

# 高硅钢管道焊接工艺优化及质量控制研究

陆丹青

中石化工程质量监测有限公司宁波分公司 浙江 宁波 315200

**摘要：**本文深入探讨了高硅钢管道在多个工业领域的应用及其重要性，特别是高硅钢S32615管道的焊接工艺特性与优化。通过分析S32615材料的物理化学性质，明确了焊接过程中的难点，并提出了焊接工艺参数的优化方法。同时，本文还介绍了焊接工艺质量控制要求及无损检测技术在S32615高硅钢管道焊接中的应用，为确保焊缝质量和管道系统的长期稳定运行提供了技术参考。

**关键词：**高硅钢管道；焊接工艺；优化；质量控制

引言：高硅钢作为一种具有优异特性和耐腐蚀性的特殊钢材，在电力、电子及化工等领域应用广泛。其高熔点、低热导率等特性给管道焊接带来了诸多挑战。本文旨在通过深入研究S32615高硅钢管道焊接工艺的优化及质量控制技术，探索提高焊缝质量、减少焊接缺陷的有效途径，以满足工业领域对高硅钢管道焊接质量日益严格的要求，推动相关技术的创新与发展。

## 1 高硅钢管道的应用领域及重要性

高硅钢管道，作为一种具有高强度、高耐热、高耐腐蚀等优异特性的管材，在多个工业领域中都扮演着至关重要的角色。其应用领域之广泛，涵盖了石油、化工、电力、航空航天等多个关键行业，充分展现了其不可替代的重要性。在石油行业中，高硅钢管道因其出色的耐腐蚀性和耐高温性能，常被用于输送各种腐蚀性介质和高温流体，确保了石油开采和加工过程中的安全性和稳定性。在化工领域，高硅钢管道则能够抵抗各种化学物质的侵蚀，保障化工生产的连续性和高效性。电力行业中，高硅钢管道的重要性更是显而易见，作为制造电机、变压器等电力设备的关键材料，高硅钢管道凭借其优异特性和低损耗特性，能够显著提升电力设备的运行效率，降低能源消耗，为电力传输和分配提供了坚实的基础。在发电设备如汽轮机、水轮机的制造中，高硅钢管道也发挥着重要作用，进一步提高了能源的利用效率。航空航天领域对材料的要求极为严苛，而高硅钢管道凭借其高强度、轻量化和良好的耐腐蚀性，成为了航空航天设备中不可或缺的一部分<sup>[1]</sup>。无论是飞机发动机的制造，还是航天器的燃料输送系统，高硅钢管道都展现出了其卓越的性能和可靠性。高硅钢管道在多个工业领域中都发挥着至关重要的作用，其优异的物理和化学性能，不仅保障生产过程的安全性和稳定性，还提高设备的运行效率和能源利用效率，高硅钢管道的应用领域广

泛且重要，是推动相关行业发展的重要力量。

## 2 高硅钢 S32615 管道焊接工艺特性分析

### 2.1 高硅钢S32615材料的物理化学性质

高硅钢S32615作为一种特殊的合金材料，其物理化学性质直接影响了焊接工艺的制定与执行。该材料主要由铬、镍、钼及适量的硅等元素组成，这些元素之间的协同增效，赋予了S32615卓越的耐腐蚀性能和机械强度，使其成为化工、石油、天然气等领域的重要材料。值得注意的是，与传统的高硅钢不同，S32615并不以其高硅含量带来的磁性能为主要特性，因此在焊接过程中无需特别考虑磁导率或矫顽力的影响。S32615的高熔点要求焊接时提供充足的热量以确保材料充分熔融，同时其相对较低的热导率使得焊接过程中容易产生较大的温度梯度，增加了热应力和变形的风险。因此，在焊接S32615管道时，必须精确控制焊接参数，确保热量输入的合理性，以维护材料的性能和接头的质量。

### 2.2 焊接过程中的难点

(1) 材质特性带来的挑战：明确高硅钢S32615的具体材质，是制定针对性焊接工艺的前提。不同材质的物理化学性质差异显著，控制方法自然不同。S32615的独特之处在于其耐腐蚀性而非磁性，这要求焊接工艺更加注重对焊接接头的耐腐蚀保护，而非磁性性能的控制。

(2) 圆形缺陷的控制：高硅钢S32615焊接过程中容易出现圆形缺陷，如气孔、夹杂等，是焊接质量控制的重要挑战。为有效控制这些缺陷，需采取一系列措施，包括严格控制热输入量，避免过热导致气体析出和卷入；采用多层多道焊接技术，确保每层焊缝的质量；在层间和焊丝焊前使用丙酮溶液进行清洗，去除焊接表面的污染物和氧化物，提高焊缝的清洁度和质量<sup>[2]</sup>。(3) 焊材选择与焊丝质量控制：目前针对高硅钢S32615尚无专门的指定焊材标准，因此通常采用母材直接拉丝制作焊丝

