

含裂纹管道结构的三维应力强度因子数值仿真

钟启濠¹, 曾伟¹, 陈振良¹, 张熙¹, 谢颖河²

¹广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞

²中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2022年11月17日; 录用日期: 2022年11月25日; 发布日期: 2022年12月15日

摘要

含裂纹管道结构的应力强度因子对结构的安全评估至关重要, 对于非穿透型裂纹来说, 很难得到其理论解, 必须采用数值仿真得到近似解。本文基于ANSYS软件给出了管道结构三维应力强度因子的数值建模方法, 并利用含穿透型裂纹直管结构验证了本文方法的精度和可行性。进一步针对含非穿透型裂纹的弯管结构的三维应力强度因子进行了参数影响研究, 分析了轴向及环向裂纹深度和长度对裂尖应力强度因子的影响规律。本文所建立的三维应力强度因子数值仿真方法可推广用于其它工程结构应力强度因子的计算评估。

关键词

应力强度因子, 管道结构, ANSYS, 有限元建模

Numerical Simulation of Three-Dimensional Stress Intensity Factor of Cracked Pipe Structure

Qihao Zhong¹, Wei Zeng¹, Zhenliang Chen¹, Xi Zhang¹, Yinghe Xie²

¹Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan Guangdong

²China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Nov. 17th, 2022; accepted: Nov. 25th, 2022; published: Dec. 15th, 2022

Abstract

The stress intensity factor is very important to the safety evaluation of cracked pipe structures, and it is very hard to obtain the theoretical solution for part-through cracks, so numerical simulation is always employed to obtain the approximate solution. The present paper shows the numerical modeling approach for the three-dimensional stress intensity factor of pipe structure with ANSYS software, and the cracked straight pipe is employed to verify the accuracy and feasibility of the proposed approach. The influence of parameters on the three-dimensional stress intensity factor of elbow pipe structure with a part-through crack was investigated. The influence of depth and length of axial and radial part-through cracks on stress intensity factor was analyzed. The numerical simulation approach of the three-dimensional stress intensity factor proposed in this paper could be used for calculating and evaluating the stress intensity factor of other engineering structures.

Keywords

Stress Intensity Factor, Pipe Structure, ANSYS, Finite Element Modeling

Copyright © 2022 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

管道结构广泛应用于石油天然气、化工、航空航天等各个工业领域，其安全性受到了学术界和工业界的普遍关注[1]。在实际的应用过程中，管道结构中不可避免地会出现各种各样的缺陷，比如腐蚀性凹坑或者各种裂纹。针对含裂纹的管道结构，可以基于断裂力学进行计算分析[2]。在断裂力学中，用应力强度因子 K 来反映裂纹尖端处的应力场的奇异性效果，其既反映了平均应力的效果，同时还包括了裂纹特征尺寸的影响，是表征裂纹尺寸是否扩展的一个参量。应力强度因子一般是工作应力、裂纹尺寸和裂纹几何的函数。

临界状态时的应力强度因子一般用 K_c 表示，临界状态是指裂纹从缓慢扩展到失稳扩展的转折点(失稳扩展为载荷突然下降的裂纹的快速扩展)。 K_c 也称为断裂韧性，它是材料常数。在实际工程中，I 型裂纹最常见，也最危险，一般把其它类型的裂纹转化为 I 型裂纹来处理，统一采用 I 型裂纹结构的断裂判据：

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

对于含裂纹的管道结构，可以计算出裂纹尖端的应力强度因子 K_I ，并根据式(1)的裂纹扩展判据，为结构设计、选材和检验提供依据，可以对管道进行断裂安全评估。材料的断裂韧性 K_{Ic} 可查阅相关手册或进行测量得到。

对于复杂的工程结构，精确的应力强度因子往往很难获得，因此，需要采用有限元方法来求得数值解。王永伟等研究了有限元方法在求解裂纹尖端应力强度因子时的网格划分问题，并基于 ANSYS 软件建立了含表面裂纹的平板模型[3]。伊军利用有限元分析软件 ANSYS 建立了内压作用下弯管环向穿透裂纹模型[4]。喻健良等人基于 ANSYS 建立了含外表面轴向裂纹的直管模型，并对内压下裂纹尖端的应力强度因子进行了参数影响研究[5]。鞠峰等人针对含轴向穿透裂纹的三通管道应力强度因子，进行了有限元分析[6]。王冉等人基于 ANSYS 对内压作用下含纵向半穿透裂纹斜接弯管的应力强度因子，进行了三

