指导性文件
GD020-2026

中　国　船　级　社

船用高强度钢厚板应用指南

2026

2026 年 9 月 1 日生效

北　京

目　录

第 1 章　通　则 1

1.1 适用范围 1

1.2 术语与定义 1

第 2 章　EH47 钢 2

2.1 一般要求 2

2.2 EH47 钢的技术条件 2

2.3 EH47 钢的工厂认可 3

2.4 EH47 钢的焊接材料 3

2.5 EH47 钢的焊接工艺评定试验 3

2.6 EH47 钢的焊接 4

第 3 章　止裂钢 5

3.1 一般要求 5

3.2 止裂钢的技术条件 5

3.3 止裂钢的工厂认可 6

3.4 止裂钢的焊接工艺评定试验 6

3.5 止裂钢的焊接 7

第 4 章　高强度钢特厚板在集装箱船上的应用 8

4.1 一般要求 8

4.2 钢级 8

4.3 厚度 8

4.4 船体结构 8

4.5 建造阶段的无损检测 8

4.6 交船后定期的无损检测 9

4.7 脆性止裂设计 9

4.8 脆性裂纹止裂设计的功能要求 10

4.9 止裂设计概念 10

4.10 止裂钢的选择 11

附录 1　EH47 钢的认可 12
附录 2　止裂钢的认可 13
附录 3　脆性裂纹止裂韧性值 K_{ca} 试验方法 15
附录 4　等温型止裂温度试验要求概要 17
附录 5　止裂钢小尺寸试验方法的认可 26
附录 6　特厚钢板的止裂措施 34

第 1 章　通　则

1.1 适用范围

1.1.1 本指南适用于 EH47 高强度船体结构用钢的认可和检验，给出最小规定屈服强度为 460 N/mm^2 船体结构用高强度钢的要求。

1.1.2 本指南适用于具有止裂性能的 EH36 / EH40 / EH47 高强度船体结构用钢的认可和检验，给出最小规定屈服强度为 355 N/mm^2、390 N/mm^2 和 460 N/mm^2 的止裂钢的要求。

1.1.3 本指南给出集装箱船上甲板区域纵向构件使用高强度船体结构用特厚钢板的止裂措施。

1.2 术语与定义

1.2.1 本指南采用的术语定义如下：

（1）特厚钢板—系指厚度大于等于 50 mm 但不大于 100 mm 的钢板。

（2）EH47 钢—系指最小规定屈服强度为 460 N/mm^2 的 EH 级船体结构用高强度钢。

（3）止裂钢（BCA 钢）—系指经过止裂韧性 K_{ca} 或止裂温度 CAT 测量具有特定脆性裂纹止裂性能的钢板，分为 BCA1 和 BCA2 两个止裂韧性等级。

（4）集装箱船上甲板区域—包括集装箱船上甲板板、舱口围侧板、舱口围顶板和与它们连接的纵向构件。

第 2 章　EH47 钢

2.1 一般要求

2.1.1 本章规定了最小规定屈服强度为 460 N/mm^2 船体结构用高强度 EH47 钢的要求。

2.1.2 EH47 钢可用于集装箱船上甲板区域纵向结构构件（如舱口围侧板、舱口围顶板和与它们连接的纵向构件等）。其他船体结构应用 EH47 钢由中国船级社（以下简称“CCS”）特殊考虑。

2.1.3 本章给出用于集装箱船上甲板板和舱口围板，厚度大于等于 50 mm 但不大于 100 mm 的 EH47 钢要求。对本厚度范围以外的 EH47 钢，由 CCS 特殊考虑。

2.1.4 除本指南另有规定外，EH47 钢应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 3 节高强度船体结构用钢和 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）EH 级高强度船体结构用钢的相关要求。

2.2 EH47 钢的技术条件

2.2.1 EH47 钢应为经过细化晶粒处理的镇静钢，其熔炼分析化学成分应满足表 2.2.1 的要求。

不要求止裂性能的EH47钢的化学成分　　表2.2.1

化学成分%（熔炼分析）①②	EH47
C max.	0.18
Mn	0.90 ~ 2.00
Si max.	0.55
P max.	0.020
S max.	0.020
Al（酸溶 min）	0.015③④
Nb	0.02 ~ 0.05④⑤
V	0.05 ~ 0.10④⑤
Ti max.	0.02④⑤
Cu max.	0.35
Cr max.	0.25
Ni max.	1.0
Mo max.	0.08
Ceq max.⑥	0.49
Pcm max.⑦	0.22

① 如有经CCS批准，在钢材冶炼过程中有意添加的任何其他元素，应在材料质量证明书上注明。

② 经CCS批准，允许化学成分与表中规定有所偏差。

③ 当采用总铝含量来代替酸溶铝含量的要求时，总铝含量应不小于0.020%。

④ 当Al、Nb、V单独加入时，其含量应不低于表列下限值；若混合加入两种及以上细化晶粒元素时，表中对单一元素含量的下限规定不适用。

⑤ Nb、V和Ti的总量应不大于0.12%。

⑥ 碳当量应按下式计算：

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%)$$

⑦ 冷裂纹敏感指数应按下式计算：

$$P_{cm}=C+\frac{Si}{30}+\frac{Mn}{20}+\frac{Cu}{20}+\frac{Ni}{60}+\frac{Cr}{20}+\frac{Mo}{15}+\frac{V}{10}+5B \quad (\%)$$

2.2.2 EH47 钢的交货状态和力学性能应满足表 2.2.2 的要求。

EH47钢的交货状态和力学性能①　　表2.2.2

交货状态	钢材等级	屈服强度 R_{eH} 不小于（N/mm²）	抗拉强度 Rm（N/mm²）	伸长率 A_5 不小于（%）	夏比V型缺口冲击试验			
					试验温度（℃）	平均冲击功不小于（J）		
						$50 \le t \le 70$	$70 < t \le 85$	$85 < t \le 100$
						纵向	纵向	纵向
TMCP②	EH47	460	570～720	17	-40	53	64	75

t为钢板厚度，mm。

注：① 具有止裂性能的EH47钢还应满足本指南第3章的要求。

② 其他交货状态由CCS特殊考虑。

2.3 EH47 钢的工厂认可

2.3.1 EH47 钢的工厂认可按照附录 1 要求进行。

2.4 EH47 钢的焊接材料

2.4.1 除本指南另有规定外，EH47 钢的焊接材料应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 2 章焊接材料和 CCS《焊接材料产品检验指南》（J01）的相关要求。

2.4.2 焊接材料熔敷金属的力学性能应满足下表要求。

焊接材料熔敷金属的力学性能　　表2.4.2

焊接材料级别	力学性能			夏比 V 型缺口冲击试验	
	屈服强度不小于（N/mm²）	抗拉强度（N/mm²）	伸长率不小于（%）	试验温度（℃）	平均冲击功不小于（J）
3Y47	460	570～720	19	-20	64
4Y47				-40	
5Y47				-60	

2.4.3 对接焊焊材的力学性能应满足下表要求。

焊接材料对接焊试验的力学性能　　表2.4.3

焊接材料级别	抗拉强度（N/mm²）	弯曲试验比: D/t	夏比 V 型缺口冲击试验	
			试验温度（℃）	平均冲击功不小于（J）
3Y47	570～720	4	-20	64
4Y47			-40	
5Y47			-60	

注：弯曲角度 120°，试验后试样表面上任何方向应不出现长度超过 3 ㎜的开口缺陷。

2.4.4 EH47 焊接材料扩散氢含量应为 H5 或者 H10 级别。

2.5 EH47 钢的焊接工艺评定试验

2.5.1 除本指南另有规定外，认可试验项目、试验方法和验收标准应满足 CCS《材料

与焊接规范》第 3 篇第 3 章的相关要求。

2.5.2 EH47 钢认可焊接工艺适用范围按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 3 章的要求，但母材仅能覆盖 EH47。

2.5.3 冲击试验试样数量和取样位置应按 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 3 章第 2 节的规定进行，在-20℃条件下冲击功应达到 64 J。

2.5.4 硬度试验按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 1 章第 2 节的要求，HV10 值应不高于 350。除 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇第 1 章第 2 节要求的测量点外，还应包括厚度中心位置的测量点。

2.5.5 横向拉伸试验的抗拉强度应不低于 570 N/mm^2。

2.5.6 可要求进行 CTOD 试验（焊缝中心和粗晶区）或深缺口试验。CTOD 试验方法按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章第 8 节规定，试验温度为-10℃。建议平均值不低于 0.15 mm。

2.5.7 弯曲试验压头直径 $D=5t$（t 为试样厚度），弯曲角度 180°。

2.5.8 焊缝断面宏观检验应显示焊缝成形良好，焊缝完全焊透，无裂纹和未熔合缺陷。

2.6 EH47 钢的焊接

2.6.1 从事 EH47 钢焊接的焊工应持有 CCS 颁发或接受的焊工证书。

2.6.2 定位焊或焊缝修补时，焊道应不短于 50 mm。当材料的 P_{cm} 小于或等于 0.19 时，经 CCS 认可可采用不短于 25 mm 的短焊道。

2.6.3 当环境温度在 5℃或以下时，应预热至 50℃或以上。如在环境温度 5℃以下但高于 0℃，且材料的 P_{cm} 小于或等于 0.19 时，预热情况可由 CCS 特殊考虑。

2.6.4 EH47 钢应按照表 2.6.4 选择等级匹配的焊接材料进行焊接。

EH47钢匹配的焊接材料　　表2.6.4

母 材	厚 度		
	50 mm ≤ t ≤ 70 mm	70 mm< t ≤ 85 mm	85 mm < t ≤ 100 mm
焊接材料	3Y47 4Y47 5Y47	4Y47 5Y47	5Y47

2.6.5 焊接结束后，应特别注意焊缝中不能留有有害缺陷。装配码板应完全去除，一般不留缺陷，或者按 CCS 接受的方式进行处理。

2.6.6 引、熄弧板和衬垫板所用钢材应对焊缝不产生显著影响，建议选用与母材相同或相近的材质。

第 3 章　止裂钢

3.1 一般要求

3.1.1 本章规定了止裂钢的要求。

3.1.2 止裂钢指满足本章要求的最小规定屈服强度为 355 N/mm^2、390 N/mm^2 和 460 N/mm^2 的船体结构用高强度钢。

3.1.3 止裂钢应用于集装箱船上甲板区域纵向结构构件（如舱口围侧板、上甲板板、舱口围顶板和与它们连接的纵向构件等）时应满足本指南第 4 章的要求。

3.1.4 止裂钢的厚度范围大于等于 50 mm 但不大于 100 mm，如表 3.2.2 所示。

3.1.5 除本指南另有规定外，止裂钢应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 3 节高强度船体结构用钢和 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）EH 级高强度船体结构用钢的相关要求。

