

指导性文件
GD24-2020



中国船级社

船用高强度钢厚板应用指南 2020

2021年1月1日生效

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	4
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（供设计用）	8
4.5	建造阶段的无损检测（附件 6 中的措施 1）	8
4.6	交船后定期的无损检测（附件 6 中的措施 2）	9
4.7	脆性止裂设计（附件 6 中的措施 3、4、5）	9
4.8	脆性裂纹止裂设计的功能要求	9
4.9	止裂设计概念	10
4.10	脆性裂纹止裂钢的选择	11
附件 1	EH47 钢的认可	12
附件 2	止裂钢的认可	13
附件 3	脆性裂纹止裂韧性值 K_{ca} 试验方法	15
附录 A	在特定温度下获取 K_{ca} 和评估的方法	28
附录 B	双重拉伸止裂试验	30
附件 4	等温型止裂温度（CAT）试验要求概要	32
附件 5	侧面落锤试验	41
附件 6	特厚钢板的止裂措施	42

第 1 章 通 则

1.1 适用范围

- 1.1.1 本指南给出最小规定屈服强度为 460N/mm^2 船体结构用高强度钢的要求。
- 1.1.2 本指南给出最小规定屈服强度为 355N/mm^2 、 390N/mm^2 和 460N/mm^2 的脆性裂纹止裂钢的要求。
- 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 50mm 但不大于 100mm 的钢板。
- (2) EH47 钢—系指最小规定屈服强度为 460N/mm^2 的 EH 级船体结构用高强度钢。
- (3) 脆性裂纹止裂钢（简称止裂钢 BCA）—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 460N/mm² 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 CCS 特别考虑。

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 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 特别考虑。

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 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》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 钢的化学成分和脱氧方法应满足表 2.2.1 的要求。

不要求止裂性能的EH47钢的化学成分和脱氧方法 表2.2.1

等级	EH47
脱氧方法	镇静和细晶处理
化学成分 % (熔炼分析) ^{⑥⑦}	
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)	0.015 ^{①②}
Nb	0.02 – 0.05 ^{②③}
V	0.05 – 0.10 ^{②③}
Ti max.	0.02 ^{②③}
Cu max.	0.35
Cr max.	0.25
Ni max.	1.0
Mo max.	0.08
Ceq max. ⁽⁴⁾	0.49
Pcm max. ⁽⁵⁾	0.22

① 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%。

② 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。

③ Nb、V和Ti的总量应不大于0.12%。

④ 碳当量应按下式计算：

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

⑤ 冷裂纹敏感指数应按下式计算：

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

- ⑥ 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。
 ⑦ 经 CCS 批准，允许化学成分与表中规定有所偏差。

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/mm ²)	抗拉强度 R_m (N/mm ²)	伸长率 A_5 不小于 (%)	夏比V型缺口冲击试验			
					试验温度(°C)	平均冲击功不小于(J)		
						50 < t ≤ 70	70 < t ≤ 85	85 < t ≤ 100
						纵向	纵向	纵向
TMCP [®]	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特别考虑。

2.3 EH47 钢的工厂认可

2.3.1 EH47 钢的工厂认可按照附件 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 船用产品检验指南《J-01 焊接材料》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			冲击试验	
	屈服强度不小于 (N/mm ²)	抗拉强度 (N/mm ²)	伸长率不小于 (%)	试验温度 (°C)	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/mm ²)	弯曲试验 比: $\frac{D}{t}$	夏比 V 型缺口冲击试验	
			试验温度(°C)	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 mm 的开口缺陷。

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°C 条件下冲击功应达到 64J。

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 570N/mm²。

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°C。建议平均值不低于 0.15mm。

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 50mm。当材料的 P_{cm} 小于或等于 0.19 时，经 CCS 认可可采用不短于 25mm 的短焊道。

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

2.6.4 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。

2.6.5 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 本章规定了脆性裂纹止裂钢的要求。

3.1.2 止裂钢指满足本章要求的最小规定屈服强度为 355N/mm²、390N/mm² 和 460N/mm² 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 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 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》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 止裂钢的化学成分和脱氧方法应满足表 3.2.1 的要求。

止裂钢的化学成分和脱氧方法 表 3.2.1

等级	EH36-BCA	EH40-BCA	EH47-BCA
脱氧方法	镇静和细化晶粒处理		
化学成分 % ^{①⑦⑧} (熔炼分析)			
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 ^{②③}		0.015 ^{②③}
Nb	0.02 – 0.05 ^{③④}		0.02 – 0.05 ^{③④}
V	0.05 – 0.10 ^{③④}		0.05 – 0.10 ^{③④}
Ti max.	0.02 ^④		0.02 ^④
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. ^⑤	0.47	0.49	0.55
Pcm max. ^⑥	-		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 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%。

③ 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。

④Nb、V 和 Ti 的总量应不大于 0.12%。

⑤碳当量应按下式计算：

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

⑥冷裂纹敏感指数应按下式计算：

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

⑦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。

⑧经 CCS 批准，允许化学成分与表中规定有所偏差。

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。另外，止裂钢厚度中心的拉伸性能也应满足要求。

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 ^{②⑥}	
		-10 °C 脆性裂纹止裂韧性值 K _{ca} (N/mm ^{3/2}) ^③ ④	止裂温度 CAT (°C) ^④
BCA1	50 < t ≤ 100	≥6,000 min.	≤-10
BCA2	80 < t ≤ 100 ^⑦	≥8,000 min.	⑤

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。

③K_{ca} 值通过附件 3 规定的脆性裂纹止裂试验获得。

④CAT 值通过本附件 4 规定的试验方法获得。

⑤相对应于 K_{ca}=8,000 N/mm^{3/2} 的止裂钢 CAT 值由 CCS 批准确定。

⑥用于产品出厂试验（批量试验）的小尺寸试验方法应经 CCS 认可。

⑦低于 80 mm 厚度的钢板由 CCS 特别考虑。

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（认可时按照附件 3 的 K_{ca} 试验或按照附件 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 小尺寸试验方法由钢厂提出，同时提供小尺寸试验与附件 3 或附件 4 大尺寸试验的相关性试验证据。

3.2.5 小尺寸试验方法可以按照附件 5 侧面落锤试验或者 CCS 认可的小尺寸试验方法。即使选择附件 5 的侧面落锤试验，其与大尺寸试验的相关性证据仍需由钢厂提供。

3.3 止裂钢的工厂认可

3.3.1 止裂钢的工厂认可按照附件 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 50KJ/cm。

3.4.2 止裂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相关要求，除了硬度满足 3.4.3 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。

3.5 止裂钢的焊接

3.5.1 脆性裂纹止裂钢的焊接（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件 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/mm²、390 N/mm² 和 460 N/mm² 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由 CCS 特别考虑。

4.4 船体结构（供设计用）

4.4.1 最小规定屈服强度 355 N/mm² 和 390 N/mm² 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 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构件时，应予以特别考虑。连接细节应满足 CCS 相关要求。

4.5 建造阶段的无损检测（附件 6 中的措施 1）

4.5.1 如果附件 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)(e) 所述衍射时差(TOFD) 或者相控阵超声检测(PAUT)技术应满足 CCS 相关指南的要求。

4.5.2 应按 CCS《船舶焊接检验指南》第 7 章（2021 年 7 月 1 日前签订建造合同的船舶）或《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1（2021 年 7 月 1 日及以后签订建造合同的船舶）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外观检查和超声波检测。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。

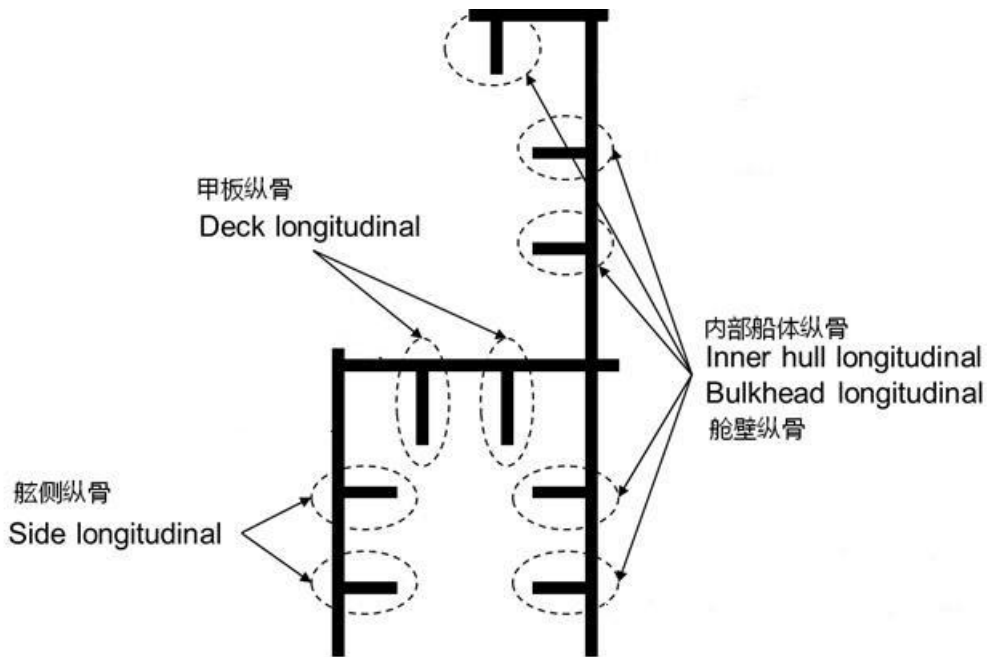


图 4.5.2 上部纵向构件

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。

4.6 交船后定期的无损检测（附件 6 中的措施 2）

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《船舶焊接检验指南》（2021 年 7 月 1 日前签订建造合同的船舶）或《材料与焊接规范》第 3 篇附录 1^①（2021 年 7 月 1 日及以后签订建造合同的船舶）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进行超声波检测。

4.6.4 超声波检测验收标准由 CCS 特别考虑。

4.7 脆性止裂设计（附件 6 中的措施 3、4、5）

4.7.1 当采用附件 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。其他防止裂纹启裂和扩展的方法应经 CCS 同意。

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些接头，因此，应根据 4.8.1(b)(ii)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。

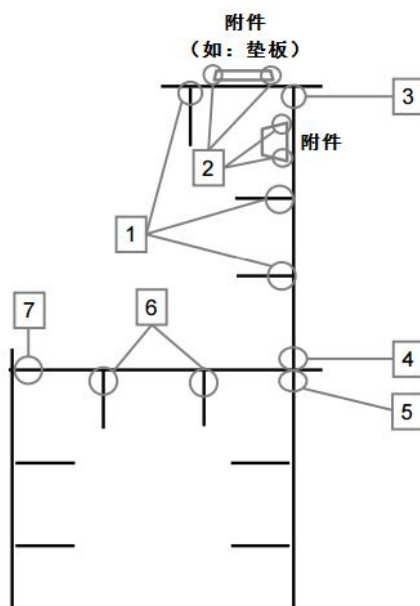
(a) 最应关注的脆性裂纹启裂和扩展位置是舱口围侧板或上甲板板的分段对接接头。其他位置也可能沿对接焊缝发生裂纹启裂和扩展。

