

用局部法评定焊接接头的疲劳性能^{*}

吴 冰, 杨新岐, 贾法勇, 霍立兴

(天津大学 材料科学与工程学院 天津 300072)

摘 要: 采用 16Mn 钢非承载十字焊接接头疲劳试验结果对使用 Dang Van 准则的疲劳评定局部方法进行了研究。结果表明, 有限元分析中应力集中区单元尺寸对局部参量计算有明显影响, 为获得比较合理的预测结果需对焊趾应力集中区所划分的单元尺寸限定, 当接头焊趾半径在 0.15~0.8 mm 变化时应选择最小单元尺寸 0.32~0.62 mm 计算局部参量; 在此基础上 Dang Van 准则可以对焊接接头做出合理的评定, 但 Dang Van 建议的 β 值偏安全。此外, 通过计算发现焊趾半径只影响局部很小区域(约 0.5 mm 内)的应力集中分布, 在某一深度(约 0.5 mm)后存在稳定的应力集中, 因而建议采用距应力集中区最大应力处某一深度的应力参数计算 Dang Van 局部参量可能更为合理, 这将减小局部参数对焊趾半径及单元尺寸的依赖性。

关键词: 焊接接头; Dang Van 准则; 局部法; 疲劳评定; 单元尺寸

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)06-51-04



吴 冰

0 序 言

焊接接头附近始终是焊接结构的薄弱区域, 这是因为其应力集中和较差的材料性能的影响。因此焊接接头的疲劳评定是工程界普遍关注的问题^[1]。传统的焊接接头疲劳评定方法(也称名义应力法)存在着局限性, 主要是基于名义应力的 S-N 曲线直接依赖于焊接接头形式和载荷类型等因素, 这使得焊接结构疲劳评定规范十分繁琐; 对复杂结构形式“名义应力”很难准确定义, 这造成疲劳试验数据分散误差很大。近年来提出了一种新的焊接接头疲劳强度评定方法“局部法”, 该方法采用焊接接头应力集中区域应力场的“局部参量”作为疲劳断裂的控制参量, 依据“局部参量”与疲劳性能的关系进行疲劳评定, 从而消除名义应力法所具有的局限性。文中将采用 Dang Van 准则^[2-3]的局部法应用于非承载十字接头的疲劳评定中, 并对该方法的适应性以及有限元计算的影响因素进行了分析讨论。

1 理论基础

Dang Van 准则认为在疲劳裂纹形成阶段, 微裂纹总是沿着最大剪切应力方向的滑移面扩展, 这个剪切面是由微观剪切应力和静水压力所形成得最不

利平面, 由此该准则提出疲劳极限于局部最大剪切应力 $\tau_{\max}$ 和静水压力 $p_{\max}$ 的关系为:

$$\beta_{\exp} = \tau_{\max} + \alpha p_{\max} \leq \beta, \quad (1)$$

$$p_{\max} = (\sigma_{1m} + \sigma_{1a})/3, \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \sigma_{1a}/2, \quad (3)$$

式中: σ_{1m} 为疲劳循环的局部平均主应力; σ_{1a} 为疲劳循环的局部主应力振幅; α 和 β 为常数, 根据大量焊态接头试验 Dang Van 提出 $\alpha = 0.62$, $\beta = 124.5$ MPa, 并得到法国焊接研究所的证实^[5]; α 、 β 适用于承受拉伸、压缩和弯曲载荷的角焊缝接头, 与材料性能无关。为了方便, 定义 $\tau_{\max} + \alpha p_{\max} = \beta_{\exp}$, $\beta_{\exp}$ 是局部参量, 同时也是焊趾处最大剪切应力和静水压力的组合参数, 即要求的局部应力。

