

ZG08Cr9W3Co3VNbNB 缸体铸造模拟及缩孔缩松研究

吉晓霞, 陈楚, 伊鹏跃, 李晓, 朱琳

(中国一重天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

摘要: 采用ProCAST软件对ZG08Cr9W3Co3VNbNB缸体铸件进行铸造过程数值模拟并预测了不同计算方式下的缩孔缩松缺陷。对铸件进行超声波探伤及解剖试验, 获得缩孔缩松的分布位置, 并对孔洞进行了微观组织观察和分析。最后对试验件工艺设计提出了优化措施。

关键词: 计算方式; 缩孔缩松; 解剖; 数值模拟

中图分类号: TG245 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0087-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0013

作者简介:

吉晓霞(1984-), 女, 工学硕士, 研究方向为铸造过程CAD/CAE分析。E-mail: jixiaoxia1984920@126.com

基金项目:

国家重点研发计划: 630 °C超超临界汽轮机转子用马氏体耐热钢与锻件研制(2021YFB3704100); 2021年国家新材料生产应用示范平台: 超超临界火电机组材料生产应用示范平台项目(TC210H022)。收稿日期: 2025-08-14 收到初稿, 2025-10-22 收到修订稿。

引用格式:

吉晓霞, 陈楚, 伊鹏跃, 等. ZG08Cr9W3Co3VNbNB缸体铸造模拟及缩孔缩松研究[J]. 铸造, 2026, 75(1): 87-92.
JI Xiaoxia, CHEN Chu, YI Pengyue, et al. Study on casting process simulation and shrinkage cavity & porosity of ZG08Cr9W3Co3VNbNB cylinder block[J]. Foundry, 2026, 75(1): 87-92.

电力行业是国民经济的支撑, 作为生产发电设备主机之一的汽轮机制造业的发展水平是国家综合实力的重要体现之一^[1]。汽轮机是一种将高温高压蒸汽的热能转化为机械功的旋转式动力机械^[2]。汽缸是汽轮机的外壳, 其作用是将汽轮机的通流部分与大气隔开, 形成封闭的汽室, 保证蒸汽在汽轮机内部完成能量的转换过程, 在运行中需要承受高温、高压和高转速的苛刻环境^[3]。随着高效率的超超临界发电技术的发展, 对汽轮机缸体的铸造质量提出了更高的要求^[4]。目前, 铸造模拟技术已经成为辅助铸造工艺设计的重要手段, 可以帮助设计人员预测铸件内部缺陷^[5-6], 降低试错成本, 提高优化效率。

本文作者以超超临界汽轮机缸体上半的典型结构试验件作为研究对象, 使用ProCAST软件对试验件进行数值模拟研究, 预测缩孔缩松缺陷。通过浇注获得铸件实物, 再进行超声波探伤、解剖和试验研究等, 获得缩孔缩松的实测结果, 进而分析提出了试验件的工艺优化措施。

1 计算方法及结果预测

ProCAST软件有四种计算方式, 即: 温度场计算(thermal)、温度场与流场耦合计算(thermal+fill)、温度场与应力场耦合计算(thermal+stress)、温度场与流场及应力场耦合计算(thermal+fill+stress), 根据不同的模拟需求选择不同的计算方式。

1.1 几何模型

本研究的试验件如图1所示, 最大外形尺寸约2 400 mm × 1 500 mm × 1 200 mm,



图1 试验件实物图

Fig. 1 Real picture of the test casting

属于左右对称结构。铸造工艺三维模型如图2所示，对两侧气道进行了对比设计，即一侧设置补贴，另一侧不设置补贴。在铸件凹面内侧设置两处冒口墙，起补缩作用，在其上方设置两个明冒口对冒口墙进行补缩，同时在必要部位设置冷铁以辅助补缩。采用开放式浇注系统，浇注温度1 558 ℃，浇注完成后对试验件进行了热处理。ZG08Cr9W3Co3VNbNB化学成分见表1。

1.2 主要计算参数

根据表1所示化学成分，由ProCAST软件计算得到铸件材料的热物性参数，主要热物性参数见图3 (a) 和 (b)。铸件-砂型界面换热系数采用如图4所示的换热系数-温度曲线。

