

# 化工管道焊接接头残余应力测试与控制技术

程 浩 (江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院, 江西 南昌 330200)

**摘要:** 化工管道焊接接头残余应力直接影响管道安全和寿命, 本文综述了化工管道焊接接头残余应力测试、控制技术, 介绍了相关难点, 给出了可行建议, 以期为保证化工管道完整性提供指导和帮助。

**关键词:** 化工管道; 焊接接头; 残余应力; 测试技术; 控制技术

中图分类号: TQ055.8; TE973 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0124-03

## Residual Stress Testing and Control Technology for Welded Joints in Chemical Pipelines

Cheng Hao(Jiangxi Institute of Special Equipment Inspection and Testing, General Institute of Inspection, Testing and Certification, Nanchang Jiangxi, 330200, China)

**Abstract:** The residual stress in welded joints of chemical pipelines directly affects pipeline safety and service life. This paper reviews the testing and control technologies for residual stress in these welded joints, introduces related challenges, and provides feasible suggestions, aiming to offer guidance and assistance for ensuring the integrity of chemical pipelines.

**Keywords:** Chemical pipelines; Welded joints; Residual stress; Testing techniques; Control techniques

化工管道作为现代流程工业的血脉, 其安全稳定运行至关重要。在管道安装与维护过程中, 焊接是必不可少的连接工艺。焊接过程局部不均匀的热循环会导致接头区域产生显著的残余应力, 在无外载作用下内部自平衡的应力, 会显著降低结构的疲劳强度、促进应力腐蚀开裂, 并对结构抗脆断能力产生不利影响。准确测试并有效控制化工管道焊接接头的残余应力, 对于预防失效事故、延长管道使用寿命、保障生产安全具有重大工程价值。

### 1 化工管道焊接接头残余应力主要的测试技术

#### 1.1 有损测试法

##### 1.1.1 小孔释放法

小孔释放法作为半损伤性残余应力测试领域的常用技术, 核心原理源于弹性力学的应力释放理论。当在构件残余应力集中区域钻制小直径通孔或盲孔时, 孔边原有应力约束随之部分解除, 进而引发应力重新分布, 促使孔周产生局部应变释放。借助预先紧密粘贴于钻孔周边的电阻应变花, 可精确捕获钻孔后产生的应变变化。

这些释放的应变数据与钻孔前该点原始残余应力存在确定数学关联, 依据经典计算公式或标定系数, 即可反演得到钻孔位置原始主应力的大小与方向。该方法设备便携性较好、操作流程简便, 且对构件造成的损伤程度较低, 这使得它在化工管道现场测试场景中具备一定适用性。但需注意, 其测量结果易受钻孔工艺精度、孔边塑性变形及材料自身塑性特性等因素干扰, 且测量深度通常受限于孔深范围, 在梯度较大的应力场评估中仍存在明显局限。

#### 1.1.2 切条法

切条法属于完全破坏性残余应力测试范畴, 其测试结果常被当作基准标尺, 用于校验其他测试方法的准确性。测试时需将含焊接接头的试件沿预设方向切割为若干细条或小块——其核心假设是, 每个细分单元的残余应力会随切割过程完全释放。借助精密测量获取各细条切割前后的长度变化, 结合材料弹性模量便能反算出细条切割前承载的平均应力。对不同位置及深度方向的细条开展系统测量后, 便能重构出焊接接头相对完整的二维乃至三维残余应力分布场。尽管切条法可提供详尽的空间应力分布数据, 但其局限性也十分突出: 测试流程耗时费力, 对操作精度要求严苛, 更关键的是对试件存在不可逆的破坏性。因此, 该方法多局限于实验室工艺研究, 或从实际构件取样进行破坏性分析, 无法应用于在役化工管道的残余应力评估。

#### 1.2 无损测试法

##### 1.2.1 X射线衍射法

作为残余应力无损检测领域的经典技术, X射线衍射法依托晶体学中经典的布拉格定律实现应力表征。其核心机制在于: 当多晶材料内部存在残余应力时, 晶格会发生弹性畸变, 导致晶粒的晶面间距改变, 这种微观变化会直接引发衍射X射线峰位的偏移。借助精密测角仪捕获特定晶面衍射角的偏移量, 再结合弹性力学关系反算, 即可得到材料表面残余应力的大小与方向。该方法兼具高测量精度与良好空间分辨率, 可精准表征微小区域的应力特征, 且全程不损伤工件完整性, 这使其在精密构件检测中备受青睐。但其固

有局限也较为突出：X射线穿透能力较弱，仅能获取微米级表层的应力信息；同时测量结果对试样表面状态极为敏感，往往需通过电解抛光等手段去除表面加工硬化层与氧化皮，否则易引入测量偏差。

