

汽轮机高压内缸铸造工艺优化设计和关键工艺控制

杨建, 曹峤, 宋帮鹏, 刘超, 夏鹏飞, 朱玮

(江苏万恒铸业有限公司, 江苏盐城 224500)

摘要: 超超临界高压内缸是整个汽轮机的核心部件, 采用ZG13Cr9MoVNbN合金铸造成形, 存在气道机械粘砂倾向大等工艺难点。运用MAGMASOFT软件对内缸铸件进行充型凝固过程数值模拟, 并运用软件的DOE工具分析预测不同铸造方案的工艺结果, 结合实际生产需求, 最终确定优化的铸造工艺。生产验证结果表明, 按照优化后的铸造工艺成形的内缸产品内外质量满足客户技术要求。

关键词: 汽轮机; 高压内缸; ZG13Cr9MoVNbN; 铸造工艺; 数值模拟; DOE

随着碳中和目标越来越近, 电力能源生产由燃煤型火电为主, 逐渐形成水电、风电、核电、余热再利用、清洁能源等多元形式。但是热力发电过程的能量转换原理依旧是传统的朗肯循环(即先将化学能转换为高温高压蒸汽的热能, 高温高压蒸汽推动汽轮机将热能转换成机械能, 最后由汽轮机带动发电机组发电), 因此汽轮机是整个热力发电系统的重要组成部分^[1-2]。在整个汽轮机机组中高压内缸又是汽轮机机组核心部件, 工况复杂长时间处于高温高压状态, 质量要求非常高。近几年, 由于能源需求加大, 钢厂产能逐年增加, 余热再利用发电市场需求逐年增加。高压内缸作为汽轮机核心部件工作介质为高温高压水蒸汽, 工作温度650℃, 压力13.5 MPa, 因此对产品内在质量要求严格。该类型的汽轮机具有产品结构复杂、交货周期短的特点。传统的铸造工艺设计、生产模式(依据经验设计工艺, 数值模拟, 实际生产再优化, 改善产品质量)难以适应新型市场环境。作者利用MAGMASOFT软件将整个铸件研发过程可视化, 通过DOE(DESIGN OF EXPERIMENT, 多参数正交实验)分析不同铸造方案的数值模拟结果, 制定出合理的工艺方案, 显著降低了开发周期, 提高了产品质量。

1 工艺方案确定

1.1 产品基本信息

1.1.1 铸件结构参数与技术要求

150 MW超超临界改造机组高压内缸产品结构如图1所示, 外轮廓尺寸1 914 mm × 1 380 mm × 710 mm, 产品单半净重4 614 kg, 最大截面厚度255 mm。材质为

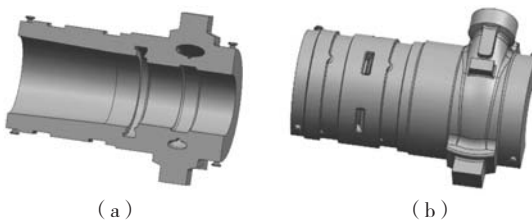


图1 产品结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of product structure

作者简介:

杨建(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事大型铸钢件铸造工艺及材料新技术研发工作。E-mail: yangj@wanheng.net.cn

中图分类号: TG249

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)10-1345-05

收稿日期:

2022-11-07 收到初稿,
2023-05-10 收到修订稿。

ZG13Cr9MoVNbN, 具体化学成分与力学性能要求如表1和表2所示。

产品NDT要求如下: 铸件整体进行100%UT+100%MT

检测, 汽缸中分法兰面、内腔、外部加工面UT 一级区, 其余面 UT二级区。中分法兰面、进气管口面MT 一级区, 其余面MT二级区。

表1 化学成分
Table 1 Chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Nb	N	Al
0.10~0.14	0.2~0.5	0.3~0.8	≤0.020	≤0.010	8.0~9.5	0.85~1.05	≤0.40	0.18~0.25	0.06~0.10	0.03~0.07	≤0.02

表2 力学性能
Table 2 Mechanical properties

项目	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	K_{V2}/J	HB
标准	≥460	630~750	≥15	≥40	≥30	190~250

1.1.2 铸件结构工艺性分析

汽缸内部结构见图2, 结合铸造工艺性分析产品铸造工艺难点如下:

(1) 高压内缸内腔有进气道, 见图2a、b 的标识①、②处, 非加工面开口处气道宽20 mm, 采用砂型铸

造无法成形。采用整体铸造工艺, 通过加工形成20 mm 缝隙。整体铸造工艺导致该处气道砂芯在铸件充型、凝固过程中长期被高温钢液加热, 机械粘砂倾向大;

