一种基于3D打印快速制造农用机械关键零部件的方法

黄金富[1]，宋彬[2]

1.天津通达日上金属制品有限公司　天津　301721
2.北京北方恒利科技发展有限公司　北京　102600

摘要：随着工业技术的提升，农用机械供油系统类零件的开发和制造成本得到了降低，通过供油系统类零件的开发来提升农用机械总体性能成为立足农机市场的新要求。结合供油系统类铸件质量要求很高，需要进行压力渗漏检测，尺寸和内部质量很难同时保证，以及短期快速制造难度很大等特点，针对零件结构和质量要求进行分析，选择合适的快速制造工艺路线。采用铸件结构优化设计、铸造工艺设计、铸造工艺模拟优化、3D打印3DP砂型、电磁真空增压铸造以及质量检验等主要工序，实现供油系统类零部件研制，解决了供油系统研制过程中出现的质量差、周期长、成本高的问题。

关键词：3DP打印砂型；电磁真空增压；供油系统

A method for rapidly manufacturing key components of agricultural machinery based on 3D printing

HUANG Jinfu[1], SONG Bin[2]

1.Tianjin Tongda Daily Metal Products Co., Ltd., Tianjin 301721, China
2.Beijing North Hengli Technology Development Co., Ltd., Beijing 102600, China

Abstract: With the improvement of industry technology, the development and manufacture cost of agricultural machinery oil-supply system parts have been reduced. It is a new requirement to improve the overall performance of agricultural machinery. Combined with the high quality requirement of the casting of oil supply system, it is necessary to check the pressure leakage, and it is very difficult to guarantee the size and internal quality at the same time, and it is very difficult to make the casting quickly in short term, select the appropriate rapid manufacturing process route. The main processes, such as casting structure optimization design, casting process design, casting process simulation optimization, 3D printing 3DP sand mold, electromagnetic vacuum pressure casting, quality inspection, etc., to realize the development of oil supply system components. This production process solves the problems of quality, cycle and cost in the process of oil supply system development. The application of this technology in the metal products industry has a great economic and social price.

Keywords:3DP print sand mold; electromagnetic vacuum pressurization; oil supply system

