

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD28-2021



中国船级社

高锰奥氏体低温钢应用指南

生效日期： 2021年12月01日

北京

Beijing

目录

第 1 章总则.....	1
第 1 节通则.....	1
第 2 章高锰奥氏体钢.....	2
第 1 节一般规定.....	2
第 2 节高锰奥氏体钢的工厂认可.....	3
第 3 节高锰奥氏体钢的产品检验.....	12
第 3 章焊接材料.....	14
第 1 节一般规定.....	14
第 2 节焊材的认可.....	15
第 4 章 高锰奥氏体钢的应用.....	17
第 1 节 一般规定.....	17
第 2 节 强度评估.....	17
附录 I 基于 CTOD 方法的高锰奥氏体钢断裂韧性仿真及疲劳.....	19
第 5 章 高锰奥氏体钢的焊接.....	21
第 1 节一般规定.....	21
第 2 节高锰奥氏体钢的焊接.....	21
第 3 节高锰奥氏体钢独立液货舱的制造与试验.....	24

第 1 章 总则

第 1 节 通则

1.1.1 目的

1.1.1.1 为使高锰奥氏体钢应用于液化天然气（LNG）低温环境的液货舱和燃料舱，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，特制定本指南。

1.1.1.2 本指南从高锰奥氏体钢钢板、焊接材料、应用要求、制造及检验等方面提出高锰奥氏体钢应用于液化天然气（LNG）低温环境的液货舱和燃料舱的相关技术要求，旨在控制高锰奥氏体钢应用于液化天然气（LNG）低温环境的液货舱和燃料舱的风险。

1.1.1.3 本指南不替代任何主管机关相关规则和 CCS 相关规范中对低温环境的液货舱和燃料舱的相关要求。

1.1.2 适用范围

1.1.2.1 本指南适用于液化天然气（LNG）低温环境下的高锰奥氏体钢板、焊接材料以及 LNG 液货舱和燃料舱的设计、制造与检验。

1.1.2.2 本指南规定的高锰奥氏体钢适用于液化天然气（LNG）液货舱和燃料舱。

1.1.3 定义

1.1.3.1 就本指南而言，有关定义如下：

（1）高锰奥氏体钢：系指含锰量为 22.5%~25.5%、屈服强度不低于 400MPa，在环境温度和工作温度中保持奥氏体相的钢。

（2）低匹配焊缝：系指焊缝金属的屈服强度低于母材的屈服强度或焊缝金属的抗拉强度低于母材的抗拉强度的焊接接头。

第 2 章 高锰奥氏体钢

第 1 节 一般规定

2.1.1 适用范围

2.1.1.1 本章适用于板厚为 6mm~40mm 的高锰奥氏体钢钢板,其他厚度的钢板应经 CCS 批准。

2.1.2 一般要求

2.1.2.1 高锰奥氏体钢应经 CCS 工厂认可和产品检验。

2.1.2.2 高锰奥氏体钢的尺寸偏差应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章 3.1.3.4 的相关规定。

2.1.2.3 除本章另有规定外,高锰奥氏体钢的试验、认可与检验应符合 CCS《材料与焊接规范》和《产品检验指南》“W01 船用轧制钢材”的相关要求。

2.1.3 制造

2.1.3.1 高锰奥氏体钢通常应为以电炉或吹氧转炉冶炼,并经细化晶粒处理的镇静钢。

2.1.3.2 高锰奥氏体钢的交货状态应为热轧加控冷 (AR+ACC),高锰奥氏体钢轧制时,板坯与成品板材厚度的压缩比应不小于 3:1,其他交货状态应经 CCS 特别考虑。

2.1.3.3 除本章另有规定外,高锰奥氏体钢的制造应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 1 节的有关规定。

2.1.4 化学成分

2.1.4.1 高锰奥氏体钢的熔炼分析化学成分应符合表 2.1.4.1 的要求。

表 2.1.4.1

牌号	化学成分 (wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	B	N
HMA400	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:若总铝含量≥0.03%,或酸溶铝含量≥0.025%,硅可低于 0.10%。

2.1.5 力学性能

2.1.5.1 高锰奥氏体钢的力学性能应符合表 2.1.5.1 的规定。

表 2.1.5.1

牌号	屈服强度 R _{p0.2} 不小于 (N/mm ²)	抗拉强度 R _m (N/mm ²)	标距长度为 5.65√S ₀ 伸长 率不小于 (%)	夏比 V 型冲击试验		
				试验温度 (°C)	平均冲击功不小 于 (J)	
					纵向	横向
HMA400	400	800~970	22.0	-196	41	27

注：R_{p0.2}规定非比例延伸长度为原始试样标距 0.2%时对应的强度。

第 2 节 高锰奥氏体钢的工厂认可

2.2.1 一般规定

2.2.1.1 除本指南规定外，高锰奥氏体钢的工厂认可，包括程序和试验项目，应按 CCS《产品检验指南》“W01 船用轧制钢材”的相关规定进行。

2.2.1.2 高锰奥氏体钢工厂认可时，应选择一件认可范围内最大厚度的产品进行试验，试验要求应符合 2.2.2 的要求。此外，对于初次认可，CCS 可视情况要求对认可范围内中间厚度的产品进行试验，试验项目包括表 2.2.2.1 中的化学成分、金相、拉伸试验、冲击试验、低倍组织、无损检测、外观尺寸及检查。

