

面向中箱体类铸件的高效低成本 双层浇注工艺

邢继伦¹, 杨国新¹, 王长春¹, 张荣焜¹, 杨超^{2, 3}

(1. 徐州徐工精密工业科技有限公司, 江苏徐州 221600; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;

3. 上海交通大学内蒙古研究院, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要: 中箱体类铸件是一种机械连接件, 在工业机械领域尤其风电行业中被广泛应用, 但是其主流的单层浇注工艺在规模生产过程中存在工艺出品率低、生产效率不高和制造成本高等难题。本研究基于自动化造型线开发了一种针对中箱体类铸件的新型双层浇注工艺, 并与单层浇注工艺进行了对比研究。通过多批次实际生产验证, 利用该双层浇注工艺生产的中箱体类铸件的工艺出品率提高10.7%, 铸件生产效率由单层浇注工艺的60件/h, 提高到280件/h, 吨铸件节约成本1 410元, 且铸件质量全部满足技术标准。这种新型浇注工艺为中箱体类铸件高效且低成本的规模生产提供了新的工艺方法, 对风电等工业机械领域的可持续发展具有重要意义。

关键词: 中箱体类; 浇注系统; 铸造工艺; 工艺出品率

作者简介:

邢继伦(1985-), 男, 学士, 工程师, 主要从事铸造工艺设计研究工作。E-mail: xingjilun85@163.com

通信作者:

杨超, 男, 博士, 助理教授。E-mail: yangchao1987@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)09-1271-05

基金项目:

内蒙古自治区上海交通大学科技合作专项“科技兴蒙”上海交通大学行动计划(2023XYJG0001-01-01); 徐工精密-上海交通大学联合攻关项目“基于人工智能技术的铸件成本优化”(SA0501495)。

收稿日期:

2024-12-05 收到初稿,
2025-01-03 收到修订稿。

中箱体类铸件作为机械连接件, 在工业机械领域尤其是风电行业中扮演着重要角色^[1]。随着国际工业水平的不断进步, 对连接件的需求量日益增多^[2]。这类铸件以其几何尺寸较小、结构简单及铸件壁厚均匀而著称, 同时对内在质量的要求也较高^[3]。

国内外在中箱体类铸件的铸造工艺方面已取得显著进展^[4]。在国际上, 研究者们设计了单层浇注工艺, 并利用小颈保温冒口和保温覆盖剂加强补缩效果, 有效减少了铸件的缩孔缩松缺陷^[5]。在国内, 研究者们针对大型风力发电机组中箱体铸件的结构, 从分型面设计、砂芯设计、浇注系统设计和冷却系统设计等方面, 不断优化单层浇注工艺, 解决了厚大断面球墨铸铁中箱体铸件规模生产中的质量控制问题^[6]。

然而单层浇注工艺充型效率低, 特别是在异形双层中空薄壁铸件的浇注中, 单层浇注系统无法满足充型效率^[7]; 同时单层浇注工艺会导致铸件的温度场控制不够精确, 使得铸件上下或不同位置的温度分布不均, 影响了铸件的整体凝固和补缩效果^[8]。为了提高整体凝固和补缩效果, 需要采取增加冒口数量和尺寸、扩大浇道等措施, 但是会大幅降低工艺出品率、增加铁砂比以及进一步降低生产效率^[9]。

在追求工艺出品率和生产效率提升以及制造成本下降(“两升一降”)的三重压力下, 对中箱体类铸件的铸造工艺进行深入分析和持续改进显得尤为重要。金玉刚等人采用分隔砂芯, 在一个铸型内制作出两层铸件, 设计了一种双层铸造工艺, 该工艺可以降低铸件冷却速度, 同时通过调整隔件用的砂芯厚度, 还可以将铸件原来很小的补缩通道扩宽, 明显提高了生产效率^[10]; 赵颖烈针对薄壁小件在水平黏土砂造型线工艺出品率不高、型砂利用率偏低等问题, 设计出中间用砂芯隔开, 上下各一层铸件的双层铸造工艺, 在该工艺方案下铸件尺寸检测合格, 批量生产废品率在4%以下^[11]; 聂爽等人采用双层浇注工艺生产刹车盘类铸件, 降低了砂铁比, 提高了工艺出品率和生产效率, 铸件质量符合标准要求^[12]。上述研究表明双层浇注工艺在“两升一降”方面具有一定的优势。但是目前针对中箱体类铸件的相关研究还未开展, 具体的高效且低成本工艺设计方法未见报道。

