DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.008

基于 Pro-CAST 的底座铸件缺陷分析及铸造工艺优化

韩　宝,贾枝树,张挨元,林　涛,李卫国
(内蒙古第一机械集团股份有限公司 第一分公司,内蒙古 包头 014030)

摘　要:对车长门底座特种钢铸件采用发热冒口进行补缩,分析了冒口下部缩孔缺陷产生的原因。结合 Pro-CAST 仿真模拟技术,优化了冒口工艺方案,并通过冒口对比、密实度解剖、加工、射线检测、超声探伤等验证了工艺方案的合理性。结果表明,解决了车长门底座在酯硬化水玻璃生产的铸造缩孔问题,实现了冒口充分补缩。

关键词:砂型铸造;ProCAST 模拟;工艺优化;缩孔;铸钢件生产

中图分类号: TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)01-0029-05

Defect Analysis and Casting Process Optimization of Pedestal Casting Based on Pro-CAST

HAN Bao, JIA Zhishu, ZHANG Aiyuan, LIN Tao, LI Weiguo
(The first Branch of Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014030, China)

Abstract: The causes of shrinkage defect in the lower part of the riser were analyzed. Combined with Pro-CAST simulation technology, the riser process plan was optimized, and the rationality of the process plan was verified by riser comparison, density dissection, machining, radiographic detection, ultrasonic flaw detection, etc. The results show that the foundry shrinkage problem of the base of the long door in the production of ester hardened sodium silicate is solved and the riser shrinkage is fully realized.

Key words: casting; ProCAST simulation; process optimization; shrinkage cavity

车长门底座是某车型的关键零部件,是关乎人们生命安全的保安铸件,其铸件材料和铸造质量要求高,内部探伤等级按 ASTM-E466 标准执行,铸造要求按 WJ1629-2005《装甲车辆用装甲铸钢件规范》标准执行。由于造型生产工艺改为酯硬化水玻璃砂造型,导致原工艺不能保证铸件内部质量,因此,工艺制定了相应的试验要求,为保证内部密实度,冒口进行了改进,并通过探伤工序对铸件进行内部质量检测。

1　产品结构特点

车长门底座是某车型的重要零部件,最大外形尺寸为 1 273 mm×1 202 mm×210 mm,铸件三维如图 1,该零件属于曲面薄壁类产品,主要壁厚为 30 mm,铸件重 333 kg,中间设计两法兰,周边为带角度的薄板结构,而且薄板边缘无裙边,产品具有尺寸大,结构复杂、易变形等特点。

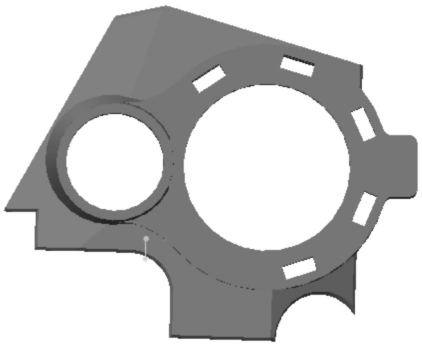


图 1　铸件三维图
Fig.1　The three-dimension diagram of casting

2　原工艺方案特点及缩孔缺陷分析

车长门底座属于薄壁曲面铸件,且形状极不规则,铸造工艺性差,由于工装限制,工艺选择性差,增加了铸造难度,不能采取常规的上下平面型分型法,工艺图如图 2,图中两条粗线为上下模分型线,根据产品曲面走向分型,采用曲面分型法,模具设计成专用工装,采用开放式浇注系统,工艺三维模型如图 3,设计一个直浇道,5 个内浇道,内浇道分流引入,有利于铸件浇注平稳,且避免局部过热,为确保浇注

收稿日期:2020-09-26
作者简介:韩　宝(1987-),内蒙古乌兰察布人,硕士,工程师.主要从事铸造工艺技术及铸造新材料、新方法、新工艺研究方面的工作.电话:18647232782,
E-mail: hbxc2018@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

