

基于材料塑性失效准则的内缺陷参数对管柱剩余抗拉强度影响分析

刘贤玉^{1*}, 苏剑波¹, 赵宝祥¹, 陈力¹, 徐靖¹, 黄维安²

¹中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江

²中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年10月28日; 录用日期: 2025年11月21日; 发布日期: 2025年11月27日

摘要

目前主要在材料弹性范围内研究含缺陷管柱剩余强度, 较少定量分析不同缺陷尺寸参数对剩余抗拉强度的影响规律。基于材料塑性破坏准则, 采用有限元数值模拟方法, 结合正交试验设计, 分析了拉伸载荷下缺陷管柱应力分布规律, 研究了内腐蚀缺陷长度、宽度、深度、管柱外径、径厚比等参数对管柱剩余抗拉强度的影响规律。结果表明: 缺陷管柱无因次抗拉强度随缺陷深度增加呈二次曲线关系降低, 随缺陷长度的增加呈指数关系逐渐变大, 随缺陷宽度增加呈指数关系逐渐减小, 随套管径厚比增加呈线性关系减小。缺陷深度与宽度对无因次抗拉强度有显著影响, 总体上两者影响程度基本相当; 缺陷长度对无因次强度有一定的影响, 管柱径厚比对无因次强度影响较小, 而管柱外径影响极小。基于数值分析结果, 建立了含缺陷管柱无因次抗拉强度多因素预测方法, 为工程上含缺陷管柱强度评价提供参考。

关键词

内缺陷管柱, 抗拉强度, 有限元, 预测模型, 正交分析, 缺陷参数

Analysis of the Influence of Internal Defect Parameters on the Remaining Tensile Strength of Pipe Columns Based on Material Plastic Failure Criteria

Xianyu Liu^{1*}, Jianbo Su¹, Baoxiang Zhao¹, Li Chen¹, Jing Xu¹, Weian Huang²

¹CNOOC (China) Limited Zhanjiang Branch, Zhanjiang Guangdong

²School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

Received: October 28, 2025; accepted: November 21, 2025; published: November 27, 2025

*第一作者。

文章引用: 刘贤玉, 苏剑波, 赵宝祥, 陈力, 徐靖, 黄维安. 基于材料塑性失效准则的内缺陷参数对管柱剩余抗拉强度影响分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 183-193. DOI: 10.12677/mos.2025.1411651

Abstract

At present, the research mainly focuses on the residual strength of defective pipe columns within the elastic range of materials, and there is relatively little quantitative analysis of the influence of different defect size parameters on the residual tensile strength. Based on the material plastic failure criterion, finite element numerical simulation method was adopted, combined with orthogonal experimental design, to analyze the stress distribution law of defective pipe columns under tensile load. The influence of parameters such as internal corrosion defect length, width, depth, pipe outer diameter, and diameter thickness ratio on the residual tensile strength of pipe columns was studied. The results indicate that the dimensionless tensile strength of defective pipe columns decreases in a quadratic relationship with increasing defect depth, gradually increases exponentially with increasing defect length, decreases exponentially with increasing defect width, and decreases linearly with increasing sleeve diameter to thickness ratio. The depth and width of defects have a significant impact on the dimensionless tensile strength, and overall, the degree of influence of the two is basically equivalent. The defect length has a certain impact on the dimensionless strength, and the ratio of pipe diameter to thickness has a small effect on the dimensionless strength, while the effect of pipe outer diameter is minimal. Based on numerical analysis results, a multi-factor prediction method for dimensionless tensile strength of defective pipe columns was established, providing reference for strength evaluation of defective pipe columns in engineering.

Keywords

Internal Defect Pipe Column, Tensile Strength, Finite Element Method, Predictive Model, Orthogonal Analysis, Defect Parameters

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油气井管柱、输油管道在管柱内壁容易出现局部减薄腐蚀缺陷，管柱缺陷不仅使管柱的承载面积减少，而且在缺陷处由于尺寸突变，产生应力集中，降低了管柱的抗内压强度、抗外挤、抗扭、抗弯及抗拉强度等。由于在役油气管道主要承受内压载荷，油气井内生产套管在井下主要承受内压与外挤载荷，目前对腐蚀缺陷管柱主要集中在腐蚀速率预测与评价，对局部缺陷管柱主要针对抗内压强度、抗外挤强度进行分析[1]-[7]。另有文献分析了管柱局部缺陷对剩余抗弯强度、抗扭强度的影响[8]-[11]。

而油气井生产管柱在井下主要承受轴向拉伸载荷。而当前对含缺陷管柱的剩余抗拉强度研究相对较少。许志倩[12]等人研究了均匀腐蚀缺陷、点状缺陷、横向裂缝型、纵向裂缝型缺陷在不同腐蚀缺陷深度下对管柱承载能力的影响；李文飞[13]等人在分析了圆弧形缺陷与半月形缺陷对套管的剩余强度进行了分析，主要在弹性范围内研究了缺陷长度与深度对套管剩余强度的影响；闫相祯[11]等人研究了套管外壁缺陷形态对套管的剩余强度的影响；宋生印[14]分析了套管外部出现磨损缺陷下缺陷深度与长度等因素对套管强度的影响；徐颖强[15]分析了不同缺陷深度下含椭圆形凹坑缺陷石油管道分别在轴向拉力、内压力和组合载荷作用时的剩余强度问题。

