

# 两种结构钢板焊接头的基础疲劳曲线\*

杜云海 丁遂栋 韩连元 孟庆波

(郑州工学院数理力学系)

**摘 要:** 对A<sub>3</sub>、16Mn两种国产结构钢板, 取V型坡口和无坡口两种对接形式, 用二氧化碳气体保护焊和埋弧自动焊两种焊接工艺制成的八种板焊接头, 在应力比  $R=0.1$  的纯弯加载方式和室温、大气环境下进行成组疲劳试验, 以获得它们的  $P-S-N$  曲线。这一研究的结果可为对焊构件的疲劳设计与计算提供可靠的依据。

**关键词:** 疲劳, 对焊接头,  $P-S-N$  曲线

**中图分类号:** 0346

焊接结构广泛应用于桥梁工程、矿山工程、起重机械、运输机械和海洋工程等各个工程领域, 许多焊接结构又是在重复应力条件下工作的。由于焊接区内材料微观组织的不均匀性、焊接缺陷、残余应力以及应力集中等因素的影响, 使得焊缝的疲劳强度远低于母材的疲劳强度, 在重复应力下工作的焊接结构常见的失效方式都是在焊缝部位的疲劳断裂。文[1]所述拌粉机机壳的疲劳破坏就是一个典型的例子。为了防止焊接构件的疲劳失效, 必须对承受重复应力的焊接部件进行疲劳设计。在国外, 焊接结构方面的研究比较完善, 已有许多设计标准供设计者作用; 而在我国, 因缺乏焊接结构的系统研究, 使得焊接结构的设计一般还是采用静强度设计方法, 可靠性低、成本高, 尽快改善焊接件设计方法的现状势在必行。近年来, 我国许多研究单位已做了大量工作, 取得了不少研究成果, 这无疑使我国的焊接结构设计方法向前迈进了决定性的一步。本文所述, 即为“典型焊接接头疲劳强度与断裂行为研究”课题的部分工作——10mm 厚度国产 A<sub>3</sub>、16Mn 结构钢板以 V 型坡口、无坡口形式对接, 采用 CO<sub>2</sub> 气保焊和埋弧自动焊制成的八种板焊接头的基础疲劳曲线的试验研究成果。

## 1 材料成分、力学性能及疲劳试样

### 1.1 母材及焊材化学成分

---

\* 机械工业技术发展基金资助项目。

收稿日期: 1994-02-21

A<sub>3</sub> 和 16Mn 国产热轧钢板(厚度 10mm)母材及相应 CO<sub>2</sub> 气保焊和埋弧自动焊焊材的化学成分详见表 1。

表 1 A<sub>3</sub>、16Mn 母材及焊材化学成分

化 学 成 分		C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)
A <sub>3</sub>	母 材	.15	.45	.18	.028	.029
	气保焊焊材	.10	1.28	.47	.013	.011
	埋弧焊焊材	.082	1.21	.53	.028	.013
16Mn	母 材	.16	1.4	.42	.015	.025
	气保焊焊材	.10	1.27	.45	.019	.015
	埋弧焊焊材	.12	.88	.24	.028	.020

1.2 母材及焊材力学性能

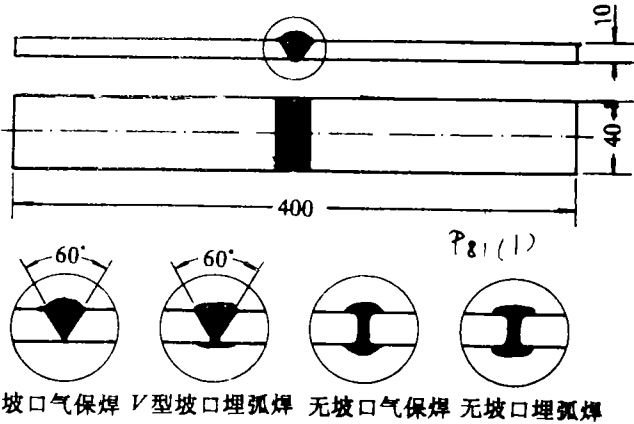
母材及焊材的主要力学性能详见表 2。

表 2 A<sub>3</sub>、16Mn 母材及焊材力学性能

力 学 性 能		$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	$\alpha_k$ (J / cm <sup>2</sup> )
A <sub>3</sub>	母 材	270	500			147
	气保焊焊材	250	399	31.6	62.6	174
	埋弧焊焊材	263	404	29.9	63.9	97
16Mn	母 材	380	560	31	63.5	372
	气保焊焊材	351	537	27.6	67	68
	埋弧焊焊材	339	505	18.4	58.9	73