### 1.2.2 超声波法

在残余应力无损评估领域，超声波法凭借独特优势展现出强劲的发展潜力。其底层逻辑源于声弹性效应——当超声波在含应力的介质中传播时，传播速度会随材料内部应力状态发生线性变化，这种明确的关联构成了应力检测的核心依据。通过精准捕获特定超声波的波速变化，或检测与波速直接相关的声时差参数，便可反演求得构件内部的应力大小。该技术最突出的优势在于超声波极强的穿透能力，这使其有望实现构件内部应力沿深度方向的分布表征；同时，其检测效率高，单个检测点耗时仅需数秒至数十秒，易于满足在线监测的工程需求。然而，其工程应用仍面临棘手挑战：超声波的传播特性不仅受控于应力，还对材料的微观组织、晶粒取向、织构状态等因素异常敏感，且这些干扰因素的影响幅度往往远超应力本身，导致应力测量的定量标定成为难题。

## 2 化工管道焊接接头残余应力主要的控制技术

### 2.1 焊接工艺参数优化

#### 2.1.1 控制热输入

控制焊接热输入是选取合适的焊接工艺条件、减小焊接残余应力的非常重要的过程之一。焊缝及热影响区过高的热输入会导致焊缝及其附近的大范围剧烈加热、冷却，塑性不均匀变形及热变形大，焊接残余应力，尤其是纵向残余应力也大。所以为保证焊缝的熔透、成形质量，焊接时应尽可能采取较小的热输入。现实操作中可选择工艺热输入较小的焊接方法，如熔化极气体保护焊，采取小焊接电流、较小的焊接速度焊接等。合理的控制热输入小热输入可缩小高温区范围，小焊接热量梯度，减小收缩及焊接引起的内应力，同时也利于焊缝晶粒细化，改善接头力学性能。

#### 2.1.2 预热与层温控制

预热和层间温度的控制主要是针对特定的材料，特别是淬硬倾向明显的低合金高强钢化工管道焊接的焊接工艺措施。预热的目的主要是为了缓慢焊后的冷却速度，减小焊接接头的热应力和组织应力，以降低形成冷裂倾向，也减少残余应力。多层多道焊的预热同样地需要很严格的层间温度。层间温度过高会使焊缝区累积热量过多，看上去就好像增加整体的热输入量，造成晶粒过粗以及应力增高。而层间温度太低却难以起到预热的作用。所以，把层间温度控制在相应的工艺规程范围内是非常关键的一道操作，把每一层

焊缝都控制在理想热循环下能正常形成，就有较低的残余应力，良好综合工艺条件的操作。

### 2.2 焊后热处理技术

#### 2.2.1 整体热处理

整体热处理是消除残余焊接应力的最彻底、最可靠的方法之一。整体热处理工艺是把焊接构件包括保温炉分加载到具有程序控制能力的炉中加热，炉温进行升温、保温、出炉三个过程。把构件加热到材料屈服较强的状态下具有一定温度在加温中长时间保温以利用热本身特性和材料蠕变性的原理使构件内部存有的残余应力松弛放松。降温阶段缓慢控制，不形成新的过大的热应力。该整体热处理方法可进一步减少焊接残余应力峰值，又能改善焊缝微观组织和接头焊缝切度。对大型化工装置的大长管道或大型容器整体放到炉内整体热处理中设备限制太多、能耗大、时间长、费钱、完成难等问题存在，现场不易操作。

#### 2.2.2 局部热处理

局部热处理是不能进行整体热处理的在役化工管道及大型构件的焊口一般采取的局部热处理方法。局部热处理仅给焊缝及周边一定范围进行加热，常用的方法是用电阻加热带或感应线圈等加热，然后可靠保温材料保温带走，尽量控制加热升温降冷却的温度梯度。基本原理是对于压力容器焊缝及其周边某一宽度部位进行局部加热，在出现塑性变形的这一条件下消除热变形引起的应力集中，使应力得到松弛。局部热处理的效果与加热带宽的合适性、温度控制的均匀性和提高坡口部位升温降降温升温和降温速率有关。如果工艺选择不合适，会在局部热处理区与母材处造成很大的温度差，而产生新的热应力，从而使焊缝的应力松弛不充分而致使新的应力过度产生。

### 2.3 机械处理技术

#### 2.3.1 锤击与喷丸

锤击和喷丸都是利用机械冲击的方法使焊接接头表层变形，达到破坏焊接残余应力影响的目的表面处理技术。锤击是采用气动或者电动锤子带动锤头的形状对焊缝的焊接金属表面进行，以较小得力和层次的不同敲打焊接金属表面，避免因强度过大而导致严重的表面损伤；喷丸也是利用压缩空气或离心空气源，喷送很多较细的弹丸至焊缝和焊缝热影响区上面，突出二者共同点是使焊接金属表层产生塑性变形，焊缝表面层压应力诱发，均能大大抵消一些不希望存在的焊接残余拉伸应力，尤其是焊缝中的应力集中点如焊缝趾部部分的残余拉伸应力。