2.2.2 高锰奥氏体钢的认可试验

2.2.2.1 一般要求

(1) 高锰奥氏体钢认可试验项目及取样要求见表 2.2.2.1，其他试验项目应符合 CCS《产品检验指南》“W01 船用轧制钢材”的相关要求。

高锰奥氏体钢认可试验项目及取样要求表 2.2.2.1

序号	试验项目	取样要求	备注
1	化学成分	桶样和成品头部	
2	金相	头部	成品
3	拉伸试验	头部和尾部 纵向和横向	室温和-165°C
4	冲击试验	头部和尾部 纵向和横向	-196°C 、 -165°C 、 -100°C和 0°C
5	应变时效冲击试验	头部 纵向	-196°C

6	落锤试验	头部	-196℃
7	疲劳试验 (S-N 曲线)	头部 横向	室温
8	疲劳裂纹扩展速率试验	头部 横向	室温
9	CTOD (裂纹尖端张开位移) 试验	头部 横向	室温和-165℃
10	腐蚀试验	头部	见 2.2.2.11
11	弯曲试验	头部和尾部 纵向和横向	室温
12	弹性模量试验	头部	室温和-165℃
13	硫印	头部	
14	低倍组织	头部	
15	无损检测	整个产品	
16	外观尺寸及检查	全部	

2.2.2.2 化学成分分析

(1) 高锰奥氏体钢的化学成分应符合表 2.1.4.1 的规定。

2.2.2.3 金相检查

(1) 金相检查应根据公认标准 (如 ASTM E112) 进行, 应在钢板的近表面和厚度中心进行 100 倍和 500 倍的金相组织检验、测定奥氏体晶粒度和按照 ISO4967 或等效标准测定非金属夹杂物, 并向 CCS 提交试样的检查报告备查。

2.2.2.4 拉伸试验

(1) 拉伸试验的试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章的要求进行。

(2) 拉伸试验应在室温 (10℃~35℃) 和工作温度 (-165℃) 下进行。

(3) 室温环境下的拉伸试验结果应满足本章第 1 节的要求。工作温度下的拉伸试验结果应提交 CCS 备查。试验测定的断面收缩率应提交 CCS 备查。

(4) 拉伸试样一般应采用全厚度板型试样。

2.2.2.5 夏比冲击试验

(1) 夏比 V 型缺口冲击功的要求为一组三个全尺寸 (10mm×10mm) 试样。标准辅助试样的要求应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章第 3 节的相关要求。

(2) 夏比 V 型缺口试样的尺寸和公差应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章第 3 节的要求。

(3) 应尽可能按材料厚度截取最大尺寸的夏比 V 型缺口试样，应尽量使试样位于材料表面和其厚度中心之间的中点位置，并使缺口的长度方向垂直于材料表面。

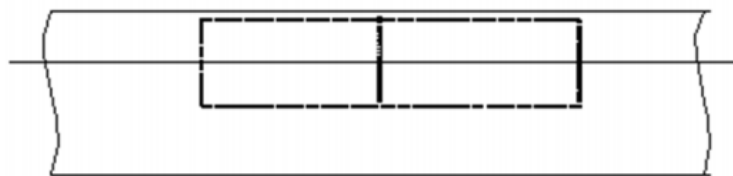


图 2.2.2.5 母材试样的方向性

(4) 应以适当的温度间隔 (-196℃、-165℃、-100℃ 和 0℃) 分别进行夏比 V 型缺口试验，-196℃的夏比冲击功应满足本章第 1 节的要求，-165℃、-100℃ 和 0℃ 温度下的冲击功应提交 CCS 备查。

(5) 除了冲击功，还应提交侧膨胀值和结晶状断口百分数。断口组织显微观察(如 SEM) 结果在-196℃时延性组织比例应为 100%，侧膨胀值提交 CCS 备查。

2.2.2.6 应变时效夏比冲击试验

(1) 样坯应在施加 5%应变后，在 250℃下保温 1 小时，然后加工成 1 组 3 个夏比 V 型冲击试样。

(2) 夏比 V 型冲击试验温度应为-196℃，试验结果应提交 CCS 备查。

2.2.2.7 落锤试验

(1) 落锤试验(板厚小于 12mm 的除外)应根据公认标准(如 ASTM E208)相关要求 进行。

(2) 应从 1 个试件表面选取一组 2 个试样进行落锤试验，试样的取向应使其纵向与板的 轧制方向垂直。

(3) 试验温度应为-196℃，材料应在-196℃的温度下不出现断裂。

(4) 提交的试验报告中应包含试验试样的照片。

2.2.2.8 疲劳试验(S-N 曲线)

(1) 疲劳试验应根据公认标准(如 ASTM E466)相关要求 进行。

(2) 应从试件中选取足够数量的试样来获取 S-N 曲线，试验应在室温下进行，应绘制 疲劳曲线，且该曲线应不低于国际焊接协会(IIW)中的 FAT125 曲线。

2.2.2.9 疲劳裂纹扩展速率试验

(1) 疲劳裂纹扩展速率试验应根据公认标准（如 ASTM E647）相关要求进行，试验结果应向 CCS 提交备查。

(2) 应从 1 个试件中选取 1 个试样进行疲劳裂纹扩展速率试验，试验温度应为室温。

2.2.2.10 CTOD（裂纹尖端张开位移）试验

(1) 应从 1 个试件选取试样进行 CTOD 试验，每 1 个试验需要一组 3 个有效 CTOD 试样。

(2) CTOD 试验的试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章的要求进行。

(3) 按照设计条件在室温和-165℃下进行试验得到的 CTOD 最小值应满足设计的要求。CTOD 最小值一般要求为 0.2 mm。

2.2.2.11 腐蚀试验

(1) 一般腐蚀试验应根据公认标准（如 ASTM NACE/ASTM G31-12a）进行，试验结果应提交 CCS 备查。

(2) 应力腐蚀裂纹试验应按照公认标准（如 ASTM G36 和 ASTM G123）进行，试样应满足公认标准（如 ASTM G30）相关要求，试验结果应提交 CCS 备查。

