DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2329

# 一种特种汽车铰接件的铸造工艺设计及优化

马 静<sup>1,2</sup>,范世玺<sup>1,2</sup>,崔新鹏<sup>1,2</sup>,李 峰<sup>1,2</sup>,石岳良<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司 北京 100094 ;2. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心 北京 100000)

摘 要:铰接件是特种汽车的关键零部件,在其铸造成形过程中,铰接件根部总会出现大的缩孔缺陷,严重影响铸件质量。本文基于 ProCAST 软件建立铰接件铸造成形仿真模型,分析铰接件充型、凝固过程,研究不同尺寸、形状的冒口对铰接件缩孔分布的影响规律。模拟结果表明,根据铸件结构设计的随形冒口对铰接件的缩孔消除影响最大,缩孔较初始方案减小了 94.8%,铸件根部的缩孔由 2.11 cm<sup>3</sup>减小到 0.11 cm<sup>3</sup>,缩孔近似全部消除。进行 X 射线探伤,探测到的缩 孔缺陷与模拟结果一致,可为后续实际生产提供指导。

关键词:ProCAST;精密铸造;钛合金;数值模拟;缩孔

中图分类号:TG292

文献标识码:A 文章组

文章编号:1000-8365(2023)05-0470-07

### Casting Process Design and Optimization of a Special Automobile Hinge

MA Jing<sup>1,2</sup>, FAN Shixi<sup>1,2</sup>, CUI Xinpeng<sup>1,2</sup>, LI Feng<sup>1,2</sup>, SHI Yueliang<sup>1,2</sup>

(1. Biamtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100000, China)

**Abstract**: Hinged parts are the key components of special vehicles. During the casting process, large shrinkage holes always appear at the root of the hinged parts, which seriously affects the quality of the castings. In this paper, based on ProCAST software, a simulation model of the casting forming of the hinged part was established, the filling and solidification process of the hinged part was analysed, and the influence of the risers with different sizes and shapes on the distribution of the shrinkage cavity of the hinged part was studied. The results show that the shape riser has the greatest influence on the extraction of shrinkage holes of hinged parts. The shrinkage holes are reduced by 94.8% compared with the initial process, and the shrinkage holes at the root of the casting are reduced from 2.11 cm<sup>3</sup> to 0.11 cm<sup>3</sup>. The detected hole defects are consistent with the simulation results, which can provide guidance for subsequent actual production. **Key words**: ProCAST; precision casting; titanium alloy; simulation; shrinkage cavity

钛合金广泛应用于航空航天、军工等领域,随着 钛合金铸造工艺,特别是熔模精密铸造的快速发 展,钛合金铸件的成品质量日益受到关注<sup>[1]</sup>。利用 ProCAST 模拟仿真技术对铸件进行充型凝固分析, 有利于减少产品设计过程中不断试错的时间,在铸 件冒口的设计过程中,通过冒口动态补缩过程,攻 克工艺设计难点,节省产品研制时间<sup>[2]</sup>。

某特种汽车车门的钛合金铰接件是目前服役 期间易产生断裂的典型零部件之一,结构比较简 单,但铸件存在孤立热节,容易产生缩孔。常用铰接 件用 ZTC4 钛合金采用熔模精密铸造工艺生产,加 工工艺流程为:蜡模-涂料-熔炼-浇注-机械加工-热等静压-扫描-热处理-机械加工-成品<sup>[3-5]</sup>。在 铰接件的生产过程中,发现多批次的铸件本体与冒 口的连接处存在大的压坑,而后续的补焊影响了铸 件性能,导致实际使用过程中出现断裂。造成钛合金 铸件缩孔等缺陷的原因是钛合金液过热度低,在真 空下浇注、冷却,其补缩能力不如铸钢,补缩距离短。 而钛合金冒口的形状和尺寸对补缩作用影响很大, 铰接件的根部缩孔问题很大程度因为冒口的形状和 尺寸的改变而改变。冒口是铸造成形过程中铸型内 用以储存金属液的空腔,在铸件形成时补给金属,有 防止缩孔、缩松、排气和集渣的作用<sup>[68]</sup>。针对此问题, 用 ProCAST 软件对不同尺寸和形状的冒口进行模 拟,分析热节及缩孔分布,得到能够消除缩孔的冒口 方案,为实际生产提供参考。

