

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.4067

大尺寸支承板钛合金铸件铸造工艺研究

王超¹, 冯秋元^{1,2}, 王磊华¹, 赵芳利¹, 张永强^{1,2}, 岳磊¹

(1. 宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014; 2. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 某大型钛合金铸件, 工件为大尺寸支承板。板上有大量凸台, 板下有许多纵横交错的筋板, 属于典型的超大型薄壁复杂平板框架结构件。因尺寸巨大, 无法通过常规的热等静压等手段保证铸件内部质量, 只能通过对其铸造工艺进行分析和优化来保证。对该大尺寸钛合金支承板铸件结构进行分析后, 设计了不同的铸造工艺。采用华铸 CAE 铸造工艺分析软件, 对该结构件在不同浇注工艺下进行石墨型铸造模拟, 对其成型过程进行工艺分析和质量预测。铸造模拟结果表明, 不同的浇注工艺显著影响铸件内部的缺陷大小及位置分布。根据 CAE 模拟结果, 对铸件的铸造工艺进行了优化。采用优化的铸造工艺浇注铸件, 并对铸件进行 X 射线检测。结果表明, 铸件成型完整、无明显表面缺陷, X 射线检测结果显示其内部缺陷分布与铸造模拟结果基本吻合。

关键词: 钛合金; 铸件; 石墨型铸造; 铸造模拟

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)10-0959-08

Research on the Casting Process of Large-scale Support Plate Titanium Alloy Casting

WANG Chao¹, FENG Qiuyuan^{1,2}, WANG Leihua¹, ZHAO Fangli¹,
ZHANG Yongqiang^{1,2}, YUE Lei¹

(1. Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China; 2. Baoti Group Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: A large-scale titanium alloy supporting plate, with many bosses on it and many ribbed panels of length and breadth, is a large thin-wall complex plate frame structure. Owing to its large scale, the interior quality cannot be assured by conventional means such as hot isostatic pressing, which can be guaranteed only by analysing and optimizing the casting process. After the structure was analysed, different casting processes were designed. Graphite mould casting was simulated with different pouring processes on the basis of Huazhu CAE software. The forming process of the casting was then analysed and predicted. The simulation results indicate that the distribution of defects in the casting is significantly affected by different pouring processes. On the basis of the CAE simulation results, the casting was poured via the optimized casting process and then inspected via X-ray. The results show that the casting is completely formed without obvious surface defects. Moreover, the X-ray inspection results reveal that the distribution of interior defects in the casting is basically consistent with the casting simulation results.

Key words: titanium alloy; casting; graphite mould casting; casting simulation

钛合金比强度高、密度小、耐腐蚀性优异, 已在化工、航空、航天、舰船、兵器等领域获得广泛应用。与锻造相比, 采用铸造技术不仅可以制造结构复杂、近净成形的铸件, 而且金属利用率高、生产周期短^[1], 其应用比例逐年增加, 2022 年我国钛铸件产量达 1 000 t^[2]。随着航空、航天领域等对装备载荷、强

度和刚性等的要求越来越高^[3], 钛铸件表现出大型、薄壁、复杂、整体结构的发展趋势^[4]。与传统的“多件组合”结构件相比, 这类铸件整体结构性好、可靠性高、重量轻、加工成本低, 其应用前景越来越广泛^[5]。然而, 由于该类结构件外廓尺寸大、壁薄、结构复杂、尺寸精度要求高, 其制造工艺难度很大^[6-10]。

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 王超, 1988 年生, 硕士, 工程师。主要从事钛及钛合金铸造工艺研究方面的工作。Email: wangchao1988@baoti.com

通讯作者: 冯秋元, 1974 年生, 博士, 正高级工程师。主要从事新型钛合金材料研发和金属材料表面改性及强化研究方面的工作。

Email: fengqiuyuan2003@163.com

引用格式: 王超, 冯秋元, 王磊华, 赵芳利, 张永强, 岳磊. 大尺寸支承板钛合金铸件铸造工艺研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 959-966.

WANG C, FENG Q Y, WANG L H, ZHAO F L, ZHANG Y Q, YUE L. Research on the casting process of large-scale support plate titanium alloy casting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 959-966.

近年来,我国研制的钛铸件尺寸不断增大。李义军等^[4]采用熔模铸造技术研制了轮廓尺寸为1 450 mm×835 mm×772.2 mm、单件质量为121.8 kg的大型薄壁复杂框架式结构钛合金铸件。王华侨等^[9]采用机加石墨型铸造出尺寸为1 008 mm×730 mm×1 295 mm的大型薄壁钛合金菱形骨架铸件。李重阳等^[9]采用机加石墨型铸造工艺制备出最大轮廓尺寸为810 mm×720 mm×605 mm、质量约340 kg的大尺寸钛合金阀体。王兰芳等^[11]采用石墨机加型铸造了轮廓尺寸为1 721 mm×805 mm×380 mm,单件质量为300 kg的大型叶片钛铸件。大型薄壁复杂钛合金铸件铸造目前仍存在尺寸精度低、铸造缺陷多、批次稳定性不够等方面的技术瓶颈^[3]。

