

“永冠杯”第八届中国大学生铸造工艺设计大赛  
参赛作品

铸件名称：F 件-箱体

自编代码：BF0320ZJ

方案编号：

## 目 录

摘要 .....	1
1 零件的特点与工作环境分析.....	2
1.1 零件结构特点分析 .....	2
1.2 零件用途分析 .....	4
1.2.1 零件工作环境分析 .....	4
1.2.2 零件结构分析 .....	4
1.3 铸件材质特点 .....	5
2 造型材料选择.....	6
2.1 造型材料的选择要求 .....	6
2.2 造型材料的选用 .....	6
2.3 涂料的选择 .....	7
2.3.1 树脂砂铸型产生粘砂缺陷分析 .....	7
2.3.2 树脂砂涂料的选择 .....	7
3 铸造工艺的选择.....	7
3.1 浇注位置的确定 .....	7
3.2 分型面的选择 .....	8
3.3 砂箱内铸件的数目与排列 .....	8
3.4 铸造工艺参数的确定 .....	9
3.4.1 铸件尺寸公差 .....	9
3.4.2 铸件的重量公差 .....	9
3.4.3 机械加工余量 .....	10
3.4.4 铸造收缩率 .....	10
3.4.5 起模斜度 .....	11
3.4.6 铸件最小壁厚和最小铸出孔 .....	11
3.4.7 附铸试样尺寸的确定 .....	12
3.5 砂芯的设计 .....	13
3.5.1 砂芯方案 .....	13
3.5.2 砂芯形状 .....	14
3.5.3 芯骨设计 .....	16
3.5.4 砂芯排气 .....	17
4 浇注系统的设计.....	17
4.1 浇注系统类型的选择 .....	17
4.2 浇注时间的确定 .....	18
4.4 阻流面面积的计算 .....	19
4.4.1 方案一 .....	19
4.4.1.1 各浇道面积的确定 .....	20

4.4.1.2 浇注系统的校核.....	21
4.4.1.3 浇口杯的设计.....	22
4.4.1.4 过滤网的设计.....	23
4.4.2 方案二.....	23
5 铸造工艺的模拟与分析.....	25
5.1 模型导入及网格划分.....	25
5.2 铸造参数设定及模拟.....	26
5.3 模拟结果及分析.....	26
5.3.1 充型速度场分析.....	26
5.3.2 缺陷以及工艺优化性分析.....	30
5.4 工艺结果对比与改良分析.....	33
5.5 冒口的初步设计与计算.....	33
5.5.1 冒口的种类.....	33
5.5.2 冒口的形状.....	33
5.5.3 冒口的计算.....	34
5.6 冷铁的初步设计与计算.....	34
5.6.1 冷铁的选择.....	34
5.6.2 冷铁的位置设计.....	34
5.6.3 冷铁的尺寸计算.....	35
5.7 初步优化结果与分析.....	36
5.8 铸造工艺的二次优化.....	38
5.8.1 铸造工艺的二次优化分析.....	38
5.8.2 铸造工艺的二次优化模拟结果.....	39
5.9 最佳工艺（平做立浇）.....	40
6 铸造工艺装备.....	40
6.1 模样.....	40
6.2 砂箱.....	41
6.2.1 砂箱尺寸设计.....	41
6.2.1 砂箱定位设计.....	42
6.3 芯盒设计.....	42
6.4 下芯顺序及合箱.....	43
7 熔炼工艺参数的确定.....	44
7.1 熔炼方法.....	44
7.2 变质剂的选择.....	45
7.3 细化剂的选择.....	45
7.4 精炼除气.....	45
7.5 熔炼工艺.....	46
8 铸件质量检测及处理.....	46
8.1 铸件清理.....	46

8.2 X 射线探伤检测 .....	46
8.3 24 小时煤油渗漏检测 .....	46
8.3 荧光探伤 .....	47
8.4 热处理制度 .....	47
8.5 抛丸处理 .....	47
9 工艺卡 .....	48
参考文献 .....	49

## 摘 要

本次铸造工艺为 F 件-箱体的铸造工艺。箱体材质为 ZL101A，用于装配高速列车转向架齿轮箱。齿轮箱为高速列车的动力传动装置，是列车的核心部件之一，其工作性能的好坏直接影响到高速动车组运行的可靠性和安全性，因此，对箱体的力学性能有较高要求。工厂中，箱体与其他部件装配在恒温室进行，可见对其精度同样有较高要求。因此在工艺设计中，应保证铸件精度与质量，在此前提之下，考虑对成本的降低与工艺中污染的减少。

确定工艺时，首先在零件图基础上确定铸造工艺参数，绘制毛坯图，并在毛坯基础上进行工艺设计。本次工艺采用树脂砂造型，开放式底注式浇注系统，使用中间分型。浇注系统设计了平做平浇与平做立浇共 3 种方案，使用 ProCAST 仿真模拟软件分别对其进行初步模拟，分析模拟结果的充型过程、缺陷分布以及工艺改进性等方面，最终浇注系统选择平做立浇底注式的浇注系统，充分保证铸件重要工作部位（即 X 射线探伤部位）在铸件下部，提高铸件质量。在工艺改进中，通过多次调整冒口与冷铁的位置，使铸件产生有利于最终铸件综合性能的顺序凝固方式，消除了铸件中的缺陷，并且保证铸件有较高的工艺出品率，符合工厂生产中经济性的原则。

合金熔炼时，采用铝锶变质，并用中间合金进行细化，采用 FOSECO 精炼除气站喷吹氮气对铝液进行精炼除气，降低铸件凝固过程中气孔类缺陷倾向。铸件浇注后，进行 X 射线探伤、24 小时煤油渗漏实验检测内部质量；进行荧光探伤检测铸件表面质量。铸件满足缺陷评定等级，进行 T6 热处理后获得最终交货铸件。

**关键词：**F 件-箱体 平做立浇工艺 铸造工艺优化

## 1 零件的特点与工作环境分析

### 2201.1 零件结构特点分析

1.零件名称：箱体

2.材质：ZL101A

3.技术要求：箱体技术要求分为两个部分，一部分为零件图中技术要求；一部分为附加技术要求。其中，零件图中技术要求如下：

1) 箱体的重要部位件见图中双点划线所示，此部位进行探伤。

2) 未注铸造圆角为 R5~R10；

3) 锐角倒钝；

4) 箱体材料规范见 TZ/DC002-2015；

5) 装钢丝螺套处钻孔直径及深度：12-M12×1.75×20、8-M12×1.75×20、18-M12×1.75×20 处钻孔  $\Phi 12.4_{-0.05}^0$  深 23，2-M6×1×15 处钻孔  $\Phi 6.2_{-0.05}^0$ ，深 17.5，4-M10×1.5×20/2-M10×1.5×20 处钻孔  $\Phi 10.3_{-0.05}^0$ ，深 23，6-M8×1.25×15 处钻孔  $\Phi 8.2_{-0.05}^0$  深 17，M20×1.5 处钻孔  $\Phi 20.3_{-0.05}^0$ ，G1-1/4 处钻孔  $\Phi 42.7_{-0.05}^0$ ，钻孔后用专用工具攻丝；

6) 箱体铸造零件编号 GD01、GD02……字样；

7) D-D 中 10×10 方孔、20×20 方孔；M-M 中 10×10 方孔；N-N 中 10×10 方孔；Q-Q 中  $\Phi 15$  孔应铸出，孔壁不得有夹渣等缺陷；

8) 箱体铸造不得有夹渣等缺陷。

9) 尺寸公差应符合 GB/T 6414 的 CT11-12 级规定，重量公差按 GB/T 11351 的同等级规定执行；

附加技术要求分为八个部分，下将其列出并作简要分析：

I) 铸件材质：箱体铸件材质为 AlSi7Mg0.3（即 ZL101A）；

II) 热处理状态：T6；

III) 化学成分：执行标准 DIN EN1706，见表 1.1：

表 1.1 铸件化学成分表

元素含量 (%)							其他杂质 (%)	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	单独	总量
6.5~7.5	≤0.19	≤0.05	≤0.1	0.25~0.45	≤0.07	0.08~0.25	≤0.03	≤0.1

IV) 机械性能：执行标准 DIN EN1706，见表 1.2：

表 1.2 铸件机械性能表

试样要求：（附铸试样 4 块，2 块用于自检，2 块交付客户）			
$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\delta_5$ (%)	HBS
≥230	190	≥2	≥75

V) 尺寸精度：箱体铸件的几何形状、尺寸、工艺加工余量等均应符合图纸及工艺的要求，铸件的尺寸公差应符合 GB/T 6414 的 CT11-12 级规定，重量公差按 GB/T 11351 的同等级规定执行。

VI) 内部质量：箱体指定部位按 ASTM E94-2004 进行 X 射线探伤，缺陷的类型及级别评定按 ASTM E155 进行，质量等级应达到 ISO9915:1992 的 C 级，见表 1.3：

表 1.3 X 射线探伤评级

检验严格程度	C 级	
参考厚度/mm	6.35	19.1
厚度范围/mm	<12	12~50
ASTM 参考底片名称	级别	
气孔	5	5
缩孔	2	-
缩松（海绵状）	4	3
夹杂物（低密度）	4	4
夹杂物（高密度）	4	3

箱体指定部位见图 1.1:

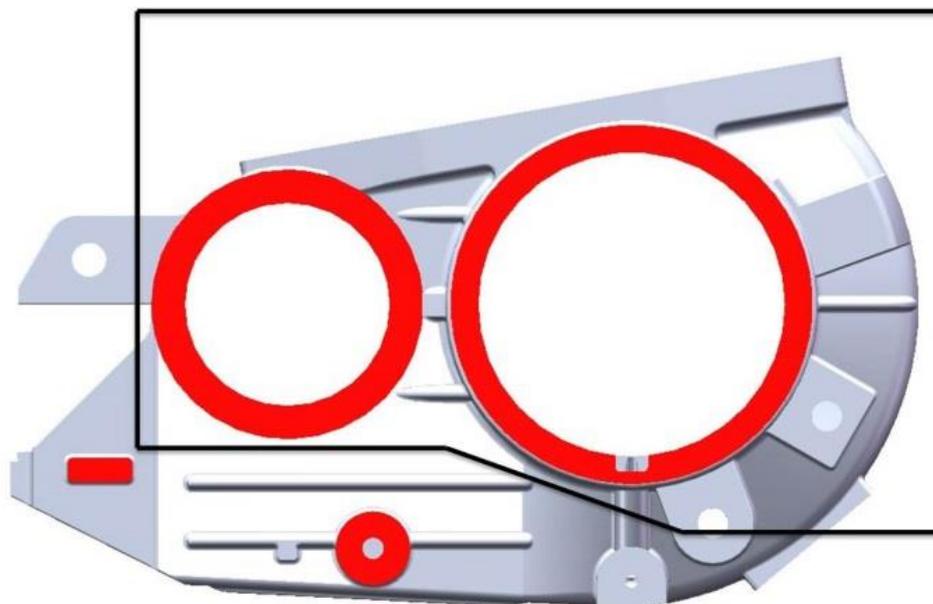


图 1.1 箱体探伤部位

箱体应进行 24 小时煤油渗漏检验，不应出现渗漏。由于箱体结构原因个别地方做不到渗漏，可在甲方加工后验证，如存在渗漏缺陷，由乙方负全部责任。

**VII) 表面质量:**

- i) 箱体铸件的表面质量应符合 GB/T 9438-1999 的 4.6 中 I 类铸件的要求;
- ii) 铸件铸后进行抛丸处理，表面清理干净；抛丸后的表面粗糙度应达到 Ra12.5;
- iii) 箱体表面按 QJ2286-1992 进行荧光探伤，不允许有裂纹、冷隔、线性缺陷及穿透性缺陷。

4.零件的形状：如图 1.2 所示：

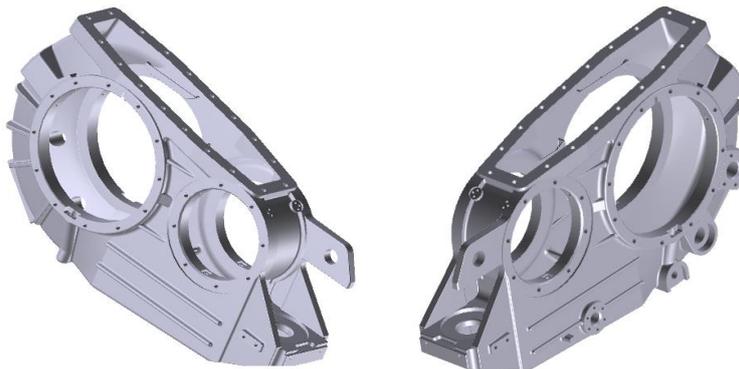


图 1.2 零件三维结构实体图

5.形状特点: 齿轮箱箱体结构复杂, 质量为 55.8kg, 轮廓尺寸为 1003×609×220mm, 最大壁厚约 40mm, 最小壁厚约 5mm, 主要壁厚约 35mm, 法兰较多且壁厚均达到 40mm, 成为铸件热节部位, 易产生缩松缺陷。箱体内腔三面均有油槽, 应保证油槽底部光滑没有阻碍。

## 1.2 零件用途分析

### 1.2.1 零件工作环境分析

本次铸件箱体为高强度铸铝合金动车转向架齿轮箱, 其主要作用为实现牵引力和制动力的传递。图 1.3 为齿轮箱安装位置示意图:

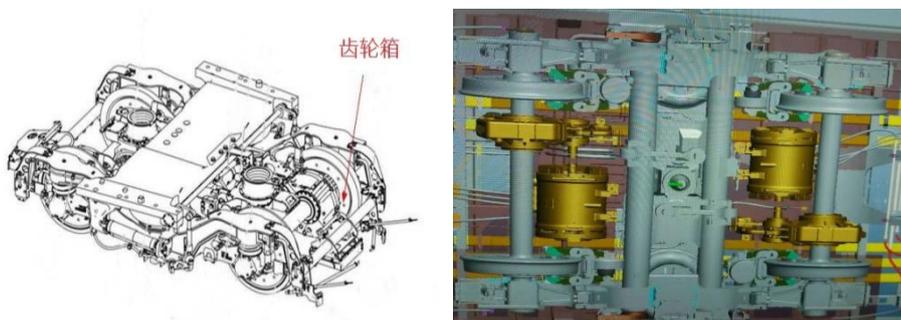


图 1.3 齿轮箱安装位置示意图

齿轮箱工作时, 将牵引电机的扭矩有效地传递到车轴而使动车组加速, 或者是将车轴的转矩传递给牵引电机发电而使动车组减速, 并承受电机驱动装置的振动冲击以及电机扭矩等载荷, 且对齿轮及轴承提供润滑。

### 1.2.2 零件结构分析

动车转向架齿轮箱由箱体与传动零件(齿轮等)、轴、轴承及其附件共同装配组成。工作时, 牵引电机将动力通过传动轴传入齿轮箱, 在齿轮箱中经齿轮传动再经轮对轴传递到轮对上。其中, 本次箱体铸件的主要部分位置如图 1.4 与表 1.4 所示:

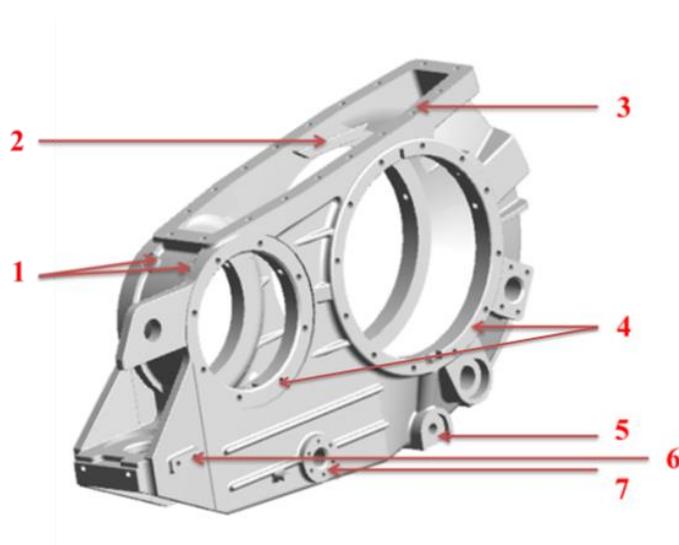


图 1.4 铸件主要部位

表 1.4 铸件主要部位

位置	名称	数量	作用
1	凸台	2	用于温度传感器的放入
2	油杯	5	滚动轴承采用润滑脂润滑时，应经常补充润滑脂。为其供注润滑脂用
3	法兰盘 1	1	与箱盖进行装配
4	法兰盘 2	2	与外盖配合分别固定轮对轴与牵引电机传动轴
5	放油活塞	1	换油时，排出污油和清洗剂。平时用带有细牙螺纹的螺塞堵住
6	磁栓座	1	固定磁铁
7	法兰盘 3	2	配合后固定齿轮箱箱体

查阅相关资料<sup>[1]</sup>发现，在电机正反转时，箱体最大应力主要出现在小齿轮法兰盘和箱体定位部分，在箱体制造过程中，需重点关注该部分的缺陷与力学性能。

### 1.3 铸件材质特点

箱体的材质为 ZL101A，零件重量为 55.8kg。ZL101A 力学性能较高、铸造性能优良，同时具有较好抗氧化和抗腐蚀能力。其物理性能和化学成分分别如表 1.5 和表 1.6 所示。

由于该合金具有铸造性能良好、缩松倾向小等优点，对保证下箱体的致密性非常有利。适当控制合金中有害杂质元素 Fe、Cu、Zn 等的含量，采用变质处理技术，优化 Si、Mg、Ti 等主要元素成分并经 T6 热处理工艺参数，从而得到高性能的铝合金，T6 处理后力学性能如表 1.7 所示。

表 1.5 ZL101A 的物理性能

合金牌号	密度密度/g cm-3	固相线和液相线
ZL101A	2.68	557~613

表 1.6 ZL101A 的化学成分

元素含量 (%)							其它杂质 (%)	
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	单独	总量
6.5~7.5	≤0.19	≤0.05	≤0.1	0.25~0.45	≤0.07	0.08~0.25	≤0.03	≤0.1

表 1.7 ZL101A 材料力学性能

$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	$\delta_5$ (%)	HBS
≥230	190	≥2	≥75

## 2 造型材料选择

### 2.1 造型材料的选择要求

铝合金箱体铸件，其所用铝硅合金流动性好、热膨胀系数和收缩率小，但铸件会出现气孔、针孔、穿壁等问题，而影响铸件质量，所以型砂应具有较小的发气量，因箱体为 I 类铸件，针孔等级要求较高，所以砂型、砂芯均应发气量小，强度符合要求。

### 2.2 造型材料的选用

由于树脂砂流动性好易紧实，强度高（24h 抗拉强度可达 1.3~1.6MPa）且易溃散（残留强度约为 0.2MPa），故此次采用树脂砂造型。近几年，树脂砂发展较快的为呋喃树脂自硬砂、碱性酚醛树脂自硬砂、PEPEST 自硬砂。表 2.1 为三种砂子性能对比：

表 2.1 三种砂性能对比

树脂砂种类	呋喃树脂砂	碱性酚醛树脂自硬砂	PEPEST 自硬砂
优点	树脂加入量少，粘结强度大，耐热性好，铸件的表面质量好，落砂性能好，旧砂易再生。	树脂中不含 N、P、S 元素，高温下有二次硬化现象，裂纹倾向比呋喃树脂砂小，不放出刺激性气体，生产环境好，落砂清理性能好	树脂砂可使用时间长，型砂流动性好，可用于射砂制芯，硬化速度快，落砂性能好，裂纹倾向比呋喃树脂砂小，旧砂再生较容易
缺点	造型浇注时有刺激性气味（有害气体），劳动环境差，高温型砂退让性差，发气量大	型砂强度比呋喃树脂砂低，树脂加入量较高，成本较呋喃树脂砂高，旧砂再生较呋喃树脂砂困难，存放稳定性较差	脂加入量高，成本较呋喃树脂砂高，制芯时有有毒气体放出，作业环境差，含 N 量高，易产生气孔类缺陷

考虑到铝合金铸件会出现气孔、针孔类问题，而影响铸件质量，所以型砂应具有较小的发气量，故本此工艺设计使用碱性酚醛树脂自硬砂，具体成分如表 2.2 所示：

表 2.2 箱体所用砂子成分

原材料名称	旧砂 (%)	新砂 (%)	树脂 (%)	固化剂 (占树脂%)	抗拉强度 (MPa)
型砂	40~65	35~60	1.5~1.7	30	0.4~0.7
芯砂	60~70	30~40	1.7~2.0	30	0.7~1.2

## 2.3 涂料的选择

### 2.3.1 树脂砂铸型产生粘砂缺陷分析

树脂砂铸型上产生粘砂缺陷与其他砂型产生的烧结型粘砂不同，是由于液态金属浸入砂粒间隙而引起的。根据《现在涂料及应用》<sup>[2]</sup>中试验可知，在空气中 600℃ 能够完全燃烧的树脂，在非氧化气氛中（氮气）即使加热到 900℃ 也不会完全燃烧，由于树脂砂回收率高，故再生砂含有较多的残留树脂，所以再生砂的铸型比用新砂的铸型加热时失重更多，浇注时产生更大的孔隙，造成了金属容易渗透的条件。

