

文章编号: 1674-599X(2021)03-0030-05

考虑残余应力释放的疲劳寿命预测方法研究

管德清, 高凡, 贺赛

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 基于断裂力学理论, 考虑残余应力及加载过程中的应力释放对接头疲劳性能的影响, 探索不等厚对接头疲劳寿命的预测方法。采用三维有限元理论研究不等厚板接头的残余应力分布规律, 并通过残余应力释放模型和Forman公式计算加载过程各瞬态的有效应力强度因子和有效应力强度因子比, 得到不等厚对接接头的疲劳寿命, 将预测值与疲劳试验结果进行对比。结果表明: 不等厚对接接头疲劳寿命的预测与试验结果是一致的, 该模型可用于不等厚对接接头疲劳寿命的预测。

关键词: 不等厚对接接头; 残余应力释放; 断裂力学; 疲劳寿命

中图分类号: TG405

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.005

Study on fatigue life prediction method considering the residual stress release

GUAN De-qing, GAO Fan, HE Sai

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The effect of residual stress and stress release during loading on the fatigue performance of butt joint with unequal thickness was studied, a prediction method for fatigue life was established using fracture mechanics theory. The residual stress distribution law of unequal thickness butt joint was investigated using the three-dimensional finite element theory, and the effective stress intensity factor and its ratio were calculated by the residual stress release model and the Forman formula. And the fatigue life of unequal thickness butt joint was calculated, the predicted value was then compared with the fatigue test result. The results show that the fatigue life predicted by the model is consistent with the experimental result. The model can be used to predict the fatigue life of unequal thickness butt joints.

Key words: unequal thickness butt joint; residual stress relaxation; fracture mechanics theory; fatigue life

焊接作为一种简单可靠的金属连接方式, 已经在各个领域广泛应用, 特别是在桥梁结构中, 不等厚对接接头作为一种新型的焊接接头, 常用于不同厚度板的连接中。受交变荷载作用产生的疲劳断裂, 是焊接结构破坏的主要形式, 研究不等厚对接接头的疲劳性能, 预测结构的疲劳寿命, 具有重要的工程应用价值。残余应力对焊接接头疲劳寿命有重要的影响^[1-3], 在焊接过程中, 接头内不可避免的会产生焊接残余应力, 会随着循环加载而逐步释放, 而且还影响接头的疲劳性能^[4-5]。

影响残余应力释放的因素较多, 国内外对此进行了许多的探索。Kim等人^[6]通过实验研究, 经过喷丸处理的中碳钢应力释放问题, 得出了应力幅对残余应力释放率影响较大。Yi等人^[7-8]分别提出了预测焊接残余应力和重复加载后的应力释放模型。Chin等人^[9]引入了一个参数来考虑冷加工工艺对残余应力释放的影响, 通过试验数据建立相关计算模型, 并用2种不同的喷丸冷加工工艺试样, 验证了模型的准确性。叶其根等人^[10]研究了长厚板的残余应力分布规律及纵横向残余应力释放情况, 发

收稿日期: 2020-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578018); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200815)

通讯作者: 管德清(1961—), 男, 长沙理工大学教授。

现纵向应力的释放水平远大于横向应力的。但对于焊接残余应力释放对疲劳寿命影响的研究少见, 也尚未发现考虑残余应力的释放影响不等厚对接接头疲劳寿命研究的文献报道。因此, 为解决实际工程中不等厚对接接头的疲劳性能, 作者拟基于断裂力学理论, 考虑残余应力释放及应力比, 采用 Forman 公式进行计算疲劳裂纹扩展速率, 求解接头的疲劳寿命, 探索考虑残余应力释放的不等厚对接接头疲劳寿命预测方法, 并将预测值与试验结果进行对比。

1 考虑残余应力释放的疲劳寿命预测模型

在焊接构件中, 不可避免地存在气孔、夹渣等初始缺陷, 而疲劳裂纹大多萌生于这些缺陷, 因此, 可将这些初始缺陷看作初始裂纹^[11-12]。在裂纹的扩展中, 依据断裂力学求解焊接结构的疲劳裂纹扩展寿命, 当应力强度因子达到断裂韧性 K_{IC} 时, 判断结构断裂失效。

