

# 高强钢焊接接头的低温疲劳性能 及其灰色预测

张国九 蔡宏彬 崔凤池

(哈尔滨焊接研究所)

**摘要** 首次测试了 HQ80C 低合金高强钢焊接接头 -40℃ 低温疲劳性能 ( $S-N$  曲线), 为工程设计和保证焊接结构的安全使用提供科学依据; 应用灰色系统理论对试验结果进行灰色建模和预测, 达到了指导试验和提高试验精度的目的。

**关键词** 焊接接头; 低温疲劳性能; 灰色预测

## 0 序言

为保证高强钢焊接构件在低温等恶劣环境下的安全服役, 要综合考虑三方面问题。一要适当地选择具有良好焊接性和强韧性的钢材; 二要正确地执行焊接工艺, 保证获得优良的焊接接头, 以避免接头区脆化和形成延迟裂纹; 三要了解焊接接头的抗疲劳性能, 为工程设计提供依据。

一般来说, 在焊接结构的设计与制造中, 对前两个问题考虑得较为充分并在焊接性及焊接工艺研究方面做了大量的工作, 而对于焊接接头疲劳性能的研究则较少, 尤其是特殊环境(如 -40℃)下使用的焊接接头疲劳性能的研究更是如此。这主要是由于疲劳试验工作量大、周期长, 数据分散性大且处理较为复杂; 在进行非标准尺寸试样的焊接接头低温疲劳性能试验时, 需用特殊夹具和冷却槽, 试验费用巨大。

为满足大型露天矿设备制造国产化的需要, 本文首次测试了 HQ80C 高强钢焊接接头 -40℃ 低温疲劳性能 ( $S-N$  曲线), 并应用灰色系统理论对试验结果进行建模和预测, 减少了试验盲目性, 提高了试验精度, 取得了满意效果。

## 1 焊接接头低温疲劳性能的实测研究

### 1.1 试验材料及试样制备

试验用钢材为国产 HQ80C 钢, 供货状态为调质态; 试验用焊丝为哈焊所研制的等强焊丝 HS-80A。母材及焊丝熔敷金属的化学成分及力学性能列于表 1 和表 2<sup>[1,2]</sup>。

表 1 HQ80C 钢和 HS-80A 焊丝的化学成分(%)

Table 1 Chemical composition of HQ80C steel and HS-80A welding wire(%)

Materials	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Cr	Ti	S	P
HQ80C steel	0.14	0.29	1.10	0.008	0.49	0.26	1.04	-	0.018	0.015
HS-80A welding wire	≤ 0.12	≤ 0.60	≤ 1.8	< 2.5	< 0.6	< 0.3	-	< 0.2	≤ 0.03	≤ 0.03

表 2 HQ80C 钢和 HS-80A 焊丝熔敷金属的力学性能

Table 2 Properties of HQ80C steel and HS-80A deposited metal

Materials	$\sigma_b$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\delta_s$ (%)	$\psi$ (%)	Akv - 40 ℃ (J)
HQ80C steel	786	700	18.0	60.3	51.3
HS-80A deposited metal	798	766	21.2	66.1	113.3

试验板厚 20mm, 单 V 型坡口对接接头, 试验焊缝采用 Ar + 20%CO<sub>2</sub> 气体保护焊焊接, 焊接参数分别为: 焊接电流 280 ~ 300A, 焊接电压 28 ~ 30V, 焊接速度 4.3 ~ 4.5mm/s, 预热及层间温度 120 ~ 130 ℃。试样尺寸如图 1 所示, 为减少数据的分散度应尽可能地使试样接头区的焊缝外形一致。为了分析和比较, 还测试了相应温度下母材的疲劳性能。