(3) 晶间腐蚀试验应根据公认标准（如 ASTM A262）进行，试验结果应提交 CCS 备查。

2.2.2.12 弯曲试验

(1) 弯曲试验的试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章的要求进行。

(2) 经过弯曲试验后，在弯曲直径为 4 倍试样厚度时，弯曲 180°后应不发生断裂，且试样的受拉表面上任何方向应不出现长度超过 3mm 的开口缺陷。

2.2.2.13 弹性模量试验

(1) 弹性模量试验应按照公认标准（如 ASTM E494）进行，试验结果应提交 CCS 备查。

(2) 应从 1 个试件中选取 1 个弹性模量试样。

(3) 试验温度应包含室温和-165℃。

2.2.2.14 硫印

(1) 高锰奥氏体钢应进行钢坯或锭及钢板的硫印。

(2) 应选取所使用最厚规格的钢坯/锭，钢坯应做从中心至边部一半截面的横向全厚度硫印。钢锭应做全截面硫印。

(3) 钢板成品的硫印，应取自成品中部，长度大于 600mm，厚度为全厚度。

2.2.2.15 低倍组织

(1) 按公认的标准（如 GB/T 226）进行钢坯/锭和成品的低倍组织检验，取样位置及长度同硫印要求，结果提交 CCS 备查。

2.2.2.16 无损检测

(1) 对高锰奥氏体钢应进行超声波探伤(UT)，探伤要求满足公认标准（如 GB/T 8651）的相关规定。

2.2.2.17 钢板的外观与尺寸检验

(1) 所有钢板应进行尺寸测量及外观检查。每张钢板应测量其长度、宽度、厚度、不平度等。厚度测量方法及要求执行 CCS《材料与焊接规范》的相关要求，其他测量值应符合 GB/T709 的具体要求。外观质量应符合有关标准要求。

2.2.3 焊接性能认可试验

2.2.3.1 一般要求

(1) 焊接性能试验应采用与高锰奥氏体钢相配套的焊接材料进行焊接，所使用的焊接材料应符合本指南 5.2.2.1 的要求。

(2) 试验用试件形状和尺寸应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 2 章相关要求。

(3) 焊接性能试验项目及取样位置应按表 2.2.3.1 进行。

(4) 焊材的认可应与所配套的高锰奥氏体钢板相适应。

认可试验项目及取样要求表 2.2.3.1

序号	试验项目	取样要求	备注
----	------	------	----

1	金相	头部	
2	硬度试验	头部	
3	焊缝横向拉伸试验	头部 横向	室温和-165℃
4	冲击试验	头部 横向	-196℃、-165℃、 -100℃和 0℃
5	CTOD（裂纹尖端张开位移）试验	头部 横向	室温和-165℃
6	延性断裂韧性试验 J _{IC}	头部	
7	弯曲试验	头部 横向	
8	疲劳试验（S-N 曲线）	头部 横向	室温
9	疲劳裂纹扩展速率试验	头部	室温
10	焊接热裂纹敏感试验		
11	腐蚀试验	头部	

2.2.3.2 试板的准备

(1) 一般应准备以下焊接用试板：

热输入约为 15kJ/cm±10% 的对接焊试板一块。

热输入约为 30kJ/cm±10% 的对接焊试板一块。

若钢板需要认可热输入超过 30kJ/cm，则应认可采用最大热输入焊接的试板。

(2) 对接焊试板的焊缝应平行于板材轧制方向，冲击试样为横向。

(3) 根据焊接试板的厚度，焊接试板的坡口形式为单边 V 型或 K 型。

(4) 试板应尽可能采用最常见的焊接工艺。所有焊接参数（焊材牌号、焊材直径、焊接坡口形式、预热温度、道间温度、电流种类、焊接电流、焊接电压、焊接速度、焊接热输入值、焊接道次记录等）均应提交。

2.2.3.3 金相试验

(1) 金相试验应根据公认标准（如 ASTM E112）进行，在焊缝中心、熔合线、热影响区均应进行 100 倍和 500 倍的金相组织检验，测定奥氏体晶粒度和按照 ISO4967 或等效标准测定非金属夹杂物。

(2) 应在焊接试板表面、1/4 厚度、中间厚度处做三个检查。

(3) 应提供一个代表焊接接头横向截面的宏观试验照片，上面显示无裂纹、无未焊透、

无未熔合等其他有害缺陷。

(4) 经过金相试验后，应向 CCS 提交试样的显微组织报告备查。

2.2.3.4 硬度试验

(1) 硬度试验应采用 HV10 硬度分布试验，在距钢板上、下表面、单 V 型、K 型坡口焊缝根部各 1~2mm 处的焊缝横截面上做硬度分布试验，测点位置分别在熔合线、两侧的热影响区及母材处，热影响区内测点间距约 0.7mm，每侧热影响区内至少 6~7 点。应在试验报告中附上焊接接头坡口尺寸、焊道数量、硬度压痕的焊缝图以及焊缝横截面照片。