3.2 止裂钢的技术条件

3.2.1 止裂钢应为经过细化晶粒处理的镇静钢，其熔炼分析化学成分应满足表 3.2.1 的要求。

止裂钢的化学成分和脱氧方法　　表3.2.1

化学成分% ①②③（熔炼分析）	EH36-BCA	EH40-BCA	EH47-BCA
C max.	0.18		0.18
Mn	0.90 ~ 2.00		0.90 ~ 2.00
Si max.	0.50		0.55
P max.	0.020		0.020
S max.	0.020		0.020
Al（酸溶 min）	0.015 ④⑤		0.015 ④⑤
Nb	0.02 ~ 0.05 ⑤⑥		0.02 ~ 0.05 ⑤⑥
V	0.05 ~ 0.10 ⑤⑥		0.05 ~ 0.10 ⑤⑥
Ti max.	0.02⑥		0.02⑥
Cu max.	0.50		0.50
Cr max.	0.25		0.50
Ni max.	2.0		2.0
Mo max.	0.08		0.08
Ceq max.⑦	0.47	0.49	0.55
Pcm max.⑧	——		0.24

注：① 止裂钢的化学成分应满足本表要求，可以超出 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 3 节和本指南第 2 章表 2.2.1 中化学成分范围。

② 如有经 CCS 批准，在钢材冶炼过程中有意添加的其他任何元素，应在材料质量证明书上标明其含量。

③ 经 CCS 批准，允许化学成分与表中规定有所偏差。

④ 当采用总铝含量来代替酸溶铝含量的要求时，总铝含量应不小于 0.020%。

⑤ 当 Al、Nb、V 单独加入时，其含量应不低于表中下限值；若混合加入两种及以上细化晶粒元素

时，表中对单一元素含量的下限规定不适用，但应满足认可的技术条件。

⑥ Nb、V 和 Ti 的总量应不大于 0.12%。

⑦ 碳当量应按下式计算：

$$C_{eq}=C+\frac{Mn}{6}+\frac{Cr+Mo+V}{5}+\frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%)$$

⑧ 冷裂纹敏感指数应按下式计算：

$$P_{cm}=C+\frac{Si}{30}+\frac{Mn}{20}+\frac{Cu}{20}+\frac{Ni}{60}+\frac{Cr}{20}+\frac{Mo}{15}+\frac{V}{10}+5B \quad (\%)$$

3.2.2 止裂钢应满足表 3.2.1 和表 3.2.2 要求。同时，EH36 和 EH40 力学性能应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章第 3 节高强度船体结构用钢，EH47 力学性能应满足本指南第 2 章表 2.2.2 的要求。

止裂钢的脆性裂纹止裂性能要求　　表 3.2.2

钢级后缀①	厚度范围（mm）	止裂性能②③	
		-10 °C 脆性裂纹止裂韧性值 Kca（$N/mm^{3/2}$）④	止裂温度 CAT（°C）⑤
BCA1	$50 \le t \le 100$	≥6000 min.	≤-10
BCA2	$80 < t \le 100$⑥	≥8000 min.	⑦

注：① 钢级后缀为“BCA1”或“BCA2”（如 EH40-BCA1, EH47-BCA1, EH47-BCA2 等）。

② 止裂钢的止裂性能通过脆性裂纹止裂韧性 K_{ca} 或止裂温度（CAT）验证。

③ 用于产品出厂试验（批量试验）的小尺寸试验方法应按照附录 5 经 CCS 认可。

④ K_{ca} 值通过附录 3 规定的脆性裂纹止裂试验获得。

⑤ CAT 值通过本附录 4 规定的试验方法获得。

⑥ 低于 80 mm 厚度的钢板由 CCS 特殊考虑。

⑦ 该温度由 CCS 特殊考虑。

3.2.3 表 3.2.2 中规定的脆性裂纹止裂性能应按照 CCS 认可方法对钢材进行评估（认可时按照附录 3 的 K_{ca} 试验或按照附录 4 的 CAT 试验，出厂检验时按照 CCS 认可的小尺寸试验）。对于出厂检验，应从每一块钢板（指“从单个钢坯或钢锭直接轧制成板材的轧制产品”）中取样。

3.2.4 经供需双方协商，可对钢板逐张进行超声波检测。检测标准、检测频率和检测验收标准应在合同中约定。例如，按照 EN 10160:1999 的 S1/E1 等级，或者 ASTM A 578:2017 的 C 等级。

3.3 止裂钢的工厂认可

3.3.1 止裂钢的工厂认可按照附录 2 要求进行。

3.4 止裂钢的焊接工艺评定试验

3.4.1 已经批准的非止裂钢焊接工艺规程（WPS）可以适用于同级别带“BCA1”或者“BCA2”后缀的止裂钢，除非热输入值超过 50 kJ/cm。

3.4.2 对于具有止裂性能的 EH36 钢和 EH40 钢，焊接工艺评定试验要求应满足不带“BCA1”或“BCA2”后缀的相应钢级的焊接工艺要求。

3.4.3 对于具有止裂性能的 EH47 钢，焊接接头 HV10 值应不高于 380，硬度测试按照 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇规定，除 CCS《材料与焊接规范》要求的测量点外，还应

包括厚度中心位置的测量点。EH47BCA 钢焊接工艺评定试验的其他要求应满足 EH47 钢的焊接工艺要求。

3.5 止裂钢的焊接

3.5.1 止裂钢的焊接（如相关的焊工资格、短焊道、预热、焊接材料选择等）应满足同级别非止裂钢（不带“BCA1”或“BCA2”后缀）的要求。

3.5.2 引、熄弧板和衬垫板所用钢材应对焊缝不产生显著影响，建议选用与母材相同或相近的材质。

第 4 章　高强度钢特厚板在集装箱船上的应用

4.1 一般要求

4.1.1 使用钢级符合 4.2 所述和厚度符合 4.3 所述的特厚钢板的集装箱船应满足本章要求。

4.1.2 本章给出特厚钢板用于纵向构件时防止脆性断裂的措施。

4.1.3 本章规定适用集装箱船特厚板防止裂纹启裂和扩展的如下方法，4.5、4.6 和 4.7 中措施的适用性按照附录 6 的规定。

（1）建造期间的无损检测，详见 4.5；

（2）交船后定期的无损检测，详见 4.6；

（3）脆性止裂设计，详见 4.7。

4.1.4 本章给出集装箱船上甲板区域纵向构件使用特厚钢板的基本理念。

4.1.5 对于本章，集装箱船上甲板区域包括集装箱船上甲板板、舱口围侧板、舱口围顶板和与它们连接的纵向构件。

4.2 钢级

4.2.1 本章适用于 H36 钢、H40 钢和 H47 钢中任一钢级用于上甲板区域纵向构件。H36 钢、H40 钢和 H47 钢系指最小规定屈服强度分别为 355 N/mm^2、390 N/mm^2 和 460 N/mm^2 的钢材。

4.2.2 当 H47 钢用于上甲板区域纵向构件时，H47 钢韧性等级应为第 2 章规定的 EH47。

4.3 厚度

4.3.1 对于厚度大于 50 mm 但不大于 100 mm 的钢板，应按 4.5、4.6 和 4.7 中规定措施，采取适当的防止脆性裂纹启裂和扩展的措施。

4.3.2 对于厚度大于 100 mm 的钢板，防止脆性裂纹启裂和扩展的措施应提交理论分析和超大尺寸试验结果，由 CCS 特别考虑。

4.4 船体结构

4.4.1 最小规定屈服强度 355 N/mm^2 和 390 N/mm^2 的材料系数见 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇。用于船体梁强度评估的 EH47 钢材料系数 K=0.62。

4.4.2 纵向结构构件的疲劳评估应按照 CCS《船体结构疲劳强度指南》的相关要求进行。

4.4.3 当特厚板用于船体结构与舾装件的连接时，边缘应平滑过渡。

4.5 建造阶段的无损检测

4.5.1 如果附录 6 要求建造时进行无损检测（NDT），则 NDT 应满足 4.5.2-4.5.4 要求。如果使用 4.9.1（2）④所述衍射时差技术（TOFD）或者相控阵超声检测（PAUT）技术应满足 CCS《材料与焊接规范》的要求。

4.5.2 应按 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1 的要求对货舱区域所有上部纵向构件的分段对接焊缝进行 100%外观检查和 100%超声波检测。上部纵向构件包括内壳/舱壁最顶部列板、舷侧顶列板、主甲板、舱口围板、舱口围板顶板及所有附连的纵向扶强材。这些构件的定义见图 4.5.2。

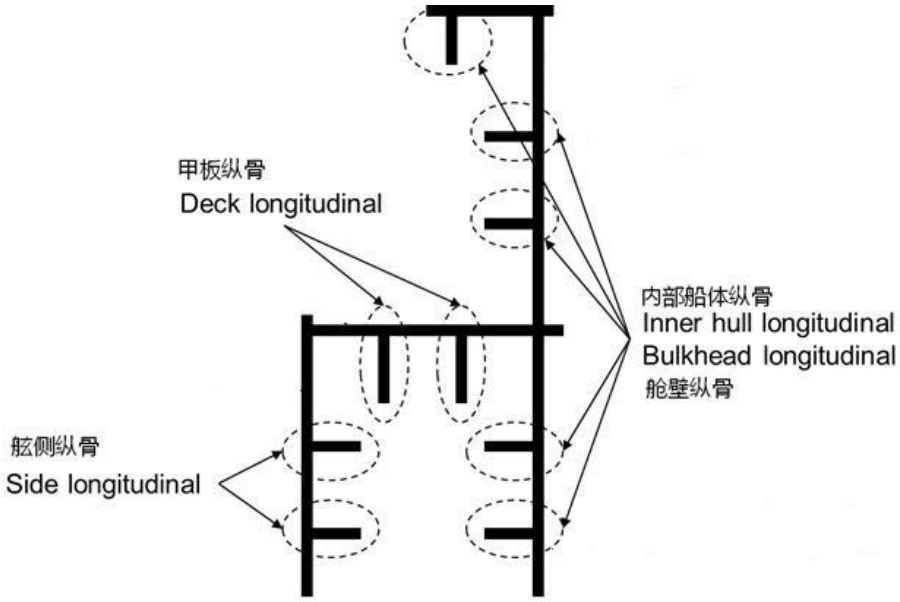


图 4.5.2 上部纵向构件

4.5.3 超声波检测验收标准不低于 ISO 11666 的 2 级、EN ISO 11666 的 2 级、CB/T 3559 的Ⅱ级、JIS Z3060 Ⅱ级或其他等效标准的要求。

4.5.4 如果要考虑防止脆性裂纹启裂，可以调整验收标准比上述要求更高，超声波检测工艺规程相应修改为更高的灵敏度，由 CCS 特别考虑。

4.5.5 如果使用 4.9.1（2）④所述衍射时差技术（TOFD）或者相控阵超声检测（PAUT）技术应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 2 的要求，衍射时差技术（TOFD）的验收标准不低于 ISO15626 的 1 级，相控阵超声检测（PAUT）验收标准不低于 ISO 19285 的 2 级。

4.6 交船后定期的无损检测

4.6.1 当交船后需要进行定期无损检测时，应符合 4.6.2 - 4.6.4 的规定。

4.6.2 无损检测工艺应满足 CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1[①]的要求。

4.6.3 每五年对货舱区域所有上部纵向构件的分段对接焊缝（见 4.5.2）进行 100%超声波检测。

4.6.4 超声波检测验收标准不低于 ISO 11666 的 2 级、EN ISO 11666 的 2 级、CB/T 3559 的Ⅱ级、JIS Z3060 Ⅱ级或其他等效标准的要求。

