、夹杂、裂纹和两个摩擦工作面硬度不均匀问题, 在分析了铸件内外质量检测结果和原铸造工艺方案之后, 认为铸件浇注系统和补缩系统设计不尽合理是产生铸件质量问题的主要原因。熔铸工艺改进并实施后, 铸造出工作面硬度均匀、内外质量达到TJ/CL 310-2014《动车组制动盘暂行技术条件》的合格样件。

1 国内外产品铸造质量对比分析

针对该型号制动盘的国外产品(图2a)和国内某企业的试件(图2b)分别进行了质量检测, 结果如下。

进口制动盘所有表面磁粉探伤均无缺陷显示; X射线照相检查结果显示工件内部无缺陷, 如图3所示; 制动盘工作面的布氏硬度除2个点为HB 279、HB 315之外, 铸字侧硬度在HB 350~401, 非铸字侧硬度在HB 351~403, 不仅每个工作面的硬度分布较均匀, 而且两个工作面表面硬度分布的对称性很好。

国内某企业试制的制动盘铸件表面磁粉探伤后, 铸件冒口侧(注: 铸件的两个工作面的铸造位置分别位于上方冒口侧和下方冷铁侧)对应的工作面没有缺陷显

作者简介:

孙 逊(1964-), 男, 研究员, 从事铸造工艺研究工作。E-mail: sx@foundryations.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)12-1348-08

基金项目:

机械科学研究总院技术发展基金(211810Q)。

收稿日期:

2020-08-25 收到初稿,

2020-09-24 收到修订稿。

示,但是冷铁侧对应的工作面上内浇口区域可见明显的线性缺陷及点状缺陷,如图4所示;X射线照相检查结果显示铸件内部存在缩孔、缩松、裂纹及夹渣缺陷,如图5所示;制动盘工作面的各点布氏硬度分布离散度较大,冒口侧硬度HB 200~327,冷铁侧硬度HB 192~284,冷铁侧硬度均匀性稍好,但两个工作面的硬度值大小、分布均匀性和对称性远不及进口制动盘的指标。

针对国产制动盘试制过程中出现的铸件质量问题,对照原铸造工艺(如图6所示),认为是以下原因造成的:①铸件充型过程金属液引入铸件型腔位置过于集中且位于铸件薄壁处,造成铸件2个内浇口附近过

热,凝固后期铸件收缩不均匀,对内浇口附近未凝固或凝固过程强度建立缓慢位置的拉应力过大,引发相应位置产生裂纹缺陷;②铸件上部7个冒口过大,为保证顺序凝固,铸件底部设置了冷铁,造成两个摩擦工作面凝固冷却速度差异较大,对应的铸件相应位置凝固组织和硬度分布产生较大差异;③熔铸过程采用了较多的返回料影响了熔融金属的纯净度,可能是铸件产生夹杂的主要原因;④铸件所用的7个冒口尺寸看起来尺寸较大,但由于两个工作面之间的散热柱横截面尺寸较小且密布其间,仍有冒口和冷铁作用不到的分散热节点,造成缩孔缩松缺陷的产生。