可以看出的粘砂等缺陷是由于随着加热铸型膨胀而扩大砂粒间隙，并使铸型产生了裂纹，以及由于粘合剂燃烧使砂粒间隙进一步扩大而引起的。

### 2.3.2 树脂砂涂料的选择

根据树脂砂产生粘砂等缺陷的主要原因的讨论，可以看出树脂砂铸型对其所用涂料要求除了一般涂料应具有的各种性能之外，还应特别注意其抗裂纹性及能涂厚性即可以形成绝热的涂层。

因此选取涂料配方与性能分别如表 2.3、表 2.4 所示：

表 2.3 树脂砂用水石英粉涂料

成分	石英粉	钠基膨润土	CMC	水溶性酚醛树脂	硅溶胶	氧化铁粉	水
单位：% (质量)	100	2	0.4	5	7	5	适量

表 2.4 涂料的性能指标

悬浮稳定性	密度	粘度	发气量	渗透深度	抗裂性
大于 8h	1.68~1.70g/cm <sup>3</sup>	6.7s(Φ6 粘度杯测)	16mL/g	3~4 个砂粒	1200℃ 急热无裂纹 (2min)

## 3 铸造工艺的选择

### 3.1 浇注位置的确定

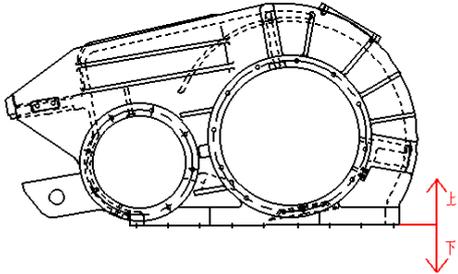
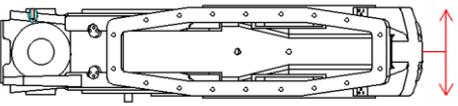
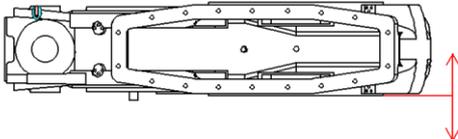
浇注位置是指浇注时未来铸件在型内所处的状态（姿态）和位置。浇注位置在很大程度上着眼于控制铸件的凝固。实现顺序凝固的铸件，内应力小，变形小，金相组织比

较均匀一致，不用或很少采用冒口，节约金属。减小热裂倾向。根据合金凝固理论和实际经验，综合本次铸件材料为 ZL101A，浇注时易产生氧化膜夹层，从而形成针孔类缺陷，因此浇注时力求金属液流平稳，故本次浇注采用底注式浇注系统，水平倾注方式。

### 3.2 分型面的选择

分型面是指两个半铸型相互接触的表面。分型面一般在浇注位置确定后再选择，但分析各种分型面方案的优点和不足之后，可能需要重新调整浇注位置，本次根据铸件结构特点，设计了表 3.1 中三种分型方案：

表 3.1 分型面方案

方案编号	位置选择	优劣
1		<p>优点：保证大平面在下；砂芯的数量少。</p> <p>缺点：砂箱高，造型困难，填砂，紧实，起模都不方便。</p>
2		<p>优点：砂芯数量少；活块数量少。砂箱不高，下芯方便。</p> <p>缺点：可能会使铸件产生错边（箱）。</p>
3		<p>优点：砂箱不高，下芯方便；位于同一砂箱提高了铸件尺寸精度。</p> <p>缺点：砂芯与活块数目势必增加</p>

根据箱体设计的基本三个要求以及对于相关厂家的了解，本次铸件箱体装配要求为恒温室中，且精度达到了 0.1mm，最终我们选择了方案二的分型方式，减少砂芯数量，方便下芯，降低工艺难度，但在工艺中应考虑避免错箱。

箱体设计的基本三个要求：

- 1.主要平面的形状精度和表面粗糙度；
- 2.孔的尺寸精度、几何形状精度和表面粗糙度；
- 3.主要孔和平面相对位置精度。

### 3.3 砂箱内铸件的数目与排列

在造型的过程，由于齿轮箱外形结构复杂，采用一箱一件。根据铸件重量确定了铸件的吃砂量，铸件在砂箱中的排列如图 3.1 所示：

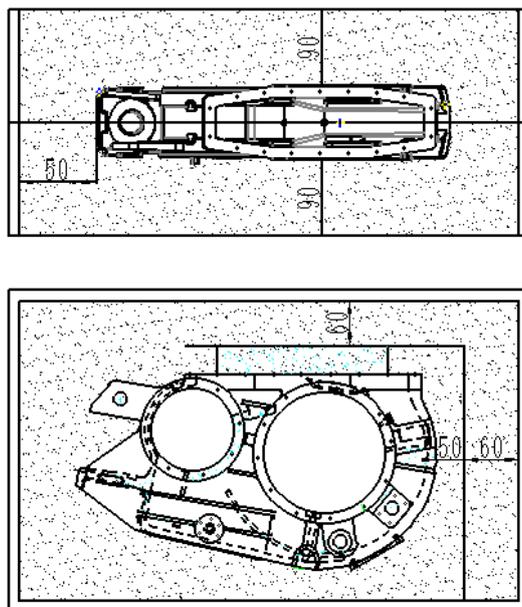


图 3.1 铸件在砂箱中的位置

### 3.4 铸造工艺参数的确定

#### 3.4.1 铸件尺寸公差

铸件尺寸公差是指允许的铸件尺寸变动量。公差就是最大极限尺寸与最小极限尺寸代数差的绝对值。铸件尺寸保持在两个允许的极限尺寸之内，就可以满足加工、装配和使用的要求。

根据铸件的技术要求，铸件尺寸公差应符合 GB/T 6414 的 CT11-12 级规定，查阅手册<sup>[3]</sup>得：

表 3.2 铸件尺寸公差 (mm)

毛坯尺寸	铸造尺寸公差等级	
	11	12
25~40	3.6	5
40~63	4	5.6

根据毛坯的尺寸，铸件尺寸公差值取 4mm。

#### 3.4.2 铸件的重量公差

铸件的重量公差定义为以占铸件公称重量的百分率为单位的铸件重量变动的允许值。所谓公称重量是包括加工余量和其他工艺余量，作为衡量被检验铸件轻重的标准。根据铸件的技术要求，重量公差按 GB/T 11351 的同等级规定执行，查阅手册<sup>[3]</sup>得：

表 3.3 铸件重量公差等级 (%)

公称重量 (kg)	铸造重量公差等级	
	11	12
40~100	12	14

根据零件的重量为 55.8kg，最终选择铸件重量公差为 14%。

### 3.4.3 机械加工余量

机械加工余量值由精到粗共分为十个等级：A、B、C、D、E、F、G、H、J 和 K，如表 3.4 所示为毛坯铸件在不同铸造方法时，采用的机械加工余量等级。

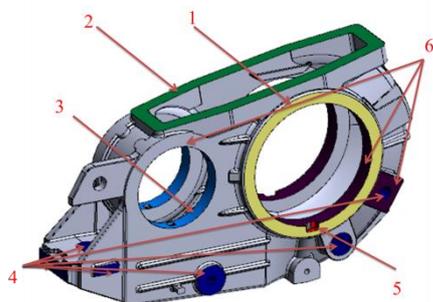
表 3.4 铝合金铸件的加工余量等级

方法	砂型铸造手工造型	砂型铸造机器造型
机加工余量等级	F~H	E~G

由表可知采用砂型铸造时，加工余量等级为 F~H，考虑到方便加工，确定各加工量的具体尺寸：箱盖配合面取 7mm，法兰盘面分别取 5mm 和 6mm，法兰孔分别取 4mm 和 5mm，磁栓座等其余加工面取 3mm，具体尺寸如表 3.5 所示：

表 3.5 加工余量尺寸

序号	加工余量/mm
1	6
2	7
3	5
4	4
5	2
6	3



### 3.4.4 铸造收缩率

铸造收缩率的定义为：

$$K = [(L_M - L_J) / L_J] \times 100\% \quad (\text{式 3.1})$$

式中  $L_M$ ——模样（或芯盒）工作面的尺寸；

$L_J$ ——铸件尺寸。

铸造收缩率与铸造合金种类、浇冒口系统结构、铸件结构、铸型种类（含砂型和砂芯的退让性）等因素有关。铸造合金从凝固状态转变为固态会产生收缩；合金的成分与其含量不同，其收缩率同样会发生变化，这是铸造合金的特性。浇冒口结构阻碍收缩，

铸件结构的复杂性，砂型和砂芯的退让性差，都会阻碍到铸件由液态变为固态的收缩。因此，实际的铸造收缩率是由上述各种因素综合形成的。查阅手册<sup>[3]</sup>得：

表 3.6 铝合金铸件的铸造收缩率

合金	模样尺寸/mm	结构形式	收缩率 (%)
铝合金	<1200	无芯	1.30
	635~1220	有芯	1.18~1.04

选择恰当的铸造收缩率是得到尺寸精确的铸件的必须条件，箱体尺寸不大，材料为 ZL101A，凝固时收缩率不大于其自由收缩率，且考虑到受阻，根据表 3.6 得取收缩率 1.18%。

### 3.4.5 起模斜度

为了方便起模，在模样、芯盒的出模方向留有一定斜度，以免损坏砂型或砂芯。这个斜度，称为起模斜度。查阅手册<sup>[3]</sup>得：

表 3.7 起模斜度 (JB/T5105-1991)

自硬砂造型时，模样外表面的起模斜度		
测量面高度 h/mm	起模斜度 (木模样)	
	$\alpha$	a/mm
>100~160	0°40'	2.0
>160~250	0°35'	2.6

箱体采用组芯造型，选用模样拔模斜度，原则上不应超过铸件的壁厚公差要求即可，根据自硬树脂砂造型，最终确定  $\alpha=0^{\circ}35'$ ， $a=2.6\text{mm}$ 。

### 3.4.6 铸件最小壁厚和最小铸出孔

铝合金液的充型能力，主要由铸件的轮廓尺寸、铝合金液态时的流动性和铸造工艺等所决定。为了尽量避免冷隔、缩松、缩孔等缺陷，必须要求铸件的壁厚不能小于最小壁厚。铝合金铸件在砂型铸造下的最小壁厚如表 3.8 所示。

表 3.8 铝合金铸件在砂型铸造中的最小壁厚

铸件轮廓尺寸 (mm)	铸件最小壁厚 (mm)
$\leq 200 \times 200$	3
$> 200 \times 200 \sim 500 \times 500$	4
$> 500 \sim 500$	6

根据齿轮箱的轮廓尺寸  $1003 \times 609 \times 220(\text{mm})$ ，由上表可得铸件最小壁厚为  $6\text{mm}$ ，由箱体毛坯图测得的最小壁厚为  $6\text{mm}$ ，满足铝合金在砂型铸造下的最小壁厚要求。

铸件上的孔和槽，究竟是直接铸出还是由机械加工而出，这应从经济角度及铸件品质要求等方面考虑。通常情况下，零件图样上较大的孔应直接铸出，从而节约机械加工工时和金属，同时还可以避免铸件局部过厚所造成的热节，提高铸件质量；而对于较小的孔，则直接机械加工更方便；但对于一些特殊孔，如方孔、弯曲孔等，这些孔无法采用机械加工，需直接铸出。

根据箱体的材质，轮廓尺寸查阅相关资料可知，最小铸出孔直径为  $20\text{mm}$ 。不铸出孔如图 3.2 所示：

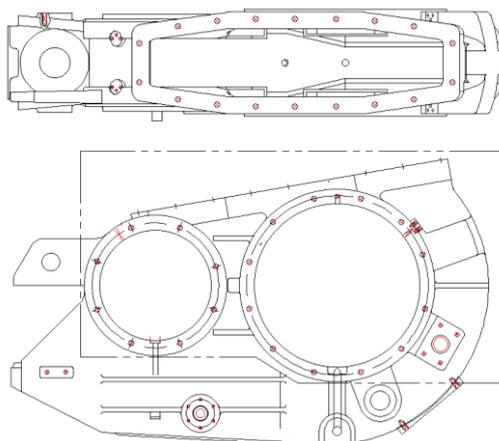


图 3.2 不铸出孔示意图

### 3.4.7 附铸试样尺寸的确定

根据附加技术要求机械性能要求，铸造时应随铸件铸造铸件试验棒，执行标准 DIN EN1706 中对砂型铸件试验棒要求如下：

- 1) 它必须用砂模铸造，不进行人工淬火，对于所使用的铸件应该是同一个翻砂制度。
- 2) 铸造的试验棒的直径至少应有  $12.0\text{mm}$ 。
- 3) 试验棒的测量长度和试验长度都必须与 EN 10002-1 一致。

查阅 EN 10002-1 标准，基于原标准试验棒为圆形截面，本标准中圆形截面试验棒中的比例试验棒尺寸如表 3.9 所示：

表 3.9 试验棒尺寸

K	直径 $d/\text{mm}$	原始横截面积	原始标距长度	最小平行长度	总长 $L_t/\text{mm}$
		$S_0/\text{mm}^2$	$L_0/\text{mm}$	$L_c/\text{mm}$	
	$20 \pm 0.150$	314	$100 \pm 1.0$	110	
5.65	$10 \pm 0.075$	78.5	$50 \pm 0.5$	55	$L_t > L_c + 2d$
	$5 \pm 0.040$	19.6	$25 \pm 0.25$	28	

因此仅能选择直径为  $20\text{mm}$  的试验棒，但其长度过长，对铸件起模有一定影响，因此决定采用非比例试验棒，直径为  $12\text{mm}$ ，试验棒尺寸计算如下：

$$\text{原始横截面积 } S_0 = 113.04 \text{ mm}^2$$

原始标距长度  $L_0 = K\sqrt{s_0} = 60.07\text{mm} = 60 \pm 0.5\text{mm}$

最小平行长度  $L_c = L_0 + d/2 = 66\text{mm}$

总长  $L_t = L_c + 2d = 90\text{mm}$

试验棒最终如图 3.3 所示：

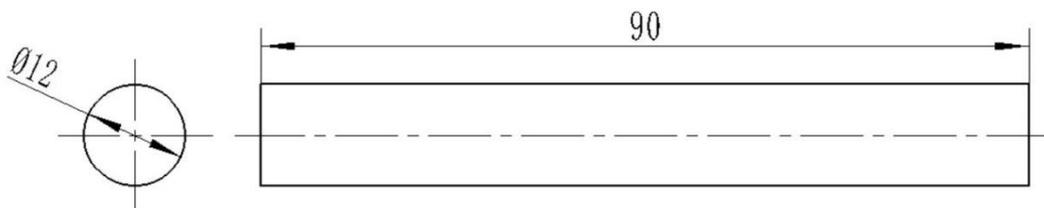


图 3.3 试验棒尺寸

### 3.5 砂芯的设计

砂芯的功用是形成铸件内腔、孔和铸件外形不能铸出砂的部位。砂型局部要求特殊性能的部分，有时也用砂芯。

对砂芯的要求主要是：

- 1) 砂芯的形状、尺寸以及在砂型中的位置均应保证铸件的形状和尺寸符合要求。
- 2) 具有足够的强度和刚度。
- 3) 在铸件形成过程中砂芯所产生的气体能及时排出型外。
- 4) 铸件收缩时的阻力小，容易清砂。

#### 3.5.1 砂芯方案

对于 F-箱体，主要采用碱性酚醛树脂自硬砂制芯，其中 D-D 中 10×10 方孔、20×20 方孔；M-M 中 10×10 方孔；N-N 中 10×10 方孔；Q-Q 中  $\Phi 15$  孔采用溃散性好、易清理的宝珠砂单独制造。如图 3.4 所示，1# 芯形成加强肋中间部位和底部散热筋处不易起模的部分，2# 芯用于铸出箱体铸造零件编号，3# 芯来形成箱体内腔，由于内腔形状复杂，所以考虑采用组芯造型。

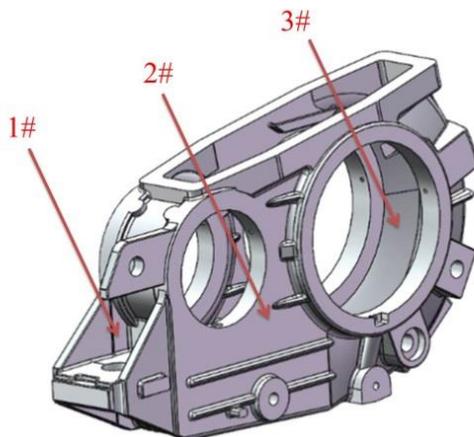


图 3.4 砂芯位置示意图

### 3.5.2 砂芯形状

根据上述分析，设置砂芯形状如表所示。为了下芯合箱准确，根据每块砂芯的结构，在主要砂芯上设有芯头。其中 1#芯分为 1-1#、1-2#和 1-3#，3#芯采用组芯造型，分为 3-1#、3-2#、3-3#、3-4#、3-5#、3-6#、3-7#，并且由于结构限制，3#芯的芯头单独制造，最后组合到 3-1#芯上，最后整体下芯。各砂芯形状如图 3.5、图 3.6 与图 3.7 所示。

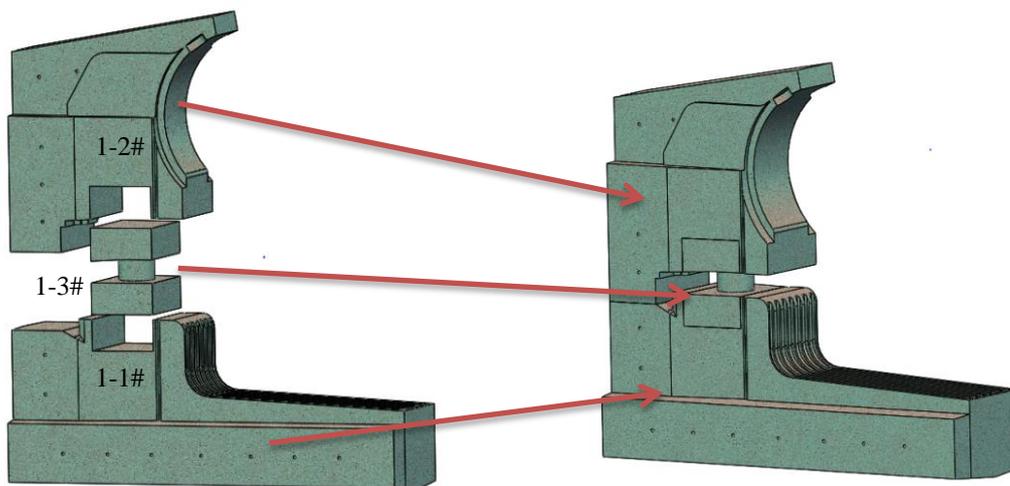


图 3.5 1#芯示意图

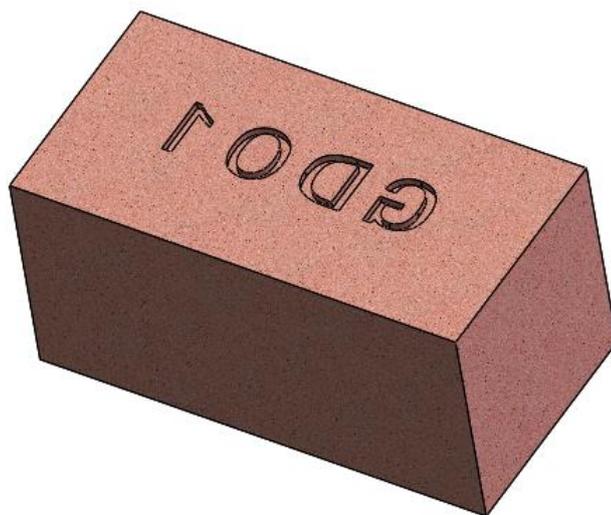


图 3.6 2#芯示意图

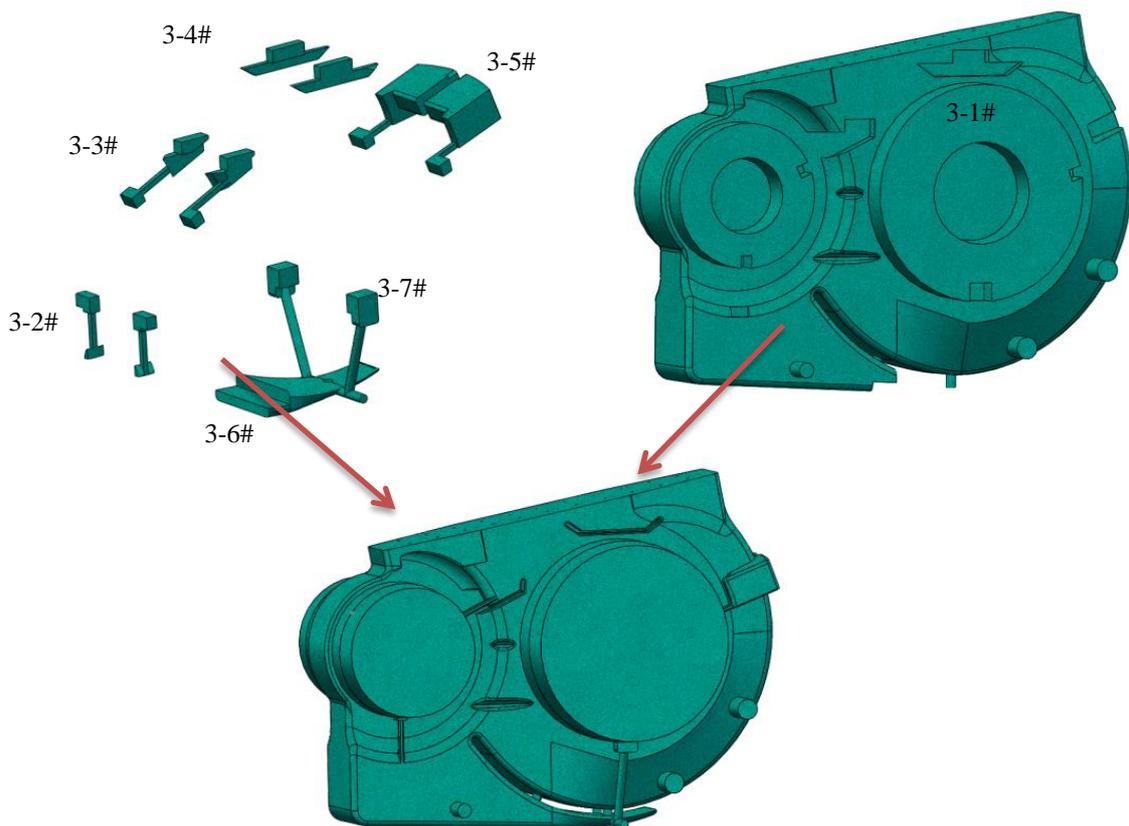
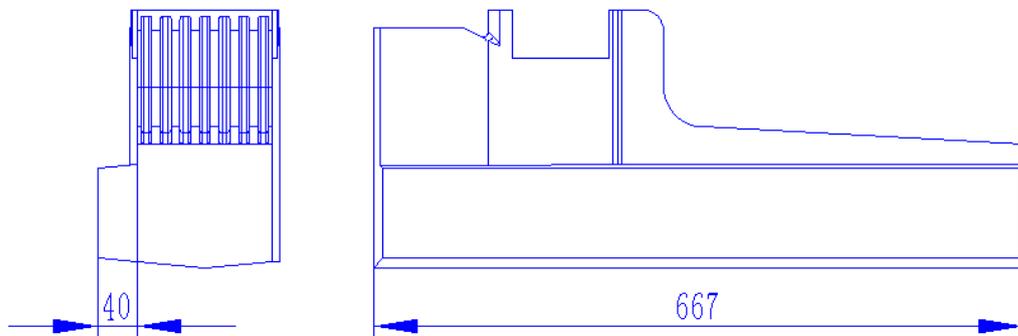


