

长输油气管道机械疲劳损伤评估与预防

孙小龙 宋玉祥 李鹏程

国家管网集团北京管道公司山西输油气分公司兴县作业区 山西 吕梁 033600

摘要：长输油气管道作为能源运输的重要基础设施，其安全可靠性和对于国家能源安全和发展具有重要意义。机械疲劳损伤是长输油气管道面临的主要挑战之一，本文旨在探讨长输油气管道机械疲劳损伤的评估方法及其预防措施，为保障管道安全提供理论支持和实践指导。

关键词：长输油气管道；机械疲劳损伤；评估方法；预防措施

引言

长输油气管道在运行过程中，长期受到内压波动、外部载荷、温度变化等多种因素的影响，这些因素共同作用导致管道产生机械疲劳损伤。机械疲劳损伤是材料在交变应力作用下，因累积损伤而引起的性能劣化和结构破坏。对于长输油气管道而言，机械疲劳损伤可能导致管道泄漏、破裂等严重事故，因此，对管道机械疲劳损伤的评估与预防具有重要意义。

1 长输油气管道机械疲劳损伤机理

1.1 交变载荷的影响

长输油气管道在长期的运行过程中，不可避免地会受到各种交变载荷的作用。这些交变载荷主要来源于输送介质的压力波动、温度变化以及流体振动等。压力波动是由于泵站的工作状态变化、管道内的流体速度变化等因素引起的，它使得管道内壁承受周期性的压力变化，从而导致管道材料内部产生应力集中。温度变化则是由于环境温度的变化以及流体在管道内流动时的摩擦热等因素引起的，它使得管道材料在热胀冷缩过程中产生交变应力^[1]。流体振动则是由于流体在管道内流动时产生的涡流、湍流等引起的，它会对管道壁面产生周期性的冲击力。这些交变载荷的作用，会使得管道材料内部微观结构逐渐发生变化，形成微小的疲劳裂纹。随着循环次数的增加，这些疲劳裂纹会逐渐扩展，最终导致管道出现宏观裂纹，甚至发生断裂失效。

1.2 设计制造因素

管道的设计制造过程对其抗疲劳性能有着至关重要的影响。设计不合理，如管道柔性不足，无法适应地基沉降、温度变化等引起的变形，就会导致管道在运行过程中产生过大的应力集中，从而加速疲劳损伤的发生。材料选用不当，如选用了抗疲劳性能较差的材料，也会降低管道的抗疲劳寿命。此外，制造过程中的焊接缺陷、材料质量不均等问题也会对管道的抗疲劳性能产生

不良影响。焊接缺陷如气孔、夹渣等会成为疲劳裂纹的萌生源，而材料质量不均则会导致管道在受力时产生不均匀的应力分布，从而增加疲劳损伤的风险。

1.3 安装质量隐患

安装过程中的不当操作也会对长输油气管道的抗疲劳性能产生影响。焊接工艺不佳，如焊缝存在未焊透、未熔合等缺陷，就会降低焊缝的强度，使其成为疲劳裂纹的易发区域。支承系统设计不合理，如支承点布置不均、支承刚度不足等，都会导致管道系统中的应力分布不均或产生额外的应力集中点，从而增加疲劳损伤的风险。因此，确保安装质量是保障长输油气管道抗疲劳性能的重要环节。

2 长输油气管道机械疲劳损伤评估方法

2.1 基于疲劳裂纹扩展速率模型的评估方法

疲劳裂纹扩展速率模型是评估管道机械疲劳损伤的核心工具之一，其中Paris公式（ $da/dN = C(\Delta K)^n$ ）凭借其简洁性和实用性，成为了描述裂纹扩展速率与应力强度因子幅值（ ΔK ）之间关系的经典公式。在这个公式中， da/dN 表示裂纹扩展速率， C 和 n 是材料常数，通过实验确定，而 ΔK 则是由管道承受的交变载荷计算得出的应力强度因子幅值。为了预测管道的疲劳寿命，我们需要对Paris公式进行积分。在积分过程中，需要考虑到裂纹的初始长度、临界长度以及裂纹扩展过程中的各种影响因素。通过积分，我们可以得到管道的剩余寿命表达式，进而预测管道在给定工况下的疲劳寿命。然而，Paris公式虽然经典，但在实际应用中可能存在一定的局限性。因为管道的运行工况复杂多变，材料性能也可能因制造、安装和使用过程中的各种因素而发生变化。因此，为了提高预测的准确性，我们需要根据管道的具体情况和实验数据，对Paris公式进行改进和优化。例如，可以考虑引入裂纹闭合效应、应力比的影响以及材料的老化等因素，对公式进行修正，使其更加符合实际情况。