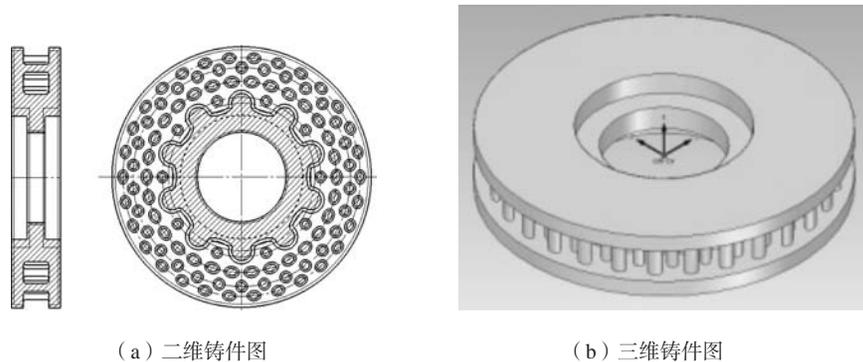


图1 制动盘铸件图

Fig. 1 Casting drawing of brake disc

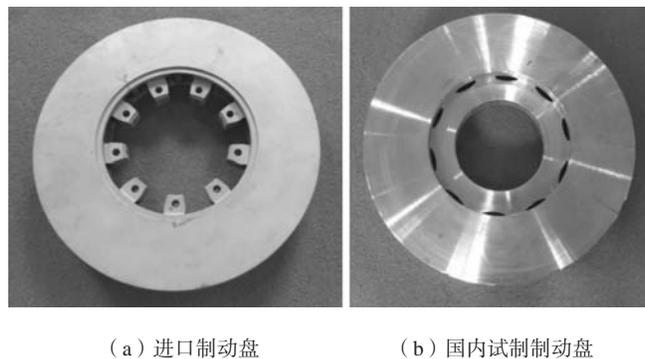


图2 进口制动盘和国内试制的制动盘

Fig. 2 Imported brake disc and domestic trial-produced brake disc



图3 国外制动盘X射线照相检查结果

Fig. 3 Result of X-Ray radiographic inspection for imported brake disc

2 制动盘铸件铸造工艺设计

基于上述缺陷产生原因分析,对制动盘铸造工艺重新进行了优化设计和试验验证。

2.1 铸件图

根据制动盘零件图纸和零件技术要求及GB/T 6414—1999《铸件 尺寸公差与机械加工余量》设计并绘制了铸件图,包括二维铸件图和三维铸件图(图1)。三维铸件图将用于三维铸造工艺图的绘制、铸件充型凝固过程数值模拟以及砂芯的3D喷墨打印分芯图的绘制。

2.2 铸造工艺图

为进行对比研究,共设计了三种铸造工艺方案,分别为方案A、方案B和方案C,如图7所示。

方案A沿用了某企业的工艺设计思路,但对补缩系统和浇注系统设计均进行了改进,每个冒口尺寸有所减小,去除了冷铁设计,增加了冒口个数,内浇道分布更分散,目的是减少制动盘工作面的硬度差异和内浇道过于集中带来的裂纹和缩松问题。

方案B是为了进一步改进制动盘两个工作面的传热对称性而设计的。

方案C则不仅考虑了制动盘两个工作面的传热对称性,还考虑了每个工作面硬度的均匀性问题。因为铸件材质确定之后,影响制动盘摩擦工作面硬度分布的主要是铸件微观组织,铸件微观组织又与制造工艺(包括铸造和热处理工艺)密切相关。方案C移除了摩擦工作上的冒口,也未在摩擦工作面上采用冷铁,使铸件两个摩擦工作面的凝固冷却条件一致性和每个摩擦工作面的凝固冷却条件一致性均得到改善,进而达到改进工作面硬度均匀性的目的。



(a) 内浇口1附近区域缺陷

(b) 内浇口2附近区域缺陷

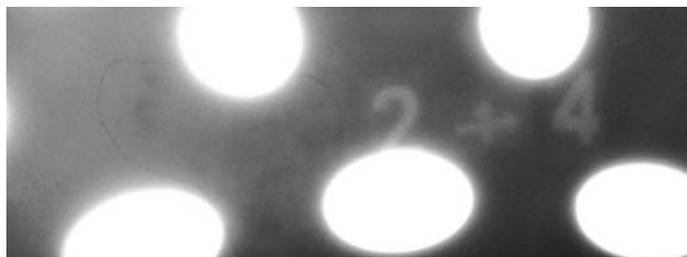
图4 试制制动盘表面磁粉探伤结果

Fig. 4 Magnetic particle inspection results of trial-produced brake disc surfaces