图 3.7 3#芯示意图

图 3.7 中所示的 3-2#、3-3#、3-4#、3-5#、3-6#、3-7#砂芯尺寸较小，造型困难且不易清理。造型过程中如添加芯骨，由于 3-6#、3-7#砂芯形成的油孔结构复杂，难以清理，因此不添加芯骨，但为保证其强度，采用单独制芯并组芯，并采用溃散性更为良好的宝珠砂制芯。

1#芯下侧设有芯头，3#芯由于组芯要求，其芯头需要单独制作，最后组合到 3-1#芯上。3#芯设上下侧各有两处芯头，为方便合箱 1#芯仅下侧设有芯头。芯头尺寸如图 3.8 所示：



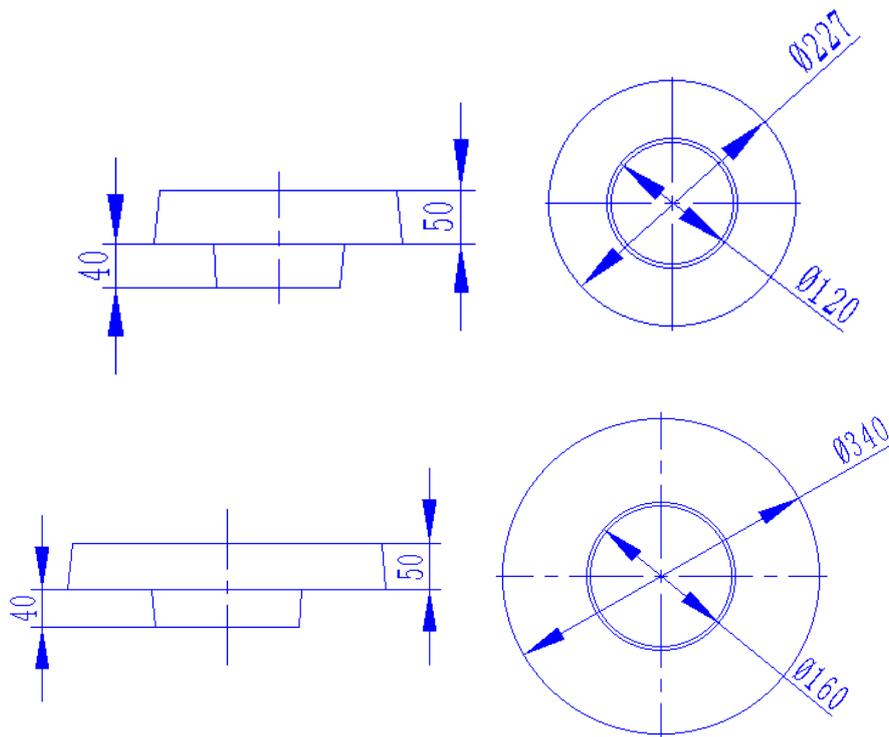


图 3.8 芯头尺寸

### 3.5.3 芯骨设计

为了保证砂芯在制造、运输、装配和浇注过程中不变形、不开裂或折断，砂芯应具有足够的刚度与强度。生产中通常在砂芯中埋置芯骨，以提高其强度和刚度。本铸件芯骨材料采用圆钢和铸铁，芯骨形状如图 3.9 所示：

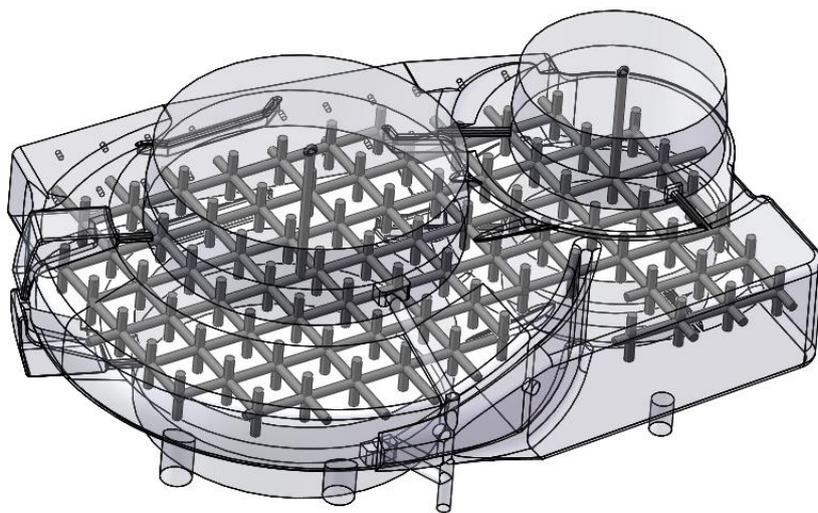


图 3.9 芯骨形状

### 3.5.4 砂芯排气

本铸件采用树脂自硬砂制芯，在浇注过程中，高温金属液使砂芯中的水分汽化，有机物挥发、分解和燃烧，短时间内产生大量气体。这些气体一旦进入金属液中，就可能使铸件产生气孔。因此，在设计、制造砂芯及下芯、合箱的整个过程中，要注意砂芯的排气，使砂芯中产生的气体能够及时的从芯头排出。

为保证砂芯排气，制芯时在砂芯中开设排气道，是一个很重要的措施，通常采用蜡线或尼龙管开设砂芯排气道。下芯时应注意不要堵塞芯头出气孔，在铸型中与芯头出气孔对应的位置应开设排气通道，以便将砂芯中的气体引出型外。本铸件排气示意图如图 3.10 所示：

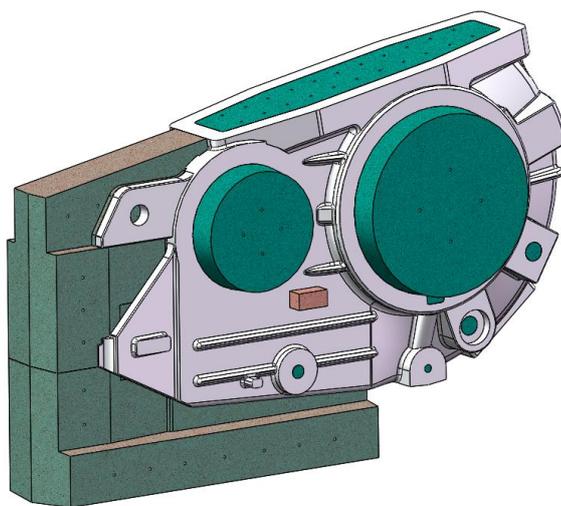


图 3.10 砂芯排气示意图

## 4 浇注系统的设计

浇注系统是铸型中液态金属流入型腔的通道，主要由浇口杯、直浇道、横浇道、和内浇道 4 个部分组成。浇注系统设计的合理与否对铸件质量影响很大，大约 30% 的铸件废品是由于浇注系统设计不当导致的。设计时应根据铸件的结构特点、合金种类、技术要求合理地设计浇注系统。设计浇注系统应遵守以下原则：

- 1) 金属液的充型过程中应控制金属液的流动方向和速度，尽可能使金属液平稳，连续地充满型腔；
- 2) 在合适的时间内充满型腔，避免形成夹砂、冷隔、皱皮等缺陷，保证铸件轮廓清晰、完整；
- 3) 调节铸型内的温度分布，有利于强化铸件的补缩、减少铸造应力，防止铸件出现变形、裂纹等缺陷；
- 4) 浇注系统应具备挡渣、溢渣、净化金属液的能力；
- 5) 浇注系统应该结构简单、可靠、减少金属液的消耗，且便于清理。

### 4.1 浇注系统类型的选择

由于铝合金的性质活泼，ZL101A 熔炼时金属液表面会形成一层氧化膜，液态合金溶液卷入氧化膜夹层后，易诱发气孔和小缩孔等缺陷。故浇注系统选择时应减少扰动，

保证金属液流平稳。

因此，在浇包浇注时，采用茶壶嘴式浇包，以减轻对液面氧化膜的扰动。

浇注系统的分类方式基本为两种：

一种是按照各组元的断面积比例关系不同大致分为封闭式和开放式等浇注系统。其中，开放式浇注系统由于金属液在浇注系统中呈无压流动状态，充型平稳，对型腔冲刷力小，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，但铝合金流动性能好，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。

另一种是按照内浇道在铸件上的相对位置不同，分为顶注式、底注式、中间注入式和分层注入式等几种浇注系统。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，流股与空气接触面积大，金属液会产生激溅、氧化，易造成砂眼、气孔氧化夹渣等缺陷。

底注式浇注系统充型时内浇道基本在淹没状态下工作，充型平稳，可避免金属液发生激溅、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，高大薄壁浇注时金属液面在上升过程中容易结皮，形成浇不到，冷隔等缺陷。

中间注入式浇注系统中，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，兼具两种浇注系统的优缺点。

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气孔针孔类缺陷，故本次浇注方案采用底注式浇注系统。

## 4.2 浇注时间的确定

浇注时间对铸件质量有重要影响，而合适的浇注时间与铸件结构、铸型工艺条件、合金种类与选择的浇注系统等有关；铸造手册<sup>[3]</sup>中给出以下两个公式：

$$\tau = AG^n \quad (\text{式 4.1})$$

$$\tau = B\delta^p G^n \quad (\text{式 4.2})$$

其中： $\tau$ ——浇注时间（s）；

$G$ ——铸件或浇注金属质量（68kg）；

$\delta$ ——铸件壁厚（最小壁厚 6mm）；

$A$ 、 $B$ 、 $p$ 、 $n$ ——系数。

铝合金系数分别如表 4.1 和表 4.2 所示：

表 4.1 式 4.1 中的系数

A	N	合金	来源
2.4	0.387	铝合金	G. Drosel

表 4.2 式 4.2 中的系数

B	n	p	合金	来源
1.7~3.0	0.33	0.33	铝合金	Г.М.дубицкий
1.25	0.35	0.35	铝合金	C. Drosel

本次工艺中浇注时间计算采用公式（2）其中 B 取 2.5，则浇注时间为 20.49s，取 20s。

## 4.4 阻流面面积的计算

### 4.4.1 方案一

方案一为平做平浇方案，初步设计了两种浇注方式，

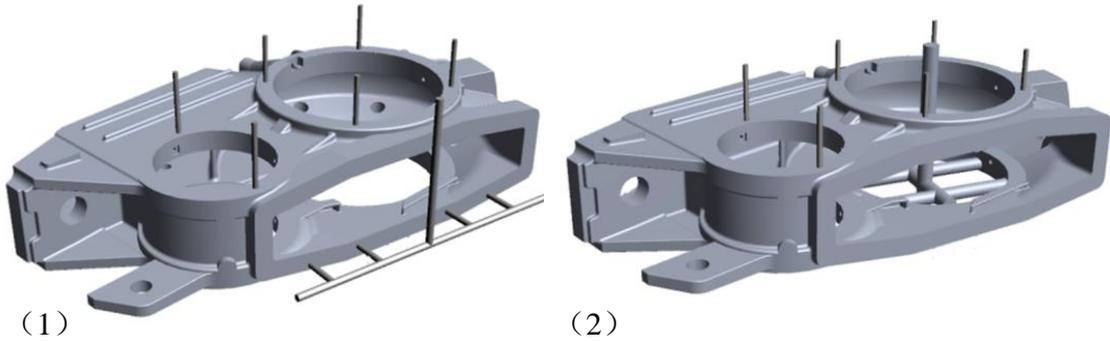


图 4.1 平浇两种工艺

图 4.1 中图 1 内浇道开设在箱体与箱盖配合的法兰处，浇注系统较为简单，浇注时对砂型冲击小，但充型不均匀，且会导致内浇道附近局部过热，可能造成该处晶粒粗大，有缩松缩孔倾向。图 4.1 中 2 中浇注系统设计在砂芯中，只能采用埋管造型，内浇道开设在大法兰内壁，对砂型冲击较小，浇注系统基本位于铸件中心位置，充型较为均匀，故方案一中采用 b 浇注系统。

铸件分型面设计在铸件中心，采用开放式浇注系统，浇口比选择  $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 1: 2: 3$ ，金属液从底部水平进入型腔。

本次计算根据铸造手册中：

$$A_{阻} = \frac{G}{\mu\rho\tau\sqrt{2gH_p}} \quad (式 4.3)$$

其中  $G$ ——流经阻流的金属液总质量；

$\rho$ ——金属液密度；

$\tau$ ——充型总时间；

$\mu$ ——充填全部型腔时，浇注系统阻流截面的流量系数；

$H_p$ ——充填全部型腔时的平均计算压力头。

对于底注式浇注系统：

$$H_p = H_0 - \frac{P}{2} \quad (式 4.4)$$

其中： $H_0$ ——铸件（型腔）总高度（430mm）；

$P$ ——阻流以上的型腔高度（210mm）。

即方案一中  $H_p$  取 325mm。

流量系数  $\mu$  的计算：

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \varepsilon_{浇} + \sum \varepsilon_{型}}} \quad (\text{式 4.5})$$

根据实际生产的经验，铝合金铸件在计算时，流量系数常取 0.618。

带入式 4.3 中计算得阻流面  $A_{阻}$  为  $9.206\text{cm}^2$ 。根据浇口比从而得到  $\sum F_{直} = 9\text{cm}^2$ ，

$\sum F_{横} = 18\text{cm}^2$ ， $\sum F_{内} = 27\text{cm}^2$ 。

#### 4.4.1.1 各浇道面积的确定

考虑到两种方案中浇注系统或在砂芯内部，或在砂型内部，造型时浇注系统难以起模，因此最终横浇道和内浇道采用使用耐火管实现。查阅相关资料，耐火管部分尺寸规格如表 4.3 所示：

表 4.3 耐火管尺寸规格

内径/mm	内径公差/mm	壁厚/mm	公差/mm
$\Phi 5 \sim \Phi 10$	0.3	2.5	0.250
$\Phi 12 \sim \Phi 18$	0.4	3.0	0.330
$\Phi 20 \sim \Phi 30$	0.8	3.5	0.420
$\Phi 35 \sim \Phi 55$	1.0	3.8	0.520

##### (1) 内浇道的确定

内浇道是引导金属液平稳地流入型腔，控制充型速度和方向，调节铸件各部位的温差和凝固顺序，对铸件质量有较大影响。本次方案中  $\sum F_{内} = 27\text{cm}^2$ ，且共开设 4 个内浇道，故  $F_{内} = 6.75\text{cm}^2$ ，即  $\Phi 26\text{mm}$ ，符合耐火管标准。如图 4.2 所示：

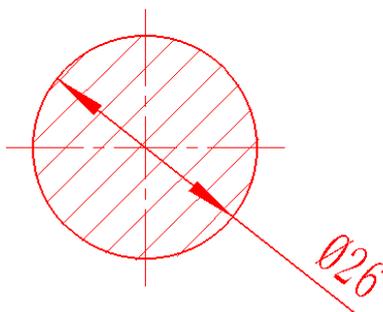


图 4.2 内浇道尺寸

##### (2) 横浇道的确定

横浇道主要是向内浇道分配金属液，贮存最初浇入的含有气体和夹杂物的低温金属液。横浇道应保证金属液中夹杂物到达第一个内浇道时浮到横浇道顶部，且应设计一段 75mm~150mm 的横浇道延长段来贮存初流液体，防止金属液的回流。本次方案中

$\Sigma F_{横} = 18\text{cm}^2$ ，且共开设 2 条横浇道，故  $F_{横}=9\text{ cm}^2$ ，即  $\Phi 32\text{mm}$ ，因此选取  $\Phi 30\text{mm}$  规格的耐火管，如图 4.3 所示。

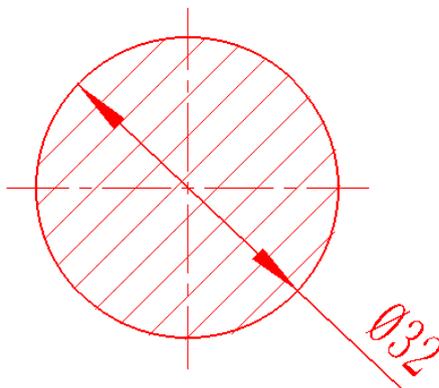


图 4.3 横浇道示意图

### (3) 直浇道的确定

直浇道主要起到引导浇口杯中的金属液向下流动，进入横浇道、内浇道或直接导入型腔，并提供足够的压头。直浇道多为圆形断面，在手工造型和一般机器造型中，直浇道通常取斜度为 2%~4% 的上大下小的锥形圆棒。本次方案中  $\Sigma F_{直} = 9\text{cm}^2$ ，直浇道下端为阻流面， $d_1=32\text{mm}$ ，上端  $d_2=42\text{mm}$ 。如图 4.4 所示：

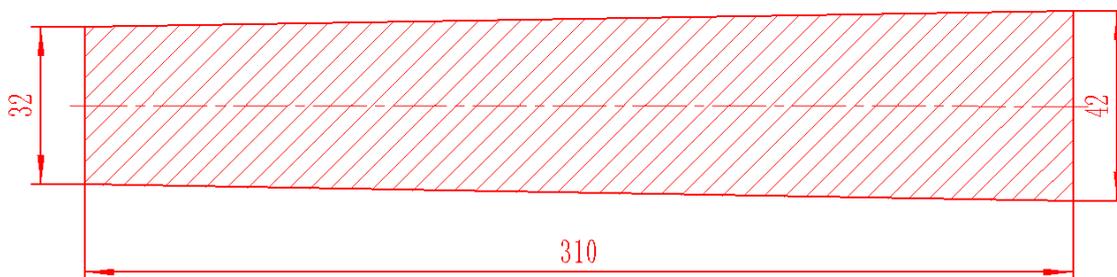


图 4.4 直浇道示意图

### (4) 直浇道窝的设计

金属液对直浇道底部有强烈的冲击作用，并产生涡流和高度紊流区，常引起冲砂，渣孔和大量氧化夹杂物等铸造缺陷。设置直浇道窝可改善金属液的流动情况。浇口窝常做成半球形、圆锥台等形状。浇口窝直径为直浇道下端直径的 1.4~2.0 倍，高度为横浇道直径的两倍。

