DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4060

ZTC4钛合金复杂薄壁件铸造过程收缩与变形模拟及尺寸控制

丁　雪,张　洋,吴东辉,白雪松
(航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司,黑龙江 哈尔滨 150028)

摘　要:针对钛合金薄壁件铸造工艺中普遍存在的由于内部结构差异引发的不均匀金属收缩,进而导致铸件尺寸难以精确控制的关键问题,利用华铸CAE软件进行了深入分析。通过数值模拟预测了在石墨铸造过程中钛合金薄壁件的具体变形量,并基于此数据,提出了通过预先在设计阶段增加补正量的方法来平衡铸造收缩的影响。数据结果显示,通过预先设计补正量的方式可以保证尺寸精度达到CT7,预变形控制后的变形量在-0.250~0.315 mm之间,整体呈正态分布,变形量为0.035 mm,约占35%。而变形量为-0.250和0.315 mm的区域累计不足2%,整体变形量小,且变形量相差小。通过实施该方法,成功解决了钛合金薄壁铸件在生产过程中出现的尺寸超差问题,提高了铸件尺寸精度和产品质量,从而推动了高端钛合金薄壁铸件在航空航天、医疗器械等领域的大规模应用和工业化进程。

关键词:ZTC4;石墨铸造;数值模拟;补正收缩

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0967-08

Shrinkage and Deformation Simulation and Size Control of ZTC4 Titanium Alloy Complex Thin-wall Casting Process

DING Xue, ZHANG Yang, WU Donghui, BAI Xuesong
(HIWING (Harbin) Titanium Industry Co., Ltd., Harbin 150028, China)

Abstract: To address the critical issue prevalent in the casting process of thin-walled titanium alloy components, where uneven metal shrinkage caused by internal structural discrepancies leads to challenges in precisely controlling the dimensions of castings, an in-depth numerical simulation analysis was conducted using Huazhu CAE software. The specific deformation of thin-walled titanium alloy parts during graphite casting was predicted via numerical simulation.Based on the data, an innovative approach was proposed to counterbalance the effect of casting shrinkage by incorporating compensatory volumes at the design stage beforehand. The results indicate that adopting this predesign compensation strategy enables dimensional accuracy to meet CT7 standards, with deformations ranging from -0.250 to 0.315 mm after predeformation, generally following a normal distribution. A deformation of 0.035 mm is the most common, accounting for approximately 35% of the cases, while regions with deformations of -0.250 and 0.315 mm cumulatively represent less than 2%, indicating minimal overall deformation with narrow variation. The implementation of this method successfully resolves the dimension tolerance issues encountered during the production of titanium alloy thin-wall castings, enhancing both the dimensional precision and product quality. Consequently, it has facilitated the large-scale application and industrialization of high-end titanium alloy thin-wall castings in sectors such as aerospace and medical equipment.

Key words: ZTC4; graphite casting; numerical simulation; compensatory contraction

钛合金凭借其高比强度、耐高温、抗断裂和耐腐蚀等性能,在航空航天、石油化工、医疗植入等领域广泛应用[1-7]。特别是在航空、航天及光电行业中,对ZTC4钛合金薄壁件的需求日益增长[8-11]。然而,由于钛合金薄壁件在冷却过程中各部分收缩差异明显,导致铸件尺寸难以精确控制,成为制约其广泛应用的技术瓶颈[12-14]。

传统经验方法对钛合金铸造收缩量的控制存在

收稿日期:2024-03-25

作者简介:丁　雪,1997年生,助理工程师.主要从事钛合金及高温合金铸造工艺研究方面的工作.Email:19s109246@stu.hit.edu.cn
通讯作者:吴东辉,1988年生,高级工程师.主要从事钛合金及高温合金铸造工艺研究方面的工作.Email:wudonghui56@163.com

引用格式:丁雪,张洋,吴东辉,白雪松.ZTC4钛合金复杂薄壁件铸造过程收缩与变形模拟及尺寸控制[J].铸造技术,2024,45(10):967-974.
DING X, ZHANG Y, WU D H, BAI X S. Shrinkage and deformation simulation and size control of ZTC4 titanium alloy complex thin-wall casting process[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 967-974.

中国知网　https://www.cnki.net

耗时、成本高且精度受限的问题。近年来，随着数值模拟技术的进步，特别是有限元方法在铸造过程再现方面的应用，为解决这一难题提供了新的途径。楚玉东等[15]采用数值模拟方法研究 ZTC4 合金机匣离心铸造的充型和凝固过程，分析了离心转速、浇铸温度和铸型预热温度对熔体充填过程流动场、凝固过程温度场和应力场的影响，并预测了缺陷的分布。韩大平等[16]运用 ProCAST 软件对一种大型薄壁机匣件的铸造工艺方案进行数值模拟，根据模拟结果，经过优化设计，较好地避免了铸造缺陷的产生，提高了机匣成品率。崔新鹏等[17]基于 ProCAST 软件对框架型钛合金铸件铸造过程中的温度场、应力场及铸造变形进行了数值模拟，验证了数值模拟的准确性。徐达鸣等[18]模拟了 TC4 的充型过程和温度场，模拟结果与实验结果基本相符，并通过模拟结果改变离心转动方向和浇道设置，改进了浇注工艺，得到了质量较好的铸件。付景宇[19]采用机加工石墨型铸造工艺，结合模拟仿真对铸件浇注凝固过程和内部缺陷进行分析预测，确定了 ZTA5 钛合金框形底座铸件的浇注系统设计和浇注参数，经熔炼浇注、热等静压和真空去应力退火，研制出合格铸件。程亚珍等[20]利用数值模拟技术对某薄壁复杂钛合金铸件的温度场、应力场进行了模拟，确定了适合于生产该铸件的铸造工艺。李超[21]模拟了 Ti-6Al-V 应力框铸件的应力与变形，并实际测量了钛合金与铸型之间的换热系数，其结果与实际相符。