4.6.5 如果使用衍射时差技术（TOFD）或者相控阵超声检测（PAUT）技术，衍射时差技术（TOFD）的验收标准不低于 ISO15626 的 1 级，相控阵超声检测（PAUT）验收标准不低于 ISO 19285 的 2 级。

4.7 脆性止裂设计

4.7.1 当采用附录 6 中措施 3、4 和 5，且上甲板板的钢材等级不高于 H40 时，可使用本指南的止裂钢。

4.7.2 应在货舱区域内采取防止脆性裂纹扩展的措施。脆性裂纹止裂设计系指使用这些措施的设计。

4.7.3 本指南中的措施一般适用于对接接头，但应注意到裂纹的启裂和扩展会偏离这

① 用于本指南时，CCS《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1 的要求适用于营运船舶的无损检测。

些接头，因此，应根据 4.8.1（2）②考虑采取合适的措施。

4.7.4 止裂钢应满足本指南第 3 章的要求。

4.8 脆性裂纹止裂设计的功能要求

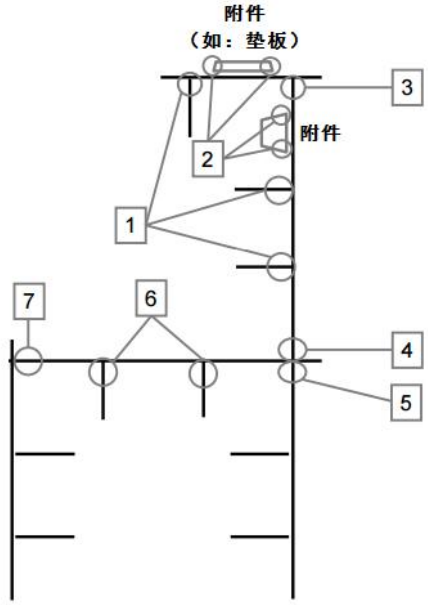
4.8.1 脆性裂纹止裂设计旨在合适的位置上阻止裂纹扩展和防止船体梁的大尺度断裂。

（1）最应关注的脆性裂纹启裂和扩展位置是舱口围侧板或上甲板板的分段对接接头。其他位置也可能沿对接焊缝发生裂纹启裂和扩展。

（2）应考虑下列两种情况：

① 脆性裂纹直接沿着对接接头扩展，和；

② 脆性裂纹启裂于对接接头中，但偏离对接接头焊道进入母材，或脆性裂纹启裂于其他焊缝（其他焊缝的定义见图 4.8.1），扩展进入母材。



注：“其他焊缝区域”包括如下：

（a）舱口围侧板（包括顶板）与纵骨连接的角焊缝；

（b）舱口围侧板（包括顶板和纵骨）与附录连接的角焊缝（如舱口围顶板与舱口盖垫板的角焊缝）；

（c）舱口围顶板与舱口围侧板连接的角焊缝；

（d）舱口围侧板与上甲板板连接的角焊缝；

（e）上甲板板与内壳/舱壁板连接的角焊缝；

（f）上甲板板与纵骨连接的角焊缝，以及

（g）舷顶列板与上甲板板连接的角焊缝。

图 4.8.1 其他焊缝区域

4.9 止裂设计概念

4.9.1 以下措施可以认为是脆性裂纹止裂设计中防止脆性裂纹扩展的可接受的措施。详细的设计布置应提交 CCS。

（1）针对 4.8.1（2）②的脆性裂纹止裂设计：

沿货舱区的上甲板板应采用满足本指南第 3 章规定性能的止裂钢，适合于阻止从舱口围启裂的脆性裂纹扩展到下部结构。

（2）针对 4.8.1（2）①的脆性裂纹止裂设计：

① 舱口围侧板分段对接焊缝和上甲板板分段对接焊缝错开，错开的距离应大于或等

于 300 mm。舱口围侧板应采用止裂钢。

② 舱口围侧板焊缝与甲板焊缝相接的分段对接焊缝处开有止裂孔，此时对接焊缝下端处的疲劳强度应予以评估。对脆性裂纹从焊道偏离进入上甲板板或舱口围侧板的可能性应采取附加的应对措施。这些措施应包含舱口围侧板使用止裂钢板。

③ 舱口围侧板焊缝与甲板焊缝相接的分段对接焊缝处嵌入止裂钢板或采用具有高止裂韧性的焊缝金属。对于脆性裂纹从焊道偏离进入上甲板板或舱口围板的可能性应采取附加的应对措施。这些措施应包含舱口围侧板使用止裂钢板。

④ 采用加强的无损检测措施，特别是采用更高缺陷验收标准的衍射时差技术（TOFD）或者相控阵超声检测（PAUT）技术替代 4.5 中规定的超声波检测技术，这种措施可以作为①、②和③的替代措施。此时，TOFD 验收标准为 ISO 15626 的 1 级，PAUT 验收标准为 ISO19258 的 2 级。

4.10 止裂钢的选择

4.10.1 用于集装箱船上甲板区域的止裂钢应满足第 3 章相应 BCA1 和 BCA2 钢的要求。

4.10.2 根据表 4.10.2，对于每个厚度大于 50 ㎜的构件，选择合适的止裂钢。

构件和厚度相应的止裂钢要求　　表4.10.2

构件*	厚度（mm）	止裂钢要求
上甲板板	$50 < t \leq 100$	带有 BCA1 后缀的 EH36 或 EH40 钢
舱口围侧板	$50 < t \leq 80$	带有 BCA1 后缀的 EH40 或 EH47 钢
	$80 < t \leq 100$	带有 BCA2 后缀的 EH40 或 EH47 钢
（*）不包括与它们连接的纵向构件		

4.10.3 如果使用表 4.10.2 的止裂钢，舱口围侧板与上甲板板的焊接应部分熔透。焊接接头细节应经 CCS 批准。在对接接头附近，甲板和舱口围侧板的连接如果需要使用其他焊接形式，则该连接区域应采用额外的防止裂纹扩展措施，并经 CCS 的同意。

附录 1　EH47 钢的认可

1 范围

1.1 本附录规定了 EH47 高强度船体结构用钢工厂认可的要求。

1.2 除本附录另有规定外，EH47 高强度船体结构用钢的认可，包括试验程序、试验产品选择、试样位置和试验项目，应符合 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）EH 级高强度船体结构用钢的相关规定。

2 认可试验

2.1 认可试验的范围

2.1.1 EH47 钢的认可不覆盖低强度等级钢的认可。

2.1.2 试验产品应代表待认可钢材的最大厚度。如果化学成分设计和制造工艺随厚度变化，则 CCS 可以要求分别选择每个化学成分范围和每种制造工艺的最大厚度钢板进行试验。

2.2 试验项目

2.2.1 母材脆性断裂启裂试验：应进行裂纹尖端张开位移（CTOD）试验或深缺口试验。CTOD 试验按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章第 8 节的规定，试验温度为-10℃。建议平均值不低于 0.20 mm。

2.2.2 焊接试验

（1）按公认的标准，如 ISO 17642-2:2005，进行斜 Y 型焊接裂纹试验（氢致裂纹试验）。

（2）应进行裂纹尖端张开位移（CTOD）试验或深缺口试验。CTOD 试验按照 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 2 章第 8 节的规定，裂纹尖端位于粗晶区（GCHAZ），试验温度为-10℃，包括最小热输入和最大热输入。建议平均值不低于 0.15 mm。

2.2.3 其他试验

在 2.2.1 和 2.2.2 试验外，其他试验按照 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）EH 级高强度船体结构用钢的认可试验进行。当 CCS 认为有需要进行另外的试验时，还可增加相应的试验。

附录 2　止裂钢的认可

1 范围

1.1 本附录规定了止裂钢工厂认可的要求。

1.2 除本附录另有规定外，止裂钢的认可按 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）（对于 EH36 止裂钢或者 EH40 止裂钢）和/或附录 1（对于 EH47 止裂钢）的规定，分别满足 EH36、EH40、EH47 要求。

2 认可申请

2.1 提交资料

2.1.1 制造商应在 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）要求的资料外，提交以下资料：

（1）申请认可钢材的脆性裂纹止裂性能内部试验报告；

（2）脆性裂纹止裂性能试验大纲；

（3）脆性裂纹止裂性能的出厂试验程序。

3 认可试验

3.1 认可试验范围

3.1.1 认可试验范围见本附录 3.2、3.3 和 3.4。认可覆盖范围见表 A2-1。

认可覆盖范围　　表A2-1

试验等级	覆盖等级
EH36BCA1	EH36BCA1
EH40BCA1	EH40BCA1、EH36BCA1①
EH40BCA2	EH40BCA2、EH40BCA1①、EH36BCA1①
EH47BCA1	EH47BCA1
EH47BCA2	EH47BCA2、EH47BCA1①

注：① 前提是相似的成分设计、相同的制造工艺和相同的止裂机理。

3.1.2 试验产品应代表待认可钢材的最大厚度。如果化学成分设计和制造工艺随厚度变化，则 CCS 可以要求分别选择每个化学成分范围和每种制造工艺的最大厚度钢板进行试验。

3.1.3 根据脆性裂纹止裂性能内部试验报告，如有需要，可以增加试验项目和试样数量。

3.2 认可试验类型

3.2.1 应在 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）（对于 EH36 止裂钢或者 EH40 止裂钢）和/或附录 1（对于 EH47 止裂钢）规定的试验外，进行本附录 3.3 的脆性裂纹止裂试验。

3.2.2 已经获得 CCS 认可的 EH36、EH40 和 EH47 申请止裂钢后缀（如果化学成分和制造工艺类似，炼钢工艺、脱氧方法和细化晶粒处理、浇铸方法和交货状态相同），可以仅按照本附录和 CCS《船用轧制钢材产品检验指南》（W01）进行脆性裂纹止裂试验、化学成分分析、拉伸试验和夏比 V 型缺口冲击试验。

3.3 脆性裂纹止裂试验的试样和程序

3.3.1 脆性裂纹止裂试验的取样，应使试样的纵轴平行于试板最终轧制方向。

3.3.2 脆性裂纹止裂试验的加载方向应平行于试板最终轧制方向。

3.3.3 脆性裂纹止裂试验的试样厚度为试板的全厚度。

3.3.4 如果脆性裂纹止裂试验的初试试样不满足止裂性能要求，可以在同一钢板上再取一组止裂试样，此时两组试样的止裂试验结果合并一起评估。

3.3.5 试样的厚度应为认可钢板的最大厚度。

3.3.6 如果使用脆性裂纹止裂韧性值 K_{ca} 评估脆性裂纹止裂性能，试验方法按照附录 3 进行。如果使用止裂温度 CAT 评估脆性裂纹止裂性能，试验方法按照附录 4 进行。