本研究基于自动化造型线开发一种针对中箱体类铸件的新型双层浇注工艺,提高补缩效果和充型效率,减少了浇冒系统残留,大幅提高了铸件工艺出品率和生产效率,显著降低了铸件制造成本,且铸件质量全部满足技术标准。这种新型浇注工艺为中箱体类铸件高效且低成本的规模生产提供了新的工艺方法,对风电等工业机械领域的可持续发展具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 中箱体类连接件结构

以如图1所示的中箱体类连接件为研究对象,一端为大法兰,一端为小法兰,通过在两端绞螺纹孔来起连接作用。铸件全高 $H_1=120\sim 160$ mm,外径

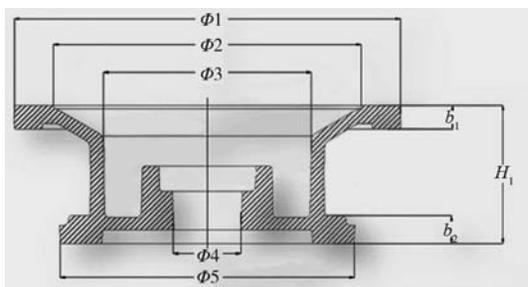


图1 中箱体类连接件结构图

Fig. 1 Structure diagram of connecting part for middle box type

$\Phi_1=380\sim 420$ mm, 平均壁厚一般为17~25 mm, 铸件单重 $G=25\sim 35$ kg。

1.2 中箱体类连接件的技术标准

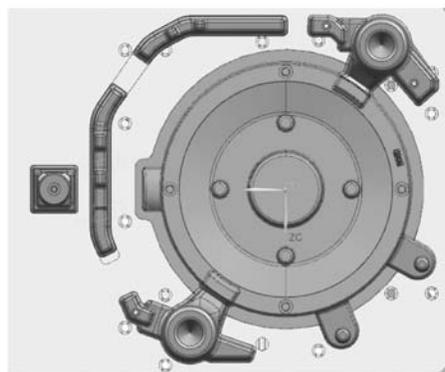
材料力学性能^[13-15]: 铸件材质为QT400-18AL的低温型球墨铸铁, 抗拉强度 $R_m \geq 400$ MPa (min.), 屈服强度 $R_{p0.2} \geq 240$ MPa (min.), 伸长率 $A \geq 18\%$ (min.), 布氏硬度HBW 130~175。

金相组织^[16-18]: 铸件基体组织为铁素体基体, 珠光体含量 $\leq 10\%$, 石墨形态主要为V或VI型, 球化率 $\geq 90\%$, 石墨大小4-7级。

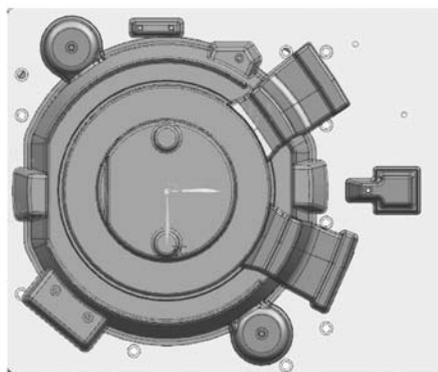
化学成分^[19-21]: 3.3%~3.5% C, 1.03%~1.08% Si, $\leq 0.35\%$ Mn, $\leq 0.05\%$ P, $\leq 0.012\%$ S, 0.35%~0.06% Mg, $\leq 1\%$ Ni, $\leq 0.2\%$ Cu。

1.3 自动化水平造型线单层工艺

采用日本Sinto自动化水平线FCMX- II 式造型机, 砂箱尺寸609 mm \times 508 mm \times 200 mm, 每箱1件, 其型板布局见图2。砂型采用湿型砂制备, 砂芯采用冷芯盒树脂砂制备。浇注系统采用圆柱形直浇道, 阶梯型横浇道, 两处内浇口随铸件形状设置; 热冒口设置在内浇口处, 铁液经热冒口进入铸件型腔, 两处内浇口旁边分别设置排气针, 大法兰放置于上砂箱, 小法兰放置于下砂箱。



(a) Sinto线上模



(b) Sinto线下模

图2 Sinto线单层浇注工艺

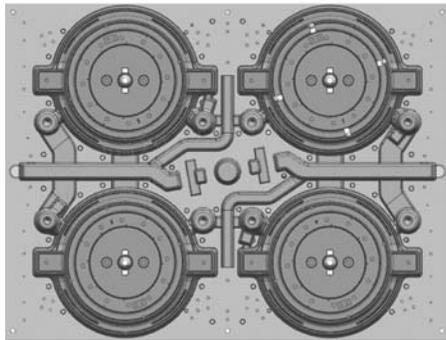
Fig. 2 Single layer casting process on Sinto line