维数值仿真[7]。于桂杰等人基于 ABAQUS 软件建立了直管外表面斜裂纹的有限元模型[8]。俞树荣等人采用 SOLID186 单元建立了基于 ANSYS 的表面裂纹的三维模型及应力强度因子计算方法[9]。贾旭等人提出了复杂载荷下偏心穿透裂纹应力强度因子的计算方法,给出了通用的权函数系数[10]。Subbaiah 利用二维轴对称有限元模型,针对圆柱形压力容器表面倾斜裂纹的应力强度因子进行了数值仿真[11]。

ANSYS 中有两种方法来计算应力强度因子:交互积分法(Interaction Integral Method)和位移外推法(Displacement Extrapolation Method)。交互积分法在求解时进行应力强度因子的计算,并将其存储到结果文件中用于后处理。由于围道积分在远离裂纹间断的点上计算,因此,交互积分法适用于混合型应力强度因子的高精度计算,同时也可用于非线性材料。位移外推法在后处理过程中进行应力强度因子的计算,只适用于裂尖区域是各向同性线弹性应力状态的问题。本文采用交互积分法进行应力强度因子的计算。

2. ANSYS 计算三维应力强度因子的步骤

在采用 ANSYS 软件进行结构三维应力强度因子计算时,其建模、分网、施加载荷和边界条件与常规的有限元分析一样,值得注意的是,划分网格时需要利用 KSCON 命令对裂纹尖端的网格进行控制,使得网格呈放射状外扩。其使用方法为:KSCON,NPT,DEL,R,KCTIP,NTHET,RRAT。这里,NPT 是网格密集处的关键点编号,也可以是一个关键点组的名称。DEL,R 是以关键点为圆心的第一行单元的半径。KCTIP 是裂纹尖端奇异性参数,0 表示单元中节点位置不变,1 表示第一行单元的中节点移动到 1/4 边长处,用于模拟裂尖的奇异性。NTHET 是环向单元的份数(默认大概 45 度一个单元,如果 KCTIP = 1,那么 30 度一个单元)。RRAT 是第二行单元尺寸与第一行单元的比值(默认是 0.75,如果 KCTIP = 1,那么取为 0.5)。

在进入求解模块/SOLU 后,与应力强度因子相关的操作如下所示。

1) 创建一个新的应力强度因子计算任务并设定求解类型。

```
CINT,NEW,CRACK_NUM
```

```
CINT,TYPE,SIFS
```

这里,CRACK_NUM 是裂纹编号,SIFS 表示求解的是应力强度因子。

2) 定义裂纹尖端信息。

```
CINT,CTNC,CRACKTIP,Par2
```

应力强度因子的计算需要定义裂尖节点组 CRACKTIP 和裂纹扩展方向。裂纹扩展方向通过定义裂纹面的法向来实现。裂尖节点组需要包括裂纹尖端的所有节点,且这些节点是连接在一起的,ANSYS 基于这些节点形成的裂纹尖端进行围道积分的单元。这里,Par2 是位于裂纹张开侧的任意一个节点。

3) 设定围道个数。

```
CINT,NCON,COUNTER_NUM
```

这里,COUNTER_NUM 是围道个数。

4) 设定对称性。

```
CINT,SYMM,ON
```

一般来说,对于混合型裂纹不存在对称性。如果设置了对称性,那么 K_{II} 和 K_{III} 均强制为 0,计算得到的应力强度因子乘以 2 即为 K_I 。

5) 设定裂纹面的法向。

```
CINT,NORM,Par1,Par2
```

这里,Par1 是定义的局部坐标系编号,Par2 是该局部坐标系的坐标轴,默认值为 2,对应于局部坐

标系的 y 轴。

在后处理模块/POST1, 通过对应力计算结果进行后处理即可得到裂纹的应力强度因子。主要的控制命令有:

```
*GET,KI_Cal,CINT,CRACK_NUM,CTIP,NODE_NUM,,COUNTER_NUM,,K1
```

这里, KI_Cal 是存储在参数 KI 的变量名, CINT 表明计算的是应力强度因子, CTIP 是固定标识符。NODE_NUM 是需要计算应力强度因子的节点编号。K1 表明需要计算的是 KI。注意, 对于弯管内裂纹, 需要选择裂纹尖端不同位置的节点进行应力强度因子的计算, 反复使用本命令可以把不同节点处的应力强度因子赋给不同的变量名 KI_Cal。

3. 数值算例

基于上述数值仿真方法, 本部分首先针对含环向和轴向穿透裂纹的直管道结构, 将应力强度因子的理论解与基于本文方法的数值仿真结果进行对比, 验证本文方法的精度与可靠性。进而针对含非穿透型裂纹的典型弯管结构, 计算不同几何尺寸轴向及环向裂纹的裂纹应力强度因子。

