

超长寿命区间 16Mn 钢焊接接头疲劳性能

吴良晨, 王东坡, 邓彩艳, 王 康

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 使用自行研制的 TJU-HJ-I 型超声疲劳试验系统装置进行了 16 Mn 钢母材和焊接接头试件的超声疲劳性能试验, 以探索其在超长疲劳寿命区间的疲劳行为。结果表明, 无论母材还是焊接接头, 其 $S-N$ 曲线都是一条连续下降的曲线; 在 $10^6 \sim 10^7$ 循环周次范围内焊接接头不存在传统概念上的疲劳极限, 载荷循环周次超过 10^7 甚至 10^9 以后, 试件依然发生疲劳断裂。在超长寿命区间, 焊接接头疲劳强度远低于母材的疲劳强度。使用现有疲劳极限数据去设计工作在超长寿命区间的焊接结构件是很危险的。

关键词: 超长寿命; 焊接接头; 疲劳性能; 超声疲劳试验

中图分类号: TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)03-0117-04



吴良晨

0 序 言

目前在工程结构上焊接已成为最主要的连接方法, 焊接结构重量占钢铁总产量 50% 以上。然而, 焊接结构却不断发生断裂事故, 其中 80% ~ 90% 为疲劳失效^[1,2]。这些疲劳失效频繁地发生在铁路公路桥梁、发电站管道和海洋工程结构、高速客车车体和转向架以及水轮机叶片的焊接部位, 造成巨大的经济损失。通过分析发现: 上述焊接部位疲劳断裂是在经过 10^9 周次循环载荷作用之后发生的。然而, 传统观点认为在此寿命区间内疲劳断裂是不会发生的, 因为它已进入无限寿命区间。鉴于常规疲劳理论和事实之间的矛盾, 研究在超长寿命区间焊接接头的疲劳断裂行为就极具理论和应用价值。

使用常规疲劳试验机来完成超长寿命试验是不现实的, 一台 30 Hz 的疲劳试验机完成 10^9 次应力循环需要一年时间。必须采用更高的频率加载。近年来, 国内外的超声疲劳试验技术迅速发展, 这为进行超长寿命焊接接头疲劳试验提供了切实可行的手段。一台加载频率为 20 kHz 的超声疲劳试验设备完成 10^9 次应力循环只需要时间 $14 \text{ h}^{[3-5]}$ 。

针对桥梁焊接结构常用的 16 Mn 钢, 使用超声疲劳试验技术研究其焊接接头在超长寿命区间的疲劳行为, 初步探索传统焊接结构疲劳设计规范在超长寿命条件下使用的安全性和可靠性问题。

1 试验方法

1.1 接头形式与试件制备

试件分成母材、圆形对接焊接接头、薄板对接焊接接头和十字焊接接头四组。母材试件加工成狗骨形状, 圆形对接焊接试件设计为中间有等截面试验段的圆柱狗骨形状。薄板对接焊接接头和十字焊接接头试件均设计成有等截面的薄板状狗骨形状。各组试件几何外形及尺寸见图 1。

1.2 疲劳性能测试方法

试验在自制的 TJU-HJ-I 型超声疲劳试验装置上完成。试验施加载荷为轴向拉-压对称循环载荷, 应力比 $R = -1$, 加载频率约 20 kHz。试验在室温下进行, 采用水冷方式控制试件温度升高。

1.3 疲劳试验数据处理方法

根据国际焊接学会制定的统计方法^[6]对相应疲劳试验数据进行处理。该方法首先假设疲劳试验结果符合对数正态分布, 然后用具有斜率 m 且分别对应 K 倍正负标准差的两条标称 $S-N$ 曲线形成一数据分散带 (K 为特征值), 指定的存活概率为 95%, 置信度为 75%。

标称值通过下述过程计算:

(1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围 ΔR 以及循环次数 N 以 10 为底的对数值。

(2) 采用幂函数模型回归计算指数 m 和常数 $\log C$ 值。

$$m \log \Delta R + \log N = \log C \quad (1)$$

收稿日期: 2007-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50405019); 博士后基金资助项目 (20070420696)

