

The Key Factors' Sensitivity Analysis of Inclined Crack in Submarine Pipeline

Yongjin Shi, Haiqing Tian

Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong
Email: address730@126.com

Received: Dec. 8th, 2017; accepted: Dec. 21st, 2017; published: Dec. 28th, 2017

Abstract

Inclined crack is one of the primary factors which results in accident of submarine pipeline. Based on the fracture mechanics theory, we take the numerical method to establish the pipeline model boundary conditions. Then according to the environmental conditions loading environmental load, and calculated the stress intensity factor K , from the pipeline pressure, wall thickness, crack length, pipe diameter, diameter and wall thickness ratio and so on, we also analyzed its sensitivity to pipeline strength. These have a certain foundation effect on the subsequent in-depth study of the pipe with oblique crack pressure.

Keywords

Submarine Pipeline, Inclined Crack, Numerical Method, Sensitivity Analysis

海底管道斜裂纹关键因素敏感性分析

史永晋, 田海庆

中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营
Email: address730@126.com

收稿日期: 2017年12月8日; 录用日期: 2017年12月21日; 发布日期: 2017年12月28日

摘要

斜裂纹是海底管道发生安全事故的主要因素之一。基于断裂力学理论, 采用数值计算法建立管道模型边界条件, 根据环境条件加载环境载荷, 从管道内压、壁厚、裂纹长度、管道直径、直径与壁厚比等方面计算了应力强度因子 K , 分析了其对管道强度的敏感性影响, 对后续含斜裂纹压力管道的深入研究具有一定的基础作用。

关键词

海底管道, 斜裂纹, 数值计算, 敏感性分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近年来, 国内在役海底输油(气)管道发生安全事故, 不仅影响了油气的正常生产, 而且对海洋环境造成污染。研究发现, 材料发生破坏或应力脆断时其承受的应力通常远远低于自身所能承受的极限应力, 产生这一现象的主要原因是管道原结构存在一些细小裂纹[1]。在正常工作过程中, 压力管道内壁产生裂纹并不是小概率事件, 若其继续工作会导致裂纹进一步扩大, 最终造成安全事故频发, 甚至出现不可挽回的损失[2]。

目前, 利用断裂力学理论分析管道安全的技术方法日趋成熟, 数值计算方法被广泛应用于各个领域。其中, 有限元法既不受所研究的裂纹体结构自身几何外形的影响, 也不受结构自身承载复杂性的制约, 在断裂力学中其有着更为广泛的发展前景[3]。本文对含有斜裂纹的压力管道建立有限元模型, 通过计算求解出含斜裂纹管道的应力强度因子的有限元解, 得到裂纹体结构裂纹尖端附近的应力应变场, 以方便工程实际应用。

2. 管道模型参数

在实际工程中, 复杂裂纹较为常见, 包括斜裂纹、分叉裂纹和平行裂纹。其中, 斜裂纹最为常见, 指裂纹与轴向夹角 $\theta \neq 0^\circ$ [4], 本文仅对该类裂纹进行分析[5]。分析过程中, 确定含斜裂纹压力管道的诸多边界约束条件, 充分考虑裂纹尖端应力强度因子的影响因素, 以建立不同参数条件下的管道模型并求解。

综合考虑各种因素后的管道模型参数设置: 管道长度 $L = 1000$ mm、壁厚 $t = 1$ mm、管道直径 $D = 400$ mm、半裂纹长度 $a = 10$ mm; 裂纹与轴向夹角 $\theta = 45^\circ$; 管道材质 35 号钢; 弹性模量 $E = 2.01E11$; 泊松比 0.3; 剪切模量 $0.794E11$; 屈服应力 315 MPa; 管道内压 1.5 MPa (内压作用时, 两端为轴向约束) [6]。建立的含斜裂纹压力管道几何模型见图 1, 两端视为轴向约束, 模拟计算时对整个结构进行力学分析。

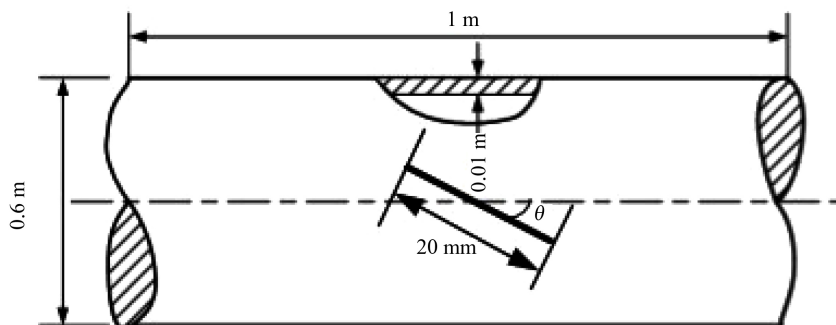


Figure 1. Geometric model of pressure piping inclined crack

图 1. 含斜裂纹压力管道几何模型

3. 有限元建模

利用有限元法分析裂纹在管道轴向贯穿时的应力场, 在线弹性条件下, 求出内压作用下的裂纹尖端应力场[7]和裂纹应力强度因子 K , 以满足实际工程中对断裂参数的需要。

