

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.022

基于有限元法的含裂纹平板应力强度因子研究

姜慧, 刘峰

(辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要:许多结构和设备由于材料本身原因或使用不当会产生表面裂纹。应力强度因子是用来判定含裂纹的设备或结构是否会失稳甚至断裂的重要依据。文中选用存在表面裂纹的有限大平板,用1/4节点奇异单元,建立含表面半椭圆裂纹的平板有限元模型,利用ANSYS对此模型进行应力强度因子的求解。建立不同的模型进行对比分析,得出不同的裂纹长度、深度、板厚等因素对裂纹尖端应力强度因子的影响情况,以及应力强度因子沿裂纹前缘分布规律。发现裂尖处应力强度因子随着裂纹长度的增加而减小,随着裂纹深度的增加而增大;裂纹前缘的应力强度因子,在裂纹最深处最大,由裂纹尖端向裂纹最深处呈现逐渐增大的变化规律。

关键词:半椭圆裂纹;应力强度因子;有限元;节点奇异单元

中图分类号:O346.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)02-0089-04

Research of Stress Intensity Factor for Surface Crack in Plane Based on Finite Element

JIANG Hui, LIU Feng

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: In engineering practice, due to material's fault or some improper operations, a lot of structures and equipments appear semi elliptical surface cracks. As the target of stress concentrate intensity and stress strain field, stress intensity factor is an important basis in determining the safety. A finite plane with semi elliptical surface cracks was chosen. An analytic plane model of finite element with semi elliptical surface cracks was established by the way of 1/4 node method singular element. The model was analyzed to get the solution of stress intensity factors by ANSYS. Taking these elements into consideration, some different models were established and compared. The regularities of distribution on edge line of stress intensity factor were concluded and the affections of elements on stress intensity factor at crack tip were summarized, such as the length of cracks, the depth of cracks and the thickness of plane. In crack tip, stress intensity factors decreased with the length growth of the crack. With the depth growth of the crack, stress intensity factors increased. Along the edge line, stress intensity factors increased from crack tip to the bottom of the crack.

Key words: semi elliptical crack; stress intensity factor; finite element; node singular element

在工程实际中,多数的机械构件和金属结构经常由于材料本身缺陷、制造工艺的不当和使用而产生表面裂纹,而裂纹的扩展往往会引发脆性断裂,导致设备或结构失效。应力强度因子是判定含裂纹的设备或结构是否处于安全状态,是否会失稳甚至断裂的重要依据,是表征裂纹尖端附近应力集中程度及应力应变场

的主要指标,所以它在含裂纹构件或设备的安全性研究和剩余寿命的评估中是一个重要的参量。在三维体的表面裂纹研究中,使用有限元法可以不再假设平面应变或平面应力,这也体现了有限元法在工程应用中的优越性。

用1/4节点法创建裂纹尖端奇异单元,并将裂纹

收稿日期:2014-09-07;修回日期:2014-10-11

作者简介:姜慧(1987),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要研究方向为石油化工设备的安全评价,结构完整性及灾害预防。E-mail:118026447@qq.com

尖端附近区域划分网格,使用 ANSYS 软件中的 Extrude 和 VSWEEP 命令建立整体模型^[1]。分别建立裂纹长度 $2b$ 、深度 a 、平板厚度 t 不同的整体模型,对裂纹尖端及裂纹前沿的应力强度因子进行计算,得到了应力强度因子 K_I 随各参量不同的变化曲线。

1 含表面半椭圆裂纹平板模型的建立

1.1 试样的几何尺寸及裂纹参数

如图 1 所示有限大平板,在平板两端均匀分布的拉应力 σ ^[2-3]。其表面存在一条椭圆形表面裂纹,裂纹长度为 $2b$,深度为 a ,平板厚度为 t ,如图 2 所示。

