● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4136

ZTi55A 钛合金大型骨架熔模铸造及后处理工艺研究

刘云超[1],李 弘[1,2],刘珍君[1,2],孟泽炎[1],朱小平[2]

(1. 河北钢研德凯科技有限公司,河北 保定 072750; 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司,北京 100081)

摘 要:以 ZTi55A 钛合金大型骨架为研究对象,通过分段铸造与焊接相结合的方法,系统探讨了熔模精密铸造工艺及后处理工艺。实验过程中,采用 3 段式分体铸造和焊接工艺,成功制备出整体铸件,并有效控制了裂纹等缺陷的产生。通过合理设计蜡模制备、型壳制备、熔炼浇注及后续酸洗和补焊工艺,可以显著提高铸件的成型质量。结果表明,成功实现了整体铸件的完整充型;确定了适用于 ZTi55A 钛合金的工艺参数,并在酸洗过程中有效去除 α 脆性粘污层。此外,提出的补焊工艺能够修复焊点裂纹,确保了铸件的力学性能与尺寸精度。

关键词:ZTi55;高温钛合金;熔模铸造;后处理

中图分类号:TG249.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2024)12-1160-09

Study on the Investment Casting and Posttreatment of a Large Skeleton in ZTi55A Titanium Alloy

LIU Yunchao[1], LI Hong[1,2], LIU Zhenjun[1,2], MENG Zeyan[1], ZHU Xiaoping[2]

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China; 2. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Taking a ZTi55A titanium alloy large-scale skeleton as the research object, through the method of segmental casting and welding, investment mould precision casting and posttreatment technology were systematically discussed. Three-stage split casting and welding processes are used to successfully prepare whole casts, and defects such as cracks are effectively controlled. The moulding quality of castings can be significantly improved by the reasonable design of wax mould preparation, shell preparation, melting pouring and subsequent pickling and repair welding processes. The results show that complete filling of the whole casting is successfully achieved, and the process parameters suitable for ZTi55A titanium alloy are determined. The α-brittle fouling layer is effectively removed during pickling. In addition, the proposed repair welding process can repair the solder joint crack and ensure the mechanical properties and dimensional accuracy of the casting.

Key words: ZTi55; high-temperature titanium alloy; investment casting; posttreatment

随着我国航空航天飞行器的不断升级换代,飞行器零部件的结构逐渐趋向复杂化,包括变壁厚设计、半封闭或封闭内腔及非对称结构。这些结构变化显著提升了对零部件材料的要求,特别是在轻质、高强度、耐高温、耐腐蚀等方面的性能需求日益增加[1-4]。在此背景下,钛合金精密铸造技术因其能够满足上述要求,逐渐成为生产飞行器关键零部件的主流工艺。例如,航空发动机机匣和壳体等零部件已广泛采用这一技术进行一体成型生产[5-6]。尽管该技术应用广泛,然而我国关于钛合金精密铸造技术的研究起步较晚,并受到国际技术封锁的限制,导致在钛合金铸件材料和工艺水平上与国际先进水平存

收稿日期:2024-07-19

基金项目:国防科工局年度配套项目(2019-112)

作者简介:刘云超,1991 年生,本科,工程师.主要从事钛及钛合金合金铸造,包括钛合金产品设计与开发、工艺研究与应用等方面的工作.Email: 15104605670@126.com

通讯作者:李 弘,1976 年生,硕士,高级工程师.主要从事钛及钛合金铸造材料和工艺技术方面的工作.Email: sevenholly@163.com

引用格式:刘云超,李弘,刘珍君,孟泽炎,朱小平.ZTi55A 钛合金大型骨架熔模铸造及后处理工艺研究[J].铸造技术,2024,45(12):1160-1168.

LIU Y C, LI H, LIU Z J, MENG Z Y, ZHU X P. Study on the investment casting and posttreatment of a large skeleton in ZTi55A titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1160-1168.

中国知网 https://www.cnki.net

在显著差距。为了缩小这一差距,并满足国内市场的需求,迫切需要依托自主创新,积极开展钛合金铸件新材料和新工艺的研发。

目前,国内外众多科研人员正在致力于攻克大型复杂钛合金铸件的成型技术难题[7-10]。张铭杰[11]和朱小平[12]通过优化浇注系统设计、铸造模拟仿真、3D 打印熔模、陶瓷型壳制备及熔炼浇注工艺,成功制备了直径超过 1 100 mm 的大型 TC4 钛合金中介机匣熔模精铸件。程亚珍等[13]采用熔模精铸技术生产了一种薄壁复杂钛合金铸件,并根据模拟仿真结果优化了浇注系统,通过在易产生缩孔的位置添加冒口,成功将缩孔引导至冒口,同时避免了应力场的变化。贾志伟等[14]则采用分体熔模铸造与真空电子束焊接相结合的工艺,成功制造出长度超过 1 260 mm,具有复杂三通道狭长内腔结构的钛合金进气道铸件。冉兴等[1]则通过合理的制模参数、蜡模防变形措施和螺杆外贴式紧固矫形工艺,确保了某大型钛合金异形结构铸件的尺寸精度。这些研究表明,通过精确的工艺设计与优化,可以有效解决大型复杂钛合金铸件成型中的诸多技术挑战。

随着飞行器对耐高温性能需求的不断提升,生产能够耐受 550 ℃以上温度的大型复杂铸件的高温钛合金变得至关重要。目前,国内外已经发展了 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si 系耐高温钛合金,如英国的 IMI 829 和 IMI 834、俄罗斯的 BT25 和 BT36、美国的 Ti-6242S 和 Ti1100,以及中国的 Ti55、Ti60 和 Ti65 等[15-17]。尽管这些高温钛合金具备优异的耐高温性能,但是基于它们的精密铸件开发仍然较少,当前市场上大多数钛合金精密铸件材料仍采用 TC4 钛合金。TC4 钛合金的长时间使用温度为 300～350 ℃[18-19],其特点是合金组元少、流动性好且不易开裂。相比之下,高温钛合金由于合金组元多,导致流动性差,开裂倾向严重。因此,在开发钛合金精密铸件时,为确保产品的完整成型、控制铸件缺陷数量和尺寸公差,铸件设计人员必须针对特定钛合金的特性,制定专门的铸造工艺和后处理工艺[20]。

