离心熔模铸造大型复杂薄壁 ZTC4 钛合金机匣铸件残余应力特征及调控

陈义斯[1]，冯　骞[2]，冉　兴[3]，李义军[4]，宋宏宝[4]，何良菊[5]，李培杰[2]

（1. 清华大学机械工程系，北京 100084；2. 四川航天长征装备制造有限公司，四川成都 610100；3. 中航重机股份有限公司，贵州贵阳 550005；4. 航空工业贵州安吉精密铸造有限责任公司，贵州安顺 561000；5. 清华大学航天航空学院，北京 100084）

摘要：大型复杂薄壁钛合金机匣铸件在离心熔模铸造及后续热加工过程中易产生高值残余应力，影响尺寸精度与服役安全。本课题对比X射线衍射法与钻孔应变释放法，评价了应力测试方法在大型钛合金铸件上的适用性，系统研究了铸态、热等静压（HIP）、补焊、退火及热矫形全流程的残余应力演变规律。结果表明，铸件表面粗晶组织导致X射线衍射法测量偏差大、数据离散，不适合该类铸件；钻孔应变法测试稳定可靠，可作为标准检测手段。铸件初始应力高，分流环等薄壁转接区域可达315 MPa；HIP可部分消除应力，但定型工装会限制变形并产生附加应力；补焊是引入残余应力的最主要工序，热矫形进一步加剧应力不均。采用高频振动与去应力退火均可有效降低应力，其中振动时效消除率约22%，去应力退火消除率可达67%，可将成品铸件应力控制在100 MPa以内，满足航空发动机机匣质量要求。

关键词：钛合金；残余应力；退火；机匣；离心熔模铸造；X射线衍射法；钻孔应变释放法

中图分类号：TG249.4；TG249.5；TG146.2^{+}3　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）09-0988-09

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0125

Residual Stress Characteristics and Control in Large-Scale and Complex Thin-Walled ZTC4 Titanium Alloy Casing Castings via Centrifugal Investment Casting

CHEN Yi-si[1], FENG Qian[2], RAN Xing[3], LI Yi-jun[4], SONG Hong-bao[4], HE Liang-ju[5], LI Pei-jie[2]

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610100, Sichuan, China; 3. Avic Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, Guizhou, China; 4. Aviation Industry Guizhou Anji Precision Casting Co., Ltd., Anshun 561000, Guizhou, China; 5. School of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Large-scale and complex thin-walled titanium alloy casings tend to produce high residual stresses during centrifugal investment casting and subsequent thermal processing, which degrades dimensional accuracy and service safety. In this project, through comparison of the X-ray diffraction and the hole-drilling strain release methods, the applicabilities of the stress measurement methods in the large-scale titanium alloy castings were assessed, and the evolution of residual stress was systematically investigated throughout the full process, including as-cast, hot isostatic pressing (HIP), repair welding, annealing, and hot straightening. The results show that the coarse surface grains of the casting lead to large deviation and scattered data in the X-ray diffraction measurements, making this method unsuitable for such castings; in contrast, the hole-drilling method exhibits stable and reliable performances and can be used as a standard testing technique. The initial residual stresses of the castings are relatively high, reaching 315 MPa at the thin-wall transition regions such as the distribution ring; the HIP can partially relieve the residual stress, but the shaping fixture restricts the deformation and introduces additional stress; the repair welding is the dominant process that introduces residual stresses, while the hot straightening further aggravates the stress inhomogeneity. Both of the high-frequency vibration and the stress relief annealing can effectively reduce residual stress, with the stress reduction

基金项目：旋力超重成形大型复杂钛合金铸件整体精铸理论研究（ZJQT-2024-01）。

收稿日期：2020–05–11 收到初稿，2026–06–21 收到修订稿。

作者简介：陈义斯（1998–），男，博士生，主要从事大型复杂钛合金铸件成形及残余应力调控研究。电话：13340110519，E-mail：chenys23@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者：冉兴，男，博士，研究员级高级工程师。电话：0851-32208022，E-mail：ranxing257@163.com；ranx@avic.com

引用格式：陈义斯，冯骞，冉兴，等．离心熔模铸造大型复杂薄壁 ZTC4 钛合金机匣铸件残余应力特征及调控 [J]. 铸造，2026，75（9）：988–996.

Chen Yisi，Feng Qian，Ran Xing，et al. Residual stress characteristics and control in large-scale and complex thin-walled ZTC4 titanium alloy casing castings via centrifugal investment casting [J]. Foundry，2026，75（9）：988–996.

efficiencies of approximately 22% for the vibration aging and up to 67% for the stress relief annealing, and the residual stress of the finished casting can be controlled within 100 MPa, meeting the quality requirements of aeroengine casings.
Key words: titanium alloy; residual stress; annealing; casing; centrifugal investment casting; X-ray diffraction method; hole-drilling strain release method

