

铝合金变速箱箱体挤压铸造 工艺设计与验证

赵曼, 苏小平, 康正阳, 杨闯

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 采用有限差分法对铝合金变速箱箱体的挤压铸造过程进行了数值模拟。根据充型、凝固过程的数值模拟结果, 判断铸件产生缺陷的原因; 针对模拟的缺陷进行工艺方案改进, 并通过实验数据验证了数值模拟结果的有效性; 可为同类产品的工艺设计和生产提供指导。

关键词: 变速箱箱体; 数值模拟; 挤压铸造; 试验验证

近年来, 由于气候变化和能源危机等重大问题, 汽车轻量化越来越受到重视。铸铝合金由于其密度小、热稳定性好、强度重量比高等优点, 越来越多地应用于整体结构件的制造中。作为汽车传动系统中的关键部件, 变速箱箱体的安全性和可靠性是至关重要的。因此, 在使用过程中, 需要较高的力学性能来抵抗机械载荷的变化。通常情况下, 汽车变速箱箱体采用铸铁或铸钢生产, 成形工艺采用砂型铸造、V法铸造、重力铸造等。但当结构复杂时, 在这些工艺下获得的产品力学性能不高, 生产缺陷较多。相比之下, 铝合金具有良好的铸造性能^[1], 可以根据不同产品的性能需求及成本预算选择不同的铸造方法。

挤压铸造属于目前较为先进的铸造成形工艺, 其特点是将金属液以低速压入型腔并使其保持在高压下凝固, 兼具铸造及锻造两者的优势, 以此方式生产的零件成形精度高, 力学性能甚至能够达到同等合金锻件的水平, 是一种前景广阔的先进金属成形工艺^[2-3]。随着计算机技术和有限元技术的发展, 数值模拟在铸造领域的应用已成为制造复杂几何形状和高强度金属零件的有力工具^[4]。因此, 本文以铝合金变速箱箱体为研究对象, 进行挤压铸造工艺的设计, 并通过MAGMASoft软件对其挤压铸造过程进行模拟分析, 最终进行试验验证获得成型质量高且力学性能良好的箱体铸件。

1 铸件结构

本研究对象为铝合金变速箱箱体, 装载于某工程机械车辆的传动总成中, 作为原铁质箱体的换代产品, 其质量更轻且具有良好的散热和耐腐蚀性能, 三维模型如图1所示。外形轮廓尺寸约为440 mm × 275 mm × 235 mm; 整体厚度主要集中在12~18 mm, 其中箱体肋板等较薄部位厚度约为10 mm, 箱体底部局部厚度约为32 mm, 属于挤压铸造技术适用的壁厚范围内。

变速箱箱体结构较为复杂, 整体呈腔形, 因其长期所处的运转环境恶劣, 所以箱体的性能要求也较高: 抗拉强度 ≥ 260 MPa, 断后伸长率 $\geq 6\%$, 硬度HBW ≥ 80 ; 经热处理后不应出现裂纹、缩孔、冷隔等缺陷, 综合性能良好。为了满足变速箱箱



图1 变速箱箱体三维模型图
Fig. 1 3D model diagram of gearbox box

作者简介:

赵曼(1993-), 女, 硕士, 主要研究方向为铝合金成形工艺。电话: 025-58139905, E-mail: zm2007s@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)

09-1181-08

收稿日期:

2023-04-25 收到初稿,
2023-05-30 收到修订稿。

体在轻量化以及力学性能方面的需求,箱体材料选用高强度铝合金A356,该合金具有良好的流动性、散

热性和耐腐蚀性,经挤压铸造工艺成形后力学性能优良。其化学成分如表1所示。

表1 铝合金A356的主要化学成分
Table 1 Main chemical constituents of aluminum alloy A356

Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Ti	Al	$w_B/\%$
6.5~7.5	0.25~0.45	0.05~0.2	0.01~0.1	0.01~0.1	0.1~0.2	0.1~0.2	余量	

2 变速箱箱体挤压铸造工艺设计

2.1 浇注系统的设计

浇注系统是挤压铸造充型过程中金属液在冲头的作用下进入型腔的通道,在铸件的充型、凝固补缩过程中起着至关重要的作用,其位置、形状等设计将很大程度上影响最终铸件的成形质量,因此设计合理的浇注系统十分重要。

