

焊接接头残余应力形成、分布及消减方法研究

谷天帅

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450000

摘要：本论文围绕焊接接头残余应力展开系统研究。通过剖析焊接过程中材料热-力学行为、相变及性能差异，揭示残余应力形成根源；运用有限元模拟与实验测试，探究不同焊接工艺、材料和结构下应力分布规律；详细阐释机械、热处理、超声冲击等消减技术原理与应用要点；构建多维度效果评价体系，并结合航空航天、船舶制造等典型案例，验证技术应用成效。研究成果可为优化焊接工艺、增强结构可靠性、延长服役寿命提供理论支撑与实践指导。

关键词：焊接接头；残余应力；形成机理；分布特征；消减方法

引言

焊接技术凭借其高效连接特性，深度融入航空航天、能源电力等现代制造业核心领域，是推动产业发展的关键力量。然而，焊接过程中材料不均匀的热循环，不可避免地会在接头区域产生残余应力。这种内应力虽“无形”，却暗藏巨大威胁：它会降低结构疲劳强度，诱发裂纹；在腐蚀环境中加速构件损坏；甚至导致构件变形，影响精密装配。在工业追求高可靠性、长寿命的当下，残余应力已成为制约焊接结构性能提升的瓶颈。因此，深入探究其形成、分布规律与消减方法，既是破解工程难题的关键，也对保障工业安全、推动技术革新具有重要意义。

1 焊接接头残余应力形成机理

1.1 热-力学行为影响

焊接过程本质上是一个高度不均匀的加热和冷却过程。在焊接热源作用下，焊缝及其附近区域的金属被迅速加热至高温，材料发生热膨胀。由于温度梯度的存在，高温区域金属的膨胀受到周围低温金属的约束，导致该区域产生压缩塑性变形。当焊接热源移开后，焊缝及热影响区金属开始冷却收缩。此时已发生压缩塑性变形的金属无法完全恢复到原始尺寸，而周围低温金属又限制其收缩，从而在焊缝及其附近区域产生拉应力，在远离焊缝的区域产生压应力，形成焊接残余应力。以碳钢焊接为例，在焊接过程中焊缝金属温度可达1500℃以上，而远离焊缝的区域温度相对较低。高温的焊缝金属在膨胀时受到周围金属的限制，产生压缩塑性变形；冷却时，这部分金属的收缩受到阻碍，最终在焊缝处形成拉应力，数值可达材料的屈服强度。

1.2 相变因素影响

对于具有相变特性的金属材料，如碳钢、合金钢等，焊接过程中的相变也会对残余应力产生重要影响。

在加热过程中，金属发生相变，如奥氏体转变，其比容减小；而在冷却过程中，奥氏体向其他相（如铁素体、珠光体、马氏体等）转变，比容增大。相变过程中的体积变化与热膨胀、收缩相互叠加，进一步改变了残余应力的分布^[1]。例如，在中碳钢焊接时，焊缝冷却过程中奥氏体向马氏体转变，马氏体的比容大于奥氏体，这种体积膨胀会在焊缝及附近区域产生附加拉应力，加剧残余应力水平。如果相变不均匀，还可能导致局部应力集中，增加结构失效风险。

1.3 材料性能差异影响

焊接接头通常由焊缝金属、热影响区和母材组成，不同区域的材料性能存在差异。焊缝金属是在焊接过程中通过填充材料与母材部分熔化混合凝固形成，其化学成分和组织性能与母材不同；热影响区由于受到焊接热循环作用，组织和性能也发生了变化。这些材料性能差异会影响金属的热膨胀系数、屈服强度、弹性模量等力学性能参数，进而导致焊接过程中各区域变形不协调，产生残余应力。例如当焊缝金属的热膨胀系数大于母材时，在加热过程中焊缝金属膨胀量更大，受到母材约束产生压缩应力；冷却时，焊缝金属收缩量也大，受到母材阻碍产生更大的拉应力，使得焊接接头残余应力增大。

2 焊接接头残余应力分布特征

2.1 不同焊接工艺下的分布

焊接工艺参数对残余应力分布有着显著影响。以电弧焊为例，焊接电流、电压、焊接速度等参数的变化会改变焊接热输入，进而影响残余应力的分布。当焊接电流增大时，焊接热输入增加，焊缝及其附近区域的高温停留时间延长，金属的塑性变形量增大，冷却后残余拉应力也相应增大。同时焊接速度会影响温度场分布，较慢的焊接速度会使温度梯度减小，残余应力分布

相对均匀；而较快的焊接速度会导致温度梯度增大，残余应力集中现象更明显。不同的焊接方法，如电弧焊、激光焊、电子束焊等，由于热源特性不同，残余应力分布也存在差异。激光焊和电子束焊具有能量密度高、加热和冷却速度快的特点，其焊接接头残余应力主要集中在焊缝及其附近狭窄区域，且残余拉应力数值较高；而电弧焊热源相对分散，残余应力分布范围较广，数值相对较低。