3.1. 含穿透裂纹直管道的应力强度因子

对于直管道来说, 可以近似认为壁厚上的应力沿厚度方向是均匀分布的, 与平板的受力状态相同。因此, 对于直管道上的裂纹, 其应力强度因子近似按平板相应裂纹的应力强度因子公式计算, 在此基础上, 考虑到曲率与膨胀效应的修正, 可得到与实际情况基本相符的结果。按照裂纹长度方向不同, 管道中的裂纹分为轴向裂纹和环向裂纹。轴向裂纹的裂纹长度方向与管道轴向同向, 环向裂纹的长度方向沿着管道的周向。

对于直管道上的穿透型裂纹, 其应力强度因子为[12]:

$$K_I = M \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

这里, M 为鼓胀因子, a 为裂纹半长。均匀拉伸应力 σ 在轴向裂纹时取环向应力 σ_1 , 在环向裂纹时取轴向应力 σ_2 , 且有:

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2t}, \quad \sigma_2 = \frac{pD}{4t} \quad (3)$$

其中, p 为管道内压, D 为管道外径, t 为管道壁厚。值得注意的是, 式(3)仅适用于薄壁管道。

轴向和环向穿透裂纹对应的鼓胀因子 M_1 和 M_2 分别为:

$$M_1 = \sqrt{1 + 3.21 \frac{a^2}{Dt}}, \quad M_2 = \sqrt{1 + 0.64 \frac{a^2}{Dt}} \quad (4)$$

直管道外径 $D = 200$ mm, 厚度 $t = 10$ mm, 裂纹长度 $2a = 20$ mm, 内压 $p = 2$ MPa。管道材料的弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。采用带中间节点的二次六面体实体单元 SOLID186。基于式(2)得到该管道轴向和环向穿透裂纹的应力强度因子分别为 $3.82 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 和 $1.80 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。在采用前节所述数值仿真方法分别对含轴向和环向穿透型裂纹结构进行仿真, 得到的裂纹尖端的等效应力场分别如图 1 和图 2 所示, 进一步计算得到的应力强度因子分别为 $3.56 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 和 $1.83 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

可以看出, 基于本文数值仿真方法得到的结合和经验解吻合得很好, 出现的误差在于经验解基于管道厚度上应力是均匀分布的假设, 而实际上对于有一定厚度的管道来说, 其厚度方向上的应力分布并不完全是均匀的, 由此也导致了沿着裂纹尖端不同位置得到的应力强度因子是不同的。

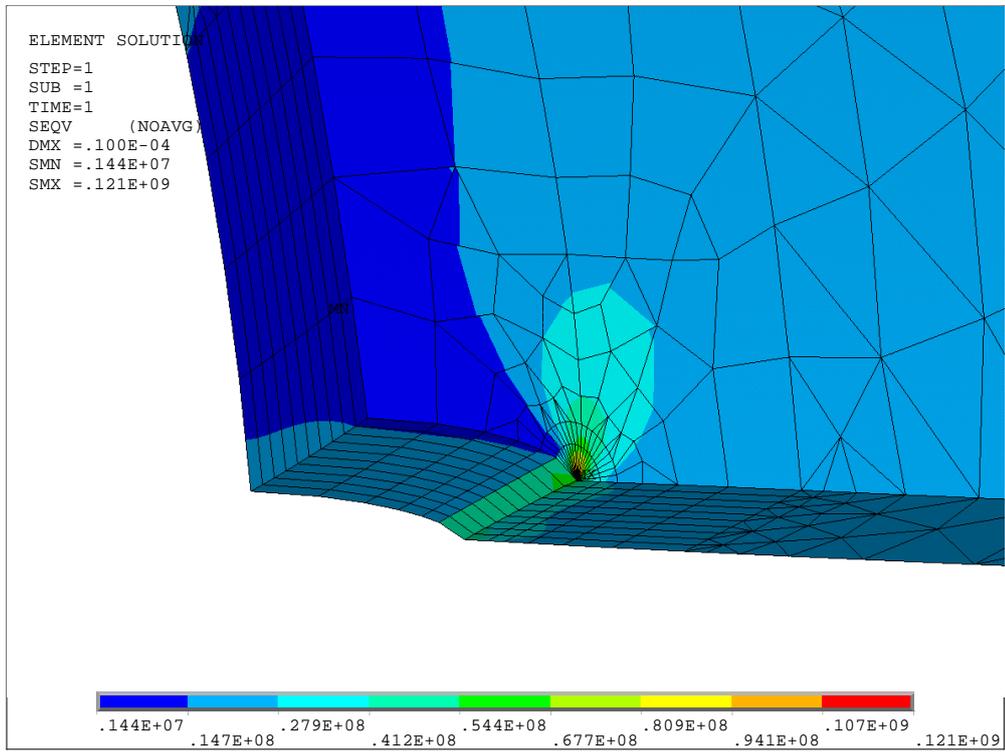


Figure 1. Equivalent stress field of the crack tip of the axial penetrated crack
图 1. 轴向穿透裂纹尖端的等效应力场云图