(2) 汽缸整体壁厚均匀, 见图2c标识③、④、⑤处, 每一处热节相同, 产品自补缩能力差, 无法实现顺序凝固, 增加工艺设计难度;

(3) 该产品材质为ZG13Cr9MoVNbN, 属于高温合金, 裂纹敏感性高, 生产过程控制难度大;

(4) 高压内缸产品中分面没有法兰, 该结构导致产品设置冒口与补缩难度大。

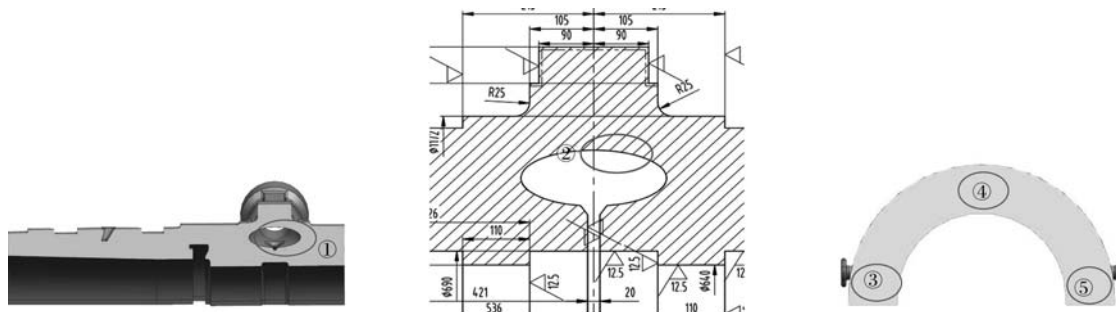


图2 产品剖视图

Fig. 2 Product cutaway view

1.2 铸造工艺方案设计

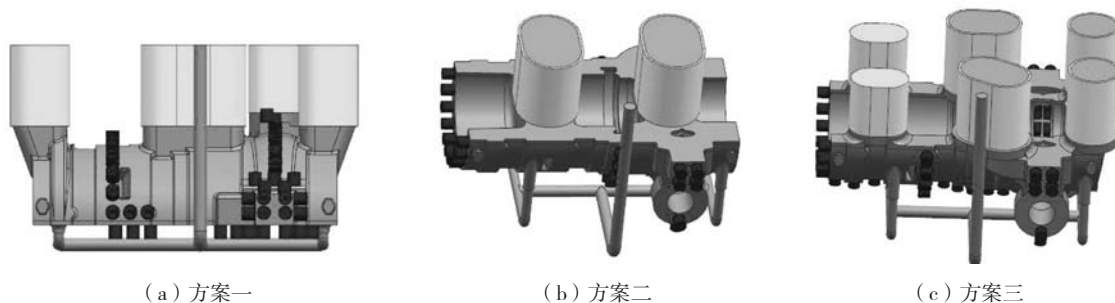
1.2.1 铸造工艺DOE方案

分析产品结构, 结合汽缸生产经验设计出三种工艺方案, 具体如下。

方案一如图3a所示, 将汽缸中分面放置在下型, 冒口放置在汽缸外圆弧顶。该方案优点: 中分面夹渣

缺陷少; 内浇道设置在中分面上, 铺设方便。有利于钢液平稳充型; 冒口放置在弧顶, 中分面位置变成自然末端区, 具有良好的补缩梯度。缺点: 冒口全部在圆弧面上, 冒口切割难度增大。

方案二如图3b所示, 汽缸内腔设置墙冒口。该方案生产优点是冒口设置方便, 补缩效果好。缺点是墙



(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图3 铸造工艺方案示意图

Fig. 3 The schematic diagrams of casting process schemes

冒口增大内腔热节，导致气道芯长期处在高温状态，粘砂倾向大；冒口切割难度大；

方案三如图3c所示，汽缸中分面设置冒口，冒口下方设置补贴，实现产品顺序凝固。该方案生产优点是操作相对简单，冒口容易切割。缺点是中分面没有法兰，冒口补缩效率降低，需要增加补贴；中分面变成浮渣面，容易产生夹渣缺陷；内浇道设置在圆弧处，钢液在充型过程中容易产生紊流。