#### 4.4.1.2 浇注系统的校核

##### 1. 金属液在型内的上升速度

型内金属液面升速度  $v_{型}$  用下式表示：

$$v_{型} = \frac{C}{\tau} \quad (\text{式 4.6})$$

式中： $C$ ——铸件（或某段）高度（220mm）；

$\tau$ ——浇注时间（或浇注某段时间）（20s）。

查阅手册<sup>[3]</sup>:

表 4.4 最小液面上升速度与铸件壁厚关系

铸件壁厚	$V_l/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
$\delta > 40$ , 水平位置浇注	0.8~1.0
$> 10 \sim 40$	1.0~2.0

对于本次浇注时  $v$  型=11m/s, 大于最小液面上升速度, 符合要求。

2.最小剩余压头  $H_M$  校核

直浇道高度一般等于上砂箱高度, 但应检验该高度是否足够, 其剩余压力头应该满足压力角的要求:

$$H_M \geq L \tan \alpha \quad (\text{式 4.7})$$

式中:  $H_M$ ——最小剩余压力头;

$L$ ——直浇道中心到铸件最高且最远点的水平投影距离 (680mm);

$\alpha$ ——压力角 (根据铸件壁厚与尺寸查阅手册取  $7^\circ$  )。

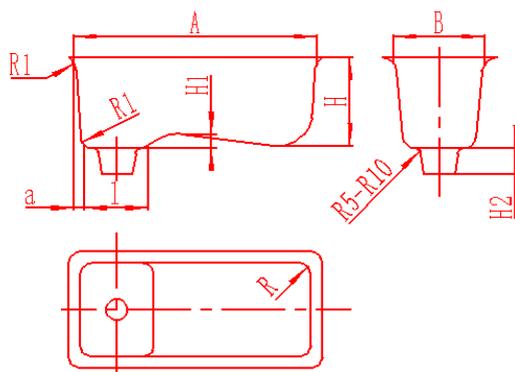
计算可得  $L \tan \alpha = 83.49\text{mm} \leq H_M$ , 即设计符合要求。

4.4.1.3 浇口杯的设计

浇口杯是承接来自浇包的金属液, 防止金属液飞溅和溢出, 便于浇注; 减轻液流对型腔的冲击; 分离渣滓和气泡, 阻止其进入型腔, 增加充型的压力头。

浇口杯分为漏斗形和池型两大类, 漏斗形浇口杯挡渣效果差, 但结构简单, 消耗金属少。池型浇口杯内液体深度大, 可阻止水平漩涡的产生而形成垂直旋涡, 从而有助于分离熔渣和气泡。本次工艺采用埋管, 无法设置直浇道窝与集渣包, 所以采用池型浇口杯, 根据手册<sup>[3]</sup>:

表 4.5 浇口杯尺寸



铸件质 量/kg	浇口杯尺寸/mm										铁液 消耗 量/kg
	A	B	l	H	H <sub>1</sub>	d	a	R	R <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	
50~100	200	120	70	120	10	30	10	20	15	30	17.5

#### 4.4.1.4 过滤网的设计

铸件工艺要求中对铸件夹渣缺陷有严格要求，因此在浇注过程中应该对金属液进行过滤处理，在工厂实际生产中，主要使用的为纤维过滤网，与陶瓷过滤器（网格式与泡沫式），其中陶瓷过滤器，尤其是泡沫陶瓷过滤器，由于其孔隙率较高，可达 92%，去除夹渣及非金属杂质的能力远强于纤维过滤网。泡沫过滤器是一种深层过滤器，它以陶瓷为网架，网架之间布满了互相连通的立体小孔，浇注时，大的杂质将在过滤器外表面被截留，微小杂质将吸附在通道的壁面上。且使金属液的流动方式有湍流变为层流，减少过滤后金属进一步氧化的可能，因此工艺中选取泡沫式陶瓷过滤器。图 4.5 为泡沫陶瓷过滤器与过滤器放置位置示意图。

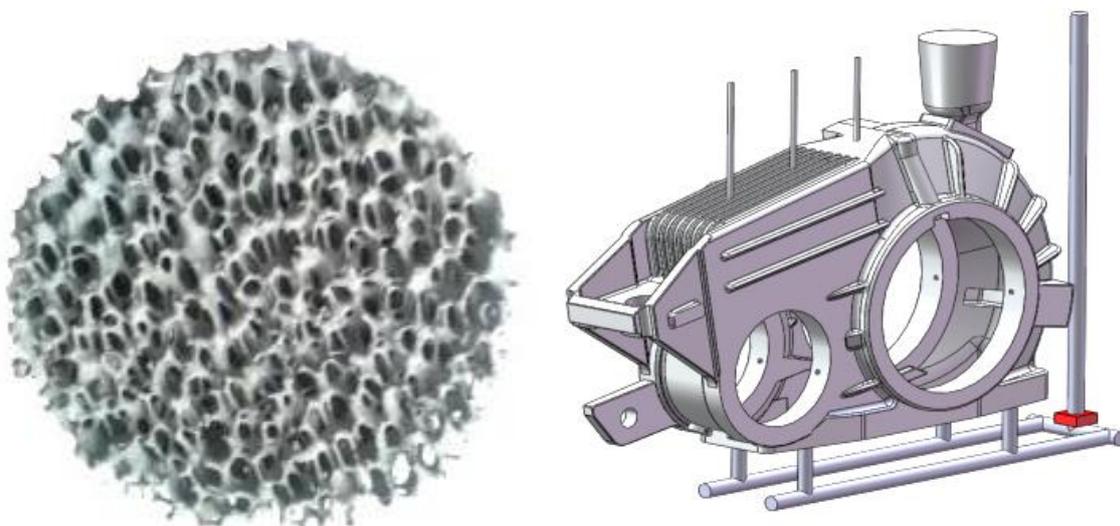


图 4.5 泡沫陶瓷过滤器与过滤器放置位置图

安放在砂型中的过滤器，其周边与砂型重叠的宽度应不小于 3mm<sup>[4]</sup>，故过滤器尺寸选取  $\Phi 40\text{mm}$ ， $Z=13.5\text{mm}$  或  $X=31\text{mm}$ ， $Y=40\text{mm}$ ， $Z=13.5\text{mm}$  型号的过滤器。

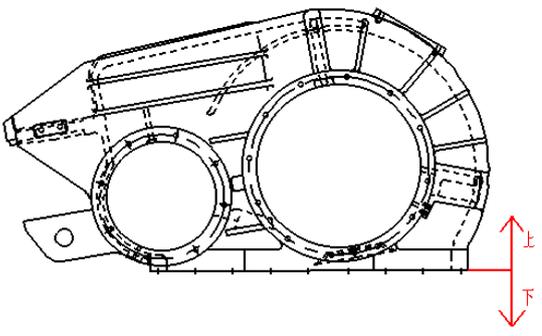
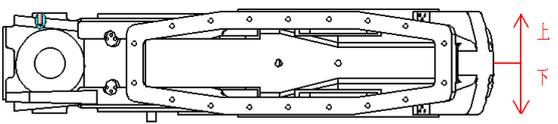
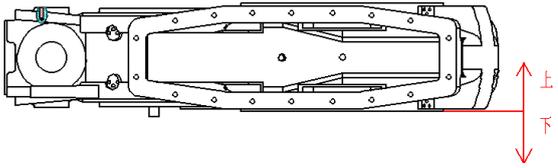
#### 4.4.2 方案二

选取分型面时，基本有三种方案如表 4.6 所示，第一种为立做立浇，这种工艺能够保证大平面在下，对于本次浇铸的箱体，还能使探伤部位位于下方，浇注时在重力作用下凝固得到致密的组织，但砂箱过高，使造型下芯都不方便。而第二、三种均为平做平浇工艺，造型、下芯、起模都较为简单。综合上述两种方案，最终确定方案二为平做立浇。

铸件水平位置造型、合箱并浇注，即称之为平做平浇。如果将砂型倾斜一定角度进行浇注，就是倾斜浇注，这类方法一般用于大平板类铸件防止上表面夹砂，如用于环类铸件时，有助于减少冒口数量，提高工艺出品率。如果将倾角增大到  $90^\circ$  后浇注，即为平做立浇工艺。

本次工艺采用第二种分型面（沿铸件主轴线），造型合箱后将砂箱通过立箱机竖立起来浇注，浇注系统及出气孔等同样设计在分型面上，这需要在专用的砂箱一侧做出直浇道等的半圆缺口。

表 4.6 分型面选择方案

方案编号	位置选择
1	
2	
3	

方案二同样采用开放式浇注系统，考虑到造型与起模方便，浇注系统同样采用埋管造型，浇口比选择 $\Sigma F_{直}:\Sigma F_{横}:\Sigma F_{内} = 1:2:3$ ，金属液从底部充入型腔，如图 4.6 所示：

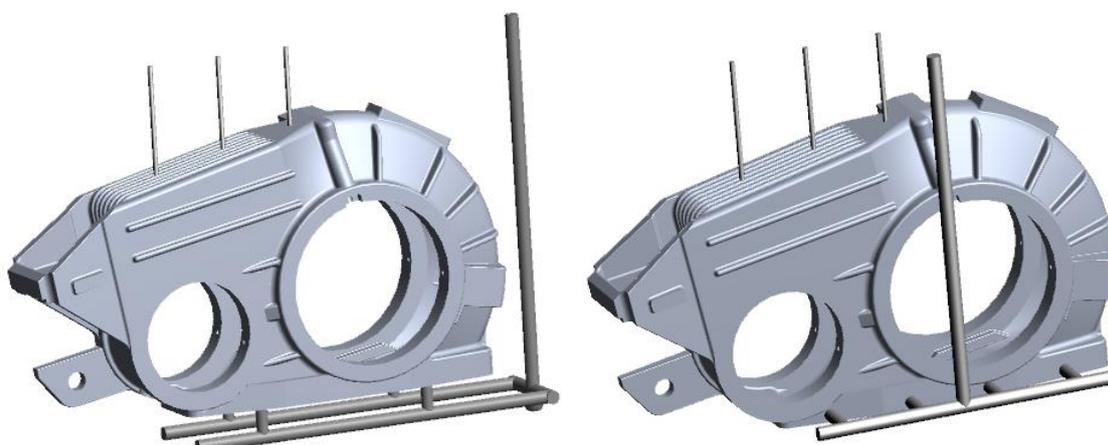


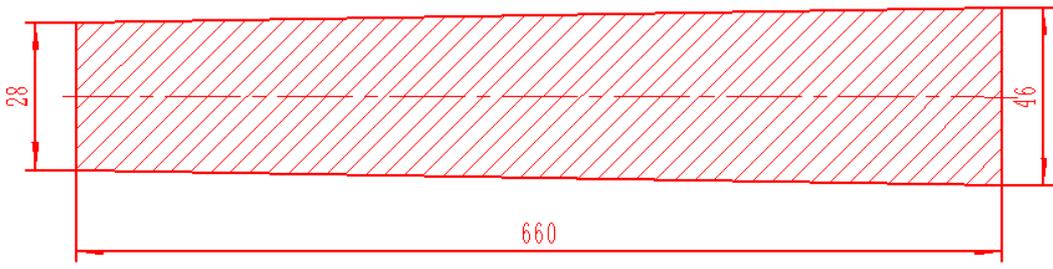
图 4.6 平做立浇两种工艺

浇注计算仍然采用式 4.3，其中，由于采用了平做立浇工艺，重新计算  $H_p$  为 500mm，按照公式计算得到阻流面积为  $6.01\text{cm}^2$ ，取  $6\text{cm}^2$ 。

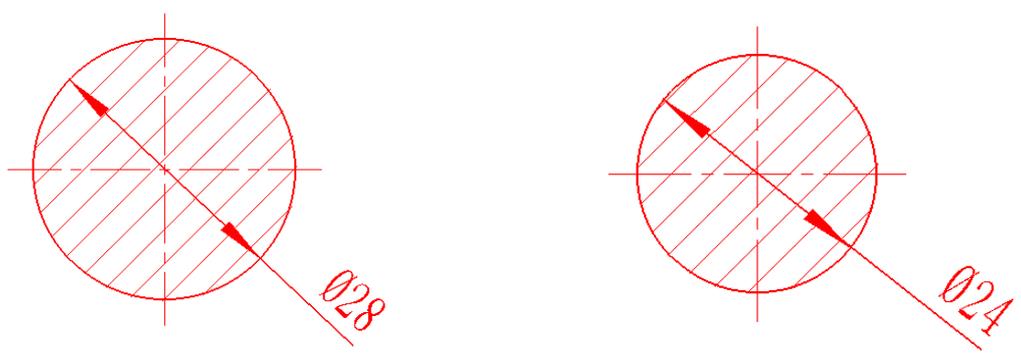
浇注系统各部分面积确定方法和方案一中所使用方式相同，计算后与标准耐火管尺寸比较后，最终确定结果如表 4.7 中所示结果：

表 4.7 浇注系统计算结果

直浇道尺寸			
数量	1		
面积	$1 \times 6\text{cm}^2$		

横浇道尺寸		内浇道尺寸	
数量	2	数量	4
面积	$2 \times 6\text{cm}^2$	面积	$4 \times 4.5\text{cm}^2$

## 5 铸造工艺的模拟与分析

本次铸造工艺采用 ProCAST 铸件成型过程数值仿真模拟软件对砂型铸造的充型过程的速度场、凝固过程的温度场和凝固场及最终缺陷的产生进行模拟，对结果进行分析，实现优化工艺的目的。

首先是对方案一与方案二中的两种浇铸方式分别进行模拟，模拟过程大致分为以下三节。

### 5.1 模型导入及网格划分

本次工艺中采用 Solidworks 三维建模软件进行三维实体的绘制，导入 ProCAST 中 mesh 部分进行网格划分，以平做立浇底注式方案为例进行网格划分，为保证网格划分

后铸件模型形状精度，共划分三维网格 1644076 个，如图 5.1 所示：

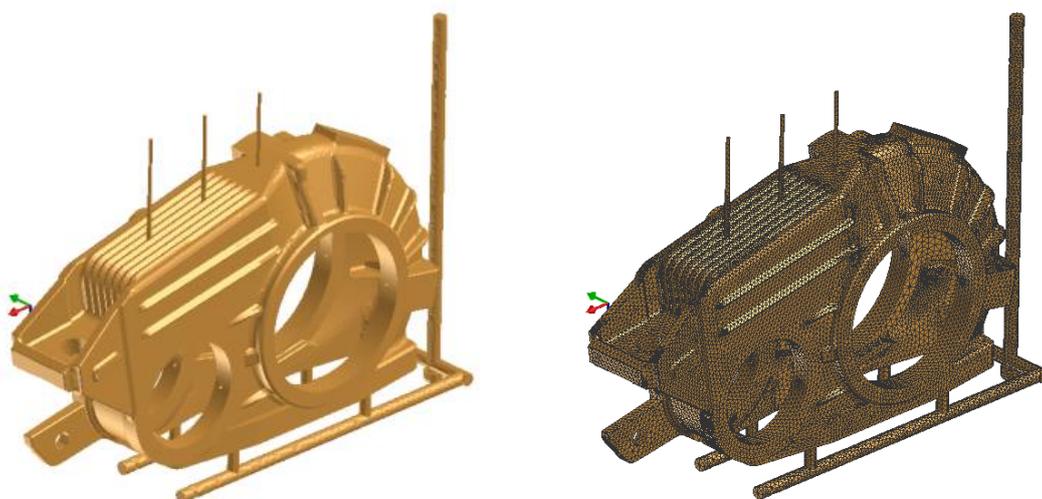


图 5.1 平做立浇底注式方案中铸件及浇注系统三维网格示意图

## 5.2 铸造参数设定及模拟

浇注时主要参数有：浇注温度、浇注时间、各部分材料以及换热系数。模拟中浇注温度为  $710^{\circ}\text{C}$ ，浇注时间为 20s，铸件为 ZL101A，砂型为树脂砂，冷铁为石墨冷铁。换热系数根据铸造工艺仿真 ProCAST<sup>[5]</sup>可知：

表 5.1 换热系数

接触面类型	换热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
金属-金属	1000~1500
金属-砂	300~1000
砂-砂	200~300
固体-空气	5~10
固体-冷空气	100~1000
固体-水	3000~5000

故砂型和铸件之间热交换系数取  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，砂型和冷铁之间取  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，铸件遇冷帖之间取  $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

## 5.3 模拟结果及分析

### 5.3.1 充型速度场分析

工艺一（平浇方案）：

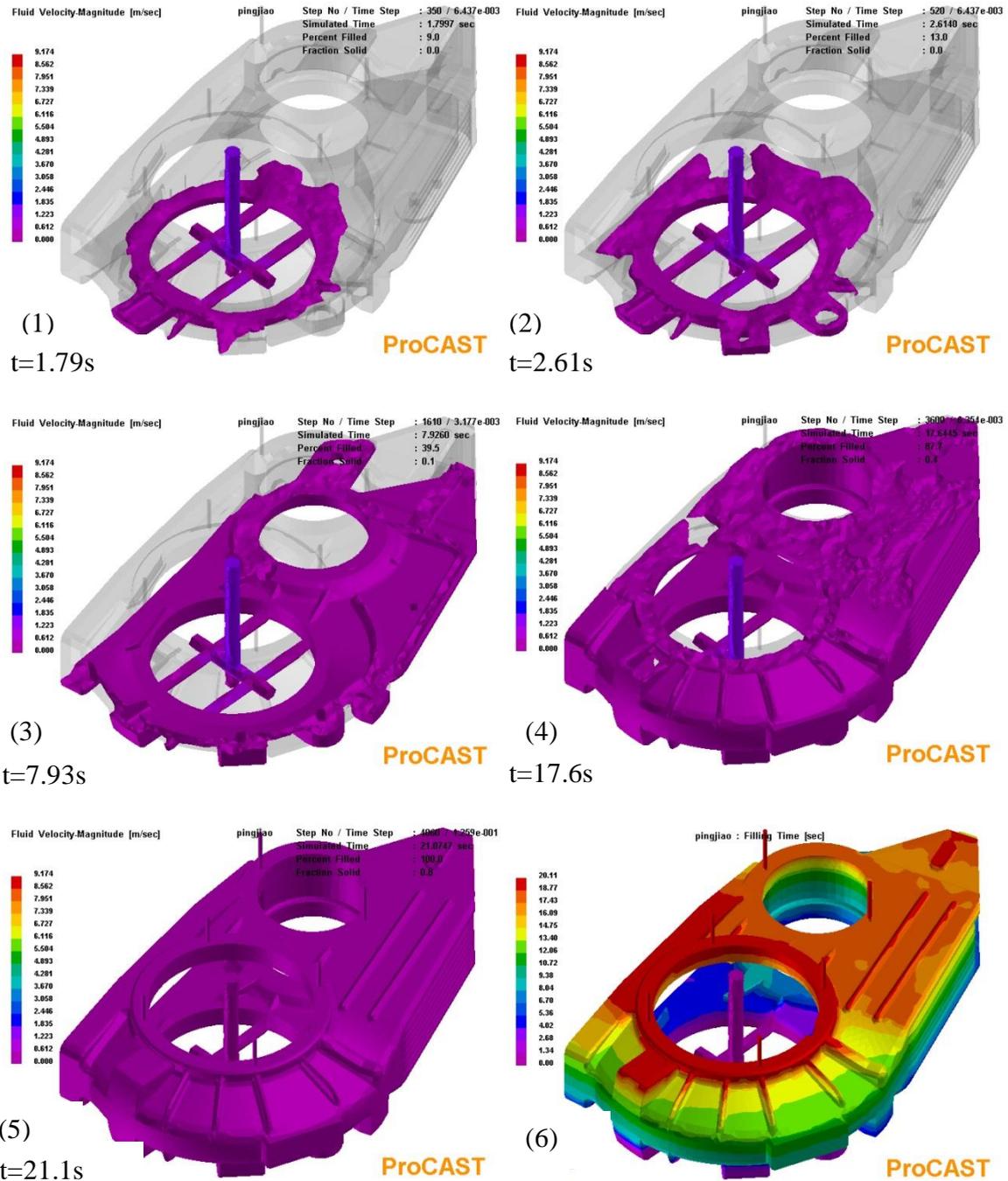


图 5.2 平浇充型速度场与充型时间

从图 5.2 中 (6) 的充型时间模拟结果可以看出，从金属液进入型腔直至充满共需 20.11s，与计算结果大体一致。同种颜色呈水平带状分布，由于同种颜色同时充型，即说明工艺采用了底注式浇注系统，整个充型过程较为平稳，对应左侧速度标尺，可以看出充型时金属液速度约为 0.612m/s，但充型过程不均匀。充型 1.79s 时，金属液刚刚进入型腔，由于没有受到砂型、砂芯的阻碍作用，充型平稳；充型 2.61s 时，金属液接触型腔壁，由于流速较慢，没有发现金属液的飞溅、卷气现象，此时大法兰底部已经充满；充型 7.93s 时，金属液充满型腔底部，相比于 2.61s 时大法兰底部充满已经过去约 5s。充型 17.6s 时，为充型最终阶段，最后充满部位即铸件最高部分较为分散，部分位置平

