

**海安会 MSC.1/Circ.1599/Rev.3 通函**  
(2024 年 7 月 1 日)

## 经修订的用于低温环境的高锰奥氏体钢应用指南

1 由于全球对液化天然气（LNG）这一环保能源的需求不断增长，以及 LNG 燃料船的建造和营运日趋增长，海上安全委员会在其第 96 届会议（2016 年 5 月 11 日至 20 日）上同意确保 LNG 运输船和 LNG 燃料船的液货舱和燃料舱安全的需求，并指派货物和集装箱分委会通过制定 IGC 和 IGF 规则修正案的方式解决问题，从而包括用于低温环境的高锰奥氏体钢。

2 海上安全委员会在其第 100 届会议（2018 年 12 月 3 日至 7 日）上认识到业界对用于低温环境的高锰奥氏体钢使用的不断增加和在此方面指导的需求，批准了用于低温环境的高锰奥氏体钢应用临时指南（MSC.1/Circ.1599 通函）。

3 海上安全委员会在其第 102 届会议（2020 年 11 月 4 日至 11 日）上批准了由货物和集装箱分委会在其第 6 次会议（2019 年 9 月 9 日至 13 日）上制定的经修订的临时指南（MSC.1/Circ.1599/Rev.1 通函）。

4 海上安全委员会在其第 105 届会议（2022 年 4 月 20 日至 29 日）上批准了由货物和集装箱分委会在其第 7 次会议（2021 年 9 月 6 日至 10 日）上制定的经修订的指南（MSC.1/Circ.1599/Rev.2 通函）。

5 海上安全委员会在其第 108 届会议（2024 年 5 月 15 日至 24 日）上批准了由货物和集装箱分委会在其第 9 次会议（2023 年 9 月 20 日至 29 日）上制定的经修订的指南，其中包括对适用范围和附录 2 的修改，其文本载于附件。

6 本委员会同意根据从应用获得的操作经验保持对经修订的指南的审议。

7 提请各成员国使所有相关方注意到经修订的指南。

8 本通函替代 MSC.1/Circ.1599/Rev.2。

附件  
经修订的用于低温环境的高锰奥氏体钢应用指南

第一部分 总则

### 1 范围

用于低温环境的高锰奥氏体钢应用指南向设计方和制造商提供用于低温环境的高锰奥氏体钢的液货舱和燃料舱的设计和建造方面的实用信息，以符合 IGC 规则第 4.18 节和 IGF 规则第 6.4.12 节定义的设计条件。

### 2 适用范围

2.1 本指南不替代任何 IGC 和 IGF 规则要求，而是作为符合 IGC 和 IGF 规则的液货舱和燃料舱的设计和建造中使用高锰奥氏体钢的补充要求，并满足下列要求：

- .1 如经 IGC 规则和 IGF 规则允许，适用于下列货物和/或燃料：
  - .1 氨，无水；
  - .2 丁烷（所有异构体）；
  - .3 丁烷-丙烷混合物；
  - .4 二氧化碳（高纯度再生质）
  - .5 乙烷；
  - .6 乙烯；
  - .7 甲烷（LNG）；
  - .8 戊烷（所有异构体）；和
  - .9 丙烷。
- .2 适用范围限于厚度在 6 mm 和 40 mm 之间的板（热轧）。
- .3 对于氨货物和/或含氨的燃料舱，免除 IGC 规则 17.12.2.2 中所述的焊后消应力热处理。