(2) 应按如图 2.2.3.4 所示的测试线测量。

(3) 试验结果应提交 CCS 备查。

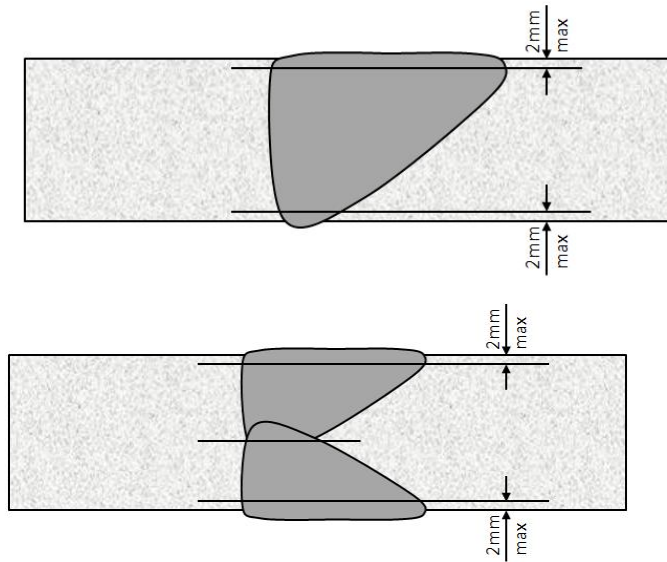


图 2.2.3.4 对接焊缝硬度测试线

2.2.3.5 焊缝横向拉伸试验

(1) 应从 1 个焊接试板中制取 2 个焊缝横向拉伸试样。

(2) 拉伸试验分别在室温和-165℃的环境温度下进行。

(3) 焊缝横向拉伸试验试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 1 章的要求进行，室温下试验结果应满足本指南第 3 章表 3.1.3.2 的要求。在-165℃的环境温度下拉伸试验结果应提交 CCS 备查。

(4) 在每种情况下，应提供试样破断位置报告以供备查。

(5) 拉伸试验应采取全厚度试样。

2.2.3.6 夏比冲击试验

(1) 对于焊接试验试样，尽可能按材料厚度截取最大尺寸的夏比 V 型缺口试样，应尽量使试样接近材料表面和其厚度中心之间的中点位置，在各种情况下，从材料表面至试样边的距离应不小于 1mm。试样缺口位置一般应取在下列位置，即焊缝的中线上、熔合线上和距离熔合线 1mm、3mm 和 5mm 处，见图 2.2.3.6。

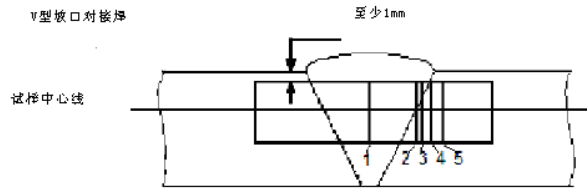


图2.2.3.6冲击试样缺口位置（以V型为例）

图 2.2.3.6 中的缺口位置：

- 1 位于焊缝中心。
- 2 位于熔合线上。
- 3 在热影响区（HAZ），距熔合线1mm。
- 4 在热影响区（HAZ），距熔合线3mm。
- 5 在热影响区（HAZ），距熔合线5mm。

(2) 在每一试验温度下，一般应在图 2.2.3.6 每个位置上截取一组 3 个夏比 V 型缺口冲击试验。

(3) 焊缝金属-196℃下冲击试验的结果，其最小平均冲击功(KV)应不低于 27J。焊缝金属小尺寸试样和单个冲击能量的要求应按 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章 2.3.1.3 的要求换算。熔合线和热影响区的冲击试验结果的最小平均冲击功(KV)应符合母材横向或纵向要求(视适用而定)，而小尺寸试样，最小平均冲击功(KV)应按 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章 2.3.1.3 的要求换算。如果材料的厚度不允许截取全尺寸试样或标准小尺寸试样，则试验方法和验收标准应符合公认标准。

(4) 应以适当的温度间隔（-196℃、-165℃、-100℃和 0℃）分别进行夏比 V 型缺口试验，其中，-165℃、-100℃和 0℃温度下的冲击功应提交 CCS 备查。

2.2.3.7 CTOD（裂纹尖端张开位移）试验

(1) CTOD 试验的试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章的要求进行。

(2) 按照设计条件在室温和-165℃低温下进行试验得到的 CTOD 最小值应满足设计的要求。CTOD 最小值一般要求为 0.2 mm。

(3) 应在裂纹尖端位于粗晶区（CGHAZ）位置进行 3 组横向焊缝的 CTOD 试验。验船师可视情况要求提交裂纹尖端位置在 FL+1、FL+3、FL+5 等位置的 CTOD 试验结果备查。

2.2.3.8 延性断裂韧性试验 J_{IC}

(1) 延性断裂韧性试验 J_{IC} 应采用公认标准（如 ASTM E1820 或 ISO 15653）进行，试验结果应提交 CCS 备查。

(2) 应从 1 个试件选取 1 个试样进行延性断裂韧性试验 J_{IC} 。

(3) 试验温度应为 -165°C 。

2.2.3.9 弯曲试验

(1) 弯曲试验的试样、试验程序应按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 1 章的要求进行。焊缝横向正反弯试样各 2 个。若试件厚度大于或等于 12mm 时，可改取侧弯试样 4 个。也可以纵向弯曲试验替代横向弯曲试验。

(2) 经过弯曲试验后，焊接材料在弯曲直径为 4 倍试样厚度时，弯曲 180° 后应不发生断裂，且试样的受拉表面上任何方向应不出现长度超过 3mm 的开口缺陷。

2.2.3.10 疲劳试验（S-N 曲线）

(1) 应从试件中选取足够数量的试样来获取 S-N 曲线。

(2) 试验温度应为室温。

(3) 应绘制疲劳曲线，且该曲线应不低于国际焊接协会（IIW）中的 FAT125 曲线。

2.2.3.11 疲劳裂纹扩展速率试验

(1) 疲劳裂纹扩展速率试验应根据公认标准（如 ASTM E647）相关要求进行，试验结果应向 CCS 提交备查。

(2) 应从 1 个试件中选取 1 个试样进行疲劳裂纹扩展速率试验。

(3) 试验温度应为室温，试样上的缺口应与焊缝平行。

2.2.3.12 焊接热裂纹敏感试验

(1) 应进行焊接热裂纹敏感试验，可采用压板对接（FISCO）焊接裂纹试验（如 GB 4675.4）或其他方法进行，试验结果应提交 CCS 备查。

2.2.3.13 腐蚀试验

(1) 一般腐蚀试验应根据公认标准（如 ASTM NACE/ASTM G31-12a）进行，试验结

果应提交 CCS 备查。

(2) 应力腐蚀裂纹试验应按照公认标准（如 ASTM G36 和 ASTM G123）进行，试样应满足公认标准（如 ASTM G30）相关要求，试验结果应提交 CCS 备查。