(a) 缩孔

(b) 裂纹及夹渣



(c) 缩松

图5 试制制动盘X射线照相检查结果

Fig. 5 Results of X-ray radiographic inspection for trial-produced brake disc

方案A和方案B的冒口设计参考了第3版《铸造手册》铸造工艺卷给出的传统的铸钢件冒口补缩距离参数，方案C冒口补缩距离参数则是参考国外学者近年的相关研究结果近似选取设计的。如图8所示为美国铸钢协会^[5-6]采用AISI 1025或其他低合金钢材料以及树脂砂或湿型砂，在不同工厂共进行了203个板件试验，由工厂检验人员对完成试件内部进行X射线照相检查后获得的冒口补缩距离参数基础上总结绘制的工艺参数图之一，用于低合金钢铸造工艺顶冒口设计。制动盘直径为 $\Phi 655$ mm，盘厚 T 为30 mm，宽厚比约为21，由图8可知冒口补缩距离约为 $LFD \approx 7T$ ，对应冒口补缩距离约为210 mm。

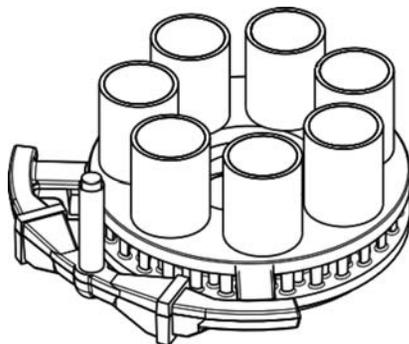


图6 试制制动盘原铸造工艺示意图
Fig. 6 Schematic diagram of original casting process for trial-produced brake disc