^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。

(b) 应考虑下列两种情况:

(i) 脆性裂纹直接沿着对接接头扩展, 和;

(ii) 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。



“其他焊缝区域”包括如下:

- ① 舱口围侧板 (包括顶板) 与纵骨连接的角焊缝;
- ② 舱口围侧板 (包括顶板和纵骨) 与附件连接的角焊缝 (如舱口围顶板与舱口盖垫板的角焊缝);
- ③ 舱口围顶板与舱口围侧板连接的角焊缝;
- ④ 舱口围侧板与上甲板板连接的角焊缝;
- ⑤ 上甲板板与内壳/舱壁板连接的角焊缝;
- ⑥ 上甲板板与纵骨连接的角焊缝, 以及
- ⑦ 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。其他类型的措施可以由 CCS 考虑接受。

(1) 针对 4.8.1 (b) (ii) 的脆性裂纹止裂设计:

(a) 沿货舱区的上甲板板应采用满足本指南第 3 章规定性能的脆性裂纹止裂钢, 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 (b) (i) 的脆性裂纹止裂设计:

(b) 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 300mm。舱口围侧板应采用脆性裂纹止裂钢。

(c) 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。

(d) 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。

(e)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(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(b)，(c)和(d)的替代措施。此时，TOFD 和 PAUT 验收标准应经 CCS 认可。

4.10 脆性裂纹止裂钢的选择

4.10.1 用于集装箱船上甲板区域的脆性裂纹止裂钢应满足第 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 mm 的构件，选择合适的脆性裂纹止裂钢。

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。

附件 1 EH47 钢的认可

1 范围

1.1 本附件规定了 EH47 钢工厂认可的要求。

1.2 除本附件另有规定外，EH47 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 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》中 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，EH47 钢的认可不覆盖低韧性等级钢的认可。

2.2 试验项目

2.2.1 母材脆性断裂启裂试验：应进行裂纹顶端张开位移(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 0.20mm。

2.2.2 焊接试验

(1) 按公认的国家标准，如 CB/T 4364-2013 或 JIS Z 3158，进行斜 Y 型焊接裂纹试验（氢致裂纹试验）。

(2) 应进行裂纹顶端张开位移(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 0.15mm。

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 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》中 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。

附件 2 止裂钢的认可

1 范围

1.1 本附件规定了止裂钢工厂认可的要求。

1.2 除本附件另有规定外，止裂钢的认可按 CCS 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》（对于 EH40 止裂钢或者 EH36 止裂钢）和/或本指南附件 1（对于 EH47 止裂钢）的规定，满足不带“BCA1”或“BCA2”后缀钢材要求。

2 认可申请

2.1 提交资料

2.1.1 制造厂应在 CCS 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》中要求的资料外，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件 3.2、3.3 和 3.4。EH47 止裂钢的认可不能覆盖 EH40 止裂钢。如果待认可钢材确保止裂性能的制造工艺和机理是相同的，EH40 止裂钢可以覆盖 EH36 止裂钢。

3.1.2 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 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》（对于 EH36 止裂钢或者 EH40 止裂钢）和/或本指南附件 1（对于 EH47 止裂钢）规定的试验外，进行本附件中 3.3 的脆性裂纹止裂试验和附件 5 的侧面落锤试验。

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），可以仅按照附件 2 和 CCS 船用产品检验指南《W-01 船用轧制钢材》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 初试试样和复试试样应取自同一试板。

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，试验方法按照附件 3 进行。如果使用止裂温度 CAT 评估脆性裂纹止裂性能，试验方法按照附件 4 进行。

3.4 侧面落锤试验

3.4.1 侧面落锤试验试样取自和 3.3 脆性裂纹止裂试验试样同一轧制件。

3.4.2 侧面落锤试验按照附件 5 测试材料侧面无塑性转变温度。

3.5 其他试验

3.5.1 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。制造厂应提交按照附件 3 进行的 K_{ca} 或按照附件 4 进行的 CAT 试验报告。同时还应提交侧面落锤试验报告。

5 标记

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

制造厂应在工厂证书有效期内提交经认可的脆性裂纹止裂钢的生产数据。

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。

附件 3 脆性裂纹止裂韧性值 K_{ca} 试验方法

在试样的宽度方向上设置温度梯度，并均匀将应力施加到试样上，撞击试样侧面的缺口开始启裂，裂纹最终终止（温度梯度型止裂试验）。使用应力强度因子，通过施加应力和裂纹扩展长度计算脆性裂纹止裂韧性值 K_{ca} 。该值是在脆性裂纹止裂点温度（止裂温度）下的脆性裂纹止裂韧性。使用附录 A 规定的试验方法，经过必要的评估得到特定温度下 K_{ca} 。

作为启动脆性裂纹的方法，也可以使用双重加载装置（参见附录 B“标准双重拉伸试验”）。

1 范围

1.1 本附件规定了使用断裂力学参数评估止裂钢脆性止裂韧性（如 K_{ca} ）的试验方法。本附件适用于厚度超过 50mm 但小于等于 100mm 的船体结构用钢。

2 符号及其含义

本附件使用的符号及其含义见表 A3-1。

符号及其含义 表 A3-1

符号	单位	含义
a	mm	裂纹长度或止裂裂纹长度
E	N/mm ²	纵向弹性模量
E_i	J	冲击能量
E_s	J	试样的弹性势能
E_t	J	连接组件的弹性势能
F	MN	所施应力
K	N/mm ^{3/2}	应力强度因子
K_{ca}	N/mm ^{3/2}	止裂韧性值
L	mm	试样长度
L_p	mm	两销孔间距
L_{pc}	mm	销型夹头长度
L_{tb}	mm	连接板长度
T	°C	温度或止裂温度
t	mm	试样厚度
t_{tb}	mm	连接板厚度
t_{pc}	mm	销型夹头厚度
W	mm	试样宽度
W_{tb}	mm	连接板宽度
W_{pc}	mm	销型夹头宽度
x_a	mm	主裂纹尖端在宽度方向上的坐标
x_{br}	mm	宽度方向上最长分支裂纹尖端的坐标
y_a	mm	主裂纹尖端在应力加载方向上的坐标
y_{br}	mm	应力加载方向上最长分支裂纹尖端的坐标
	N/mm ²	施加应力
σ_0	N/mm ²	室温下屈服强度

3 试验装置

以下规定了进行脆性裂纹止裂试验所需的试验装置。试验机用于对整个试样施加拉伸力，冲击装置用于在试样上产生脆性裂纹。

3.1 试验机

3.1.1 加载方法

3.1.1.1 整个试样的拉伸载荷应采用液压加载。应使用销式试验机对整个试样加载。通过对齐两侧加载销的中心和整个试样的中心轴，使板宽方向的应力分布均匀。

3.1.2 加载方向

3.1.2.1 加载方向应为垂直或水平。如果是水平方向，试样表面应垂直于地面。

3.1.3 加载销的距离

3.1.3.1 加载销之间的距离应约为 $3.4w$ 或更大，其中 w 是试样的宽度。由于加载销之间的距离有时会影响裂纹扩展导致冲击载荷下降的幅度因此试验结果的有效性由 7.1 中描述的判定方法确定。

3.2 冲击装置

3.2.1 对整个试样施加冲击载荷的方法应为落锤式或空气枪式。楔子应足够硬，以防止由冲击引起显著塑性变形。楔子厚度应等于或大于试样的厚度，楔子角度应大于试样缺口的角度，并具有能够冲开试样缺口的形状。

4 试样

4.1 试样形状

4.1.1 标准试样的形状见图 A3-1。

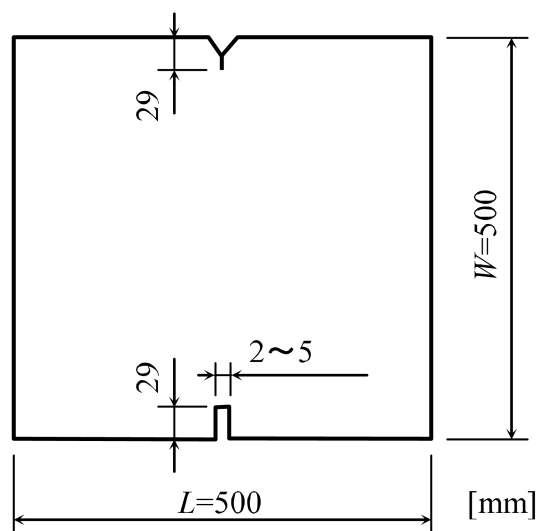


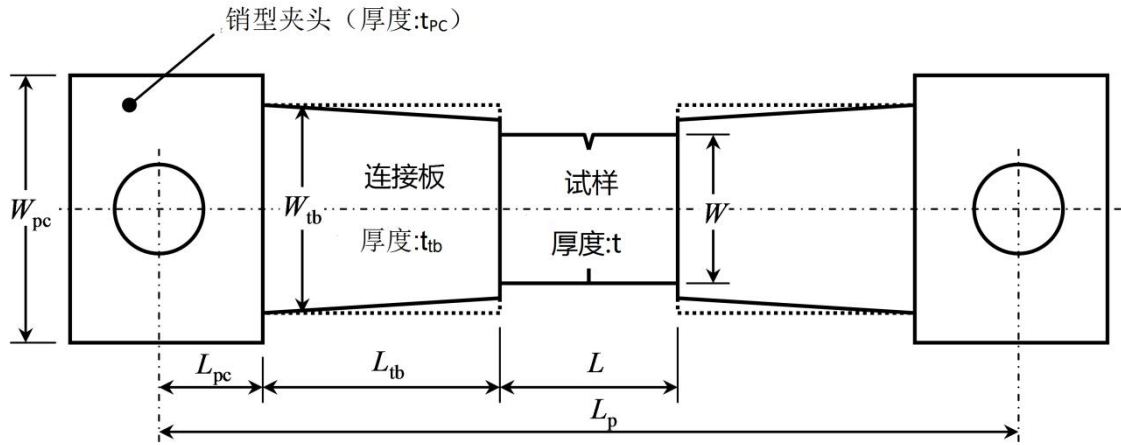
图 A3-1 标准试样形状

表 A3-2 给出了试样厚度、宽度和宽度与厚度之比的范围。试样长度原则上大于等于其宽度。

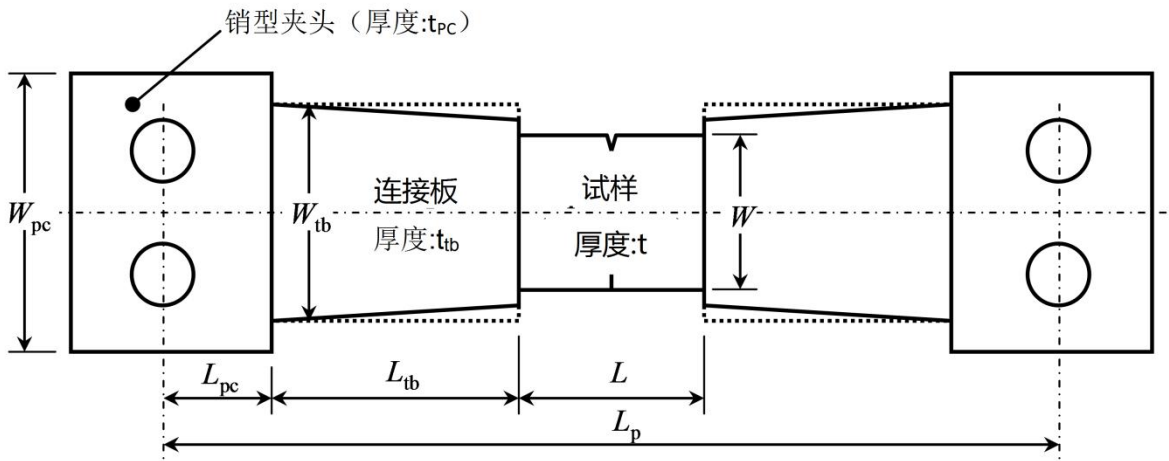
试样尺寸		表 A3-2
试样厚度, t		$50 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$
试样宽度, W		$350 \text{ mm} \leq W \leq 1000 \text{ mm}$ (标准宽度: $W = 500 \text{ mm}$)
试样宽度/试样厚度, W/t		$W/t \geq 5$