通常,钛合金铸件成型主要有两种工艺:机加石墨型铸造工艺和熔模精密铸造工艺^[9]。熔模精密铸造生产的铸件表面质量优于石墨型铸造,但制造成本高、生产周期长,主要适用于中小型铸件^[3]。针对大尺寸钛合金铸件,若采用熔模精密铸造,制壳难度大,大型薄壁铸件自身刚度不足会导致产品产生较大变形。因此,熔模精密铸造不适于生产小批量、大型复杂结构的铸件^[9]。机加石墨型受热尺寸变化小,不易发生弯曲、变形,铸件尺寸精度高、质量稳定,且其分型面选择灵活、制备周期短、易于切削加工等特点,被广泛应用于大型复杂钛合金的铸造成型^[5]。

对于大型薄壁复杂整体钛合金铸件,受铸造工艺等多种因素的影响,在流动场、温度场和应力场的耦合作用下,易出现冷隔、浇不足、缩孔、缩松、裂纹等缺陷^[12],影响铸件品质,因此,合理的浇注系统设计是铸件内外部质量和性能满足使用要求的关键。近年来,随着计算机模拟仿真技术的不断发展和日益成熟,铸造模拟仿真技术已被应用于铸造工艺设计中^[13-14],用于优化浇注系统、铸造工艺参数^[15]和充型过程^[16],预测铸件的缩松和缩孔缺陷,改善其品质。铸件内部质量通过X射线进行检测^[17]。

本单位承接研制的ZTC4钛合金铸件,零件轮廓尺寸为2 810 mm×2 110 mm×163 mm,最小壁厚5 mm,毛坯单重约1 000 kg。与前文提及的钛铸件相比,尺寸更大、质量更重。其结构为大平板上含有多个安装凸台,大平板以下设计了很多纵横交错的筋板,属于典型的超大型薄壁复杂平板框架结构件,如图1。

针对该超大型薄壁复杂平板框架结构铸件,本文对其研制难点进行分析,设计了不同的浇注系统,采用华铸CAE软件对不同浇注系统对缩孔、缩

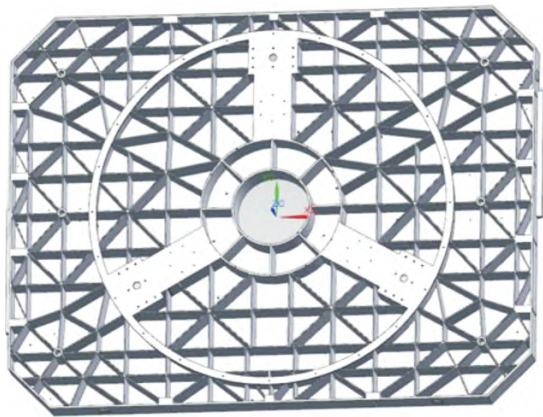


图1 ZTC4钛合金铸件结构示意图

Fig.1 Structure schematic of ZTC4 titanium alloy casting

松缺陷大小及位置分布的影响进行了模拟分析,根据模拟结果优选出该超大型薄壁复杂平板框架结构铸件的最佳铸造工艺,并采用石墨型按照优选的铸造工艺进行了生产验证,得到内部质量满足标准要求的ZTC4钛合金铸件,可为同类超大尺寸复杂薄壁平板结构铸件的制造提供参考和借鉴。

1 研制难点分析

通过对铸件结构分析,认为其研制难点有如下几点:①成型难度高,该铸件长2 810 mm、宽2 110 mm,长度及宽度均在2 000 mm以上,属于大尺寸铸件。大平板及四周外围壁厚仅10 mm,筋板厚只有5 mm,成型难度大。再加上筋板纵横交叉、加强筋结构复杂,更增加了其成型难度(尤其是筋板轮廓和充型的完整性)。②该铸件尺寸精度要求高,需符合GB/T 6414-1999 CT8级。③该大平板表面及内部质量要求高,整体表面需着色渗透检验、大平板和四周安装面需进行X射线检测,无损检验显示缺陷不能超过标准要求。此外,该平板类铸件容易在其上表面出现气孔和缩松等铸造缺陷。对于常规钛合金铸件,通常采用热等静压处理消除其内部的孔洞类缺陷,然而该铸件由于外形尺寸太大,无法进行热等静压处理。综上所述,该大尺寸钛合金支承板铸件铸造难度极大。

2 铸造工艺设计

钛合金因其化学活性较高,在高温下与造型材料发生较为剧烈的化学反应,会对其质量产生影响^[18]。因此,钛合金铸造常采用机加工石墨型、捣实石墨型、金属型和熔模精密型铸造。与砂型、金属型铸造相比,机加工石墨型铸造铸型制造成本低、生产周期短,铸型的激冷能力强,铸件晶粒易细化。与熔模精密型铸造相比,机加工石墨型表面光滑、密度小、质

量轻、硬度低、易于切削加工^[9],石墨型壳具有强度高、热化学稳定性好、耐火度高的优点^[8],其散热效果好、冷却速度快、凝固速度快^[20],铸型和熔融金属一般不发生化学反应,铸件表面质量好。此外,石墨型受热尺寸变化小,不易发生弯曲、变形,铸件尺寸精度高^[9]。鉴于该铸件轮廓尺寸巨大,从尺寸精度、模型强度和制造成本等方面综合考虑,选用机加工石墨型铸造。

2.1 浇注方案选择

2.1.1 大平面垂直放置

按照铸件浇注位置选择的一般原则,大平面垂直放置的浇注方案(立式浇注)有利于大平面内部气孔缺陷及铸造变形的减少,但不利于铸造成形,也不利于安装凸台及筋板交叉处圆柱等厚大部位的补缩(金属液充型需要很大的静压头和浇注系统)。如果设置冒口,则需要增设大的补缩通道。由于浇口及补缩通道数量多,其加工去除除了增加铸造成本外,还会增加铸件的变形倾向。安装凸台和筋板均为铸件的关键部位,若补缩不足会形成缩孔,铸件内部质量无法保证,后期补焊也会产生变形。此外,立式浇注方案非常不利于内部型芯的固定和铸型的装卡。