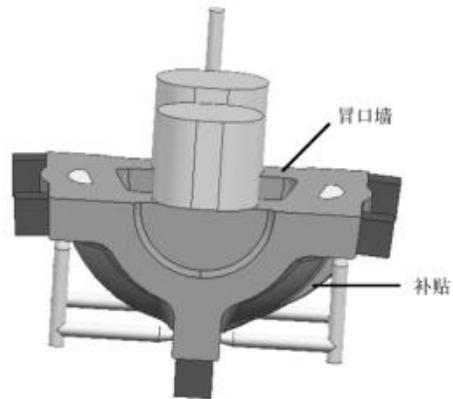
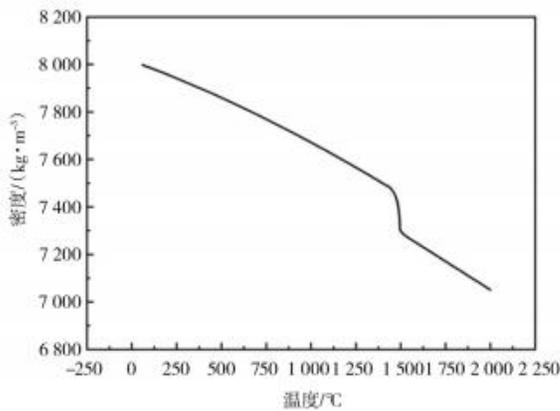


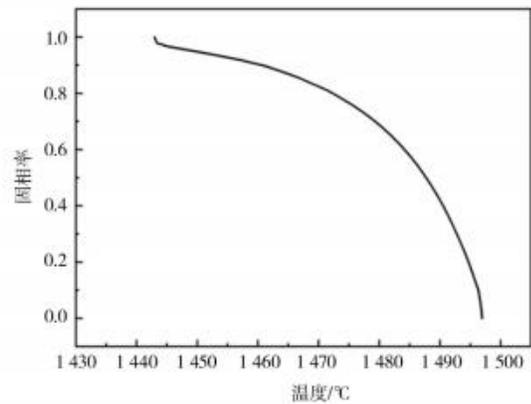
图2 铸造工艺三维模型
Fig. 2 3D model of casting process

表1 ZG08Cr9W3Co3VNbNB化学成分
Tab. 1 Chemical composition of ZG08Cr9W3Co3VNbNB

C	Si	Mn	Cr	W	Co	V	Nb	$w_B/\%$
0.08~0.15	0.6~1.0	0.25~0.5	8.5~9.2	2.0~2.6	3.0~3.4	0.18~0.35	0.01~0.15	



(a) 密度



(b) 固相率

图3 主要热物性参数

Fig. 3 Main thermal physical properties

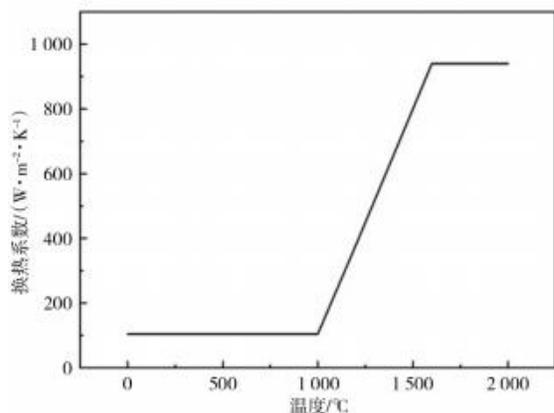


图4 铸件-砂型界面换热系数

Fig. 4 Interface heat transfer coefficient between casting and sand mold

1.3 缩孔缩松预测

本研究应用温度场 (thermal)、温度场+流场 (thermal+fill)、温度场+应力场 (thermal+stress) 三种方式进行了数值模拟计算。如图5 (a)、(b) 和 (c) 所示为三种方式下，试验件凝固约14.5%时刻的气道中心截面温度场，可见计算方式改变了气道壁内部的温度分布情况。温度场+流场 (thermal+fill) 计算方式下，气道壁表面和末端已有部分凝固，尤其末端凝固较多，心部温度场略呈现朝向法兰端的扩张角，有利于补缩。而其他两种计算方式，由于假设整个铸件为瞬时充满状态，所以末端区凝固较少且气道壁接近同时凝固，不利于补缩。