1　序言

农用机械铝合金供油系统制造流程分为结构和成形工艺设计及优化、3D打印铸型型芯、电磁真空增压铸造、热处理和质量检验共4部分。其制造

第一作者：黄金富，高级工程师，主要从事砂型铸造方法相关研究与应用工作，E-mail：tongdarishang01@163.com。

流程囊括了零件结构、铸造工艺、3D打印、铸造方法、清理手段、热处理工艺及质量检验各个方面。整个过程最关键有4个环节，铝合金供油系统制造流程如图1所示。

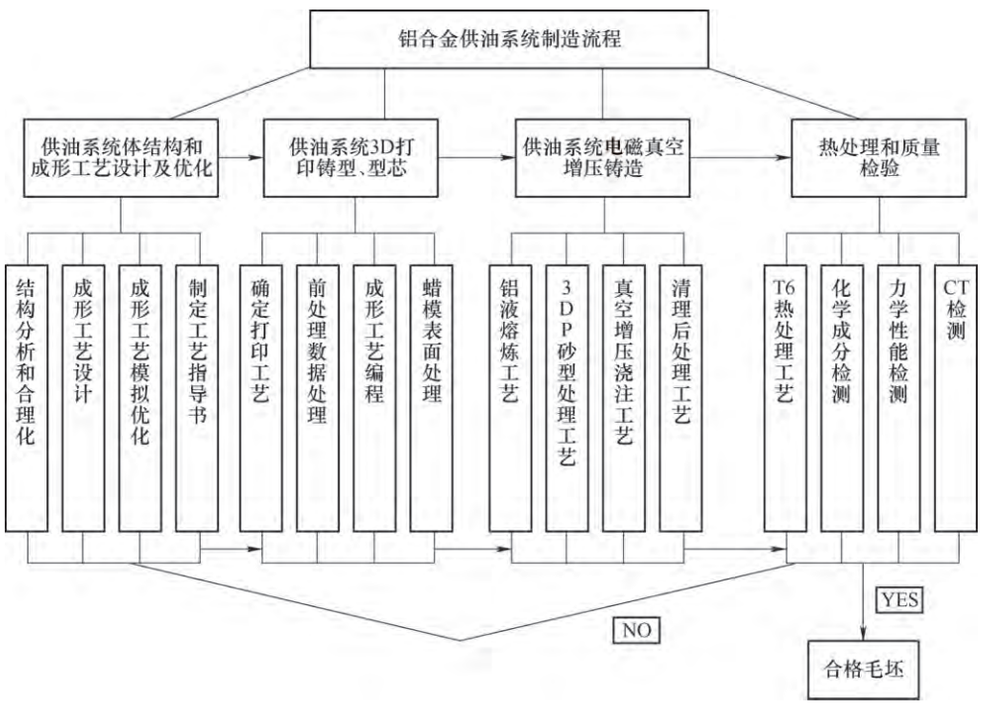

图1　铝合金供油系统制造流程

2　供油系统结构和成形工艺设计及优化

铝合金供油系统构件尺寸为1345mm×654mm×563mm，重136kg，最大壁厚85mm，最小壁厚在3mm左右，小于《铸造手册》推荐最小壁厚5～6mm的要求，工艺设计需要注意铸件产生浇不到和冷隔缺陷。零件壁厚过渡较合理，铸造圆角符合要求，零件结构强度高。此零件结构复杂、取模困难，若采用普通砂型铸造工艺进行生产，则具有很高的难度。构件为典型壁厚很不均匀的厚大铸件，零件和毛坯如图2、图3所示。铝合金供油系统构件要求材料为ZL114A合金，数量为2件，要求Ⅱ类，打压试验0.5～0.8MPa下保压30min无渗漏，尺寸公差CT9级，不加工面表面粗糙度12.5μm，交货周期20天内。结合用户对材料、质量和周期的要求，排除采用开模具再铸造的方法，只能通过“3D打印＋砂型铸造”方法实现。

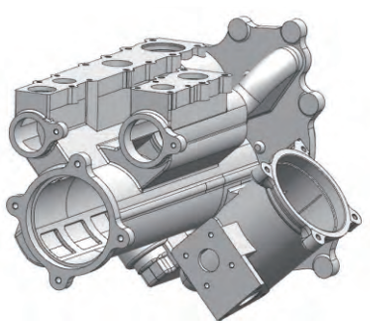

图2　铝合金供油系统零件

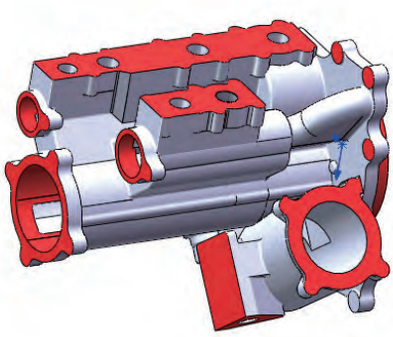

图3　铝合金供油系统毛坯

供油系统结构、外形尺寸和铸造工艺分布等情况分析，针对供油系统尺寸大、制型和补缩工艺实施难等问题，需要在供油系统底部开设内浇道，确保充型过程平稳，减少氧化夹渣，再配合多浇口和冒口压力补缩工艺，通过控制浇注速度、铝液温度、局部热节配置冷铁、内部配冷却材料，以及减

小铸型厚度等方法来调整凝固顺序，以保证铸件质量[1]。

3 铸造工艺设计及模拟优化

供油系统结构优化是采用铸造工艺设计优化CAD系统将铸件毛坯热节位置和尺寸计算出来，对铸件毛坯的可铸性进行评价，帮助设计人员进一步优化结构，尽可能减少厚薄不均情况，减少不便于工艺实施的厚大热节。

浇注位置方案一：铸件竖直正放，有密封槽的高度基准在下部，此处铸件质量容易保证，但是有许多螺纹孔的铸件较厚的部位在侧面，不容易使铸件形成顺序凝固。

浇注位置方案二：铸件平放，有密封槽的高度基准侧放，此处铸件质量较容易保证，有许多螺纹孔的铸件较厚的部位在上面，此处可以设置许多冒口补缩，容易使铸件形成顺序凝固，而且铸件总高度适当，容易浇注成形。

