



中华人民共和国国家标准

GB/T 28896—2023

代替 GB/T 28896—2012

金属材料 焊接接头准静态断裂韧性 测定的试验方法

Metallic materials—Method of test for the determination of quasistatic fracture
toughness of welds

(ISO 15653:2018, MOD)

2023-03-17 发布

2023-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和说明	2
5 原理	3
6 试样设计、方位和缺口位置选择	5
7 机加工前金相检查	7
8 机械加工	8
9 试样预制	13
10 试验装置、试验要求及步骤	14
11 试验后金相检查	14
12 试验结果分析	18
13 试验报告	22
附录 A (资料性) 试样缺口位置示例	23
附录 B (资料性) 试验前后金相检查示例	25
附录 C (资料性) 消除残余应力和预制疲劳裂纹方法	27
附录 D (规范性) pop-in 效应评定	30
附录 E (规范性) 浅缺口试样试验	35
参考文献	37

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 28896—2012《金属材料焊接接头准静态断裂韧性测定的试验方法》，与 GB/T 28896—2012 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了根据室温抗拉强度进行估算低温时抗拉强度的公式(见 12.1)；
- 增加了系列计算深缺口的裂纹尖端张开位移 δ 的计算公式(见 12.2)；
- 更改了浅缺口三点弯曲试样双引伸计的输出估计 V 的计算公式、计算单点 J 积分的计算公式、计算单点裂纹尖端张开位移特征值(δ)的计算公式及计算单点裂纹尖端张开位移特征值(δ)的计算公式(见附录 E, 2012 年版的附录 E)。

本文件修改采用 ISO 15653:2018《金属材料 焊接接头准静态断裂韧性测定的试验方法》。

本文件与 ISO 15653:2018 的技术差异及其原因如下：

- 用规范性引用文件 GB/T 21143 替换了 ISO 12135, 以适应我国技术要求(见第 3 章、第 4 章、第 5 章、6.2、8.1、8.4、9.1、9.2、第 10 章、12.2.1、12.2.2、12.3.1、12.3.2、12.3.3、12.3.4、第 13 章、D.1、D.2、D.5、E.2、E.3)。
- 更改了适用于深缺口($0.45 < a_0/W < 0.7$)裂纹尖端张开位移 δ 的计算公式, 以确保计算结果的准确性。[见式(10)和式(11), ISO 15653:2018 的式(10)]。
- 为与标准技术内容保持一致, 将资料性附录 E 更改为规范性附录。

本文件做了下列编辑性改动：

- 更正了图 9 中注的错误；
- 更改了式(11)~式(15)的编号, 将式(11)~式(15)改为式(12)~式(16)；
- 更改了附录 E 中的式(E.3)的符号, 将符号 A_0 改为 A_F ；
- 在资料性附录 B 中增加了“贯穿厚度缺口试样中心 75%厚度范围内的特定显微组织区域累计长度总和值”的示例；
- 增加了参考文献[3]。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：天津大学、国家石油天然气管网集团有限公司、十堰市工业产品质量检验检测所、江苏澄信检验检测认证有限公司、天津市金桥焊材集团股份有限公司、首钢集团有限公司、东莞材料基因高等理工研究院、深圳万测试验设备有限公司、北京空间机电研究所、冶金工业信息标准研究院。

本文件主要起草人：王东坡、冯庆善、刘传龙、朱国森、张强、肖辉英、李荣锋、董莉、黄星、臧博、龚宝明、戴联双、魏启均、甘美露、邓彩艳、赵海微、王婷、王富祥、侯慧宁、王书强、郭柏辰、马强。

本文件于 2012 年首次发布, 本次为第一次修订。

jcvba.cn, qejc.cn, 微信qejc21

金属材料 焊接接头准静态断裂韧度 测定的试验方法

1 范围

本文件描述了测试金属材料焊接接头应力强度因子(K)、裂纹尖端张开位移[CTOD(δ)]和 J 积分的试验方法。

本文件是对 GB/T 21143 的补充,GB/T 21143 涵盖了金属材料母材有关断裂韧度测试的试验方法的所有方面,本文件与 GB/T 21143 配套使用。

本文件适用于测定断裂韧度特征值而不宜用于测定有效的 R-curve(裂纹扩展阻力曲线),但本文件中试样的加工方法也适用于焊缝金属的 R-curve 测定。规定的测试采用的是焊接之后、经机加工缺口并预制疲劳裂纹的金属材料试样,该缺口位于焊缝金属或者热影响区的目标区域,如适用时需要对其疲劳裂纹位置的有效性进行评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;对于不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法(GB/T 21143—2014,ISO 12135:2002,MOD)

3 术语和定义

GB/T 21143 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

伸张区宽度 stretch zone width

SZW

裂纹钝化时所产生的裂纹延伸长度。

注:裂纹钝化一般发生在裂纹不稳定扩展、突进(pop-in)或者裂纹缓慢稳定扩展之前,其位置与预制疲劳裂纹在同一平面之上。

3.2

目标区域 target area

预制疲劳裂纹尖端在焊缝金属(3.7)或热影响区(3.9)中所处的位置。

3.3

突进 pop-in

在力-位移记录曲线上出现突然的不连续点,一般具有位移陡然增加、力快速下降的特征,而随后力与位移能够继续增加至不连续开始时值之上。

3.4

局部压缩 local compression

在预制疲劳裂纹之前,沿试样厚度方向上对包含裂纹尖端在内的韧带部分用较硬钢块所进行的受控挤压处理。

注:见附录 C。

3.5

焊接 welding

通过加热、摩擦、加压或三者并用,使两个或多个工件之间形成金属连接的方法。

注:可用填充材料也可不用,其熔点与母材相近。

3.6

焊缝 weld

经过焊接之后,在焊件中所形成的结合部分。

3.7

焊缝金属 weld metal

形成焊缝且保留在焊缝中的熔化金属。

3.8

母材 parent metal

基材 base metal

被焊接的金属材料。

3.9

热影响区 heat-affected zone; HAZ

由于受到焊接热作用,使母材产生具有冶金性质影响的区域。

3.10

熔合线 fusion line; FL

焊缝金属和热影响区之间的结合部位。

3.11

焊缝位置 weld positional; WP

由参考线所定义的疲劳裂纹尖端目标位置。

注:如附录 A 中图 A.1 所示。

3.12

特定显微组织 specific microstructure; SM

疲劳裂纹尖端处的目标组织。

注:如图 A.2 所示。

3.13

试样坯料 specimen blank

缺口加工之前所制备的带有母材(见 3.8)的焊缝金属(见 3.7)试样。

3.14

焊后热处理 post-weldheat treatment

为降低焊接残余应力或改善焊缝性能,在焊接之后所实施的热处理。

4 符号和说明

GB/T 21143 规定的以及表 1 所列符号、单位和说明适用于本文件。

表 1 符号、单位和说明

符号	单位	说明
d_1, d_2	mm	与突进相关的显微组织特征长度
h	mm	有效焊缝宽度,即在焊缝中心 75% 厚度范围内,疲劳裂纹尖端至两侧熔合线的最短距离(见图 13 和图 14)。
HV10	—	施加 10 kg 力时测得的维氏硬度
m_c	—	断裂拘束系数
N	—	垂直焊缝方向
P	—	平行焊缝方向
Q	—	焊缝厚度方向
$R_{p0.2b}$	MPa	母材在断裂试验温度条件下 0.2% 的规定塑性延伸强度
$R_{p0.2w}$	MPa	焊缝金属在断裂试验温度条件下 0.2% 的规定塑性延伸强度
R_m	MPa	母材在断裂试验温度条件下的抗拉强度
R_{mW}	MPa	焊缝金属在断裂试验温度条件下的抗拉强度
S_1	mm	疲劳裂纹尖端与目标区域之间在裂纹平面方向上的距离(见图 12)
S_2	mm	疲劳裂纹尖端与目标区域之间在垂直于裂纹平面方向上的距离(见图 12)
V	mm	三点弯曲试样缺口边缘和紧凑拉伸试样加载线上的裂纹嘴张开位移
V_a	mm	装卡在刀口边缘上的引伸计所测定的位移值
V_{a1}	mm	在 E.3 中描述的装卡在双排刀口上的引伸计所测定的位移值(见图 E.1)
V_{a2}	mm	在 E.3 中描述的装卡在双排刀口上的引伸计所测定的位移值(见图 E.1)
X	—	平行母材轧制方向
Y	—	垂直母材轧制方向
Z	—	贯穿母材厚度方向
z	—	用于测定缺口张开位移的引伸计装卡位置距离试样表面之间的距离
Δa_{per}	mm	与突进效应相关的最大脆性裂纹扩展长度(但不包括伸张区宽度 SZW,见 3.1)
λ	mm	在试验前后金相检验的特定显微组织区域的长度(见图 B.2)
τ	—	断裂韧性的屈强比和厚度修正参数
w_{th}	—	反向弯曲载荷所产生的压缩塑性区尺寸