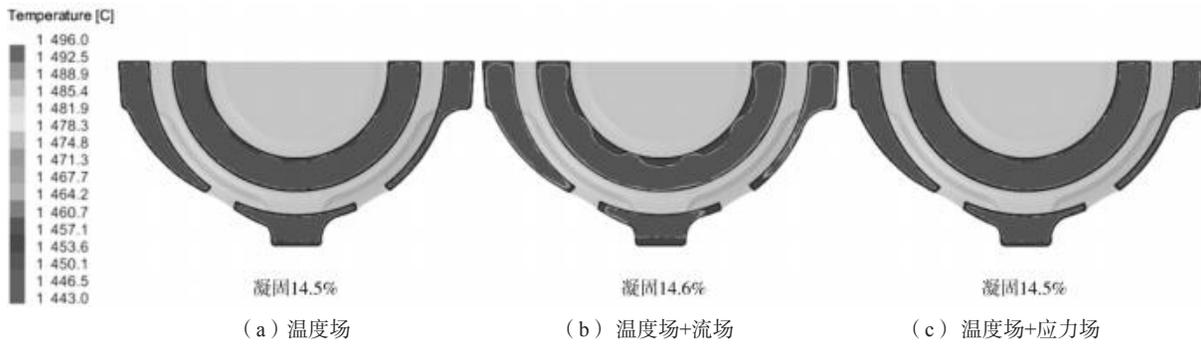


图5 凝固过程温度场

Fig. 5 Temperature fields during the solidification processes

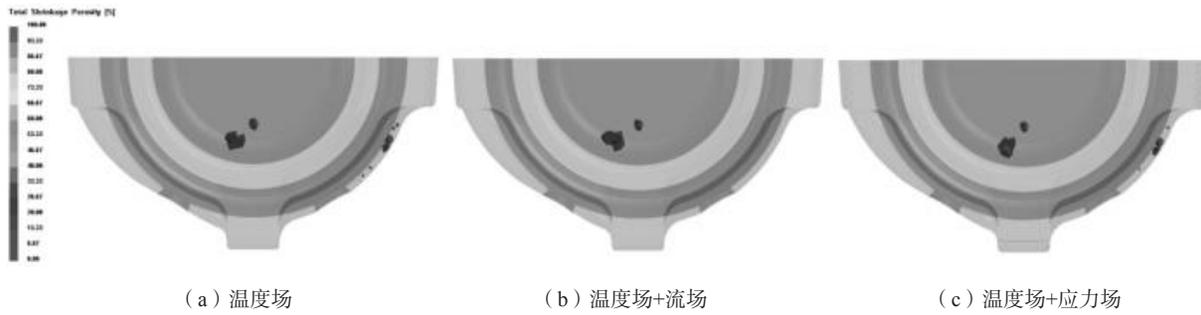


图6 缩孔缩松预测

Fig. 6 Predictions of the shrinkage cavities and shrinkage porosities

如图6 (a)、(b)和(c)所示为三种计算方式下, 试验件凝固结束时的缩孔缩松预测。可见冒口墙内的缩孔缩松分布基本相同, 而无补贴侧气道壁内的缩孔缩松分布有所不同: 其中两种计算方式下预测到了轴线缩松, 而温度场+流场 (thermal+fill) 计算方式下并没有预测到, 这与前述的温度场情况对应较好。由此可见, 计算充型过程对轴线缩松结果影响较大。同时, 无补贴侧气道壁内是否真实存在轴线缩松缺陷还需要经过实测验证。

