DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.012

复杂薄壁框架件无模铸造工艺研究

孙福臻[1,2,3],曲文峰[1,2,3],王化乔[1,2,3]

(1.北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京 100083;2.国家轻量化材料成形技术及装备创新中心,北京 100083;3.先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100083)

摘　要:以某型号雷达天线底座为例,进行复杂薄壁框架件的数字化无模铸造精密成形工艺研究。采用雨淋式浇注系统,设计了合理的浇注工艺;利用 ProCAST 铸造模拟软件对复杂薄壁框架件无模铸造工艺的充型、凝固过程及缩松、缩孔缺陷分布进行模拟分析。结果表明,采用数字化无模铸造精密成形机进行砂型加工试验,浇注所得铸件不存在缺陷,说明该工艺合理可行。

关键词:复杂薄壁框架件;雷达天线底座;无模铸造;雨淋式浇注系统

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)07-0645-04

Research on Complex Thin-Wall Frame Structure Casting Made by Patternless Technology

SUN Fuzhen[1,2,3], QU Wenfeng[1,2,3],WANG Huaqiao[1,2,3]

(1.Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd, Beijing 100083, China; 2. National Innovation Center for Light Weight Material Forming Technology & Equipment, Beijing 100083, China; 3.State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking a radar antenna base as an example, the digital without pattern casting precision forming process of complex thin-walled frame parts was studied. A reasonable pouring process was designed by adopting rain pouring system. The mold filling, solidification, shrinkage and porosity distribution of complex thin-walled frame parts were simulated and analyzed by ProCAST casting simulation software. The results show that there are no casting defects in the castings obtained by pouring, which indicates that the process is reasonable and feasible.

Key words: complex thin-walled frame structure; base of radar antenna;casting without pattern; rain pouring system

数字化无模铸造精密成形技术是在 CAD 模型驱动下,直接采用数字化无模铸造精密成形机切削砂坯,经过高速的粗精加工获得可以直接进行浇注的砂型和砂芯,进而得到铸件的一种快速制造技术[1-3]。由于利用三维 CAD 模型直接驱动铸型制造,抛弃了传统的木模或金属模等模具,数字化无模铸造精密成形技术使铸造流程大大缩短,开发时间缩短 50%~80%,其加工费用仅为传统有模铸造方法的 1/10 左右,相应地使制造成本降低 30%~50%,是一种无模化、精密化、智能化、绿色化的先进制造技术[4-6]。

薄壁铸件是铸造技术的发展方向,是产品轻量化发展的前提。在汽车、航空、航天、电子等领域实现铸件、特别是轻合金铸件的薄壁化具有重大的意义[7]。

雨淋式浇注系统可使铸件顺序凝固,有利于铸件的补缩,能防止铸件产生缩孔、冷隔、夹渣以及浇不足等缺陷,同时还可以防止由于冲砂而引起的夹砂、气孔和渣孔等缺陷。因此,对于机械加工要求较高的零件,以及对表面质量要求高而不经加工就使用的零件,应采用雨淋式浇注系统。

某型号雷达天线箱体三维模型如图 1,铸件整体壁厚均为 5 mm,结构复杂,若采用传统铸造工艺,

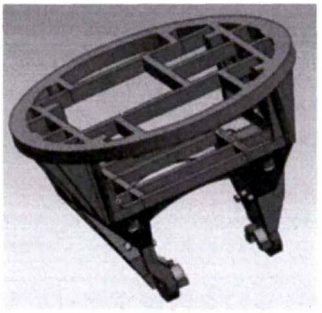


图 1 雷达天线底座三维模型

Fig.1 3D model of the base of radar antenna

收稿日期:2020-05-15

基金项目:工业和信息化部 2018 年绿色制造系统集成项目《轮胎模具绿色制造关键工艺技术和装备突破及集成应用项目》

作者简介:孙福臻(1983-),山东高密人,高级工程师.主要从事先进成形工艺方面的工作.电话:0535-5521088,E-mail:sfz523@163.com

木模成本高、周期长、成形困难且精度难以保证。因此，采用数字化无模铸造精密成形技术完成该零件制作。掌握该零件的数字化无模铸造精密成形工艺，为复杂薄壁结构件的铸造工艺提供了新的思路，为数字化无模铸造精密成形技术开辟了更广泛的应用领域。

