

海洋石油管道工程焊接变形控制要点探讨

韩兴忠（中海油能源发展装备技术有限公司，天津 300450）

摘要：海洋石油天然气在运输过程中，海底管道发挥着重要作用，其发展速度持续加快，在对管道进行焊接时，由于操作程序相对复杂，一般会发生焊接变形的问题，从而容易使得管线出现弯曲变形的情况，对此，必须加强焊接技术工艺控制。本文首先介绍海洋管道焊接技术，其次分析海洋石油管道工程焊接变形的原因与影响因素。然后提出海洋石油管道工程焊接变形控制策略，以供参考。

关键词：海洋石油；管道工程；焊接变形

全球海底油气管道整体长度达到10万km，最高施工水深超过3000m。当前我国现已完成建设的海底管道总量为数百万米，最高作业水深为300m。根据相关信息显示，国内海底管道的直径通常小于711mm。随着海洋资源的大力开发，海洋管道工程数量不断增多，为海洋石油管道产业的稳定发展奠定良好基础。因此，对海洋石油管道工程焊接变形控制要点深入研究具有重要意义。

1 海洋管道焊接技术

在海洋工程建设中，对技术有着较高的要求，并且容易发生施工风险事故，尤其是在海上使用工程船铺设海底管道时需要综合考虑多方面影响因素。

在铺设海底管线期间，焊接作业是较为关键的部分，并直接关系到生产水平与铺设质量，因此，在焊接施工时，需保证其稳定与效率，从而能够为海底管道工程建设有序开展提供可靠保障。在焊接期间，应加大外部干扰水平，提升焊接施工的速度，增加一次焊接作业的合格几率，同时也是海底滚道焊接作业的关键特征，在环缝焊接技术发展过程中，从原先的焊条电弧焊逐渐转变为当前的管道全位置自动焊技术。现阶段，主线路一般使用管道全位置自动焊技术与手工焊的方法开展焊接工作。

1.1 电弧焊技术在海底管道中的应用

在使用焊条电弧焊装置时，操作流程较为便捷，整个设备构造简单，容易实施根部焊接工作，并且背面成形符合规定的标准，能够开展全方面焊接，焊缝具有较高的力学功能，在采用此技术时，管口组需要保持较小间隙，在进行焊接时，使用多层、高电流以及迅速焊接，由于焊层厚度相对较薄，相同焊道需要安排2名作业人员共同进行对称焊接，可应用在专业铺管船开展流水施工，与传统焊条电弧焊对比，具有明显优势，主要使用在连头根焊、返修等方面。

1.2 全自动焊接技术在管道施工中的应用

自动焊接主要使用在口径较大与管壁较厚的管道工程，且有着焊缝美观、操作简单等特征，因此，广泛应用于海洋与长输管道项目建设。现阶段在无限航区施工中，已逐步开始使用非自航大型工程船舶，与之相配套的自动焊施工线主要使用双丝焊技术、双焊机头等。并在船头到船尾之间合理安装4个焊接站，根据作业流对管道进行根焊焊道、填充焊道以及盖面焊道，从而能够显著改善作业水平与效率^[1]。

1.3 海底管道手动焊接过程

在使用手工焊的方法时，作业人员需要手持焊枪进行焊接作业，并由送丝部门不断送丝。在对管线主线路实施焊接过程中，一般采用自保护药芯焊丝手工焊与STT相结合的焊接技术。在STT表面中，其张力根焊主要是依据短路液桥表层的实际张力过渡理论的熔化极CO₂气体保护焊技术，并且有着以下特征，包括焊道光滑、操作简单以及飞溅少等，可显著提升根焊焊接的施工质量与效率；在采用自保护药芯焊时，有着较高抗风性，焊接接头力学性能良好，焊缝成形美观，成本投入较少等特征，同时也是现阶段海底管道作业中较为常用的焊接形式，将以上几种方法融合应用，可构成一种全新的焊接形式，为海底管道焊接作业的有序开展提供可靠支持。

2 焊接变形在海洋石油管道工程中的发生原因及其影响因素

2.1 引起焊接变形的主要原因

在对管线进行焊接时，母材受到热熔化之后，在冷却收缩期间，通常会受到热胀冷缩的干扰，从而容易引起不均匀收缩的情况，使得发生焊接变形。如果管线出现变形的情况，一般可划分成局部和整体变形。在作业期间，通常会同时发生以上变形情况。整体变形具体是指结构形态或是大小出现变化，一般会发生翘曲变形、

弯曲变形等。而局部变形具体表现在对结构实施焊接作业时，一些区域会出现波浪形与角变形。在焊接相对较小的管线时，会引起翘曲和弯曲变形问题^[2]。

2.2 影响焊接变形的关键因素

2.2.1 坡口设计对焊接变形的控制

在进行设计过程中，可使用不同种类的焊接坡口，其中对称坡口可显著降低与有效控制变形。因此，单V型坡口略差于X型坡口，而双面坡口要比单边坡口优良，需优先使用。在进行焊接时，如果母材的壁厚相对较大，需尽量开双面坡口，同时还要从双面实施焊接工作。