2.1.2 大平面水平向下放置

如果采用大平板在下、网格筋在上的浇注方案(可设计底注式浇注系统),其优点是充型平稳,凸台安装面及大平板底面缺陷少;缺点是大平板及安装凸台的补缩不利于放置冒口,内部质量不易保证,铸件变形大,同时也存在筋板浇不足的风险。

2.1.3 大平面水平向上放置

如果采用大平板在上、网格筋在下的浇注方案,其优点是充型快,容易充满,有利于安装凸台及网格筋交叉处圆柱等厚大部位放置冒口进行补缩,可减少铸件变形,同时也有利于型芯及铸型整体装卡固定;缺点是铸件上平面的气孔缺陷倾向多。

综合考虑,铸件大平面水平向上的浇注方案比较合理,且成型风险较小,其气孔缺陷可通过排气孔及倾斜浇注等工艺措施来减少或消除。该浇注方案为首选方案。

2.2 浇注系统及冒口设计

铸件采用真空自耗凝壳炉熔炼。由于真空自耗凝壳炉熔炼时过热度低,采用的石墨型壳导热性好,凝固速度非常快,铸件容易出现浇不足、气孔、冷隔等缺陷。对于大型薄壁平板框架结构的铸件来说,更易产生以上缺陷。为此,设计采用顶注开放式浇注系统,浇口位置选择设计在大平板端面,多个

内浇口从筋的交汇处引入,保证金属液迅速、平稳、连续填充铸型,不产生涡流、喷溅和断流,同时使腔中的气体顺畅地排出,防止产生铸造缺陷。在米字筋的中心热节部位及安装凸台上设计冒口,使铸件充型良好,减少内部缩孔和气孔缺陷。在铸件上平面开设多个排气孔,进一步减少气孔的产生。

2.3 铸造工艺参数的确定

铸件尺寸越大,其周边与中心部位的冷却速度相差越大,铸件越易产生变形。对大尺寸基板铸件而言,易产生平板凹心的变形。设计铸造工艺时,通过在平板处设计反变形、在靠近外沿处设计井字筋的工艺,可减少铸件在冷却凝固时的变形。

根据平板的结构,除需要精确控制铸件大平面和四周外围筋板壁厚以及大平面平整度和外围尺寸,还需精确控制筋板交点处圆柱的定位中心距,以满足打孔要求。因此,铸件的收缩率和反变形量的确定非常关键。鉴于该大尺寸平板上筋板数量多,收缩时会产生结构性的阻碍,铸件的收缩率取 0.5%~0.8%。

2.4 铸造工艺优化

顶注式浇注系统各部分截面积比为直浇道: Σ 横浇道: Σ 内浇道=1:2:2,金属液由直浇道分流到 6 根横浇道后,经 6 个内浇口进入型腔,内浇口位于米字形筋板交汇处。在每个内浇口处再设置 2 根长条形冒口,其作用一是对金属液进行分流,二是对大平面进行补缩,三是起防变形的作用。同时,在安装凸台处设置长条冒口对厚大部位进行补缩。顶注式浇注系统示意图如图 2 所示。

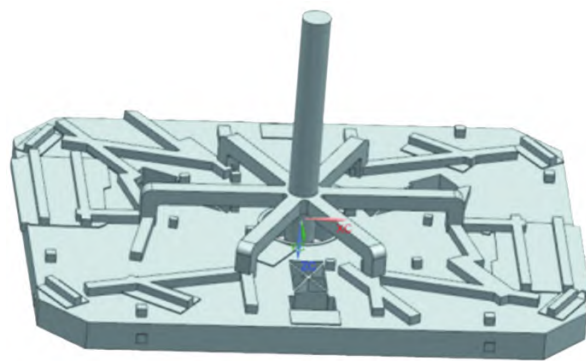


图 2 顶注式浇注系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the top pouring system

铸造工艺方案确定后,采用华铸 CAE 数值模拟软件模拟铸件浇注时的流动场和充型过程的温度场变化,预测与充型和凝固相关的铸造缺陷,进而优化铸造工艺,减少因不确定性因素引起的工艺失误,缩短研制周期,降低研制费用。基于上述铸造工艺设计,将数值模拟初始条件设置如表 1 所示。

铸件充型过程温度场变化如图 3 所示。由图 3a

表 1 数值模拟初始条件
Tab.1 Initial conditions of the numerical simulation

Initial temperature of liquid metal /℃	Initial temperature of casting mould /℃	Filling time/s	Heat transfer coefficient of casting mould/(cal·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	Heat transfer coefficient of interface/(cal·cm ⁻² ·s ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
1 750	100	10	0.025	0.04