1.2.2 DOE检验结果分析

利用MAGMASOFT软件中的DOE功能，对三种方案进行数值模拟和结果自动比对分析，筛选出优化的铸造工艺，如图4所示。根据各方案设计的工艺参数，软件完成三种方案数值模拟后，进行多维度的大数据结果显示。高压内缸工况复杂，对铸件的内在质量要求高，缩松、夹渣和气孔缺陷是重点关注点。根据MAGMASOFT软件结果分析方法确定：孔隙率（缩松）、钢液与空气接触时间这两个判据作为关键判据。各判据分析结果如图4，图中红色线为方案一的数值模拟结果，蓝色线为方案二的数值模拟结果，黄色线为方案三的数值模拟结果^[3]。从图4中可以得出结论：同时满足孔隙率最低和钢液接触时间最短只有方案一，结合产品要求和实际生产过程中操作性，确定方案一为最终铸造工艺方案。

依据方案一对产品进行了充型、凝固结果分析，

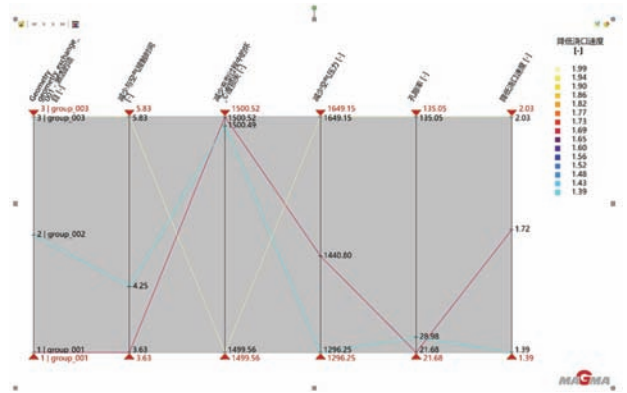


图4 DOE模拟结果

Fig. 4 The result of DOE simulation

具体计算结果如图5和图6所示。图5a为porosity（孔隙率）判据，产品内在质量要求高，判据选定3%进行过滤筛选。结果显示产品内部没有超标缺陷，满足技术要求；图5b Age（追踪粒子判据为钢液充型前10%追踪粒子的流动情况），结果显示，最初进入型腔的钢液主要进入了冒口，减少了产品内部夹渣缺陷；图5c Fstime（凝固时间，不同的凝固时间表征凝固速度）判据。结果显示，产品凝固梯度好，实现顺序凝固；图5d为 SandBurn On（粘砂倾向分析）判据。结果显示，冒口正下方存在粘砂倾向，该处气道为开口结构，通过使用铬矿砂，提高紧实度，即可解决；在封闭气道即图2a标识①处，粘砂倾向小。图6为充型