本文围绕大型、复杂、薄壁骨架铸件的需求,结合前期铸件攻关研究积累,采用熔模精密铸造工艺对 ZTi55A 大型骨架铸件进行研制生产。通过攻克铸造工艺和后处理工艺中的关键技术难题,使得产品的冶金质量和性能达到了型号设计的使用要求,并成功完成了产品的研制,为后续批量生产奠定了坚实基础。

1　实验材料与方法

1.1　铸件模型和材料

图 1 为大型骨架结构,其最大外廓尺寸约为 1 600 mm×800 mm,零件呈非回转半敞开结构,壁厚小于 3 mm,是典型的大尺寸、复杂、薄壁铸件。实验选用的 ZTi55A 铸造钛合金是一种新型高温钛合金,其名义成分为(质量分数,%):5.5 Al、3.5 Sn、3.0 Zr、0.7 Mo、0.3 Si、0.4 Nb、0.4 Ta, 余量 Ti。

1.2　铸造工艺设计

综合考虑 ZTi55A 油箱框架铸件的成形及补焊工艺,研制工作面临多项技术难点,包括如何有效控制高温钛合金在成形过程中的裂纹倾向,如何确保铸件在焊接后的整体强度,以及如何优化型壳力学性能以防止过高强度导致的铸造缺陷。在铸造工艺中,首先采用分段铸造与焊接工艺进行研制工作,通过这一方法成功制备了合格的产品;在此基础上,进一步开展整体铸件的研制。

在工艺设计方面,针对铸造过程中的裂纹形成问题,决定型壳的强度不宜过高,因此采用静止浇注以减少应力集中。此外,为了确保铸件能够顺利充型,减少对型壳的冲击、并有利于顺序凝固和排气,从而保证铸件的冶金质量,本项目采用了底注式浇注系统设计方案。具体的铸造工艺要点包括以下几个方面。

(1)蜡模的制备　蜡模制备采用激光快速成形设备,无需模具即可快速成形蜡模,并且便于在蜡模上

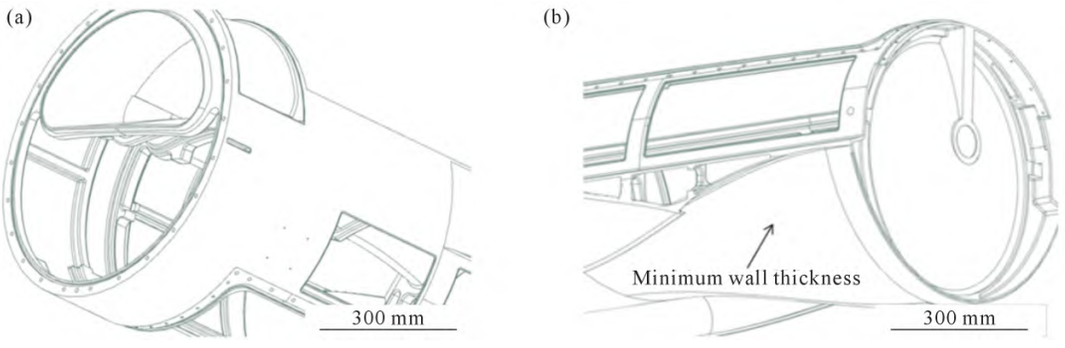


图 1　大型骨架零件结构:(a) 左视图;(b) 右视图

Fig.1　Structural diagram of a large skeleton: (a) left side view; (b) right side view

中国知网　https://www.cnki.net

进行工艺修改和优化。为了确保蜡模的尺寸精度，专门设计并制造了防变形工装和检测工装。在蜡模制备过程中，严格控制环境温度并规范操作，确保在蜡模修整和组焊过程中不发生变形。

(2)制壳工艺　选用具有良好综合工艺性能的耐火材料 ZM(Y_2O_3 和 ZrO_2 的复合相)和新型复合黏结剂 ZYM，以特定配比(5∶1)制备浆料。具体步骤包括：使用机械手自动线将配制好的浆料涂覆在经过清洗的蜡模表面，浆料涂覆后在(22±2) ℃和 40%~60%的湿度条件下自然干燥 10~12 h；然后进行 1 次 200 目铝锆粉的过渡层撒砂及干燥处理；接着重复 8 次 200 目铝矾土粉的加固层撒砂和干燥操作，最后 1 层仅挂浆而不撒砂。完成干燥后，模壳经过脱蜡和高温焙烧形成具有一定强度的型壳。制壳的完整工艺流程如图 2 所示，型壳焙烧工艺曲线如图 3 所示。

(3)浇注成形　在浇注过程中，首先将型壳预热至 400~450 ℃，减少温度梯度带来的内应力。然后将预热后的型壳快速转移至熔炼炉内，进行热壳浇注。此过程可以有效降低铸件在凝固过程中的降温速度，减轻收缩应力，进而减少裂纹的产生。同时，通过提升熔炼炉的熔炼电流，控制在45 000~50 000 A，以增加金属液的过热度，进一步改善铸件凝固质量。此外，对型壳采取保温措施，进一步减缓铸件的冷却速度，有效降低裂纹的产生几率。