2 试验结果与分析

2.1 探伤结果

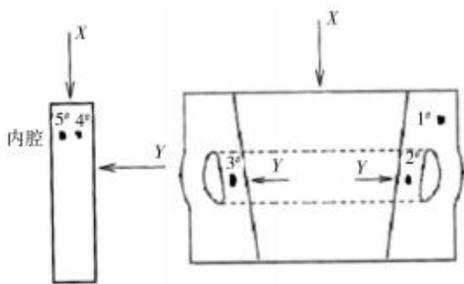
对铸件进行整体探伤, 探伤结果如图7所示, 1#~5#缺陷均位于法兰面以下一定深度位置处。两侧气道壁内并未发现缺陷, 初步验证了温度场+流场 (thermal+fill) 的预测结果。

2.2 解剖试验

为进一步确认探伤结果, 本研究对铸件进行了解剖试验, 获得了对应探伤缺陷位置的解剖块, 以及无补贴一侧气道壁, 编号6#。其中只对2#缺陷块和6#无补贴气道壁进行切片解剖, 其他缺陷块有待后续研究。2#块和6#块实物分别如图8 (a)、(b)所示。按照每片约1 cm厚度进行解剖后, 2#块和6#块部分切片如图9 (a)、(b)所示。

2.3 低倍试验

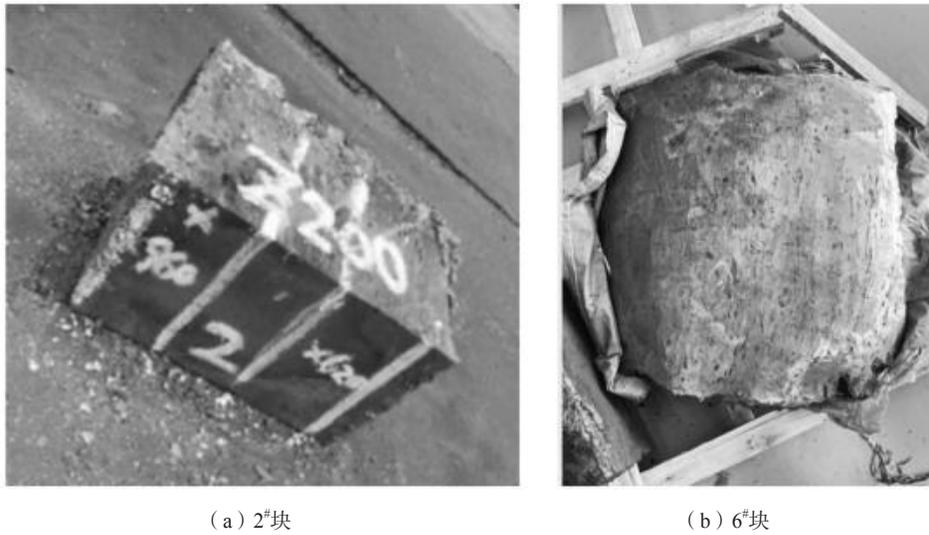
将上述2#块和6#块的所有切片打磨至满足要求后进行低倍试验。其中只有2#块的8#切片出现了缩孔缩松缺陷, 如图10所示, 此切片位置与原探伤缺陷所在范围吻合较好。6#块所有切片均未发现轴线缩松缺陷, 其中的23#低倍试验片如图11所示, 进一步验证了温度场+流场 (thermal+fill) 的预测结果。



序号	距X轴	距Y轴	深度	当量	备注
1#	200-285	310-375	278-285	φ3-φ5最大无底波	不合格
2#	680-900	10-160	91-162	φ3-φ4	不合格
3#	745-810	10-120	67-79	φ2-φ3最大φ6	不合格
4#	130-165	220-280	67	φ5	不合格
5#	180-280	260-480	67-84	φ5-φ6	不合格

