## 航天大型铝合金壳体树脂砂铸型快速制造 单元设计研究

#### 蒋 清, 孟祥炜, 王 建, 高鹏程, 倪江涛, 齐 朋

(首都航天机械有限公司,北京 100076)

摘要:以航天大型铝合金壳体为对象,基于自硬树脂砂低压铸造工艺特点,进行树脂砂快速造型单元设计研究。通过将叠箱造型工艺优化为分箱底板造型工艺,实现上、中、下各箱同步造型,提升造型效率;将铸型制造工序分解为5种工位,精确设计工位布置和数量,形成高效率自循环的造型单元;通过综合造型单元构建技术研究,在同等条件下单个产品的树脂砂铸型生产效率提升3倍以上,铸型紧实度均匀性提升50%以上,铸型连续生产的效果提升更加明显。

关键词: 大型铝合金铸件; 树脂砂; 造型单元

航空航天等行业装备大量采用优质铝合金铸件,目前国内此类铸件主要采用砂型铸造、熔模精密铸造工艺生产,其中高质量的大型优质铝合金铸件很多采用树脂砂低压铸造工艺。在航天装备中应用最广泛合金之一是ZL114A合金,这是一种优质亚共晶Al-Si系铸造铝合金,此合金具有较高的强度(T6热处理的抗拉强度达到320 MPa),同时具有很好的流动性、气密性和抗热裂性能,能够铸造出复杂形状的高强度铸件,如飞机和导弹的壳体、仪器舱体、支撑梁等承受高载荷的零件,因此,ZL114A合金在航空、航天以及汽车等领域具有广泛的应用前景。

目前,各行业也有自动化程度非常高的自动化树脂砂铸型生产模式,比如汽车等行业的大批量生产模式,由于每种铸件的批量较大,年产几万到几十万件<sup>[3]</sup>,因此,可以投入几千万元资金针对每项产品建设自动化的铸造生产线。与汽车行业不同,在航空航天行业的一些装备生产中,产品项目较多,每个产品的批量较少(每年几十或者几百件)。在国内航天行业内,此类大型ZL114A合金等铝合金铸件采用树脂砂低压铸造工艺生产,然而,在生产过程中存在产品种类多批量少的特点,砂型铸造工艺系统相当复杂,导致此类优质铝合金铸件无法建设高自动化的生产线。

国内很多单位仍采用手工操作,生产效率较低,多品种小批量生产时效率低, 铸件批量生产合格率波动较大,这个问题严重影响到航天行业优质铝合金铸件的应 用前景<sup>[1-2]</sup>。树脂砂造型生产是保证铝合金铸件内部质量和力学性能的核心工序之 一,也是影响铸件生产效率和批产质量合格率的最核心因素之一。本文主要以多品 种小批量航天大型铝合金铸件为对象,基于国内树脂砂低压铸造工艺能力情况,进 行航天多品种小批量大型铝合金铸件树脂砂快速造型单元设计研究,以较低的成本 建设高效率自循环的铸型快速制造单元。

## 1 产品的铸造工艺特点

以航空航天装备的大型铝合金壳体铸件为例,对产品项目进行归类分析,采用形状结构特点成组分类,以轮廓尺寸大小分成同类的不同尺寸系列。比如针对某公司的铝合金现有产品各项目进行分析,高质量优质铝合金铸件生产工艺采用了树脂

作者简介:

蒋 清(1984-),男,高 级工程师,研究方向为 铝合金铸造。E-mail: jq618@163.com

中图分类号: TG245; TG292 文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2019)

08-0916-05

收稿日期: 2019-04-15。 砂低压铸造工艺生产,以典型的20多项产品为生产对 象,进行成组归类。

产品大部分为圆筒形、圆锥形、异性曲面壳体 铸件,这类产品的结构特点是主体简形,产品的内部 为各类筋条和凸台等结构。这类产品的铸造工艺特点 是:铸件的外部工艺相似性较高,外铸型规整性好, 而且产品的模具工装通用性好,整体铸造的工艺和工 装相似性高,可以成组归类生产。

现有的试验条件为:选用Pepset自硬树脂砂工艺, 采用混砂机进行自动混合树脂砂。

在多品种小批量的铸件生产应用中, 高质量优质 铝合金铸件生产工艺在国内普遍采用树脂砂低压铸造 工艺生产,此铸造工艺生产的铸件质量可以满足X光透 视、荧光检测、力学性能等方面的高质量要求。然而 此类铸造工艺生产的特点是: 浇注系统复杂多层, 且 浇道数量多;另外,为满足不同区域的冷却要求,铸 件的冷却系统也非常复杂; 此外, 为保证铝液的排气 排渣能力,排气片数量也较多。由于以上复杂的铸造 工艺系统,导致在铸造生产过程的铸型和砂芯等生产 过程中大量采用手工操作。因此,在多品种小批量铸 件的生产需求特点下, 高质量铝合金铸造工艺的复杂 性和手工操作难点多等特点导致了生产效率低和质量 波动大。为解决以上问题,以核心的树脂砂铸型制造 工序为典型, 开展多品种小批量大型铝合金铸件树脂 砂铸型快速制造单元设计,以提升铸型的生产效率, 提高铸型的批次质量稳定性。

