

考虑显微组织影响的焊接接头疲劳 裂纹扩展寿命估算

韩连元 朱安国 查世锦

(郑州工学院)(核工业第五研究设计院)(郑州大学)

摘 要: 本文讨论了焊接头的微观金相组织及其对疲劳裂纹生长率的影响,用标准试样的裂纹扩展速率数据,考虑显微组织的影响建立了疲劳裂纹在不同区域扩展的疲劳模型,并用这些模型编制计算机程序估算了裂纹的扩展寿命,与实验值进行了比较。

关键词: 焊接, 金相组织, 疲劳模型, 寿命估算

中图分类号: O346

研究人员常常根据焊接构件的结构、几何形状、焊缝处的应力场,以不同类型的接头模拟焊接构件的抗疲劳性能外,还可以对焊件的寿命估算提供一种有效的方法。常规的估算是众所周知的 Miner 累积损伤法则,但由于焊接缺陷的大量存在,使得 S-N 曲线具有很大的分散性,因此用 Miner 法则估算焊接件的疲劳寿命存在很大的误差。随着断裂力学、计算机的广泛应用,用线弹性断裂力学来进行焊接结构的疲劳寿命估算已成为可能。研究成果表明:断裂力学的寿命估算既方便又可靠。

由于在焊件中不可避免地存在夹渣、切口、咬边、微裂纹等缺陷,因此接头的疲劳裂纹萌生寿命相对较短,而扩展寿命占有相当的比例,所以裂纹扩展寿命估算具有十分重要的意义。

用断裂力学方法进行疲劳裂纹扩展寿命估算必须解决下述问题:

- (1) 考虑各种因素,建立与接头相应的断裂力学估算模型;
- (2) 解决模型中所涉及的力学参数和材料性能参数。

研究成果表明:应力强度因子范围能较好地描述疲劳裂纹扩展速率 da/dN , 文献[1]概括了几种常见的经验疲劳模型,在这些模型中,除了 c 、 m 等参数由实验确定外, ΔK 是一个非常重要的参数,同时 ΔK 与材料的显微组织密切相关。

在人们做过的工作中,接头的寿命估算,往往把裂纹的生长路径看成是同材质的,但由于焊接时高温,以及焊缝材料与母材的机械性能的差异,因而这样来估算是切实际的。

* 收稿日期: 1990-12-22

** 河南省自然科学基金资助项目

的。本文结合河南省自然科学基金项目:《十字焊接接头的疲劳试验研究》,在此基础上,考虑显微组织对疲劳寿命的影响,建立了疲劳裂纹在不同区域内扩展的疲劳模型,并用这些模型来估算寿命并与实验值进行了比较。

1 接头的显微分析

作者拍摄了两种试样经抛光浸蚀后的纵截面照片,可以看到有三个区域,1)16Mn 母材区;2)焊缝金属区;3)热影响区。三个区域具有不同的显微组织、残余应力、缺陷和机械性能。焊缝金属与铸造金属相似,具有明显的各向异性;热影响区由母体金属转变而来,这是由于焊接过程中产生高温,使母体金属再结晶,因此该区的特性肯定不同于原始母体的特性。

试验结果表明:当疲劳裂纹在焊接处起始时,裂纹在焊缝中扩展至脆断;或者在焊趾处萌生,向热影响区扩展,穿过母体金属至脆断,疲劳裂纹均为 I 型裂纹。

由于各区的组织和机械性能不同,导致了疲劳裂纹在各区(图 3)的生长行为有所不同,特别是对裂纹扩展速率有不同的影响。为此我们提取了两种接头试样进行显微金相组织检查,在焊缝区,外层焊缝的性能比焊缝里层的性能要差些,这是由于末道焊缝相当于铸造金属,晶粒粗大,主要是呈柱状和针状的铁素体和贝氏体及少量的珠光体,而层间区焊接在前,以后的焊接高温实际上对它进行了一次高温正火,因而晶粒细化均匀,除了铁素体外,还有少量贝氏体和珠光体,在焊缝中还有分散分布的小夹渣。

