

文章编号: 1000-8055(2008)06-1082-05

基于场强法的平板法兰角焊缝接头的 疲劳寿命估算方法

郭海丁, 武 奇

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 焊接接头疲劳损伤具有局部性特征. 基于应力场强法的基本思想, 通过对角焊接接头的场径分析, 通过对法兰角焊缝接头应力集中区的弹塑性有限元计算和应力场强数值求解, 得到了接头焊趾区局部应力场强. 在此基础上, 根据光滑试件的 $S-N$ 曲线, 最终得到了法兰角焊缝接头的疲劳寿命的一个估算值. 该结果与局部应力应变法相比, 疲劳寿命预测精度有较大提高, 与试验结果吻合良好.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 应力场强法; 疲劳损伤; 弹塑性有限元; 应力集中; 疲劳寿命

中图分类号: V231. 95

文献标识码: A

Way to evaluate fatigue life of fillet weld of plate with flange based on stress field intensity

GUO Hai-ding, WU Qi

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The fatigue behavior of welded joint has local damage characteristics. Based on stress field intensity (SFI) theory, the field diameter of fillet welded joint was analyzed, and the stress field intensity at the weld toe of fillet weld joint of flange was calculated using elastic-plastic finite element method. Based on the calculation results and the results of $S-N$ curve of smooth specimen of the same material, a fatigue life evaluation of flange fillet welded joint was obtained. The precision of fatigue life prediction with SFI method is better than the one with the local stress-strain method, and the result is much closer to the experimental result.

Key words: aerospace propulsion system; stress field intensity method;
fatigue life fatigue damage; elastic-plastic finite element method;
stress concentration

航空发动机结构中, 焊接结构已普遍得到广泛应用. 焊接接头除了存在化学成分、微观组织的不均匀性外, 其几何尺寸的不完整性也是影响其接头疲劳性能的主导因素之一. 航空结构往往在焊接部位发生疲劳破坏, 因此, 研究航空发动机焊接结构的疲劳性能、预测其疲劳寿命始终是航空发动机可靠性分析重点关注的问题之一.

现代材料的破坏机理和疲劳损伤的微观、细观与宏观研究的结果表明: 疲劳是一种局部损伤现象. 构件的疲劳行为主要由应力集中区域内材料的损伤状态所控制. 结构疲劳的发展主要取决于局部高应力或高应变区疲劳损伤的累积, 并与材料性能、应力集中区附近的应力梯度、应力、应变状态等因素有密切关系. 以往对焊接结构的疲

收稿日期: 2007-05-29; 修订日期: 2007-10-26

作者简介: 郭海丁(1958-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 主要从事结构强度和疲劳的研究.

疲劳寿命评估多以局部区域内的最大应力或最大应变作为参量(如局部应力应变法),而未考虑该点的应力梯度,这显然不够完备,也难以解释疲劳损伤机制^[1].场强法^[2]则另辟蹊径.该方法认为:应力集中区域存在一破坏区,该区域大小只与材料性能有关.控制该区域疲劳损伤的参数可用应力、应变场强度来表示.应力场强法可定量地考虑材料性能、最大应力、应力梯度和应力状态等与疲劳发展的有关参数,该方法特别适用于含缺口的结构疲劳分析.由于焊接接头-尤其是角焊接接头-应力集中现象明显,用此方法有望对分析航空发动机焊接部件的结构疲劳问题提供一个新途径^[2-3].

1 应力场强法的基本思想^[3]

应力场强法的主要思想基于:可在缺口根部一个区域 Ω (应力集中区) 中,定义有效应力参数—场强 σ_{Fi} —来反映缺口试件受载的严重程度.同时假定:若缺口根部的应力场强度变化历程与同材质光滑试件的应力场强度变化历程相同,则两者具有相同的寿命.与此类似,在焊接接头区,焊趾处几何形状发生突变,故可将焊趾看作一“缺口”.此缺口产生的应力集中使得疲劳裂纹多发源于此.如图 1(a)所示:通常 P 点处应力值最大,而图 1(b) Q 点处应力对 P 点峰值应力也具有一定

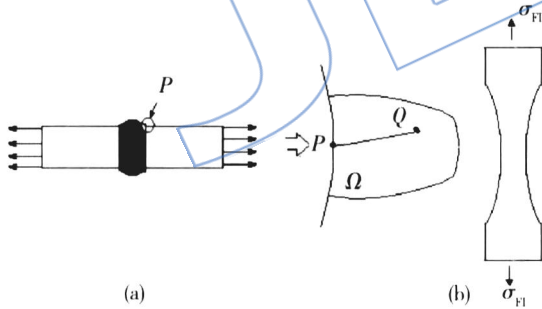


图 1 焊趾处应力场强模型

Fig. 1 Model of stress field intensity at weld toe

的贡献.事实上,焊趾处的应力集中和缺口件的应力集中都是由于几何形状上的突变导致,二者形成应力集中的机理相似.因此用场强法来评价焊接接头焊趾处疲劳载荷的苛刻程度具有合理性.本文将针对法兰角焊接接头展开研究,角焊接接头如图 2 所示.应力场强计算公式如下:

$$\sigma_{Fi} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} (\sigma_j) \phi(r) dv \quad (1)$$