钛合金具有轻质高强的特性，广泛应用于航空发动机部件[1]。其中，航空发动机机匣构件具有尺寸大、壁厚差异悬殊、形状复杂的特征[2]。离心熔模铸造工艺能够构建强力场从而驱动金属液充填型腔，促进了大型复杂薄壁钛合金铸件的整体化设计[3-6]。机匣整体结构件外表面光滑，质量轻，在刚度、抗疲劳强度以及各种失稳临界值方面均比螺栓连接、铆接结构高出一筹[3]。然而，在航空发动机机匣这类典型的大型复杂薄壁铸件一体化成形过程中，由于轮廓尺寸大以及铸件厚薄区域过渡急剧，凝固后铸件存在高残余应力的问题。

残余应力会使零部件发生翘曲、变形，甚至开裂，严重影响零部件的服役寿命[1]。研究人员展开了广泛的探索，例如刘珍君等结合Procast有限元仿真和小孔法探究了钛合金中介机匣的残余应力，研究表明支撑处易形成应力集中，浇口和冒口分布区域的应力分布紊乱[7]。此外，张志正等则在钛合金阀板铸件加工过程中检测到裂纹，通过微观表征揭示了该裂纹形成机制为机加和焊接残余应力导致的应力集中开裂[8]。罗军等系统研究了初始残余应力对ZTC4钛合金性能的影响，发现残余拉应力会显著缩短样品疲劳寿命[9]。Amatanweze等采用XRD和DANTE仿真分析了不同淬火方式下的铸件表面残余应力，结果指出裂纹的产生与大范围的拉伸应力集中和微观结构不均匀有关[10]。总之，在铸件的成形及后续热处理过程中易引入表面残余应力，严重影响了铸件在加工及使用过程中的变形和破坏行为[11-13]。为此，研究人员开展了一系列围绕表面应力测试及消除策略的工作。例如，曹学峰等发现铸件残余应力引起了铸后冷裂倾向，通过优化局部造型结构有效地降低了产品残余应力从而减少了开裂报废[14]。顾邦平等采用威廉姆森-霍尔法和钻孔法系统评估了金属位错密度和残余应力情况，指出高频振动可激活材料内部的位错，促进位错的湮灭，降低内部位错密度，通过减少晶格畸变程度的方式缓解了残余应力[15]。胡生双等采用X射线衍射法测量了Ti-4Al-5Mo-5V-6Cr-1Nb在不同退火条件下的残余应力水平，确定了500 ℃ × 1 h退火工艺制度，退火后样品强度变化不大，但峰值应力下降289.5 MPa[16]。

大型复杂熔模铸造机匣铸件成形难度大，浇注系统结构尺寸大，铸造后热工艺阶段多[17]。工艺全流程中的应力状态变化情况复杂，对铸件机加、装配和服役中的尺寸稳定性和安全性有不同程度的影响。为此，本课题以某大型复杂薄壁ZTC4钛合金机匣为研究对象，系统分析X射线衍射法和钻孔应变法测量的可靠性，掌握铸件残余应力状态及分布特征，研究高频振动和退火对不同区域的残余应力释放效率的影响，揭示热工艺过程中铸件残余应力演变行为，为大型钛合金构件的残余应力检测和调控提供工程建议和理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 样件选取及应力状态分析

本课题选用的钛合金机匣铸件结构如图1所示，铸件由内环、外环、分流环及内外环中间六道薄壁支板组成，其中心平面绕铸件中心轴均匀分布，铸件上下端面均设有厚大的环形法兰结构，铸件外侧环面上设置有安装凸台结构，具有典型的大型复杂结构特征。此外，该铸件最大外轮廓尺寸达到Φ920 mm，最大壁厚达30 mm，最小壁厚约为2.5 mm，厚薄壁过渡急剧，局部区域呈90°转接。考虑到钛合金熔体粘度大，铸件壁厚较薄，采用离心精密铸造成形工艺，铸件浇注系统结构设计依据前期研究工作。该工艺系统下能够满足铸件完整充填和精确成形的需要，铸件成形后需要经过热等静压、退火等热工艺过程。本课题中HIP制度为900~920 ℃，100~140 MPa，保温2 h，随炉冷至300 ℃以下出炉；退火制度为720 ℃ ± 10 ℃，保温2 h，随炉冷至300 ℃以下出炉；热矫形制度为820 ℃，保温2 h后进行矫形处理。

值得注意的是，大型复杂机匣的浇冒系统复杂，切割浇道和冒口后容易在基体中残留较大的机械应

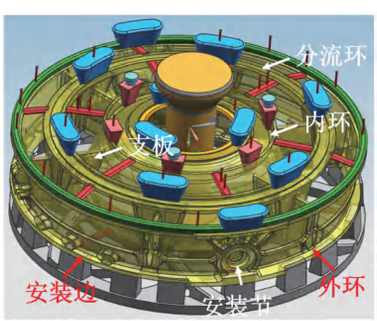


图1 大型复杂薄壁钛合金铸件及浇冒系统模型

Fig. 1 The model of large-scale，complex and thin-walled titanium alloy casting with gating and feeding systems