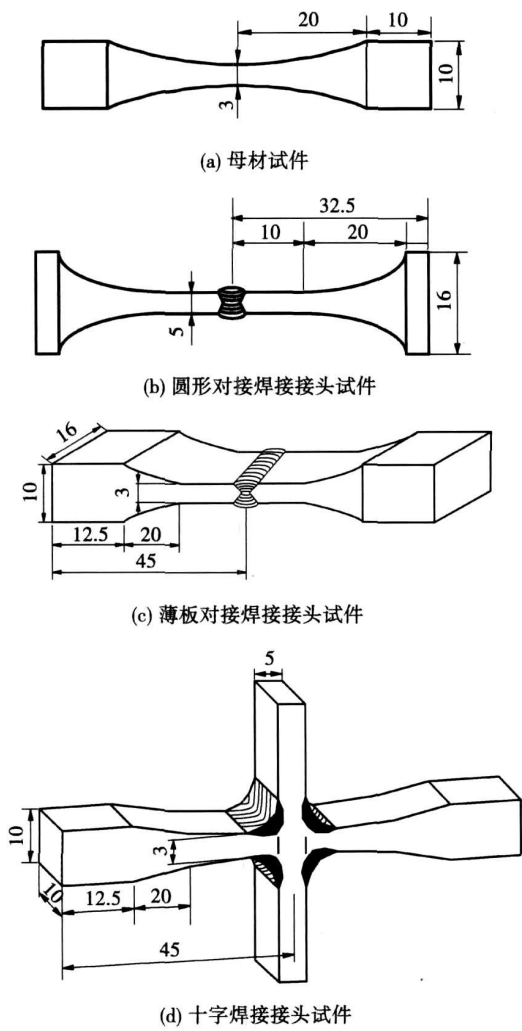


图 1 试件几何形状与尺寸 (mm)
Fig 1 Geometry and size of specimens

(3) 设 C_i 是试验数据的对数值, 利用所获得的 m 值, 计算 $\log C$ 的平均值 C_m 和标准方差 S_{tdv} 。

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \tag{2}$$

$$S_{tdv} = \sqrt{\frac{\sum (C_m - C_i)^2}{n-1}} \tag{3}$$

式中: n 为试件个数。

(4) 计算特征值 C_k 。

$$C_k = C_m - k \cdot S_{tdv} \tag{4}$$

2 试验结果与分析

将超声疲劳试验数据进行处理, 得到母材、圆形对接焊接接头、十字焊接接头及薄板对接焊接接头试件分别所对应的应力范围循环曲线 (50%存活率下的 $S-N$ 曲线), 如图 2~图 4 所示。