1.1 有效应力强度因子

考虑到残余应力对焊接寿命的影响, 有效应力强度因子 K_{eff} 定义为^[13]:

$$K_{eff} = K_s + K_{res} \quad (1)$$

式中: K_s 为外部载荷应力强度因子; K_{res} 为残余应力强度因子。

1.1.1 K_s 的求解

根据 *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures (BS7910)*, 焊趾表面裂纹最深点的应力强度因子幅值 ΔK_s 表达式为:

$$\Delta K_s = M_K K_{pla} \quad (2)$$

式中: M_K 为与焊接类型及尺寸有关的放大系数, 可根据文献[4]得出具体表达式; K_{pla} 为平板半椭圆表面裂纹应力强度因子。

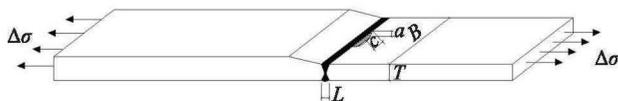


图1 应力强度因子尺寸参数示意

Fig. 1 Schematic diagram of size parameters of stress intensity factor

应力强度因子尺寸如图1所示, 在拉伸载荷

下, 根据三维有限元分析, 裂纹最深点的 M_K 具体表达式为:

$$M_K = f_1\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{T}\right) + f_3\left(\frac{a}{T}, \frac{L}{T}\right) \quad (3)$$

其中, K_{pla} 采用 Newman 等人^[14]基于有限元得到的经验公式进行计算, 其计算式为:

$$\Delta K_{pla} = \Delta\sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \cdot F\left(\frac{a}{T}, \frac{a}{c}, \frac{c}{W}, \varphi\right) \quad (4)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为名义应力幅; a 为裂纹深度; c 为裂纹长度; Q 为第二类完全椭圆积分; W 为板宽; T 为板厚; φ 为参数角; f_i 为修正系数。

1.1.2 K_{res} 的求解

为考虑残余应力对焊接构件寿命的影响, 采用权函数方法求解残余应力强度因子:

$$K_{res} = \int \sigma_{res} m(z, a) dz \quad (5)$$

式中: σ_{res} 为焊接残余应力; $m(z, a)$ 为权函数, 表达式见文献[15]。

1.2 残余应力释放模型

在循环载荷下, 焊接残余应力会随着循环次数增加而逐步释放, 影响其释放的因素主要有初始残余应力、载荷形式、名义应力幅、循环次数等。

首先定义应力衰减率 S 计算式为:

$$S = \frac{\sigma_{res, 0} - \sigma_{res, i}}{\sigma_{res, 0}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\sigma_{res, 0}$ 为初始残余应力; $\sigma_{res, i}$ 为经过 i 次循环后的残余应力。

其次, 根据文献[8]所建立的残余应力释放模型, 得到 S 的具体表达式为:

$$S = \left[a \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right)^n + b \right] [\ln(i + 1)]^m \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 n 、 m 分别为材料常数, 通过实验拟合确定; σ_a 为名义应力幅; σ_s 为屈服应力; i 为外载荷循环次数。

根据式 (6) ~ (7), 可知在经过 i 次循环后的残余应力为:

$$\sigma_{res, i} = \sigma_{res, 0} - \sigma_{res, 0} \left[a \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right)^n + b \right] [\ln(i + 1)]^m \quad (8)$$

通过式 (8), 可以获得经过 i 次循环的瞬态残余应力强度因子。

1.3 疲劳寿命预测模型

依据线弹性断裂力学，疲劳裂纹扩展模型可以采用Pairs公式，但是其没有考虑残余应力和应力比对疲劳裂纹扩展的影响。Forman公式基于Pairs公式考虑了应力比的影响。文献[13]又在Forman公式的基础上，提出有效应力强度因子 ΔK_{eff} 和有效应力强度因子比 R_{eff} ，得到了考虑残余应力的裂纹扩展速率。其公式为：