综上，目前对缺陷管柱剩余抗拉强度的研究，主要在材料弹性范围内针对单一尺寸管柱定性研究缺陷深度对其强度的影响，其它因素如缺陷长度、宽度、管柱尺寸等对管柱剩余抗拉强度的影响程度缺少

定量分析, 未有局部内缺陷管柱抗剩余拉强度快速预测模型。本文基于材料的塑性失效准则, 建立内缺陷管柱抗拉强度有限元数值分析模型, 并结合正交试验设计, 探究缺陷尺寸参数对局部内缺陷管柱剩余抗拉强度的影响规律。基于数值分析结果建立了含缺陷管柱无因次抗拉强度多因素预测模型, 可用于快速评价工程上含缺陷管柱的剩余抗拉强度。

2. 内缺陷管柱非线性有限元分析

2.1. 有限元分析原理

三维实体结构中, 任意一点应变与位移几何方程、物体内部平衡方程、应力应变本构关系分别为:

$$\{\varepsilon\} = [L]\{u\} \quad (1)$$

$$[L]^T \{\sigma\} + \{P\} = \{0\} \quad (2)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D_{ep}]\{\Delta\varepsilon\} \quad (3)$$

其中, $\{\varepsilon\}$ 为应变分量矢量, $\{u\}$ 为位移矢量, $[L]$ 为微商算子组成的 6×3 阶矩阵, $\{\sigma\}$ 为应力分量向量, $\{p\}$ 为作用在单位体积上的外力向量, $[D_{ep}]$ 为应力应变之间的弹塑性非线性本构关系矩阵, $\{\Delta\sigma\}$ 为应力增量矢量, $\{\Delta\varepsilon\}$ 为应变增量矢量。

按照能量恒定的理论, 外力在空间位移中产生的功与内力在空间位移中产生的功是等价的, 这就是所谓的虚功原理, 公式为:

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \delta\{u\}^T \{p\} dV + \int_V \delta\{u\}^T \{q\} dS \quad (4)$$

其中, $\{q\}$ 为作用在边界上的外力矢量。

采用数值模拟方法, 将三维实体结构离散为一系列三维实体单元, 根据虚功原理, 可得总体单元平衡方程:

$$[K]\{a\} = \{R\} \quad (5)$$

其中, $[K]$ 为系统刚度矩阵, $\{R\}$ 为等效结点载荷矢量, $\{a\}$ 为单元节点位移矢量, 刚度矩阵 $[K]$ 为载荷矢量 $\{R\}$ 与节点位移矢量 $\{a\}$ 的函数。

对于非线性问题, 需要进行分步加载, 把非线性问题转化为逐段的线性问题。载荷增量下的单元平衡方程为:

$$([K_T])_m \{\Delta a\} = \{\Delta R\} \quad (6)$$

其中, $([K])_m$ 为第 m 步载荷 $\{R\}_m$ 下的系统总体切线刚度矩阵, $\{\Delta R\}$ 为载荷增量, $\{\Delta a\}$ 为节点位移增量。

2.2. 有限元分析模型结构

油气井中管柱实际内腐蚀缺陷一般形状较为复杂, 本文有限元模拟分析中对模型进行了适当的简化, 将局部腐蚀缺陷近似简化处理为矩形均匀壁厚缺陷。为消除应力集中对分析结果的干扰, 在矩形缺陷的边界处以光滑圆弧面过渡。

由于矩形均匀壁厚缺陷管柱在受拉载荷时的应力分布是对称的, 为了提高计算效率, 选择了缺陷管柱模型的四分之一来建立三维有限元模型。为了消除边界效应, 将计算管柱的长度设置为管柱外径的 3 倍和缺陷长度的 3 倍中的最小值。采用了具有高计算精度的三维 20 节点六面体等参单元, 以避免应力过大的集中, 将在缺陷及其附近区域划分细密的网格, 同时在远离缺陷处划分稀疏的网格, 以提高模型运行速度。在管柱厚度方向划分了三层网格[10]。划分网格后, 局部内缺陷管柱的几何模型如图 1 所示。

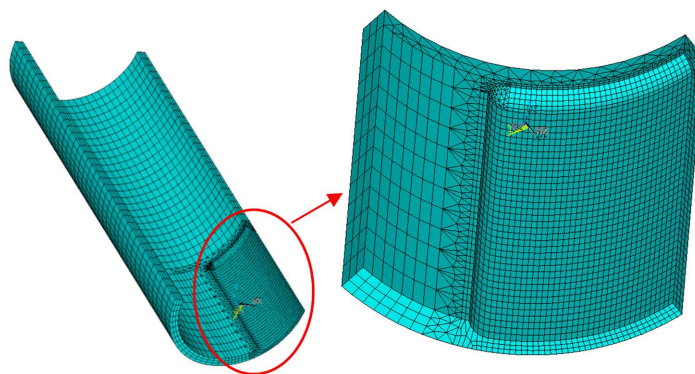


Figure 1. Calculation model diagram of local rectangular uniform thinning for tubing with internal defects

