

城轨铝合金制动盘成形仿真和缺陷预测

王朝涛¹, 杨智勇², 张雄飞¹, 赵海芹¹, 韩建民²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛 266111; 2. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 00044)

摘要: 发展城轨列车是缓解城市交通拥堵的重要途径。列车运行速度提高到120 km/h以上时, 传统的闸瓦-车轮踏面制动已不能满足列车制动的要求。针对140~160 km/h城轨列车用SiC_p/A356复合材料制动盘, 利用ProCAST凝固模拟软件对制动盘的真空调压成形工艺进行仿真分析, 基于流场、缩孔缩松、凝固时间及固相率等模拟结果, 确定了制动盘内部成形质量良好的浇注系统和浇注工艺参数, 成形了内在质量完好的SiC_p/A356制动盘。

关键词: SiC_p/A356制动盘; 真空调压成形; 成形工艺; X射线探伤; 数值模拟

制动盘是基础制动系统的重要部件, 对列车的安全可靠运行起着至关重要的作用。随着城市轨道交通运行速度的提高, 原有的踏面制动会对车轮产生严重的热损伤, 而导致其过早的疲劳失效, 所以基础制动方式需要采用盘形制动^[1]。制动盘是典型的簧下重量, 对列车的运行品质具有重要影响。SiC颗粒增强铝基复合材料既具有其陶瓷颗粒组分的高耐磨性、高硬度(强度)及低膨胀系数的特点, 又具有其基体组分铝合金的良好热传导性、低密度、低噪声、长寿命等突出优点, 因而在制动盘方面的应用得到了世界各国的广泛关注和研究, 被认为是轨道列车制动盘用钢铁材料的理想替代材料, 在城市轨道列车基础制动系统中具有广阔的应用前景^[2]。但SiC_p/A356复合材料铸造性能较差, 成形过程中极易形成气孔、缩孔缩松及裂纹缺陷, 加之制动盘的复杂结构, 决定了常规的铸造方法无法获得健全的优质铸件^[3]。

真空调压成形工艺^[4]与传统的低压铸造和砂型铸造工艺相比, 能够使材料在更高压力下结晶凝固, 铸件致密度更高, 能够明显提高铸件性能和质量稳定性。

此外, 计算机辅助工程技术(CAE)是通过数值模拟和物理模拟相结合的方法, 实现计算机模拟生产, 动态显示工艺历程, 预测缺陷, 优化工艺, 最终达到控制铸件质量, 减少生产的盲目性, 对实际生产具有指导价值, 已在各行业得到广泛应用。杨智勇等^[5]采用ProCAST软件对颗粒增强铝基复合材料轴装制动盘的砂型真空调压成形工艺进行了研究, 并基于模拟结果进行了试验, 制动盘铸件的探伤结果与模拟结果一致; 李钊寅^[6]采用铸造仿真软件ProCAST对制动盘不同浇注方案和不同的冒口设计进行了虚拟试浇, 获得了合理的铸造方案, 实践证明工艺方案可行, 提高了铸件质量; 朱丽丽^[7]基于UG NX建模软件和ProCAST铸造仿真软件对车轮的结构和成形工艺进行了优化, 提高了车轮的成形质量; 尹延东^[8]等采用ProCAST铸造仿真软件模拟了新旧浇注系统下蠕墨铸铁制动盘在充型、凝固过程中的金属液流动及温度分布, 模拟结果与实际相吻合。

鉴于此, 本文利用Visual-Environment和ProCAST分析软件研究了SiC_p/A356制动盘的真空调压成形工艺, 并基于模拟结果, 完成了内部无缺陷的SiC_p/A356制动盘真空调压成形工艺设计和产品样件, X射线探伤结果表明制动盘内部质量完好。

1 SiC_p/A356制动盘的数值模拟过程

采用颗粒增强铝基复合材料铸造成形代替粉末冶金成形能够大幅降低生产成

作者简介:

王朝涛(1988-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为转向架设计。
E-mail:wangchaotao@cqsf.com