式中 σ_{Fi} 为应力集中域场强; Ω 为疲劳损伤区; V 为 Ω 的体积; $f(\sigma_j)$ 为破坏应力函数; $\phi(r)$ 为权函

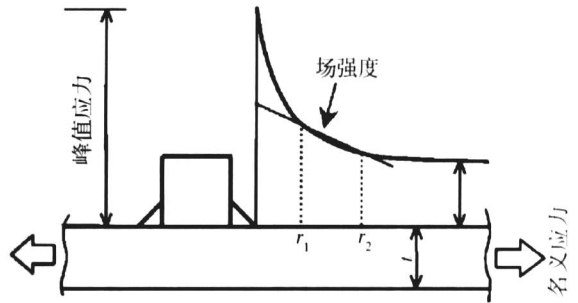


图 2 场强法示意图

Fig. 2 Sketch of stress field intensity

数,在物理上表征 Q 点处的应力对峰值应力处疲劳开裂的贡献. r 为该点到峰值应力处的距离.对于平面问题,上式可写为

$$\sigma_{Fi} = \frac{1}{S} \int_{\Omega} (\sigma_j) \phi(r) ds \quad (2)$$

式中 S 为区域 D 面积.对于光滑试件,应力集中系数 $K_t = 1$,因此 $\phi(r) = 1$.光滑试件受均布载荷,可认为应力处处相等,所以破坏应力函数 $f(\sigma_j)$ 为常数.按场强法定义,光滑试件的场强为

$$\sigma_{Fi} = f(\sigma_j) = \text{常数} \quad (3)$$

而光滑试件的破坏准则是 $\sigma = \sigma_{Fi}$.对于应力集中试件,破坏准则为

$$\sigma_{Fi} = f(\sigma_j) \geq \sigma \quad (4)$$

其中 σ 为光滑试件破坏应力,即当含应力集中试件的场强 σ_{Fi} 大于或等于同种材料的光滑试件的场强(σ)时,试件破坏.由此可见,应力场强法理论模型包含了影响材料强度的多种因素,给出了一个定量描述含“缺口”构件应力强度的参数 σ_{Fi} ,将微观应力分布与宏观应力场有机地结合起来.

2 应力场强法的计算

对于实际工程问题, $f(\sigma_j)$ 和 $\phi(r)$ 均难以用显式解析式表达,只能用数值求解来实现.这里需要注意:

1) 材料不同,适用的强度理论也不同,因而应力函数 $f(\sigma_j)$ 的选取也不同.在比例加载下,对于碳钢、铝合金、钛合金等宏观各向同性韧性金属材料, $f(\sigma_j)$ 按 Von Mises 等效应力公式计算.

2) 权函数 $\phi(r)$ 在物理上表征 Q 点处应力对 $|r|$ 处峰值应力的贡献.从疲劳破坏的机理看,疲劳损伤的累积不仅与损伤域中的最大应力应变有关,还和某一范围内的应力应变场有关.

$\phi(r)$ 应满足以下 3 个条件:

① $0 \leq \phi(r) \leq 1$, 且 $\phi(r)$ 是关于 $|r|$ 的广义单调函数;

② $\phi(0) = 1$, 应力集中域最大应力处对疲劳裂纹萌生的贡献最大;

③当应力梯度 $G = 0$ 时, $\phi(r) = 1$. 光滑试件或全屈服试件在破坏区内各处对疲劳裂纹萌生的贡献相同.

$\phi(r)$ 的具体形式有多种. $\phi(r)$ 应与距离 $|r|$ 和方向 θ 有关, 此处取

$$\phi(r) = 1 - cr(1 + \sin \theta)$$

(5)

c 为与应力梯度有关的系数, 可取相对应力梯度

$$c = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$$

(6)

式中 $\sigma_{\max}$ 为焊趾根部处最大应力, σ 为 r 处的等效应力.

3) 应力集中破坏区 Ω 的大小和形状与破坏机理有关. 基于这种思想场强法认为: 疲劳破坏区只与材料性能有关. 但是要將疲劳损伤域的大小和形状与疲劳破坏机制定量的联系起来, 目前尚有困难. 从宏观力学的角度, 可假定破坏区是以应力最大值点为圆心的一个圆 (对空间问题则为一圆球), 其半径称为“场径”, 可通过数字试验拟合来确定 (本文略).