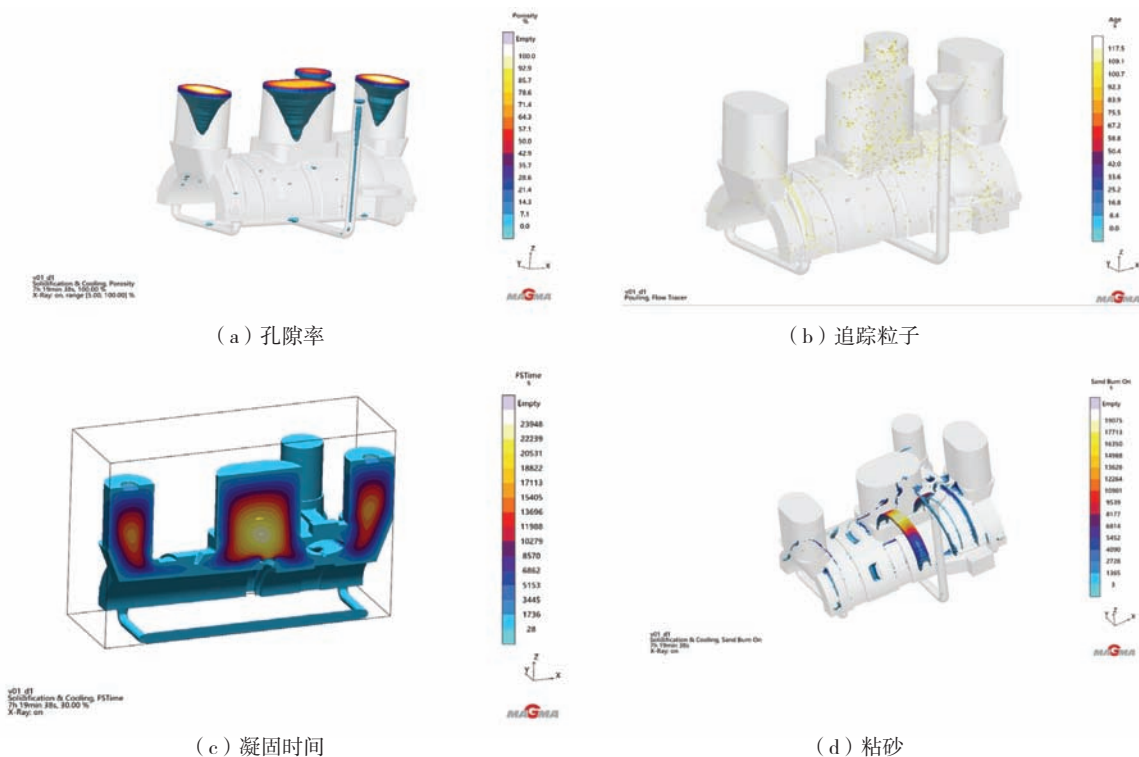


图5 方案一数值模拟结果

Fig. 5 The result of numerical simulation

Absolute Velocity (充型速率) 判据, 结果显示: 内浇道设置在中分面上, 金属液充型平稳、进流均匀。综合上述判据, 确定铸造工艺方案可以满足实际需求。

1.3 化学成分内控和热处理工艺

铸件材料牌号为ZG13Cr9MoVNbN, 属于高合金耐热钢。材料中合金含量高, 铸件在凝固过程中偏析倾向大。其中V元素凝固过程中更容易发生偏析并造成铸件开裂。同时V元素含量高影响材质的焊接性能, 增加产品后序焊接返修难度。为改善材质的焊接性能,

在化学成分设计过程中, 考虑V在中下限控制, 其余C、Si、Mn、Cr等合金元素, 结合铸件的强度、塑性、冲击、可焊性等方面, 选择中线左右。

为解决产品冒口切割时容易开裂问题, 增加了均匀退火工艺, 保证产品成分均匀, 同时消除铸造应力。具体均匀化退火工艺: 450℃打箱, 直接热装炉, 炉温控制在350~400℃, 升温至660℃保温, 随后继续升温1060℃保温, 缓冷至350℃, 出炉进行冒口切割。冒口切割后直接进行热处理, 具体工艺: 1055℃水雾冷却正火+755℃回火。

