

# 海洋平台用高强度钢多次补焊的疲劳分析\*

## FATIGUE ANALYSIS OF MULTIPLE REPAIRING WELDING ON HIGH STRENGTH OFFSHORE STRUCTURE STEEL

刘海涛\*\* 柳春图 黎之奇 崔民子 阚常珍

(中国科学院力学研究所 固体力学研究室, 北京 100080)

LIU Haitao LIU Chuntu LI Zhiqi CUI Minzi KAN Changzhen

(Division of Solid Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

**摘要** 对海洋平台用高强度钢焊接接头多次补焊的疲劳性能进行试验研究, 给出采用威布尔分布下的寿命估算式及  $R-S-N$  曲线。考虑到多次补焊后焊趾外移造成的焊接角的变化, 应用有限元方法计算试样的应力分布, 给出焊趾处的应力集中系数, 由此进一步分析多次补焊对焊接接头疲劳性能的影响。

**关键词** 疲劳强度 补焊 多次补焊

**中图分类号** TG115.57 TE54 O346.4

**Abstract** Based on an experimental study of multiple repairing welded joints on high strength offshore structure steel, the  $R-S-N$  curves and life estimation equations under Weibull distribution are presented. Considering the position and angle of toe changing after each repairing welding, the stress distribution of toe zone has been calculated with FEM program, and the stress concentration factors (SCF) are given. Based on the FEM results, a further analysis of the effect of multiple repairing welding was developed.

**Key words** Fatigue strength; Repairing welding; Multiple repairing welding

Correspondent: LIU Chuntu, Fax: +86-10-62561284

Manuscript received 19990510, in revised form 19990608.

## 1 引言

近海石油平台结构复杂、造价昂贵, 一旦发生事故将造成巨大的损失。各国都十分重视对海洋平台结构用钢的研究, 例如欧共体的 ECSC 计划和英国的 UKOSRP 计划<sup>[2,3]</sup>。平台长期服役在恶劣的海洋环境中, 受到各种交变载荷的作用, 因此重要受力部件的焊缝及其热影响区不可避免的会出现疲劳裂纹。疲劳失效是海洋平台结构失效的一种主要形式, 严重威胁平台的安全。对疲劳裂纹进行补焊修复, 可以消除疲劳裂纹, 延长平台的寿命。因此对焊接接头多次补焊后的疲劳性能研究具有重要意义。由于对平台用钢进行多次补焊后的疲劳试验工作量大, 操作复杂, 一致性很难保证, 所以国内外都鲜有这方面的报道。

## 2 试样的补焊及疲劳试验

试样的形状及尺寸如图 1 所示, 中间部分为 A514 高强度钢, 而两侧为 EH36 中强度钢。焊接及补焊都采用 LB-52 焊条。A514、EH36 及 LB-52 焊条的化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。

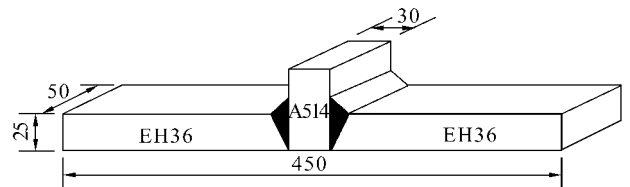


图 1 试样及试样尺寸示意图

Fig. 1 Test specimen and its dimension

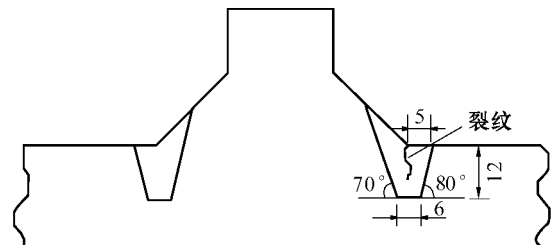


图 2 坡口形状及尺寸示意图

Fig. 2 Groove shape and its dimension

焊缝形状为 V 型, 经过疲劳试验后, 在 V 型焊缝的焊趾处出现裂纹, 裂纹的扩展方向为垂直于试样表面向母材内部扩展 (图 2)。进行补焊前在焊趾开出图 2 所示的坡口, 坡口深度为 12 mm, 坡口两侧的仰角分别为 80 和 60°, 坡口底部留有一个 6 mm 的平面, 以便