(3) 晶间腐蚀试验应根据公认标准（如 ASTM A262）进行，试验结果应提交 CCS 备查。

第 3 节 高锰奥氏体钢的产品检验

2.3.1 一般规定

2.3.1.1 除本指南另有规定外，高锰奥氏体钢的生产应按 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 1 节的相关规定以及认可的生产工艺要求进行。

2.3.2 化学成分

2.3.2.1 钢厂应对每一炉罐取样进行熔炼化学成分分析，其结果应满足本指南第 2 章第 1 节的规定。

2.3.3 力学性能

2.3.3.1 力学性能试验试样的截取应从每一轧制件的一端截取 1 个拉伸试样和 1 组 3 个冲击试样。

2.3.3.2 拉伸与冲击试样的截取方向、试样形状和尺寸应符合 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章与第 3 章第 1 节有关规定。

2.3.3.3 试验结果应满足本指南第 2 章第 1 节的规定。

2.3.4 无损探伤

2.3.4.1 应对成品逐件进行超声波检测，探伤要求及结果满足公认标准或订货方的相关规定。

2.3.5 落锤试验

2.3.5.1 如订货协议有要求可进行落锤试验。落锤试验应从每订货协议中最厚（12mm 以下可免除）的钢板上取 1 组 2 个试样进行，试验温度应为-196℃。

2.3.6 外观质量和尺寸偏差

2.3.6.1 钢厂应按 CCS《材料与焊接规范》的相关要求对钢板的外观质量和尺寸偏差进行控制。

第 3 章 焊接材料

第 1 节 一般规定

3.1.1 适用范围

3.1.1.1 本章规定适用于高锰奥氏体钢焊接所使用的焊条、焊丝和焊剂等焊接材料。

3.1.2 一般要求

3.1.2.1 焊接高锰奥氏体钢所使用的焊接材料应经 CCS 工厂认可。

3.1.2.2 除本章另有规定外，焊接高锰奥氏体钢所使用的焊接材料的试验、认可与检验应符合 CCS《材料与焊接规范》的相关要求。

3.1.3 力学性能

3.1.3.1 用于高锰奥氏体钢的焊接材料熔敷金属试验的力学性能应满足表 3.1.3.1 的要求。

表 3.1.3.1

材料级别	屈服强度 $R_{P0.2}$ 不小于 (N/mm^2)	抗拉强度 R_m 不 小于 (N/mm^2)	标距长度为 $5.65\sqrt{S_0}$ 伸长 率不小于 (%)	夏比 V 型冲击试验	
				试验温度 ($^{\circ}C$)	冲击值 (J) 不小于
HMA400	400	660	22.0	-196	27

注： $R_{P0.2}$ 规定非比例延伸长度为原始试样标距 0.2%时对应的强度。

3.1.3.2 用于高锰奥氏体钢的焊接材料对接焊试验的力学性能应满足表 3.1.3.2 的要求。

表 3.1.3.2

材料级别	抗拉强度不小于 (N/mm^2)	夏比 V 型缺口冲击试验	
		试验温度($^{\circ}C$)	冲击值 (J) 不小于
HMA400	660	-196	27

第 2 节 焊材的认可

3.2.1 一般要求

3.2.1.1 本节适用于焊接高锰奥氏体钢所使用的焊条、焊丝和焊剂等焊接材料的工厂认可。

3.2.1.2 为保证焊接接头质量,应选用焊缝金属热膨胀系数与母材热膨胀系数相近的焊接材料。

3.2.1.3 高锰奥氏体钢焊接材料应控制 S、P 等杂质元素,控制要求可参见表 3.2.1.3。同时应考虑焊缝金属化学元素对母材的影响。

S、P 杂质元素含量表 3.2.1.3

	S (wt.%)	P (wt.%)
焊条熔敷金属	≤0.012	≤0.015
埋弧焊熔敷金属	≤0.012	≤0.020
药芯焊丝熔敷金属	≤0.020	≤0.020
氩弧焊丝	≤0.020	≤0.020

3.2.1.4 除本章另有规定外,焊接材料的认可还应符合本指南第 2 章 2.2.3 认可试验的有关要求。如在钢板认可时已按照 2.2.3 的要求进行母材焊接性能试验,或拟认可焊材焊接性能优于钢板认可焊材时并经 CCS 同意,本规定可免除。

3.2.2 焊材的认可

3.2.2.1 高锰奥氏体钢焊接材料认可试验用的试板可根据表 3.2.2.1 选取。

认可试验用钢材级别表 3.2.2.1

焊接材料等级	试验用钢级别
HMA400	HMA400

3.2.2.2 除本章有明确规定外,焊接材料认可试验应按 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 2 章的规定进行。

3.2.2.3 熔敷金属试验时,应满足以下要求:

- (1) 焊接材料熔敷金属试验试件用的试板应为高锰奥氏体低温钢。经 CCS 同意,也可

采用普通强度碳钢或碳锰钢,但应以低热输入的方法在坡口表面用待试验的焊接材料堆焊二层隔离层。隔离层的厚度在加工后应不少于 3mm。

(2) 熔敷金属试验应进行化学成分分析、力学性能试验和金相检查;