聚焦于大型薄壁复杂 ZTC4 钛合金铸件在铸造过程中因收缩差异导致的变形及尺寸超差问题，鉴于现有研究中直接针对钛合金铸件变形情况的数值模拟分析相对较少，提出运用数值模拟方法精确计算 ZTC4 薄壁复杂铸件铸造收缩量，并在此基础上设定工艺补正量，以期实现对铸件变形及尺寸误差的有效控制，从而为解决航天航空等领域对精密复杂薄壁钛合金铸件严格的尺寸精度需求提供技术支持和实践指导。

1 浇注过程有限元模型

1.1 数学模型

铸造充型过程是伴随热交换及凝固的非恒温流动过程。在这个过程中，金属液的流动遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。即：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho\bar{v})=0 \tag{1}$$

式中，ρ 为密度；$\bar{v}$ 为流体速度；∇ 为矢量微分算子。

$$\rho\frac{\partial \bar{v}}{\partial t}=-\nabla P-\nabla\bar{\tau}+\rho\bar{G} \tag{2}$$

式中，$\bar{v}$ 为速度矢量；ρ 为密度；P 为压力；$\bar{G}$ 为重力；$\bar{\tau}$ 为应力张量。

$$\frac{de}{dt}+P\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{\rho}\right)=\frac{1}{\rho}div(\lambda iv(\lambda g))+\frac{\phi}{\rho} \tag{3}$$

式中，e 为流体的动能；ϕ 为耗函数；ϕ/ρ 为由内部表面应力对液体做功而产生的热量，等号的右端是单位时间内传给单位质量液体的热量。

1.2 铸件模型

图 1 为 ZTC4 钛合金薄壁安装支架，整体尺寸为 400 mm×474 mm×224 mm，最薄壁处为 2 mm，最厚处为 37 mm。结构复杂产品精度较高，铸造等级需达到 CT7。该安装支架在铸造过程中存在以下工艺技术难点：①壁厚极小，存在充不满的隐患；②方形孔结构较多，变形可能性较大。针对以上技术难点，采取底注式浇注，以保证充型平稳、充填效果良好，浇注系统结构如图 2 所示。

1.3 有限元模型

采用有限元分析方法模拟 ZTC4 钛合金安装支架的铸造过程。图 3 为安装支架网格划分示意图，网格数量为 100 626 个。采用重力浇注方式，浇注温度为 1 700 ℃，浇注速度设定为 5.5 kg/s。铸造方式采用石墨型铸造，石墨型壳厚度设为 25 mm，型壳预热温度为 200 ℃，铸型与金属液之间的换热系数设定为 450 W/(m^2·℃)。

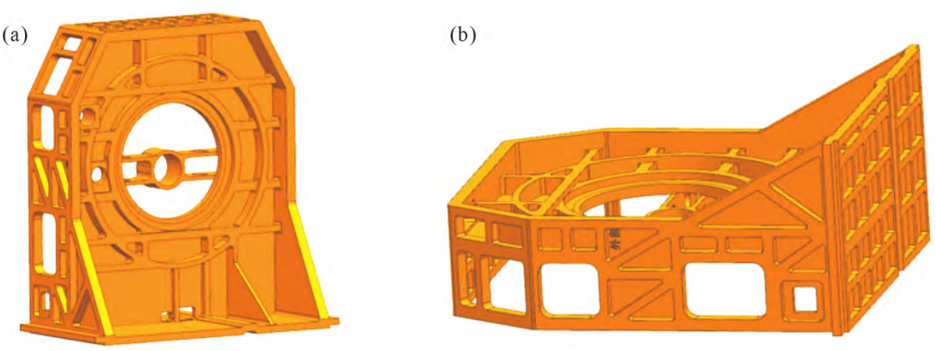

图 1 安装支架结构示意图：(a)主视图；(b) 侧视图

Fig.1 Schematic diagram of the installation bracket structure: (a) front view; (b) profile view

中国知网 https://www.cnki.net

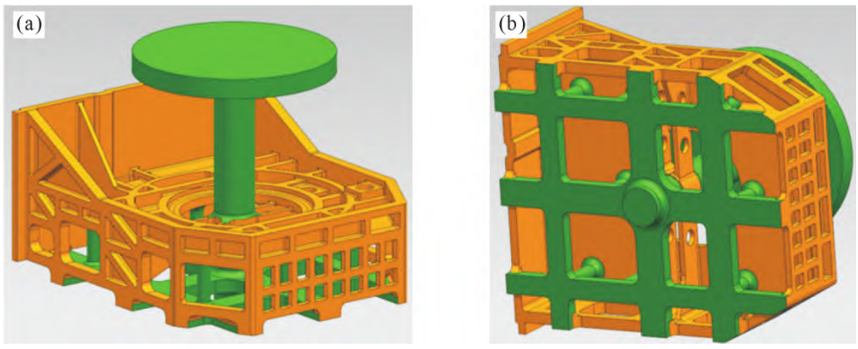

图 2 安装支架浇注系统：(a) 主视图；(b) 侧视图

Fig.2 Schematic diagram of the pouring system for installing the bracket: (a) front view; (b) profile view

