

裂缝边缘凸起变形对带裂缝柱形薄壁结构 应力强度因子的影响初探

高瑞霞^{1,2} 剧锦三² 蒋秀根² 庄金钊²

(1. 深圳能源投资股份有限公司,深圳 518031; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 为避免采用阶段策略时模型简化可能导致的柱形薄壁结构中裂缝边缘有凸起变形时应力强度因子的计算误差,分析了采用该方法,柱形薄壁结构裂缝边缘有无凸起变形时二维与三维模型所得应力强度因子的特点和局部模型尺寸对应力强度因子的影响。结果表明:1)裂缝边缘有无凸起变形时应力强度因子有很大差别,裂缝半长为133.4 mm时,三维模型裂缝边缘的径向凸起变形为41 mm,应力强度因子为4 499 MPa·mm^{1/2},是无凸起变形时应力强度因子(1 949 MPa·mm^{1/2})的2.3倍。2)裂缝较短(13.34 mm)时,二维与三维模型得到的应力强度因子十分接近;裂缝越长,差别越大,因而不能忽略。3)局部模型尺寸不同时,三维局部模型与三维整体模型得到的应力强度因子几乎相同,都与理论值十分接近;但对二维模型应力强度因子的影响较大,虽然1/8弧长二维局部模型的计算结果比1/4弧长的更加接近三维模型的结果,但仍不准确。所提出的分析方法可应用于类似的复杂结构。

关键词 应力强度因子(SIF);柱形薄壁结构;裂缝;凸起变形

中图分类号 TU 311.41

文章编号 1007-4333(2004)06-0068-04

文献标识码 A

Primary exploration on effect of bulging deformation of crack edge on stress intensity factor of barrel shell structure

Gao Ruixia^{1,2}, Ju Jinsan², Jiang Xugen², Zhuang Jinzhao²

(1. Shenzhen Energy Investment Co., LTD, Shenzhen 518031, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To avoid the calculation error of the stress intensity factor of a crack in a cylindrical shell structure caused by the model simplification used in a multistage strategy, the effects of 3-dimensional bulging deformations of crack edges on the stress intensity factor of a cylindrical shell structure were investigated and analyzed. The difference of the stress intensity factors from 2- and 3-dimensional shell models with bulging deformation and without bulging deformation of crack edge in shell structure was obtained. We found that the bulging deformation of the crack edge was rather large and the effect caused by the bulging deformation on stress intensity factors was significant that couldn't be ignored when the crack length was long. When half crack length is 133.4 mm, the radial bulging deformation of crack edges is 41 mm, stress intensity factor (SIF) is 4 499 MPa·mm^{1/2}, which is 2.3 times of that without bulging. When the half crack length is 13.34 mm, the SIFs from the models with and without bulging deformation are similar. The longer the crack is, the bigger the difference. The size of local models has a great influence on the SIF value.

Key words stress intensity factor (SIF); cylindrical shell structure; crack; Bulging deformation

对于压力容器、石油天然气管道和飞机等薄壳结构,由于结构断裂引发的问题会导致严重后果^[1]。在断裂力学研究中,应力强度因子是非常重要的参数^[2],它能够为工程中防止发生疲劳和断裂

破坏提供重要依据。为了获得准确的应力强度因子,对裂缝局部区域应进行精确的计算,目前通常采用2种策略。

1)整体策略。把整体结构包括结构细部同时放

收稿日期:2004-03-01

作者简介:高瑞霞,硕士研究生;剧锦三,副教授,博士,通讯作者,主要从事结构稳定和断裂研究,E-mail:jujinsan@tsinghua.org.cn

在一个模型中模拟,仅在裂缝尖端部位进行细化。这种方法的优点是只需 1 次计算即可得到应力强度因子,但同时也存在缺点,即为了得到一个合理的结果,需要花费很多时间建立模型,并需使用大型计算机进行计算。