4.2 连接板和销型夹头的形状

4.2.1 连接板和销型夹头尺寸的定义见图 A3-2。典型的范例如图 A3-3 所示。

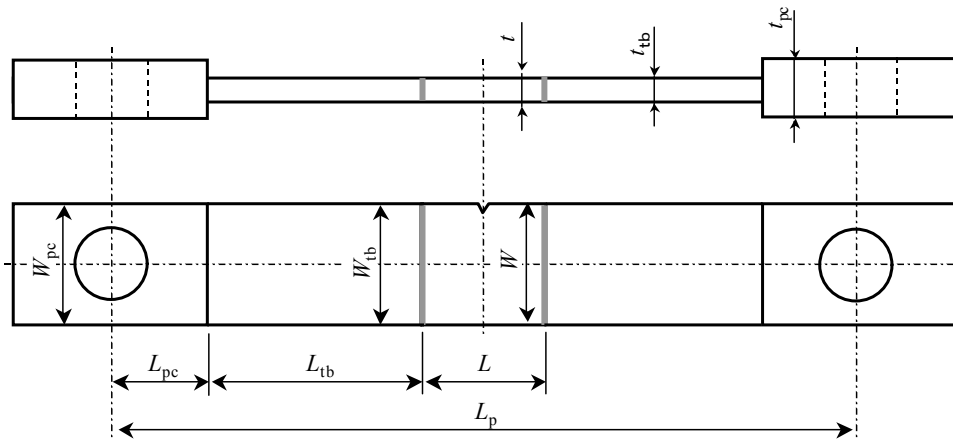


(a) 单孔型

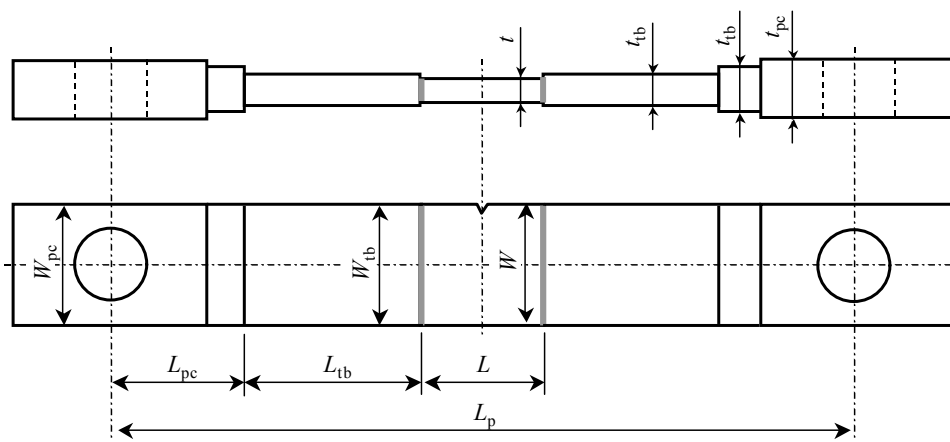


(b) 双孔型

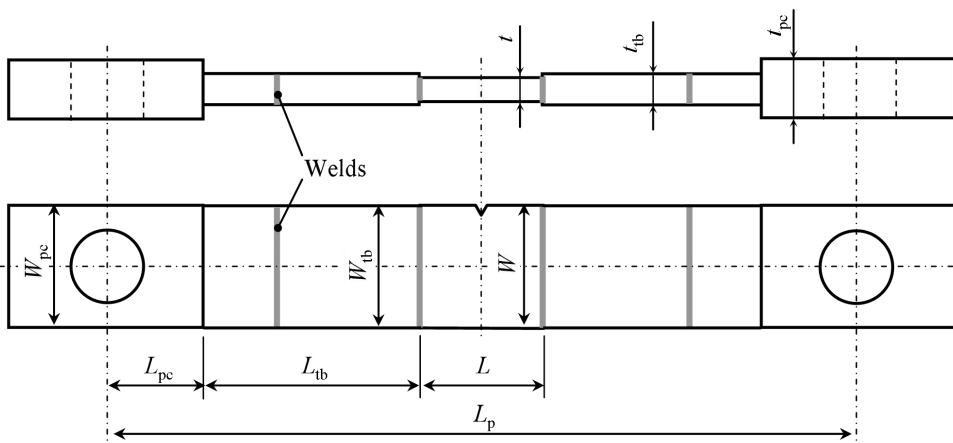
图 A3-2 连接板和销型夹头尺寸定义



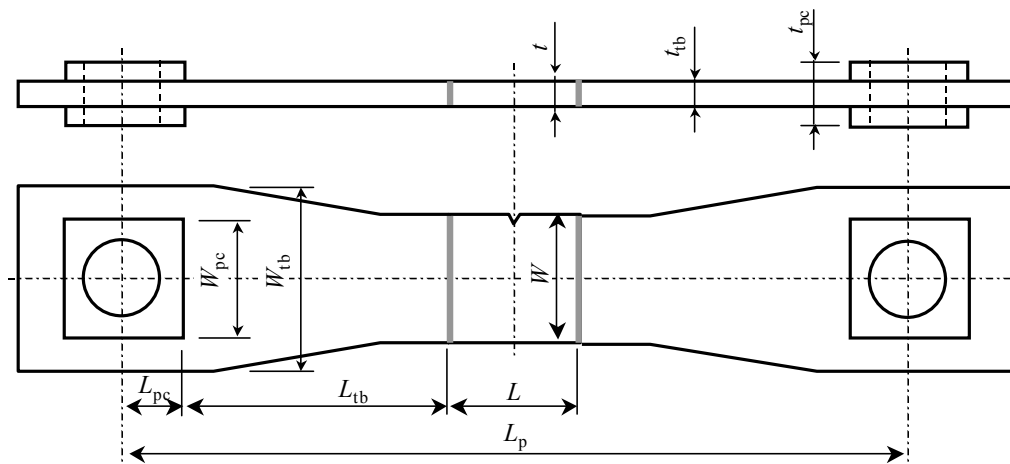
(a) 范例 1



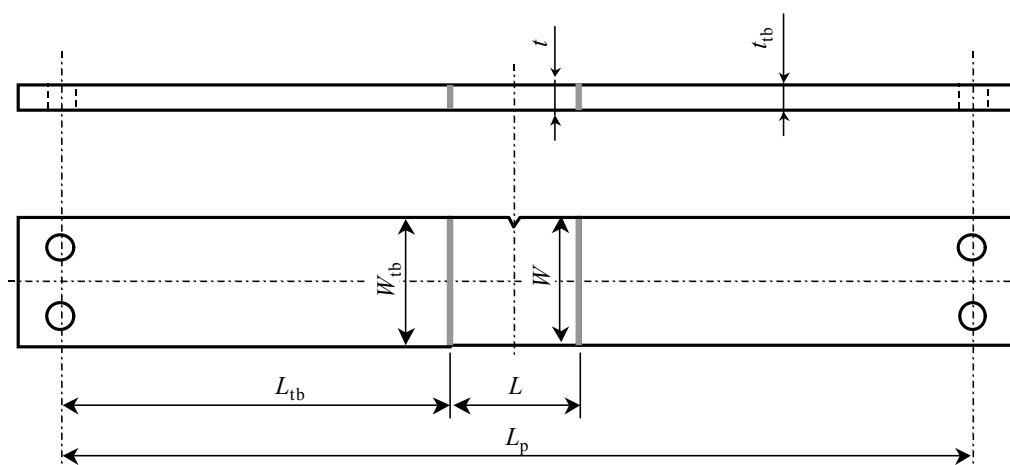
(b) 范例 2



(c) 范例 3



(d)范例 4



(e)范例 5

图 A3-3 连接板和销型夹头形状范例

4.2.2 连接板

4.2.2.1 连接板尺寸见表 A3-3。当连接在试样两端的连接板的长度不同时，应使用较短的长度作为连接板长度 L_{tb} 。

连接板尺寸

表 A3-3

连接板厚度, t_{tb}	$0.8t \leq t_{tb} \leq 1.5t$
连接板宽度, W_{tb}	$W \leq W_{tb} \leq 2.0W$
试样和连接板总长度, $L + 2L_{tb}$ (试样和单侧连接板长度, $L + L_{tb}$)	$L + 2L_{tb} \geq 3.0W$ $(L + L_{tb} \geq 2.0W)$
连接板长度 (L_{tb})/试板宽度(W)	$L_{tb}/W \geq 1.0$

4.2.3 销型夹头

4.2.3.1 销型夹头宽度 W_{pc} 原则上应大于等于连接板宽度 W_{tb} 。销型夹头应设计具有足够的承载强度。当连接整个试样两端的销型夹头不对称时，销型夹头长度 L_{pc} 取较短的一个。

4.2.3.2 销孔之间的距离, L_p , 通过公式(1)得到。如果是图 A3-3(e)所示范例 5, 计算 L_p 时 $L_{pc}=0$ 。

$$L_p = L + 2L_{tb} + 2L_{pc} \quad (1)$$

4.3 试样和连接板的焊接

4.3.1 试样、连接板和销型夹头之间应通过焊接连接。焊缝应具有足够的承载强度。

4.3.2 如图 A3-4(a)所示，试样与连接板之间的平面度（角度变形，线性偏差）应在每米 4mm 以内。在预加载的情况下，预加载后的平面度值满足上述条件是可以接受的。如图 A3-4(b)所示，内加载轴的精度应为销孔之间距离的 0.5%或更小，外加载轴的精度应为销孔之间距离的 0.4%或更小。