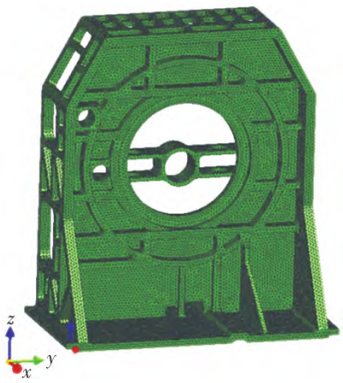

图 3 安装支架网格划分

Fig.3 Schematic diagram of grid division for installation bracket

2 有限元模拟结果分析

2.1 充型过程有限元模拟

经数值模拟计算得到如图 4 所示的 ZTC4钛合金结构件充型过程示意图。从图中可以看出，金属液流经横浇道后在压力差作用下逐步向上充填，呈逐层充填态势。金属液稳定流动，充填状态极其平稳，充填效果良好。

2.2 凝固过程的有限元模拟

图 5 为 ZTC4 钛合金结构件各部位凝固所需时间。如图所示，当固相分数为 8.7%时，ZTC4 钛合金结构件薄壁框架外表面由于散热速度高于其他部位，所以优先开始凝固，随着时间的推移，固相分数增加，薄壁框架外表面凝固面积逐步扩大。直到固相分数为 46.1%时，薄壁处外表面已实现全部凝固，剩余壁厚突变连接处尚未凝固，固相分数升至 76.4%时，结构件部分实现全部凝固。在整个凝固过程中，结构件本身始终都有来自浇注系统中横浇道的金属液补充，能够实现很好的补缩效果，所以无明显的固液两相区。

2.3 变形过程的有限元模拟

图 6 为 ZTC4 钛合金结构件因收缩导致变形的模拟结果。如图所示，结构件变形量较为均匀，同一平面内的变形量最大偏置小于 0.3 mm，且都集中在壁厚突变处。整体而言，安装支架各部位之间变形量差异较大，但同一壁厚区域变形差异量小。

