



导管架过渡段、剪力键有限元疲劳损伤及疲 劳改善技术规程

中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司

目录

1. 疲劳计算和焊缝改善原理	1
1.1 疲劳计算方法	1
1.2 焊缝改善原理	4
1.3 设计疲劳系数与材料侧安全系数	4
2. 计算过程	6
2.1 参数取值与累计疲劳损伤计算	6
2.1 T型对接焊缝的焊缝疲劳改善	7

1. 疲劳计算设计依据

1.1 计算依据与公式

依据 DNVGL-RP-C203 中 2.4.3 节，疲劳强度可规定如下：

The fatigue strength of welded joints is to some extent dependent on plate thickness. This effect is due to the local geometry of the weld toe in relation to thickness of the adjoining plates. See also effect of profiling on thickness effect in [7.2]. It is also dependent on the stress gradient over the thickness. See [F.5], Commentary. The thickness effect is accounted for by a modification of the stress range such that the design S-N curve for thickness larger than the reference thickness reads:

规范翻译：焊接接头的疲劳强度在一定程度上取决于板厚。这种影响源于焊趾的局部几何形状与相邻板厚的关系。参见[7.2]中关于轮廓对厚度影响的讨论。此外，它还受到厚度方向上应力梯度的影响。参见[F.5]的注释。厚度影响通过调整应力范围来考虑，使得对于大于参考厚度的设计 S-N 曲线为：

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right)$$

$$\log N = \log \bar{a} - m \log \left((\gamma_m \times SCF \times \sigma) \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right)$$

其中：m—S-N 曲线的负逆斜率，根据选择曲线，在表 1-1 中取值；

$\log a$ — 对数 N 轴的截距，根据选择曲线，在表 1-1 中取值；

t_{ref} — 参考厚度，对于非管状焊接，焊接连接（管状接头除外）的参考厚度为 25 毫米。对于管状接头，参考厚度为 16 毫米。螺栓的参考厚度 $t_{ref}=25$ 毫米；

	非管状 节点 mm	管状节 点 mm	螺栓 mm
参考厚度 t_{ref}	25	16	25

t —裂纹最有可能增加的厚度，取板厚度；

k —疲劳强度的厚度指数，根据选择曲线，在表 1-1 中取值；

$\Delta\sigma$ —为应力幅值，取等效疲劳荷载下的有效应力值。

对过渡段选用 DNVGL-C203 中的表 1-1 进行疲劳计算，如下表和下图所示。

注：（由于过渡段处于空气中，所以取空气中的 S-N 曲线）

1.2 参考 S-N 曲线表

依据 DNVGL-RP-C203 中 2.4.4 节~2.4.6 节中内容，S-N 曲线参数选取如下：

（注：过渡段处于空气中因此只选用空气中的 S-N 曲线，如涉及到其他部位，可按需选取其他曲线）

（1）空气中的 S-N 曲线

表 1-1 空气中 S-N 曲线参数表

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_1$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles (MPa) [*]	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), see also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50

^{*}) see also [2.11]

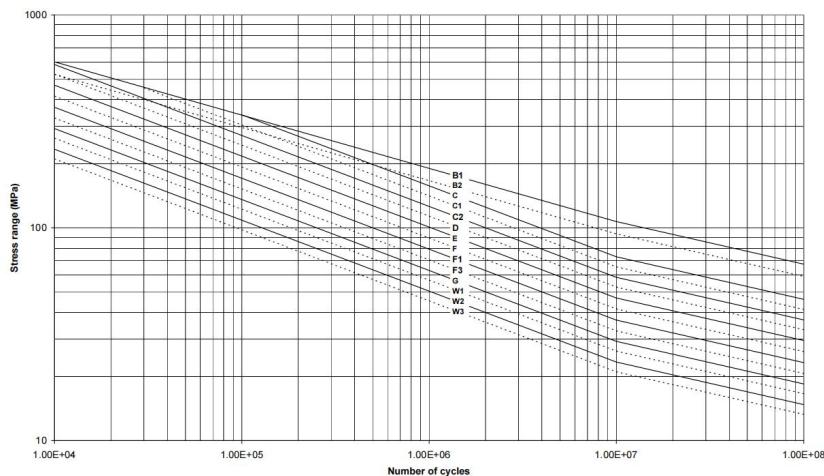


图 1-1 空气中 S-N 曲线图

（2）阴极保护下海水环境中的 S-N 曲线

表 1-2 阴极保护下海水环境中的 S-N 曲线参数表

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$	Fatigue limit at 10^7 cycles (MPa) *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), see also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.05	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.10	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50

*) see also [2.11]