2 试验方法

试验材料为厚度 8 mm 的 16Mn 钢材, 其力学性能如表 1 所示。试样接头形式为不开坡口的角焊缝十字接头。试样分为两组: 第一组(试样 1~试样 7)采用 CO₂ 气体保护焊进行焊接, 焊接电流 118~120 A, 电弧电压 20.6~20.8 V, 平均焊接速度 2 mm/s; 第二组(试样 8~试样 14)采用手工电弧焊进行焊接, 焊条型号为 E7018(CHE58-1), 焊接电流 128~130 A, 电弧电压 23.6~24.3 V, 焊接平均速度 2 mm/s。

表 1 16Mn 钢的力学性能
Table 1 Mechanical properties of 16Mn steel

Material	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ (%)
16Mn	390.5	591.0	24.4

图 1 为焊后接头的几何尺寸的示意图。焊缝的局部几何尺寸用硅橡胶进行复形^[6], 然后在工具显微镜下测量焊趾半径 ρ (50 倍), 两种工艺的 ρ 为 0.15~0.80 mm, 手工电弧焊和 CO₂ 气体保护焊的焊脚尺寸分别为 5.58~6.25 mm 和 7.44~8.19 mm。

试验选取 $R=0.1$ (试样 1~7) 和 $R=0.2$ (试样 8~14) 两组应力比在 100kN 高频疲劳试验机上进行拉伸疲劳试验, 加载频率范围为 100~143Hz, 全部试样均为焊态。试验结果如表 2 所示。

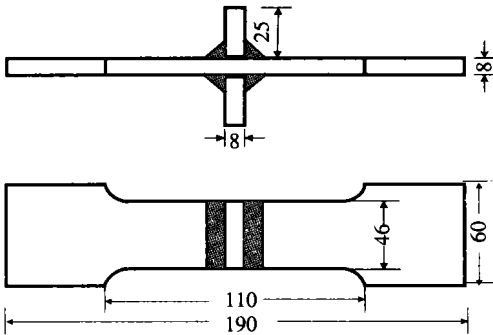


图 1 16Mn 钢十字接头疲劳试样

Fig. 1 Fatigue specimen of 16Mn cruciform joints

表 2 疲劳试验结果
Table 2 Results of fatigue tests

No.	Stress ratio R	Stress range $\Delta\sigma$ /MPa	Fatigue life N /cycle	Reference of crack
1	0.1	160.0	0.832×10^6	Weld toe
2		135.0	$>2.047\times 10^6$	No failure
3		145.0	1.165×10^6	Weld toe
4		180.0	0.406×10^6	Weld toe
5		130.0	1.21×10^6	Weld toe
6		125.0	1.93×10^6	Weld toe
7		110.0	$>2\times 10^6$	No failure
8	0.2	165.0	1.036×10^6	Weld toe
9		180.0	0.915×10^6	Weld toe
10		195.0	0.790×10^6	Weld toe
11		210.0	0.593×10^6	Weld toe
12		140.0	$>2\times 10^6$	No failure
13		125.0	$>2\times 10^6$	No failure
14		110.0	$>2\times 10^6$	No failure

3 疲劳评定

3.1 参数计算

局部参量 β_{exp} 是 Dang Van 准则疲劳评定的关键。依据实测尺寸(焊趾半径选其平均值 0.4 mm)对试样建立二维弹性平面应变有限元模型。采用 8 节点等参单元划分网格, 最小单元尺寸为 0.37 mm, 如图 2 所示。经有限元计算得应力集中系数, 取应力集中区的最大应力值与应力集中系数相乘可计算出 σ_{1a} 的值; 根据疲劳试验加载应力值及应力比可计算出 σ_{1m} 的值。进而可计算出局部参量 β_{exp} 的值, 计算公式见(1)~(3)。

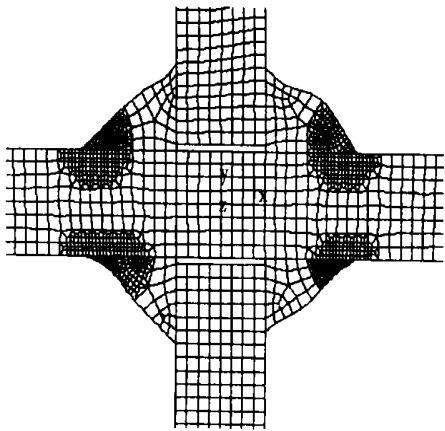


图 2 十字接头的有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh of cruciform joints

