

WPX 灰铁机体裂纹缺陷的分析与改善

刘继波¹, 李永亮¹, 陈秀明^{2, 3}, 廉贞松¹

(1. 潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东潍坊 261199;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061;

3. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东潍坊 261061)

摘要: 对WPX机体的裂纹问题进行了多方面的分析。应力仿真分析表明, 残余应力导致了较高的开裂风险, 裂纹产生于固相线温度以下。从产品结构和生产工艺两个方面设计了3种改进方案, 通过仿真评估确定了最佳方案。试验验证表明, 该方案有效改善了裂纹问题。

关键词: 机体; 裂纹; 应力; 仿真

WPX柴油机是国内外研发机构联合开发的大排量柴油机, 主要应用于牵引车、自卸车等卡车用发动机, 以及压路机、推土机等工程机械用发动机。柴油机及其附件布置简洁, 采用一缸一盖结构, 易于维修。其中, 机体的缸心距150 mm, 主要壁厚7 mm, 瓦口壁厚48 mm, 长958 mm、宽392 mm、高425 mm, 毛坯质量296 kg。材料牌号为HT300, 图纸要求抗拉强度 ≥ 230 MPa, 化学成分范围要求如表1所示。

表1 材料化学成分
Tab. 1 Chemical composition of materials

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Sn	Mo
3.20~3.35	1.70~2.00	0.60~1.00	0.06~0.12	≤ 0.06	0.30~0.50	0.20~0.35	0.05~0.08	0.05~0.15

1 生产工艺

组芯方式为立组卧浇, 采用湿型砂工艺, 浇注温度1 400~1 420 °C, 浇注时间26~28 s, 打箱时间6 h。总体废品率为2.6%, 其中裂纹废品率为1.1%, 约占总废品率的42%。裂纹缺陷在铸件毛坯生产检验阶段较难识别, 一般到加工工序才能发现, 且一旦发现必须报废, 造成生产成本的极大浪费, 这是该产品最为突出的问题。

2 缺陷形貌

对裂纹发生的位置进行了统计, 如图1所示, 90%以上的裂纹出现在3、4缸法

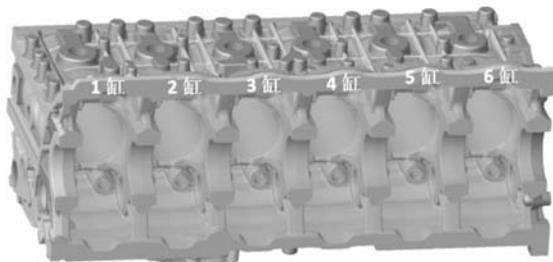


图1 裂纹位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crack location

作者简介:

刘继波(1977-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事铸造方面工作。电话: 0536-2200071, E-mail: liujib@weichai.com

通信作者:

廉贞松, 男, 硕士, 工程师。电话: 15095092017, E-mail: lianzs@weichai.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)11-1530-06

收稿日期:

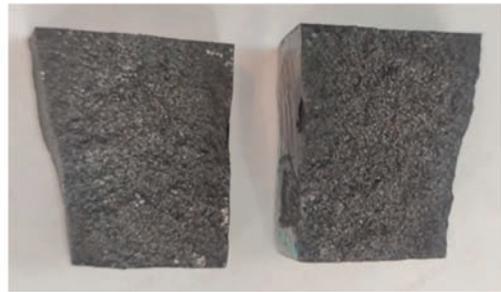
2025-06-23 收到初稿,
2025-06-27 收到修订稿。

兰面。如图2所示，断口呈现灰黑色，断口氧化程度严重，无金属光泽，这表明是在较高的环境温度下开裂。如图3所示，呈现解理断裂的特征，裂纹发展非常

迅速，无明显的塑性变形，呈现偏脆性断裂的特征，说明开裂时已完全凝固。



(a) 裂纹



(b) 断口

图2 裂纹宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of the crack

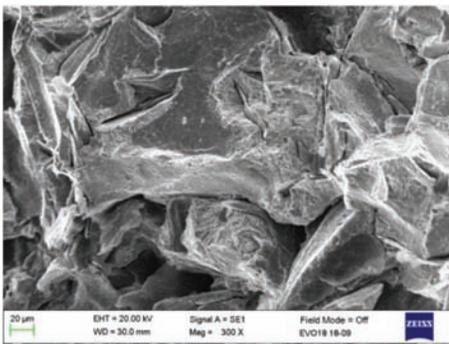


图3 裂纹微观形貌

Fig. 3 Microscopic morphology of crack

3 裂纹缺陷分析

通常来说，铸件裂纹的产生原因是多种多样的，有铸件材质、铸件结构导致的应力集中等^[1-6]。

从工艺执行过程进行了排查：化学成分符合技术要求范围；裂纹断口处金相组织正常，石墨为A型，4级，珠光体含量98%，如图4所示；此位置为披缝位置，但现场清理工序到位，清理后无残余披缝；打箱时间严格按照6 h执行；锤击清理时，暴力操作的情况



图4 裂纹断口处金相组织

Fig. 4 Metallographic structure at the crack fracture location

极少。因此，工艺过程控制无明显问题。

目前，计算仿真在铸造领域已经发展到相对成熟阶段，可以较为准确地模拟出铸件的残余应力、相变等^[7-9]。下面采用MAGMA仿真软件对铸件铸造过程的应力进行分析。

由图5的Cold Crack (Cold Crack=Mises应力/抗拉强度)结果可知，裂纹区域的值在1.0~1.1范围内 (>临界值1.0)，因此裂纹风险较高。

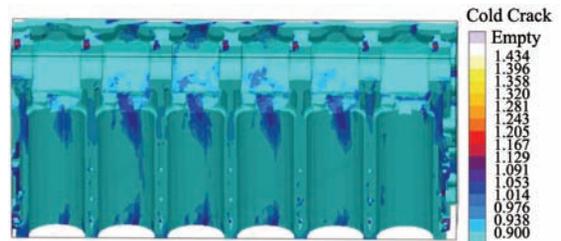


图5 法兰面的Cold Crack仿真结果

Fig. 5 Cold Crack simulation results of flange surface

由图6应力状态曲线可以看出，在打箱(6 h)之前为拉应力状态，在打箱(6 h)之后为压应力状态，由此可以推断裂纹产生在打箱之前^[10]。

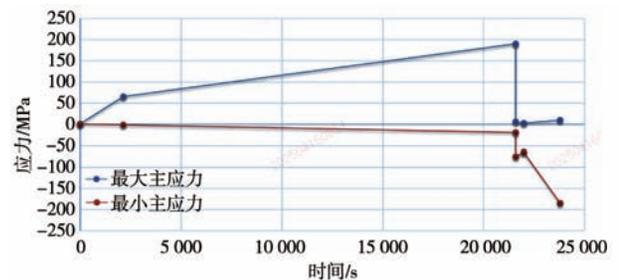


图6 裂纹位置的应力状态

Fig. 6 Stress state at crack location

从图7的Cold Crack变化曲线来看,大约在3 000 s左右到达临界值1.0。从图8凝固顺序来看,在616 s之后,法兰位置已经完全由液态转变为固态。从图9的冷却曲线可知,在3 000 s时,该位置已经完成共析转变。