通讯作者:

杨智勇, 男, 副教授, 博导。
E-mail:Zhyang@bjtu.edu.cn

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)

04-0412-06

基金项目:

下一代城市轨道交通列车关键技术及装备研制(2015BAG12B00)。

收稿日期:

2019-12-20 收到初稿,

2020-02-10 收到修订稿。

本。考虑到制动盘的成形质量要求较高，其成形采用真空调压成形铸造工艺方案，由于模具设计和制造的周期长，采用“试错法”，物力、材料浪费很大。目前普遍采用凝固过程模拟技术对铸件的铸造工艺进行辅助设计并通过与实测数据对比验证其有效性。

1.1 几何及物理建模

有限元仿真过程分为三个阶段，即前处理、计算和后处理。前处理包括三维模型的建立、体网格的划分、计算参数的选取等。图1是利用Solidworks建立的三维铸造工艺模型。

在Visual-mesh软件中进行砂型上模、上冷铁、铸件、砂型中模、砂芯一、砂芯二、砂型下模和吸管的零件装配，检查零件之间是否有重合和交叉。装配后的模型如图2所示。对装配好的模型首先划分面网格，再在面网格的基础上划分体网格。分析模型包含76 572个节点，252 578个单元。

热物参数的选择合理与否对模拟计算准确性有着决定性影响^[10-11]。制动盘的材料为20%Si_p/A356复合材料，模拟所需要的参数一般包括热导率、密度、固相分数、固相线温度、液相线温度、热焓。其中液相线温度为616 ℃，固相线温度为556 ℃，其他热物参数如图3所示。

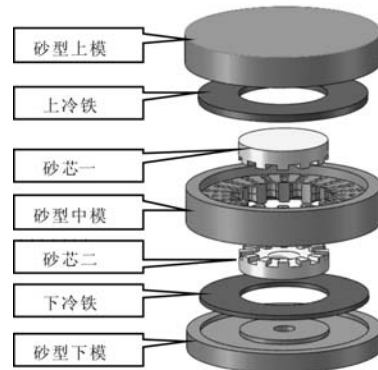


图1 制动盘的铸造工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of brake disc casting process