3 含法兰焊接接头疲劳寿命计算

计算模型如图 3 所示, 为焊接法兰平板模型. 材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 法兰为锻件, 板厚 2.2 mm, 试件长: 300 mm, 试验段宽: 130 mm. 法兰和平板采用氩弧焊接, 成角接.

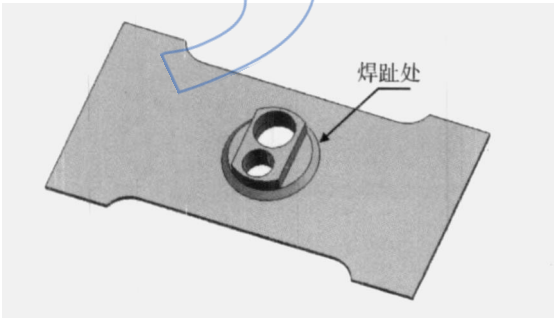


图 3 平板法兰焊接模型
Fig. 3 Model of welded plate and flange

3.1 场径计算

场径计算将直接影响力场强的计算结果. 考虑场径大小与载荷无关, 场径计算所需基本数据可以采用同种材料的同类焊缝试验结果. 在此选用文献[4]试验结果. 试件为十字接头 (角接). 材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板材^[4], 板厚 8 mm. 用氩弧焊焊接, 如图 4 所示. 其尺寸为: 板厚: $t = 4.0$ mm, 焊缝宽度: $B = 10.5$ mm.

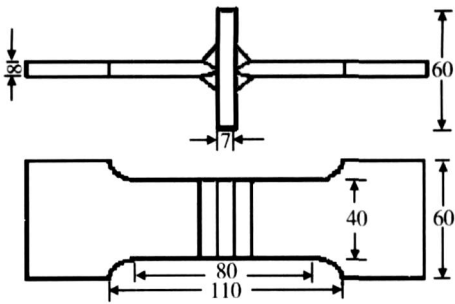


图 4 十字焊接接头试样示意图 (单位: mm)
Fig. 4 Sketch of specimen of cross weld
(Unit: mm)

场强计算利用有限元法和公式 (2). 考虑对称性, 取 1/4 模型进行计算, 所需试验数据取自文献 [4], 见表 1. 计算中, 考虑到不锈钢焊接接头各区力学性能无明显变化, 暂未考虑焊接接头力学性能变化影响.

对表 1 所给出的每一组数据, 分别按假定的场径及权函数 (式 (5)) 计算其场强 σ_{E1} . 对其计算值与试验值的误差按最小二乘法求其累积误差, 以其累积误差最小的那一组值的场径作为该材料的场径期望值. 计算结果为: 场径 $D = 0.48$ mm. 该值作为这种材料的场径均值. 为检验计算结果, 将计算得到的场径计算结果代入式 (2) 计算其它光滑试件场强 (最大载荷), 结果对比如表 2.

表 1 1Cr18Ni9Ti 材料的试验数据^[4]

Table 1 Experiment results of 1Cr18Ni9Ti steel

$N / 10^6$	$\sigma_s (K_T = 1) / \text{MPa}$	$\sigma_s (K_T = 2, 10) / \text{MPa}$
0.44	292	200
1.0	279	180
1.9	268	150

表 2 光滑试件场强计算值与试验值 (最大载荷) 对比
Table 2 Comparison of SFI based on calculation and test for smooth specimen

试验值/MPa	计算的 σ_{E1} /MPa	误差 / %
291	301.8	3.71
279	272.4	2.4
268	231.0	- 13.8

*注: 表中的误差 = (计算值 - 试验值) / 试验值.

3.2 含法兰焊接接头疲劳寿命计算及与试验对比
模型如图 3. 计算分三步进行:

表 3 不同计算方法及试验所得疲劳寿命对比
Table 3 Comparison of fatigue life based on calculation and experiment

计算方法	危险部位应力/ MPa	计算寿命 N_c	试验寿命 N_e	N_c / N_a
局部应力应变法	372.98	2 705	$N_{min} = 6\ 305$ $N_{max} = 15\ 200$	0.239
场强法	349.5	6 109	$N_a = 11\ 319$	0.540

注: N_a 为平均寿命.

1) 通过有限元粗算,找到焊缝处的危险点.
2) 采用应力场强法对焊接试件危险点区域的应力场强进行计算;图 5 为该试件的有限元模型并在焊趾处局部放大.注意到场径值在 1 mm 以下,因此划分网格数量巨大,可考虑采用有限元子模型结构以在不增加整个模型复杂性和计算量的前提下获得结构中特定区域更为准确的结果.

