DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.010

基于 CAE 分析的高锰钢履带板铸造工艺优化设计及生产实践

方德权[1],林　波[2],傅伟宇[1]
(1.浙江华晟金属制品有限公司,浙江 武义 321200;2.浙江机电职业技术学院,浙江 杭州 310053)

摘　要:根据履带板铸件的结构特点,进行铸造工艺设计与优化。利用 NX 软件对履带板进行实体造型,并应用芸峰 CAE 软件模拟铸件的充型及凝固过程。结果表明,初始的单浇口-单冒口方案中金属液的充型方式容易使履带板的两端边缘形成卷气和夹渣缺陷。同时,由于单冒口的补缩作用不足容易使履带板的缺陷聚集于内部。通过增加内浇道的数量、改进补缩措施,使得充型过程更加均匀、稳定,凝固过程更加有序,有效控制了铸件缺陷。采用优化后铸造工艺生产履带板,减少了履带板铸件的气孔和夹渣缺陷,同时验证了模拟结果的正确性。

关键词:履带板;铸造工艺;CAE 模拟;优化设计

中图分类号:TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0799-05

Optimization Design of Casting Process for Track Shoe based on CAE Analysis

FANG Dequan[1], LIN Bo[2], FU Weiyu[1]
(1. Zhejiang Huasheng Metal Products Co., Ltd., Wuyi 321200, China; 2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: According to the structural characteristics of crawler plate casting, the casting process design and optimization were carried out. NX software parts shall be used to conduct solid molding of the strap plate, and the filling and solidification process of the casting shall be simulated by Yunfeng CAE software. The results show that the filling mode of metal liquid in the initial single spout and single riser scheme is easy to cause the air entrapment and slag inclusion defects at both ends of the track plate. At the same time, due to the insufficient shrinkage of single riser, the defect of the strap plate is easily gathered in the inner part. By increasing the number of inner runner and improving feeding measures, the filling process is more uniform and stable, the solidification process is more orderly, and the casting defect is effectively controlled. The optimized casting process is used to produce crawler plate, which reduced the porosity and slag inclusion defects of crawler plate casting, and verified the correctness of the simulation results.

Key words: track shoe; casting process; CAE simulation; optimization design

随着我国经济的不断增长,铸造行业已成为推动我国经济发展的重要产业,铸件广泛应用于航空航天、石化、汽车制造、造船、电力等各个领域[1-3]。铸造 CAE 软件极大地方便了各种工艺、模型的验证,为实际生产制造以及工艺改进提供了极具参考价值的信息,节省了大量的时间、精力和金钱。国内外铸造企业、汽车行业普遍采用 CAE 方法,取得了很好的效果[4,5]。

本文针对履带板的结构特点,设计了单浇口的铸造工艺方案,利用芸峰 CAE 进行了数值模拟验证,经过分析模拟的结果确定了优化工艺方案,进行工艺改进,得到合格铸件,缩短了开发周期,降低了制作成本。

1　零件结构特点及分析

履带板零件的材料为高锰钢,锰的含量不少于 11%,是一种常用的耐磨合金钢,广泛应用于采石、采矿、挖掘、煤炭工业、铸造和钢铁行业等。经耐磨技术处理后,材料表面可达到 500~550 布氏硬度,并且可以继续保持内部柔韧度[6-10]。履带板铸件是工程机械的底盘件之一,常用在挖掘机、推土机、履带起重机、摊铺机等工程机械中,其表面质量、尺寸精度和内部质量要求都较严格[11-13]。高锰钢的线收缩值(2.4%～3.0%)比碳素钢大得多,导热系数较低,为碳素钢的 1/4～1/6,铸件在凝固过程中由于壁厚差引起的温差较大而容易产生大的热应力,导致裂纹的产生[14,15],生产过程中还易出现粘砂、缩孔、缩松

收稿日期:2019-07-10
作者简介:方德权(1976-),浙江武义人,高工.主要从事提高高锰钢的综合性能以及根据不同物料、工矿条件来量身定做高锰钢产品方面的工作.

