DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.010

SiC_p/A356 制动盘铸造成形工艺设计和缺陷预测

赵海芹[1],杨智勇[2],张雄飞[1],王朝涛[1],韩建民[2]

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心，青岛 266111；2. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院，北京 100044)

摘　要:SiC_p/A356 复合材料制动盘具有轻质低噪长寿命等突出优点,在城市轨道列车基础制动系统中具有广阔的应用前景。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。本文利用 ProCAST 凝固模拟软件对制动盘的金属型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结果,确定了制动盘内部成形质量良好的浇注系统设计和浇注工艺参数,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;数值模拟

中图分类号: TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)07-0671-05

Casting Process Design and Defect Prediction of SiCp/A356 Brake Disc

ZHAO Haiqin[1], YANG Zhiyong[2], ZHANG Xiongfei[1], WANG Chaotao[1], HAN Jianmin[2]

(1. CRRC Qingdao Sifang Corporation Limited, Qingdao 266111, China; 2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: SiC_p/A356 composite brake discs have outstanding advantages such as light weight, low noise, long life, etc., and it has broad application prospects in the basic braking system of urban rail trains. However, the castability of SiC_p/A356 composites materials are poor, and pores, shrinkage porosity and crack defects are easily formed in the forming process. The metal mold vacuum pressure regulating forming process of the brake disc was simulated and analyzed by using ProCAST solidification simulation software. The results show that based on the results of flow field, shrinkage cavity and porosity, solidification time and solid phase ratio, the design of casting system and casting process parameters with good forming quality inside the brake disc are determined, and SiC_p/A356 brake disc with good internal quality is prepared.

Key words: SiC_p/A356 brake disc; vacuum adjustable pressure casting; forming process; numerical simulation

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。随着城市轨道列车运行速度的提高,原有的踏面制动会对车轮产生严重的热损伤，从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]。

金属型真空调压成形工艺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[4],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。

真空调压成形方法是一种典型的反重力铸造法,合金液在压力作用下自下而上充型,并在高压力作用下结晶凝固。与传统的差压铸造方法相比,该方法能实现液体金属在一定真空度下以较小的压差充型,提高型腔的排气能力,并减少充型过程液态金属的紊流和卷入气体，还可以实现金属液在较大的压力下结晶凝固,增强铸件的补缩效果,从而获得组织

收稿日期:2019-02-16

基金项目:国家科技支撑计划(2015BAG12B00)资助项目

作者简介:赵海芹(1980-),女,山东招远人,高级工程师.主要从事车辆、转向架设计方面的工作.
电话:13793299572,E-mail:zhaohaiqin@cqsf.com

通讯作者:杨智勇(1976-),河北保定人,博士,副教授,博导.研究方向:零件结构可靠性基因工程.
电话:13671049326,E-mail:Zhyyang@bjtu.edu.cn

致密均匀的高质量铸件[5]。该方法尤其适用于铝合金、镁合金等轻金属的成形。

铸件的充型和凝固是铸造工艺的关键过程，大部分铸造缺陷均产生在这一过程或与之密切相关。在研制新铸件和改进工艺时，利用计算机辅助设计和模拟分析一体化技术，实现模拟浇注和质量预测。杨智勇等[6]采用铸造仿真软件 ProCAST 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。李铷寅等[7] 采用 ProCAST 软件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[8]基于 UG NX 建模软件和 ProCAST 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；尹延东等[9]采用 ProCAST 软件模拟了新旧浇注系统下蠕墨铸铁制动盘在充型、凝固过程中的金属流动及温度分布，模拟结果与实际相吻合。实践表明，采用计算机模拟技术可以缩短产品试制周期 40%，降低生产成本 30%，提高材料利用率 25%[10]，这符合面向 21 世纪的铸造成形加工过程的高质量、短周期及低成本的需要。

鉴于此，本文利用 Visual-Environment 和 ProCAST 软件分析研究了 SiC_p/A356 制动盘的金属型真空调压成形工艺，并基于模拟结果，完成了内部无缺陷的 SiC_p/A356 制动盘金属型真空调压成形工艺设计和产品样件。

1 SiCp/A356 制动盘的数值模拟过程

制动盘是基础制动系统的重要部件，采用颗粒增强铝基复合材料铸造成形能够大幅降低生产成本。考虑到制动盘的成形质量要求较高，其成形采用金属型模具辅以砂芯的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。

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 软件中进行上模具、下模具、铸件、砂芯 1、砂芯 2、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。