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^m}{(1 - R_{eff})} \quad (9)$$

$$\Delta K_{eff} = \begin{cases} (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) = \Delta K_s (K_{res} + K_{min} > 0); \\ K_{max} + K_{res} (K_{res} + K_{min} < 0). \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (11)$$

式中： C 、 m 分别为疲劳裂纹扩展速率材料参数； K_{max} 为外荷载应力强度因子最大值； K_{min} 为外荷载应力强度因子最小值。

在循环载荷不断加载和裂纹扩展中， ΔK_{eff} 和 K_{res} 是不断变化的。设定初始裂纹 a_0 后，裂纹的扩展中，按 $a/c=0.25$ 的半椭圆表面裂纹处理^[16]。通过MATLAB编制数值程序，按照式(1)~(11)求解经过 i 次循环后的 $\Delta K_{eff,i}$ 和 $K_{res,i}$ ，裂纹长度则可根据下式数值积分求出：

$$a_i = a_{i-1} + \frac{C(\Delta K_{eff,i})^m}{(1 - R_{eff,i})} \quad (12)$$

利用临界裂纹长度 a_c 作为循环中止条件，即可求得最终寿命 N 。其分析流程如图2所示：

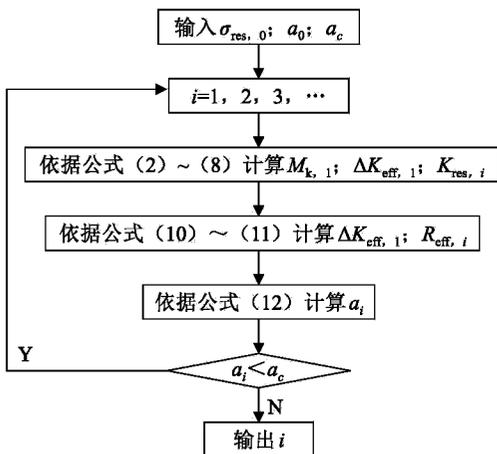


图2 疲劳寿命计算流程
Fig. 2 Calculation process of fatigue life

2 不等厚对接接头的疲劳寿命预测

2.1 焊接残余应力有限元分析

不等厚焊接接头尺寸如图3所示，其材料为Q345，在ABAQUS中选用C3D8R线性减缩积分单元建立有限元模型，如图4所示。

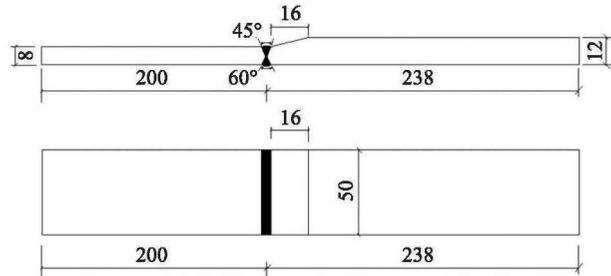


图3 焊接试件尺寸示意
Fig. 3. Size of welding specimen



图4 焊接模型网格划分示意
Fig. 4 Mesh generation of welding model

利用“生死单元法”模拟焊接过程，FORTRAN语言编制双椭球热源模型对接ABAQUS，实现了焊接模拟过程中的热源输入，初始环境温度设为20℃。焊缝表面残余应力分布如图5所示。从图5中可以看出， $y=25$ mm处从焊缝中心沿 x 轴的横向残余应力，与文献[8]中残余应力分布一致，验证了模型的有效性。此模型为薄板焊接，因此，认定残余应力沿厚度方向均匀分布。