由于砂型为3D打印制造，铸造过程中放置位置不考虑分型和出模问题，最终分析确定供油系统平放，孔向上。供油系统铸造过程放置状态位置如图4、图5所示[1-4]。

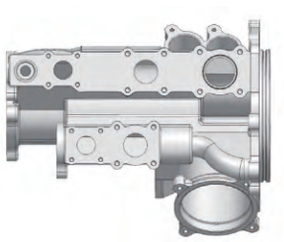

图4 铸造过程放置状态位置1

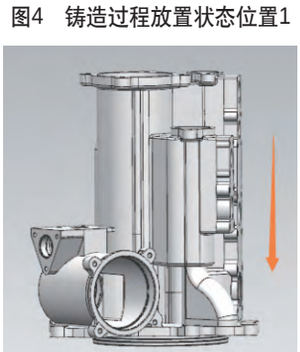

图5 铸造过程放置状态位置2

首先，浇注系统的分类方式基本为两种：一种是按照各组元的横截面积比例关系不同，大致分为封闭式和开放式浇注系统。该零件的材质为ZL114A铸造铝合金，结合该种铸造铝合金的特点着手制定浇注系统，选择如下。

（1）开放式与封闭式浇注系统的选择　通过分析，针对材质为ZL114A的零件，开放式浇注系统金属液在浇注系统中呈无压流动状态，充型平稳，对型腔冲击力小，能够减少铝合金铸件浇注时金属液的氧化；然而其开放比例大时，金属液不易充满浇注系统，由于铝合金流动性能好，因此确定合适的浇注温度即可避免。故本次浇注方案采用开放式浇注系统，其浇道横截面积比为 $\Sigma A_{直} < \Sigma A_{横} < \Sigma A_{内}$。

（2）针对顶注式、底注式、中间注入式和分层注入式等浇注系统的选择　顶注式由于内浇道开在铸件顶部，浇注时液流对铸型底部的冲击力较大，金属液会产生激溅、氧化，易造成砂眼、气孔及氧化夹渣等缺陷。

（3）底注式浇注系统分析　在充型时内浇道基本在淹没状态下工作，充型平稳，可避免金属液发生飞溅、氧化及由此形成的铸造缺陷，且横浇道基本处于充满的状态下，有利于挡渣，型腔内空气容易顺序排出。但内浇道附近容易过热，导致缩孔、缩松和晶粒粗大等缺陷，大薄壁浇注时金属液面在上升过程中容易结皮，形成浇不足、冷隔等缺陷。

（4）中间注入式浇注系统　对于内浇道以下的型腔来说，相当于顶注式浇注系统；对于内浇道以上的型腔而言，则相当于底注式浇注系统，因此兼具顶注式和底注式浇注系统的优缺点。在设计供油系统构件的铸造工艺中，考虑到铝合金熔液易氧化，形成氧化膜，从而在充型冷却过程中易产生针孔类缺陷。因此综合考虑后，本次浇注方案采用底注式浇注系统和中注式浇注系统进行对比分析，浇注系统都采用开放式浇注系统。通过铸造模拟分析后，选择其中一种浇注系统进行工艺改进。根据《铸造手册》推荐的浇注系统的横截面比为：$\sum A_{直} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : (2\sim3) : (1.5\sim4)$，铸造工艺选择为 $\sum A_{直} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : 2 : 2.6$，属于开放式底注的浇注系统。

形成两种浇注系统的工艺方案，此工艺设计采用三维建模软件造型，将有浇注系统工艺模型导出STL格式再导入CAE软件中的网格划分模块进行网格划分。铸造工艺参数如下：铸件浇注温度都是730℃，浇注时间为10s，铸型和砂芯均采用呋喃树

脂砂，铸件与铸型换热系数为500W/（m^2 ·K）[5, 6]。方案一网格总数为5178845个，方案二网格总数为5927400个。两种浇注系统工艺方案和模拟结果如图6～图11所示。

