doi:10.3969/j.issn.1671-7627.2009.04.006

平行偏置裂纹相互作用及其合并条件

汪微微,赵建平

(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 210009)

摘 要:裂纹之间的相互作用因其位置和方向的不同会引起应力场的相互增强或者相互减弱效应.运用FRANC2D软件,对单向拉伸载荷作用下含2条平行偏置裂纹的平板进行有限元分析,计算得到2条平行偏置裂纹在不同几何特征下的应力强度因子和应力变化图,再现了它们相互作用的应力场叠加规律,讨论了裂纹水平间距比(s/a_2)、裂纹垂直间距比(h/a_2)和裂纹长度比(a_2/a_1)对应力强度因子的影响以及2条裂纹之间的相互作用情况.结果表明:裂纹尖端内侧在$s/a_2=-1.4$时所受的屏蔽效应最明显,h/a_2对应力强度因子的影响因s/a_2表现为3种不同的变化规律,且等大裂纹的相互作用最为显著.在此基础上验证了在用含缺陷压力容器安全评定(GB/T19624—2004)中关于非共面的两相邻穿透裂纹合并条件的适用性.

关键词:平行偏置裂纹;应力强度因子;有限元;相互作用;合并条件

中图分类号:TQ051;O341.1;O346.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-7627(2009)04-0027-05

Interaction between offset parallel cracks and combination conditions

WANG Wei-wei, ZHAO Jian-ping

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The interaction between cracks could produce either an enhancement or a shielding effect on the stress field depending on positions and directions. By using the finite element software FRANC2D (Fracture Analysis Code 2D), a plate specimen with two cracks of different geometric dimensions under cycling load was used as a model, the stress intensity factors and stress contours were calculated under offset parallel crack condition and the superposed rule of the stress of cracks field was also presented. The influence of different level interval ratio (s/a_2) and vertical separation ratio (h/a_2), crack length ratio (a_2/a_1) on stress intensity factors and the interaction of two cracks were discussed. Results indicated that the crack tip suffered the most conspicuous shielding effect at $s/a_2=-1.4$, and h/a_2 influence on stress intensity factors showed three different changing laws and the biggest interaction between cracks happened at two same ones. Based on these rules, the availability was verified with adjacent non-coplanar through thickness cracks in safety assessment for in-service pressure vessels containing defects.

Key words: offset parallel cracks; stress intensity factors; finite element; interaction; combination condition

在役压力容器及部件常常存在着多部位缺陷,而裂纹之间的相互作用因其位置和方向的不同会引起应力场的相互增强和相互减弱效应[1],从而导致结构的剩余强度往往高于或者低于仅以单一裂纹模型确定的剩余强度,因此,多裂纹的相互作用分析成为当今结构完整性研究的关键问题之一而得到了广

收稿日期:2009-02-16

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA04Z439);国家"十一五"科技支撑计划资助项目(2006BKA02B02)

作者简介:汪微微(1983—),女,湖北随州人,硕士生,主要研究方向为化工设备与管道的可靠性;赵建平(联系人),教授,E-mail: jpzhao@njut.edu.cn.

万方数据

泛的关注.同时,在相应的评定规范中也必须考虑多裂纹之间的相互影响,在现有的规范中,通常是采用简化处理方法,即当2条裂纹之间的距离小于规定的合并距离时,就将2条裂纹合并为1条大尺寸裂纹;反之,就分别按单个裂纹来处理.

本文采用由美国Cornell大学断裂力学小组开发的FRANC2D[2-4]有限元分析软件,通过数值模拟,对2条平行偏置裂纹的应力强度因子进行参数化求解,并得到应力变化图,分析在不同的裂纹几何特征下(包括相对位置、裂纹长度等)的2条裂纹的相互作用及其影响规律,并在此基础上验证GB/T19624—2004[5]中关于非共面的两相邻穿透裂纹合并条件的适用性.

