

中小型管道焊接工艺优化及其经济效益分析

赵峰 (中石化胜利油建工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 本研究旨在探索中小型管道焊接工艺优化及其经济效益, 通过分析中小型管道焊接工艺现状与存在问题, 本研究发现焊接缺陷、焊接应力与变形、焊接成本高是当前中小型管道焊接工艺中所常见而急需解决的重要问题。鉴于此, 本研究提出选择更有针对性的焊接材料与焊接设备、改进焊接参数设置以及应用自动化焊接技术等一系列的中小型管道焊接工艺优化策略, 此类策略可以从节约直接成本、减少后期维护和返工成本以及提升施工效率等角度全面提升中小型管道焊接工程的经济效益。

关键词: 中小型管道; 焊接工艺; 工艺优化; 经济效益

0 引言

随着全球能源需求的持续攀升, 管道作为能源运输的重要载体, 其在工业和民用领域中的应用日益广泛。特别是中小型管道, 其在分配和输送网络中灵活的适应性, 使其逐渐成为各类工程项目中的重要组成部分。然而, 因为大量工程中都使用了中小型管道, 其本身的施工质量也就直接关系到整个管道系统的安全性与可靠性, 所以对于中小型管道而言, 决定其质量水平的焊接工艺就成了制约整个管道系统, 甚至是整体能源运输系统的重要支点, 具有举足轻重的影响。传统的焊接工艺经过广泛应用已经有了比较全面的改善, 但在中小型管道施工中依然面临着焊接缺陷多、焊接应力大以及施工成本高等一系列技术难题^[1]。这些问题不仅影响了管道的使用寿命和安全性, 也在一定程度上拉高了整体工程的施工和维护成本。因此, 如何优化中小型管道的焊接工艺、全面提升管道系统的焊接质量, 并且降低施工成本、提高经济效益, 已然成为当前我国管道运输事业亟待解决的重要课题。

1 中小型管道焊接工艺现状与存在问题

1.1 焊接缺陷

在中小型管道的焊接过程中, 由于操作环境、工艺参数和焊材选择等多方面因素的影响, 焊缝易出现各种焊接缺陷, 这些缺陷不仅严重影响了焊接质量, 还可能对管道的长期使用可靠性产生不利影响^[2]。具体而言, 焊接缺陷主要表现为气孔、裂纹和未熔合等几类问题。

其中, 气孔的产生主要是由于焊接过程中保护不充分导致的, 例如在气体保护焊(GMAW)中, 如果保护气体流量不足或气体纯度不高, 焊接区域就可能受到空气中的氧气、氮气和水蒸气的侵入, 从而在焊缝内部形成气孔。这种缺陷不仅会削弱焊缝的致密性,

还可能成为应力集中的源头, 导致管道在使用过程中发生脆性断裂。

而裂纹问题通常会出现在焊接热影响区或焊缝金属内部, 其形成原因相对复杂, 可能与焊接过程中产生的高温应力、焊接材料的脆性、冷却速度过快等因素有关。例如, 当管道材质中含有高碳或高硫成分时, 焊接过程中如果冷却速度过快, 极易形成淬火组织, 从而导致焊缝区域出现热裂纹或冷裂纹。这种裂纹不仅难以通过常规无损检测手段及时发现, 还具有较强的延展性, 可能随着管道使用时间的增加而扩展, 最终导致管道的失效。

在中小型管道焊接中, 未熔合是另一种常见的焊接缺陷, 通常是由于焊接电流设置不当或操作不规范造成的。未熔合现象在中小型管道的焊接中尤为突出, 因为这些管道的直径较小, 焊接过程中操作空间有限, 焊工在施焊时往往难以保证焊接电弧与母材之间的充分接触, 从而导致焊缝与母材之间没有完全融合。未熔合缺陷的存在不仅削弱了焊缝的机械性能, 还可能导致管道在承受外力时发生提前破坏。

1.2 焊接应力与变形

中小型管道的焊接过程中, 焊接应力与变形是不可忽视的技术难题, 这些问题往往由于管道直径较小、壁厚较薄以及焊接工艺控制不当而更加突出。其中, 焊接应力主要是由于焊接过程中的高温和快速冷却所引起的热应力累积, 在焊接区域形成较大的应力集中, 才导致了管道局部区域产生塑性变形甚至开裂。这种应力集中主要表现为残余应力, 它不仅会降低焊接接头的抗疲劳性能, 还会引发焊接裂纹的扩展, 威胁管道的使用安全。

在焊接过程中, 焊接热输入的大小直接影响焊接应力的产生和分布。例如, 在使用手工电弧焊(SMAW)

进行中小型管道焊接时，焊接电流的选择至关重要。如果焊接电流过大，焊缝区域的加热量过高，冷却过程中就会产生较大的热应力，导致焊缝周围的母材发生明显的塑性变形；而如果电流过小，则焊缝金属的熔融深度不足，可能导致未熔合或焊缝强度不足的问题。此外，由于中小型管道通常直径较小，焊接过程中热量不易散发，也比较容易形成高温区域，从而进一步增加焊接应力的集中风险。