5 原理

本文件描述了单边缺口带预制疲劳裂纹焊接接头试样的断裂韧性测试程序。根据裂纹尖端位置把试样类型分为两种:

- 只考虑裂纹尖端位于特定宏观位置而不考虑显微组织的试样,称为 WP 试样;
- 需金相检查来确定裂纹尖端位于特定显微组织的试样,称为 SM 试样。

对焊接接头进行金相检查来确认在裂纹尖端是否有目标焊接特征和(或)显微组织,并且其数量是否足够用于断裂韧性试验。

这样试样的几何尺寸和预制缺口方位也就确定了,随后施加一定的交变力,使疲劳裂纹扩展并进入到试样存有目标焊接特征或显微组织的区域。试验的目的是在消除焊接残余应力影响的条件下测定焊接接头的断裂韧性。为了达到该目的并且确保所预制的疲劳裂纹前沿能够平直扩展,有必要对原始焊态或应力部分释放的焊接接头试样的预制疲劳裂纹方法进行改进。

断裂韧度试验与结果评定过程在 GB/T 21143 中均有详细的说明,但按本文件进行试验时还需遵守试验后金相分析(见 12.1,12.2 和 12.3)和有效性(见 12.4)涉及的要求。

试验后通过金相检查判断裂纹尖端是否位于目标焊缝特征和(或)显微组织的区域内以及评定突进效应(pop-in)的有效性。

试验流程如图 1 所示。

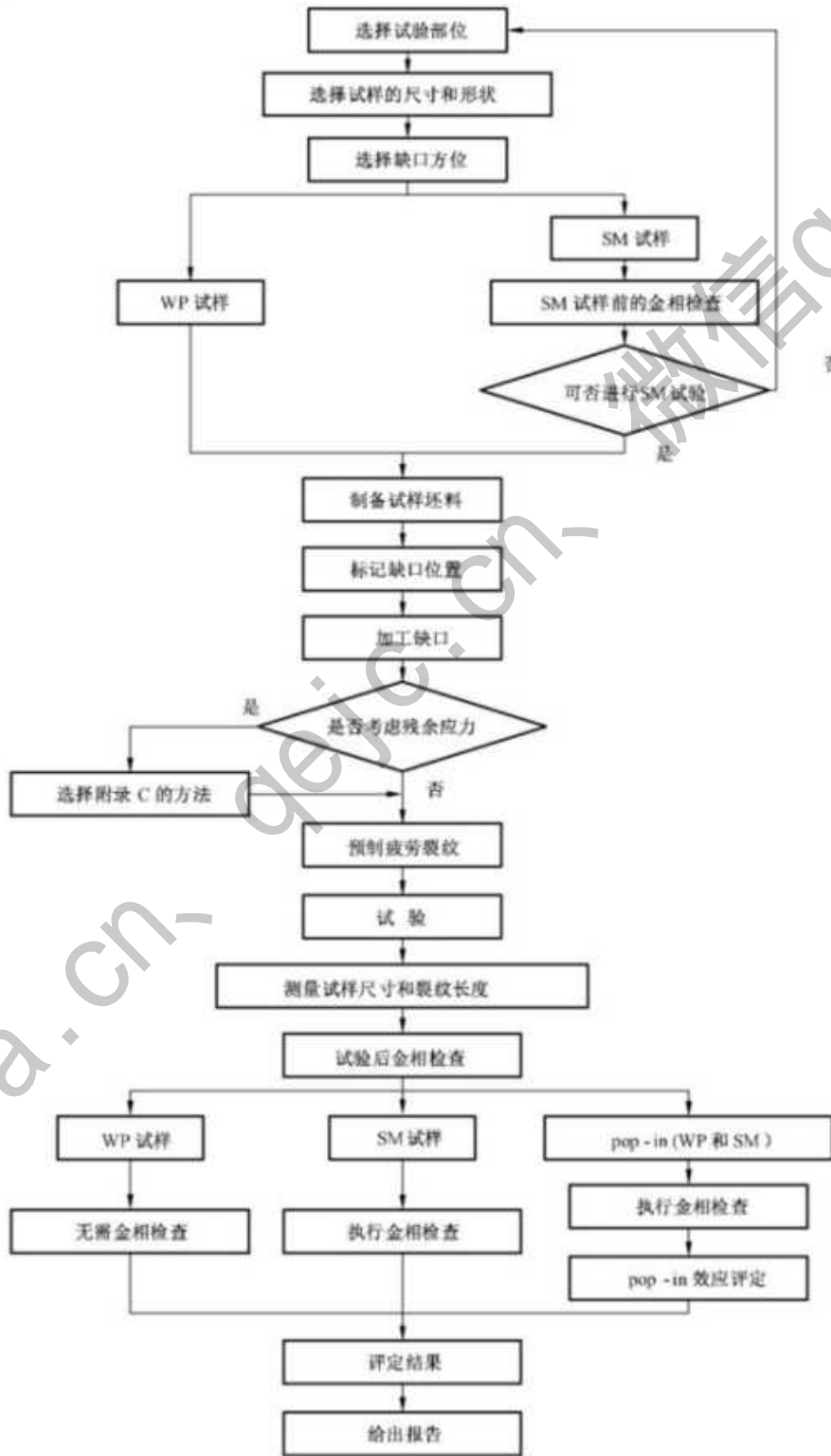


图 1 断裂韧度试验流程图

6 试样设计、方位和缺口位置选择

6.1 缺口处目标区域分类

WP 试样缺口在相对某参考位置(例如焊缝金属中心线位置)的特定焊接区域。

SM 试样缺口全部或部分疲劳裂纹前缘在试样厚度中心 75%范围内的特定显微组织区域内。

注:典型 WP 和 SM 试样的缺口位置实例见附录 A。

对于对中不好的双道或者多道焊缝,当 WP 试样缺口取在焊缝金属中心线且细晶区占主导的位置,可能得到错误的(过高的)断裂韧度值。对于这种焊接接头,本文件推荐使用 SM 试样进行断裂韧度测试,缺口位置分别见图 A.2d)和图 A.2e)。

6.2 试样设计

应将试样设计成由 GB/T 21143 中所定义的单边缺口三点弯曲试样或紧凑拉伸类型,且试样侧面可为平面或开侧槽。沿试板厚度开缺口的三点弯曲试样称为贯穿厚度缺口试样(见图 2、图 3 和图 4,母材试样为 XY 和 YX,焊缝试样为 NP 和 PN),在试板表面开缺口的三点弯曲试样称为表面缺口试样(见图 2、图 3 和图 4,母材试样为 XZ 和 YZ,焊缝试样为 NQ 和 PQ)。