采用 Shell63 单元对薄壁管道建模。通常情况下, 二维裂纹在划分单元之后可以直接利用 KSCON 命令对裂纹尖端单元进行奇异化处理, 但三维裂纹不能直接利用该命令来生成裂纹前缘处的奇异单元, 需要寻求其他方法对三维裂纹建模。工程中主要采用实体建模法, 具体思路是将含裂纹管道分为含裂纹的小块模型 M 和管道主体部分 N, 并分别建模, 然后利用 ANSYS 中的 Boolean 运算对两部分进行 Glue (黏接运算)操作, 先对含裂纹的小块模型 M 进行细腻的网格划分, 再利用自由划分方法对不含裂纹的管道主体部分 N 划分网格。

由于存在应力集中, 裂纹尖端周围区域的应力、应变值的跨度很大, 需要适当加密裂纹尖端周围的有限元网格, 以获得更准确可靠的应力、应变和位移场。通常情况下, 裂纹前缘第一层单元垂直方向的长度不能超过裂纹长度的 5%, 裂纹体裂纹尖端附近区域单元最大长度与最小长度的比值不能超过 5, 但在远离裂纹尖端的区域该比值可以控制在 20 之内。

网格划分之前, 需要在裂纹尖端创建奇异点, 并设置奇异单元[8], 1 个平面中只能设置 1 个奇异点。本文为创建 2 个奇异点的全裂纹, 管道建立坐标系后, 通过 Glue (黏接运算)命令建立裂纹共享的边界。管道网格划分见图 2、图 3。

4. 模型载荷施加

根据第四强度理论, 管道模型整体应力求解结果见图 4, 裂纹尖端受力情况见图 5。

从图 5 中可以看出: 最大应力值位于两个裂纹尖端附近; 裂纹尖端附近的应力值随着其与裂纹尖端距离的增大而减小, 但仍然远远大于远离裂纹尖端处的应力值(该变化规律正好对应于裂纹尖端附近接近呈对称分布的蝶形高应力区域); 最小应力值位于裂纹两个尖端之间靠近裂纹线的部位(图中深蓝色区域)。

