

跨越式油气管道地震破坏机理及失效模式分析

汪亚君（中石化石油工程设计有限公司，山东 东营 257026）

摘要：本文简要分析地震对跨越式油气管道的影响，重点强调跨越式油气管道结构地震响应破坏机理分析，并以油气管道结构地震失效模式分析作为切入点，以此来探讨地震对跨越式油气管道的影响，从而降低地震对油气管道的破坏，使油气管道能够平稳有序运行，发挥出应有的作用和价值，保证油气运输安全，旨在为相关人员提供参考。

关键词：跨越式；油气管道；地震

跨越式油气管道作为能源输送的重要基础设施，其安全性与稳定性对于国家能源安全和经济发展具有至关重要的意义。因此，深入研究跨越式油气管道的地震破坏机理及失效模式，对于提高管道的抗震能力、确保其在极端条件下的安全运行具有重要意义。

1 地震对跨越式油气管道的影响

1.1 地震波对管道的直接影响

地震对跨越式油气管道的影响显著，尤其当地震波直接作用于管道时，其影响更为剧烈。地震波的传播导致管道发生形变，这种形变可能包括弯曲、扭曲甚至断裂，严重影响管道的结构完整性和运行安全性^[1]。在强烈的地震波冲击下，油气管道可能会遭受严重的物理损伤，如焊缝开裂、防腐层脱落等，这些损伤不仅会降低管道的承压能力，还可能引发油气泄漏等安全事故。

此外，地震波还可能引发地面变形，如断层位移、地面沉降等，进一步加剧对油气管道的破坏。因此，在设计和建设跨越式油气管道时，必须充分考虑地震因素，采取有效的抗震措施，如选用抗震性能好的管材、加强管道支撑和固定、优化管道布局等，以确保管道在地震等极端自然灾害中的安全运行。同时，还应加强地震监测和预警，及时发现并应对潜在的地震风险。

1.2 地面变形对管道的破坏

地震引发的地面变形对跨越式油气管道构成了巨大的破坏威胁。当地震发生时，地壳的剧烈运动会导致地面出现断层位移、地面开裂、坍塌以及不均匀沉降等多种变形现象。这些地面变形会直接作用于油气管道，使其遭受严重的挤压、拉伸或剪切力，从而导致管道结构受损，甚至发生断裂。特别是在地质条件复杂、地震活动频繁的地区，油气管道更容易受到地面变形的破坏。一旦管道受损，不仅会造成油气资源

的泄漏，还可能引发火灾、爆炸等次生灾害，对周边环境和居民的生命财产安全构成严重威胁。因此，在油气管道的设计和建设中，必须充分考虑地震引发的地面变形因素，采取有效的抗震和防护措施，如加强管道与地面的固定连接、优化管道穿越地质构造的设计等，以确保管道在地震等极端条件下的安全运行。

1.3 次生灾害对管道的威胁

地震不仅直接对跨越式油气管道造成物理损伤，其引发的次生灾害更是对管道构成了重大威胁。地震可能诱发滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害，这些灾害会间接作用于油气管道，导致管道被掩埋、冲毁或受到剧烈冲击，从而造成管道断裂、泄漏等严重后果。特别是在山区、河谷等地质条件复杂的地区，油气管道更易受到次生灾害的威胁。

此外，地震引发的火灾、爆炸等次生灾害也可能对油气管道造成直接破坏，进一步加剧管道的损伤程度。这些次生灾害不仅会影响油气管道的正常运行，还可能对周边环境和居民的生命财产安全构成巨大威胁。因此，在油气管道的安全管理和应急响应中，必须充分考虑地震及其次生灾害对管道的影响，制定有效的防灾减灾措施，确保管道在极端条件下的安全运行和及时抢修。

1.4 对油气管道安全运行的挑战

地震对跨越式油气管道的安全运行构成了严峻挑战。地震不仅可能导致管道结构受损、出现裂缝甚至断裂，还可能引发地面变形、滑坡、崩塌等次生灾害，进一步威胁管道的安全。在地震作用下，油气管道可能遭受强烈的物理冲击，导致管道内部压力异常，引发油气泄漏、火灾、爆炸等严重事故，对周边环境和居民的生命财产安全构成重大威胁。此外，地震还可能影响油气管道的监控和通信系统，使得管道运行状态的实时监测和应急响应变得困难。因此，确保油气

管道在地震等极端条件下的安全运行,需要采取一系列有效的抗震措施和应急响应机制,包括加强管道结构的抗震设计、优化管道布局、提高管道监控和通信系统的可靠性等,以最大程度地减少地震对油气管道安全运行的影响。