1 模型的建立

1.1 计算模型

以受均匀分布拉伸应力σ的含有2条平行偏置穿透裂纹的板试样为研究对象.计算模型的尺寸为300 mm×300 mm,2条裂纹的长度分别为$2a_1$和$2a_2$,设$2a_1 \geqslant 2a_2$并取$2a_1 = 5$ mm,因此可以近似把该计算模型看作无限大平板,如图1所示.设2条裂纹的水平间距为s,垂直间距为h,定义其水平间距比为s/a_2,垂直间距比为h/a_2,当2条裂纹发生重叠时,设定s/a_2为负值.结构选取压力容器常用材料16 MnR,弹性模量$E = 2.05 \times 10^8$ Pa,泊松比$\mu = 0.3$,板厚$t = 2$ mm.

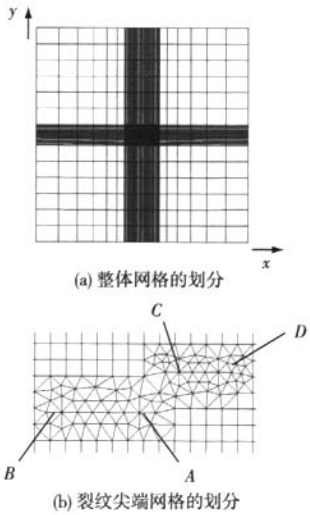

图1 有限元网格

Fig.1 Finite element mesh

1.2 有限元网格

整体结构的有限元网格包括两部分,一部分是包含裂纹在内的区域,另一部分是除裂纹以外的部分.由于裂纹前沿存在应力集中现象,因此裂纹前沿附近的网格划分得比较密集,如图1所示.计算时,约束下底边xy方向上的位移.

2 两平行偏置裂纹的相互作用

多裂纹的相互作用对应力强度因子的干扰效应有增强和减弱(屏蔽)2个方面.以K_I^0表示裂纹单独存在时的应力强度因子[6],K_I表示该裂纹受到邻近裂纹干扰时的应力强度因子,引入应力强度因子放大系数$M = K_I/K_I^0$,则:当$M > 1$时表示具有强化效应;$M < 1$时表示屏蔽效应;$M = 1$时表示零效应,即2条裂纹之间的相互作用微乎其微,可看作2条互不相干的孤立裂纹.

无限大平板中2条平行偏置裂纹受均匀分布应力时,Ⅰ型应力强度因子(K_I)占主导地位,Ⅱ型裂纹应力强度因子(K_{II})很小,可忽略不计,因此,本文只考虑K_I的变化情况.

2.1 水平间距比对两裂纹相互作用的影响

图2为2条等长的平行偏置裂纹的应力强度因子放大系数随着裂纹水平间距比s/a_2的变化而变化的曲线.

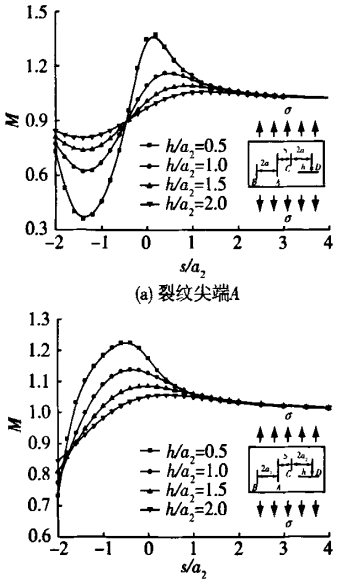

图2 应力强度因子放大系数随水平间距比的变化

Fig.2 Variations in stress intensity factor magnification coefficients with level interval ratios