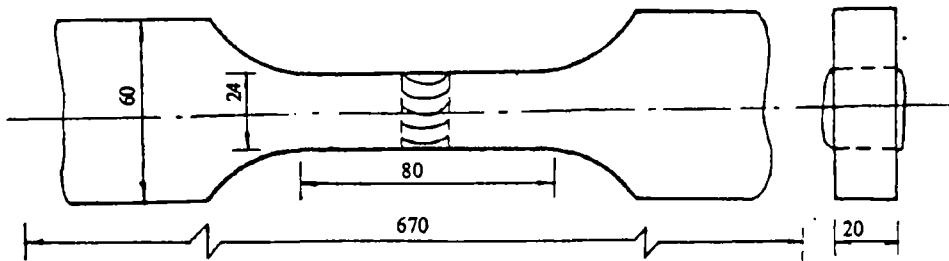


图 1 疲劳试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of fatigue test specimen

## 1.2 低温疲劳试验

疲劳试验按照 GB2656-81 和 GB3075-82 在 Instron1346 型电液伺服疲劳试验机进行, 试验机静、动负荷精度均满足国标要求。试验温度为 -40 ℃, 试样经 20 min 保温后

进行试验,试验过程中温度误差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 之内。试验为拉—拉疲劳试验,应力比 $R=0.1$ ,正弦波形。根据焊接接头疲劳特性和工矿机械使用的特点,试验在一定疲劳循环周次( $10^6$ 次)范围内,测试了对应于不同最大疲劳应力( $S$ )下的低温疲劳破断循环次数( $N$ ),结果列于表3和表4。

表3 HQ80C钢焊接接头-40℃低温疲劳试验结果

Table 3 Low temperature ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) fatigue test results of welded joint of HQ80C steel

Test No.	Max. fatigue stress $S$ (MPa)	Cycles-to-failure $N \times 100$	$\lg N$
1	610	94	3.97
2	566	111	4.05
3	520	167	4.22
4	460	230	4.36
5	380	487	4.39
6	300	1369	5.14
7	220	3411	5.53
8	180	8634	5.94
9	160	10000(no failure)	6.0

表4 HQ80C钢母材-40℃低温疲劳试验结果

Table 4 Low temperature ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) fatigue test results of base metal HQ80C steel

Test No.	Max. fatigue stress $S$ (MPa)	Cycles-to-failure $N \times 100$	$\lg N$
1	659	150	4.17
2	575	579	4.76
3	520	3138	5.50
4	480	3311	5.52
5	450	3558	5.55
6	430	3815	5.58
7	400	6703	5.83
8	380	10000(no failure)	6.0

### 1.3 试验结果分析

文献[1]测试HQ80C钢焊接接头各区域的疲劳裂纹扩展速率,结果表明:疲劳裂纹在接头焊缝区和热影响区的扩展速率低于在母材中的扩展速率,说明焊缝和热影响区阻碍疲劳裂纹扩展的能力不低于母材。尽管如此,但就焊接接头而言,和母材相比存在着由接

头几何形状所决定的应力集中,使得接头的条件疲劳极限均小于母材在同样循环次数下的条件疲劳极限,表3和表4试验结果证实这一点。正是由于应力集中的作用,使得焊趾处的热影响区优先成为疲劳断裂处,在接头的拉-拉低温疲劳试验中,较高应力下发生疲劳破坏的位置绝大多数在焊趾处。因此减少应力集中的措施(如焊缝修磨等)是工程中提高焊接接头抗疲劳性能的有效方法。

## 2 焊接接头低温疲劳性能的灰色预测

### 2.1 预测的依据

本文预测模型的建立主要基于金属材料的疲劳特性曲线即  $S-N$  曲线。不同材质的  $S-N$  曲线,其形状大致可分为两种类型,见图2。对于常温下的钢铁材料,其  $S-N$  曲线有明显的水平部分(图2a),即疲劳极限有明确的物理意义;而对于有些不均匀材料,如焊接接头或在特殊环境(如低温、腐蚀等)下使用的材质,其  $S-N$  曲线则没有水平部分(图2b),这就需设定某一循环次数  $N_0$ (循环基数)所对应的应力作为“条件疲劳极限”。循环基数  $N_0$  根据被试材料的疲劳特性和工程设计需要而定,本文测试 HQ80C 钢焊接接头低温疲劳性能时,取  $N_0$  为  $10^6$  次。考察图2的  $S-N$  曲线,同灰色预测的极值模式和延伸模式相一致,故选择和建立单序列一阶线性动态模型 GM(1,1),运用灰色系统理论<sup>[3]</sup>,在试验数据的基础上进行疲劳性能的灰色预测并借以指导试验。