力，因此该铸件在HIP前需要经过一次退火。热等静压作为等静压过程不会引入额外的应力[18]。但是，由于机匣铸件一般具有多环结构，存在多个厚薄急剧过渡区域，并且X射线照相检验发现铸件中的缺陷数量多，故铸件在HIP过程中不同部位的孔隙闭合程度与体积应变不均匀，实际中观察到HIP处理也导致了铸件的尺寸变形，故此生产中对HIP处理的铸件开发了配套的固定工装，抑制其变形，该过程也可能产生一定的应力。另一方面，对于大型铸件HIP通常无法消除全部的孔隙缺陷，通过荧光渗透检验后铸件表面或浅表层还存在较多的孔隙缺陷，需要进行排故和补焊，这会引入焊接应力。此外，经过去应力退火的铸件需要通过尺寸检验，进一步以三维定位工装热矫形，确保铸件尺寸合规。基于此，本课题将大型复杂钛合金机匣的残余应力演变划分为五个阶段，如表1所示。

表1　大型复杂钛合金机匣残余应力演变阶段

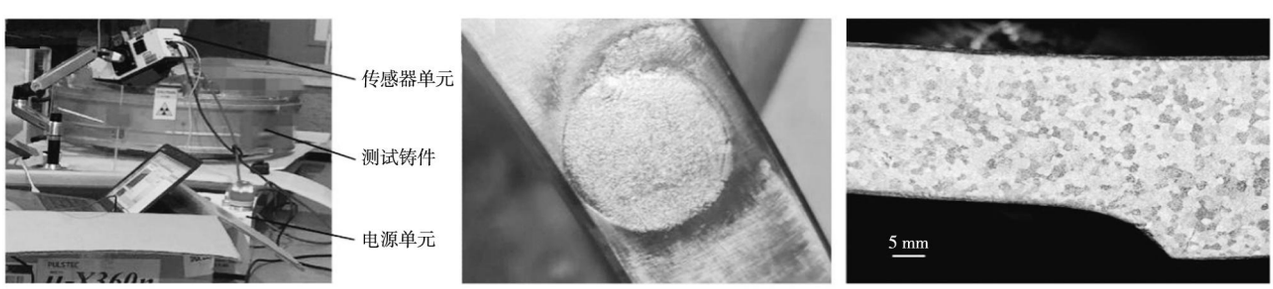
Tab. 1 Evolution stages of the residual stresses in large-scale and complex titanium alloy casings

热加工阶段	处理方法	应力状态变化
铸坯	清壳后切割浇道和冒口，获得铸件本体	初始铸造应力
HIP	对铸坯一次退火并安置定型工装后HIP	消除应力，引入机械应力
补焊	自然时效后对缺陷区域排故补焊	补焊热应力
二次退火	真空炉中进行退火处理	消除焊接应力
热矫形	安置定性工装后矫形，高频振动	机械应力，消除应力
三次退火	终产品退火处理	消除应力

1.2　铸件残余应力检测方法

1.2.1　X射线衍射法

目前关于构件残余应力测量的方法较多，本课题根据实际应用和测量精度选择X射线衍射法和钻孔应变法，通过对比分析优选出适用于大型复杂钛合金铸件的残余应力测量方法。X射线衍射法是目前最为常用的残余应力无损检测方法，如图2所示，文献表明该方法能够测量样品表面5~20 μm的残余应力状态。该方法要求测量材料表面或亚表面的晶体结构信息，因此检测过程需要保证材料表面光洁，裸露出晶体组织。具体而言，对测试区域打磨后采用电解抛光工艺，在2.5 μm/s的剥层速率下进行30 s的抛光处理，将剥层厚度控制在100 μm内，避免对铸件的影响。为检验X射线衍射法测试的有效性，本课题对铸件同一区域进行10次测量，得到其晶体信息并求解残余应力值。



（a）测试系统组成　（b）测试区域表面状态　（c）铸件晶粒组织

图2　X射线衍射法测量残余应力

Fig. 2 The X-ray diffraction method for measuring residual stress

1.2.2　钻孔应变法

钻孔应变法基于CB/T 3395—2013《残余应力测试方法 钻孔应变释放法》标准，采用郑州机械研究所研制的“ZDL-Ⅱ型盲孔法测残余应力钻孔装置”和“YC-Ⅲ型应力测量仪”对盲孔中心位置Φ1.5 mm，深2 mm范围内的平均应力进行测试，如图3所示。测试采用的主要参数有：A系数-0.072 55；B系数-0.151 4（设备厂家提供）；钛合金弹性模量109 GPa。

测试点位选取示意图如图4所示，铸坯和HIP阶段的铸件采用图4（a）方案初步分析铸件应力水平，确定方法适用性，其中1#和2#为铸件冒口侧安装边，3#为内浇道侧安装边、4#和5#为外环型面。为全面检验铸件的残余应力状态，在铸件四分之一对面的重要安装边上大量打孔测试。图4（b）为铸件俯视图，A1-A6位于