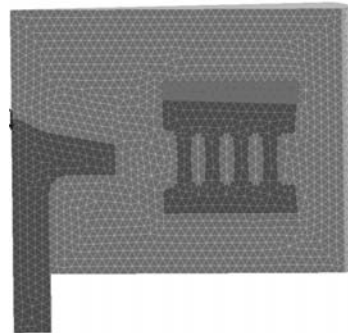


图2 装配后的网格模型

Fig. 2 Assembled mesh model

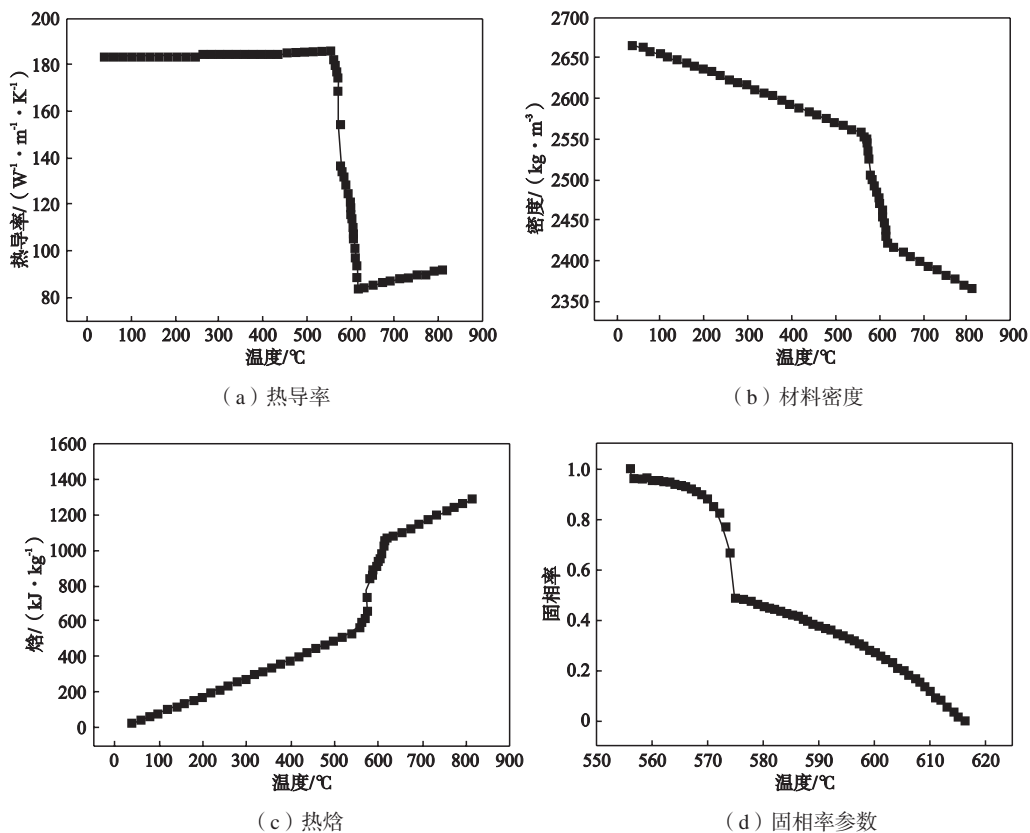


图3 模拟计算使用的热物参数

Fig. 3 Thermal parameters for simulation calculations

造型用砂为石英砂，材料参数取自ProCAST材料库，密度为 1.52 g/cm^3 ，其他热物参数见表1。

制动盘真空调压成形的工艺参数主要包括砂型、吸管和砂芯的预热温度、浇注温度、充型速度（通过压力调控）。覆膜砂砂型中模、砂芯一、砂芯二的预热温度均设置为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，金属吸管的预热温度设置为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ，合金液浇注温度 $690 \text{ }^\circ\text{C}$ ，充型压力 0.14 MPa （参考压力 0.1 MPa ，坩埚内加压 0.04 MPa ），保型压力为 0.08 MPa 。

1.2 模拟有效性验证

试验前进行模拟有效性验证对提高模拟结果可信度，提高经济性有重要意义。在确定热物理参数和边界条件后，针对凝固过程，在仿真之前添加ProCAST代码。在制动盘铸件上选择图4所示的8个点来计算其冷却温度，利用热电偶测量它们的实际冷却温度，以便对照实际结果检查模拟结果的正确性。

如图5所示为选择的8个点处实际测量的冷却曲线。图6为相同的8个点的模拟冷却曲线。可以看出，计算和测量的冷却曲线非常相似，这表明凝固模拟是可信的，可用于描述实际的铸件凝固过程。

1.3 模拟结果分析

采用ProCAST软件进行制动盘的铸造成形过程模拟，模拟结果通过Visual-Environment后处理程序来实现。图7和图8分别是制动盘铸件的水平剖面和垂直剖面内的温度分布云图。从图中可以看出，在水平剖面和垂直剖面上都是远离内浇道的合金液先于靠近内浇道的合金液凝固，铸件具有良好的凝固顺序，能够满足铸件内部顺序凝固的要求。模拟结果表明铸件内部不存在孤立的热节区域，其内部不会产生缩孔缩松缺陷。

在铸件冷却凝固过程中，将铸件内达到某一相同温度并用时间相同的点连接在一起而构成的曲线称为等时线，如果比较达到固相线温度的等时线，则凝固时间长的局部区域，若其周围凝固时间短，则该局部区域在凝固时将得不到补缩，于是将成为孔洞缺陷发生区，此种判断方法被称为等固相线法^[10]。图9所示为等固相线法获得的凝固时间云图。由图9可知，制动盘铸件内部越靠近内浇道的部位凝固到固相线所需的时间越长，液态金属能够实现良好的补缩作用。

