文章编号：1002-6673（2016）04-011-03

基于扩展有限元法的工程机械焊接结构断裂分析

王 依，卢启鹏，龚学鹏
（中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室，吉林 长春 130033）

摘 要：针对工程机械焊接结构的强度分析问题，结构的断裂强度评定是保证结构可靠性的关键。首先利用有限元法分析焊接结构的静载强度，然后提取考查焊缝区域的应力场，作为断裂分析的载荷，基于断裂力学理论分析局部的焊缝特征，以扩展有限单元法为计算手段，分别计算焊接结构断裂强度与疲劳强度，应用结构完整性评定与损伤累积理论，校核焊接结构的断裂强度，估计结构的疲劳寿命。结合工程实际，说明所提出的焊接结构分析方法可为工艺设计提供依据。

关键词：焊接结构；断裂；疲劳；扩展有限元法
中图分类号：TG40 文献标识码：A doi:10.3969/j.issn.1002-6673.2016.04.004

Welding Structure Fracture Analysis for Construction Machinery Based on Extended Finite Element Method

WANG Yi, LU Qi-Peng, GONG Xue-Peng
(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

Abstract: According to the strength analysis of welding structure for construction machinery, fracture strength evaluation is the key to structure reliability. First, the static load analysis model was built with finite element method, and the stress field of welding seam was picked up as the load for structure analysis. With the fracture mechanics and extended finite element method, the fracture and fatigue strength welding model were built respectively. Finally, the structure integrity assessment and damage accumulation theory were utilized to evaluate the fracture strength and predict the fatigue life. By the application of engineering practice, the proposed welding structure fracture analysis provides the quantitative metric for the welding structure design.

Key words: welding structure; fracture; fatigue; extended finite element method

0 引言

对于工程机械的焊接结构，失效形式具有多样性的特点，从不同角度分析焊接结构强度，预测结构潜在的失效形式，是焊接的结构设计及工艺规划必不可少的步骤。

传统的分析方法通常只是校核应力强度或结构刚度，未考虑焊接结构的特征，或只是考虑焊缝几何形状，从应力分布的角度，分析结构的疲劳强度，如名义应力评定方法、结构应力评定方法、缺口局部应力应变评定方法等[1]。焊接是各组成部分的连接方式，各部分间不能发生明显的相对运动，表现出结构的整体性，而焊接工艺特点决定，焊接结构中必然存在各类缺陷，即表现出结构的不完整性，只有以断裂力学为基础的断裂强度与疲劳强度分析，才更能反映出焊接结构的本质特征。而外载直接作用于焊接结构整体，载荷传递至局部，局部的强度决定整体结构的使用性能。根据焊接结构的结构特点，从屈服强度、断裂强度、疲劳强度、裂纹扩展等诸多方面考虑，分析焊接结构的断裂强度，为结构工艺设计提供定量依据，对于提高工程机械中焊接结构的使用寿命，增强市场竞争力具有十分重要的现实意义。

修稿日期：2016-06-16
项目来源：吉林省重点科技成果转化项目(20150307039GX)
作者简介：王依(1987-)，男，辽宁阜新人，硕士，实习研究员。从事机械结构强度分析研究；卢启鹏(1964-)，男，黑龙江齐齐哈尔人，硕士，研究员。主要从事光谱仪器及短波光学方面研究。

1 焊接结构的断裂分析理论

一般情况下，焊接结构失效多发生焊缝处的开裂，因此焊缝局部分析是焊接结构分析的关键，焊接结构的失效形式分为两类：一类是针对脆性断裂的宏观裂纹结构的断裂强度分析；另一类是针对疲劳失效的含缺陷焊接结构的寿命估计，扩展有限单元法是分析两类失效形式的一种新技术。

1.1 扩展有限单元法

美国西北大学Belystschko 和 Moës[2,3]等提出了扩展有限元法(Extended Finite Element Method)，扩展有限元法

是一种新的数值方法，它基于单元分解理论在传统有限元中引入非连续的位移模式，通过扩充函数描述不连续边界，使非连续位移场的描述独立于网格划分，在 XFEM 分析中非连续界面可以穿过网格。因此，在裂缝扩展过程的模拟中，无需预设开裂路径和调整网格，而是通过增加不连续位移模式来表征不连续界面的演化，利用水平集法定义裂纹尖端和虚拟裂纹扩展方向，实现裂纹扩展的动态跟踪。

由于 XFEM 是在传统有限元框架下提出的一种新的数值方法，将建立的理论模型嵌入到有限元软件来分析计算是较常见的策略。现在通用代码已被嵌入到大型商用软件上，如 LS-DYNA 和 ABAQUS。

1.2 静载断裂强度分析

焊接结构断裂分析的理论基础是断裂力学[4]，根据裂纹体的受载与形变关系，裂纹分为三种基本类型：张开型、滑开型、撕开型。在实际工程问题中，并不是所有问题都可简化为三种基本类型之一，存在着复合型断裂，即三种基本模式的组合。