母材的组织呈典型的组织,主要是带状分布的铁素体和珠光体,基体上有非金属夹杂物分布,这种组织现象使母材的性能呈明显的各向异性,热影响区由于离焊缝区的远近不一样,因而受影响的程度不一样,离焊缝最近的为过热区,晶粒粗大,性能差;热影响区为正火区,晶粒细小,均匀,性能比较好,离焊缝最远为不完全正火区,这里已发生部分相变,其组织为经相变后的细小铁素体和珠光体及未相变的较大块铁素体(图 4(a)、(b))。

当疲劳裂纹在上述不同区域扩展时,由于组织和性能的影响,因而呈现出不同的扩展速率。

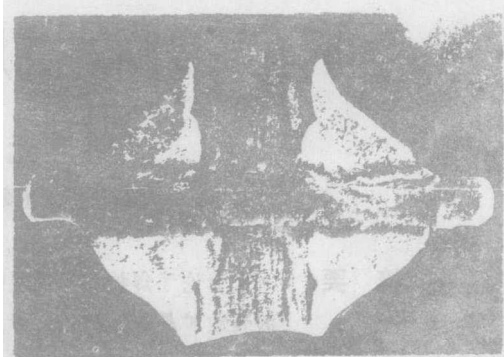


图 1 不开切口试样(WT08)

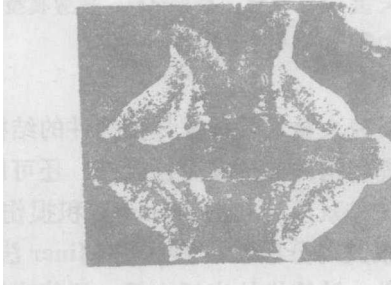


图 2 开切口试样(WT09)

