

CB2 中压内缸铸造工艺设计分析与优化

胡志强, 杜延强, 许 诺

(中国一重 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

摘要: 汽轮机中压内缸铸件壁厚大, 内腔汽道部位狭窄、易粘砂。分析了初始铸造工艺出现缩松缺陷的原因, 并运用MAGMA软件对凝固过程进行模拟, 有针对性地优化了铸造工艺方案。经过优化后的铸造工艺进行生产验证, 铸件质量良好, 满足技术要求, 与初始方案对比, 铸件工艺出品率提高近20%。

关键词: CB2铸件材料; 中压内缸; 工艺优化

汽轮机作为火力厂的核心设备之一, 其行业发展重点在于如何提高汽轮机机组的热效率, 而热效率的提升与主蒸汽和再热蒸汽温度息息相关。主蒸汽和再热蒸汽温度由580℃提高到620℃, 其热效率提高4%~6%左右。2013—2018年的五年间, 620℃超超临界机组得到大力发展, 但随着环境保护和节能减排的要求不断提升, 世界各国火电机组开始追求高效、清洁、低排放的发电技术。具有优良的导热性、低的热膨胀系数、良好的抗晶间腐蚀和抗应力腐蚀性能的CB2材质逐渐替代传统12%Cr马氏体耐热钢, 成为第二代超超临界汽轮机大型关键铸钢件选材^[1-2]。

但目前CB2材质的大型铸钢件, 例如高压进气缸、中压内缸和主汽调节阀壳等, 还存在铸件质量控制不稳定等问题。本文通过对CB2中压内缸原铸造工艺下缩松缺陷产生原因的分析, 采用墙式补贴与墙冒口的铸造工艺方法, 解决了T型台与管口处的缩松问题, 利用数值模拟技术预测其质量, 并通过实际生产进行验证, 最终得到合格产品, 达到提质降本的目的^[3-4]。

1 中压内缸结构特点与技术要求

1.1 结构分析

中压内缸具体结构如图1所示, 轮廓尺寸2 420 mm×1 674 mm×1 268 mm, 上半净重8 430 kg, 下半净重8 570 kg, 最大壁厚300 mm, 最小壁厚85 mm, 内部环带多, 半径各不相同, 控制难度大, 整体质量要求严格。

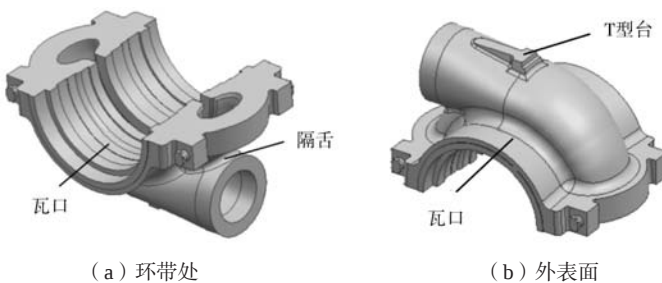


图1 中压内缸立体模型

Fig. 1 Stereoscopic model of the medium pressure inner cylinder

1.2 材质分析

中压内缸材质为ZG13Cr9Mo2Co1VNbNB-II, 简称CB2。化学成分要求见表

作者简介:

胡志强(1995-), 男, 工程师, 从事大型铸钢件的铸造工艺研发及其数值模拟。电话: 18304094696, E-mail: 1940258615@qq.com

通信作者:

许诺, 男, 高级工程师。电话: 15822048090, E-mail: promise18@163.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

07-0987-06

收稿日期:

2024-02-26 收到初稿,

2024-05-11 收到修订稿。

1. 成品分析时, 要求进行杂质与气体含量分析, 其中 $\text{Cu} \leq 0.10\%$ 、 $\text{As} \leq 0.025\%$ 、 $\text{Sb} \leq 0.001\%$ 、 $\text{H} \leq 7 \times 10^{-6}$ 、 $\text{O} \leq 9 \times 10^{-5}$, 要求严格。

力学性能试块要求在本体上附铸, 热处理过程不

允许与本体断开。经过热处理后切掉试块, 加工试样进行力学性能检测, 指标要求如表2所示。另外要求高温持久强度, $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 125 N/mm^2 下大于100 h。

表1 中压内缸化学成分要求

Tab. 1 Requirements for chemical composition of the medium pressure inner cylinder