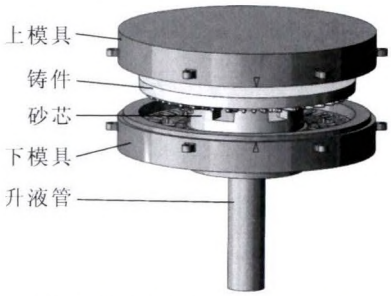

图 1 制动盘的铸造工艺示意图
Fig.1 Schematic diagram of brake disc casting process

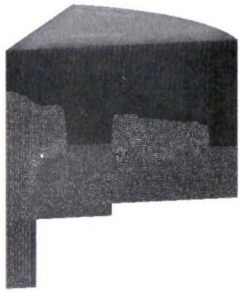

图 2 装配后的网格模型
Fig.2 Mesh model after assembly

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 645 751 个节点，3 055 587 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[11,12]。制动盘的材料为 20% wt SiC_p/A356 复合材料。模拟所需要的参数一般包括导热系数、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 ℃，其它热物参数如图 3 所示。

造型用砂为石英砂，密度为 1.52 g/cm^3，其它热物参数见表 1。

表1 砂的热物参数
Tab.1 Thermal parameters of resin sand

温度 / K	导热系数 / W·m^{-1}·K^{-1}	比热 / kJ·kg^{-1}·K^{-1}
298	0.733	0.676
473	0.640	0.910
673	0.586	0.997
873	0.590	1.104
1 073	0.640	1.112
1 276	0.703	1.230

制动盘金属型低压铸造的工艺参数主要包括模具、吸管和砂芯的预热温度、浇注温度、充型速度(通过压力调控)。模拟中金属型上、下模的预热温度设定为 200 ℃，覆膜砂砂芯 1、砂芯 2 的预热温度均设置为 100 ℃，金属吸管的预热温度设置为 600 ℃，铝合金浇注温度 690 ℃，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。

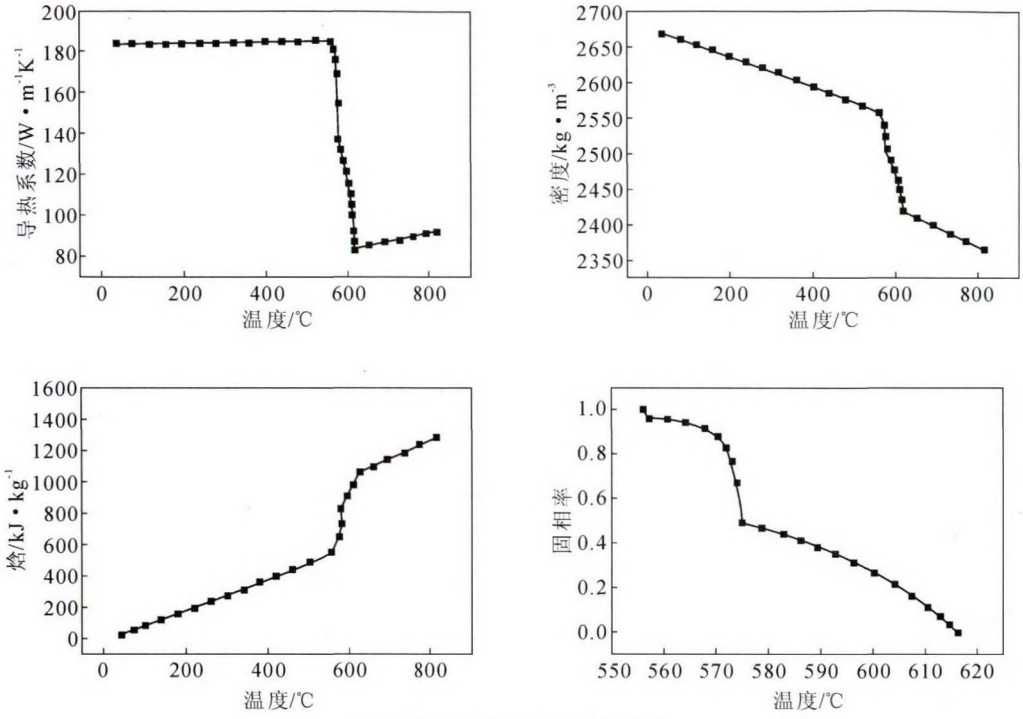

图 3 模拟计算使用的热物参数

Fig.3 Thermal parameters used in simulation calculations

1.2 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 4 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口的合金液先于靠近内浇口的合金液凝固，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，常用等固相线法判断缩孔缺陷的发生区域[11]。图 5 所示为等固相线法获得的凝固时间云图。由图 5 可知，制动盘铸件内部越靠近内浇口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。