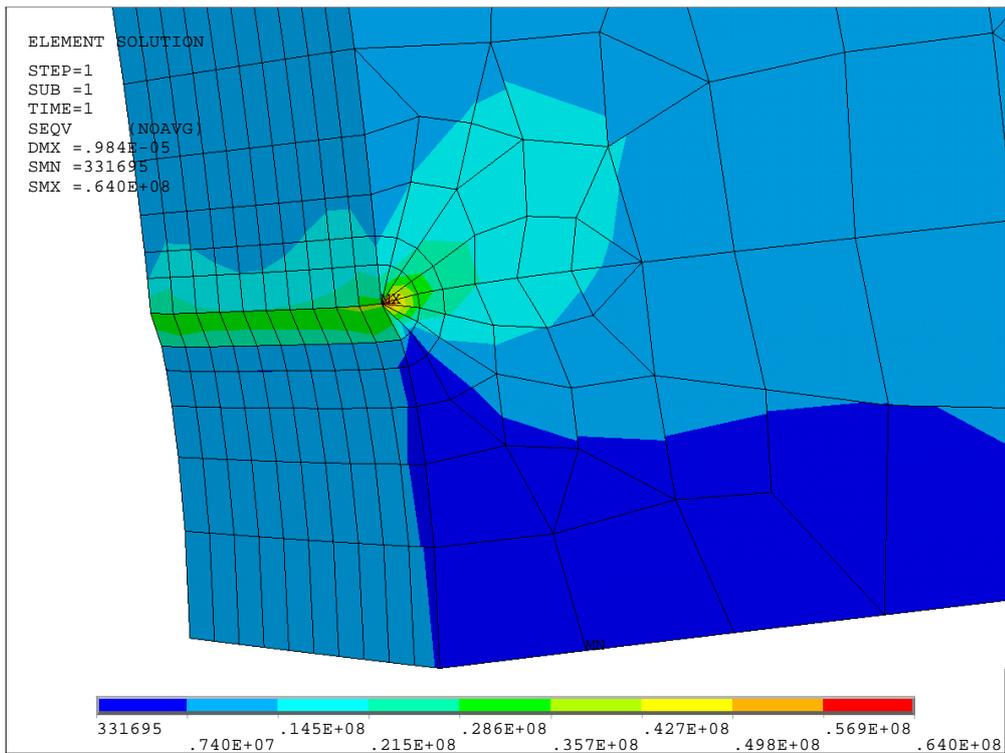


Figure 2. Equivalent stress field of the crack tip of the radial penetrated crack
图 2. 环向穿透裂纹尖端的等效应力场云图

3.2. 含非穿透裂纹弯管结构的应力强度因子

本节研究的弯管管道外径为 406 mm，壁厚 10 mm，弯曲部分的曲率半径为 2 m，对应的圆心角为 20 度，其几何模型如图 3 所示。管道内压 8.5 MPa，其下部端面固定，上部端面施加 30 MPa 的轴向拉力来模拟管道其它部分对模型的作用。

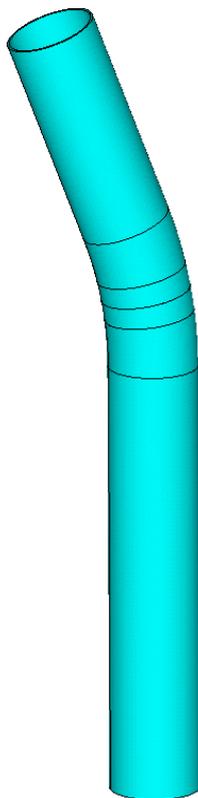


Figure 3. Geometry of the pipe
图 3. 弯管几何模型

3.2.1. 轴向裂纹

对于轴向的非穿透裂纹，这里假设裂纹位于管道内壁的内侧。裂纹为椭圆形，如图 4 所示，这里 B 为管道壁厚。沿管道轴向的裂纹长度为 $2a = 20$ mm，其深度 $b = 5$ mm。

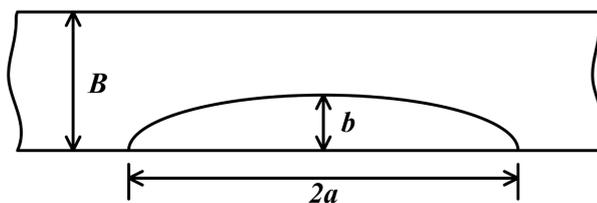


Figure 4. Geometry of the part-through crack
图 4. 非穿透型裂纹几何

基于上述几何模型、载荷条件和材料属性得到的管道结构裂纹尖端的等效应力场如图 5 所示。经过后处理得到裂纹顶端的应力强度因子为 $17.62 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

