

铝合金铸件机加工残余应力测试与消除工艺研究

何燮锋

浙江文源科技智能有限公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：铝合金铸件因残余应力导致变形开裂，制约高端制造精度。本文通过理论推演，构建从应力生成到消除的定性理论体系。首先，基于热弹塑性力学与金属物理，剖析铸造冷却与切削加工双重作用下应力的演化耦合机制；其次，阐述盲孔法、衍射法等测试技术的物理本源与适用边界，确立多尺度表征框架；最后，揭示振动时效等工艺的微观机理，论证其通过促进位错运动释放应变能的内在逻辑。本文虽无量化数据，但阐明了应力产生与释放的物理本质，为高精度铝合金构件的工艺优化与全流程控制提供了坚实的理论支撑与设计指南。

【关键词】：铝合金铸件；机加工；残余应力；应力测试；应力消除；振动时效；热弹塑性力学

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.032

1 引言

在高端装备制造里，大型复杂铝合金铸件因材料特性，在铸造冷却与机加工时易产生显著残余应力。内应力平衡被加工打破会致工件变形甚至失效，威胁关键部件精度与安全。残余应力演化是热-力耦合的复杂过程，铸造时因冷却不均形成初始热应力，机加工时因切削热与塑性变形叠加新应力，本质是应力场动态重构。当前研究多局限单一环节，缺乏对“铸造-加工”全链条应力耦合效应的系统理论推演，在测试技术判据与消除工艺微观机制阐释上不足。残余应力本质是晶格畸变能储存，消除需基于能量释放与组织稳定原理。鉴于此，本文摒弃经验数据堆砌，用理论分析与逻辑推演探讨铝合金铸件残余应力测试与消除工艺。先阐释应力形成与演化机理，再剖析测试技术物理本源与局限，接着构建消除理论模型、评估工艺路径互补性，最后总结理论范式，推动该领域从经验控制向科学调控转变，为高精度制造提供理论支撑。

2 铝合金铸件残余应力的形成机理与演化逻辑

2.1 铸造冷却过程中的热-组织耦合应力生成

铝合金铸件残余应力源于凝固与冷却阶段。基于热弹塑性力学分析，熔融铝液冷却收缩时，因铸件几何非对称性及壁厚差异，各部位冷却速率不同。薄壁先凝固收缩，对厚壁产生约束形成拉应力；厚壁最终冷却收缩受已凝固部分限制形成压应力，温度梯度导致的不协调变形构成宏观热应力主体。

除热应力外，组织转变引起的体积变化也是关键来源。虽铝合金固态相变体积效应弱于钢铁，但热处理强化型合金中，固溶体析出与第二相形成会引起晶格常数微变。冷却速度差异使不同区域显微组织及比体积不均，产生微观组织应力，共晶反应与初生相析出期，微观疏松周围是应力集中高值区。

铸造残余应力是热应力与组织应力时空耦合叠加的结果。冷却初期应力可部分松弛，后期进入弹性态应力被“冻结”。大型复杂铸件冻结应力场非均匀且三维复杂，表层多为压应力，心部多为拉应力，截面突变处有剧烈梯度，这种初始非平

衡态是应力演化起点，为后续机加工变形埋下伏笔。

2.2 机加工过程中的应力重分布与新生应力机制

机加工不仅是材料去除过程，更是应力场的重构过程。从力学平衡角度，铸件内部残余应力原处于自平衡状态。当刀具切除部分材料，原由该部分承担的载荷需重新分配至剩余材料以维持新平衡。逻辑推演显示，这种重分布会引发工件弹性变形；若局部应力超屈服极限，还将诱发塑性流动导致永久变形。例如，去除表层高压应力层后，内部拉应力释放可能导致工件反向弯曲。

此外，切削过程本身会引入新的加工残余应力。剧烈摩擦产生的切削热使表层经历极速热循环：受热膨胀受冷基体约束产生压应力，若超高温屈服极限则发生塑性压缩；冷却收缩时受基体牵拉，最终形成拉伸残余应力。同时，刀具挤压剪切导致晶粒拉长、位错密度增加，形成加工硬化层，其与基体的变形不协调会产生压应力层。

逻辑上，机加工后的最终应力场是“初始应力重分布”与“切削新生应力”叠加的产物。两者符号可能相同或相反，取决于切削参数、刀具几何及冷却条件。大切深粗加工中，切削热与塑性变形主导应力分布；精加工中，初始应力释放效应更显著。加工顺序同样关键，不同走刀路径决定应力释放的顺序与方向，触发不同的全局变形模式。因此，必须将机加工视为动态、非线性的累积过程，任何局部材料去除均在触发全局应力响应。