注:试样尺寸公差比母材试样更加宽松,见 8.1。

试样尺寸 B 或 W (见图 5)应等于或尽量接近待测近缝区母材厚度(不包括焊缝余高)。

可采用小尺寸(即 B 或 W 小于图 2、图 3 和图 4 中所指示的 Z 方向母材厚度和 Q 方向焊缝厚度)和/或开侧面槽的试样进行断裂韧度试验,但应在试验报告中注明。使用小尺寸和/或侧面开槽试样进行断裂韧度测定所得到的试验结果,可能会由于尺寸效应和/或试验区域显微组织的不同而与使用全厚度试样获得的断裂韧度值存在一定的差异。

6.3 试样和裂纹面方位

试样和裂纹面相对于焊缝和母材加工方向的方位应由图 2、图 3 和图 4 所描述的方法加以确定。

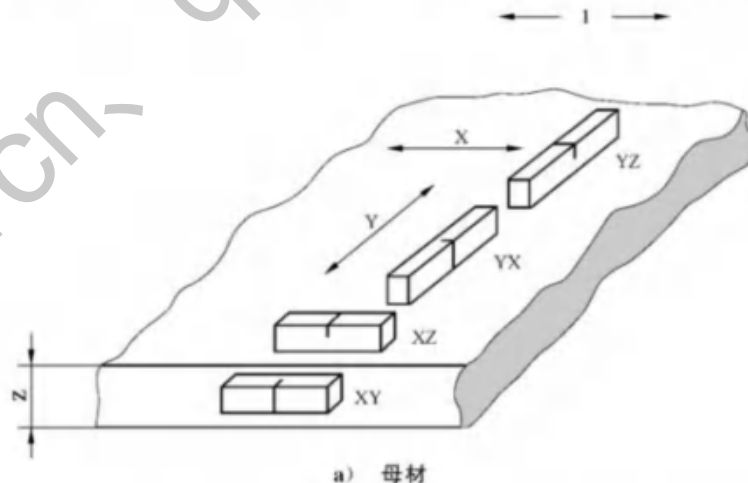
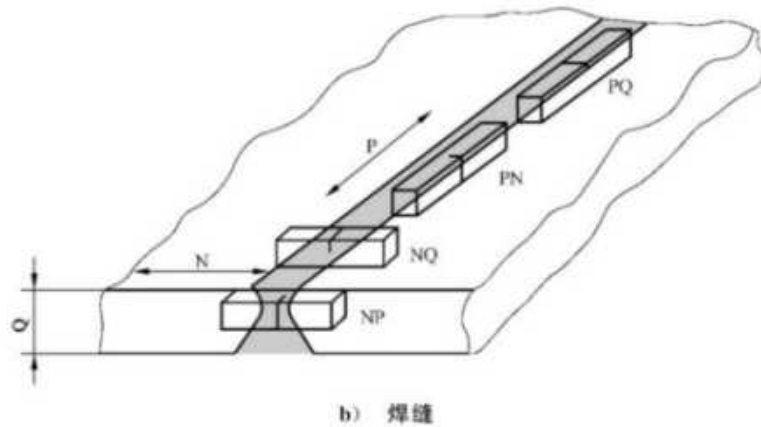


图 2 母材与焊缝断裂韧度试样裂纹面取样方位



标引序号说明：

1——轧制方向；

N——垂直焊缝方向；

注1：标注的第一个字母表示裂纹平面法向；

注2：标注的第二个字母表示预制裂纹扩展方向；

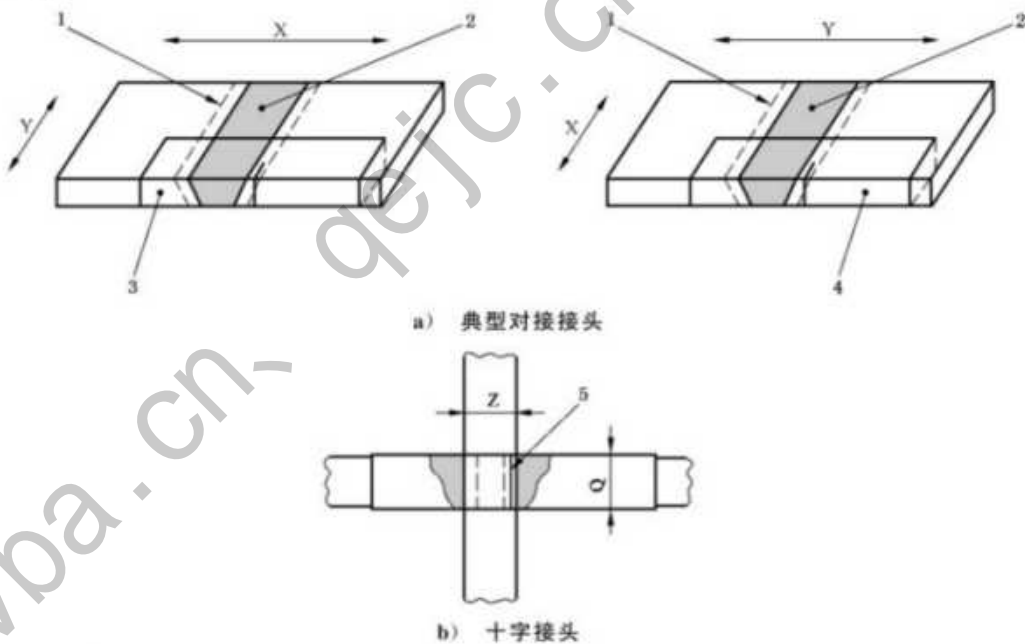
注3：参考 GB/T 20832 对 X、Y、Z 方向的定义。

P——平行焊缝方向；

Q——焊缝厚度方向。

图2 母材与焊缝断裂韧性试样裂纹面取向方位(续)

如图2所示,方向为NP与PN的试样应称为贯穿厚度缺口试样,方向为NQ与PQ的试样应称为表面缺口试样。



标引序号说明：

1——热影响区(HAZ)；

2——焊缝金属；

3——焊缝试样取向 NP/XY；

4——焊缝试样取向 NP/YX；

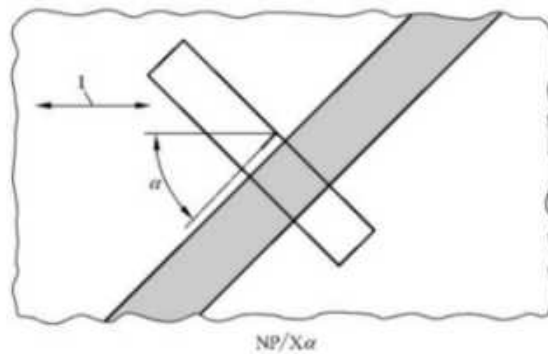
5——贯穿厚度裂纹, NP/ZX 或 NP/ZY；

X——轧制方向；

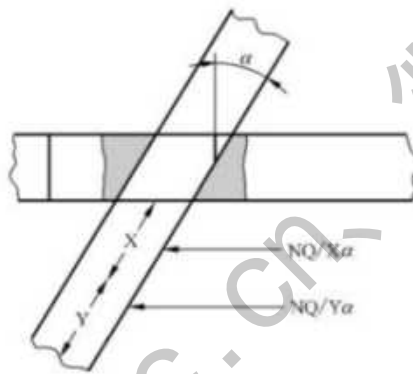
Q——焊缝厚度方向。

注：对于 HAZ 试验,当母材轧制方向可能影响到裂纹扩展阻力时,由于母材轧制方向和焊缝方向之间存在取向不同的问题,可能导致试样的焊缝和母材方向之间存在多种组合形式,具体实例见本图和图4。

图3 典型对接与十字接头热影响区断裂韧性试样裂纹面方向示意图



a) 典型对接接头



b) 斜十字接头

标引序号说明：

l——轧制方向。

注：对于 HAZ 试验，当母材轧制方向可能影响到裂纹扩展阻力时，由于母材轧制方向和焊缝方向之间存在取向不同的问题，可能导致试样的焊缝和母材方向之间存在多种组合形式，具体实例见本图和图 3。