$w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.11~0.14	0.20~0.30	0.80~1.00	≤ 0.015	≤ 0.010	9.00~9.60	1.40~1.60
V	Ni	Nb	N	Al	Co	B
0.18~0.22	0.10~0.20	0.05~0.07	0.015~0.030	≤ 0.02	0.90~1.10	0.008~0.013

表2 力学性能要求

Tab. 2 Mechanical properties requirements

R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	KV_2/J	硬度HB
630~750	≥ 500	≥ 15	≥ 40	≥ 27	190~260

1.3 无损探伤

中压内缸100% UT, 其中法兰与汽道区域按1级验收。探伤灵敏度: 加工面 $\Phi 2.4\text{ mm}$, 毛坯面 $\Phi 4\text{ mm}$; 中压内缸所有表面做MT。

2 中压内缸技术难点分析

2.1 材料分析

CB2材料密度为 7.8 g/cm^3 , 固相线 $1482\text{ }^{\circ}\text{C}$, 液相线 $1510\text{ }^{\circ}\text{C}$, 化学成分复杂, 合金元素多, 含有污染元素Co、易氧化元素B和元素N, 而且成分要求范围窄。因此虽有较高的持久强度和热强性能, 但钢液流动性差、高温氧化性强, 易产生夹渣缺陷, 加之缸体的底部T型台、隔舌位置、中分面法兰及汽道相贯处, 热节较为分散且孤立, 补缩难度大。材质中含V量较高, 裂纹倾向大。主要体现为冷裂纹, 因此气割、碳刨、焊接必须预热, 预热温度 $\geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

铸件热处理要求: 正火温度 $\geq 1040\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最终去应

力或最终回火温度 $\geq 730\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经热处理后的室温组织为板条马氏体。有资料表明, 如果铸造缺陷较多, 后续补焊带来的多次回火过程, 会导致硬度明显降低, 且强度会很难满足技术要求^[5], 因此合理的铸造工艺设计避免清缺补焊的同时, 也能保证强度的富余量。

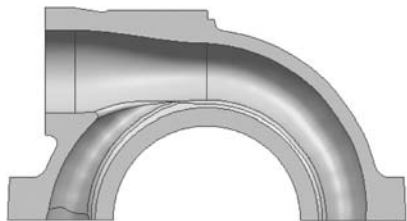
2.2 结构分析

(1) 该中压内缸整体近似于“C”型, 法兰壁厚大, 内腔汽道位置壁厚变化小, 多为均匀壁厚, 壁厚为 85 mm , 如图2所示, 此种结构自身近似同一几何模数, 补缩梯度差, 凝固过程中难以进行自补缩, 不能实现顺序凝固, 易产生轴线缩松。

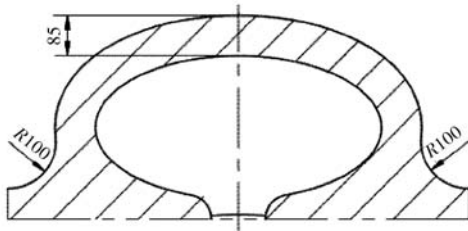
(2) 汽道开口部位(加上加工量后)仅有约 104 mm , 铸件浇注后, 汽道砂芯完全处于钢液的包围中, 排气性差, 不易冷却, 极易产生粘砂甚至烧结导致无法清砂; 同时, 汽道内腔截面型线随截面角度不同而变化, 汽路结构较为复杂, 且较为封闭, 撞芯、下芯操作较为复杂, 下芯过程中砂芯不易固定, 极易偏芯, 型腔尺寸检查较为困难。

3 中压内缸铸造工艺设计与数值模拟

CB2材质特殊, 其裂纹敏感性大, 应尽量避免大面积补焊, 以防裂纹产生与延展, 加之表面与内部质



(a) 汽道剖面



(b) 汽道壁厚

图2 汽道结构图

Fig. 2 Structure diagram of steam passage

量要求严格,因此设计铸造工艺时应考虑冒口放置位置为加工面,采用加工方式去除冒口根有利于防止裂纹产生。另外通过数值模拟手段验证铸造工艺的合理性,减少缺陷的产生,从而避免清缺补焊带来的裂纹问题。