分别提取图 2~图 4 中平均 $S-N$ 曲线在 $5 \times$

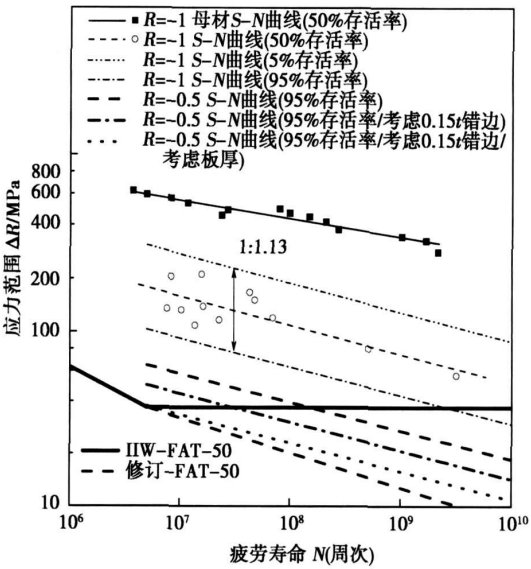


图 2 圆形对接焊接接头超声疲劳 $S-N$ 曲线
Fig. 2 $S-N$ curve for rounded butt joints

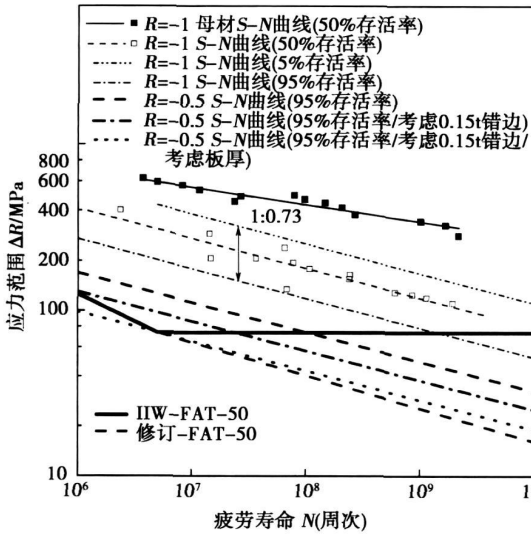


图 3 薄板对接焊接接头超声疲劳 $S-N$ 曲线
Fig 3 $S-N$ curve for thin plate butt joints

10^6 及 1×10^9 循环周次下的疲劳强度, 将结果列于表 1。比较每种情况下 5×10^6 及 1×10^9 循环周次对应的疲劳强度值 (表 1), 其中 t 表示板厚。

从图 2~图 4 及表 1 可以看出: 在长寿命或超长寿命区间, 焊接接头疲劳性能均远低于母材。当循环周次在 5×10^6 条件下, 圆形对接焊接接头疲劳强度是母材的 22.3%, 薄板对接接头疲劳强度是母材的 39%, 十字焊接接头疲劳强度是母材的 27%。而在超长寿命区间, 不论是母材试件还是焊接接头试件, 其 $S-N$ 曲线都为一条连续下降的曲线, $10^6 \sim$

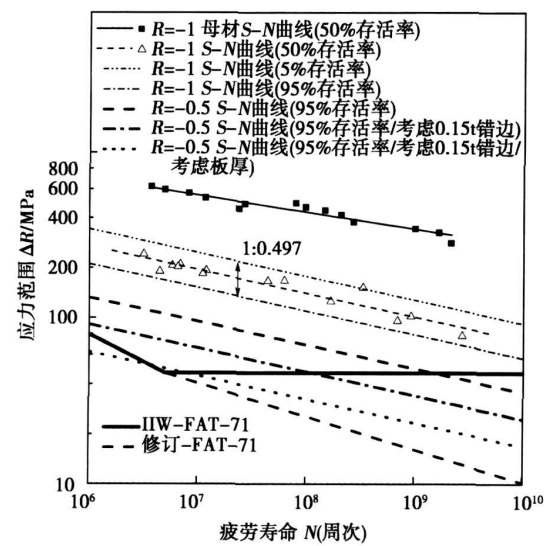


图 4 十字焊接接头超声疲劳 S—N 曲线
Fig 4 S—N curve for cross joints

表 1 疲劳强度(5×10⁶/1×10⁹ 循环周次)
Table 1 Fatigue strength(5×10⁶/1×10⁹ cycles)

试件类型	ΔR(5×10 ⁶)	ΔR(1×10 ⁹)	降低程度 (%)
	/MPa	/MPa	
母材	798	449	56.3
圆形对接接头	178	74	41.6
薄板对接接头	312	116	37.2
十字接头	216	101	46.8

10⁹ 循环周次范围内不存在传统疲劳概念上的水平平台, 曲线下降趋势也没有发生显著变化, 载荷循环周次超过 5×10⁶ (焊接接头) 或 10⁷ (母材) 后依然发生疲劳断裂。

表 1 统计结果显示: 与 5×10⁶ 循环周次对应疲劳强度相比, 母材试件在 1×10⁹ 循环周次条件的疲劳强度降幅很大, 只有 5×10⁶ 循环周次对应疲劳强度的 56.3%。焊接接头降低幅度更大, 其中圆形对接焊接接头在 1×10⁹ 循环周次条件的疲劳强度只有 5×10⁶ 循环周次对应疲劳强度的 41.6%; 薄板对接焊接接头降幅较大, 1×10⁹ 循环周次条件的疲劳强度只有 5×10⁶ 循环周次对应疲劳强度的 37.2%; 而十字焊接接头的降幅是 46.8%。由图 2~图 4 可见: 即便是当循环周次超过 1×10⁹ 之后, 随着应力水平的不断降低, S—N 曲线仍有继续延伸的趋势。也就是说: 如果在更低的交变应力水平作用下, 只要循环周次足够长, 其仍然有发生疲劳断裂的可能性。因此有充分的理由相信, 使用 5×10⁶ 循环周次下条件的疲劳极限去设计服役在超长寿命区间的焊接结构件是非常危险的。