1.4 自动化静压造型线单层工艺

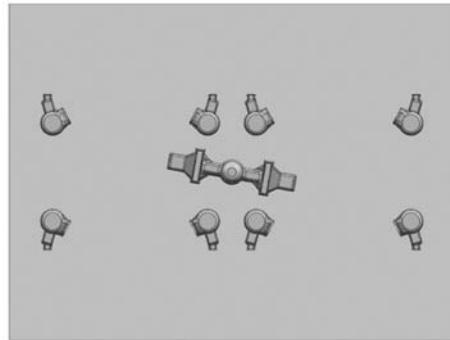
采用德国HWS EFA-SD6.5型静压造型线, 砂箱尺寸1 300 mm \times 900 mm \times 350 mm, 每箱4件, 其型板布局见图3。外形和砂芯所用原料同水平线相同。浇注系统同样采用圆柱形直浇道, 铁液经由热冒口进入铸件型腔。铸件小法兰端放置于顶部, 铸件整体置于上砂箱。

1.5 自动化静压造型线双层工艺

双层浇注工艺就是在原单层浇注工艺的基础上, 在下模布置4模相同外模, 将两个连接件的大法兰面重叠在一起, 上下箱各4件。受限于砂箱尺寸(Sinto上下砂箱总高400 mm, 双层工艺高度400 mm), 双层浇注工艺只能在HWS线上实现。下芯时相当于将原有砂芯翻转180°下入下模。浇注系统和尺寸稍作改变, 增加下模的内浇口即可, 见图4。



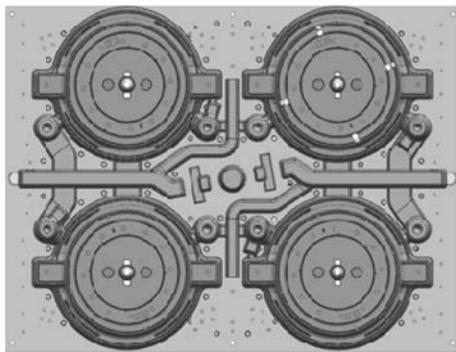
(a) HWS线单层浇注工艺上模



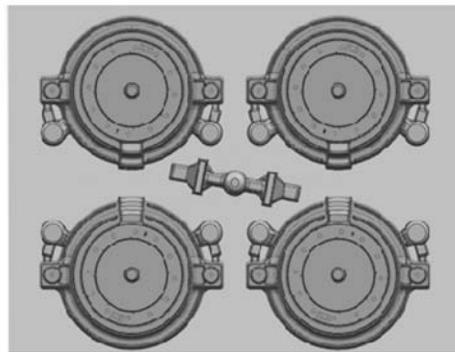
(b) HWS线单层浇注工艺下模

图3 HWS线单层浇注工艺

Fig. 3 Single layer casting process on HWS line



(a) HWS线双层浇注工艺上模



(b) HWS线双层浇注工艺下模

图4 HWS线双层浇注工艺

Fig. 4 Double layer casting process on HWS line

2 试验结果及讨论

2.1 单层工艺

采用水平自动化造型线单层工艺制备出的铸件单重18.6 kg, 浇冒系统总重20.2 kg, 浇注重量38.8 kg, 工艺出品率47.9%, 生产效率为60件/h。采用静压自动化造型线单层工艺制备出的铸件总重74.4 kg, 浇冒系统总重70 kg, 浇注重量144.4 kg, 生产效率为160件/h, 工艺出品率为51.5%, 相较于水平线单层工艺提升了3.6%, 每生产1 t铸件, 铁液消耗量减少143 kg, 考虑铁液可回收利用后的净成本以3.7元/kg计算, 每生产1 t铸件节约成本530元。

2.2 双层工艺

采用自动化静压造型线双层工艺试制80件, 抽检8件, 经检验其外观尺寸、金相组织、硬度、抗拉强度、屈服强度及伸长率全部合格, 对比双层的上模和下模尺寸、性能均在合格范围内。工艺更改前后, 金相组织图片见图5, 具体等级和标准的变化见表1, 力学性能见表2。

采用自动化静压造型线双层工艺制备出的铸件总

表1 工艺更改前后显微组织等级和标准的变化
Tab. 1 Variations in microstructural grades and standards before and after the process change