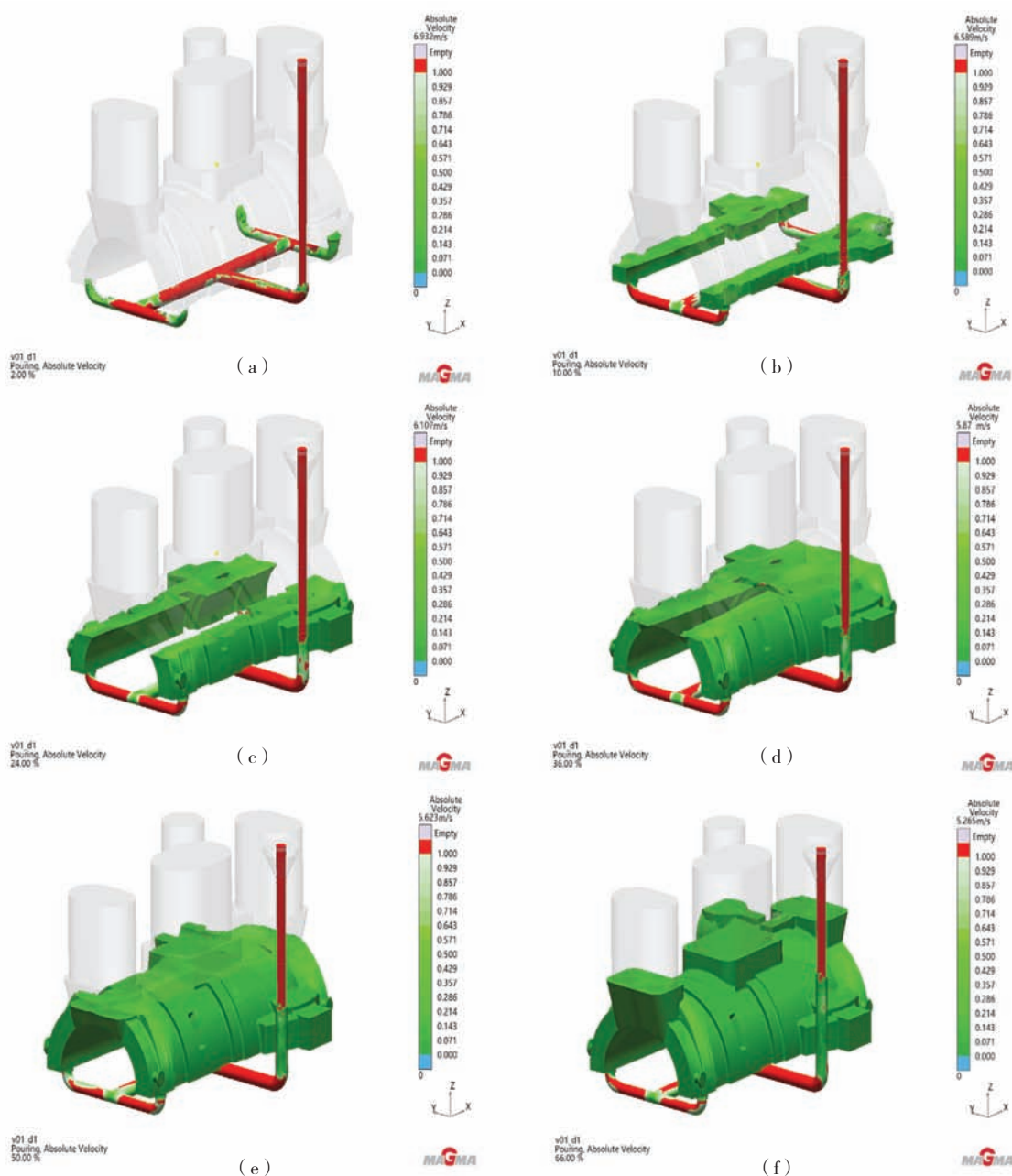


图6 充型过程数值模拟结果

Fig. 6 The numerical simulation results of mold filling process

2 实际生产结果

按照方案一进行实际生产，具体措施如下。浇注系统按照底注式二分法进行铺设，通过计算确定：1个 $\Phi 100$ mm的直浇道，4个 $\Phi 80$ mm的内浇道，保证出流速度在0.46~0.50 m/s；按照工艺全部采用发热冒口作为明冒口，保证补缩效率^[4]；图2中气道砂芯，采用高耐火度铬矿砂制备，砂芯表面使用锆英粉涂料涂刷三遍，涂层保证1.0 mm，提高砂芯抗高温性；砂芯内部设置出气绳，保证浇注过程砂芯内部气体顺利排出，以及带走砂芯浇注过程中产生的部分热量，降低砂芯温度，减轻粘砂倾向^[5]。实际生产验证，采用该工艺设计，产品理化性能，NDT检测结果全部满足客户需求，产品见图7。

3 结束语

(1) 对于无法兰结构的ZG13Cr9MoVNbN汽轮机高压内缸铸件产品，采用中分面作为补缩末端区的工艺方案，实现铸件部分部位自补缩，有效解决了传统铸造工艺方案补缩难度大、气道粘砂等问题，提高了



图7 精加工后产品

Fig. 7 The product of finish machining

生产效率。

(2) 中分面设置在下箱，有利于底注式浇注系统铺设，有效保证钢液平稳充型，解决产品夹渣缺陷，提高中分面质量。

(3) 铸造工艺设计过程中使用MAGMASOFT软件及其DOE功能，显著提高设计效率，提升设计质量。

参考文献:

- [1] 熊一权. 燃煤联合循环发电技术的发展 [J]. 节能, 2002 (1): 7-11.
- [2] 牛玉广, 董竹林. 汽轮机主蒸汽压力优化研究发展综述 [J]. 控制工程, 2020, 27 (11): 1937-1945.
- [3] 冯周荣, 郭小强, 李永新, 等. 600 MW改进机组高压内缸铸造工艺研发 [J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55 (1): 73-76.
- [4] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 146-149.
- [5] 陈国桢. 铸件缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

Casting Process Optimization Design and Key Techniques Control of Steam Turbine HP Inner Cylinder

YANG Jian, CAO Qiao, SONG Bang-kun, LIU Chao, XIA Peng-fei, ZHU Wei
(Jiangsu Wanheng Casting Industry Co., Ltd., Yancheng 224500, Jiangsu, China)

Abstract:

The ultra-supercritical high-pressure (HP) inner cylinder is a core part of the whole steam turbine, which is cast from ZG13Cr9MoVNbN alloy, and existing some technical difficulties such as the tendency of metal penetration in the steam channel. MAGMASOFT software is used to numerically simulate the mold filling and solidification processes of the inner cylinder casting, and its DOE tool is applied to analyze and predict the results brought about by different casting process designs. Finally, an optimized casting process is determined combining with actual production requirements. The production verification results show that the internal and external quality of the inner cylinder cast with the optimized casting process design meets the customer's technical requirements.

Key words:

steam turbine; HP inner cylinder; ZG13Cr9MoVNbN; casting process; numerical simulation; DOE