

较严和较松的情况。

$$[y]_1 = H/100 \quad \text{mm} \quad (24)$$

$$[y]_2 = H/160 \quad \text{mm} \quad (25)$$

由表2可以看出,无论按照那种控制标准,芳烃抽提塔和甲酚精制塔的顺风向塔顶位移均符合要求。对于高径比 H/D_1 较大的丙酮精制塔和丙烷分离塔,塔顶位移也较大,按照较严的位移控制标准,其塔顶位移不合格。但这两台设备在使用过程中,没有因为位移过大而发生操作故障,因而多数位移控制标准取值可适当放宽些。

表1中甲酚精制塔和丙烷分离塔的 H/D_1 相近,前者位移在控制标准范围内,而后者却超标。这是因为塔顶位移除了与 H/D_1 的3次方成正比外,还与 H/δ_1 成正比,丙烷分离塔的 H/δ_1 较大,因而位移也相对地较大并超过许用值。由此,在塔器设计中为了控制塔顶位移,首先应尽量减小高径比 H/D_1 ,其次可以考虑增加 H/δ_1 值,亦即增加塔器厚度。

4. 结语

①按照塔器设计标准计算得出的塔顶顺

风向位移值偏小。②塔器位移控制标准可以适当放宽,否则操作正常的塔其位移校核也会不合格。③减小塔器位移的主要途径是降低塔高与塔径之比,其次是增加塔器壁厚。④对于高度在20 m以下的塔器,取风振系数 $K_{z1} = 1$ 并非总是偏于安全的。

参 考 文 献

- 1 张相庭. 结构风压和风振计算. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- 2 喻九阳, 方子严. 塔设备风致诱导振动分析与计算. 武汉化工学院学报, 1989(2): 60~69
- 3 全国压力容器标准化委员会. 钢制塔式容器标准释义. 北京: 气象出版社, 1992.
- 4 全国压力容器标准化委员会. JB 4710—92 钢制塔式容器. 北京: 气象出版社, 1992.
- 5 Forsythe G E. *et al.* 计九三译. 计算机数值计算方法. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- 6 何克清. 计算机软件工程学. 武汉: 湖北大学出版社, 1983.

(收稿日期: 1995-08-26) (王编)

穿透及表面疲劳裂纹扩展的计算机模拟

厦门大学(厦门市361005) 讲师 宋建华
南京化工大学 教授 成建国 副教授 黄振仁

摘要 根据疲劳裂纹扩展的规律,对等幅和变幅谱载下CCT及PS(T)试件的疲劳裂纹扩展进行了计算机模拟。其结果经疲劳试验考评,误差在40%以内,能满足疲劳分析的要求。

叙词 疲劳裂纹 试验 计算机模拟 软件 结果比较

Computer Simulating of Through or part-through Fatigue Crack Propagation

Lecturer Song Jianhua Professor Cheng Jianguo Associate Professor Huang Zhenren

Abstract According to characters of fatigue crack propagation, we imitated the tests of CCT and PS(T) by computer under constant amplitude and varied amplitude

spectrum loading. The errors are about 40% after comparing the results of computer simulating and experiment test. It is possible that computer simulating may effectively take the place of fatigue crack propagation tests.

疲劳裂纹扩展试验是一项既费事又花钱的昂贵科研工作,可它又是目前进行疲劳分析的重要内容和依据。国内外专家对此深感头痛,或几国联合出资研究,或简化试件,或望洋兴叹而暂停研究,也有的在考虑采用替代它的新方法和新途径。笔者利用计算机高速循环计算功能,模拟了疲劳裂纹扩展的试验。因计算机的循环速度是疲劳试验机的成万上亿倍,一个要花几天时间才可能完成的疲劳试验,在计算机上几秒钟就模拟完成了,这对疲劳分析理论应用于工程实际具有较大的促进作用。PLCVAF软件^[1]是本课题组为开发一个在线化工设备安全分析专家系统而做的有关疲劳分析部分内容。目前它能模拟等幅和变幅谱载条件下标准试件CCT(中心穿透裂纹平板)、PS(T)(中心半椭圆表面裂纹平板)乃至管和壳等一系列试验以及工程上常见的疲劳问题。对此软件,本文作者还用CCT和PS(T)标准试件的等幅及变幅谱载条件下的疲劳裂纹扩展试验对其进行了考评。

1. 计算机模拟疲劳裂纹扩展软件 PLCVAF的设计理论

(1) 应力及应力幅的确定 PLCVAF把应力作为已知数据来处理,所以在用本软件之前一定要通过公式或有限元、边界元技术来计算出裂纹所在处当地应力情况。然后按程序设计的分类要求准备好数据,也即形成PLCVAF的前处理数据文件。本程序把应力分成两大类:拉伸应力和弯曲应力。应力分布又分为均匀变化、线性变化和曲线插值等几类。