2.2 在液货舱和燃料舱应用高锰奥氏体钢受下列要求的限制。

### 3 定义

高锰奥氏体钢： 含有大量锰成分，在环境温度和工作温度中保持奥氏体相的钢。

低匹配焊缝： 焊缝金属的屈服强度或拉伸强度低于母材的焊接接头。

## 第二部分 材料规格和试验要求

### 4 材料规格

4.1 材料规格应提交主管机关审批。材料的试验要求和验收衡准详见附录。

4.2 钢应为全镇静细晶粒钢。所有材料的交货状态应为热轧后经必要的控制冷却。板坯与成品厚度的压缩比应不小于 3:1。其他交货状态应符合主管机关的规定。

4.3 对高锰奥氏体钢的应用限于厚度为 6 mm 至 40 mm 的钢板。对厚度大于 40 mm 的钢板，可由主管机关予以特别考虑。其他尺寸可经主管机关接受。

### 5 化学成分

高锰奥氏体钢的化学成分应满足公认标准的要求，如表 1 中所示的 ASTM 标准 A1106/A1106M-17 或 ISO 21635:2018。

**表 1 高锰奥氏体钢的化学成分**  
(参见: ASTM 标准 A1106/A1106M-17)

	化学成分 (wt.%, 成品)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	B	N
要求	0.35 - 0.55	0.10 - 0.50	22.50 - 25.50	≤ 0.030	≤ 0.010	3.00 - 4.00	0.30 - 0.70	≤0.005	≤0.050

注: 硅可低于 0.10%, 前提是总铝含量≥0.03%, 或酸溶铝含量≥0.025%。

## 6 力学性能

高锰奥氏体钢母材的力学性能应满足 IGC 规则、IGF 规则和相应公认标准的要求, 如 ISO 21635:2018 (见下表 2) 或 ASTM A1106/A1106M-17。应按照附录所列的材料试验要求和验收衡准对材料的符合性进行验证并记录。

### .1 母材

**表 2 高锰奥氏体钢母材的力学性能**  
(参见 ISO 21635:2018)

最小屈服强度 (0.2%误差) N/mm <sup>2</sup>	拉伸强度 N/mm <sup>2</sup>	最小伸长率 5.65√S0%
400	800 至 970	22.0

(注意 IGC 规则表 6.3 或 IGF 规则表 7.3 中规定的相关冲击试验要求)

### .2 焊态

**表 3 焊态的典型力学性能**

拉伸性能		
最小屈服强度 (0.2%误差) N/mm <sup>2</sup>	最小拉伸强度 N/mm <sup>2</sup>	最小伸长率 5.65√S0%
400	660	22.0

(注意 IGC 规则表 6.3 或 IGF 规则表 7.3 中规定的相关冲击试验要求)

## 7 金属材料焊接和无损检测

金属材料焊接和无损检测应满足 IGC 规则第 6 章或 IGF 规则第 16 章的要求, 参见附录中的“材料试验要求和试验验收衡准”。焊态的典型最小屈服强度和最小拉伸强度值见表 3。

## 8 材料试验和验收衡准

材料试验和采用的验收衡准应满足 IGC 规则第 6 章或 IGF 规则第 16 章和附录的要求。应按照附录所列的材料试验要求和验收衡准对材料的符合性进行验证并记录。

## 9 制造商认可程序

对制造商的认可应按照 IGC 规则第 6.2.2 节或 IGF 规则第 16.1.1 节的规定进行, 并使主管机关满意。

### 第三部分 应用

## 10 设计应用

### 10.1 通则

10.1.1 应根据 IGC 规则第 4.18 节或 IGF 规则第 6.4.12 节确定相关装载工况和设计工况。对高锰奥氏体钢的特殊考虑如下。

10.1.2 对于高锰奥氏体钢相关安全系数的选择见 IGC 规则 4.21 至 4.23 或 IGF 规则第 6.4.15 节，“奥氏体钢”所规定的安全系数应适用于母材和焊态。

### 10.2 极限设计条件

(参见：IGC 规则第 4.18.1 节或 IGF 规则第 16.3.3 节)

应注意高锰奥氏体钢一般具有低匹配焊缝，因此，应基于母材和焊态的“最低力学性能”确定其屈服强度和拉伸强度的设计值（见关于力学性能的第 6 节）。应注意 IGC 规则第 4.18.1.3.1.2 节或 IGF 规则第 16.3.3.5.1 节所述的对低匹配焊缝的限制。

### 10.3 屈曲强度

10.3.1 应根据公认的标准进行屈曲强度分析。并应考虑 IGC 规则第 4.3.4 节或 IGF 规则第 6.4.1.6 节所述的功能载荷。同时，注意应考虑相关设计公差并按照 IGC 规则第 6.6.2.1 节或 IGF 规则第 16.4.2 节的要求纳入强度评估中。