国际焊接学会钢结构疲劳设计规范制定针对焊接接头疲劳试验数据进行统计处理的方法。利用该方法对焊接接头的相应试验结果进行统计处理, 分别得到三种接头形式下存活概率为 95%、置信度为 75% 的标称 S—N 曲线参数, 将其列于表 2 中。

表 2 焊接接头疲劳试验数据统计处理结果
Table 2 Statistical processing results of test data

类别	计算指数 <i>m</i>	平均值 <i>C_m</i>	特征值 <i>C_k</i>	标准方差 <i>S_{div}</i>
圆形对接	6.07	2.29×10 ²⁰	8.15×10 ¹⁸	0.580
薄板对接	5.58	4.546×10 ²⁰	3.665×10 ¹⁹	0.341
十字接头	7.0	1.076×10 ²³	1.875×10 ²²	0.310

需要说明的是: 在超长寿命区间范围内所进行的所有疲劳试验均为应力循环比 $R=-1$ 条件下, 采用基本不含焊接残余应力和错边变形的薄板小尺寸试件得到的, 而国际焊接学会钢结构疲劳设计规范中的标准设计曲线是使用含有高值焊接残余拉应力的厚板 (板厚 $t=20\text{ mm}$) 且含有错边变形 $e=0.15t$ 的足尺寸试件 (或虽使用小尺寸试件, 但试验是在应力比 $R=0.5$ 条件下进行) 做出的, 因此相应试验结果需要进行应力比修正 / 错边变形修正 / 板厚修正。

应力比修正方法按国际焊接学会钢结构疲劳设计规范规定的不同应力比 R 之间疲劳强度的换算关系进行估算, 修正公式为

$$F(R)=1.6, \quad R<-1$$
$$R(R)=-0.4R+1.2, \quad -1\leq R\leq 0.5 \quad (5)$$
$$F(R)=1, \quad R>0.5$$

由上式可知应力比修正采用将所有疲劳寿命对应疲劳强度除以 1.6 即可。

错边变形修正也按国际焊接学会钢结构疲劳设计规范中相应规定进行: 将对焊接接头所有疲劳寿命对应疲劳强度除以 1.3; 十字焊接接头所有疲劳寿命对应疲劳强度除以 1.45。

研究表明, 随着板厚度的增加焊接接头疲劳强度不断下降, 因此国际焊接学会钢结构疲劳设计规范中进行了相应规定, 修正方法是设计疲劳强度乘以板厚修正公式进行折减, 具体公式为

$$f(t)=(25/t_{eff})^n, \quad t\geq 25 \quad (6)$$

按规范规定上式只适用厚度大于 25 mm 的焊接接头, 当厚度小于 25 mm, 出于保守或偏安全的考虑而不予折减。然而, 文中的超声疲劳试验结果是在薄板条件下得到的, 高于 20~25 mm 板厚时对应的疲劳强度, 因此, 如果将试验结果与规范中利用 20

~25 mm 板厚试件疲劳试验数据统计获得的设计 $S-N$ 曲线对比,那么正确的修正方法是将试验疲劳强度数据除以 $f(t)$ 进行折减,而不是乘以板厚修正公式。按国际焊接学会钢结构疲劳设计规范中相应规定,原始十字焊接接头 n 取 0.3,而对接头 n 取 0.2。另外,按上述方法对利用标准厚度(20~25 mm)设计强度对薄板疲劳强度进行估算,一般高估了薄板真实具有的疲劳强度。有鉴于此,为了保证利用薄板焊接接头试件的疲劳试验结果推算标准厚度(20~25 mm)条件的疲劳强度,参考文献中相应试验结果,板厚修正时十字焊接接头 $n=0.2$,而对接头 $n=0.15$ 。