图 1. 内含缺陷管柱的局部矩形均匀减薄计算模型图

2.3. 边界条件

本文只考虑轴向拉伸载荷对管柱应力分布的影响。正对称载荷的轴向拉伸作用在缺陷的纵向切开面和靠近缺陷的管柱端面上得到了体现，而在远离缺陷的管柱端面则施加了轴向拉力。并在模型上选取 2 个节点用于限制刚体位移，否则刚体位移会导致计算结果发散。

2.4. 材料模式

硬化效应对油套管的强度有着显著影响，为了更精确地研究材料在屈服后的硬化特性，分析模型采用 Ramberg-Osgood 幂硬化应力 - 应变法则来替代材料的实际应力 - 应变曲线[7] [8]，该法则的表达式是

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n \quad (7)$$

式中， ε_0 代表初始应变，即 $\varepsilon_0 = \sigma_s/E$ ； σ_s 表示材料的屈服强度，单位是 MPa； E 是弹性模量，单位也是 MPa； α 是硬化系数， n 是幂硬化指数。

文章主要分析了油气井中广泛应用的 N80 钢级油套管，其屈服强度为 552 兆帕，抗拉强度为 650 兆帕，弹性模量 206 吉帕，泊松比为 0.3。

2.5. 失效准则

当前，管道结构的损坏和故障是评估其强度的关键因素。根据实际应用，弹性损伤规则和塑料损伤规则被广泛使用作为常见的破坏标准。按照弹性损伤规则，如果局部区域内的最大有效压力达到了材料的屈服点，那么就认定管道已经出现问题并丧失了进一步承受负载的可能。然而，因为石油和天然气的生产过程中，通常会采用有良好延展性的油套管，因此它的破损方式主要是以塑性为主[5]。本篇文献采用了塑料损伤规则来判断管道是否已受损，只要所有部分的有效压力都达到或者超越了屈服应力，就会视为管道出现了问题并且失去了沿着轴线承重的可能。本文根据第四强度理论，采用 Von Mises 等效应力。在三个主应力轴构成的空间中，Von Mises 等效应力的数学表达式为：

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} < [\sigma] \quad (8)$$

式中： σ_v 代表 von mises 的等效应力，单位是 Mpa； $[\sigma]$ 是许可的应力值，其中 σ_1 ， σ_2 ， σ_3 分别代表第一、第二和第三个主要的应力。

3. 剩余抗拉强度影响因素分析

为了方便把研究成果推而广之，设定了一些无因次数分析变量：局部缺陷的相对深度(h/T)、缺陷的环向相对宽度(θ/π)、缺陷轴向相对长度(L/D)、管柱径厚比(D/T)、无因次抗拉强度 F_D ，其中： L ——缺陷轴向长度，mm； h ——缺陷深度，mm； θ ——缺陷环形周角，rad； T ——管柱壁厚，mm； D ——管柱外径，mm； $F_D = F_L/F_0$ ， F_L ——缺陷管柱剩余抗拉强度，kN， F_0 ——完整无缺陷管柱抗拉强度，kN。

3.1. 拉伸载荷下缺陷管柱应力分布规律

如图 2 所示，当施加不同的拉伸负荷时，局部内部缺陷对管柱的影响程度可以通过等效压力云图来观察(此处缺陷参数设定为： $D = 177.8\text{ mm}$ ， $T = 10.36\text{ mm}$ ， $h/T = 0.5$ ， $\theta/\pi = 1/2$ ， $L/D = 2.2$)。从图像上看，由于存在局部缺陷，管柱产生了显著的应力集聚效果，然而这种影响主要局限在缺陷所在的区域周围；而在距离缺陷稍远的部分，管柱承受的应力受到缺陷的影响相对较少，且应力的分布更为均衡，这使得它们的应力状态接近未有缺陷时的完好管柱的状态。

当轴向拉伸载荷在较小范围内时，缺陷管柱的最大应力和应变随着载荷的增加近似呈线性关系，最大应力主要集中在管柱内部缺陷环向边缘区域，同时在缺陷的中心区域也存在较大的应力。当轴向拉伸载荷增加至 1060 kN (完整管柱强度的 36%)时，缺陷环向边缘处最大应力达到 N80 材料的屈服强度值 550 MPa，最后发生材料塑性屈服变形。随着载荷的继续增大，塑性屈服范围由缺陷边缘区域开始向缺陷中心区域、向管柱外侧方向同步扩展，此时虽然载荷继续增大，但最大应力增加的幅度相对较小。随着负载的提升到 2060 kN (完整的管道强度达到 69%)，塑性变形范围已经扩大到了所有裂缝和周围地区，接着裂缝处的压力与应变迅速增长。通过有限元素模拟发现，一旦裂缝部分完全屈服，尽管塑形区域还能进一步延伸并承担一定程度的外部压力，然而在此阶段只需引入轻微的内部压力或者外部压缩力量，就会导致管道破损，可以推断出，一旦裂缝部位全面屈服，管道的基本承重功能就已经丧失了。