收稿日期: 2022-11-17

作者简介:马 静,1996年生,硕士,助理工程师.主要从事钛及钛合金等研究工作.电话:18800162793,Email:majingujs@163.com 引用格式:马静,范世玺,崔新鹏,等.一种特种汽车铰接件的铸造工艺设计及优化[J].铸造技术,2023,44(5):470-476.

MA J, FAN S X, CUI X P, et al. Casting process design and optimization of a special automobile hinge[J]. Foundry Technology, 2023, 44(5): 470-476.

## 1 模型的建立

#### 1.1 铰接件及其化学成分

铰接件的材质为 ZTC4,属于航空航天、军工领 域常用铸造钛合金,该材料属于中温合金,是应用 范围最广、用量最多的钛合金之一,本研究所用的 铰接件成分如表1所示。

表1 铰接件化学成分 w%						
Tab.1 Chemical composition of the hinge						

C O		O N H		Fe Al	Al	V	其他	Ti	
							杂质		
0.02	0.11	0.02	0.003 4	0.19	6.5	3.9	0.4	余量	

图 1 为铰接件的三维图,铸件为左右对称的异 形中小件,方形结构上有"H"型凸起,铸件的外形轮 廓尺寸为 136 mm×140 mm×146 mm,最小厚度为 7.7 mm,铸件的整体质量为 2.8 kg。



Fig.1 3D structure of the hinge

#### 1.2 有限元模型

根据铸件的不同形状,目前常用冒口的形状有 圆锥体形、梯形椭圆体形、带圆弧梯形<sup>(9)</sup>。熔模精密 钛合金铸件冒口的尺寸或直径应当不小于补缩热 节点厚度的3倍,冒口高度通常取其厚度或者直径 的1.5~2.0倍。在冒口设计过程中需考虑冒口与铸 件连结处的光滑整洁,以免在此处产生夹杂玷污甚 至产生局部化学反应<sup>[10]</sup>。设计铰接件的浇注系统之 前,首先分析铸件在无冒口情况下的缩孔分布情 况,由图2可知,铸件的方形结构"H"型凸起处存在



图 2 无浇注系统铰接件本体缩孔分布 Fig.2 Shrinkage distribution of the hinge body without the gating system

孤立热节,容易产生缩孔。

本研究根据铰接件的形状和铸件本体凝固时的 缩孔分布,设置 5 种不同方案的冒口进行模拟分析, 如图 3 所示,方案 1 在铸件的底部设置 2 个带斜度 的梯形浇口,垂直于根部缩孔的位置上端设置 2 个 圆冒口;方案 2 在方案 1 的基础上,将顶部的圆冒口 改为带斜度的梯形冒口,增加补缩的金属液;方案 3 则在方案 1、2 的基础上将铸件逆时针旋转 90°,垂 直于根部缩孔的位置上端设置一个带斜度的梯形冒 口;方案 4 在方案 3 的基础上,底板上端设置一个带 斜度的梯形冒口;方案 5 在方案 4 的基础上,将垂直 于根部缩孔上端的冒口改为随形冒口<sup>[11-13]</sup>。

本研究采用静止浇注的方法,采用不同形状和 尺寸冒口的浇注系统,5种方案所设计的组合浇注 系统如图 4 所示,为了模拟计算的速度和精度,对不 同的部件进行不同尺寸的网格划分,直浇道的网格尺 寸设置为 8 mm,横浇道的网格尺寸设置为 6 mm,冒 口和铸件的尺寸设置为 3 mm,设置有限元模型<sup>[14-16]</sup>。 且因为实际生产中型壳需要涂 11 层料浆,在模拟过 程中,将每层料浆的厚度近似为 1.3 mm,即设置型 壳的厚度为 14 mm,共划分出 1 554 465 个体网格, 最后的有限元模型如图 5 所示。