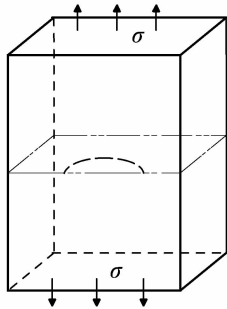


图 1 含裂纹平板模型
Figure 1 Plane with cracks

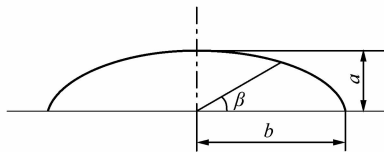


图 2 椭圆裂纹
Figure 2 Elliptical crack

1.2 裂纹体建模

由于试样为对称结构,且载荷也为对称施加,所以本文选取 1/4 试样建模,并进行有限元分析与计算。

为了提高计算的精度,采用 Solid95 单元建模。由于裂纹尖端存在奇异性,所以要建立含裂纹的有限元模型,首先要创建奇异点,采用 1/4 节点法,在裂纹尖端创建奇异单元,如图 3 所示。由于裂纹尖端的奇异性不是仅存在于裂纹尖端(平板表面),而是沿裂纹前缘普遍存在的,所以将裂纹体沿椭圆弧进行拉伸,使用 Extrude 和 VSWEEP 命令将裂纹面尖端扩展^[4-5],得到裂纹前缘的网格如图 4 所示,含裂纹附近的网格如图 5 所示。然后生成整体平板结构和网格。

1.3 模型的材料特性及约束施加

模型弹性模量为 2.06 GPa,泊松比 μ 为 0.3。由于分析模型为整体的 1/4,根据对称性,在平板一端施加均匀分布的拉应力 σ ,2 个对称面施加对称约束,其

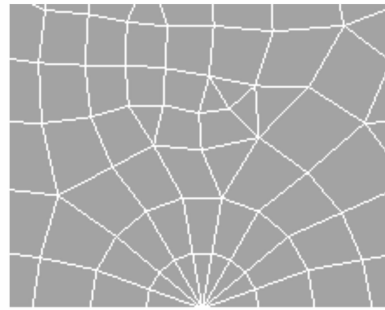


图 3 裂纹尖端奇异单元
Figure 3 Singular element in crack tip

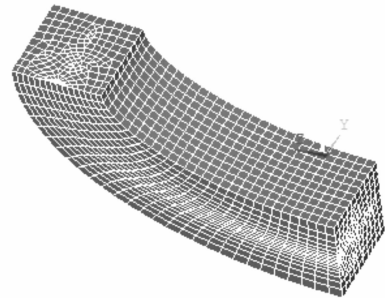


图 4 裂纹前缘有限元模型
Figure 4 Finite element model of crack edge

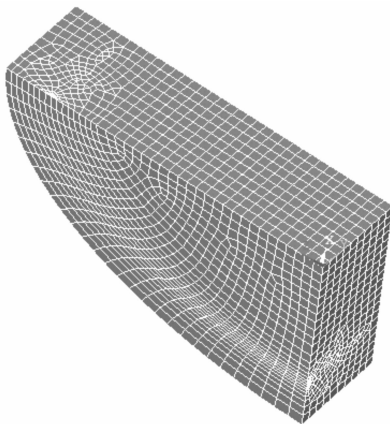


图 5 含裂纹部分网格划分
Figure 5 Mesh divide of block containing crack
余面为自由面。

2 有限元计算结果及分析

以裂纹长轴半长 b 、深度 a 、平板厚度 t ,裂纹前缘上的点与椭圆中心的连线与长轴夹角 β 等为参数,对平板表面椭圆裂纹应力强度因子 K_I 进行分析计算。通过大量数据模拟计算发现,这些参数并不是相互独立的,他们对应力强度因子的影响是有关联的^[6-11]。

2.1 应力强度因子在 β 影响下的变化规律

当椭圆短轴长 a 为 3 mm,板厚 t 为 15 mm,长轴半长 b 分别为 5, 10, 15 mm 时,应力强度因子 K_I 沿裂纹

前沿分布规律如图 6 所示,可知在裂纹前沿, K_I 由裂纹最浅点(平板表面处)向裂纹最深处呈现逐渐递增的趋势,即其他参数一定时,其前沿某一点位置越深, K_I 越大。在其他参数相同的情况下,随着 b 的减小, K_I 变化梯度降低,曲线变化趋向平缓,说明在板厚 t 、裂纹短轴长 a 及施加载荷 σ 等参数一定时, a/b 越大,裂纹前沿各处 K_I 差异越小。