3.1 铸造工艺方案设计

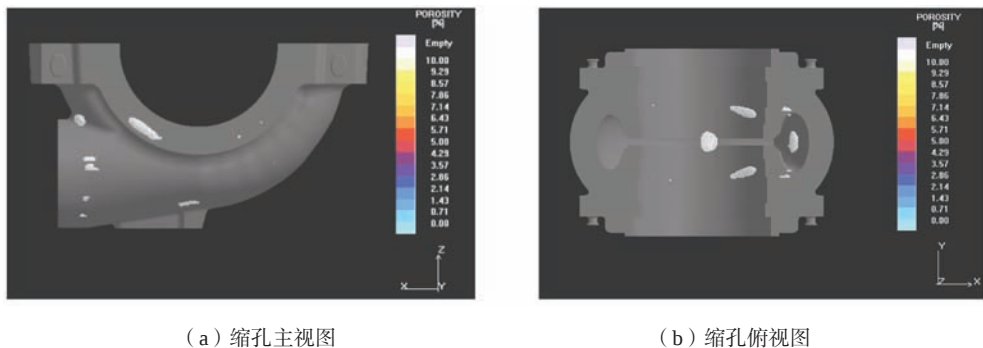
铸造工艺设计中的分型面位置决定着铸件的尺寸精度与造型效率^[6-7]。该中压内缸的法兰面为最大壁厚位置,而且又是加工面,采用其为分型面,铸件整体朝下的铸造工艺方案。不仅利于补缩厚大热节,而且利于切割冒口。同时铸件整体都处于下箱,方便造型与合箱。

采用UG软件建模,将立体模型导入MAGMA模拟软件中,网格划分数量为2 000万,对无冒口铸件直接进行凝固模拟,缩孔模拟结果如图3所示,缩孔位置主

要集中于瓦口、隔舌、T型台等位置。

根据缩孔位置,设计铸造工艺方案:(1)采用滚圆法,在法兰上部设计随型明冒口,利用大气压力和冒口自身重力的双重作用提高铸件钢液补缩能力,并在冒口下增设人为补贴,用于补缩法兰及铸件主体;(2)汽道外表面增设长条补贴以补缩汽道下部;(3)汽道管口上方采用暗冒口对隔舌部位进行补缩;(4)在汽道内采用暗冒口对T型台位置进行补缩,并在外部设置合理厚度的外冷铁;(5)利用不同规格的外冷铁进行分区,结合明暗冒口进行补缩。

造型方法上,采用“主型+吊芯”的造型方法,本体型腔不需要制作其他芯盒,无需设置拔模斜度,个别影响起型的结构采用泡沫与活料结合的方式,以达到内腔砂芯一体化撞制,提高砂型的尺寸精度。最终铸造工艺方案,如图4所示。

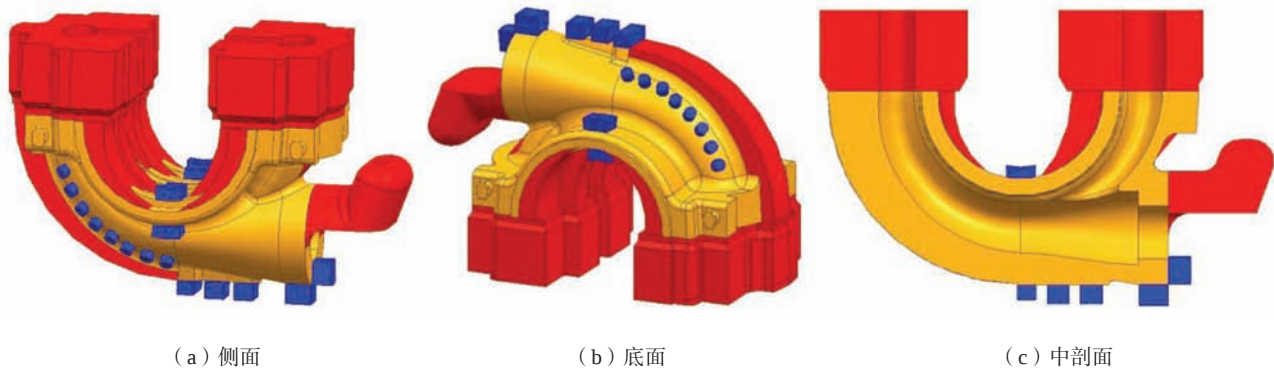


(a) 缩孔主视图

(b) 缩孔俯视图

图3 无冒口铸件的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of casting without riser