图 4 与母材轧制方向呈 α 角的典型对接与斜十字接头热影响区断裂韧性试样裂纹面方向示意图

7 机加工前金相检查

7.1 宏观金相检查

当试验采用 SM 试样时，应在垂直于焊接方向的平面上选取宏观试样或者在焊接试板末端的截面上进行金相检查。横截面位置应在即将进行试验的焊缝长度范围内选取，确保足够数量的目标显微组织出现在预期的裂纹尖端部位以满足试验要求。在制备宏观金相检查试样时，应注意及时将取样位置记录下来，而所截取试样的宏观剖面应经过抛光、腐蚀处理后再进行相应金相检查，最后通过放大适当倍数对该样品进行观测，确认目标区域的显微组织是否满足试验的有关要求。

宏观剖面检查的目的是判断裂纹尖端的位置：

- 对于贯穿厚度缺口试样，预期的裂纹尖端在试样厚度中心 75% 范围内的目标区域；
- 对于表面缺口试样，预期的裂纹尖端距离目标区域不超过 0.5 mm。

如果在目标区域内不存在特定的显微组织，或因其数量不足而难以确保试验结果的可靠性，亦或疲劳裂纹尖端位置无法满足标准（深缺口试样）的相应规定，那么该焊接试板将因为不满足制备 SM 试样

的标准要求而不应用于断裂韧性试验。在这种情况下,可重新选择目标区域或者重新焊接符合标准要求的试板。如果使用单边缺口三点弯曲类型的 SM 试样并且其显微组织数量达到试验要求,但裂纹尖端位置却不满足相关标准(深缺口试样)的规定,经相关方协商,则可使用附录 E 中介绍的浅缺口试样方法进行断裂韧性试验。

由于浅缺口试样的裂纹尖端拘束度较低,浅缺口试样($0.10 \leq a_0/W \leq 0.45$)(a_0 为初始裂纹长度, W 为试样厚度)得到的断裂韧性数值可能高于裂纹尖端部位具有相同显微组织的深缺口试样($0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$)。因此使用浅缺口试样时宜考虑上述原因所带来的相应影响。

7.2 有关热影响区试验的补充要求

当 SM 试样的待测区位于热影响区(HAZ)时,除遵照 7.1 规定之外,还应在经过抛光、腐蚀之后所获得的清晰宏观组织截面上沿着疲劳裂纹尖端位置的前沿区域进行金相检查,其目的是判别目标显微组织是否存在于试样厚度中心 75% 范围之内,且目标显微组织的数量满足成功地进行试验的相关要求。

当确认好目标区域的相应位置和长度之后,可以用图示的形式将其表示出来(对应实例见附录 B)。在图示中应标出宏观试样厚度与目标显微组织的具体位置,目标显微组织所占比例应在试样中心 75% 厚度的范围内进行计算。

对于表面缺口试样,应检查其宏观截面以便确保其目标显微组织存在于 $0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$ 的范围之内。

如果 SM 试样疲劳裂纹尖端位置的选择条件得不到满足,则宜考虑重新选择目标区域位置或者重新焊接试板,亦或使用 7.1 中提及的浅缺口试样。

8 机械加工

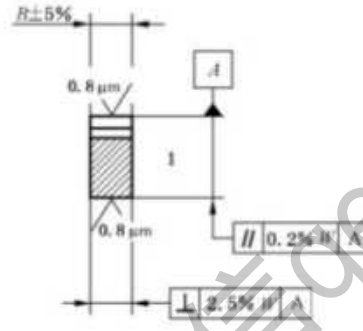
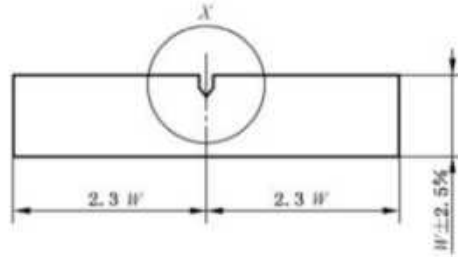
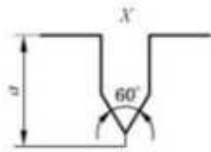
8.1 试样尺寸公差

为了能够在试验的目标位置加工出合格的缺口,在产品试板上切取的试样样坯应在加工机械缺口之前,机加工到满足尺寸公差的要求。

紧凑拉伸类型试样应满足 GB/T 21143 对试样尺寸和公差的具体要求;三点弯曲类型试样应满足图 5 中的尺寸公差要求。当使用浅缺口三点弯曲类型试样时(见 7.1、7.2 和附录 E),除裂纹长度应在 $0.10 \leq a_0/W \leq 0.45$ 范围内,试样还应遵循图 5 所标注的尺寸和公差要求。

注 1: 为了尽量不改变焊接接头的原始状态,图 5 中单边缺口三点弯曲试样的尺寸公差要求低于 GB/T 21143。

对于存在焊接错边、焊接变形和样坯弯曲(当试样的样坯取自管件时)的试样,应按照图 6 的相应要求进行机械加工。对于半径与焊缝厚度比值不小于 10 的管件,由于管道弯曲而允许样坯侧面存在 $2.5\%W$ 的平直度公差。对于不平直试样,如果不能达到规定的平直度和对正要求,则应采用局部弯曲的方法在加工缺口前予以矫直。注意矫直时加载点或支撑点至焊缝缺口部位之间的距离应不小于厚度 B 。变形或弯曲样坯的矫直方法如图 7 所示。



标引符号说明：

W —— 试样宽度；

B —— 试样厚度, $B=0.5W$ ；

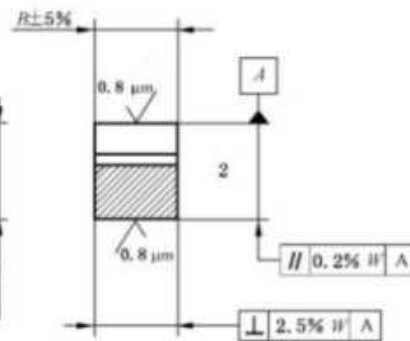
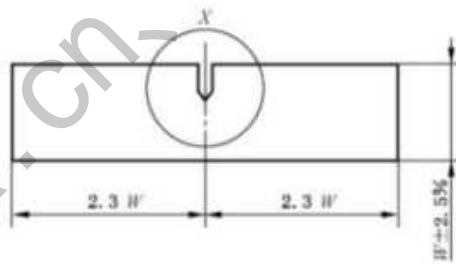
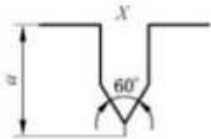
a —— 标称裂纹长度, $a=0.45W\sim 0.7W$ ；