万方数据

由图 2 可见:平行偏置多裂纹不仅有强化效应,还会产生屏蔽效应. 裂纹 CD 对裂纹内侧 A 端与裂纹外侧 B 端的干扰效应表现出不同的规律. 当裂纹水平间距比 s/a_2 较大时,裂纹两侧均处于零效应区;随着 s/a_2 的减小,开始进入强化区,且裂纹内侧 A 端被强化的程度大于裂纹外侧 B 端;随着 s/a_2 的进一步减小,强化作用使得两端的应力强度因子放大系数达到最大值后又开始减小,而应力强度因子放大系数达到最大值时的 s/a_2 又随着裂纹垂直间距比 h/a_2 的增大而增大;当 $s/a_2=0$(两裂纹刚发生重叠时)或者 $s/a_2=0$ 左右时,裂纹内侧 A 端首先进入屏蔽区,此时,裂纹外侧 B 端仍然处于强化区,具体表现为,当 h/a_2 较大,2 条裂纹快要发生重叠($s/a_2>0$)时 A 端开始进入屏蔽区,随着 h/a_2 的减小,其进入屏蔽区时的 s/a_2 减小甚至发生在 2 条裂纹重叠之后($s/a_2<0$);随着 2 条裂纹重叠程度的增大,外侧 B 端也开始进入屏蔽区,其开始进入屏蔽区时的重叠程度是随着裂纹垂直间距比 h/a_2 的减小而增大的. 无论 h/a_2 多大,2 条裂纹在 $s/a_2=-1.4$ 时,内侧 A 端受到的屏蔽作用最大,使得应力强度因子放大系数达到最小值,之后随着重叠程度的进一步加大,A 端的屏蔽作用又开始减弱. 而对于裂纹外侧 B,从开始进入屏蔽区直至 2 条裂纹完全重叠($s/a_2=0$),受到的屏蔽效应始终增强.

根据上述分析结果,可以将一裂纹周围的空间划分为强化区域和屏蔽区域,区域的分割如图 3 所示.

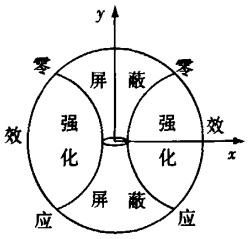

图 3　干扰效应区域

Fig. 3　Sketch of interference effect zone

图 4 为 $a_1=a_2$、裂纹垂直间距比 $h/a_2=1$ 时,几种不同的裂纹水平间距比 s/a_2 下的应力云图. 图 4 表示了几种典型的两平行偏置裂纹相互作用情况:$s/a_2=-2$ 时,2 条裂纹完全重叠,A 端和 B 端相互作用情况完全相同,且都处于屏蔽区;$s/a_2=-1.4$ 时,裂纹内侧 A 端受到的屏蔽作用最强烈;$s/a_2=-1$ 时,裂纹内侧 A 端处于屏蔽区,裂纹外侧 B 端处于强化区;$s/a_2=0$ 时,2 条裂纹刚好发生重叠,裂纹内侧 A 端和裂纹外侧 B 端都处于强化区,且被强化的程度都不大;$s/a_2=1$ 时,裂纹内侧 A 端和裂纹外侧 B 端都处于强化区,且裂纹内侧 A 端被强化的程度大于裂纹外侧 B 端.

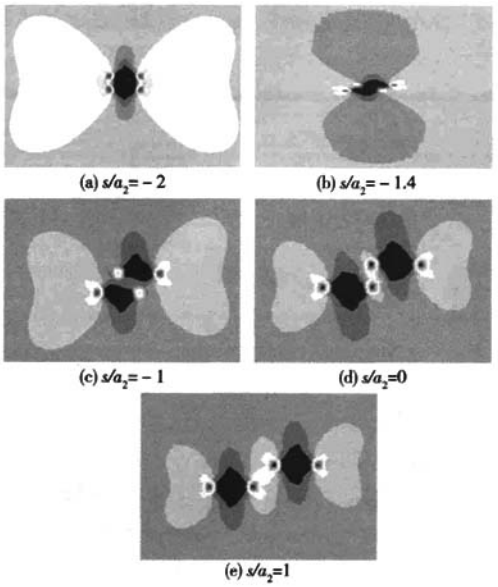

图 4　两平行偏置裂纹的应力云图

Fig. 4　Stress contour of two offset parallel cracks

2.2　垂直间距比对两裂纹相互作用的影响

图 5 为裂纹垂直间距比 h/a_2 对应力强度因子放大系数影响的变化曲线.