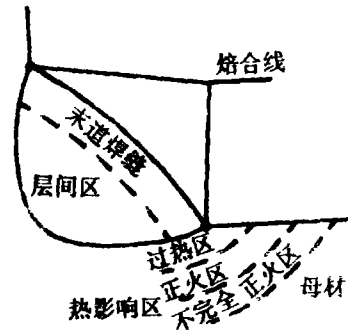


图 3 各区分布图

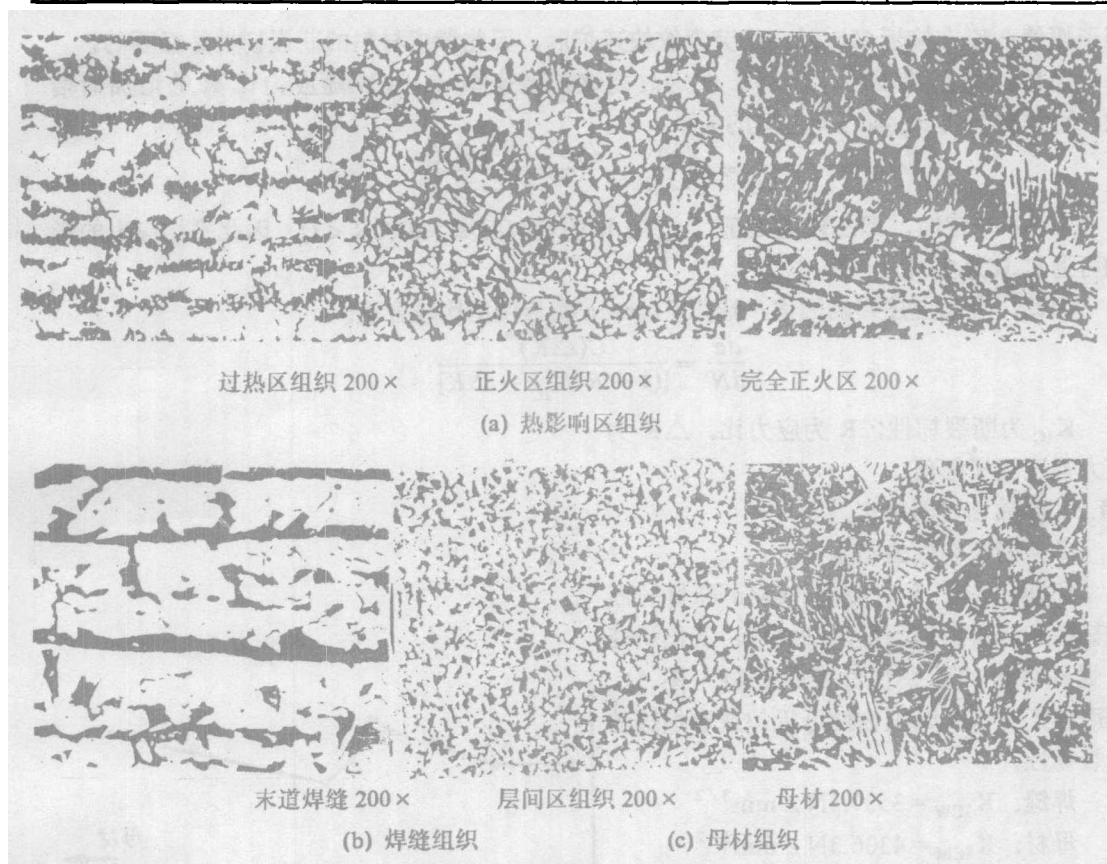


图4 各区显微金相组织

2 考虑显微组织影响的疲劳裂纹扩展寿命估算

焊件的疲劳寿命估算, 一般有两种不同的方法: 一是等效应力法, 其思想是假设焊件中已存在某种相当尺寸的初始裂纹, 因此可以忽略疲劳裂纹起始寿命, 裂纹扩展寿命即为焊件的总寿命。扩展寿命用 Paris 疲劳模型估算; 二是两种裂纹起始寿命和扩展寿命两部分, 疲劳裂纹起始寿命定义为出现 0.20~0.25mm 深的疲劳裂纹所经历的循环次数, 而扩展寿命则选用合适的模型进行估算。焊接质量高的焊件, 由于在焊趾或焊缝内部未形成可检测的类裂纹缺陷, 采用两阶段法是合理的, 本试验观测记录了疲劳裂纹起始寿命 N_i 这部分寿命相对总寿较短, 因而只进行裂纹扩展寿命估算就可以了。

2.1 疲劳模型的建立

2.1.1 模型的选取

实验表明: 从焊根处起始的裂纹, 穿过焊缝金属扩展至脆断; 在焊趾处起始的裂纹穿过热影响区, 向母材扩展至另一侧脆断。前面我们讨论了焊缝金属、热影响区及母材的金相组织, 这三个区域的组织与母材属同一材质, 因而在化学成份上无显著差异, 而焊缝的化学成份则与母材不同, 因而它们的机械性能有一定的差别。对疲劳裂纹扩展行为影响较大的是材料的断裂韧性, 断裂韧性不仅对裂纹扩展速率有一定影响, 同时也使得应力强度

因子幅值 ΔK 在接近 K_{IC} 时,疲劳裂纹快速扩展,因此考虑材料的断裂韧性是必要的。

已做过的试验表明,当 ΔK 一定时裂纹扩展速率 da/dN 随应力比 R 的增加而增大,可以推导出 σ_m 与 ΔR 之间的关系。

$$\sigma_m = \frac{\Delta\sigma}{1-R} - \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{1+R}{1-R} \frac{\Delta\sigma}{2}$$

当 $\Delta\sigma$ 一定时,即 ΔK 为定值, σ_m 随 R 的增大而增大($0 < R < 1$),因此平均应力的影响可通过 R 来实现。

因此,考虑上述影响因素,选用 Forman 疲劳模型比较合理:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{[(1-R)K_{IC} - \Delta K]}$$

K_{IC} 为断裂韧性; R 为应力比, ΔK 为应力强度因子幅值。

2.1.2 参数韧性的确定

① 断裂韧性的确定

郑州机械研究所测得 16Mn 母材的断裂韧性和焊缝金属的断裂韧性值,我们研究了焊件各区的断裂韧性变化趋势(图 5),因而热影响区的断裂韧性可近似选取焊缝的断裂韧性。