2.2 不同材料焊接接头的分布

材料的种类和性能对残余应力分布起着决定性作用。（1）对于高强度钢焊接，由于其屈服强度高、塑性变形能力有限，焊接过程中产生的残余应力不易通过塑性变形释放，因此残余应力水平较高，且容易出现应力集中现象。（2）铝合金焊接时，由于其热膨胀系数大、导热性好，焊接过程中温度变化剧烈，导致残余应力分布复杂，尤其是在厚板焊接中，沿板厚方向的残余应力分布不均匀性更为明显^[2]。（3）不同材料之间的异种金属焊接，由于材料的物理性能（如热膨胀系数、导热系数等）和力学性能差异较大，焊接接头残余应力分布更加复杂。例如，钢与铝的异种金属焊接，由于两者热膨胀系数相差较大，在焊接冷却过程中会产生较大的热应力，同时由于界面处的冶金反应和组织差异，还会产生附加应力，使得残余应力分布极不均匀，增加了焊接接头的失效风险。

2.3 不同结构形式焊接接头的分布

焊接结构的几何形状和尺寸对残余应力分布有着重要影响。（1）在T形、十字形等接头形式中，由于焊缝的不对称分布，会导致残余应力分布不对称，在焊缝交叉处容易产生应力集中。对于封闭结构或复杂形状的焊接构件，如压力容器、管道焊接接头，残余应力分布受到结构边界条件的约束，在拐角、开孔等部位会出现应力集中现象，这些部位往往是结构失效的起始点。（2）焊接接头的尺寸大小也会影响残余应力分布。一般来说，随着板厚增加，焊接接头沿厚度方向的温度梯度增大，残余应力分布的不均匀性加剧，厚板焊接接头中往往存在较大的沿厚度方向的残余应力，对结构的抗疲劳性能和断裂性能产生不利影响。

3 焊接残余应力消减技术方法

3.1 机械消减方法

机械消减方法主要通过对焊接接头施加外部机械力，使焊接接头产生塑性变形，释放部分残余应力。常见的机械消减方法包括捶击法、碾压法和喷丸法。（1）捶击法是利用锤子或专用的捶击设备对焊缝及其附近区

域进行捶击，使金属表面产生塑性变形，抵消部分残余拉应力。捶击法操作简单、成本低，但需要控制捶击力度和频率，避免过度捶击导致表面损伤。（2）碾压法是通过滚轮对焊缝及其附近区域进行碾压，使材料产生塑性变形，改善残余应力分布。碾压法适用于平板对接焊缝和角焊缝，能够有效降低焊缝表面的残余拉应力，提高焊接接头的疲劳强度。（3）喷丸法是将高速弹丸喷射到焊接接头表面，使表面材料产生塑性变形，形成残余压应力层。喷丸法可以显著提高焊接接头的疲劳寿命，尤其适用于承受交变载荷的焊接结构。弹丸的材质、尺寸、喷射速度和角度等参数会影响喷丸效果，需要根据具体情况进行优化选择。

3.2 热处理消减方法

热处理消减方法是通过对焊接接头进行加热和冷却，利用材料的热-力学性能变化来降低残余应力。常见的热处理方法有整体退火、局部退火和温差拉伸法。（1）整体退火是将焊接构件整体加热到一定温度（通常低于材料的相变温度），并保温一定时间，然后缓慢冷却。在加热过程中，材料的屈服强度降低，残余应力得以释放；冷却过程中，由于材料的均匀收缩，残余应力水平显著降低^[3]。整体退火能够有效消除焊接接头的残余应力，但对于大型焊接构件，需要大型加热设备，成本较高，且可能会导致构件尺寸精度下降。（2）局部退火是对焊接接头局部区域进行加热和冷却，适用于无法进行整体退火的大型构件或特定部位。局部退火需要精确控制加热区域和温度分布，以避免产生新的应力集中。（3）温差拉伸法是在焊缝两侧加热，使焊缝区域产生拉伸塑性变形，抵消部分残余压应力。该方法具有操作简便、成本低的优点，但对加热和冷却的控制要求较高。

3.3 超声冲击消减方法

超声冲击消减方法是利用超声频率的机械振动，通过特制的冲击工具对焊接接头表面进行高频冲击。在冲击过程中焊接接头表面材料产生塑性变形，使表层的残余拉应力转化为残余压应力，同时改善焊接接头的微观组织和表面质量。超声冲击处理能够显著降低焊接接头的残余拉应力，提高疲劳强度和抗应力腐蚀性能。该方法具有处理效率高、设备便携、对环境无污染等优点，适用于各种焊接接头形式和材料。通过调整超声冲击的参数，如冲击频率、振幅、冲击时间等，可以优化处理效果，满足不同工程需求。