(1) 浇注系统设计原则。在间接挤压铸造中,合理的浇注系统建立应当遵循以下设计原则:①一般采用底注式浇注系统,结构应尽可能简单并圆滑过渡,避免金属液进入型腔时出现紊流、冲射现象,实现平稳充型。②浇注系统应有利于铸件形成顺序凝固,为实现金属液在由液相变为固相的过程中具有良好的补缩通道,应采用封闭式浇注系统。③内浇道的位置应布置在铸件壁厚较大处,这样不仅能够避免充型过程中金属液温度下降过快,同时有利于在凝固过程中由冲头经浇道至铸件上的压力传递,保证补缩通道的顺畅。④浇注系统应能够保证铸件成形后的完整性,同时应设置在容易去除的位置,最大程度减少后续加工的难度以及材料的浪费,实现大批量生产。

(2) 压室容量的确定。本文选用的间接挤压铸造是通过冲头将压室中的金属液推至型腔内,为了保证有足够的金属液能够充满型腔,需要满足压室容量大于模具合模后空腔内的容量(即工艺质量),即应当满足公式:

$$G_{\text{压}} > G_{\text{工}} \quad (1)$$

式中: $G_{\text{压}}$ 为压室容量, kg; $G_{\text{工}}$ 为工艺质量, kg。

变速箱箱体铸件产品的质量为14.1 kg,按照一模一件的布置方案,型腔中还包含浇排系统等结构。通常来说铸件质量约占工艺质量的50%~70%,所以工艺质量应当在20.1~28.2 kg之间。因此为了确保浇注金属液的用量能够填满型腔,选取容量为30 kg的压室,其配套的冲头直径为140 mm。

(3) 内浇道及浇道的设计。内浇道的开设位置以及形状设计都将直接影响金属液进入型腔时的流动状态和凝固时的补缩效果。对于本文研究的间接挤压铸造,内浇道通常设置在铸件底部较厚部位,这样不仅有利于金属液平稳地进入型腔,同时也有利于建立良

好的补缩通道使铸件实现顺序凝固。内浇道的截面积比例可根据经验公式确定^[5]:

$$R_g = \frac{A_t}{A_g} \leq 10 \quad (2)$$

式中: R_g 为内浇道的截面积比例; A_t 为冲头的截面积, mm^2 ; A_g 为内浇道的截面积, mm^2 。

对于变速箱箱体的间接挤压铸造,依据以上所述的原则,将内浇道设置在箱体底部通孔处的圆环形凸台位置,如图2所示。

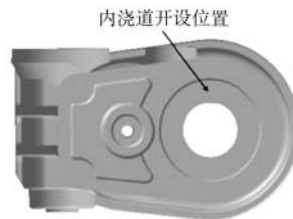


图2 内浇道开设位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of opening position of inner gate

该位置处于箱体底部近乎中间区域,局部较厚、结构简单规则且平整,这样有利于金属液进入型腔时向四周均匀地填充铸件底部,有效避免喷溅、紊流;在凝固阶段也有利于进行良好的压力补缩,实现铸件从远离内浇道区域到内浇道的顺序凝固。由于变速箱箱体间接挤压铸造中选用的冲头直径为140 mm,依据经验公式(2)计算内浇道的截面积应大于1 540 mm^2 。考虑到所选的内浇道开设位置为圆环形凸台结构,所以内浇道也设计为圆环形。内浇道的截面积应尽可能地拓宽,这样能够更好地实现金属液平稳充型以及挤压力的顺畅传递,但同时需要兼顾到铸件成形后其浇注系统容易去除、减少后续加工的难度。因此设计圆环形内浇道的内圈直径与箱体通孔处的圆环形凸台内圈一致为81 mm,外圈直径比圆环形凸台外圈略小为147 mm,经计算得到内浇道的截面积为11 819 mm^2 ,满足式(2)的要求。

浇道是连接压室与铸件型腔的通道,其形状和尺寸的设计同样应有利于金属液的平稳充型和高压补缩,因此综合考虑浇道将延续内浇道的外圈圆形形状,其厚度为21 mm,如图3所示。另外将料柄的厚度