10.3.2 应注意浸水工况的接受标准不同于其他屈曲载荷工况。此外，IGC 规则与 IGF 规则中定义的浸水载荷工况的接受标准也不同。IGF 规则要求液舱“在浸水后保持其完整性以确保船舶安全撤离”(IGF 规则第 6.4.1.6.3.3 节)，而 IGC 规则仅考虑危及船体完整性(IGC 规则第 4.3.4.3.3 节)。

### 10.4 疲劳设计条件 (参见：IGC 规则 4.18.2 和 IGF 规则 6.4.12.2)

高锰奥氏体钢材料的母材及焊态的疲劳设计曲线已与公认的 S-N 曲线中的 D-曲线（参照 11.4（表 4））及 FAT90 曲线（参照 11.5（图 1））进行比较。仅对对接焊缝的节点进行了疲劳试验。但对于其他节点型式，其他 S-N 曲线的应用应使主管机关满意。IGC 规则第 4.18.2.4.2 节和 IGF 规则第 6.4.12.2.4 节规定设计 S-N 曲线应基于对应于至最终失效的相关实验数据的平均值减去两倍标准差曲线的 97.6% 的残存概率。

表 4 （空气环境中的 S-N 曲线）高锰奥氏体钢的试验结果等于或优于焊态的 D-曲线值（参照 11.4）且不包括由于结构突变处的应力集中

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]

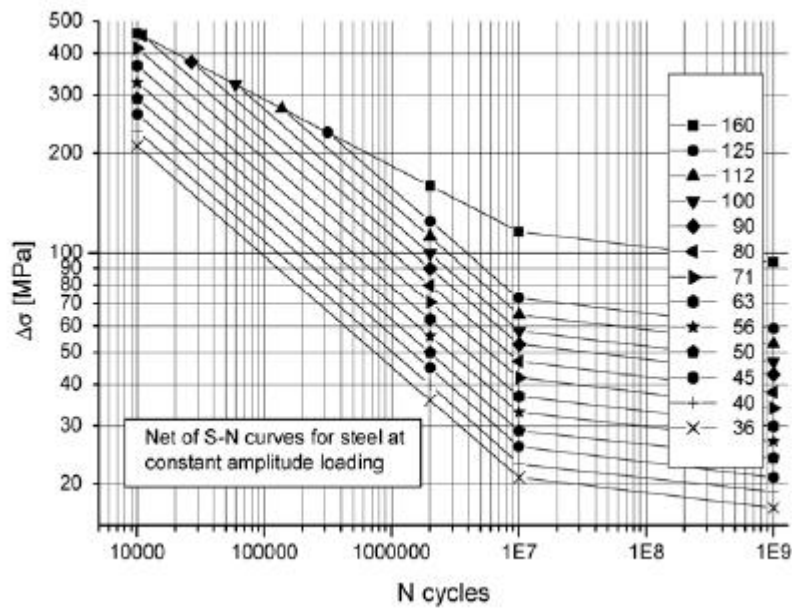


图 1 高锰奥氏体钢的参照 S-N 曲线为 FAT90 曲线（参见 11.5）。FAT90 曲线是不包括由于结构突变处的应力集中的焊态

## 10.5 断裂力学分析

10.5.1 应用部分次屏壁的货舱或燃料舱，应按照 IGC 或 IGF 规则进行断裂力学分析。

10.5.2 应使用公认的标准表达断裂韧性特性。对于所使用的材料，应基于液舱系统预期装载率相类似的载况，确定其断裂韧性特性。并应记录在营运状态下液舱母材及其焊接接头的疲劳裂纹扩展率特性。上述特性应使用公认的断裂力学方法表达，该断裂力学方法应将疲劳裂纹扩展率与裂纹尖端应力强度 $\Delta K$ 中的变量相关联。同时，在选择疲劳裂纹扩展率参数时应考虑静载荷产生的应力效应。