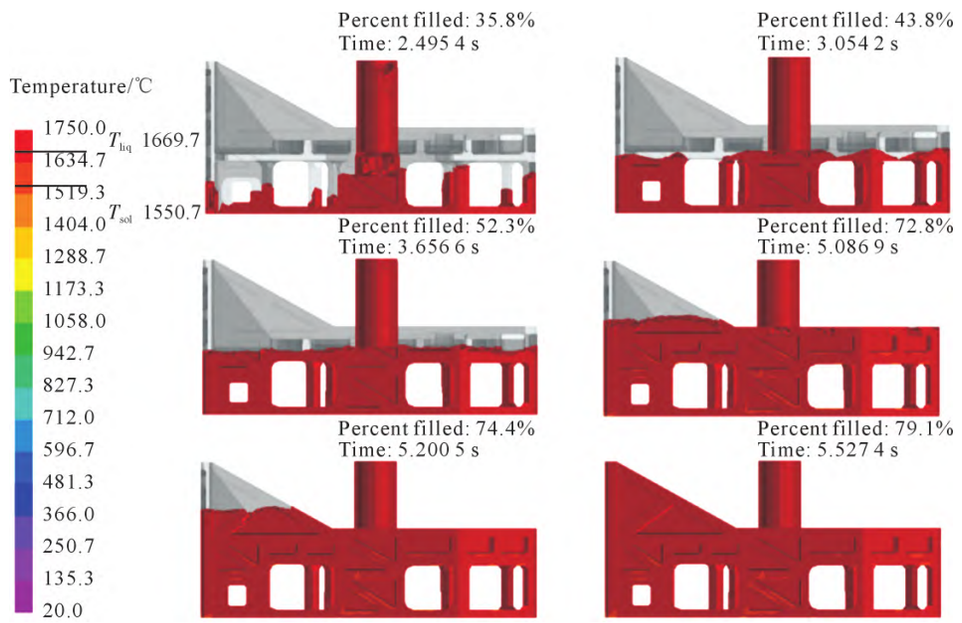

图 4 安装支架充型过程

Fig.4 Schematic diagram of the filling process of the installation bracket

中国知网　https://www.cnki.net

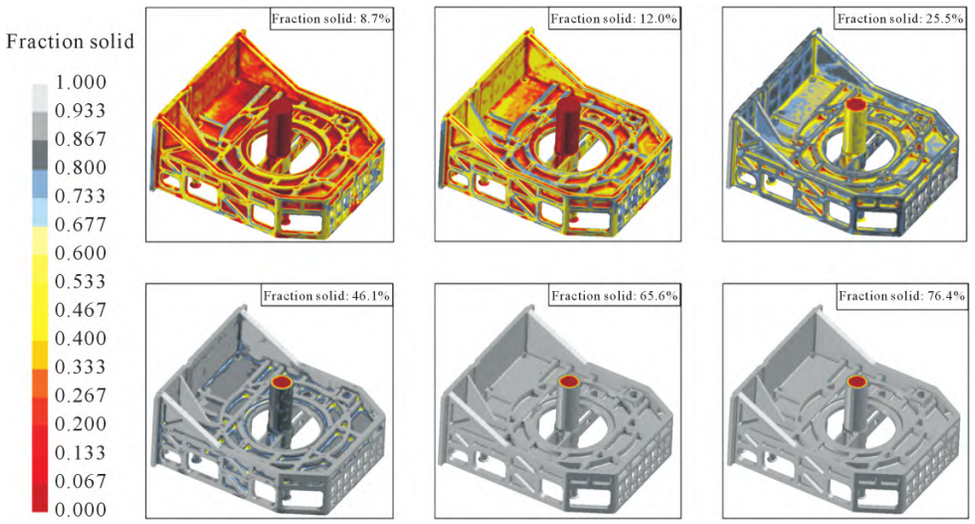

图 5 安装支架凝固过程

Fig.5 Schematic diagram of the solidification process of the installation bracket

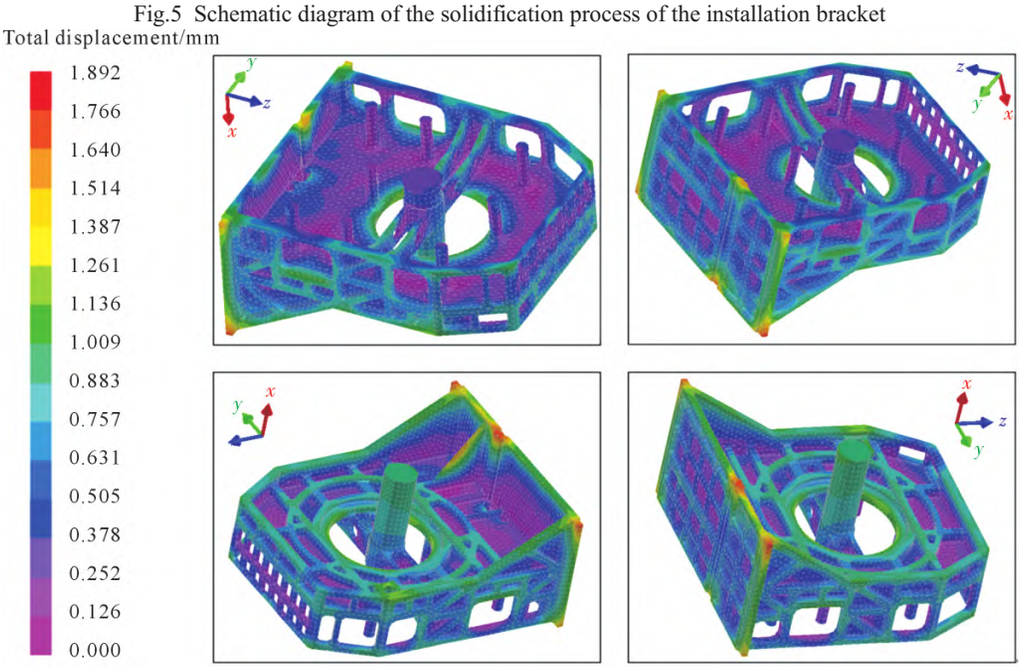

图 6 安装支架变形结果

Fig.6 Schematic diagram of the deformation results of the installation bracket

为更具针对性、更精准地计算分析安装支架各部位的变形量，自主确定几个示例面加以分析说明。标定面如图 7 所示，箭头所指部位即代表该颜色所覆盖的平面区域，共选定了 A-A、B-B、C-C、D-D、E-E、F-F、G-G、H-H 8 个平面区域，其中 A-A 平面壁厚为 8 mm、面积 86 484 mm^2，B-B 平面壁厚为 28.5 mm、面积 21 931 mm^2，C-C 平面壁厚为 21.5 mm、面积 9 139 mm^2，D-D 平面壁厚为 37 mm、面积 1 010 mm^2，E-E 平面壁厚为 2 mm、面积 46 882 mm^2，F-F 平面壁厚为 2 mm、面积 2 136 mm^2，G-G 平面壁厚为 10 mm、面积 19 891 mm^2，H-H 平面壁厚为 11.5 mm、面积为 30 479 mm^2。

首先计算分析 A-A、B-B、C-C、D-D 4 个平面区域，在 4 个平面上选取特征点，选取结果如图 8 所示，分别为 A-A 平面上的网格点 #10008、#12174、#30339、#42077；B-B 平面上的网格点 #16171、#20152、#35339；C-C 平面上的网格点 #3444、#16582、#31763；D-D 平面上的网格点 #26163、#26494、#28909。

根据图 8 所选定的网格特征点，绘制特征点随温度变化曲线图 9。从曲线图中，可以发现，随着温度的降低，变形量逐渐增大。图 9a 所示的 A-A 平面中包含的 4 种色域代表值分别为 0.517 794、0.421 122、0.315 906 和 0.173 329 mm，变形量最大偏差$\Delta_{(A\text{-}A)max}$=0.344 465 mm；B-B 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 0.929 085、0.830 943 和 0.726 336 mm，变形量最大偏差 $\Delta_{(B\text{-}B)max}$=0.202 749 mm；C-C 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 0.981 257、0.825 926 和