为了更加清楚地反映温度的变化，对制动盘沿补缩通道进行取点，见图10。考虑制动盘铸件的结构特点，选取图7中的两条补缩通道进行分析。

图11a是第一条补缩通道上不同点的凝固冷却曲线。从缺陷的变化趋势可以看出，铸件凝固过程中会释放结晶潜热从而延缓合金液温度的快速下降。合金液的温度对其流动性具有决定性的影响，合金液

表1 砂的热物参数
Table 1 Physical properties of sand

温度 /K	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
298	0.733	0.676
473	0.64	0.91
673	0.586	0.997
873	0.59	1.104
1 073	0.64	1.112
1 276	0.703	1.23

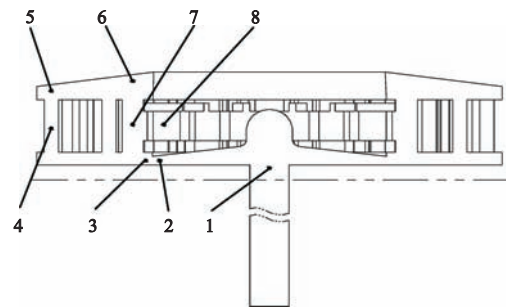


图4 凝固温度曲线选点草图

Fig. 4 Sketch map of alternative nodes used to measure temperatures

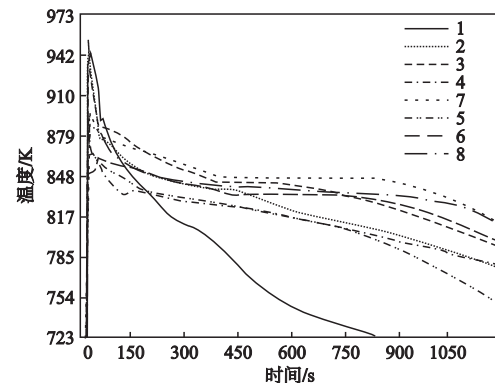


图5 实测温度曲线

Fig. 5 Practical cooling curves

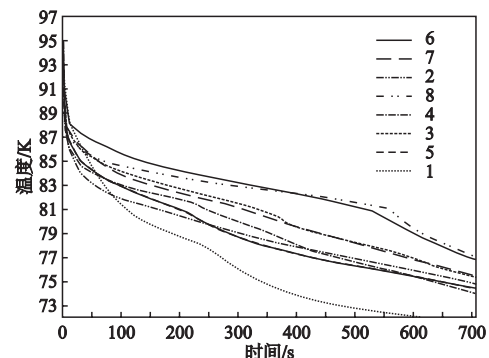