(4)后处理　首先采用吹砂、打磨等常规机械方法初步清除表面的沾污层，使用酸液质量百分配比 HF(化学纯，40%)∶HNO_3(工业纯，62%~67%)∶H_2O=1∶3∶6 的酸洗工艺，彻底去除残留的沾污层。为了确保补焊的可靠性，在进行工艺试验前对试片和焊丝进行了以下处理：①缺陷模拟。在试片上故意制造铸造缺陷，以便模拟实际修复场景，并按照规范进行焊前处理。②焊丝处理。焊丝先进行酸洗处理，然后用铝箔包裹烘干备用，以确保焊接时材料的清洁度和性能。③补焊试片处理。试片在吹砂和酸洗后备用，酸洗量单边 0.5 mm。④补焊操作。在真空焊箱中进行补焊，焊接电流设计范围为 50~100 A。⑤检测与分析。补焊后，使用荧光检测和 X 光检测对试片进行全面分析，以评估焊接质量。

2　实验结果及讨论

2.1　分段铸件铸造成形

根据大型骨架结构的特点，将产品分为前、中、

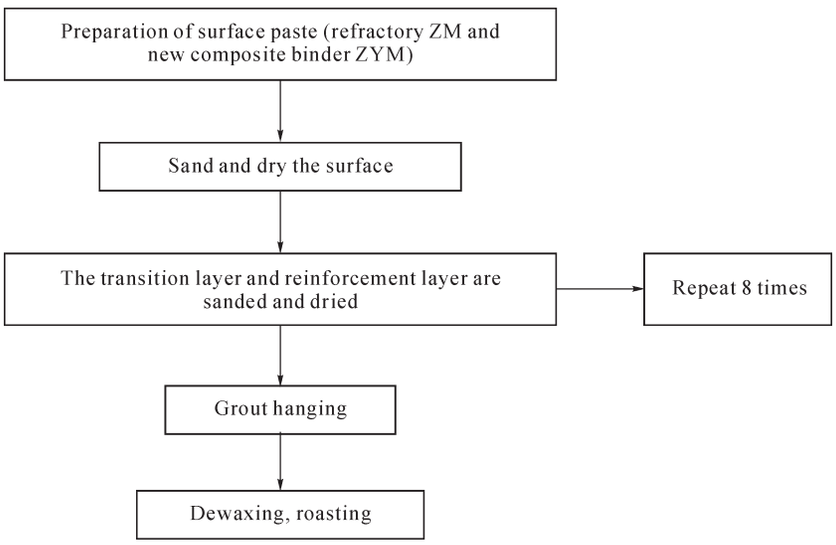


图 2　精密铸造制壳工艺流程

Fig.2　Flow chart of the precision casting shell-making process

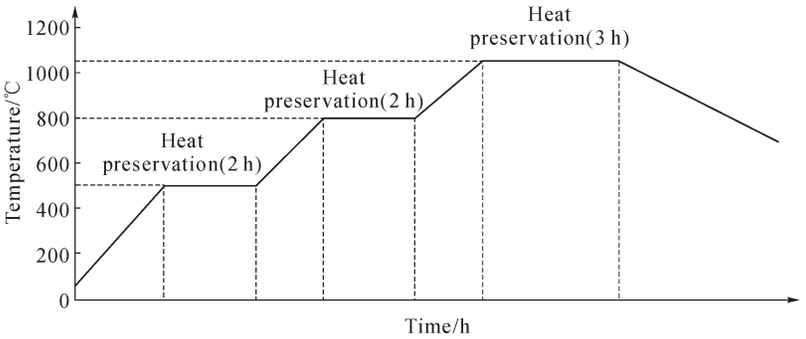


图 3　型壳焙烧工艺曲线

Fig.3　Curve of the shell roasting process

中国知网　https://www.cnki.net

后 3 段进行铸造，如图 4a~c 所示。此分段形式的设计使焊缝区域厚度较大，且厚度差较小，便于保证电子束焊接的质量和一致性。如图 4d~f 所示，为了实现平稳有序的充型并提高铸件整体的成形致密性，针对易产生孔洞类缺陷的热节部位，对浇注系统结构进行了优化，增加了局部辅助浇冒系统。该优化措施使金属液在充型过程中能够更好地填充和补缩热节部位，从而有效减少或消除内部的缩孔和缩松缺陷。

如图 5 所示，采用激光快速成形设备及专门设计制造的蜡模防变形工装和检测工装进行蜡模的制备和修整。修整后的蜡模通过激光三维扫描检测，尺寸精度满足工艺设计要求，具体精度达到±0.3 mm。

为防止脱蜡过程中的残渣掉入型腔，在脱蜡前对脱蜡孔、排气孔等周边的型壳进行打磨，使其光顺平整，确保型腔无外来物污染。脱蜡和焙烧过程中，使用金属盖板封堵朝上的排气孔及浇口，防止外来夹杂物进入型腔。同时，在模组局部低点位置增设脱蜡口，使局部蜡液能够快速流出，防止蜡液长时间接触型壳造成局部破坏。浇注前，使用高清工业内窥镜对型壳内部进行检查，对发现的夹杂物等采用清洗方式进行清理，确保型壳干净无污染。浇注前的模壳如图 6a~c 所示，浇注完成后的清壳和吹砂过程如图 6d~f 所示。铸件成形完整，外观质量良好，表面呈金