力跨距为 $4W$ ；

缺口宽度为 $0.065W_{max}$ ；

试样平直度要求见图 6。

a) 矩形截面试样



标引符号说明：

W —— 试样宽度；

B —— 厚度, $B=W$ ；

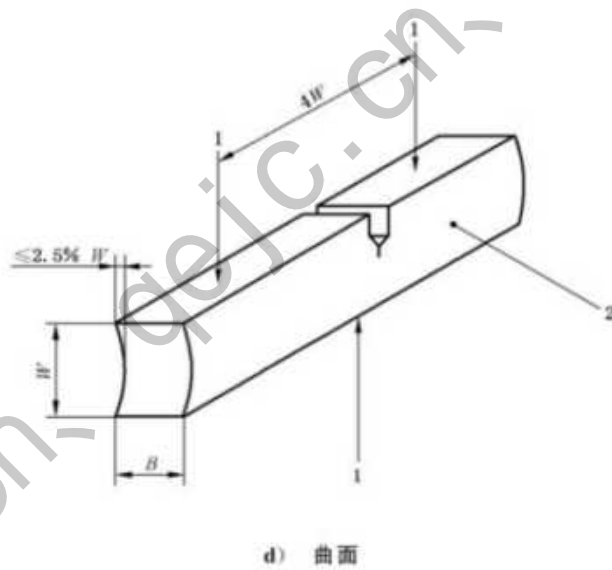
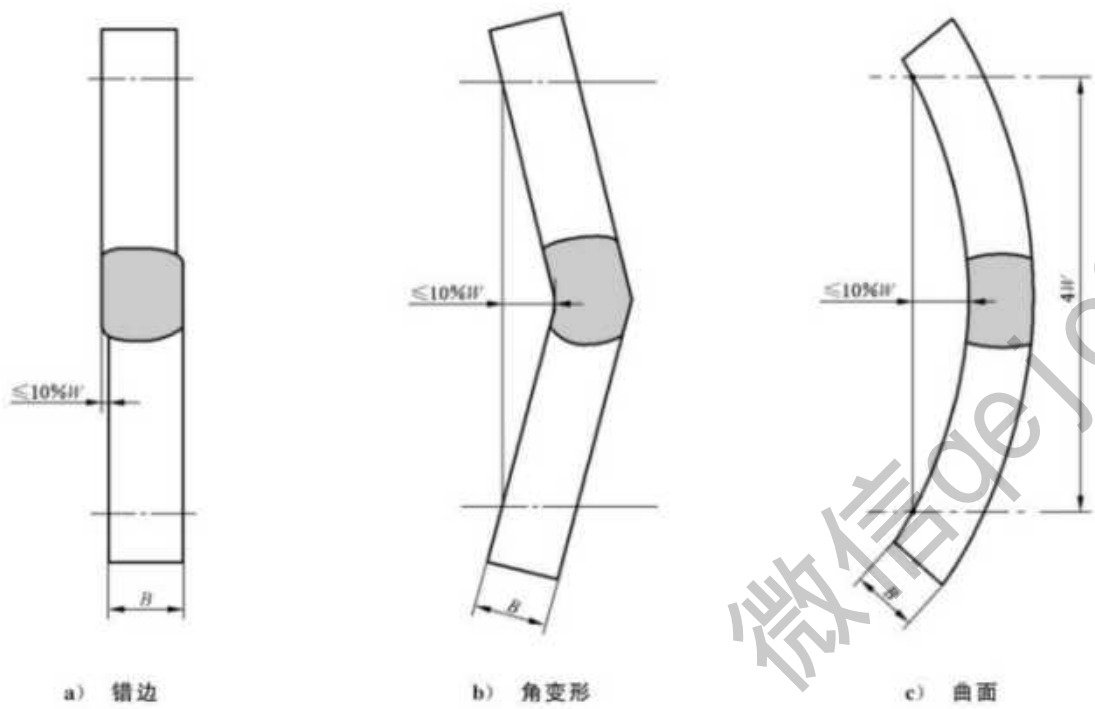
a —— 裂纹长度, $a=0.45W\sim 0.7W$ ；

X 为缺口宽度, $X=0.065W_{max}$ ；

力跨距为 $4W$ ；试样平直度要求见图 6。

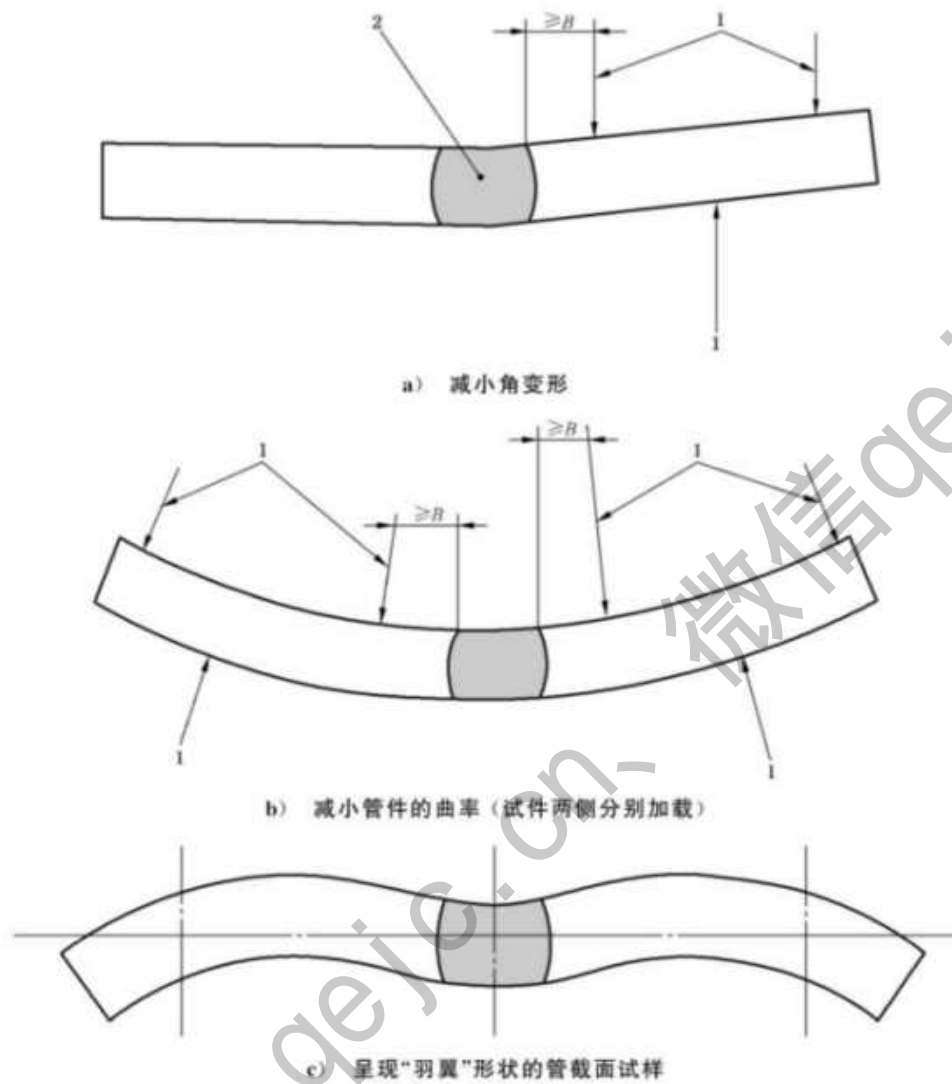
b) 方形截面试样

图 5 三点弯曲试样尺寸比例与公差



标引序号和符号说明：
 1 — 加载点；
 2 — 弧面；
 $4W$ — 跨距。

图6 三点弯曲试样所允许的几何尺寸公差



标引序号说明:

1——矫直加载点;

2——焊缝。

图7 三点弯曲毛坯试样的平直方法

当取自管材的样坯无法矫直时,可从管材上取一矩形块并与一个适当长度的延伸板焊接在一起。该矩形块应与延伸板组成一个具有足够长度的试样来满足图6的曲率要求。矩形块与延伸板的焊接位置应与原焊缝保持足够的距离,以免影响目标区域的显微组织。

注2:激光或电子束焊方法在焊接方形块与延伸板时具有焊缝窄、变形小的优点。

当试样采用全厚度样坯时,机加工量应尽量小,以满足公差以及局部压缩的相应要求(见C.2)。

焊缝余高部分应加工到与试件母材原始表面具有相同高度的位置。

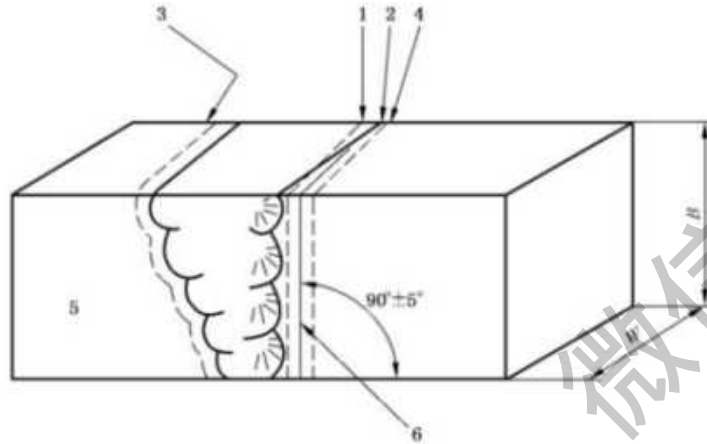
当焊缝两侧材料厚度相差10%或更多时,应按厚度较薄一侧尺寸加工试样。此时,应在报告中说明试样原始厚度与机加工后厚度的相应情况。