综上所述,结合前述断口形貌等,可以认为裂纹在拉应力状态下,产生在共析转变之后、打箱(21 600 s)之前的时间段里,应为冷裂。

4 改进措施

完成以上分析后,着手进行改进。如图10所示,

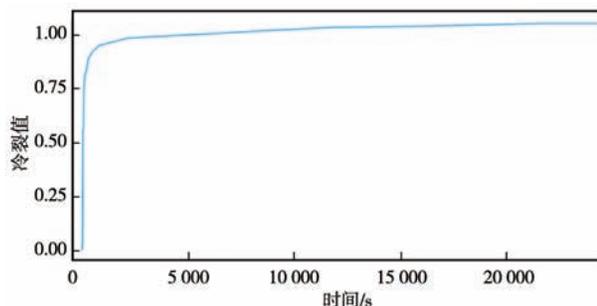


图7 裂纹位置的Cold Crack值
Fig. 7 Cold Crack value at crack location

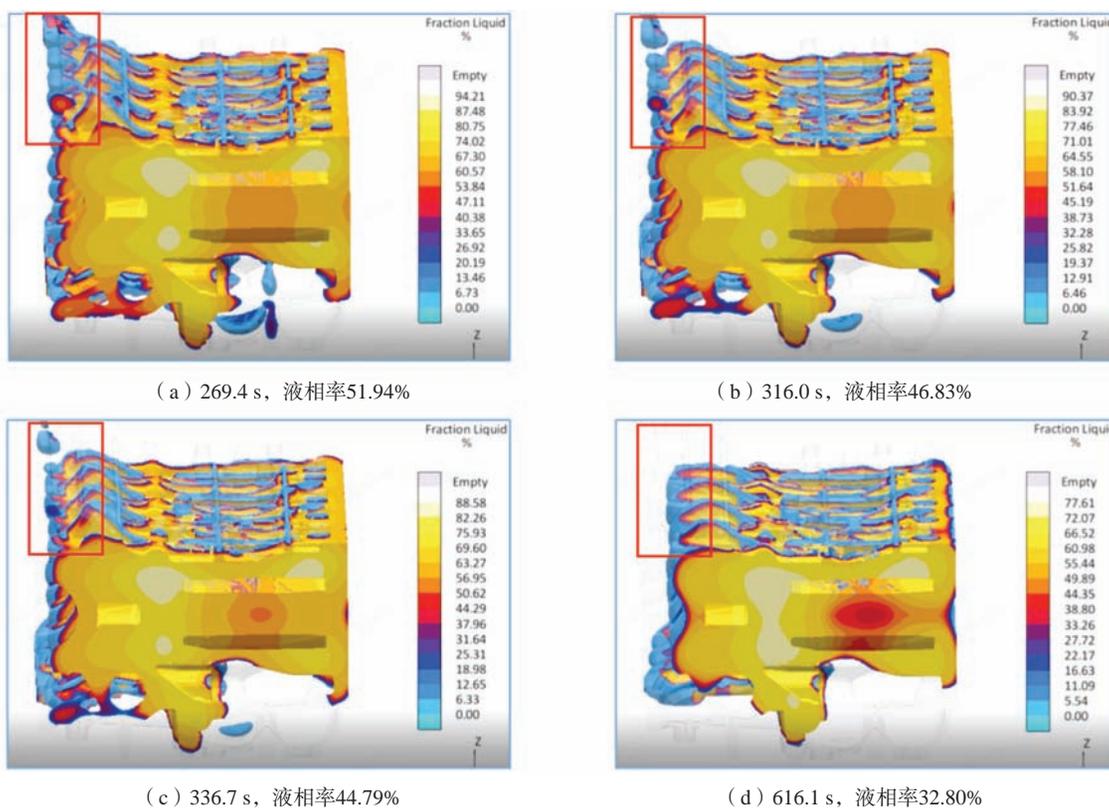


图8 WPX机体法兰裂纹位置的凝固顺序

Fig. 8 Solidification sequence of crack location on cylinder block WPX

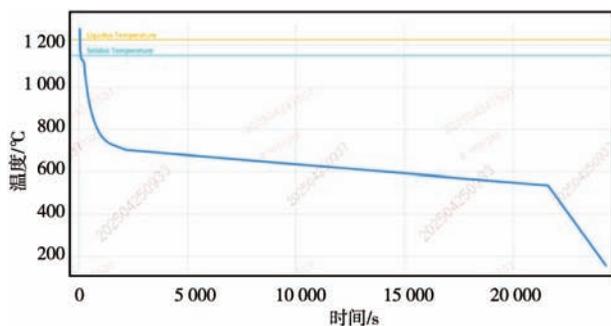


图9 裂纹位置的冷却曲线
Fig. 9 Cooling curve at crack location

改进方案从两个方面入手:(1)从产品结构方面进行改进,设计了方案1和方案2两种方案:增加了裂纹位置的壁厚,期望通过增加结构强度减少开裂风险;(2)从铸造工艺方面进行改进,设计了方案3:在裂纹位置增加了4 mm厚度的内拉筋,期望能减小裂纹位置的变形和应力,降低开裂风险。该内拉筋在加工工序加工掉,不改变产品结构。