面较小，不宜开设出气孔；21.1s时充型完毕。总体充型效果良好。  
工艺二（平做立浇单侧水平浇注式）：

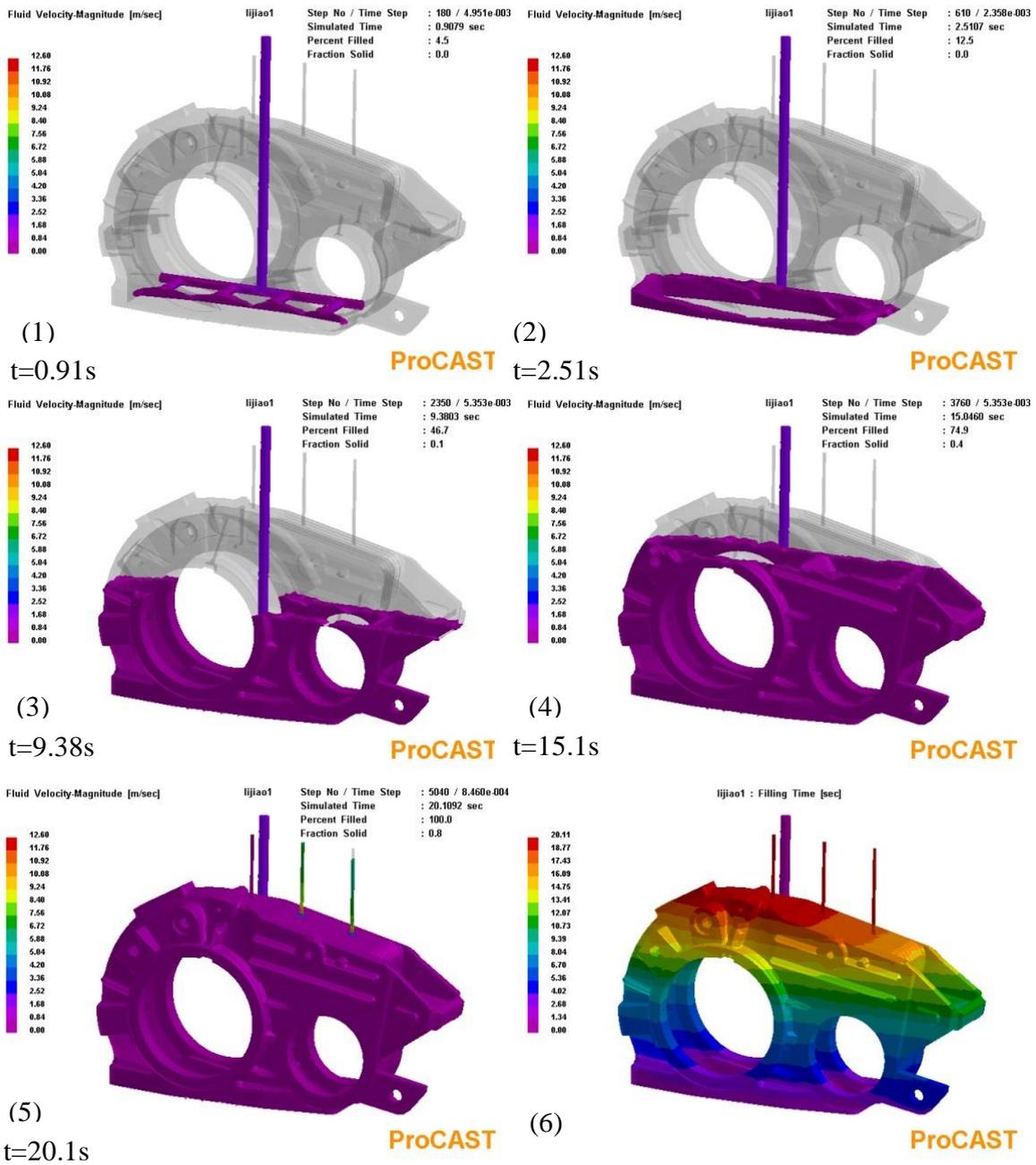


图 5.3 平做立浇侧浇充型速度场

从图 5.3 中 (6) 的充型时间模拟结果可以看出，从金属液进入型腔直至充满共需 20.1s，与计算结果一致；其中，铸件部分颜色相同说明其被充满时刻相同，同种颜色呈水平带状分布，说明由于采用了底注式浇注系统，整个充型过程较为平稳，为逐层充满；对应左侧速度标尺，可以看出充型时金属液速度约为 0.84~1.68m/s。图 (1)、(2)、(3)、(4) 分别选择了充型过程中金属液几次相遇的时刻，并未发生金属液的飞溅、卷气等现象；但从图 (2) 可以看出，充型初期，浇道附近型腔充型较快，即图 (2) 右部金属液略高于左部。顶部大平面最后充型，为型腔最高部分，设置出气孔效果良好。总体充

型过程较好。

工艺三（平做立浇底注式）：

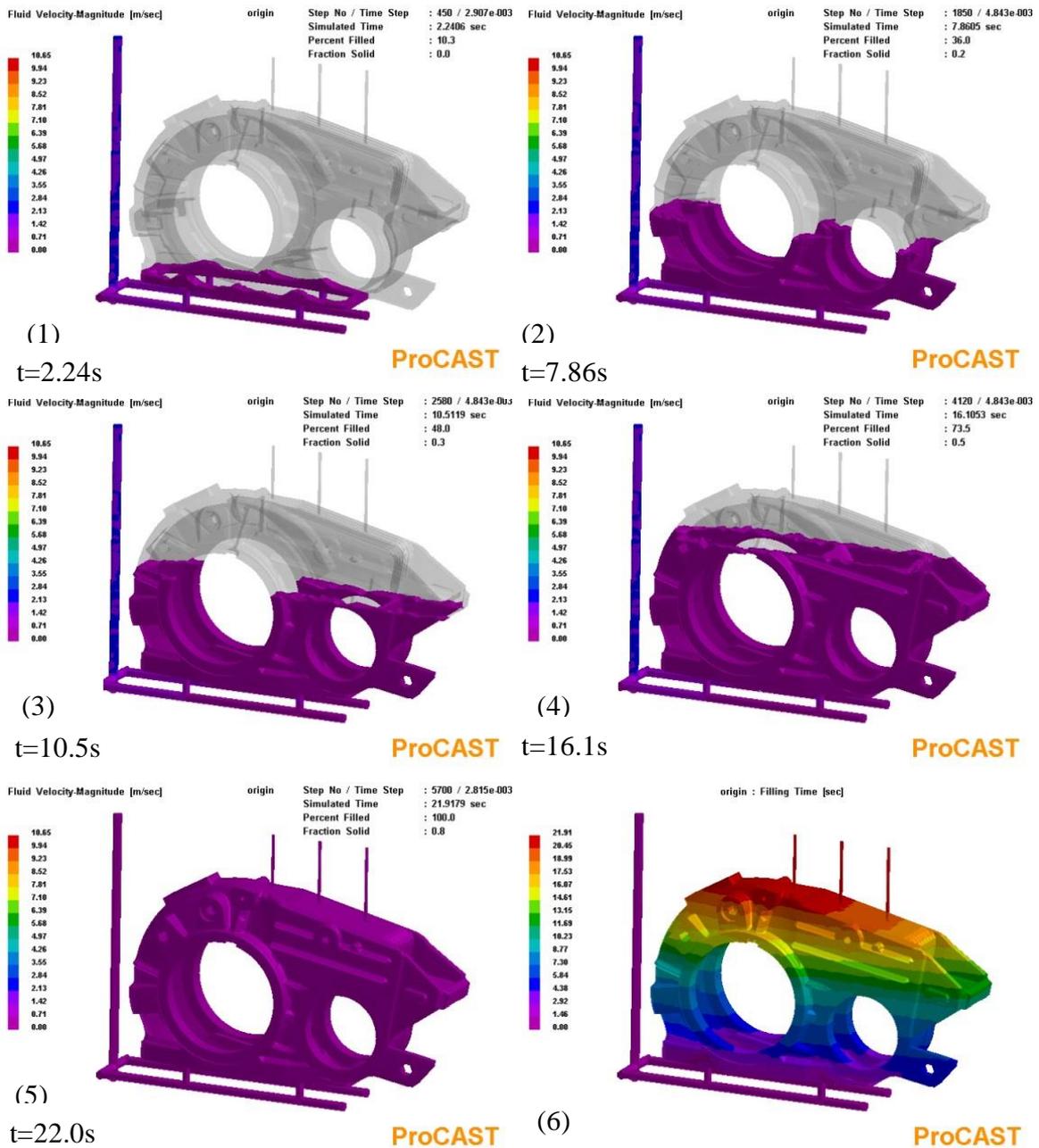


图 5.4 平做立浇底注式充型速度场

从图 5.4 中（6）充型时间的模拟结果可以看出，从金属液进入型腔直至充满共需 22.0s，与计算结果大体一致；充型过程基本和侧浇相似，但从图（1）、（2）可以看出，在充型初期时，底注式浇注系统充型左右更加对称均匀。整体充型效果为三种方案中最佳。

综合三种工艺的充型速度场，可以看出，平做立浇底注式的充型过程最为均匀、平稳，充型过程中未出现金属液飞溅、卷气等现象，顶面便于设置出气孔，有利于充型过程中的排气。

### 5.3.2 缺陷以及工艺优化性分析

缺陷分析主要以缩松缩孔分析为主，旨在确认三种工艺中缺陷分布、大小、是否易于消除等方面，来确定本次 F 件箱体的初步铸造工艺。

缩松是指铸件最后凝固的区域没有得到液态金属或合金的补缩形成分散和细小的缩孔。常分散在铸件壁厚的轴线区域、厚大部位、冒口根部和内浇口附近。当缩松与缩孔容积相同时，缩松的分布面积要比缩孔大得多。缩松隐藏于铸件的内部，外观上不易被发现。因为本次铸件浇注后按照技术要求需进行 X 射线探伤，故缺陷均以切片形式进行分析。

工艺一：

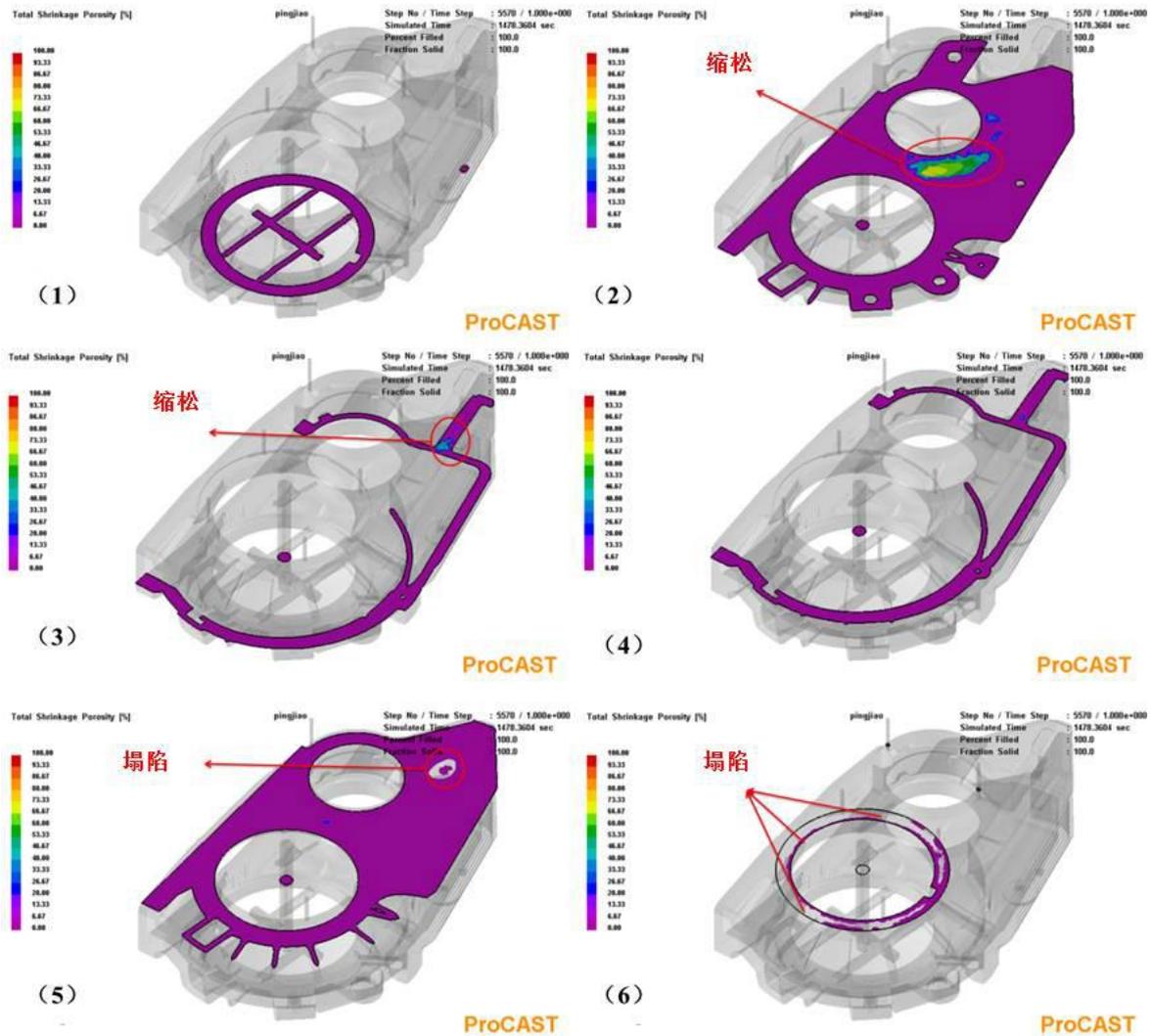


图 5.5 立浇水平浇注缺陷分布图

图 5.5 中 (1) 至 (6) 为铸件 XZ 面上的 6 个缺陷切片。其中 (1) 至 (3) 为中心面下方三个均布的切片，可以看出，此部分为缩松主要分布区域，尤其在大法兰盘与小法兰盘之间，缩松严重，对温度场与凝固场分析发现，该部分温度较高，为最后凝固区域，这与铝合金在砂型中属于糊状凝固相关；且由于下方靠近内浇道，金属液最后进入，较开始进入在型腔顶部金属液温度较高，因此凝固顺序基本为从表面铸件中心凝固，从

薄壁处向厚壁处凝固，此处又处于两个法兰厚壁之间，因而最后凝固，缩松严重。对温度场进行分析发现，从浇注开始到凝固结束，该处金属液保持较高温度，即存在轻微过烧现象。图（4）至（6）为中心面上的三个均匀部分切片，可以看出几乎没有缩松缺陷的出现，这是由于上部温度低的金属液先行凝固，得到了周围金属液的补缩，但在凝固终了收缩后上部却产生了塌陷。

工艺二：

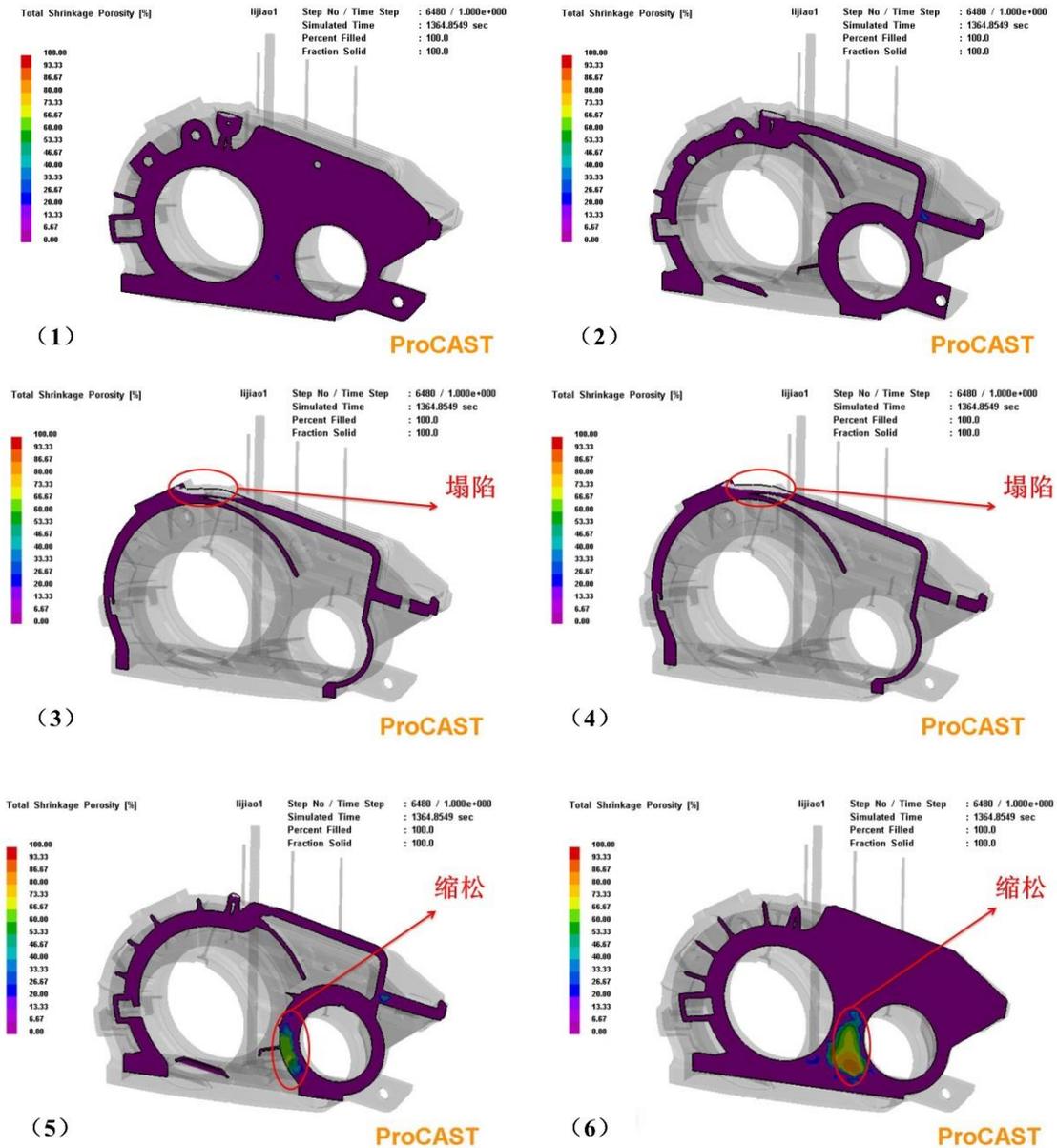


图 5.6 平做立浇侧注式缺陷分布图

图 5.6 为铸件在 XZ 面上由中心面向两侧均匀取得的 6 个缺陷切片，其中(1)至(3)为远离内浇道的一组切片，几乎没有缩松、缩孔缺陷，在靠近内浇道一侧却有大片缩松缺陷形成，分析发现应由以下原因共同导致：一是由于顶部金属液温度较低，先行凝固，未能对其进行补缩；二是由于该处处于两个厚壁法兰形成两处热节的中间部位，温度较高，从凝固场中可以看出该处为最后凝固区域，形成了较为严重的缩松，导致该处致密

度降低，影响箱体使用性能。图（4）至（6）则为远离内浇道部分的缺陷分布，可以看出由于该处远离内浇道，温度较低，凝固较早，几乎没有缩松缺陷出现。从图（3）、图（4）中可以看出，顶部凝固最后仍然出现了塌陷。