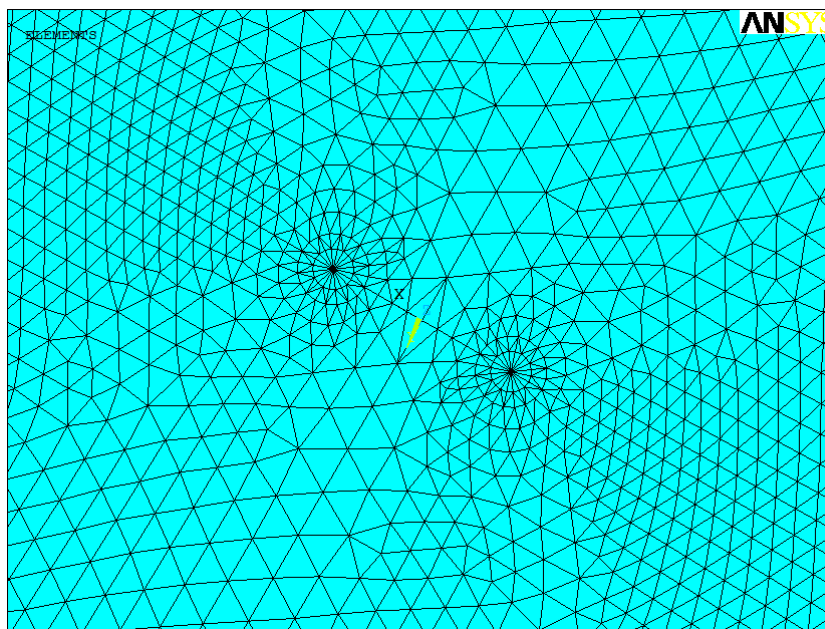


Figure 2. The meshing of tip oblique crack
图 2. 斜裂纹尖端网格划分

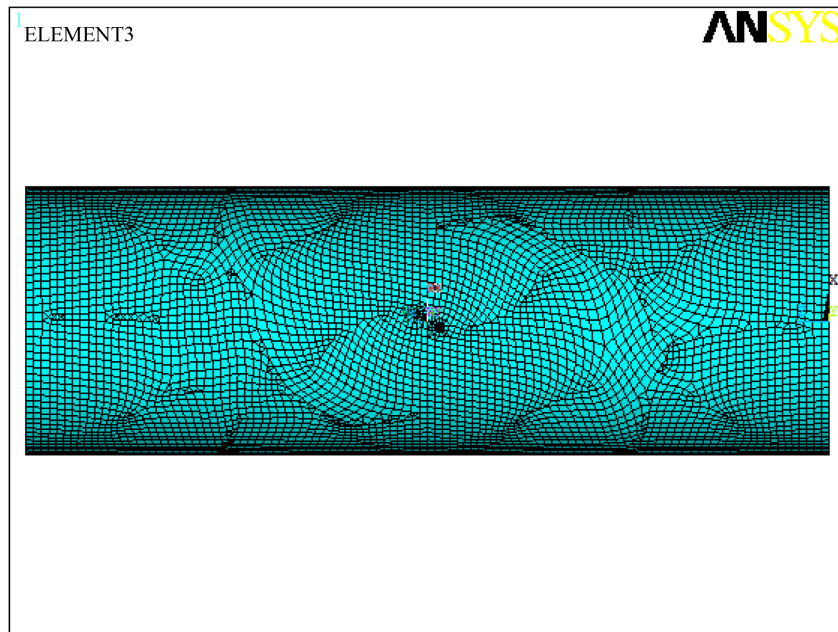


Figure 3. Overall grid partition of pressure piping inclined crack
图 3. 含斜裂纹管道整体网格划分

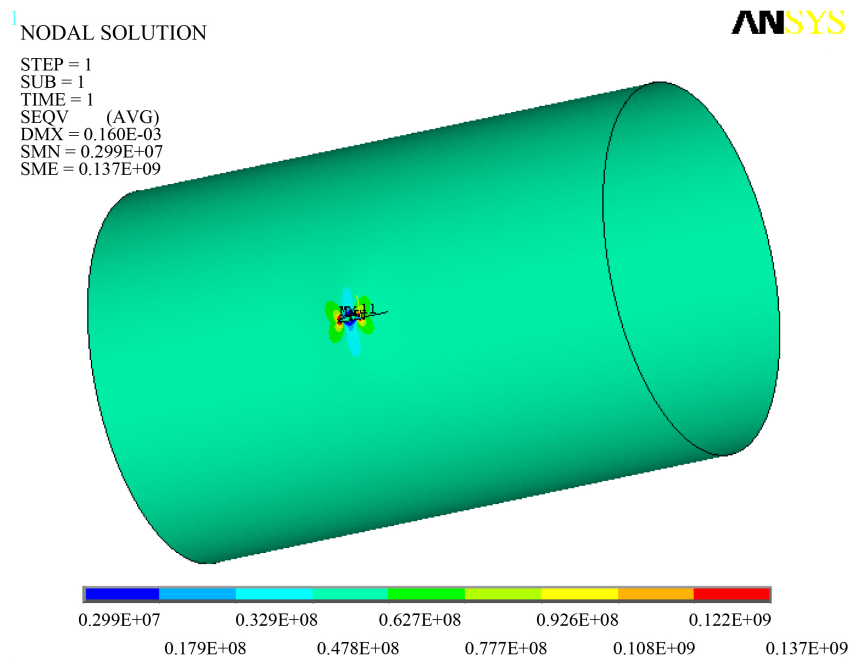


Figure 4. Overall stress condition of pressure piping
图 4. 管道整体应力情况

5. 斜裂纹应力强度因子变化规律

利用平面位移外推法在全模型中求解应力强度因子 K 。以裂纹与轴向夹角 $\theta = 45^\circ$ 、管道模型长度 $L = 1000$ mm、管道直径 $D = 400$ mm、半裂纹长度 $a = 10$ mm、管道壁厚 $t = 10$ mm、管道内压 $P = 1.5$ MPa 为基本参数创建有限元模型，然后分别以其中一个参数为变量、其余参数为定量，建立不同参数条件下