(a) 侧面

(b) 底面

(c) 中剖面

图4 初始铸造工艺

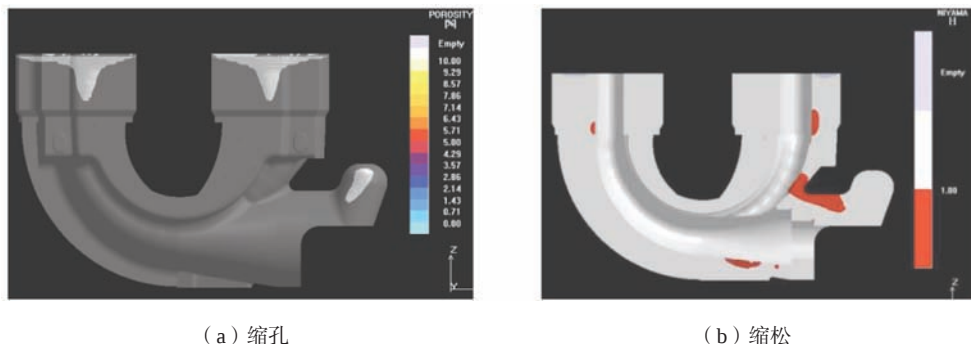
Fig. 4 Initial casting process

3.2 铸造工艺数值模拟

该铸件结构复杂,采用MAGMA软件对铸件凝固过程温度场、缩孔进行模拟,以验证铸造工艺设计的可行性,降低实际生产过程中的缺陷风险,为工艺优化提供有效的数据支撑。将铸造工艺模型中的各部件

转化为STL文件,依次导入MAGMA软件中划分网格,网格数量为2 000万。模拟结果如图5所示,可看出铸件本体无缩孔缺陷,测量明冒口安全高度为80 mm。

而缩松模拟结果显示,管口上方与T型台位置出现大面积块状缩松集中。根据无损探伤要求,法兰与



(a) 缩孔

(b) 缩松

图5 初步工艺数值模拟结果

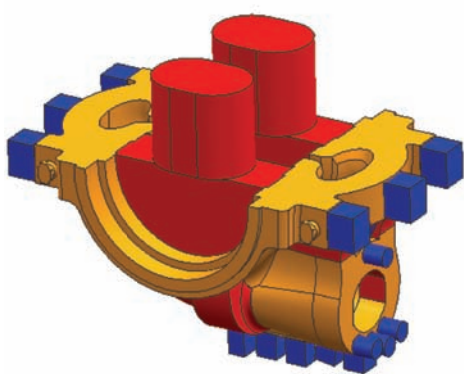
Fig. 5 Numerical simulation results of initial casting process

汽道区域质量要求严格,按1级验收,此种缩松模拟结果必定会影响产品质量。分析其原因,汽缸底部虽增设了人为补贴,但由于“T”型台厚大,导致壁厚变化大,此处孤立热节没有完全消除;另一方面,由于汽缸自身结构,暗冒口无法设置在管口的正上方,并且为了避免暗冒口对法兰处的热影响,暗冒口要向远离汽缸管口一侧偏移,导致补缩距离加长,极大地削弱暗冒口的补缩效果。

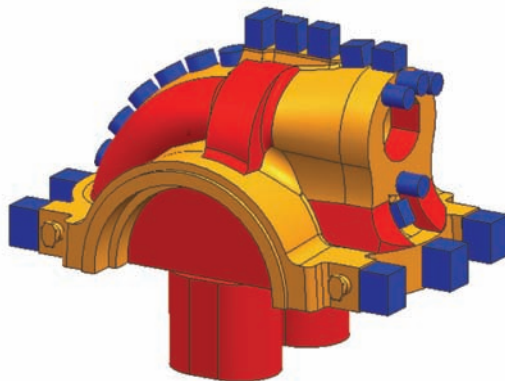
3.3 铸造工艺方案优化

优化方案采用墙式补贴与墙冒口方案。如图6所示,汽缸环带处设置紧贴内腔壁的“墙式补贴”,其

上面设置冒口,使热节集中,明冒口通过墙式补贴补缩整体,并且此种呈“D型”补贴,相当于内腔拉筋,可防止变形;内缸外壁两侧上增设人为补贴用于形成对“T”型台的补缩通道,相比初始方案补缩通道距离短,作用更明显;在法兰与管口之间增设补贴,形成补缩通道;补缩梯度差的内缸汽道均匀壁厚处,采取滚圆法设计人为随型补贴;汽道外侧设有分区冷铁,这样补贴、冒口以及冷铁的配合使用,形成鲜明的补缩通道,以补缩汽缸分散而独立的多个热节,可有效避免初始方案中“T”型台与管口缺陷。另外,汽道外侧与铸件主体的圆角过渡部位设置割筋,用于控制裂纹产生。