如图11所示,通过仿真进行评估,其中方案1和方案2效果均不明显,Cold Crack的值并无明显变化,仍在1.0~1.1的范围内,开裂风险依旧较高。而方案3的Cold Crack值由1.0~1.1降低为0.9~1.0,降低幅度比较明

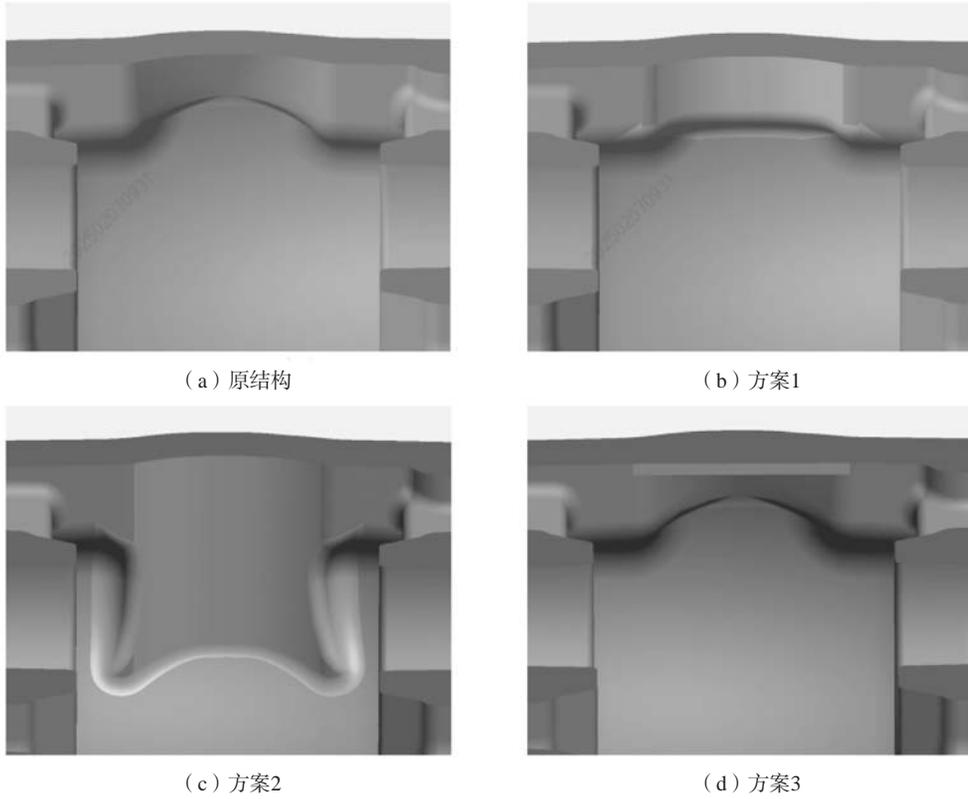


图10 原结构及三种改进方案
Fig. 10 Original structure and three improvement schemes

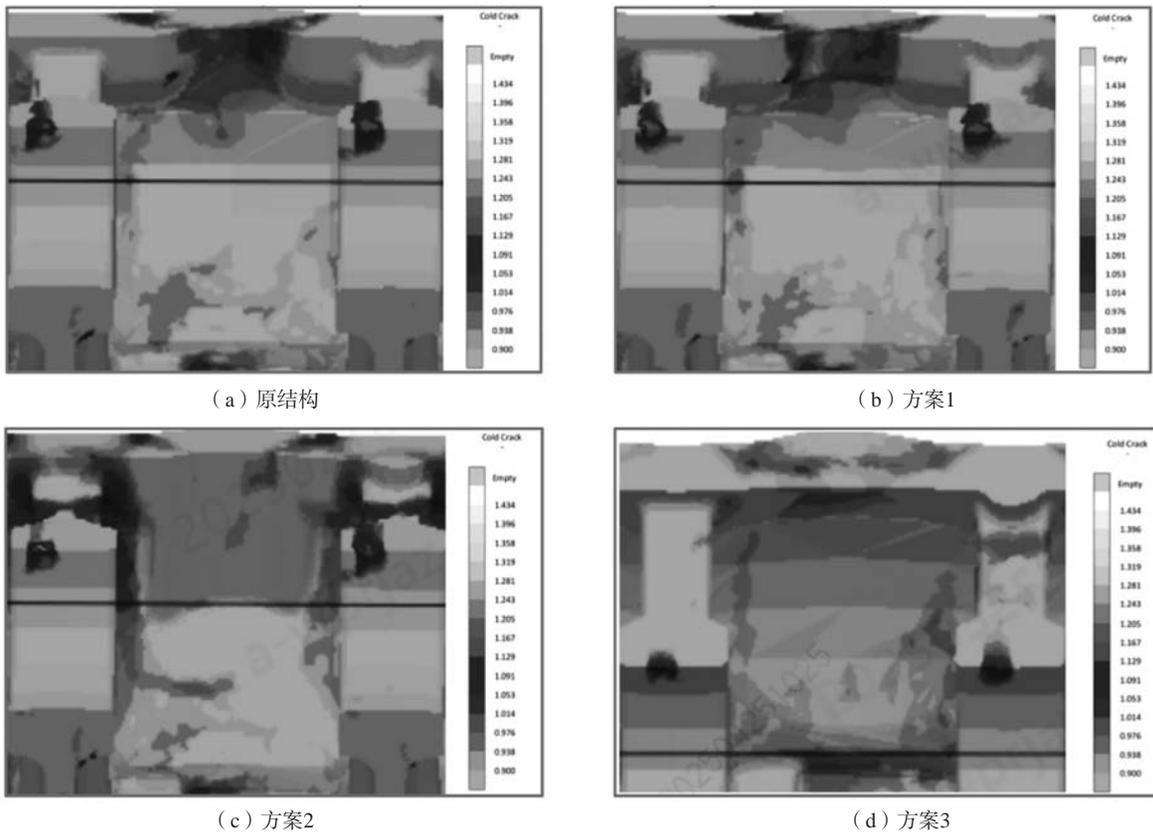


图11 原结构及三种改进方案的Cold Crack仿真结果
Fig. 11 Cold Crack simulation results of the original structure and three improvement schemes

显。有必要开展进一步的工艺验证。

由图12和图13可知，增加内拉筋之后，一方面应力最大的位置转移到了内拉筋上；另一方面内拉筋由于冷却速度快，抗拉强度较本体更高，抵抗裂纹的能力更强，图14的内拉筋金相组织也说明了这一点。因