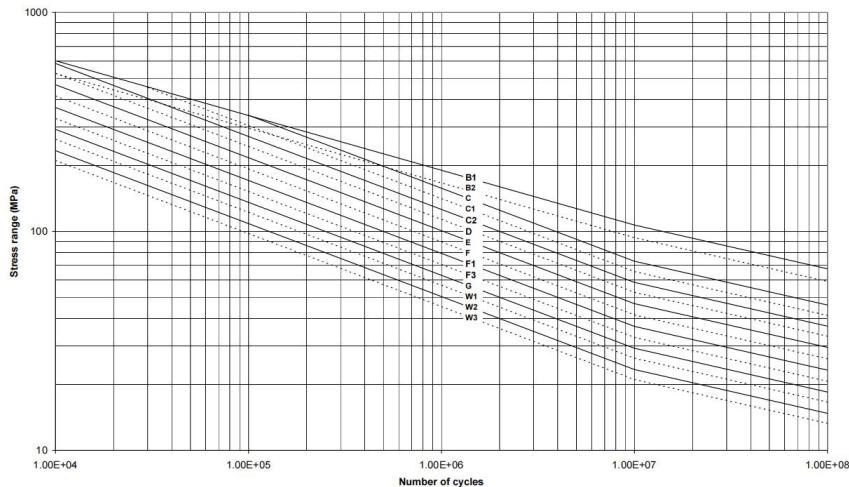


图 1-2 阴极保护下海水环境中的 S-N 曲线图

(2) 管节点的 S-N 曲线

表 1-3 管节点的 S-N 曲线参数表

Environment	m_1	$\log \bar{a}_1$	m_2	$\log \bar{a}_2$	Fatigue limit at 10^7 cycles (MPa) *)	Thickness exponent k
Air	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles			
	3.0	12.48	5.0	16.13	67.09	0.25
Seawater with cathodic protection	$N \leq 1.8 \cdot 10^6$ cycles		$N > 1.8 \cdot 10^6$ cycles			
	3.0	12.18	5.0	16.13	67.09	0.25
Seawater free corrosion	3.0	12.03	3.0	12.03	0	0.25

*) see also [2.11]

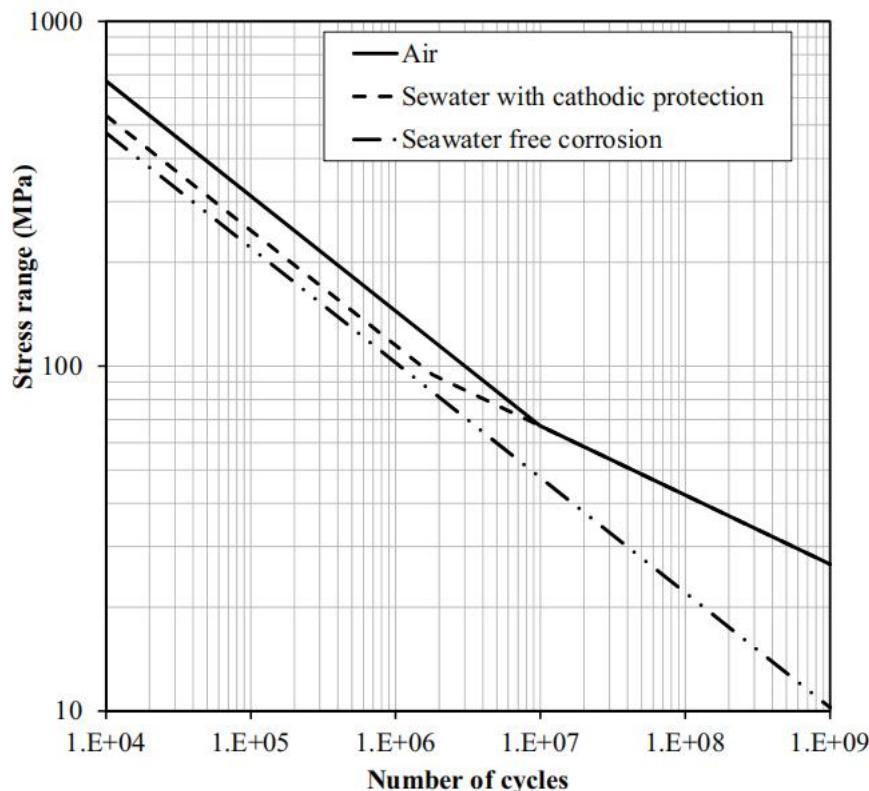


图 1-3 管节点的 S-N 曲线图

1.3 设计疲劳系数与材料侧安全系数

在疲劳设计计算时，需考虑设计疲劳系数和材料侧安全系数，但二者不同时考虑，即考虑材料系数时，DFF 均考虑为 1；考虑采用 DFF 系数放大疲劳损伤时，不考虑材料侧安全系数。