实际生产过程中,浇注前铸型的温度对钛合金 的流动性和填充性也有影响,在模拟过程中将浇注 的模壳的初始温度设置为 300 ℃,金属液的浇注温





图 4 铸件的组模方案 Fig.4 Molding scheme of the castings

度设置为 1 720 ℃,浇注时间设置为 5 s,其余相关 模拟参数如表 2~4 所示<sup>[17-20]</sup>。

2 模拟结果与分析

2.1 不同冒口下热节分析

由于多方案模拟分析铸件的结构、浇注过程相 对复杂,为保证流动平稳迅速,充型完整顺畅,需要 防止充型过程中冷隔的出现。随着金属液的流动,高 温钛液温度降低,金属液流入铸件型腔内,并逐渐流



图 5 铸件的网格划分 Fig.5 Meshing of the castings

表2 模拟相关参数						
Tab.2 Related parameters in the simulation						

环境温度	模壳初始	浇注温度	浇注时间	浇注炉辐	浇注速度
/°C	温度 /℃	/°C	/s	射系数	$/(kg \cdot s^{-1})$
30	300	1 720	5	0.91	5.76

```
表 3 金属液与模壳的换热系数
Tab.3 Heat transfer coefficient between molten metal and
mold shell
```

温度 /℃	0	25	1 600	1 650	2 000
换热系数 /(W・m-2・k-1)	30	30	100	600	600

#### 表 4 模壳的辐射系数 Tab.4 Emissivity of the mold shell

温度 /℃	30	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
辐射系数	0.9	0.71	0.62	0.56	0.51	0.48	0.47	0.46	0.45

进冒口;随着金属液移动距离变大,底部横浇道温度 逐渐降低。距离浇口近的位置温度高,反之温度低。 且按照铸件的结构分析,同一位置的铸件,壁薄位置 温度相较于壁厚处低。充型凝固影响后续铸件的质 量,钛合金铸件在凝固过程中容易出现缩孔、缩松、 气孔、夹杂等缺陷。因此,浇注系统方案设计需要满 足能使液态钛迅速平稳地从同一方向自下而上地填 充铸型型腔,不产生涡流、喷溅和断流,并使型腔中 的气体能顺畅地排出铸型外的要求。

铰接件充型过程的温度场如图 5 所示,当铸件 充型 3 s 时,金属液开始从横浇道流入铸型内,此时 金属液的流速为 0.5 m/s;当充型时间为 3.5 s 即充型 率为 70%时,金属液在铸型内的流速为 0.33 m/s;当 充型时间为 4 s 时,充型率为 80%,金属液的流速稳 定在 0.3 m/s,直到 5 s 充型完成,金属液在铸型中的 流速都是稳定在 0.3 m/s 左右,没有出现明显的紊 流、飞溅和浇不满的情况,即金属液充型平稳,浇 注系统方案设计合理。

从充型的各个时间段来看,液态金属钛从直浇 道开始流入横浇道,金属液由内浇道流入到型腔 中。随着充型时间的进行,金属液平稳的进行重力 浇铸,流动平稳迅速,铸件本体区域几乎没有深红色 的区域,避免了分散和孤立的热节。铸件充型及成 形效果良好,浇注系统设计及浇口数量满足要求。

从充型结束时凝固场的热节分布结果可以看 出,不同冒口下铸件内的热节基本都孤立在铸件根 部。充型初期,金属液重力浇铸;随着充型的进行, 整个铰接件型腔内基本都是液态金属钛;充型末 期,铸件部分区域出现少量凝固,随着凝固的进行, 铸件型腔内的金属液先凝固,接着是铸件上的冒口, 最后是内浇道和外侧的横浇道。但是,随着凝固的 进行,铸件型腔内部分厚壁后于冒口凝固,该部分的 固相率高于铸件其他位置,补缩通道被形成的枝晶 阻断。如图 7 所示,前 4 种冒口的设计方案中,冒口 都是先于热节凝固,补缩通道关闭,在后续的凝固过 程中,冒口对铸件没有补缩的作用,铸件只能依靠自 补缩。