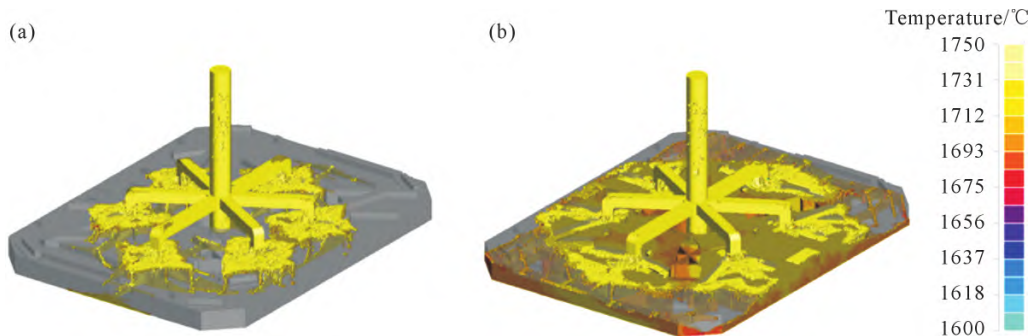


图 3 顶注式浇注系统充型过程温度场变化:(a) 2 s;(b) 5 s

Fig.3 Changes in the temperature field during the filling process of the top pouring system: (a) 2 s; (b) 5 s

可以看出,充型开始后约 2 s,金属液由 6 个内浇口进入型腔并从筋板交叉处开始充填筋板,因筋板间隙狭窄,液流转至填充大平面并向外沿充填型腔,见图 3b。由于铸件为大平板矩形结构,四角处流程较长,最晚填充,该处(四角处)的充型温度最低。由图中色标可知该处温度下降约 75℃,属于正常降温,因而筋板的成型风险较小。与大平板铸件的筋板数量相比,该浇注系统的浇口相对较少,金属液流充型速度大,液流前端在交汇后易形成紊流,导致形成冷隔、流痕等缺陷的风险加大。

对铸件充型后的凝固过程进行模拟分析,预测其可能出现的缺陷位置,结果如图 4 所示。图 4 中紫色区域为铸件凝固后可能出现的缩松缺陷,褐色区域为可能出现的缩孔缺陷。由图 4 可以看出由于设计时仅在安装凸台处设置了长条冒口,而部分较厚大的筋板位置没有安放冒口进行补缩,易出现缩孔缺陷;同时,筋板交汇处的热节由于没有得到有效补缩,极易出现缩松缺陷。

根据模拟结果,对浇注系统进行了调整:增加横浇道和内浇口的数量,使充型更加平稳。增加的内浇口位置选择设置在筋板各个节点处,使铸件充

型完整,同时可对该处热节进行补缩。将浇注系统各部分截面积比增加为直浇道:Σ横浇道:Σ内浇道=1:2:3,并增加内外两圈浇冒口,可起到补缩及防变形的作用。调整设计后的浇注系统如图 5 所示,该浇注系统为典型的雨淋式浇注系统。

对雨淋式浇注系统充型过程温度场变化进行模拟,结果见图 6。由图 6 可以看出,金属液由直浇道分流至 8 根横浇道后再行分流进入鱼骨形横浇道,在每个筋板交汇处开设内浇口,液流由内浇口进入型腔充填筋板后,再由筋板和大平面共同向外充填型腔,筋板充填完成后与大平面液流交汇完成整个铸件的充填。

该浇注系统浇口多,充型平稳,形成冷隔留痕等缺陷的风险较小。由于内浇口多,筋板较大平面充型快,液流经由中心径向漫延充满型腔,四角位置的放射形浇道没有液流通过;待整个平面充满后,放射形浇道才能填充金属液。由于外围浇道只在平直或分支较少的横浇道有液流通过,其余浇道没有起到引流作用,仅对大平面起补缩作用。

图 7 为雨淋式浇注系统充型凝固后的缩孔缩松模拟预测。由图 7 可以看出,由于在安装凸台处设置

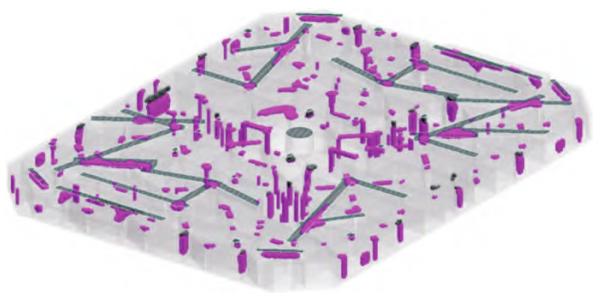


图 4 顶注式浇注系统缩松缩孔缺陷模拟预测

Fig.4 Simulation of shrinkage and porosity defects in the top pouring system

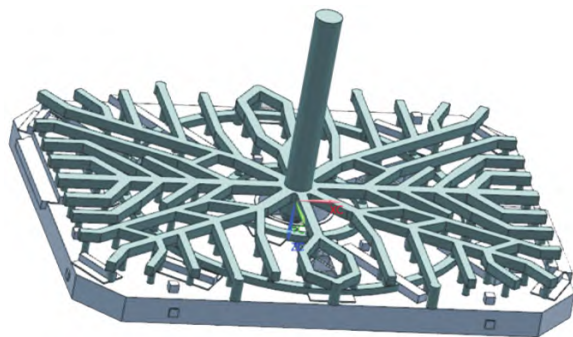


图 5 雨淋式浇注系统

Fig.5 Shower gating system

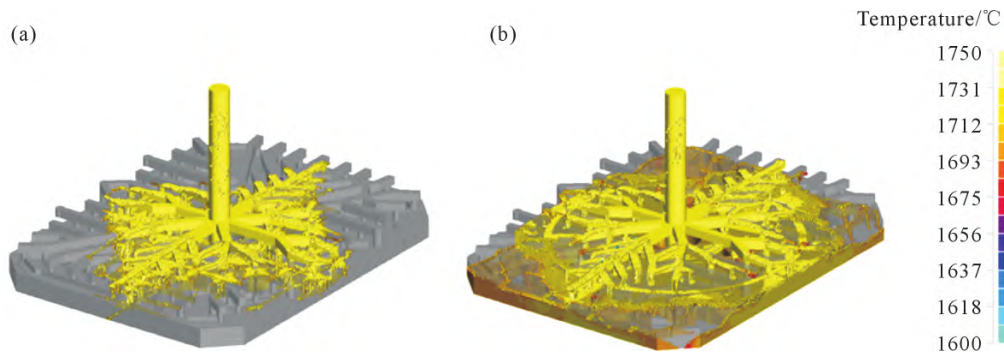


图6 雨淋式浇注系统充型过程温度场变化:(a) 2 s; (b) 5 s

Fig.6 Changes in the temperature field during the filling process of the shower gating system: (a) 2 s; (b) 5 s