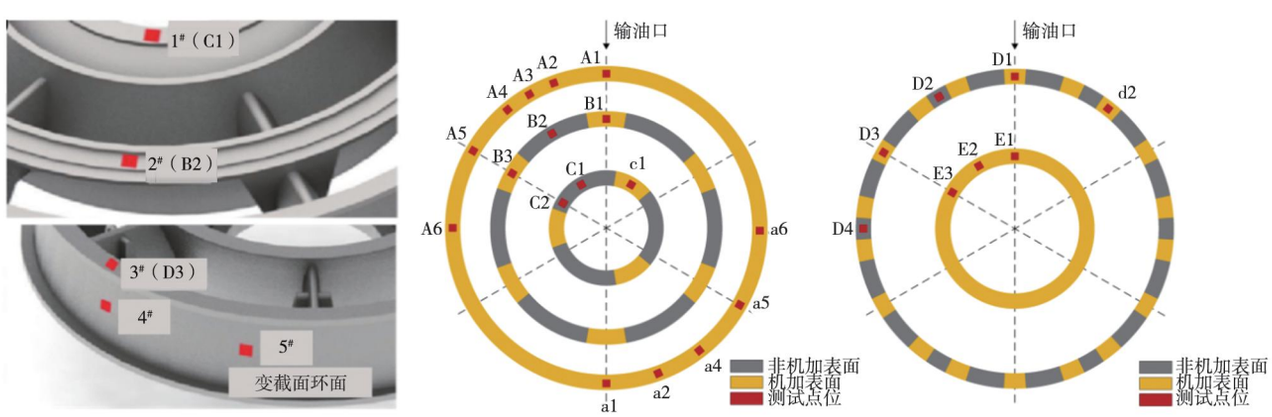
（a）测试点位选取　（b）测试区域表面状态　（c）粘贴应变片



（d）点位钻孔　（e）待测状态　（f）近原位测试

图3　钻孔应变法测量大型复杂钛合金机匣残余应力

Fig. 3 The hole-drilling strain gauge method for measuring the residual stress of large-sized and complex titanium alloy casing



（a）整体取样点　（b）冒口侧安装边取样点　（c）内浇道侧安装边取样点

图4　机匣残余应力测量点位示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of residual stress measurement sites on the casing

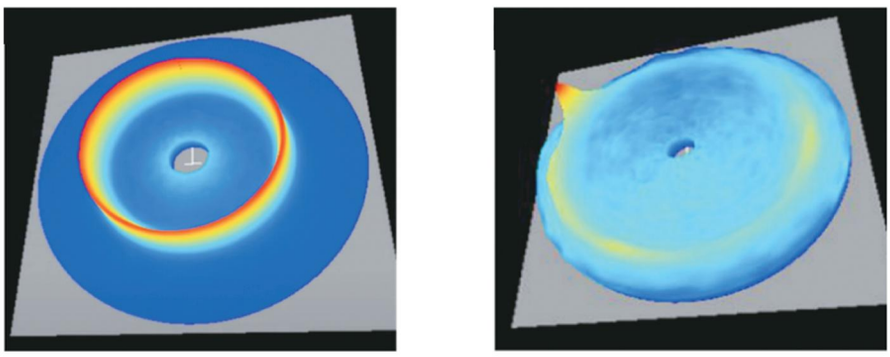
机匣外环，B1-B3和C1-C2分别位于机匣的分流环和内环；图4（c）为铸件底视图，D1-D4和E1-E3位于铸件外环和内环底部。其中a1-a6、c1和d2的设置是为了检验对称面测量的有效性。

2　结果与分析

2.1　衍射法测量机匣残余应力准确性分析

X射线衍射法测量表面残余应力具有无损检测的优势，然而在大型复杂薄壁机匣铸件中应用的适用性需要通过具体的衍射结果进行评价。图5中给出了不同区域基于XRD测试建立的德拜环测试结果，如图5（a）所示，对理想细晶体测量能够构筑均匀强度的德拜环统计结果，然而在铸件表面测试中，德拜环出现局部突出的现象。这说明，在测试区域存在着不均匀的晶粒结构和测试偏差。一般地，衍射法的核心原理是检测材料晶格畸变导致的衍射角偏移，在多晶体材料中晶粒取向随机，衍射后形成环形亮斑的德拜环。通过不同ψ角下的测试能够对$\sin2\psi$的拟合计算，得出平均残余应力。在此基础上，本课题采用多次同位测试和耦合统计分析的方法对表面区域进行衍射法分析。