1 浇注工艺设计

雷达天线底座属于框架类零件，根据其结构特征和技术要求，对浇注系统工艺提出以下几点要求[8]：

(1)保证铸件的重要部位不能出现缩松缩孔缺陷，且本体力学性能满足技术要求。

(2)该浇注系统还必须具备良好的排渣、排气功能，确保铸件内部和外表面没有夹杂、砂孔和气孔等缺陷。

针对上述要求，决定采用顶注雨淋式浇注系统。雨淋式浇注系统具有以下优点：

(1)雨淋式浇注系统截面比 $S_{直}:S_{横}:S_{内}$ 近似为 3:8:4，横浇道是横截面最大单元，与雨淋式浇口呈封闭状态，这样可以保证横浇道从开始浇注时一直处于充满状态。金属液由顶部的雨淋小孔分为多股细流连续均匀地注入铸件型腔，对型腔的冲击力小，同时上升的液面一直处于活跃状态，这样金属液中的气体、夹渣物由于活跃的液面能够顺利上升排出，因此排气排渣效果好。尺寸较小的雨淋小孔在浇铸结束之后能够快速凝固，避免缩松缩孔缺陷形成[9]。

(2)从天线底座的三维图看出，底部为半径最大部位，然后依次变小，半径呈均匀过渡分布。将半径最大的部位置于最顶部，同时上面设置冒口。顶注的方式能够让铸件形成一个自上而下的温度梯度，使铸件呈顺序凝固状态，最后凝固的地方为冒口，将缩松缩孔缺陷以及浇铸过程中产生的氧化夹杂、冲砂全部聚集于冒口之中，得到组织致密的铸件，就良好的补缩和集渣功能。

采用顶注入雨淋式浇注系统，设计带有锥度的直浇道，可防止浇注时卷入空气，直浇道窝可对金属液进行缓冲避免金属液冲刷型腔。

1.1 浇口杯设计

浇口杯容量为

$$G_{杯}=\frac{mG_L}{t} \tag{1}$$

式中，$G_{杯}$为浇口杯的金属液重量；G_L为铸型中金属液总重量；t 为浇注时间；m 为金属液储备系数，本文选取 m=3。

浇注时间为

$$t=B\delta^P G_L^n \tag{2}$$

式中，δ 为铸件壁厚；对于铝合金铸件，选取 B=1.25，n=0.35，P=0.35。

浇口杯宽度为

$$B=\sqrt[3]{\frac{V_{杯}}{1.12}} \tag{3}$$

式中，B 为浇口杯宽度；$V_{杯}$为浇口杯容积。

浇口杯长度 A=1.6B；浇口杯高度 H=0.7B。

1.2 阻流截面设计

阻流截面面积为

$$A_{阻}=\frac{G_L}{\rho t\mu\sqrt{2gH_0}} \tag{4}$$

式中，ρ 为金属液密度；μ 为充填全部型腔时，浇注系统阻流截面的流量系数；H_0 为充填型腔时的阻流截面以上的金属压力头。

根据计算结果，设计浇注系统如图 2。

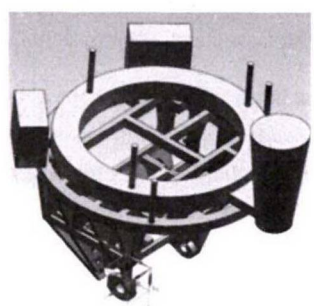


图 2 雷达天线底座浇注系统

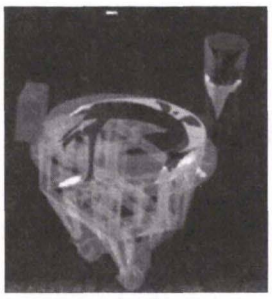
Fig.2 Gating system of the base of radar antenna

2 浇注工艺模拟与分析

为验证所设计浇注工艺的可行性，采用 ProCAST 铸造模拟软件对浇注工艺进行模拟。铸造模拟便于及时发现与更正浇注工艺中存在的问题，预测并优化浇注结果，避免浇注缺陷的产生。

将三维模型格式转化后导入 Visual CAST. 12.0.1 软件进行铸件成型过程的模拟。充型过程模拟如图 3，结果表明，该铸件的浇注系统设计能够保证金属液在无模铸型内自上而下平稳充型，同时金属也流动顺畅，充型平稳。

运用 ViewCAST 对铸件进行充型状态与缩松分析。如图 4，模拟显示金属液能平稳充满型腔并顺序凝固，铸件侧壁顶端最先凝固，冒口凝固较慢，保证了对侧壁的充分补缩，侧壁的底部凝固较慢可能会造成补缩困难。在 Porosity 模拟显示中各部位数值<6.67%，表明铸件在凝固过程中出现缩松、缩孔的可能性较小。如图 5，铸件总收缩孔隙度≤5，满足


