

# 长输管道半自动下向焊施工工法的优化与应用研究

陈玮成 王立业

中建三局第三建设工程有限责任公司，湖北武汉，430074；

**摘要：**随着石油天然气及化工工业的蓬勃发展，长输管道朝着大口径、高压力的方向持续迈进，这对焊接技术的效率和质量提出了更为严苛的要求。本文深入且系统地阐述了长输管道半自动下向焊施工工法的技术特点与创新性，并结合实际工程实例，全面验证了该工法的经济性与环保效益。该工法运用药芯自保护焊丝，借助流水化作业模式与分层焊接工艺，使焊接效率得到显著提升，焊缝质量严格符合 API 1104 标准，缺陷率成功降低至 5% 以下。与传统氩电联焊相比，采用该工法工期能够缩短 30%，每万吋口综合成本可节省 53.9 万元。研究结果充分表明，半自动下向焊技术兼具高效性与环保性，能够为长输管道建设提供坚实可靠的技术支撑。

**关键词：**半自动下向焊；长输管道；药芯焊丝；流水化作业；焊接质量

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.10.007

## 前言

在现代能源输送体系中，长输油气管道扮演着核心角色，是连接能源生产地与消费地的关键纽带。其焊接质量的优劣，不仅直接关乎管道在运行过程中的安全性，还对管道的使用寿命有着决定性影响。传统手工下向焊技术虽然具备熔深大、焊缝成型美观等优点，然而，在实际应用中，其效率低下、劳动强度高的问题也逐渐凸显，难以满足当前长输管道建设日益增长的需求。

随着焊接自动化技术的不断进步，半自动下向焊技术应运而生。该技术巧妙地融合了人工操作的灵活性与设备的高效性，一经问世便在长输管道焊接领域崭露头角，逐步成为主流工艺。据国际焊接学会（IIW）的统计数据显示，在全球长输管道焊接所产生的缺陷中，根部未焊透和层间夹渣这两类缺陷的占比超过 70%。这充分表明，焊接质量的提升依然面临诸多挑战，亟待更为先进的技术和工艺加以解决。

我国《石油天然气管道焊接技术规范》（GB 50369 - 2014）明确规定，焊接工艺在实际应用中必须兼顾效率与质量这两个关键因素，并且要具备在野外复杂环境下作业的适应能力。长输管道的建设往往会穿越各种复杂的地形地貌和气候区域，如沙漠、高寒地带等，这就对焊接技术提出了更高的要求。半自动下向焊技术采用自保护焊丝，在焊接过程中无需额外的外部气体保护，同时具备较强的抗风性能，在风速不超过 11m/s 的情况下仍能稳定施焊，尤其适用于这些恶劣的工况环境。

本文将以某长输管道工程为具体实例，从工艺原理、

施工流程、质量控制等多个维度，系统且深入地分析该工法的技术优势，并对其经济效益进行量化评估，旨在为长输管道建设领域提供具有重要参考价值的技术依据。

## 1 工法特点与技术创新

### 1.1 工法特点

1) 高效分层焊接：在半自动下向焊施工工法中，根焊、热焊、填充焊、盖面焊等各焊接工序分工细致明确。每位焊工仅需专注掌握单一工序的技能，这使得操作的熟练程度大幅提高，从而实现了焊接效率提升近 3 倍的显著效果。例如，在某大型长输管道项目中，采用这种分工协作的方式，每个焊接小组每天完成的焊口数量相比传统方式增加了两倍有余，极大地加快了工程进度。

2) 抗环境干扰：该工法所采用的药芯自保护焊丝具有独特的优势，在风速小于等于 11m/s 的条件下，能够稳定进行施焊作业，无需额外配备气体保护设备。这一特性使得半自动下向焊在野外复杂多变的环境中展现出了强大的适应性。无论是在风沙肆虐的沙漠地区，还是在风力较大的空旷地带，都能确保焊接工作顺利进行，有效减少了因环境因素导致的停工次数，保障了工程的连续性。