选取铸件最后凝固位置的典型节点,跟踪其温 度随时间变化。如图 8 所示,充型初期,金属液进 入浇道内,节点的温度为 1 720 ℃。随着充型的进 行,金属液流过直浇道横浇道和分流流入节点和节 点自身降温达到平衡,温度维持在 1 650 ℃左右,在 158.4 s 时,节点温度降至 1 600 ℃,已完全凝固,



图 6 不同时间段的温度场分布:(a) 3 s,充型率 60%,(b) 3.5 s,充型率 70%,(c) 4 s,充型率 80%,(d) 4.5 s,充型率 90%,(e) 5 s,充 型率 98%

Fig.6 Distribution of filling field in different time periods: (a) 3 s, 60% filling rate, (b) 3.5 s, 70% filling rate, (c) 4 s, 80% filling rate, (d) 4.5 s, 90% filling rate, (e) 5 s, 98% filling rate



图 7 不同方案下热节分布 Fig.7 Distribution of thermal nodes under different schemes



Fig.8 Curve of typical node temperature of casting changing with time

158.4 s 后,节点完全凝固,金属流动通道关闭,没有 金属流入进节点,节点温度持续降低,随炉冷却至室 温。在158.4 s 时,铸件的各部位的温度都降至固相 线温度以下,说明铸件已经完全凝固,孤立热节的位 置金属液自由收缩后形成了空洞即缩孔。

因此尝试按照铸件结构即最大壁厚的形状随形 设计第5种冒口,根据凝固热节点可知,冒口颈是在 最大壁厚后凝固的,铸件完全可以依靠冒口进行补 缩,说明此种冒口设计比较合理。

## 2.2 不同冒口下缩孔分析

图 9 为不同冒口下孔隙率设为 30 的缩孔模拟 分布的情况。从图中可以看出,前 2 种方案冒口的缩 孔都是细长型集中在垂直于冒口补缩的厚区加强筋 里,方案一的大缩孔为 2.86 cm<sup>3</sup>,方案二的细长型大 缩孔的大小为 2.95 cm<sup>3</sup>,这种大缩孔对铸件的强度、 塑韧性影响很大,必须避免。方案三~五为了避免 如方案一、二所示的细长型的缩孔,将铸件逆时针旋 转 90°,这种组模方式可以有效将细长型的缩孔避 免,但是方案三、四的铸件冒口的根部存在 2.62 cm<sup>3</sup> 大小的缩孔,其余部位的缩孔基本有效消除。方案五 根据铸件的形状随形设计顶部冒口,根据后处理结 果可以看出,铸件中的缩孔几乎全部消除,铸件的整 体缺陷近乎没有,因铸件后续要进行热等静压处理, 方案五中存在的缩孔按照经验可完全去除,满足铰 接件的生产要求。

# 3 实验验证

为确保实验结果和模拟的结果具有可比性,铸 件采用金属压型直接压制蜡模。为了防止蜡模的收



图 9 不同冒口下的缩孔分布 Fig.9 Shrinkage cavity distribution under different risers

缩, 蜡模放置整体成型冷蜡, 收缩率按照 1.5%设计, 酸洗量单边 0.6 mm, 根据方案五设计出的随形冒口 进行组模, 其组模的情况如图 10 所示, 1 720 ℃下在 100 kg 真空自耗凝壳炉熔模静止浇注。



图 10 实际组模方案 Fig.10 Actual modelling scheme

铸件的力学性能通过室温拉伸试验获得,实验 设备采用岛津 AGS-X3000KNX 万能材料试验机, 取两根随铸件一起进行热等静压处理(即在 120 MPa 的氩气压力下在 910 ℃下保温 2 h 随炉冷却到 300 ℃ 以下空冷)的同批附铸 R5 试样按照 GB/T 228.1 进行。