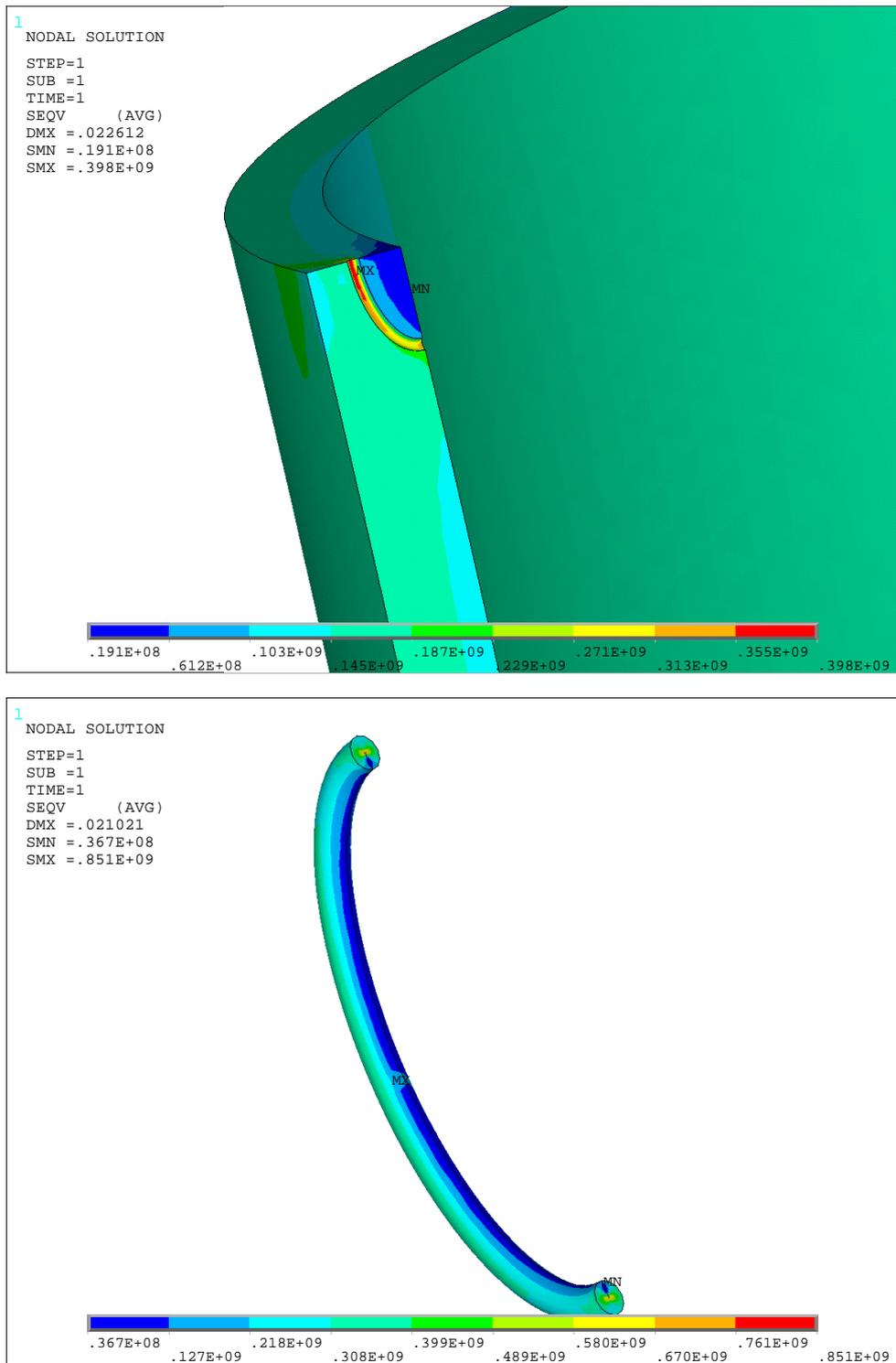


Figure 5. Equivalent stress field of the crack tip of the axial part-through crack
图 5. 非穿透轴向裂纹尖端的等效应力场云图

保持轴向裂纹深度 5 mm 不变, 不同轴向裂纹长度时裂纹尖端应力强度因子的变化趋势如图 6 所示。
 保持裂纹长度 20 mm 不变, 不同轴向裂纹深度时裂纹尖端应力强度因子的变化趋势如图 7 所示。