2.2.2 材料特性对焊接变形的影响

在母材中，单位体积比热容与热膨胀数值会直接影响到变形。与此同时，由于母材有着较高热固性、冷凝性等特点，从而会对形变产生一定的影响。

2.2.3 焊件组对的影响

组对破口需要尽量保持规整统一，如果破口能够达到预期的标准与要求，可有效改善组对水平，可结合焊接试验显示的恒定能够预测出的收缩，对焊接数据进行预测。与此同时，如果接头间隙比较大，板厚度较高，会显著增加焊接的填充量。必须保证焊接接头的稳定性，防止在焊接期间发生偏移的情况。在确保整个焊道破口缝隙、角度等方面相同的情况下，可使不同位置中的焊接填充量均一致，以降低因不同收缩而导致的形变问题。

2.2.4 焊接件受限状态的效应

在进行焊接过程中，焊接件处在自由的状态，并自由变形中释放焊接应力。当受到限制时，自由变形动作一般会在外力的干扰下会出现形变或是变小。

2.2.5 焊接过程的技术要求

在开展海洋石油项目作业时，需对所使用的焊接技术的速度与质量进行全面检测。在选择焊接形式时，需具有稳定热源与高密度能量，并采用合适的焊接材料与数值。具体内容包括电压、电流等。

3 控制海洋石油管道工程中的焊接变形策略

3.1 优化焊接顺序和布局

按照既定的焊接程序进行施工，可以有效控制和减少变形。在焊接过程的初期，应优先进行板材间的直接焊接，为后续的复杂焊接工作提供支持。随后，应焊接结构件之间的接缝，最后执行结构件与板材之间的角焊，可保持整个结构的对称性和平衡性^[3]。在连接结构件或与壁板、甲板间焊接时，从结构的中心

向外围进行，控制焊接带来的热膨胀和收缩，减少因不对称热应力而导致的变形。此外，应用分段焊接和跳焊技术，将焊接过程分成多个阶段，每个阶段完成特定区域的焊接，然后跳跃到另一个区域，分散热输入，防止过度集中的热引起的局部过热和变形。焊接方向的选择也至关重要，应从结构中较稳定的部分向更易活动的部分进行，提高焊接接头的整体稳定性和质量。在组装过程中，优先焊接可能造成较大收缩的接头，例如厚壁或高应力区域的接头，在初始阶段就控制大部分收缩，从而降低对整体结构的影响。完成关键接头后，再转向收缩相对较小的接头，保持结构在焊接后的几何精度。除此以外，在较小的限制条件下进行焊接工作，例如，使用临时支撑或夹具，有效固定未焊接的部分，减少由于材料自由移动造成的变形。

3.2 使用平衡焊接技术

在焊接X型坡口时，常用的两种焊接方法对焊缝变形有不同的影响。一种是交替焊接法，即通过交替焊接坡口的两侧，确保两侧的热输入相对平衡，从而降低由于不对称热扩散引起的角变形。均衡焊接应力场，即可使焊缝在冷却过程中产生的收缩相互抵消，从而达到有效控制焊缝变形的效果。另外还可应用优先一侧焊接法，即先在坡口的一侧进行焊接，随后在另一侧实施焊接。这一方法适用于某些特定工况，例如当焊接一侧需要较大填充量时，可以设计后续焊接的填充焊缝，即可抵消最初焊接时所引起的变形。在焊接操作中，不对称的X型接头坡口设计在焊接过程中起到重要作用。通常，焊接从较小的一侧开始进行，随后在较大的填充区域进行第二侧的焊接。此时，后续焊缝的热收缩效应可以在一定程度上抵消前一侧焊接造成的收缩变形。这种基于力学原理的焊接方式，可以通过合理的热管理和焊接参数控制，使整个焊接过程中的变形更加可控。此外，焊接过程中外界条件，如环境温度、焊接材料的物理特性以及焊接参数如电流、电压和焊接速度等，都会对最终的焊缝变形产生显著影响。因此，在实施平衡焊接技术时，必须综合考虑这些因素，调整焊接工艺和设备，确保焊接接头能够承受施工过程中产生的应力和变形。

3.3 预留焊缩量

结合当前焊接实验信息与经验，预先设计收缩角度和收缩量，可合理使用可预测的形变，使预留量能够全面抵消形变量，以提升焊接作业的水平，并有效控制整个尺寸。对此，可使用先进的计算机模拟软件，