设计疲劳系数 DFF 的取值如表 1-4 所示：

表 1-4 设计疲劳系数 DFF

位置	是否便 于检查 或维修	S-N 曲 线	DFF
大气区	No	空气中	3
	Yes		2 or 1
浪溅区	No	在空气 中和自 由腐蚀 的结合	3
	Yes		2
浸没区	No	海水中	3
	Yes		2

冲刷区	No		3
冲刷区以下	No		3

依据 DNV-0126 中 4.7.1.3 节, 结构钢材料安全系数可按表 1-5 取值:

表 1-5 结构钢材料安全系数 (依据 DNV-0126 4.7.1.3)

材料系数	ULS	ALS	SLS
γ_{M0}	1.10	1.00	1.00
γ_{M1}	1.10	1.00	1.00
γ_{M2} (螺栓)	1.25	1.00	1.00

材料侧安全系数和疲劳损伤系数 DFF 的相关性如表 1-5 所示:

表 1-5 设计疲劳系数 DFF 和材料侧安全系数的相关性

DFF	γM
1	1
2	1.15
3	1.25

过渡段焊缝的设计疲劳系数除加劲肋 DFF=2 外, 其余均为 DFF=3。

2. 焊缝改善原理

2.1 焊缝改善规范相关内容

依据 DNVGL-RP-C203 中 7.2 章规定, 焊缝改善规定内容如下:

By weld profiling in this section is understood profiling by machining or grinding as profiling by welding only is not considered to be an efficient mean to improve fatigue lives.

In design calculations, the thickness effect may be reduced to an exponent 0.15 provided that the weld is profiled by either machining or grinding to a radius of approximately half the plate thickness, ($T/2$ with stress direction as shown in Figure 7-2 B).

Where weld profiling is used, the calculated fatigue life can be increased taking account of a reduced local stress concentration factor. A reduced local stress due to weld profiling can be obtained as follows.

翻译如下:

由于本节中的焊接轮廓是指通过机械加工或研磨形成的轮廓，因此认为仅通过焊接形成轮廓并不是提高疲劳寿命的有效手段。

在设计计算中，如果通过机械加工或研磨将焊缝轮廓化为板厚一半的半径（应力方向如图 7-2 B 所示， $T/2$ ），则厚度效应可降低至 0.15 的指数。

在使用焊缝轮廓的情况下，考虑到局部应力集中系数降低，因此计算出的疲劳寿命增加。通过以下方法可获得由于焊缝轮廓而降低的局部应力。

进行焊缝剖面分析时，可计算出降低的热点应力，如下所示：

$$\sigma_{Local\ reduced} = \sigma_{Membrane}\alpha + \sigma_{Bending}\beta$$

其中 α 和 β 分别由下式得出：

$$\alpha = 0.47 + 0.17 \times (\tan\varphi)^{0.25} \times (T/R)^{0.5}$$

$$\beta = 0.60 + 0.13 \times (\tan\varphi)^{0.25} \times (T/R)^{0.5}$$

几何参数描述见图 6.2.5。

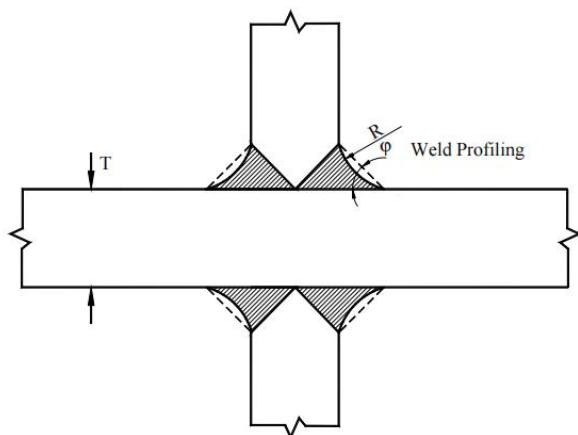


图 1-2 十字形接头的焊接剖面

依据 DNVGL-RP-C203 中第 7.3 节，规定如下：

Where local grinding of the weld toes below any visible undercuts is performed the fatigue life may be increased by a factor given in Table 7-1. In addition the thickness effect may be reduced to an exponent $k = 0.20$ for S-N curves with $k = 0.25$ (for S-N curves F to W3) and is reduced to an exponent $k = 0.15$ for S-N curves D and E. See Figure 7-2. Grinding a weld toe tangentially to the plate surface, as at A, will produce only little improvement in fatigue strength. To be efficient, grinding should extend below the plate surface, as at B, in order to remove weld toe defects. Grinding is normally carried out by a rotary burr. The treatment should produce a smooth concave profile at the weld toe with the depth of the depression penetrating into the plate surface to at least 0.5 mm below the bottom of any visible undercut (see Figure

7-2). The grinding depth should not exceed 2 mm or 7% of the plate thickness, whichever is smaller.