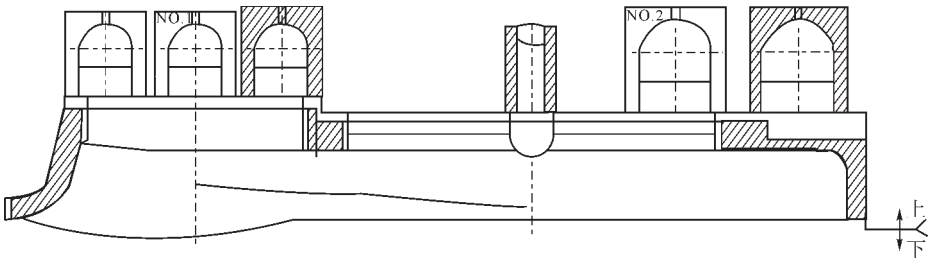


图 2 铸造工艺简图
Fig.2 Casting process diagram

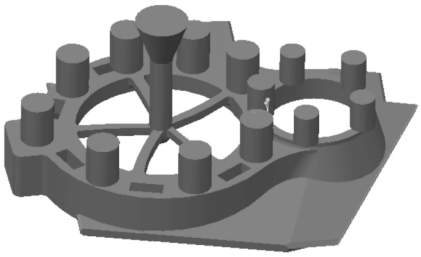


图 3 工艺三维模型
Fig.3 The three-dimension diagram of Process

质量，在车长门底座分型面上箱小法兰端面放置 4 个普通保温冒口套，大法兰放置 7 个普通保温冒口套，利于铸件补缩，防止砂眼缺陷产生。冶炼选用 20 t 偏心底电弧炉和 25 t LF 精炼炉，原造型采用水玻璃造型生产线生产，吹二氧化碳硬化。浇注温度为 1 560~1 575 ℃，浇注速度为 25~35 s，铸件化学成分见表 1。

铸造缩孔缺陷集中在大法兰冒口下方，缺陷位置如图 4，法兰内外直径差即截面有效尺寸为 87 mm，大法兰截面高度 49 mm，首先对原冒口的工艺保证能力进行了计算，过程如下[1]。

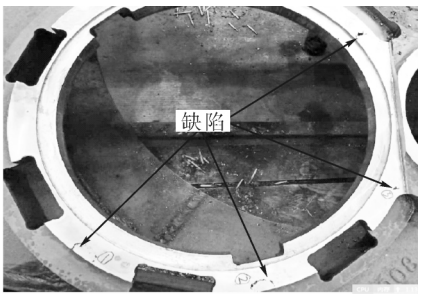


图 4 产品缺陷位置示意图
Fig.4 Schematic diagram of product defect location

环形体或空心圆柱体

模数计算：$M=a\times b/2(a+b)=1.5$

式中，a 圆柱的直径 87；b 圆柱高度 49。

根据冒口长宽与模数比例关系可确定冒口尺寸为：h=90、d=90

常用冒口为 $h=(1.15\sim1.80)d$

冒口中心圆半径为 372 mm，冒口圆周长为 2 336 mm，冒口补缩距离为：$L=4\sim4.5T=196\sim220$ mm（T 为铸件壁厚），理论计算冒口个数为：2 336/2×220～2 336/2×196=5～6(个)

现冒口尺寸为：h=100 mm、d=130 mm，冒口数量为 7，冒口设置符合要求。

现在造型采用酯硬化水玻璃造型生产线，造型工艺流程为混砂、振实、烘干、脱模、下芯、合箱、浇注，砂型退让性较原水玻璃砂型差，铸件产生缩孔缺陷，冒口下产生缩孔，主要是由于冒口根部凝固快于铸件本体，堵塞了冒口到热节的补缩通道，使冒口中的金属液不能对热节凝固时发生的体积亏损进行补缩，于是在冒口下方产生了缩孔[2]，所以，认为原工艺不能保证新生产线产品质量。

3 铸造工艺方案优化及数值模拟

车长门底座零件其结构属于曲面薄壁片状零件，依据车长门底座零件的材料特点以及前期生产过程中的缩孔情况等，在平衡经济成本与质量的同时，为了加大冒口补缩能力，制定了改善缩孔缺陷的方案，具体方案见表 2，两种方案中都对浇道宽度进行增大，与铸件相接处加大圆角 R。

(1)工艺参数设置　使用三维建模软件 Creo2.0 对铸件工艺方案二进行建模，采用 ProCAST 软件对其进行工艺模拟[3-5]，通过对零件铸造工艺模型进行网格划分，如图 5，网格尺寸为 15 mm，体网格数量为 255 749。

(2)模拟及结果分析　铸件从浇注到冷却结束经历金属液充型、金属液凝固两个阶段。铸件材料

表 1 铸件的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of casting

钢种	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Mo
特种钢	0.26~0.33	0.20~0.50	1.40~1.80	≤0.020	≤0.015	1.00~1.30	0.40~0.60	0.30~0.45

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 工艺改进方案
Tab.2 Process improvement plan

调整方案	冒口设置		
	小法兰	小法兰与大法兰连接处	大法兰
方案一	4 个 8/11K 发热冒口	无	7 个 10/13K 发热冒口
方案二	4 个 9/12K 发热冒口	1 个 10/13K 发热冒口	8 个 12/15K 发热冒口