焊缝: $K_{ICW} = 3537.1 \text{ N/mm}^{3/2}$

母材: $K_{ICM} = 4306.3 \text{ N/mm}^{3/2}$

热影响区: $K_{IC} = 3537.1 \text{ N/mm}^{3/2}$

② 材料常数 c 、 m 的确定

材料常数 c 、 m 值常用裂纹扩展速率 da/dN 和应力强度因子幅值 ΔK 的对数线性关系用最小二乘法线性拟合获得。将 Forman 模型进行处理:

$$\ln \left(\frac{da}{dN} \right)^* = \ln \left(\frac{da}{dN} \right) [(1-R)K_{IC} - \Delta K] \quad \text{则有}$$

$$\left(\frac{da}{dN} \right)^* = c(\Delta K)^* \quad \text{取对数有}$$

$$\log \left(\frac{da}{dN} \right)^* = \log c + m \log(\Delta K)$$

用标准三点弯曲试样测得 16Mn 母材、焊缝、热影响区的 $(da/dN)_i$ 值, ΔK 由文献[2]给出,用这些数据最小二乘法线性回归,求得 c 、 m 值见表 1:

表 1 各区 c 、 m 值

	c	m
焊缝区	5.5726×10	3.4239
热影响区	6.3856×10	4.5190
母材区	1.6296×10	2.2725

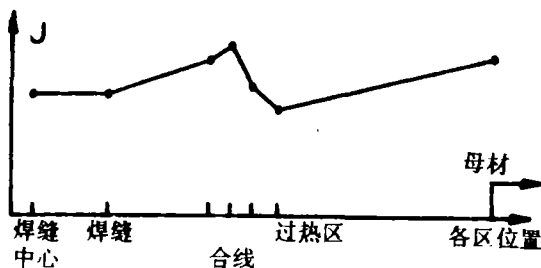


图 5 焊缝各区断裂韧性变化趋势

比较三点弯曲试样组织与本试验接头的组织, 二者无论是母材、热影响区和焊缝的组织十分接近, 除此之外, 机械性能也十分接近, 因而用三点弯曲试样求得的疲劳模型完全可以运用到焊接头的寿命估算中。

焊缝金属的疲劳等效扩展速率 $(da/dN)^*$ > 热影响区的等效扩展速率 $(da/dN)^*$ > 母材的扩展速率 $(da/dN)^*$, 除了这三个区域的断裂韧性不同外, 微观组织也是一个重要的影响因素。

焊缝金属和热影响区的断裂韧性相差不大, 因而扩展速率差别不十分明显, 而母材的断裂韧性比焊缝和热影响区的断裂性高出许多, 因而等效裂纹扩展速率明显比其它两个区域要低, 焊缝组织的不均匀分布, 晶粒粗大, 质点较脆的贝氏体、珠光体和少量的马氏体, 以及在基体上分散分布的夹渣存在, 使疲劳裂纹穿过这些硬质点时, 发生微小脆断, 扩展速率变快, 当 ΔK 增加时, 扩展速率增加较快, 所以在裂纹扩展的第二阶段, 分散性较大; 热影响区只是一个被动受影响的区域, 其结果是使母材受到一次受热不均匀的正火, 性能得到改善; 母材的断裂韧性较高, 含有大量的大块铁素体, 均匀的“织物”组织使裂纹扩展时不会发生扩展速率突变现象, 因而分散性小。

用一组数据采用 Forman 模型进行寿命估算, 计算结果表明, 断裂韧性 K_{IC} 在小范围变化时, 其寿命计算结果变化不大, 当 K_{IC} 在 $K_{IC} \pm 10\% K_{IC}$ 的范围内变化时, 其寿命误差不超过 10%, 这也弥补了热影响区断裂韧性近似选取而带来的缺陷。

2.2 疲劳裂纹扩展寿命估算

2.2.1 估算说明

疲劳裂纹扩展寿命的实验值为:

$$N_{fc} = N_f - N_i$$

N_f : 总寿命; N_i 起始寿命; 均由实验测得。

扩展寿命计算值由下式计算:

$$N_{fc} = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\frac{c(\Delta K)^m}{(1-R)K_{IC}\Delta K}}$$

在不同的区域, 参数 c 、 m 、 K_{IC} 取相应不同的数值。积分上限取断口上裂纹长度 a_f , 焊根处破坏, $a_f = a_p + c/2$, c 为未焊合长度。疲劳裂纹起始长度为 a_i , 焊趾处定义为 0.25mm, 焊根处为 $a_f - c/2$ 。