将对接和十字接头试件的超声疲劳试验结果分别依次进行 95% 存活概率统计应力比修正/错边变形修正/板厚修正等处理过程所得到的四条 $S-N$ 曲线见图 2~图 4 中。

从图 2~图 4 可以看出:在超长寿命区间,圆形对接焊接接头超声疲劳试验结果得到的特征 $S-N$ 曲线(95% 存活概率/应力比修正/错边变形修正/板厚修正)几乎完全落在 FAT-50 设计 $S-N$ 曲线之下,薄板对接特征 $S-N$ 曲线则落在 FAT-100 设计 $S-N$ 曲线之下,十字焊接接头特征 $S-N$ 曲线落在 FAT-71 设计 $S-N$ 曲线之下。可见:目前以国际焊接学会焊接钢结构疲劳设计规范为代表的国际主流焊接钢结构疲劳设计规范在超长寿命区间使用是偏于危险的,对此问题有进行大量研究的必要性,有关国际组织和国内相关部门应引起足够重视。需要对焊接接头在超长寿命区间的疲劳设计曲线进行一些修订,为此进行初步分析探讨。

修订方法如下:(1)规定恒幅疲劳设计曲线在 5×10^6 循环周次之后以 $m=5$ 的斜率连续下降而没有截止线。(2)利用修订的恒幅疲劳设计曲线,重新分析超长寿命区间相应焊接接头恒幅设计 $S-N$ 曲线的对应强度级别。

根据上述恒幅疲劳设计曲线修订方法,绘出相应焊接接头可能使用的强度级别的疲劳设计 $S-N$ 曲线,如图 2~图 4 所示。由图 2~图 4 可见:在超

长寿命区间,圆形对接焊接接头超声疲劳试验结果得到的特征 $S-N$ 曲线(95% 存活概率/应力比修正/错边变形修正/板厚修正)恰好落在修订 FAT-50 设计 $S-N$ 曲线之上,薄板对接特征 $S-N$ 曲线则也恰好落在修订 FAT-100 设计 $S-N$ 曲线之上,而十字焊接接头特征 $S-N$ 曲线完全落在修订 FAT-71 设计 $S-N$ 曲线之上。因此,上述针对国际焊接学会焊接钢结构疲劳设计规范所进行的在超长寿命区间的修订,其思路是基本合适的。

3 结 论

(1)无论母材还是焊接接头,其 $S-N$ 曲线都是一条连续下降的曲线,在 $10^6 \sim 10^9$ 循环周次范围内不存在传统疲劳概念上的水平平台;载荷循环周次超过 10^7 甚至 10^9 以后,试件依然发生疲劳断裂。

(2)在超长寿命区间,焊接接头疲劳性能远低于母材。

(3)使用在 5×10^6 循环周次下的条件疲劳极限去设计服役寿命在超长寿命区间范围内的焊接结构件是很危险的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京:机械工业出版社, 1981.
- [3] Tien J K. State of ultrasonic fatigue[S]. Ultrasonic Fatigue, AIME, USA; 1982: 1-14.
- [4] 陶 华. 超声疲劳研究综述[J]. 航空科学技术, 1997, 6: 23-25.
- [5] 王清远. 超声加速疲劳实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(3): 6-11.
- [6] XIII-1539-96/XV-845-96: Recommendations on fatigue design of welded joints and components[S]. France, 2002.

作者简介:吴良晨,男,1978 年出生,博士研究生。研究方向为焊接结构疲劳延寿技术。发表论文 2 篇。

Email: ulc_fj@126.com

GUO Delun, SI Haoxue (Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p113—116

Abstract: The applications of DC-LSND (dynamically controlled low stress non-deformation) welding technique on 1420 Al-Li alloy butt welded plate and penetrated T-weld were investigated respectively. By comparison of residual stress and distortion, weld microstructure and tensile properties between conventional TIG welding and DC-LSND welding, the reason why DC-LSND technique can control welding stress and distortion was discussed. The results showed that DC-LSND technique could effectively decrease residual stress and distortion of the 1420 Al-Li alloy butt welded plate, while hadn't apparent effect on the joint tensile properties. The welding stress and distortion of 1420 Al-Li alloy penetrated T-weld could also be controlled.

