

十字焊接接头(开剖口)疲劳强度 试验研究*

朱安国

韩连元**

(核工业第五研究设计院)

(郑州工学院)

摘 要: 通过对模向承载开剖口十字焊接接头的疲劳试验,研究了此类接头的疲劳裂纹萌生的位置和扩展行为及接头的破坏情况。求得了开剖口接头的 S-N 曲线,用升降法测得接头在指定寿命 (1×10^6 周) 下条件疲劳极限。为工程上焊接构件的设计使用提供了疲劳设计数据和设计曲线。

关键词: 疲劳试验, 疲劳强度, 十字焊接接头, 剖口

中国图书分类号: 0346

焊件的失效大都属于疲劳破坏,由于焊接缺陷的大量存在,以及焊缝处的应力集中和焊接工艺造成的残余应力,使得焊件的疲劳性能大幅度降低。目前,国外在焊接构件的疲劳强度研究方面进行了大量的试验研究,通过对各种各样接头的研究来描述焊件的疲劳性能,并且取得了大量的试验数据,在此基础上,建立了许多典型接头的 S-N 曲线,作为焊件的疲劳设计规范。这方面的研究目前仍在继续,不断地对已有的设计规范和研究成果进行修正和完善。而国内焊接接头的疲劳强度试验研究起步较晚,还未进行系统全面的研究,不但缺乏必要的疲劳设计数据,而且也缺乏常用典型焊接接头的疲劳设计曲线。在产品的设计中按类比设计和静强度设计或借用国外现有的规范,其结果是设计产品粗大,可靠性差,不能满足工程需要。为了提高我国机械产品的质量,提供我国自己的焊接结构有疲劳性能数据和设计曲线,国家下达了七·五重点攻关项目:《轮式装载机计算机辅助设计和疲劳设计方法数据库》的研究课题。测定焊接接头系列在不同荷载下的疲劳性能数据和疲劳性能曲线。本文介绍的是模向承载开剖口十字焊接接头的 S-N 曲线和在指定寿命 (1×10^6 周) 下的疲劳极限测定,并对疲劳裂纹的起始、扩展行为及接头的失效情况进行了考查。

1 试样

1.1 试样设计

* 收稿日期: 1989.11.17

** 本课题系河南省自然科学基金资助项目

在课题的接头系列中, 开剖口十字焊接接头试样编号为 WT09, 为横向承载焊缝, WT09 试样设计焊高为 $8\times 8\text{mm}$, 剖口角度为 55° , 拟和不开剖口接头进行比较, 试样照片及结构简图见图 1、2 所示。

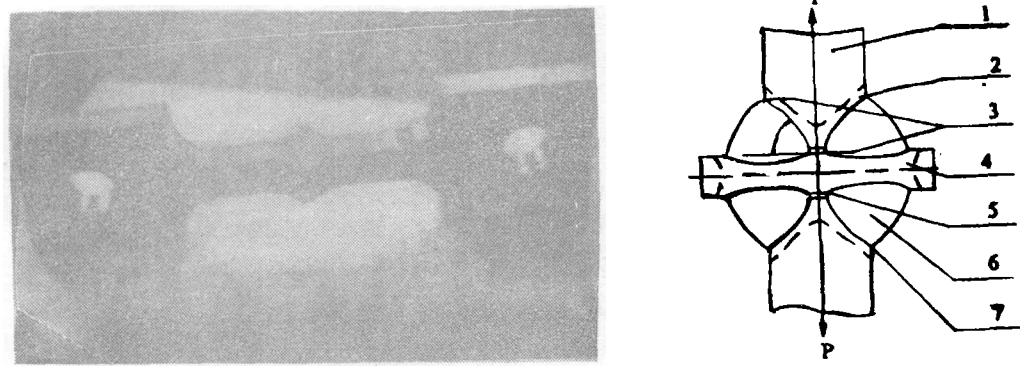


图1 试样照片

图2 试样结构简图

1. 母体金属; 2. 热影响区; 3. 裂纹
4. 连接块; 5. 焊根; 6. 焊缝; 7. 焊趾

1.2 材料性能和化学成份

所有试样均选用出自一炉的 16Mn 轧制钢板, 试件长度方向为钢板的轧制方向, 钢板厚 20mm, 其机械性能和化学成份列表如下:

表 1 机械性能		表 2 化学成份 (%)		
σ_s	σ_b	C	Mn	Si
323.4MPa	490MPa	0.12~0.2	1.20~1.60	0.20~0.60

焊条为 J506 型、低碳钢电焊条, 用于试样加工的规格为 $\Phi 4\text{mm}$ 、 $\Phi 5\text{mm}$, 有关焊条的机械性能和化学成份也一并列表如下:

表 3 焊条机械性能			表 4 焊条化学成份 (%)				
σ_b	ψ (%)	a_k	C	Mn	Si	S	P
510~568 MPa	24~32	1.96~2.94 MPa	<0.12	1.0	0.5	<0.035	<0.04

1.3 试件加工

试样加工由天津工程机械研究所完成。焊接温度保持在 5°C 以上, 否则焊件予热。焊接工艺为手工电弧焊, 焊缝底部用 $\Phi 4\text{mm}$ 的电焊条封底, 其余用 $\Phi 5\text{mm}$ 的焊条, 试样的每条焊缝按次序焊 2 遍, 填满剖口, 采用反转焊工艺, 以减少试样的变形。

2 疲劳试验

2.1 接头应力分析

施加于接头的负载为拉伸载荷, 在接头的焊根和焊趾处的几何形状突变, 造成了这些

部位具有很高的应力集中,文献[1]给出了焊趾半径为 ρ 的应力集中系数 K_t 的计算式:

$$K_t = \beta[1 + \alpha(t/\rho)^\lambda]$$

在轴向拉伸的情况下:

$$\text{焊趾处: } \alpha = 0.35(\lg\theta)^{0.25}[1 + 1.1(C/l)^{1.65}]$$

$$\beta = 1; \quad \lambda = 0.5$$

$$\text{焊根处: } \alpha = 1.15(\lg\theta)^{-0.25}(C/l)^{0.5}$$

$$\beta = 1; \quad \lambda = 0.5$$

各参数的意义见图 3。

焊趾半径用轮廓法进行测量并统计处理,

图 3 各参数意义

其平均值与板厚的比例为: $\bar{\rho}/t = 0.035$ 。

取 ρ 的平均值, 计算焊根与焊趾处的应力集中系数, 结果如下:

表 5 焊趾和焊根处的应力集中系数

参 数	l (mm)	t (mm)	$\theta (^{\circ})$	C (mm)	l/t	K_t	
						焊趾	焊根
试样 WT09	8	20	31	4	0.035	2.76	4.11

从表中可以看出, 焊根和焊趾处高的应力集中将导致疲劳裂纹在这些地方萌生。

2.2 疲劳试验

2.2.1 试验条件

所有疲劳试验在郑州机械研究所民主德国产 ZD40Pu 疲劳试验机上完成, 试验条件为: 恒幅正弦波载荷; 室温; 空气介质; 频率为 10Hz, 试验过程中用放大 10 倍的读数显微镜对裂纹进行观察。

由于裂纹在扩展后期扩展很快, 无法准确定义破坏准则, 故以接头脆断时的循环周次定义为接头破坏寿命。

2.2.2 试验方案

试验应力用应力范围 $\Delta\sigma$ 表示, 单位取 Pa, WT09 试样测 S-N 曲线, 高应力一级, 试验 6 个有效点, 低应力用升降法测在 1×10^6 周下的疲劳极限, 级差取 4.9MPa。

为了节省试样和试验时间, 对疲劳极限进行粗略估算。

取 $\sigma_b = 560\text{MPa}$, 对于光滑试样, 文献[2]有经验公式: $\sigma_{-1} = 0.5\sigma_b$;