8.2 贯穿厚度试样缺口位置的确定

NP裂纹面方向的贯穿厚度试样缺口位置的确定如图8所示。在试样待加工缺口表面(面A)及相对的另一表面上(面B)均需进行研磨处理并腐蚀显现出焊缝和热影响区轮廓位置。然后沿着特定显微

组织区域在面 A 和面 B 各画出一条参考标识线,标识线与试样轴向方向垂直,误差为 $\pm 5^\circ$ 。两条标识线延伸到面 A 和面 B 的同一垂直侧面上。在两条延伸线中间等间距的位置画一条新的标识线,用来最终确定 A 面的缺口加工位置。

注:上述确定缺口位置的方法,其目的是当出现试样轴线方向与焊接方向不垂直且 $a_0/W=0.5$ 情况时,保证裂纹尖端最终落在目标区域(尤其是 HAZ 试件)。如果 $a_0/W \neq 0.5$,适当调整标识线以保证裂纹尖端最终落在目标区域。



标引序号说明:

- 1——标识线 A;
- 2——熔合线;
- 3——面 B (不开缺口面);
- 4——标识线 B;
- 5——面 A (开缺口面);
- 6——缺口。

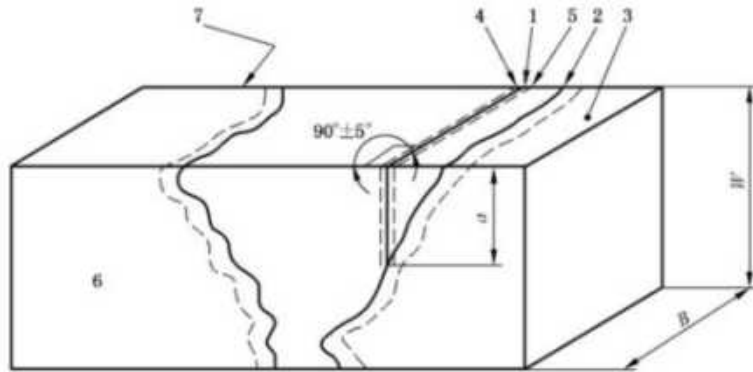
注: NP 裂纹面方向。

图 8 应用参考标识线来确定贯穿厚度试样缺口位置

8.3 表面缺口试样缺口位置的确定

NQ 裂纹面方向的表面缺口试样缺口位置的确定如图 9 所示。首先将试样与缺口加工面垂直的两个侧面在进行研磨、腐蚀后显示出焊缝和 HAZ。在这两个侧面上分别从特定显微组织区域画标识线至缺口加工面(标识线与试样轴向方向垂直,误差为 $\pm 5^\circ$)。在两条标识线的中间等间距的位置画一条新的标识线,用来最终确定缺口加工面的缺口加工位置。

注:上述确定缺口位置的方法,其目的是当出现试样轴线方向与焊接方向不垂直情况时,保证试样中间厚度处的裂纹尖端最终落在目标区域。



标引序号说明：

- 1——缺口；
- 2——熔合线；
- 3——开缺口面；
- 4——标识线 B；
- 5——标识线 A；
- 6——面 A；
- 7——面 B。

注：NQ 裂纹面方向。

图 9 表面缺口试样缺口位置确定

8.4 缺口加工

缺口加工应遵循 GB/T 21143 的要求。

9 试样预制

9.1 疲劳裂纹预制

疲劳裂纹预制应按照 GB/T 21143 进行。对于预制疲劳裂纹尖端位于焊缝金属的试样，预制疲劳裂纹的最大力(F_1)以及最大疲劳应力强度因子(K_{I1})应根据焊缝金属的拉伸性能进行估算，即根据疲劳裂纹所在部位材质的相应力学性能进行估算。而在其他任何情况下，应使用焊接接头各区域最低的拉伸性能进行估算。

所有焊后热处理或消除应力热处理都应当在预制疲劳裂纹之前进行。

在条件允许的情况下，推荐使用 GB/T 21143 规定的最短预制疲劳裂纹长度，这样可减少疲劳裂纹前缘弯曲以及裂纹偏离特定目标区域的可能性。

当预制疲劳裂纹过程中满足 12.3.3 中有关疲劳裂纹前端平直度的相应要求出现困难，尤其对于焊态或局部消除焊接残余应力的试样时，宜考虑使用附录 C 中的试验程序。

注 1：焊态和局部消除焊接残余应力试样中残余应力的大小和分布取决于母材、焊接工艺参数、拘束水平和焊后试样加工方式等诸多方面。

注 2：焊接残余应力可能对裂纹前缘平直度有不利的影响，而且可能对最终断裂韧度值有一定影响。

若试样是由已经消除了焊接残余应力的焊接接头加工而成，则可不进行疲劳裂纹预制，见附录 C。

注3：如果试样疲劳裂纹尖端区域的残余应力数值低或残余应力均匀分布，则所预制的疲劳裂纹有可能获得平直的前缘形状。

当预制疲劳裂纹过程中满足 12.3.3 中有关疲劳裂纹前端平直度的相应要求可能出现困难时，尤其对于焊态或局部消除焊接残余应力的试样，应考虑使用附录 C 中的试验程序。当使用附录 C 中修改的预制疲劳裂纹方法时，其断裂韧度测试结果应按照 12.3.4 所述方法进行计算。

9.2 试样侧面开槽

对于侧面开槽试样，疲劳裂纹预制程序应按 GB/T 21143 的有关要求进行。

10 试验装置、试验要求及步骤

测定 K_{IC} 、 δ 和 J 积分的试验装置、试验要求及试验程序应符合 GB/T 21143 的相关规定。

11 试验后金相检查

11.1 通则

对于 SM 试样，为了辨别疲劳裂纹尖端位置是否落在目标显微组织区域之内，在试验之后应再次进行金相检查，方法是从试样上截取含有断裂面的切片。当检查热影响区试样时，应在焊缝一侧切下含有热影响区的切片。截取切片后，应根据 11.2 和 11.3 的有关规定进行分析，确认疲劳裂纹尖端位置的显微组织。