图7 探伤结果

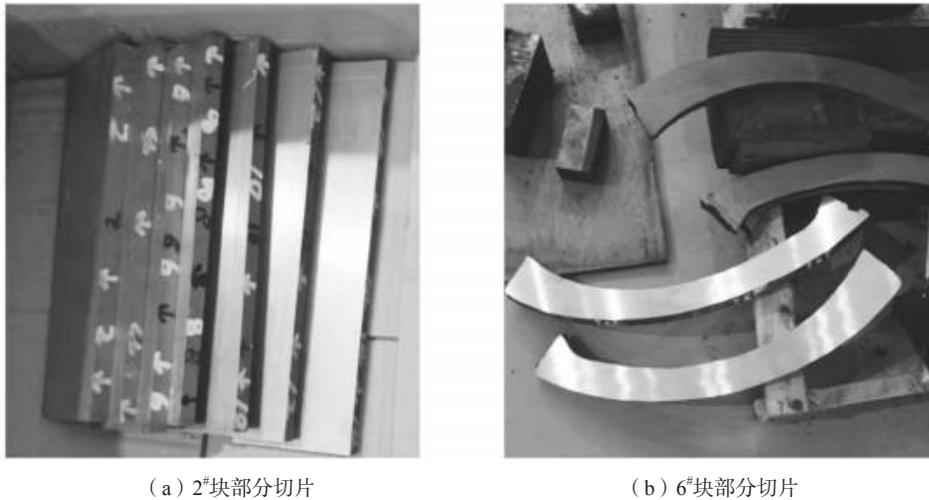
Fig. 7 Result of Ultrasonic flaw detection



(a) 2#块

(b) 6#块

图8 2#块和6#块实物图
Fig. 8 2# and 6# steel block



(a) 2#块部分切片

(b) 6#块部分切片

图9 2#块和6#块的部分切片实物图
Fig. 9 Partial slicies of 2# and 6# steel block

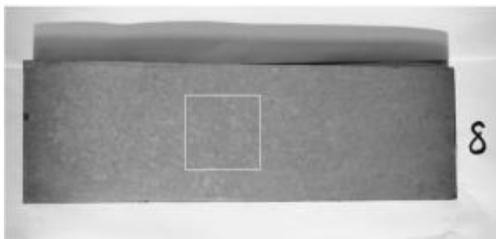


图10 2#块-8#切片低倍照片
Fig. 10 Macrograph of the 8# slice of 2# block



图11 6#块-23#切片低倍照片
Fig. 11 Macrograph of the 23# slice of 6# block

2.4 金相试验

为了更好地观察缩孔缩松缺陷,将上述2#块的8#切片进行取样,取样位置在如图10中所示的白线框内。对图示截面进行金相及显微组织观察。如图12为典型的缺陷组织,根据缺陷形貌可进一步判定为缩松。

图13是图12金相组织的透射电镜照片。该图显示孔洞分布在枝晶间,由各个枝晶的边界形成了孔洞的外形轮廓,有的孔洞有凹面轮廓,无内容物,而有的孔洞有内容物。根据凝固原理,在枝晶向液体纵深推进过程中或等轴晶形成过程中,在固液交错区会遍布

得到充分发展的枝晶骨架。由于各枝晶间相互穿插和相互封锁作用,被分隔于各枝晶之间的孤立液体,冷凝后会在这些区域形成许多分散的小缩孔,小缩孔的综合称为缩松。图10所述缩松位于铸件法兰壁厚的中间位置处,推测其形成的外部原因是由于铸件在凝固过程中,靠近外壁和内壁处的金属液由于冷速较高、凝固较快;而壁厚中间位置处最后凝固,由于补缩不足或补缩通道受阻导致了中间位置处缩松的形成^[7]。

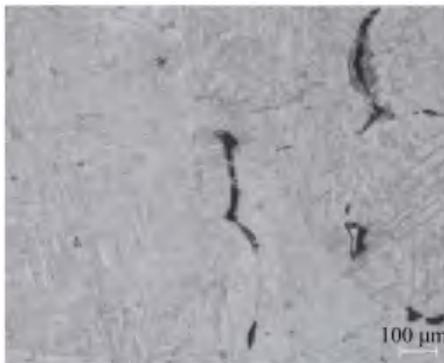
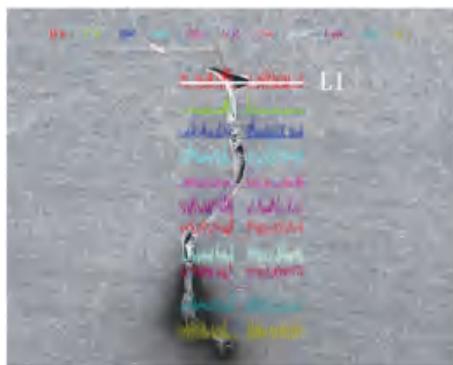