更改前后	球化等级	标准	NG/OK
更改前	6	4-7	OK
更改后	6	4-7	OK

重148.8 kg, 浇冒系统总重105 kg, 浇注重量253.8 kg, 生产效率为280件/h, 工艺出品率为58.6%, 相较于水平线单层工艺, 工艺出品率提升10.7%。双层浇注工艺每生产1 t铸件, 节约铁液381 kg, 考虑铁液可回收利用后的净成本以3.7元/kg计算, 每生产1 t铸件可节约成本1 410元。三种浇注工艺对比结果见表3。

3 结论

(1) 基于自动化静压造型线双层工艺制备出的铸件工艺出品率达到58.6%, 相较于自动化水平造型线单层工艺提高10.7%。

(2) 基于自动化静压造型线双层工艺的铸件生产效率为280件/h, 而自动化水平造型线单层工艺的铸件

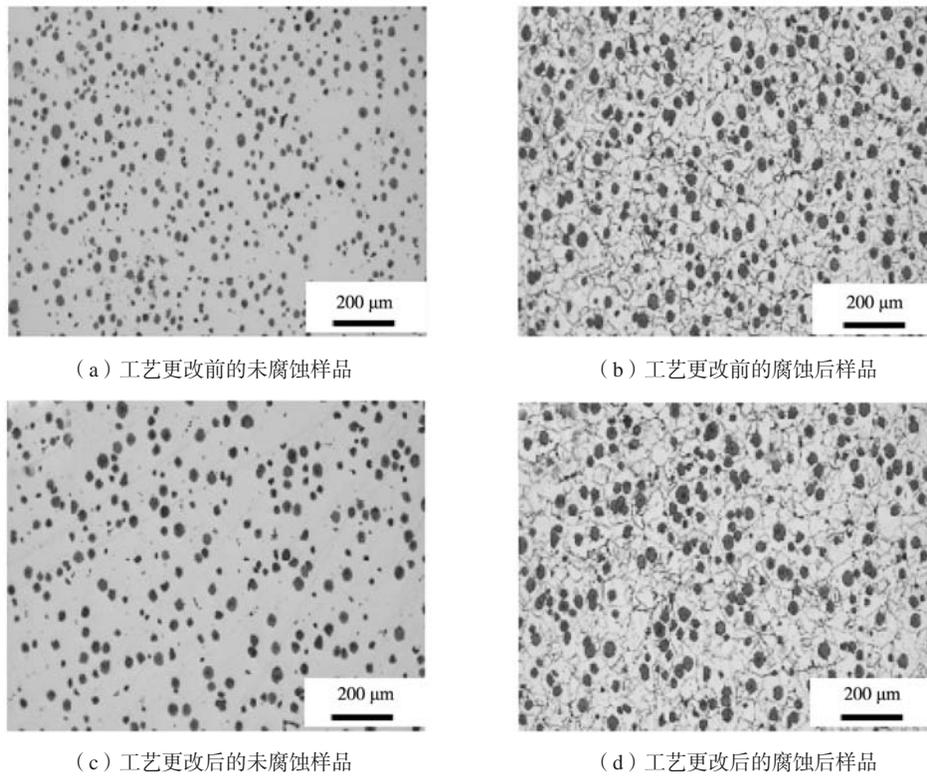


图5 工艺更改前后金相图片

Fig. 5 Metallographic images before and after the process change

表2 工艺更改前后力学性能

Tab. 2 Mechanical properties before and after process change

材质			HB硬度	抗拉/MPa	屈服/MPa	伸长率/%
QT400-18AL	改前	标准	130~175	≥400	≥240	≥18
		实测	145	151	138	457
QT40-18AL	改后	标准	130~175	≥400	≥240	≥18
		实测	136	139	143	446

表3 三种浇注工艺对比表

Tab. 3 Comparison table of three pouring processes

工艺	造型线	每箱件数/件	单重/kg	铸件重/kg	模重/kg	工艺出品率/%
单层工艺	Sinto	1	18.6	18.6	38.8	47.9
	HWS	4	18.6	74.4	144.4	51.5
双层工艺	HWS	8	18.6	148.8	253.8	58.6

生产效率为60件/h, 提升了近4.6倍。

(3) 基于自动化静压造型线双层工艺的吨铸件节

约成本1 410元, 以年产3 000 t预估, 每年可多获利423万元。

参考文献:

- [1] 倪钧, 马寒坤, 狄崇祥, 等. 两种大断面球墨铸铁用孕育剂的效果分析 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1127-1132.
- [2] 苏俊齐, 张伟, 马金哲, 等. 风电铸件球墨铸铁材料的发展现状与趋势 [J]. 铸造技术, 2023, 44 (12): 1144-1151.
- [3] 赵悦光, 田逢甲, 郭敏, 等. 风电轮毂铸件铸造工艺设计研究 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (3): 229-232.
- [4] 郑伟刚, 刘志军, 阳鑫, 等. 金属材料液态成型技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (23): 5-7.