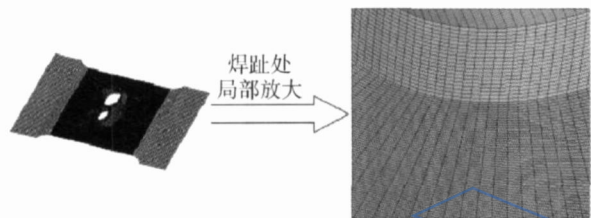


图 5 法兰焊接接头有限元模型
Fig.5 Finite element method model of welded flange

3) 将 σ_{F1} 代入光滑试件的 S-N 曲线可以得到焊接接头的疲劳寿命.

考虑实际模型在应力集中区域应力可能超过屈服应力,应力场采用增量弹塑性有限元法分析.材料本构关系采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢循环 σ - ε 曲线.场径取 $D = 0.48\text{ mm}$ (如前).计算结果将与局部应变法计算结果和试验结果进行对比.试验采用载荷控制.应力比 $R = 0.1$.最大名义应力 σ_{max} 为 310 MPa,共 7 件.

表 3 为依据场强法的法兰焊接接头疲劳寿命计算结果与局部应变法计算结果和试验结果对比.

3.3 分析

1) 从表 3 可以看出:应用场强法计算含法兰焊接接头疲劳寿命精度与局部应力应变法相比有较明显提高.究其原因,是场强法在考虑了应力梯度变化后,其“疲劳载荷强度”控制参量低于局部应力应变法.而局部应力应变法显然给出了更加苛刻的“疲劳载荷强度”控制参量,因而寿命计算结果更加保守.

2) 应力场强法对法兰焊接结构的疲劳循环寿命计算结果低于并十分接近模型试验件最小循

环寿命,表明其估算结果仍具有一定的安全性,在此类结构疲劳寿命估算方面能给出更加符合实际情况的结果.

3) 由于场强计算需要在结构有限元分析的基础上进行数值积分,故计算工作量较大.但由于在场强计算中,场径的试验数值拟合只需要针对较为简单的结构进行(如本文中用十字角焊缝计算场径),因此可以降低试验的难度,减少试验费用.

4) 应力场强法在用于结构低周疲劳分析时,应注意由于计算只考虑结构的应力梯度变化,因此对于屈服范围较大的情形,由于“场径”范围内的应力梯度会明显降低,由此可能导致场强计算结果偏低.由此得到的疲劳寿命估算结果可能会偏大,此时可考虑用应变作为场强评估量.

4 结 论

1) 对于应力集中效应较明显的焊接结构疲劳寿命预测,应力场强法可以给出更为适合的估算值.由于此方法综合考虑了应力梯度对疲劳寿命计算结果的影响,其计算结果与局部应力应变法相比与试验结果更加接近.

2) 用场强法进行疲劳寿命计算可尽量避免经验公式引入的误差,其疲劳寿命估算结果具有更高的精度.

3) 用场强法进行疲劳寿命计算,所需试验数据可以通过相对简单的试验件获得,因而可以降低试验代价.

参考文献:

[1] Janosch J J ,Debiez S. Influence of the shape of undercut on the fatigue strength of fillet welded assemblies application of the local approach [J]. Welding in the World,1998,41: 350-360.
[2] 姚卫星.金属材料疲劳行为的应力场强法描述[J].固体力学学报,1997,18(1):38-47.
YAO Weixing. The descriptions for fatigue behaviors of metals by stress field intensity approach[J]. Acta Mechanica Solida Sinica,1997,18(1):38-47.

[3] Yang X H ,Chen Y L. Fatigue life calculation with Stress field intensity method[C]// Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress. Beijing :1999 ,2 :865-870.

[4] 吴冰,杨新岐,贾法勇,等. 不锈钢焊接接头疲劳强度试验研究[J]. 机械强度,2004 ,26(3) :321-325.

WU Bing , YANG Xinqi ,JIA Fayong ,et al. Experimental investigation on the fatigue resistance of stainless steel welded joints[J]. Journal of Mechanical Strength , 2004 , 26(3) :321-325.

[5] 王立心. 某发动机燃烧室外套寿命预测[D]. 南京:南京航空航天大学,2003.

WANG Lixin. Fatigue life evaluation of a aero-engine case [D]. Nanjing: Nanjing University of Astronautics and Aeronautics , 2003.

[6] 管德清,易伟建. 焊接钢结构疲劳强度预测的应力场强模型研究[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版),2004 ,19(3) :59-62.

GUAN Deqing , YI Weijian. Research of Stress field intensity model on the fatigue strength prediction for welded steel structures[J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science) , 2004 , 19(3) : 59-62.