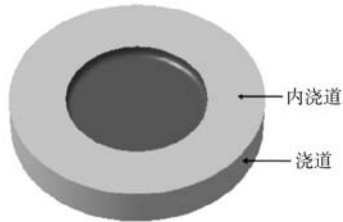


图3 内浇道及浇道三维模型图

Fig. 3 Three dimensional model drawing of inner gate and sprue

设置为35 mm。

2.2 排溢系统的设计

排溢系统的作用主要包括：保证金属液在充型过程中，型腔内的气体在金属液的推进下顺利溢出，避免残留在型腔中形成气孔缺陷；保证金属液前端存在的氧化夹杂物、混合气体以及涂层等杂质溶液被顺利聚集到集渣包内，从而使铸件本体部分的金属液质量良好。

在间接挤压铸造中，一方面，为了保证铸件充型完整，同时尽可能地将卷气夹渣等缺陷集中在集渣包内，应将集渣包开设在金属液填充困难以及汇流的部位，这样也可以在一定程度上改善金属液的充填状态；另一方面，为了保证铸件离内浇道较远的边缘部位在凝固过程中得到良好的补缩，应将集渣包开设在金属液最后填充的位置。结合以上考虑，对于变速箱箱体，将集渣包设置在箱体后侧面的结构凸起处，以及箱体顶端最后填充的位置，如图4所示。

至此，对于变速箱箱体间接挤压铸造成形工艺中带有浇排系统的铸件模型如图5所示。

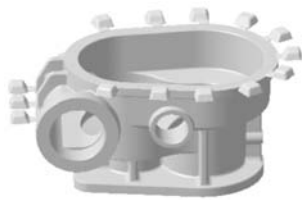


图4 集渣包开设位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of opening position of slagging bag



图5 带浇排系统的铸件模型

Fig. 5 Casting model with drain system

2.3 分型面的确定

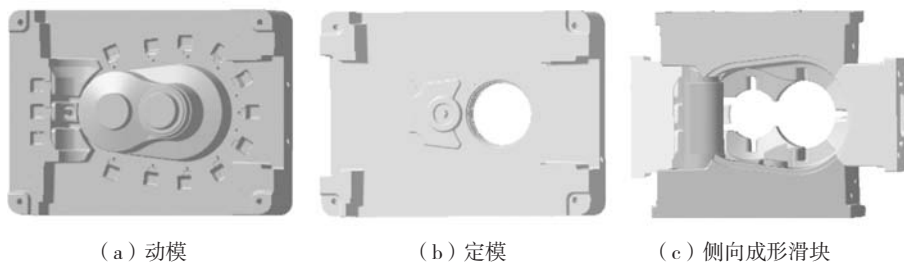
分型面位置的选择主要取决于铸件的结构和形状，其选择是否合理直接关系到模具设计的难易程度以及铸件的成形质量。为了得到尺寸精度高的铸件，间接挤压铸造模具分型面的选择应遵循以下基本原则^[6]：有利于简化模具的设计制造难度；有利于气体等夹杂物在金属液的推进下顺畅排出；有利于开模取件。

对于变速箱箱体分型面的选择，在保证排气的前提下，应充分考虑箱体的形状结构和浇排系统的设计特点，使集渣包处于模具分型面处，便于箱体凝固成形后留在动模内顶出取件。本文选取箱体的内腔表面和底部表面作为主分型面，对于箱体侧面四周的结构及零件侧壁上孔，采用侧向成形滑块抽芯实现组合分型，即垂直加水平分型面，按此分型思路得到的模具结构如图6所示。

3 挤压铸造数值模拟

3.1 仿真设置

将建立好的铸件模型导入到MAGMASoft，在进行数值模拟之前，首先需要对于铸件、浇排系统、模具等结构进行网格划分。铸件部分网格单元大小定为1.5 mm，浇注系统部分网格单元大小定为3 mm，集渣包处因有薄壁结构网格单元大小定为1mm，模具部分网格单元大小定为5 mm，最终生成14 537 718网格数。铸件材料选用AlSi₇Mg铝合金，模具材料选用H13。铝合金变速箱箱体挤压铸造的初始工艺参数设定如表2所示。



(a) 动模

(b) 定模

(c) 侧向成形滑块

图6 模具三维模型图

Fig. 6 Mold 3D model drawing

表2 初始工艺参数的设定
Table 2 Setting of initial process parameters

工艺参数	数值
浇注温度/℃	660
模具预热温度/℃	200
充型前段速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.1
持续时间/s	2.7
充型后段速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.3
持续时间/s	0.5
比压/MPa	100
保压时间/s	100