(3) 熔敷金属的化学成分,包括所有重要元素,应予报告。分析结果应符合公认的标准或制造商的规定;

(4) 从试件上截取 1 个纵向拉伸试样和 1 组 3 个 V 型缺口冲击试样,进行拉伸和冲击试验。纵向拉伸试样的轴线应尽可能位于试件焊缝的中心线上,并在试件厚度的中间处。V 型缺口冲击试样的轴线应位于试件厚度的中间,且与焊缝中心线垂直,V 型缺口应位于焊缝中心线上,并与试板表面相垂直。熔敷金属的力学性能应符合本节表 3.1.3.1 的要求。

3.2.2.4 对接焊试验时,应满足以下要求:

(1) 对接焊试验用的试板应为与焊接材料相适应的高锰奥氏体钢。

(2) 对接焊接头应进行力学性能试验。

(3) 从试件上截取 1 个纵向拉伸试样和 1 组 3 个 V 型缺口冲击试样,进行拉伸和冲击试验。试样的截取位置与本章 3.2.2.3 (4) 的规定相同,对接接头的力学性能应符合本节表 3.1.3.2 的要求。

第 4 章 高锰奥氏体钢的应用

第 1 节 一般规定

4.1.1 一般要求

4.1.1.1 本章规定适用于高锰奥氏体钢制造的独立型液货舱及燃料舱。

第 2 节 强度评估

4.2.1 一般要求

4.2.1.1 结构设计应确保液货舱（燃料舱）具有足够的承受所有相关载荷的能力和足够的安全裕量。

4.2.1.2 高锰奥氏体钢的液货舱（燃料舱）强度评估时，屈服应力 $R_{p0.2}$ 取 400 N/mm^2 ，抗拉强度 R_m 取 660 N/mm^2 ，许用应力应不大于 220 N/mm^2 。

4.2.2 屈曲强度

4.2.2.1 屈曲强度分析时，独立型液货舱及燃料舱结构应按照 IGC 规则或 IGF 规则中所定义的浸水载荷工况进行强度校核。

4.2.3 疲劳强度

4.2.3.1 高锰奥氏体钢对接焊缝节点的疲劳设计 S-N 曲线应采用“IIW-1823-焊接接头与部件的疲劳设计”中的 FAT90 曲线。

4.2.3.2 对于其他节点型式的疲劳设计 S-N 曲线，采用统计分析和线性回归方法，应基于 97.6% 的存活概率，该存活概率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的曲线。

4.2.4 断裂强度

4.2.4.1 对于设置部分次屏壁的液货舱（燃料舱）应采用基于断裂力学的方法进行裂纹扩展评估和泄漏量分析。疲劳裂纹扩展系指裂纹从初始萌生至扩展到临界裂纹尺寸为止的整个

裂纹扩展阶段。泄漏量分析应基于裂纹扩展分析确定。

4.2.4.2 对于所使用的高锰奥氏体钢,疲劳裂纹扩展速率应采用公认的断裂力学方法表达成疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端张开位移 $\Delta CTOD$ 或应力强度因子幅值 ΔK 之间的关系。在测定疲劳裂纹扩展速率参数时,应考虑平均应力的影响。

4.2.4.3 低温环境下的高锰奥氏体钢应通过试验确定载荷与裂纹尖端张开位移 (CTOD) 之间的关系曲线,确定裂纹失稳扩展所对应的裂纹尖端张开位移临界值 $CTOD_{cr}$ 。

4.2.4.4 低温环境下的高锰奥氏体钢断裂韧性仿真计算及疲劳裂纹扩展评估流程,见附录 I。

附录 I 基于 CTOD 方法的高锰奥氏体钢断裂韧性仿真及疲劳

裂纹扩展评估流程

I.1 一般要求

I.1.1 本附录适用于基于 CTOD 方法的高锰奥氏体钢断裂韧性仿真计算及疲劳裂纹扩展评估流程。

I.1.2 1 高锰奥氏体钢的密度和弹性模量推荐值为：

密度 (g/cm^3): 7.80

弹性模量 (GPa): 179

I.2 裂纹尖端张开位移 CTOD 的仿真计算（取-196℃时）流程

(1) 应力-塑性应变关系曲线

在没有获得拉伸试验的工程应力应变曲线时，可以使用屈服强度、抗拉强度和延伸率通过换算公式得到简化的线性应力-塑性应变关系曲线进行初步的仿真分析。换算公式如下：

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1-1)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1-2)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \sigma_{true}/E \quad (1-3)$$

式中，E 为材料弹性模量； ε_{true} 、 σ_{true} 为真实应变和真实应力； ε_{nom} 、 σ_{nom} 为工程应变和工程应力，也就是需要换算的屈服强度、抗拉强度及对应的延伸率； ε_{pl} 为塑性应变。

(2) 有限元网格模型划分

三维有限元法在裂纹所在局部区域使用三维模型，裂纹局部区域与非裂纹区域使用节点绑定技术连接。

裂纹尖端单元环半径应小于裂纹规范要求的 15%，对于板类结构，同时要不超板厚的 10%。裂尖尖端的前沿采用 15 节点楔形单元，中间层和最外层采用 20 节点六面体单元。

(3) CTOD 值确定

选取裂纹尖端单元环内层节点，提取裂纹两侧轮廓上远离裂纹尖端第 3 或第 4 个节点的张开方向的位移值 u_y ，则裂纹张开位移 CTOD 值（如图所示）为：

$$\text{CTOD} = u_y(\text{第 3 或第 4 个节点对的位移} +) - u_y(\text{第 3 或第 4 个节点对的位移} -)$$