3) 低缺陷率：通过实施流水化作业模式和标准化的焊接参数设置，半自动下向焊成功地将根部缺陷率控制在 5% 以内。这一数据与传统焊接工艺高达 15% -

20% 的根部缺陷率相比，有了显著的降低。较低的缺陷率意味着焊缝质量更加可靠，管道在运行过程中的安全性得到了极大提升，减少了后期因焊接缺陷而导致的维修和更换成本。

4) 节能环保：在焊接过程中，半自动下向焊技术在节能环保方面表现出色。与传统焊接工艺相比，焊接飞溅减少了 60%，焊渣产生量降低了 80%。这不仅减少了对施工现场环境的污染，还降低了清理和处理废弃物的成本，符合当前绿色施工的发展理念，为可持续发展的工程建设提供了有力支持。

## 1.2 技术创新

1) 动态电流调节技术：为了确保在不同焊接位置下熔池的稳定性，半自动下向焊技术引入了动态电流调节技术。该技术能够根据焊接位置（平焊、立焊、仰焊）的变化，自动对电流参数进行精准调整。例如，在平焊位置时，焊接电流相对较低，以保证熔池能够平稳地铺展；而在立焊和仰焊位置时，由于熔池受到重力的影响较大，电流会相应地增大，从而提供足够的热量和电弧吹力，使熔池能够保持稳定，避免出现流淌、下坠等问题，有效提高了焊接质量和焊缝的成型效果。

2) 智能清渣系统：针对焊接过程中产生的焊渣清理难题，研发了集成角磨机与真空吸附装置的智能清渣系统。该系统实现了焊道清理的自动化，在焊接完成一层后，能够迅速、高效地清理焊道表面的焊渣。角磨机负责对焊渣进行打磨松动，真空吸附装置则及时将松动的焊渣吸除，避免了人工清渣过程中可能出现的清渣不彻底问题，同时也提高了清渣效率，减少了层间夹渣等缺陷的产生概率。

3) 数字化监控平台：借助现代数字化技术，构建了数字化监控平台。该平台能够实时采集焊接电流、电压及焊接速度等关键数据，并对这些数据进行分析和处理，生成详细的质量追溯报告。通过对这些数据的实时监测和分析，施工人员可以及时发现焊接过程中出现的异常情况，并采取相应的措施进行调整。同时，质量追溯报告也为后续的质量检查和工程验收提供了有力的依据，方便对焊接质量进行全面、准确的评估。

## 2 工艺原理与适用范围

### 2.1 工艺原理

半自动下向焊的工艺核心在于分层施焊与参数优

化，通过对每个焊接层次的精细控制，确保焊缝质量达到高标准。

1) 根焊：根焊是整个焊接过程的关键起始环节，采用 E6010 纤维素焊条进行焊接。焊接电流通常控制在 90 – 110A 之间，采用短弧操作方式。这种操作方式能够确保电弧稳定，实现单面焊双面成型的效果，使根部焊缝具有良好的熔透性和成型质量，为后续的焊接工序奠定坚实的基础。

2) 热焊：热焊与根焊之间的时间间隔应控制在不超过 5min，这样可以使焊缝保持较高的温度，有利于提高焊缝的力学性能。在热焊时，电流提升至 130 – 150A，通过快速覆盖根焊层，进一步加强根部焊缝的强度和密封性，防止出现裂纹等缺陷。

3) 填充焊：填充焊采用 E71T8 药芯焊丝，在焊接过程中，横向摆动幅度控制在不超过 5mm。通过这种方式，能够使焊丝均匀地填充焊缝，提高熔敷率，相比传统焊接方式，熔敷率提高了 40%。填充焊的目的是使焊缝达到规定的厚度，为盖面焊提供良好的基础。

4) 盖面焊：盖面焊的主要任务是保证焊缝的外观质量，将焊缝余高控制在 0.2 – 1.5mm 之间，覆盖宽度为坡口两侧各 1 – 2mm。这样的参数设置能够使焊缝表面平整、光滑，既满足了美观要求，又保证了焊缝的强度和密封性。