3.4 其他消减方法

随着焊接技术发展，新兴残余应力消减技术逐渐成为研究热点，其中振动时效与电磁处理技术展现出独特

优势。(1) 振动时效技术: 振动时效通过向焊接构件施加周期性动应力, 使动应力与残余应力叠加, 诱发材料微观塑性变形, 从而实现应力释放。其核心机制在于通过振动能量激发材料内部位错运动, 促进残余应力松弛。该技术具有显著优势: 第一, 高效节能: 处理时间短(通常为数小时), 能耗仅为传统热时效的10%~20%; 第二, 设备轻便: 设备体积小、操作灵活, 适用于大型构件现场处理; 第三, 适用性广: 对碳钢、不锈钢、铝合金等多种金属材料均有效, 且不改变材料表面性能。目前, 振动时效已广泛应用于船舶、桥梁、压力容器等领域, 但在复杂结构或高精度构件中的应用仍需优化工艺参数。(2) 电磁处理技术: 电磁处理利用交变电磁场与焊接接头相互作用, 通过电磁力或热效应改变材料微观组织(如晶粒细化、相变调控), 进而降低残余应力。其优势在于: 第一, 非接触加工: 避免机械损伤, 适用于精密构件; 第二快速响应: 处理时间通常在分钟级, 效率显著高于传统方法。然而, 该技术仍面临挑战: 电磁场参数(频率、强度)与应力消减效果的量化关系尚未明确, 且设备成本较高。目前电磁处理在航空航天、核电等高端领域的应用尚处于试验阶段, 未来需结合多物理场耦合模拟技术, 优化工艺窗口, 推动其工程化应用。

4 残余应力消减效果评价与工程应用

4.1 效果评价指标与方法

残余应力消减效果评价需要综合考虑多个指标。残余应力数值是最直接的评价指标, 通过测量焊接接头在消减处理前后的残余应力大小和分布, 可直观判断消减效果。常用的残余应力测量方法有盲孔法、X射线衍射法、中子衍射法等。盲孔法操作简便、成本低, 适用于现场测量, 但测量精度相对较低; X射线衍射法和中子衍射法测量精度高, 但设备昂贵, 对测量条件要求严格。除了残余应力数值, 还应考虑焊接接头的力学性能变化, 如强度、塑性、韧性、疲劳强度等。通过拉伸试验、冲击试验、疲劳试验等方法, 对比消减处理前后焊接接头的力学性能指标, 评估残余应力消减对焊接结构性能的影响。此外, 微观组织分析也是重要的评价手段, 通过观察焊接接头微观组织在消减处理前后的变

化, 如晶粒尺寸、相结构等, 了解残余应力消减对材料组织性能的影响机制。

4.2 典型工程案例分析

(1) 在航空航天领域, 飞机机身结构大量采用焊接技术。某型号飞机机翼焊接接头采用超声冲击处理后, 残余拉应力降低了60%以上, 疲劳寿命提高了2倍多, 有效保障了飞机结构的安全性和可靠性。在船舶制造中, 大型船体焊接结构通过整体退火处理, 显著降低了残余应力水平, 减少了船体变形, 提高了船舶的装配质量和航行性能。(2) 在桥梁工程中, 钢桥焊接接头采用喷丸处理和振动时效相结合的方法, 不仅降低了残余应力, 还提高了焊接接头的抗疲劳性能, 延长了桥梁的使用寿命^[4]。这些工程案例表明, 合理选择和应用残余应力消减技术, 能够有效改善焊接结构的性能, 提高工程结构的安全性和可靠性。

结语

本论文系统剖析了焊接接头残余应力的形成机理、分布规律及消减技术, 揭示了热-力学耦合、相变与材料性能差异对残余应力的主导作用, 阐明了不同工艺与结构下的应力分布特征, 并验证了机械干预、热处理、超声冲击等消减技术的有效性。然而新材料与新工艺的应用使残余应力问题日趋复杂。未来研究需深化微观机制探索, 开发高效环保的消减技术, 强化消减工艺与焊接过程的协同优化; 同时完善检测与评价技术, 构建精准预测模型, 为工程实践提供可靠支撑。唯有持续创新, 方能推动焊接技术向智能化、绿色化方向迈进, 助力高端装备制造高质量发展。

参考文献

- [1]王梓轩,李洪波.焊接残余应力对钢结构变形的影响及控制方法[J].焊接技术,2024,45(2):68-74.
- [2]蔡永佳,赵俊峰.焊接过程中残余应力对铝合金结构变形的影响分析[J].材料科学与工程,2023,50(4):112-118.
- [3]胡建华,孙志明.焊接残余应力对结构安全性的影响及控制技术[J].结构工程,2025,42(1):95-101.
- [4]贾杰.焊接残余应力对压力容器稳定性影响的分析[J].冶金与材料,2025,45(04):136-138.