2) 阶段策略^[3]。与整体策略相比,模型有了很大程度的简化,最典型的是三阶段方法,即整体-中间-局部模型分析方法,包括模型简化、后一阶段模型在前一阶段模型中的抽取和边界条件的传递。这种方法通过 3 次计算得到应力强度因子,这 3 次计算之间有计算结果和几何数据的传递,其优点是每次计算都是小规模,可以节省计算时间。这种方法在从中间模型中抽取局部模型时,将三维模型简化为二维模型来求解应力强度因子,此时忽略了裂缝边缘的凸起变形。裂纹较短时凸起变形较小,但裂缝较长时凸起变形较大。忽略该变形对应力强度因子计算精度的影响,已有解析解^[2],即给平面问题应力强度因子的解析解加一个系数;但是该解析解不能给出裂缝边缘变形的大小,仅适用于结构形式简单的压力容器,对于有内部加劲构造的复杂柱形结构则无能为力。目前国内外尚未见针对此问题的研究报道,很多人仍在使用上述简化方法进行计算。本文中的计算考虑了裂缝边缘三维凸起变形的大小,而且可以精确计算柱形结构考虑裂缝边缘凸起变形后的应力强度因子,从而避免了上述模型简化可能带来的计算误差。此方法也可应用于类似的复杂结构中。

1 阶段策略的模型简化

模型简化的目的是要在保证计算精度的前提下减少模型的自由度,以提高计算效率。阶段策略中每一阶段都有一个模型,由于描述的是同一结构的不同部位,故 3 个模型有一些共同的几何参数;但由

于模型的简化手段不同,相互又有所不同。下面以飞机结构为例简单介绍模型的简化过程。

整体模型中采用三维壳单元模拟飞机舱体,三维梁单元模拟飞机环形框架和纵梁,其他很多细部内容如铆钉和加劲肋被省略,将环形框架和纵梁与舱体的连接看作固接;中间模型则采用壳单元模拟飞机舱体、环形框架、纵梁和加劲肋,铆钉用弹簧单元模拟;局部模型通常采用二维平面单元进行模拟。

2 模型简化带来的问题

从模型简化过程可知,整体和中间模型均为三维模型,而局部模型是二维的。虽然从理论上讲,只要局部区域足够小,网格足够密,得到的结果应该足够精确,但是由于阶段策略的优点就是用较粗的网格得到精确的结果,所以局部模型的尺寸不可能非常小。另外,既然局部区域的尺寸不可能很小,在中间模型中如何选取对应于局部模型的局部区域尺寸,是另一个从三维模型简化到二维模型时存在的问题。三维变形的影响是否小到可以被忽略,局部区域的尺寸对应力强度因子的影响到底有多大?至今尚未见有关研究报道。笔者将在算例中回答这 2 个问题。

3 算例

为了突出三维变形对应力强度因子的影响,本文中考虑一个柱形壳体。图 1 示出不同荷载作用下的 3 个柱壳模型,中心裂缝沿其长度方向分布。柱壳半径 2 820 mm,弧边 740 mm,直边 1 066.8 mm,壳体厚 1.8 mm。

图 1(a)为 $0.0593 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 内压作用下的柱壳模型,4 条边所有节点的自由度全部约束。图 1(b)所示模型右边上有均布荷载,可以产生与图 1(a)模型相同的环向拉力,左边上所有节点的 6 个自由度

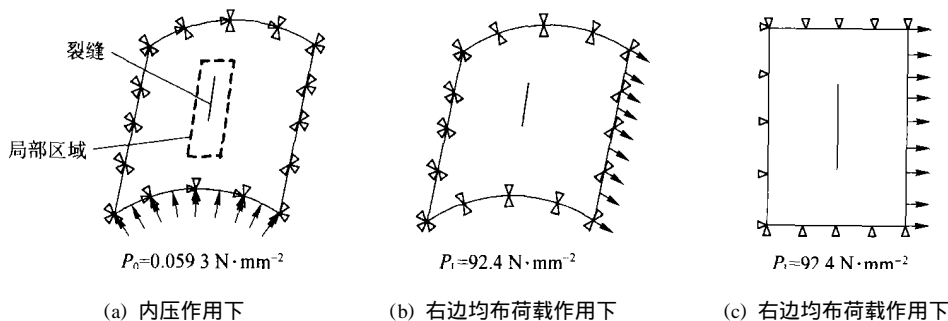


图 1 不同荷载作用下的柱壳模型

Fig. 1 Cylindrical shell structures under various loads

均被约束,除弧度方向自由度,2弧边上节点的自由度被约束,柱壳内部节点和右边上节点的径向自由度也被约束。图3(c)为柱壳的二维模型,右边有 $92.4\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的均布荷载,左边上节点的3个自由度均被约束,2个短边上节点的竖向自由度也被约束。3个模型的弹性模量均为 $70.310\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。