Key words: 1420 Al-Li alloy; dynamically controlled low stress non-deformation welding; welding stress and distortion

Fatigue properties of welded joints of 16Mn steel in super long life region

WU Liangchen, WANG Dongpo, DENG Caiyan, WANG Kang (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p117—120

Abstract: Ultrasonic fatigue properties experiments have been performed with base metal and welded joints of 16Mn steel using a home-made ultrasonic fatigue testing system. The objective was to investigate its fatigue behaviors of welded joints in super long life region. The cycling frequency is about 20 kHz and the load ratio is -1 . The testing results show that the $S-N$ curves of both base metal and welded joints are not horizontal in super long life region. The specimens still fail over 10^7 , even 10^9 stress cycles and there is no fatigue limit between 10^6 and 10^9 cycles. The fatigue strength of welded joint is much less than that of base metal. It is dangerous to design the super long life welded structures by current fatigue data. It is necessary to carry out comprehensive research of welded joints in super long life region with different material and different joint style.

Key words: super long life; welded joints; fatigue properties; ultrasonic fatigue test

Effect of simulated welding parameters on pipe girth weld residual stresses

DONG Junhui, LIN Yan (School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China). p121—124

Abstract: A two-dimensional axial-symmetric finite element model of welding residual stresses of thick-wall pipe has been proposed based on the theory of thermal-elastoplasticity. Using ANSYS finite element code, the effect of three groups of welding parameter on girth weld residual stresses of pipe is analyzed. The temperature correlation of thermal physical property parameter with mechanical property parameter is considered during the simulation. The results show that both the axial stresses and the hoop stresses are tensile stress in the pipe inner surface weld and near weld section, but they are compression stress in the pipe outer surface weld and near weld

section. The stress value near the inner surface is higher than the one of the outer surface in the joint; the maximal value of residual stresses appears in the certain distance beneath exterior surface of the pipe, and the value is close to the yield stress of base metal. The size of plastic deformation zone increases with the increase of heat input while peak value of residual stresses change little.

Key words: processing parameter; pipeline; girth weld; residual stresses; numerical simulation

Effect of heated region on stress relief ratio of local heat treatment on spherical tanks

WANG Zejun¹, LU Huiping¹, JING Hongyang² (1. Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin 300382, China; 2. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p125—128

Abstract: The technology of local heat treatment on spherical tanks is not yet supported by standards. In purpose of solving this problem, series numerical analyses are performed on the effect of the size of heated region on the relief ratio of residual welding stress. The results show that the thermal stress induced by local heating process itself is the key factor controlling the result of local heat treatment. Satisfied stress relief ratio can't be resulted from processes normally be employed in engineering because the heated region is generally too small. The stress relief ratio can be increased remarkably with the increasing of heated region, and when it is large enough, the same efficiency of heat treatment as a whole can be obtained. However, the selection of ideal size of heated region can be obviously affected by the volume and thickness of spherical tanks, and for the same expected stress relief ratio, larger heated region should be selected when dealing with larger and thicker spherical tanks.

Key words: spherical tank; local heat treatment; numerical simulation; heated region; residual stress relief ratio

Calculation and discussion of welding stress and strain field

FANG Hongyuan, ZHANG Xueqiu, YANG Jiangguo, LIU Xuesong (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p129—132

Abstract: Residual compressive plastic strain presents in the weld from traditional views, now some literates think that weld is formed during the cooling process which isn't concerned with the heating process. Therefore, they concluded that not the compressive plastic strain but the tensile plastic strain presents in the weld, in order to indicate the mechanism of the formation of welding residual stress and strain, welding longitudinal stress and plastic strain of the low-carbon steel are simulated by finite element method. The simulated results show that residual compressive plastic strain and tensile stress are found in the weld longitudinal plastic strain decreasing from the weld centre to the edge of the base metal where plastic deformation won't take place.

Key words: residual stress; compressive strain; finite element method; temperature field