(2) 应力强度因子(SIF)的求取 SIF的求取是解决各类疲劳问题的关键和难

点。目前许多疲劳问题因为SIF难求而无法解决,有的对问题进行简化以达到能求出SIF。PLCVAF软件目前能求解4类问题的SIF值:①国标CCT试件。②美国ASTM的PS(T)试件(经验公式解)。③PS(T)试件(线弹簧模型—LSM解)。④类三通体(大小头、三通、接管等的LSM解)。其中,①和②类问题中的SIF的求取可采用文献〔2〕所推荐的公式。③和④两类问题,由于涉及到表面裂纹SIF的求取问题而成为本课题的一个难点。众所周知,工程实际中出现的裂纹大多以表面裂纹的形式存在,由于其有很大的理论和实用价值,近20年来许多科研工作者对其做了大量工作。笔者查阅了许多文献资料^[3,4,5],最后确定采用文献〔4〕所介绍的LSM法,并进行了编程。该方法经考评,确实是一种较为准确、方便和具有发展前途的解法^[1]。

(3) 变幅谱载中的超载迟滞效应 疲劳分析中,超载作用会使裂纹扩展速率显著变缓并出现所谓的“迟滞”效应(RETARDATION),从而增加裂纹的扩展寿命。这对结构获得较长的疲劳寿命来说是有利的,因此超载现象引起了广泛的兴趣并进行了研究。但直到目前,对各种影响超载迟滞的因素还未能完全了解和作出满意的解释。超载迟滞现象的机理目前已有好几种。如:①裂纹尖端的纯化效应。②裂纹的闭合效应。③裂纹扩展尖端的残余应力的影响。④屈服塑性区效应等。本文主要根据②和④来进行综合文献报道,并采用4类10种超载模型编制了对应的软件。它们分别为: a. WHEELER模型。 b. 修整的WHEELER模型。 c. WILLENBORG模型。 d.

J. B. CHANG修正的WILLENBORG模型。
e. 北京621所修正的WILLENBORG模型。
f. MOARSE模型。g. S. MATSUOKA模型。
h. 文献[6]修正的S. MATSUOKA模型。
I. 杨秉宪模型。J. 本文作者修正的S. MATSUOKA模型。

各类超载模型都是建立在一定的材料、工况、试验条件、环境及裂纹形状等因素之上的, 各有所长。目前还不能确定哪一个模型较为普遍适用, 所以选取模型时, 要考虑各种具体因素以及以下两项原则: ①选用模拟试算结果与试验数据最为吻合者。②若都相差较大时, 可考虑各模型中的可变参数在其允许范围内作适当的调优。

2. PLCVAF软件组织

PLCVAF软件从总体上可分为两部分, 并由控制变量MCOVA切换。MCOVA = 1时, 是模拟等幅值疲劳裂纹的扩展过程; MCOVA = 2时, 是模拟变幅值疲劳裂纹的扩展过程。解题范围暂定如下4类穿透裂纹或表面裂纹问题。①CCT试件。②PS(T)平板(LSM解)。③PS(T)平板(经验公式解)。④类三通体(LSM解)。由变量MTYPE控制。本软件裂纹扩展速率计算公式采用PARIS公式及其修正式。在处理变幅谱载的超载迟滞效应时, 由变量MODEL控制。

PLCVAF要求当地应力经各种应力计算方法进行前处理并形成数据文件IN.DAT后方可接受。程序执行的结果会得到可读性很强的输出文件OUT.DAT, 其可用于WS、WPS、CCED及WINDOWS的WORD等通用计算机编辑软件的编辑和重组。本软件设计过程中, 还考虑了循环增量的自动划分、以一级为增量的变幅谱载计算机内存近址或远址寻数, 以及小型机VAX地址虚拟和内存无限等特点, 可让使用者根据具体的解题类型和不同的计算机型号, 选择并安装不同