10.5.3 注意到当承受极高静载荷时，应考虑诸如韧性断裂力学分析的替代方法。

10.5.4 低温条件下典型裂纹尖端张开位移（CTOD）值的示例见图 2。

10.5.5 应对使用部分次屏壁的 B 型液舱（IGC 规则第 4.22.4 节和 IGF 规则第 6.4.15.2.3.3 节）进行断裂力学分析。当其他类型液舱表现出疲劳和裂纹扩展率特性相符合时，也可进行断裂力学分析。为确保材料的适用性，在断裂力学分析中使用的 CTOD 值在任何情况下应作为材料的重要特性予以分析。

CTOD 试验报告										
			报告号:							
试验方法标准	ISO 12135/15653 试件号		FCAW-2	试验日期						
试件结构	方形横截面 3 点弯曲 (W=B)			裂纹平面取向	L-T					
试件尺寸		1	2	3	平均					
	厚度, B (mm)	40	40	40	40					
	宽度, W (mm)	80	80	80	80					
	跨距, S (mm)	320	刀口厚度, z (mm)		0					
试验材料	杨氏弹性模数, E (MPa)			182,000						
	YS(0.2%条件验证), $\sigma_{VSP}$ (MPa)			474						
	TS, $\sigma_{TSP}$ (MPa)			780						
	YS(0.2%条件验证), $\sigma_{YS}$ (MPa)			655						
	加工缺口(mm)	宽度, N	长度, Lmc	根半径						
	4.7	32.4	0.1							
试验状态	温度(°C)			-165						
试验结果										
	至疲劳预裂尖端的裂缝长度 (mm)									
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>10</sub>
	37.62	39.28	39.36	38.95	39.24	38.27	38.55	38.67	37.21	38.72
	a <sub>0</sub> /W		0.52		V 的塑性分量 V <sub>p</sub> (mm)			1.53		
	临界 CTOD (mm)									
	CTOD 类型			总 CTOD						
δ <sub>m</sub>			0.53							

图 2 在-165°C的 CTOD 试验典型值示例

## 10.6 焊接

10.6.1 应根据 IGC 规则第 6.5 节或 IGF 规则第 16.3 节进行焊接, 并使主管机关满意。

10.6.2 对于焊接, 可考虑以下几点:

- .1 在生产中减少热量输入:
  - .1 应特别注意在进行药芯焊丝电弧焊 (FCAW) 时的第一个根部焊道; 应考虑减少的安培数; 和
  - .2 对 3G 位置应使用最大 30 KJ/cm 的焊接热量输入, 因为对 1G 位置热量输入更少;
- .2 焊缝和喷嘴之间的距离应保持最小以减小焊池附近的氧含量;
- .3 FCAW 焊接气成分一般应为氩气和二氧化碳以 80/20 的比例的混合; 和
- .4 应设有适当的通风以减少接触有害焊接烟尘。

## 10.7 无损检测 (NDT)

无损检测 (NDT) 的范围应符合 IGC 规则第 6.5.6 节或 IGF 规则第 16.3.6 节要求。NDT 程序应符合认可的标准,并使主管机关满意。对于高锰奥氏体钢,应使用一般适用于奥氏体钢的合适的 NDT 程序。

## 10.8 防腐蚀

10.8.1 应采取相关防腐蚀和避免腐蚀环境的措施。特别是可能不营运的 LNG 燃料舱,应始终采取相关预防措施以确保在不使用时在空舱内充有惰性气体或干燥空气。

## 11 参考文献

ASTM A1106 / A1106M-17: 低温应用压力容器板, 合金钢和奥氏体高锰钢的标准规格

ISO 21635:2018: 船舶和海上技术—船用 LNG 舱高锰奥氏体钢规格

材料试验要求和验收衡准 (附录)

