

含埋藏裂纹焊接结构可靠性分析

何柏林¹ 霍立兴² 张玉凤²

(1. 华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

(2. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 采用随机有限元法对含埋藏裂纹焊接结构的可靠性进行了计算。并讨论了断裂韧性、外载荷、椭圆裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 等随机变量的变异对焊接结构可靠性的影响。计算结果表明, 在三个随机变量(K_{IC} , P , a/c)中, 断裂韧性 K_{IC} 的变异对结构可靠性影响最大, 外载荷 P 的变异对结构可靠性影响其次, 裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 的变异对结构可靠性影响较断裂韧性、外载荷的影响都小。该方法克服了传统的确定性断裂力学在结构的安全评定中结果偏于保守的缺点, 为含缺陷焊接结构的安全评定开辟了新的途径。

关键词: 焊接结构 埋藏裂纹 随机有限元 可靠性

0 前言

基于“合于使用”原则对含缺陷焊接结构的安全性进行评定, 国内外都已进行了广泛的研究, 制定了一些评定标准, 如 IIW-1157-90 标准、WES-2805 标准。但这些标准均是建立在“确定性断裂力学”基础之上。在工程结构中存在着很多不确定因素的影响, 诸如结构的物理性质、几何参数, 以及所承受的某些载荷(风载、地震载荷等)。这些随机性因素的影响是不可忽略的, 致使结构的行为不在是确定性的。近些年来, 随机有限元由于将可靠性分析与有限元这样的数值技术结合起来计算结构的可靠度, 具有高效、准确等优点, 使得其研究与应用都取得了显著的进展^[1-3]。在很多情况下, 缺陷是导致结构失效的基本原因, 采用随机有限元法计算含缺陷焊接结构的可靠性, 目前这方面的文献很少见报导。

本文采用自行编制的三维随机有限元程序, 对含埋藏裂纹焊接结构的可靠性指标进行了计算, 并就一些随机变量的变异对可靠性的影响进行了分析研究。为合理、准确、可靠的进行含缺陷焊接结构安全评定开辟了新的途径。

1 功能函数的选取与可靠度指标计算公式

本文以含埋藏裂纹焊接结构为研究对象(埋藏裂纹在焊缝中), 以断裂力学中 K 判据为功能函数:

$$g(X) = K_{IC} - K_I \quad (1)$$

其中 K_{IC} 为材料的断裂韧性, K_I 为裂纹尖端应力场强度因子。 $X = X_i (i = 1, 2, \Lambda, n)$ 为影响 $g(x)$ 的诸随机变量, 假定 $X_i (i = 1, 2, \Lambda, n)$ 均服从正态分布且相互独立, 对于非正态分布可以通过当量变换转换成正态变量, 非独立变量可以通过独立性变换转换成独立变量。将诸变量通过变换得到一组相互独立的标准正态变量 $Y_i (i = 1, 2, \Lambda, n)$

$$Y_i = (X_i - u_{xi}) / \sigma_{xi} \quad (2)$$

则功能函数变为

$$g(X) = g(K_{IC}(Y) - K_I(Y)) = G(Y) \quad (3)$$

其中 u_{xi} , σ_{xi} 分别为随机变量 X_i 的均值和标准差。采用迭代法可以确定极限状态面 $G(y)=0$ 上距原点最近的点 Y^* , 然后按距离公式确定结构的可靠性指标, 具体迭代格式为^[4]:

$$\{Y\}_{i+1} = (\{Y_i\}^T \{\alpha\}_i + \frac{G(Y_i)}{\|\Delta G(Y_i)\|}) \{\alpha\}_i \quad (4)$$

式中

$$\Delta G(Y_i) = \left\{ \frac{\partial G}{\partial Y_1}, \frac{\partial G}{\partial Y_2}, \dots, \frac{\partial G}{\partial Y_n} \right\}_{Y=Y_i}^T \quad (5)$$