4 计算结果分析

4.1 裂缝长度与应力强度因子的关系

使用有限元软件 ABAQUS 求解裂缝边缘的凸起变形对应力强度因子的影响,结果见图2;裂缝边缘的变形见图3。

图2中曲线1为近似理论公式

$$K_I = \frac{Pd}{2} \sqrt{a} \left[1 + 3.22 \frac{a^2}{d} \right]^{1/2} \quad (1)$$

的计算结果。式中: K_I 为应力强度因子; d 为柱壳

直径; t 为壳厚度; a 为裂缝半长; P 为柱壳内压。曲线2,3分别为由图3(a)和(b)所示模型得到的应力强度因子曲线,曲线4为图1(c)中二维模型的计算结果。

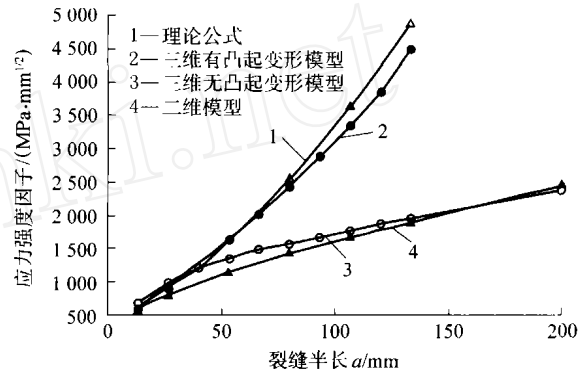
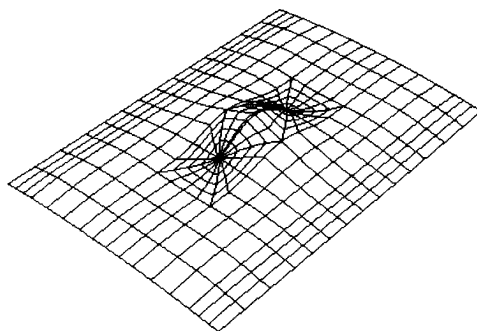
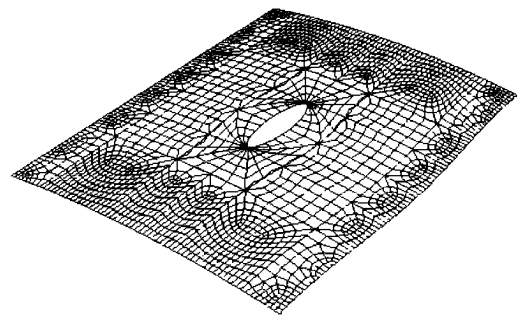


图2 三维、二维模型与理论公式得到的应力强度因子
Fig.2 Stress intensity factors from 3- and 2-D models respectively



(a) 有凸起变形



(b) 无凸起变形

图3 三维模型裂缝边缘的变形

Fig.3 Deformation of crack edges of 3-D model

从图2可以看出,裂缝边缘有凸起变形时三维模型应力强度因子的计算结果与理论公式的结果基本一致,说明三维模型的计算结果是合理的;同时可以看出,裂缝边缘有无凸起变形时三维模型的应力强度因子有很大不同,这是由于变形被约束的缘故。当裂缝半长为 133.4 mm 时,三维模型裂缝边缘的径向凸起变形为 41 mm ,应力强度因子为 $4\,499\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$,是无凸起变形模型应力强度因子($1\,949\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$)的2.3倍。正是因为凸起变形被限制,所以无凸起变形时三维模型的结果与二维模型的十分接近。当裂缝较短时(13.34 mm),4条曲线十分接近,因为这时裂缝边缘的凸起变形很小。裂缝越长,其边缘凸起变形就越大,不同模型得到的应力强度因子的差别就越大。