中国知网 https://www.cnki.net

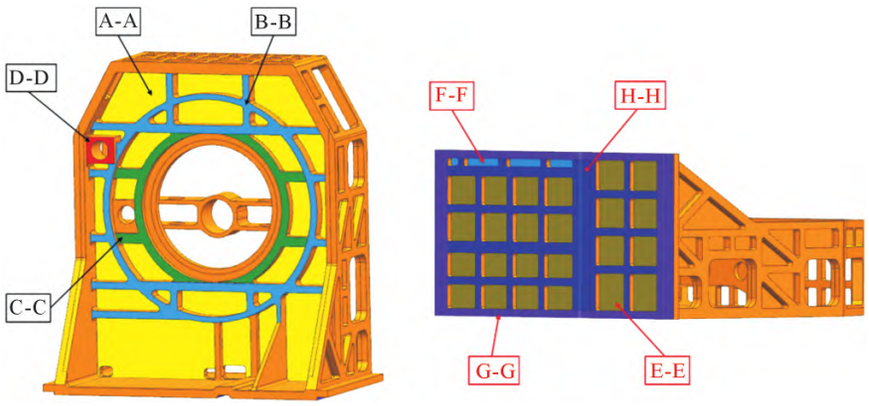

图 7　安装支架标定面

Fig.7　Schematic diagram of the calibration surface of the installation bracket

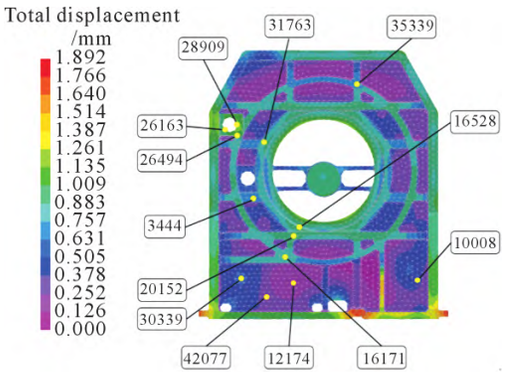

图 8　安装支架标定面所选特征点

Fig.8　Schematic diagram of selected feature points on the calibration surface of the installation bracket

0.711 814 mm，变形量最大偏差$\Delta_{(C\text{-}C)max}$=0.269 443 mm；D-D 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 1.171 15、1.083 59 和 0.981 836 mm，变形量最大偏差 $\Delta_{(D\text{-}D)max}$=0.189 314 mm。可得出，平面面积越大，变形量最大偏差 Δ_{max} 越大；壁厚越大，变形量越大。

其次计算分析 E-E、F-F、G-G、H-H 4 个平面区域，在 4 个平面上选取特征点，选取结果如图 10 所示，分别为 E-E 平面上的网格点 #29849、#34969 和 #44109；F-F 平面上的网格点 #14310、#19271、#32642；G-G 平面上的网格点 #7052、#17814、#18734、#21455、#27380、#31375、#42451；H-H 平面上的网格点#13665、#17768 和 #23919。

根据图 10 所选定的网格特征点，绘制特征点随温度变化曲线图 11。从曲线图中可以发现，图 11a 所示的 E-E 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 0.429 927、0.305 737、0.171 714 mm，变形量最大偏差 $\Delta_{(E\text{-}E)max}$=0.258 213 mm；F-F 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 0.637 019、0.660 341 和 0.611 631 mm，变

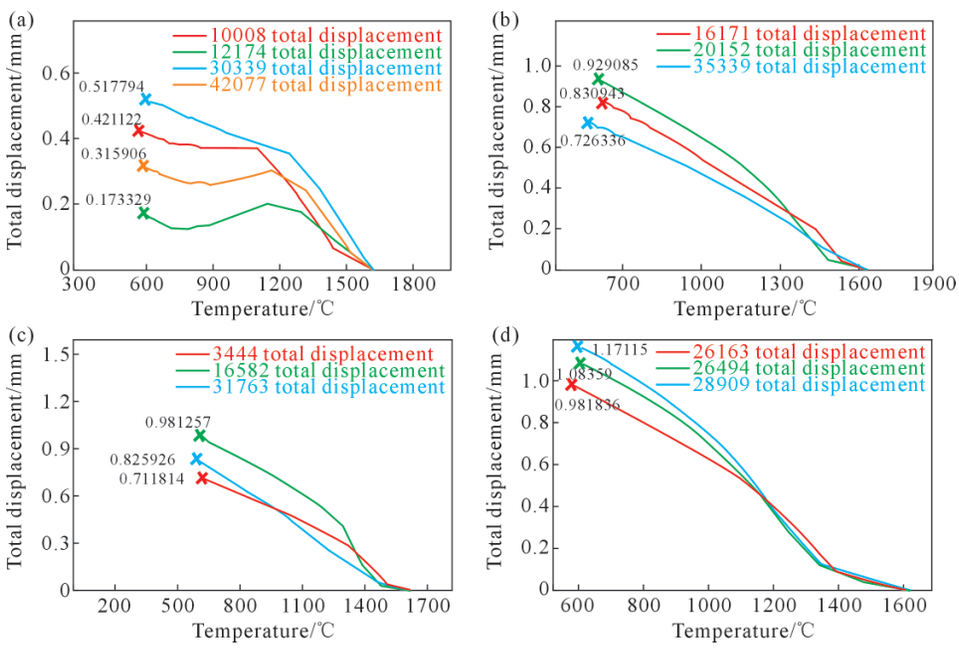

图 9　安装支架标定面所选特征点变形量：(a) A-A 平面；(b) B-B 平面；(c) C-C 平面；(d) D-D 平面

Fig.9　Schematic diagram of the deformation of the selected feature points on the calibration surface of the installation bracket: (a) A-A plane; (b) B-B plane; (c) C-C plane; (d) D-D plane