目前对断裂问题的研究多集中于张开型裂纹分析，而实际的工程问题多不是简单的载荷形式，针对这一问题，由西安交通大学俞茂宏教授提出的双剪理论[5]，对解决这一问题提供了一种可行的方法。双剪强度理论认为，当作用于双剪单元体上的两组剪应力和相应面上的正应力影响函数达到某一临界值时，材料发生屈服或破坏，双剪强度理论的主应力表达式为：

$$F=\sigma_1-\frac{\alpha}{2}(\sigma_2+\sigma_3) \quad 当\ \sigma_2\le\frac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \tag{1}$$

$$F'=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)-\alpha\sigma_3 \quad 当\ \sigma_2\ge\frac{\sigma_1+\alpha\sigma_3}{1+\alpha} \tag{2}$$

将弹性力学复合型裂纹脆性断裂问题的应力关系与弹性断裂力学中裂纹尖端的应力场，代入双剪强度表达式可得：

$$F=\frac{1}{8\sqrt{2\pi r}}\{\cos\frac{\theta}{2}[K_I(1+\cos\theta)-3K_{II}\sin\theta]+6\sqrt{a_{11}K_I^2+a_{12}K_IK_{II}+a_{22}K_{II}^2+a_{33}K_{III}^3}\} \tag{3}$$

其中，

$$a_{11}=\frac{1}{8}(1+\cos\theta)^2(5-3\cos\theta)$$

$$a_{12}=\frac{1}{4}\sin\theta(1+\cos\theta)(9\cos\theta-7) \tag{4}$$

$$a_{22}=\frac{1}{8}(1+\cos\theta)(27\cos^2\theta-24\cos\theta+13)$$

$$a_{33}=2(1+\cos\theta)$$

设：

$$T=\cos\frac{\theta}{2}[K_I(1+\cos\theta)-3K_{II}\sin\theta]+6\sqrt{a_{11}K_I^2+a_{12}K_IK_{II}+a_{22}K_{II}^2+a_{33}K_{III}^3} \tag{5}$$

T 为针对复合型裂纹的双剪应力因子。通过双剪应力因子断裂准则，可将复合型断裂问题的应力强度因子转化为等效的 K1 型应力强度因子，将整体分析的应力与应力强度因子对应的状态点标定到结构完整性评定[6]的失效评定图中，校核结构的静载断裂强度。

1.3 疲劳强度分析

疲劳断裂是焊接结构的最主要失效形式，一般情况下，材料在使用过程中疲劳的发生是不可避免的，在设计的使用期内保证结构的疲劳寿命是通常采用的解决方法，对含缺陷的焊接结构的寿命估计是结构设计的主要内容之一。

传统分析方法认为在接头的疲劳损伤中，应力是导致结构疲劳失效的主导作用。但实际材料的断裂行为是内因与外因相结合作用的结果，断裂力学观点认为断裂是结构中的损伤与应力场共同作用下发生的，断裂力学把疲劳设计建立在构件本身存在裂纹这一客观事实基础上来估算结构的寿命，是保证构件安全工作的重要途径，同时也是对传统疲劳分析方法的一个重要补充和发展。

首先根据文献[1]资料的经验公式，得到结构的疲劳断裂应力强度因子门槛值 $\triangle K_{th}$：

$$\triangle K_{th}=240-173R \tag{6}$$

其中，$\triangle K_{th}$ 的单位为 $N/mm^{3/2}$；R—作用力的循环特性，$R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$。

计算得到对应的疲劳断裂切应力门槛 τ_{th} 值，结合整体模型的分析与应力试验测试结果，评定疲劳断裂行为是否会发生；结合疲劳损伤容限理论中的 Paris 方程，积分后得到周次寿命与切应力 τ 及初始裂纹深度 a_0 的关系式 $N(\tau,a_0)$：

$$\frac{da}{dN}=1.315\times10^{-4}(\frac{\triangle K}{895.4})^m \tag{7}$$

结合测试数据与疲劳损伤理论，得到测试时间区间内，外载所产生的结构损伤 $D(a_0)$；Miner 准则的表达式如下：

$$\sum_{i=1}^{p}\frac{n_i}{N_i}=1 \tag{8}$$

表 1 应力幅数据统计及寿命计算

Tab.1 Statistics of stress amplitude and life calculation

序号(i)	切应力范围(τ)/MPa	测试点应力频次/次	寿命/次
1	τ1	n1	N1
2	τ2	n2	N2
3	τ3	n3	N3
…	…	…	…

根据试验测试的数据统计可得到外载对结构造成的损伤：

$$D=D_1+D_2+\cdots=\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}+\cdots \tag{9}$$