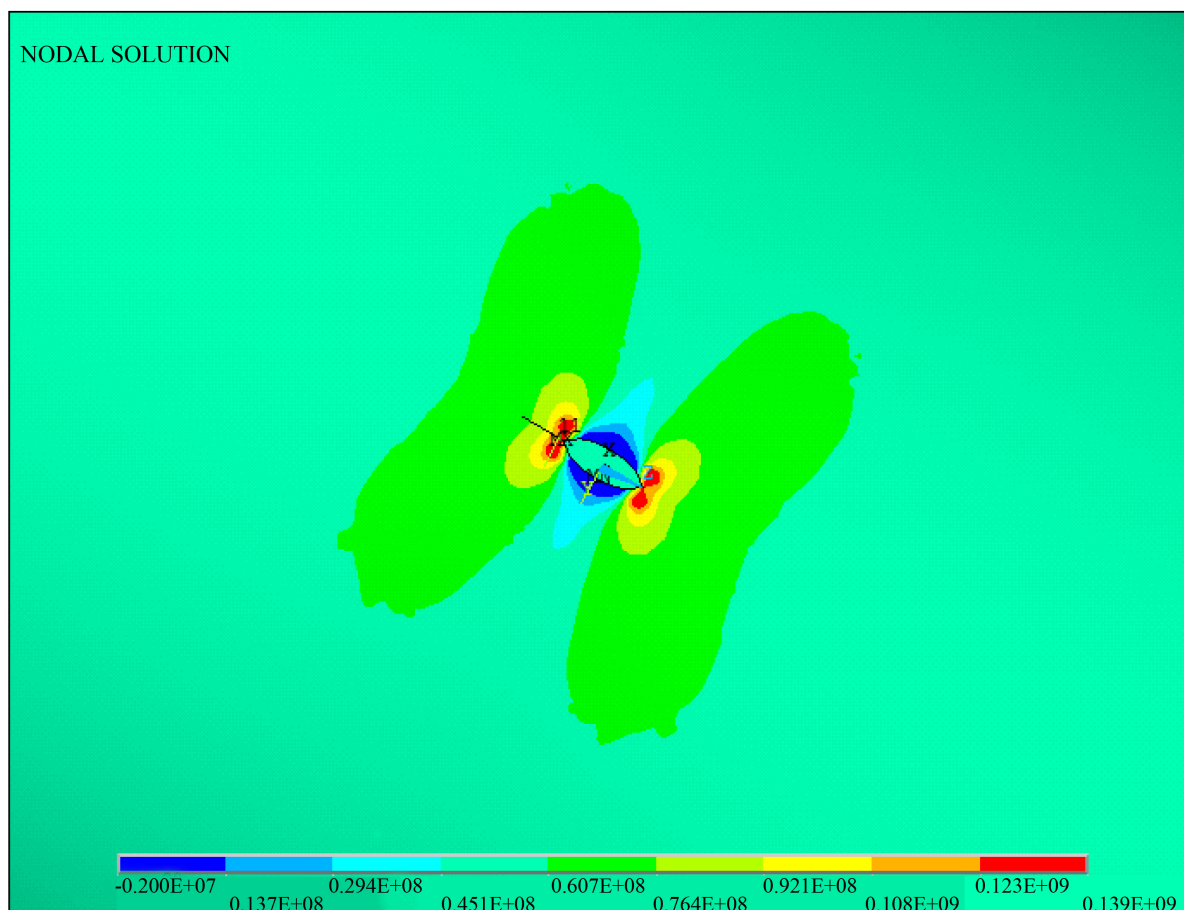


Figure 5. Stress condition of tip oblique crack
图 5. 斜裂纹尖端应力情况

含有斜裂纹($\theta \neq 0$)的压力管道有限元模型并计算求解, 探求该变量与应力强度因子 K 的变化规律。

5.1. 管道内压 P 的影响

分别取 $\theta = 45^\circ$, $a = 10 \text{ mm}$, $D = 400 \text{ mm}$, $L = 1000 \text{ mm}$ 为定量, 管道壁厚分别取 $t = 10 \text{ mm}$ 和 $t = 15 \text{ mm}$, 管道内压 P 作为自变量, 分别取作 $P = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 \text{ MPa}$, 建模计算出对应的应力强度因子 K_I 和 K_{II} 值并作出曲线, 结果见图 6。(K_I 和 K_{II} 不同壁厚下的强度因子)

从图 6 中可以看出: 不同壁厚条件下应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的曲线走势基本相同; 随着管道内部压力的增大, 应力强度因子 K_I 和 K_{II} 均增大, 基本呈线性增长关系, 即 K_I 、 K_{II} 与 P 值呈增函数关系。

5.2. 管道壁厚 t 的影响

半裂纹长度分别取 $a = 10 \text{ mm}$ 和 $a = 20 \text{ mm}$, 管道壁厚 t 作为自变量, 分别取 1 mm 、 3 mm 、 5 mm 、 10 mm 、 15 mm 、 20 mm 、 25 mm 、 30 mm , 其他参数为定量, 建模计算应力强度因子 K_I 、 K_{II} 与不同壁厚 t 的关系曲线, 结果见图 7。