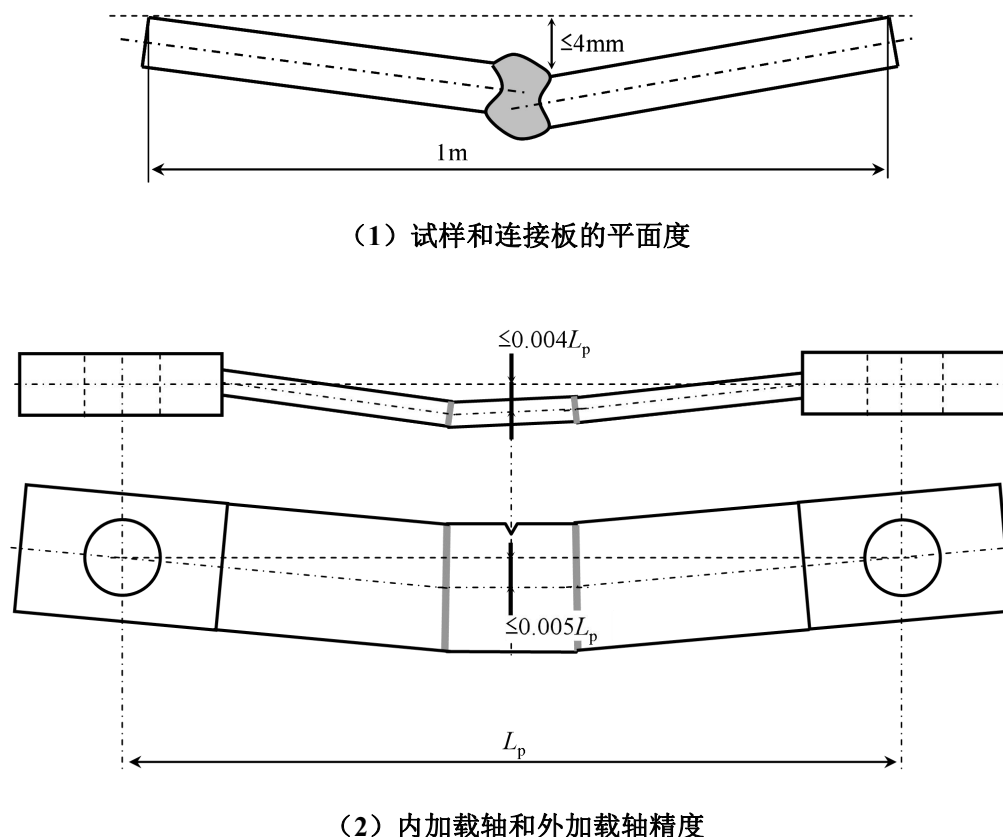


图 A3-4 试样与销型夹头的尺寸精度

5 试验方法

以下是进行止裂韧性试验的方法。

5.1 温度控制方法

5.1.1 通过将至少 9 个热电偶焊接到试样进行温度测量和控制，以在试样宽度上建立预定的温度梯度。

5.1.2 温度梯度应按照 (1) - (3) 建立。

(1) 在 0.3W-0.7W 的试样宽度范围内应建立 0.25~0.35°C/mm 的温度梯度，当测量试样厚度中心位置的温度时，应在±2°C 范围内保持 10 分钟或更长时间；而当测量试样前后表面位置的温度时，考虑传递到中心所需的时间，应在±2°C 范围内保持 $(10 \pm 0.1t(\text{mm}))$ 分钟以上。如果在 0.3W-0.7W 范围内温度梯度小于 0.25°C/mm，则止裂可能变得困难；如果梯度大于 0.35°C/mm，则获得的断裂韧性可能过于保守。

(2) 试件宽度中心位置（如 0.5W）在试样长度方向±100 mm 范围内，中心位置在长度方向上与中心位置的温度偏差应控制在±5°C 以内。然而，当中心位置在长度方向上不进行温度测量时，最靠近中心位置的温度应被当作长度方向上中心位置的温度。

(3) 在宽度方向相同的位置上，前后表面温度的偏差应控制在±5°C 以内。

5.2 启裂方法

5.2.1 施加冲击能量到试样上引发裂纹。然而，如果能量过大，它可能会影响试验结果。在这种情况下，结果应按照 7.2 规定的标准判定为无效数据。使用公式(2)和图 A3-5 作为获取有效数据的导则是可取的。

$$\frac{E_i}{t} \leq \min(1.2\sigma - 40, 200) \dots\dots\dots(2)$$

其中变量具有下列单位：E_i [J]，t [mm]，σ[N / mm²]，min 表示两个值的最小值。

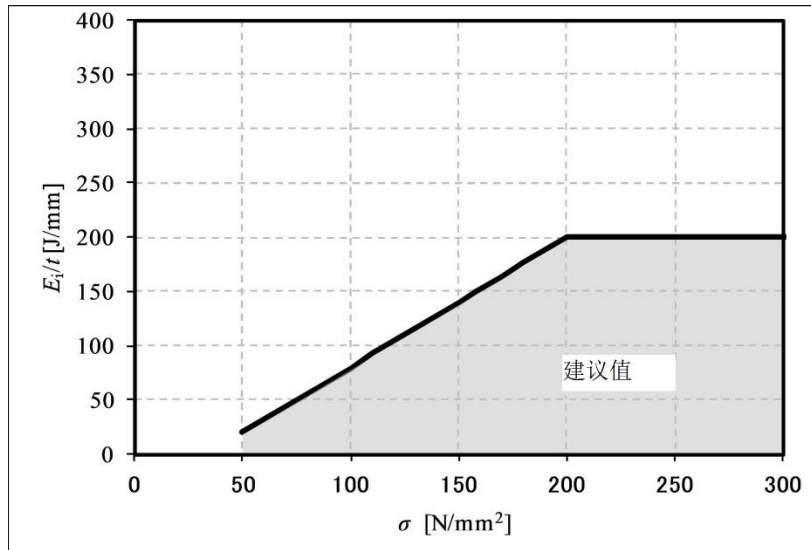


图 A3-5 冲击能量的推荐范围

6 试验步骤

脆性裂纹止裂韧性试验的步骤规定如下。

6.1 试验准备

- (1) 在试验机上安装一个完整的试样。
- (2) 在试样上安装冷却装置。试样上也可以安装加热装置。
- (3) 在试验机上安装 3.2 规定的冲击装置。必要时放置适当的反作用力接收器。

注：上述 (1) 至 (3) 步骤不限制实施顺序，它们可以在试验前一天完成。

- (4) 检查热电偶的所有测量值确认显示室温后，开始冷却。温度分布和保温时间应满足 5.1 的要求。
- (5) 设置一个 3.2 所规定的冲击装置，以便它能向试样提供预定的能量。

(6) 对试样加载应力，直到其达到预定值为止。在温度控制后加载应力以防止在应力增加期间裂纹自动启裂。也可以在加载应力之后再进行温度控制。加载速率和加载应力分别满足下面(a)和(b)描述的条件。

(a) 加载速率

加载速率不做规定，但应考虑到过慢的加载速率会延长温度控制时间，从而使温度分布偏离期望条件，并且过快的加载速率可能导致过度加载。

(b) 加载应力/屈服应力比

加载应力应在公式 (3) 范围内。

$$\sigma \leq \frac{2}{3} \sigma_{Y0} \dots \dots \dots (3)$$

作为指导，值大于等于 σ_{Y0} 的 1/6 是理想状况。如果施加的应力大于公式 (3) 所规定的应力，则试验可能给出非保守结果。

(7) 为了引发裂纹，可以在冲击之前迅速冷却缺口，条件是冷却不会干扰 0.3W-0.7W 范围内的温度。在这种情况下，试验温度应该是在缺口进一步冷却之前的温度记录中的测量温度。

(8) 记录载荷记录仪测量的载荷值。

6.2 加载步骤

(1) 在保持预定载荷 30 秒或更长时间后，使用冲击装置对楔形缺口施加冲击力。如果未冲击裂纹已经自动开始并且无法获得裂纹启裂时的精确载荷值，则试验无效。

(2) 冲击后，记录载荷记录仪测量的载荷值。

(3) 当冲击后的力小于试验力时，考虑裂纹已经发生启裂。

注：冲击次数的增加可能导致试样缺口形状的变化。由于冲击次数对脆性止裂韧性值没有影响，因此对冲击次数没有限制规定。但是，由于温度梯度经常受到冲击的影响，当对缺口反复冲击时，应在温度控制满足要求后再进行试验。

(4) 当观察到裂纹启裂、扩展和止住时，撤除应力。

6.3 试验后步骤

(1) 移除冲击装置。

(2) 移除冷却装置，热电偶和应变仪。

(3) 将试样的温度恢复到室温。为此，可以使用燃气燃烧器或类似物对试样进行加热。但如果需要防止断裂面的加热，应避免采用这种方法。

(4) 对未开裂部分进行气割后，如果有必要，使用试验机进行韧性断裂。相应的，也可以先使用试验机形成足够长度的韧性断裂后，再气体切割未开裂部分。。

6.4 断口形貌观察

(1) 拍摄断裂面和扩展路径。

(2) 测量裂纹尖端的最长长度，并将结果记录为止裂裂纹长度。止裂裂纹长度应包括缺口长度。在裂纹偏离垂直于加载方向的情况下，投影到垂直于加载方向的平面上的长度定义为止裂裂纹长度。但是，在下列情况下，根据每种描述情况判定结果。

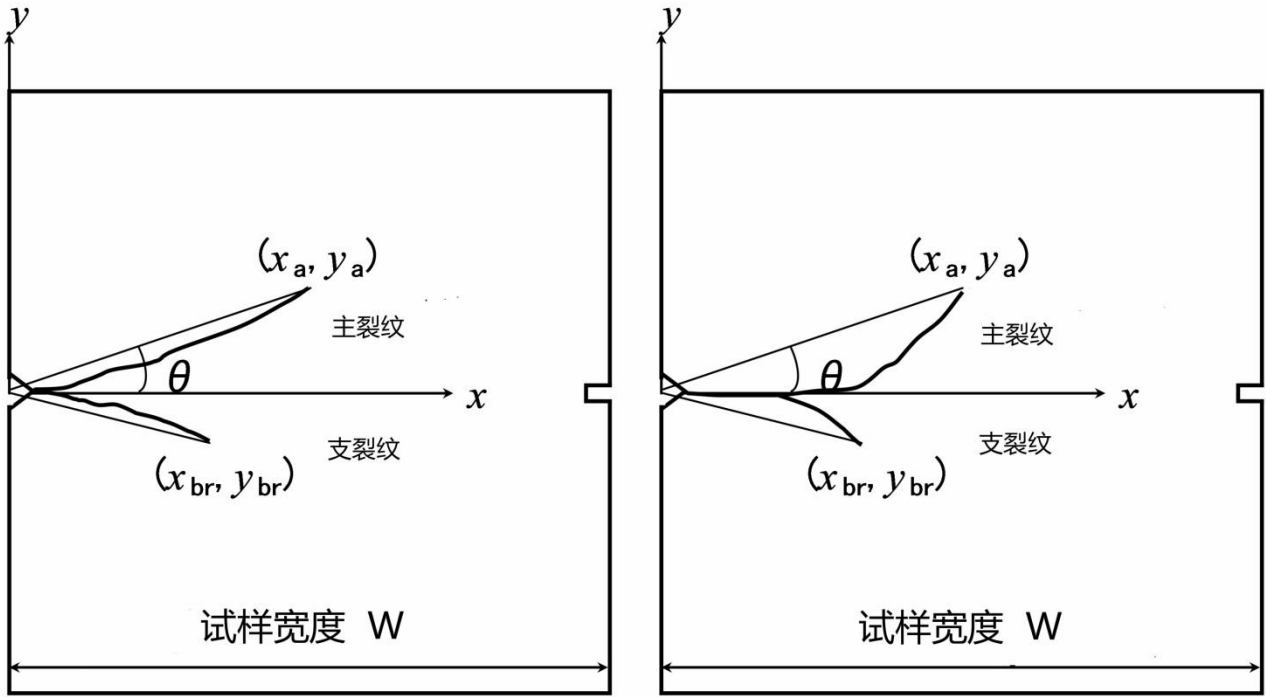
(a) 再次开裂

如果从止裂处再次开裂，最初的止裂点定义为止裂位置。再次开裂是指初次裂纹和二次裂纹从拉伸区完全分离的情况，并且可以清楚地观察到从拉伸区开始的脆性裂纹启裂。裂纹连续扩展的情况下，最长脆性裂纹的位置定义为止裂位置。