由图 5 可知:当 2 条裂纹的水平间距比 s/a_2 大于 0 时,随着裂纹垂直间距比 h/a_2 的增加,应力强度因子放大系数先增大后减小最终进入零效应区,应力强度因子放大系数达到最大值时的 h/a_2 是随着 s/a_2 的减小而减小的,且裂纹内侧 A 端所受的干扰程度明显大于裂纹外侧 B 端;随着 s/a_2 的减小,应力强度因子放大系数达到最大值时的 h/a_2 减小为 0,即表现为 M 值随着 h/a_2 的增大而减小,最终因干涉效应的减弱进入零效应区;当 2 条裂纹深度重叠时,裂纹内侧 A 端的应力强度因子放大系数随着 h/a_2 的增加始终增大,但在数值上均表现为屏蔽效应. 垂直间距比 h/a_2 越小,干扰效应越强烈,随着 h/a_2 的增大,干扰效应减弱. 当 h/a_2 很大时,即使裂纹水平间距比 s/a_2 很小,2 条裂纹的干扰效应也很

万方数据

微弱,可忽略不计.

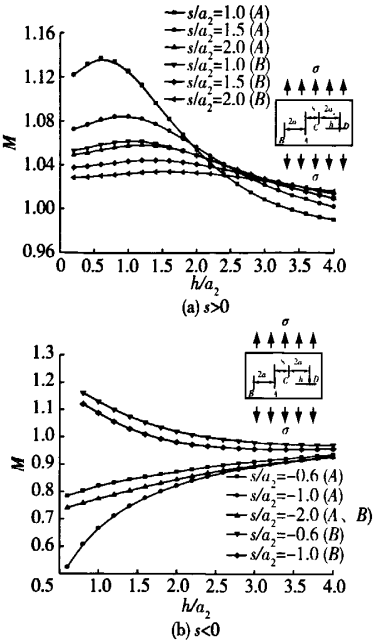

图5 应力强度因子放大系数随裂纹垂直间距比的变化

Fig. 5 Variations in stress intensity factor magnification coefficients with vertical separation ratios

2.3 裂纹长度比对两裂纹相互作用的影响

图6为2条不同长度的平行偏置裂纹在 $h/a_2=2$ 时裂纹 CD 对裂纹尖端 A 的干扰及其影响情况. 由图6可知:2条等长裂纹的相互作用效应最为显著,因此,当裂纹长度情况比较复杂时,可以用等长裂纹的应力强度因子放大系数代替,是安全的.

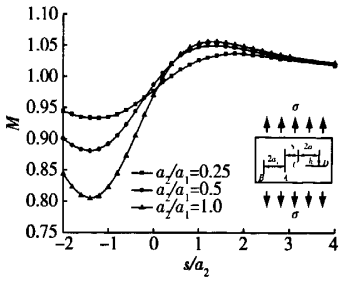

图6 应力强度因子放大系数随裂纹长度比的变化

Fig. 6 Variations in stress intensity factors magnification coefficients with crack length ratios

3 讨 论

对两平行偏置裂纹相互作用的研究,可以与缺陷评定规范中关于非共面的两相邻穿透裂纹的处理方法相比较,以便能够更好地理解和应用缺陷评定规范.

GB/T19624—2004[5]规定,非共面的两相邻穿透裂纹,当两裂纹面之间的最小距离 h 和两裂纹之间的水平距离 s_2 小于较小表征裂纹尺寸 a_2 的2倍时,合并为共面的长度为 $2a$ 的大裂纹来处理,$2a=2a_1+2a_2+s_2$. 设合并后的应力强度因子与单独应力强度因子的比值 $M'=K'_I/K_I^0$.