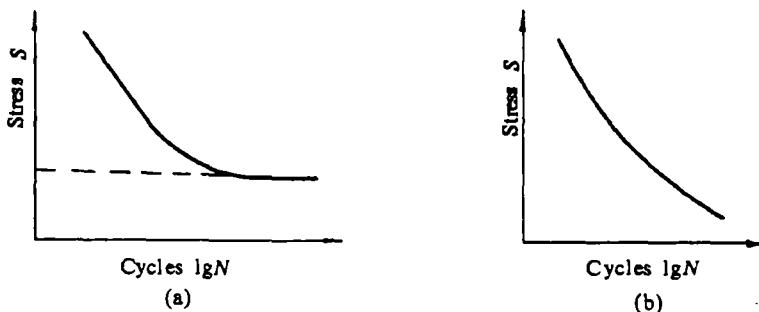


图2 疲劳曲线的两种类型

Fig.2 Two types of fatigue curves

### 2.2 数据处理及建模

以 HQ80C 钢焊接接头的低温疲劳试验为例。根据灰色系统建模方法,将表3数据处理如下:以  $\Delta s = 50 \text{ MPa}$  为步长建立应力序列  $s(K)$ ,相应循环次数的对数值  $\lg N$  为循环次数序列,记为  $x^{(0)}(K)$ ,如果存在灰区间(即无适当试验点数据),则可按灰数“白化”方法计算相应值,并建立关于  $x^{(0)}(K)$  的一次累加生成序列  $x^{(1)}(K)$ ,列于表5。

表5 依据试验结果建立的应力序列和循环次数序列  
Table 5 Stress series and cycles series based on test results

Series No <i>K</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stress series <i>S(K)</i> (MPa)	610	560	510	460	410	360	310	260	210
Cycles series <i>x<sup>(0)</sup>(K)</i>	3.97	4.04	4.24	4.36	4.57	4.80	5.08	5.34	5.63
$x^{(1)}(K) = \sum_{i=1}^K x^{(0)}(K)$	3.97	8.01	12.35	16.61	21.18	25.98	31.06	36.40	42.03

首先以高应力区的试验数据点(序数1~5)为基础,建立GM(1,1)模型,相应的微分方程为:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \quad (1)$$

其解为:

$$x^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}) e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (2)$$

计算a、u的参数量 $\hat{a}$ :

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} (x^{(0)}(2) + x^{(0)}(1)) & 1 \\ -\frac{1}{2} (x^{(0)}(3) + x^{(0)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2} (x^{(0)}(4) + x^{(0)}(3)) & 1 \\ -\frac{1}{2} (x^{(0)}(5) + x^{(0)}(4)) & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y = [x^{(0)}(2) \ x^{(0)}(3) \ x^{(0)}(4) \ x^{(0)}(5)]^T \quad (5)$$

将表5数据代入以上各式并计算:

$$B = \begin{bmatrix} -5.99 & 1 \\ -10.13 & 1 \\ -14.43 & 1 \\ -18.90 & 1 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 4.04 \\ 4.24 \\ 4.36 \\ 4.57 \end{bmatrix}$$

$$(B^T B)^{-1} B^T = \begin{bmatrix} 0.0676 & 0.0229 & -0.0235 & -0.0718 \\ 0.0229 & 0.10735 & 0.5258 & -0.0431 \\ -0.0235 & 0.5258 & 0.6338 & -0.6338 \end{bmatrix}$$

