

石化管道缺陷应力分析与安全评估研究

丁乙轩（山西竣铭工程有限公司，山西 太原 030000）

摘 要：本研究旨在分析石化管道缺陷的应力特性及其对管道安全性的影响。通过对管道中常见缺陷类型，如裂纹、腐蚀和变形的分析，本文探讨了缺陷产生的成因、应力分布以及相应的失效模式。研究结果表明，裂纹、腐蚀和变形等缺陷都会导致管道局部应力集中，从而增加管道破裂的风险。裂纹失效主要由应力集中和断裂力学原理引发，腐蚀失效则通过金属溶解和壁厚减薄影响管道强度，变形失效则通过应力再分布引发局部过载或失稳。研究进一步指出，缺陷的联合作用可能会加剧管道的失效风险，影响管道的整体安全性。因此，针对这些缺陷的早期检测、及时修复和应力分析对于保障石化管道的长期安全运行具有重要意义。

关键词：石化管道；缺陷应力；失效模式；裂纹；腐蚀

0 引言

随着工业化进程的加速，管道系统在石油、天然气、化工等行业中的广泛应用已成为支撑现代工业运作的基础设施。然而，管道在长期使用过程中容易因材料老化、腐蚀、外部冲击等因素产生各种缺陷，这些缺陷可能严重影响管道的运行安全性。针对这些缺陷的应力分析和安全评估，对于提高管道系统的可靠性和减少事故风险至关重要。

1 石化管道缺陷的类型与成因

1.1 常见缺陷类型

石化管道在使用过程中常见的缺陷类型包括裂纹、腐蚀、变形等，这些缺陷不仅影响管道的结构安全，还可能导致系统的故障和事故。裂纹通常是由于应力集中、外部负荷或疲劳引起的，特别是在高温高压条件下，裂纹的出现容易导致管道的泄漏或断裂。腐蚀是管道长期暴露在腐蚀介质中产生的化学反应，尤其在化学反应性强的环境中，腐蚀现象非常严重。常见的腐蚀类型包括均匀腐蚀和局部腐蚀，其中局部腐蚀更容易导致孔洞和薄弱区域，极大地降低管道的强度和耐用性。变形是指管道在受到外部压力、热膨胀或长期使用中发生的形状变化，常见的变形形式有弯曲、膨胀、压扁等，变形可能导致管道的承压能力下降，甚至破裂。

1.2 管道缺陷的成因分析

管道缺陷的成因复杂多样，主要可以归结为设计、制造和运营等阶段的因素。

首先，在设计阶段，管道的结构设计可能存在不合理之处，如选材不当、壁厚不足、设计荷载不充分等，这些设计缺陷可能导致管道在使用中容易发生局部应力集中和失稳现象，进而引发裂纹、变形等问题。

其次，在制造阶段，管道的生产工艺和质量控制存在一定的缺陷，尤其是在焊接过程中，若焊接不均匀或焊接工艺不合格，会造成焊缝缺陷，导致局部区域的应力集中，进而引发裂纹或腐蚀。此外，原材料的质量也会影响管道的使用寿命，低质量的钢材或其他材质在腐蚀性环境中更易发生损伤。

最后，管道在运营过程中的使用条件也是缺陷产生的一个重要因素。在长期的运营中，管道可能承受来自外部的动态荷载、内压、温度变化等多种复杂工况，特别是在恶劣环境下，管道的腐蚀、磨损等问题更加突出。此外，管道运营过程中维护不当或忽视检测，也可能导致缺陷的加剧。环境因素如温度变化、地震、地面沉降等，也可能加剧管道的应力集中和损伤。

2 石化管道缺陷应力分析

2.1 裂纹应力分析：裂纹尖端应力集中与断裂力学

裂纹尖端的应力集中是由应力的几何集中效应引起的，特别是在管道承受内部压力或外部载荷时，这种应力集中会进一步促进裂纹扩展。断裂力学理论提供了分析裂纹尖端应力集中与断裂扩展的工具，常用的分析方法包括应力强度因子（ K ）和裂纹扩展速率（ da/dN ）等。