等铸造缺陷[16],因此科学合理的铸造工艺是制造质量合格的复杂高锰钢铸件的关键。

履带板的轮廓尺寸为 1 500 mm×780 mm×450 mm,体积 188 774 306,在 1 080 kg,铸件实体模型如图 1 所示。可以看出铸件结构较为复杂,铸件在长方向为左右对称实体，主体由 5 个销孔构成，多个铸件经履带销连接成为完整的履带。正常工作时,履带销在销孔中向后慢慢转动,两者磨损均匀,销孔逐渐变大,销子逐渐变细。如果操作不当,如高速转弯,猛起步,或进入泥水、杂草等使销子塞死,都会造成履带板左右两侧受压过重往下弯垂,销子变形弯曲,在销孔内不能转动,销与销孔变为滑动摩擦,销孔加大又引起履带节距加长(节距即履带板两端孔的中心距)，于是履带板与驱动轮互相啃磨，履带板被磨穿。所以铸件的重要加工面主要为 5个销孔,设计铸造工艺时需加以注意。对铸件壁厚进行分析，如图 2 所示，铸件最大壁厚为 115 mm,最小为 10 mm 左右,相差悬殊。

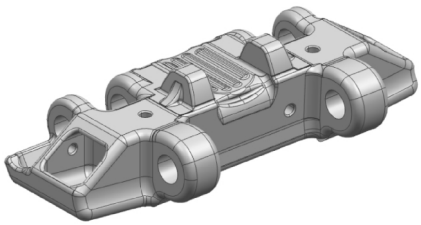


图 1 铸件实体模型
Fig.1 Solid casting model

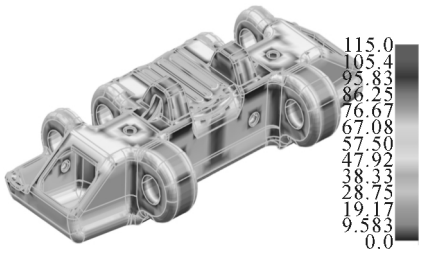


图 2 履带板零件壁厚分析
Fig.2 Wall thickness analysis of crawler plate parts

2 原始方案设计

2.1 设计分析

履带板结构较为复杂，铸件上下结构不对称，为了保证铸件的重要加工面的质量,将铸件的重要加工面向下放置，采用顶注式的浇注系统进行浇注。分型面设置于铸件的水平最大截面处,模具简单,出模方便,有利于浇注系统和溢流系统的布置。同时,为了调整金属液的冷却过程,设计 1 个明冒口,对铸件进行补缩。

按设计手册,计算得到浇注系统各部分的尺寸：$A_{直}$ = 6 480 mm^2,$A_{横}$ =3 380 mm^2,$A_{内}$ = 2 625 mm^2(其中 $A_{直}$代表直浇道截面积,$A_{横}$代表横浇道截面积,$A_{内}$代表内浇道截面积)。

浇注方案中铸件的大平板面在上，宜采用明顶冒口。因为明顶冒口造型方便,而且能观察到金属液的充型情况,便于向冒口中补浇金属液,对砂箱高度无特殊要求,利于提高批量生产的效率。考虑到铸件热节的分布,设计了 1 个明冒口,提高补缩效率。按设计手册,使用的冒口尺寸为 ϕ252 mm,高度为 310 mm。原始工艺方案见图 3。