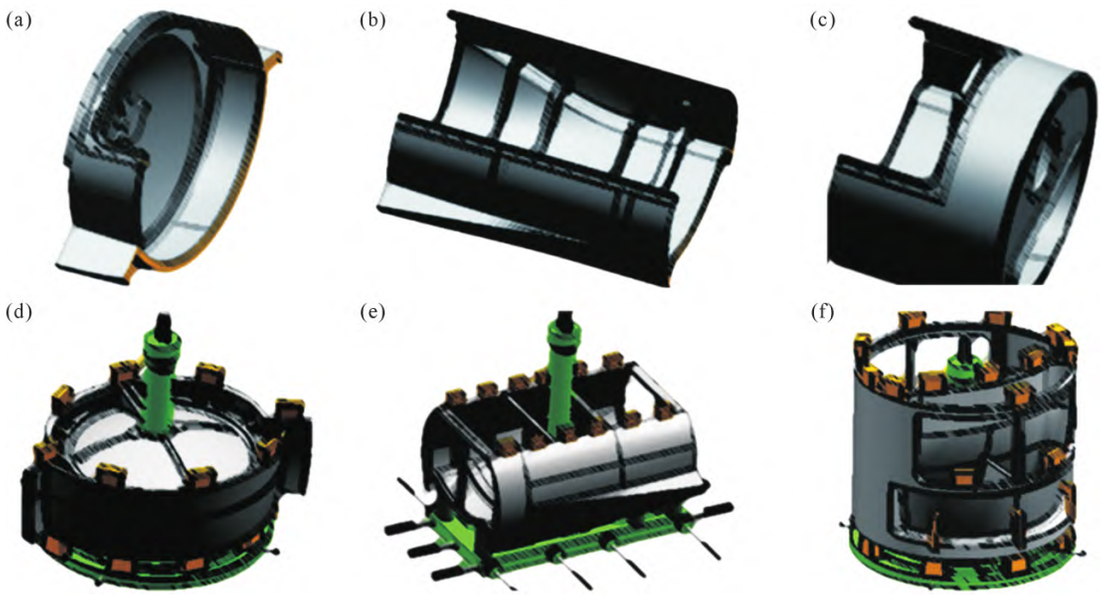


图 4 大型骨架分段试验件示意图：(a) 前段；(b) 中段；(c) 后段；(d~f) 前、中和后段浇注系统

Fig.4 Schematic diagram of a large-scale skeleton segmented test piece: (a) front section; (b) middle section; (c) rear section; (d~f) pouring system for the front, middle and rear sections

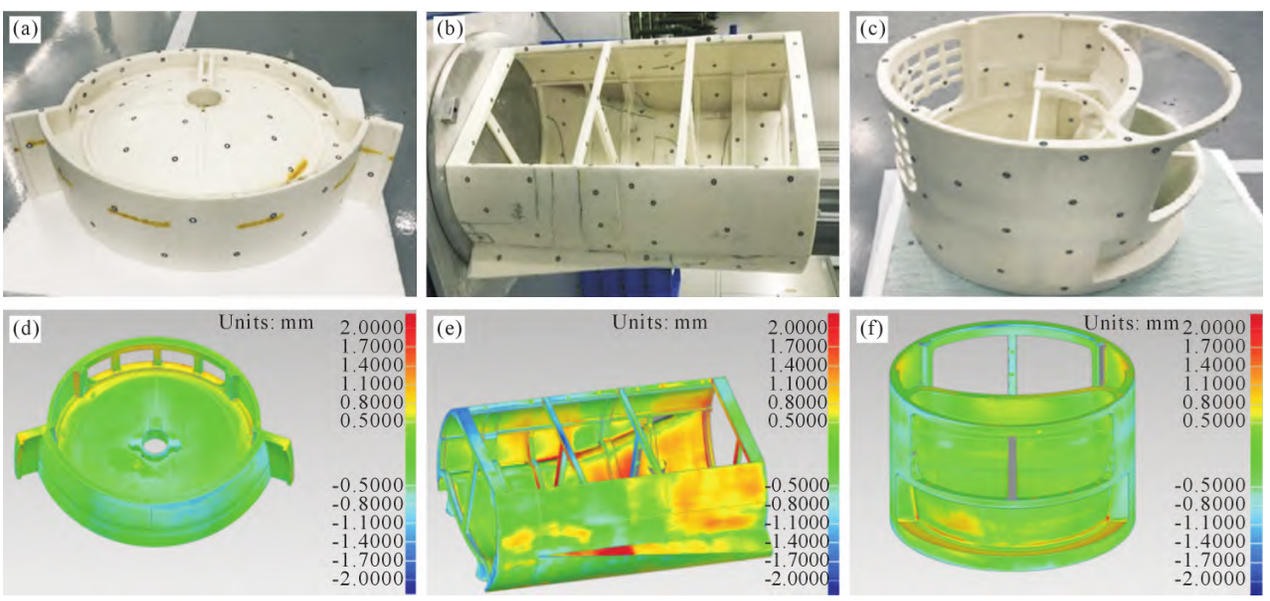


图 5 大型骨架分段试验件：(a) 前段蜡模；(b) 中段蜡模；(c) 后段蜡模；(d) 前段扫描结果；(e) 中段扫描结果；(f) 后段扫描结果

Fig.5 Large-scale skeleton segmented test pieces: (a) front wax mold; (b) middle wax mold; (c) rear wax mold; (d~f) scan results for the front, middle and rear sections