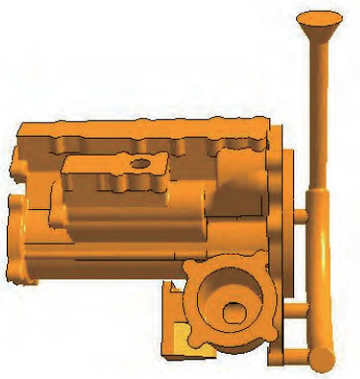

图6　浇注系统工艺方案一

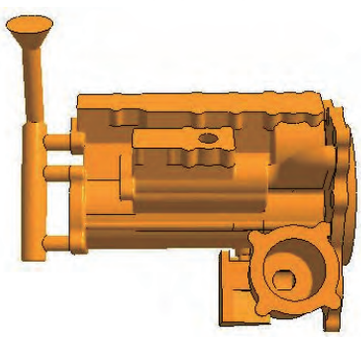

图7　浇注系统工艺方案二

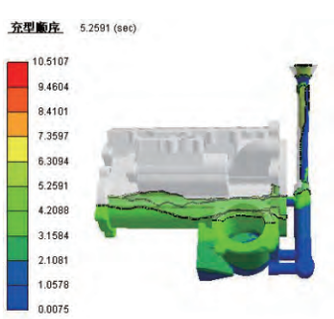

图8　浇注系统工艺方案一（充型50%）

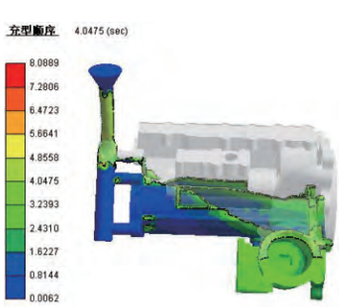

图9　浇注系统工艺方案二（充型50%）

图10　浇注系统工艺方案一缺陷位置

图11　浇注系统工艺方案二缺陷位置

其次，根据两种方案进行模拟分析，确定了浇注系统从小端面进入，并进一步模拟优化，优化后确定两种供油系统铸造工艺方案（见图12、图13）。供油系统铸造过程分析缺陷位置和缺陷大小结果，如图14、图15所示。

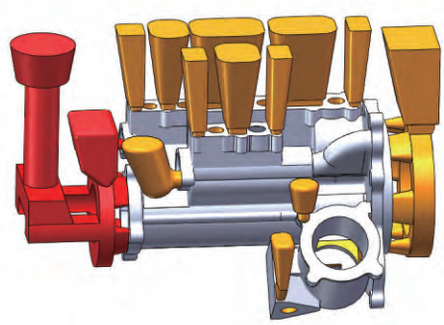

图12　供油系统铸造工艺方案一

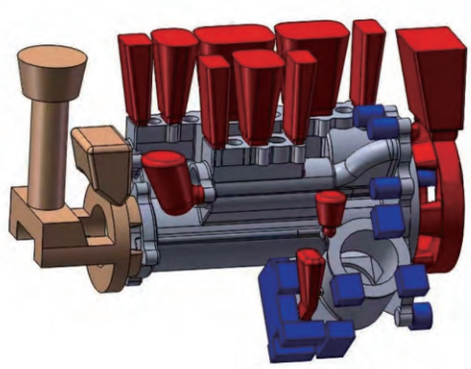

图13　供油系统铸造工艺方案二

图14　供油系统方案一缺陷CT分布

图15　供油系统方案二缺陷CT分布

通过供油系统铸造工艺模拟优化得到方案二优于方案一，方案二缺陷CT显示铸件本体无明显缺陷。

4　供油系统3D打印铸型和型芯

3D打印铸型和型芯是采用喷涂黏接的方法（3DP工艺）将硅砂材料通过合理的参数进行逐层黏接，再进行后处理表面质量好，得到供油系统砂型、砂芯。供油系统数据处理和分层编程，为了节省打印时间和材料，供油系统数据进行镂空处理，厚度为30mm（见图16）。处理后供油系统成形砂型和砂芯[7-12]，如图17～图19所示。