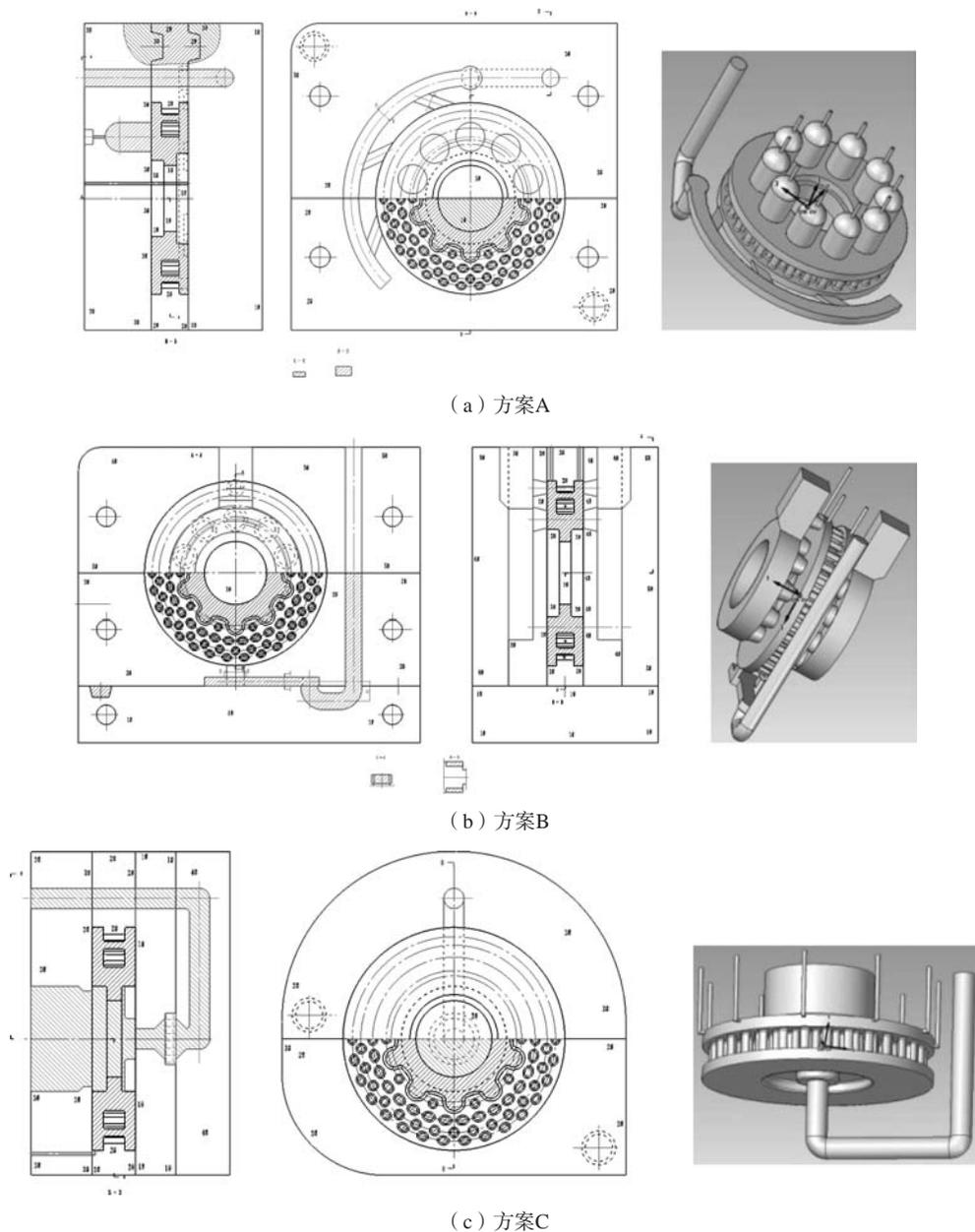


图7 三种改进后制动盘铸造工艺图

Fig. 7 Three kinds of improved casting process drawings for brake discs

浇注系统阻流面积根据铸造工艺手册给出的经验公式设计, 浇注系统各单元截面积比值按照 $A_{内}:A_{横}:A_{直}=1.0:(0.8\sim 0.9):(1.1\sim 1.2)$ 设计计算。

上述三种铸造工艺方案的铸件技术要求为: 采用呋喃树脂砂3D打印法制备砂芯, 横浇道、直浇道采用耐火砖管, 内浇道与横浇道交接处设置陶瓷过滤网; 砂芯涂刷锆英粉涂料, 按照铸造工艺图组芯造型; 铸件收缩率取2.0%; 铸件重量168 kg, 浇注重量分别为308 kg (方案A)、432 kg (方案B)和354 kg (方案C); 浇注温度1 570~1 590 °C; 铸件浇冒口热切割, 表面打磨处理; 浇注同炉标准力学性能试块3块、炉前化学成分试样1块。

2.3 铸造工艺设计优化

采用ProCAST软件对制动盘铸件的三套铸造工艺方案进行金属流动与传热过程数值模拟对比研究, 数值模拟前处理设置的计算条件为: 铸件材质选用28CrMoV5; 铸型材质选用呋喃树脂砂; 浇注温度1 580 °C; 砂型初始温度20 °C; 铸件/铸型的换热系数500 W/(m²·K); 铸件/空气的换热系数10 W/(m²·K); 铸型/空气的换热系数10 W/(m²·K); 计算域内材料热物性采用软件默认值; 缩松判据函数选用新山判据, 临界值设为

$0.1 K^{0.5} \cdot s^{0.5} mm^{-1}$ 。通过数值模拟获得铸件充型状态、凝固时间场和缩松预测结果如图9-11所示。

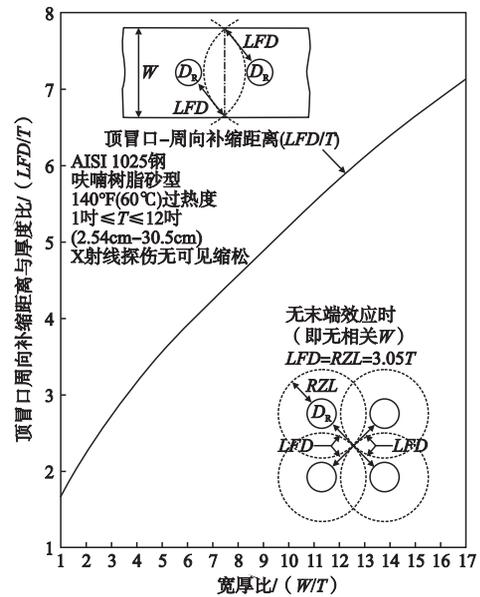


图8 顶冒口周向补缩距离 (LFD) 与试板宽厚比 (W/T) 关系
Fig. 8 Lateral feeding distance (LFD) as a function of width and thickness (W/T) for top-riiser sections