① 焊根破坏: ΔK 由文献[3][4]给出:

$$\Delta K = \prod_{i=1}^n \alpha_i \Delta K'$$

α_i 为修正系数。

② 焊趾破坏: ΔK 由文献[4]给出:

$$\Delta K = \prod_{i=1}^n \alpha_i \Delta \sigma (\pi a)^{m/4}$$

a 为裂纹长度; t 为板厚; σ 为取板中应力。

考虑微观组织的影响, 寿命估算的计算式须以分段积分表示:

$$N_{\pi} = \int_{a_i}^{a_H} \frac{da}{f(\sigma, a, c)} = \int_{a_i}^{a_H} \frac{da}{f_H(\sigma, a, c)} + \int_{a_H}^{a_M + a_H} \frac{da}{f_M(\sigma, a, c)} \\ + \int_{a_M + a_H}^{a_i} \frac{da}{f_H(\sigma, a, c)}$$

f_H, f_M 分别为热影响区和母材的裂纹扩展速率表达式, a_H, a_M 分别为热影响区和母材的宽度, 统计测量结果为:

不开剖口接头: $a_H = 2.804\text{mm}$

开剖口接头: $a_H = 3.453\text{mm}$

2.2.2 估算结果

编制数值积分程序, 利用计算机进行寿命估算, 计算结果与实验结果列于表 2 和表 3 中。

2.3 简要讨论

2.3.1 从图 6 可以看出, 大部分估算点落在分散带内, 估算结果合理, 因而所选取的疲劳模型是合理的。

2.3.2 图中大部分估算点

均落在分散带的下区, 估算值偏大, 这是由于在疲劳裂纹起始寿命中包含了一部分裂纹扩展寿命, 因而扩展寿命的实验值偏短。

2.3.3 计算时有些尺寸按试样图纸选取, 但实际上每个接头的尺寸都各不相同, 与图纸尺寸存在很大差异, 特别是焊缝尺寸, 差别显著, 造成数据分散。

2.3.4 由于每个区域内部组织和性能均有差异, 但计算时把每个区域都看成理想化、均匀的区域, 这是不切实际的。

2.3.5 三个区域内分散分布的夹渣、夹杂物等缺陷加速了裂纹扩展, 而缩孔等缺陷则阻滞了裂纹扩展, 因而有些寿命偏长或偏短。

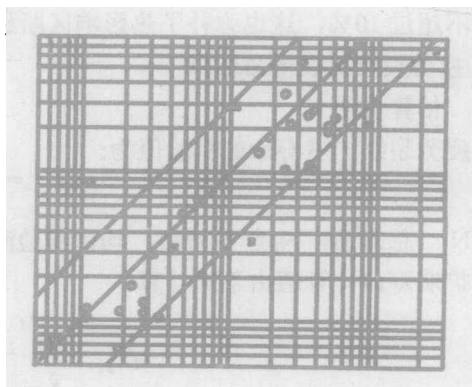


图 6 裂纹扩展寿命计算值与实验值比较

表 2 焊根处破坏的裂纹扩展寿命估算结果

试样号	$\Delta\sigma$ (MPa)	R	C(mm)	$a_1=c/2$	a_p (mm)	N_i (次) $\times 10^4$	N_{ii} (次) $\times 10^4$	N_{pe} (次) $\times 10^4$	N_{pe} (次) $\times 10^4$
WT-08-15-8	220	0.1	18.34	9.17	8.94	2.67	4.11	1.44	1.22
WT-08-15-9	140	0.1	17.66	8.83	12.12	18.16	25.89	7.73	7.69
WT-08-15-7	100	0.1	17.38	8.69	11.92	151.34	173.06	21.72	37.17
WT-08-15-5	85	0.105	17.72	8.86	9.32	52.87	106.26	47.39	30.16
WT-08-15-11	75	0.107	18.52	9.26	8.68	41.73	65.75	24.02	62.01
WT-08-15-1	110	0.1	15.42	7.71	9.92	23.86	34.17	10.31	24.62
WT-08-15-4	90	0.1	18.10	9.05	10.48	32.35	44.62	12.27	35.46
WT-08-15-17	90	0.1	16.58	8.29	13.22	23.13	42.78	19.65	44.54
WT-08-15-18	90	0.1	16.32	8.16	12.84	46.16	69.10	22.94	46.09
WT-08-15-23	90	0.1	17.62	8.81	12.98	35.81	47.79	11.98	38.58
WT-08-15-19	198	0.1	17.96	8.98	8.98	11.95	3.22	1.27	1.94
WT-08-15-32	180	0.1	16.22	8.11	4.42	2.92	3.75	1.46	2.75
WT-08-15-13	180	0.1	18.88	9.44	8.52	6.10	8.93	2.83	2.42
WT-08-15-26	180	0.1	16.38	8.19	9.62	3.83	5.96	2.13	3.52
WT-08-15-21	90	0.1	17.70	8.85	13.32	39.91	69.55	29.64	38.20
WT-08-15-25	180	0.1	18.66	8.33	12.20	4.82	7.64	2.82	3.48