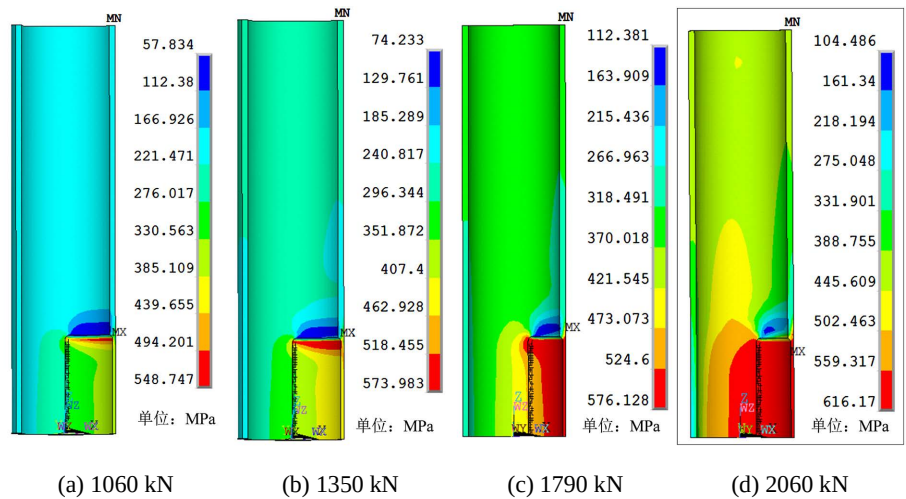


Figure 2. Equivalent stress cloud map of defective pipe column under different tensile loads
图 2. 不同拉伸载荷下缺陷管柱等效应力云图

3.2. 缺陷深度对强度的影响

对于管道支架来说，缺陷相对深度 h/T 对其抵抗力有明显影响，随着缺陷深度的增长，它的抵抗能力呈现出接近二阶曲线的下降趋势，如图 3 所示。如果缺陷相对深度 h/T 很低，例如小于 0.35，那么它对抵抗力的影响就会比较微弱；然而，一旦这个值超过了 0.35，这种影响就变得非常强烈。以 $\theta/\pi = 5/6$

和 $L/D = 0.4$ 为例, 当缺陷相对深度 h/T 从 0.2 变为 0.3 的时候, 抵抗力会降低约 6.5%; 同样地, 当 h/T 从 0.5 升至 0.6, 抵抗力也会减少大约 9.8%。当缺陷长度、宽度较小时, 随着缺陷深度的增大, 抗拉强度以较小的幅度减小; 而当缺陷长度、宽度较大时, 随着缺陷深度的增大, 抗拉强度以较大的幅度减小。

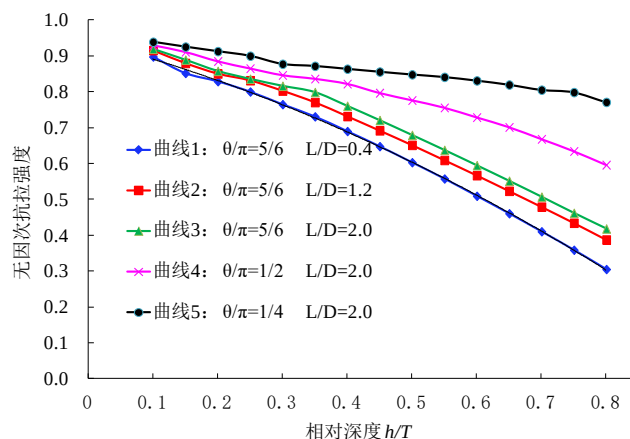


Figure 3. Influence of defect depth on dimensionless tensile strength ($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)
图 3. 缺陷深度对无因次抗拉强度影响($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)

3.3. 缺陷长度对强度的影响

缺陷长度与剩余抗拉强度之间近似呈指数关系, 其影响曲线基本分为两阶段, 如图 4 所示。

当缺陷相对长度 L/D 在 0.4 以内时, 缺陷管柱抗拉强度随缺陷长度的减小大幅度降低; 当缺陷相对长度超过 0.4 时, 随着缺陷长度的增加, 抗拉强度增加的幅度较小, 抗拉强度趋于极限值。缺陷相对长度超过 3 时, 抗拉强度几乎不受缺陷长度的影响。另外可以看出, 当缺陷宽度较小时, 缺陷长度的增加对抗拉强度的影响幅度不明显; 而当缺陷宽度较大时, 缺陷长度的增加对抗拉强度的影响幅度较大。