3.2 基于 Dang Van 准则的局部法疲劳评定

将计算结果 β_{exp} 与 β 进行比较: 若 $\beta_{\text{exp}} \leq \beta$, 依据 Dang Van 准则试样在 2×10^6 次循环下不发生疲劳断裂; 若 $\beta_{\text{exp}} \geq \beta$, 则试样在 2×10^6 次循环下发生疲劳断裂。由上知: $\beta=124.5$ MPa, 其比较结果见表 3。

表 3 疲劳评定结果

Table 3 Calculation results of local parameters

No.	σ_{1a} /MPa	σ_{1m} /MPa	β_{exp} /MPa	Predicting site of failure (at 2×10^6 cycles)
1	243.5	297.6	233.6	Weld toe
2	162.4	198.5	155.8	Weld toe
3	181.8	222.2	174.4	Weld toe
4	266.2	325.4	255.3	Weld toe
5	161.5	197.3	154.9	Weld toe
6	150.4	183.7	144.2	Weld toe
7	129.8	158.6	124.5	No failure
8	190.7	286.0	193.9	Weld toe
9	247.0	370.5	251.2	Weld toe
10	268.0	401.9	272.4	Weld toe
11	266.2	399.2	270.6	Weld toe
12	195.7	293.6	199.0	Weld toe
13	157.4	236.0	160.0	Weld toe
14	138.5	207.7	140.8	Weld toe

4 分析讨论

4.1 有限元计算中最小单元尺寸的选择

有限元计算中单元尺寸(划分网格)的选取是否适当会影响其最终计算结果。作者对此进行了研究, 试验试件焊趾半径为 0.15~0.80 mm, 在这个范围内选取不同的最小单元尺寸进行有限元计算。表 4 数据为试样 2 在不同焊趾半径下计算的局部参数变化。可以看出, 对给定的焊趾半径, 随最小单元尺寸 e_{min} 减小, 局部参量 β_{exp} 不断增加。但用 Dang Van 准则评定时, β_{exp} 值并不是越大越好。为了计算出合理的 β_{exp} 值, 即选择合理的最小单元尺寸, 研究选取不同最小单元尺寸对三种不同焊趾半径所对应的 β_{exp} 值进行计算, 并与 $\beta=124.5$ MPa 比较, 结果见图 3。由图看出, 对不同的焊趾半径, 当最小单元尺寸近

表 4 不同焊趾半径的局部参量计算

Fig. 4 Result of local parameter for different radius of weld tip

Radius of weld tip ρ /mm	Size of min element e_{min} /mm	Local parameter β_{exp} /MPa
0.15	0.09	230.4
	0.45	133.1
	0.85	107.0
0.40	0.13	176.2
	0.37	134.3
	0.80	114.0
0.80	0.12	135.4
	0.45	117.5
	1.10	99.8

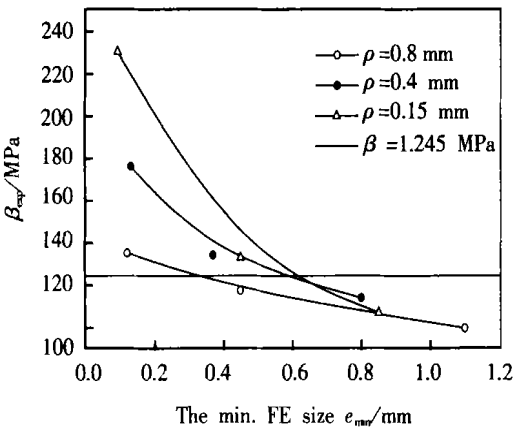


图 3 e_{min} — β 曲线

Fig. 3 e_{min} — β curve

似为 $e_{min}=0.32\sim0.62$ mm 时, 试验条件下计算的

β_{exp} 结果与 Dang Van 准则的建议值 $\beta=124.5$ MPa 比较接近。因而, 对实际焊接接头焊趾半径在 0.15~0.8 mm 范围内变化时, 采用 Dang Van 准则进行疲劳评定时, 应选择最小单元尺寸为 0.32~0.62 mm 计算参量 β_{exp} 才能获得比较合理的预测结果。