(b) 裂纹分叉

在裂纹偏离垂直于加载方向的情况下，投影到垂直于加载方向的平面上的长度定义为止裂裂纹长度。类似地，在裂纹分叉的情况下，投影到垂直于加载方向的平面上的最长分叉裂纹的长度定义为分叉裂纹长度。更具体地，如图 A3-6 所示，止裂裂纹尖端位置的坐标 (xa, ya) 和分叉裂纹尖端位置的坐标 (xbr, ybr)，从 x 轴获得角度 θ 并定义 xa 作为止裂裂纹的长度 a。这里，x 是试样宽度方向上的坐标，并且冲击侧的侧面设定 x = 0；y 是试样长度方向上的坐标，缺口位置设定 y = 0。

(3) 通过热电偶测量结果获得温度分布曲线（显示温度与试验试样顶端距离之间关系的图），并获得对应于止裂裂纹长度的止裂温度 T。



(a)从缺口开始裂纹的情况 (b)裂纹扩展时裂纹分叉情况

图 A3-6 主裂纹和分叉裂纹长度的测量方法

7 止裂韧性的测量

7.1 止裂的判定

当一个止裂裂纹满足如图 A3-7 所示，且满足(a)到(d)所有条件时，由 6.4 确定的止裂裂纹长度是有效的。如果有一条不满足，则 7.3 计算的止裂韧性无效。

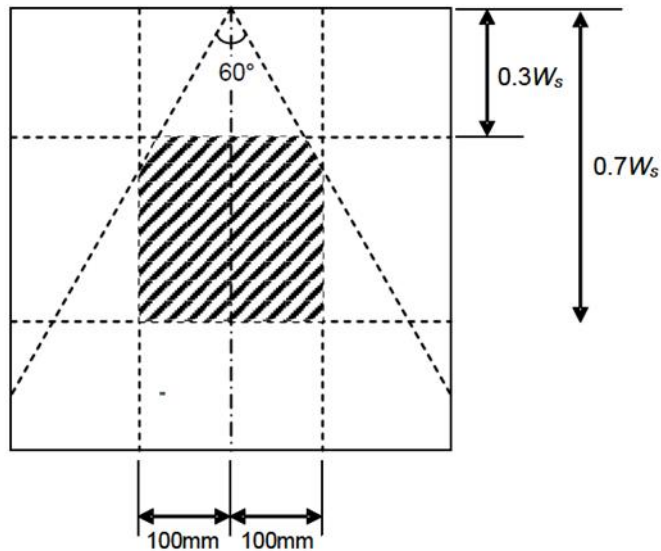


图 A3-7 止裂位置的必要条件

(a)裂纹扩展路径的条件

从裂纹启裂到止裂的所有裂纹路径都应在图 A3-8 所示的范围内。然而，在主裂纹尖端位于该范围内但主裂纹的一部分超出该范围的情况下，如果主裂纹在 y 方向上最偏离位置的温度低于 y = 0 位置的温度，

并且主裂纹的 K 值在具有相同 a 的直裂纹 K 值的±5%范围内，则止裂韧性评估为有效。主裂纹和直裂纹的 Ks 的计算方法由公式（4）获得。

$$K = K_I \cos^3\left(\frac{\phi}{2}\right) + 3K_{II} \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \dots\dots\dots(4)$$

其中，K=应力强度因子

K_I=模式 I 的应力强度因子，适用于于裂纹张开模式

K_{II}=模式 II 的应力强度因子，适用于于裂纹剪切模式

φ=裂纹尖端的角度

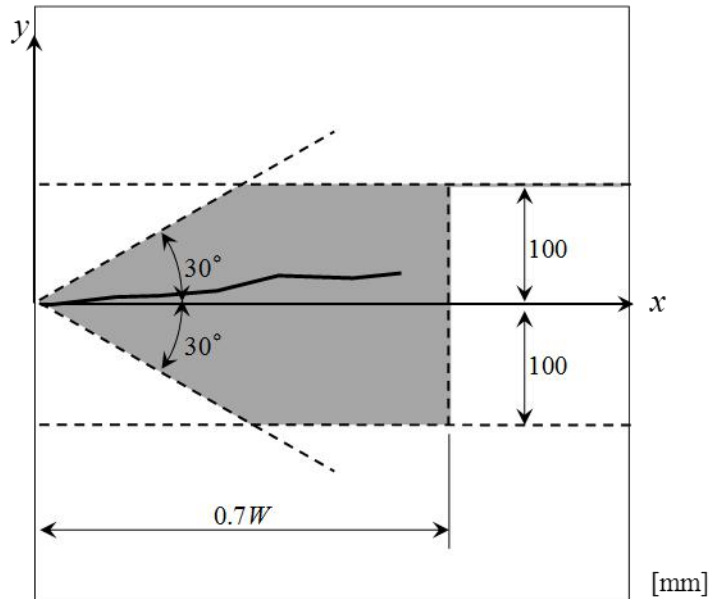


图 A3-8 主裂纹扩展路径的允许范围

(b) 止裂裂纹长度的条件

$$0.3 \leq \left(\frac{a}{W}\right) \leq 0.7 \quad (5)$$

$$\left(\frac{a}{t}\right) \geq 1.5 \dots\dots\dots(6)$$

$$\left(\frac{a}{L_p}\right) \leq 0.15 \quad (7)$$

公式（7）确保了因裂纹扩展和应力波在试样两端反射而导致试样中心载荷下降的影响至最小。然而，如果应变和裂纹长度经动态测量，并且止裂时的应变值大于等于裂纹启裂前的瞬时静态应变的 90%，则不必满足公式（7）。

(c) 裂纹直线度的条件

$$|y_a| \leq 50 \text{ mm} \quad (8)$$

在 $50 \text{ mm} < |y_a| \leq 100 \text{ mm}$ 且 $|\theta| \leq 30^\circ$ 的情况下，仅当 $x = 0.5W$, $y = \pm 100 \text{ mm}$ 的温度落在 $x = 0.5W$, $y =$

0 的温度±2.5℃范围内时，结果才有效。

(d) 裂纹分支的条件

$$\left(\frac{x_{br}}{x_a}\right) \leq 0.6 \quad (9)$$

7.2 冲击能量的评估

冲击能量应满足公式 (10)。如果不满足该公式，则根据 7.3 公式计算的止裂韧性值无效。

冲击能量的条件：

$$\frac{E_i}{E_s + E_t} \leq \frac{5a - 1050 + 1.4W}{0.7W - 150} \quad \text{当} \quad 0.3 \leq \left(\frac{a}{W}\right) \leq 0.7 \quad (10)$$

其中变量具有以下单位：a [mm]和 W [mm]。E_i 是根据公式 (11) 计算的冲击能量。E_s 和 E_t 分别由公式 (12) 和 (13) 计算。

注 1：如果不满足公式 (10)，则冲击能量对应力强度因子的影响太大而不能获得准确的止裂韧性。

注 2：在如图 A3-3(b)所示连接板是多级的情况下，使用公式 (12) 计算每个连接板的应变能并求和。

注 3：在如图 A3-3(d)所示连接板宽度逐渐变细的情况下，根据弹性力学计算应变能。

$$E_i = m g h \dots\dots\dots (11)$$

$$E_s = \frac{10^9 F^2}{2E} \frac{L}{Wt} \dots\dots\dots (12)$$

$$E_t = \frac{10^9 F^2}{E} \left(\frac{L_{tb}}{W_{tb} t_{tb}} + \frac{L_{pc}}{W_{pc} t_{pc}} \right) \dots\dots\dots (13)$$

其中变量具有以下单位：E_s [J]，E_t [J]，F [MN]，E [N / mm²]，L [mm]，W [mm]和 t [mm]。

7.3 止裂韧性的计算

应使用由 7.1 判定的止裂裂纹长度 a 和施加应力σ通过公式 (14) 计算温度 T 下的止裂韧性 K_{ca}。其中σ通过公式 (15) 计算。

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\frac{2W}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (14)$$

$$\sigma = \frac{10^6 F}{Wt} \dots\dots\dots (15)$$

其中变量具有以下单位：F [MN]，W [mm]和 t [mm]。

如果不满足 7.1 和 7.2 中规定的条件，则通过公式 (14) 计算的 K_{ca} 无效。

8 报告

下列项目应予报告，可以使用表 A3-4。

- (1) 试验材料：钢材类型和室温下屈服强度
- (2) 试验机：试验机能力
- (3) 试样尺寸：厚度，宽度，长度，角度变形和线性偏差
- (4) 整个试样尺寸：连接板厚度，连接板宽度，包括连接板的整个试样长度，加载销之间的距离
- (5) 试验条件：施加载荷，施加应力，温度梯度，冲击能量和冲击能量与整个试样应变能（试样应

变能和连接板应变能之和) 的比值

(6) 试验结果

(a) 止裂判定: 裂纹长度, 裂纹分支存在或不存在, 主裂纹角度, 是否存在裂纹重新扩展, 和止裂温度

(b) 止裂韧性值

(7) 冲击时的温度分布: 热电偶位置, 温度值和温度分布

(8) 试样照片: 裂纹扩展路径(一侧)和脆性裂纹断裂面(两侧)

