

液态金属螺旋形流动性实验用造型模板的生产及应用

史书考¹, 于伟业², 马玉琪¹, 孟祥臣¹, 王承云¹, 张伟¹, 向青春¹

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 大连博斯特电机有限公司, 辽宁大连 116033)

摘要: 液态金属流动性测试实验是材料成形及控制工程专业(铸造方向)非常重要的一个大中型综合性实验。流动性是液态金属一个非常重要的铸造性能指标,螺旋形流动性实验是测定液态金属在砂型中流动性常用的实验方法,同心三螺旋形流动性试样造型模板是螺旋形流动性实验方法中最主要的工装用具。本文根据该铸件的结构特点设计了初步铸造工艺方案,并应用ProCAST数值模拟软件优化了其铸造工艺方案,然后基于优化的铸造工艺方案,利用数字化无模铸造精密成形技术完成了同心三螺旋形流动性试样造型模板铸件产品的实际生产。最后利用生产的造型模板铸件,对本科生开设了液态金属流动性测试实验课,取得了良好的实验教学效果。

关键词: 螺旋形流动性实验;造型模板铸件;铸造工艺设计;数字化无模铸造;实验教学

作者简介:

史书考(1999-),男,硕士生,主要从事铸造新材料与新工艺方面的研究工作。E-mail: 1303419196@qq.com

通讯作者:

向青春,男,教授。E-mail: xiangqchun@yeah.net

中图分类号: G642.423,

TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

04-0484-06

基金项目:

沈阳工业大学2020年度本科教育教学改革研究重点项目(100020238);沈阳工业大学2020年专创融合课程建设项目(100600056);沈阳工业大学2020年创新创业竞赛培育项目(100600041)。

收稿日期:

2021-12-20 收到初稿,

2022-01-26 收到修订稿。

液态金属流动性测试实验是材料成形及控制工程专业(铸造方向)非常重要的一个教学实验,它是一个大型的综合性实验,涵盖造型、合型、熔炼、浇注、打箱清理等多个实验环节,几乎与工厂实际铸造生产工序步骤相同。其中造型环节非常关键,它是完成该教学实验的首要步骤,而采用粘土湿型砂来进行造型,则必须有造型模板。

测定液态金属流动性的试样类型有很多,包括螺旋形、球形、U形、楔形等,在生产和科学研究中应用最多的是螺旋形试样^[1]。而液态金属螺旋形流动性实验测定的方法主要有:单螺旋测定、三心三螺旋测定和同心三螺旋测定^[2],其中同心三螺旋测定的结果具有较好的数据对比性^[3],它克服了单螺旋线测定装置因浇注工作条件等的变化而造成误差大、测试精度低和不易控制的缺点,采用专门设计的外浇道浇注同一直浇道引入同一中心的三条等截面的螺旋线,从而实现化学成分、浇注温度、铸型等工艺相同条件下测试合金流动性的目的,其结构紧凑、操作方便,具有较高的测试精度,适用各种铸造合金流动性的测试^[4]。

进行液态金属流动性测试实验,则需要采用同心三螺旋金属模板来进行造型。常用制造同心三螺旋造型金属模板的方法,有传统铸造法和机械加工等方法。其中采用机械加工的方法来制造,由于螺旋型模样本身形状复杂,而每一根螺旋型模样底部又有30个半球形基准点,共计有90个基准点,所以必须采用高精度数控机床来进行加工,造成生产成本总体较高。若采用传统铸造的方法,即用金属模板或木制模板来进行铸型造型,则造型精度比较差,尤其是那些基准点不容易造出来,采用传统铸造法生产出来的同心三螺旋造型模板铸件质量也相对较差,而且还需要金属模板或木制模板来造型,在同心三螺旋造型模板铸件需求量本身并不大的情况下,采用传统铸造法其生产成本也不低。北京机械研究总院研发的数字化无模精密铸造成型技术具有铸型加工精度高、可以加工复杂形状铸型、无需制作实体模样、生产周期短等特点,特别适合于铸件单件小批生产以及铸件新产品的工艺试制^[5-8]。本文利用数字化无模精密铸造成型技术来生产液态金属流动性实验所需同心三螺旋造型