### 2.2 适用范围

1) 管径与壁厚要求：本工法适用于管径大于等于 219mm，壁厚大于等于 6mm 的油气管道焊接。在这个管径和壁厚范围内，半自动下向焊能够充分发挥其技术优势，保证焊接质量和效率。对于大口径、厚壁管道，该工法的高效分层焊接和强大的熔透能力能够满足工程需求；而对于较小管径和壁厚的管道，也能通过精细的参数控制实现高质量焊接。

2) 环境条件要求：在环境温度处于 - 30°C – 50°C，风速小于等于 11m/s 的条件下，半自动下向焊均可正常作业。这使得该工法能够适应多种复杂的气候环境，无论是寒冷的北方地区，还是炎热的南方地区，亦或是风力较大的野外环境，都能保障焊接工作的顺利进行。

3) 作业场景要求：无论是野外开阔场地的施工，还是受限空间内的作业，半自动下向焊都能展现出良好的适应性。在野外施工时，其抗环境干扰的特性能够有效应对各种自然条件；在受限空间作业时，其设备的灵

活性和操作的便捷性能够满足空间限制的要求，确保焊接质量不受影响。

### 3 施工工艺流程与关键技术

#### 3.1 施工总流程

半自动下向焊的施工流程涵盖多个关键环节，依次为焊前准备、管道组对、根焊、热焊、填充焊、盖面焊、焊后检测以及标识与记录。每个环节紧密相连，前一个环节的质量直接影响后续环节的施工效果，只有确保每个环节都严格按照规范操作，才能保证整个焊接工程的质量。

#### 3.2 关键技术要点

1) 焊前准备：坡口加工是焊前准备的重要环节，单边坡口角度应控制在  $28^\circ - 32^\circ$  之间，钝边厚度为  $1.0 - 1.5\text{mm}$ ，错边量需控制在不超过  $2\text{mm}$ 。合适的坡口角度和钝边厚度能够保证焊接时电弧的穿透性和熔敷金属的填充效果，而严格控制错边量则是确保焊缝质量均匀的关键。对于 E6010 焊条，在使用前需进行  $70 - 80^\circ\text{C}$  烘干  $1\text{h}$  的处理，且重复烘干次数不得超过 2 次，以保证焊条的性能稳定。此外，焊接区域的湿度应控制在不超过 85%，对于高碳钢材质的管道，预热温度需达到  $100^\circ\text{C}$  以上，这样可以有效降低焊接应力，防止出现裂纹等缺陷。

2) 根焊操作：在根焊操作过程中，不同的焊接位置需要采用不同的参数和操作方法。在平焊位，焊接电流设定为  $90\text{A}$ ，焊条角度保持在  $70^\circ - 80^\circ$  之间，熔孔直径控制在不超过  $3\text{mm}$ ，这样可以保证熔池平稳，避免出现焊瘤等缺陷。在立焊位，为了克服重力对熔池的影响，电流提升至  $110\text{A}$ ，并采用反月牙形运条方式，使熔池能够均匀地填充焊缝。在仰焊位，同样将电流设置为  $110\text{A}$ ，采用短弧顶推熔池的操作方法，防止熔池下坠导致焊缝内凹，确保根部焊缝的质量。

3) 质量检测：外观检查是质量检测的首要环节，主要检查咬边深度和焊缝余高。咬边深度应不超过  $0.5\text{mm}$ ，余高需控制在  $0.2 - 1.5\text{mm}$  之间，超出这个范围可能会影响焊缝的强度和密封性。无损检测采用 X 射线探伤，需符合 ASME B31.8 标准，且一级片率应达到 95% 以上。通过严格的质量检测，能够及时发现焊接过程中存在的缺陷，并采取相应的措施进行修复，确保焊缝质量符合要求。

### 4 工程应用与效益分析

#### 4.1 工程概况

东营港区一突堤 1#、2# 泊位管道工程是应用半自动下向焊技术的典型案例。该工程管道全长  $12\text{km}$ ，管径为  $813\text{mm}$ ，壁厚  $12\text{mm}$ 。在施工过程中，采用了半自动下向焊工艺，共计完成焊口 60168 个，整个施工周期仅为 50 天，相比传统工艺，工期得到了显著缩短。