采用成型冷蜡+金属模具+静止浇注的方法,有 效的保证了铸件的轮廓尺寸,对铸件进行了尺寸检 验包括采用关节臂扫描和铸件数模进行比对,对铸 件进行检测,按照最佳拟合结果偏差±0.5 mm 的要 求的尺寸初检和铸件 100%尺寸检验由专业检验员 按铸件图及 PCP 尺寸控制表进行铸件尺寸终检,实 现了外形尺寸在 150 mm 的结构轮廓尺寸可以控制 在±0.3 mm 以内。铸件表面基本无可见的流痕、冷隔 和微裂纹等缺陷,热等静压后铸件的根部无明显压 坑如图 11 所示,铸件内部质量用 X 射线进行检测, 按照 MFS0705 规定进行,并按照 ASTM E 192 标准 射线参考底片进行评定,如表 5 所示,根据铸件的壁 厚对内部缺陷进行评定,较接件铸件使用柯达 125X 射线底片,荧光检查方法使用 类 A 法,荧光液 3级灵 敏度。X 光检测结果和模拟的结果吻合,如图 12 所 示,铸件 X 光检测结果显示缩孔在冒口上,整体铸 件几乎没有缩孔,经检测,铰接件铸件内部质量和荧 光表面质量较好,铸件荧光一次合格率 70%以上,X 光检测一次合格率 75%以上,缺陷数量较少,经过



图 11 实际生产铸件 Fig.11 Actual casting produced

表5 X射线检验铸件内部缺陷允许级别						
Tab.5 Allowable levels of internal defects in X-ray inspection						

						• •			
铸件壁厚 /mm	标准板厚 /mm	单个气孔	串状气孔	分气孔	缩孔 /mm	分散缩孔	集中疏松	低密度夹杂	高密度夹杂
≤9.53	6.35	3	5	4	1	5	3	5	4
>9.53~15.88	12.7	4	5	5	1.2	6	7	4	4
>15.88~25.4	19.05	6	4	5	1	6	7	5	4



图 12 X 射线扫描结果 Fig.12 X-ray scan results

少量的修补,铸件最终检测符合技术条件要求。且 经热等静压退火处理后铸件的室温拉伸力学性能 检测数据如表6所示,符合技术协议要求,满足投 产的要求。

表	6 铸件2	力学性能检注	测数据	
Tab.6 Med	chanical	properties	of the	casting

	F P		8
抗拉强度/MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%
910	840	8.0	17

# 4 结论

(1)利用 ProCAST 技术对铸件进行充型凝固 分析,有利于减少产品设计过程中不断试错的时间,在铸件冒口的设计过程中,通过冒口动态补缩 过程,攻克工艺设计难点,节省产品研制时间。

(2)通过多方案模拟分析,采用不同的浇冒口方 案,解决了铸件根部厚大热节处集中性缩孔问题。

(3)采用随形冒口结构设计缩孔较之前减小了 94.8%,铸件根部的缩孔由 2.11 cm<sup>3</sup>减小到 0.11 cm<sup>3</sup>, 缩孔近似全部提出,进行 X 射线探伤,探测到的缩 孔缺陷与模拟结果一致,铸件荧光一次合格率 70% 以上,X 光检测一次合格率 75%以上,缺陷数量较 少,经过少量的修补,铸件最终检测符合技术条件 要求。

#### 参考文献:

- [1] 郭鲤,何伟霞,周鹏,等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺,2020,49(22):22-28.
  GUO L, HE W X, ZHOU P, et al. Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(22): 22-28.
- [2] 王顺桀,刘前结,李晨阳,等. 铰接轮式装载机的横向动力学建 模分析[J]. 机电工程,2021,38(12):1529-1537.
  WANG S J, LIU Q J, LI C Y, et al. Lateral dynamic modeling of articulated wheeled loader[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(12): 1529-1537.
- [3] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造, 2012, 61(4): 347-356.

LV Z G. History and development trend of investment casting in-

dustry in China[J]. Foundry, 2012, 61(4): 347-356.