(a)t=2 s


(b)t=6 s

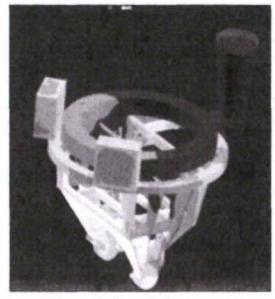
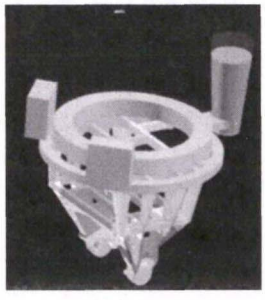
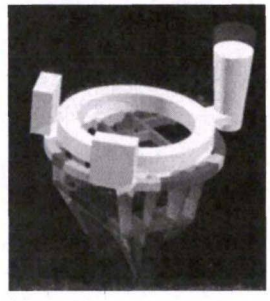

(c)t=10 s

图 3 充型过程

Fig.3 Filling process


(a)t=400 s


(b)t=1 000 s


(c)t=2 000 s

图 4 铸件凝固过程模拟结果

Fig.4 Simulation results of casting solidification process

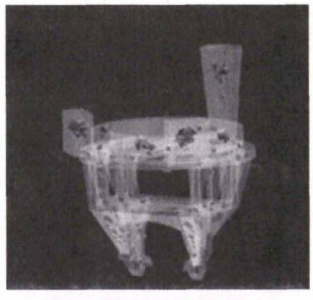


图 5 铸件收缩孔隙度

Fig.5 Shrinkage porosity of casting

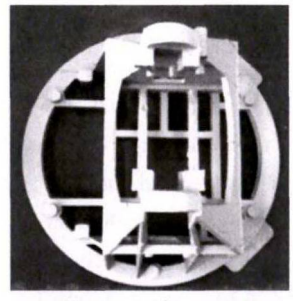


图 7 雷达天线底座铸件

Fig.7 Casting of the base of radar antenna

静态应力构件的需求。

3 试验验证

在科学研究中，试验是必不可少的环节。为验证上述浇注工艺与分模工艺的正确性，采用数字化无模铸造精密成形机进行砂型加工(见图 6)。采用重力铸造法对砂型进行合型浇注，浇注材料为 ZL104 铝合金，所得铸件如图 7。对外观进行观察，

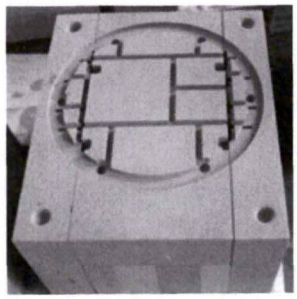


图 6 雷达天线底座砂型

Fig.6 Sand mould of the base of radar antenna

回转体铸件充型完整，无浇注不足、冷隔现象等缺陷。对铸件进行 X 射线内部无损检测，结果显示内部质量优良，无缩孔、缩松缺陷。

经试验可知，所得铸件各部位工艺性能均满足制作要求，因此，本文所设计的工艺性正确。

4 结论

(1)对雷达天线底座的结构分析，传统铸造工艺制作存在较大困难。采用数字化无模铸造技术，不仅实现了雷达天线底座的快速成形，而且铸件达到设计要求。

(2)采用 ProCAST 铸造模拟软件对浇注工艺进行模拟，并通过无模铸造试验验证，表明本文采用的铸造工艺设计的合理性，该工艺可以为复杂薄壁框架类零件在数字化无模成形工艺提供参考。

(3)数字化无模铸造成形技术采用重力浇注

(下转第 652 页)

表5 不同夹送辊厂家全周期吨钢成本对比数据表
Tab. 5 Comparison data of cost per ton steel of different pinch roll manufacturers in full cycle

厂家	平均过钢量 /(t/mm)	工作层厚度 /mm	新辊成本 /(元 /t)	修复成本 /(元 /t)
某国内堆焊辊	5.770	20	0.644 3	0.221 8
某进口铸铁辊	6.803	20	0.657 9	0.207 7
本研究	7.880	20	0.308 4	0.197 6

新辊吨钢成本相近,但是某进口铸铁夹送辊解决了辊面粘钢问题,并且磨损均匀,相对国内某厂堆焊辊来说,某进口铸铁辊有优势。但是,某进口铸铁夹送辊在使用过程出,出现辊面轻微凹坑缺陷。从表中可以看出,本研究的夹送辊有明显的成本优势(吨钢成本),是3种夹送辊中成本最低的。同时,本铸铁夹送辊还解决了辊面粘肉、磨损不均匀及表面局部凹坑的问题,既降低了其它边际成本,也提高了质量稳定性和生产连续性。另外,表中的铸铁夹送辊为使用初期价格,随着夹送辊的批量供货,新辊价格低于表价格。