图6 模拟温度曲线

Fig. 6 Simulated cooling curves

越接近于固相，流动性越差。选取合金液相线温度（616℃）和固相线温度（556℃）之间的曲线。从图中可以看出，第一条补缩通道上7个点的凝固顺序为：

A1→A2→A3→A4→A5→A6→A7，第一条补缩通道表现为良好的顺序凝固特征。

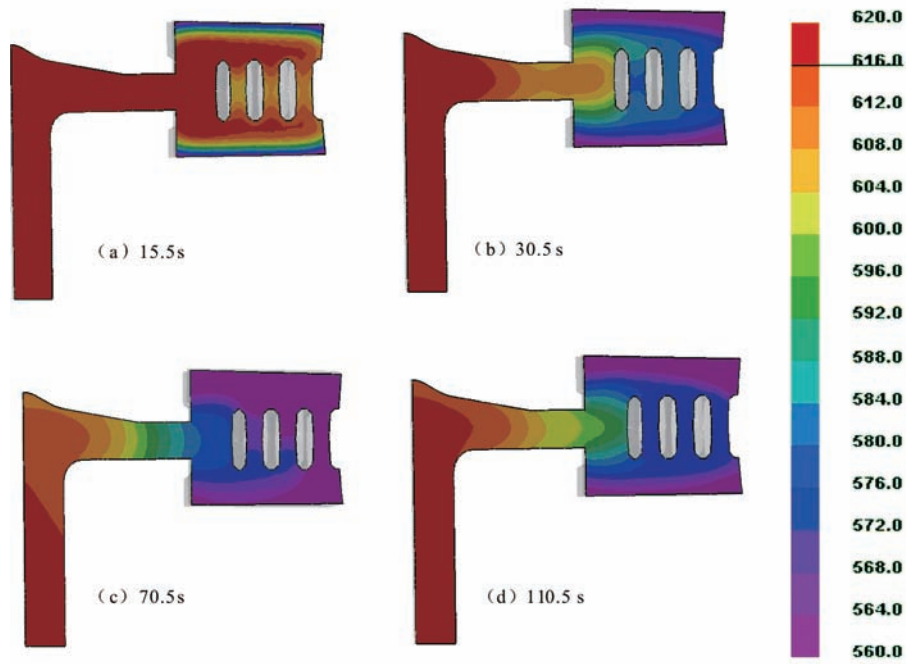
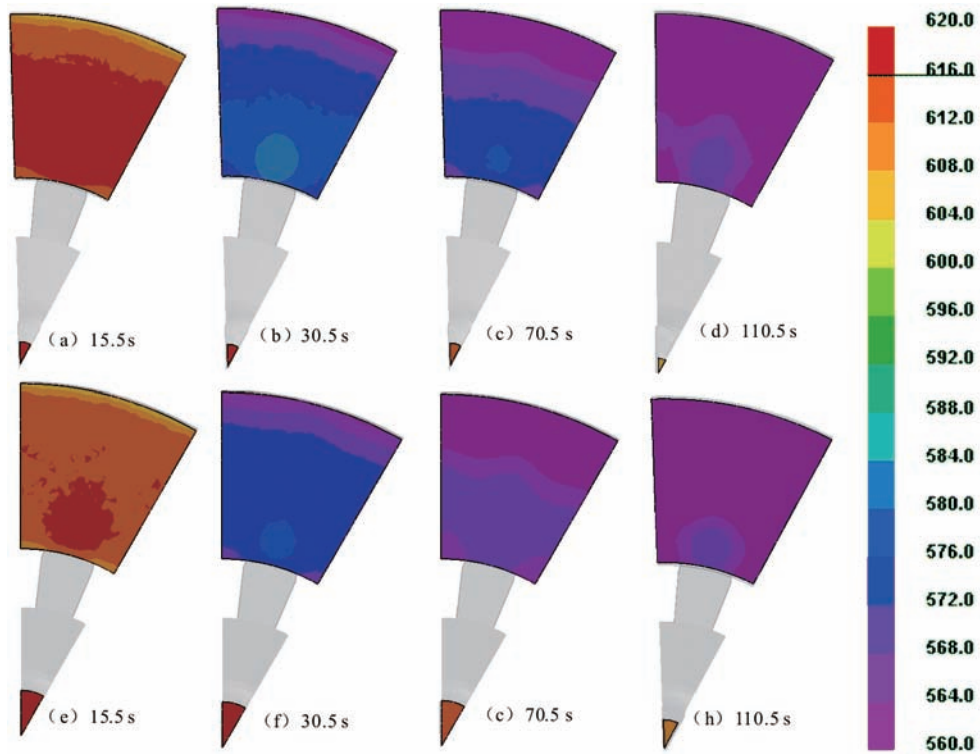


图7 铸件垂直剖面内的温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution cloud of vertical section inside casting



(a)、(b)、(c)和(d)为上盘面水平剖面，(e)、(f)、(g)和(h)为下盘面水平剖面

图8 铸件水平剖面内的温度分布云图

Fig. 8 Temperature distribution cloud of horizontal section inside casting

图11b是第二条补缩通道上不同点的凝固冷却曲线。从图中可以看出，第二条补缩通道上10个点的凝固顺序为：B1→B2→B3→B4→B5→B6→B7→B8→B9→B10，第二条补缩通道表现为良好的顺序凝固特征。