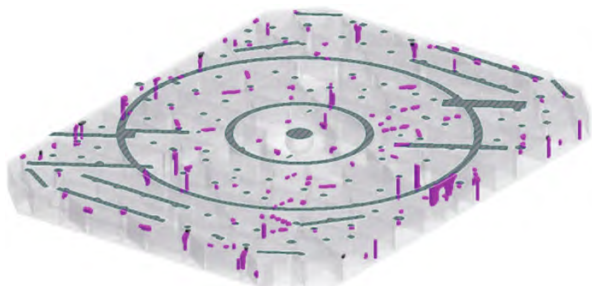


图7 雨淋式浇注系统缩孔缩松缺陷模拟预测

Fig.7 Simulation of shrinkage and porosity defects in a shower gating system

了冒口,且每个筋板交汇处开设内浇口,热节得到有效补缩,因此没有缩孔倾向。缩松缺陷数量较顶注式方案有了明显改善,但数量仍然较多。

根据雨淋式浇注系统缩孔缩松缺陷数值模拟预测的结果,调整浇道分布,去除外围横浇道,将原节点处内浇口保留,作为筋板节点冒口和充型过程的排气通道,保留内外两圈环形浇冒口,在大平面外沿第二排筋板处设置井字型防变形筋,在对大平面进行补缩的同时起防变形作用。优化后的雨淋式浇注系统如图8所示。

对优化后的雨淋式浇注系统进行充型过程温度场模拟,如图9所示,结果显示金属液由直浇道分流至8根横浇道后再行分流进入放射形横浇道。由于上层横浇道末端为环形,所以各股液流流程基本一致,筋板由自下而上、自内而外充填。内圈筋板

(a)

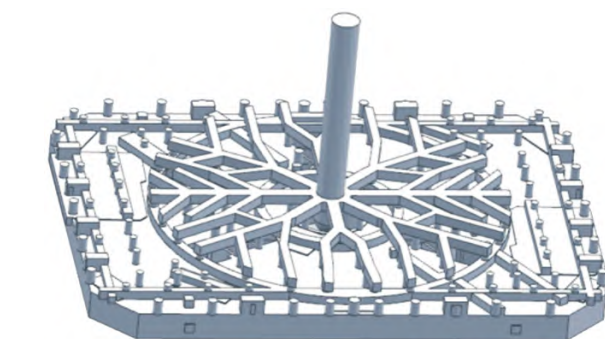
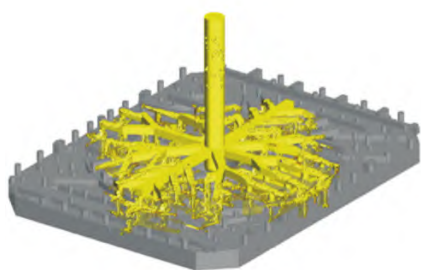


图8 优化后的雨淋式浇注系统

Fig.8 Shower gating system after optimization

填充完成后金属液开始充填大平面,并向前漫延。环形浇冒口外侧筋板由大平板液流和已充满筋板液流共同向外充填,整个充型与雨淋式浇注系统基本一致,充型过程比较平稳,排气效果良好,且在第5 s左右筋板部位基本充填完毕,液流前端温度下降约60℃,成形风险进一步减小。

图10为优化后雨淋式浇注系统的缩孔缩松模拟预测。由图10可以看出,由于增设的冒口对原方案缺陷位置的补缩效果明显,井字型加强筋对大平面的缺陷预防也有明显作用,铸件四周缩松缺陷(图中紫色区域)产生的倾向较小,仅环形浇冒口内部区域仍存在少量缩松。

考虑到铸件倾斜浇注时,金属液流由中间直浇道向横浇道分流时受倾斜角度的影响会使下方横浇

(b)

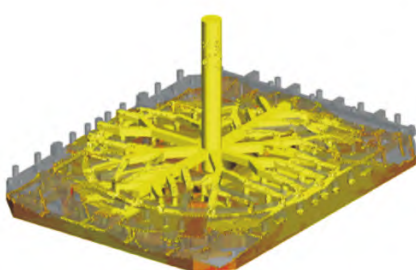


图9 优化后雨淋式浇注系统充型过程温度场变化:(a) 2 s; (b) 5 s

Fig.9 Changes in the temperature field during the filling process of the shower gating system after optimization: (a) 2 s; (b) 5 s