DNVGL-RP-C203: 近海钢结构疲劳设计

IIW 1823-07: 焊接接头和部件疲劳设计建议

BS 7910:2013 + A1:2015: 金属结构裂纹验收评定方法指南

**附录 1**  
**高锰奥氏体钢材料试验要求和验收衡准**

**1 母材试验**

**1.1 化学成分**

公认标准，如：ASTM A1106/A1106M-17 或 ISO 21635:2018。

**试验验收衡准**

符合公认标准。

**1.2 金相试验**

应根据 IGC 规则 6.3.4 和 IGF 规则 16.2.4（即：公认标准，如 ASTM E112）进行本试验。

**试验验收衡准**

应形成微观结构报告供参考（即：粒度/沉淀相）。

**1.3 拉伸试验**

应根据 IGC 规则 6.3.1 和 IGF 规则 16.2.1 进行本试验。

试验应从不同组分的三炉钢中取样，在室温和低温环境下进行。

**试验验收衡准**

屈服、拉伸强度和伸长率应满足适用于化学成分（2.1）的公认标准，如 ASTM A1106/A1106M-17 或 ISO 21635:2018。

**1.4 夏比冲击试验**

应根据 IGC 规则 6.3.2 和 IGF 规则 16.2.2 进行本试验。

**试验验收衡准**

满足 IGC 规则表 6.3 和 IGF 规则表 7.3 中关于奥氏体钢的要求。

表 6.3 和 7.3 的注 9：因缺少经验，对高锰奥氏体钢不应免除冲击试验。

**1.5 应变时效夏比冲击试验**

公认标准，如 ASTM E23。

**试验验收衡准**

满足 IGC 规则表 6.3 和 IGF 规则 16.2.2 中关于奥氏体钢的要求。

表 6.3 和 7.3 的注 9 由于缺少经验而不适用于高锰奥氏体钢。

**1.6 落锤试验**

应采用公认标准，如 ASTM E208。应在-196℃进行试验。

**试验验收衡准**

在采用标准规定的试验温度下不断裂。

**1.7 疲劳试验（S-N 曲线）**

应根据 IGC 规则 4.18.2.4.2 和 IGF 规则 6.4.12.2.4 确定 S-N 曲线。

**试验验收衡准**

按照 IIW 或 DNVGL-RP-C203 的规定建立的 S-N 曲线应为疲劳强度最小值。

**1.8 CTOD（裂纹尖端张开位移）试验**

应采用公认标准，如 ASTM E1820, BS 7448 或 ISO 12135。
<b>试验验收衡准</b> 按照设计条件在室温和低温下进行试验得到的 CTOD 最小值应满足设计规范的要求。作为指导，一般要求 CTOD 最小值为 0.2 mm。

<b>1.9 腐蚀试验</b> 应根据公认标准进行这些试验。
<b>试验验收衡准</b> 符合公认标准或经主管机关同意。
<b>1.9.1 晶间腐蚀试验</b> 本试验应根据公认标准进行，如 ASTM A262。
<b>试验验收衡准</b> 符合公认标准或经主管机关同意。
<b>1.9.2 一般腐蚀试验</b> 本试验应根据公认标准进行，如 ASTM G31。
<b>试验验收衡准</b> 符合公认标准或经主管机关同意。
<b>1.9.3 应力腐蚀裂纹试验</b> 本试验应按照公认标准进行，如 ASTM G36 和 ASTM G123，并使主管机关满意，
<b>试验验收衡准</b> 符合公认标准或经主管机关同意。
<b>1.9.4 氨的兼容性腐蚀试验</b> 附加试验应根据附录 2 中的试验要求进行以满足氨的应用。
<b>试验验收衡准</b> 符合附录 2 中的验收衡准。

## 2 焊态试验（包括 HAZ）

<b>2.1 金相试验</b> 本试验应根据 IGC 规则 6.3.4 和 IGF 规则 16.2.4 进行，即：公认标准，如 ASTM E112（或等效标准）。
<b>试验验收衡准</b> 应形成微观结构报告供参考（即：粒度/沉淀相）。

<b>2.2 硬度试验</b> 本试验应根据 IGC 规则 6.3.4、6.5.3.4.5 和 IGF 规则 16.2.4、16.3.3.4.5 进行，即：公认标准，如 ISO 6507-1。
<b>试验验收衡准</b> 应形成硬度值报告供参考。