3 残余应力测试技术的理论基础与适用性评析

3.1 破坏性测试方法的力学原理与误差逻辑

盲孔法作为经典的破坏性测试手段，其理论基石为弹性力学中的孔边应力集中效应。逻辑推演表明，钻孔导致局部残余应力释放，引发孔周材料弹性恢复，通过应变花测量释放应变并借助标定系数矩阵，即可反演原始应力状态。该方法理论成熟、成本低廉，适用于多数金属。然而，其固有局限显著：首先，基于线弹性假设，若软态铝合金在钻孔时发生塑性变形，

计算结果将产生严重偏差；其次，钻孔过程引入的切削热与机械应力会叠加于释放应变，干扰测量精度，且钻头参数直接影响附加应力大小。此外，盲孔法仅限表面及近表面测量，获取深层应力需逐层铣削，这不仅效率低下，更因层层去除引发的复杂应力重分布修正而极易累积误差。切割释放法（如环芯法）虽适用于大范围平均应力测量，但空间分辨率低且破坏性大。针对铝合金铸件晶粒粗大及各向异性特征，若应变花覆盖区域内晶粒取向差异巨大，宏观应变难以准确反映真实平均应力，故使用破坏性方法时必须严格匹配材料微观组织与测试尺度。

3.2 无损检测技术的衍射物理与穿透深度博弈

无损检测技术中，X射线衍射（XRD）与中子衍射最具代表性。XRD基于布拉格定律，通过测量应力导致的晶格畸变及衍射角偏移来计算应力张量。逻辑上，XRD直接表征微观晶格应变，空间分辨率极高。但其致命短板在于穿透深度极浅，对铝合金仅达微米级，仅能反映表层状态，且受表面粗糙度与氧化层散射影响显著；若晶粒过大或织构严重，衍射峰分裂亦会增加数据处理难度。相比之下，中子衍射利用中子束极强的穿透力，可深入金属内部数厘米，是获取大型铸件内部三维应力分布的唯一无损手段。然而，中子源稀缺、设备昂贵且测试耗时，加之束斑尺寸较大（毫米级），导致其空间分辨率低于XRD，难以捕捉细微梯度。理论对比显示，两者在穿透深度与空间分辨率上存在天然博弈。实际应用中，常需结合两者优势：以XRD表征表层精细结构，以中子衍射探测内部宏观分布，并辅以超声衍射等半无损技术衔接，构建全方位应力表征体系。

3.3 综合评析与技术选择策略

综上所述，残余应力测试技术的选择并非单一维度的优劣判断，而是基于测试目的、材料特性及精度要求的系统决策。破坏性方法虽能提供深度分布剖面，但受限于塑性变形误差及应力重分布修正的复杂性，更适合工艺研发阶段的机理研究，而非成品检测。无损检测中，XRD与中子衍射分别占据了“高分辨表层”与“深穿透内部”的两极，互为补充却难以互相替代。对于铝合金铸件这一特定对象，其粗晶组织与复杂几何形状对测试提出了双重挑战：既要克服晶粒取向对应变传递的干扰，又要解决从表层到心部的连续表征难题。因此，理想的测试策略应建立多尺度耦合模型：利用宏观力学模型指导测点布局，结合XRD的高频表层数据与中子衍射的内部基准数据，并通过改进的盲孔法或超声技术填补中间层空白。唯有构建这种“宏观-微观”、“表层-内部”、“破坏-无损”相结合的立体化测试逻辑，才能准确揭示铝合金铸件复杂的残余应力场，为后续的消除工艺提供可靠的数据支撑。

4 残余应力消除工艺的热力学与动力学机制

4.1 热时效与振动时效的能量耗散与组织稳定机理

热时效是消除铝合金铸件残余应力的经典方法，利用高温降低材料屈服强度、增强原子扩散能力。从热力学看，残余应力对应高弹性应变能，系统趋向低能量稳定态。高温保温激活位错滑移与攀移，释放应变能，但温度需控制在再结晶温度以下。振动时效（VSR）基于机械能驱动，通过共振交变动应力使动应力与残余应力叠加超过微观屈服极限，诱发局部微塑性变形，将弹性势能转化为热能耗散。相比热时效，VSR能耗低且无氧化风险。热时效侧重热激活实现全局组织稳定，振动时效侧重机械诱导局部塑性流动削减峰值应力，两者均促进位错运动打破亚稳态平衡。大型复杂铸件可采用“振动+低温”复合工艺。

4.2 深冷处理与机械预拉伸的相变诱导与塑性补偿逻辑

深冷处理利用极低温（约-196℃）改变材料微观行为，促使亚稳相转变、细化析出相，闭合微观缺陷。受控的深冷复温过程促进应力重分布与释放，提升尺寸稳定性。机械预拉伸法用于板材或型材，淬火后施加微量塑性拉伸变形，抵消残余应力。关键是精确控制预拉伸量。从能量角度，预拉伸以外部做功置换微观不均匀应力场，深冷处理利用温差引发的体积效应与相变驱动力扰动平衡。这两种方法适用于对热时效敏感或形状复杂的构件，需灵活选择或组合。

