DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.008

铸造 CAE 应力仿真技术在轮毂裂纹预测中的应用

贾枝树,樊　超,于大威,王虎明,马彦伟,刘跃辉,公冶铭哲,张晓敏,左文博
(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 014032)

摘　要:为彻底解决某型履带式车辆轮毂铸钢件裂纹缺陷,实践运用了问题定位"排除法",科学判断出轮毂铸钢件裂纹发生的根本性问题,进一步运用 ProCAST 铸造应力模拟仿真技术,对轮毂铸钢件结构进行应力模拟分析。结果表明,模拟分析可预测出轮毂铸钢件裂纹缺陷的主要分布部位,通过对轮毂铸钢件优化工艺方案及相关试验验证,彻底解决了轮毂铸钢件的裂纹问题,保证了批量生产的顺利进行。

关键词:轮毂铸钢件;裂纹缺陷;排除法;铸造应力模拟仿真技术;优化工艺
中图分类号:TG245　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0683-05

Application of CAE Stress Simulation Technology in Crack Prediction of Steel Wheel Casting

JIA Zhishu, FAN Chao, YU Dawei, WANG Huming, MA Yanwei, LIU Yuehui, GONGYE Mingzhe, ZHANG Xiaomin, ZUO Wenbo
(Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., First Branch, Baotou 014032, China)

Abstract: In order to completely solve the crack defects of a tracked vehicle wheel casting, the problem location "elimination method" was applied in practice to scientifically judge the fundamental problem of wheel casting crack, Furthermore, the stress simulation analysis of wheel casting structure was carried out by using ProCAST casting stress simulation technology, The results show that the main distribution locations of crack defects in hub steel castings are predicted, and the crack problem of hub steel castings is completely solved by optimizing the technological scheme of hub steel castings and relevant test verification, and the smooth progress of mass production is ensured,

Key words: wheel steel castings; crack defects; elimination method; casting stress simulation technology; optimization process

近年来,国内外为了提升传统铸造行业的数字化制造技术水平,对铸造过程数值模拟技术进行了大量的研究和开发,研制出了多项科研成果,铸造 CAE 模拟仿真技术现正在不断发展、壮大,已走出了学术浓重的实验室,不断走进铸造生产第一线。2015 年我公司重金引进了 ProCAST 正版全模块模拟仿真软件,并开始推进铸造 CAE 模拟仿真技术的研究与应用。

某型履带式车辆轮毂是我公司重点铸钢件产品,整体表面探伤发现轮辐筋板部位存在局部贯通性裂纹问题,报废率达到了 15.22%,增加了产品制造成本。通过运用 ProCAST 应力模拟仿真分析技术,并结合使用问题定位试验"排除法",科学准确预测出轮毂铸钢件轮辐筋板裂纹缺陷的主要原因;同时对铸造工艺方案进行优化,并对优化后的铸造工艺方案进行试生产验证,试制轮毂铸钢件整体表面探伤 100% 合格,彻底解决了轮毂铸钢件裂纹缺陷问题。

1　运用问题"排除法"定位裂纹产生的主要原因

轮毂铸钢件是我公司某型履带式车辆输出行走牵引力系统的重要结构件之一。轮毂属薄壁复杂筒状结构,铸件重量为 186 kg。工作时轮毂铸钢件承受着履带式车辆动力输出的交变应力和冲击应力,如果该产品发生质量问题,将直接导致履带式车辆行动系统失效,在紧急情况下产生重大事故问题。

1.1　裂纹问题确认

经过对出现裂纹的轮毂铸钢件进行统计分析,发现裂纹部位全部集中发生于轮辐筋板与轮缘交接的圆弧区域内(见图 1)。

在裂纹部位周围进行火焰切割,对裂纹断面作进一步检测(见图 2)。

收稿日期:2021-04-21
基金项目:贾枝树(1967—),内蒙古包头人,学士,高级工程师. 主要从事铸造新工艺、新材料、新方法及计算机模拟方面的工作. 电话:13337199931,Email:13337199931@163.com
通讯作者:樊　超(1984—),内蒙古包头人,学士,工程师. 主要从事铸造成型工艺及计算机模拟仿真技术方面的工作. 电话:15904728886,Email:fc15904728886@163.com