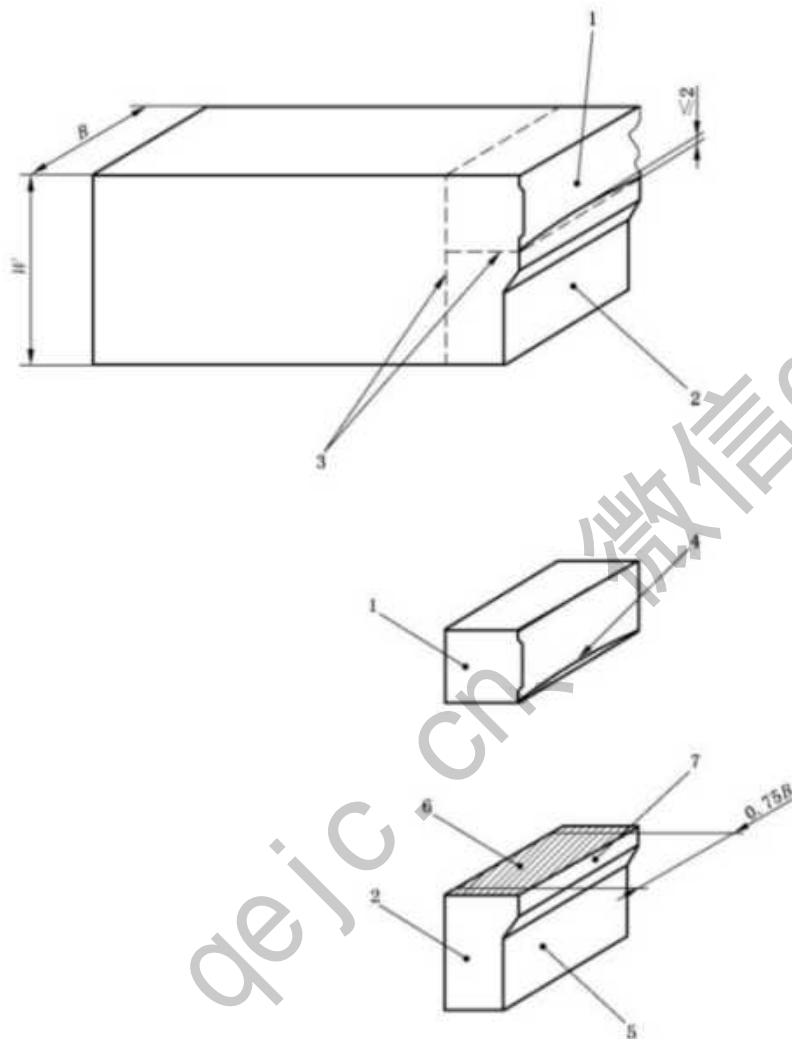
WP 试样试验后无需进行切片金相检查。

在脆性断裂情况下，如果已证实疲劳裂纹尖端落入目标显微组织区域之内，但这并不能保证解理裂纹一定启裂于该显微组织。为确认裂纹萌生部位的显微组织，(如有要求)或许有必要进行更进一步的切片与金相检查以验证该组织就是脆性裂纹启裂部位，切片的切取方法、金相检查方法与 pop-in 的评定过程中按照附录 D 的要求所采用的方法进行。

11.2 贯穿厚度缺口试样

11.2.1 切片

对于贯穿厚度缺口试样，切片应垂直断裂表面切割，截取位置距疲劳裂纹尖端的最大长度为 2 mm，并应保证在试样厚度中心 75% 范围含有疲劳裂纹 (B 为试样厚度，对于侧开槽试样则为 B_N) (见图 10，切片 A)。应对切片表面进行金相检查以确定疲劳裂纹尖端是否位于目标显微组织范围之内。



标引序号说明:

- 1—切片 B;
- 2—切片 A;
- 3—切口;
- 4—疲劳裂纹尖端;
- 5—机械缺口;
- 6—待检测表面(抛光和腐蚀);
- 7—疲劳预制裂纹。

图 10 贯穿厚度缺口试样试验后金相检查切片的截取方法

11.2.2 评定

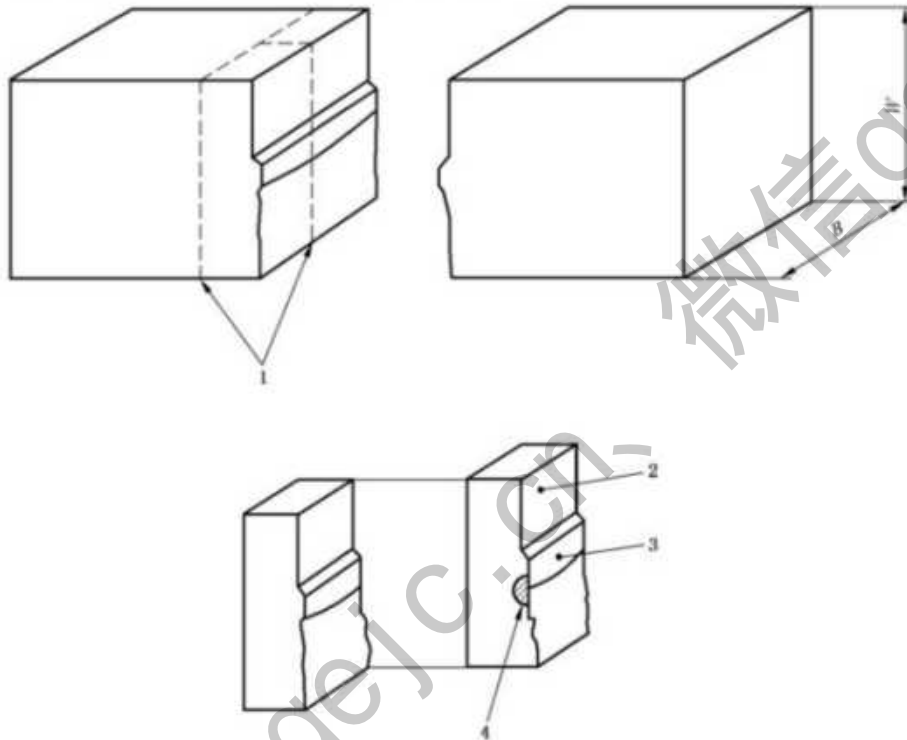
为了判断在试样厚度中心 75% (B 或者 B_N) 范围内疲劳裂纹尖端部位是否为目标显微组织, 应进行切片金相检查, 并记录试样厚度中心 75% 范围内的目标显微组织区域的长度及相应位置。热影响区缺口试样的切片金相检查实例见附录 B。

11.3 表面缺口试样

11.3.1 切片

如果试样发生解理断裂,则应采用适当的放大倍数对断裂面进行检查以确定裂纹萌生的确切位置,并至少在靠近断裂裂纹萌生部位制取一个切片。切片平面应垂直于缺口表面与裂纹平面(见图 11)。当仅发生裂纹稳定扩展时,切片则应在疲劳裂纹尖端最深处截取。

可以通过目测确定裂纹萌生位置,也可以借助于光学显微镜或扫描电镜等设备观察确认。



标引序号说明:

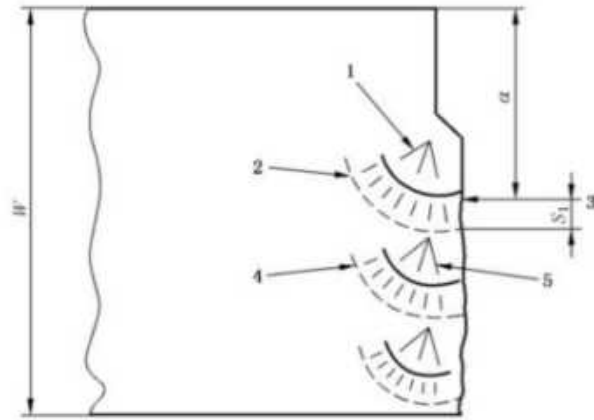
- 1——切口;
- 2——机械缺口;
- 3——疲劳预制裂纹;
- 4——待检测表面(抛光和腐蚀)。

图 11 表面缺口试样试验后金相检查切片的切取方法

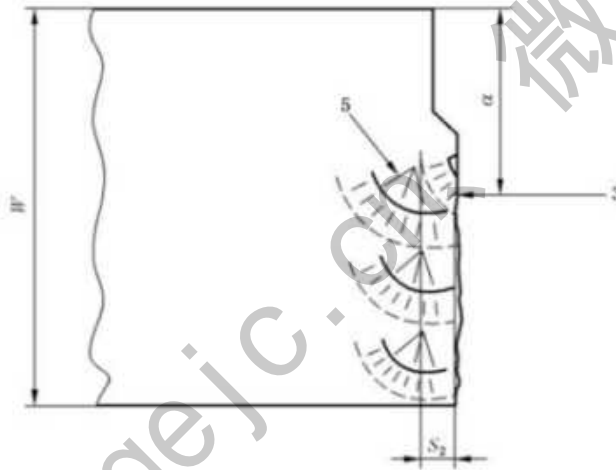
11.3.2 评定

应检查制备的切片表面金相,以确认疲劳裂纹尖端是否位于目标显微组织区域内。当目标显微组织区位于疲劳裂纹尖端前面时,两者之间最小距离应用 S_1 表示[S_1 的最大允许测量误差为 ± 0.05 mm,见图 12a)。当目标显微组织区位于疲劳裂纹尖端的一侧时,两者之间最小距离应用 S_2 表示[S_2 的最大允许测量误差为 ± 0.05 mm,见图 12b)。