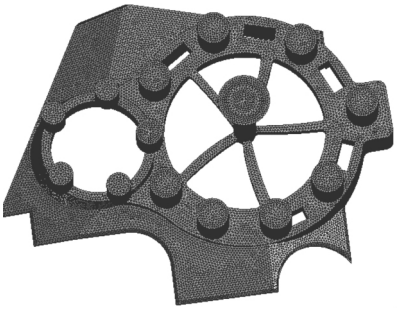


图 5 工艺模型网格划分
Fig.5 Grid division of process model

为特种钢，铸型材料为石英砂。利用 Visual-Cast 前处理模块对有限元模型进行材料性能、边界条件、初始条件等参数设置，如表 3。

图 6 是模拟结果，图 6(a)车长门底座铸件壁厚较薄、热节分散，采用砂型重力浇注，浇注温度较高、时间短，在型腔全部充满时铸件温度仍然处于合金液相线以上，无浇不足现象。浇注系统采用开放式浇注，铸件区域充填平稳，无紊流现象，且充型过程平稳，说明浇注系统设计分布合理。图 6(b)温度场显示铸件高温区域都集中在冒口边缘，冷却过程实现了顺序凝固，铸件随时间开始凝固，固相率

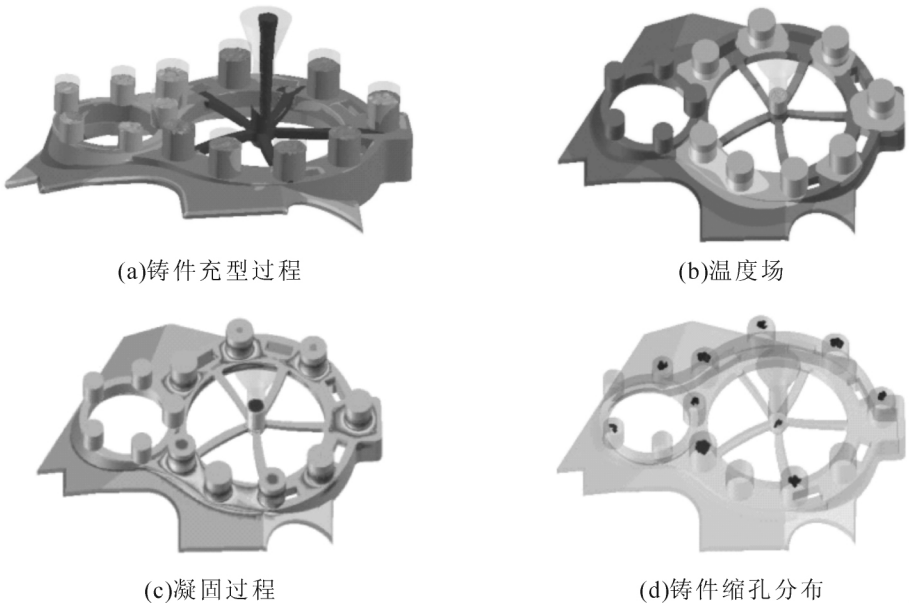
表3 参数设置
Tab.3 Parameter settings

参数名称	实际参数设置
材料	铸件：铸造特种钢 铸型：石英砂
界面换热系数	h=900 W/(m^2·K)
边界条件	浇注速度：9 kg/s 冷却方式：空冷
初始条件	浇注温度：1 570 ℃ 铸型初始温度：25 ℃
浇注方式	砂型重力浇注
重力方向	-Z 方向
运算时间	充型流动：35 s
停止条件	1 000 ℃

达到 80%的区域会在动画中消失，铸件整体呈现顺序凝固原则，图 6(c)显示铸件冒口边缘凝固率最低，固相率显示铸件凝固时没有孤立液相区，保证铸件上各部分能按照远离冒口部分先凝固，然后冒口部分最后凝固。图 6(d)缩孔分布显示没有产生铸造缺陷，铸造缺陷全部留至冒口和浇道中，说明冒口方案二选择合理，方案一与方案二模拟效果相近，此处只给出方案二的模拟结果，具体方案选择需进行后期生产进一步验证。

4 生产验证及缺陷检测

采用表 1 工艺方案，在造型车间对冒口在车长门底座上进行对比试验，其中 3 件采用方案一，5 件采用方案二，并对两种方案生产的冒口进行了解剖。图 7 为两种冒口剖面和整体俯视对比图。由图 7(a)看出，两种方案冒口收缩部位均远离冒口与铸件