图9 图7中方案A充型凝固过程和缩松缺陷预测结果

Fig. 9 Prediction results of mold filling & solidification processes and shrinkage porosity defect for scheme A in Fig.7



图10 图7中方案B充型凝固过程和缩松缺陷预测结果

Fig. 10 Prediction results of mold filling & solidification processes and shrinkage porosity defect for scheme B in Fig.7

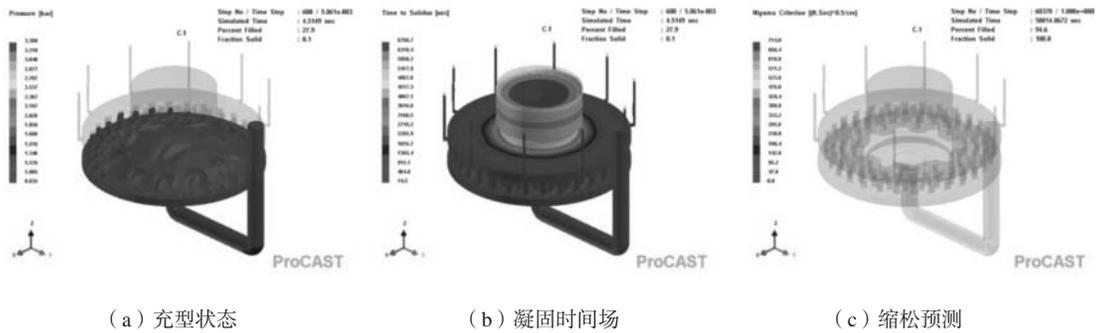


图11 图7中方案C充型凝固过程和缩松缺陷预测结果

Fig. 11 Prediction results of mold filling & solidification processes and shrinkage porosity defect for scheme C in Fig.7

从图9-11的数值模拟结果可以看出，方案A对应的铸件内部散热柱与工作盘交界位置多处存在缩松缺陷，方案B和C对应的铸件内部无缩松缺陷。从数值模拟过程得到的制动盘两个工作面特定位置温度变化中可以看出，两个工作面的凝固过程冷却条件方面，方案C最接近，如图12所示，方案B次之，方案A差别最大，这是与三个工艺方案不同的补缩系统设计密切关联的。方案A、B和C的铸造工艺出品率分别为55%、39%和48%。经以上三个方案的缩松缺陷预测结果、铸件两个摩擦工作面凝固过程冷却条件预测结果以及铸件工艺出品率的对比，确定采用方案C实施工艺过程。

3 铸造工艺实施结果

根据铸造工艺设计，采用Solid Edge软件绘制了三维铸造工艺图，并进行了三维分芯，采用3D喷墨打印设备和三维砂芯几何实体文件制备了呋喃树脂砂芯，如图13所示。将砂芯有效部位涂刷锆英粉涂料并烘干，然后组芯造型，如图14所示。根据铸件化学成分要求准备工业纯铁、硅铁、金属锰、金属铬等金属炉料，采用酸性中频炉大气熔炼，炉料熔化前烘烤去氢，熔炼完成后金属液倒入中间包，包内预先加铝脱

氧，翻包浇注。现场记录浇注温度1 596 ℃，浇注时间21~24 s，熔铸2件。

清理后铸件如图15所示。根据铸件技术条件要求对研制的制动盘铸件进行了质量检测，铸件尺寸检测合格。表面磁粉探伤未发现缺陷。超声波检测未发现缺陷。X射线照相检查发现部分微小分散气孔，未超过内部缺陷等级要求，如图16所示。对铸态制动盘