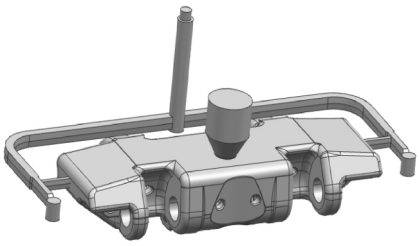


图 3 原始工艺方案
Fig.3 Original process plan

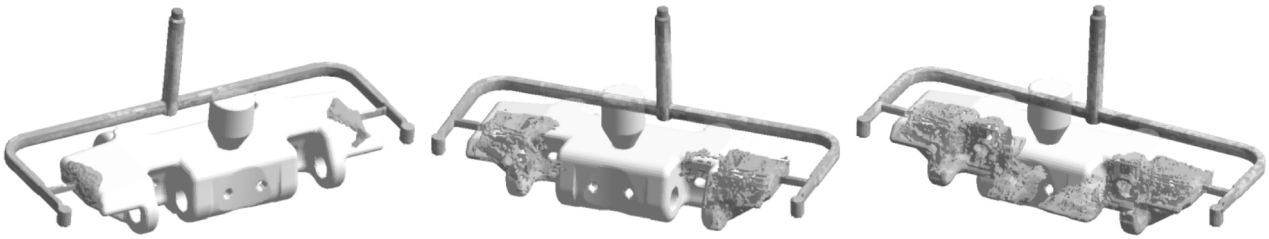
2.2 模拟分析

利用芸峰 CAE 模拟软件对上述设计的履带板铸造工艺方案进行充型模拟，验证上述方案的合理性,模拟结果见图 4。

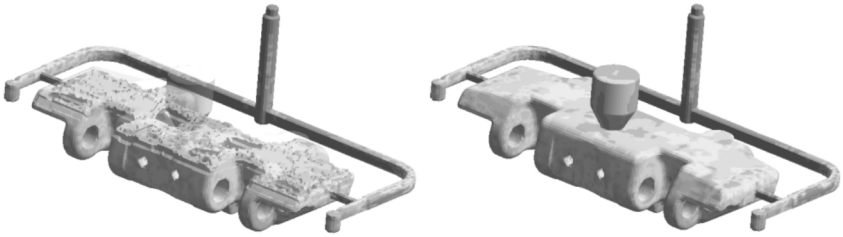
由图 4(a)可以看出,当充型时间 t=5.16 s 时,金属液从浇口进入直浇道，经横浇道再分入左右两条内浇道，开始填充靠近浇注系统的一部分型腔;当 t=9.89 s 时金属液逐渐进入型腔,在远离浇注系统内浇口的一侧有部分金属液,由于铸件结构的不均匀,在充型过程产生了大量紊流，部分气体和夹渣物聚集在铸件中,无法排到冒口,见图 4(b);当 t=13.56 s 时金属液由型腔两端开始汇聚,汇聚前沿流速较高,附近由于铸件结构和流速的不均匀产生了一定的紊流,易产生缺陷,见图 4(c);当 t=39.45 s 时金属液稳定流动,液面缓慢上升,充型平稳,见图 4(d);当 t=95.45 s 时铸件充型结束,铸件基本充填完毕,见图4(e)。

利用芸峰 CAE 模拟软件对上述设计的履带板铸造工艺方案进行了凝固模拟,模拟结果见图 5。

由图 5(a)可以看出,当凝固时间 t=12.18 s 时,金属液开始凝固；当 t=30.31 s 时金属液持续凝固,此时冒口发挥着一定的补缩作用,见图 5(b);当 t=85.67 s时金属液凝固到一定程度,冒口完全凝固,丧失了补缩作用,见图 5(c);当 t=285.15 s 时金属液大部分已经凝固,剩余部分最终凝固于铸件内部,容易产生缺陷,见图 5(d)。