3.4 其他试验

3.4.1 当 CCS 认为有需要时，可增加相应的试验。

4 试验结果

4.1 试验结果应相应满足 CCS《材料与焊接规范》第 1 篇第 3 章 EH36 钢材、EH40 钢材、本指南第 2 章的要求和本指南第 3 章要求。

4.2 试验项目和程序应符合批准的试验大纲。制造商应提交按照附录 3 进行的 K_{ca} 或按照附录 4 进行的 CAT 试验报告。

5 标记

5.1 在完成认可后，对满足相应止裂性能的钢材，授予“BCA1”或“BCA2”后缀（例如 EH40-BCA1、EH47-BCA1、EH47-BCA2 等）。

6 证书换新

6.1 制造商应在工厂证书有效期内提交经认可的止裂钢的生产数据。

注：实际生产数据包括化学成分、力学性能、脆性裂纹止裂性能（如脆性裂纹止裂试验结果或小尺寸替代试验结果）和标称厚度，可以用柱状图或者统计数据的形式描述。

附录 3　脆性裂纹止裂韧性值 Kca 试验方法

1 范围

1.1 ISO 20064:2019 给出一种宽板梯温测试止裂韧性的方法。

1.2 本附录规定了按照 ISO 20064:2019 使用断裂力学参数测定止裂韧性（即 K_{ca}）的试验程序和确定特定温度下 K_{ca} 的方法。此外，本附录规定了试板 K_{ca} 的评估方法。本附录适用于厚度大于等于 50 mm 但不超过 100 mm 的船体结构钢。

2 试验程序

2.1 试验程序，包括试验设备、试样、试验方法、止裂韧性的测量、试验报告等，应符合 ISO 20064:2019 的要求。

2.2 脆性裂纹的启裂方法也可以采用 ISO 20064:2019 附录 D 的双重拉伸方法。

2.3 ISO 20064:2019 附录 B.2.4 中的第一句话应修改为“每个数据点按 {Kca /[K0 *exp（−c/TcaK）]}计算。

3 特定温度下 Kca 的确定

3.1 应按照 ISO 20064:2019 附录 B 的规定进行多次试验获得特定温度下 K_{ca} 值。

3.2 用插值法对有效 Kca 数据进行阿伦尼乌斯图的直线近似应满足以下（1）或（2）的要求：

（1）K_{ca} 的评估温度（即-10℃）位于试验所测止裂温度的上限和下限之间，对应于评估温度的 K_{ca} 不低于规定的 K_{ca} 值（例如 6000 N/mm$^{3/2}$ 或 8000 N/mm$^{3/2}$），如图 A3-1 所示。

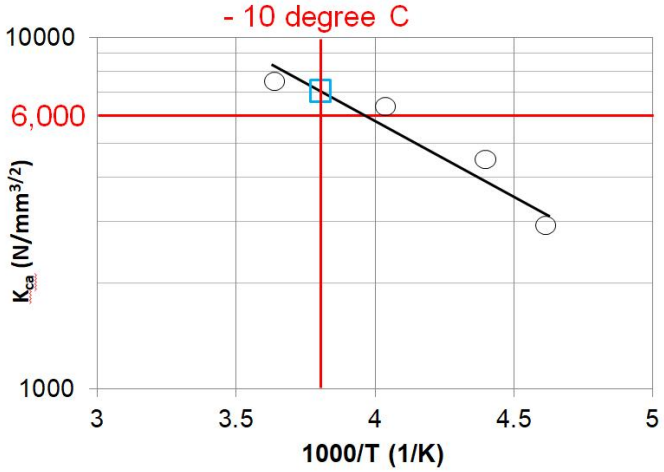


图 A3-1 评估-10℃下 Kca 的例子

（2）对应于 K_{ca} 规定值（例如 6000 N/mm$^{3/2}$ 或 8000 N/mm$^{3/2}$）的温度应通过试验所测止裂温度内插得到，且不高于评估温度（即-10℃），如图 A3-2 所示。

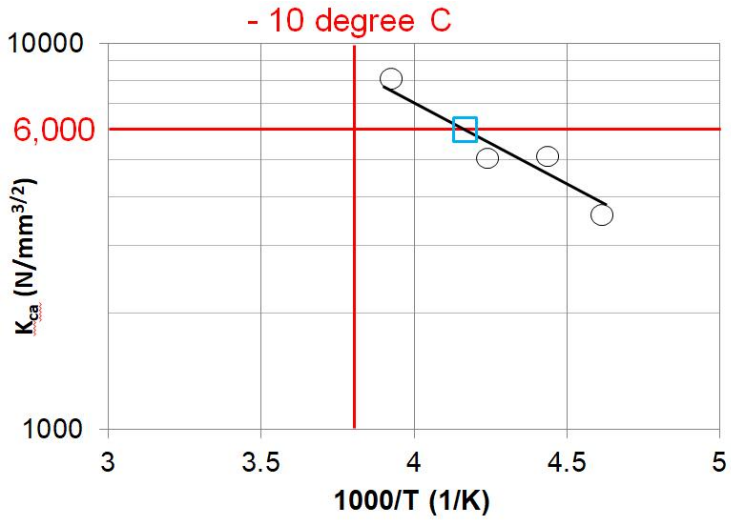


图 A3-2 评估所需 Kca 对应温度的示例

如果上述（1）和（2）都不满足，则增加试验以满足该条件。

附录 4　等温型止裂温度试验要求概要

1 适用范围

1.1 本附录适用于本指南规定范围。

1.2 本附录规定了在等温条件下使用等温止裂试验确定有效试验结果以获得裂纹止裂温度（CAT）的试验程序和试验条件的要求。本附录适用于厚度大于 50mm 但不大于 100 mm 的钢材。

1.3 该方法采用待评估试样的等温温度。除本附录另有规定外，其他试验参数应符合 ISO 20064:2019 的规定。

1.4 本指南第 3 章表 3.2.2 给出了由止裂温度（CAT）表征的止裂性能的相关要求。

1.5 制造商应在试验前将其试验大纲提交给 CCS 进行审查。

2 符号及其含义

2.1 表 A4-1 在 ISO 20064:2019 表 1 的基础上对等温试验的特定符号进行了补充。

在ISO 20064: 2019表1外的补充符号含义　　表A4-1

符号	单位	含 义
t	mm	试样厚度
L	mm	试样长度
W	mm	试样宽度
a_{MN}	mm	试样边缘加工缺口的长度
L_{SG}	mm	试样侧面上从边缘起的侧槽长度。L_{SG} 定义为除了侧槽末端深度方向弯曲段外，具有恒定深度的凹槽长度
d_{SG}	mm	具有恒定深度段上的侧槽深度
$L_{EB\text{ - }min}$	mm	试样边缘与电子束重熔区前端之间的最小长度
$L_{EB\text{-}s1,\ \text{-}s2}$	mm	试样两侧从边缘到电子束重熔区前端之间的长度
L_{LTG}	mm	脆性裂纹扩展方向上局部温度梯度区域的长度
a_{arrest}	mm	止裂裂纹长度
T_{target}	℃	目标试验温度
T_{test}	℃	定义的试验温度
T_{arrest}	℃	目标试验温度，在该温度下观察到有效的止裂行为
σ	N/mm^2	在W*t的横截面上施加的试验应力
SMYS	N/mm^2	待认可试验钢材等级的最小规定屈服强度
CAT	℃	裂纹止裂温度，Tarrest的最低值，在此温度下裂纹扩展被阻止

3 试验装置

3.1 使用的试验装置应为液压型，具有足够能力可以提供达到待认可钢材等级 2/3 SMYS 的拉伸载荷。

3.2 应配备温度控制系统，以使试样指定区域内的温度保持在 T_{target}±2℃的范围内。

3.3 引发脆性裂纹的方法可以是落锤式、空气枪式或双重拉伸式。

3.4 试验装置的详细要求见 ISO 20064:2019。

4 试样

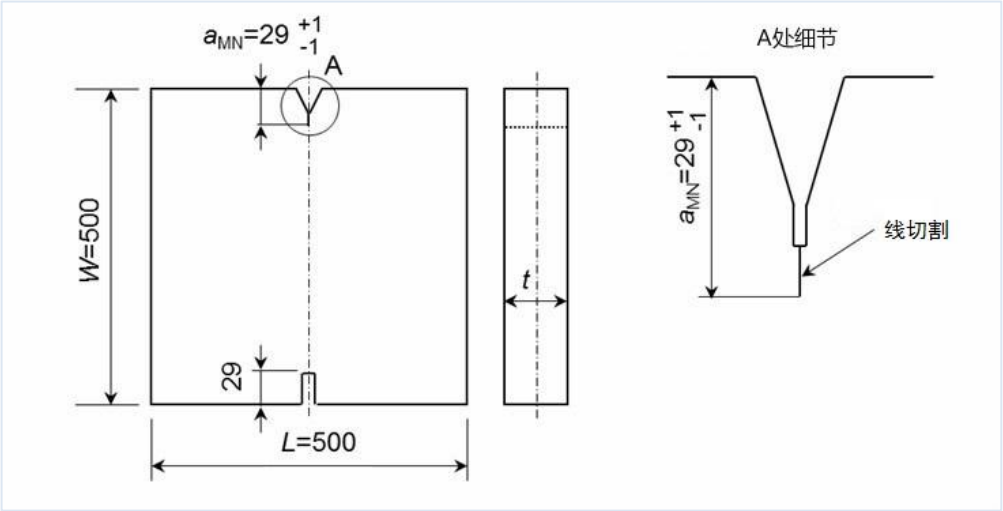
4.1 冲击式裂纹启裂

4.1.1 除本附录另有规定外，试样应满足 ISO 20064:2019 的要求。

4.1.2 试样尺寸如图 A4-1 所示。试样宽度 W 为 500 mm。试样长度 L 大于等于 500 mm。

4.1.3 在试样冲击侧的边缘加工出用于脆性裂纹启裂的 V 形缺口。整个加工缺口长度为 29 mm ± 1 mm。

4.1.4 侧槽的要求见 4.4。



注：缺口半径可加工在 0.1mmR 和 1mmR 的范围内，以控制试验时脆性裂纹的启裂。

图 A4-1 冲击式试样的试样尺寸

4.2 双重拉伸式裂纹启裂

4.2.1 副加载板的形状和尺寸以及脆性裂纹启裂的副加载方法，应参考 ISO 20064:2019 附录 D。

4.2.2 在双重拉伸式试验中，副加载板可以进一步冷却以易于脆性裂纹的启裂。

4.3 脆化区的设置

4.3.1 应形成脆化区以确保脆性裂纹启裂。可采用电子束焊接（EBW）或局部温度梯度（LTG）方法促使脆化区形成。

4.3.2 对于 EBW 脆化，沿着裂纹预期扩展路径进行电子束焊接，该焊道位于机加工 V 形缺口前的试样中心线上。

4.3.3 脆化区试样厚度方向需要全焊透。最好是单侧 EBW 焊透，但是当 EBW 功率不足以实现单侧 EBW 的全焊透时，也可以采用双侧 EBW 全焊透。

4.3.4 建议在试样加工前进行 EBW 脆化。

4.3.5 对于 EBW 脆化，脆化区应具有适当的质量。

注：EBW 偶尔会在起点和终点出现不稳定。建议 EBW 线通过增加功率控制从脆化区顶端一侧起始焊到试样边缘，或以在起点进/出方式以保持稳定的 EBW。

4.3.6 对于 LTG 方法，在等温温度控制之后，调节建立加工缺口尖端和等温试验区域之间的特定局部温度梯度。LTG 温度控制应在脆性裂纹启裂之前完成，应保证厚度方向上稳定的温度。