从图 7 中可以看出: 半裂纹长度不同, 但两种应力强度因子 K_I 、 K_{II} 的走势基本接近; 随着管道壁厚 t 的增大, 应力强度因子 K_I 和 K_{II} 整体呈减小的趋势, 壁厚由 1 mm 增加到 5 mm , K_I 、 K_{II} 值迅速减小, 壁厚超过 5 mm 后, K_I 、 K_{II} 值减速变缓。

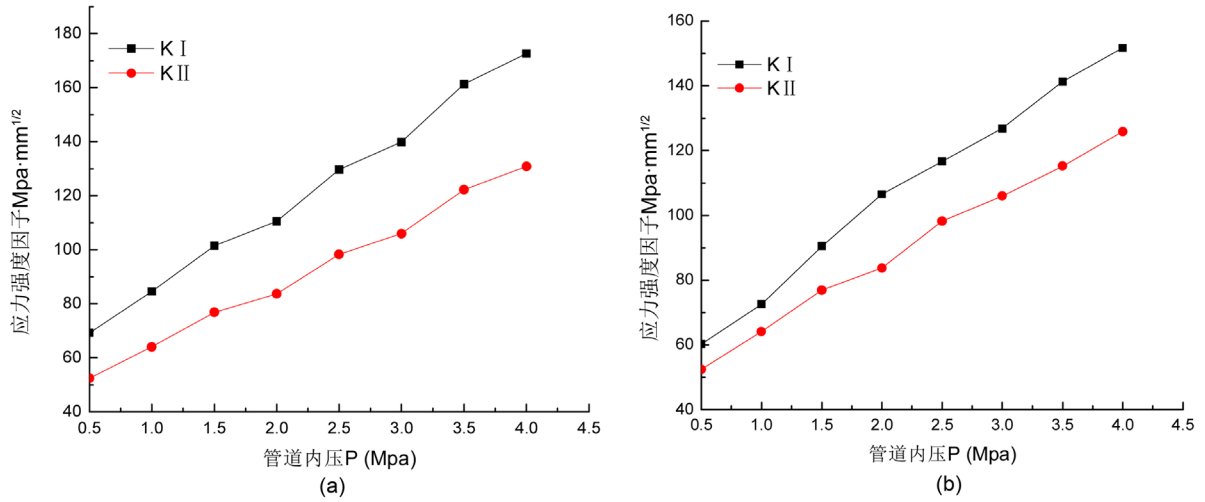


Figure 6. Relationship curves of K and pipeline internal pressure P . (a) $t = 10$ mm; (b) $t = 15$ mm
 图 6. K 和管道内压 P 的关系曲线。(a) $t = 10$ mm; (b) $t = 15$ mm

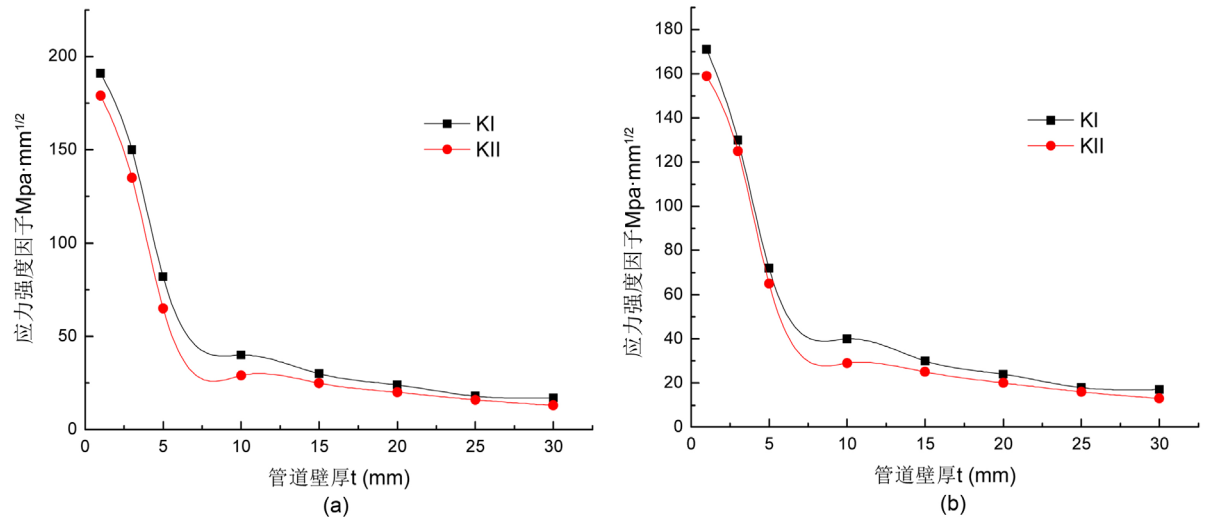


Figure 7. Relationship curves of K and pipe wall thickness t . (a) $a = 10$ mm; (b) $a = 20$ mm
 图 7. K 和管道壁厚 t 的关系曲线。(a) $a = 10$ mm; (b) $a = 20$ mm