\* 19990510 收到初稿, 19990608 收到修改稿。

\*\* 刘海涛, 男, 1972 年 9 月生, 汉族。固体力学专业硕士研究生, 主要研究方向为高强度钢焊接接头的多次补焊及焊后处理对其疲劳寿命的影响。

于焊材能够充分地填充整个坡口。

疲劳试验采用四点弯曲形式,分两个应力级。在初焊试样疲劳试验的基础上,确定低周疲劳应力幅取为  $\sigma_a = 161.28$  MPa,高周疲劳应力幅取为  $\sigma_a = 73.92$  MPa,应力比均为 0.3。

由于试样关于中心完全对称,加载方式为四点弯曲,因此左右两侧焊趾处的最大应力完全相同,出现裂纹的可能性也完全一样,可以认为当任一侧的焊趾处出现裂纹时,另一侧焊缝的剩余疲劳寿命已很短。如只对出现裂纹的一侧焊缝进行补焊,则一方面会破坏试样的对称性,另一方面重新进行补焊疲劳试验时,另一侧未经补焊的焊缝将很快出现裂纹而导致补焊处焊缝的疲劳寿命无法得到。为得到正确的补焊疲劳强度,试验中采用了对称补焊的方法,即在一侧出现裂纹的焊趾处开出坡口的同时,在另一侧焊缝的对称位置上开出形状及尺寸完全一致的坡口,对两侧焊缝同时进行补焊。经这样处理后的补焊试样可保证其几何特性及力学特性左右完全对称。在每次补焊(包括初焊)试样的疲劳试验中,控制疲劳裂纹的深度在 8 mm 以内,所以坡口深度控制在 12 mm 已经可以完全挖掉疲劳裂纹。

表 1 EHB6 中强度钢、A514 高强度钢及 LB-52 焊条的化学成分(重量 %)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mb	B
EHB6 钢	0.10	0.60	0.035	0.04	0.15	0.40	0.40	0.001 2
A514 钢	0.16	0.96	0.04	0.04	0.10	0.25	0.00	0.00
LB-52 焊条	0.08	0.96	0.011	0.007	0.58	0.00	0.00	0.00

表 2 EHB6 中强度钢、A514 高强度钢及 LB-52 焊条的力学性能

	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_s$ / MPa	$\delta_5$ / %
EHB6	490	357	22
A514	770	700	13
LB-52	560	490	32

### 3 试验结果的统计

可靠性分析在疲劳设计中具有重要的意义,目前使用较多的为对数正态分布和威布尔分布。对数正态分布由于较为方便而得到广泛应用,但也存在着一些不足,一、试验数据并非完全是正态分布,采用对数正态分布时得到的结果将是近似的;二是对数正态分布密度函数以水平轴为渐近线,在可靠性取得较高时对寿命的估算结果将偏迂保守。威布尔分布由于有三个参数,得出的分布函数与试验结果符合得更好一些,同时威布尔分布存在一个起始寿命,因此在要求高可靠性时对寿命的估算更接近实际情况。各次补焊的试验数据均按威布尔分布进行处理,对任意可靠度下的疲劳寿命估算由下式给出

$$N_R = N_0 + (N_a - N_0) [\ln(1/R)]^{1/b} \quad (1)$$

其中  $R$  为可靠度,  $N_R$  为给定可靠度  $R$  下的疲劳寿命,  $N_0$  为起始寿命,  $N_a$  为特征寿命,其对应的寿命分布函数值为 63.2%,  $b$  为形状参数或威布尔斜率。

威布尔分布由于有三个独立参数,使得对其参数的解析求解相对复杂。而在对试验数据的统计处理中,大量采用图解法<sup>[5]</sup>求解三个威布尔参数。表 3 列出各次补焊试验结果的威布尔参数。

表 3 各次补焊试验结果的威布尔参数

	起始寿命 $N_0$		特征寿命 $N_a$		威布尔斜率 $b$	
	低周 $\times 10^{-5}$	高周 $\times 10^{-6}$	低周 $\times 10^{-5}$	高周 $\times 10^{-6}$	低周	高周
	初焊	0.92	1.17	2.15	2.62	2.72
一次补焊	0.67	0.70	1.79	2.37	2.71	2.27
二次补焊	1.26	1.00	2.32	3.98	2.02	2.15
三次补焊	0.80	0.80	2.19	4.51	2.38	1.69