4.4 侧槽

4.4.1 可在脆化区表面加工侧槽，以使脆性裂纹沿着直线扩展。侧槽应按本节规定加

工。

4.4.2 对于 EBW 脆化，侧槽不是强制性的。使用 EBW 可避免剪切唇。当断裂试样上有明显的剪切唇时，如任意一侧厚度上有超过 1 mm 的剪切唇，则应加工侧槽，以抑制剪切唇。

4.4.3 对于 LTG 脆化，应有侧槽。应在两个侧面机加工出相同形状和尺寸的侧槽。

4.4.4 侧槽的长度 L_{SG} 应不小于所需脆化区的长度。

4.4.5 当采用侧槽时，侧槽深度、尖端半径和开口角度不做限定，但要适当选择，以避免任何一侧出现厚度超过 1 mm 的剪切唇。侧槽尺寸的示例如图 A4-2 所示。

4.4.6 侧槽末端应加工，使槽深逐渐变浅，曲率半径应大于或等于槽深 d_{SG}。侧槽长度 L_{SG} 定义为除了侧槽末端深度方向弯曲截面部分外，具有恒定深度的凹槽的长度。

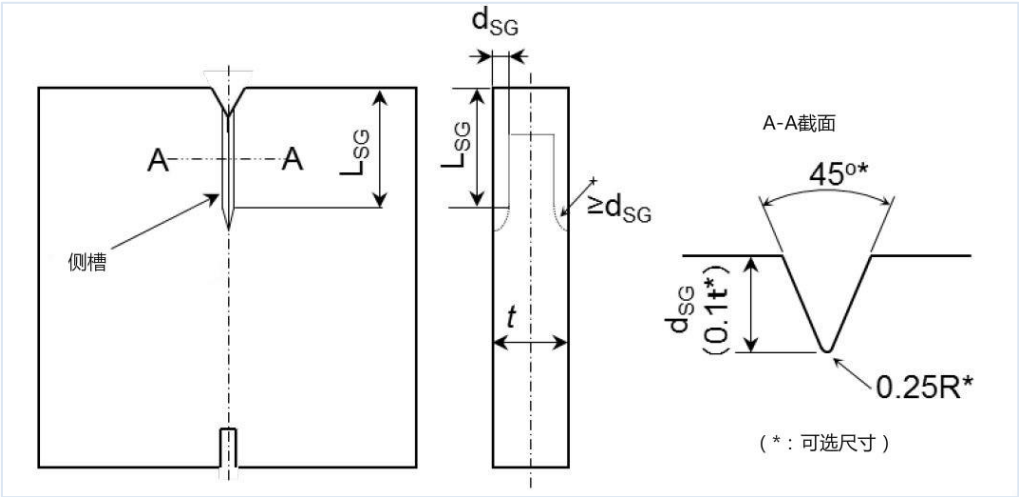


图 A4-2 侧槽形状和尺寸

4.5 脆化区的名义长度

4.5.1 脆化区的名义长度应大于等于 150 mm。

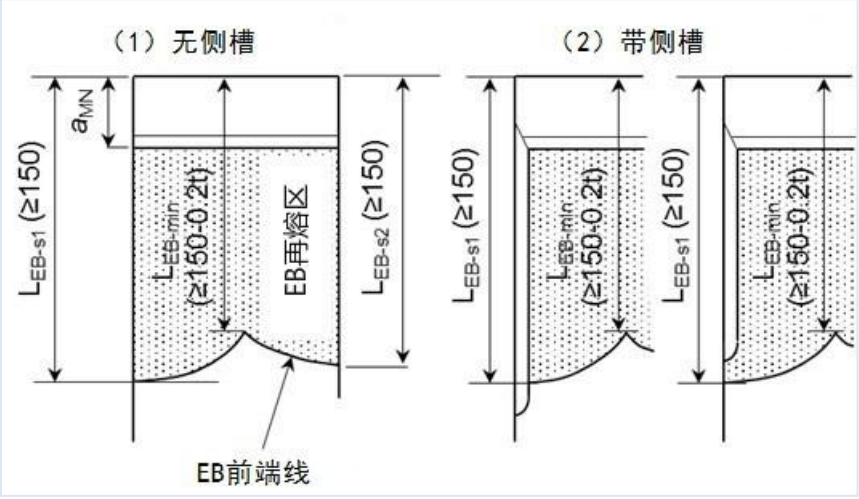


图 A4-3 EBW 长度的定义

4.5.2 EBW 区的长度由试验后断面上，试样边缘与 EBW 前端线之间的 $L_{EB\text{-}min}$，以及 $L_{EB\text{-}s1}$ 和 $L_{EB\text{-}s2}$ 的三次测量值来调节，如图 A4-3 所示。

4.5.3 试样边缘至 EBW 前端线的最小长度 $L_{EB\text{-}min}$ 不宜小于 150 mm。然而，$L_{EB\text{-}min}$ 不小于 150 mm-0.2t 也可以接受，其中 t 是试样厚度。当 $L_{EB\text{-}min}$ 小于 150 mm 时，温度安全裕度应在 T_{test} 中考虑（见 8.1.2）。

4.5.4 另外两个是试样两侧从边缘到 EBW 前端线之间的长度，用 $L_{EB\text{-}s1}$ 和 $L_{EB\text{-}s2}$ 表示。$L_{EB\text{-}s1}$ 和 $L_{EB\text{-}s2}$ 均应不小于 150 mm。

4.5.5 对于 LTG 方法，L_{LTG} 设置为 150 mm。

4.6 连接板/销型夹头细节和试样与连接板的焊接

4.6.1 连接板和销型夹头的构造和尺寸应参考 ISO 20064:2019。试件、连接板和销型夹头焊接在一起的整个试样的焊接变形也应在 ISO 20064:2019 的要求范围内。

5 试验方法

5.1 预加载

5.1.1 可在室温下进行预加载，以避免试验时出现意外的脆性裂纹启裂。施加的载荷值应不大于试验应力。当预计在预加载中会发生脆性裂纹启裂时，可以在高于环境温度的温度下进行预加载。无论如何，试样的温度不得高于 100℃。

5.2 温度测量和控制

5.2.1 显示热电偶数量和位置的温度控制计划应符合本节的要求。

5.2.2 热电偶应布置在试样两侧，在整个宽度范围内布置的最大间距为 50 mm，同时在试样宽度中心位置（0.5 W）距中心线±100 mm 的纵向范围内布置，参见图 A4-4。

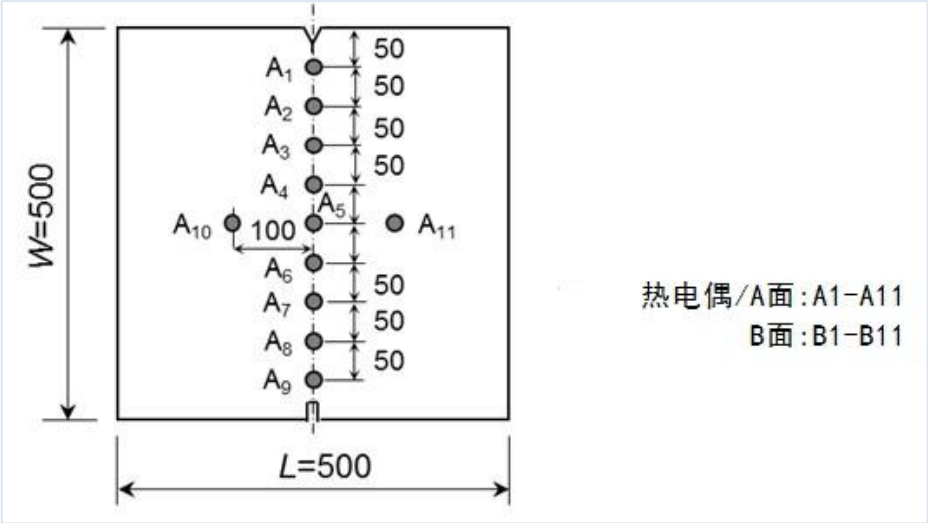


图 A4-4 温度测量位置

5.2.3 对于 EBW 脆化方式

5.2.3.1 在 0.3W-0.7W 范围内宽度和纵向上热电偶的温度应控制在目标试验温度 T_{target}±2℃范围内。

5.2.3.2 当 0.3W-0.7W 范围内所有测得的温度都达到目标值后，温度应至少稳定保持 10+0.1*t[mm]分钟，以确保在施加试验载荷前厚度中心的温度也均匀稳定。

5.2.3.3 可局部冷却加工缺口尖端，促使脆性裂纹易于启裂。不过局部冷却不应影响 0.3W～0.7W 范围内的温度控制。

5.2.4 对于 LTG 脆化方式

5.2.4.1 对于 LTG，除了图 A4-4 所示的温度测量外，还需要在机加工缺口尖端，A_0 和 B_0 处进行额外的温度测量。LTG 区域内的热电偶位置如图 A4-5 所示。

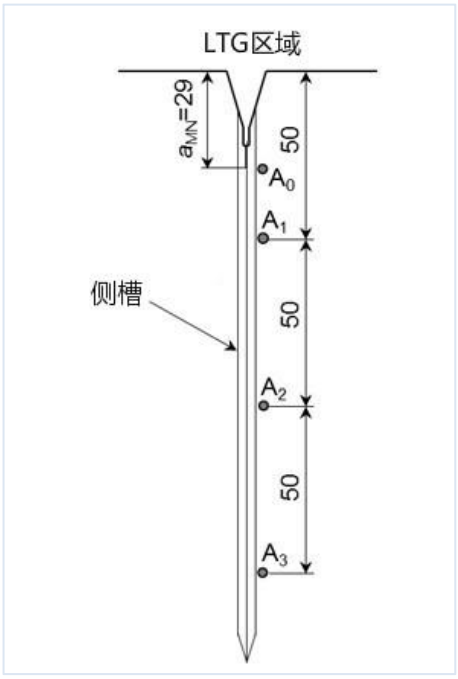


图 A4-5 LTG 区域和附加热电偶 A_0 详图

5.2.4.2 在 0.3W-0.7W 范围内宽度和纵向上热电偶测量的温度应控制在目标试验温度 T_{target} ± 2℃范围内。但是，0.3W（A_3 和 B_3 位置）处的温度测量应满足以下 5.2.4.6 的要求。

5.2.4.3 当 0.3W-0.7W 范围内所有测得温度达到目标温度后，温度应至少稳定保持 10+0.1*t[mm]分钟，以确保厚度中心的温度也均匀稳定，然后施加试验载荷