(9) 动态测量结果: 裂纹扩展速度变化历程和销块的应变变化

注: 必要时应报告第(9)项。

脆性止裂试验结果报告表

表 A3-4

项目	细节	符号	条件/结果	单位	有效/无效	
(1)试验材料	钢材类型	—		—	—	
	室温下屈服强度	σ_{Y0}		N/mm ²	—	
(2)试验机	试验机能力	—		MN	—	
(3)试样尺寸	厚度	t		mm		
	宽度	W		mm		
	长度	L		mm		
	角度变形和线性偏差	—		mm/m		
(4)整个试样的尺寸	连接板厚度	t_{tb}		mm		
	连接板宽度	W_{tb}		mm		
	包括连接板的试样长度	$L + L_{tb}$		mm		
	加载销之间的距离	L_p		mm		
(5)试验条件	施加载荷	F		MN		
	施加应力	σ		N/mm ²		
	温度梯度	—		°C/mm		
	冲击能量	E_i		J		
	冲击能量与整个试样应变能(试样应变能和连接板应变能之和)的比值	$E_i/(E_s+E_i)$		—		
(6)试验结果	止裂的判定 扩展/止裂	裂纹长度	a		mm	
		分支裂纹存在或不存在	—		—	—
		分支裂纹长度与主裂纹的比值	x_{br}/x_a		—	
		主裂纹角度	θ		(°)	
		是否存在裂纹重新扩展	—		—	
		止裂位置的温度	T		°C	

项目	细节	符号	条件/ 结果	单位	有效/无效
	止裂韧性值	K_{ca}		$N/mm^{3/2}$	
(7) 冲击时的温度分布	温度测量点	—	附后	—	—
	每个测量点温度	—	附后	$^{\circ}C$	—
	温度分布曲线	—	附后	—	
(8) 试样照片：裂纹扩展路径（一侧）和脆性裂纹断裂面（两侧）	裂纹扩展路径	—	附后	—	
	脆性裂纹断裂面（两侧）	—	附后	—	
(9) 动态测量结果：裂纹扩展速率变化历程和销块的应变变化	裂纹扩展速度变化历程	—	附后	—	
	销块的应变变化	—	附后	—	

附录 A 在特定温度下获取 K_{ca} 和评估的方法

A.1 一般要求

本附录规定了按照本指南附件 3 规定试验获得特定温度 T_D 下 K_{ca} 值的方法。

A.2 方法

许多实验数据显示 K_{ca} 对止裂温度的依赖性，如式 A.1 所示，其中 T_K [K] (= T [°C]+273)， c 和 K_0 是常数。

$$K_{ca} = K_0 \exp\left(\frac{c}{T_K}\right) \dots\dots\dots (A.1)$$

特定温度 T_D [K]下止裂韧性按以下步骤获取。

- (1) 获得至少 4 个有效的 K_{ca} 值。
- (2) $\log K_{ca}$ 与 $1/T_K$ 近似线性关系，使用最小二乘法利用 (1) 中的数据确定系数 $\log K_0$ 和 c 。

$$\log K_{ca} = \log K_0 + c \frac{1}{T_K} \quad (A.2)$$

(3) 获得每组数据的 $K_{ca}/[K_0 \cdot \exp(c/T_K)]$ 值。当数值未超出 0.85-1.15 范围时，(2) 中使用的最小二乘法认为是有效的。通过向下舍入的值获得整数。如果不满足此条件，则增加试验添加至少两个数据，并使用 (2) 中的步骤处理数据。

(4) $K_0 \exp(c/T_D)$ 的值定义为在 T_D 的 K_{ca} 估计值。对应于 K_{ca} 特定值的温度估计值可以从 $T_K = c/\log(K_{ca}/K_0)$ 获得。如果不满足 (3) 规定的条件，则将这些估计值视为参考值。

A.3 评估

用插值法对有效 K_{ca} 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°C) 位于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 $6,000 \text{ N/mm}^{3/2}$) 或 $8,000 \text{ N/mm}^{3/2}$)，如图 A3(1)所示。

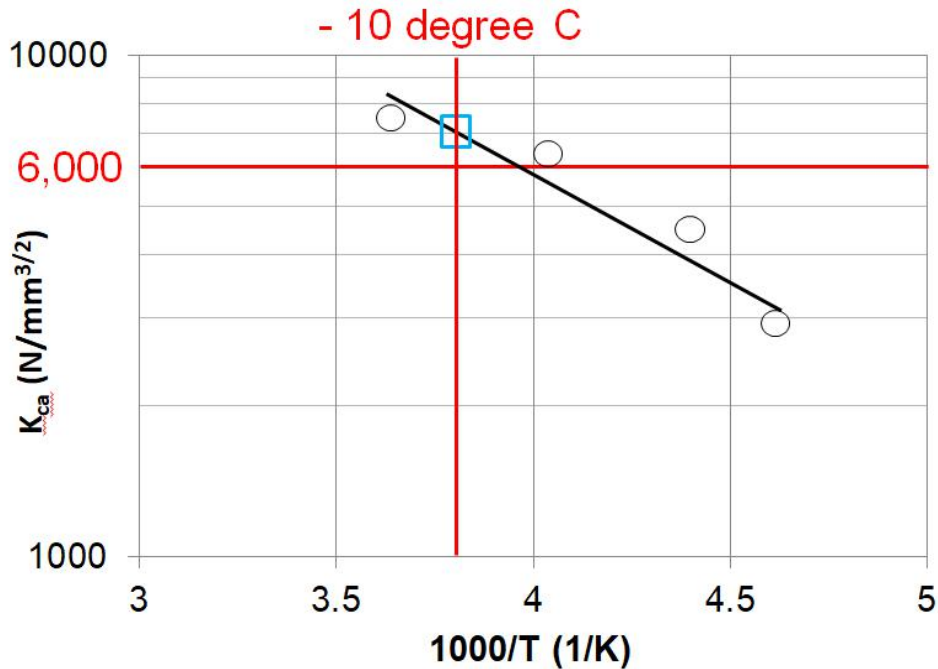


图 A3-A.1 -10°C 下 K_{ca} 估计值示例

(2) 对应于 K_{ca} 规定值（例如 $6,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 或 $8,000 \text{ N/mm}^{3/2}$ ）的温度位于止裂温度的上限和下限之间，对应于 K_{ca} 规定值的温度不高于评估温度（即 -10°C ），如图 A3(2)所示。

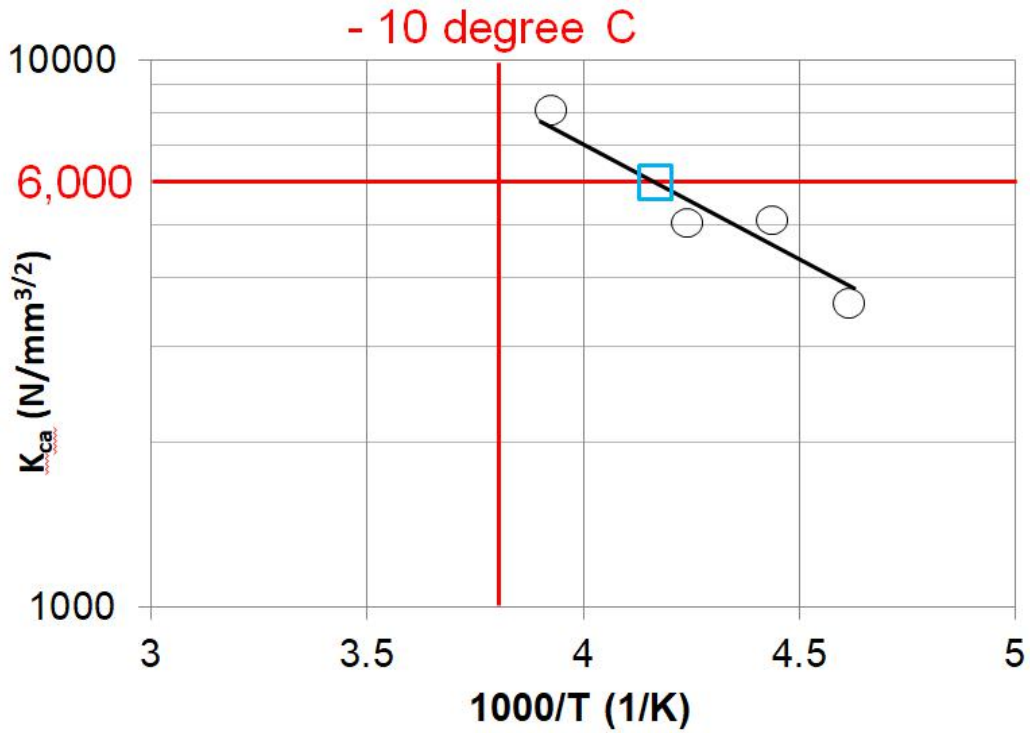


图 A3-A.2 对应于 K_{ca} 规定值的温度估计值的示例

如果上述（1）和（2）都不满足，则增加试验以满足该条件。

附录 B 双重拉伸止裂试验

B1 试验方法的特点

双重拉伸止裂试验试样由主试板和副加载板组成。主试板是用于评估脆性止裂韧性的试板。副加载板是启裂板，用于促使脆性裂纹进入主试板。在对主试板施加预定的拉伸载荷和温度梯度之后，通过副加载装置将副拉伸载荷施加到副加载板上，以引起脆性裂纹启裂并进入主试板。根据止裂温度和主试板的裂纹长度来评估止裂韧性。

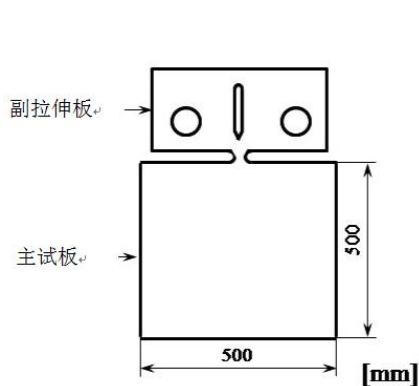
在该试验中，主试板和副加载板的狭窄连接部分阻止了副加载板的拉伸应力进入主试板。通过该方法获得的止裂韧性值可以认为与通过附件3中的脆性止裂韧性试验获得的结果相同。

附录B中未提及的试验条件应使用附件3中的规定。

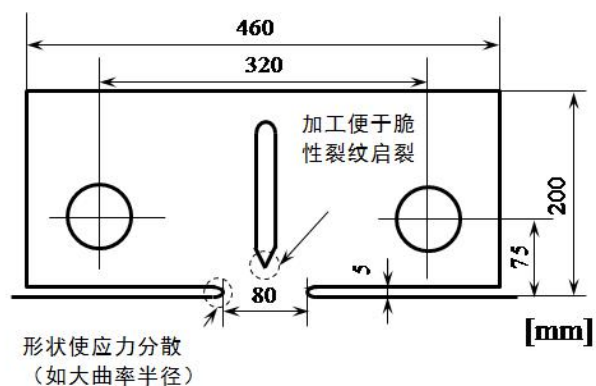
B2 试板形状

整个双重拉伸止裂试验试样和副拉伸板的推荐形状分别如图B2-1和B2-2所示。连接板和销型夹头的形状见附件3第4.2条。

注：由于连接部分的狭窄，轻微的裂纹偏差可能导致裂纹不能进入主试板。副加载板的最佳形状设计取决于钢的类型和试验条件。



图A3-B.1 整个试样形状示例



图A3-B.2 副加载板形状示例

B3 温度条件和温度控制方法

在主试板上建立温度梯度以评估其脆性止裂韧性。温度梯度的要求和建立温度梯度的方法已经在附件3第5条中描述。此外，在双重拉伸止裂试验中，应冷却副加载板。在不影响主试板的温度梯度的情况下冷却副加载板。与附件3中描述的试样冷却方法一样，可以使用冷却箱和冷却剂进行冷却。可以使用附件3中所述的热电偶测量副加载板的温度。