### 4 试验结果的比较

按公式(1),焉表 3 中的参数可以计算可靠度  $R = 0.5$  及  $R = 0.999$  时的疲劳寿命。

在双对数坐标下,中低寿命区疲劳寿命  $N$  与加载应力幅  $\sigma_a$  应为直线关系,即

$$\lg N = K \lg \sigma_a + C \quad (2)$$

由式(2)及表 4 可得各次补焊  $R-S-N$  曲线的参数列于表 5。

表 4 可靠度  $R = 0.5$  及  $R = 0.999$  时的疲劳寿命

	$R = 0.5$		$R = 0.999$	
	低周 $\times 10^{-5}$	高周 $\times 10^{-6}$	低周 $\times 10^{-5}$	高周 $\times 10^{-6}$
初焊	2.00	2.43	1.02	1.29
一次补焊	1.65	2.20	0.76	0.90
二次补焊	2.15	3.52	1.30	1.12
三次补焊	1.99	3.78	0.88	0.86

表 5  $R-S-N$  曲线参数

可靠度 $R$	$K$		$C$	
	0.5	0.999	0.5	0.999
初焊	-3.205 1	-3.252 2	12.375 9	12.186 8
一次补焊	-3.317 1	-3.175 5	12.540 5	11.889 8
二次补焊	-3.584 3	-2.765 3	13.244 2	11.217 9
三次补焊	-3.776 5	-2.931 7	13.635 3	11.414 4

可以看到,一次补焊寿命下降约 20%;二次补焊在高周的数据分散性加大,且寿命有所提高,比初焊提高约 10%;三次补焊在  $R = 0.5$  时与二次补焊寿命相当,比初焊高约 10%,在  $R = 0.999$  时与一次补焊相当,比初焊低约 20%。可见三次补焊的疲劳试验数据分散性进一步增大。

就总体而言,经过三次补焊,试样的疲劳寿命没有较大的变化(见图 4),基本分布在一定的分布带中。

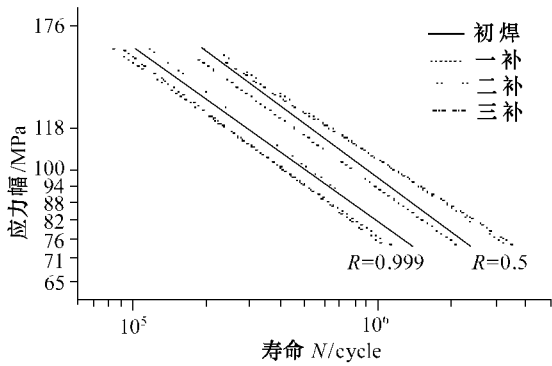


图 3 各次补焊的 R—S—N 曲线

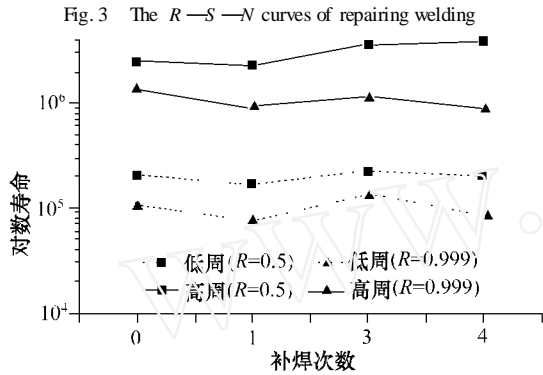


图 4 各次补焊寿命比较

Fig. 4 The life compare of repairing welding

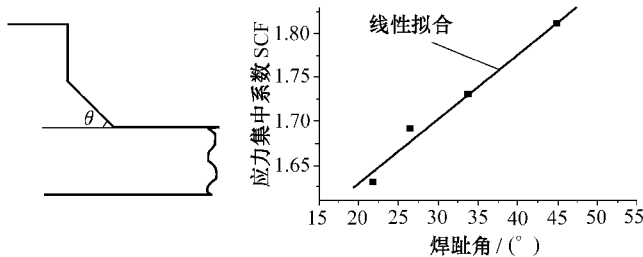


图 5 焊趾角

图 6 应力集中系数与焊趾角的关系

Fig. 5 The welding toe angle Fig. 6 The relationship of SCF and toe angle

其中低周  $R = 0.5$  时的寿命相差约 20%，而最大处寿命也只相差约 40%。考虑到多次补焊中，试样由于焊接的不一致性等原因，这些差距还是合理的，由此可以认为多次补焊对试样的寿命没有较大的影响。究其原因，可以看到在上面叙述的补焊方法中，在焊趾处产生的裂纹被完全挖掉，甚至挖掉了相当的热影响区。在历次疲劳试验所累积的损伤尚未使母材损坏时，就焊趾的局部而言，基本上可以认为是新的。因此各次补焊的疲劳寿命没有较大的改变。