图 1 轮毂裂纹部位

Fig. 1 Crack location of the wheel hub

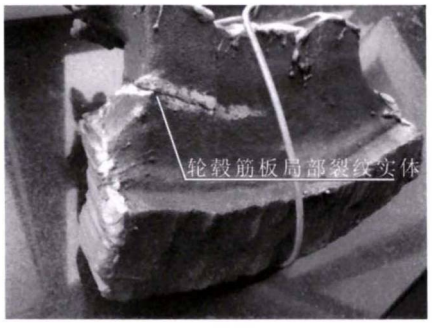


图 2 轮毂裂纹部位局部实体

Fig. 2 Flame- cut Local area containing crack

1.2 裂纹问题分析

使用机械加工锯床对裂纹断面锯切后，对本体裂纹断面进行了理化试验氧化脱碳检测。一般情况下，公司理化试验的热处理试样，氧化脱碳层深通常为 0.8 mm 左右；依据该客观信息数据，如果裂纹在热处理前形成，那么裂纹断面处经过多次氧化，氧化脱碳层深结果应达到 0.8 mm 以上。通过氧化脱碳理化检测裂纹断面本体，证明裂纹已在热处理前形成。

1.3 运用问题试验排除法

经检查轮毂铸钢件熔炼、造型、热处理等工序记录，全部符合铸造工艺要求。现使用问题“排除法”，试验 3 种方式（人工干法清砂、机械干法清砂、调质热处理）+ 整体表面磁粉探伤，准确定位裂纹问题的发生根源。

轮毂试验生产 20 件，造型采用酯硬化水玻璃砂自动化生产线，型芯采用无机高溃散水玻璃砂，一箱两件，浇注温度为 1 565 ℃，浇注时间为 15 ~ 25 s，打箱时间≥8 h。

采用人工干法清砂，简单清除轮毂内外砂块。首先随机选择 10 件轮毂进行人工干法清砂，为保持试验过程严谨及表面探伤结果准确，在切割试验轮毂铸钢件浇冒系统前先整体喷丸 10 min，切割试验轮毂铸钢件浇冒系统后再喷丸 10 min，试验轮毂铸钢件电弧气刨完成后第三次喷丸 10 min。通过 3 次喷丸处理，确保试验轮毂铸钢件表面洁净，具备整体表面探伤的基本条件。

经过对试验轮毂整体表面探伤检查后，未发现轮毂本体存在任何裂纹，试验轮毂 100% 合格。

同时现场监督试验轮毂件的热处理装盘操作，指导经表面磁粉探伤检查合格的试验轮毂件进行正常工艺流程中的调质热处理（淬火 + 高温回火），确保轮毂试验过程完全符合热处理工艺要求。喷丸 10 min 后，经整体表面磁粉探伤，发现有 3 件轮辐筋板部位存在局部裂纹，长度为 5 ~ 8 mm。

跟踪并指导对剩余 10 件试验轮毂按照工艺要求进行机械干法清砂。为保持试验过程严谨及探伤结果准确，在切割试验轮毂浇冒系统前先整体喷丸 10 min，切割试验轮毂浇冒系统后再喷丸 10 min，试验轮毂电弧气刨完成后第三次喷丸 10 min，确保试验轮毂表面洁净。然后对试验轮毂件进行整体表面磁粉探伤检查，发现 4 件轮辐筋板部位存在局部裂纹，长度为 35 ~ 50 mm。

经过使用 3 种问题试验“排除法”，证明轮毂轮辐区域内部铸造应力较大，轮毂自身结构设计可能存在一定的不合理问题。现运用铸造 CAE 应力模拟仿真技术辅助验证轮毂铸钢件自身结构设计问题，并进一步对原工艺设计进行工艺优化改进。

2 铸造工艺及应力模拟仿真

2.1 工艺设计

2.1.1 铸造工艺介绍

轮毂铸钢件采用铸造行业绿色可再生的酯硬化水玻璃砂在造型自动化生产线上生产，工艺设计为一箱两件。轮毂采用组芯工艺，外轮廓结构由上下两个型芯对粘组成，中心齿孔部位由一个型芯形成。钢液浇注时，由底部进入砂型型腔内，内浇道上设置有一个 153 mm × 231 mm × 285 mm 的普通型砂暗冒口对铸件内浇道区域进行补缩，中心齿部上方设置有一个 ϕ198 mm × 255 mm 的普通型砂暗冒口，在轮缘法兰对应的 4 条筋板上各设置一个 165 mm × 90 mm × 160 mm 的普通型砂暗冒口，凸台中心通孔各放置一个 ϕ10 mm × 90 mm 的内冷铁，见图 3。

2.1.2 结构分析定位

由于轮辐筋板与相接齿部尺寸结构比例相差较大（见图 4），在浇注后凝固过程中，厚大的齿部对轮辐筋板产生较大拉应力，同时受法兰轮缘结构限制，造成在轮辐筋板部位易产生应力集中，从而发生局部贯通裂纹。