5.3. 半裂纹长度 a 的影响

管道壁厚分别取 $t = 10$ mm 和 $t = 15$ mm, 半裂纹长度 a 作为变量, 分别取 12 mm、16 mm、20 mm、24 mm、28 mm、32 mm、36 mm、40 mm, 其他参数为定量, 建模计算应力强度因子 K_I 、 K_{II} 与不同半裂纹长度的变化曲线, 结果见图 8。

从图 8 中可以看出: 不同壁厚条件下, 应力强度因子 K_I 和 K_{II} 值的曲线走势基本相同; 随着半裂纹长度 a 值的增加, 应力强度因子 K_I 、 K_{II} 不断增大, 与半裂纹长度近似呈线性增长关系。

5.4. 管道直径 D 的影响

半裂纹长度分别取 $a = 10$ mm 和 $a = 20$ mm, 管道直径 D 作为变量, 分别取 200 mm、250 mm、300 mm、350 mm、400 mm、450 mm、500 mm、550 mm, 其他参数为定量, 建模计算应力强度因子 K_I 、 K_{II} 随不同管道直径的变化曲线, 结果见图 9。

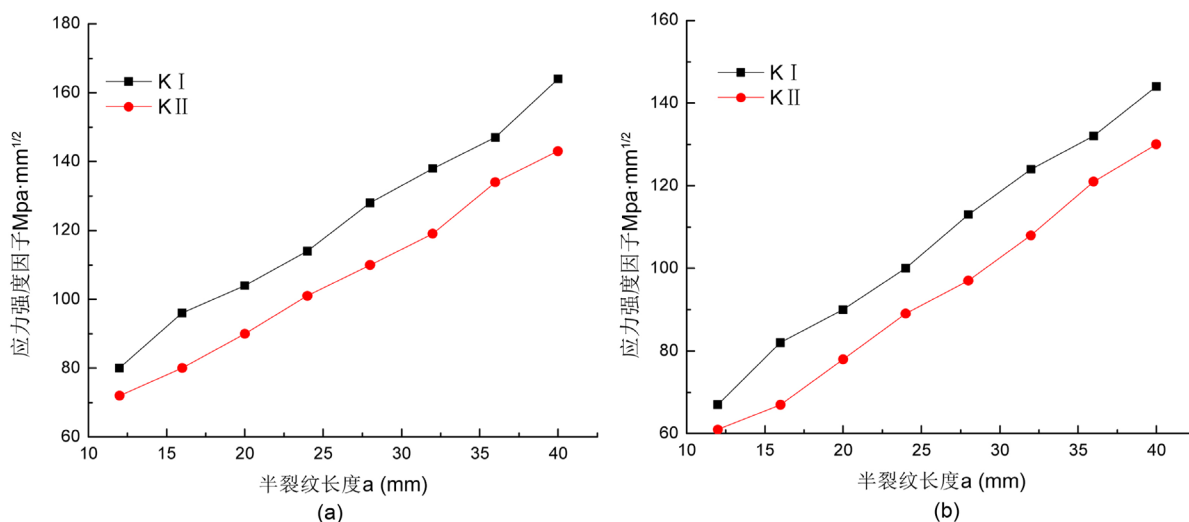


Figure 8. The relationship between K and semi-crack length a . (a) $t = 10$ mm; (b) $t = 15$ mm