## 树脂砂铸型快速制造工艺优化

与常用的两箱(对箱)造型不同,航空航天用 高质量大型优质铝合金铸件需要采用多层铸型制造 工艺,根据铸件的高度而定,选取铸件高度在500~ 3 000 mm, 因此, 树脂砂铸型数量从3层到8层不等。

以典型圆筒形壳体为例(图1),铸件直径 1500 mm、高度800 mm,铸件的树脂砂铸型分4层,下 部铸型、中部1#铸型、中部2#铸型和上部铸型。按照现 有的叠箱造型工艺生产:首先,将下部浇道模具放置 在底板上,套上砂箱进行填砂紧实,采用自硬树脂砂 需要等待30 min后硬化。等下部铸型硬化后再将中1#箱 浇道外模放置在下部铸型上面,套上砂箱进行填砂紧 实铸型, 30 min后中1\*铸型硬化; 然后, 再将中2\*浇注 系统和外模放置在中1#铸型上面,套上砂箱进行填砂紧 实, 等30 min后中2<sup>#</sup>铸型硬化。最后, 将上部排气系统 模具放置在中2<sup>#</sup>铸型上面,放上砂箱继续填砂紧实,再 等30 min后上部铸型硬化。待所有铸型硬化后进行逐层 起模,最后修整铸型飞边等。整个铸型制造过程中4个 铸型制造的工作都是串行,下一工步需要等待上一工 步全部完成后才能进行,因此,如表1所示一个典型产 品的铸型整个生产过程时间合计达到了209 min。

采用分箱底板造型工艺(图2),典型产品的4个 铸型都直接在底板上填砂造型,4个铸型的生产分开, 然后通过砂箱定位最后组合,因此,此工艺可以分解 为多工位连续循环生产单元。建设树脂砂铸型快速制 造单元,将铸型生产工序分解为5个工位:模具准备 工位、填砂紧实工位、硬化工位、脱模工位、精修工 位,并将所有工位连接形成可循环生产的单元。

综合考虑投入成本和批量生产需求,设计树脂砂快 速铸型制造单元,此单元的生产设计按照40型/8 h,每 个工位的节拍为12 min一个铸型, 因此, 一个典型产品 的铸型整个生产过程所需的时间为4个×12 min=48 min。 与叠箱造型工艺相比,采用分箱底板造型工艺建设的 树脂砂铸型快速制造单元生产时间缩短为其23%,整体 铸型制造效率提升3倍以上。

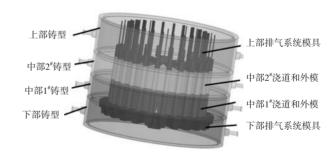


图1 叠箱造型工艺 Fig. 1 The moulding process of stacked boxes

#### 表1 ZL114A典型圆筒形铸件叠箱造型时间 Table 1 Moulding time of typical cylindrical castings in ZL114A

造型工艺	模具准备	下部铸型	中1#铸型	中2#铸型	上部铸型	逐层脱模	精修
	30 min	持力人。	模具吊运组合	模具吊运组合	模具吊运组合		
叠箱造型工艺		填砂3 min +	5 min +填砂3 min	5 min +填砂3 min	5 min +填砂3 min	4层×每层3 min	4层×每层5 min
		硬化30 min	+硬化30 min	+硬化30 min	+硬化30 min		
合计/min	30	33	38	38	38	12	20

### 3 树脂砂铸型快速制造单元设计

根据铝合金树脂砂铸造工艺特点,采用分箱底板造型工艺制造铸型,树脂砂铸型快速制造单元设计包括模具准备工位、填砂和振动紧实、硬化、脱模和铸型精修5个工位,如图3所示。造型线实现将造型托板和模型分别转运至造型单元的准备工位进行组装,在准备工位上放置砂箱、活块、冷铁、浇冒口等;模具准备完成后经机动辊道送到填砂振实工位,人工操作控制混砂机进行填砂,启动振实台进行振实,振实完成后进行刮平,而后进入硬化阶段。硬化完成后的砂型,进入起模工位,通过设备辅助进行起模,最后对铸型精修。根据公司的批产任务情况和造型工位最少时间控制情况,树脂砂铸型快速制造单元设计按照40型/8h,因此,每个工位的节拍为12 min一个铸型。