4.3 工艺选择的系统论与多场耦合优化策略

残余应力的消除是一个遵循热力学与动力学机制的系统工程。热时效和振动时效主要依赖于位错运动的微观机制来释放应力，而深冷处理与机械预拉伸则分别利用了材料在相变过程中产生的体积效应，以及通过宏观塑性变形实现的应力补偿。这些技术各自拥有特定的适用场景。由于不同工艺的微观作用机制相互补充，单纯依靠某一种方法往往难以同时兼顾处理效率、生产成本与最终性能的综合要求。未来的理论研究应着重探索多物理场耦合的优化策略，构建能够整合“热-力-相”作用的多场耦合模型，并在此基础上开发出时序经过优化的复合型工艺。这旨在实现残余应力的深度消除与材料微观组织性能的同时提升，从而推动铝合金制造从经验实践向基于科学调控的更高阶段跨越。

5 综合控制策略与工艺优化的理论模型

5.1 铸造-加工全流程的应力协同控制逻辑

针对残余应力贯穿制造全链条的特性，必须摒弃孤立的末端治理，建立“铸造-加工”全流程协同控制策略。理论模型需将铸造参数与加工策略纳入统一框架。逻辑推演表明，源头控制至关重要：通过优化冒口与冷铁布置实现温度场均匀化，从根源上减小初始应力梯度。机加工阶段应遵循“对称去除、分层释放”原则，避免单侧去材引发应力失衡。更为关键的是引

入“中间去应力”工序，即在粗加工后、精加工前安排时效或振动处理，释放大部分累积应力，为精加工提供低应力基准。这种分阶段释放策略优于最终一次性消除，能有效规避高应力状态下的不可控变形。全流程控制的核心在于构建“预测-干预-反馈”闭环：利用数值模拟预判应力演化轨迹，在关键节点插入干预措施，并依据实测数据动态调整后续参数，实现应力的主动调控。

5.2 多物理场耦合下的工艺参数优化判据

具体工艺制定需基于多物理场耦合建立参数优化判据。对于热时效，目标是在最小化晶粒长大与性能损失前提下最大化应力松弛率，需结合扩散方程与粘塑性本构模型，求解最佳温度-时间曲线。对于振动时效，需依托结构动力学模型识别模态振型，确定最佳激振点与频率，确保动应力全覆盖。逻辑上，参数选择存在“阈值区间”，超出范围可能诱发过时效或疲劳损伤。此外，需量化不同工艺的协同效应，描述序列工艺对微观组织的累积影响。优化判据应涵盖应力消除效率、尺寸稳定性、力学性能保持率及经济成本等多维指标。通过构建多目标优化函数，利用遗传算法等智能工具在庞大参数空间中寻优，可摆脱经验依赖，为复杂铝合金铸件精密制造提供科学决策依

参考文献：

- [1] 闫亮亮,杨振雷,刘佳敏,等.铝合金筒体铸件热处理防变形控制研究[J].热加工工艺,2026,55(2):149-154.
- [2] 钟福,王松涛,王杰,等.电磁耦合处理对 7050 铝合金承力框铸件初始残余应力调控研究[J].热加工工艺,2024,53(22):145-149.
- [3] 杨杰,杨俊.高导热铝合金铸件生产的材料组织优化与挤压铸造工艺革新[J].中国高新科技,2025(12):134-136.
- [4] 叶翌洁,惠云龙,郭天俊,等.铝合金熔模铸造气孔缺陷的产生原因和预防[J].冶金与材料,2024,44(12):10-12.

据，实现工艺参数的全局最优配置。

6 结论

本文系统构建了铝合金铸件残余应力从生成机理到全流程控制的理论逻辑链。研究表明，残余应力是铸造热-组织耦合与机加工应力重分布叠加的复杂产物，遵循热弹塑性力学与位错动力学规律。

在测试层面，单一手段难以全面表征复杂应力场。必须构建多尺度互补体系，结合盲孔法、XRD 及中子衍射等技术，实现从表层到心部、微观至宏观的全方位精准探测。

在消除工艺层面，热时效、振动时效、深冷及预拉伸分别通过热激活、机械诱导塑性、相变驱动及强制变形释放应变能。理论论证指出，单一工艺存在局限，唯有实施“铸造源头优化+中间去应力+最终精调”的全流程协同策略，并基于多物理场耦合模型优化参数，方能实现应力高效消除与尺寸精准控制。

综上，残余应力控制是多学科交叉的系统工程。本文理论框架为突破高精度制造瓶颈提供了清晰指引。未来应深化微观组织与宏观应力的跨尺度关联研究，开发智能在线监测与自适应消除装备，推动铝合金制造向极致精密、绿色高效迈进，助力高端装备制造核心竞争力提升。