3.2 充型过程分析

如图7所示为试验铝合金液在充型过程中的温度场变化情况,从图7中可以看出,金属液在冲头的作用下液面逐渐上升,经浇道、内浇道进入模具型腔直至充

满,整个充型过程大约持续了3.2 s。通过观察和分析金属液在型腔中的流动状态,可以判断浇排系统设计的合理性。由图7d可以看出,金属液填充至远离浇口的箱体后侧部位最大孔结构处,即:图中用红圈圈出的区域,此处的型腔结构由侧向成形滑块构成,结构变化较大较为复杂,容易阻碍金属液的平稳填充,而实际金属液流经此处时顺着箱体后端的加强肋板结构流入集渣包中,并没有出现液面大幅度的波动起伏以及汇流杂乱的情况,在此处设置的集渣包充分起到了改善金属液填充状态、聚集液面前端杂质的作用。

3.3 凝固过程分析

图8为变速箱箱体在凝固过程中的温度场分布情况,图8a中显示在3.37 s时,即铸件刚刚完成充型进入到高压凝固阶段,此时在箱体边缘部位和集渣包及附近区域的温度较低,为590℃左右,而在箱体底部的内

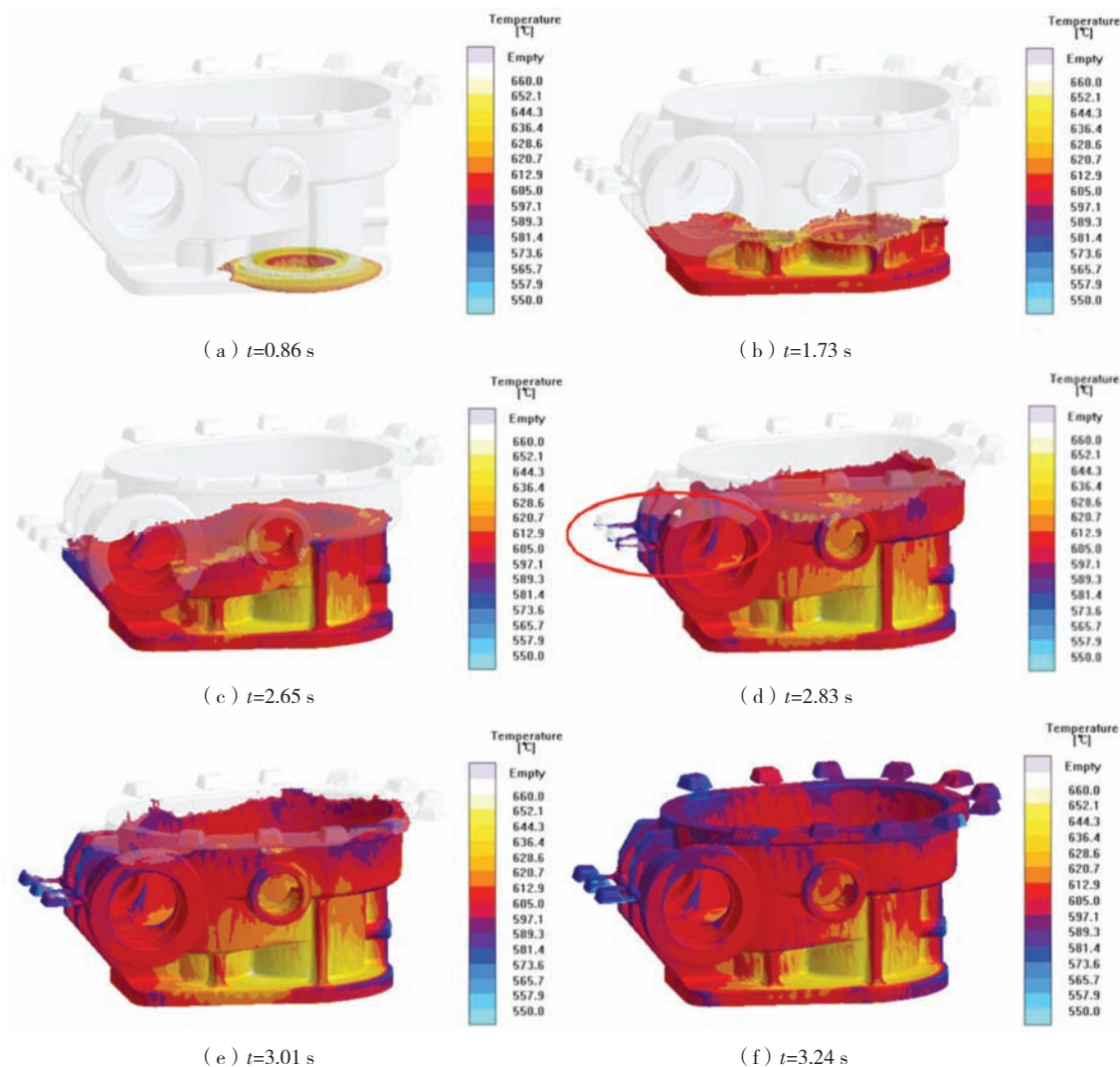


图7 充型状态和温度场变化

Fig. 7 Filling state and temperature field change

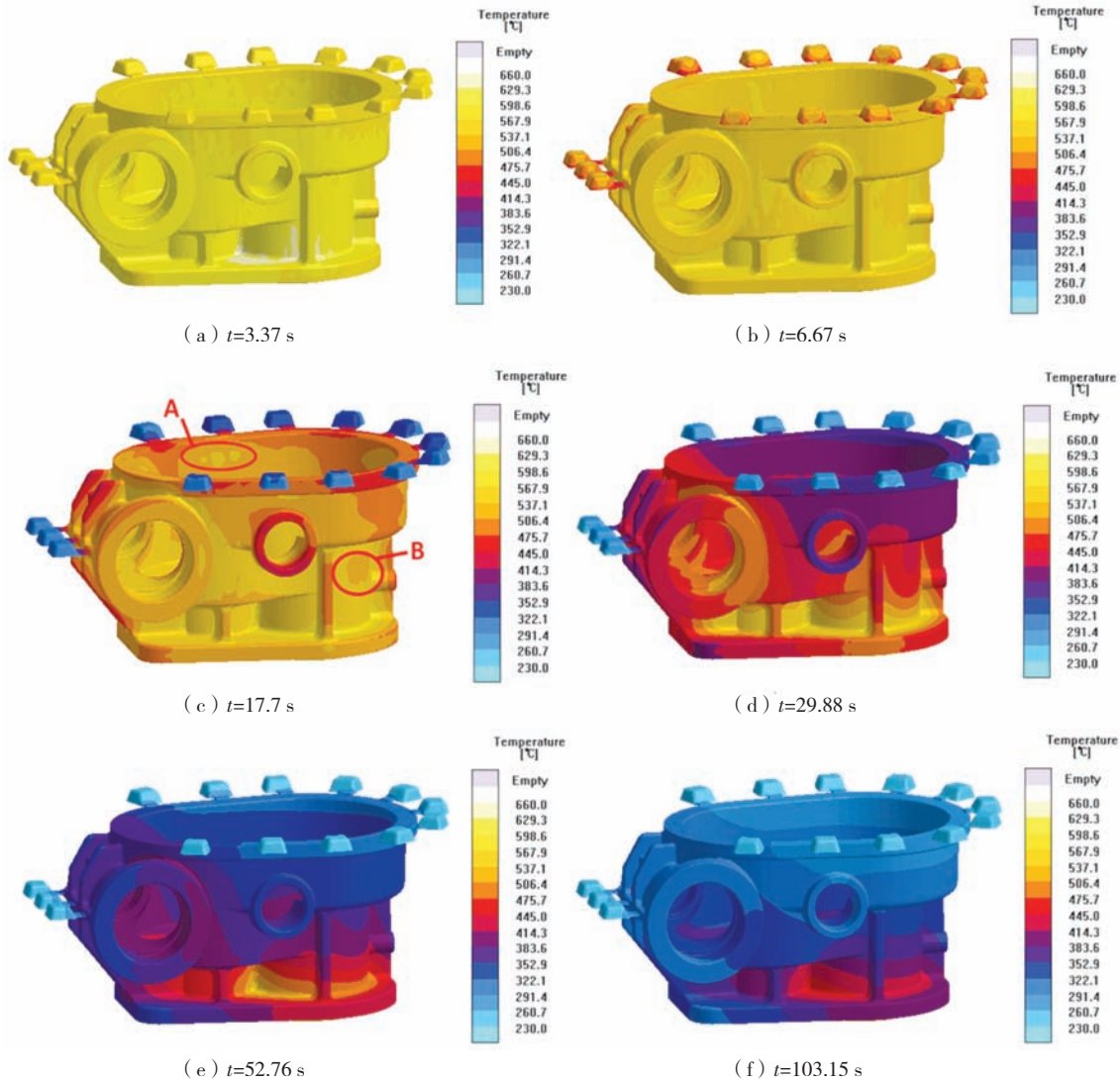


图8 凝固过程温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution during solidification