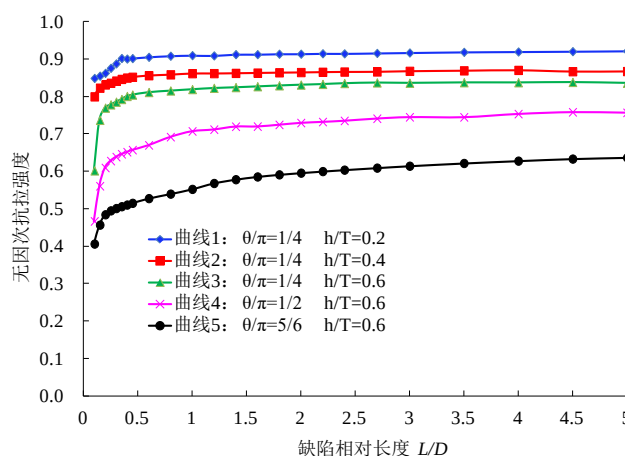


Figure 4. Effect of defect length on dimensionless tensile strength ($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)
图 4. 缺陷长度对无因次抗拉强度影响($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)

当缺陷相对长度 L/D 在 0.4 以内时, 缺陷长度越小, 缺陷形状越接近环向沟槽形。在受拉压力的环境中, 管道桩基会在其横截面处产生拉应力, 由于沟槽状瑕疵的外观与裂纹相似, 这会使管道更容易发生应力集中的现象, 进而导致环向沟槽型瑕疵的管道桩基抗拉能力显著下降。所以, 随着瑕疵长度逐渐

减少, 抗拉性能也会迅速衰退, 特别是在较大的瑕疵深度情况下, 沟槽式瑕疵更加趋近于裂纹, 此种情况的影响尤为突出。

3.4. 缺陷宽度对强度的影响

缺陷宽度对抗拉强度影响规律如图 5 所示, 两者近似为负数指数关系。抗拉强度随缺陷宽度的增大而减降低, 但随着缺陷宽度的增大, 抗拉强度降低的幅度变小并趋于零; 当 θ 超过 1.6π 时, 抗拉强度已接近管柱整体均匀减薄时抗拉强度值。

当缺陷宽度较小时, 如缺陷相对宽度小于 $\theta/\pi = 1/15$ 时, 虽然缺陷较接近于轴向沟槽形缺陷, 但并没有明显降低管柱的抗拉强度, 即相比环向沟槽形缺陷, 轴向沟槽形缺陷对管柱抗拉强度影响较小。

可以看出, 局部内缺陷管柱抗拉强度受缺陷宽度的影响较大, 其规律与缺陷宽度对管柱的抗扭强度影响基本类似[10]; 而与缺陷宽度对管柱的抗内压强度影响较小甚至可以忽略差异较大[7] [8]。

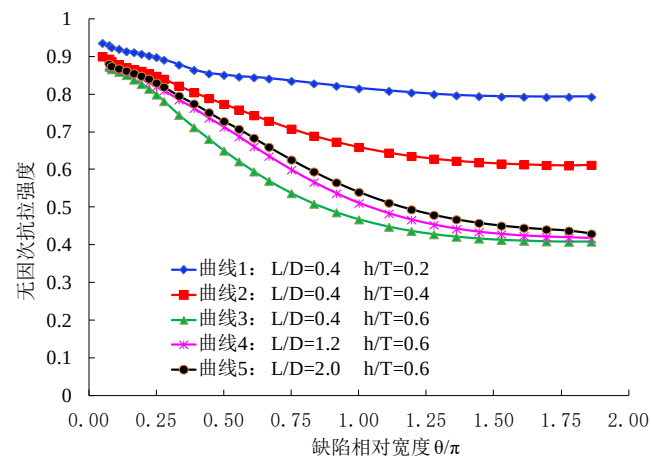


Figure 5. Effect of defect width on dimensionless tensile strength ($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)

图 5. 缺陷宽对无因次抗拉强度影响($D = 177.8$ mm, $T = 10.36$ mm)

3.5. 管柱径厚比对强度的影响

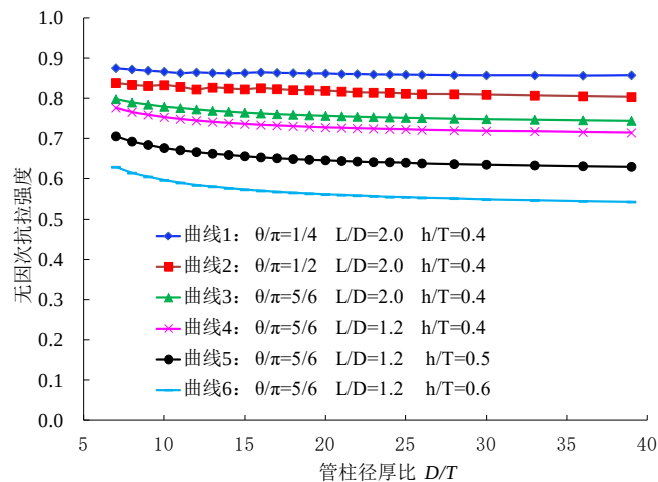


Figure 6. Influence of pipe diameter-thickness ratio on dimensionless tensile strength ($D = 177.8$ mm)

图 6. 管柱径厚比对无因次抗拉强度影响($D = 177.8$ mm)