所以

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} -0.0604 \\ 3.4819 \end{bmatrix}$$

即  $a = -0.0604 \quad u = 3.4819$

将计算结果代入式(2)中:

$$x^{(1)}(t) = 61.6181 e^{0.0604(t-1)} - 57.6481 \quad (6)$$

当  $t$  取应力序数  $K$  时, 即得预测模型:

$$x^{(1)}(K) = 61.6181 e^{0.0604(K-1)} - 57.6481 \quad (7)$$

### 2.3 检验

取  $K=1, 2, 3, 4, 5$ , 由式(7)计算出一次累加生成序列:

$$x^{(1)}(K) = \{3.97 \quad 7.81 \quad 11.89 \quad 16.21 \quad 20.81\} \quad (8)$$

由表 5 给出实测的一次累加生成序列:

$$x^{(1)}(K) = \{3.97 \quad 8.01 \quad 12.25 \quad 16.61 \quad 21.183\} \quad (9)$$

比较式(8)和式(9), 两者相对误差的平均值仅为 0.26, 可见吻合精度是较为理想的, 建立的预测模型是可信的。

### 2.4 预测

疲劳性能预测包括两方面内容。一方面, 根据高应力区试验数据建立模型, 预测低应力区的结果, 即  $S-N$  曲线的下半段。因为疲劳试验时, 应力水平越低, 循环次数就越大, 试验时间就越长, 所以这种预测很有实用价值。

当疲劳应力分别为 360MPa、310MPa、260MPa 和 210MPa(对应序数  $K$  分别为 6、7、8 和 9)时, 利用式(7)预测循环次数的一次累加生成序列  $x^{(1)}(K)$ , 并据此计算出相应的原始序列  $x^{(0)}(K)$ :

$$x^{(1)}(K) = \{25.70 \quad 30.88 \quad 36.40 \quad 42.25\} \quad (10)$$

$$x^{(0)}(K) = \{4.89 \quad 5.18 \quad 5.52 \quad 5.85\} \quad (11)$$

此时试验实测的疲劳破断时循环次数的对数序列由表 5 给出:

$$x^{(0)}(K) = \{4.80 \quad 5.08 \quad 5.34 \quad 5.63\} \quad (12)$$

比较式(11)和式(12), 不难看出预测值与实测值较为吻合但预测点(如  $K=9$ )与建模的最大采样点(即  $K=5$ )间距拉大时, 预测误差有所增加, 仍不失指导试验并且这种误差可采取措施加以减小。

疲劳性能预测的另一内容就是预测条件疲劳极限。记预测的循环次数为  $N_f$ , 条件疲劳极限对应的循环基数为  $N_0$ , 那么有以下三种情况:

(a) 如果  $N_f - N_0$  接近或相等, 则  $N_f$  所对应的疲劳应力值就是条件疲劳极限的预测值;

(b) 如果  $N_f > N_0$ , 即  $N_f$  对应的疲劳应力值小于条件疲劳极限, 则可按插值法计算  $N_0$  所对应的疲劳应力值作为条件疲劳极限的预测值;

(c) 如果  $N_f > N_0$ , 即  $N_f$  对应的疲劳应力值大于条件疲劳极限, 需进一步建模预测, 直至出现(a)、(b)两种情况。

现仍以 HQ80C 钢焊接接头为例, 预测  $N_0 = 10^6$  次时的条件疲劳极限。

根据式(7)预测, 当疲劳应力分别为 210MPa 和 160MPa 时, 相应的循环次数对数值为:

$$x^{(0)}(9) = 5.85 \quad x^{(0)}(10) = 6.22$$

采用插值法结合最接近的实测数据(见表3),计算条件疲劳极限的预测值:

$$S_0 = 180 - \frac{6 - 5.94}{6.22 - 5.94} (180 - 160) = 175 \text{ MPa}$$

从物理意义上讲,当疲劳应力取175MPa时,试样经过 $10^6$ 次疲劳循环后发生破断。表3试验结果表明,当疲劳应力为160MPa(小于 $S_0$ ,15MPa)时,经过 $10^6$ 次疲劳循环,试样仍未断裂破坏,这说明条件疲劳极限的预测值与试验结果吻合良好。