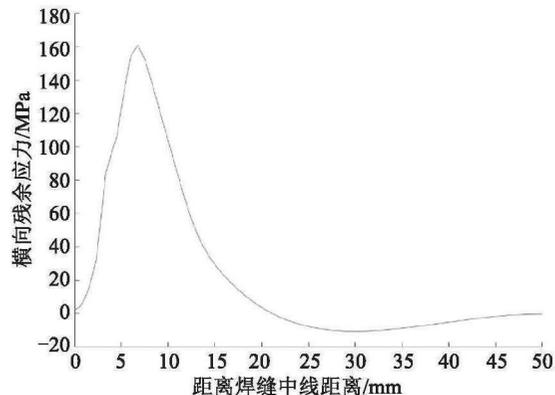


图5 焊缝表面残余应力分布
Fig. 5 Residual stress distribution on weld surface

2.2 疲劳寿命预测

由于焊趾处不可避免地存在小而尖锐的夹渣, 并作为裂纹萌生点, 金相检验表明: 这些缺陷的平均深度为0.15 mm^[17], 即使是高质量的焊缝, 其缺陷深度也可达0.1 mm左右, 因此, 取 $a_0=0.15$ mm。Q345的裂纹扩展材料常数取 $C=2.19 \times 10^{-13}$, $m=3.99$ ^[18]。通过编制数值程序可求得经过*i*次循环后的残余应力释放情况, 以及其对应的动态 $\Delta K_{eff,i}$ 、 $R_{eff,i}$ 和 a_i 。当裂纹长度达到 a_c 时, 认定其疲劳破坏断裂, 最终求得疲劳寿命*N*, 结果见表1。

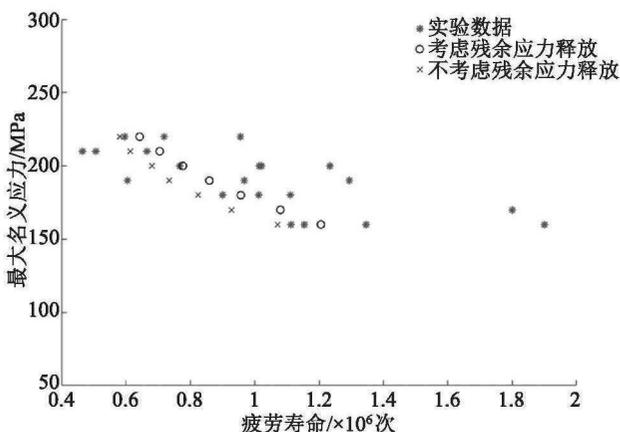
表1 不等厚对接接头的疲劳寿命预测结果

Table 1 Fatigue life prediction of unequal thickness butt joint

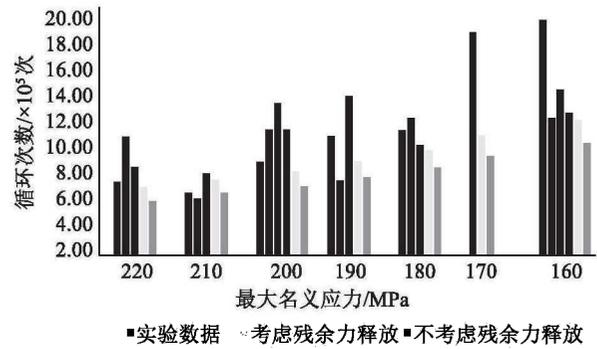
最大名义应力/MPa	考虑残余应力释放的疲劳寿命预测值/ $\times 10^4$ 次	不考虑残余应力释放的疲劳寿命预测值/ $\times 10^4$ 次	相对误差/%
220	55.47	45.66	17.69
210	61.68	50.75	17.72
200	68.61	56.58	17.53
190	76.61	63.30	17.37
180	85.80	71.12	17.11
170	96.75	80.28	17.02
160	109.56	91.16	16.79

3 实验对比分析

文献[19]对图3所示的不等厚对接接头进行疲劳试验, 总共26个试件, 从160~220 MPa分为7个荷载等级进行实验, 并保持应力比 $R=0.1$, 实验得到21个有效实验数据。实验结果与数值计算结果如图6所示。



(a) 不等厚对接接头疲劳实验结果



(b) 不同等级荷载下的疲劳寿命对比分析

图6 疲劳寿命预测与实验结果对比

Fig. 6 Comparison of fatigue life prediction and experimental results

从图6中可以看出, 由于疲劳试验的随机性和离散性, 个别试验数据与预测结果有一定差别。在考虑残余应力释放的情况下, 理论结果与试验结果基本吻合, 数据点多分布于试验数据点下方, 在保证精度的同时又有足够的安全储备。若不考虑残余应力释放, 则与试验结果相差较大, 对比考虑残余应力释放的情况, 对疲劳寿命的低估约16%以上。