模板铸件，并实际应用于我校材料成型及控制工程专业的本科生实验，取得了良好的实践教学效果。

1 造型模板铸件的结构设计

设计的同心三螺旋造型模板铸件结构如图1所示，其外轮廓尺寸为505 mm × 475 mm × 57 mm，主板的壁厚为7 mm，三条螺旋线从中心基圆顺时针旋转，呈120°均布在螺旋基圆所在平面上（图1a），螺旋线之间的距离为30 mm，其截面形状为6/10 mm × 10 mm等腰梯形，每条螺旋线的长度为1 500 mm，在每条螺旋线上每隔50 mm有直径3 mm的半球形基准点（图1b）。在模板底部的正中心位置是高50 mm、直径82 mm的全压井（图1c）。模板铸件的合金材质为ZL101，铸件的质量约为5.8 kg。

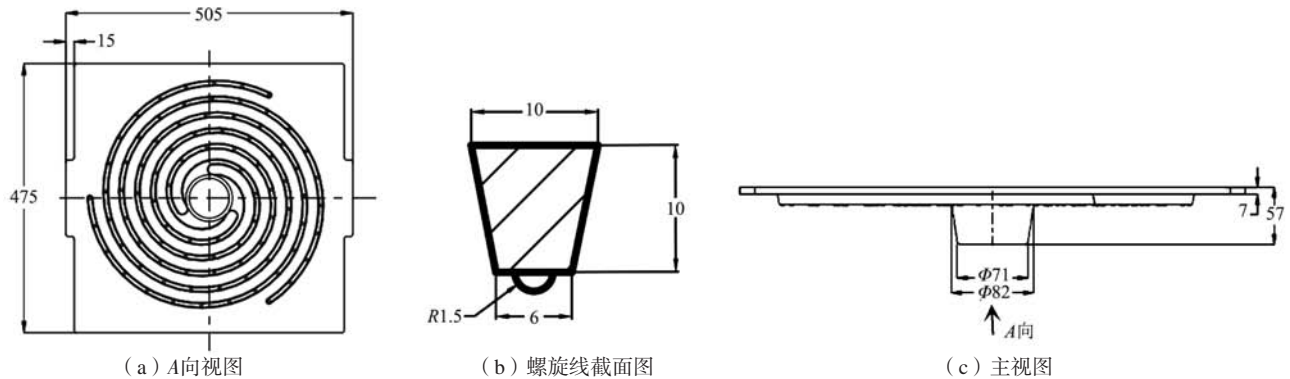


图1 同心三螺旋形试样造型模板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of molding template of the concentric triple spiral sample



图2 模板铸件的浇注位置和分型面

Fig. 2 Pouring position and parting surface of the molding template casting

浇注时间可按经验公式（1）计算：

$$t = S\sqrt{G_L} \quad (1)$$

式中： t 为浇注的时间（s）； G_L 为金属液的总质量（kg）； S 为与铸件壁厚有关的系数，根据手册^[9]可取1.85。经计算，可得浇注时间 t 为5.4 s。

该铸件的直浇道为节流截面，其截面积按公式（2）计算：

$$A_{直} = \frac{G_L}{\rho_L \mu t \sqrt{2gH_p}} \quad (2)$$

式中： ρ_L 为合金液密度（kg/cm³）； μ 为流量损耗系数，取值0.5； t 为浇注时间（s）； g 为重力加速度（cm/s²）； H_p 为平均静压力头高度（cm），设计值为20 cm。

2 铸造工艺方案初步设计

（1）浇注位置的确定。为保证铸件最关键的螺旋线部分的精度和质量，同时便于放置浇冒口系统，将铸件有全压井的部分朝下摆放，如图2所示。

（2）分型面的选择。为了造型方便并保证不产生错型缺陷，分型面选择放在铸件最上面的最大截面处，如图2所示，采用两箱造型，将铸件全部置于下型，不仅能保证铸件的精度，还便于数字化无模精密造型机加工铸型。

（3）浇注系统设计。该铸件的浇注重量（GC）约为8.6 kg。为了使金属液充型平稳，减少液流对铸型的冲刷，采用开放式浇注系统^[9]；为了提高铸件的工艺出品率，直接将直浇道设在铸件顶部一角，并将直浇道周围的铸件主板区域当作内浇道。