### 3 HQ80C钢母材疲劳性能的灰色预测

按上述同样步骤,对HQ80C钢母材的疲劳性能进行预测。以 $\Delta s = 50 \text{ MPa}$ 为步长,取高应力区5个实测点建立预测模型:

$$x^{(1)}(K) = 73.1094e^{0.0613(K-1)} - 68.9394 \quad (13)$$

取 $K=7$ ,即当 $s=359 \text{ MPa}$ 时,预测 $\lg N = 6.28$

采用插值法结合实测数据,计算 $N_0 = 10^6$ 次时的条件疲劳极限的预测值:

$$S_0 = 400 - \frac{6.0 - 5.83}{6.28 - 5.83} (400 - 359) = 385 \text{ MPa}$$

表3试验结果表明,当疲劳应力为380MPa时,疲劳循环 $10^6$ 次后试样不发生疲劳破断,说明预测精度较高、故按式(13)模型在 $N_0 = 10^6$ 次范围内预测的 $S-N$ 曲线与实测的 $S-N$ 曲线较为吻合。

### 4 灰色预测与实测的关系

从本文实践来看,可从以下几个方面注意灰色预测与实测的关系。

首先,根据被预测对象的客观规律科学地选择预测模型。对于类似图2的疲劳 $S-N$ 曲线,只要满足灰色预测模式,选择GM(1,1)模型作为预测的基础和依据,是较为可行的。

其次,为保证预测精度,应注意灰色预测的动态性,即动态建模和预测。可通过三种途径提高灰色预测的精度:

(a)不断地把经过实测验证的预测点作为采样点,进行再次建模和进一步预测,为下一点实测提供指导;

(b)适时选择合适的步长。对于疲劳试验,在高应力区选择应力的步长一般较大,而在低应力或接近某一条件疲劳极限时选择应力的间隔则较小,以利于提高预测值的精度;

(c)采取单段函数残差辨识方法<sup>[3]</sup>对预测模型进行动态修正。

灰色建模和预测过程完全可实现微机编程运算。预测和实测同步进行,达到指导试验提高试验精度的目的。

## 5 结论

(1)首次测试了HQ80C钢焊接接头-40℃低温疲劳性能( $S-N$ 曲线),为工程设计和保证焊接结构的安全使用提供了科学依据。

(2)用灰色系统建模预测方法,结合微机进行数据处理,可迅速简便地预测焊接接头低温疲劳性能,达到指导试验,减少试验盲目性和提高试验精度的目的。

(1992年11月13日收到修改稿)

### 参 考 文 献

- 1 张国九. HQ80C钢焊接性、焊接工艺及接头性能的研究. 哈焊所科技报告, 1990.
- 2 张显辉, 谭长瑛. 寒冷地区用高强钢气体保护焊实芯焊丝的研制. 哈焊所科技报告, 1990
- 3 邓聚龙. 灰色控制系统. 武汉: 华中工学院出版社, 1985

### Low temperature fatigue property and its grey forecast of welded joint of HSLA steel

Zhang Guoju, Cai Hongbin and Cui Fengchi

(Harbin Research Institute of Welding)

**Abstract** The authors took the lead in studying the low temperature(-40℃) fatigue property ( $S-N$  curve) of welded joint of HSLA steel, HQ80C, thus providing a scientific basis for engineering design and so also the welded structure safety. The test results were modeled and forecasted by applying the Grey System Theory for guiding the test process and improving test precision.

**Key words** welded joint; low temperature fatigue property; grey forecast