2 跨越式油气管道结构地震响应破坏机理分析

2.1 地震波的选取及工况设置

2.1.1 地震波选取

在位于8度地震烈度区、Ⅱ类场地的条件下,该斜拉管桥结构系统的特征周期被确定为0.35s。为此,我们选择了已记录的EI-Centro地震波作为输入地震波,以研究结构在强烈地震作用下的破坏机制。为了实现这一目标,将地震波的峰值加速度调整至10.02m/s,地震持续时间设定为50s,时间间隔为0.02s。在本研究中,仅考虑地震波对斜拉管桥结构的一致激励输入情况,未涉及其他复杂的激励因素。

2.1.2 工况设置

根据《油气输送管道线路工程抗震技术规范》(GB/T50407-2017)的相关规定,当地震波加速度峰值不超过0.2g时,通常可以忽略竖向和纵向地震动的影响。然而,鉴于本文所选用的地震波幅值较大,决定对三向地震波(纵桥向、横桥向、竖桥向)进行分别计算。同时,为了更全面地评估地震动对斜拉管桥结构的影响,设定了三向地震动的比例为1:0.85:0.65。在此基础上,设置了6种工况,这些工况涵盖了各地震动分量单独作用以及各分量共同作用的情况。

表1 工况设置

工况	地震作用方向组合方式
1	X
2	Y
3	Z
4	X+Y
5	X+Z
6	X+Y+Z

2.2 附加质量的油气管道结构地震破坏分析

2.2.1 管道结构变形分析

在六种设定条件下,地震波作用于管道时,其最大形变时刻出现于28s,且主要发生在管道两端的跨中位置,呈现明显的左右对称性。分析三种不同方向的地震波动对管道结构所造成的形变及破坏程度,观察到纵向地震波导致的影响最为显著,横向地震波次之,而竖向地震波的影响则相对微乎其微。纵桥方向上,地震波自右向左扩散,导致管道右侧跨中区域

形变最为显著,而左侧跨中形变相对较小。管道的形变在横向地震波和竖向地震波的作用下呈现出左右对称的特征,其中位于管道两端的边跨中区域所承受的变形最为显著。对于管道的形变,当受到多方向地震波作用时,相较于单向地震波单独作用,影响更为显著。当双向地震波共同产生影响时,会导致边缘支撑结构在中间区域的形变加剧。在遭受三向地震波影响下,管道承受的形变将显著增加,其最大形变程度为纵向地震波作用下的1.4倍。

在分析油气管道时,考虑其介质引起的额外质量影响,观察到管道在两端支座中间区域的最大位移反应,这种形变特性反映了斜拉管桥较低的刚度和较高的柔性。在桥梁的抗震稳定性分析中,管道位于其左右两侧的跨中区域,是受地震影响最为显著的薄弱环节,针对这一部分,必须实施重点审查,以防位移过大导致管道损坏。在多方向地震波的作用下,管道的变形程度因地震波类型的不同而有显著差异,其中纵向地震波导致的影响最为显著,横向地震波次之,而竖向地震波的影响则相对较小。在多方向的地震影响下,石油和天然气管道的结构形态改变尤为明显。

2.2.2 管道结构应力、应变分析

在六种设定条件下,地震波作用于管道时,应力最大的位置应变集中在约27s的时间点。分析表明,在单向地震波沿纵向或竖向作用时,管道在进出口上端区域呈现最大应变,其应力值已超出材料屈服强度425MPa,从而在该位置容易发生由于应力应变超限而导致的管道屈曲失效;在横向地震波的作用影响下,桥梁结构在桥塔基部区域呈现出最大的形变程度,而管道系统的入口和出口位置所承受的应变则相应较小。竖向位移在管道左右边跨跨中位置过度显著,导致跨中区段的管道下端所受应力增大;同时,桥塔因左右两跨巨大位移变形而承受较大的应力与应变,特别是管道跨中位置的上端。

而在共同作用下,多方向的地震波动使得管道和桥塔在两端以及底部所承受的最大应力,相较于单一方向的地震波作用时有所增加,这种增加是因为多方向地震动导致管桥系统的最大形变增强,尤其是在三向地震动的作用下,管道的形变可以达到最大值。

此外,在考虑油气管道因介质附加质量效应的影响下,其结构在地震影响下所承受的最大应力和应变往往出现在管道的进出口端部,该区域成为管道发生屈曲破坏的高风险区,当单向地震波作用于结构系统