图6中给出了表面区域多次采样测试及耦合处理结果。如图所示，在多次采集后，覆盖了更多的晶粒，在单次测试形成的离散化德拜环基础上，多组测试的



（a）理想细晶区德拜环　　（b）实际铸件测量结果

图5　基于XRD的德拜环图像

Fig. 5 Debye ring images based on the XRD

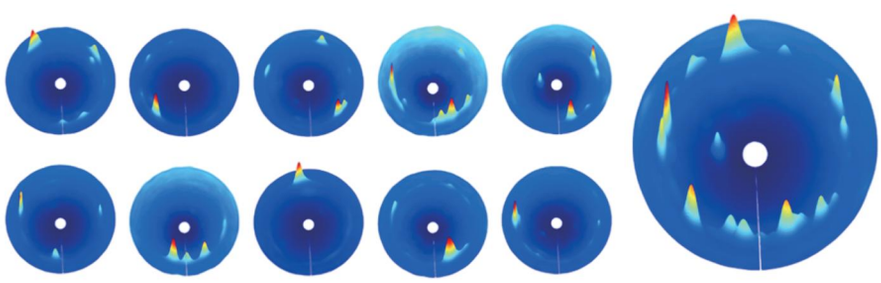
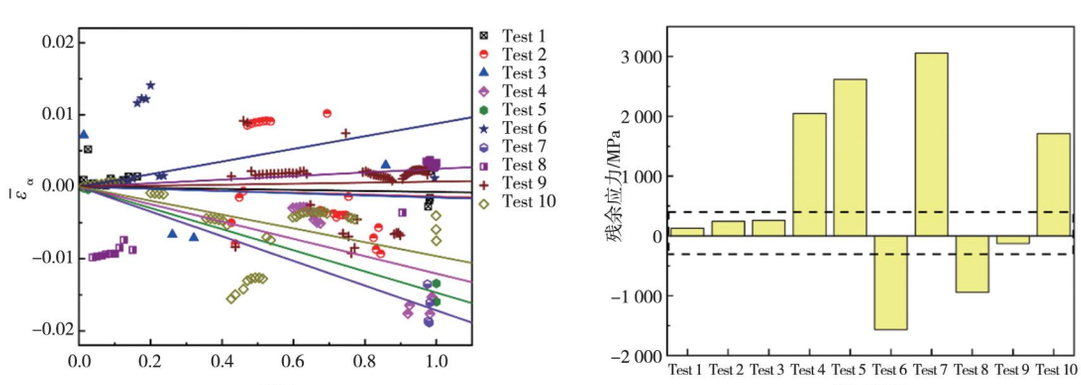


图6　同点位多次采样及其耦合处理结果

Fig. 6 Multiple samplings at the same site and their coupled processing results

德拜环呈现出一定的互补性。将10次测试后获得的结果耦合至图6右侧中的形态，可见，在对多组耦合之后形成了在各个区域均有信号的德拜环。由此可知，对有效信号进行叠加处理后，能够显著降低单次测试偏差对于整体结果的影响，但是此时的德拜环仍然无法构成均匀结构。进一步地，对所获得数据进行拟合分析，如图7所示。可见，仅有少量数据拟合结果处于可能的残余应力分布区间，大量拟合结果偏差较大，计算得出的残余应力显著超过了材料的屈服强度。

上述结果表明，在衍射法测量大型复杂薄壁钛合金铸件残余应力时，即使具有无损检测的优势，但是由于德拜环不均匀、拟合数据偏差大的特征，难以为铸件残余应力进行准确评估。其原因在于，铸造大型复杂薄壁铸件过程中，为满足充型需求，铸件预热温度较高，同时安装边的壁厚较大，在凝固过程中处于高温区域。表面晶粒在热过程中生长时间较久，其尺寸超过了衍射法需求，粗晶区域参与衍射的晶粒数量极少，每个粗晶的取向差异较大，出现斑点状峰和



（a）多次采样拟合图像　　（b）残余应力数据图

图7　衍射法测量平均残余应力拟合结果

Fig. 7 The fitting results of average residual stresses measured by diffraction method

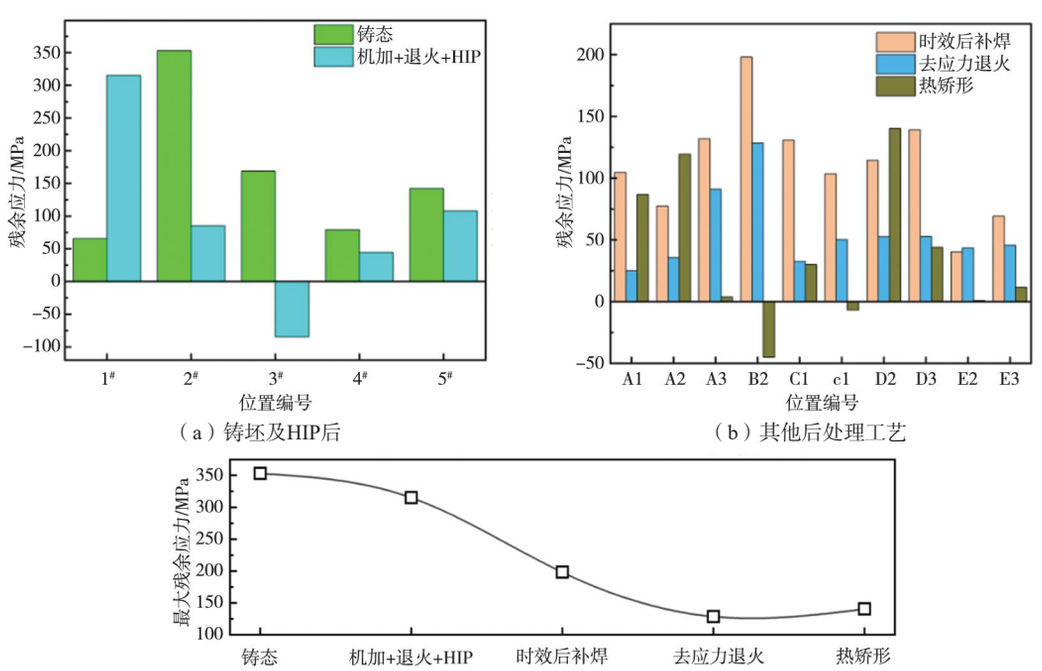
锯齿峰，如图6所示。此外，对多点进行重复测试耦合中，由于晶粒尺寸大，晶界数量少，残余应力在晶粒内部形成梯度分布，单个晶粒会主导衍射信号的采集，应力计算值波动大，以至于出现负值应力情况。大型复杂钛合金铸件的成形特性造成表面粗晶和局部细晶并存的结构，导致了XRD残余应力测试结果偏差超过工程允许范围。