- [4] DAI H L, ZHANG C L, ZHAO Q, et al. The study of titanium alloy precision casting turbine blades based on procast[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 677: 022090.
- [5] KUMAR R, MADHU S, ARAVINDH K, et al. Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using procast software for defect minimization[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22(3): 799-805.
- [6] 杨小建,张怀章,杨国超,等.喷嘴本体的熔模铸造工艺及模拟 计算[J]. 热加工工艺,2021,50(7):66-68.
  YANG X J, ZHANG H Z, YANG G C, et al. Process and simulation calculation of nozzle body investment casting[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 66-68.
- [7] DUBEY S, SWAIN S R. Numerical investigation on solidification in casting using ProCAST [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 561: 012049.
- [8] SKRIPALENKO M M, BAZHENOV V E, ROMANTSEV B A, et al. Computer modeling of chain processes in the manufacture of metallurgical products[J]. Metallurgist, 2014, 58: 86-90.
- [9] 李峰,崔新鹏,王丽娟,等. 两种铸造模拟软件在钛合金铸件研制中的应用对比[J]. 精密成形工程,2018,10(3):163-167.
  LI F, CUI X P, WANG L J, et al. Comparison of two kinds of casting simulation software on titanium alloy castings preparing [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(3):163-167.
- [10] LU X Z, WAN X W, FAN X M, et al. The process optimization of cast copper stave based on ProCAST[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1088: 744-749.
- [11] KOUKOUI D M, SHWARTS O E, SHWATS E G, et al. About experience in casting processes simulation [J]. Lit' ë I Metallurgiâ, 2000(4): 57-59.
- [12] HUANG W, SHEN H M, HU M J, et al. A pre-processing method of ProCAST based on Pro/E and HyperMesh[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 597: 203-207.
- [13] RAO L, ZHU L B, HU Q Y, et al. Finite element mesh model analysis and model information transform method in casting simulation process[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 217-219: 1618-1621.
- [14] 李盼,王俊,荣坚. 基于 ProCAST 的铸钢件壳体铸造工艺研究
  [J]. 铸造技术,2009, 30(12): 1583-1586.
  LI P, WANG J, RONG J. Cast technology of cast-steel shell based on Procast[J]. Foundry Technology, 2009, 30(12): 1583-1586.
- [15] 唐琦. 铸钢浇铸成型过程的数值模拟及含缺陷的铸钢节点力学性能分析[D]. 南京:东南大学,2017.
  TANG Q. numerical simulation of casting process of cast steel and mechanical analysis of cast steel nodes with initial defects [D].
  Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] 王春欢,胡红军,罗静.基于 Procast 软件的熔模铸造计算机模 拟[J].铸造技术,2007(10): 1360-1362.
  WANG C H, HU H J, LUO J. Computer simulation of investment casting based on Procast software[J]. Foundry Technology, 2007 (10): 1360-1362.
- [17] 刘晋.铸造模拟关键热参数的反算优化及应用研究[D].成都:西 华大学,2020.

LIU J. Research on inverse optimization and application of key thermal parameters in casting simulation [D]. Chengdu: Xihua Uniersity,2020.

- [18] 董文正,邓志儒,林启权,等. 基于 ProCAST 的熔胶座移动板浇 注系统模拟优化[J]. 热加工工艺,2016,45(3): 74-76, 79.
  DONG W Z, DENG Z R, LIN Q Q, et, al. Simulation and optimization of pouring system for melt mobile board based on procast
  [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(3): 74-76, 79.
- [19] 关晓强,杨军,严进,等.石膏浆液流出泵泵体的铸造工艺优化

[J]. 铸造,2013,62(7):661-665.

GUAN X Q, YANG J, YAN J, et al. Optimization of casting process of gypsum slurry outflow pump body[J]. Foundry, 2013, 62 (7): 661-665.

[20] 殷亚军,徐巧志,周建新,等.考虑铸型强度的球墨铸铁件冒口
 设计方法[J].铸造工程,2020,44(5):33-39.
 YING Y J, XU Q Z, ZHOU J X, et al. Design method of risers for

ductile iron castings based on mold strength[J]. Foundry Engineering, 2020, 44(5): 33-39.