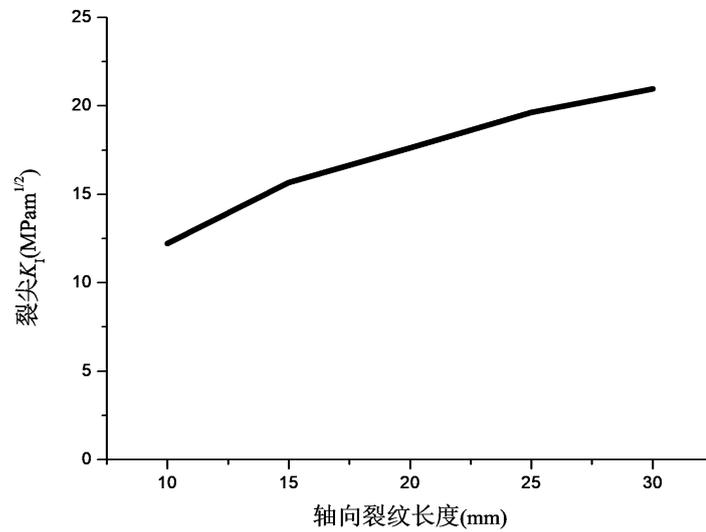


Figure 6. Variations of stress intensity factor with the length of the axial part-through crack tip

图 6. 非穿透轴向裂纹尖端应力强度因子随裂纹长度的变化趋势

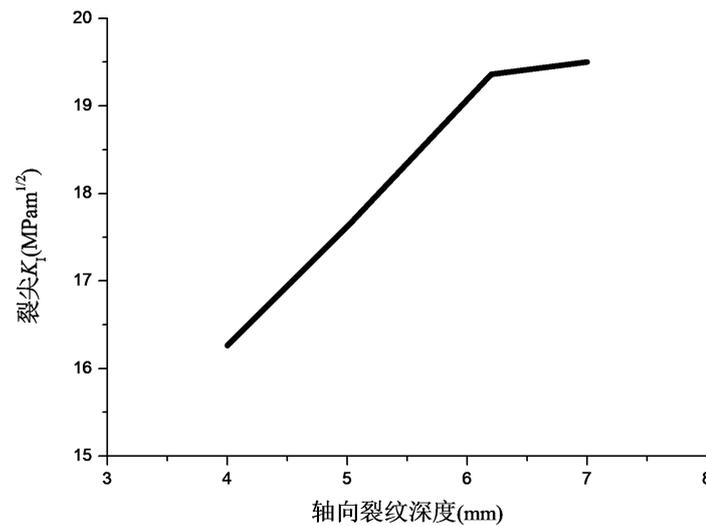


Figure 7. Variations of stress intensity factor with the depth of the axial part-through crack tip

图 7. 非穿透轴向裂纹尖端应力强度因子随裂纹深度的变化趋势

从图 6 和图 7 可以看出, 随着轴向裂纹长度的增加, 裂尖应力强度因子基本上呈线性增加趋势, 而随着裂纹深度的增加, 在裂纹深度不大的情况下, 裂尖应力强度因子随其深度的增加, 基本上呈线性增加趋势, 但当裂纹深度比较大时, 裂尖应力强度因子增加趋势变缓。

3.2.2. 环向裂纹

对于环向的非穿透裂纹, 这里也假设裂纹位于管道内壁的内侧。裂纹几何形状与轴向裂纹相同均为椭圆形。沿管道环向的裂纹长度为 $2a = 20$ mm, 其深度 $b = 6$ mm。基于上述几何模型、载荷条件和材料属性得到的管道结构裂纹尖端的等效力场如图 8 所示。经过后处理得到裂纹顶端的应力强度因子为 $6.37 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ 。