浇道附近区域温度仍接近660℃，可以很好的传递冲头的挤压力实现强制补缩。凝固持续至17.7 s时，结合图8c中红圈A处可以看出，在靠近箱体上端面的部位相比其附近区域的温度较高，由于该处局部较厚，金属液的热量不能及时消散容易形成热节，最终可能产生疏松缩孔缺陷；从图8c中红圈B处可以看出，在靠近箱体前端的局部壁厚较薄处，金属液温度下降较快提前凝固，这样容易阻断内浇道与处于该部位上端区域之间的压力补缩通道，导致其上端区域的补缩效果变差。随着时间的推移，箱体整体上呈现出从边缘向中心、从远离内浇道向内浇道自上而下的顺序凝固趋势，到103.15 s时，金属液温度全部低于固相线，凝固完成。

4 方案改进

通过上节对变速箱箱体凝固过程中温度场变化

情况的分析，发现在凝固过程中箱体存在热节以及较薄部位提前凝固的问题，均会影响铸件最终的成形质量，因此，决定在初始工艺方案的基础上，设计加装冷却系统以改善铸件凝固过程中的温度梯度。

冷却系统的实质是通过冷却管道中的介质与模具之间进行热量交换，加快模具与相应位置金属液之间的热量交换，达到调节铸件温度场分布减少热节的目的。合理的冷却系统设置可以为铸件构建良好的温度梯度，使铸件趋于理想的顺序凝固，此外，冷却系统的加装不仅能够缩短铸件凝固时间，通过冷却介质的不断循环还可以使模具温度始终稳定在适于生产的范围，有效提高生产的效率和可持续性。对于本变速箱箱体挤压铸造的冷却系统建立应符合以下原则：模具中的冷却管道尺寸应尽量统一，从而避免增加模具的设计难度与制造成本，一般冷却管道直径在8~25 mm