预测焊接过程中的热影响区和焊缝周围的温度分布，预计材料在不同温度下的表现。通过创建模型分析，可以帮助预测焊缝收缩和变形的情况，从而设计出合适的预留量。在焊接前，需计算工作件在焊接热影响下的扩展和收缩，据此合理设置间隙。为了能够合理利用焊接过程中材料的弹性变形，需采用精确的测量和严格的工艺，从而抵消焊缝收缩带来的影响^[4]。

3.4 应用热处理技术

在海洋石油管道工程中，应用热处理技术，有利于控制焊接变形。在焊接过程中，需焊接区域的温度进行精确控制，采用预热和后热处理方式，优化焊缝的微观结构和机械性能，以达到减少焊接应力和变形的效果。预热是热处理中的关键步骤，即对焊接工件进行加热处理，在达到适宜温度后，即可有效降低焊接过程中的温度梯度，减少快速加热和冷却造成的热应力。预热处理还可提高焊缝区域的塑性，使材料更容易接受焊接过程中的热输入，从而降低焊接过程中的裂纹发生概率。焊后热处理，又被称为后热或应力消除热处理，是另一种关键的热处理技术，通过温和加热和逐渐冷却调整焊接部位的应力状态，在此过程中，可有效释放焊接过程中积累的内部应力，从而显著减少材料的残余应力，避免在焊接完成后发生变形和扭曲。此外，采用焊接后热处理方式，还可以改善焊缝区域的硬度和韧性，优化焊缝的整体机械性能。

3.5 引入机械张力

引入机械张力可作为焊接变形控制的一项核心策略，具有显著的技术效益和实用价值。在焊接过程中应用专门设计的张力装置，如张紧器、夹具、或液压设备，可对管道进行预应力处理，从而精确控制焊接变形。机械张力的核心在于通过预施加的张力平衡由焊接热引起的内部应力，在此过程中，需基于材料性质、焊接参数和结构设计，精确计算所需的张力大小和施加位置，在整个焊接周期中，对材料的形变进行控制。为有效引入机械张力，需要综合考虑焊接速度、热输入、材料特性以及结构的最终使用条件。在焊接开始前施加张力，在焊接过程中根据焊缝的实时状态调整，确保施加的力量均匀且持续，避免因局部过度张力而引发材料性能下降或局部断裂。引入机械张力可以显著提高焊缝区的微结构质量，使得材料的温度场和应力场均匀，焊缝冷却均匀，可减少焊接缺陷如气孔和未熔合等。此外，还可改善焊接接头的机械性能，提高其抗拉强度和抗冲击性能，提升管道系统的整体稳定性和安全性。

3.6 焊接过程监控

在对钢结构中的接头进行焊接时，需要全面监视与检测操作人员的资质、防风环境以及焊材品质等方面。与此同时，为确保焊接作业的质量能够符合相关规定标准，应组织有着较高专业水平以及相关资格证书的人员开展焊接施工。因此，在焊接过程中，需要重点关注相关人员的综合素养与资质。另外，在进行焊接时，应避免焊丝、焊条等部位出现损伤。在此期间，需保证焊丝与焊条不会发生受潮的情况。除此以外，如果低氢电极处于绝缘状态，应合理安装到电极筒内。从质检人员的角度来看，作业场地主要用于开展检测与控制工作，第一时间暂停施工阶段中不符合规定要求的操作行为，并实施针对性地处理措施。在焊接期间，对整个过程进行详细检测时，应重点关注以下内容，包括管腿、吊点板等。在焊接钢结构时，通常会采用多层多道焊的焊接形式。对此，在开展检测工作时，需合理使用测温枪、钳形电流表等各种类型的工具与设施，在对焊接电压、电流等各项信息进行测量时，需详细记录，为对比工作提供数据支持，并能够对焊接环节中的传热与冷却速度进行严格管控，进而能够显著提升焊缝组织的各项性能。

4 结语

综上所述，本文对海洋石油管道工程焊接变形控制要点进行全面探讨。根据具体作业要求和程序开展监督工作，使用全新的技术实施引导，利用现场试验全面论证焊接作业的合理性与可行性，保证海洋石油管道工程的建设质量与效率，并在严格控制作业的管理精度的情况下，确保能够达到施工项目规定的要求，从而高效完成建设任务。

参考文献：

- [1] 于皓, 郑纯亮, 许磊, 等. 海洋石油工程焊接模拟技术的现状与发展趋势 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(07):190-192.
- [2] 王孟强, 李兆杰, 李海良, 等. 海洋工程钢结构焊接仿真模拟及检验 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(01):38-40.
- [3] 李振亮, 牛晓民, 李希光, 等. 不锈钢工艺管线焊接变形因素分析及控制方法 [J]. 化学工程与装备, 2022, (11):241-242.
- [4] 张德国, 齐永春, 王学伍, 等. 海上平台钢结构焊接变形控制策略 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(19):24-25.