基于模拟结果可知，文中的制动盘真空调压铸造工艺方案，能够实现铸件的顺序凝固和良好补

缩，得到无缩孔和缩松的高质量制动盘铸件。

2 制动盘成形及其质量检测

采用北京交通大学研发的真空调压成形系统，采用模拟中设定的工艺参数，完成了SiC_p/A356制动盘的样件试制，成形工艺曲线如图12所示，铸件如图13所示。

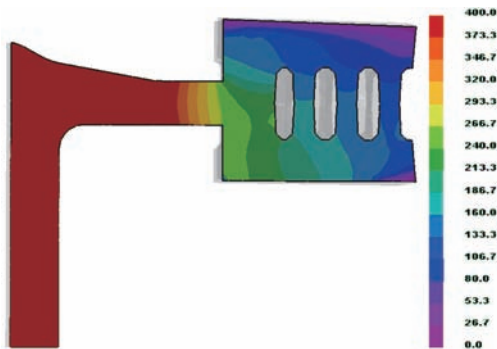


图9 铸件内部凝固时间分布云图

Fig. 9 Solidification time distribution cloud inside casting

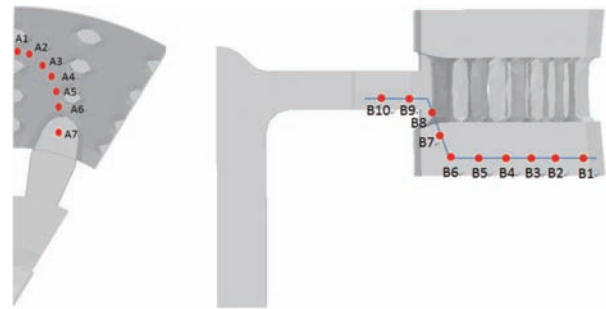
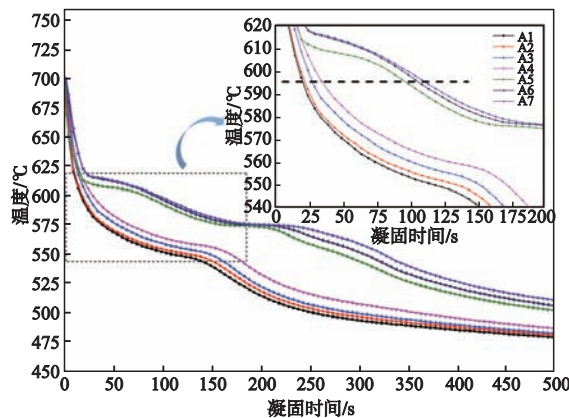
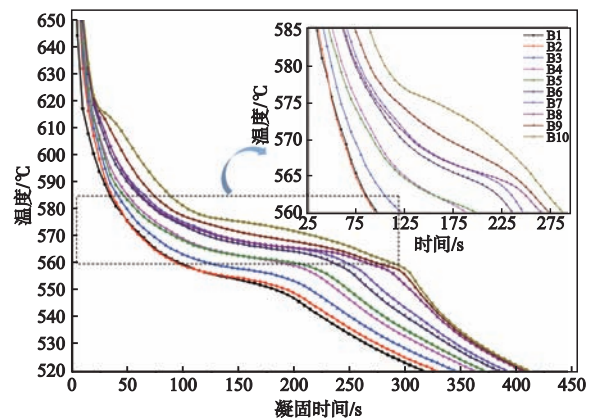


图10 铸件内部补缩顺序示意图

Fig. 10 Schematic diagram of internal feeding sequence of casting



(a) 第一补缩通道



(b) 第二补缩通道

图11 第一、第二补缩通道不同位置点温度变化曲线

Fig. 11 Temperature change curves of different positions on the first & second feeding channels