WT-08-15-37	180	0.1	16.64	9.32	9.84	7.64	11.15	3.57	2.56
WT-08-15-29	180	0.1	18.56	9.28	4.02	2.53	3.19	0.66	1.89
WT-09-17	150	0.1	5.80	2.90	9.46	18.96	25.38	6.42	5.85
WT-09-19	230	0.1	8.06	4.30	7.00	1.72	2.46	0.74	0.60
WT-09-13	90	0.1	6.20	3.10	9.46	76.93	92.31	15.38	32.57
WT-09-9	190	0.1	8.32	4.16	6.40	2.41	3.54	1.13	1.26
WT-09-10	90	0.1	8.42	4.21	9.72	72.69	90.09	17.40	19.30
WT-09-18	190	0.1	7.84	3.92	3.62	17.89	26.50	8.61	1.19
WT-09-4	190	0.1	5.04	2.52	5.34	11.41	12.66	1.25	2.85
WT-09-11	95	0.1	7.68	3.84	6.52	29.85	46.55	16.70	17.20

表 3 焊趾处破坏的裂纹扩展寿命估算结果

试样号	$\Delta\sigma$ (MPa)	R	C(mm)	a_i (mm)	a_p (mm)	N_i (次) $\times 10^4$	N_r (次) $\times 10^4$	N_{pe} (次) $\times 10^4$	N_{pe} (次) $\times 10^4$
WT08-15-10	90	0.1	13.32	0.25	17.60	9.229	15.354	60.6	12.612
WT08-15-12	90	0.1	14.62	0.25	15.70	5.008	7.286	22.78	8.346
WT09-6	190	0.1	5.62	0.25	12.46	1.031	1.346	3.15	0.517
WT09-1	110	0.1	8.52	0.25	15.32	2.968	4.247	1.278	1.072
WT09-15	95	0.1	6.08	0.25	16.34	6.022	6.38	3.58	1.431
WT09-5	190	0.1	5.92	0.25	6.10	0.452	0.546	0.94	0.286
WT09-16	190	0.1	6.62	0.25	7.82	0.628	0.918	2.90	0.319

3 结论

3.1 研究讨论了焊接接头的显微组织和它们对疲劳裂纹生长速度的影响。

3.2 用标准试样的裂纹扩展速率数据, 考虑微观组织的影响建立了疲劳裂纹在不同区域扩展的疲劳模型。

3.3 用这些模型估算了疲劳裂纹扩展寿命, 与实验数据比较, 结果合理, 因此本文所采取的方法和模型是合理和可靠的。

参 考 文 献

- (1) 孙学伟. 断裂力学在裂纹扩展研究中的应用. 机械强度. No. 4, P41~43, 1986.
- (2) 高庆等主编. 工程断裂力学. 重庆大学出版社. P61. 1986年8月.
- (3) R. H. Frank. The fatigue strength of fillet welded connection, PhD. Thesis, Lehigh University. Oct. 1971.
- (4) 韩连元. 朱国安. 十字焊接接头应力强度因子表达式研究. 中国农机学报. Vol.22, 1991年第3期. P91~96.

The Prediction of the Welded Joint's Fatigue Crack Propagation Life Under a Varics of Metaatllographics Fabrics

Han Lianyuan Zhu an guo Cha Sijun

(Zhengzhou Institue of Technology)(The 5th Reserch Institue)(Zhengzhou University)

Abstract: In this paper, the metallographic fabric of the fatigue Crack growth were discussed. The fatigue mode which fatigue crack grow through the various ranges were established, by using the fatigue crack growth, the crack propagation life was estimated, and compared with the experimented values.

Keywords: Welding joint, metallographics, ftigue mode, life prediction