之间。冷却管道与模具型腔表面以及不同冷却管道之间应保持适当的距离。若距离过近，尤其在挤压铸造中，模具受到高温金属液与冷却管道之间过大的温差作用容易发生开裂；若距离过远，则无法达到预期的冷却效果。

根据变速箱箱体在凝固过程中的温度场分布情况并结合以上阐述，本文在原有铸件模型的基础上添加冷却系统。因本变速箱箱体的体积较大，为了充分发挥冷却系统的作用，采取冷却效果较好的水冷方式，考虑到模具的制造难度及使用寿命，冷却管道的直径统一为12 mm，各冷却管道与型腔表面之间的距离至少为30 mm，具体布置如图9所示。

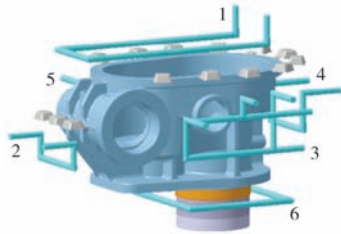


图9 冷却系统布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of cooling system layout

为了使如图9中所设计的冷却系统能够达到调节箱体在凝固过程中的温度场分布、使其沿补缩路径顺序凝固的目的，冷却水温度、流速等参数就需要遵循金属液自上而下由外而内的凝固规律而设置，以取得良好的冷却效果。因此，在其他工艺参数保持不变的情况下，经过多次数值模拟计算的验证对比，最终设置的冷却工艺参数如下表3所示。

表3 冷却工艺参数的设置
Table 3 Setting of cooling process parameters

管道编号	温度/℃	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	开启时间/s	关闭时间/s
1	25	0.8	3.5	15
2-5	25	1	10	60
6	25	1.2	65	80