根据损伤与测试时间，预测结构的疲劳寿命与初始

裂纹测试的关系 $T(a_0)$;将估计的疲劳寿命与设计使用寿命相比较,校核焊接结构的寿命。

2 工程应用分析

以工程机械推耙机中的焊接结构件 H 形架为例,介绍焊接结构断裂分析的实际应用。

2.1 静断裂强度分析

利用扩展有限单元法建立分析模型,求解应力强度因子(SIF)与应力载荷 τ 与裂纹深度 a 的关系式 $K(\tau,a)$。

表 2 不同裂纹深度的 K3 型 SIF 计算

Tab.2 Relation of depth of fracture seam and K3 SIF

a/mm	1	2	3	4	5	6	7
K3/MPa·mm$^{1/2}$	161.7	174.7	209	239.2	271.3	304	360.4
a/mm	8	9	10	11	12		
K3/MPa·mm$^{1/2}$	382	432.1	501.2	601.2	730.7		

分析 H 形架横梁处的焊缝结构含初始裂纹的静断裂强度,从整体分析结构中提取出局部的应力场,转换成等效力矩作用于局部分析中,基于扩展有限元法求解当初始裂纹深度为板厚 1/2 时的应力强度因子,结合整体分析结果,将评定点标定到失效评定图中,如图 1 所示。

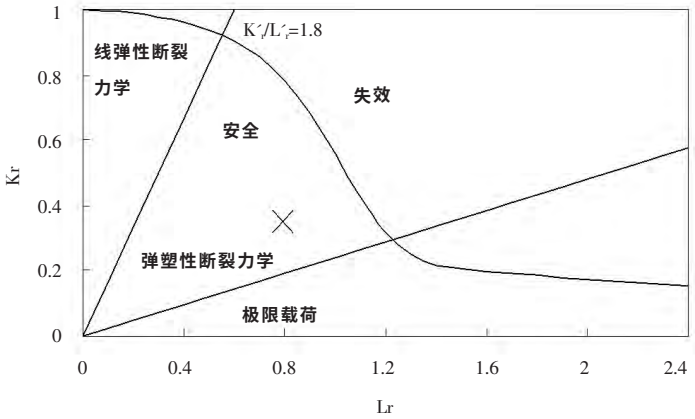


图 1 H 形架焊接结构的完整性评定

Fig.1 Structure integrity assessment of H structure

从失效评定图中可以看出,在设计静载条件下,局部缺陷设定为焊缝处 1/2 板厚深度的表面裂纹时,评定点位于失效评定图的安全区域,且安全容度很大,评定点所处的力学区域为弹塑性断裂力学,如果初始裂纹深度增大,评定点将向上移动,还有很大的容许变化区间范围,不会发生失效,即使发生失效,仍未进入线弹性断裂区域;如果加大外载,评定点将右上方移动,在失效前,始终保持在弹塑性断裂力学区域内,说明在这种状态下材料的行为受弹塑性力学支配,发生韧性断裂的可能性比脆性断裂要大。

因此,从结构完整性的角度,当设定裂纹深度为板厚的一半时,H 形架的断裂静强度满足结构的使用性能。

2.2 疲劳强度分析

分析 H 形架横梁焊缝处的疲劳寿命与初始裂纹深度的关系,结果如图 2 所示。

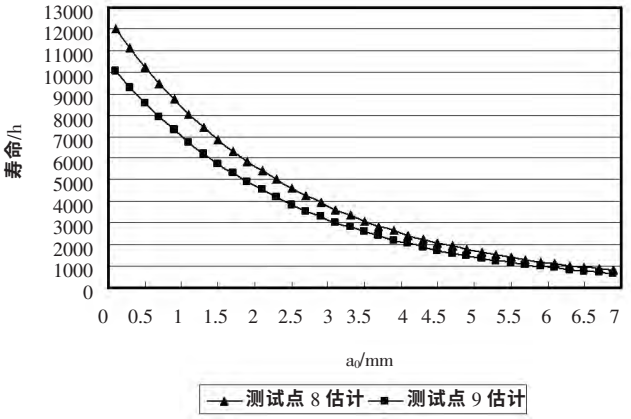


图 2 疲劳寿命与裂纹深度关系

Fig.2 Relation of fatigue life and fracture seam depth

疲劳寿命与裂纹深度关系曲线,一方面对工艺加工质量评判,当设计寿命一定时,对焊接结构的工艺质量提出要求;另一方面,当机械工作一段时间后,如果通过仪器检测到宏观裂纹,可以对 H 形架的疲劳寿命进行预测。

3 结束语

所提出的焊接结构断裂分析方法,以断裂力学、弹性力学、工程力学、双剪强度理论及损伤累积理论为基础,将有限元分析、结构完整性评定、扩展有限元分析、应力试验测试及焊接工艺等技术,整合到分析流程中,多方面评价结构强度,为焊接结构设计及工艺规划提供定量依据。

参考文献:

[1] 张彦华.焊接结构原理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[2] T. Belytschko ,T. Black. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,1999,5.

[3] Sukumar N, Moës N, Moran B,et al. Extended finite element method for three-dimensional crack modelling[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2000,11.

[4] 程靳,赵树山. 断裂力学[M].北京:科学出版社,2006.

[5] 俞茂宏.双剪理论及其应用[M].北京:科学出版社,1998.

[6] R6:Assessment of the integrity of structure containing defect.Re-v 4[S].

[7] 王依. 工程机械焊接结构跨尺度分析及其应用研究[D].浙江大学,2013.