经计算可得直浇道的横截面积为615 mm²。初步设计的铸造工艺如图3所示。

（4）初步工艺的数值模拟。利用ProCAST模拟软件对初步设计的铸造工艺进行模拟分析，以便根据铸件的充型、凝固和缺陷模拟分析结果来改善和优化其铸造工艺方案。铸型采用树脂砂制备，在ProCAST模拟软件中对铸件和铸型进行网格划分，其中铸件的网格单元尺寸为4，铸型的网格单元尺寸为20，生成89 792个面网格和1 700 092个体网格。经计算，铸件的浇注时间为5.4 s，设置铸件与砂型的换热系数为1 000 W/（m²·K），将浇注温度设置为700 °C进行



图3 初步设计的铸造工艺

Fig. 3 Preliminary design of the casting process

模拟, 所得模拟结果如图4所示。从图中可以看出, 金属液从直浇道进入以后, 直接通过下部的内浇道平稳地充填铸型, 但在充型中后期, 在螺旋线沟槽内的金属液会出现液流相汇的情况, 这非常容易产生冷隔缺陷(图4a)。凝固时铸件主板处的金属液凝固速度较快, 而全压井处由于相对厚大, 所以最后凝固(图4b)。铝合金的凝固收缩缺陷一般为缩孔、缩松, 缩孔是铸件在冷凝过程中收缩且得不到金属液的补充而

产生的较大孔洞, 形状不规则, 孔壁粗糙, 一般位于铸件的热节处。缩松是铸件最后凝固的区域或枝晶间区域没有得到金属液的补缩而形成分散细小的孔洞, 常出现在铸件的较厚截面以及厚薄截面交接处或热节点上^[10]。观察模板铸件凝固完成后的缩孔缩松缺陷分布(图4c), 可见缩孔缺陷主要存在最后凝固的全压井内, 而在其他部位也不均匀地分布着一些缩松缺陷。

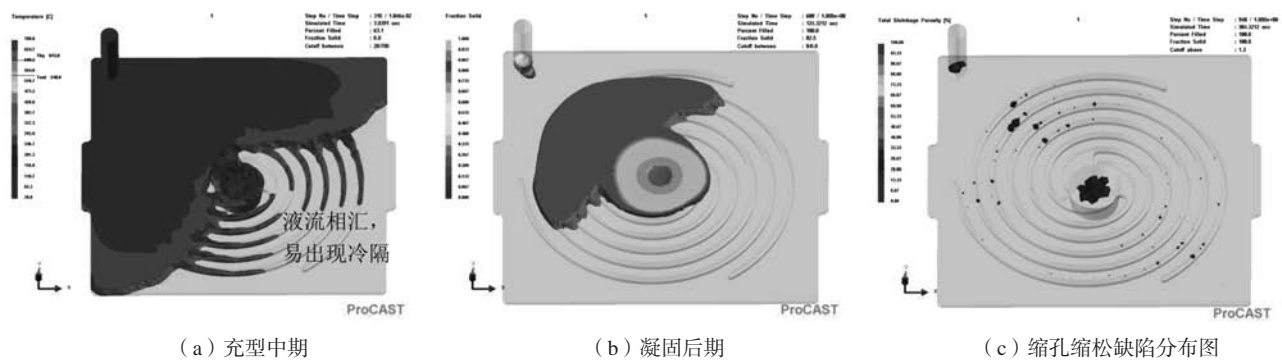


图4 初步工艺的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of the preliminary casting process

3 铸造工艺方案的优化

针对上述模拟结果分析存在的缩孔缩松缺陷问题, 进行了铸造工艺方案的优化。在全压井的上方采用了高100 mm、直径100 mm的圆柱形明顶冒口。同时, 为了使型腔的气体顺利排出和更好地控制铸件的整体温度分布, 分别在主板的四周设计了直径为15 mm的出气冒口。优化后的铸造工艺方案如图5所示。