#### 2.3.2 振动时效技术

振动时效技术是利用机械振动能量来均匀而释放

焊接残余应力的一种方法。振动时效技术用一定质量的一激振器固定在焊接构件上使构件进入共振状态，找到构件的共振频率，然后以此频率施加一定周期时间的动载作用。构件在交变动载作用下，工件残余应力应力高点将在做弥散的微塑性变形，减少应力的应力峰值，降低应力分布不均匀度。振动时效技术的特点是体积小、能耗低、加工时间短、不需要加热，对现场大焊件较为适宜。

### 3 化工管道焊接接头残余应力测试与控制中面临的挑战

#### 3.1 测试精度与现场适用性的矛盾

高精度的实验室测试方法需要用严格的试样制备条件和实验室环境，不能直接适用于充满挑战的化工管道现场中情况复杂的环境。用于管道现场、较为简单的测试方法如某些非破坏性检测的方法的测量精度、稳定性、对材料自身状态等因素的敏感感受不到明显改善。管道现场表面条件、几何形状的限制，测试现场环境如振动等因素都会干扰测试结果，而找到出现问题后的在非理想状态下建立可靠数据库又是很大的挑战。

#### 3.2 复杂结构与异种钢焊接的应力评估困难

化工管道系统绝不是一般的直管，管线中会有弯头、三通、大小头等复杂管件，焊接焊缝的几何形态不规则，应力分布形势相对复杂，具有很明显的三维性，传统的测试以标准平板、简单曲面起贴的是原则，用于复杂地带的应力模型适应性就不那么好。化工装置中的异种钢焊接接头应用越来越多，不同侧母材的物理性能不同，异种钢焊接接头的焊接残余应力的来源和分布更复杂，所以准确地测试和预测有很大难度。

#### 3.3 控制技术的效果稳定性与效率问题

现有的各种控制技术的情况不确定。局部热处理加热带太宽，热处理温度不能够均匀，应力消除得不彻底，反而会造成新的应力。振动方法的工艺参数选择要靠经验摸索，不同种类、不同材料之间的处理效果重复性不是很好。像整体热处理这样的效果不错方法，效率却是存在能量开销大、周期长等问题，不适合在役管线或者大的工程装置上实现，很难适应现代化工生产单位的时代要求。

### 4 化工管道焊接接头残余应力测试与控制的优化建议

#### 4.1 发展智能化和在线监测技术

将传感器、数据分析和人工智能等融合起来，开发智能化的残余应力测试和评估系统，将超声波、声发射检测等无损检测技术和机器学习算法融合起来，通过大量的已经知道的应力信息的样本学习，建立传

感器检测信号和应力信息的智能映射模型，加强无损检测定量化检测能力和抗强干扰能力。探索运行管道在线应力监测方法和管道关键连接部位应力的长期在线安全监测。

#### 4.2 深化数值模拟与实验的融合应用

计算焊接力学可以比较真实地模拟焊接过程与残余应力的形成。以后还要加大对数值模拟的作用，如技术方案制定、控制工艺的改进等。通过完善细小的焊接热-冶金-力学耦合模型，进行预测复杂接头、异种钢焊接接头的残余应力，设计优化测点、预演不同控制工艺等多种效果等，降低试验的盲目性，实现测试控制的精准、定制化设计。

#### 4.3 推广复合型控制技术与标准化管理

研究多种控制技术之间的组合工艺。比如，进行良好焊接工艺设计与焊后机加工处理结合，或焊接结构在振动处理的基础上再辅以局部低温保持松弛等等，把追求良好应力控制的技术更为经济合理化。加强工程应用中好的实际经验的积累和总结，将关于不同类型、不同结构、不同使用条件下焊接化工管道接头残余应力测试及控制的技术准则或规范标准总结完善，提高整个行业技术水平和工程应用上的一致性和规范性。

### 5 结语

化工管道焊接接头残余应力的测试与控制，横跨材料科学、固体力学、焊接工程与无损检测等多个学科，是一项典型的综合性技术课题，其技术水平直接决定了化工生产装置能否实现本质安全与长周期稳定运行。展望未来，伴随智能化检测技术的迭代、先进数值模拟方法的成熟以及新型复合控制工艺的落地应用，化工管道焊接残余应力的管理必将向更精准、更高效、更智能的方向升级。持续深化该领域的理论研究与工程实践，对推动我国化工装备制造与运行维护水平的整体提升，无疑具有关键的支撑意义。

#### 参考文献：

- [1] 何宗源,王芳,周江,等.不同温度下焊接残余应力对含裂纹管道断裂行为的影响[J].焊接,2024,(11):54-64.
- [2] 蔡亮.长输管道在线焊接关键技术探讨[J].石油工业技术监督,2024,40(07):28-33.
- [3] 李毅.超高强钢补焊接头残余应力与疲劳寿命评估[D].西安理工大学,2024.
- [4] 张晶.焊接工艺对复合管接头残余应力的影响规律研究[D].西安石油大学,2023.
- [5] 张世伟.管道焊接残余应力的定量测试和数值模拟研究[D].福州大学,2023.