的方法。这种方法虽然简便，但焊丝的质量直接取决于母材的质量。因此，在选择母材时，必须确保其化学成分、机械性能和表面质量均符合标准要求，以保证焊丝的质量和焊接接头的性能。

### 3 高硅钢管道焊接工艺参数优化

#### 3.1 高硅钢S32615材料特性与焊接工艺选择

高硅钢S32615，作为一种特定配比的合金材料，不仅继承了高硅钢家族的典型特征，如较高的电阻率，这有助于减少电流通过时产生的热量损失。还因其独特的化学成分（包含铬、镍、钼等元素）而具备优异的耐腐蚀性和高温稳定性。这些特性使得S32615高硅钢在电力、电子、化工及高端设备制造等领域中扮演着关键角色。然而，其高熔点（约1530°C）、低热导率以及在室温下相对较高的脆性，为焊接工艺的选择和执行带来了巨大挑战。在焊接S32615高硅钢管道时，传统焊接方法如手工电弧焊和气焊因难以精确控制焊接参数和避免热影响区（HAZ）的过度加热，往往导致焊缝质量不稳定，易产生裂纹、组织粗大等问题。因此，更倾向于采用高精度、低热输入的现代焊接技术，如精确控制气体环境的TIG（钨极惰性气体保护焊）和MIG（金属惰性气体保护焊）。

#### 3.2 焊接工艺参数优化方法

针对S32615高硅钢管道的焊接工艺参数优化，需结合材料特性采用科学方法，具体包括：（1）试验设计（DOE）：通过精心设计的试验矩阵，系统地调整焊接参数如焊接电流、电压、焊接速度及保护气体流量等。以全因子设计为例，通过设定不同水平的焊接电流（如110A至280A，间隔170A）和焊接速度（如8mm/s至24mm/s，间隔16mm/s），结合具体材料特性，进行多组试验。通过分析每组试验的焊缝质量（如抗拉强度、硬度、金相组织等），利用统计软件确定最佳参数组合。此方法不仅能揭示各因素间的交互作用，还能有效缩短寻找最优参数的周期。（2）数值模拟：基于焊接物理过程，利用计算流体力学（CFD）和计算热力学（CTH）原理，构建S32615高硅钢焊接过程的数学模型。通过模拟不同参数下的焊接热循环、熔池流动及凝固过程，预测焊缝的组织形态、应力分布及缺陷形成。该方法能够在无需实际试验的情况下，快速评估大量参数组合的效果，为实验设计提供理论依据和方向指导<sup>[1]</sup>。

#### 3.3 焊接变量对焊缝质量的影响分析

在S32615高硅钢管道焊接过程中，关键焊接变量的精确控制对焊缝质量至关重要：（1）焊接电流与电压：它们是决定焊接热输入的核心因素。对于S32615材料，

过高的电流或电压会导致焊接热输入过大，使焊缝组织粗化，增加裂纹敏感性；而过低则可能导致焊缝未熔合或熔深不足。例如，对于中等厚度的管道，TIG焊接电流可能设定在90-150A之间。电压设定为14-16V，可实现熔深与熔宽的完美平衡，确保焊缝微观组织均匀细小。

（2）焊接速度：直接影响焊接热输入在焊缝中的分布及停留时间。适宜的焊接速度能够确保焊缝充分熔合且热影响区适中。对于S32615材料，研究发现将焊接速度控制在12-18mm/s范围内，可以显著提升焊缝的抗拉强度和减少焊接变形。（3）保护气体流量：在高硅钢焊接中，保护气体不仅防止氧化，还影响电弧稳定性和焊缝形态。对于S32615材质，推荐使用纯度高的氩气作为保护气体，流量控制在16-20L/min之间，以确保焊缝表面光洁无氧化，并维持电弧稳定。（4）焊缝质量控制与检验：在优化焊接工艺参数并成功施焊后，对焊缝质量进行全面而严格的检验是确保管道安全运行的必要环节。这包括焊缝外观检查（如检查焊缝表面是否有裂纹、咬边、未熔合等缺陷）、尺寸测量（确保焊缝宽度、高度和余高等符合设计要求）、非破坏性检测（如X射线检测、超声波检测等，用于发现焊缝内部的裂纹、气孔、夹杂物等隐藏缺陷）以及机械性能测试（如抗拉强度、屈服强度、冲击韧性等试验，以评估焊缝的力学性能）。