图 8. K 和半裂纹长度 a 的关系曲线。(a) $t = 10$ mm; (b) $t = 15$ mm

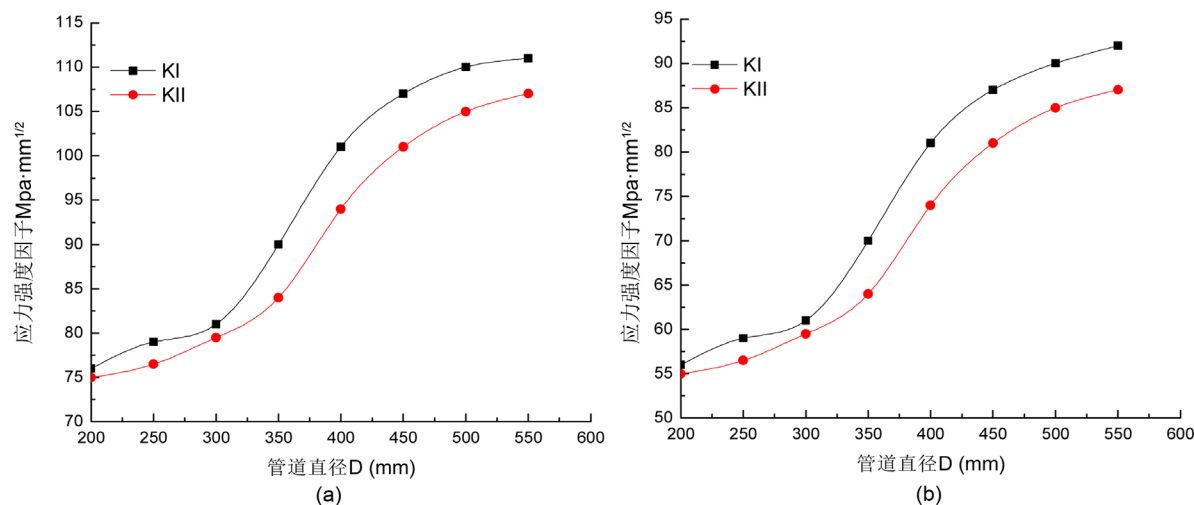


Figure 9. The relationship between K and semi-crack length D . (a) $a = 10$ mm; (b) $a = 20$ mm

图 9. K 和半裂纹长度 D 的关系曲线。(a) $a = 10$ mm; (b) $a = 20$ mm

从图 9 中可以看出: 两种应力强度因子 K_I 、 K_{II} 的走势基本接近, 总体上随着管道直径的增加而增大; 管道半径在 300~500 mm 时, K_I 和 K_{II} 增速较快。

5.5. 裂纹夹角 θ 的影响

半裂纹长度分别取 $a = 10$ mm 和 $a = 20$ mm, 裂纹线与管道轴线夹角 θ 作为变量, 分别取 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° , 其他参数为定量, 建模计算应力强度因子 K_I 、 K_{II} 随裂纹线与轴向夹角 θ 的关系曲线, 结果见图 10。

从图 10 中可以看出: 应力强度因子 K_I 随着裂纹夹角 θ 的增加而减小; 在 $0^\circ \sim 45^\circ$, K_{II} 随着 θ 的增加而增大, 在 $45^\circ \sim 90^\circ$, 则随着 θ 的增大而减小, 在 $\theta = 45^\circ$ 附近 K_{II} 出现最大值; 在 $0^\circ \sim 45^\circ$, 应力强度因子 K_I 总体上大于 K_{II} , 且角度越小二者的差值越大; $\theta = 0^\circ$ 时(即为轴向裂纹), 应力强度因子 K_I 恒大于 K_{II} , 且角度越大两者之差越小。

5.6. 管道直径与壁厚比值的影响

管道壁厚分别取 $t = 10 \text{ mm}$ 和 $t = 15 \text{ mm}$, 管道直径与管道壁厚的比值依次取 $D/t = 12, 16, 20, 22, 24$, 其他参数为定量, 建模计算应力强度因子 K_I 和 K_{II} 与管道直径与壁厚比值的关系曲线, 结果见图 11。

从图 11 中可以看出: 不同壁厚条件下, 应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的曲线走势基本相同, 并随着比值 D/t 的增加而增大; 两种应力强度因子与管径与壁厚比值呈线性增长关系。

6. 结论

- 1) 在线弹性条件下建立了含有斜裂纹压力管道的有限元模型, 在内压载荷条件下求出应力强度因子 K , 分析了不同因对其影响规律。
- 2) 在管道直径相同的前提下, 管径与壁厚的比值越大(即壁厚越小), 应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的值越