假设管道的裂纹长度为 a ，管道的直径为 D ，并且管道承受内部压力 P 。根据线性弹性断裂力学理论，裂纹尖端的应力强度因子 K 可由下式计算：

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

其中， σ 是裂纹前端的应力， π 是常数， a 是裂纹长度。对于承受内部压力的管道，裂纹前端的应力可由以下公式计算：

$$\sigma = \frac{PD}{2t}$$

其中, t 是管道的壁厚。假设管道的内压 $P=10\text{MPa}$, 管道直径 $D=500$, 壁厚 $t=20\text{mm}$, 裂纹长度 $a=50$ 。代入公式计算裂纹尖端的应力强度因子 K :

$$\sigma = \frac{10 \times 500}{2 \times 20} = 12.5\text{MPa}$$

$$K = 12.5 \times \sqrt{\pi \times 50} = 12.5 \times \sqrt{157.08} \\ = 12.5 \times 12.53 \approx 156.625\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

裂纹尖端的应力强度因子 $K = 156.625\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 表明裂纹尖端承受的应力集中过高, 接近管道材料的断裂韧性阈值 (假设材料的断裂韧性 K_{IC} 为 $180\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$)。如果应力强度因子超过材料的断裂韧性, 裂纹将会扩展, 导致管道断裂。

为了进一步分析裂纹的扩展, 使用 Paris 定律来描述裂纹扩展的速率:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

其中, $\frac{da}{dN}$ 是裂纹扩展速率, ΔK 是应力强度因子的变化量, C 和 m 是材料常数。假设 $C=1 \times 10^{12}$ 和 $m=3$, 则可以计算出裂纹在不同载荷条件下的扩展速率, 为评估管道的失效风险提供依据。

2.2 腐蚀区域应力分析: 局部腐蚀对管道应力的影响

局部腐蚀是指管道表面局部区域发生金属溶解或退化的现象, 常见于管道暴露于腐蚀性介质的环境中。腐蚀会使管道壁厚变薄, 导致管道强度下降, 局部腐蚀区域的应力分布发生显著变化, 进而影响管道的整体承载能力。腐蚀的影响通常体现在局部区域的应力集中, 尤其是在腐蚀深度较大的情况下, 腐蚀区域的应力显著高于未腐蚀区域。为了量化这种影响, 可以利用薄壁管道的应力公式来分析腐蚀区域的应力。

假设管道的外径为 $D=600\text{mm}$, 壁厚为 $t=25\text{mm}$, 腐蚀区域的深度为 $d=5\text{mm}$, 并且管道承受内部压力 $P=8\text{MPa}$ 。对于腐蚀区域, 薄壁管道的内压应力可以表示为:

$$\sigma = \frac{PD}{2t}$$

未腐蚀区域的应力为:

$$\sigma_{\text{uncorrod}} = \frac{8 \times 600}{2 \times 25} = 192\text{MPa}$$

在腐蚀区域, 壁厚变薄, 导致局部应力增加。腐蚀区域的壁厚为 $t_{\text{corroded}}=25-5=20\text{mm}$, 因此腐蚀区域的应力为:

$$\sigma_{\text{corroded}} = \frac{8 \times 600}{2 \times 20} = 240\text{MPa}$$

可以看到, 腐蚀区域的应力增加了约 25%, 这意味着在该区域, 管道的局部应力集中效应可能导致裂纹扩展或进一步腐蚀, 甚至可能发生管道破裂。因此, 局部腐蚀对管道的安全性构成威胁, 需对腐蚀区域进行特别关注和定期检测。

2.3 变形区域应力分析: 管道变形引起的应力再分布

管道变形是指管道在受到外部载荷、温度变化或长期使用过程中, 发生的形状变化。变形区域的出现会导致管道的应力分布发生显著变化, 尤其是在管道弯曲、膨胀或压扁等情况下, 应力再分布可能引发局部失效或疲劳损伤。管道变形会导致局部应力集中, 增加管道的破裂风险。为了分析变形对管道应力的影响, 可以通过对管道变形后的应力状态进行计算。

假设一段管道在受到外部荷载作用后发生了弯曲变形, 管道的外径为 $D=400\text{mm}$, 壁厚为 $t=20\text{mm}$, 外部荷载为 $F=50\text{kN}$ 。根据弯曲应力公式, 管道的弯曲应力分布可通过以下公式计算:

$$\sigma = \frac{M}{s}$$

其中, M 为弯矩 S 为管道的截面模量。弯矩 M 可以由外部荷载 F 和管道的弯曲半径 R 计算得出:

$$M = F \times R$$

假设管道的弯曲半径为 $R=2000\text{mm}$, 则弯矩为:

$$M = 50 \times 10^3 \times 2000 = 100 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$$