综上所述,全周期内合金铸铁夹送辊应用的各项指标均达到使用要求,并且表现出优异的卷钢特性。生产成本低于主流夹送辊厂商,现已成为武钢热轧厂生产车间的长期使用产品。因此,本研究具有极为重要的实用价值,对于打破技术垄断的局面具有重要意义。

3 结论

(1)含铌合金铸铁中形成了细小、弥散的NbC颗粒,分布均匀,使夹送辊辊筒在保证耐磨性能的同时减小其他超硬碳化物对钢板的损伤;

(2)合金铸铁的最佳热处理工艺为:淬火温度870 ℃,淬火时间1 h,回火温度220 ℃,回火时间4 h。在此工艺下处理时,合金的硬度达到55.92 HRC,与铸态合金相比提高了37%;

(3)本研究制备出的夹送辊辊筒材料完全达到使用要求,适用于普钢、高强钢、低温双相钢、管线钢等所有钢材产品的卷取,平均毫米过钢量达7.88万t,完全能够代替现有堆焊辊或进口夹送辊辊筒,使生产成本显著降低。

参考文献:

[1] 王清宝,粟卓新,史耀武. 夹送辊堆焊裂纹及其产生机理[J]. 焊接学报, 2010, 31(3):93-96.
[2] 吕艳春. 热轧卷取机夹送辊表面堆焊修复技术 [J]. 中国设备工程, 2016, 4:60-62.
[3] Riposan I, Chisamera M, Stan S. New developments in high quality grey cast irons[J]. China Foundry, 2014, 11(4):351-364.
[4] 王峰. 灰铸铁件的生产[J]. 现代铸铁, 2019, 39(01):22-26.
[5] Collini L , Nicoletto G, R Konenά. Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron [J]. Materials Science & Engineering A, 2008, 488(1-2):529-539.
[6] Filipovic M , Kamberovic Z , Korac M , et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-C-Nb white cast irons[J]. Materials & Design, 2013, 47:41-48.
[7] 孙小亮,朱洪波,闫永生,等. Nb对高CE灰铸铁耐磨性能的影响[J]. 现代铸铁, 2011(2):52-57.
[8] 周文彬. 铌在高碳当量灰铸铁中的作用及在制动盘生产中的应用[D]. 上海:上海大学,2010.
[9] 刘文莲,徐久军,姚曼. 铌铸铁缸套表面矩形硬质相的磨损行为的有限元研究[J]. 润滑与密封, 2005(5):81-83.
[10] 王海燕. 稀土对微合金钢中碳化铌溶解与析出行为的影响[D]. 北京: 北京科技大学,2017.

(上接第647页)

方法,在对复杂薄壁框架类构件重力铸造时采用雨淋式浇注系统,有利于铸件的补缩,能防止铸件产生缩孔、冷隔、夹渣以及浇不足等缺陷,同时还可以防止由于冲砂而引起的夹砂、气孔和渣孔等缺陷。

参考文献:

[1] 单忠德. 基于快速原型的金属模具制造工艺研究 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
[2] 徐丹. 无模铸型制造工艺和设备的研究与开发 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
[3] 刘丰,单忠德,李柳,等.大型薄壁壳体件无模铸造技术研究[J]. 铸造技术, 2013,34(10):1324-1326.
[4] Shan Z D, Liu F, Zhan L, et al. Research on Patternless Casting CNC Manufacturing Technology and Development of the Equipment[J]. Advanced Materials Research, 2010(97-101): 4036-4041.
[5] 刘丰,单忠德,冯涛,等. 汽车发动机零部件无模组装制造技术研究 //2010中国铸造活动周论文集[C]. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2010: 1-4.
[6] Zhongde Shan, Xiaoli Dong, Feng Liu. Study on manufacturing of Sand Mold by Direct Milling [C]. The 3rd Seminar of Sino-Korea Cooperation on the Advanced Manufacturing Technology. 2008: 165-169.
[7] 郑亚虹,王自东. 复杂薄壁精密铝合金铸件铸造技术进展[J]. 铸造, 2010(8): 796-799.
[8] 王猛,曾建民,黄卫东. 大型复杂薄壁铸件高品质高精度调压铸造技术[J]. 铸造技术, 2004(5): 353-358.
[9] 孙昌建,舒大禹,王元庆,等. 大型复杂薄壁铝合金铸件的真空增压铸造技术[J]. 铸造技术, 2008(2): 232-235.