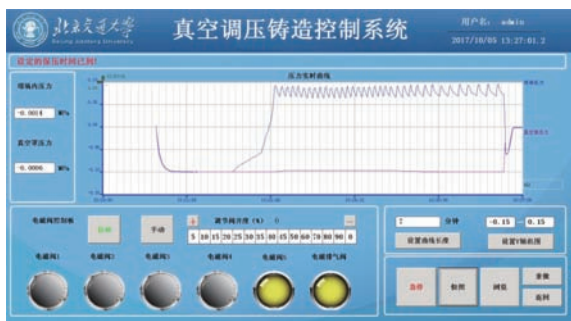


图12 制动盘成形工艺曲线

Fig. 12 Brake disc forming process curve



图13 制动盘铸件

Fig. 13 Brake disc casting

铸件经过粗加工之后,采用铸件X射线探伤仪进行探伤,探伤结果表明,制动盘内部无气孔、无缩孔缩松缺陷,质量完好。铸造结果与模拟计算结果相吻合。

3 结论

(1) 利用Solidworks三维设计软件完成了铸造工艺的建模,并采用Visual-environment软件完成了面

网格和体网格的划分,通过ProCAST进行铸造模拟分析,以铸造缩孔缩松为判据并验证了模拟的有效性。

(2) 基于虚拟制造过程中温度场和流场变化情况,完成了内部无缺陷的SiC_p/A356制动盘真空压成形工艺设计和铸造样件,X射线探伤结果表明,制动盘内部质量完好,模拟结果与实际相吻合。

参考文献:

- [1] 《国外高速列车译文集》编委会. 国外高速列车译文集(制动技术专集)[M]. 北京:铁道部科学研究院机辆所,1996.
- [2] 杨智勇. 高速客车铝基复合材料制动盘热损伤和结构设计研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [3] 韩建民. 高速列车SiC_p/A356制动盘制造关键技术及摩擦特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2004.
- [4] 沙镇嵩. 真空调压铸造技术研究与应用[D]. 北京:北京交通大学,2005.
- [5] YANG Zhiyong, HAN Jianmin, CUI Shihai, et al. Solidification simulation of a SiC_p/Al disk brake casting[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2006, 7(4): 363-366.
- [6] 李翎寅, 宋崇智. 基于冒口的250 km/h高铁制动盘铸造工艺研究[J]. 机械工程师, 2017(2): 44-45.
- [7] 朱丽丽. 低压铸造铝合金车轮主要缺陷分析与控制[D]. 秦皇岛:燕山大学,2015.
- [8] 尹延东, 徐洪德, 李殿中. 客车制动盘铸造工艺模拟与优化分析[J]. 铸造, 2000: 49(4): 219-222.
- [9] 柳百成, 荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [10] XIAO Feng, YANG Ren-hui, FANG Liang et al. solidification shrinkage of Ni-Cr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 132: 193-196.
- [11] YANG Jian-wei, DU Yan-ping, SHI Rong et al. Fluid flow and solidification simulation in beam blank continuous casting process with 3D coupled model[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2006, 13: 17-21.

Forming Simulation and Defection Forecast of Aluminum Alloy Brake Disc for Urban Express Rail Vehicles

WANG Chao-tao¹, YANG Zhi-yong², ZHANG Xiong-fei¹, ZHAO Hai-qin¹, HAN Jian-min²

(1. CRRC Qingdao Sifang Corporation Limited, Qingdao 266111, Shandong, China; 2. School of Mechanical, electronic and control engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract:

An important way to alleviate the urban traffic congestion is to develop urban rapid rail. When the train's speed is increased to 120 km/h or more, the traditional tread braking already cannot satisfy the requirement of train braking. Aimed at aluminum alloy brake disc used in 140~160km/h urban express rail vehicles, ProCAST, a kind of solidification simulation software, was used to simulate the vacuum adjustable pressure casting of the brake disc. Based on the simulation results of flow field, shrinkage porosity, solidification time and solid fraction, casting system and pouring process parameters were determined, by which some SiC_p/A356 brake discs with an internal good quality were fabricated.

Key words:

SiC_p/A356 brake disc; vacuum adjustable pressure casting; forming process; X-ray inspection; numerical simulation