同样利用ProCAST软件对优化后的铸造工艺方案进行数值模拟。为了防止产生冷隔缺陷, 将浇注温度改为730 ℃。同时, 采用高温慢浇的浇注方式, 实现边浇注边补缩, 从而更好地达到实现顺序凝固的效果。图6所示为优化工艺的数值模拟结果, 可以看出, 大部分缩孔缩松缺陷都被冒口予以补缩, 仅有极少量缩松仍然存在于模板铸件内部, 但是这点缺陷并不会影响模板铸件的使用, 因此把该铸造工艺方案定为模板铸

件最终的生产工艺。

4 螺旋形流动性试样造型模板铸件的 实际生产

4.1 砂块的制作

该铸件的吃砂量确定为50 mm, 砂块尺寸确定为上型和下型均610 mm × 610 mm × 100 mm, 采用呋喃树脂

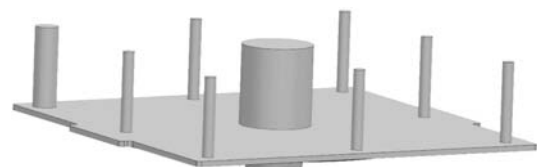


图5 优化后的铸造工艺方案

Fig. 5 Optimized casting process scheme

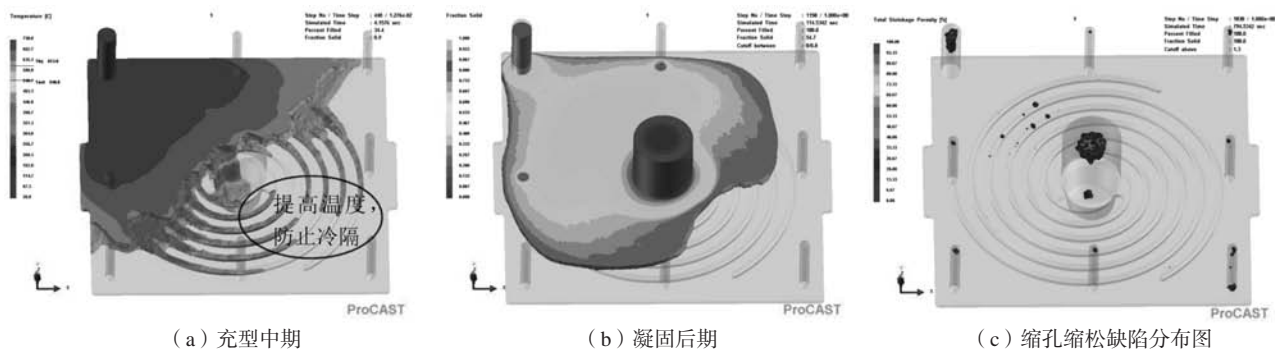


图6 优化铸造工艺方案的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the optimized casting process scheme

自硬砂制作，呋喃树脂粘结剂的加入量为原砂重量的0.9%~1.2%，固化剂为对甲苯磺酸，加入量为树脂重量的30%~50%^[11]。

将原砂倒入混砂机中，先倒入固化剂再倒入树脂分别搅拌混匀，然后将混好的型砂填入可拆式木制砂箱中，用工具压实和刮平，待型砂硬化后拆开砂箱，起出砂块备用。

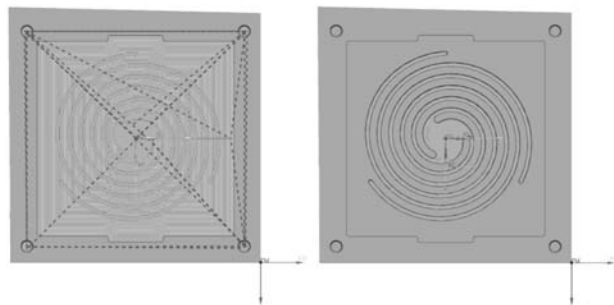
4.2 砂型的加工刀路设计及数字化无模精密成形

用UG软件在建模环境下对砂块进行处理，在加工环境下设计对应的刀路，生成后处理文件，然后将后处理文件输入到数字化无模精密成形机的控制面板中转换成机器的识别码。将预制的砂块放入到工作台上，通过定位加工点和添加刀具来实现铸型的数控切削加工，无需传统铸造模样，直接得到铸型。