中国知网　https://www.cnki.net

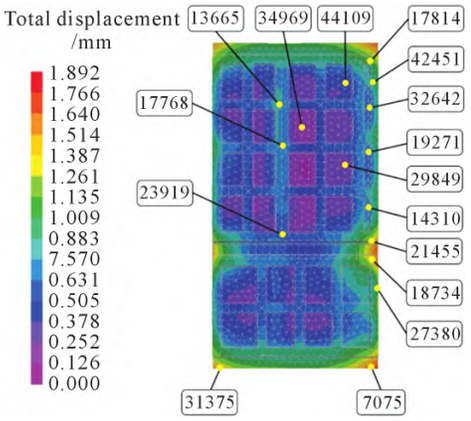

图 10 安装支架标定面所选特征点

Fig.10 Schematic diagram of selected feature points on the calibration surface of the installation bracket

形量最大偏差 $\Delta_{(F\text{-}F)max}$=0.025 388 mm；G-G 平面中包含的7 种色域代表值分别为 1.65937、1.427 22、1.404 01、1.313 58、1.149 48、1.111 346、0.887 628 mm，变形量最大偏差 $\Delta_{(G\text{-}G)max}$=0.771 742 mm；H-H 平面中包含的 3 种色域代表值分别为 0.774 64、0.699 911 和 0.591 479 mm，变形量最大偏差$\Delta_{(H\text{-}H)max}$=0.183 161 mm。可得出，平面自由度越大，变形量最大偏差 Δ_{max} 越大。

最后按照同样方法计算出结构件其他区域平面变形量，以得到安装支架变形情况的量化结果。

3 预变形控制与测量对比

3.1 预变形控制

在第二节中通过选取结构件的特征平面，加之模拟结果可视化，计算分析得出了特征平面的变形量。为有效、精准控制 ZTC4 钛合金结构件因金属液收缩导致的变形问题，现采用添加补正量的方式加以解决，补正量的多少由铸件模拟变形结果来确定。因金属收缩导致的变形量多少即是补正量的大小，由于同一平面的不同区域变形量不同，本文采用加权平均数的方法确定最终的补正量。加权平均数公式为：

$$\bar{l}=\frac{l_1f_1+l_2f_2+\cdots+l_nf_n}{f_1+f_2+\cdots+f_3} \tag{4}$$

式中，l_n 为不同区域的变形量；f_n 为同一变形量所占有的权数。

以 A-A 平面为例，变形量为 0.517 794 mm 的区域所占网格数约为 36 个，变形量为 0.421 122 mm的区域所占网格数约为 412 个，变形量为 0.315 906 mm 的区域所占网格数约为 706 个，变形量为 0.173 329 mm 的区域所占网格数约为 653 个。则 A-A 平面的补正量为：

$$\bar{l}_{A\text{-}A}=\frac{0.517\ 794\times36}{36+41+706+653}+\frac{0.421\ 122\times412}{36+41+706+653}+\frac{0.315\ 906\times706}{36+41+706+653}+\frac{0.173\ 329\times653}{36+41+706+653}$$