为了更加清楚的反映温度的变化，对制动盘沿补缩通道进行取点，见图 6。考虑制动盘铸件的结构特点，选取图 6 中的两条补缩通道进行分析。

图 7 是第一条补缩通道上不同点的凝固冷却曲

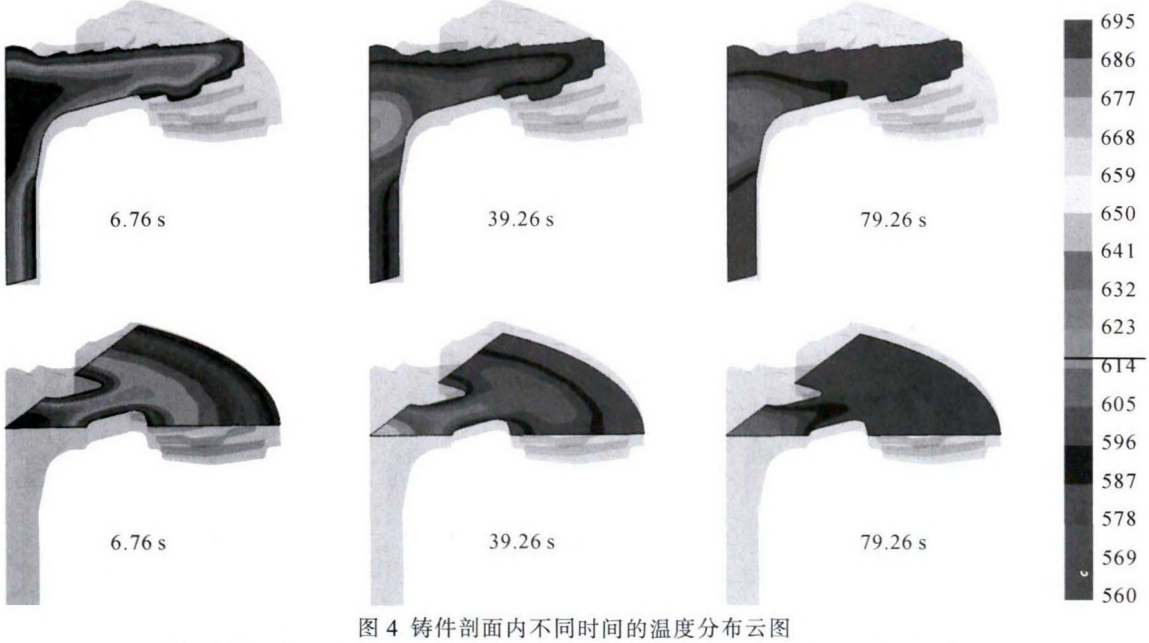

图 4 铸件剖面内不同时间的温度分布云图

Fig.4 Cloud maps of temperature distribution at different times in the casting section

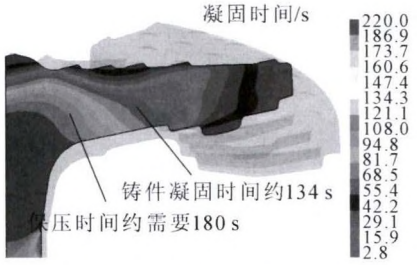

图 5 铸件内部凝固时间分布云图
Fig.5 Nephogram of solidification time distribution inside casting

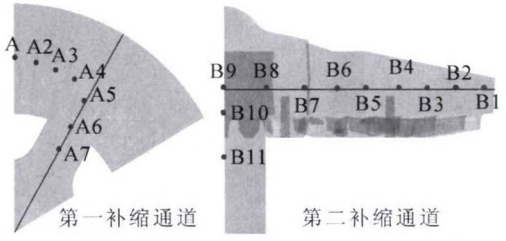

图 6 铸件内部补缩顺序示意图
Fig.6 Schematic diagram of the sequence of complementary shrinkage inside the casting

线。从曲线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 个点的凝固先后顺序为：A1→A2→A3→A4→A5→A6→A7，表明第一条补缩通道具有良好的顺序凝固特征。

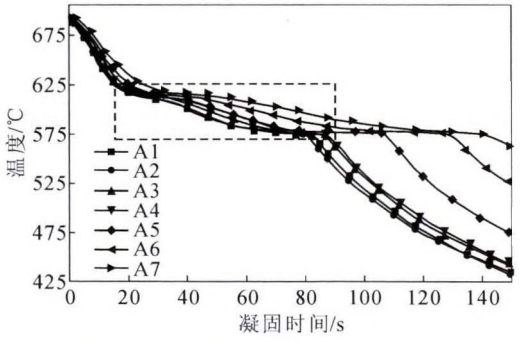

图 7 第一补缩通道不同位置点温度变化曲线
Fig.7 Temperature change curve of different positions on the first feeding channel

图 8 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 11 个点的凝固先后顺序为：B1→B2→B3→B4→B5→B6→B7→B8→B9→B10→B11，表明第二条补缩通道也具有良好的顺序凝固特征。