中国知网 https://www.cnki.net

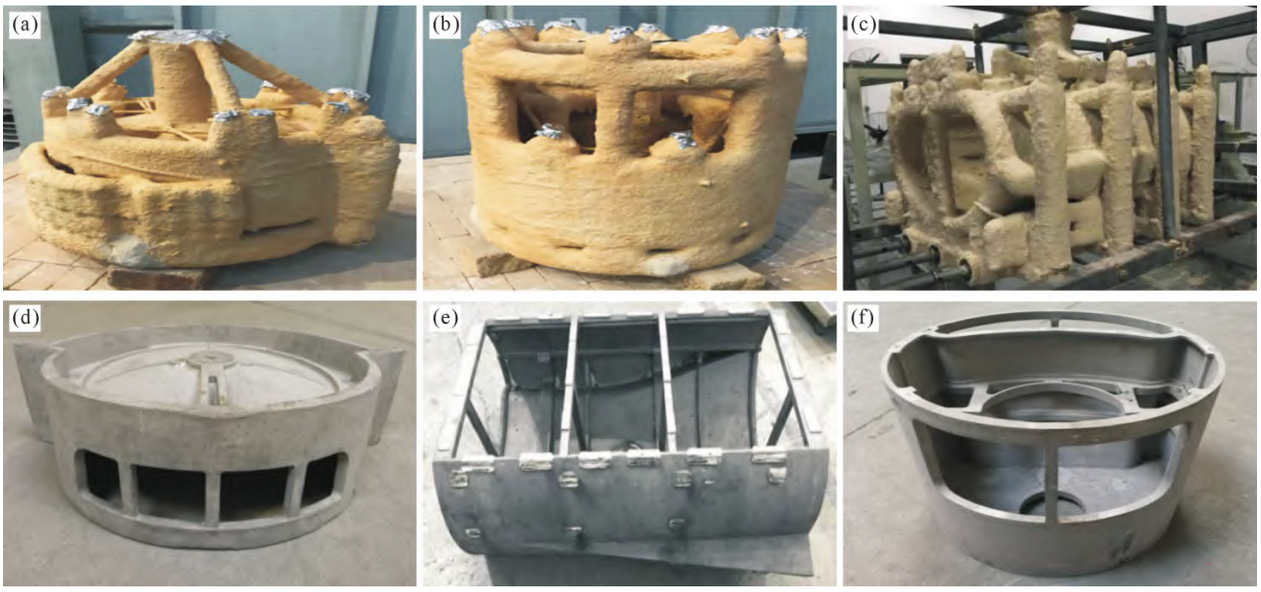


图 6 大型骨架分段试验件:(a~c) 前、中和后段浇注前;(d~f) 前、中和后段清壳吹砂后

Fig.6 Large-scale skeleton segmented test pieces: (a~c) front, middle and rear sections before pouring; (d~f) front, middle and rear sections after shell cleaning and sand blowing

属光泽,无反应粘砂现象,且外观无目视可见的裂纹。

使用表 1 所列设备对分段铸件进行化学成分检测后,获得实测结果和标准要求对比数据,如表 2 所示。可以看出,经过熔模精密铸造浇注出来的 ZTi55A 分段骨架铸件的表面及内部质量均符合 GJB 2896A-2007 的 I 类 B 级要求,各元素含量均在标准范围内。

表1 化学成分检测设备

Tab.1 Equipment for the chemical composition test

Alloying element	Testing equipment	Model number
O, N	Oxygen and nitrogen meter	ON-5500
H	Hydrogen analyzer	EMGA-821W
C	Carbon sulfur analyzer	ELEMENTRAC CS
Other/sum	Inductively coupled plasma emission spectrometer	5110 / ICAP 6300

2.2 整体铸件铸造成形

针对 ZTi55A 材料在铸造过程中易产生裂纹的特点,结合分段铸件在工艺设计和生产过程中的经验,发现以下问题:在薄厚转接部位,由于应力集中,容易产生裂纹缺陷;在尺寸较小的凹槽区域,由于型壳干燥不彻底,导致强度不足,浇注时容易产生夹杂类缺陷。此外,在冒口尺寸不足的情况下,铸件本体易出现缩孔缺陷。

为有效控制局部应力集中,减少缺陷数量,采取了以下工艺优化措施:①增大薄厚转接部位的过渡角 R。为了减少结构应力集中区的裂纹产生几率,在应力集中的薄厚转接部位增大过渡角 R,后续打磨至铸件设计要求的表面光滑状态,进一步减少裂纹出现。②铸平尺寸较小的凹槽。为防止因型壳干燥不彻底导致的强度过低问题,浇注时产生夹杂类缺陷,将尺寸较小的凹槽在铸造过程中铸平,后续通过机械加工来实现铸件的凹槽结构,以保证凹槽的精度和铸件的整体质量。③增大冒口尺寸。为了尽可能将缩孔缺陷提出铸件本体,增大冒口尺寸,并在热等静压处理之后去除冒口,确保铸件本体的致密性和机械性能。

根据铸件的结构特征,在相应位置添加筋条或筋板,通过增加多处工艺加强筋的方式,有效控制易变形部分,形成更为稳定的铸件结构,最大限度地减少铸件变形。同时,为了满足铸件充型平稳、型壳冲击小、顺序凝固和良好排气的要求,设计了合适的浇注系统。由于整体骨架铸件为非回转结构,选用底注式浇注系统,这有助于保证铸件的冶金质量。具体浇

表 2 ZTi55A 标准合金成分及分段骨架铸件成分

Tab.2 Standard composition of ZTi55A alloy and the composition of segmented skeleton casting

(mass fraction/%)

Alloying element	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Fe
Standard	matrix	5.2~5.8	3.0~4.0	2.5~3.5	0.2~1.0	0.1~0.5	≤0.25
Measured	matrix	5.66	3.61	2.9	0.7	0.29	0.02
Alloying element	N	H	O	C	Nb	Ta	Other single/sum
Standard	≤0.05	≤0.012	≤0.20	≤0.10	0.2~0.7	0.2~0.7	≤0.10/≤0.30
Measured	0.01	0.002	0.17	0.02	0.38	0.36	-

中国知网 https://www.cnki.net

注工艺方案如图 7a 所示。

使用蜡模制备设备分多段制备蜡模，如图 7b 所示。多段蜡模需要在专用的蜡模拼接工装上进行整体拼接,拼接处使用黏结蜡进行黏接,以保证蜡模的整体强度。拼接后的整体蜡模按照设计的浇注系统组焊在专用浇道上。为确保整个浇注系统在组模和制壳过程中不出现变形、开裂或破损,设计加固工装。加固工装采用带有翻转功能的金属框架结构,便于操作和使用,确保系统的坚固性和耐用性。