4.2 Dang Van 准则的适应性

有限元计算按 4.1 建议的范围选择最小单元, 结果见表 3。对比表 2 和表 3 中的结果可得, 除试样 2, 12~14 外, 其余试样的计算结果与疲劳试验的结果基本符合。按 Dang Van 准则评定, 当试样的计算值 β_{exp} 大于 124.5 MPa 时试样的疲劳寿命应低于 2×10^6 。从表 3 中 β_{exp} 的计算值与 Dang Van 准则建议值 $\beta=124.5$ MPa 比较可看出 Dang Van 准则给出的预测结果偏安全, 如对 12~14 试样, 参数 β_{exp} 分别为 199.0、130.0、140.8 MPa 明显大于 124.5 MPa 应发生疲劳破坏, 但实际疲劳寿命均高于 2×10^6 。说明用 Dang Van 准则对焊态接头进行的疲劳评定能够基本符合实际情况, 但也存在一些偏差, 主要原因为: Dang Van 建议的 β 值是经大量试验并根据具体的结构选择应力集中区的最大应力进行计算总结出的, 为了能使其适合于普遍的试件 Dang Van 选取了偏安全的值; 而文中该参数是采用有限元方法计算得出的, 尽管采用了较合理的单元尺寸(0.32~0.62 mm), 单元划分的疏密程度对计算结果还是存在着一定影响。

4.3 关于改进参量计算的一点建议

图 4a、b、c 分别为试样 2 在不同焊趾半径下沿最大主应力方向的应力集中系数 K_t 与距应力集中区最大应力处的距离 r 的关系曲线。由图 4 可见, 对于给定的焊趾半径, 最小单元尺寸愈小, 其 $r=0$ 处的应力集中系数 K_t 愈大, 如 $\rho=0.15$ mm, 最小单元尺寸为 0.85、0.45、0.09 时, $K_t(r=0)$ 的值分别约为 1.8、2.35、3.9。当焊趾半径愈小时, 最小单元尺寸的影响也愈严重, 如当 $\rho=0.8$ mm, 最小单元尺寸相对减小量为 89.1%(从 1.1 mm 减小到 0.12 mm)时, K_t 值相对增加量为 35.3%(从 1.7 增加到 2.3); 而当 $\rho=0.15$ mm, 最小单元尺寸相对减小量为 89.4%(从 0.85 mm 减小到 0.09 mm)时, K_t 值相对增加量上升为 116.7%(从 1.8 增加到 3.9)。然而从图 4 同样可以看出随着 r 的增加, 单元尺寸的大小对应力集中系数 K_t 的影响明显减小, 在 r 约大于 0.5 mm 以后其应力分布基本一致。这表明焊趾半径只影响局部很小区域(约小于 0.5 mm)的应力集中分布, 在某一深度(约 0.5 mm)后存在稳定的应力集中, 它取决于焊趾宏观角度的变化。鉴于此, 作者认为采用距应力集中区最大应力处某一深