- [5] YEN H C. Experimental studying on development of slurry-layer casting system for additive manufacturing of ceramics [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77: 915-925.
- [6] 曲迎东, 王希, 李晨希, 等. 1.5 MW风力发电机组轮毂球墨铸铁件的浇注系统设计 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (1): 11-14.
- [7] 李娄明, 张福全, 周帖武, 等. 大型复杂球铁铸件滑枕充型过程数值模拟 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (2): 216-220.
- [8] 吴和保, 樊自田, 龙文元, 等. 轮毂类球铁铸件缩孔缩松缺陷的形成机理及防治措施 [J]. 中国铸造装备与技术, 2003 (5): 14-16.
- [9] 连炜, 郑建忠, 魏兵. 球铁油缸浇注系统补缩无冒口工艺设计 [J]. 铸造技术, 2006, 27 (6): 581-583.
- [10] 金玉刚, 常世俭, 金胜灿. 双层铸件铸造工艺的试验与应用 [J]. 现代铸铁, 2006, 26 (3): 84-90.
- [11] 赵颖烈. 薄壁铸件水平造型线双层铸造工艺设计 [J]. 铸造设备与工艺, 2018 (3): 29-32.
- [12] 聂爽, 张笑征, 侯振生, 等. 刹车盘类铸件的双层浇注工艺 [J]. 铸造工程, 2015, 39 (1): 31-33.
- [13] 颜伟, 苟华强, 杨弋涛. 风电底座球铁铸件力学性能与金相组织的研究 [J]. 现代铸铁, 2013 (6): 31-33.
- [14] 赵金锋, 穆富超. 高韧性球墨铸铁QT400-18AL的生产 [J]. 纺织机械, 2005 (2): 54-55.
- [15] 季火绩, 丁杰, 于赞, 等. 热处理对QT400-18AL低温韧性球墨铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 383-385.
- [16] 李肖霞, 赵登利, 马永东. 风电涡轮机用QT400-18AL球墨铸铁的研制 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (2): 140-142.
- [17] 李冬琪, 徐德民, 于海生. 高端球墨铸铁件的研制与应用 [J]. 现代铸铁, 2015, 35 (5): 26-31.
- [18] 田苗, 贺焱, 刘海涛, 等. 风电用 QT400-18AL 合成球墨铸铁的力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017 (9): 118-121.
- [19] 李英昌, 董健, 员一泽, 等. 基于风电球墨铸铁件的强度提升研究及实践 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 483-485.
- [20] 白佳鑫. 高品质球墨铸铁生产的原材料选择和微量元素控制 [J]. 铸造, 2020, 69 (6): 563-571.
- [21] 喻光远, 肖恭林, 陈琳, 等. 高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (3): 258-263.

High-Efficiency and Low-Cost Double-Pouring Process for Middle Box Type Castings

XING Ji-lun¹, YANG Guo-xin¹, WANG Chang-chun¹, ZHANG Rong-xuan¹, YANG Chao^{2,3}

(1. XCMG Precision Industry Technology Co., Ltd., Xuzhou 221600, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Inner Mongolia Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract:

Middle box-type castings are mechanical connecting parts, which are widely used in the industrial machinery field, especially in the wind power industry. However, the mainstream single-layer pouring process faces challenges such as low process yield rate, low production efficiency, and high manufacturing costs during mass production. This study developed a new double-layer pouring process for middle box-type castings based on the automotive molding line and conducted a comparative study with the single-layer pouring process. Through multi-batch actual production verification, the process yield of middle box-type castings produced using this double-layer pouring process increases by 10.7%, the casting production efficiency is improved from 60 pieces/h via the single-layer pouring process to 280 pieces/h, saving 1 410 RMB per ton of castings, and the quality of the castings meets all the technical standards. This new pouring process provides a new processing method for the efficient and low-cost mass production of middle box-type castings and is of great significance to the sustainable development of the wind power and other industrial machinery fields.

Key words:

middle box type; gating system; casting process; process yield rate