### 5 应力集中的影响

对以上结果，二次补焊和三次补焊的疲劳寿命都超过初焊的疲劳寿命，这一结果有些不合理。考虑到所采用的补焊方法，由于补焊前要开比较大的坡口，所以每次补焊都会造成焊趾外移，焊趾角（见图 5）减小，从而影响焊趾处的应力集中系数。为了考察焊趾角变化对应力集中系数的影响，采用有限元法对试样

的应力场进行计算。焊趾处的过度角半径 5 mm，计算结果（表 6）显示应力集中系数与焊趾角基本成线形关系（图 6），且焊接角在  $20^\circ \sim 50^\circ$  之间时，应力集中系数在 1~2 之间。考虑到应力集中系数的影响，得到各次补焊的  $R-S-N$  曲线。

考虑应力集中系数的影响后，初焊的  $R-S-N$  曲线基本上位于最高位，这也纠正了在图 3 中二次补焊寿命超过初焊寿命的问题，得到的结果更趋于合理。

表 6 焊趾角对应力集中系数的影响

Tab. 6 The effect of welding toe changing on SCF

	焊趾角 / (°)	应力集中系数 SCF
初焊	45.0	1.81
一补	33.69	1.73
二补	26.57	1.69
三补	21.80	1.63

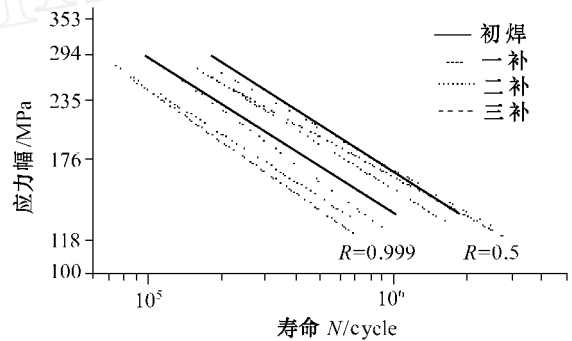


图 7 考虑应力集中系数的 R—S—N 曲线

Fig. 7 The R—S—N curves considering the effect of SCF

### 6 结束语

通过对海洋平台用高强度钢多次补焊试样的疲劳试验，得到如下主要结果：(1) 采用上述补焊方法进行补焊，在母材累积受损未达到其疲劳极限时，补焊后的疲劳寿命与正常情况基本相当。(2) 对于上述焊接形式和用材，焊趾处的应力集中系数与焊趾角间成线形关系，过度角半径为 5 mm 时，其值在焊趾角为  $20^\circ \sim 50^\circ$  度之间时在 1~2 之间。(3) 考虑应力集中系数的影响后，可以得到更为合理的  $R-S-N$  曲线。

#### References

- Gurney T R. Fatigue of welded structures. London: Cambridge University Press, 1977 (In Chinese) (Gurney T R. 焊接结构的疲劳. 北京: 机械工业出版社, 1988).
- Shi L G, Dou R F, Guo W D, et al. Progress of joint strengths of the tubes and columns of ocean steel structures. Advances in Mechanics, 1982, 12(3): 238~254 (In Chinese) (石理国, 窦润福, 郭武德, 等. 近年来国内外海洋钢结构管柱接头强度研究进展. 力学进展, 1982, 12(3): 238~254).
- Chen B Z. Development of the research plans for the offshore structures using steel in European. Advances in Mechanics, 1988, 18(3): 353~361 (In Chinese) (陈伯真. 欧洲近海结构用钢研究计划的进展. 力学进展, 1988, 18(3): 353~361).
- Miki C, Tateishi K, Heng da Fan, Tanaka M. Fatigue strengths of fillet-welded joints containing root discontinuities. Int. J Fatigue, 1993, 15(2): 133~140.
- Gao Z T. Applications of statistics in fatigue. Beijing: National Defence Industry Press, 1986 (In Chinese) (高镇同. 疲劳应用统计学. 北京: 国防工业出版社, 1986).