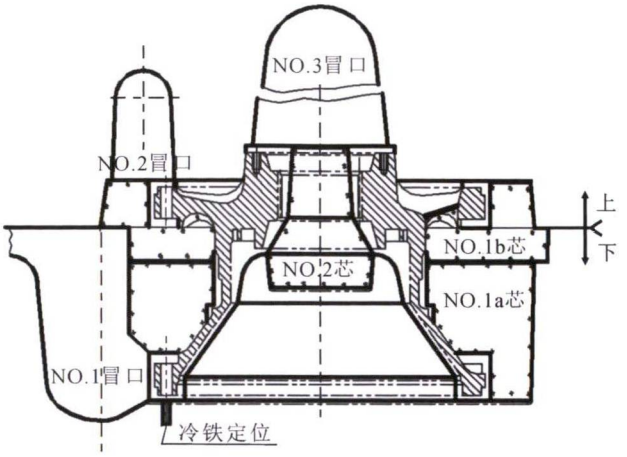


图 3 铸造工艺主剖简图

Fig. 3 Schematic of casting process

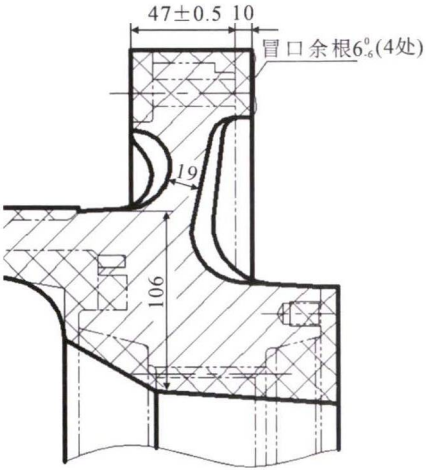


图 4 轮辐筋板局部结构简图

Fig. 4 Schematic diagram of the local structure of the spoke ribs

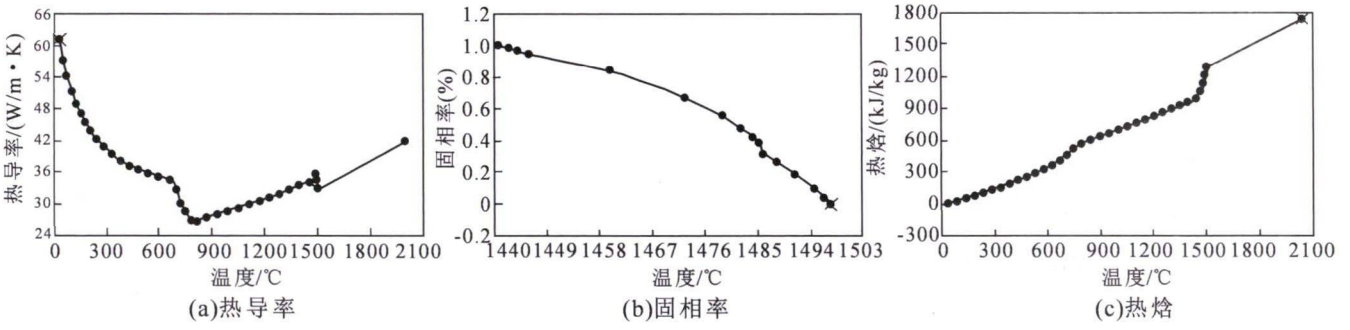
2.2　模拟条件设置

2.2.1　工艺造型的网格划分

运用三维建模软件 Creo2.0 对铸件进行三维实体铸造工艺造型，用 ProCAST 铸造模拟仿真软件的划分模块对铸件进行网格划分时，模型网格单元的表面三角形最大边长为 6 mm，由此获得四面体网格数为 228 635、节点数为 26 833。

2.2.2　设置材料热物性参数

我公司对工艺中使用材料的热物理性能进行了专业测试，保证了数值模拟仿真计算和分析结果的可靠性，测试后的结果见图 5。



(a)热导率　(b)固相率　(c)热焓

图 5 材料主要热物性参数

Fig. 5 Main thermophysical parameters of materials

该种材料的密度为 7.84 g/cm^3，固相线温度为 1 446 ℃，液相线温度为 1 503 ℃。

2.2.3　设定初始条件和边界条件

根据实际生产工艺确定浇注温度为 1 565 ℃，浇注速度为 15 kg/s，环境初始温度为 25 ℃。

2.3　应力模拟计算结果分析

运用 ProCAST 铸造模拟仿真软件对轮毂铸钢件工艺优化前的方案进行模拟计算，应力模拟结果见图 6，可以看出原工艺方案应力模拟结果与实际铸件发生裂纹的部位基本一致。