(1) 下型的刀路设计。整个铸件都处于下型之中，只需要一面铣型就能成形，铸件螺旋线的位置有复杂曲面，不仅需要粗加工，还需要精加工。设计粗加工刀路：刀具选择 $\Phi 8$ mm的平刀，每一刀的切削深度恒定为2.5 mm，切削参数中的余量改为0.1 mm，非切削移动改为无。设计精加工刀路：刀具选择 $\Phi 6$ mm的球刀，切削参数中的连接改为层与层之间斜进刀，生成的刀路如图7所示。

(2) 上型的刀路设计。在上型中没有精加工曲面，只需要粗加工，刀路要贯通整个砂块，为了避免刀具最后打到机床和便于两面铣型，把刀路的深度设为80 mm，刀路生成结果如图8所示。

(3) 铸型的实际加工成形及处理。通过数字化无模铸造精密成形机分别铣出上型和下型。由于下型中的螺旋线槽内每隔50 mm有直径3 mm的半球形基准点，用机器不能直接加工出来，所以需要人工制作出来。然后在铸型上涂刷醇基锆英粉涂料，刷好涂料的上型和下型如图9所示。



(a) 粗加工刀路

(b) 精加工刀路

图7 下型的加工刀路

Fig. 7 Machining tool path for the lower sand mold

4.3 合金熔炼浇注及铸件后处理

对制好的上型和下型进行合型，合型完成后在铸型上面放上适当的压铁，等待浇注。本铸件采用优化后的工艺方案需要金属液的总质量为8.3 kg，直接采用ZL101铝合金锭作为原材料，利用坩埚电阻炉进行熔炼。为了提高浇注温度，控制熔炼温度为780 ℃，出炉温度为750 ℃左右，浇注温度为730 ℃ \pm 5 ℃。采用铝合金专用除气除渣剂进行熔体处理，采用Al-5Ti-1B细化剂对铝合金熔体进行变质处理。为了防止模板铸件产生变形，浇注完成4~5 h后进行打箱。再用角磨机切去浇冒口及出气冒口，并进行打磨和抛光，最终获得的同心三螺旋形试样造型模板铸件如图10所示，可以看出，铸件表面没有冷隔和浇不足等缺陷，表面质量良好，完全达到预期效果。

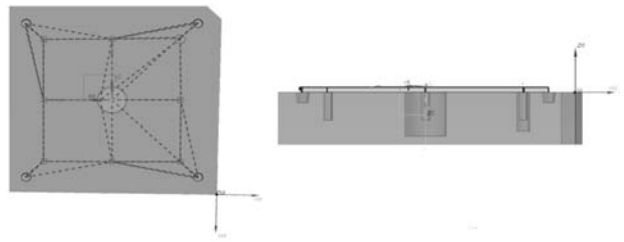


图8 上型的加工刀路

Fig. 8 Machining tool path for the upper sand mold

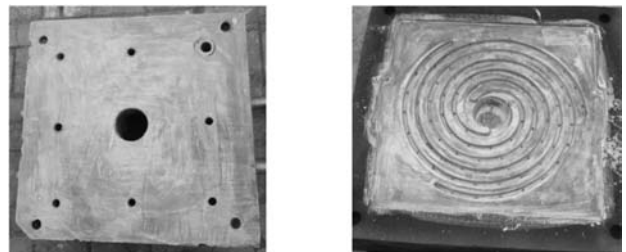


图9 刷好涂料后的铸型

Fig. 9 Prepared sand molds after coating



图10 生产的同心三螺旋形试样造型模板铸件产品

Fig. 10 Produced casting product of the concentric triple spiral sample molding template