2.2 基于S-N曲线的评估方法

S-N曲线（应力-寿命曲线）是描述材料在交变应力作用下疲劳寿命与应力水平之间关系的曲线。对于长输油气管道来说，通过测量管道材料的S-N曲线，我们可以了解材料在不同应力水平下的疲劳寿命情况。在实际应用中，我们需要结合管道的实际运行工况，将管道承受的交变应力转换为应力幅值，并在S-N曲线上找到对应的疲劳寿命。然而，由于管道的运行工况复杂多变，且可能存在多个应力幅值同时作用的情况，因此我们需要对S-N曲线进行适当的修正和处理。例如，可以考虑应力比的影响、多轴应力的作用以及材料的老化等因素，对S-N曲线进行修正，使其更加符合管道的实际情况^[2]。通过修正后的S-N曲线，我们可以评估管道在给定工况下的疲劳寿命和剩余寿命。同时，我们还可以根据评估结果，对管道的维护策略进行优化和调整，以延长管道的使用寿命并提高其安全性。

2.3 基于无损检测技术的评估方法

无损检测技术是评估管道机械疲劳损伤的重要手段之一。通过超声波检测、磁粉检测、涡流检测等无损检测技术，我们可以及时发现管道中的裂纹、缺陷等损伤情况，为疲劳损伤评估提供数据支持。超声波检测是一种利用超声波在材料中传播时的反射、透射和散射等特性来检测材料内部缺陷的方法。对于长输油气管道来说，超声波检测可以有效地发现管道内部的裂纹、夹杂物等缺陷，并评估其大小和位置。通过定期对管道进行超声波检测，我们可以及时了解管道的损伤情况，并采取相应的维修措施。磁粉检测是一种利用磁场作用使铁磁性材料中的磁粉形成磁痕来显示缺陷的方法。对于长输油气管道中的铁磁性材料部分（如钢管、法兰等），磁粉检测可以有效地发现表面和近表面的裂纹、夹杂物等缺陷。通过磁粉检测，我们可以对管道的焊接接头、弯头等易产生疲劳损伤的部位进行重点检查，确保管道的安全性。涡流检测是一种利用电磁感应原理来检测导电材料表面和近表面缺陷的方法。对于长输油气管道来说，涡流检测可以快速检测管道表面的裂纹、腐蚀等缺陷，并评估其深度和范围。涡流检测具有检测速度快、灵敏度高、无需接触被检材料等优点，因此在管道疲劳损伤评估中得到了广泛应用。

3 长输油气管道机械疲劳损伤预防措施

3.1 选用合适的抗疲劳材料

材料的抗疲劳性能是影响长输油气管道机械疲劳损伤的关键因素之一。在管道设计和建设过程中，应高度重视材料的选用，确保所选材料具有良好的抗疲劳性

能。首先，应优先考虑那些经过长期实践验证、具有良好抗疲劳性能的材料。例如，低碳钢和碳锰钢等因其优异的力学性能和焊接性，在长输油气管道建设中得到广泛应用。这些材料在长期的交变载荷作用下，能够保持较好的稳定性和耐久性，有效抵抗疲劳裂纹的产生和扩展。在选用材料时，除了考虑其抗疲劳性能外，还应综合考虑材料的强度、韧性、耐腐蚀性以及可焊性等因素。强度是材料抵抗外力破坏的能力，足够的强度可以确保管道在承受内部压力和外部载荷时不会发生破坏。对于长输油气管道来说，由于输送的介质可能含有腐蚀性成分，因此选用具有良好耐腐蚀性的材料对于延长管道使用寿命具有重要意义。同时，良好的韧性可以防止管道在受到突然冲击或振动时发生脆性断裂，提高管道的安全性。此外，可焊性也是选用材料时需要考虑的重要因素，因为管道的连接多采用焊接方式，良好的可焊性可以确保焊缝质量可靠，减少焊接缺陷的产生。在具体选材时，可以结合管道的运行条件、输送介质的性质以及管道所处环境等因素进行综合考虑。例如，对于输送高压、高温介质的管道，应选用具有高强度和高温稳定性的材料；对于处于腐蚀环境中的管道，应选用具有良好耐腐蚀性的材料；对于需要频繁进行焊接作业的管道，应选用具有良好可焊性的材料。