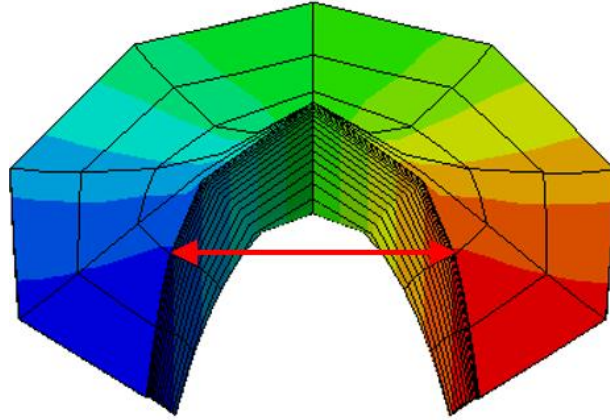


图 I.1 裂纹张开位移 CTOD 值

I.3 疲劳裂纹扩展评估流程

- (1) 建立包含裂纹的结构有限元模型, (裂纹长度、深度等参数按照 CCS 的规范确定);
- (2) 确定施加的疲劳载荷 (等幅载荷、变幅载荷以及频谱载荷等);
- (3) 引入疲劳裂纹扩展公式——Paris 公式。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

$$\text{或} \frac{da}{dN} = C(\Delta CTOD)^m$$

式中, C 和 m 值为材料参数, 需通过母材和焊缝金属的疲劳裂纹扩展试验确定。

(4) 根据计算得到的裂纹扩展长度 a 判断裂纹长度是否超过阈值, 如未超过阈值, 则继续进行疲劳裂纹扩展分析; 如贯穿裂纹达到临界裂纹尺寸时, 则停止计算, 提取载荷循环次数。

(5) 结合裂纹扩展长度, 按照 CCS 的相关规范进行泄露量的分析。

第 5 章 高锰奥氏体钢的焊接

第 1 节 一般规定

5.1.1 适用范围

5.1.1.1 本章适用于用高锰奥氏体钢制造的独立型 LNG 液货舱或燃料舱。

5.1.2 焊工

5.1.2.1 从事高锰奥氏体钢焊接工作的焊工及负责对全机械化和自动化焊接设备进行参数设置和/或调节的焊接操作者，应经专门高锰奥氏体钢焊接的操作技能和知识培训，并按 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 4 章的有关规定获取相关焊工证书。

5.1.2.2 焊工资格考试时，高锰奥氏体钢材料分组可按 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 4 章中 W11 组别进行。但首次焊接此材料的焊工必须采用高锰奥氏体钢进行考试，并经现场验船师确认。

5.1.3 试验室与试验装置

5.1.3.1 与本章认可相关的焊接试验应在 CCS 接受的试验室中进行。试验室应配有足够的设备和称职的人员，试验装置应保持良好的状态。

5.1.5 环境要求

5.1.5.1 从事高锰奥氏体钢焊接时应采取适当措施对焊接人员进行保护，防止锰蒸气可能带来的危害。

第 2 节 高锰奥氏体钢的焊接

5.2.1 一般要求

5.2.1.1 用高锰奥氏体钢制造 LNG 液货舱或燃料舱，除应满足本节要求外，还应满足相关规范对低温环境的液货舱和燃料舱的相应要求。

5.2.2 焊接材料

5.2.2.1 高锰奥氏体钢焊接时应选用与其相匹配的焊接材料，并尽可能采用与高锰奥氏体钢相配套的认可（证书中所载明的）焊接材料。高锰奥氏体钢焊接材料焊接时通常出现低匹配焊缝，但至少应保证焊接接头抗拉强度不低于 660MPa。

5.2.3 焊接工艺试验

5.2.3.1 高锰奥氏体钢对接焊的工艺认可试验，试板的制备应使板材轧制方向平行于焊接方向，焊接接头力学性能应符合表 5.2.3.1 的要求。

对接焊工艺认可试验项目及评价指标表 5.2.3.1

试验项目	屈服强度 $R_{p0.2}$ 不小于 (N/mm ²)	抗拉强度 R_m 不小于 (N/mm ²)	标距长度为 $5.65\sqrt{S_0}$ 伸长率 不小于 (%)
焊缝金属试验	400	660	22.0
接头横向试验	—	660	—
夏比 V 型缺口冲击试验	冲击温度：-196℃；平均冲击值：27J		
弯曲试验	180°弯曲试验（弯曲直径 $D=4a$ ），试样的受拉面不应出现长度超过 3mm 的开口缺陷		
焊缝断面宏观检验	焊缝成形良好，焊缝完全焊透，无裂纹和未熔合缺陷		
硬度试验	≤HV350		

5.2.3.2 冲击试验包括焊缝中心线、熔合线、热影响区（距熔合线 1、3、5mm）的冲击试验。

5.2.3.3 对于高锰奥氏体钢和不锈钢焊接的情况，焊接工艺认可应符合下列要求：

- （1）对接焊工艺试验的试验项目符合表 5.2.3.1 规定。
- （2）焊缝金属拉伸试验测试值应不低于焊材标准规定的熔敷金属性能下限值。
- （3）焊接接头横向拉伸试验，其抗拉强度按母材（高锰奥氏体钢、不锈钢材料标准抗拉强度下限值）和焊接材料标准规定熔敷金属抗拉强度下限值进行符合性评价，应不低于三者最小值。
- （4）可采用纵向弯曲代替横向弯曲进行试验。
- （5）两侧热影响区均需进行冲击试验。合格指标符合 5.2.3.1 规定。

5.2.4 产品焊缝试验

5.2.4.1 除本章有明确规定外，产品焊接试件试样的制备、试验方法应符合 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 7 章的有关规定。