树脂砂铸型快速制造单元设计如下。

- (1)模具准备工位。由于模具组合涉及到外模、底板、砂箱、冷铁、浇注系统、冒口和排气片等各种工装模具的组合,工作时间较长,为提升组合效率,在线下预备4个准备工位,为各类工装模具的提前配合做准备。在造型工位上预留5个准备工位,可以将模具的准备工位分解为外模和底板组合、浇道与模具组合、冷铁与模具组合、砂箱上线、检查工位,以提升模具组合的整体效率,实现高效率的快速批产模具组合工作。
- (2)填砂和振动紧实工位。通过固定式双臂连续混砂机进行铸型的快速填砂,按照总体纲要计算40型/8 h,即每小时为5型,根据铸件最大轮廓尺寸计算,每个铸型的最大极限用砂重量为3 t,即每小时最大为15 t。采用空气弹簧上升,活动平台在辊筒之间上

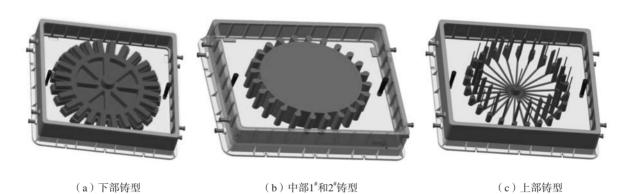


图2 分箱底板造型 Fig. 2 Modeling of bottom plate of sub-box

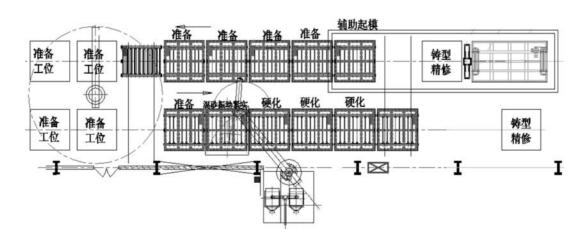


图3 典型铸型快速造型系统工位设计布局 Fig. 3 The layout of typical casting rapid prototyping system

升将辊道上的托板托起。采用高频低振幅先进技术, 适合于自硬砂造型制芯生产线上紧实型砂的要求。工 作台面设置升降高度限位器。空气弹簧有隔离震动的 吸震功能,能有效减少设备对地基的振动作用。震动 由振动电机产生,其偏震块在设备停机时可无级调 节。两侧振动电机的转向相反产生完好地垂直震动。 采用振动电机为振源, 承载为5 t。

- (3)硬化工位。根据树脂砂铸型的厚度及壳体铸 型的实际固化时间,合理设置硬化速度,由于不同产 品的结构和尺寸不同,树脂砂铸型砂层的厚度存在一 定的差异,导致硬化速度无法固定实施,需根据壳体 批产情况讲行适应调整确定,故该工位应具备机动调 整功能。目前,根据现有最大铸型的固化时间进行实 际测算,最大硬化时间不会超过30 min,根据造型单 元生产节拍设计为12 min, 因此, 需要预留3个硬化工 位。
- (4) 脱模工位。脱模工位是保证模具顺利从铸型 中脱出,对于壳体尺寸各异、铸造工艺结构复杂的特 点,由于航空航天类高质量大型铝合金铸件的质量要 求高,外部缝隙浇道数量多,所有模具整体脱模难度 非常大,因此,设计了振动辅助脱模装置,配合链式 翻转机,实现柔性脱模,同时配合人员操作,实现高 效脱模。
- (5)铸型精修和铸型转运工位。该工位主要是完 成铸型的精修,满足不同尺寸铸型的转运,对铸型从 线上转移至重型运载平台上,通过平台进行物流的调 配运转。

通过将叠箱造型改为分箱底板造型工艺,将造型 工序进行分解多个工步进行连续循环单元设计,以实 现高节拍的铸型生产,从而通过以上的工艺优化和单 元设计实现生产效率的全面提升。

## 树脂砂快速造型振动紧实工艺研究

以典型壳体铸件为例进行振动紧实工艺试验。采 用高频低幅振动技术,将设备的电机转速调制到额定 转速2 980 r/min。实际振动过程中,振幅过大(超过 4 mm以上)会造成砂箱和底板不稳,其中的模具配合 振动过大造成无法紧实。根据现有树脂砂工艺特点, 树脂砂混制后4 min开始固化,因此,铸型振动时间需 要控制在180 s以内。以典型壳体中部1#铸型为例,铸型 振动60~100 s仍存在上部局部区域不够紧实的问题, 振动达到100~180 s可以满足所有区域振动紧实,经过 对比试验发现此铸型在120 s已经完全紧实。

根据实际振动过程分析控制在3 mm以内的低振幅 振动过程比较平稳,通过设备激振力的调节开展对比 试验,振动时间为120 s,围绕着模具一圈随机选取5个

部位进行强度检测分析:振幅在1 mm以下时砂芯平均 强度低于1.1 MPa, 且标准差0.45 MPa也较大, 无法保 证稳定紧实。振幅在2~3 mm的砂芯强度能够满足紧实 需求平均值在1.3 MPa左右,标准差也在0.27左右,在 满足平稳振动紧实的需求下,为减少振动对工艺系统 的稳定性影响,振幅选择偏低为好,根据试验选择振 幅2 mm。