<b>2.3 焊缝横向拉伸试验</b> 本试验应根据 IGC 规则 6.5.3.5.1 和 IGF 规则 16.3.3.5.1 关于低匹配焊缝的应用要求进行。应采用如 ASTM E8/E8M 等公认标准。
<b>试验验收衡准</b> 符合 IGC 规则 4.18.1.3.1.2 和 IGF 规则 6.4.12.1.1.3。

<b>2.4 夏比冲击试验</b>
应根据 IGC 规则 6.3.2、6.5.3.4.4 和 IGF 规则 16.2.2、16.3.3.4.4 进行本试验。
<b>试验验收衡准</b>
符合 IGC 规则 6.5.3.5.3 和 IGF 规则 16.3.3.5.3。
<b>2.5 CTOD（裂纹尖端张开位移）试验</b>
应采用公认标准，如 ASTM E1820, BS 7448 或 ISO 15653。
<b>试验验收衡准</b>
根据设计条件在室温和低温下进行试验得到的 CTOD 最小值应满足设计规范的要求。作为指导，一般要求 CTOD 最小值为 0.2 mm。
<b>2.6 延性断裂韧性试验，<math>J_{Ic}</math></b>
公认标准，如 ASTM E1820 或 ISO 15653。主管机关可酌情免除延性断裂韧性试验。
<b>试验验收衡准</b>
符合公认标准。
<b>2.7 弯曲试验</b>
应根据 IGC 规则 6.3.3 和 IGF 规则 16.2.3 进行本试验。
<b>试验验收衡准</b>
符合 IGC 规则 6.5.3.5.2 和 IGF 规则 16.3.3.5.2 对焊接材料的要求，在弯曲 180°后不应断裂。
<b>2.8 疲劳试验（S-N 曲线）</b>
应根据 IGC 规则 4.18.2.4.2 和 IGF 规则 6.4.12.2.4 确定 S-N 曲线。
<b>试验验收衡准</b>
按照 IIW 或 DNVGL-RP-C203 规定建立 S-N 曲线应为疲劳强度最小值。
<b>2.9 腐蚀试验</b>
应根据公认标准进行这些试验。
<b>试验验收衡准</b>
符合公认标准或经主管机关同意。
<b>2.9.1 晶间腐蚀试验</b>
本试验应根据公认标准进行，如 ASTM A262。
<b>试验验收衡准</b>
符合公认标准或经主管机关同意。
<b>2.9.2 一般腐蚀试验</b>
本试验应根据公认标准进行，如 ASTM G31。
<b>试验验收衡准</b>
符合公认标准或经主管机关认可。
<b>2.9.3 应力腐蚀裂纹试验</b>
本试验应根据公认标准进行，如 ASTM G36 和 ASTM G123，并使主管机关满意。
<b>试验验收衡准</b>
符合公认标准或经主管机关同意。

#### 2.9.4 氨的兼容性腐蚀试验

附加试验应根据附录 2 中的试验要求进行以满足氨的应用。

##### 试验验收衡准

符合附录 2 中的验收衡准。

##### 参考：

ASTM E466-15：金属材料力控制轴向等幅疲劳试验实施规程

ASTM E1290-08e1：裂纹尖端张开位移（CTOD）断裂韧性测量标准试验方法（2013 年撤销）

ASTM G31：金属实验室浸泡腐蚀试验标准导则

ASTM B858：用氨蒸气试验测定铜合金对应力腐蚀裂纹敏感性的试验方法标准

ISO 12737:1999：金属材料—平面应变断裂韧性的测定<sup>1</sup>

ISO 15653:2018：金属材料—测定焊缝准静态断裂韧性的试验方法<sup>2</sup>

IIW 1823-07：焊接接头和部件疲劳设计建议案

ISO 12135:2016：金属材料—准静态断裂韧性测试方法

ISO 15653:2018：金属材料—测定焊缝准静态断裂韧性的试验方法

<sup>1</sup> 替代 ASTM E1820-18：测量断裂韧性的标准试验方法，BS 7448 1:1991：断裂力学韧性试验。测定金属材料的  $K_{Ic}$  值，临界 CTOD 和临界 J 值的方法