=0.29 mm

以此类推，计算得出结构件剩余平面的补正量。

3.2 测量对比

经实际浇注试验得到 ZTC4 钛合金安装支架铸件产品，为评估预变形控制效果，将实际铸件产品与

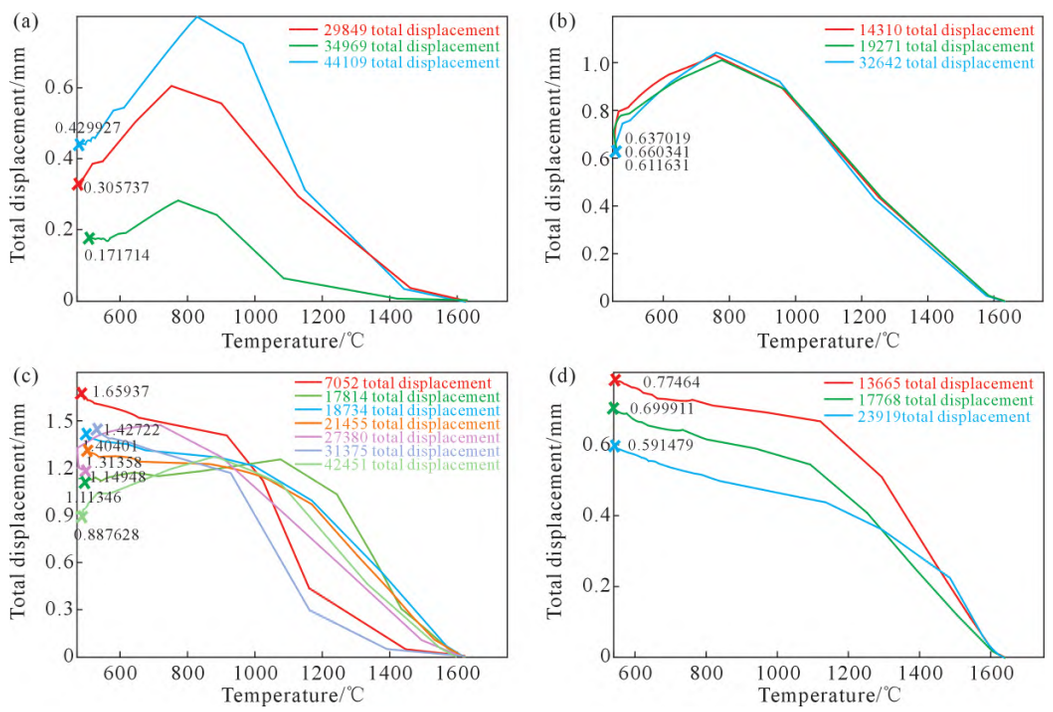

图 11 安装支架标定面所选特征点变形量：(a) E-E 平面；(b) F-F 平面；(c) G-G 平面；(d) H-H 平面

Fig.11 Schematic diagram of the deformation of the selected feature points on the calibration surface of the installation bracket: (a) E-E plane; (b) F-F plane; (c) G-G plane; (d) H-H plane

中国知网 https://www.cnki.net

安装支架零件图模型进行三维尺寸对比，对比结果如图 12 所示。从对比结果可以看出，预变形控制效果良好，整体精度满足铸造要求公差 CT7。

变形量数据整合后，可得出安装支架铸件产品的变形量偏差分布柱形图 13。从图中可以看出，预变形控制后的变形量在 -0.250~0.315 mm 之间，整体呈正态分布，变形量为 0.035 mm 居多，约占 35%，而变形量为 -0.250 和 0.315 mm 的区域累计占比不足 2%，整体变形量小，且变形量相差小。

4　结论

(1)经过对钛合金安装支架进行详细的有限元数值模拟分析，成功再现了冷却过程中的应力应变分布状态，从而精确地模拟了支架从液态凝固到室温下冷却整个过程中产生的几何变形特征。

(2)运用数值模拟分析手段，结合实际生产经验，引入补正量的概念，即在铸型设计阶段预先考虑到金属收缩率的影响并施加反向补偿措施。通过这种方式，在模拟环境下对铸件凝固收缩过程进行仿真，并据此调整模具设计或工艺参数，铸件尺寸精度达到 CT7，预变形控制后的变形量在 -0.250~0.315 mm 之间，有效地实施了对铸件产品的预变形控制。

(3)为获得最贴近实际情况的补正量，采用了加权平均公式来整合多种影响因素，包括但不限于不同的温度场模拟结果、材料特性参数的变化、以及历史生产数据中的统计偏差。通过综合考虑这些因素并赋予相应的权重，计算得到的补正量更为贴切和稳健，结果较为准确地反映了 ZTC4 钛合金安装支架的变形情况，为实际预变形控制提供了数据支撑。

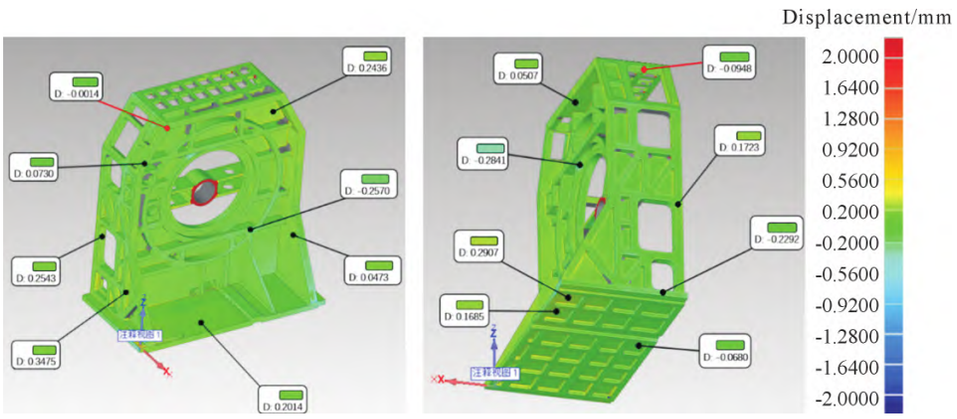

图 12　安装支架预变形控制结果

Fig.12　Schematic diagram of the pre-deformation control results of the installation bracket

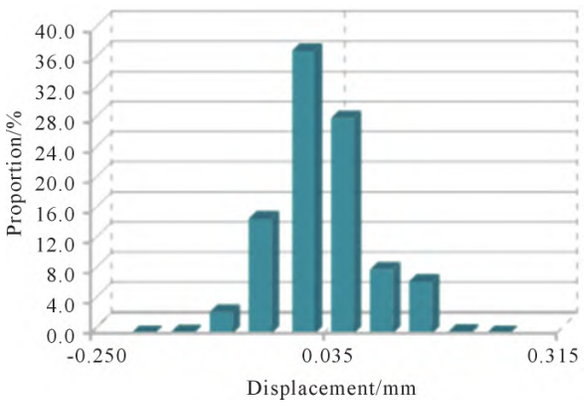

图 13　安装支架变形量偏差分布

Fig.13　Distribution diagram of the deformation deviation of the installation bracket

参考文献：

[1] BALASUNDAR I, RAVI K R, RAGHU T. On the high temperaturedeformation behaviour of titanium alloy BT3-1 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 135-145.

[2] LIN Y C, TANG Y, ZHANG X Y, CHEN C, YANG H, ZHOU K C. Effects of solution temperature and cooling rate on microstructure and micro-hardness of a hot compressed Ti-6Al-4V alloy[J]. Vacuum, 2019, 159: 191-199.