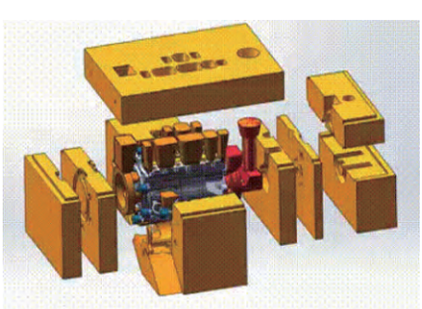

图16　供油系统砂型/芯数据处理

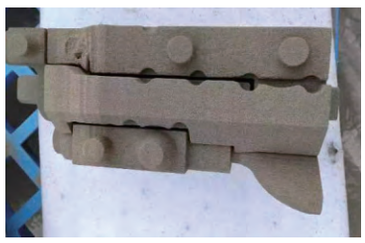

图17　供油系统砂芯

图18　供油系统砂型和砂芯组合1

图19　供油系统砂型和砂芯组合2

5　电磁真空增压铸造

电磁真空增压铸造是采用打印砂型为铸型和型芯组合，在真空环境下电磁浇注，在压力下凝固，有很好的复模性和尺寸稳定性，成形产品表面和内部质量很好。在这个环节重点介绍铝液进化除气过程[13-15]。铝液进化除气过程：铝液熔化后按照正常除渣和除气方法进行，完成后转入浇注专用保温包中，在从熔化炉转入保温包过程中水分又进入铝液，尤其是在湿度>60%时，熔化炉除气作用基本处于无效状态，铸件气孔、针孔十分严重，这种情况往往被忽视。通过将转入浇注专用保温包的铝液，静置至真空罐中，抽真空800Pa状态下10min，在这个过程中，能发现大量的气体从铝液中析出，在液面形成大小不等的气泡，待气泡完全排除后，开始正常浇注。真空增压铸造装备、真空增压铸造控制系统和供油系统清理件，如图20、图21所示。

图20　真空增压铸造装备

图21　真空增压铸造控制系统

通过数据处理、打印、铸型组合、熔炼、合金净化、浇注及清理等工序，将3D打印技术和先进的铸造技术相融合，实现了不开模具即可制造铝合金供油系统。

6　热处理和和质量检验

供油系统零件按照T6热处理，热处理后进行水喷砂表面处理，如图22所示。铸件均需要进行外观质量、力学性能、内部质量（X 射线检测）及气密性等试验与检测。通过检验，供油系统零件质量符合设计要求。

图22　供油系统清理件

7　结束语

1）3D打印砂型、型芯与真空增压铸造融合可研制出合格的农用机械供油系统零件。

2）铸造工艺设计及模拟优化技术可以缩短工艺试制周期。

3）3D打印砂型技术可以快速完成复杂砂型、砂芯的制造且分型简单。

4）真空增压铸造增加了铝合金液流动性和铝液的补缩距离，减少了冷隔、气孔、缩孔及缩松缺陷。

5）3D打印技术适合用于快速制造复杂薄壁铝合金铸件，尤其是有气密性要求的零件生产中。

参考文献：

[1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册-铸造工艺[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2011.

[2] 马亮，古良，李鑫，等. 3D打印在复杂铝合金框架铸件生产中的应用[J]. 金属加工（热加工），2023（8）：10-113.

[3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册-铸造非铁合金[M]. 北京：机械工业出版社，1993.

[4] 李弘英，赵成志. 铸造工艺设计[M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[5] 蒲生，邢世雄. 基于 AnyCasting的叶轮铸造模拟及工艺设计优化[J]. 工业软件，2021（1）：27-30.

[6] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST从入门到精通[M]. 北京：中国水利水电出版社，2010.

[7] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册-特种铸造[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2010.

[8] 高桂丽，张伟坤，杜志敏，等. 基于喷墨3D打印的铸造砂型（芯）成形工艺参数应用研究[J]. 铸造，2020，69（6）：627-631.

[9] 上海铸造协会. 简明铸工手册[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[10] 张涛. 精确砂型铸造技术[J]. 科技创新导报，2018，15（22）：131-132.

[11] 王荣滨. 铸造铝合金缺陷分析与热处理工艺研究[J]. 铸造技术，2008，37（4）：10-12.

[12] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京：机械工业出版社，1982.

[13] 李魁盛. 铸造工艺及原理[M]. 北京：机械工业出版社，1988.

[14] 宋彬，崔聿辰，李雨，等. 3D打印技术和铸造模拟技术在精密铸造生产中的应用[J]. 金属加工（热加工），2016（19）：28-31.

[15] 宋彬. 3D打印蜡模技术在复杂薄壁构件真空增压生产中的应用[R]. 重庆：重庆市机械工程学会铸造分会，2014.

MW 20240326