在中小型管道焊接中，焊接变形问题同样也是一个比较突出的技术难题，特别是在多道焊或焊接结构较为复杂的情况下。由于中小型管道的壁厚较薄，焊接过程中管道材料受热后容易发生局部膨胀和收缩，就会形成不均匀的热变形。例如，在环缝焊接中，焊接过程中热输入的非均匀性就可能会导致管道产生轴向收缩或径向弯曲，最终使得整个管道系统的安装精度受到影响，甚至需要通过后续加工来进行校正，增加施工难度和施工成本。

1.3 焊接成本高

传统焊接工艺在中小型管道的施工中由于材料消耗较快、人力成本较高、施工工期较长等方面的高投入而显得成本较高，尤其是在大规模管道网络建设或复杂管道系统的安装中，这些问题更加明显。

其中，在材料消耗方面，由于传统焊接工艺往往对焊材的利用率不高，导致材料浪费现象较为严重。例如，在手工电弧焊(SMAW)中，焊条的熔敷效率较低，焊条渣、飞溅和焊缝余高等都会导致材料的浪费，尤其是在对焊缝质量要求较高的情况下，反复修补焊缝所消耗的焊材更是大幅增加了施工成本。

在人力成本方面，中小型管道焊接中传统的手工焊接工艺对焊工的操作技能要求较高，需要熟练焊工进行长时间的作业，这不仅增加了人力投入，也使得施工进度难以得到保障。在一些复杂的焊接场景中，如位置不便的狭小空间或高空作业，焊接操作的难度会进一步提升，导致工时增加，人工成本随之上升。此外，焊接过程中焊缝质量控制的难度也使得返工率较高，这不仅增加了施工时间，还导致了额外的人工和材料成本投入。

在施工工期问题上，传统焊接工艺由于其手工操作的特点，施工速度较慢，特别是在中小型管道的长距离铺设或复杂结构的安装中，焊接工序成为影响整体工程进度的瓶颈。为了缩短工期，传统施工单位通常会要求增加焊工数量或进行多班次作业，这无疑只会进一步堆高中小型管道的焊接施工成本，给施工单

位造成巨大的现金流压力。

2 中小型管道焊接工艺优化策略

2.1 选择更有针对性的焊接材料与焊接设备

在中小型管道的焊接过程中，由于壁厚较薄，焊接时对热输入的控制要求更高，过大的热输入可能导致焊缝变形、烧穿，甚至产生内应力和裂纹。因此，焊接材料的选择应优先考虑那些在低热输入条件下能够实现良好熔透效果的焊材。比如，可以选择低氢型焊条或细径焊丝，这些焊材在降低热量输入的同时，可以有效减少焊缝中的氢含量，从而降低焊接过程中氢致裂纹的风险。此外，针对一些特殊材质的中小型管道，如不锈钢或合金钢管道，为了优化焊缝性能与母材匹配效果，最好还是选择含有合适合金成分的焊材。

在焊接设备的选择上，应考虑设备的电流控制精度和稳定性问题。由于中小型管道焊接对热输入比较敏感，因此在选择焊接电源的时候应当选择具备精确的电流控制功能的电源，提高焊接过程中电源对热输入的有效调节水平，避免产生各种奇形怪状的焊接缺陷。例如，可以选择具有脉冲电流控制功能的焊接电源，这种设备可以通过调节电流的峰值和基值，精细控制焊接过程中的热量输入，从而实现稳定的熔透效果并减少热影响区的尺寸。

此外，在设备配置方面，可以选择一些适合中小型管道焊接的自动送丝系统和精准的焊枪定位装置，这些设备可以提到焊接设备的焊材稳定输送能力和焊接位置精确控制水平，进一步提高焊接质量，保证焊接工艺的稳定性 and 可靠性。

2.2 改进焊接参数设置

中小型管道的焊接由于管道壁厚较薄问题，焊接工艺对焊接参数的设置要求极为严格。焊接电流、焊接速度以及电弧长度的精确控制，会直接影响到焊接质量和焊缝的机械性能。为了避免过高的热输入导致焊缝变形、烧穿或内部组织粗化，在设置焊接电流时，应根据管道的实际壁厚和材质选择较低的电流范围，减小焊接过程中的热输入。例如，对于壁厚较薄的管道，可以选择比常规焊接低 10%–20% 的电流，将焊接过程中的热量输入控制在安全范围内。在焊接速度控制方面，速度过快可能导致焊缝未完全熔透，而速度过慢则可能引起过大的热输入。因此，应通过实验调整，确定适合不同管径和壁厚的最佳焊接速度。而在电弧长度控制方面，过长的电弧会增加焊接区域的热输入，导致焊缝表面形成氧化层或产生气孔；过短的电弧则可能引发焊丝与焊缝的粘连，影响焊缝的均