时,相较于其他类型的地震波,横向地震波对于结构和系统的应力应变产生最为显著的影响,这不仅加剧了管道进出口端的应力应变水平,也对桥塔底部产生了额外的应力应变负担。在油气管道的风险点,多方向的地震波作用导致应力和应变增加,从而提升了破坏的风险。

2.3 流固耦合的油气管道结构地震破坏分析

2.3.1 管道结构变形分析

在六种工况的地震波作用下,发现管道的最大变形时刻主要集中在11s,且左右边跨跨中位置的管道变形最为显著,变形情况呈反对称。对比分析三种单向地震波对管道的影响,纵向地震波对管道变形的影响最大,竖向地震波次之,而横向地震波则主要影响桥塔顶部的横向弯曲。当纵向和竖向地震波共同作用时,虽然它们的组合导致了一定的变形,但最大变形量(1.6949m)却小于纵向地震波单独作用时的最大变形量(1.9013m),显示出管道变形在多向地震波作用下得到了某种程度的削弱。

然而,当纵向和横向地震波共同作用时,桥塔顶部的变形会加剧。在三向地震波的共同作用下,管桥系统的整体变形又进一步减小,表明多向地震动作用下的管道变形更为合理。此外,考虑油气管道的流固耦合效应时,管道的变形情况与考虑附加质量效应的变形情况相似,最大位移响应仍出现在左右边跨跨中位置。因此,在强震作用下,左右边跨跨中位置的过大变形可能导致管道结构破坏,这是桥梁抗震分析时需要重点关注的地方。总体来说,不同方向的地震波对管道的影响各异,而多向地震波共同作用下的油气管道变形小于单项地震作用下的变形,表明多向地震波作用有助于削弱管道的变形。

2.3.2 管道结构应力、应变分析

在六种工况的地震波作用下,管道的最大应力处应变时刻大多集中在27s左右。对比分析三种单向地震波的影响,发现纵向和竖向地震波主要在管道进出口端和出口端产生较大的应变,其中纵向地震波的最大应变是竖向的1.4倍,且其导致的管道最大应力(458.79MPa)已超过了材料的屈服极限,使管道进入塑性范围。而横向地震波则主要在桥塔底部两端引起较大的应变。在三种方向地震波的作用下,管道进出口端都极易因应力应变过大而发生屈曲破坏。此外,由于管道左右边跨跨中位置的竖向位移过大,该位置的管道下端应力也较大;同时,桥塔因承受较大的位

移变形,其跨中位置上端的应力应变也相应增大。当多向地震波共同作用时,管桥结构的最大应变情况变得复杂,双向地震波共同作用会削弱管桥系统的最大应变,但三向地震动又会加剧管道两端的应变。

3 油气管道结构地震失效模式分析

3.1 屈曲破坏

油气管道结构在地震作用下的一种主要失效模式是屈曲破坏。当地震波冲击油气管道时,特别是管道进出口端等关键位置,由于应力应变急剧增加,超过了材料的极限强度,管道可能会发生显著的屈曲变形,进而导致结构失效。这种屈曲破坏不仅会降低管道的承压能力,还可能引发焊缝开裂、防腐层脱落等次生问题,严重威胁油气管道的安全运行。因此,在油气管道的设计和抗震分析中,必须充分考虑地震波对管道屈曲破坏的影响,采取有效的抗震措施,如加强管道结构的刚度、优化管道布局等,以确保管道在地震等极端条件下的安全稳定。

3.2 纵向和横向开裂

油气管道结构在地震作用下常见的失效模式之一为纵向和横向开裂。地震波的直接冲击可能导致管道在纵向方向上因拉伸或压缩应力超过材料强度极限而发生开裂,同时在横向方向上也可能因剪切或弯曲应力过大而出现裂缝。这些开裂不仅会降低管道的完整性和承压能力,还可能引发油气泄漏等严重后果,对周边环境和居民安全构成重大威胁。因此,在油气管道的设计和抗震分析中,必须充分评估地震波对管道纵向和横向开裂的影响,并采取相应的抗震加固措施,如增强管道材料的韧性、优化管道支撑结构等,以确保管道在地震等极端条件下的安全可靠性。

4 结论

综上所述,跨越式油气管道的地震破坏机理及失效模式分析对于提高管道的抗震能力和确保其在极端条件下的安全运行具有重要意义。在未来的研究和实践中,需要继续深入探索地震对油气管道的影响机理,不断优化抗震设计和安全防护措施,为保障国家能源安全和经济发展做出更大的贡献。

参考文献:

[1] 李冰毅.油气场站地质灾害风险分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(16):122-124.

作者简介:

汪亚君(1991-),女,汉族,湖北荆州人,高级职称,本科,研究方向:油气储运。