4.2 局部区域尺寸与应力强度因子的关系

局部区域尺寸不同时计算得到的应力强度因子曲线见图4。曲线2~4的局部模型均取自图1(a)所示模型的中心区域,曲线2局部模型的弧边长度是原模型弧长的 $1/4$ 和 $1/8$ (2条曲线几乎重合),直边长度是原模型的 $1/2$ (三维局部模型的变形见图5);曲线3,4的局部模型与裂缝垂直边的长度为原模型弧长对应弦长的 $1/8$ 和 $1/4$,与裂缝平行边的长度为原模型长边的 $1/2$ 。比较三维局部模型、整体模型和理论公式的计算结果(图4)可以看出,局部模型的结果与整体模型的几乎相同,都与理论值十分接近。这是因为无论局部的还是整体的三维模型,都考虑了裂缝边缘凸起变形对应力强度因子的影响。比较图4中不同尺寸平面局部区域的计算结

果(曲线 3 和 4)可以看到,对于同样长度的裂缝,所取局部区域尺寸不同,计算结果有很大不同。裂缝越长,裂缝边缘凸起变形则越大,而平面模型不能完全考虑其对应力强度因子的影响,所以裂缝越长平面模型与三维模型的计算结果相差越大。

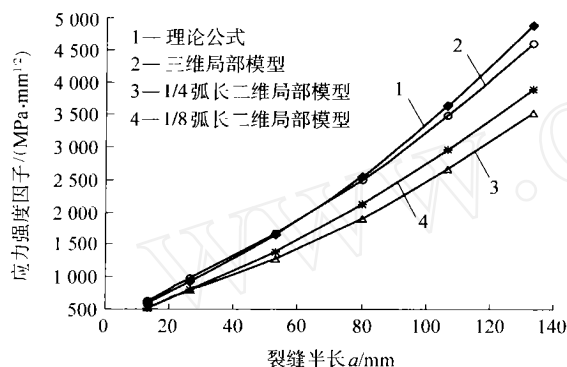


图 4 有凸起变形、局部区域尺寸不同时二维和三维局部模型的应力强度因子

Fig. 4 Stress intensity factors from 2- and 3-D local models with various sizes

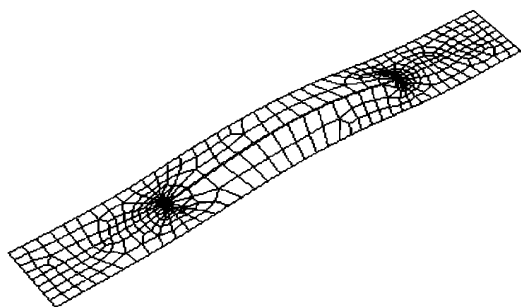


图 5 三维局部模型的变形

Fig. 5 Deformation of 3-D local model

5 结 论

1) 裂缝边缘凸起变形对柱壳的应力强度因子有显著影响。裂缝很短时,其边缘的径向变形很小,此时变形对应力强度因子的影响很小;裂缝边缘凸起变形越大,影响越大。

2) 二维局部模型的尺寸大小对应力强度因子有影响。局部模型尺寸越小,结果越接近三维模型结果,但仍不准确。

3) 求解柱壳及其他薄壁结构的应力强度因子时应选用三维模型,此方法也可应用于类似的复杂结构。

笔者编制了一套程序,只需输入模型的几何尺寸、材料、荷载、裂缝位置及长度等参数,就可以自动完成柱壳结构整体及局部模型的建模、分析和模型间数据传递的全过程,最后输出应力强度因子的数值。程序有很好的通用性,可以高效、快速地求解柱壳型结构应力强度因子。

参 考 文 献

- [1] Anderson T L. Fracture Mechanics Fundamentals and Applications[M]. Florida: CRC Press, 1995. 60 ~ 64
- [2] Atluri S N. Structural Integrity and Durability [M]. Georgia: Tech Science Press, 1997. 328 ~ 390
- [3] Kawai H, Wang L, Pipkins D S, et al. Automation of global-intermediate-local analysis based on feature-based modeling techniques and the finite element alternating method[J]. Computer Modeling and Simulation in Engineering, 1999, 4(1): 37 ~ 41
- [4] Kanninen M F, Popelar C H. Advanced Fracture Mechanics[M]. New York: Oxford University Press, 1985. 16 ~ 18