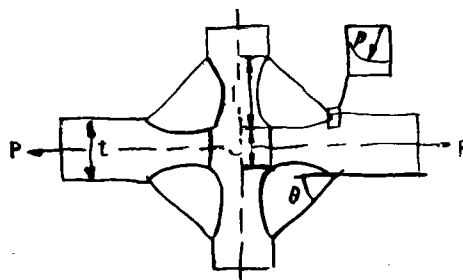
对接头: $\sigma_{-1} = 280\text{MPa}$;

等效疲劳强度: $\frac{K_\sigma}{\varepsilon \cdot \beta} \cdot \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \sigma_m$

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(1+R)\sigma_{\max}; \quad \sigma_a = \frac{1}{2}(1-R)\sigma_{\max}$$

文献[3]指出: $K_\sigma < 2$ 时, $\psi_\sigma = 0.2$; $K_\sigma > 2$ 时, $\psi_\sigma = 0.05$, β 值查文献[2]得 $\beta = 0.72$ 。用应力分析的结果, $K_t = 4.11$, K_σ 以 K_t 代替, ε 取 1。

$$\sigma_{-1} = \frac{\Delta\sigma}{2(1-R)} \left[\frac{K_\sigma}{\varepsilon\beta} (1-R) + \psi_\sigma (1+R) \right]$$



估算的疲劳极限为: $\Delta\sigma = 97.02\text{MPa}$ 。试验时, 取 $\Delta\sigma$ 高于此值, 寻找极限试验点。

2.2.3 试验结果

通过试验观察, 裂纹起始、扩展和接头的破坏情况如下:

①接头在焊根和焊趾处均有失效机会, 高应力的试验结果表明, 疲劳裂纹在焊根和焊趾处萌生的机会相等, 接头破坏概率为 50%。(见图 4、图 5)



图4 焊根破坏



图5 焊趾破坏

②在焊根处萌生的裂纹沿与连接块成 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的方向以 I 型裂纹向焊缝扩展至脆断。在焊趾处, 首先形成许多小裂纹, 然后连成一片, 形成穿透的 I 型裂纹向热影响区扩展。(见图 6、图 7)

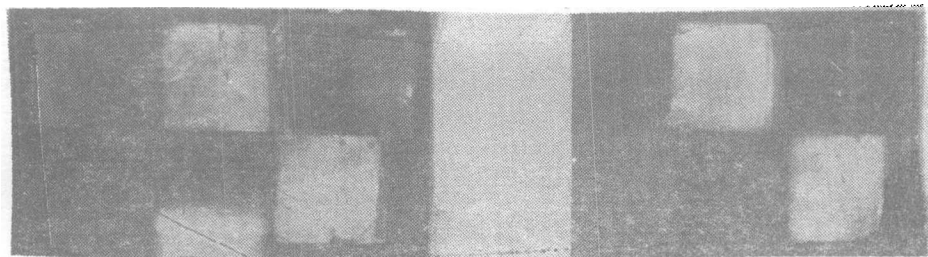


图6 以 I 型裂纹扩展

图7 小裂纹连成一片后留下台阶

③由于在焊根截面上应力较名义应力小, 因而断口平坦光亮, 瞬断区粗糙不平且暗淡无光。在焊趾处破坏的断口由于名义应力相对较大, 断口略暗且粗糙, 瞬断区小。

3 数据处理

数据处理按文献[4]的方法处理。求 S-N 曲线试验数据及处理结果。

3.1 高应力试验数据 ($\Delta\sigma = 186.2\text{MPa}$, $R = 0.1$)

表6 高应力试验数据

试样号	序号	N_f (次)	$X_f = \log N_f$	P_f (%)	备注
09-18	1	2.65×10^4	4.4232	85.71	焊趾断
09-9	2	3.54×10^4	4.5490	71.43	焊根断
09-5	3	5.46×10^4	4.7372	57.14	焊趾断
09-16	4	9.18×10^4	4.9628	42.86	焊根断
09-4	5	1.266×10^5	5.1024	28.57	焊根断
09-6	6	1.346×10^5	5.1290	14.28	焊趾断