此开裂风险得以有效降低。

方案3的实际改动如图15所示。经生产验证，裂纹率由1.1%降低到0.2%以下，降幅达80%以上，质量改进取得了理想的效果。

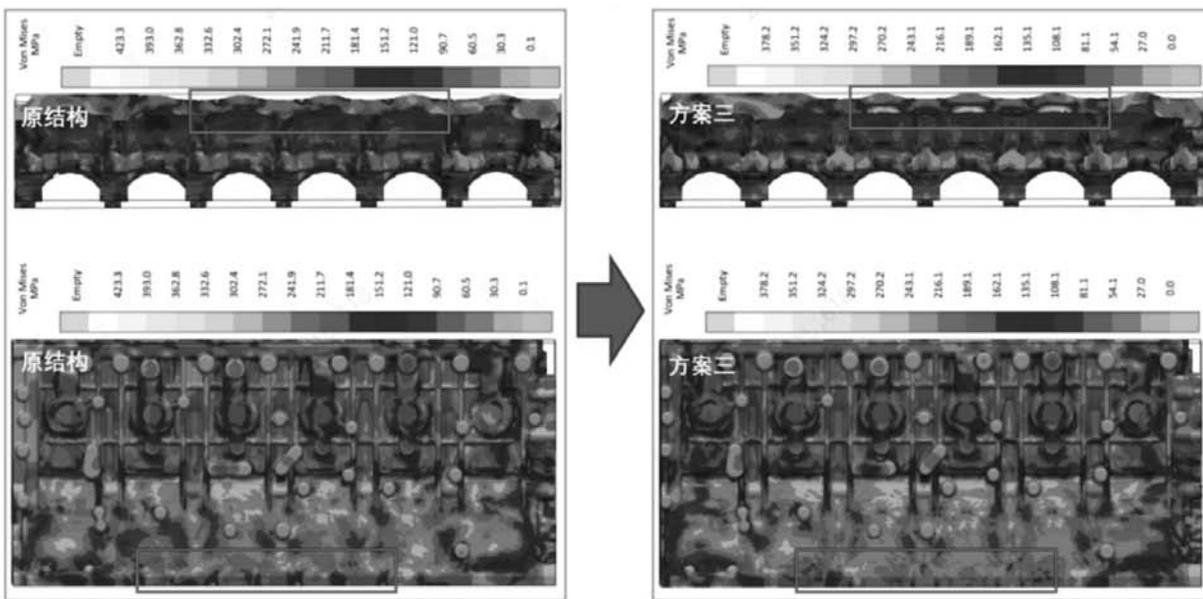


图12 原结构及方案3的Mises应力仿真结果

Fig. 12 Mises stress simulation results of the original structure and scheme 3

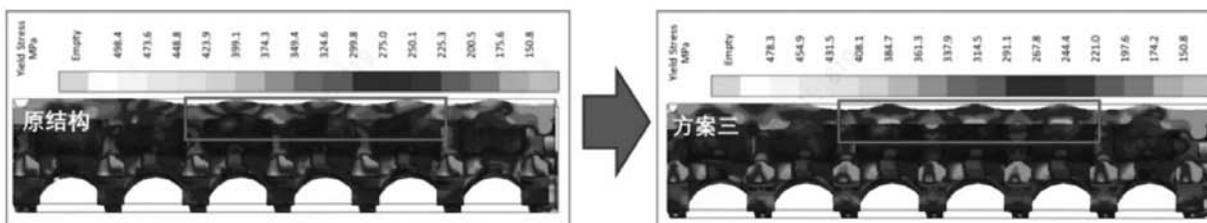
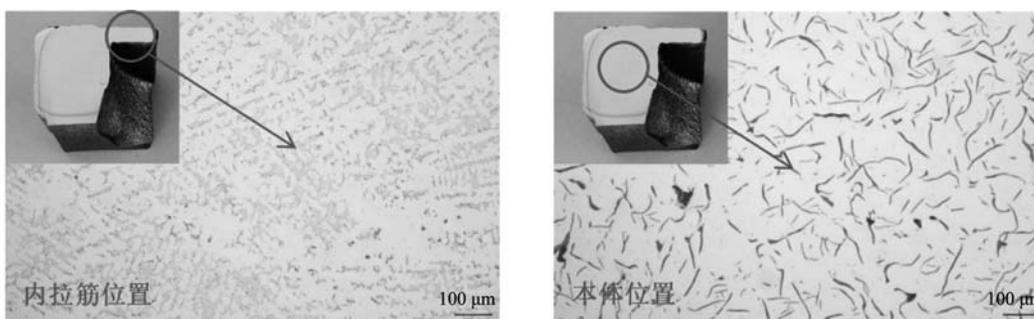


图13 原结构及方案3的抗拉强度仿真结果

Fig. 13 Tensile strength simulation results of the original structure and scheme 3



(a) 内拉筋位置

(b) 本体位置

图14 方案3内拉筋位置和本体位置的金相组织

Fig. 14 Metallurgical structure at the internal reinforcement and main body positions in scheme 3