### 4 高硅钢管道焊接质量控制技术

#### 4.1 焊接工艺质量控制要求

针对S32615这一特定材质的高硅钢管道，焊接工艺的质量控制是确保管道系统长期、稳定、安全运行的基石。S32615高硅钢以其优异的耐腐蚀性和高温性能在多个工业领域中得到广泛应用，但其高熔点、低热导率和脆性特点对焊接工艺提出了严峻挑战。因此，焊接工艺的选择必须精准匹配材料的物理和化学特性，优先采用TIG焊等高精度、低热输入的焊接方法。在设定焊接工艺参数时，如焊接电流、电压、焊接速度和保护气体种类及流量等，需经过严格的计算、模拟及实验验证。例如，针对S32615高硅钢，可能发现当焊接电流设定在比如110-130A，电压维持在14-16V范围内，焊接速度控制在12-15mm/s时，能够获得最佳的焊缝成形和力学性能。同时，焊接前的准备工作同样不容忽视，包括彻底清洁焊接区域、精确加工坡口、选用匹配的焊接材料。这些准备工作将直接影响焊缝的熔合质量、气体保护效果以及焊接过程中的热传导效能。在焊接过程中，实施严格的监控和记录制度是至关重要的。焊接人员需严格遵守焊接工艺规程，确保每一步操作都符合既定标准。

#### 4.2 无损检测技术在S32615高硅钢管道焊接中的应用

#### 4.2.1 射线检测 (RT) 的深入应用

射线检测, 作为无损检测领域的经典方法, 其直观性和准确性在S32615高硅钢管道焊缝的内部缺陷检测中得到了充分展现。通过高能射线 (如X射线或 $\gamma$ 射线) 穿透焊缝, 利用射线与物质相互作用的特性, 形成焊缝内部的影像。这些射线照片能够清晰地揭示焊缝中可能存在的未熔合、气孔、夹渣等隐蔽缺陷, 其细节之丰富, 使得检测人员能够准确判断缺陷的类型、位置和大小, 为后续的缺陷修补或工艺调整提供直观且详尽的依据。

#### 4.2.2 超声波检测技术的特点及应用

超声波检测是一种利用超声波在材料中传播时遇到缺陷会产生反射、散射等现象来检测焊缝内部缺陷的方法。对于S32615高硅钢管道焊接, 超声波检测具有高效、高灵敏度的特点, 能够快速检测出焊缝中的微小裂纹、未熔合等缺陷。同时, 超声波检测设备相对较为便携, 操作方便, 适用于现场检测。在S32615高硅钢管道焊接质量控制中, 超声波检测可以与射线检测相互补充, 共同确保焊缝质量。

#### 4.2.3 相控阵检测技术的精准应用

在S32615高硅钢管道焊接质量的严格把控中, 相控阵检测技术以其独特的优势成为超声波检测的有力补充与升级。相控阵技术通过控制多个超声波换能器阵元, 灵活调整声束的聚焦深度、角度和扫描范围, 实现了对焊缝内部结构的精细扫描与成像。这种技术不仅继承了超声波检测高效、高灵敏度的特点, 更在检测精度和灵活性上实现了质的飞跃。它能够更精确地定位焊缝中的微小裂纹、分层等缺陷, 并通过复杂的算法处理, 生成高分辨率的二维或三维图像, 直观展示缺陷的形态、位置和尺寸, 为焊接质量的评估提供了前所未有的详细数据支持。

#### 4.2.4 表面着色检测的直观验证

为了全面保障S32615高硅钢管道焊接质量, 表面着色检测作为无损检测体系中的重要一环, 被广泛应用于

焊缝表面的质量检测中。该技术利用渗透剂对焊缝表面微小开口缺陷 (如裂纹、气孔等) 的渗透作用, 随后通过显像剂的吸附与显色反应, 使这些缺陷在焊缝表面以明显的颜色变化呈现出来。这种直观且易于识别的检测方式, 使得检测人员能够迅速发现并确认焊缝表面的缺陷情况, 为后续的修复工作提供了明确的指示。表面着色检测不仅操作简便、成本低廉, 而且能够有效弥补射线检测、超声波检测和相控阵检测在焊缝表面检测方面的不足, 共同构建起S32615高硅钢管道焊接质量的全方位保障体系。

#### 4.2.5 综合应用与优势互补

射线检测侧重于焊缝内部宏观缺陷的直观展示, 超声波检测擅长于微小缺陷的精准识别, 相控阵检测技术在精度和灵活性上具有独特优势, 而表面着色检测则能有效检测焊缝表面缺陷。通过综合运用这四种无损检测技术, 可以实现对焊缝质量的全方位、多层次检测, 确保无遗漏、无死角。

#### 结束语

综上所述, 高硅钢S32615管道在多个工业领域中的应用前景广阔, 但其焊接工艺复杂且要求严格。通过科学合理的选择焊接方法、优化焊接工艺参数、加强焊接质量控制及采用先进的无损检测技术, 可以显著提升高硅钢管道的焊接质量, 保障管道系统的长期稳定运行。未来, 随着材料科学和焊接技术的不断进步, 高硅钢管道的应用领域将进一步拓展, 为工业发展注入新的活力。

#### 参考文献

- [1]屈勇舟.关于石油化工工艺管道安装质量控制的思考[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(13):23-24.
- [2]宋亚卓.石油化工管道焊接工艺分析及其质量控制策略探析[J].云南化工,2020,47(06):167-168.
- [3]杨仁杰.浅析石油化工管道安装常见问题分析及质量控制探讨[J].化工管理,2020(06):45-46.