基于模拟结果可知，文中的制动盘金属型低压铸造成形工艺方案的充型过程平稳，能够实现铸件的顺序凝固和良好补缩，可得到无缩孔和缩松的高质量制动盘铸件。

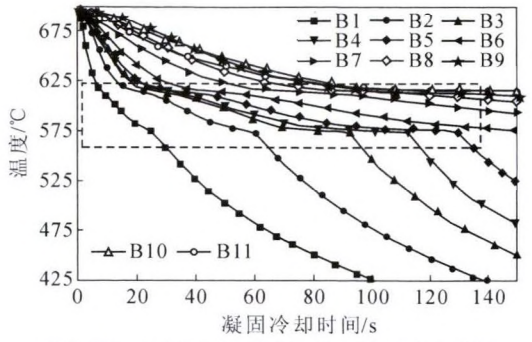

图 8 第二补缩通道不同位置点温度变化曲线
Fig.8 Temperature change curve of different positions on the second feeding channel

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，铸件如图 9 所示。

图 9 制动盘铸件
Fig.9 Brake disc casting

铸件经过粗加工之后，采用铸件 X 射线探伤仪分 12 个扇区进行探伤，部分探伤结果如图 10 所示。由图可知，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。

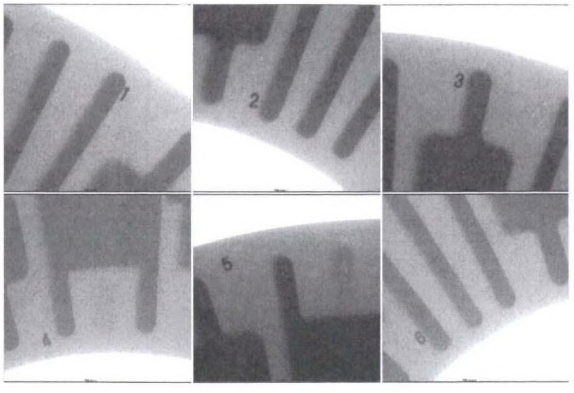

图 10 制动盘 X 射线探伤结果
Fig.10 X-ray inspection results of brake disc

3 结论

利用 Solidworks 三维设计软件完成了

(下转第 678 页)

区域已可见“隔断式”的温度变化。

(2)对典型衬板铸件流场的数值模拟中，在 20 kg/s 的充型速度下，衬板铸件中充型的金属液保持了规则的层状流动，在 30 kg/s 的充型速度下，衬板铸件中充型的金属液已有了湍流的特征。所以，选取 20 kg/s 的充型速度是比较合理的。

参考文献：

[1] 郭亚非，李洁，庞庆海，等. 立式磨机用高铬铸铁螺旋衬板热处理工艺研究[J]. 大型铸锻件，2019(1): 34-37，45.

[2] 李占长，黄雨，付向上，等. 大型半自磨机衬板的选材与制备[J]. 铸造技术, 2019, 40(2):143-146.

[3] 谢卓宏，张岁庚. 半自磨机及球磨机衬板结构的改进[J].有色金属(选矿部分), 2019(1):73-77.

[4] Rezaeizadeh M, Fooladi M S, Powell S H, et al. A new predictive model of lifter bar wear in mills[J]. Minerals Engineering, 2010,23 (15): 1159-1244.

[5] Djordjevic N. Discrete element modelling of the influence of lifters on power draw of tumbling mills [J]. Minerals engineering, 2003, 16 (4) :331-336.

[6] Nenad Djordjevic. Influence of charge size distribution on net-power draw of tumbling mill based on DEM modelling [J]. Minerals Engineering, 2004,18(3).

[7] 孙敏. 金属液的充型速度对提高铸件质量影响的几则实例[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2010, 20(S1):49-50，53.

[8] Bazhenov V E, Koltygin A V, Fadeev A V. The use of the ProCast software to simulate the process of investment casting of alloy based on titanium aluminide TNM-B1 into ceramic molds[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals，2013(6)：551-555.

[9] 刘晋，彭必友，包有宇，等. 铸造模拟关键热参数的反求优化及应用研究[J]. 热加工工艺，2019，48(5):131-135，140.

(上接第 674 页)

SiC_p/A356 制动盘铸造工艺的建模，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，基于虚拟制造过程中温度场和流场变化情况，以铸造缩孔缩松为判据，完成了内部无缺陷的 SiC_p/A356 制动盘金属型真空调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 SiCp/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] Manfred K. Walther. Solidification analysis using CAST [J]. Modern Casting, 1984, 3:8-14.

[5] 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.

[6] Zhiyong Yang, Jianmin Han, Shihai Cui, et al. Solidification simulation of a SiCp/Al disk brake casting [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2006, 7(4): 363-366.

[7] 李铷寅，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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Xiao Feng, Yang Renhui, Fang Liang, et al. Solidification shrinkage of Ni-Cr alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2006,132:193-196.

[12] Yang Jianwei, Du Yanping, 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.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628