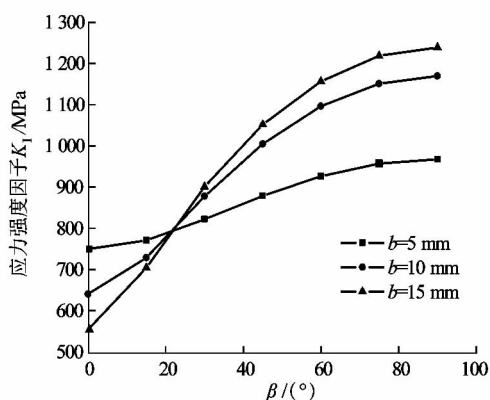


图 6 K_I 沿裂纹前缘变化规律

Figure 6 Change regulation of K_I on crack edge

2.2 裂纹尖端应力强度因子在 b 的影响下的变化规律

当板厚 t 为 15 mm, 裂纹短轴长 a 分别为 3, 5, 7 mm 时, 裂纹尖端处(平板表面) K_I 随长轴的变化规律如图 7 所示, 可知裂纹深度、板厚和施加载荷相同时, K_I 与长轴半长 b 呈近似线性关系, b 越大, K_I 越小。

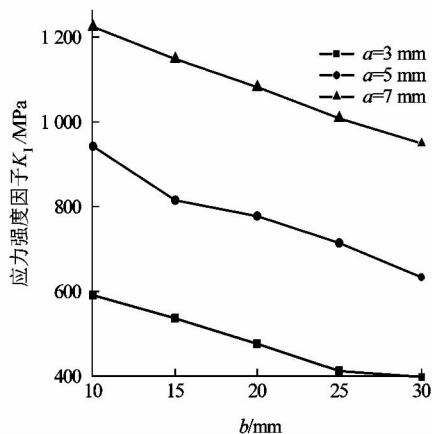


图 7 裂纹尖端 K_I 随 b 变化规律

Figure 7 Change regulation of K_I with b

2.3 裂纹尖端应力强度因子在 a 影响下的变化规律

当板厚 t 为 15 mm, b 取 10, 15, 20 mm 时, 裂纹尖端处 K_I 随着 a 的变化规律如图 8 所示, 可知板厚、长轴半长和施加载荷相同时, 裂纹尖端处 K_I 与短轴长 a 呈近似线性关系, a 越大, K_I 越大。

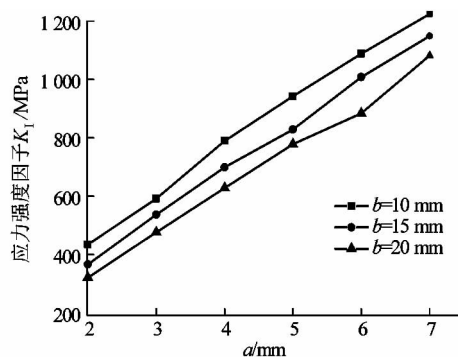


图 8 K_I 随裂纹深度 a 变化规律

Figure 8 Change regulation of K_I with a

2.4 应力强度因子在 t 影响下的变化规律

当裂纹深度 a 为 3 mm, 裂纹半长 b 为 5 mm 时, 裂纹前缘各处 K_I 分布如图 9 所示, 可知裂纹尺寸和施加载荷相同时, 板厚 t 越大, 裂纹前缘各处 K_I 越小。

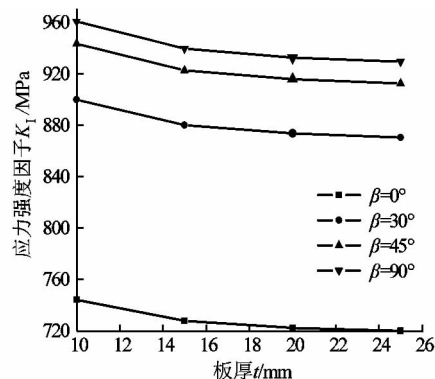


图 9 K_I 随平板厚度 t 变化规律

Figure 9 Change regulation of K_I with t

3 结论

1) 应力强度因子 K_I 在裂纹前缘处, 自裂纹尖端(平板表面)向裂纹最深处呈逐渐增大的趋势; a 一定时, b 越小, K_I 曲线越平缓, 即 a/b 越大, 应力强度因子 K_I 沿裂纹前缘各处分布差异越小, 结构越不易发生断裂。在裂纹最深处 K_I 最大, 所以在实际应用中, 判断此类裂纹的危险程度及结构的安全性可以以最深点的 K_I 为基准。其他参数相同时, a/b 越大且壁厚 t 越小, K_I 可达最大, 结构最容易发生断裂, 即平板越厚裂纹越浅, 结构越安全。

2) 应力强度因子是表征裂纹尖端及前沿应力应变场分布、应力集中强度的主要指标, 应力强度因子的确定, 表明了应力集中程度的确定, 对于继续分析应力应变场及工程上对含裂纹结构进行安全性判定和剩余寿命评估有着重要的参考价值。

(下转第 94 页)