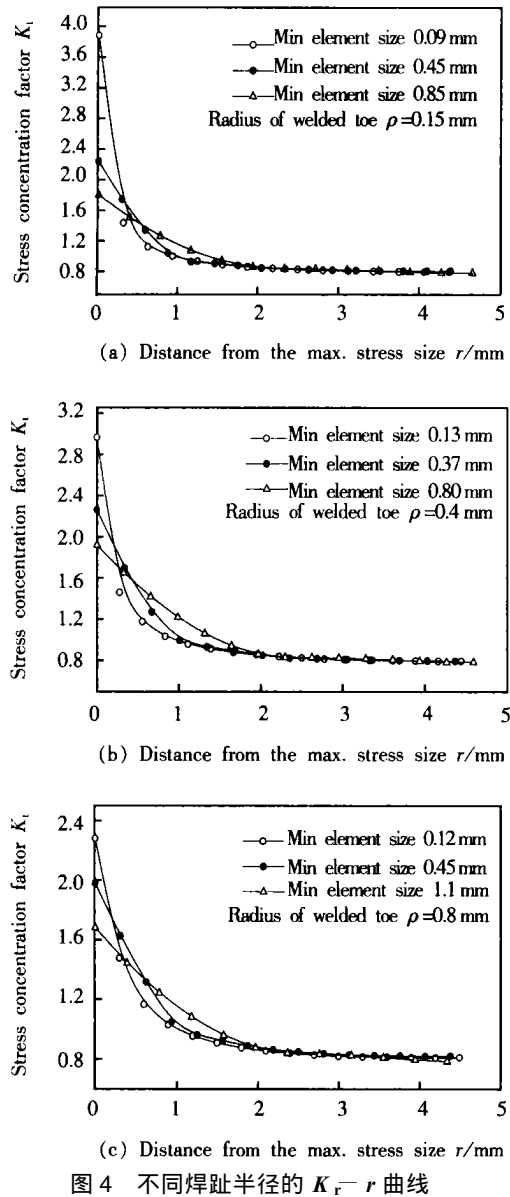


图 4 不同焊趾半径的 K_r-r 曲线

Fig. 4 K_r-r curve with different toe radius

度的应力代替最大应力集中区最大应力计算 Dang Van 局部参量 β_{exp} 应更为合理, 这将减小参数 β_{exp} 对焊趾半径和局部单元尺寸的依赖性。

5 结 论

(1)Dang Van 准则对应力集中区单元尺寸有明

显依赖性, 对实际焊态接头焊趾在 0.15 ~ 0.8 mm 变化时, 应选择最小单元尺寸 0.32 ~ 0.62mm 计算局部参量 β_{exp} . 才能获得比较合理的预测结果。

(2)采用 Dang Van 准则的局部法能够对焊态接头的疲劳性能做出合理的评定, 但 Dang Van 建议的 $\beta=124.5$ 偏安全, 当用有限元计算结果进行评定时会产生一定偏差。

(3)对给定焊趾角度的角焊缝, 焊趾半径只影响局部很小区域的应力集中分布 ($r<0.5$ mm), 在某一深度 ($r\geq0.5$ mm) 后存在稳定的应力集中, 它取决于焊趾宏观角度的变化。因而建议采用距应力集中区最大应力处某一深度的应力代替应力集中区最大应力计算 Dang Van 局部参量 β_{exp} 更为合理, 这将减小局部参数 β_{exp} 对焊趾半径和局部单元尺寸的依赖性。

参考文献:

[1] David Taylor, Niall Barrett, Gabriele Lucano. Some new methods for predicting fatigue in welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 509~518.

[2] Dang Van K. Macro-micro approach in high-cycle multiaxial fatigue[A]. Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191, American Society for Testing and Materials[C], Philadelphia, USA, 1993. 120~130.

[3] Dang Van K, Papadopoulos Y V. Multiaxial fatigue failure criterion; a new approach[A]. Proceedings of the Third International Conference on Fatigue and Fatigue Threshold[C], Virginia, USA, 1987. 997~1008.

[4] Ballard P, Dang Van K, Deperrois A. High cycle fatigue and a finite element analysis[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Material & Structures, 1995, 18(3): 397~411.

[5] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 304~307.

[6] 陈俊梅. 局部法在焊接接头疲劳强度评定中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.

作者简介: 吴 冰, 女, 1978 年 8 月出生, 硕士研究生。研究方向为焊接结构强度与断裂、弹塑性断裂力学。

Email: wubing@tw.tmail.tju.cn