2.2 全流程热工艺中残余应力分布及演变行为

为全面揭示大型复杂薄壁钛合金铸件应力分布状态，对铸件不同区域进行钻孔应变分析，各个阶段的残余应力数值如图8所示。图8（a）给出了铸件成形后的铸坯件和初步机加+退火和热等静压后的残余应力状态。其中1#-3#位于大型复杂薄壁铸件的内环、分流环和外环，4#和5#则位于铸件外环的变截面环形曲面。如图8（a）所示，铸件初始应力水平较高，其中分流环由于其在铸件主体中只与支板小面积连接，因此在凝固过程中容易受到更大凝固收缩导致的残余应力，高达315 MPa。对钛合金进行HIP处理的主要目的是在高温高压状态下弥合铸件内部的孔隙缺陷，同时，有较多的研究表明HIP工艺能够有效降低构件的残余应力。高温下有利于残余应力的释放，并促进微观组织的均匀化，消除应力集中，促使材料基体发生均匀的塑性变形并释放内应力。因而，在经过HIP之后，铸件的各个区域得到了不同程度的残余应力降低。

然而，需要指出的是，在铸件的内环区域检测到HIP后铸件残余应力急剧升高的现象。对于大型复杂薄壁钛合金的精密铸造过程而言，由于铸件尺寸大所需金属液容量多，故浇注过程需要短时间内向铸件型腔注入大量钛合金熔体。一般地，大型复杂薄壁钛合金铸件的浇注系统尺寸较大，铸件在切割附带浇道和冒口的过程中，由于机械位置的限制，容易对铸件引入较大的残余应力。另一方面，大型复杂薄壁钛合金铸件中的孔隙缺陷也比传统的小型零件更多，在HIP过程中铸件整体的孔隙弥合造成的体积变化也相对更大，并且其孔隙在不同离心半径区域的分布也存在差异，实践中更是可以观察到在HIP处理后铸件表面留有较为明显的凹坑。为了避免在HIP过程中导致铸件变形，对于该类型大尺寸铸件通常需要加装定型工装，工装结构的存在限制了HIP时铸件基体产生的塑性变形，但容易造成残余应力。所以相较于已报道文献中指出的HIP对残余应力的显著消除效率，针对大型复杂薄壁铸件，即使经过一次退火结合HIP工艺，能够释放的残余应力仍然有限。

进一步地，由于铸件中的孔隙缺陷较多，还需对HIP无法弥合的表面孔隙进行排故和补焊处理。如图8（b）所示，在补焊后铸件各个区域的应力水平增加，平均残余应力水平达到111.0 MPa，最大残余应力高达198.1 MPa。由此可见，铸件补焊是大型复杂薄壁钛合金铸件工艺流程中引入残余应力的关键阶段。在焊接



（a）铸坯及HIP后

（b）其他后处理工艺

（c）最大残余应力变化情况

图8 热工艺过程中残余应力演变结果

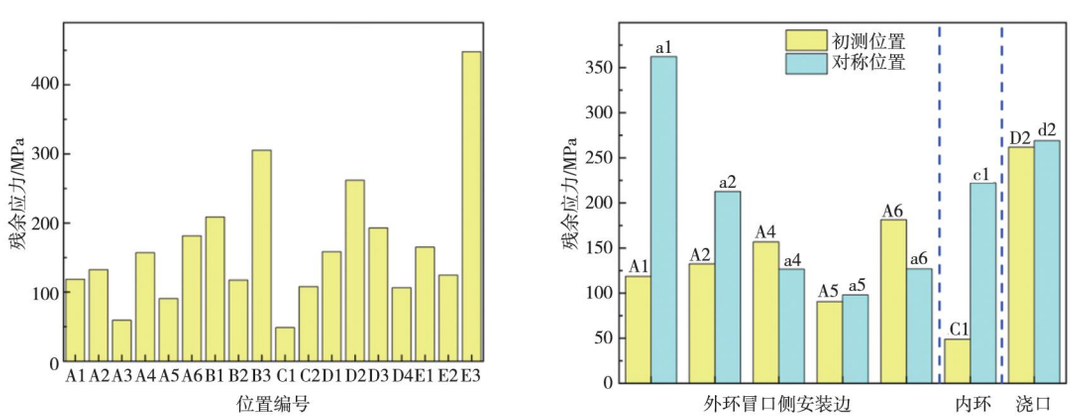
Fig. 8 Evolution results of the residual stresses during thermal processing

高温区以及快速凝固局部细晶的影响下，补焊对铸件整体残余应力产生显著提升。通过二次退火能够有效地降低焊接导致的残余应力，并且不同位置在二次退火后残余应力的数值变化趋势与补焊后基本一致，说明残余应力分布具有位置继承性。此外，经验上铸件残余应力水平超出屈服强度30%后存在后续加工过程中变形乃至开裂的风险。二次退火后残余应力平均下降了46.6%，最大残余应力出现在内环冒口机加工表面，约为128.4 MPa，低于铸件屈服强度（约为850 MPa）的20%，能够满足加工及使用性能要求。