在 $h<2a_2$、$s>0$ 的条件下,不同长度比 $s/a_2=2$ 时的 M' 和 M 值见表1. 由表1可见,合并后的应力强度因子明显比合并前裂纹受到干扰作用时的应力强度因子大. 就这点而言,规范是偏于安全的. 在 $h<2a_2$、$s<0$ 的条件下,即两裂纹发生重叠之后,轻度重叠时,裂纹内侧受到屏蔽,外侧被强化,深度重叠时,裂纹两端均受到屏蔽,但缺陷评定规范中对多裂纹的处理只考虑到强化效应,从这方面来看,规范也是偏于安全的. 但本文的研究仅考虑的线弹性条件下的干涉效应,研究表明[7]:弹塑性干涉效应会在 M 值的基础上随载荷的增加而逐步加大. 综合考虑,我国现行的缺陷评定规范中对非共面的两相邻穿透裂纹的处理方法是适用的.

表1 应力强度因子放大系数的对比

Table 1 Comparison of stress intensity factor magnification coeifficients

a_2/a_1	M	M'
0.2	1.035	1.183
0.5	1.042	1.414
1.0	1.054	1.732

4 结 论

本文应用FRANC2D软件对含两裂纹的平板进行了有限元计算,分析了两平行偏置裂纹的相互作用及其影响情况,并对GB/T19624—2004[5]中的非共面的两穿透裂纹的合并条件进行了讨论,结论如下:

1) 两平行偏置裂纹不仅有强化效应,还会产生屏蔽效应. 当 s/a_2 较大时,裂纹处于零效应区;随着 s/a_2 的减小,裂纹处于强化区;随着 s/a_2 的进一步减小,裂纹内侧首先进入屏蔽区,此时裂纹外侧仍然被强化;两裂纹深度重叠时,裂纹外侧也开始进入屏蔽

万方数据

区,裂纹内侧在 $s/a_2 = -1.4$ 时所受的屏蔽效应最明显.

2) h/a_2对应力强度因子的影响因 s/a_2的不同表现为 3 种不同的变化规律. 当 s/a_2较大时,随着 h/a_2的增加,应力强度因子放大系数 M 先增大后减小最终进入零效应区;随着 s/a_2的减小,M 值随着 h/a_2的增大而减小,最终因干涉效应的减弱进入零效应区;当两裂纹深度重叠时,裂纹内侧 M 随着 h/a_2的增加始终增大但均为屏蔽效应. 同时,干扰效应随着 h/a_2的增大而减弱.

3) 两等长裂纹相互作用最为显著.

4) 我国现行的 GB/T19624—2004[5] 中关于非共面的两穿透裂纹的合并条件,仅从线弹性条件考虑,是偏安全的处理方法,综合其他方面的因素,是适用的.

参考文献:

[1] Lam K Y, Phua S P. Multiple crack interaction and its effect on stress intensity factor [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1991, 40(3):585 - 592.

[2] Bachir B B, Benguediab M, Elmeguenni M, et al. Analysis of the effect of micro-crack on the plastic strain ahead of main crack in aluminum alloys 2024 T3 [J]. Computational Materials Science, 2008, 42:100 - 106.

[3] Bittencourt T N, Wawrzynek P A, Ingraffeat A R, et al. Quasi-automatic simulation of crack propagation for 2D LEFM problems[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(2): 321 - 334.

[4] 刘斌,沈士明. 基于 FRANC2D 的疲劳裂纹扩展数值模拟[J]. 中国制造业信息化,2007,36(15):32 - 34.
Liu Bin, Shen Shiming. The numerical simulation of fatigue crack growth based on FRANC2D[J]. Manufacturing Informationization in China, 2007, 36(15):32 - 34.

[5] 中国特种设备检测研究中心. GB/T19624—2004 在用含缺陷压力容器安全评定[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[6] Li Y P, Tham L G, Wang Y H, et al. A modified Kachanov method for analysis of solids with multiple cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(9): 1115 - 1129.

[7] 秦红,陈新德,孙连奎,等. 多裂纹弹塑性断裂评定研究[J]. 石油化工设备,1996,25(4):8 - 15.
Qin Hong, Chen Xinde, Sun Liankui, et al. Study of assessment methods relating to multiple cracks in elastic-plastic fracture[J]. Petrochemical Equipment, 1996, 25(4):8 - 15.

万方数据