从图 6 可以看出, 缺陷管柱无因次抗拉强度随径厚比(D/T)增加呈线性关系下降。当缺陷深度、宽度较小时, 管柱径厚比对抗拉强度的影响幅度较小; 当缺陷深度、宽度较大时, 影响幅度较大。总体上, 径厚比变化对抗拉强度影响幅度有限, 但将含局部缺陷下的某尺寸管柱抗拉强度推广应用到其他尺寸管柱上时, 如果忽略管柱径厚比的影响, 最大可能会引起 10% 的误差。

3.6. 管柱外径对强度的影响

在缺陷相对深度(h/T)、相对宽度(θ/π)、相对长度(L/D)、管柱的径厚比(D/T)等关键参数保持恒定时, 该管道的无因次数抗拉强度对管径的变化并不敏感, 这可以从图 7 中看出。所以, 如果两个地方存在类似的局部缺陷管柱, 且它们的管柱参数和局部缺陷参数的几何特性相近, 那么我们就可以认定这两个缺陷管柱拥有相当的无因次数抗拉强度。

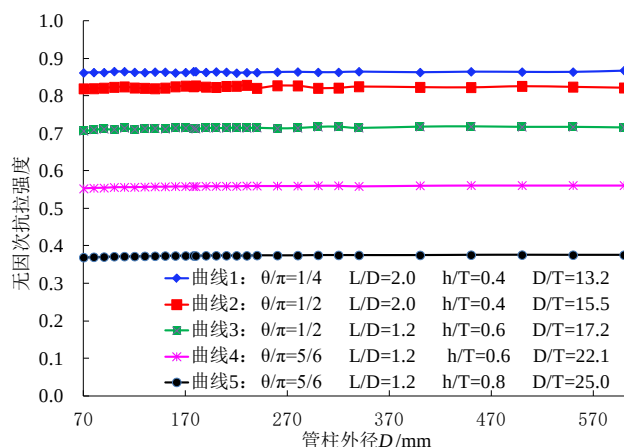


Figure 7. Influence of pipe outer diameter on dimensionless tensile strength
图 7. 柱外径对无因次抗拉强度影响

4. 无因次抗拉强度主控因素分析

利用正交实验的设计方式, 我们进行了精确的数值研究来评估和理解管道柱子的抗拉强度的变化情况, 这涉及其内部缺陷的长度比例、宽度比例、深浅比例、外部直径以及内外圆周半径之比等五大要素。针对这些关键元素, 我们将它们分为四类不同的等级, 详细内容参见表 1。然后, 依据正交实验 $L_{16}(4^5)$ 的方法构建出 16 组分析模型, 并使用有限元技术对其中的每一种模型都进行了仿真计算以获得无因次数的抗拉强度数据, 接着运用极大差异分析来揭示各个影响因素对于抗拉强度的作用大小。

表 2 为五个影响因子正交试验分析结果, 根据极差分析结论, 各因素对无因次抗拉强度的影响从强到弱排序为: 缺陷相对深度、缺陷相对宽度、缺陷相对长度、管柱径厚比、管柱外径。缺陷相对深度是影响无因次抗拉强度最显著的因素, 宽度的影响略次于深度影响, 总体上两者影响程度基本相当。缺陷相对深度对无因次抗拉强度的影响程度, 约为缺陷相对长度影响程度的 2 倍, 为管柱径厚比影响程度的 5 倍。

如表 2 所示, 当缺陷深度从 0 到 0.158 时, R_1 、 R_2 和 R_3 分别由 0.107、0.115 和 0.158 构成, 呈现出一种逐步上升的模式, 这意味着随着缺陷深度的增长, 无因次数抗拉强度变动范围正在扩大; 同样地, 对于缺陷宽度而言, R_1 、 R_2 和 R_3 分别是 0.171、0.126 和 0.048, 显示出了逐级下降的规律, 也就是说, 随着缺陷宽度的提升, 无因次数抗拉强度变动程度正趋于缩小; 此外, 我们还发现, 与缺陷长度相关的 R_1 、 R_2 和 R_3 数值为 -0.091、-0.058 和 -0.046, 它们的绝对值也表现出持续减少的现象, 换句话说, 随着

缺陷长度的延长, 无因次数抗拉强度变动规模也在不断收窄。

Table 1. The factors affecting the dimensionless tensile strength and the value of the influencing factors

表 1. 无因次抗拉强度影响因素及水平取值

因子水平	1	2	3	4
A: 缺陷相对长度, L/D	0.2	0.8	1.6	2.4
B: 缺陷相对长度, h/T	0.2	0.38	0.56	0.74
C: 缺陷相对宽度, θ/π	1/12	2/3	5/4	11/6
D: 管柱外径, mm	80	160	240	320
E: 管柱径厚比, D/T	10	15	20	25

Table 2. Orthogonal experimental results of factors affecting dimensionless tensile strength