通常，大型复杂薄壁铸件成形后需要通过热矫形调整构件宏观外形尺寸。图8（b）中给出了不同区域经过热矫形工艺后的残余应力状态，如图所示，铸件残余应力普遍增加，甚至由于矫形过程中的机械工装限制，在B2和c1区域引入了压应力。对全工艺过程中的残余应力测试结果进行统计，其结果如图8（c）所示。可见，铸件的最大残余应力值逐步降低，并在二次退火后达到最低值。其中，整体的平均残余应力在补焊阶段会显著增加。

大型复杂薄壁钛合金铸件的成形较一般铸件更为困难，尤其是位于内外环连接区域的支板结构，偶有因充型压力不足，表现出支板浇不足的极端缺陷状态。为研究该条件下补焊对钛合金机匣铸件的残余应力影响，选取完成所有去应力退火的钛合金机匣铸件，在支板薄壁部位进行整体补焊后，对安装边进行残余应力检测。图9中展示了针对大型复杂薄壁钛合金支板区域大面积补焊后的残余应力分布结果。如图9（a）所示，即使机匣铸件厚大安装边未进行补焊处理，但是受到薄壁区域的热变形影响，整体应力超过100 MPa。同时，最大残余应力在外环、内环、分流环及铸件外环底部和内环底部分别达到了181.4 MPa、305.4 MPa、107.8 MPa、261.8 MPa和447.9 MPa。由此可见，在大面积补焊之后会在铸件中引入较大的残余应力。尤其是铸件的分流环和内环底部，其残余应力水平显著超过标准允许范围。

进一步，采集了铸件三分之一对称区域的残余应力，结果如图9（b）所示。对比可知，初测和对称位点的残余应力范围基本一致。说明了大面积补焊之后，大型复杂薄壁钛合金铸件整体残余应力水平介于100~400 MPa。另一方面，在铸件的冒口机加表面（图4）中残余应力比非机加面和铸件其他区域的残余应力低，而内浇道位置机加表面残余应力更高。这是由于在凝固过程中，冒口作为补缩过程的最后凝固区域，较长时间处于高温状态，有利于凝固收缩应力的释放。然而，内浇道作为浇注系统连接铸件本体的通道，在充型过程持续受到高温金属熔体冲刷，并且铸件大量环面区域的壁厚较薄，凝固速度快，而此时浇注系统的各个浇道尚未凝固，因此铸件本体和浇注系统容易形成差异性的凝固收缩状态，导致了连接区域的残余应力较高。



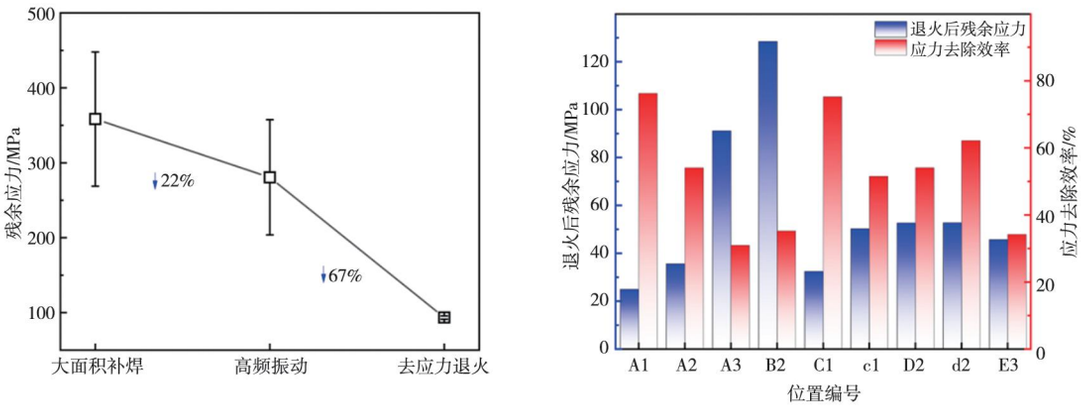
（a）不同位置残余应力　　（b）残余应力对称性分析

图9　大面积补焊后铸件残余应力分布

Fig. 9 Residual stress distributions in the casting after large-area repair welding

2.3　残余应力消除及改进措施

工程化消除残余应力的方法包括高频振动和退火两种方式，本课题中大面积补焊的大型复杂薄壁钛合金铸件经高频振动和退火后的残余应力变化如图10（a）所示。对大型复杂铸件施加高频振动处理后，残余应力下降幅度约为50~100 MPa，应力去除效率约为22%；而通过退火处理能够有效地将铸件残余应力降低至100 MPa以下，应力去除效率约为67%。值得注意的是，去应力退火后产品的残余应力均匀性较好。同时，分析了不同铸件区域经过退火后的应力变化，如



（a）大面积补焊铸件应力去除效率　　（b）多位点退火后应力去除效率

图10　铸件残余应力消除效率

Fig. 10 Residual stress relief efficiencies of the casting

图10（b）所示，可见经过退火后多点位的残余应力值能够降低至50 MPa以下，达到良好的低应力状态。残余应力去除效率对于不同点位存在一定差异性，但整体上的平均应力去除效率可以达到50.15%。上述结果表明，采用本课题中的退火制度能够将铸件残余应力降低至允许值以下，满足大型复杂薄壁铸件的应用需求。