(a)有效应力分布　(b)最大剪切应力分布　(c)平均法向应力

图 6 应力分布模拟预测

Fig. 6 Stress distribution simulation prediction

从轮毂铸钢件裂纹部位分布与 ProCAST 应力模拟仿真结果对比的一致性，可以看出轮毂铸钢件轮辐筋板产生裂纹的主要原因是该铸件结构设计不合理。

3 优化工艺方案

为改善轮毂铸钢件质量，经过技术团队缜密分析与讨论，设计在轮毂铸钢件原工艺方案的 4 个减重孔内均布增加 4 条加强防裂筋，尺寸为 55 mm × 50 mm × 15 mm，见图 7。

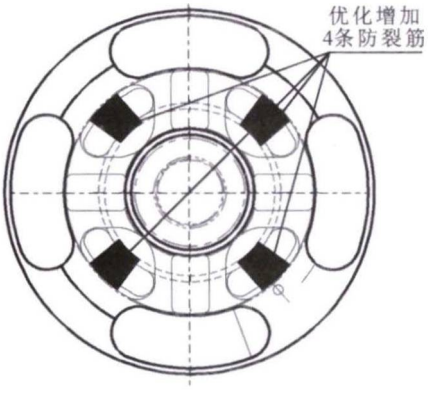


图 7 优化工艺设计

Fig. 7 Optimizing process design

按照优化工艺设计，将优化措施落实到模样中，并进行试生产验证（见图 8）。

图 8 优化工艺措施试生产

Fig. 8 Optimizing process measures and piloting production

4 优化措施验证及效果

4.1 小批量试制验证

首先，按照优化后的工艺方案试生产 10 件进行效果验证，按照打箱后机械清砂、一次清理、调质热处理常态化生产工艺要求执行，然后喷丸将试验轮毂件整体表面清理洁净，再整体表面探伤检查，经探伤检查后，试验轮毂铸钢件全部合格，未发现任何裂纹缺陷，见图 9。

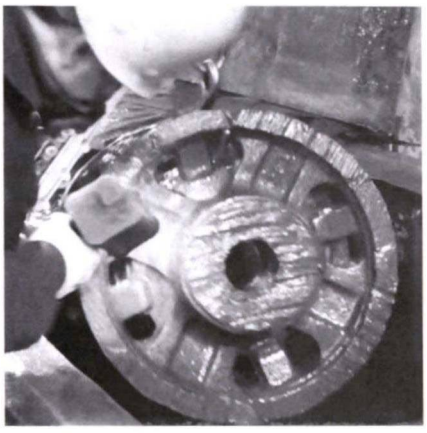


图 9 表面磁粉探伤未发现裂纹缺陷

Fig. 9 Surface magnetic powder crack detection showing no crack defects

将整体表面探伤全部合格的试验轮毂铸钢件，统一使用火焰切割方式切除加强防裂筋，并与本体打磨齐平，然后按二次清理、去应力回火、喷丸、表面探伤常态化生产工艺流程进行处理，再次对试验轮毂铸钢件进行整体表面探伤检查，经探伤检查后，试验轮毂铸钢件全部合格。

4.2 大批量生产验证

在随后的批量验证生产中，按照优化后的工艺方案，大批量生产 3 个批次轮毂铸钢件共计 60 件，全部按照常态化生产工艺流程执行。调质热处理后统一使用火焰切割方式切除加强防裂筋，并与本体打磨齐平，再二次清理、去应力回火、喷丸、表面探伤常态化生产工艺流程进行处理，对试验轮毂件进行整体表面探伤检查，轮毂全部合格。

4.3 常态化生产验证

截至目前，按照优化方案现已生产 326 件。常态化生产状态下，轮毂在调质热处理后统一使用火焰切割方式切除加强防裂筋，成品交验前整体表面探伤，未发现轮辐筋板局部贯通裂纹，100% 合格。

5 结语

（1）实践中使用 3 种问题“排除法”，能够准确辅助定位分析轮毂铸钢件裂纹缺陷发生的根源性问题，取得的结论是可靠的，该方法对产品实际问题准确定位分析具有可借鉴的意义。

（2）探索运用 ProCAST 应力模拟仿真技术，能够较准确预测轮毂铸钢件裂纹缺陷产生部位，模拟分析结果与实物裂纹缺陷特征及分布基本一致，为确定轮毂铸钢件科学判定裂纹缺陷根源性问题提供了科学依据。

（3）通过结合轮毂铸钢件应力模拟仿真分析结果，制定优化工艺方案，经生产验证后，显著降低了

轮毂铸钢件裂纹缺陷发生率，裂纹缺陷由优化改进前的 15.22% 降低到了 0%，提高了轮毂铸钢件的综合质量合格率。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(5)[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

[2] 毛红奎，铸造过程模拟仿真及工艺设计[M]. 北京：国防工业出版社，2011.