5 方案验证

对改进后的工艺方案进行数值模拟验证，采用Syvertsen和Freddy两位学者^[7]在Niyama判据的基础上引入了局部凝固时间，提出的适用于预测铝合金铸件中缩松缩孔缺陷的判据进行缩松缩孔预测分析。图10为改进方案下变速箱箱体的缩松缩孔分布图，从图中可以发现该工艺方案下铸件中几乎不存在缩松缩孔缺陷。

图11为改进方案下变速箱箱体的二次枝晶臂间距分布图，从图中可以发现箱体各部位二次枝晶臂间距



图10 缩松缩孔分布图

Fig. 10 Distribution diagram of shrinkage cavity and porosity

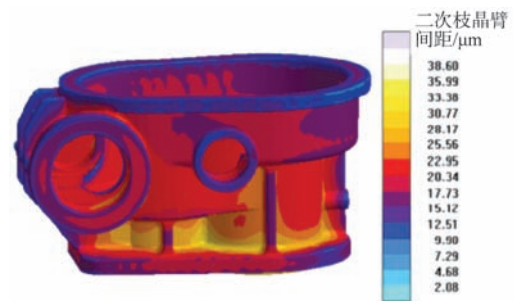


图11 二次枝晶臂间距分布图

Fig. 11 Distribution of secondary dendrite arm spacing

的长短分布基本吻合于相应部位凝固时间的长短，最大间距值为38.6 μm。冷却系统的添加在缩短凝固时间的同时，能够有效起到细化晶粒、提高变速箱箱体力学性能的作用。

为进一步验证所设计的变速箱箱体挤压铸造工艺方案的可行性，根据上述确定的方案选用SCV-2500T挤压铸造设备对产品进行试制。挤压铸造设备的主要技术参数如表4所示。此外，在铝液熔炼过程中加入0.15%的AlTiB细化剂以细化晶粒，并添加Al-Sr中间

表4 挤压铸造设备的主要技术参数
Table 4 Main technical parameters of squeezing casting equipment

序号	参数	数值
1	压射力/kN	2 400
2	锁模力/kN	25 000
3	脱模力/kN	800
4	最大压室容量/kg	31
5	合模行程/mm	1 500
6	模具厚度/mm	800~2 000
7	哥林柱间隔/mm	1 300×1 500
8	哥林柱直径/mm	280
9	压射行程/mm	740
10	浇口套直径范围/mm	120~190
11	顶出行程/mm	260
12	压射速度/(m·s ⁻¹)	0.03~0.7

合金对铝液进行了变质处理。试制产品如图12所示，经检验，产品整体质量较好，内外表面无裂纹。

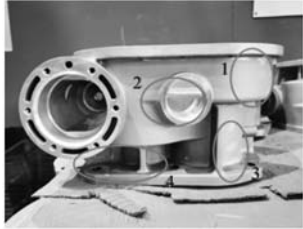


图12 铝合金变速箱箱体实物图

Fig. 12 Physical drawing of aluminum alloy gearbox box

为了能够直观地判断铸件内部的成形质量，利用X射线检测铝合金变速箱箱体的内部缺陷情况，主要检测箱体容易出现缩松缩孔缺陷的局部厚大部位，如图12中圆圈所示的位置，检测结果如图13所示。

为了检验铝合金变速箱箱体的力学性能，对其进行拉伸性能测试和硬度测试。同理，正确的取样位置能够综合反映出箱体不同部位的力学性能，选择在箱体相对平整、壁厚变化不大的位置进行取样，取样部位如图14所示。铝合金变速箱箱体力学性能测试的结果如表5所示。