<sup>2</sup> 替代 BS 7448-2—断裂力学韧性试验：测定金属材料焊缝的  $K_{Ic}$  值，临界 CTOD 和临界 J 值方法

## 附录 2

### 氨应用的附加兼容性测试要求

氨应用的附加兼容性应按照公认标准如ASTM B858进行测试。该标准适用于铜合金，并未明确也适用于高锰奥氏体钢。因此，应进行以下附加的非标准测试：

1 应按 ISO 7539-2 和 ISO 16540 标准制备试样。应在恒定应变下采用四点弯曲试验，在测试前应弯曲试样。试样的总最大应变应等于材料在大气温度下的屈服强度。应使用应变仪来测量施加的应变。对于焊接试样，应在焊接接头的每一侧应用应变仪。在测试过程中应约束试样以保持其形状。详见试样制备。

2 应将36个试样（在每个氨环境中三个焊接试样和三个母材）分别浸入以下四种氨环境中30天：

- .1 液相氨环境，在稍低于氨沸腾温度的温度（如-33.5℃）和大气压下，通过冷却氨获得，具备以下液氨成分：
  - .1 0.1%重量的水和2.5 ppm的氧；和
  - .2 2.5 ppm的氧。
- .2 环境温度（+25℃）和大气压下的气相氨环境，具备以下气氨成分：
  - .1 纯氨（≥99.99%）；和
  - .2 0.9%体积的氧和99.1%体积的氨；
- .3 -20℃和大气压下的气相氨环境，具备以下气氨成分：
  - .1 纯氨（≥99.99%）；和
  - .2 0.9%体积的氧和99.1%体积的氨。

应按ISO 7539和ISO 16540标准的要求进行应力腐蚀裂纹测试。

- 3 测试报告应按ISO 16540标准提供所有程序、设置数据、检查、环境信息，包括：
  - .1 试样的方向、类型和尺寸；
  - .2 材料描述：
    - .1 母材的化学成分和拉伸性能；
    - .2 焊接材料的化学成分和拉伸性能；
    - .3 焊接类型、焊接金属的硬度和热影响区；
  - .3 四点弯曲试验设置数据；
  - .4 目标应力和施加挠度；
  - .5 应变测量程序；
  - .6 加载程序；和
  - .7 测试环境（温度、含水量和含氧量、和pH）。

#### 测试验收标准

浸泡后，应在适当放大的光学显微镜下检查所有试样的应力腐蚀裂纹。应说明裂纹的位置和数量，并在必要时进行荧光渗透测试以确认结果。对于焊接接头，裂纹的位置应记录为位于母材、焊缝或热影响区。若没有观察到表面裂纹，应在两个不同位置进行纵向切割，并