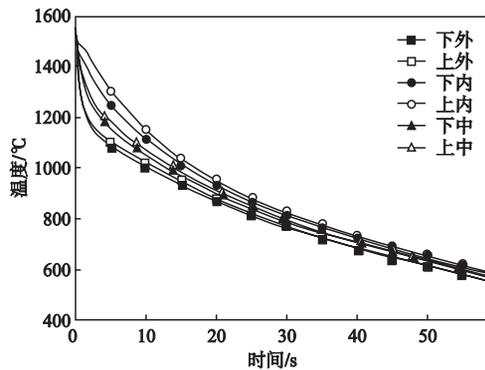
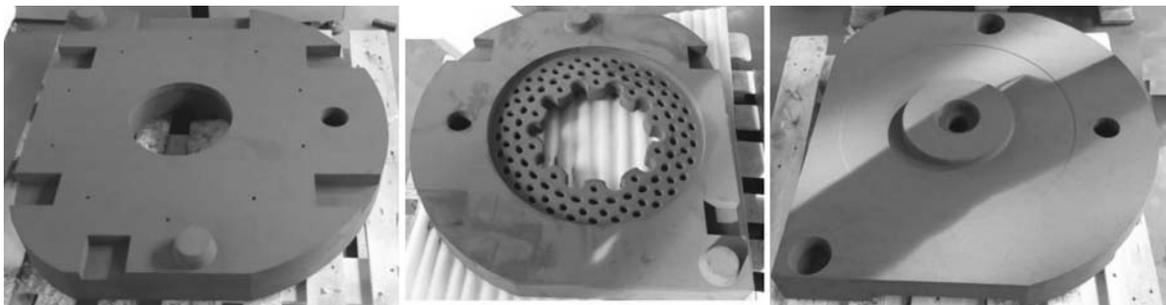


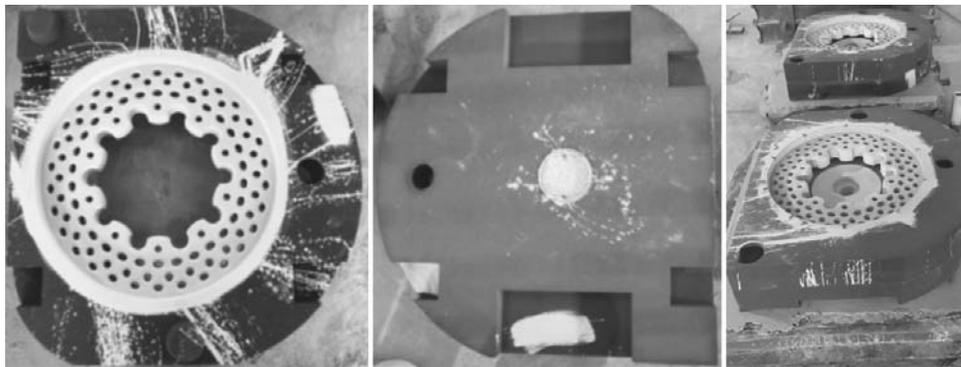
图12 方案C两个工作面面对应6个特征点的温度变化曲线
Fig. 12 Temperature variation curves of 6 characteristic points on two working surfaces for scheme C



(a) 1#芯 (b) 2#芯 (c) 3#芯

图13 采用3D喷墨打印方法制备的部分砂芯

Fig. 13 Part of sand cores prepared by using 3D ink-jet printing method



(a) 锆英粉涂料喷涂

(b) 陶瓷过滤网埋设

(c) 砂芯组装

图14 组芯造型

Fig. 14 Mold preparation through cores assembling

工作面硬度检查结果表明：1#件，浇口侧硬度范围在HB 356~417，最大差值HB 61，冒口侧硬度范围在HB 343~441，最大差值HB98；2#件，浇口侧硬度范围在HB 316~356，最大差值HB 40，冒口侧硬度范围在HB 325~401，最大差值HB 76。工作面硬度检测结果与进口铸件近似。铸件质量检测结果符合《动车组制动盘暂行技术条件》（TJ/CL 310—2014）规定。

4 结论

采用铸造工艺CAD/CAE和砂型3D喷墨打印等技术手段研究了高速列车用铸钢制动盘砂型铸造工艺，制作出内外部质量满足《动车组制动盘暂行技术条件》（TJ/CL 310—2014）规定的合格铸件，所研制铸件的铸造质量达到进口同型号铸件水平。

（1）在铸钢制动盘砂型铸造工艺设计时避免在两个摩擦工作面上设置冒口、浇口、出气孔和冷铁，创造两个工作面及每个面不同位置尽可能接近的凝固冷却条件，可以获得双工作面硬度较均匀的制动盘铸件。