5 螺旋形流动性试样造型模板的实际应用

利用生产出来的同心三螺旋型流动性试样造型模板铸件产品给我校2019级材料成型及控制工程专业本科生开设了液态金属流动性测试实验（图11和图

12），取得了良好的实验教学效果。学生不但在实验中学会了相应铸造专业知识，而且还极大地提高了实践动手能力和团队合作能力，培养了工程意识和团队协作意识。



图11 利用生产的造型模板开设本科生实验课

Fig. 11 Undergraduate experimental courses using the produced molding template

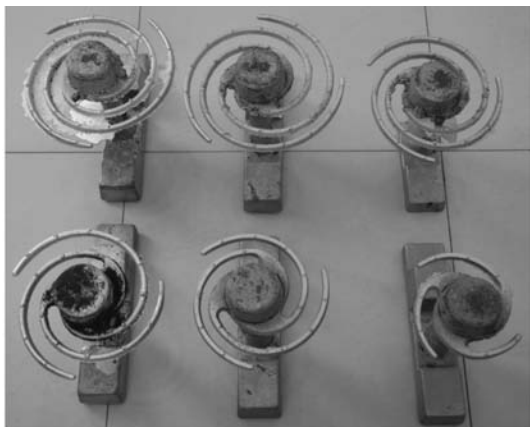


图12 不同组学生做出来的实验结果

Fig. 12 Experimental results made by different groups of students

6 结束语

（1）通过铸造工艺设计及优化，利用数字化无模精密铸造成形技术，成功生产出同心三螺旋型流动性试样造型模板铸件产品。

（2）与传统铸造方法或纯机加工方法相比，利用数字化无模精密铸造成形技术生产液态金属流动性试样造型模板具有生产效率高、制造成本相对较低等优点。

（3）利用生产出来的同心三螺旋型流动性试样造型模板给本科生开设了液态金属流动性测试实验，取得了良好的实验教学效果。

参考文献：

- [1] 祖方道. 铸件成形原理 [M]. 北京：机械工业出版社，2013.
- [2] 杨钢，起华荣，王吉坤，等. 金属流动性测试装置：CN 2816795Y [P]. 2005.
- [3] 赵军，陈光昀，刘旭麟. 同心三螺旋线合金流动性测定仪的研制及应用 [J]. 大连工学院学报，1987，166（3）：51-58.
- [4] 陈光昀，赵军，刘旭麟. 同心三螺旋线合金流动性测定仪装置：CN 88204038 [P]. 1988.
- [5] 黄希，王恒，张敏等. 快速精密铸造技术的研究现状和发展趋势 [J]. 铸造技术，2013，34（12）：1690-1693.
- [6] 孙福臻，曲文峰，王化乔. 数字化无模铸造一模多型工艺研究 [J]. 铸造技术，2016，30（7）：1507-1510.
- [7] 向青春，张伟，毛杰，等. 应用数字化无模铸造技术生产艺术铸件的探索与实践 [J]. 铸造设备与工艺，2014（1）：15-18.
- [8] CHEN Li, ZHANG Wei, WU Chenhong, et al. Application of digital pattern-less molding technology to produce art casting [J]. China Foundry, 2014, 11（6）：487-492.
- [9] 李新亚. 铸造手册：铸造工艺 [M]. 3版，北京：机械工业出版社，2011.
- [10] 王荣. 铸件缩孔和缩松缺陷的成因及防止措施 [J]. 金属加工（热加工），2016（11）：58-60.
- [11] 王明铸. 浅谈呋喃树脂砂的生产与质量控制 [J]. 科技创新与应用，2013（11）：88.

Production and Application of Molding Template for Liquid Metal Spiral Fluidity Experiment

SHI Shu-kao¹, YU Wei-ye², MA Yu-qi¹, MENG Xiang-chen¹, WANG Cheng-yun¹, ZHANG Wei¹, XIANG Qing-chun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;
2. Dalian Best Electric Motor Co., Ltd., Dalian 116033, Liaoning, China)

Abstract:

The liquid metal fluidity test experiment is a very important large-scale comprehensive experiment for the major of materials forming and control engineering (casting direction). Fluidity is a very important casting performance index of the liquid metal. The spiral fluidity experiment is a common experimental method to determine the fluidity of the liquid metal in sand molds. The concentric triple spiral fluidity sample molding template is the most important tooling for the spiral fluidity experiment method. In this paper, according to the structural characteristics of the molding template casting, a preliminary casting process scheme was designed and then was optimized with the ProCAST numerical simulation software. Subsequently, based on the optimized casting process scheme, a concentric triple spiral fluidity sample molding template casting product was actually produced by using the digital pattern-less casting precision forming technology. Finally, with the molding template casting produced, the experimental course of the liquid metal fluidity test was conducted for the undergraduates majored in the materials forming and control engineering in our university, and a good experimental teaching effect was achieved.

Key words:

spiral fluidity experiment; molding template casting; casting process design; digital pattern-less casting; experimental teaching