目前,所有树脂砂铸型都采用手工舂砂紧实的 方法生产,铸型的质量都是依靠操作人员的经验和力 度把握,且一个铸型存在多个人员同时操作的情况, 造成铸型的紧实度差异较大,如表3所示。铸型的强 度:抽取连续3次手工舂砂的强度分析,最大抗拉强度 1.62 MPa, 最小0.98 MPa, 标准差异最大0.64 MPa, 砂 型强度波动较大。

采用同样的模具和树脂砂,按照振动紧实工艺 进行紧实,振动时间120 s,振幅2 mm,进行振动紧 实工艺的树脂砂强度分析如表4所示,最大抗拉强 度1.4 MPa, 最小抗拉强度1.15 MPa, 标准差异最大 0.26 MPa, 砂型强度的波动是手工舂砂波动的40%。因 此,采用振动紧实工艺进行铸型生产,效率较高,并 且铸型强度的均匀性也有很大改善, 砂型强度波动降 低了60%。

## 5 结论

(1)通过将叠箱造型改为分箱底板造型工艺,采

表2 不同振幅紧实的强度 Table 2 Compact strength with different amplitudes /MPa

Iubic I C	tubic 2 compact strength with universal amplitudes						
振幅/mm	部位1	部位2	部位3	部位4	部位5	平均值	标准差
1	1.02	0.89	1.34	1.21	1.02	1.10	0.45
2	1.38	1.33	1.05	1.32	1.42	1.3	0.27
3	1.36	1.05	1.4	1.43	1.36	1.32	0.28

表3 手工舂砂紧实的强度

Table 5 Manual scoop compaction strength							/WII a
编号	部位1	部位2	部位3	部位4	部位5	平均值	标准差
第一次	1.30	1.24	1.44	1.04	1.46	1.30	0.42
第二次	1.28	1.51	0.98	1.62	1.31	1.34	0.64
第三次	1.36	1.17	1.68	1.43	1.32	1.39	0.51

表4 振动紧实的强度

	/MPa						
编号	部位1	部位2	部位3	部位4	部位5	平均值	标准差
第一次	1.22	1.34	1.40	1.18	1.30	1.29	0.22
第二次	1.28	1.41	1.35	1.15	1.40	1.32	0.26
第三次	1.17	1.37	1.28	1.32	1.42	1.31	0.25

用分箱底板造型工艺建造的树脂砂铸型快速制造单元,生产时间缩短23%,整体铸型制造效率提升3倍以上。

- (2)树脂砂铸型快速制造单元设计将铸型制造工序分解为模具装配(准备)、填砂与振动紧实、硬化、脱模、精修等多个工位,将此5个工步进行连续循环单元设计,以实现高节拍的铸型生产,从而通过以上的工艺优化和单元设计实现生产效率的全面提升。
- (3)与手工紧实工艺相比,大型铝合金典型壳体的振动幅度2 mm左右,振动时间120 s,典型壳体振动紧实树脂砂强度的均匀性提升50%以上。

#### 参考文献:

- [1] 刘华多,刘喆,郭莹.树脂砂生产线的工艺设计与改造[J].装备制造技术,2010(11):105-106.
- [2] 蒋清,孟祥炜,肖文丰. Sr及RE变质对砂型铸造ZL114A合金组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 35-37.
- [3] 曹思盛,王海勇.年产10000t树脂砂生产线技术改造工程[J].中国铸造装备与技术,2003(5):62-64.

# Research on Rapid Prototyping Unit Design of Resin Bonded Sand Mold for Aerospace Large-Scale Aluminum Alloy Castings

JIANG Qing, MENG Xiang-wei, WANG Jian, GAO Peng-cheng, NI Jiang-tao, QI Peng (Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

#### Abstract:

Based on the low pressure casting process characteristics of self-hardening resin bonded sand, the design of resin bonded sand rapid moulding unit was studied. By optimizing the moulding process of stacked box into the moulding process of sub-box bottom plate, the simultaneous moulding of upper, middle and lower boxes can be realized, and the moulding efficiency can be improved. The moulding process can be divided into five kinds of workplaces, and the layout and quantity of workplaces can be accurately designed to form the moulding unit with high efficiency and self-circulation. The resin bonded sand moulding production of single product under the same conditions can be achieved by the research of the construction technology of integrated mould. The efficiency is increased more than three times, the uniformity of compactness is increased by more than 50%, and the effect of continuous casting production is more obvious.

#### Key words:

large-scale aluminium alloy castings; resin bonded sand; moulding unit