5.2.4.4 LTG 通过对加工缺口尖端周围的局部冷却来控制。LTG 温度场应记录图 A4-6 所示的从 A0 到 A3 测量的温度。

5.2.4.5 LTG 区由三个区，I 区、Ⅱ区和Ⅲ区的温度梯度确定。各温度梯度的可接受范围见表 A4-2。

5.2.4.6 A_2、B_2 和 A_3、B_3 处的温度测量应满足以下要求：

A_3 处 T, B_3 处 $T < T_{target} - 2^oC$

A_2 处 $T < A_3$ 处 $T - 5^oC$

B_2 处 $T < B_3$ 处 $T - 5^oC$

5.2.4.7 如果 A_3 和 A_2 的温度满足上述要求，则 A_0 和 A_1 的温度不作要求。B 面一样。

5.2.4.8 A_0、B_0 到 A_3、B_3 的温度应在试验计划阶段确定，参考表 A4-2，该表给出了三个区域的推荐温度梯度，即 LTG 区域的 I 区、Ⅱ区和Ⅲ区。

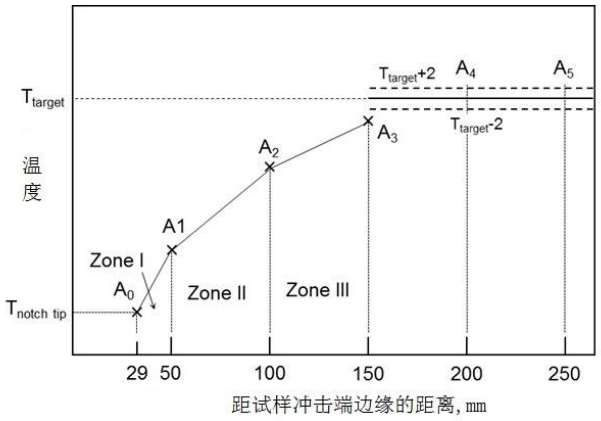


图 A4-6 LTG 区温度梯度剖面示意图

可接受的LTG范围 **表A4-2**

区域	距离边缘的位置	可接受的温度梯度
I 区	29 ~ 50 mm	2.00 ~ 2.30 ˚C/mm
II 区	50 ~ 100 mm	0.25 ~ 0.60 ˚C/mm
III区①	100 ~ 150 mm	0.10 ~ 0.20 ˚C/mm

注：①区域III的温度分布是强制的。

5.2.4.9 上述 LTG 区的温度分布应至少稳定保持 10+0.1t [mm]分钟，以确保在施加试验载荷前厚度中间的温度也均匀稳定。

5.2.4.10 应基于从 A_0 到 A_3 的测量温度，根据表 A4-2 确定试验中 LTG 是否可以接受。

5.2.5 对于双重拉伸式启裂裂纹试样

5.2.5.1 稳定状态下的温度控制和保持时间应与 5.2.3 中规定的 EBW 脆化情况或 5.2.4 中规定的 LTG 脆化情况一样。

5.3 加载和脆性裂纹启裂

5.3.1 试验前，应选定目标试验温度（T_{target}）。

5.3.2 试验程序应符合 ISO 20064:2019 的规定，但施加的应力应为试验钢材等级 SMYS 的 2/3。

5.3.3 在裂纹启裂之前，应将试验载荷保持在试验目标载荷或更高载荷至少 30 秒。

5.3.4 在记录下所有的测量温度和所施加的力后，可以通过冲击或副加载拉伸启裂脆性裂纹。

6 试验后的测量和试验有效性判定

6.1 脆性裂纹启裂和验证

6.1.1 如果在试验力达到规定值前或在试验力保持时间未达到规定时间前，脆性裂纹自发启裂，则试验无效。

6.1.2 在试验力保持规定时间后，如果脆性裂纹在没有冲击或副加载拉伸的情况下自发启裂，则认为试验是有效的启裂。随后应检查裂纹路径和断裂面以验证有效性。

6.2 裂纹路径检查和验证

6.2.1 当脆化区脆性裂纹路径偏离和/或裂纹分叉偏离 EBW 线或 LTG 侧槽时，试验应

视为无效。

6.2.2 从脆化区末端开始的所有裂纹路径应在图 A4-7 所示的阴影范围内。否则，试验应视为无效。

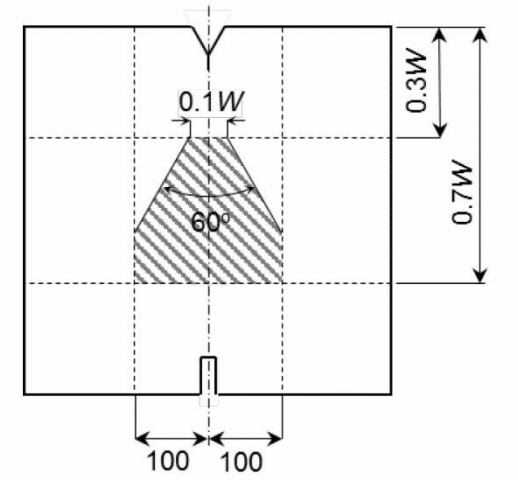


图 A4-7 主裂纹扩展路径的允许范围

6.3 断裂面检查、裂纹长度测量及其验证

6.3.1 观察并检查断裂面。应检查裂纹“启裂”和“扩展”的有效性并记录判定结果。应测量并记录裂纹“停止”位置。

6.3.2 在 V 形缺口尖端以外，如果在侧槽根部清楚地检查到裂纹启裂触发点时，试验无效。

6.3.3 在电子束焊接脆化中，电子束焊接长度通过 $L_{EB\text{-}s1}$、$L_{EB\text{-}s2}$ 和 $L_{EB\text{-}min}$ 三个测量值进行量化，定义见 4.5。当 $L_{EB\text{-}s1}$ 和 $L_{EB\text{-}s2}$ 中的一个或两个小于 150 mm 时，试验无效。当 $L_{EB\text{-}min}$ 小于 150 mm-0.2 t 时，试验无效。

6.3.4 当明显观察到脆化区两侧有超过 1 mm 厚度的剪切唇时，无论试样是否带有侧槽，试验无效。

6.3.5 在电子束焊接脆化中，应目视检查超出电子束焊接前端线的脆性裂纹。当未发现从电子束前端线延续的脆性断裂面区域时，试验无效。

6.3.6 应目视检查电子束焊接脆化区的焊接缺陷。如果发现，应进行量化。应测量电子束焊接区域内，沿着脆性裂纹扩展路径上，缺陷投影在厚度方向上长度。投影缺陷部分占总厚度的百分比定义为缺陷百分比（见图 A4-8）。当缺陷百分比大于 10%时，试验无效。

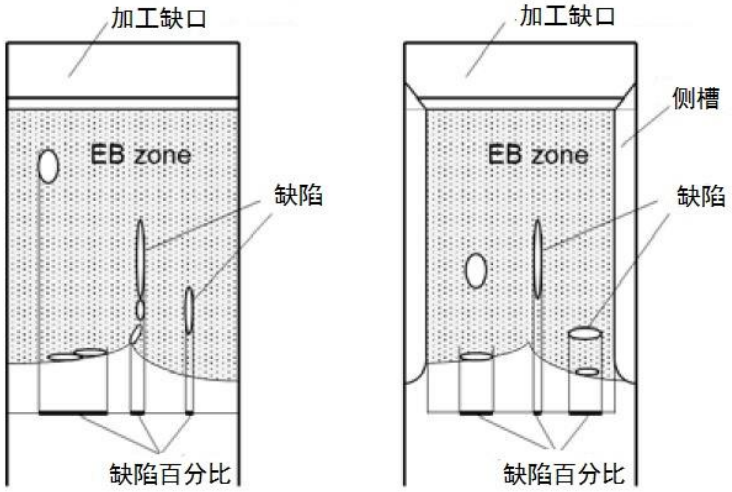


图 A4-8 缺陷百分比计算方法

6.3.7 在双面熔透的 EBW 脆化中，在双面熔透的重叠线上，如果明显发现由双面熔合线不重合引起的脆化区断裂面间隙，试验无效。

7 “止裂”或“未止裂”的判定

7.1 最终试验“止裂”、“未止裂”或“无效”的判定按照 7.2 到 7.6 的要求。

7.2 如果初始脆性裂纹被阻止，且试样未裂成两块，则应按照 ISO 20064:2019 规定的程序剖出断裂面。

7.3 当试样在试验过程中未裂成两块时，应在断裂面上测量止裂长度。从冲击侧试样边缘到止裂尖端（最长位置）的长度定义为 a_{arrest}。

7.4 对于 LTG 和 EBW 两种脆化方式，a_{arrest} 应大于 L_{LTG} 和 $L_{EB\text{-}s1}$、$L_{EB\text{-}s2}$ 或 $L_{EB\text{-}min}$，否则视为无效。

7.5 即使试样在试验过程中裂成两块，当脆性裂纹是明显的再次启裂时，也可以认为是“止裂”的。即使断裂面上全都是脆性断裂，当从脆化区过来的部分脆性裂面被细韧性撕裂线连续包围时，试验可以判定为再次启裂。如果是再次启裂，则撕裂线包围部分的最长裂纹长度可测量为 a_{arrest}。如果裂纹再次启裂不明显时，试验判定为“未止裂”。

7.6 当 a_{arrest} 值不大于 0.7W 时，判定为“止裂”，否则判定为“未止裂”。

8 T_{test}，T_{arrest} 和 CAT 的测定

8.1 T_{test} 的测定

8.1.1 在热电偶测量记录上，应确保在 0.3W-0.7W 宽度和纵向范围内的所有温度测量值在脆性裂纹启裂时均在 T_{target} ± 2°C 的范围内。否则，试验无效。不过，LTG 方式中 0.3W（A_3 和 B_3 位置）处的温度测量可不满足此要求。

8.1.2 如果 EBW 脆化中的 $L_{EB\text{-}min}$ 不小于 150 mm，则 T_{test} 可定义为等于 T_{target}。否则，T_{test} 应等于 T_{target} +5℃。

8.1.3 在 LTG 脆化中，T_{test} 与 T_{target} 相等。

8.1.4 T_{test} 下最终止裂判定是通过在同一试验条件下至少两次判定为“止裂”的试验得出的。

8.2 T_{arrest} 的测定

8.2.1 当在同一 T_{target} 下至少出现两次“止裂”试验结果时，判定 T_{target} 下具有脆性裂

纹止裂行为（T_{arrest}=T_{target}）。当在同一 T_{target} 下多个试验结果中有“未止裂”试验结果时，不能将该 T_{target} 确定为 T_{arrest}。

8.3 CAT 的测定

8.3.1 当测定 CAT 时，除了两个“止裂”试验外，还需要一个“未止裂”试验。“未止裂”的目标试验温度 T_{target} 建议比 T_{arrest} 低 5℃。T_{arrest} 的最低温度确定为 CAT。

8.3.2 如果只有“止裂”试验，没有“未止裂”试验，无法确定 CAT，只能确定 CAT 低于两个“止裂”试验中的 T_{test}。

9 报告

9.1 试验报告应至少包括以下信息：

（1）试验材料：材料等级和材料厚度

（2）试验机额定载荷

（3）试样尺寸：厚度 t；宽度 W 和长度 L；缺口参数和长度 a_{MN}；如有加工侧槽，一并注明侧槽参数。

（4）脆化区类型：EBW 脆化或 LTG 脆化；

（5）试样尺寸：连接板厚度；连接板宽度；包括连接板在内的整个试样长度；加载销之间的距离；角变形和线性偏差。

（6）脆性裂纹启裂方式：冲击式或双重拉伸式。如果是冲击式，注明落锤式或气枪式、并记录实际施加冲击能量。

（7）试验应力：预加载应力；加载应力；预加载应力限值是否达标的判定；加载应力稳定后的应力保持时间是否满足要求的判定。

（8）试验温度：完整的温度记录；测量温度的热电偶位置（以图和/或表的形式）；预设试验温度；等温区温度离散度是否符合要求的判定；采用 LTG 方式时，局部温度梯度是否满足要求以及温度梯度达到稳定后的保温时长是否满足要求的判定。