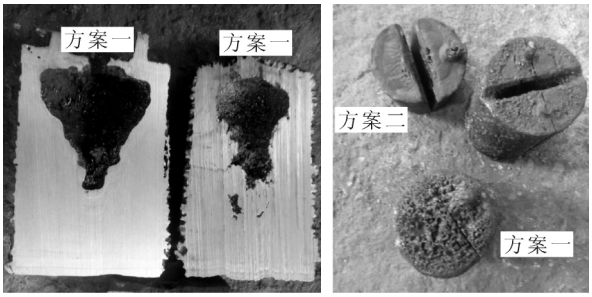


(a)铸件充型过程　(b)温度场

(c)凝固过程　(d)铸件缩孔分布

图 6 模拟结果图
Fig.6 Simulation results

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)冒口剖面　　(b)整体俯视图

图 7 两种冒口对比图

Fig.7 Comparison of two kinds of risers

本体结合处，说明冒口补缩能力都满足设计要求，但从收缩剖面可以看出，方案一冒口的收缩锥度比方案二的质量差，且离铸件本体较近，由图 7(b)可以看出，冒口整体凝固，方案二使用冒口比方案一致密，即方案二的冒口密实度、补缩高度以及锥度壁厚效果都都优于方案一。

对方案二铸件冒口对应位置进行密实度解剖，如图 8 所示，结果显示密实度合格，内部组织致密，无缺陷。

对机加完的车长门底座进行射线探伤，确定加工完内部缺陷的类型及等级，将两种方案的产品大法兰冒口区域进行射线探伤，设备型号为HS-XY-320，按冒口数量分区，方案一 7 个区域，方案二 8 个区域，方案二探伤 5 件，方案一探伤 3 件，表 4 是射线探伤统计表，表中底片编号即为冒口编号，探伤结果显示：两种方案均未发现缩孔缩松类缺陷，只存在夹杂类缺陷，对标内部探伤等级 ASTM-E466，方案二所有探伤结果无大于III级的缺陷，方案一中存在大于III级的缺陷，图 9 为探伤 II 级缺陷图。

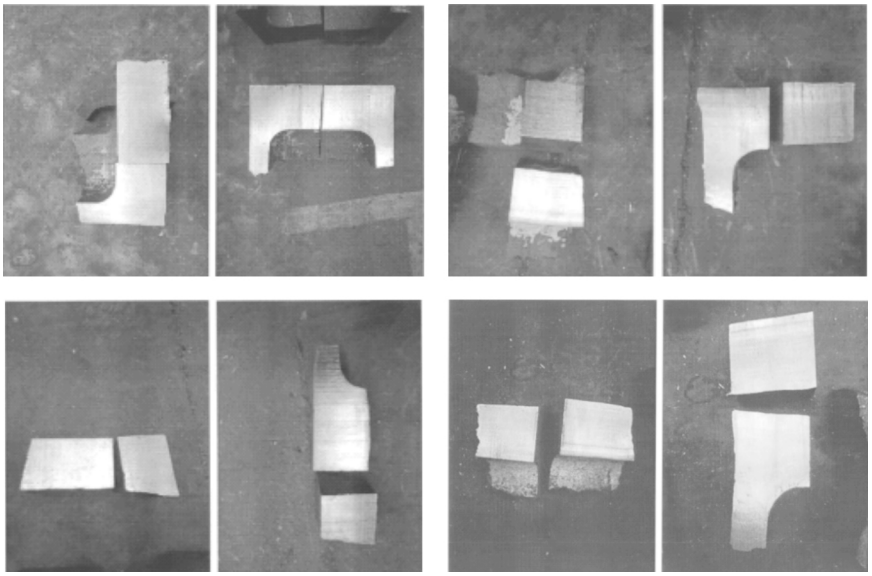


图 8 解剖冒口以检查密实度

Fig.8 Sectioned risers to examine compactness

表 4 射线探伤统计表

Tab.4 Statistical table of radiographic inspection

方案	铸造号	检测结果				
		底片编号	像质指数	底片黑度	缺陷情况	评定结果
方案二	19-052	1-8	W7	2.0~3.5	/	1
	19-071	1、8	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	2、3
		2-7	W7	2.0~3.5	/	1
	19-055	1-3	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	2
		4-8	W7	2.0~3.5	/	1
	19-032	3	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	2
		1、2、4-8	W7	2.0~3.5	/	1
	19-047	1、6	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	1、2
		2-5、7、8	W7	2.0~3.5	/	1
方案一	19-046	1、2、5、7	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	4、2、3、4
		3、4、6	W7	2.0~3.5	/	1
	19-056	1、2、4、5、7	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	2、2、2、4、5
		3、6	W7	2.0~3.5	/	1
	19-054	1、4、6、7	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	2、3、3、4
		2、3、5	W7	2.0~3.5	B 类夹杂物	1、1、1