是功能函数对 Y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的偏导数, $\|\cdot\|$ 表示几何范数, 而

$$\{\alpha\}_i = -\frac{\Delta G(Y_i)}{\|\Delta G(Y_i)\|} \quad (6)$$

当 $\{Y\}^*$ 确定后可按下式计算可靠性指标 β ,

$$\beta = \sqrt{\{Y\}^{*T} \{Y\}^*} \quad (7)$$

相应的失效概率和可靠度分别为:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (8)$$

$$P_r = 1 - P_f \quad (9)$$

2 含埋藏裂纹焊接结构可靠性计算

2.1 计算用程序

本文采用文献[5]中给出的随机有限元程序对含埋藏裂纹焊接结构的可靠性进行计算。

2.2 计算模型的建立

结构可靠度指标 β 的计算关键在于获得裂纹尖端应力场强度因子 K_I 的表达式, 为考虑由裂纹引起的裂纹尖端应力应变场的奇异性, 本文对裂纹尖端区域采用退化的 20 节点奇异等参单元, 非裂纹区采用普通的 20 节点等参单元。裂纹尖端应力场强度因子 K_I 的计算公式为^[6]:

$$K_I = \frac{E}{2(1-\gamma^2)} \sqrt{\frac{\pi}{2L_1}} \left[2U_B - U_C + 2U_E - U_F + U_D + \frac{1}{2}\eta(-4U_B + U_C + 4U_E - U_F) + \frac{1}{2}\eta^2(U_F + U_C - 2U_D) \right] \quad (10)$$

式中 E 为材料的弹性模量, γ 为泊松比, 其它参量的意义如图 1 所示。 L_1 为单元节点 M 和 F 之间的长度, 当局部坐标 $\eta = -1$ 时, 上式可以简化为:

$$K_I = \frac{E}{2(1-\gamma^2)} \sqrt{\frac{\pi}{2L_1}} (4U_B - U_C) \quad (11)$$

考虑到结构的对称性,取结构的 1/8 作为分析对象,有限元计算模型如图 2 所示,其中 $2h=200\text{mm}$, $2b=180\text{mm}$, $2t=60\text{mm}$, $2a=8\text{mm}$, $2c=16\text{mm}$,焊缝宽度 $2w=4\text{mm}$,整个模型共划分 256 单元,节点数为 1579,外载荷为 Z 方向承受均匀拉伸。

2.3 随机变量的选取

本文选取材料的临界应力强度因子 K_{IC} 、外载荷 P 及椭圆裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 三个参量作为随机变量。由于实际金属材料的弹性模量 E 和泊松比 γ 变异较小,故本文将弹性模量 E 和泊松比 γ 均视为常量。焊缝金属的弹性模量 $E=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$,泊松比 $\gamma=0.3$ 。根据断裂韧性 K_{IC} 的测试结果,断裂韧性 K_{IC} 的均值为 $3168 \text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$,其变异系数在 0.1 到 0.15 之间。在计算中,外载荷 P 的均值取为 190Mpa ,裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 的均值取为 4mm ,随机变量 P 和裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 的变异系数也分别取 0.1 和 0.15。