1.3 疲劳试样

将 10mm 厚度板材以 V 型坡口、无坡口对接形式进行气保焊和埋弧焊后，再切割加工成图 1 所示的疲劳试样，板面及焊缝均为原始状态，不经加工。两种材料共八种对焊接头疲劳试样。试样加工由太原重型机器厂按现行焊接规范完成。



2 试验条件及试验方案

2.1 试验条件

图 1 横向对焊接头疲劳试样

2.1.1 设备 疲劳试验用国产 PLG-100 型高频拉-压疲劳试验机，静载试验用国产 WJ-10 型万能材料试验机。

2.1.2 加载方式 采用四点弯曲加载。考虑到焊接件的平整性较差，为保证疲劳试验顺

利进行,使用自制双向平面辊轴支承。试验时,在安装试件后,先以小幅载荷短时间加载,使支承与板面的接触情况自动调整达最佳状态,然后固定横向辊轴,按要求的载荷正式试验,并开始记录循环次数。

2.1.3 试验频率 由试样及试验机振动系统刚度决定的试验频率在 70~110HZ 之间。

## 2.2 试验方案

根据文[2]建议,采用 2~3 级应力成组法试验方案。每级应力下要获得 8~10 个有效疲劳数据。最低级应力按疲劳寿命约达 2000 千周来估算,最高级应力取在材料屈服极限附近。断裂寿命定义为疲劳裂纹扩展到板厚一半时的循环次数。试验时,设置下限保护载荷为试验载荷(平均载荷或载荷幅)的 50%即可有效地控制试验机在裂纹深度达板厚一半左右时自动停机。若循环次数超过 2000 千周试件仍未起裂,则继续试验到 5000 千周,如仍未起裂则停机按无效数据处理,不计试验结果。

## 3 试验结果及数据处理

### 3.1 试验结果

八种对焊接头试样用二级或三级应力成组法得到的疲劳试验数据如表 3 所示。

### 3.2 数据处理

疲劳数据的处理方法详见文献[3],这里不予赘述,其大体步骤如下

- ①可疑数据取舍;
- ②计算变异系数,若  $Cr > 0.04$ ,需增补试验数据;
- ③疲劳试验观测值母体分布检验(正态、威布尔);
- ④按适当母体分布求回归方程

正态分布,求  $\lg N_p = a + bu_p$ ;

威布尔分布,求  $\lg(N_p - N_0) = a + bY_p$ 。

- ⑤由母体分布回归方程求  $N_p$ 、 $\lg N_p$ ;

- ⑥求 P-S-N 曲线回归方程  $\lg N_p = c + d \lg \sigma_a$ 。

表 3 中已舍弃可疑数据和无效数据。在进行威布尔分布检验时,采用安全寿命  $N_0$  的巡回变步长试算法,使相关系数达到极大值的  $N_0$  为安全寿命,并限制  $N_0$  不得大于试验数据中的最小寿命。表 3 中给出的分布检验结果表明,正态和威布尔两种分布都是可以接受的。由两种分布得到的 50%存活率下的疲劳寿命基本相同;而随存活率  $P$  增大,由正态分布推算得到的  $N_p$  偏于完全。因此,在表 3 中仅给出了由正态分布计算得到的回归方程系数  $a$ 、 $b$  及具有一定存活率的疲劳寿命。P-S-N 回归方程  $\lg N_p = c + d \lg \sigma_a$  以及对应的几何图形详见图 2。