5.2.4.2 对 A 型和 B 型独立液货舱和燃料舱的产品焊缝试验应符合以下要求：

(1) 通常按每 50m 左右的对接焊缝进行一次产品焊缝试验，并应能代表各个焊接位置。在同一工厂，用相同的焊接方法同时制作一批产品时，其板厚的差异不超过 5mm 时，可每 50m 长度焊缝焊制 1 个试件，试件厚度应等于结构中最厚板的厚度。且至少每批（不多于 5 台）焊制 1 个试件。

(2) 产品焊缝试验应包括弯曲试验和一组 3 个夏比 V 型缺口冲击试验。夏比 V 型缺口冲击试验试样缺口应位于焊缝中心线。

5.2.4.3 对于 C 型独立液货舱、燃料舱的产品焊缝试验应符合以下要求：

(1) 通常按每 50m 左右的对接焊缝进行一次产品焊缝试验，并应能代表各个焊接位置。在同一工厂，用相同的焊接方法同时制作一批产品时，其板厚的差异不超过 5mm 时，可每 50m 长度焊缝焊制 1 个试件，试件厚度应等于结构中最厚板的厚度。且至少每批（不多于 5 台）焊制 1 个试件。

(2) 除 5.2.4.2 (2) 的试验外，还应进行焊缝横向拉伸试验和焊缝纵向拉伸试验。

5.2.4.4 产品焊缝试验结果应符合表 5.2.3.1 的要求。

5.2.5 焊接

5.2.5.1 制造厂应按本节认可的焊接工艺进行焊接。

5.2.5.2 高锰奥氏体钢焊接前，应清除焊件表面的铁锈、油污、水分等杂质。

5.2.5.3 焊条、焊剂使用前应按照焊材使用说明书推荐的温度烘干 1~2 小时，焊条、焊剂烘干后应放置在 100~150℃的保温桶中备用。

5.2.5.4 制造厂在进行高锰奥氏体钢焊接时，应注意以下方面：

(1) 在生产中减少热量输入，在保证熔合良好的情况下，尽可能快速焊。焊条电弧焊、气体保护焊，每层（道）焊缝最大厚度不宜大于 4mm；埋弧焊每层（道）焊缝最大厚度不宜大于 10mm；

(2) 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，应考虑采用小规范焊接；

(3) 焊接热输入不宜大于 30KJ/cm；

(4) 焊缝和喷嘴之间的距离应保持最小以减小熔池附近的氧含量；

(5) GMAW、FCAW 焊接时，保护气成分一般应为富氩混合气体。

5.2.6 无损检测

5.2.6.1 高锰奥氏体钢应在焊接完成 24 小时后进行无损检测。

5.2.6.2 高锰奥氏体钢制造的独立液货舱（燃料舱）的无损检测应符合 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 3 篇 6.5.6 的相关要求。

5.2.6.3 对于承压罐体与公称直径 $\leq 80\text{mm}$ 的接管之间的全焊透角焊缝接头，如因超声波检测难以获得满意结果时，经验船师同意，可进行渗透或磁粉检测。

5.2.6.4 容器耐压试验后还应对容器焊接接头表面进行表面无损检测。如容器结构无法进行容器内部焊接接头表面检测时，经验船师同意，允许只进行容器外表面焊接接头表面检测。

第 3 节 高锰奥氏体钢独立液货舱的制造与试验

5.3.1 一般要求

5.3.1.1 本节适用高锰奥氏体钢制造的 C 型独立液货舱。

5.3.2 C 型储罐制作

5.3.2.1 C 型储罐制造、检验和验收除应符合图样要求外，还应按 CCS 接受的压力容器标准相关章节进行制造、检验。

5.3.2.2 板材切割宜采用机械切割、等离子或激光切割。所有待焊接表面不应留有影响焊接性能的热切割痕迹。

5.3.3 封头制作

5.3.3.1 C 型储罐封头瓣片的曲面加工，可采用压模、冷加工成型，如进行热加工成型，或者需采用热处理方式恢复或改善材料性能，相关的生产工艺应经验船师确认。

5.3.3.2 封头成型后的各部位母材或焊缝力学性能指标（拉伸、冲击、弯曲）不低于本指南对钢板的要求。否则，应通过合适的热处理工艺恢复或改善材料性能。

5.3.3.3 封头制造完工后，应对封头进行全面的检验。封头的几何形状、尺寸应符合公认标准和设计要求；封头直边段、封头过渡区（椭圆形、蝶形封头）进行表面渗透检测；有拼接焊缝的封头，除按设计要求检测焊缝内部缺陷外，还应对焊缝表面及热影响区进行表面渗透检测。

5.3.3.4 封头成型后的厚度应符合设计要求。

5.3.4 筒体制作

5.3.4.1 筒体应采用冷成型，筒节纵缝焊接后，焊缝及热影响区不宜再采用冷校形。

5.3.4.2 容器严禁强力组装。

5.3.5 热处理

5.3.5.1 高锰奥氏体钢独立液货舱或燃料舱一般不进行热处理。消除焊接残余应力可按照 CCS《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》第 3 篇 6.6.2.3 的要求进行。

5.3.6 腐蚀防护

5.3.6.1 高锰奥氏体钢应进行有效的腐蚀防护。

5.3.7 试验及验收

5.3.7.1 真空绝热型高锰奥氏体钢制 LNG 储罐，参照同类型奥氏体不锈钢制真空绝热储罐进行各项低温性能试验和合格性能指标判定。

5.3.7.2 非真空绝热型高锰奥氏体钢制 LNG 储罐，可参照同类型其他低温材料制储罐进行各项试验和合格性能指标判定。