（9）裂纹路径与断口形貌：显示试样两侧断口样貌和裂纹路径的照片；“脆化区尖端”和“止裂”位置的标注；裂纹路径是否满足要求的判定；启裂位置信息（侧槽边缘或 V 型缺口边缘）。

（10）脆化区信息：采用 EBW 方式时，记录 $L_{EB\text{-}s1}$、$L_{EB\text{-}s2}$ 和 $L_{EB\text{-}min}$；剪切唇厚度是否满足要求的判定；脆性断裂形貌区域是否自电子束焊接熔合线处连续延伸的判定；电子束焊接缺陷是否超标的判定；EBW 长度包括 $L_{EB\text{-}s1}$、$L_{EB\text{-}s2}$ 和 $L_{EB\text{-}min}$ 是否满足要求的判定。用 LTG 方式时，记录 LLTG，剪切唇厚度是否满足要求的判定。

（11）止裂裂纹长度 a_{arrest}：脆性裂纹启裂后试样未完全断裂时，记录止裂裂纹长度 a_{arrest}。脆性裂纹启裂后试样完全断裂时，如果脆性裂纹属于二次启裂，且 a_{arrest} 在有效区域内（$0.3W < a_{arrest} \leq 0.7W$），记录止裂裂纹长度 a_{arrest}。

（12）试验结果的判定：“止裂”、“未止裂”或“本次试验无效”

（13）动态试验数据：裂纹扩展裂纹扩展速率变化与加载销夹持端应变变化记录（如果需要）

10 作为材料鉴定试验的使用

10.1 如有需要，本方法可用于确定本附录 8.3 中钢材阻止扩展脆性裂纹的最低温度（CAT）的试验方法。

附录 5　止裂钢小尺寸试验方法的认可

1 范围

1.1 本附录规定了本指南表 3.2.2 规定的用于止裂钢产品检验（批量试验）的小尺寸试验方法的认可方案。

1.2 除本附录另有规定外，应满足附录 1 和/或附录 2 的要求。

2 认可申请

2.1 制造商应向 CCS 提交如下资料：

（1）小尺寸试验方法的认可申请；

（2）小尺寸试验方法至少包括以下项目：

① 钢材等级，厚度范围，脱氧方法，热处理等；

② 小尺寸试验的类型和方法；

③ 试样在板厚方向和最终轧制方向的取样位置；

④ 试样的大小和尺寸；

⑤ 试样数量；

⑥ 试验条件，如试验温度；

⑦ 验收衡准；

⑧ 试验报告示例格式；

⑨ 包括小尺寸试验结果的产品质量证书的示例；

⑩ 小尺寸试验的复试规定。

（3）止裂钢实现止裂性能的机理；

（4）基于上述（3）中的机理，通过小尺寸试验方法评估止裂性能的技术背景；

（5）用小尺寸试验结果评估止裂钢止裂性能的程序；

（6）止裂钢的小尺寸试验结果与大尺寸脆性裂纹止裂试验结果的相关性的数据记录，其数量满足本附录 3.3 给出的最小数据数量要求；

（7）申请认可的试验大纲。

2.2 小尺寸试验方法说明应按照本附录第 3 条的要求编制。

2.3 如果制造商对认可的小尺寸试验方法提出任何变更，则制造商应向 CCS 提交包括本附录 2.1 所有项目的文件。

2.4 提交文件应包括变更的原因，变更对试验方法的影响，以及消除影响的建议措施。

3 小尺寸试验方法说明的编制

3.1 一般要求

3.1.1 应根据制造商止裂钢的止裂机理确定小尺寸试验方法。此外，需要描述大尺寸脆性裂纹止裂性能与小尺寸试验结果之间相关性，并根据以下项目确定小尺寸试验的验收衡准：

（1）实现止裂性能的机理；

（2）取样位置和方向；

（3）取样频率；

（4）小尺寸试验方法；

（5）脆性裂纹止裂试验结果与小尺寸试验结果之间的相关性证明；

（6）基于统计分析的小尺寸试验验收衡准的推导。

3.1.2 制造商应按照本附录 3.2-3.5 编制小尺寸试验方法说明。

3.2 **试验类型和方法**

3.2.1 小尺寸试验的类型、方法、试样尺寸、取样位置和试样方向由制造商给定，按照本指南认可。

3.2.2 一般选择可以显现裂纹萌生、扩展和止裂的小尺寸试验方法，例如：

（1）多种试验的组合，例如落锤试验和夏比 V 型缺口冲击试验的组合

（2）一种试验方法，例如压制缺口夏比冲击试验或者侧面落锤试验

3.2.3 通常，应通过小尺寸试验结果（例如，通过小尺寸试验获得的转变温度）与大尺寸脆性裂纹止裂试验结果（如 Kca 或对应于特定脆性裂纹止裂性能的温度）之间关系的回归方程来预测止裂钢的脆性裂纹止裂性能。经 CCS 认可，也可采用其他方法。

注：表 A5-1、表 A5-2、表 A5-3 给出小尺寸试验方法的示例。

3.2.4 制造商应基于试验方法理论、产品止裂性能机理、试样的取样位置（见本附录 3.1.1），从理论上确认试验方法对止裂钢的适用性，并应按照本附录 2.1 向 CCS 提交确定小尺寸试验方法的技术背景。

3.3 **试验数据**

3.3.1 试板的选择

3.3.1.1 应根据本附录 3.3，对止裂钢的每种材料等级（包括所有后缀）进行脆性裂纹止裂试验和小尺寸试验。

3.3.1.2 应根据 3.3.1.3 在至少 12 块试板上进行脆性裂纹止裂试验和小尺寸试验，在满足 3.3.1.6 的情况下，经 CCS 同意，可以接受试板数量的适当减少。试板数量应使得这些试验结果能够可靠地评估止裂钢的止裂性能。

注：“一块试板”是指“从单个板坯或铸锭直接轧制成板材的轧制产品”。

3.3.1.3 为了确保小尺寸试验结果与钢板各种制造条件下止裂性能之间相关性，试板的选择考虑厚度范围和炉次的组合，包括：

（1）最大板厚和最小板厚

（2）每种板厚选择不同炉次

此外，上述试板中应包括一定数量的试板，其止裂性能（即脆性裂纹止裂试验结果）未达到本指南表 3.2.2 规定的要求。这类试板数量至少一个，但不超过所有试板数量的四分之一。这类试板的制造工艺可以与止裂钢的制造工艺不同（或有意改变认可的生产工艺）。建议这些（未达到止裂性能要求）试板的强度级别与止裂钢强度级别相似。

如果制造商申请的产品只有一种厚度。这种情况下，对于每种厚度（一种厚度）和每个炉次（三个不同炉次）的组合，每种组合至少选择四块试板，该小尺寸试验仅适用于单一厚度产品。

3.3.1.4 前期用于钢材认可试验的止裂钢（及其认可试验结果）可作为本附录 3.3.1.3 规定的试板。

3.3.1.5 脆性裂纹止裂试验试样和小尺寸试验试样应取自同一试板。

3.3.1.6 在以下情况下，CCS 可接受试板数量的减少：

（1）当制造商对不同材料等级采用小尺寸试验方法时，前提是这些不同等级材料确保止裂性能的制造工艺和机理相同。

（2）当一个或多个材料等级的小尺寸试验方法已经由 CCS 认可，制造商将类似的小尺寸试验方法应用于其他材料等级时，前提是这些不同等级材料确保止裂性能的制造工艺和机理相同。

3.3.2 止裂试验

3.3.2.1 应按照附录 2 对每个试板进行脆性裂纹止裂试验。

3.3.2.2 如果脆性裂纹止裂试验用 K_{ca} 值评估，应根据附录 3 得到特定温度下的 K_{ca}。

3.3.2.3 如果脆性裂纹止裂试验用 CAT 值评估，则应根据附录 4 得到 CAT。

3.3.3 小尺寸试验

3.3.3.1 每块试板应按照认可的小尺寸试验方法进行试验。

3.3.3.2 通常，小尺寸试验试样的纵轴应平行于试板的最终轧制方向。

3.3.3.3 小尺寸试验的试样应按本附录 3.2.3 所述，在试板的板厚方向规定的位置取样。

3.4 相关性的验证

3.4.1 建立由脆性裂纹止裂试验得到的止裂性能与单个或多个小尺寸试验结果之间关系的回归方程。对于止裂性能，可以使用特定温度（例如 BCA1 的 $T_{Kca6000}$、BCA2 的 $T_{Kca8000}$ 或 CAT）或-10℃下的 K_{ca} 值。

3.4.2 应检查回归方程的有效性，以足够准确地预测止裂性能。应使用两倍标准偏差（2σ）来确保小尺寸试验计算值与脆性裂纹止裂试验结果之间的止裂性能相关性。当使用温度衡量止裂性能时，2σ应不大于 20℃。在其他情况下（例如-10℃下的 K_{ca} 值），2σ的上限应经 CCS 同意。标准偏差（σ）的计算步骤如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)^2}$$

n: 试板数量

y_i: 某块试板通过脆性裂纹止裂试验得到的止裂性能

x_i：某块试板通过小尺寸试验计算的止裂性能

3.5 验收衡准

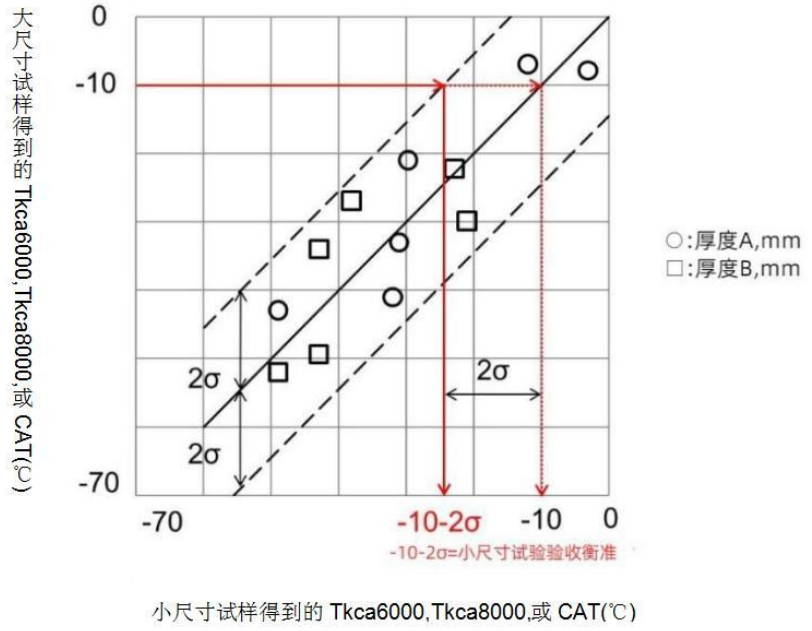
3.5.1 制造商应根据本附录 3.4 中与止裂性能相关的回归方程，提出小尺寸试验中止裂钢的验收衡准。考虑到止裂性能与回归方程计算值的离散性，确定的验收衡准应使回归方程计算的止裂性能足够安全。