表 3 A<sub>3</sub> 和 16Mn 钢八种板焊接头疲劳试验数据及处理结果

板焊接头类别		A <sub>3</sub> 钢 V 型坡口对接				16Mn 钢 V 型坡口对接				A <sub>3</sub> 钢无坡口对接				16Mn 钢无坡口对接			
		气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊	气保焊	埋弧焊
应力幅 $\sigma_a$ (MPa)		135	81	135	81	168.4	126	94.5	168.4	96.75	135	81	135	81	164.8	126	96.75
疲劳寿命观测值千周	1	254	1335	112	946	129	407	958	95.5	521	228	1823	178	1043	137	328	1015
	2	270	1595	156	1026	130	423	1192	103	557	247	1963	213	1152	141	329	1248
	3	312	1721	164	1051	138	425	1225	105	695	256	2096	215	1427	147	362	1321
	4	328	1791	172	1373	141	427	1490	110	755	286	2361	218	1849	149	363	1406
	5	362	2519	204	1818	143	454	1600	113	883	303	2371	232	2012	159	368	1423
	6	374	2657	221	1842	147	461	1847	117	901	309	2638	246	2629	162	383	1430
	7	410	3243	303	2119	169	464	1850	130	1055	336	2841	258	2717	171	383	1555
	8	416	3375	335	2384	174	472	2066	143	1139	373	2864	263	2760	184	393	1906
	9	440		420	2500	175	497	2337	143	1243			280	2978	185	484	2714
	10					196	511	2380	149				324		186	497	3129
变异系数 Cr		.015	.024	.034	.027	.012	.006	.021	.013	.022	.013	.011	.014	.028	.010	.011	.025
正态分布检验相关系数		.981	.975	.986	.966	.967	.983	.983	.973	.987	.993	.982	.983	.960	.976	.932	.940
威布尔分布检验相关系数、最小寿命数、最小寿命		.989	.982	.984	.970	.979	.983	.991	.986	.989	.994	.988	.979	.974	.988	.958	.958
相关系数起码值		53.5	1133	81.3	886	125	388	359	88.3	264	194	1455	119	407	128	314	918
$u_p \sim \lg N_p$		.666	.707	.666	.666	.632	.632	.632	.632	.666	.707	.707	.632	.666	.632	.632	.632
一定存活率下的疲劳寿命 (千周)	a	5.539	6.335	5.330	6.197	5.184	5.656	6.212	5.077	5.918	5.461	6.369	5.379	6.286	5.207	5.586	6.208
	b	.1005	.1817	.2199	.1935	.0725	.0379	.1559	.0795	.1597	.0877	.0888	.0862	.2023	.0590	.0684	.1721
	$N_{50}$ $N_{99.9}$	346 169	2164 594	215 44.8	1574 397	153 91.1	453 346	1628 537	119 67.8	827 265	289 155	2341 1245	240 130	1932 458	161 106	386 237	1615 474

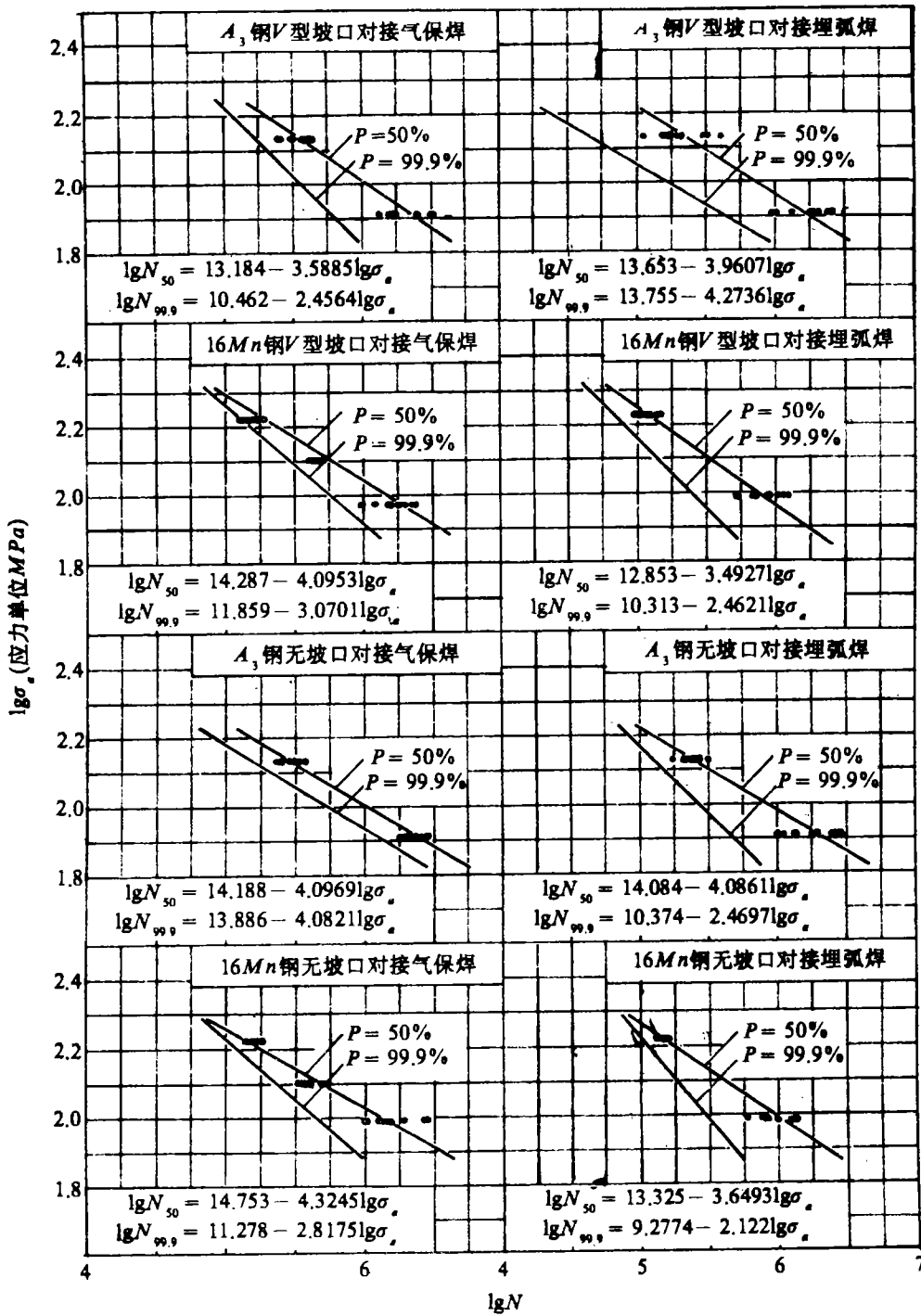
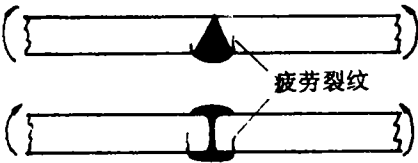