翻译如下：在对任何可见的下切口下方的焊缝趾进行局部研磨时，疲劳寿命可按表 7-1 中的系数增加。此外，对于 S-N 曲线，厚度效应可以减少到指数 $k=0.20$ （适用于 S-N 曲线 F 至 W3），而对于 S-N 曲线 D 和 E，则减少到指数 $k=0.15$ 。参见图 7-2。如果像 A 那样，仅沿板面切向研磨焊缝趾，对提高疲劳强度的帮助不大。为了达到最佳效果，研磨需延伸至板面以下，如 B 所示，以去除焊缝趾的缺陷。通常使用旋转砂轮进行研磨。处理后，焊缝趾应形成平滑的凹形轮廓，凹陷深度至少穿透到可见下切口底部以下 0.5 毫米（见图 7-2）。研磨深度不超过 2 毫米或板厚的 7%，取较小者。

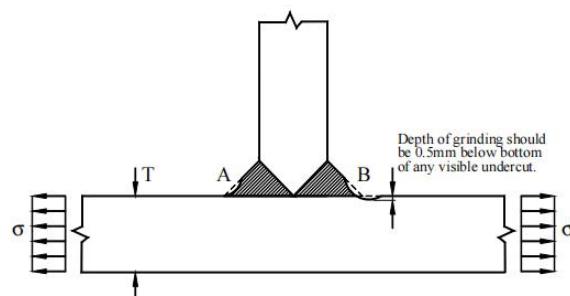


Figure 7-2 Grinding of welds

2.2 焊缝改善内容总结和参考做法

对于十字形接头和重型加强管状接头，假设热点应力主要由膜应力引起。

对于简单的管状接头，假设弦中的热点应力仅由弯曲引起。然而，对于 β 比率大的 X 型接头，热点处主要存在膜应力。

此外，考虑到局部趾部磨蚀，疲劳寿命可以增加。但是，仅通过磨蚀所能带来的最大改善系数应限制在疲劳寿命的 2 倍以内。

当对可见切口下方的焊头进行局部研磨时，对于 $k=0.20$ 的 S-N 曲线 D 和 E，厚度效应降低为指数 $k = 0.15$ 。

热点应力可以根据上述进行折减。此时焊缝需要进行修正，需要特别强调 T 型焊缝处的做法。

T 型接头的做法参考下图：

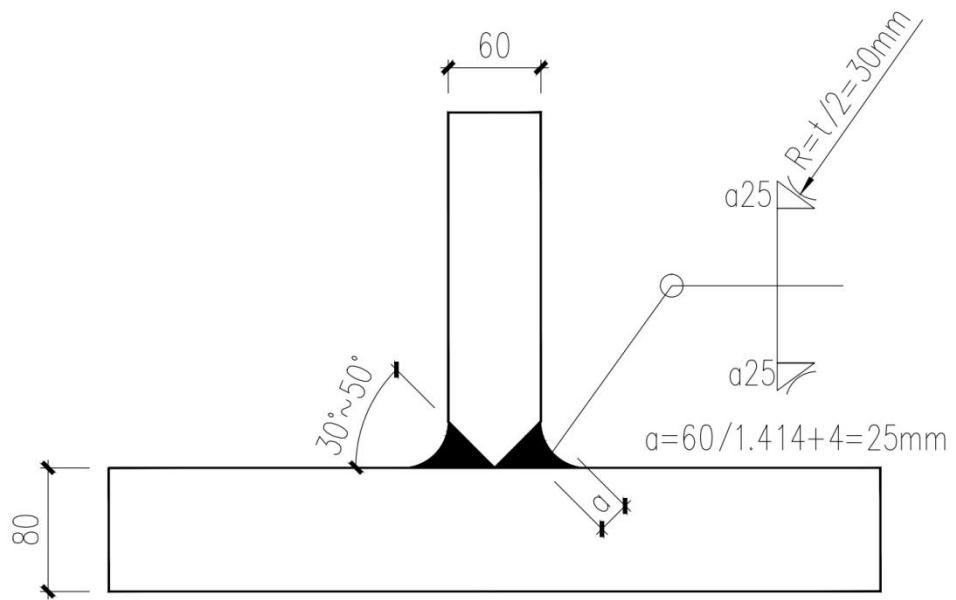


图 1-3 T 型接头做法参考