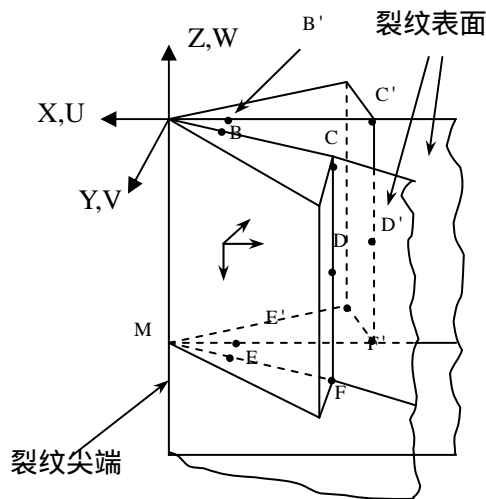


图 1 裂纹尖端 20 节点退化单元

Fig.1 Arrangement of singularity element along segment of front

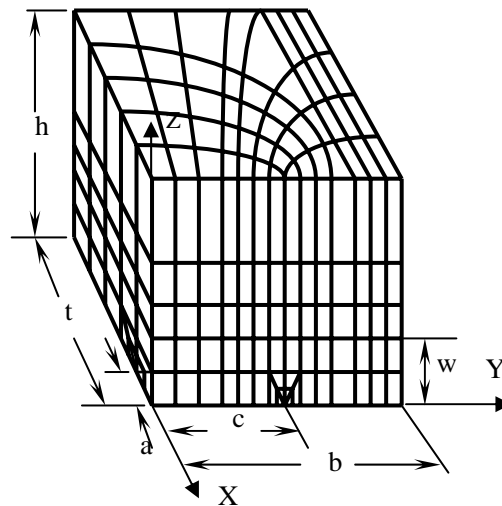


图 2 计算模型及尺寸

Fig.2 Calculation model and size

2.4 计算结果及分析

对随机变量取不同的变异组合,其相应的可靠性指标 β 和失效概率 P_f 如表 1 所示,计算控制精度 $\varepsilon=0.01$ 。

表 1 不同变异系数组合时随机有限元计算的结构可靠性指标和失效概率

Table 1 Reliability index and probability of failure at different combinations of the coefficient of variations

	K _{1c} 的变异	P 的变异	a/c 的变异	迭代次数	β	P_f
第一组合	0.1	0.1	0.1	12	4.27	0.9774×10^{-5}
第二组合	0.1	0.15	0.1	16	3.72	0.9961×10^{-4}
第三组合	0.1	0.1	0.15	19	3.86	0.5669×10^{-4}
第四组合	0.15	0.1	0.1	18	3.39	0.3495×10^{-3}
第五组合	0.15	0.15	0.15	22	2.91	0.1807×10^{-2}

从表 1 可以看出,对于含有一埋藏裂纹($2a=8\text{mm}, 2c=16\text{mm}$)的焊接结构,在断裂韧性 K_{IC} 、载荷 P 和裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 三个随机变量的变异系数均为 0.1 时,结构的失效概率为 0.9774×10^{-5} ,表明结构仍然具有较高的可靠性。在三个随机变量中,断裂韧性 K_{IC} 的变异对结构的可靠性影响最大,其次是载荷 P ,裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 的变异对结构可靠性的影响较 K_{IC} 和 P 的影响小。由此说明,要使焊接结构具有较高的可靠性,首先应该控制焊缝金属 K_{IC} 的变异系数,即提高焊缝金属的冶金质量,尽量使其波动减小;其次应该控制外载荷的变异;最后应该控制的随机参数才是裂纹短轴半长与长轴半长之比 a/c 。由于本算例中所加的外载荷相对来说较小及验算点偏离极限状态面较远,故在同样变异系数的条件下,外载荷 P 的变异对结构可靠性的影响要小于断裂韧性 K_{IC} 的变异对结构可靠性的影响。

为了比较随机有限单元法和确定性断裂力学方法的计算结果,本文在安全系数取 2 时,用确定性断裂力学方法对裂纹尖端应力强度因子 K_I 进行了计算,得出的 K_I 将大于材料的断裂韧性 K_{IC} ,由此可得出传统的确定性断裂力学在结构的安全评定中结果偏于保守。

3 结论

1) 采用随机有限元法对含缺陷焊接结构的可靠性指标和失效概率进行了计算。结果表明,尽管结构含有一定尺寸的埋藏裂纹,其失效概率是比较低的,克服了确定性断裂力学安全评定结果偏保守的缺点。

2) 在断裂韧性 K_{IC} 、载荷 P 和裂纹短轴半长与长轴半长 a/c 三个随机变量中, K_{IC} 的变异对结构可靠性影响最大, P 的变异影响其次, a/c 的变异对可靠性的影响较前两者都小。

3) 本文介绍的基于三维弹塑性随机有限元法的含缺陷焊接结构可靠性计算方法,为含缺陷焊接结构的安全评定开辟了新的途径。

参考文献

- 1 崔海涛. 基于随机有限元法的山东某煤矿主井井架强度的可靠性分析. 计算力学学报, 1997(3):332~335
- 2 吴世伟. 拱坝的失效模式与可靠性计算. 河海大学学报, 1992(2):88~96
- 3 吴立言. 齿轮可靠度计算的概率有限元法. 机械传动, 1992(2):1~4
- 4 李同春. 三峡重力坝三维随机有限元可靠度分析. 河海大学学报, 1992(9):89~96
- 5 何柏林, 霍立兴, 张玉凤等. 基于三维随机有限元法的含缺陷焊接结构可靠性分析. 机械强度, 2000(4):291~293
- 6 Anthonng R. Stress intensity factor calculation in three dimensions with quarter-Point element. Int. J. num..Mech.Engng,1980(15):1427~1445