图2 八种板焊接头的P-S-N曲线

3.3 疲劳裂纹位置

八种板焊接头试样的疲劳破坏具有相同的特点, 即疲劳裂纹都沿焊缝在焊趾(单侧或双侧)根部起裂向板中扩展, 见图 3。



4 结果分析

4.1 板焊接头疲劳强度

图 3 板焊接头的疲劳裂纹位置

对所研究的八种对焊接头, 按图 2 中标注的  $\lg N_p - \lg \sigma_a$  关系, 指定寿命  $N=2000$  千周, 可计算出存活率  $P=50\%$  和  $P=99.9\%$  下的疲劳强度  $\sigma_{0.1}$  及其与母材屈服极限之比, 如表 4 所示。

表 4 板焊接头疲劳强度及与母材屈服强度比(基于寿命  $2 \times 10^6$ )

板焊接头母材	对接形式	焊接工艺	疲劳强度 $\sigma_{0.1}(\text{MPa})$		与母材屈服强度比	
			$P=50\%$	$P=99.9\%$	$P=50\%$	$P=99.9\%$
$A_3$	V 型坡口	气保焊	184	110	.681	.407
		埋弧焊	169	123	.626	.456
	无坡口	气保焊	198	144	.733	.533
		埋弧焊	167	94.7	.619	.351
16Mn	V 型坡口	气保焊	187	160	.492	.421
		埋弧焊	178	99.1	.468	.261
	无坡口	气保焊	200	130	.526	.342
		埋弧焊	187	56.2	.492	.148

4.2 不同材料、对接形式及焊接工艺间的比较

4.2.1 不同材料间比较

$A_3$ 、16Mn 两种母材在不同对接形式和不同焊接工艺下的疲劳强度平均值, 在  $P=50\%$  时, 分别为 180MPa 和 188MPa, 而在  $P=99.9\%$  时, 又分别为 118MPa 和 111MPa, 由此可见, 两种材料的焊接头疲劳强度无显著差异。

4.2.2 不同对接形式间比较

在  $P=50\%$  时, 无坡口接头的疲劳强度稍高于 V 型坡口焊接头的疲劳强度, 但在  $P=99.9\%$  时, 又无此规律, 这说明对接形式也不是影响焊接头疲劳强度的主要因素。

4.2.3 不同焊接工艺间比较

比较气保焊接头与埋弧焊接头的疲劳强度, 明显看出, 气保焊工艺可使焊接头具有

较高的疲劳强度; 不仅如此, 在中寿命区, 相同应力水平下气保焊接头的疲劳寿命远高于埋弧焊接头的疲劳寿命, 详见图 4。这种结果, 与气保焊比埋弧焊的焊趾角小且有较大半径的过渡圆弧, 因而与具有较小理论应力集中系数有关; 此外, 也与气保焊焊材有较好的塑性性能 (见表 2), 能进一步削弱焊趾处应力集中有关。

## 5 结 语

用成组疲劳试验法对国产 10mm 厚的  $A_3$  和 16Mn 两种结构钢钢板, 取 V 型坡口和无坡口两种对接形式; 用气保焊和埋弧焊两种焊接工艺制作的八种板焊接头进行了疲劳破坏试验, 通过统计分析得到了这八种焊接头的基础疲劳曲线。这些焊接头的疲劳强度对比表明