型腔中的多余物是导致铸件夹杂类缺陷的主要原因。为避免在型壳脱蜡和焙烧过程中外来夹杂物的混入,以及型腔表面涂层的脱落形成夹杂源,采取焙烧后清洗型壳的措施,确保型壳具有良好的性能和质量。制备完成的整体铸件型壳如图 8a 所示。

与分段骨架的浇注过程相同,整体大型骨架采用热壳浇注工艺，增加铸件在炉内的冷却时间,降低铸件的凝固冷却速率,从而减少铸件在凝固过程中产生裂纹的倾向。浇注完成后,经过清壳、切割浇冒系统,以及吹砂打磨处理,最终的整体骨架铸件如图 8b 和 c 所示。铸件充型完整,无欠铸或多肉等明显的铸造缺陷。

通过检测,整体骨架铸件的表面及内部质量均符合 GJB 2896A-2007 的 I 类 B 级要求。如表 3 所示,经过熔模精密铸造浇注出来的 ZTi55A 整体铸件各元素含量均在标准范围内。

2.3　后处理工艺研究

2.3.1　铸件酸洗工艺

图 9 所示为厚度 5、10、15 和 20 mm 的 4 种 ZTi55A 试块，切割横截面进行 α 脆性沾污层厚度检测。通过 AXIO Vert.A1 型金相显微镜分析发现,试块厚度越大,其对应的 α 脆性沾污层越厚。

根据酸洗的要求和测试结果,确定了铸件的酸洗时间:对于 ZTi55A 钛合金,基于上述实验结果 α 脆性沾污层厚度取 0.4 mm(表示典型的脆性沾污层厚度)。根据酸洗速率块测定化学除层的速率为 0.014 mm/min,获得最佳酸洗时间取 30 min,即可完全去除铸件表面的 α 脆性沾污层。

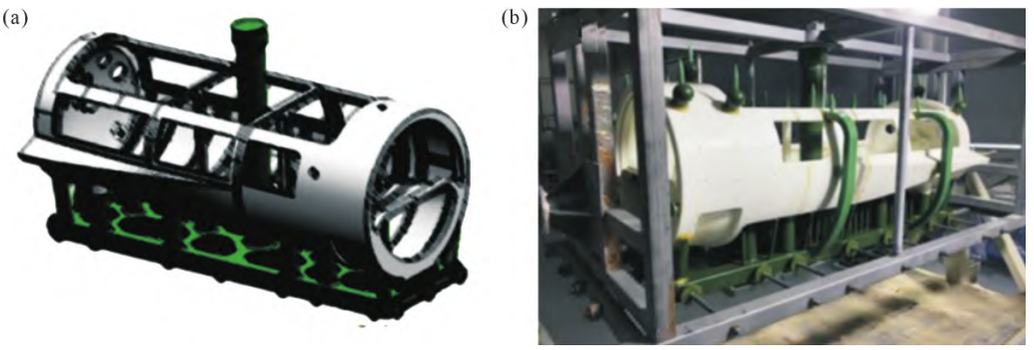


图 7　整体大型骨架熔模铸造:(a) 工艺方案;(b) 相应的蜡模与工装组合

Fig.7　Overall large-scale skeleton investment casting: (a) process plan; (b) corresponding wax mold and tooling combination

表3 ZTi55A标准合金成分及整体骨架铸件成分

Tab.3 Standard composition of ZTi55A alloy and composition of integral skeleton casting

(mass fraction/%)

Alloying element	Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Fe
Standard	matrix	5.2~5.8	3.0~4.0	2.5~3.5	0.2~1.0	0.1~0.5	≤0.25
Measured	matrix	5.4	3.6	2.9	0.7	0.2	0.03
Alloying element	N	H	O	C	Nb	Ta	Other single/sum
Standard	≤0.05	≤0.012	≤0.20	≤0.10	0.2~0.7	0.2~0.7	≤0.10/≤0.30
Measured	0.01	0.004	0.11	0.01	0.4	0.4	-



图 8　整体骨架:(a) 浇注型壳;(b, c) 整体铸件正面和背面

Fig.8　Overall skeleton: (a) castable shell; (b, c) front and back of the integral casting

中国知网　https://www.cnki.net

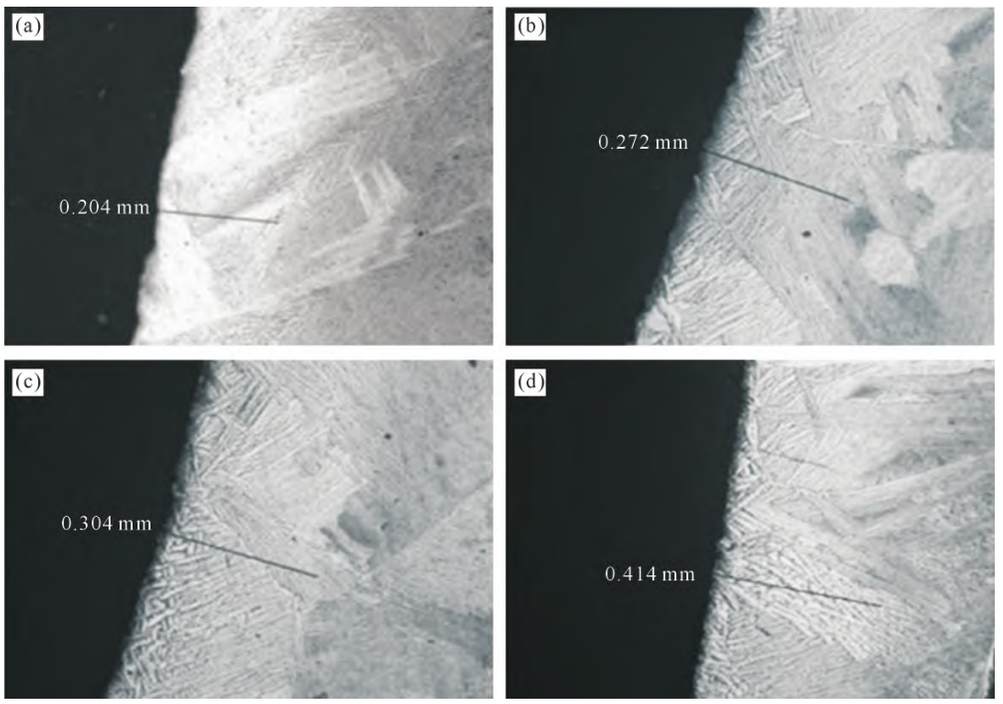


图 9 不同厚度试块的 α 脆性沾污层 OM 照片:(a) 5 mm; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm

Fig.9 OM images of α brittle stain layers in samples with different thicknesses: (a) 5 mm; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm

2.3.2 补焊工艺

为实现补焊无开裂现象，最重要的就是要降低焊接应力，使其低于母材抗拉强度。考虑到采用焊前弧光局部预热、焊后缓慢收弧的焊接方式,降低焊后冷却速率,从而降低焊接应力及应变速率。

为了排除多次补焊对焊点周围开裂的影响,在骨架前段试验件上应力较为集中的区域选取数点进行缺陷模拟,并对缺陷进行补焊工艺研究。首先,将焊点及周围清理干净,对铸件进行预热。其次,补焊前使用焊枪弧光对焊点周围进行局部预热，预热范围为 R50 mm。补焊后,围绕焊点缓慢收弧,减少焊接融合区与母材间的温度梯度以达到减少焊接应力和残余应力的效果。最后,铸件在真空焊箱中充分冷却后,采用超声波振动方式对铸件进行去应力处理。经过不断改进优化,确认了补焊工艺方法,并将同一位置修复前、修复后的情况进行了对比，结果如图 10 所示。可见,采用这种焊接工艺方法可以有效消除焊点周围裂纹的产生。

针对 ZTi55A 铸件补焊后焊点周围开裂情况,经过试验已取得突破性进展。研究出适用于 ZTi55A 铸件的补焊工艺方法，并在前段试验件中得到可行性验证。补焊工艺方法概括如下。

(1)铸件焊前预热　铸件进入焊箱前先进行整体预热,预热温度范围为 350~400 ℃;进入焊箱后,再对焊点及其周围区域进行局部预热，预热温度范围为 600~800 ℃,预热范围为焊点面积的 5 倍以上。

(2)焊接过程控制　采用小电流慢速焊接,电流范围设定为 50~100 A,焊接速度为 2~3 mm/s。

(3)缓慢冷却　焊接后采用局部保温方式,降低焊接区的冷却速度,减小收缩应力。

(4)去应力处理　补焊铸件冷却后立即采用超声去应力方式降低焊接应力。

(5)去应力退火　补焊铸件需 12 h 内进行真空状态下去应力退火。

(6)清洁处理　焊丝和补焊区域必须在焊前短时间内重新清理干净。

(7)固定设备与工艺　保持固定的焊接设备和焊接人员,确保工艺参数和条件的一致性。

3 结论

(1)蜡模与型壳制备　通过改进蜡模和型壳的制备工艺,确保了大型钛合金铸件的完整充型,避免了由于蜡模变形和型壳强度不足而导致的铸造缺陷。这一成果为复杂结构钛合金铸件的制造提供了工艺保障。

(2)熔炼与浇注工艺　优化了 ZTi55A 合金的熔炼和浇注工艺,通过控制浇注温度和速度,有效减少了铸件中的缩孔、缩松等内部缺陷。研究结果表明,合适的底注式浇注系统有助于实现顺序凝固，从而提高了铸件的冶金质量。

(3)酸洗工艺　针对铸件表面和内部缺陷,制定了适用于 ZTi55A 铸件的酸洗工艺。理论上,通过控制酸洗时间和酸洗液浓度，能够有效去除铸件表面的 α 脆性沾污层,保持铸件的表面质量和力学性能。

中国知网 https://www.cnki.net

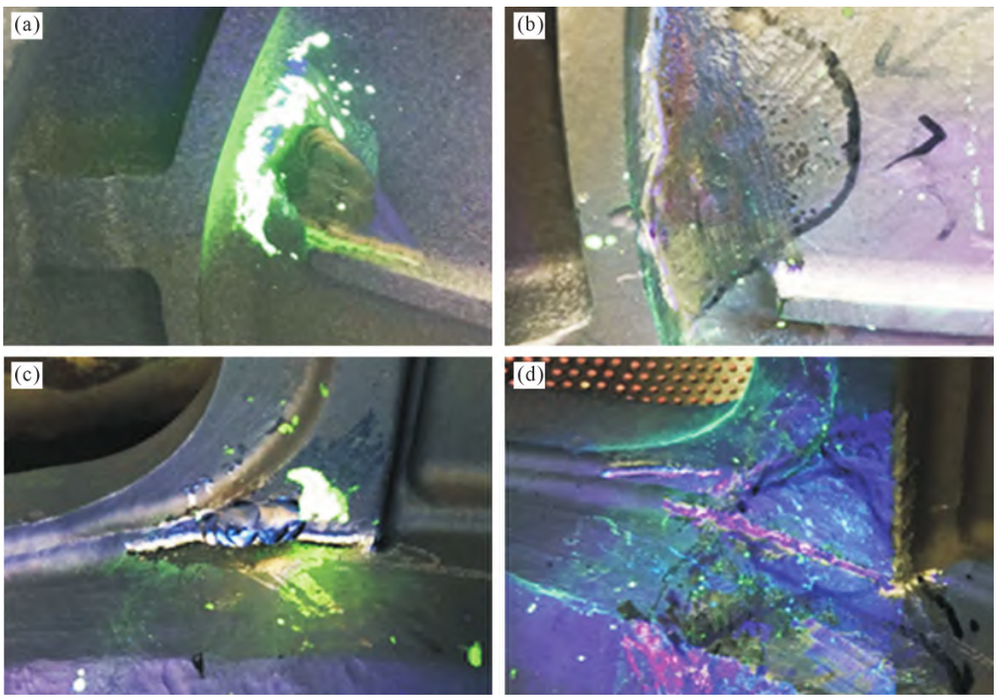


图 10　铸件圆弧盖：(a) 外侧焊接前；(b) 外侧焊接后；(c) 内侧焊接前；(d) 内侧焊接后

Fig.10　Casting arc cover: (a) before external welding; (b) after external welding; (c) before internal welding; (d) after inner welding