[3] 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 for large and complex titanium alloy thin-walled parts[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2024, 52(1): 1-6.

[4] ZHAO Q Y, YANG F, TORRENS R, BOLZONI L. Evaluation of the hotworkability and deformation mechanisms for a metastable beta titanium alloy prepared from powder[J]. Materials Characterization, 2019, 149: 226-238.

[5] 李银标，刘泰达. 铸造 TC4 钛合金的组织与性能研究[J]. 热加工工艺，2022, 51(21): 65-68.
LI Y B, LIU T D. Study on microstructure and properties of casting TC4 titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(21): 65-68.

[6] 杨冠军，赵永庆，邓炬，周廉. 高温钛合金研究现状与发展趋势[A]. 2000 年材料科学与工程新进展(下)——2000 年中国材料研讨会论文集[C]. 北京：冶金工业出版社，2000. 952-957.
YANG G J, ZHAO Y Q, DENG J, ZHOU L. Research status and development trend of high temperature titanium alloy[A]. The New

中国知网　https://www.cnki.net

Progress on Material Science and Engineering 2000-Symposia Proceedings of C-MRS [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. 952-957.

[7] LIU C Y, TANG Z A, YANG S, LIU W W, LU Y D. Machinability of ZTC4 titanium alloy analysis using finite element simulation and milling experiment[J]. Key Engineering Materials, 2011, 474-476: 633-638.

[8] JIANG Y Q, LIN Y C, JIANG X Y, HE D G, ZHANG X Y, KOTKUNDE N. Hot tensile properties, microstructure evolution and fracture mechanisms of Ti-6Al-4V alloy with initial coarse equiaxed phases[J]. Materials Characterization, 2020, 163: 110272.

[9] ZHANG L C, CHEN L Y. A review on biomedical titanium alloys: Recent progress and prospect [J]. Advanced Engneering Materials, 2019, 21(4): 1801215.

[10] 霍东兴,梁精龙,李慧,谢珊珊,杨宇. 钛合金研究及应用进展[J]. 铸造技术,2016, 37(10): 2065-2066, 2080.
HUO D X, LIANG J L, LI H, XIE S S, YANG Y. Progress of research and application of titanium alloy [J]. Foundry Technology, 2016, 37(10): 2065-2066, 2080.

[11] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究[J]. 飞航导弹, 2002(7): 50-60.
CAO Y H. Research on the application of titanium alloy forming process in cruise missile[J]. Aerospace Techology, 2002(7): 50-60

[12] 杨阳,杨晶,白培康,任晓燕. U 形铸件应力应变数值模拟及反变形研究[J]. 铸造技术,2013, 34(4): 462-464.
YANG Y, YANG J, BAI P K, REN X Y. Numerical simulation on strain and stress in U-shaped castings and study on reversible deformaion[J]. Foundry Technology, 2013, 34(4): 462-464.

[13] 苏俊明,施立军,赵文华,张帅,方刚. 等温热成形钛合金零件尺寸精确控制方法[J]. 塑性工程学报,2023, 30(3): 39-45.
SU J M, SHI L J, ZHAO W H, ZHANG S, FANG G. Precise control method of dimension of isothermal hot formed titanium alloy parts[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(3): 39-45.

[14] 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): 137-146.
RAN X, LYU Z G, CAO J, LI P J. Investment casting technologies for large complex titanium alloy parts [J]. Foundry, 2021, 70(2): 137-146.

[15] 楚玉东,常辉,黄东,南海,钟宏,赵亚利,李金山. ZTC4 钛合金机匣构件离心铸造过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(2): 133-136.
CHU Y D, CHANG H, HUANG D, NAN H, ZHONG H, ZHAO Y L, LI J S. Numerical simulation of centrifugal casting process of ZTC4 Ti alloy case[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(2): 133-136.

[16] 韩大平,杨武,彭志江,冯文刚,周文亮,徐博. 基于 ProCAST 的大型薄壁机匣件整体熔模铸造工艺研究[J].铸造,2013, 62(10): 979-982.
HAN D P, YANG W, PENG Z J, FENG W G, ZHOU W L, XU B. Process optimization of whole investment casting of large thin-wall cartridge receiver based on ProCAST software [J]. Foundry, 2013, 62(10): 979-982.

[17] 崔新鹏,张晨,范世玺,南海. 钛合金框架铸件铸造变形和应力的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2015, 35(3): 257-259.
CUI X P, ZHANG C, FAN S X, NAN H. Numerical simulation of casting deformation and stress in the Ti-alloy parts with framework structure [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35 (3): 257-259.

[18] 徐达鸣,王军新,孙小波,郭景杰,安阁英,贾均. Ti-6AL-4V 熔模精密铸造充型及凝固过程计算机模拟[J]. 材料科学与工艺, 1999 (S1): 6-11, 16.
XU D M, WANG J X, SUN X B, GUO J J, AN G Y, JIA J. Computer simulation for mold filling and solidification processes in precision casting of Ti-6Al-4V alloys [J]. Materials Science and Technology, 1999(S1): 6-11, 16.

[19] 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.

[20] 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, LILU Y Q. Numerical simulation and process optimization of investment casting process for thin-walled complex titanium alloy casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6): 780-784.

[21] 李超. 钛合金铸件应力的测量与数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
LI C. Numerical simulation and measurement of stress field about Ti-6Al-4V casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

中国知网 https://www.cnki.net