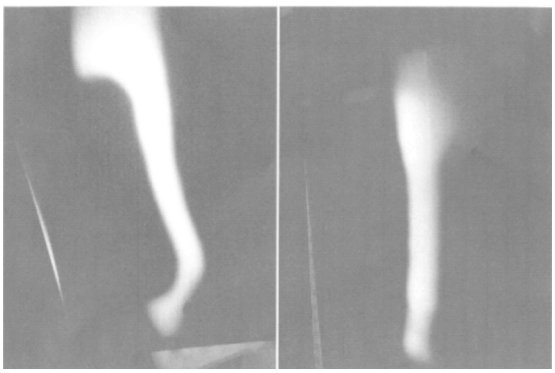


图 9 射线探伤 II 级缺陷图

Fig.9 Level II defect diagram of radiographic inspection

为进一步确定射线探伤缺陷的深度及面积，采

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用数字超探仪 BLC-201L，双晶纵波 A 型脉冲反射法，以 4 mm×ϕ3 mm 平底孔试块回波高度 80%制作距离波幅曲线，增益 62dB，进行超声探伤。表 5 为超声探伤统计表，对方案二大于 II 级缺陷的区域进行超声探伤，超探结果显示：方案二无缺陷波显示，超声级别均为 I 级，射线超过 II、III级夹杂类缺陷，超声显示无法探出此类缺陷，此类缺陷为铸造无法避免缺陷，根据方案二的超探结果，只对方案一中超过 III级的缺陷进行超探，由表 5 可知，超过III级的缺陷可以超探出缺陷深度及大小，超声级别为 II 级，且缺陷直径超过 ϕ3 当量，深度位置位于加工面。

表5 射线探伤统计表

Tab.5 Statistical table of radiographic inspection

方案	铸造号	冒口编号	缺陷深度 /mm	缺陷面积 /mm²	超声级别
方案二	19-071	1、8	无缺陷波	-	1 级
	19-055	1、3	无缺陷波无缺	-	1 级
	19-032	3	陷波	-	1 级
	19-047	6	无缺陷波	-	1 级
方案一	19-046	1	7.5		1 级
	19-056	7	无缺陷波		1 级
		5	无缺陷波		1 级
	19-054	7	14.8	4×3	II 级
		7	17.6	3×3	I 级

综上所述，工艺优化后生产的车长门底座，通过对两种方案冒口对比试验，可以看出两种冒口都可以满足补缩。但通过过解剖、加工、射线探伤、超声探伤进一步检查，最后经过综合考虑，工艺改进方案二能够保证铸件质量，可以确保产品的可靠性。

5　结语

车长门底座内部质量要求高，原工艺保证不了酯硬化水玻璃砂生产铸件的内部质量要求，通过分析冒口下部缩孔缺陷产生的原因，优化了工艺方案，利用 Pro-CAST 仿真模拟技术模拟工艺方案的可行性，并通过冒口对比、密实度解剖、加工、射线探伤、超声探伤验证了工艺方案的合理性，最后经过综合考虑，工艺改进方案二能够保证铸件质量，可以确保产品的可靠性，解决了车长门底座在酯硬化水玻璃生产的铸造缩孔问题。

参考文献：

[1] 丁根宝. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，1989.

[2] 张华，魏兵，袁森.铸铁件补缩特性的实验研究[J]. 铸造技术，1993, 24(1):44-47.

[3] 金永锡.汽车球铁件冒口补缩设计方法及其评价(1)[J]，现代铸铁，2010(1):15-25.

[4] 周挤，范金辉，吴兴远，等.汽车制动钳体冒口颈缩孔工艺改进[J].铸造技术，2016,32(9)：2014-2016.

[5] 任英磊，冯沛晨，张伟，等. 板类件冒口优化设计的模拟研究[J]. 铸造，2017，66(1):50-54.

2021 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979 年创刊，中国铸造协会会刊，被 20 余家数据库收录。中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期，每期定价 25 元，平寄全年 300 元（含邮费），挂号全年 336 元，快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

邮购地址：陕西省西安市金花南路 5 号 西安理工大学 608 信箱

联系人：李巧凤　029-83222071　电话/传真：13991824906　网址：www.zhuzaojishu.net　E-mail：zzjs@263.net.cn

银行汇款：户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net