(a)5.16 s开始充型　(b)9.89 s有渣气进入　(c)13.56 s紊流充型

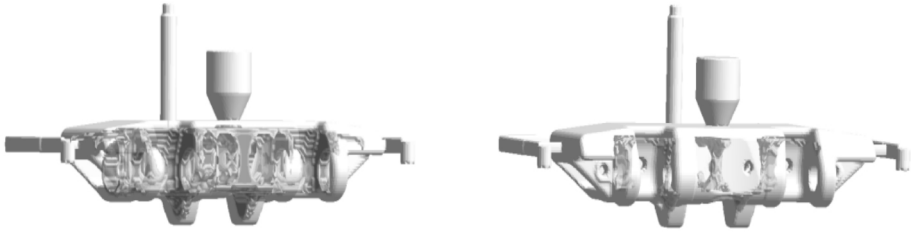


(d)39.45 s充型平稳　(e)95.45 s充型完毕

图 4 初始方案的充型模拟结果

Fig.4 Simulation results of the initial scheme

(a)12.18 s开始凝固　(b)30.31 s冒口在补缩



(c)85.67 s冒口停止补缩　(d)285.15 s内部有没凝固的金属液

图 5 初始方案的凝固模拟结果

Fig.5 Solidification simulation results of the initial scheme

3 优化方案设计

3.1 设计分析

基于初始方案模拟结果，采用双内浇口方案，增加 2 个内浇口，减缓充型压力。同时考虑到铸件热节的分布，增设了 4 个对称分布的明冒口，并在明冒口上加装保温套，使普通明冒口成为发热冒口，可以延长冒口凝固时间，提高补缩效率。按设计手册，发热冒口尺寸为 ϕ252 mm×3，ϕ224mm×2，高度均为 310 mm。改进后的铸造工艺如图 6 所示。

3.2 模拟分析

优化工艺方案后的工艺方案的充型模拟结果如图 7 所示。从图 7(a)可以看出，t=5.33 s 时金属液平稳进入横浇道，经过 4 个内浇道进入铸件型腔两侧内，开始充填靠近浇注系统外侧的型腔；t=8.91 s 时4 股金属液经内浇口逐渐由中间向两侧充填，见图 7(b)，由于在铸件两侧增设内浇道，金属液充型速度更加均匀，对比原始方案，金属液的充型流向可有效减少铸件中的卷气和夹杂物缺陷；当 t=14.25 s 时金属液由型腔两端开始汇聚，汇聚前沿流速较低，

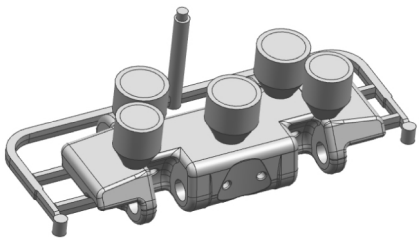
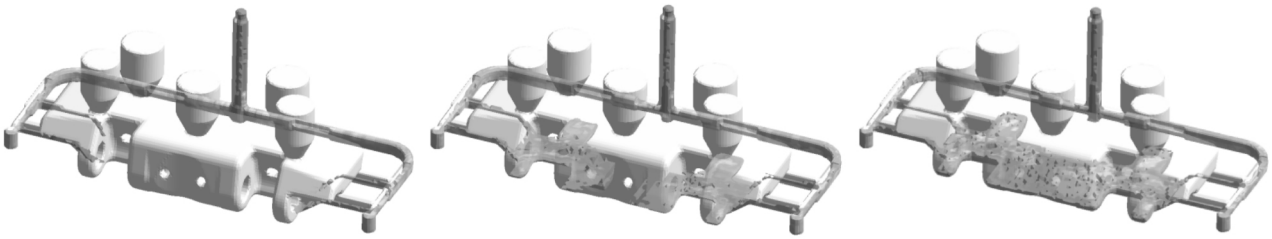
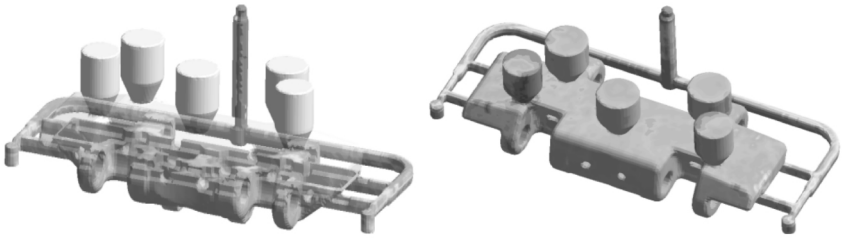