3.5.2 除非 CCS 另有规定，小尺寸试验的验收衡准应按以下程序确定：

（1）通过温度进行关联

① 将本指南表 3.2.2 中的止裂钢规定值减去 2σ（℃），即-10-2σ（℃），其中 2σ见本附录 3.4.2，得到要求的温度（见图 A5-1）。图 A5-1 中 $T_{Kca6000}$ 和 $T_{Kca8000}$ 分别是为钢板 K_{ca} 值为 6000 N/mm$^{3/2}$ 和 8000 N/mm$^{3/2}$ 时的温度。

② 通过回归方程小尺寸试验结果预测的温度应不大于-10-2σ（℃）。



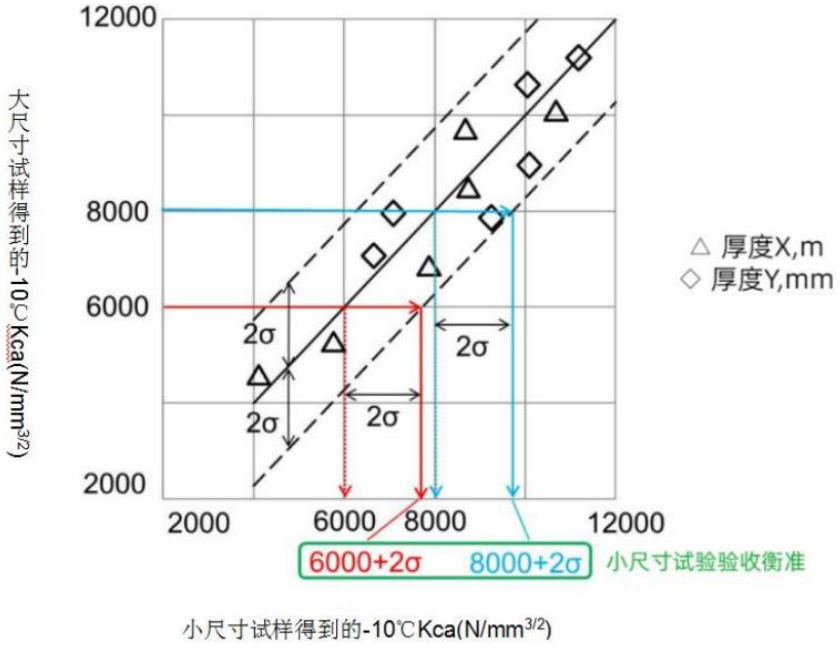
注：本示意图不代表实际数据

图 A5-1 通过温度确定小尺寸试验验收衡准的示例

（2）通过脆性裂纹止裂韧性（K_{ca}）进行关联：

① 将本指南表 3.2.2 中止裂钢规定值加上本附录 3.4.2 中给出的 2σ（N/mm$^{3/2}$），即 BCA1 的 6000+2σ（N/mm$^{3/2}$）和 BCA2 的 8000+2σ（N/mm$^{3/2}$），得到要求的 K_{ca}，见图 A5-2。

② 通过回归方程从小尺寸试验结果预测的 K_{ca} 值应不小于 BCA1 的 6000+2σ（N/mm$^{3/2}$）值，或 BCA2 的 8000+2σ值（N/mm $^{3/2}$）。



注：本示意图不代表实际数据

图 A5-2 通过脆性裂纹止裂韧性（K_{ca}）确定小尺寸试验验收衡准的示例

4 认可试验

4.1 一般要求

4.1.1 为了确认本附录 2.1 规定的提交技术文件的有效性，应进行认可试验。

4.1.2 试验前，试验大纲应经 CCS 批准。

4.1.3 考虑到本附录 2.1 规定的提交技术文件的内容，CCS 可要求在下列情况下进行附加试验：

（1）当 CCS 认为脆性裂纹止裂试验或小尺寸试验的数量太少，无法充分确认小尺寸试验验收衡准的有效性时；

（2）当 CCS 认为建立小尺寸试验验收衡准的试验数据过于离散时（见本附录 3.4.2）；

（3）当 CCS 认为建立小尺寸试验验收衡准的脆性裂纹止裂试验结果或小尺寸试验结果的有效性不足，或者在试验和/或试验结果中存在一些缺陷时（见本附录 3.3.2 和 3.3.3）；以及

（4）CCS 认为需要其他必要的试验时。

4.2 认可试验的范围

4.2.1 认可试验的范围应符合附录 1 的 2.1 和附录 2 的 3.1。

4.3 试验类型

4.3.1 脆性裂纹止裂试验

4.3.1.1 应根据附录 2 的 3.3 进行脆性裂纹止裂试验。

4.3.1.2 如果通过 K_{ca} 评估止裂性能，应根据附录 3 的第 3 条获得特定温度（$T_{Kca6000}$ 或 $T_{Kca8000}$）下的 K_{ca}。

4.3.1.3 如果通过 CAT 评估脆性裂纹止裂试验，应根据附录 4 获得确定的 CAT。

4.3.2 小尺寸试验

4.3.2.1 小尺寸试验按照本附录的 3.3。

5 结果

5.1 试验结果和试验程序应符合 CCS 批准的试验大纲。

5.2 对于脆性裂纹止裂试验结果，制造商应向 CCS 提交脆性裂纹止裂试验报告，K_{ca} 按照附录 3 得到，CAT 按照附录 4 得到。

5.3 对于小尺寸试验结果，制造商应按照本附录 2.1（2）的要求，向 CCS 提交小尺寸试验报告。

6 认可

6.1 在完成检验和试验后，提交的技术文件经 CCS 确认满意后，CCS 将认可小尺寸试验方法。

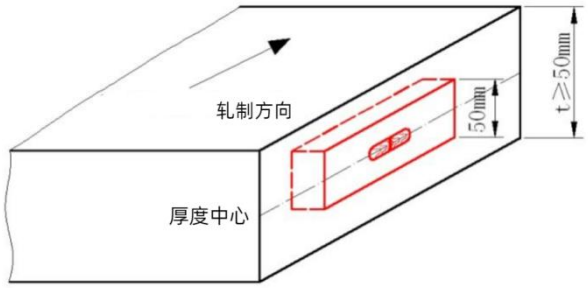
采用NRL落锤试验和夏比V形缺口冲击试验的小尺寸试验方法示例（仅供参考）表A5-1

试验类型	NRL 落锤试验和夏比 V 形缺口冲击试验
标准	ASTM E208:2020 和 ISO 148-1:2016
试样取样位置	落锤试验：表面 夏比 V 形缺口冲击试验：1/4 厚度
试样长度方向	平行于试板的最终轧制方向
回归方程	$T_{Kca} = \alpha \cdot (NDTT + 10) + \beta \cdot vTrs + 153\ (t-5)^{1/13} - 170.5$ T_{Kca}：K_{ca} =6000 N/mm$^{3/2}$ 或者 K_{ca} = 8000 N/mm$^{3/2}$ 对应的温度（℃） $NDTT$：无塑性转变温度（℃） $_vT_{rs}$：吸收功对应的温度（℃） t：厚度（㎜） α, β[1]：常数
备注	（1）α和β通过比较小尺寸试验结果与脆性裂纹止裂试验结果来确定。

采用压制缺口夏比冲击试验的小尺寸试验方法示例（仅供参考）　　表A5-2

试验类型	压制缺口冲击试验
试验标准	尺寸、形状、缺口引入方法：按照制造商的建议 其他：见 ISO 148-1:2016
试样取样位置	1/2 厚度
试样长度方向	平行于试板的最终轧制方向
回归方程	$T_{Kca}=\alpha\,{}_pT_{E\gamma J}+\beta$ T_{Kca}：K_{ca} =6000 N/mm$^{3/2}$ 或者 K_{ca} = 8000 N/mm$^{3/2}$ 对应的温度，（℃） ${}_pT_{E\gamma J}$：吸收功γ（J）对应的温度，（℃） α 和 β：常数 γ：脆性断面率δ（%）对应的吸收功,（J）
备 注	α, β, γ和δ通过比较小尺寸试验结果与脆性裂纹止裂试验结果来确定。

采用侧面落锤试验的小尺寸试验方法的示例（仅供参考）　　表A5-3

试验类型	侧面落锤试验
试验标准	试验程序按 ASTM E208:2020
试样取样位置	试样的尺寸和制备按照 ASTM E208 中的 P2 试样 试样的纵向中轴线位于侧面 1/2 厚度处，见下图 
试样长度方向	平行于试板的最终轧制方向
回归方程	$$T_{Kca}=\alpha+\beta\cdot T_{NDT}^{side}+\gamma\cdot t^{1.5}$$ T_{Kca}:K_{ca}=6000 N/mm$^{3/2}$ 或者 K_{ca} = 8000 N/mm$^{3/2}$ 对应的温度（℃） T_{NDT}^{side}：侧面落锤试验的无塑性转变温度（℃） t：厚度（mm） α,β,γ [1]:常数
备注	α,β和γ 通过比较小尺寸试验结果与脆性裂纹止裂试验结果来确定。

附录 6　特厚钢板的止裂措施

1 根据表 A6-1 中舱口围顶板和舱口围侧板的厚度和屈服强度，给出特厚钢板止裂措施的要求。表 A6-1 中的厚度和屈服强度不适用于上甲板板。

2 如果舱口围顶板和舱口围侧板的建造厚度两者都低于表中所列的值，不论上甲板板的厚度和屈服强度，不必采取应对措施。

特厚钢板的措施　　表A6-1

屈服强度（N/mm²）	**厚度（mm）**	**选项**	**措施**			
			1	**2**	**3+4**	**5**
355	$50 < t \leq 85$	-	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	$85 < t \leq 100$	-	X	N.A.	N.A.	N.A.
390	$50 < t \leq 85$	-	X	N.A.	N.A.	N.A.
	$85 < t \leq 100$	A	X	N.A.	X	X
		B	X*	X	N.A.	X
460（药芯焊丝电弧焊）	$50 < t \leq 100$	A	X	N.A.	X	X
		B	X*	X	N.A.	X
460（气电立焊）	$50 < t \leq 100$	-	X	N.A.	X	X

“X”为“应采用”。
“N.A.”为“不必采用”。
“A”和“B”可选其一。
*:见本指南 4.9.1（2）e。

措施：

1 （建造阶段）除外观检查外，所有目标分段接头进行无损检测，见本指南 4.5；

2 （交船后）除外观检查外，所有目标分段接头进行无损检测：见本指南 4.6；

3 （建造阶段）防止脆性裂纹沿焊缝直线扩展的止裂设计：见 4.9.1（2）①、②或③；

4 （建造阶段）防止脆性裂纹偏离焊缝扩展的止裂设计见 4.9.1（1）；

5 （建造阶段）防止从其他焊缝区域，如角焊缝和附录焊缝，裂纹扩展的止裂设计见 4.9.1（1）。