工艺三（平做立浇底注式）：

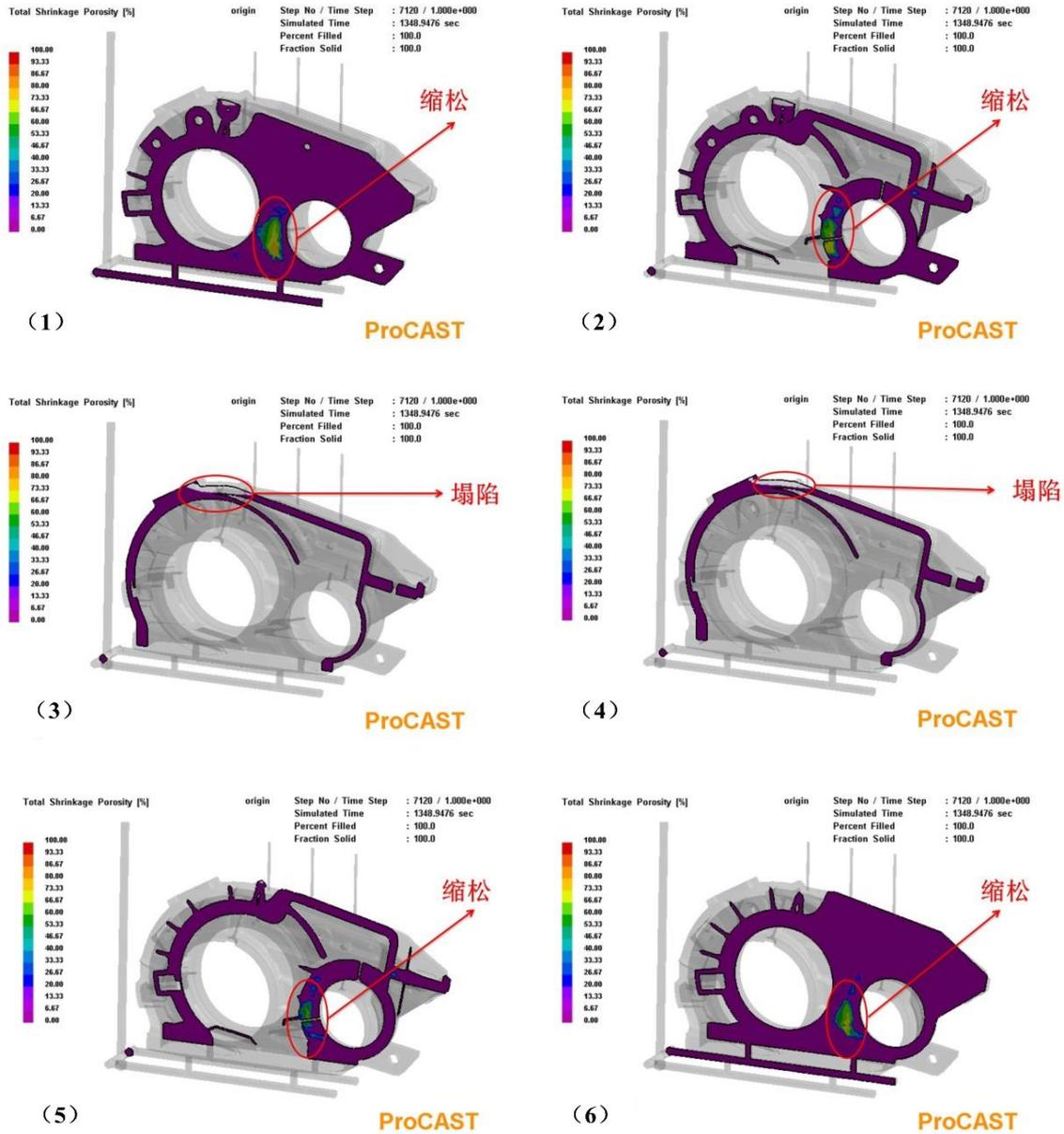


图 5.7 平做立浇底注式缺陷分布

图 5.7 为铸件 XZ 面上由中心面向两侧对称取得的 6 个切片截面，分别对应图（1）和（6）、（2）和（5）、（3）和（4），可以看出，由于采用底注式浇注系统后，充型均匀，缺陷分布对称，且仍然处于两个法兰热节中间部位，与上述两种工艺缺陷对比可知，平做立浇底注式浇注系统产生的缩松较小。从图（3）、（4）中可以看出，顶部在金属液凝固收缩时，依旧形成了塌陷。

## 5.4 工艺结果对比与改良分析

从充型过程来看，三种工艺方案中，平做立浇底注式浇注系统充型平稳且均匀。从缺陷分布来看，三种工艺方案中依旧是平做立浇底注式浇注系统的缺陷分布对称、均匀且缩松面积最小，程度最为轻微，最易进行工艺改善。因此，最终确定使用平做立浇底注式浇注方案并对其进行改善。

工艺改善主要是分为两个方面：第一是通过开设冒口，消除铸件收缩缺陷；第二是通过控制浇注时铸件在型腔中的凝固顺序，来实现关键部位先行凝固从而得到补缩，消除关键部位的缺陷。由于铝合金在砂型凝固中是糊状凝固，即结晶在熔液内部进行，当几乎同时形核又以同样快的速度生长时，形成有固体和液体组成的糊状混合物，而这些先行形核的晶体，易发展成树枝发达的等轴晶，并很快连成一片，形成结晶骨架，将熔液分割成一个一个不相连的小熔池，难以补缩最终形成缩松。基于铝合金糊状凝固的特点，单一设置冒口对其补缩效果不明显，因此，首先在铸件下方设置冷铁，改善其凝固顺序，总体上产生自下而上的逐层凝固；其次在热节处放置冷铁，消除热节厚大处缺陷；最后在工作面处放置冷铁，使得该处金属液受到激冷作用，减少缺陷形成，且细化该处晶粒，优化工作性能。冒口设置在铸件顶部，消除铸件的顶部塌陷。

## 5.5 冒口的初步设计与计算

从模拟结果看，铸件顶部产生较大塌陷，内部出现集中缩松区域，故对浇注系统添加补缩系统，提高铸件的致密性。冒口的主要作用是贮存金属液，对铸件进行补缩，此外，还有出气和集渣的作用。为了实现这样的目的，设计冒口应遵照以下原则：

- 1) 冒口的凝固时间应大于铸件被补缩部位的凝固时间；
- 2) 冒口能提供足够的补缩金属液；
- 3) 在整个补缩过程中，冒口与铸件被补缩部位存在补缩通道；
- 4) 有足够的补缩压力，使补缩金属液能够流到要求补缩的区域。

冒口设计的主要内容是：选择冒口形状以及安放位置、确定冒口数量、计算冒口的尺寸、校核冒口的补缩能力。

### 5.5.1 冒口的种类

按照冒口在铸件上的位置，普通冒口可以分为顶冒口和侧冒口（边冒口）两类；按照冒口顶部是否与大气相通，可以分为明冒口和暗冒口。

由于顶冒口一般位于铸件最厚部位的顶部，这样可以利用金属液的重力进行补缩，提高冒口的补缩效果，而且有利于排气和浮渣。采用顶明冒口，造型方便，能观察到铸型中金属液上升情况，便于向冒口中补浇金属液，可以向冒口顶面撒发热剂以减缓冒口冷却速度，因此铝合金铸件常采用明顶冒口。

从模拟结果来看，工艺中铸件顶部有塌陷，故首先在铸件顶部添加一个明顶冒口进行补缩。铸件主要热节部位均位于铸件侧面，只能设置侧冒口，但热节不在分型面上，采用侧冒口将对造型带来麻烦，增加工艺难度，因此仅设置一个明顶冒口对铸件进行补缩。

### 5.5.2 冒口的形状

冒口形状直接影响其补缩结果，为了降低冒口散热速度，延长冒口的凝固时间，应尽量减少冒口的表面积，因此最理想的冒口形状为球型，但因起模困难，且根据铸件顶部呈长矩形，故最终决定使用腰圆柱形明顶冒口。

### 5.5.3 冒口的计算

冒口计算最经常使用的方式为模数法设计，但考虑到本次工艺中冒口主要最作用为对铸件顶部塌陷区域进行补缩，并非对热节缩松缩孔缺陷的消除，因此，最终根据塌陷金属量，查阅铝合金铸件腰圆柱形明顶冒口尺寸，最终确定使用冒口尺寸如图 5.8:

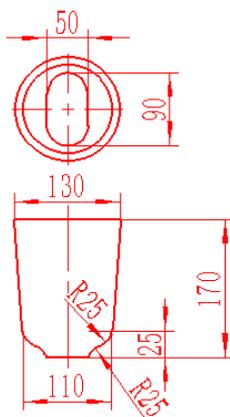


图 5.8 腰圆柱形明顶冒口尺寸

## 5.6 冷铁的初步设计与计算

### 5.6.1 冷铁的选择

为了增加铸件局部冷却速度而置于铸件表面或内部的激冷材料通常简称为冷铁。冷铁可以分为内冷铁和外冷铁两大类：造型（制芯）时置于模样（芯盒）表面、浇注时只作用于铸件表面的激冷块为外冷铁；进入铸件内部，称为铸件一部分的称为内冷铁。由于内冷铁可能会带来降低铸件力学性能，甚至引起裂纹，因此，只有在外冷铁激冷作用不足时才考虑使用，初步设计冷铁仅设置外冷铁。

铝合金铸件冷铁材料常用的有铸铁，铸造铝合金，铸造铜合金，由于使用铸铁冷铁会引入 Fe 杂质，而 Fe 元素为铝合金铸件中的有害元素，因此质量要求的铸件应避免铸铁冷铁的使用。铸造铝合金的热容量小，激冷效果差，一般仅用于铸件热节较小部位，且不宜多次使用，甚至在热量集中部位还会和铸件熔合。因此，也不采用铸造铝合金冷铁。铜合金冷铁虽然热容量大、激冷效果好，但考虑铜合金价格过高，因此也不使用。本次工艺中，选择使用耐火度高，导热系数大的石墨冷铁，成本略高于铸铁冷铁。经过对石墨冷铁与铸铁冷铁模拟结果的对比，发现石墨冷铁消除缺陷的效果优于铸铁冷铁，因此，虽然成本略高，但有利于提高铸件合格率，因此，本次工艺中采用石墨作为冷铁材料。

### 5.6.2 冷铁的位置设计

根据初步模拟结果的分析，冷铁设计的位置主要为三处：首先为箱体与箱盖配合法兰处，该处在浇注时处于铸件底部，此处设置冷铁可以改善铸件件的凝固顺序，力求铸件产生一个自下而上的顺序凝固，使铸件下部先凝固，在重力的作用下的到补缩，形成致密的组织，保证铸件探伤部位的质量；其次，在两个法兰与铸件侧面热节周围设置冷铁，使得该处金属液受到激冷作用，减少缺陷形成，且细化该处晶粒，优化机械性能。

### 5.6.3 冷铁的尺寸计算

设冷铁部位铸件体积为  $V_0$ ，与设置冷铁部位相邻铸件体积为  $V_r$ ，且  $V_0 > V_r$ 。为使  $V_0$  部位获得致密组织，应在  $V_0$  处设置冷铁后，凝固时间不大于  $V_r$ 。由体积差（质量差）引起的热量差  $(V_0 - V_r) \rho (L + \Delta H)$  应由设置的冷铁吸收，才能使  $V_0$  与  $V_r$  的凝固时间相近或相等。冷铁重量  $G_{ch}$  计算公式：

$$G_{ch} = (V_0 - V_r) \rho \frac{(L + \Delta H)}{t_{ch} c} \quad (\text{式 5.1})$$

其中： $G_{ch}$ ——冷铁重量（g）；  
 $V_0$ ——设置冷铁部位的铸件体积（ $\text{cm}^3$ ）；  
 $V_r$ ——与设置冷铁部位相邻的之间体积（ $\text{cm}^3$ ）；  
 $\rho$ ——合金液的密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）；  
 $L$ ——凝固潜热（ $\text{J}/\text{kg}$ ）；  
 $\Delta H$ ——金属液过热热量（ $\text{J}/\text{kg}$ ）；  
 $t$ ——凝固结束时冷铁的温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；  
 $c$ ——比热容 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]。

为计算方便，做以下计算：

$$V_0 - V_r = V_0 \frac{V_0 - V_r}{V_0} = V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \quad (\text{式 5.2})$$

带回原式得：

$$G_{ch} = (V_0 - V_r) \rho \frac{(L + \Delta H)}{t_{ch} c} = V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \rho \frac{(L + \Delta H)}{t_{ch} c} \quad (\text{式 5.3})$$

对于铝合金浇注， $\rho \frac{(L + \Delta H)}{t_{ch} c} = 2.46$ ，即冷铁重量：

$$G_{ch} = 2.46 V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} \quad (\text{式 5.4})$$

其中： $M_0$ ——设置冷铁部位铸件的模数（ $\text{cm}$ ）；  
 $M_r$ ——与设置冷铁部位相邻接的铸件的模数（ $\text{cm}$ ）。

则冷铁厚度计算公式：

$$D = \frac{G_{ch}}{2.25S} \quad (\text{式 5.5})$$

其中： $S$ ——设置冷铁的面积（ $\text{cm}^2$ ）；  
 $D$ ——设置冷铁的厚度（ $\text{cm}$ ）；  
 $2.25$ ——石墨冷铁的密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）。

下以侧面热节为例计算：

$$\text{该处铸件模数 } M_0 = \frac{40^2 + 40 \times 12 + 2 \times 12^2}{3 \times 40 + 4 \times 12} = 14.09 \text{cm};$$

$$\text{与其相邻处铸件模式 } M_r = \frac{12}{2} = 6 \text{cm};$$

$$\text{冷铁重量 } G_{ch} = 2.46 V_0 \frac{M_0 - M_r}{M_0} = 2.46 \times 22.24 \times 2.5 \times \frac{14 - 8}{14} = 78.16 \text{g};$$

$$\text{冷铁面积 } S = 40^2 + 40 \times 12 + 2 \times 12^2 = 2224 \text{ mm}^2 = 22.24 \text{ cm}^2;$$

$$\text{冷铁厚度 } D = \frac{G_{ch}}{2.25S} = \frac{78.16}{22.24 \times 2.25} = 1.75 \text{ cm} = 17.5 \text{ mm}.$$

考虑工厂中常用冷铁厚度为10mm、15mm、20mm与30mm，故该处冷铁厚度取20mm。用同种方式计算其余冷铁厚度，并将冷铁形状依照铸件形状优化，冷铁尺寸分布尺寸如图 5.9 所示：

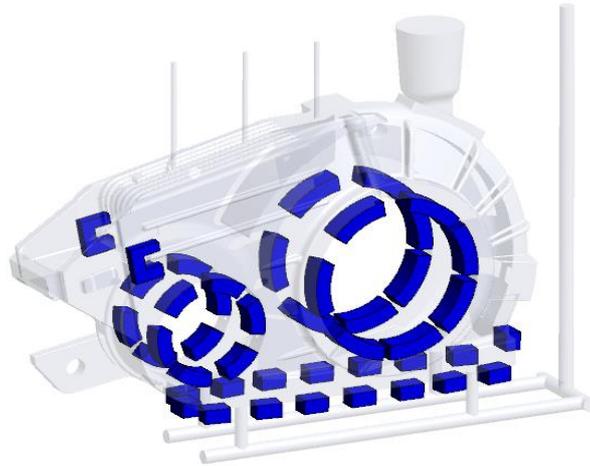
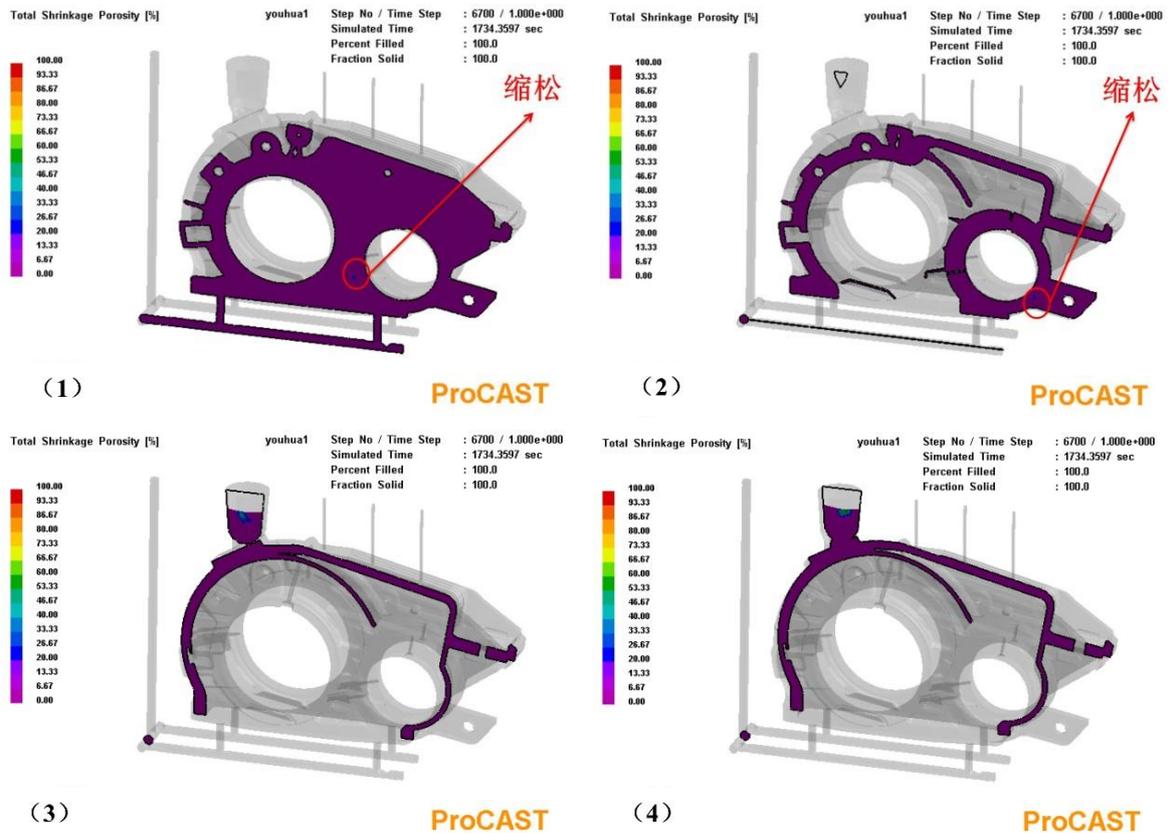


图 5.9 初次优化模拟冷铁分布

### 5.7 初步优化结果与分析

按照 5.4、5.5 节中工艺优化分析后的改进铸造工艺，对其进行模拟。其中缺陷模拟结果如图 5.10 所示：



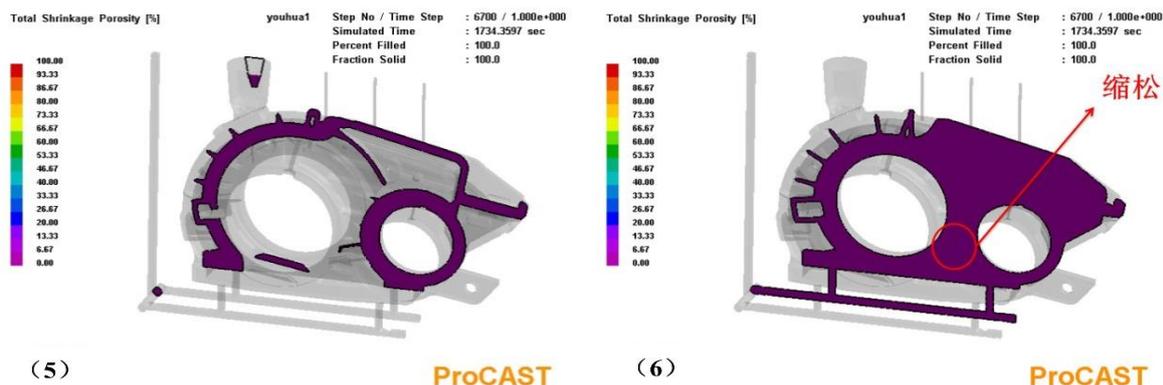


图 5.10 改进工艺中缺陷分布图

依据图 5.10 中改进工艺缺陷分布的结果，铸造工艺质量有了较大改善。其中，从图 (4) 可以看出，加上冒口之后，消除了顶部凝固时出现的塌陷；对比未改进工艺中缩松缩孔缺陷，缺陷有一定程度的改善，但并未完全消除，因而，对凝固时间与温度场进行分析：

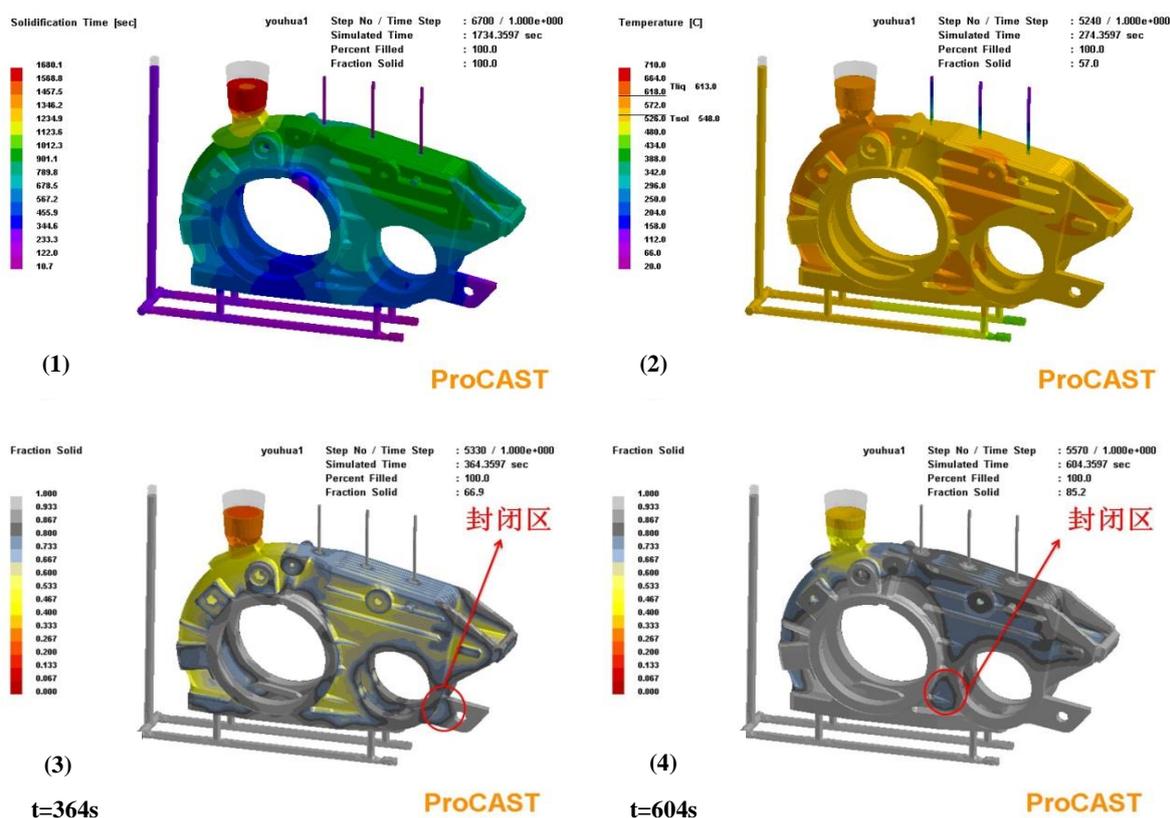


图 5.11 凝固时间 (1)、铸件温度场 (2) 与凝固场 (3)、(4) 的分布

从凝固时间来看，图 5.11 中 (1) 中从深蓝色到红色凝固时间越来越长，即从图中凝固时间来看，铸件基本形成了一个自下而上的顺序凝固，能够提升铸件探伤部位金属致密度，从而提高铸件性能。ZL101A 的液相线温度为 613℃及图中 a 颜色部分所示，固相线温度为 548℃如图中 b 部分所示，即图 2 中 b 部分即为温度较高凝固滞后的区域，