（2）采用纯净原料熔炼、底返式浇注系统、耐火砖管铺设浇道，并在内浇口处设置陶瓷过滤网的工艺措施，可以获得夹杂（渣）缺陷等级满足技术要求的制动盘铸件。

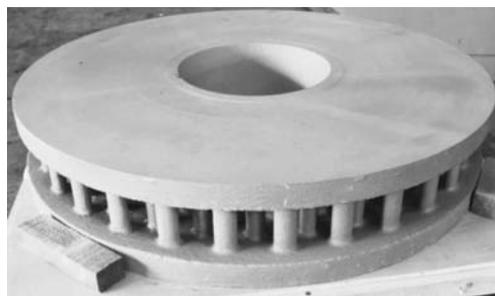


图15 清理后铸件

Fig. 15 The casting after cleaning

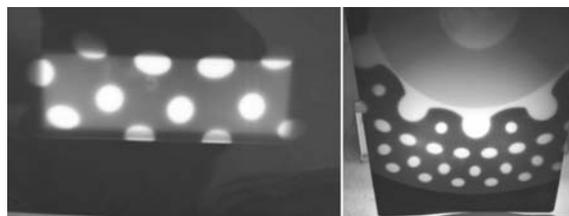


图16 部分X射线照相检查照片

Fig. 16 X-ray radiographic inspection photographs

参考文献:

- [1] 盛欢, 王泽华, 邵佳, 等. 高速列车制动盘材料的研究现状与展望 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (1): 1-5.
- [2] 李继山, 刘涛, 李和平, 等. 380 km/h高速列车轮装制动盘研制 [J]. 铁道机车车辆, 2013, 33 (1): 1-4.
- [3] 钱坤才, 刘颖, 阙红波. 高速列车铸钢制动盘材料的研究 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14 (4): 250-254.
- [4] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册: 第5卷 铸造工艺 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 814-840.
- [5] CARLSON K D, HARDIN R A, OU S, et al. Development of new feeding-distance rules using casting simulation: part I. methodology [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2002, 33 (5): 731-740.
- [6] OU S, CARLSON K D, HARDIN R A, et al. Development of new feeding-distance rules using casting simulation: part II. the new rules [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2002, 33 (5): 741-755.
- [7] 张涛, 王一鸣, 刘彦磊, 等. 铁路铸钢车轮V法铸造工艺的探索试验研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (3): 282-286.
- [8] 李玲, 尹绍奎, 谭锐, 等. 铸钢件3D打印砂型芯用水基涂料的开发与应用 [J]. 铸造, 2019, 68 (4): 359-362.
- [9] 吴铁明, 徐阳, 任朝阳, 等. GX4CrNi13-4铸钢非金属夹杂物的消除及其对性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 802-805.

Study on Casting Process of Cast Steel Brake Discs for High Speed Train

SUN Xun^{1,2}, SHI Jian^{1,2}, SHUI Guo-yan^{1,2}, ZHANG Peng-cheng¹, LI Bao-zhi¹, TANG Cun-jiang³, ZUO Ling-li³, SONG Jia-jian⁴

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China; 4. Jinzhou JT Railway Machinery Co., Ltd., Jinzhou 121116, Liaoning, China)

Abstract:

The study on the casting process of cast steel brake discs was carried out to eliminate or reduce the casting defects, such as uneven friction working surface hardness, cracks, shrinkage porosities and so on, which occurred in the trial production of cast steel brake disc castings for high-speed trains in China. Firstly, the casting quality of the imported and domestic trial-produced brake discs was compared by NDT and other methods, and the problems existed in the original casting process for trial-produced brake discs were analyzed. Then, the casting process improvements were made, and the numerical simulation and comparative study of several design schemes were carried out by using the ProCAST software. Finally, the optimal scheme was determined. The production verification results show that the casting quality obtained by the new scheme is equivalent to that of the imported parts, and can meet the technical requirements of brake disc castings.

Key words:

cast steel; brake disc; sand casting process; numerical simulation