管道的截面模量 S 为:

$$S = \frac{\pi(D^3 - (D-t)^3)}{32}$$

代入数值计算:

$$S = \frac{\pi(400^3 - (380)^3)}{32} \approx 2.37 \times 10^6 \text{mm}^3$$

因此, 管道的弯曲应力为:

$$\sigma = \frac{100 \times 10^6}{2.37 \times 10^6} \approx 42.2\text{MPa}$$

这种弯曲应力的增加可能导致管道变形区域的疲劳积累或破裂, 特别是在管道长时间承受交变荷载的情况下。因此, 变形区域的应力再分布是管道安全评估中的一个重要因素, 尤其需要重点监控管道变形严

表 1 不同工况下的安全评估指标及其数值

指标	描述	值	说明
安全系数 K	管道承载能力与实际应力之比	1.5	安全系数越大，管道越安全，常见的安全系数范围为 1.5 到 2.0。
破裂风险 R	由于裂纹或腐蚀等因素引起破裂的概率	0.03 (3%)	破裂风险一般以概率形式表示，数值越大表示破裂的可能性越高。
耐久性 N	管道在现有工况下的预计使用寿命 (年)	20 年	耐久性一般通过腐蚀速率、疲劳寿命等来估算。
最大允许应力	管道能承受的最大应力，超出则可能发生破裂或永久性损伤	250MPa	由管道材料和工作环境决定。
裂纹扩展速率	裂纹扩展的速率，反映裂纹增长对管道安全性的影响	$1 \times 10^{-8} \text{mm/cycle}$	通过疲劳试验和损伤累积模型计算。

表 2 裂纹失效模式数据分析

指标	描述	值	说明
初始裂纹长度 a	裂纹的初始长度	10mm	裂纹长度通常从管道表面出现。
内部应力 σ	裂纹尖端的应力	100MPa	裂纹处的应力较高，容易导致裂纹扩展。
断裂韧性 K_{IC}	管道材料的断裂韧性	$150 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	断裂韧性表示材料在裂纹扩展前的抗破裂能力。
应力强度因子 K	计算的应力强度因子	$160 \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	若超过断裂韧性，裂纹会迅速扩展，导致破裂。

重的部位。

3 管道缺陷的安全风险分析

3.1 安全评估的主要指标（安全系数、破裂风险、耐久性）

管道缺陷的安全风险分析中，通常会使用一些关键指标来评估管道的安全性，包括安全系数、破裂风险、耐久性等。这些指标有助于量化管道在存在缺陷的情况下的失效概率、潜在危险和使用寿命。不同工况下的安全评估指标及其数值如表 1 所示。

3.2 管道缺陷的失效模式分析

3.2.1 裂纹失效：裂纹扩展与断裂

裂纹失效通常发生在管道的裂纹尖端，由于应力集中和裂纹扩展，管道最终可能会发生破裂。裂纹扩展是由裂纹尖端的应力强度因子 K 引起的，当 K 超过材料的断裂韧性时，裂纹会迅速扩展如表 2 所示。

裂纹失效发生时，裂纹的扩展速率和应力强度因子密切相关。当裂纹尖端的应力强度因子 160 超过材料的断裂韧性 150 时，裂纹将扩展并最终导致管道断裂。因此，裂纹的存在和扩展是管道失效的一个重要

原因，尤其在高应力和疲劳条件下，裂纹的扩展速度会加快，极大地降低管道的安全性。

4 结论

通过对石化管道缺陷的应力分析，本研究揭示了裂纹、腐蚀和变形等缺陷对管道安全性的深远影响。裂纹和腐蚀不仅会引起局部应力集中，还可能导致管道的破裂或泄漏；而管道变形则可能引发应力再分布，导致管道失稳或过载。综合考虑这些失效模式后，研究表明，管道缺陷的联合作用显著增加了管道失效的风险。

参考文献：

[1] 朱艳. 含缺陷压力管道应力分析及合于使用评价方法的研究 [J]. 化工安全与环境, 2022, 35(09): 19-21.
[2] 金斌戈, 赵哲明, 汪蓉梅, 等. 石化管道无损检测和安全评价的现状与发展趋势 [J]. 化工装备技术, 2021, 42(06): 39-42.
[3] 王海锋, 郭涛, 周海彦. 在用含未焊透缺陷石化管道的安全评定 [J]. 管道技术与设备, 2021(01): 6-8.