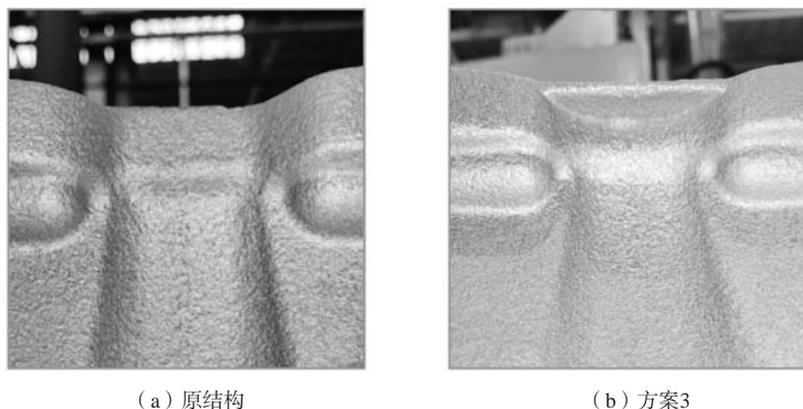


图15 方案3的试验验证

Fig. 15 Experimental verification of scheme 3

5 结语

对于具有复杂结构铸件的裂纹问题，改进方向通常为产品结构和铸造工艺两个方面。结构更改较为简单，能够降低工艺成本，但需考虑整个产品的装

配要求；工艺改动虽不影响产品结构，但会增加工艺成本。只有综合考虑，才能快速找到最有效的解决方案。同时，借助仿真手段可有效提高改善效率，降低改善成本。

参考文献:

- [1] 宫显辉, 颜向旭, 张涛, 等. 大型船用柴油机缸体裂纹缺陷分析及应对措施 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (12): 1041-1054.
- [2] 阎顺祥, 谢正茂, 赵小军, 等. 发动机缸体裂纹形成机理探究 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2920-2923.
- [3] 李泽芝, 倪钧, 赵平, 等. 灰铸铁水泵壳体铸件裂纹形成原因分析 [J]. 铸造, 2024, 73 (9): 1254-1261.
- [4] 毕海香, 于建忠, 张敏之, 等. 高牌号灰铸铁机体裂纹缺陷探讨 [J]. 铸造设备与工艺, 2022 (6): 21-36.
- [5] 卢宝胜, 张显宜, 张福强, 等. 气缸体裂纹缺陷的分析与解决 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (2): 57-61.
- [6] 王笃雄, 郑志伟, 顾晓文, 等. 高碳当量灰铸铁低周疲劳行为研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 868-870.
- [7] 史东丽, 钱坤才. 大型高铬铸铁叶轮凝固过程应力场数值模拟及铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2020, 69 (9): 972-976.
- [8] 贾枝树, 樊超, 于大威, 等. 铸造CAE应力仿真技术在轮毂裂纹预测中的应用 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (8): 683-687.
- [9] 赵建华, 许鹏飞, 韩征权. 浅谈铸造过程应力的数值模拟 [J]. 铸造设备与工艺, 2009 (2): 45-46.
- [10] 宋帆, 苏辉. 灰铸铁拉伸断裂金相组织的原位观察及分析 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (18): 90-92.

Analysis and Improvement of Crack Defects in WPX Gray Iron Cylinder Block

LIU Ji-bo¹, LI Yong-liang¹, CHEN Xiu-ming^{2,3}, LIAN Zhen-song¹

(1. Weichai (Weifang) Material Forming & Manufacturing Center Co., Ltd., Weifang 261199, Shandong, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China; 3. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, Shandong, China)

Abstract:

A multi-faceted analysis was conducted on the crack problem of WPX cylinder block. The stress simulation results show that the residual stresses result in higher cracking risk, and the cracks occur below the solidus temperature. Three improvement schemes were proposed from the two aspects of product structure and production process, and the best scheme was determined through simulation evaluation. The test verification shows that this scheme can be used to effectively solve the crack problem.

Key words:

cylinder block; crack; stress; simulation