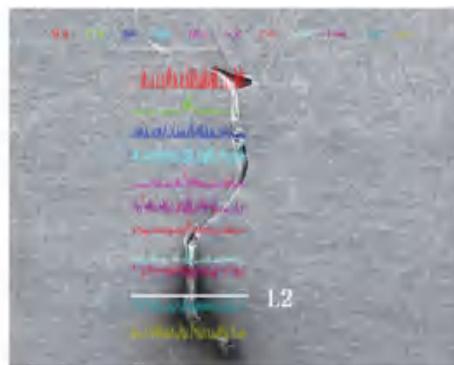
图12 热处理后的ZG08Cr9W3Co3VNbNB合金显微组织 (OM)
Fig. 12 Microstructure of ZG08Cr9W3Co3VNbNB alloy after heat treatment



图13 缩松形貌 (SEM)
Fig. 13 Morphology of the shrinkage porosity (SEM)



(a) L1



(b) L2

图14 缩松线扫描 (SEM)

Fig. 14 Line scanning of the shrinkage porosities (SEM)

3 结论

(1) 在传统工艺设计中,为了避免所研究铸件气道壁内出现轴线缩松缺陷,设计人员通常会给气道壁设置补贴。本研究通过数值模拟计算与实测相结合的方法验证了气道壁内并不存在轴线缩松,无需设置补

贴,为工艺设计提供了依据。
(2) 探伤缺陷均位于法兰面以下一定深度位置处,推测是因为补缩不足引起的。因此可以在法兰面上设置一定高度的随型冒口以满足补缩要求。

贴,为工艺设计提供了依据。

(2) 探伤缺陷均位于法兰面以下一定深度位置处,推测是因为补缩不足引起的。因此可以在法兰面上设置一定高度的随型冒口以满足补缩要求。

参考文献:

- [1] 王福艳. 中国汽轮机技术发展简析 [J]. 山东工业技术, 2017 (5): 264.
- [2] 史进渊, 阳虹, 张宏涛, 等. 我国汽轮机产品的新进展与发展方向 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (7): 542-550
- [3] 朱晓龙, 王文焱, 谢敬佩, 等. 600 MW超临界汽轮机缸体铸造工艺与材料制备 [J]. 铸造, 2025, 74 (1): 82-90.
- [4] 杜延强, 张亚才. 超超临界汽轮机缸体上半铸造工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2017 (z1): 57-59.
- [5] 李振彦, 安红萍, 陈慧琴. 大型锻造用钢锭凝固缩松缺陷的数值模拟 [J]. 太原科技大学学报, 2012, 33 (4): 306-310.
- [6] 张向琨, 石伟, 高国峰, 等. 空心钢锭凝固过程温度场模拟与缩孔、缩松预测 [J]. 铸造, 2000, 49 (6): 344-348.
- [7] 陈宗民, 于文强. 铸造金属凝固原理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 256-259.
- [8] 宋维锡. 金属学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 97-125.

Study on Casting Process Simulation and Shrinkage & Porosity of ZG08Cr9W3Co3VNbNB Cylinder Block

Ji Xiao-xia, CHEN Chu, YI Peng-yue, LI Xiao, ZHU Lin
(CFHI, Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:

The ProCAST software was used to numerically simulate the casting process of ZG08Cr9W3Co3VNbNB cylinder block casting and predict the shrinkage and shrinkage porosity defects under different calculation modes. By using of ultrasonic flaw detection and dissecting test, the distribution positions of the shrinkage and shrinkage porosities were obtained, and the microstructures of the shrinkage porosities were observed and analyzed. Finally, the optimization measures for the process design of the test casting are put forward.

Key words:

calculation modes; shrinkage and shrinkage porosity; dissecting; numerical simulation