从凝固场中可以看出，凝固时，温度较高的区域最后凝固形成金属液“孤岛”，不能得到来自其它未凝固部分金属的补缩，最终仍然形成缩松。

对其充型过程观察发现，气孔设置并未完全在铸件最高点，不利于金属液的排气，增加针孔气孔类缺陷。如图 5.12 所示：

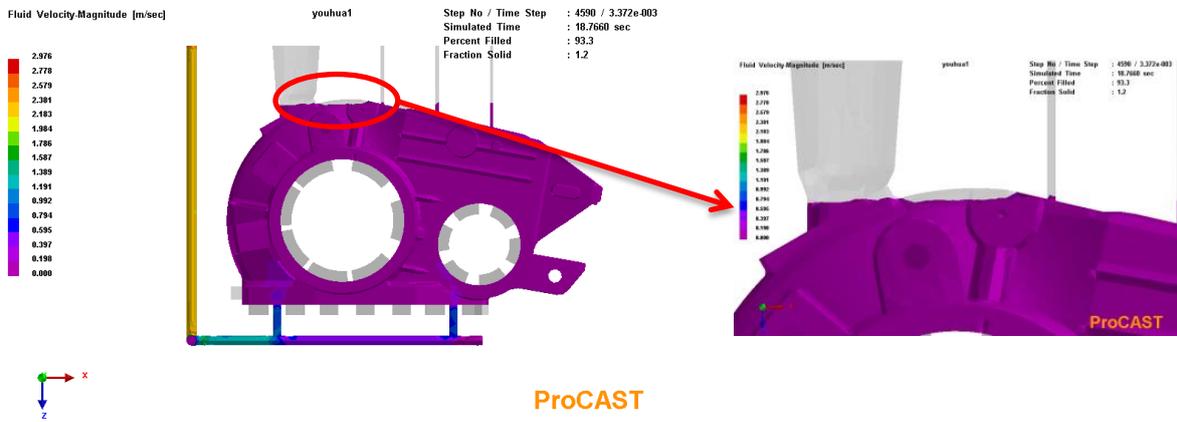


图 5.12 改进工艺中充型 93.3%时

## 5.8 铸造工艺的二次优化

### 5.8.1 铸造工艺的二次优化分析

对上节缩松遗留区域进行分析，造成该处金属液温度过高的原因大致如下：1)该处分布在热节中间，金属液温度高；2)在其周围热节处设置冷铁，加快其周围金属凝固速度；3)该处距离内浇道口过近。

针对如上因素，对工艺作出如下改进：1)优化缩松区域冷铁分布；2)增加同侧内浇道区域距离。

且对其出气孔位置进行改进，改进工艺如图 5.13 所示：

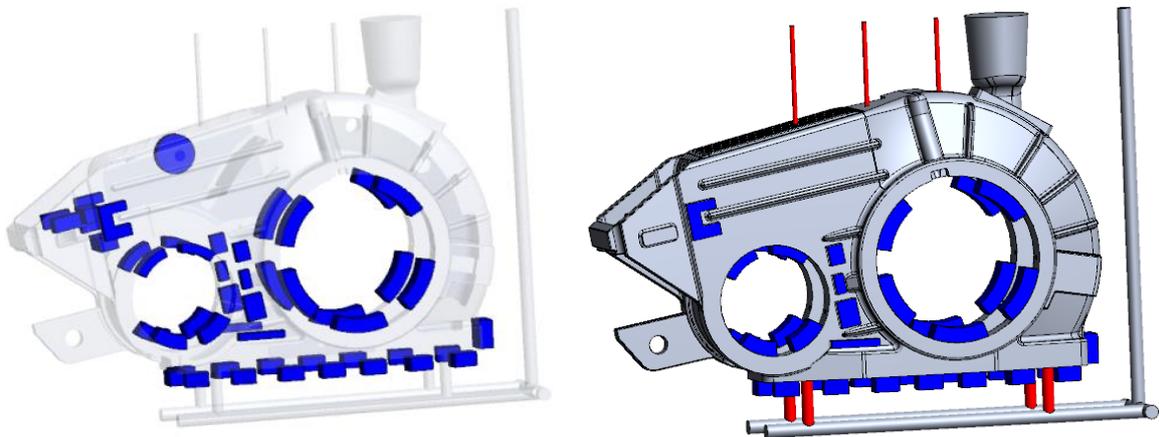


图 5.13 二次改进工艺冷铁分布及改动部位

### 5.8.2 铸造工艺的二次优化模拟结果

根据 5.8.1 节中优化方案改进之后进行模拟，其缺陷模拟结果如下：

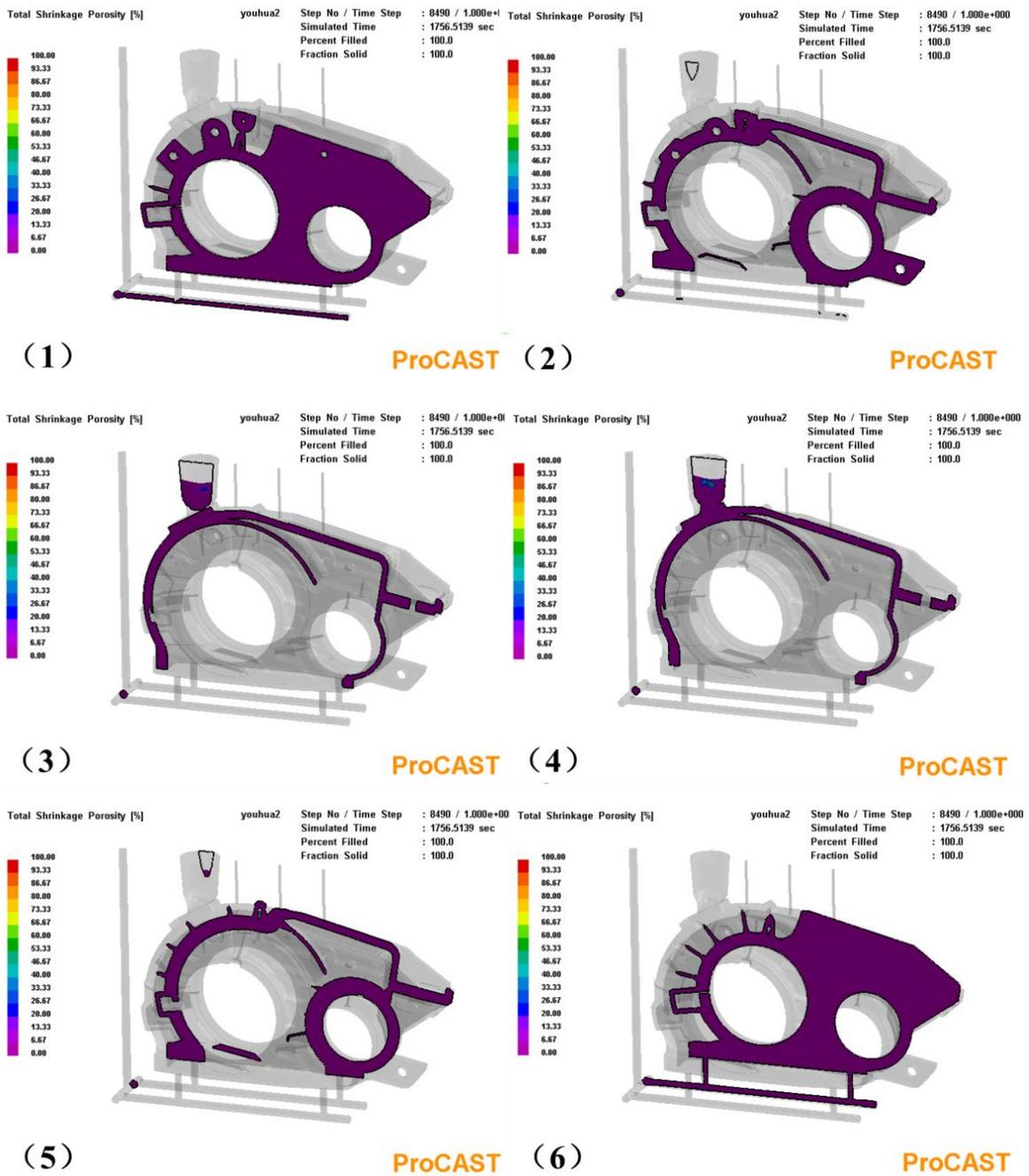


图 5.14 改进工艺中缺陷分布图

图 5.14 为与图 5.10 中初步优化结果取相同位置时缺陷分布示意图。可以看出在图 5.10 初步结果中出现的缺陷全部消失，同样对其它位置进行检查，均未出现缩松缩孔缺陷，即本工艺方案结果最终在 X 射线探伤检测中合格。整体铸件金属致密，未出现穿透性气孔与裂纹等缺陷，即在 24 小时煤油渗漏检测中合格。

图 5.14 中 (4) 的冒口部分中除去缩松部分，金属液剩余量较少，使得本工艺方案的工艺出品率可达 85% 以上，降低了生产成本，节约了金属资源。

综合评价：本次工艺采用平做立浇的浇注方式，通过设置冒口与冷铁使铸件有一个自下而上的顺序凝固，保证了探伤部位铸件金属的致密性，同时消除铸件的缩松缩孔缺陷；通过合理地设置出气孔，降低了铸件针孔气孔的倾向，保证了铸件在实际中对渗漏的要求；同时，方案的工艺出品率较高，可以降低工厂的生产成本。综合来看，属于一种合理的铸造方案。

## 5.9 最佳工艺（平做立浇）

经过第 5 节分析，最终确定最佳工艺为平做立浇的方式，所谓平做立浇，就是造型时将模样沿轴向中间分模造型，合箱后将砂箱竖立起来浇注，避免铸件工作部位处于铸件顶部，探伤部分整体处于铸件下部，在重力作用下首先凝固，得到致密的组织，保证质量检测结果，提高铸件的工作性能<sup>[6]</sup>。平做立浇最佳工艺参数如下：

- 1) 铸件毛重 68.2kg，浇注铝液重 80kg；
- 2) 造型方法：手工造型，两箱造型；
- 3) 造型材料：碱性酚醛树脂自硬砂、宝珠砂；
- 4) 分型面设计：中间分型；
- 5) 浇注系统：开放底注式， $\sum F_{直}:\sum F_{横}:\sum F_{内} = 1:2:3$ ；
- 6) 浇注时间：20s；
- 7) 打箱时间：1600s；
- 8) 出炉温度： $750\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，浇注温度： $710\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- 9) 工艺出品率： $\eta=88.1\%$ 。

## 6 铸造工艺装备

铸造工艺装备是造型、制芯、合箱及浇注过程中使用的模具和装置的总称，铸造工装设计对于保证铸件质量，提高劳动生产效率，减轻劳动轻度起很大作用。设计工装设备既要满足工艺要求，又要便于加工制造。本节重点说明模样、砂箱与芯盒的设计。

### 6.1 模样

模样用来形成铸型的型腔，是砂型铸造中不可缺少的工艺装备。模样的设计质量，不仅关系着铸件的几何形状、尺寸精度和表面质量，而且直接地影响着模样制造工艺、经济性、模样的使用性能与寿命。因此，模样材料的选择与形状尺寸的确定都极为重要。

本次工艺中设计模样形状如图 6.1 所示：

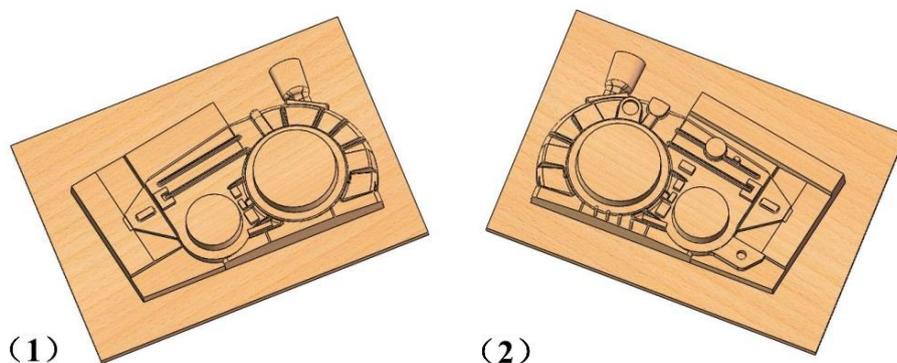


图 6.1 上铸型 (1) 模样下铸型 (2) 模样

根据铸件结构、技术要求及生产批量的不同，铸造行业中使用的模样材料也有所不同：在大批大量生产、机械造型的条件下，多采用金属模样；在单件小批量生产、手工造型条件下多采用木模样；而泡沫塑料模样则多用于消失模铸造。因此，本次工艺中木模较为复杂，故采用易加工、价格低的木模样制造。

## 6.2 砂箱

砂箱是铸造车间造型所必需的工艺装备，用于制造和运输砂型，砂箱结构要符合造型、运输设备的要求。正确地设计砂箱的结构和尺寸，对于保证铸件的质量，提高生产效率，减轻劳动强度以及保证生产安全，都有重要的意义，因此在砂箱的设计中，应遵循以下原则：

- 1) 砂箱应满足铸件在生产过程中的各项工艺要求；
- 2) 砂箱应有足够的强度和刚度；
- 3) 砂箱定位装置应保证铸件精度要求，并持久耐用；
- 4) 砂箱材料应来源广泛、价格低廉。

### 6.2.1 砂箱尺寸设计

按照以上原则，砂箱材料采用成本低、制造方便、强度与刚度均较高的铸铁。由于采用平做立浇工艺，且分型面选在铸件中间，因此上下箱内框尺寸相同；根据 3.3 节中的吃沙量与工厂中常用砂箱尺寸，最终确定上下砂箱内框尺寸为 1400mm(长)×1000mm(宽)×250mm(高)。

采用平做立浇工艺中，砂箱要完成水平位置的造型，满足正常上下相造型的要求，完成水平位置的造型后，应翻转 90° 将砂箱立起进行浇注，因此，在立起来之后，应给砂箱留出直浇道与冒口的位置，完成浇注、排气、补缩等一系列过程，因此设计如图 6.2 所示尺寸的砂箱：

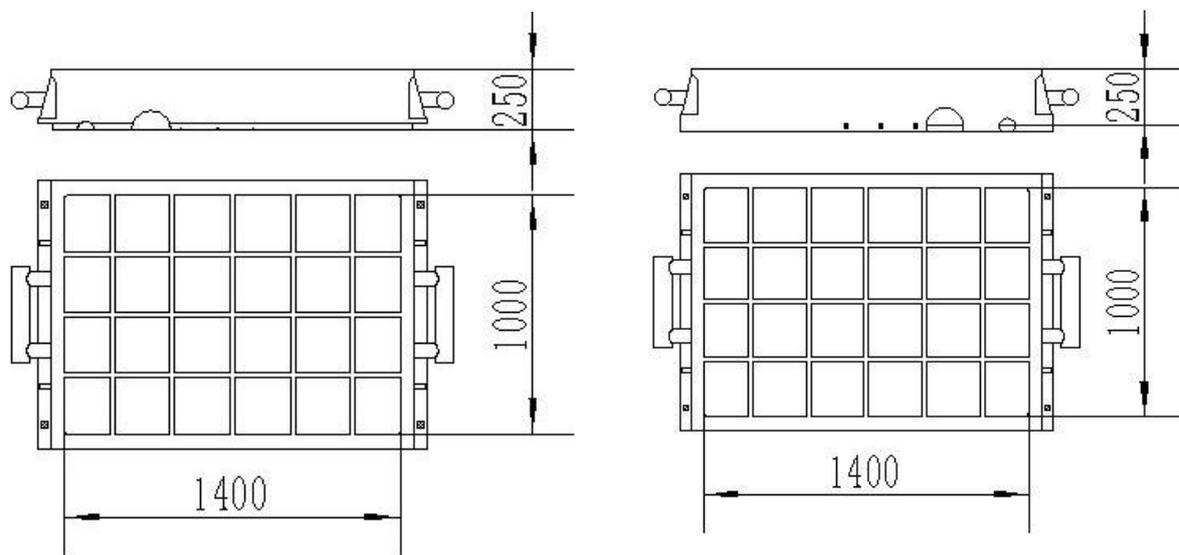


图 6.2 砂箱尺寸图

图 6.3 为砂箱及砂型三维立体示意图：

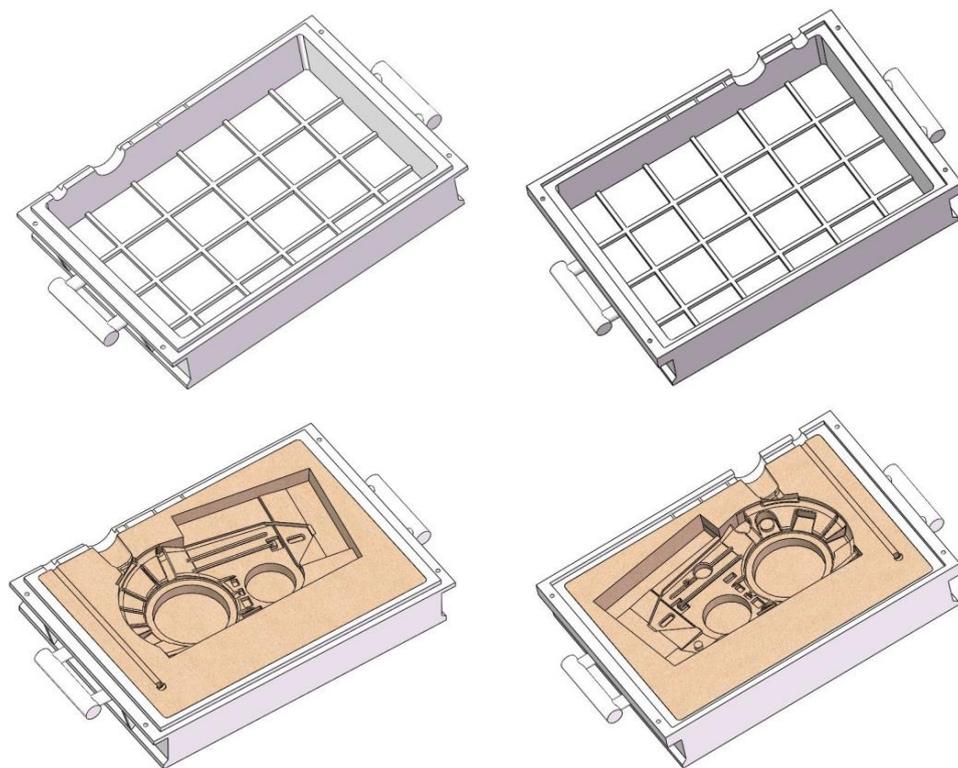


图 6.3 砂箱三维模型

### 6.2.1 砂箱定位设计

平做立浇过程中有砂箱立起的过程，因此产生错箱可能增加，因此，对于砂箱定位结构要求更加严。本次工艺砂型定位不仅采用螺栓卡紧结构，同时增加了上下砂箱的配合，成功解决错箱问题<sup>[7]</sup>。