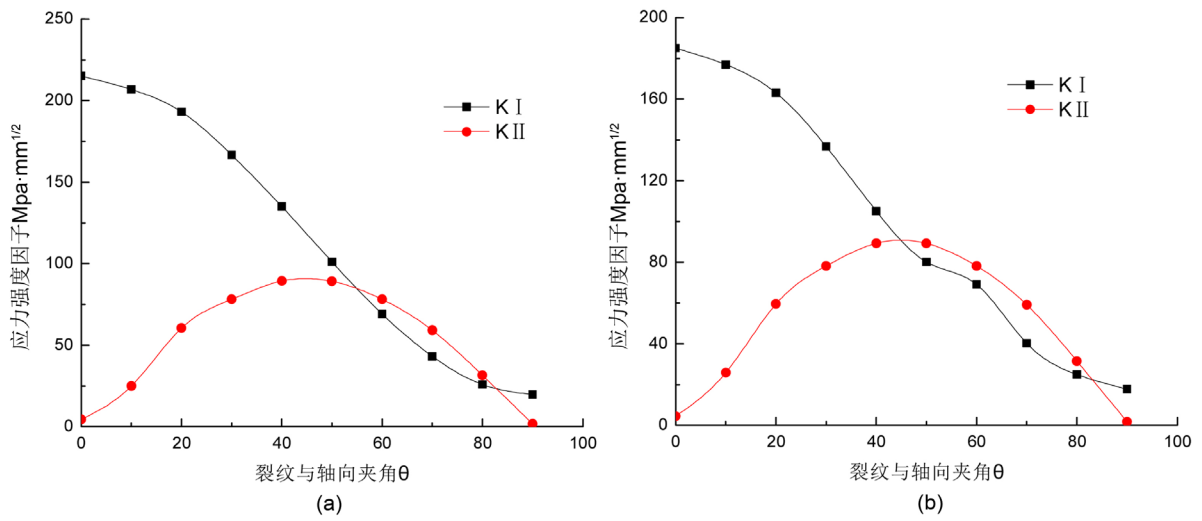


Figure 10. The relation curve of K and crack angle θ . (a) $a = 10 \text{ mm}$; (b) $a = 20 \text{ mm}$
 图 10. K 和裂纹夹角 θ 的关系曲线。(a) $a = 10 \text{ mm}$; (b) $a = 20 \text{ mm}$

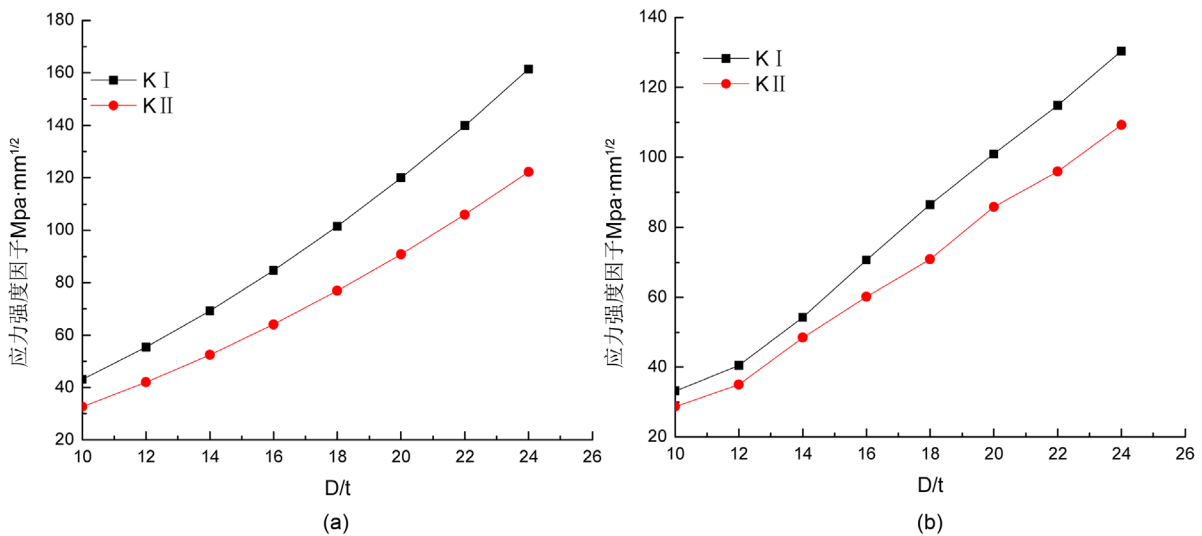


Figure 11. The relationship between K and pipe diameter and wall thickness ratio D/t . (a) $t = 10 \text{ mm}$; (b) $t = 15 \text{ mm}$
 图 11. K 和管径与壁厚比值 D/t 的关系曲线。(a) $t = 10 \text{ mm}$; (b) $t = 15 \text{ mm}$

大, 管道的安全性越低, 即含裂纹的薄壁管道更容易引发断裂事故。

3) 本文的分析结果填补了应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的计算空缺, 增补了部分形状因子 F_I 和 F_{II} 的数据库, 对后续含斜裂纹压力管道的深入研究奠定了一定基础, 计算得到的规律和拟合的相关公式在工程实际中有着很强的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 曹宇光, 孔谦, 田凯, 等. 基于有限元模拟的压力管道轴向裂纹应力强度因子计算[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(8): 1-7.
- [2] Chan, S.K., Tuba, I.S. and Wilson, W.K. (1970) On the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*, **2**, 1-17.
- [3] 赵建生. 断裂力学及断裂物理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [4] 仇仲翼. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [5] 范天佑. 断裂理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 沈成康. 断裂力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [7] 马德林. 受内压厚壁圆筒中裂纹尖端应力强度因子[J]. 兵器材料科学与工程, 1985, 8(10): 5-12.
- [8] 易当祥, 刘春和, 张仕念, 等. 圆管内表面周向三维裂纹应力强度因子的新解法[J]. 飞机设计, 2007, 27(1): 11-15, 26.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org