经检查无可疑数据, P_j 和 $\log N_j$ 在正态概率纸上亦符合正态分布。数据处理结果如下:

$$\bar{X} = 4.8173 \quad N_{50} = 6.57 \times 10^4 \text{ (次)}$$

$$S = 0.2937 \quad C_r = S / \bar{X} = 0.0609$$

3.2 低应力(升降法)试验数据(级差 4.9MPa)

表7 低应力(升降法)试验数据

应力水平 $\Delta\sigma$ (Kgf/mm ²)	试样号	寿命(次)	备 注
9.5	09-15	6.380×10^5	焊趾断
	09-11	4.655×10^5	焊根断
9.0	09-13	9.231×10^5	焊根断
	09-14	$> 10^6$	
	09-10	9.009×10^5	焊根断
	09-20	$> 10^6$	焊趾起裂
8.5	09-3	$> 10^6$	
	09-7	$> 10^6$	

按式: $\sigma_{rc} = \frac{1}{n} \sum V_j \sigma_j$ 计算

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{0.1c} &= \frac{1}{9} [2 \times 93.1 + 5 \times 88.2 + 2 \times 83.3] \\ &= 88.2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

其中(×)点亦当成一有效点计入。

标准差: $S = 1.106$

变异系数: $C_r = S / \Delta\sigma_{0.1c} = 0.0125$

S-N 曲线在双对数座标下 $\log N_{50} - \log \Delta\sigma$ 的直线方程为:

$$\log N_{50} = 9.4778 - 3.6445 \log \Delta\sigma$$

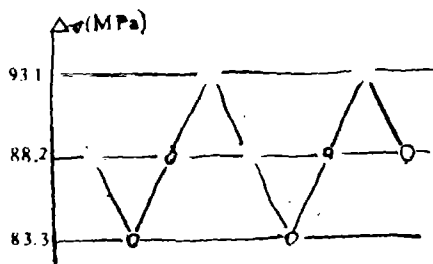


图8 升降图 (×-破坏; ○-未断)

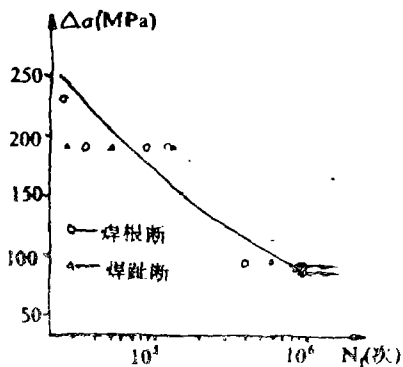


图9 WT09 试样的 S-N 曲线

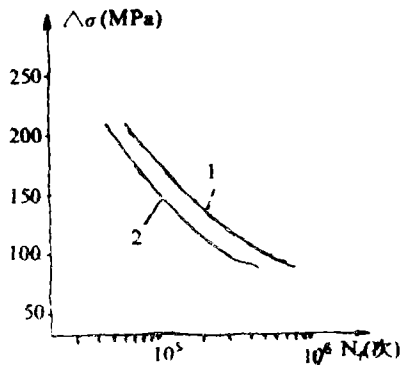


图10 开剖口接头与不开剖口接头 S-N 曲线比较

①开剖口接头; ②不开剖口接头

图 10 比较了焊高为 $15 \times 15\text{mm}$ 不开剖口接头的中值 S-N 曲线和本试验接头的 S-N 曲线, 结果表明: 开剖口接头的抗疲劳性能高于不开剖口接头的抗疲劳性能。

4 结果评论

4.1 文献[5]用断裂力学的方法给出十字焊接接头(焊缝承载)破坏形式的焊缝临界尺寸(图 11), WT09 试样图纸规定: 未焊合宽度为 4mm , 但实际加工出来的试样未焊合宽度在 $5 \sim 8\text{mm}$ 之间, 破坏点在临界曲线附近波动, 因而破坏应具有焊缝和焊趾破坏的两种可能。实验结果也证实了这一点, 也就是说, WT09 试样在焊根和焊趾处是等强度的, 至于在什么部位破坏, 取决于焊根和焊趾处的局部焊接质量。在焊根处起裂的试样, 焊接质量低劣, 焊渣较多, 而在焊趾处起裂的试样都有不同程度的咬边。