图 6 优化后工艺方案

Fig.6 Optimized process plan



(a)5.33 s开始充型　(b)8.91 s均匀充型　(c)14.25 s开始平稳充型



(d)33.87 s平稳充型　(e)91.00 s充型结束

图 7 优化方案的充型模拟结果

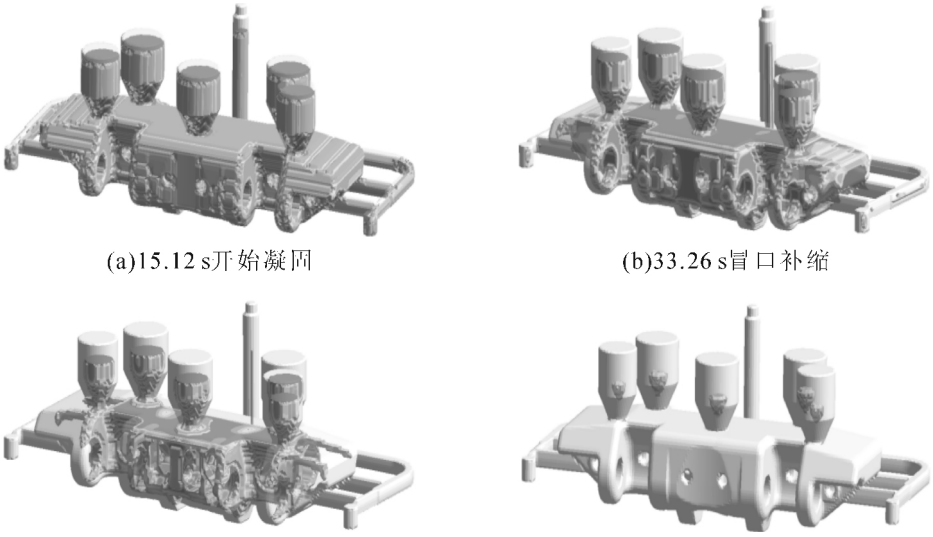
Fig.7 Simulation results of the optimized scheme

金属液没有发生强烈的对流，汇聚后液面开始平稳上升，见图 7（c）；当 t=33.87 s 时金属液稳定流动，液面缓慢上升，高于内浇道高度，充型平稳，见图 7(d)；当 t=91.00 s 时铸件充型结束，铸件基本充填完毕，见图 7(e)。与图 4 充型相比，金属液充填更加平稳、均匀，卷气程度降低。设计的双浇口方案经生产验证，铸件表面光滑，气孔、冷隔缺陷少。

优化后的工艺方案的凝固模拟结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出，当凝固时间 t=15.12 s 时，金属液开始凝固；当 t=33.26 s 时金属液持续凝固，此时冒口发挥补缩作用，将凝固顺序调整至由下至上，见图 8(b)；当 t=81.65 s 时金属液凝固到一定程度，继续发挥补缩作用，铸件边缘部分逐步完成了凝固，见图 8(c)；当 t=291.31 s 时金属液大部分已经凝固，剩余部分最终凝固于 5 个冒口之中，铸件的凝固顺序较为理想，不易产生缺陷，见图 8(d)。

4 结语

根据履带板的结构特点进行铸造工艺设计，使用芸峰 CAE 软件进行了充型过程以及凝固过程的的数值模拟，初始的方案中金属液的充型不平稳，金属液凝固顺序不理想，容易使得履带板的两端以及内部产生卷气和夹渣缺陷。经过优化后的铸造工艺方案，增加了内浇口的数量和冒口数量，并增设了保温套，使得充型过程更加稳定、凝固过程更加有序。经过生产验证，铸件气孔等铸造缺陷得到有效控制，



(a)15.12 s开始凝固　(b)33.26 s冒口补缩

(c)81.65 s继续冒口补缩　(d)291.31 s铸件凝固了冒口最后凝固

图 8 优化方案的凝固模拟图

Fig.8 Solidification simulation results of optimized scheme

铸件质量符合用户技术要求，铸件出品率为 58%。

参考文献：

[1] 岳琳清. 我国挤压铸造技术的研究现状及展望 [J]. 中国设备工程,2018(9):188-189.

[2] 渠志刚，刘江南，贺辛亥，等. 熔模精密铸造技术在汽车工业的应用及发展[J]. 热加工工艺，2017，46(1): 11-14.

[3] 郑小秋，谢世坤，易荣喜，等. 低压铸造技术:发展历程、研究现状和未来趋势[J]. 材料导报，2016，30(7):74-80，85.

[4] 袁贝，廖敦明，周建新. 铝合金铸造工艺 CAD/CAE 技术的研发与应用[J]. 特种铸造及有色合金，2012，32(4):321-323.