4 结论

基于断裂力学理论, 考虑残余应力及加载过程中的应力释放对不等厚对接接头疲劳性能的影响, 建立了一种不等厚对接接头疲劳寿命的预测方法, 并将理论预测值与试验结果进行了对比, 得到结论为:

1) 只考虑残余应力而不考虑其释放, 会导致寿命预估结果偏于保守, 且与试验结果相差较大, 与考虑残余应力释放的结果对比, 其疲劳寿命会低估约16%以上。

2) 将本研究计算结果与疲劳试验结果进行对比, 在不同荷载水平下都具有较好的一致性, 且留有一定的安全储备, 该模型用于不等厚对接接头疲劳寿命预测是可靠的。

参考文献 (References)

[1] Guan D Q. A method of predicting the fatigue life curve for misaligned welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(4): 221-226.
 [2] 卞如冈, 崔维成, 万正权, 等. 焊接残余应力对疲劳寿命

- 影响的定量研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(7): 776-783. (BIAN Ru-gang, CUI Wei-cheng, WAN Zheng-quan, et al. A quantitative study on the effect of welding residual stresses on fatigue life[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7): 776-783. (in Chinese))
- [3] 管德清, 丁湘泽, 潘嫣然. 考虑残余应力影响的焊接结构疲劳总寿命预测方法[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2020, 17(3): 15-21. (GUAN De-qing, DING Xiang-ze, PAN Yan-ran. A method for predicting the total fatigue life of welded joints considering residual stress [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(3): 15-21. (in Chinese))
- [4] Webster G A, Ezeilo A N. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 375-383.
- [5] Torres M A S, Voorwald H J C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(8): 877-886.
- [6] Kim J C, Cheong S K, Noguchi H. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56: 114-122.
- [7] Yi H J, Lee Y J. Numerical analysis of welding residual stress relaxation in high-strength multilayer weldment under fatigue loads[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(4): 2167-2175.
- [8] Xie X F, Jiang W C, Luo Y, et al. A model to predict the relaxation of weld residual stress by cyclic load: Experimental and finite element modeling[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 95: 293-301.
- [9] Chin K S, Idapalapati S, Ardi D T. Thermal stress relaxation in shot peened and laser peened nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 59: 100-106.
- [10] 叶其根, 董玲萱. 长厚板焊接残余应力释放的研究[J]. 焊接学报, 1990, 11(3): 155-161. (YE Qi-gen, DONG Ling-xuan. Deliberation on residual stress release in butt welded long thick plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1990, 11(3): 155-161. (in Chinese))
- [11] Zhang Y H, Maddox S J. Fatigue life prediction for toe ground welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(7): 1124-1136.
- [12] 马亚飞, 欧阳清波, 汪国栋, 等. 基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 52-57. (MA Ya-fei, OUYANG Qing-bo, WANG Guo-dong, et al. Fatigue life prediction for suspender based on equivalent initial flaw size[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 52-57. (in Chinese))
- [13] Barsoum Z, Barsoum I. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LFM[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 449-467.
- [14] Newman J C Jr, Raju I S Jr. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15(1-2): 185-192.
- [15] Glinka G, Shen G. Universal features of weight functions for cracks in mode I[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1991, 40(6): 1135-1146.
- [16] Ibsø J B, Agerskov H. An analytical model for fatigue life prediction based on fracture mechanics and crack closure [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 37(3): 229-261.
- [17] Hobbacher A F. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 50-58.
- [18] Baik B, Yamada K, Ishikawa T. Fatigue crack propagation analysis for welded joint subjected to bending[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(5): 746-758.
- [19] 宗亮. 基于断裂力学的钢桥疲劳裂纹扩展与寿命评估方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. (ZONG Liang. Investigation on fatigue crack propagation and life prediction of steel bridges based on fracture mechanics [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))