进行适当放大的横截面检查。并应记录任何存在的点蚀腐蚀及其最大深度。结果应由主管机关批准。

### 加载夹具

图1中显示了外滚轮间距为85 mm的耐腐蚀合金制成的加载夹具，用于对试样施加恒定的挠度。为了避免不必要的电化学腐蚀，试样与陶瓷滚轮电气隔离。

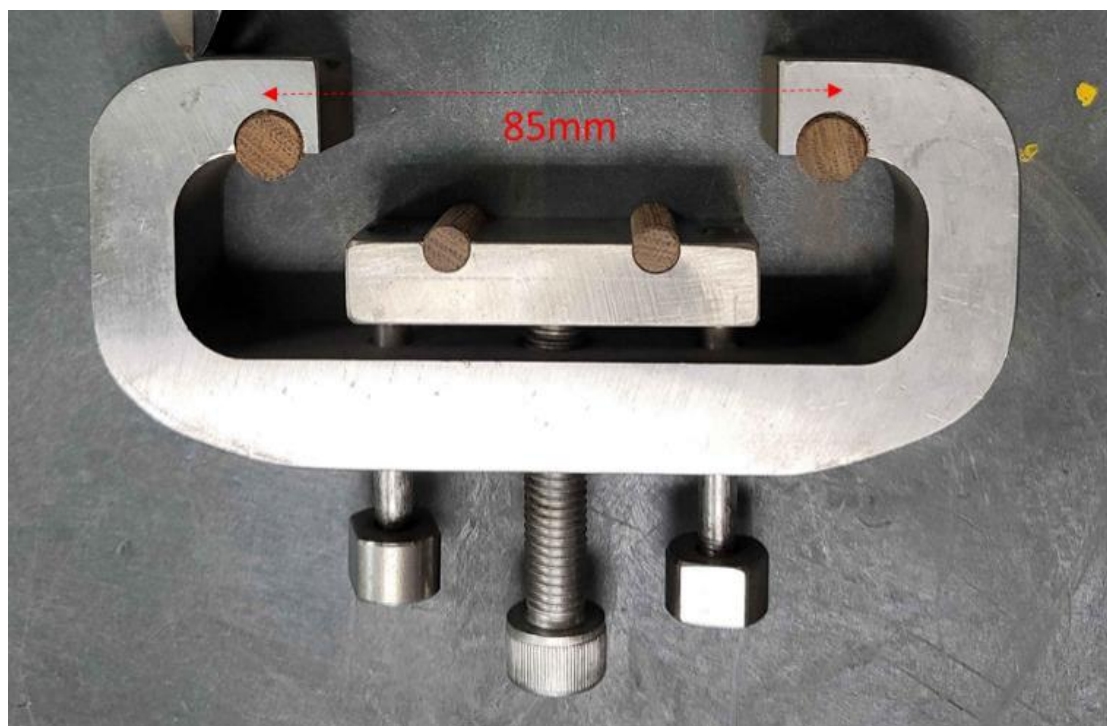


图1：四点弯曲加载夹具设计

### 试样制备

这些试样由40 mm厚的热轧板加工而成，且未进行焊后热处理。承受弯曲的试样的外半径为热轧板的原始表面。它们在测试前进行弯曲，而在液罐中会暴露于氨的表面未进行加工。

四点弯曲试样为均匀矩形截面和均匀厚度的扁条，但在焊接状态下测试单面焊接试样的情况除外，如图2所示。要观察的是40 mm热轧板的原始表面（焊接试样时为表面焊道）。对于焊接件，要测试的表面焊道是焊帽。

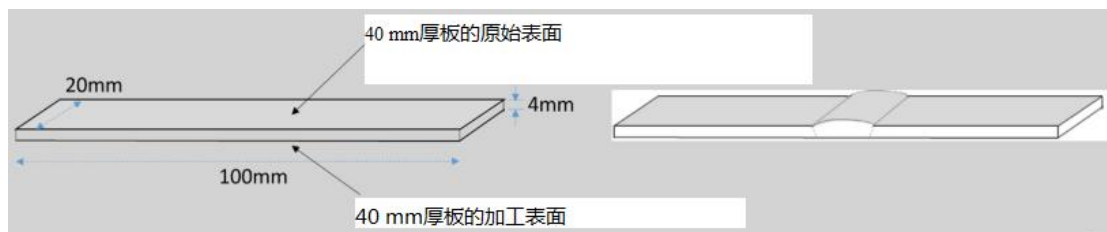


图2：四点弯曲试样（母材试样和焊接试样）

### 应变测量

安装刻度仪，用于测量表面中心在张力下的挠度。试样的载荷是其达到所需的屈服强度水平，然后约束试样以在测试期间保持其形状。根据ISO 16540的规定，挠度 $y$ 按如下公式计算：

$$Y = \frac{(3H^2 - 4A^2)\sigma}{12Et}$$

式中， $\sigma$  为所需应力（此处为屈服强度）， $E$  为弹性模量， $t$  为试样厚度， $A$  为内外支间距， $H$  为外支间距。在四点弯曲之前，将进行 40 mm 厚板的单轴拉伸试验，以确定计算挠度所需施加的屈服强度。为简化焊接试样试验，应设置与母板相同的挠度。