[5] Zhu J Z, Guo J, Samonds M T. Numerical modeling of hot tearing formation in metal casting and its validations [J]. International Journal.

[6] 张增志. 耐磨高锰钢[M]. 北京：冶金工业出版社,2002.

[7] 杜西灵，杜磊. 钢铁耐磨铸件铸造技术[M]. 广州：广东科技出版社，2006.

[8] 黄天佑. 消失模铸造技术[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[9] 陶杰. 消失模铸造方法与技术[M]. 南京：江苏科技出版社，2003.

[10] 胡祖尧，邓宏运，章舟. 高锰钢铸造生产及应用实例[M]. 北京：化学工业出版社，2010.

[11] Smith R W, DeMonte A, Mackay W B F. Development of high-manganese steels for heavy duty cast-to-shape applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154：589-595.

[12] 陈希杰. 高锰钢[M]. 北京：机械工业出版社，1989.

[13] Bhero S W, Nyembe B, Lentsoana K. Common causes of premature failure of hadfield steel crusher and hammers used in the mining industry [C]//Int. Conf. on Mining, Mineral Processing and Metallurgical Engineering. Johannesburg, 2013；174.

[14] 张增志. 耐磨高锰钢[M]. 北京：冶金工业出版社，2002：138-140.

[15] 傅排先，张文宁，康秀红. 厚大高锰钢铸件微裂纹形成机理研究[J]. 铸造，2007，56（4）：409-414.

[16] 李文生，路阳. 高锰钢铸件的缺陷与对策[J]. 铸造，2004，53（6）：476-478.

（上接 798 页）

墨铸铁力学性能的影响[J]. 铸造, 2009, 58(4): 368-372.

[16] Basso A, Martí nez R, Sikora J. Infuence of chemical composition and holding time on austenite (γ)ferrite (α) transformation in ductile iron occurring within the intercritical interval[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 9884-9889.

[17] 王金辉，刘金海，李国禄，等. 双相 ADI 飞轮毂热处理工艺[J]. 铸造设备与工艺, 2014(4): 16-18.

[18] Mé ndez S, Torre U D L, Larranaga P L, et al. Processing Thickness Window for As-cast Ausferritic Castings[C]. Afs Proceedings, 2015: 1-7.

[19] Yang J, Putatunda S K. Near threshold fatigue crack growth behavior of austempered ductile cast iron (ADI) processed by a novel two-step austempering process [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 393(1): 254-268.

西安普胜机电设备有限公司

XIAN PUSHENG MECHANICAL& ELECTRICAL EQUIPMENT CO.,LTD,.

西安普胜机电设备有限公司是专业从事仪器仪表、耗材、生产、销售、维护的科技公司。公司拥有高水平、高素质的科研生产团队和一流的销售、售后服务团队。

普胜公司秉承“诚信、务实、开拓、创新”的经营理念以满足客户的需要。以先进的技术和优质的服务，多年现场应用经验，为用户提供成熟的检测方案并为用户解决现场疑难问题。我们的坚持用户第一，信誉至上。

●主要产品　智能、高效、精確、快捷的型砂試驗儀器

——实现您建造现代化型砂试验室的梦想！

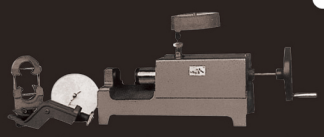
炉前分析仪

测温仪

高精度炉前分析仪
便携式智能测温仪
LXH-1冷芯盒制样机
SSZ震摆式筛砂机
SYS-B砂型表面硬度计
ZSL智能热湿拉测试仪
STZ直读式透气性测定仪
ZTY智能透气性测定仪
SHY树脂砂混砂机
SWY液压强度试验机
GET-11型智能发气性测定仪

●其他产品：高精度样杯　高精度快速热电偶　在线式系列非接触红外测温仪

●维修服务：测温仪、炉前分析仪及各种电路板维修。



地 址：710054西安市雁塔路南段99号
联系人：王志兵 15009251740　　电话/传真：029-83255097
顾 问：西安理工大学教授　魏 兵　13609155628
邮 箱：zhuzaogy@163.com　　仪器维修：13309279348