(4)补焊工艺　开发了适合 ZTi55A 铸件的补焊工艺，包括焊前预热、慢速焊接、焊后缓慢冷却和超声去应力处理。这些工艺的优化有效降低了焊接应力和残余应力，避免了焊接过程中的裂纹产生，确保了铸件的完整性和可靠性。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.
LYU Z G. History and development trend of investment casting industry in China[J]. Foundry, 2012, 61(4): 347-356.

[3] 南海，谢成木，魏华胜，林汉同. 大型复杂薄壁类钛合金精铸件的研制[J]. 中国铸造装备与技术，2001(2): 12-14.
NAN H, XIE C M, WEI H S, LIN H T. The study of large thin-wall complex integrated titanium precision casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2001(2): 12-14.

[4] 陆子川，张绪虎，微石，纪玮，温涛. 航天用钛合金及其精密成形技术研究进展[J]. 宇航材料工艺，2020, 50(4): 1-7.
LU Z C, ZHANG X H, WEI S, JI W, WEN T. Research progress of titanium alloys and relevant precision forming technology for the aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(4): 1-7

[5] 宋德福，赵丹. 航空发动机外涵机匣轻量化设计研究[J]. 燃气涡轮试验与研究，2023, 36(3): 57-62.
SONG D F, ZHAO D. Light-weight techniques for aero-engine bypass duct[J]. Gas Turbine Test and Research, 2023, 36(3): 57-62.

[6] 杨小兵. 航空发动机的现状与发展[J]. 中国航务周刊，2021(45): 58-59.
YANG X B. Status and Development of aero engines [J]. China Shipping Gazette, 2021(45): 58-59.

[7] 项征. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成型技术[J].轻合金加工技术，2024, 52(1): 1-6.
XIANG Z. Precision casting Technology of large and complex titanium alloy thin-walled parts[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2024, 52(1): 1-6.

[8] 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 large complex titanium alloy base[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 69-72.

[9] 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 platetitanium alloy casting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 959-966.

[10] 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.

[11] 张铭杰. 钛合金中介机匣浇注系统设计与快速熔模精密铸件解剖分析[D]. 上海：上海交通大学，2022.
ZHANG M J. Design of gating system and anatomical analysis of titanium alloy intermediate casing prepared by rapid investment casting process [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.

中国知网　https://www.cnki.net

[12] 朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.
ZHU X P. Research on integral casting technology of large weight and high precision complex titanium alloy casing [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[13] 程亚珍,李渤渤,孙冰,杜延乐,孙宏喆,刘茵琪. 薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(6): 780-784.
CHENG Y Z, LI B B, SUN B, DU Y L SUN H Z, LIU Y Q. Numerical simulation and process opttimization of investment casting process for thin-walled complex titanium alloy casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6): 780-784.

[14] 孙冰,刘义辉,乔海滨,孙宏喆,杨学东. 水溶蜡芯在钛合金精铸件生产中的应用[J]. 铸造技术,2022, 43(6): 468-472.
SUN B, LIU Y H, QIAO H B, SUN H Z, YANG X D. Application of water-soluble wax core in the production of titanium alloy investment casting[J]. Foundry Technology, 2022, 43(6): 468-472.

[15] 魏寿庸,贾栓孝,王鼎春,高颀. 550 ℃高温钛合金的性能[J]. 钛工业进展,2000(2): 25-29.
WEI S Y, JJA S X, WANG D C, GAO Q. Properties of 550 ℃ high temperature titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2000(2): 25-29.

[16] 张尚洲,刘高峰,王广东,刘子全,杨锐. 碳对高温钛合金组织稳定性的影响[J]. 材料热处理学报,2009, 30(5): 149-153.
ZHANG S Z, LIU G F, WANG G D, LIU Z Q, YANG R. Effect of Carbon on microstructure stability of high temperature titanium alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(5): 149-153.

[17] 王恺婷. 高温钛合金的发展与应用[J]. 世界有色金属,2021(14): 21-22.
WANG K T. Development and application of high temperature titanium alloys[J]. World Nonferrous Metals, 2021(14): 21-22.

[18] 刘莹莹,陈子勇,金头男,柴丽华. 600 ℃高温钛合金发展现状与展望[J]. 材料导报,2018, 32(11): 1863-1869, 1883.
LIU Y Y, CHEN Z Y, JIN T N, CHAI L H. Present situation and prospect of 600 ℃ high-temperature titanium alloys [J]. Materials Reports, 2018, 32(11): 1863-1869, 1883.

[19] ALLAHVERDIZADEH N, GILIOLI A, MANES A, GIGLIO M. An experimental and numerical study for the damage characterization of a Ti-6AL-4V titanium alloy[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 93: 32-47.

[20] 戚英伟,陈宏燃,王祥贺,谢洪志,付和国,赵天章. TC4 钛合金的高温变形行为及损伤机理研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(4): 8-14.
QI Y W, CHEN H H, WANG X H, XIE H Z, FU H G, ZHAO T Z. High temperature deformation behavior and damage mechanism of TC4 titanium alloy[J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2024, 47(4): 8-14.

中国知网 https://www.cnki.net