[3] 荆涛，凝固过程数值模拟[M]. 北京：电子工业出版社，2002

[4] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆：重庆大学，2016

[5] 周建新，铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造，2012(10)：1105-1115.

[6] 樊超，杜志强，刘江，等，利用发热保温冒口解决钩体头部缩孔缺陷的探索[J]. 铸造技术，2017，38(12)：3021-3023.

[7] 樊超，王光明，张挨元，等，ProCAST 模拟仿真技术在铸钢件缺陷预测中的应用[J]. 铸造技术，2019，40(7)：705-711.

[8] 黄春雨，铸钢车轮中"亮点"的探讨[J]. 铸造技术，2014，35(3)：633-634.

[9] JALURIA Y, Challenges in the accurate numerical simulation of practical thermal processes and systems[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2013, 23(1): 158-175.

[10] TEWARI A, BISWAS P, Effect of amount, size, and spatial distribution of intermetallics on incipient localization during plastic deformation[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(6): 1567-1578.

河北省冀州市华北铸钉铸造工具总厂

冀州市华北铸钉铸造工具总厂座落于河北省冀州市城南白庄工业区，紧靠全国大动脉京九、石梅铁路，交通十分便利。我厂是生产铸顶（泥芯撑）、羊毛掸笔、硬扫笔、圆水笔的专业厂家。建厂36多年来,技术设备先进，产品销往全国各地,深受用户欢迎。本厂始终承诺：诚信至上，守信誉,质高价低，实行三包，交货及时，代办发运，可供图订做。热情欢迎国内外来人来电选购。

四同

同类产品比质量　同等质量比价格
同样价格比服务　同等服务比速度

两免

免费为客户提供产品技术咨询
免费为客户提供初期试用产品

一、常用修造工具规格（材质为不锈钢或弹簧钢）　　/mm

名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格	名称	型号	规格
刮刀	2#	160×45	秋叶	1#	180×30	三角光子	2#	50×30	东北压钩	1#	270×50
尖刮刀	3#	140×35	单头钢批	2#	240×22	蛋圆光子	1#	75×50	圆型钩	2#	200×30
提钩	2#	350×15	单头钢批	3#	210×20	压钩	1#	270×50	长把压钩	1#	220×30
提钩	4#	300×10	法兰钩	1#	270×14	压钩	2#	240×45	柳叶钩	1#	240×40
钢批钩	1#	280×16	榔头铲	1#	240×24	单齐压钩	2#	240×45	单开提钩	2#	320×12

二、掸笔、硬扫笔：20～120 mm 10个品种；圆水笔：12～17 mm 3个品种；
三、铸顶（芯撑）有圆、方、长方形，单、双、多柱、异形铸顶等各种铸铁、铸钢用铸顶材质为A3或A3F，表面镀锌、镀锡等；
四、过滤网、木型工具、皮风箱、铸尺、百叶轮、角磨片、树脂油、固化剂、粘结剂、木型锤等。

图中从左至右依次为：1.刮刀 2.尖刮刀 3.压勺 4.单齐压勺 5.提钩 6.单头钢批 7.秋叶 8.单开提钩 9.法兰钩 10.钢批钩 11.掸笔、扫笔 12.圆水笔 13.铸顶

诚征各地代理商

厂址：河北省冀州市城南白庄工业区（053200）　联系人：白英韩 13831863803 白其水 13582484193（中国农行金穗卡，户名：白英韩 卡号：955998213033249031O）
电话/传真：0318-8682135　网址：www.hbzhz.com　E-mail:hbbyh@hbzhz.com　银行汇款：冀州市华北铸钉铸造工具总厂　开户行：市中行　帐号：100148643069

经销处
哈尔滨市铸材门市部 13831863803　包头市铸材经销处 13633184318
杭州市中亚铸材有限公司 13932860882　贵阳市忠信铸材公司 13831888322
长沙市铸材办事处 13831823340　西宁市铸材办事处 13931810511
上海市铸材办事处 13932894585　南宁市铸材办事处 0771-8994686

本单位为一般纳税人，增值发票税率17%。