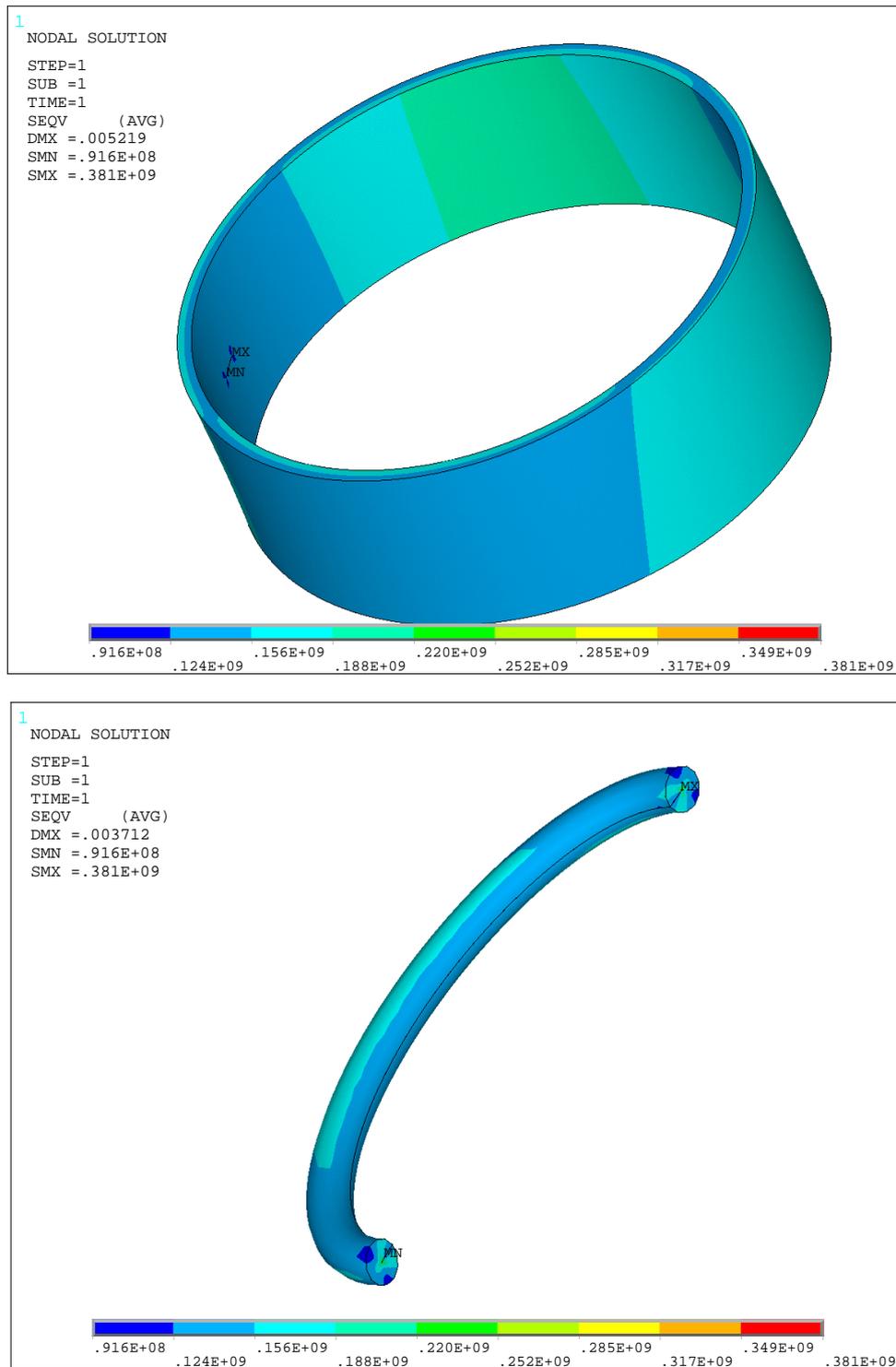


Figure 8. Equivalent stress field of the crack tip of the radial part-through crack
图 8. 非穿透环向裂纹尖端的等效应力场云图

保持环向裂纹深度 6 mm 不变, 不同环向裂纹长度时裂纹尖端应力强度因子的变化趋势如图 9 所示。
 保持裂纹长度 20 mm 不变, 不同环向裂纹深度时裂纹尖端应力强度因子的变化趋势如图 10 所示。

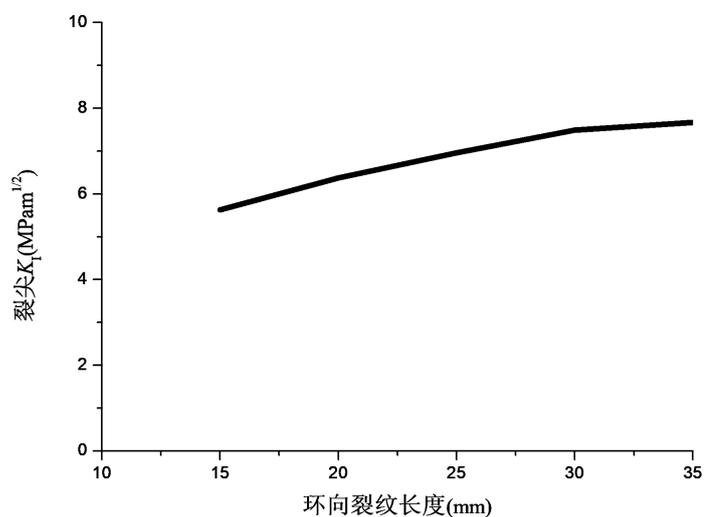


Figure 9. Variations of stress intensity factor with the length of the radial part-through crack tip