5.1 气保焊工艺优于埋弧焊工艺。

5.2  $A_3$  与 16Mn, V 型坡口对接与无坡口对接形式, 对焊接头疲劳强度的影响无显著差异。

5.3  $A_3$  钢焊接头疲劳强度约为母材屈服强度的 44%, 16Mn 钢焊接头的疲劳强度约为母材屈服强度的 30%, ( $P=99.9\%$ )。

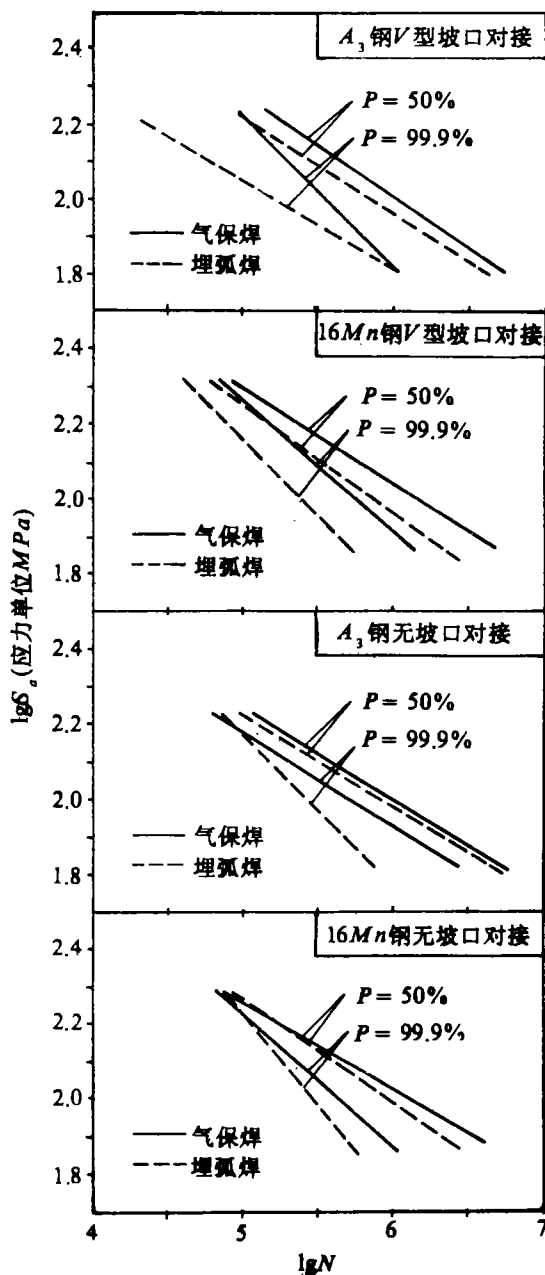


图 4 气保焊、埋弧焊两种工艺比较

## 参 考 文 献

- 1 查世锦等. 电测技术在疲劳强度核核中的应用. 河南科学. Vol.9, No.1, 1991
- 2 丁遂栋. 测定材料 P-S-N 曲线的一种简便方法. 机械强度. Vol.10, No.2, 1988
- 3 高镇同. 疲劳性能测试. 国防工业出版社, 1980.

## Basic Fatigue Curves of Butt Welded Joints in Two

### Kinds of Structural Steel Plate

Du yunhai Ding suidung Han lianyuan Meng qingbe  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** The fatigue test of the eight kind flat welding joints has been carried out with the in groups method, under pure bending load of cycling R-ratio 0.1, room temp. and atmospheric environment, to study their P-S-N curves. These joints are processed with the A<sub>3</sub> and 16Mn steel plate made in china, using CO<sub>2</sub> arc welding and union melt welding technology, as well as V groove and square-butt welding fashion. The results of this study can provide a reliable basis for the fatigue design and calculation of butt welding components.

**Key words:** fatigue butt welding joint, P-S-N Curve

---

(上接第 74 页)

### 参 考 文 献

- 1 汪培庄. 模糊集合论及其应用. 上海科学技术出版社.
- 2 关惠玲、张瑞林. 透平压缩机组故障诊断专家系统研究. 第三届全国机械设备故障诊断学术会议论文集.

## Making a Research into the Method of Abstracting the Symptoms Used by Default Diagnosis System

Guan Huiling Zhang Ruilin  
(Zhengzhou institute of Technology)

**Abstract:** This paper proposes three methods of abstracting symptoms, special frequency, historical analysis and special parameters, and the method of synthesizing three results above on fuzzy synthetic decision model. It makes a basis research into the "bottleneck" problem of diagnosis expert system.

**Keywords:** fault diagnosis, multi-symptom analysis of fault, fuzzy combined decision