表 2. 无因次抗拉强度影响因素正交试验结果

试验序号	L/D	h/T	θ/π	D mm	D/T	无因次抗拉强度有限元结果
1	0.2	0.2	1/12	80	10	0.9191
2	0.2	0.38	2/3	160	15	0.7277
3	0.2	0.56	5/4	240	20	0.4720
4	0.2	0.74	11/6	320	25	0.2044
5	0.8	0.2	2/3	240	25	0.8459
6	0.8	0.38	1/12	320	20	0.9133
7	0.8	0.56	11/6	80	15	0.4787
8	0.8	0.74	5/4	160	10	0.3178
9	1.6	0.2	5/4	320	15	0.8498
10	1.6	0.38	11/6	240	10	0.6546
11	1.6	0.56	1/12	160	25	0.8658
12	1.6	0.74	2/3	80	20	0.5514
13	2.4	0.2	11/6	160	20	0.8213
14	2.4	0.38	5/4	80	25	0.7113
15	2.4	0.56	2/3	320	10	0.7308
16	2.4	0.74	1/12	240	15	0.8401
R1	-0.091	0.107	0.171	-0.018	-0.069	
R2	-0.058	0.115	0.126	-0.020	0.035	
R3	-0.045	0.158	0.048	0.029	0.033	
极差	0.1950	0.3806	0.3448	0.0380	0.0685	
因素主次	4	1	2	5	3	

5. 剩余抗拉强度多因素预测模型

使用有限元方法进行了 626 个样本中各种缺陷条件下管道柱子的抗拉强度的数值模拟研究, 并且根据缺陷相对于长短、宽窄和深浅程度, 以及管道柱子直径与壁厚的比例等因素来评估其影响无量纲抗拉强度的模式, 从而构建出一组关于局部均质内部缺陷管道柱子无量纲抗拉强度的多种因素预测公式模型:

$$F_D = 1 - \left[\frac{h}{T} + 0.354 \left(\frac{h}{T} \right)^2 \right] \left\{ 1 - 0.929 e^{-0.644 \frac{\theta}{\pi}} + 0.221 \left[2.15 \frac{\theta}{\pi} - \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right] e^{-0.706 \frac{L}{D}} + 0.028 \left(\frac{D}{T} - 17.2 \right) \right\} - 0.02 \left(\frac{h}{T} \right)^{0.25} \quad (9)$$

其中： L ——缺陷长度，mm； h ——缺陷深度，mm； θ ——缺陷环形周角，rad； T ——管柱壁厚，mm； D ——管柱外径，mm； F_D ——因次抗拉强度； $F_D = F_L/F_O$ ； F_L ——缺陷管柱剩余抗拉强度，kN， F_O ——原始管柱抗拉强度，kN。

相关系数为 0.9821 的拟合公式，图 8 是使用该公式预测结果与有限元模拟结果之间的相对误差。平均绝对误差达到 1.41%，大多数预测点的误差都在 2% 以内，因此，拟合效果相当理想。

误差较大的 9 个预测点均为缺陷相对长度小于 0.2 的情况，当缺陷相对长度小于 0.2 时，缺陷近似为环形沟槽，应力集中极为明显，因此本公式不适用于环向沟槽形缺陷管柱抗拉强度的预测评价，但可用于轴向沟槽形缺陷抗拉强度的计算。用无因次抗拉强度 F_D 乘上原始管柱的抗拉强度 F_O ，即可得到含缺陷管柱剩余抗拉强度 F_L 。

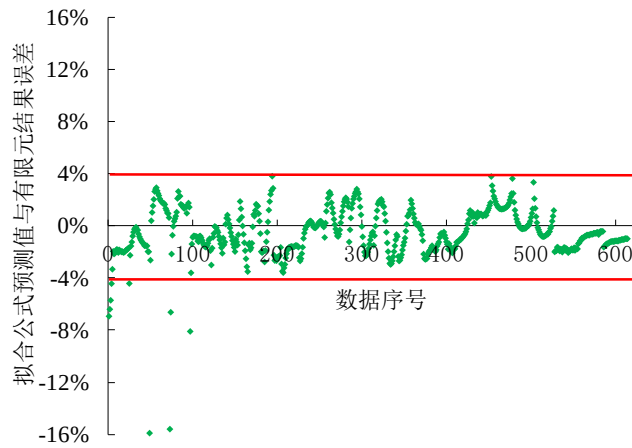


Figure 8. Relative error between formula prediction results and finite element calculation results
图 8. 公式预测值与有限元计算结果的相对误差

6. 应用实例

南海西部某水平生产气井，井深 3426 m， $\varnothing 244.5$ mm 生产套管下深 2862 m，裸眼段下入 $\varnothing 168.3$ mm 筛管完井。 $\varnothing 88.9$ mm 生产管柱下深 2810 m，管柱钢级为 N80，生产封隔器下深 2732 m。该井生产中后期需要修井更换管柱，由于井筒腐蚀较严重，需要评价管柱抗拉强度能否满足解封生产封隔器要求。采用机械测井技术对生产管柱腐蚀情况进行检测，得到管柱部分内腐蚀缺陷尺寸参数如表 3 所示。

Table 3. Measured dimensional parameters and strength prediction results of corrosion defects in oil pipes
表 3. 某井实测油管内腐蚀缺陷尺寸及强度预测结果