(a) 墙式补贴与墙冒口



(b) 外表面补贴

图6 优化后的铸造工艺

Fig. 6 Optimized casting process

优化工艺方案的模拟结果如图7所示,缩孔都存在墙式补贴和冒口中,而且距离环带位置距离较远,铸件本体无缩孔缺陷;温度场结果表示整体呈顺序凝固趋势,外冷铁的使用起到了效果;从缩松模拟结果上看,并没有初始铸造工艺方案中的大块状缩松产生,大部分为非密集性点状缩松,这在实际生产中可以忽略。

4 中压内缸制造过程关键控制点

4.1 冶炼方面

冶炼工艺为“电炉粗炼+LF精炼+VD真空精炼”。化学成分按照表1进行控制,钢液中V、Nb、Cr等元素能和N形成稳定的氮化物,但这些元素与氧的结合能力大于和N的结合能力,另外B元素和O亲和力也很强,

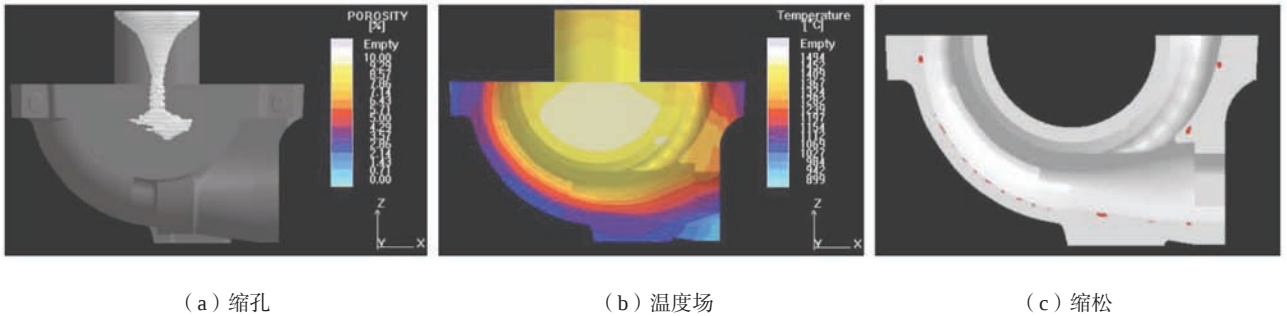


图7 优化方案数值模拟结果
Fig. 7 Numerical simulation results of optimized casting process

因此为增加钢液中N的溶解度以及控制B的含量，需要严格脱氧。由于Al含量控制严格，因此Al作为终脱氧剂要适量，控O的同时又能提高合金收得率。钢液重23 500 kg，出钢温度1 580~1 590 ℃。

4.2 造型方面

中压内缸所有表面都需进行UT与MT检测，特别是汽道区域无损探伤质量要求严格，而汽道一旦粘砂严重，清砂过程中会对质量产生极大影响。为避免汽道粘砂问题，采用CO₂硬化配合唯科新铬铁矿砂的方法撞制内腔芯，汽道芯内部采用空心钢管拼焊成的整体芯骨，钢管周身钻孔、外缠空心尼龙绳，有利于排气，通过充入CO₂气体的时机，控制砂芯硬化时间，整体芯骨利于固定砂芯，防止漂芯；砂芯采用定位芯头与型腔检查样板相结合的方式保证下芯的准确性。

由于本厂涂料采用醇基锆英粉涂料，因此为避免表面气孔的产生，型腔与吊芯的涂料涂刷时，至少涂刷4遍涂料，每遍涂刷后需点燃，干透后打磨光滑才能涂刷下一层。

4.3 浇注过程与清理方面

采用单包浇注，设计3层浇注系统，每层2道内浇口，其中最底层为底返式，其余两层为侧进式。底返式浇注系统有利于钢液平稳缓慢流动及上升，不会产

生强烈冲击，由于造型方向下部壁厚小，液面上升时间短，很快到达第二层侧进式浇注系统高度，可以减少飞溅与卷气现象产生^[8]。

为防止浇注过程中的合金氧化问题，浇注前30 min向型腔内充满氩气，用便携式氧气检测仪测定型腔氧气浓度在5%以下，并在整个浇注过程中，利用氩气保护环与吹氩钢管实现实时氩气保护。