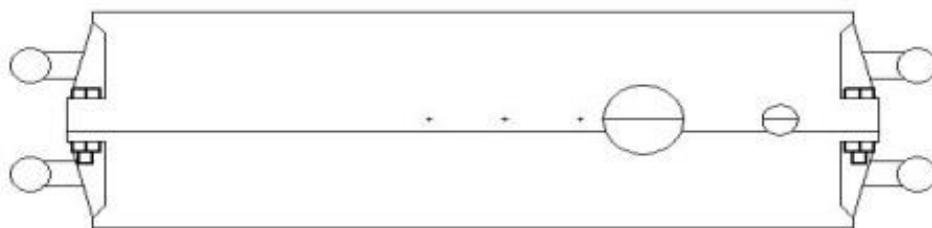
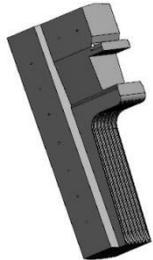
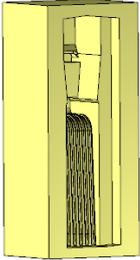
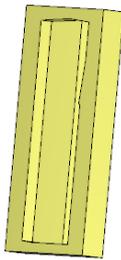
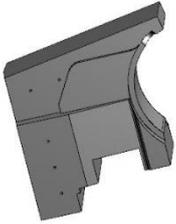
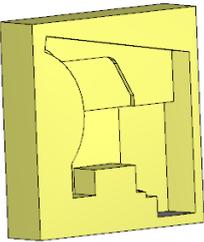
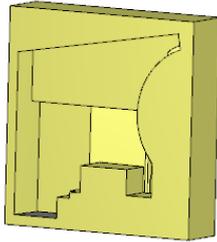
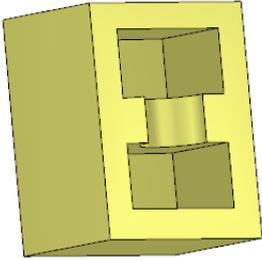
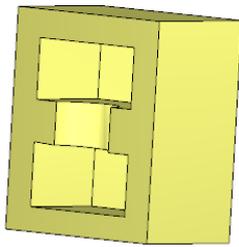
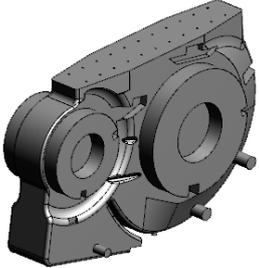
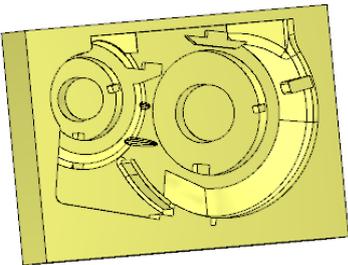
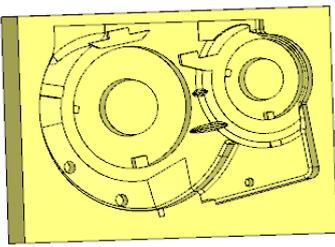


图 6.4 砂箱定位图

### 6.3 芯盒设计

芯盒是制造砂芯的专用工艺装备。芯盒尺寸精度和结构合理与否，将在很大程度上影响砂芯的质量和造型效率。按制芯方法，芯盒可分为震动制芯、挤压制芯、射砂制芯、热芯盒制芯、冷芯盒制芯以及自硬砂制芯等，本次采用自硬砂制芯。主要芯盒形状汇总如下：

表 6.1 主要芯盒汇总表

编号	砂芯形状	上芯盒	下芯盒
1-1			
1-2			
1-3			
3-1			

#### 6.4 下芯顺序及合箱

合理的下芯顺序能够降低工人劳动轻度，保证铸造过程顺利进行，按照 6.1 节、6.2 节、6.3 节分别制出模样、砂箱、砂型后，即可按如下顺序进行下芯、合箱、立箱、放上浇口杯等进行浇注。

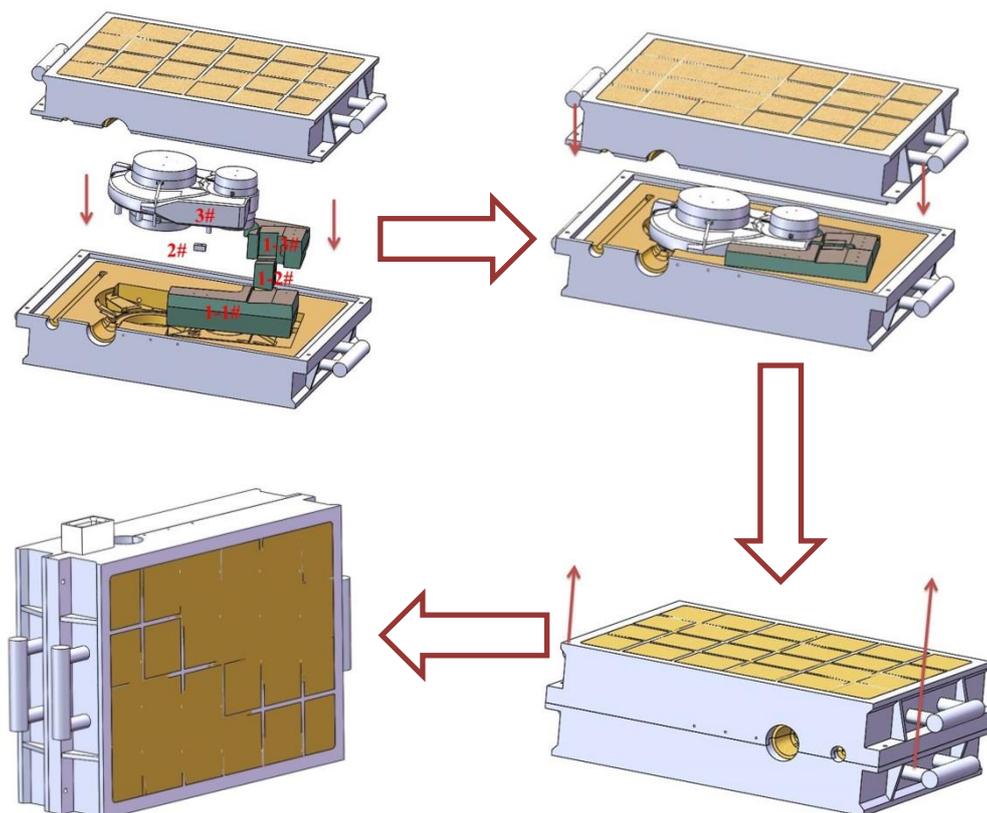


图 6.5 砂芯合箱示意图

## 7 熔炼工艺参数的确定

ZL101A 铝合金液具有严重吸氢的特性，在高温下容易氧化，如果控制不当就会污染铝合金熔液，浇注后形成的铸件废品率必然增加<sup>[8]</sup>。根据实际生产经验，熔炼过程中应当控制两点：一是对铝合金液的精炼处理，应严格控制铝合金液在熔化及保温过程的吸气氧化；二是防止铝液在熔化和保温过程中增 Si、Fe，尤其是 Fe 为有害杂质，应严格加以控制。

### 7.1 熔炼方法

按照铸件技术要求，合金成分与 GB/T8733—2007《铸造铝合金锭》中 365Z.3（原 ZL101A）合金锭规格如表 7.1 所示：

表 7.1 合金元素成分表

	元素含量 (%)							其他杂质 (%)	
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	单独	总量
技术要求	6.5~7.5	≤0.19	≤0.05	≤0.1	0.25~0.45	≤0.07	0.08~0.25	≤0.03	≤0.1
国家标准	6.5~7.5	≤0.12	≤0.05	≤0.05	0.30~0.40	≤0.05	0.10~0.20	≤0.05	≤0.15

对比成分分析：主要元素含量基本相同，仅杂质含量要求较高，故本熔炼工艺采用合金锭重熔法，铸造时只需重熔和精炼，作业方式简便且经济。

## 7.2 变质剂的选择

在 Sr 变质 Al-Si 合金中,变质时间长,几个小时后仍有良好的变质效果,且对 Al-Si 系合金的铸态和热处理状态的力学性能有较大幅度提高,与其他传统变质剂相比, Sr 变质有着实收率高,变质长效性,重熔性好,无设备腐蚀和不污染环境等特点<sup>[9]</sup>。故选用 Al-Sr 变质剂。Al-Sr 变质剂中 Sr 含量较高时,其中 Sr 容易氧化失效; Sr 含量较低时,变质过程中会使铝液温度降低,因此,根据长春第一汽车厂工艺所研究表明 Al-Sr 合金中 Sr 含量在 8%~10%时效果最佳,故本次选取 Al-10Sr 中间合金作为熔炼变质剂。但 Al-10Sr 变质剂有约 40min 的潜伏期,且有增加很近吸气倾向,故变质过程后进行精炼除气。为保证 Sr 加入量在 0.02~0.06%之间, Al-10Sr 加入量选择为 5%。

## 7.3 细化剂的选择

考虑到实际生产中铝合金件多实用低压铸造<sup>[10]</sup>,压力铸造下晶粒较为细小,力学性能相对优良<sup>[11]</sup>。本次工艺采取砂型重力铸造,为达到较高力学性能,故熔炼时加入细化剂细化晶粒,铝合金常用细化剂如下:

表 7.2 铝合金常用细化剂

细化剂种类	盐类细化剂			中间合金类细化剂	
		KBF <sub>4</sub> 25% K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> 75%	K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub> 28% KBF <sub>4</sub> 33% K <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> 39%	Al-5Ti
加入量(占合金的%)	1.0~1.5	0.5~1.0	1.5~2.0	0.4~0.6	0.4~0.6

相较于盐类细化剂,中间合金类细化剂不论从减少杂质的引入还是细化效果而言,都有较好的表现。分析技术要求中对合金成分要求,相较于标准合金规格, Ti 含量有适量增加,并且为避免 B 元素的引入,最终选用 Al-5Ti 中间合金作为熔炼细化剂。

## 7.4 精炼除气

精炼过程非常重要,减少铝液中的氧化夹杂和含氢量,可有效地减少针孔产生倾向。由于变质剂采用 Al-10Sr 中间合金,精炼时不能采用氯或氯盐作为精炼剂<sup>[12]</sup>,且目前六氯乙烷虽为效果理想的精炼剂,但使用时会产生有毒气体,腐蚀设备,污染工厂环境,故最终采用 FOSECO 精炼除气站喷吹氮气对铝液进行精炼除气,强化了除气除渣过程,液面平稳且合金烧损少<sup>[13]</sup>。

采用 FOSECO 精炼除气站喷吹氮气对铝液进行精炼除气,除气时间要求达到 30min 以上。除气机的转速为 300~800rpm,氮气压力为 0.2~0.4MPa,流量为 10~18L/min。使用真空测氢仪,根据密度当量法对除气过程进行控制。

密度当量法测氢:取两个铝试样,分别在大气状态下和真空度为 80mbar 的状态凝固,测定两个铝试样的密度依次为  $\rho_{atm}$  和  $\rho_{80}$ ,用以下公式计算出铝样的密度当量值 DL:

$$DL = \frac{\rho_{atm} - \rho_{80}}{\rho_{atm}} \times 100\% \quad (\text{式 7.1})$$

在齿轮箱浇注前,规定铝液密度当量 DL 应小于 2%,  $\rho_{80} \geq 2630 \text{Kg/m}^3$  才能使用,且铝液必须在 2 h 内使用完毕,否则重新精炼除气。

## 7.5 熔炼工艺

称量后将合金锭加入 5t 燃气炉中,熔炼温度在  $740^{\circ}\text{C}\sim 770^{\circ}\text{C}$ ,完全融化后打开炉口,是合金熔液流入中间包,变质细化在中间包中进行,温度在  $710^{\circ}\text{C}\sim 730^{\circ}\text{C}$ ,分别加入 0.5% 的 Al-10Sr 与 Al-5Ti 中间合金,进行搅拌,之后使用 FOSECO 精炼除气站喷吹氮气对铝液进行精炼除气,加入覆盖剂,静置静 10~20min 之后通过测氢仪对铝液的含氢量进行检测,含氢量合格后方可进行浇注,浇注温度在  $710\pm 5^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>。

## 8 铸件质量检测及处理

综合铸件的技术要求,对于本次铸件箱体生产的工艺流程为称料→熔炼→精炼→转注→测氢→铸造→X 检验(探伤)→毛坯尺寸、外观检查→去浇冒口→修毛边→T6 热处理(固溶处理+时效处理)→抛丸→机加工<sup>[15]</sup>。本节重点说明铸造结束后对铸件质量的检测与使用的热处理工艺等环节。

### 8.1 铸件清理

铸件在浇注后约 1600s 进行打箱,之后对铸件落砂进行清理。清理后探伤检测尺寸检查合格后切除浇冒口,清理毛边,切下 4 块试验棒,2 块交于客户,2 块自行检测性能组织。

### 8.2 X 射线探伤检测

X 射线检测是无损检测中最常用的方式之一,根据射线穿过材料或工件时的强度衰减,检测其内部不连续程度,反映其中缺陷数量与等级。穿过材料或工件的射线由于强度不同在 X 射线胶片上的感光程度也不同,由此生成内部不连续的图象,可作为探伤结果最直接证据。

铸造结束后,首先应请探伤人员在指定部位(图 1.1)按照 ASTM E94-2004 标准进行 X 射线探伤,并按照 ASTM E155 标准对气孔、缩孔、缩松、夹杂等缺陷进行评级,质量等级达到 ISO9915:1992 的 C 级(即表 1.3 中标准)。

### 8.3 24 小时煤油渗漏检测

煤油渗漏检测一般是用在只起到密闭作用,但对强度要求较低的常压容器。在铸件-箱体工作时,图 8.1 所示箱体部位为充满润滑油的状态,因此应对其进行 24 小时煤油渗漏检测。

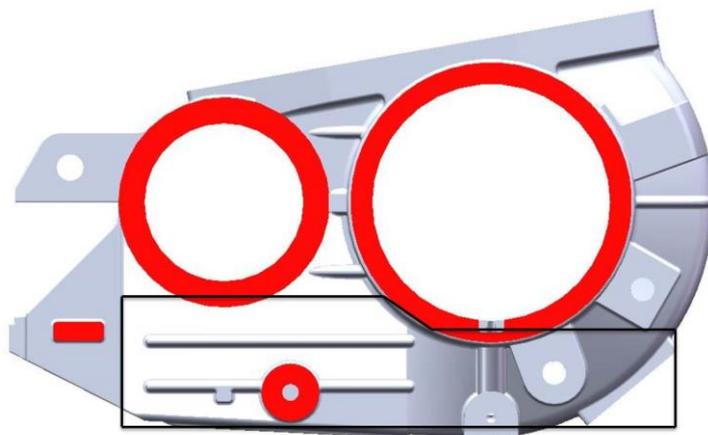


图 8.1 煤油渗漏检测

检测时，应对图 8.1 中制定外壁进行脏物清理，并涂上白粉乳液或白土乳液，等干燥后，在内壁至少喷涂两次煤油（环境气温低时，允许事先将煤油加热至  $60^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$  后喷涂内壁），每次间隔 10min，24h 后，在涂白粉乳液的外壁上没有出现斑点即为合格。

由于箱体该部分结构中通孔类结构，此类部位应在加工后进行检测。

### 8.3 荧光探伤

荧光探伤主要是对铸件的裂纹、冷隔、夹杂、疏松、折叠、气孔等表面穿透性缺陷进行检测，检测过程严格按照 QJ2286-1992 中进行，主要过程为清洗、渗透、去除、干燥、显像与检测等 6 部分。

### 8.4 热处理制度

箱体热处理指出为 T6 热处理，即固溶处理加完全人工时效处理，旨在提高铸件的抗拉强度。具体热处理过程如下：

- 1) 热处理前检测（铝合金固溶炉设备检测）。
- 2) 加热至  $525\pm 5^{\circ}\text{C}$  保温 150min。
- 3) 出炉淬  $30^{\circ}\text{C}$  以下的水，转移时间应小于 15s。
- 4) 如有需要。可进行铸件变形的矫正，矫正模具提前备好，矫正要在淬火后立即进行。
- 5) 淬火后 30min 内进行时效处理，时效炉为  $140\pm 5^{\circ}\text{C}$  保温 5h。

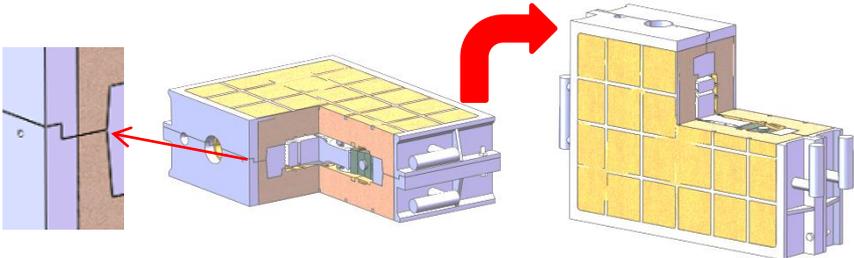
### 8.5 抛丸处理

铸件在冷却过程中，由于壁厚有所差异，冷却速度不一致，导致表面产生应力集中。抛丸处理后，可改善表面组织结构，消除表面应力(拉应力)集中，提高疲劳强度，并使表面硬度略有提高；同时利于喷漆时表面的附着。

由于本铸件材质为 ZL101A，抛丸不适合使用钢丸，可使用铝合金丸或不锈钢丸，但不锈钢丸价格昂贵，因此，铸件采用粒度为  $1\pm 0.2\text{mm}$  的铝合金丸。抛丸机以  $110\sim 260\text{kg}/\text{min}$  抛射量， $50\sim 75\text{m}/\text{s}$  的抛射速度将铝合金丸抛向铸件， $5\sim 7\text{min}$  内即可完成清理。

## 9 工艺卡

### 箱体铸造工艺卡

零件号	BF0320ZJ		零件名称	箱体		每台件数	1		
材 料									
铸件重量 (kg)					工艺出品率	铸件材质	每个毛坯可切零件数		
净重	毛重		浇注系统重						
55.8kg	68.2kg		9.2kg		88.1%	ZL101A	1		
造 型									
造型名称	造型材料	造型方法	砂箱内部尺寸 (mm)			涂料			
			长	宽	高				
上箱	碱性呋喃树脂自硬砂	手工造型	1400	1000	250	水石英粉涂料			
下箱		手工造型	1400	1000	250				
制 芯									
砂芯	制芯材料	制芯方法	芯盒类型	芯骨材料	涂料				
1#	碱性呋喃树脂自硬砂	手工制芯	木质芯盒	圆钢和铸铁	水石英粉涂料				
2#	碱性呋喃树脂自硬砂	手工制芯	木质芯盒	-	水石英粉涂料				
3#	碱性呋喃树脂自硬砂	手工制芯	木质芯盒	圆钢和铸铁	水石英粉涂料				
浇 注 系 统									
内浇口		横浇口		直浇口		浇口杯形状	过滤器	出气孔数量	
数量	截面积 (cm <sup>2</sup> )	数量	截面积 (cm <sup>2</sup> )	数量	截面积 (cm <sup>2</sup> )				
4	18	2	12	1	6	池型	有	3	
浇 注									
铝液出炉温度 °C		浇注温度 °C		每箱铝液消耗 kg		浇注时间 s		冷却时间 s	
750		710		80		20		1600	
铸 件 落 砂 与 清 理									
名称	落砂			落芯			铸件清理		
方法	机械振动			机械振动			人工打磨		
使用设备	振动落砂机			振动落砂机			锤子、风铲		
备注	<p>本工艺采用平做立浇工艺方案，为防止立箱过程中错箱，上、下砂箱结构如下图：</p> 								

## 参考文献

- (1) 徐贵宝, 谭东, 陈红圣. CRH380B 高铁齿轮箱体的制造工艺与质量控制[J]. 铸造, 2016, 65 (10): 950~954
- (2) 徐庆柏, 章舟. 现在铸造涂料及应用[M]. 化学工业出版社, 2007年05月第1版
- (3) 中国铸造协会, 《铸造工程师手册》编写组. 铸造工程师手册[M]. 机械工业出版社, 2010年10月第3版
- (4) 李晨曦. 铸造工艺及工装合计[M]. 化学工业出版社, 2014年08月第1版
- (5) 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 中国水利水电出版社, 2010年01月第1版
- (6) 李谟康. 平做立浇、倾斜浇注工艺在铸钢生产中的应用[J]. 铸造技术, 2003, 6: 559
- (7) 袁艳欣, 徐君东, 李志博. 平做立浇生产球墨铸铁主轴铸件[J]. 现代铸铁, 2007, 4: 34~35
- (8) 周延军, 宋克兴, 张彦敏. 真空熔铸法制备 ZL101A 合金工艺及性能研究[J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1167~1170
- (9) 高泽生. Sr 在变形铝合金中的应用[J]. 轻合金加工技术, 1997, 25 (8): 34~37
- (10) 王沛培, 张章, 马俊等. 高速动车组齿轮箱金属型低压铸造工艺研究[J]. 研究开发, 2016, 5 (10): 1~4
- (11) 张大伟, 童跃飞, 唐 阳等. Al5Ti1B 细化剂对 ZL101A 铸造铝合金组织与性能的影响[J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (11): 60~62
- (12) 王顺成, 陈彦博, 温景林. 变质剂 Al-Sr 中间合金的制备及其变质效果[J]. 轻合金加工技术, 2003, 30 (1): 4~6
- (13) 徐贵宝, 周峰, 马俊成. 城际动车组齿轮箱体的铸造技术与质量控制[R]江苏常州: 南车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 2015: 58~63
- (14) 陆文华, 李隆盛, 黄良余. 铸造合金及其熔炼[M]. 机械工业出版社, 2002年05月第2版
- (15) 范文静. ZL101A 铝合金车轮热处理工艺的优化与研究[D]. 河北: 河北农业大学, 2010:8~10