匀性和外观质量。因此，在焊接实操中也应根据焊接电流和焊接环境，选择适当的电弧长度，提高焊接过程的稳定性。

2.3 应用自动化焊接技术

在中小型管道的焊接过程中，应用自动化焊接技术对于焊接效率和焊接质量而言，都有比较好的保障。由于中小型管道通常具有较小的直径和较薄的壁厚，传统手工焊接容易受到操作人员技能水平和焊接环境的影响，导致焊缝质量不稳定。而自动化焊接技术则通过精确控制焊接过程中的各项参数，有效避免这些问题的发生。

首先，自动化焊接设备可以实现对焊接电流、电压、焊接速度以及焊枪位置的精确控制，解决中小型管道焊接过程中的参数设置和实操精度问题。自动化设备可以通过预先设定和编程，根据管道的具体尺寸和材料特性，自动调整焊接参数，并在一次次的微调中持续提高焊缝的均匀性和熔透效果，并且在找到合适参数的情况下进行重复性操作。例如，在使用轨道式自动焊接设备时，焊枪可以沿管道自动移动，保持稳定的焊接速度和电弧长度，避免因人为操作不当导致的焊接缺陷。

自动化焊接技术在中小型管道的焊接中，还可以有效控制、减少热影响区的大小，降低焊缝附近材料的热变形情况，从数据的角度提升焊接工艺的实时参数调整水平。尤其是在管壁较薄的情况下，过大的热输入容易导致管道变形或焊缝出现裂纹，而自动化焊接设备可以通过精确控制热输入量，保持焊接过程中的热平衡，确保焊缝与母材的良好结合。

3 经济效益分析

3.1 节约直接成本

中小型管道焊接工艺的优化可以在多个环节上有效减少直接成本。其中，在材料消耗上，优化后的焊接工艺可以显著提高焊材的利用率。例如，通过改进焊接电流和电压的设置，可以减少焊材的浪费，避免因焊接缺陷需要反复修补带来的额外消耗。选用适宜的焊接材料和设备，特别是使用高效的焊丝和焊条，可以减少材料浪费，从而降低焊材成本。在人工成本上，优化后的工艺可以减少对高技能焊工的依赖，降低焊接工艺的人力成本。通过自动化焊接技术的引入，部分焊接作业可以由自动化设备完成，减少对人力的需求，避免人工焊接带来的误差和不稳定性。自动化技术的应用，不仅可以减少施工工时，还可以提高焊接速度和焊接质量，进一步降低项目的整体人力成本。

3.2 减少后期维护和返工成本

传统焊接工艺中，气孔、裂纹和未熔合等常见焊接缺陷问题，常导致后期频繁的维护和返工，进而影响了管道运营的总体成本支出。因此，通过焊接工艺的优化，全面提升了中小型管道的焊接质量，焊缝的致密性和机械性也有了全面的改进，因而自然就降低了因焊接缺陷引发的管道破裂和泄漏的风险。优化工艺后，焊接过程中的焊接应力和变形问题得到了有效控制，管道在运营期间因应力集中导致的管道破坏风险有效降低，管道的使用寿命更长，管道损坏而产生的维修成本自然就有效降低。

3.3 提升施工效率

焊接工艺的优化不仅保障了焊接质量，还显著提升了焊接施工效率，通过自动化焊接等技术的应用，原本困难的焊接工程问题得到快速解决，施工速度得到了极大提升。在中小型管道的大规模铺设过程中，自动化设备比人工更能保持一致的焊接质量，减少了因人工操作不当而导致的质量波动问题，使得工程进度不再总是受到返工的困扰，效率直线上升。此外，焊接参数的优化、更加合适的设备选型，充分减少了施工中的意外停工和故障发生率，也减少了因焊接问题而导致的返工时间，从而有效缩短了项目工期。在一些紧急项目中，工期的缩短意味着项目可以早日投产并产生经济效益，而这种效益的积累对整体项目的盈利能力更是有着直接的推动效益。

4 结论

中小型管道焊接工艺的优化不仅从技术上解决了焊接质量问题，还通过节约直接成本、减少后期维护和返工成本以及显著提升施工效率，带来了可观的经济效益。在未来的研究中，针对中小型管道焊接工艺的优化研究可以进一步集中在自动化施工过程中，也可以尝试结合人工智能或者深度学习算法，让整个中小型管道焊接工程更加自动化和智能化，从而减少中间环节的成本支出与失误风险，进一步提高焊接工艺的科技集成水平，从而有效增进中小型管道焊接工程的总体效益。

参考文献：

- [1] 曾甘露, 李绪丰, 朱鹏安, 王磊. 大型石化工程中的工业管道试压包审核要点分析 [J]. 特种设备安全技术, 2024, (04): 15-17.
- [2] 冯章柯, 田云祥. 聚乙烯燃气管道焊接过程平稳特征分析方法 [J]. 石油管材与仪器, 2024, 10(04): 68-73.