B4 副加载方法

副加载装置用于向副加载板施加力。副加载装置应满足以下条件。

B4.1 副加载装置的保持方法

为避免对整个试样施加不必要的力，应以适当的方式保持副加载装置。可以使用悬挂式或地板式保持方法。在悬挂式方法中，通过使用起重机或类似装置悬挂和保持副加载装置。在地板式方法中，通过使用框架或类似装置升高和保持副加载装置。

B4.2 加载系统

液压式加载系统最适合于向副加载板施加力。也可以使用其他方法。连接和销型夹头的形状见附件3第4.2条。

B4.3加载方法

副加载板的加载方法应为销型加载方法。经有关各方同意可以使用销型以外的加载方法。加载速率没有特别规定，因为它对主试板的止裂性能没有直接影响。

附件 4 等温型止裂温度 (CAT) 试验要求概要

1 适用范围

1.1 本附件适用于本指南规定范围。

1.2 本附件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。本附件适用于厚度大于 50mm 但不大于 100mm 的钢材。

1.3 该方法采用待评估试样的等温温度。除非本附件另有规定，否则其他试验参数应符合附件 3 的规定。

1.4 本指南第 3 章表 3.2.2 给出了由止裂温度 (CAT) 表征的脆性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 在附件 3 表 A3-1 的基础上对等温试验的特定符号进行了补充。

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-min}	mm	试样边缘与电子束重熔区前端之间的最小长度
$L_{EB-s1, -s2}$	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}	°C	目标试验温度
T_{test}	°C	定义的试验温度
T_{arrest}	°C	目标试验温度，在该温度下观察到有效的脆性止裂行为
σ	N/mm ²	在 $W \cdot t$ 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	°C	裂纹止裂温度， T_{arrest} 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 $T_{target} \pm 2^\circ\text{C}$ 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附件 3 中的 3。

4 试样

4.1 冲击式裂纹启裂

4.1.1 除本附件另有规定外，试样应满足附件 3 中 4 的要求。

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

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 $29\text{mm} \pm 1\text{mm}$ 。

4.1.4 侧槽的要求见 4.4。

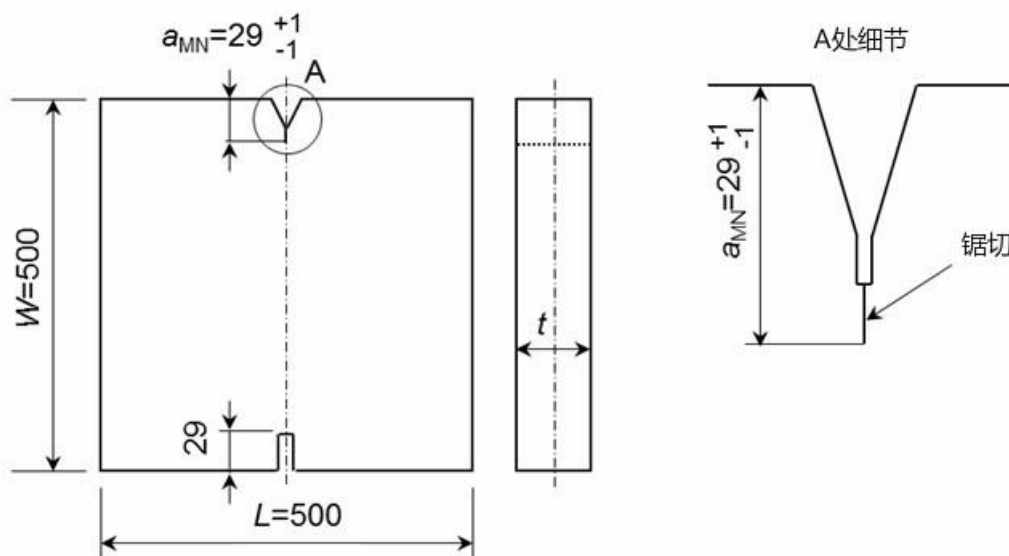


图 A4-1 冲击式试样的试样尺寸

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。

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，应参考附件 3 的附录 B。

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 1mm 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 150mm 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 1mm 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。

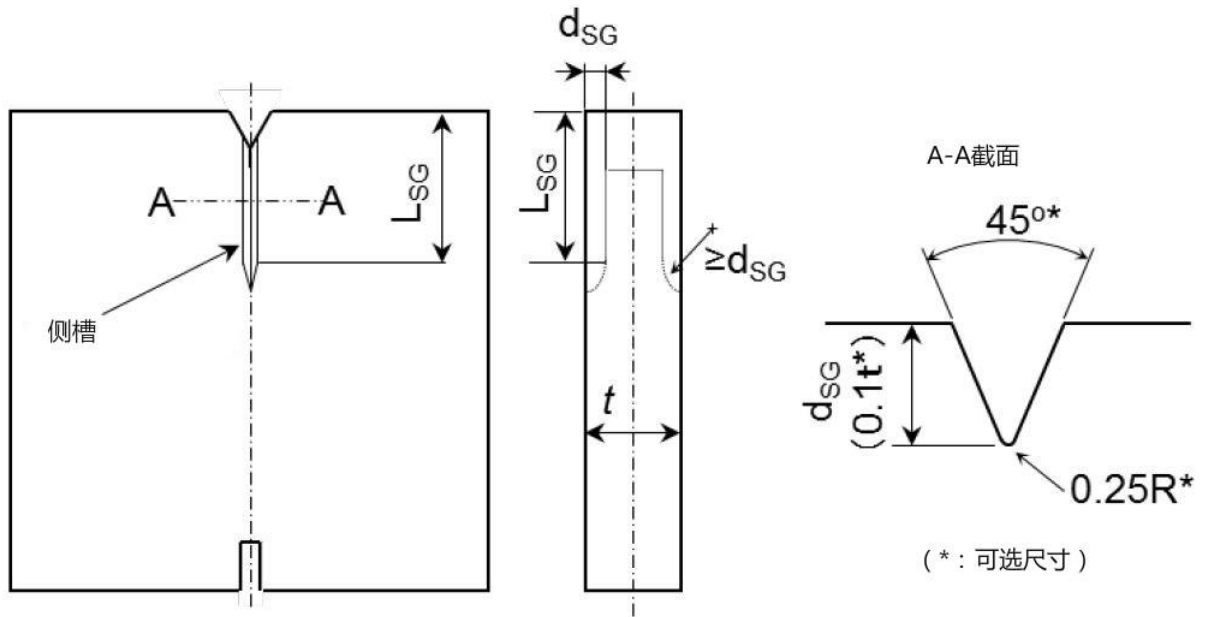


图 A4-2 侧槽形状和尺寸

4.5 脆化区的名义长度

4.5.1 对于 EBW 和 LTG 两种脆化方法，脆化区的名义长度应等于 150 mm。

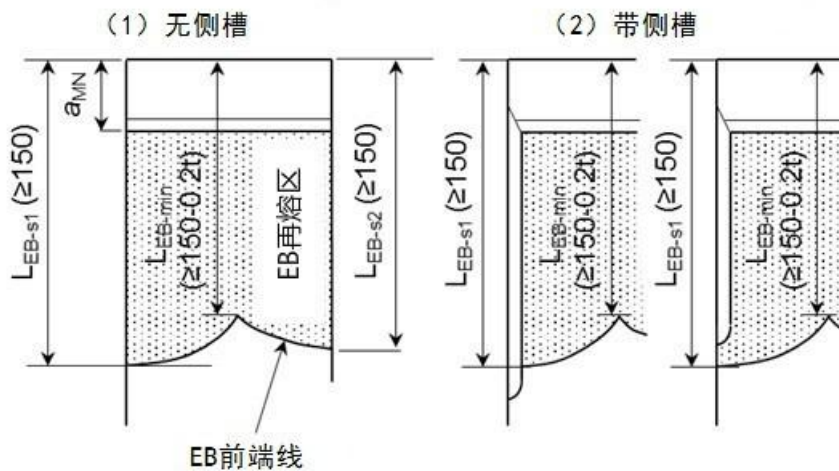


图 A4-3 EBW 长度的定义

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-min} ，以及 L_{EB-s1} 和 L_{EB-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-min} 不宜小于 150 mm。然而， L_{EB-min} 不小于 $150mm-0.2t$ 也可以接受，其中 t 是试样厚度。当 L_{EB-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-s1} 和 L_{EB-s2} 表示。 L_{EB-s1} 和 L_{EB-s2} 均应不小于 150 mm。

4.5.5 对于 LTG 方法， L_{LTG} 设置为 150mm。

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附件 3 的 4.2。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附件 3 第 4.3 条的要求范围内。

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°C。

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 50mm，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。

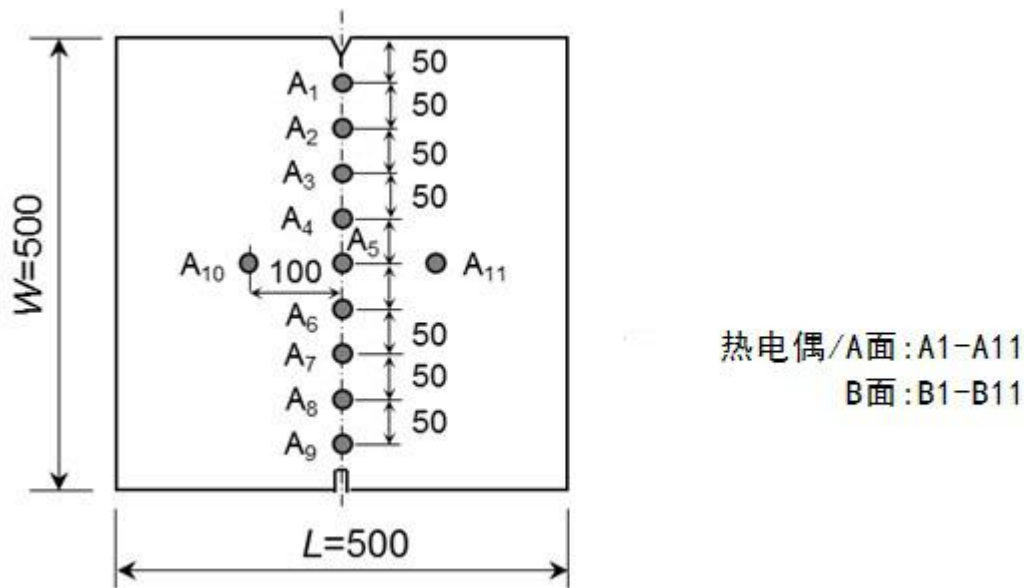


图 A4-4 温度测量位置

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 $T_{target} \pm 2^\circ\text{C}$ 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 $10+0.1 \cdot t$ [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。