根据CB2材质液相线1 510 ℃，以及相关生产经验，设置浇注温度为1 545~1 560 ℃。由于材质含V，易产生裂纹，因此要严格控制保温时间，避免提前打箱产生裂纹。起坑后按专用割冒口工艺进行预热后，再出炉热割冒口及补贴，整个切割过程中铸件温度不得低于300 ℃。

5 生产验证

经过保温打箱，该中压内缸在清理过程中，汽道内腔未出现粘砂烧结现象；粗加工和精加工后UT检测未发现缩松、裂纹等铸造缺陷；尺寸检验也符合图纸要求。经热处理后，性能检验合格，检测结果如表3所示。此次产品满足技术要求，说明优化铸造工艺的墙冒口及补贴设计、冷铁放置、防粘砂与排气措施都是有效的，制造后铸件如图8所示。

表4为优化方案与初始方案对比情况，墙式补贴与

表3 力学性能检测结果
Tab. 3 Testing results of mechanical properties

R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	Z/%	KV_2 /J	硬度HB	650 ℃高温持久/h
710	554	21	59	64/57/60	228	131

表4 两种方案对比情况
Tab. 4 Comparison of two schemes

方案	液重/kg	工艺出品率/%	净重与浇注重量的比值/%
初步方案	23 500	40.5	35.9
优化方案	18 500	59.5	45.6



图8 实际生产的中压内缸

Fig. 8 The actual production medium pressure inner cylinder

墙冒口的使用,既避免了铸造缺陷的产生,浇注重量又减少5 000 kg,提升铸件工艺出品率近20%,净重与浇注重量的比值提升近10%,降低了生产成本。

6 结论

(1) 随型冒口与墙式冒口两种工艺的模拟结果表明,采用墙式补贴与墙冒口能更有效解决中压内缸热节分散、暗冒口补缩效率低的铸造工艺问题,显著降低缩松与缩孔缺陷的产生,提高中压内缸的产品质量。

(2) 中压内缸铸造工艺的优化改进,将铸件工艺出品率提升了近20%,显著降低了生产费用。

参考文献:

- [1] 田晓,刘德来,徐慧,等. 620 ℃高效火电机组用CB2铸钢件材质特性与质量状态分析 [J]. 材料导报, 2023, 37 (14): 180-187.
- [2] 曹登云,董治中,王旭明,等. 热处理工艺对CB2耐热钢组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (7): 75-77.
- [3] 郭小利,李成志,赵健东,等. CB2中压主汽调节联合阀铸造工艺研发 [J]. 铸造设备与工艺, 2023 (1): 20-23.
- [4] 郑慧. CB2汽轮机缸体铸钢件型砂的使用及控制要点 [J]. 铸造, 2020, 69 (5): 490-495.
- [5] 马志宝. 620 ℃等级超超临界机组CB2缸体铸件补焊技术 [J]. 焊接技术, 2017, 46 (7): 35-38.
- [6] 杨清,李爽,王旭,等. 大型框架铸钢导轨铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1163-1168.
- [7] 马聪,杨梦馨,程强,等. 某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (5): 582-587.
- [8] 唐方艳,梅益,薛茂远,等. 大型机床底座铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 103-108.

Design Analysis and Optimization of Casting Process for CB2 Medium Pressure Inner Cylinder

HU Zhi-qiang, DU Yan-qiang, XU Nuo

(CFHI Tianjin Heavy Equipment Engineering Research Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:

The wall thickness of the medium pressure inner cylinder of steam turbine is large, the inner cavity is narrow, which can easily cause burnt on sand. The causes for the occurrence of shrinkage defects in the initial casting process were analyzed, and the solidification process was simulated using MAGMA software, and the casting process was optimized in a targeted manner. After the optimization of the casting process is verified, the quality of the produced casting is good and meets the technical requirements. Compared with the initial scheme, the process yield of casting is increased by nearly 20%.

Key words:

CB2 casting material; medium pressure inner cylinder; process optimization