4.2 焊接质量和焊接分散性, 使试验数据分散性加大, 同一应力水平下, 寿命可相差 $4 \sim 5$ 倍。

4.3 由于开了剖口, 故接头的抗疲劳性能要比不开剖口的接头好。

4.4 疲劳裂纹起始寿命为总寿命的 $60\% \sim 75\%$, 未焊合越长, 起始寿命就越短, 总寿命也就越短。

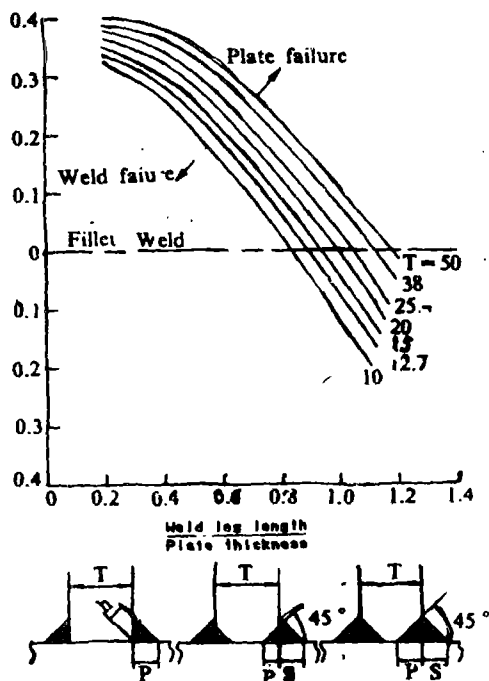


图 11 角焊接接头破坏临界焊缝尺寸

5 结 论

5.1 由试验求得了 16Mn 板钢材开剖口十字焊接接头的 S-N 曲线和在指定寿命 (1×10^6 周) 下的条件疲劳极限为 88.2MPa (应力范围 $\Delta\sigma$, $R=1.0$)。

5.2 开剖口接头的抗疲劳性能比不开剖口接头在同样荷载下的抗疲劳性能要好, 因此; 对于承受轴向荷载的十字焊接接头, 应尽量采用开剖口焊接接头。

5.3 接近 50% 的 WT09 接头在焊根破坏, 其余均在焊趾破坏, 此结果表明: 所使用的开剖口接头的焊缝尺寸处于临界尺寸, 焊根和焊趾处的疲劳强度是相等的。

5.4 疲劳裂纹起始寿命约为总寿命的 $60\% \sim 75\%$ 。

5.5 无论在焊根处起始并扩展和在焊趾处起始并扩展的裂纹绝大部分以 I 型穿透裂纹扩展, 个别以半椭圆表面裂纹和角裂纹扩展。

参 考 文 献

- (1) 邹十践译. 焊件疲劳设计的分析方法和图解法. 机械强度, No.1, 1989
- (2) 徐源著. 疲劳强度设计. 机械工业出版社, 1984
- (3) C.B.谢联先主编, 汪一麟译. 机械零件的承载能力和强度计算. 机械工业出版社, 1984
- (4) 高镇同著. 疲劳性能测试. 机械工业出版社, 1983
- (5) H.Ouchida. A study of fatigue strength of fillet welded joints. Schueiss technik, Vol.16, No.4, 1966

The Experimental Research of the Fatigue Strength of the Cruiform Welded Joints

Zhu Anguo Han Lianyuan
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In the paper, the fatigue tests of the grooved transvers load-carrying cruiform welded joints had been carried out, Researched the location of the initial fatigue crack of joints and the behavior of the crack growth and the failures of joints, Obtained the condition fatigue limits (1×10^6 cycles) by using stair case. The fatigue data and design cures were provided for the designing of welded structures in engineering.

Keywords: fatigue test, fatigue strength cruiform welded joint, groove