序号	管柱参数		实测缺陷尺寸			无因次参数				强度预测	
	外径/mm	壁厚/mm	长度/mm	宽度/mm	深度/mm	L/D	θ/π	h/T	D/T	无因次强度	抗拉强度/kN
1	88.9	6.45	44	23	2.00	0.49	0.19	0.31	13.8	0.903	814
2	88.9	6.45	37	43	1.74	0.42	0.36	0.27	13.8	0.883	796
3	88.9	6.45	72	83	2.52	0.81	0.69	0.39	13.8	0.751	676
4	88.9	6.45	66	56	1.81	0.74	0.47	0.28	13.8	0.859	774
5	88.9	6.45	84	29	1.16	0.95	0.24	0.18	13.8	0.940	847

依据(9)式评价该井生产管柱腐蚀后的抗拉强度,结果见表3,管柱最小无因次抗拉强度 $F_D = 0.751$,剩余抗拉强度为676 kN。解封封隔器按最大过提200 kN考虑,模拟分析解封过程中管柱最大拉力为512 kN,即腐蚀缺陷管柱可满足解封封隔器时的抗拉强度要求。现场起管柱作业中,实际解封封隔器时管柱最大拉力460 kN,在缺陷管柱的剩余抗拉强度范围之内。

7. 结论

(1) 内缺陷管柱无因次抗拉强度随缺陷深度增大近似呈二次曲线的趋势下降;抗拉强度随缺陷长度的增大呈指数关系逐渐增加,并趋于极限值;抗拉强度随缺陷宽度增大呈负指数关系逐渐降低,并趋于管柱整体均匀减薄时的抗拉强度值;无因次抗拉强度随管柱径厚比增加近似呈线性关系减小;环向沟槽形缺陷显著降低管柱的抗拉强度,而轴向沟槽形缺陷对管柱抗拉强度影响较小。

(2) 对于内部缺陷管道结构而言,其无因次数之抗拉强度受制于缺陷深度和宽度的明显作用,其中深度的作用更为关键一些,其次才是宽度;至于缺陷的长度也对其无因次数之抗拉强度产生一定的效应,但相比之下,管道直径与壁厚的比例对其无因次数之抗拉强度的贡献相对较低,而且管道的外部尺寸对其无因次数之抗拉强度的干扰几乎可忽略。

(3) 基于内缺陷参数对管柱剩余抗拉强度影响规律,拟合了局部内缺陷管柱抗拉强度多因素计算公式,为工程上含缺陷管柱剩余抗拉强度预测与评价提供参考。

基金项目

中海石油(中国)有限公司科研项目“南海西部油田上产2000万方钻完井关键技术研究”(项目编号:CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ 05 ZJ)。

参考文献

- [1] 覃成锦,高德利. 套管强度计算的理论问题[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 123-126.
- [2] 石晓兵,陈平,徐进,等. 油气井套管CO₂点状腐蚀剩余强度分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 95-97.
- [3] 车争安,张智,陈胜宏,等. 酸性气田开发中腐蚀对套管强度的影响[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 114-118.
- [4] 王刚庆,刘旭辉,王小增,等. 月牙形和偏心圆筒形内壁磨损套管应力分析[J]. 石油机械, 2013, 41(4): 35-39.
- [5] 张智,孔维伟,刘志伟,等. 腐蚀缺陷管柱的剩余强度研究[J]. 中国科技论文, 2016, 21(11): 2467-2472.
- [6] 崔铭伟,曹学文. 腐蚀缺陷对中高强度油气管道失效压力的影响[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1086-1092.
- [7] 刘贤玉,范村莹,陈江华,等. 开口模型下内腐蚀缺陷管柱剩余抗内压强度[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1795-1801.
- [8] 沈士明,郑逸翔. 含局部减薄缺陷管道的极限荷载与安全评定[J]. 石油机械, 2004, 32(6): 17-20.
- [9] 韩晓毅,张平生,刘玉标,等. 钻杆管体体积型缺陷的有限元分析[J]. 石油机械, 2002, 30(4): 20-21.
- [10] 刘贤玉,蔡振兴,韩成,等. 局部内缺陷套管剩余抗扭强度分析[J]. 石油机械, 2020, 48(4): 112-118.
- [11] 闫相祯,邓卫东,高进伟,等. 套管钻井中套管柱疲劳可靠性及相关力学特性研究[J]. 石油学报, 2009, 5(10): 669-770.
- [12] 许志倩,闫相祯,杨秀娟,等. 不同缺陷对套管剩余强度影响分析[J]. 机械设计, 2014, 31(8): 74-78.
- [13] 李文飞,李玄烨,夏文安,等. 腐蚀套管剩余强度数值模拟分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(6): 74-78.
- [14] 宋生印,刘永刚,王力,等. 套管钻井用套管外表面磨损后剩余强度分析[J]. 石油机械, 2006, 34(2): 7-10.
- [15] 徐颖强,原园,吕国志,等. 含凹坑缺陷在役石油管道剩余极限强度分析[J]. 石油机械, 2004, 32(10): 11-13.