综上所述，大型复杂薄壁钛合金铸件的残余应力分析结果表明，此类铸件的残余应力较高，分布不均匀，受到浇注系统布局、补焊、后续热工艺工装的严重影响。据此，为进一步降低大型复杂薄壁铸件的残余应力水平，可以通过以下方法进行优化。首先，调整浇注系统内浇道的位置和尺寸，在保证铸件凝固补缩的前提下尽可能减小铸件各部位温度场差异，降低铸坯初始残余应力。其次，在补焊过程中适当降低焊接电流和焊接速度，缩小焊接热影响区范围，减少焊接区对铸件其他区域的拉扯作用。此外，在工装设计中考虑对铸件变形的阻碍影响，抑制机械阻碍应力的增加；在矫形等传统末端工艺之后，可以补加去应力退火处理，将铸件残余应力保持在较低的水平。

3　结论

（1）X射线衍射法受铸件表面粗晶组织影响，德拜环不均匀、数据离散大，不适用于大型复杂薄壁钛合金铸件；钻孔应变法测试稳定、结果可靠，可作为大型复杂薄壁钛合金铸件残余应力的标准检测方法。

（2）铸件初始铸态应力高，分流环等薄壁转接区域应力可达315 MPa；HIP可部分降低应力，但受工装约束与缺陷弥合影响，消除效果有限；补焊是引入残余应力的最主要工序，热矫形会进一步提升残余应力水平并导致应力不均匀分布。

（3）高频振动应力去除效率约20%~22%，去应力退火效率可达50%~67%，可将铸件残余应力稳定控制在100 MPa以内，满足航空发动机机匣工程应用要求；优化浇道布局、降低补焊热输入、改进工装设计可进一步降低铸件残余应力。

参考文献：

[1] Williams J C，Boyer R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components [J]. Metals，2020，10（6）：705.

[2] 冉兴，吕志刚，曹建，等. 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.

[3] 冉兴. 大型环状钛合金铸件立式离心铸造螺旋形横浇道设计 [J]. 稀有金属材料与工程，2024，53（7）：2049–2058.

[4] 隋艳伟，袁芳，李邦盛，等. 离心铸造钛合金熔体充型流动物理模拟相似理论及实验研究 [J]. 稀有金属材料与工程，2012，41（8）：1351–1356.

[5] 时俊克，廖敦明，陈宇豪，等. 钛合金立式离心熔模铸造凝固缺陷数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金，2022，42（11）：1360–1365.

[6] 贾国成，麻毅，常化强，等. 倾斜式离心铸造对钛合金铸件质量的优化 [J]. 铸造技术，2022，43（5）：385–388.

[7] 刘珍君，朱小平，栗尼娜，等. 熔模铸造钛合金中介机匣应力数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（1）：129–134.

[8] 张志正，孟波波，杜延乐，等. ZTA15-Cr钛合金阀板失效分析 [J]. 铸造工程，2025，49（5）：11–14.

[9] 罗军，王曦，赵文正，等. 初始残余应力对ZTC4钛合金力学性能的影响 [J]. 材料工程，2026，54（4）：269–281.

[10] Amatanweze K T，Buchely M F，Athavale V A，et al. Residual stress distribution，distortion，and crack initiation

in conventional and intensive quench practices [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2024，33（8）：3838–3848.

[11] Xu W，Liang Y，Huang X，et al. Surface strengthening synergistically enhances the strength and ductility of as-cast titanium alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds，2026，1058：187036.

[12] Wei K，Wang Z，Zeng X. Preliminary investigation on selective laser melting of Ti-5Al-2.5Sn α-Ti alloy：from single tracks to bulk 3D components [J]. Journal of Materials Processing Technology，2017，244：73–85.

[13] 张艳新，阿拉腾，金洪福，等. A356铸造铝合金车轮轮辐裂纹分析及改进方法 [J]. 兵器材料科学与工程，2023，46（3）：134–139.

[14] 曹学锋，朱大智，张少文，等. 铝合金车轮铸造裂纹研究 [J]. 铸造，2022，71（9）：1178–1181.

[15] 顾邦平，胡雄，徐冠华，等. 基于位错密度演化的高频振动时效微观机理 [J]. 稀有金属材料与工程，2018，47（8）：2477–2482.

[16] 胡生双，史利利，赵虎，等. 去应力退火对Ti-4Al-5Mo-5V-6Cr-1Nb钛合金力学性能和残余应力的影响 [J]. 金属热处理，2025，50（10）：252–255.

[17] Prayoga B T，Dharmastiti R，Akbar F，et al. Microstructural characterization，defect and hardness of titanium femoral knee joint produced using vertical centrifugal investment casting [J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2018，32：149–156.

[18] Mancisidor A M，García-Blanco M B，Quintana I，et al. Effect of post-processing treatment on fatigue performance of Ti6Al4V alloy manufactured by laser powder bed fusion [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing，2023，7（4）：119.

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）