根据表中数据可以计算得到抗拉强度的平均值为

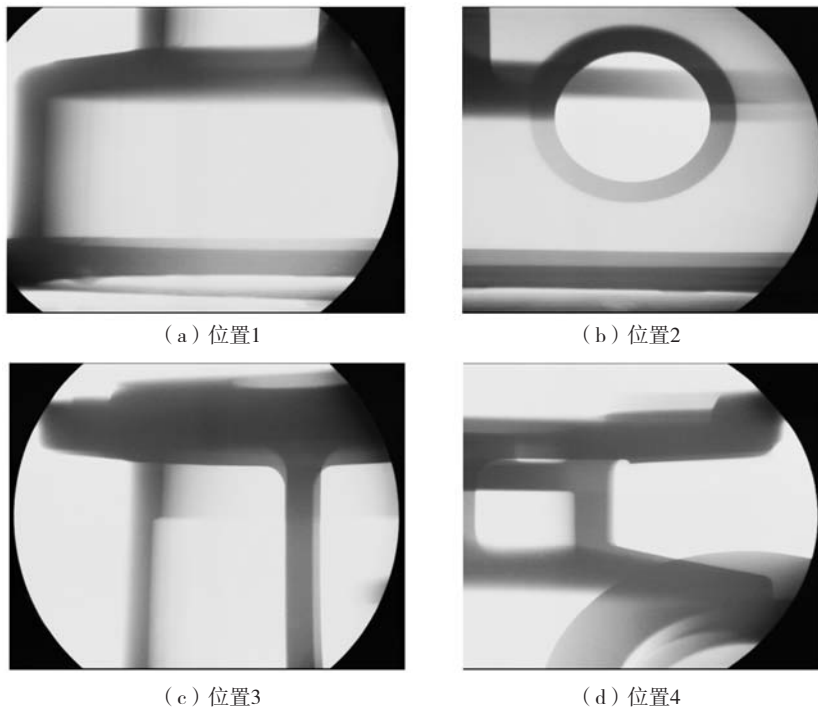


图13 检测结果图

Fig. 13 Test result diagram

表5 铝合金变速箱箱体力学性能测试结果
Table 5 Test results of mechanical properties of aluminum alloy gearbox box

序号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW
1	281	9.4	92
2	279	9.5	91
3	286	9.1	94
4	280	9.3	91
5	278	9.8	89
6	281	9.7	90

280.8 MPa>260 MPa; 伸长率的平均值为9.5%>6%; 硬度的平均值HBW为91.2>80。从表5中数据也可以看出对于不同取样位置的试样，其抗拉强度、伸长率以及



图14 取样位置示意图

Fig. 14 Sampling position diagram

硬度值都保持在很小的范围内波动，且均高于零件技术要求一定裕度，说明本铝合金变速箱箱体各部位力学性能满足铝合金变速箱箱体的技术要求。

6 结束语

(1) 根据铝合金变速箱箱体的结构特征, 设计了挤压铸造工艺方案。通过铝合金变速箱箱体挤压铸造过程的数值模拟和凝固过程中固相率分析, 预测了原始工艺方案中箱体可能产生缩松缩孔缺陷的分布情况, 通过分析其形成原因, 改进设计了合理的冷却系

统。

(2) 完成了铝合金变速箱箱体挤压铸造成形工艺验证, 并进行了X射线检测以及力学性能测试, 验证了工艺方案的有效性, 为此类壁厚差异较大零件的挤压铸造工艺设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 李欣珂, 于鑫泓, 于金瑞, 等. 铝合金转向壳铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1561-1564.
- [2] 王攀, 湛弘义, 刘名, 等. 如何实现“以铸代锻”——新型高强铝合金挤压铸造量产实例 [J]. 铸造, 2023, 72 (2): 193-195.
- [3] EDOSA O O, TEKWEME F K, GUPTA K. Squeeze casting for metal alloys and composites: an overview of influence of process parameters on mechanical properties and microstructure [J]. China Foundry, 2023, 20 (2): 148-158.
- [4] 王伟, 崔晓明, 石博, 等. 铝合金轮毂连接盘挤压铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 306-310.
- [5] 孙珏. 铝合金间接挤压铸造的应用实践 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009 (压铸专刊): 291-295.
- [6] 张鹏. 基于 A356.2 铝合金汽车螺簧座挤压铸造技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [7] 杜强, 王利明, 韩维新, 等. A356 铝合金显微疏松与二次枝晶臂距的计算机模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11 (S2): 226-229.

Squeezing Casting Process Design and Verification of Aluminum Alloy Gearbox Case

ZHAO Man, SU Xiao-ping, KANG Zheng-yang, YANG Chuang
(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract:

The finite element method was used to simulate the squeezing casting process of aluminum alloy gearbox case. According to the numerical simulation results of filling and solidification process, the causes of casting defects were determined, and the process plan was improved according to the simulated defects. The effectiveness of numerical simulation results was verified by the experimental data, which could provide meaningful guidance for the process designation and production of similar products.

Key words:

gearbox case; numerical simulation; squeezing casting; experimental validation