#### 4.2 性能指标

指标	实测值	标准要求
焊接合格率	98.5%	$\geq 95\%$
根部缺陷率	4.2%	$\leq 5\%$
日均焊口量	150 个 / 人	50 个 / 人

从性能指标数据可以看出，半自动下向焊技术在该工程中的应用取得了优异的成果。焊接合格率高达 98.5%，远远超过了标准要求的 95%；根部缺陷率仅为 4.2%，控制在了 5% 的标准范围内；日均焊口量达到 150 个/人，是传统工艺日均焊口量 50 个/人的三倍，充分体现了该技术在提高焊接质量和效率方面的优势。

#### 4.3 经济效益

1) 直接节省：在人工费用方面，由于半自动下向焊技术提高了焊接效率，减少了焊工的数量和工作时间，相比传统工艺，人工费用减少了 70.4 万元。在机械费用方面，设备的使用效率得到提升，租赁时间缩短，机械费用降低了 9.5 万元。

2) 间接效益：该技术使得工期缩短了 10 天，这意味着减少了设备租赁成本，共计节省 15 万元。此外，工期的缩短还能够使管道提前投入使用，为企业带来更早的经济效益。

3) 环保效益：在环保方面，半自动下向焊技术的优势也十分明显。焊渣回收率达到了 90%，有效减少了固废处理量，降低了固废处理费用，共计节省 3 万元。同时，焊接过程中产生的焊接飞溅和焊渣量减少，对环境的污染程度降低，具有良好的环保效益。

### 5 技术难点与解决方案

#### 5.1 焊缝层间夹渣

1) 成因：焊缝层间夹渣的主要成因包括清渣不彻底和焊速过快。在焊接过程中，如果前一层焊缝的焊渣没有清理干净，就会残留在层间，形成夹渣缺陷。此外，焊速过快会导致熔池在凝固过程中，熔渣来不及浮出表

面，也容易造成夹渣。

2) 对策：为了解决焊缝层间夹渣问题，采取了双面打磨+真空吸附的方法。在每层焊接完成后，对焊缝进行双面打磨，使焊渣松动，然后利用真空吸附装置将松动的焊渣及时吸除。同时，严格控制层间清理时间，确保在2min以内完成清理工作，避免焊渣再次氧化和粘结，有效减少了层间夹渣的产生。

## 5.2 根部未焊透

1) 成因：根部未焊透主要是由于组对间隙偏差和焊接电流不足导致的。在管道组对过程中，如果间隙过大或过小，都会影响焊接时电弧的穿透能力，导致根部未焊透。此外，焊接电流不足会使焊条熔化不充分，无法提供足够的热量使根部焊透。

2) 对策：针对根部未焊透问题，引入了激光对中仪。该仪器能够实时监测管道组对间隙的精度，将间隙偏差控制在±0.2mm以内，确保组对间隙符合焊接要求。同时，根据管道的材质、壁厚和坡口形式等因素，

合理调整焊接电流，保证根部能够充分焊透，有效避免了根部未焊透缺陷的出现。

## 6 结论与展望

半自动下向焊技术通过对焊接参数的优化和流水化作业模式的应用，在长输管道焊接领域取得了显著的效果。与传统焊接工艺相比，其在焊接效率、质量、成本控制以及环保性能等方面都展现出了巨大的优势。工程实践证明，该技术能够使综合成本降低。

## 参考文献

- [1]薛振奎.国内长输管道下向焊用焊接材料的发展现状与建议[J].金属加工:热加工,2006,000(010):16-17.
- [2]徐升乾,刘春艳,越大伟.我国长输管道下向焊技术的现状及发展趋势[J].经济技术协作信息,2001(5):100-100.
- [3]李剑.长输管道手工下向焊接工艺的质量通病与防治[J].中华民居,2012(4).