图 9. 非穿透环向裂纹尖端应力强度因子随裂纹长度的变化趋势

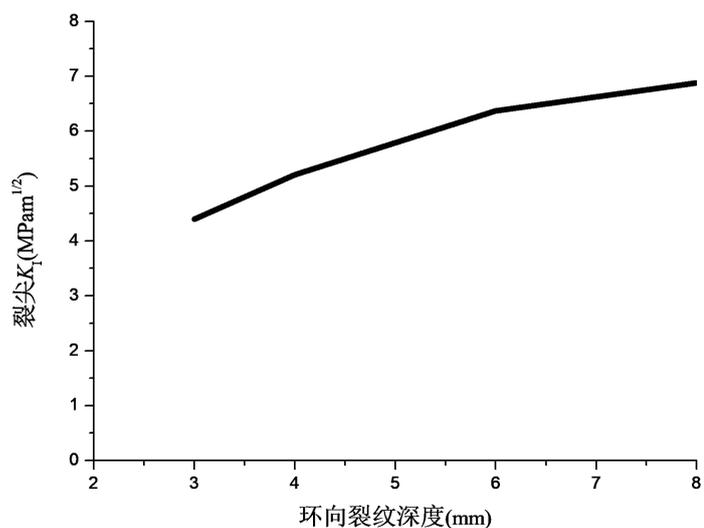


Figure 10. Variations of stress intensity factor with the depth of the radial part-through crack tip

图 10. 非穿透环向裂纹尖端应力强度因子随裂纹深度的变化趋势

从图 9 和图 10 可以看出, 随着环轴向裂纹长度和深度的增加, 裂尖应力强度因子基本上呈线性增加趋势。当裂纹深度或长度比较大时, 裂尖应力强度因子的增加有变缓的趋势。

4. 结论

本文给出了利用 ANSYS 进行三维应力强度因子数值仿真的关键步骤及实施过程, 同时针对含穿透型裂纹的直管道的裂尖应力强度因子进行了计算, 并与文献中的工程近似解进行了对比, 二者结果吻合得很好, 从而验证了本文数值仿真方法的精度和可靠性。本文进一步针对含非穿透型裂纹弯管结构的应力强度因子进行了数值仿真, 并分别针对轴向和环向裂纹的长度及深度对其应力强度因子的影响进行了参数分析。数值结果表明, 随着非穿透型裂纹长度和深度的增加, 裂纹尖端应力强度因子会逐渐增加,

但是当裂纹深度或长度比较大时，此增加的趋势会变缓。本文所建立的三维裂纹应力强度因子数值仿真方法可进一步应用于其它类型工程结构的安全性评估。

参考文献

- [1] 白永强, 汪彤, 吕良海, 帅健, 孙亮, 陈钢. 油气管道内部轴向表面半椭圆裂纹弹塑性断裂分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2009, 22(3): 71-74.
- [2] 于培师, 赵军华, 郭万林. 三维损伤容限设计: 离面约束理论与疲劳断裂准则[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 87-105.
- [3] 王永伟, 林哲. 表面裂纹的三维模拟及应力强度因子计算[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(3): 23-26.
- [4] 伊军, 闻拓, 闫兴清, 喻健良. 内压作用下弯管环向穿透裂纹应力强度因子分析[J]. 机械设计与制造, 2013(8): 95-97.
- [5] 喻健良, 闻拓, 闫兴清, 伊军. 直管外表面轴向半椭圆裂纹应力强度因子 K_I 的有限元分析[J]. 化工装备技术, 2012, 33(1): 10-13.
- [6] 鞠峰, 王和慧, 鞠鹏翔, 曹凯. 含轴向穿透裂纹的三通管道应力强度因子有限元分析[J]. 化工科技, 2014, 22(5): 36-41.
- [7] 王冉, 李惠荣, 闻拓. 内压作用下斜接弯管纵向半穿透裂纹应力强度因子研究[J]. 化工装备技术, 2012, 33(4): 14-17.
- [8] 于桂杰, 董校峰, 李建文. 直管道外表面斜裂纹应力强度因子有限元分析[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(2): 26-31.
- [9] 俞树荣, 吴艳萍, 荆扬. 表面裂纹的三维模型及应力强度因子计算[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1): 160-164.
- [10] 贾旭, 胡绪腾, 宋迎东. 复杂载荷下偏心穿透裂纹应力强度因子的计算方法[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1464-1474.
- [11] Subbaiah, A. and Bollineni, R. (2020) Stress Intensity Factor of Inclined Internal Edge Crack in Cylindrical Pressure Vessel. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **20**, 1524-1533.
- [12] 帅健. 管线力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.