结构软件, 从而使解题速度最快, 结果最精确, 软件用户最为方便。

3. 软件的部分考评试验及模拟计算结果比较

为了考评本软件模拟计算结果的可靠性, 笔者在MTS810电液伺服材料试验系统上进行了如下4类考评试验: 等幅CCT、变幅谱载CCT、等幅PS(T)及变幅谱载PS(T)。所用试件分别按国标GB 228—87、GB 6398—86并参考美国ASTM E740—80T等相关标准后经精密加工而成。在进行疲劳裂纹扩展试验之前, 要对它们进行一定周次的疲劳裂纹预制。本试验的裂纹长度观测采用国产JXD-2型和JC-10型读数显微镜。表面裂纹的扩展量与循环次数的对应关系借助变载勾线技术[1]来取得。试验环境为大气, 室温25℃, 试验所用的材料为12Cr1MoV, 试验载荷是参考国标GB 6398—86及文献[7、8]后确定的。对应于各考评试验条件, 用PLCVAF软件分别对各个试验进行了模拟计算。在选择适合于12Cr1MoV这一材料的具体载荷形式和工况条件等因素作用下的超载迟滞模型时, 以CCT4试验为准绳, 再由软件根据其模型选择原则而进行优化选择。结论是GENERALIZED WILLENBORG模型最为适合。试验及计算机模拟计算所用的基本材料数据如下(ISO单位): 屈服点为234, 抗拉强度是481, PARIS常数 $C = 2.322 \times 10^{-16}$, PARIS常数 $n = 6.0613$, 门槛值 $\Delta K_{th} = 2.2$, $\Delta K_c = 93$ 。GENERALIZED WILLENBORG模型参数为: $\alpha_s = 6$, $\alpha_c = 2$, $m = 0.15$, $S_{s0} = 3$ 。疲劳裂纹扩展试验及其对应的计算机模拟结果见表1~4。

4. 结语

①用计算机模拟来减少代价昂贵的各类疲劳裂纹扩展试验并解决工程上复杂的疲劳问题是一条可行的途径。②PLCVAF软件

表1 等幅CCT试验及计算结果

试件号	CCT1	CCT2	CCT2
裂纹起始长 (mm)	7.588	7.722	7.710
裂纹终止长 (mm)	13.895	13.878	13.890
试验循环 (cycles)	152 120	136 533	157 400
计算循环 (cycles)	92 900	162 300	135 000
误差 (%)	-39	19	14

表2 变幅CCT试验及计算结果

试件号	CCT4	CCT5	CCT6
谱类	17	17	17
裂纹增量 (mm)	0.198 0	0.298 5	0.652 4
实验重复谱数 (spectrums)	20	20	20
计算重复谱数 (spectrums)	14.5	21.5	26.5
误差 (%)	-27.5	7.5	32.5

表3 等幅PS(T)试验及计算结果

试件号		PS(T)1	PS(T)2	PS(T)3
裂纹始长 (mm)	a	1.881	1.827	1.737
	c	9.957	9.815	9.921
循环数 (cycle)		2×10^4	2×10^4	3.08×10^4
裂纹	试验	a	2.056	2.012
		c	10.098	9.931
终长 (mm)	公式	a	2.041	1.969
		c	9.960	9.817
	LSM	a	2.012	1.892
		c	9.962	9.819
误差 (%)	公式	8.6	23.2	28.9
	LSM	25.0	37.3	43.2

表4 变幅PS(T)试验及计算结果

试件号		PS(T)4	PS(T)5	PS(T)6
裂纹始长 (mm)	a	2.307	2.279	2.533
	c	9.190	10.049	10.236
重复试验		120	100	120.0
谱数		120	100	112.5
公式计算		120	100	117.7
裂纹	试验	a	2.772	2.555
		c	9.235	10.078
终长 (mm)	公式	a	2.619	2.477
		c	9.196	10.052
	LSM	a	2.569	2.446
		c	9.240	10.066
误差 (%)	公式	32.9	28.3	-6.3
	LSM	43.7	39.5	-1.9

参 考 文 献

- 1 宋建华. 高温高压蒸汽管线的变幅值疲劳研究. 南京化工学院硕士学位论文, 1992.
- 2 Murakami Y. et al. Stress Intensity Factor Handbook. World publ. Co. 1989, (2): 712~722
- 3 Rice J R and Levy N. J. of Appl. Mech. of Trans. of ASTM, 1972, 39: 185~194
- 4 刘 曦. 用改进的线弹簧模型分析焊接结构焊缝表面裂纹. 国防科技大学硕士学位论文, 1988.
- 5 唐国金. 任意载荷作用下浅壳半椭圆型表面裂纹的改进线弹簧模型解法. 国防科技大学硕士学位论文, 1985.
- 6 钱 进. 合成塔压力载荷谱的编制及谱载下CCT试件的疲劳裂纹扩展寿命分析. 南京化工学院硕士学位论文, 1987.
- 7 黄振仁等. 石油化工设备, 1993, 22(1): 22~26
- 8 宋建华等. 石油化工设备, 1993, 22(3): 41~45

(收稿日期: 1995-06-11) (王编)

是一种功能较强, 数据准备较方便, 且面向工程应用的疲劳分析专用软件, 它的模拟计算结果与试验考评结果误差在40%以内, 能满足疲劳分析的要求。③PLCVAF 软件要应用于工程实际, 还有待于完善和充实, 尤其是各种工程材料的基本数据还严重不足, 还存在某些复杂工程结构的SIF难求等问题。