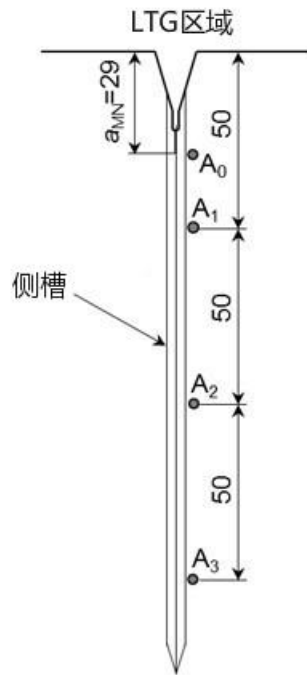


图 A4-5 LTG 区域和附加热电偶 A₀ 详图

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 $T_{target} \pm 2^\circ\text{C}$ 范围内。但是，0.3W（A₃ 和 B₃ 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 $10 + 0.1 * t[\text{mm}]$ 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 A₂、B₂ 和 A₃、B₃ 处的两次温度测量应满足以下要求：

A₃ 处 T, B₃ 处 $T < T_{target} - 2^\circ\text{C}$

A₂ 处 $T < A_3$ 处 $T - 5^\circ\text{C}$

B₂ 处 $T < B_3$ 处 $T - 5^\circ\text{C}$

5.2.4.7 如果 A₃ 和 A₂ 的温度满足上述要求，则 A₀ 和 A₁ 的温度不作要求。B 面一样。

5.2.4.8 A₀、B₀ 到 A₃、B₃ 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。

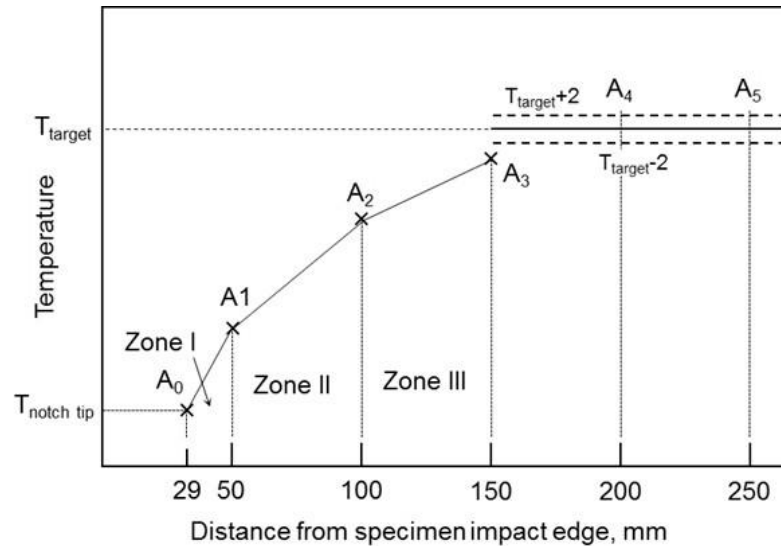


图 A4-6 LTG 区温度梯度剖面示意图

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	29mm – 50mm	2.00 °C/mm – 2.30 °C/mm
II 区	50mm – 100mm	0.25 °C/mm – 0.60 °C/mm
III 区 ¹⁾	100mm – 150mm	0.10 °C/mm – 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 $10+0.1 \cdot t$ [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 A₀ 到 A₃ 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 试验程序应符合附件 3 第 6 条的规定，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。

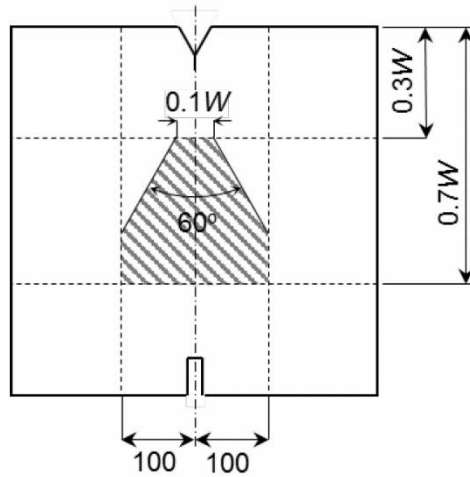


图 A4-7 主裂纹扩展路径的允许范围

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-s1} 、 L_{EB-s2} 和 L_{EB-min} 三个测量值进行量化，定义见 4.5。当 L_{EB-s1} 和 L_{EB-s2} 中的一个或两个小于 150 mm 时，试验无效。当 L_{EB-min} 小于 $150\text{mm}-0.2t$ 时，试验无效。

6.3.4 当明显观察到脆化区两侧有超过 1mm 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。

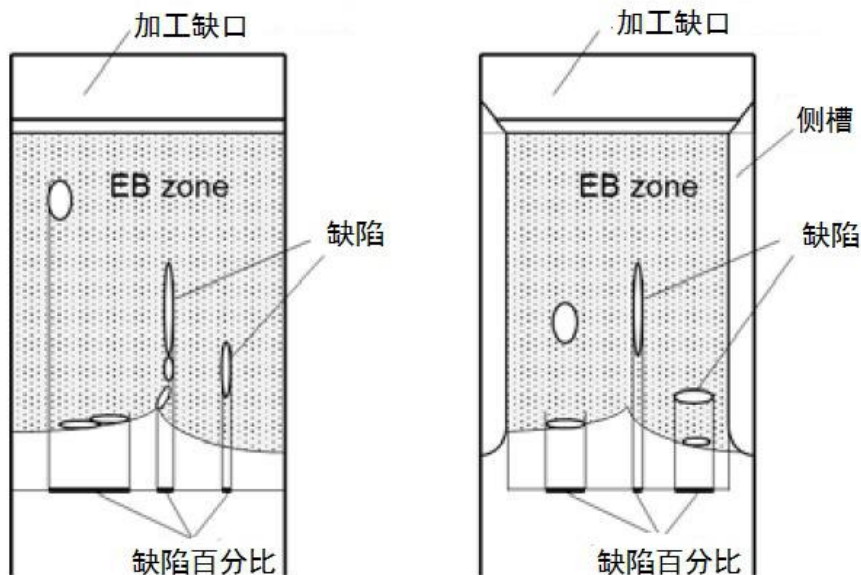


图 A4-8 缺陷百分比计算方法

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，则应按照附件 3 第 6.3 和 6.4 条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 $L_{\text{EB-s1}}$ 、 $L_{\text{EB-s2}}$ 或 $L_{\text{EB-min}}$ ，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”。

7.5 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 $T_{\text{target}} \pm 2^\circ\text{C}$ 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 $L_{\text{EB-min}}$ 不小于 150 mm ，则 T_{test} 可定义为等于 T_{target} 。否则， T_{test} 应等于 $T_{\text{target}} + 5^\circ\text{C}$ 。

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 ($T_{\text{arrest}} = T_{\text{target}}$)。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°C 。 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 应报告以下项目：

- (i) 试验材料：等级和厚度
- (ii) 试验机能力
- (iii) 试样尺寸：厚度 t ；宽度 W 和长度 L ；缺口细节和长度 a_{MN} ，侧槽细节（如果是加工的）。
- (iv) 脆化区类型：EBW 或 LTG 脆化；
- (v) 整个试样尺寸：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。
- (vi) 脆性裂纹启裂信息：冲击式或双重拉伸式。如果是冲击式，报告落锤式或空气枪式、冲击的能量。
- (vii) 试验条件；施加载荷，预加载应力，试验应力

-预加载应力极限的判定，稳定保持试验应力的时间要求。

(viii) 试验温度：完整的温度记录，包括测量温度的热电偶位置（图和/或表）和目标试验温度
-等温区温度离散极限的判定。

-对于 LTG，脆性裂纹启裂前局部温度梯度稳定后，局部温度梯度要求和保温时间要求的判定。

(ix) 裂纹路径和断裂面：试样照片，显示两侧的断裂面和裂纹路径侧视图；“脆化区尖端”和“止裂”位置的标记

-裂纹路径要求的判定。

-启裂位置的判定（无论是侧槽边还是 V 形切口边）。

(x) 脆化区信息：

采用 EBW 方式时：LEB-s1、LEB-s2 和 LEB-min

-剪切唇厚度要求的判定

-是否有从电子束焊接前端线延续的脆性断面的判定

-电子束焊接缺陷要求的判定

-EBW 长度、LEB-s1、LEB-s2 和 LEB-min 的判定

采用 LTG 方式时：LLTG

-剪切唇厚度要求的判定

试验结果：

脆性裂纹启裂后试样没有断裂成两块时，止裂裂纹长度 a_{arrest}

脆性裂纹启裂后试样断裂成两块时，

-判断脆性裂纹是否再次启裂。

如果是，则止裂裂纹长度 a_{arrest} ：

- a_{arrest} 在有效区域内的判断 ($0.3W < a_{arrest} \leq 0.7W$)

-最终的判定，“止裂”、“扩展”或“无效”

(xi) 动态测量结果：裂纹扩展速度和加载销处应变变化的历史记录（如果需要）

10 作为材料鉴定试验的使用

10.1 在有必要时，本方法也可用于确定钢材能够阻止扩展脆性裂纹的最低温度（CAT 的确定），作为 8.3 中的材料特性。

附件 5 侧面落锤试验

1 试料通常可在常规力学性能取样位置附近截取。试样的纵轴平行于试板最终轧制方向，见图 A5-1。

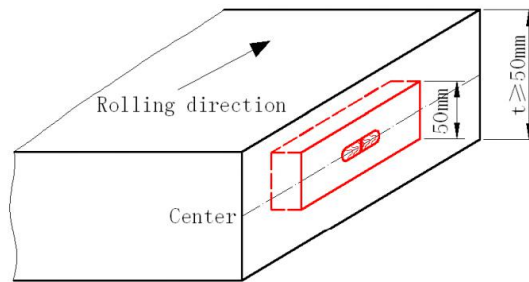


图 A5-1 侧面落锤试样取样示意图

2 试样的尺寸和制备按照 ASTM E208 中的 P2 试样。

3 试验程序应按 ASTM E208 进行。

4 产品认可试验需要测定材料侧面无塑性转变温度，并拍摄断裂面照片。

5 对于产品合格性考核的试验，仅在规定的温度下进行侧面落锤试验。在规定侧面落锤试验温度下，1 组 2 个试样均未发生断裂，试验合格。如果一组 2 个试样中只有一个断裂的情况可进行复试。复试应在原取样位置附近重新选取一组 2 个试样在原温度下进行，复试的两个试样应均不出现断裂。

附件 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/mm ²)	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*	N.A.**	N.A.	X	
460 (药芯焊丝电 弧焊)	$50 < t \leq 100$	A	X	N.A.	X	X
		B	X*	N.A.**	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。
 **:CCS 可要求按照本指南 4.6 进行交船后定期的无损检测。

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) b、c 或 d;
- 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)a;
- 5 (建造阶段) 防止从其他焊缝区域, 如角焊缝和附件焊缝, 裂纹扩展的止裂设计见 4.9.1(1)a。