3.2 优化管道设计

管道设计是影响长输油气管道机械疲劳损伤的另一个重要因素。在管道设计过程中，应充分考虑各种因素，以减少应力集中和交变应力的作用，提高管道的抗疲劳性能。首先，应注重管道的柔性设计。通过合理设置管道的弯曲半径、支撑点以及膨胀节等元件，使管道具有一定的柔性，能够适应地基沉降、温度变化以及管道内部压力变化等引起的变形，从而减少应力集中和交变应力的作用。同时，在管道设计过程中还应考虑管道的热应力问题，通过合理设置固定支架和滑动支架等支撑结构，使管道在热胀冷缩过程中能够自由伸缩，避免产生过大的热应力^[3]。其次，应优化管道的支撑方式。支撑方式的选择应考虑管道的重量、直径、运行压力以及地基条件等因素。对于大直径、重型的管道，应采用坚固可靠的支撑结构，如桩基础或混凝土支墩等，以确保管道的稳定性。同时，支撑点的设置应合理分布，避免局部应力过大导致疲劳损伤。此外，还应合理布置焊缝。焊缝是管道中的薄弱环节，易产生应力集中和裂纹。因此，在焊缝布置时，应尽量避免焊缝位于高应力区或管道弯曲处等易产生应力集中的部位。同时，应采用合适的焊接工艺和焊材，确保焊缝质量可靠，减少焊

接缺陷的产生。

3.3 加强管道维护和管理

管道维护和管理是预防长输油气管道机械疲劳损伤的重要措施之一。通过定期对管道进行检查、检测和维修,可以及时发现并处理管道中的裂纹、缺陷等损伤情况,防止损伤进一步扩展和恶化。首先,应建立完善的管道巡检制度。定期对管道进行巡检,检查管道表面是否存在裂纹、腐蚀、变形等损伤情况。对于发现的损伤应及时进行记录、拍照和报告,以便后续的处理和分析。同时,还应对管道的支撑结构、焊缝、法兰等关键部位进行重点检查,确保其稳定可靠。其次,应加强管道的检测工作。采用超声波检测、磁粉检测、涡流检测等无损检测技术,对管道内部和表面进行检测,及时发现并定位裂纹、缺陷等损伤情况。对于发现的损伤应进行详细的评估和分析,确定其性质、大小和位置等信息,为后续的修复和处理提供依据。在管道维护过程中,还应加强对管道运行过程的监控和管理。确保管道在规定的压力和温度范围内运行,避免超压、超温等不利因素的影响。同时,还应建立健全的应急响应机制,一旦发生管道事故或异常情况,能够迅速响应并处理,减少损失和影响。

3.4 采用先进的监测技术

采用先进的监测技术是预防长输油气管道机械疲劳损伤的重要手段之一。通过安装应力传感器、振动传感器等监测设备,可以实时监测管道在运行过程中受到的应力和振动情况,为疲劳损伤评估提供准确的数据支持。首先,应在管道的关键部位安装应力传感器。这些传感器可以实时监测管道受到的应力情况,包括应力的方向以及变化速率等。通过对应力数据的实时分析和处理,可以及时发现管道中的应力集中和异常变化,为疲劳损伤评估提供准确的数据支持。同时,还可以将应力数据与管道的运行参数(如压力、温度等)进行关联分析,进一步了解管道的运行状态和疲劳损伤情

况。其次,还应在管道上安装振动传感器。这些传感器可以实时监测管道的振动情况,包括振动的频率、幅度以及振动模式等。通过对振动数据的实时分析和处理,可以判断管道是否存在异常振动或共振现象,及时采取措施进行干预和调整。例如,可以通过调整管道的支撑结构或增加减振装置等方式来降低管道的振动水平,减少疲劳损伤的发生^[4]。此外,还可以利用地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)以及遥感技术等现代技术手段,对管道进行精确定位和跟踪管理。通过GIS技术,可以建立管道的地理信息系统数据库,实现管道的空间信息和属性信息的集成管理。这有助于对管道进行全面的分析和评估,为管道的维护和管理提供便捷高效的手段。通过GPS技术,可以实时监测管道的位置和运行状态,及时发现并处理管道的移动或变形等情况。而遥感技术则可以对管道周边的环境进行监测和分析,为管道的安全运行提供有力的保障。

结语

长输油气管道机械疲劳损伤是管道安全运行的重要威胁之一。通过采用合适的评估方法和预防措施,可以及时发现并处理管道中的疲劳损伤情况,保障管道的安全性和可靠性。未来,随着科技的不断进步和管道技术的不断发展,相信会有更多先进的评估方法和预防措施被应用于长输油气管道机械疲劳损伤的预防和管理中。

参考文献

- [1]范琦.油气管道机械损伤缺陷及其腐蚀原因分析[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(05):26-28.
- [2]杨可歆,金岍.内压荷载下油气管道轴向双裂纹疲劳扩展研究[J].管道技术与设备,2023,(06):16-21.
- [3]王锋,齐嵩岭,闻亚星,等.油气管道机械损伤缺陷及其腐蚀原因分析[J].石油化工腐蚀与防护,2021,38(05):33-37+64.
- [4]魏强,宋鹏飞,刘国恒,等.海洋平台油气管道疲劳裂纹识别方法[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(04):481-487.