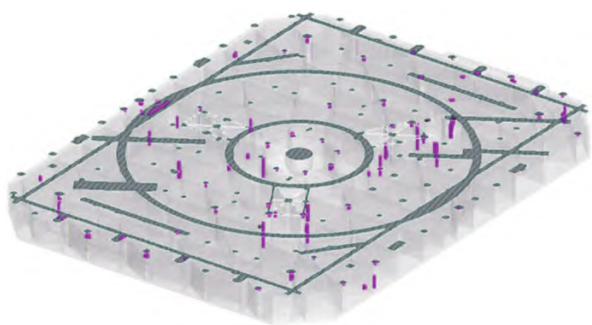


图 10 优化后的雨淋式浇注系统缩孔缩松缺陷模拟预测
Fig.10 Simulation of shrinkage and porosity defects in the shower gating system after optimization

道液流多于上方,使整个充型过程液面自下而上流动直至充满整个型腔,对减少气孔缺陷有积极作用。因此,基于优化后的雨淋式浇注系统,采用倾斜浇注工艺对浇注方案进行进一步优化。

将优化后的雨淋式浇注系统以底部长边为轴倾斜 10° 后,对其充型过程温度场变化进行模拟分析,如图 11 所示。从模拟结果可以看出,金属液在经横浇道分流时下方金属先行充满,而后液面继续上升逐渐充满整个型腔,充型过程较水平放置时更为平稳。

图 12 为优化后的雨淋式浇注系统倾斜 10° 充型凝固后的缩孔缩松缺陷模拟预测。由图 12 可以

看出,采用倾斜浇注可能出现缩松的区域明显增多,且其位置多集中于筋板交叉处,这与工艺设计预期不符。分析原因认为,如果浇注简单平板结构铸件,倾斜浇注确实具有充型和补缩方面的优势。但对于大平板且具有复杂筋板结构的铸件,倾斜浇注在内部缺陷控制方面更偏向于减少大平板部分的缺陷。由于在浇注时倾斜了一定的角度,导致重力方向与热节补缩方向也形成了一个角度,使冒口对筋板部分的补缩效果减弱,需要采用更大的浇注系统和补缩系统才有可能达到与基板水平放置时相近的补缩效果。这不但给后续去除这些系统增加了加工量,而且可能对铸件本身造成更大的应力,导致铸件变形风险加大。

综上所述,基于大尺寸平板结构的特殊性,在权衡内部缺陷控制及铸件后续加工等方面综合考虑,选取平板水平放置的优化后雨淋式浇注系统为铸件的最佳铸造工艺。

3 铸件研制

3.1 模型制作

根据该大尺寸平板铸件的结构特点,采用金属型与石墨型相结合的铸型制作方案。下型采用强度较高的钢底板,以防止铸型本身的变形及大量金属

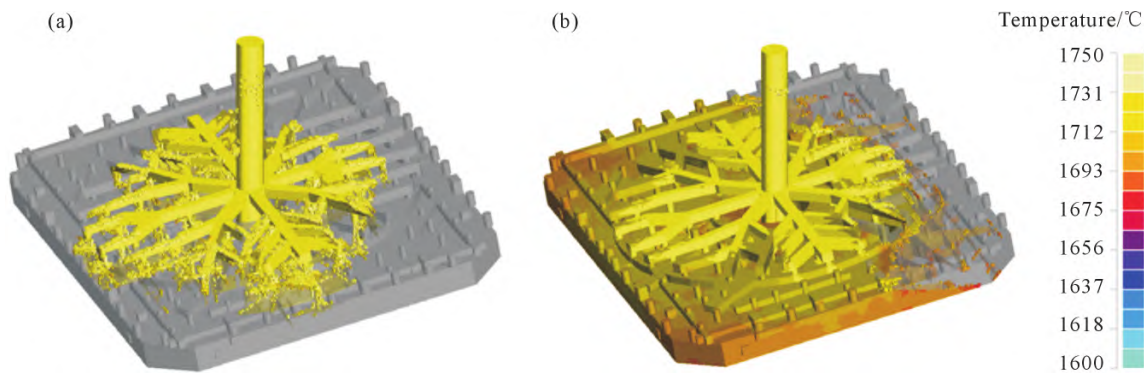


图 11 优化后的雨淋式浇注系统倾斜 10° 的充型过程温度场变化:(a) 2 s;(b) 5 s
Fig.11 Changes in the temperature field during the filling process of the shower gating system after optimization with a 10° incline:
(a) 2 s; (b) 5 s

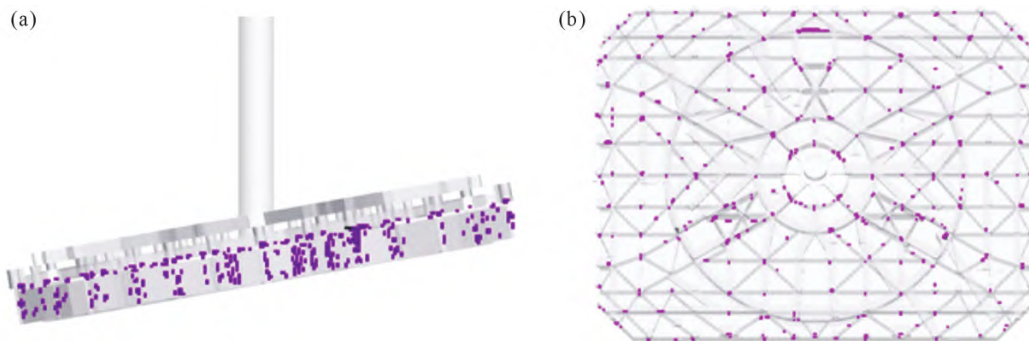


图 12 优化后的雨淋式浇注系统倾斜 10° 的缩孔缺陷模拟预测
Fig.12 Simulation of shrinkage and porosity defects in the shower gating system after optimization with a 10° incline

液的冲击;中型及上型采用热化学稳定性好、加工制作方便的机加石墨型。铸型采用数控机床加工,采用三坐标检测仪及三维扫描仪对模型尺寸进行检测,确保模型的尺寸精度。受石墨原料尺寸的限制,平板的上型需由 8 块石墨板拼接而成。铸型拆分后如图 13 所示。

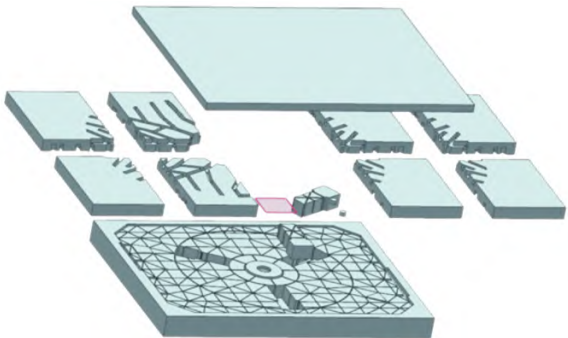


图 13 铸型拆分示意图
Fig.13 Schematic diagram of casting separation

鉴于整个上型尺寸太大,若拼接不好会使中间部分坍塌,使大平板局部厚度不够,因此在铸件的长度方向靠中间的位置设计工艺孔。工艺孔位置应避开关键部位如安装凸台等,在浇注完成后采用板材焊接封闭。

3.2 铸件浇注与精整

铸件浇注在公司 1 200 kg 真空自耗凝壳炉内进行,浇注前对模型进行预热。为了提高金属液的过热度,熔化过程中采用大电流快速熔化,这样既有利于改善金属液的流动性,防止铸件表面产生冷隔、流痕、裂纹缺陷,又能提高冒口的补缩效果。

铸件材质为 ZTC4 钛合金,浇注后进行退火处理,以消除铸造应力,防止铸件产生裂纹或变形。铸件经渗透和 X 射线检查后,去除影响铸件使用的缺陷,采用线能量较小的氩弧焊补焊后,进行第二次真空退火,消除焊接应力和铸造残余应力,提高铸件内在质量及结构稳定性。

为防止铸件在凝固、补焊及热处理过程中产生

变形,除设计反变形加强筋及工艺筋外,还设计、制作了铸件热处理防变形专用工装,对铸件防变形起到了一定的效果。将铸件底面垫平置于矫形炉中进行热蠕变矫形,最终使铸件变形得以矫正,其尺寸精度满足技术要求。

4 铸件检测结果

铸件的化学成分、力学性能测试结果见表 2 和 3(表中 T1 和 T2 为横向拉伸试样)。由表 2 的测试结果可知,铸件的化学成分符合 GJB 2896A- 2007 标准要求。由表 3 的数据可知,铸件的室温力学性能满足技术指标要求。

经检测,铸件的形状和尺寸符合 GB/T 6414-1999 CT8 级要求。铸件表面质量用目视和着色渗透检查,结果表明铸件表面光滑,无浇不足、裂纹、冷隔等现象。铸件尺寸、质量均符合标准要求。采用 X 射线对铸件内部质量进行检测,受检部位为大平面及四周面。X 射线检测结果显示:铸件内部无裂纹、冷隔、海绵状疏松、夹杂以及穿透性缺陷;缩孔缩松(或孔穴)缺陷的数量、大小(直径和深度大于 0.5 mm)、分布和间隔与铸造模拟结果基本吻合。由此可见,采用优化后雨淋式浇注系统浇注铸件,铸件尺寸精度、内外部质量和力学性能等均满足标准要求。

5 结论

- (1)铸造模拟结果表明不同的浇注系统显著影响铸件内部的缺陷大小及位置分布。
- (2)通过对铸件充型过程温度场变化和缩孔、疏松缺陷模拟预测,优选出最佳的浇注系统。采用优化后的雨淋式浇注系统,可使铸件内部的缩孔及缩松倾向大大减小。
- (3)采用优化后的浇注系统进行浇注,铸件充型完整、无明显表面缺陷。X 射线检测结果显示其内部缺陷与铸造模拟结果基本吻合。

表2 铸件化学成分
Tab.2 Chemical composition of the casting

Element	(mass fraction/%)							
	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
Measured value	6.3	4.0	0.07	<0.02	0.01	<0.01	<0.001	0.13
Standard value	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.3	≤0.15	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.2

表 3 铸件室温力学性能
Tab.3 Mechanical properties of the casting at room temperature

Sample	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	E /GPa
T1	925	827	15.5	33	118
T2	922	825	12	36	115
Standard value	≥835	≥765	≥5	≥12	≥114

参考文献:

- [1] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [2] 安仲生, 陈岩, 赵巍. 2022 年中国钛工业发展报告[J]. 钛工业进展, 2023, 40(2): 40-48.
AN Z S, CHEN Y, ZHAO W. Report on China titanium industry progress in 2022[J]. Titanium Industry Progress, 2023, 40(2): 40-48.
- [3] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 李培杰. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术[J]. 铸造, 2021, 70(2): 139-146.
RAN X, LYU Z G, CAO J, LI P J. Investment casting technologies for large complex titanium alloy parts[J]. Foundry, 2021, 70(2): 139-146.
- [4] 李义军, 朱明渝. 大型薄壁复杂框架式结构钛合金铸件的研制[J]. 铸造, 2015, 64(3): 256-259.
LI Y J, ZHU M Y. Development of large thin-wall complex tower structure titanium alloy casting[J]. Foundry, 2015, 64(3): 256-259.
- [5] 刘艳磊, 孟磊, 周含宣. 大型复杂钛合金底座铸造工艺研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(19): 69-72.
LIU Y L, MENG L, ZHOU H X. Research on casting technology of a large complex titanium alloy base[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 69-72.
- [6] 王华侨, 包春玲, 王永凤, 李道金, 肖德廷, 孙立君, 梁宏超, 柴方录. 大型薄壁钛合金菱形骨架铸件铸造工艺的研究[J]. 铸造, 2015, 64(2): 135-139, 143.
WANG H Q, BAO C L, WANG Y F, LI D J, XIAO D T, SUN L J, LIANG H C, CHAI F L. Study on casting process of large thin-wall diamond skeleton titanium alloy casting[J]. Foundry, 2015, 64(2): 135-139, 143.
- [7] 张美娟, 南海, 鞠忠强, 高富辉, 郗喜望, 朱郎平. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 13-19.
ZHANG M J, NAN H, JU Z Q, GAO F H, QIE X W, ZHU L P. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.
- [8] 范李鹏, 王宝兵, 姬艳硕, 冯港雯, 徐信锋, 谢剑锋, 杨剑. 大型复杂圆台型钛合金铸件的铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 182-184.
FAN L P, WANG B B, JI Y S, FENG G W, XU X F, XIE J F, YANG J. Research on casting process of large and complex titanium alloy castings with the round table type[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 182-184.
- [9] 李重阳, 刘时兵, 徐凯, 李鸿举, 李昕祺, 岳野, 刘天翼, 倪嘉. 大尺寸钛合金阀体石墨型铸造工艺研究[J]. 铸造, 2023, 72(2): 188-192.
LI C Y, LIU S B, XU K, LI H J, LI X Q, YUE Y, LIU T Y, NI J. Research on graphite casting process of large-sized titanium alloy valve body[J]. Foundry, 2023, 72(2): 188-192.
- [10] 付景宇, 纪志军, 肖强伟, 赵瑞斌. ZTA5 钛合金薄壁复杂框形底座铸件的研制[J]. 铸造工程, 2023, 47(2): 6-11.
FU J Y, JI Z J, XIAO Q W, ZHAO R B. Development of ZTA5 titanium alloy thin-walled complex frame base castings[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(2): 6-11.
- [11] 王兰芳, 朱仲忍, 王晓林, 刘晓军, 田小科. 大型平板类钛叶片的铸造[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S3): 183-185.
WANG L F, ZHU Z R, WANG X L, LIU X J, TIAN X K. Casting of the titanium blade of big size plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 183-185.
- [12] 殷亚军, 刘振伟, 张勇佳, 李乐川, 沈旭, 计效园, 周建新. 铸造数值模拟软件技术及应用进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1297-1311.
YIN Y J, LIU Z W, ZHANG Y J, LI L C, SHEN X, JI X Y, ZHOU J X. Progress in casting numerical simulation software technology and application[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10): 1297-1311.
- [13] 周建新, 廖敦明, 等. 铸造 CAD/CAE[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [14] 王彦鹏, 伞晶超, 倪嘉, 宁兆生. CAD/CAE/CAM 技术在钛合金铸造中的应用[J]. 铸造, 2022, 71(2): 194-197.
WANG Y P, SAN J C, NI J, NING Z S. Application of CAD/CAE/CAM technology to titanium alloy casting[J]. Foundry, 2022, 71(2): 194-197.
- [15] 黄进, 张勇佳, 殷亚军, 欧阳春芳, 连凯文. 基于华铸 CAE 的航空发动机铝合金传动件铸造数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 846-849.
HUANG J, ZHANG Y J, YIN Y J, OUYANG C F, LIAN K W. Numerical simulation and optimization of aluminum alloy transmission parts for aeroengine based on inteCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(8): 846-849.
- [16] 韩文虹. 基于计算机模拟的钛合金铸件充型过程分析与优化[J]. 铸造技术, 2014, 35(9): 2073-2075.
HAN W H. Analysis and optimization of filling process of titanium alloy castings based on computer simulation[J]. Foundry Technology, 2014, 35(9): 2073-2075.
- [17] 王伏喜, 郭会丽, 付鲲鹏. 钛合金铸件 X 射线检测[J]. 铸造技术, 2017, 38(5): 1241-1243.
WANG F X, GUO H L, FU K P. X-radiographic testing of titanium alloy castings[J]. Foundry Technology, 2017, 38(5): 1241-1243.
- [18] 赵瑞斌. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成形技术研究进展[J]. 钛工业进展, 2015, 32(2): 7-12.
ZHAO R B. Research progress of precision casting of large complex thin-walled titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(2): 7-12.
- [19] 史兴利, 郑子樵. 钛及钛合金铸造用石墨型的制造[J]. 铸造, 1998(3): 39-41.
SHI X L, ZHENG Z Q. Production of graphite moulds for titanium and titanium alloys castings[J]. Foundry, 1998(3): 39-41.
- [20] 宗学文, 刘文杰, 高中堂, 徐文博, 高倩, 王磊. 不同铸型对钛合金微观组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(5): 1681-1688.
ZONG X E, LIU W J, GAO Z T, XU W B, GAO Q, WANG L. Effect of different molds on microstructure and mechanical properties of titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1681-1688.