注:为了确定这些距离可能需要在断裂表面两侧截取切片。



a) 目标区域微观组织位于疲劳裂纹尖端前沿



b) 目标区域微观组织位于疲劳裂纹尖端一侧

标引序号说明：

- 1——柱状焊缝金属；
- 2——再热焊缝金属；
- 3——疲劳裂纹尖端；
- 4——再热焊缝金属；
- 5——SM(目标区域微观组织)。

注：NQ裂纹面方向。

图 12 SM 表面缺口试样 S_1 和 S_2 的测量

11.4 Pop-in 效应评定

当力下降和位移增加均不足 1% 时, pop-in 应忽略不计。除非根据附录 D 规定的相应程序进行断口形貌分析和金相检查后认定 pop-in 可忽略, 否则就应对试验过程中产生的 pop-in 效应予以考虑。

注：GB/T 21143 介绍的有关 pop-in 评定准则主要适用于均质材料的断裂韧性试验, 但不一定适用于焊缝金属试样。大量试验表明, 对于焊接部位断裂韧性试验, pop-in 尺寸可能与存在于疲劳裂纹尖端区域的脆性材料长度有关, 裂纹尖端位置微小的变动会改变 pop-in 尺寸大小。

12 试验结果分析

12.1 拉伸性能选择

当裂纹尖端完全位于焊缝金属时,应采用全焊缝金属拉伸试样测出其拉伸性能;当裂纹尖端位于或部分位于热影响区时,应采用母材或焊缝二者中较高的拉伸性能。

注 1: 热影响区 CTOD 变化很复杂,总的来说,它受热影响区尺寸、屈服强度以及附近显微组织的影响。当采用母材和焊缝二者中强度较高的拉伸性能时,则能够得到趋于保守的 CTOD 断裂韧度值。

注 2: 当考虑焊缝强度失配情况下,通过协商在母材与焊缝金属强度中选取用于评估的拉伸强度^[4-3]。

对于碳钢和碳-锰钢,当母材和焊缝的拉伸性能不能直接测量时,采用硬度值来估算其拉伸性能。

式(1)~式(4)描述了室温下拉伸性能(MPa)与硬度(HV10)之间的关系:

$$\text{当 } 160 < \text{HV10} < 495, \text{母材}^{[6]}: R_{p0.2b} = 3.28\text{HV10} - 221 \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{当 } 170 < \text{HV10} < 330, \text{焊缝}: R_{p0.2w} = 2.35\text{HV10} + 62 \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{当 } 100 < \text{HV10} < 400, \text{母材}: R_{mb} = 3.3\text{HV10} - 8 \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{当 } 170 < \text{HV10} < 330, \text{焊缝}: R_{mw} = 3.0\text{HV10} + 22.1 \quad \dots\dots(4)$$

对于铁素体钢,当试验温度低于室温且在试验温度下的 0.2% 塑性变形量所对应的规定塑性延伸强度没有提供时,低温时的屈服强度与抗拉强度关系可用式(5)与式(6)估算^[7]:

$$R_{p0.2}(\text{低温环境, 温度值为 } T) = R_{p0.2}(\text{室温环境}) + \frac{10^3}{491 + 1.8T} - 189 \quad \dots\dots(5)$$

$$R_m(\text{低温环境, 温度值为 } T) = R_m(\text{室温环境}) \left\{ 0.7857 + 0.2423 \exp\left(\frac{-T}{170.646}\right) \right\} \quad \dots\dots(6)$$

式中:

T ——试验温度,单位为摄氏度(°C),一般要求高于-196 °C。

12.2 断裂韧性的确定

12.2.1 K_{IC}

测定 K_{IC} 的试验数据分析应根据 GB/T 21143 的有关规定执行,但根据 12.1 的相应要求,还应注意考虑如何合理选用 $R_{p0.2}$ 。

12.2.2 δ

不考虑延性裂纹扩展的 CTOD(裂纹尖端张开位移 δ_0) 值的计算方法应按照式(7)~式(11)来进行。

对于三点弯曲试样:

$$\delta_0 = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left(\frac{1 - \nu^2}{m R_{p0.2} E} \right) + \tau \cdot \left[\frac{0.43(W - a_0) V_p}{0.43(W - a_0) + a_0} \right] \quad \dots\dots(7)$$

对于紧凑拉伸试样:

$$\delta_0 = \left[\frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_2 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left(\frac{1 - \nu^2}{m R_{p0.2} E} \right) + \tau \cdot \frac{0.52(W - a_0) V_p}{0.52(W - a_0) + a_0} \quad \dots\dots(8)$$

其中:

$$m = 4.9 - 3.5 \frac{R_{p0.2}}{R_m} \quad \dots\dots(9)$$

注: 当考虑保证所测试的试样获得的断裂韧度具有足够保守性时,通过协商确定 m 是否固定取 2。

当 $B > 25 \text{ mm}$ 时:

$$\tau = \left[-1.4 \left(\frac{R_{p0.2}}{R_m} \right)^2 + 2.8 \frac{R_{p0.2}}{R_m} - 0.35 \right] \{ 0.8 + 0.2 \exp[-0.019(B - 25)] \} \quad \dots\dots\dots (10)$$

当 $B \leq 25$ mm 时:

$$\tau = -1.4 \left(\frac{R_{p0.2}}{R_m} \right)^2 + 2.8 \left(\frac{R_{p0.2}}{R_m} \right) - 0.35 \quad \dots\dots\dots (11)$$

其中, $S, W, F, B, B_N, g_1(a_0/W), g_2(a_0/W)$ 等均在 GB/T 21143 中予以定义, V_p 是 V 的塑性部分。当使用附加刀口时, 采用式(12)~式(14)将钳形夹位移(V_g)转化为裂纹嘴张开位移(V)。

对于三点弯曲试样:

$$V = \frac{0.43(W - a_0) + a_0}{0.43(W - a_0) + a_0 + z} V_g \quad \dots\dots\dots (12)$$

对于直缺口紧凑拉伸试样:

$$V = \frac{0.52(W - a_0) + a_0}{0.52(W - a_0) + a_0 + 0.25W + z} V_g \quad \dots\dots\dots (13)$$

对于阶梯缺口紧凑拉伸试样:

$$V = \frac{0.52(W - a_0) + a_0}{0.52(W - a_0) + a_0 + z} V_g \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

z ——测定缺口张开位移的引伸计装卡位置与试样表面之间的距离, 具体定义见 GB/T 21143。

当发生延性裂纹扩展且 CTOD 断裂韧性需要采用阻力曲线定义时, 应按照 GB/T 21143 所规定相应测试流程进行, 但同时应符合 12.1 的相关规定。

12.2.3 J 积分

J 积分的试验数据分析应根据 GB/T 21143 的有关规定执行, 同时应符合 12.1 中的相关要求。

12.2.4 浅缺口弯曲试样

当采用浅缺口弯曲试样时 ($0.10 \leq a_0/W \leq 0.45$), 应根据附录 E 对试验数据记录进行处理, 以确定未经过延性裂纹扩展量修正的单点 J_0 与 δ_0 值。

12.3 有效性评定

12.3.1 总则

GB/T 21143 所有规定及下述评定内容适用于本文件。

12.3.2 焊缝宽度与韧带尺寸比

当裂纹位于焊缝金属中心且满足如下条件时^[9,10], 则 δ 试验的相应步骤应依据本文件进行:

- 当裂纹位于焊缝中心线: 焊缝宽度(在试样厚度中心 75% 范围内焊缝两侧熔合线之间的最短距离)与试样厚度中心 75% 范围内韧带尺寸之间的比值应大于 0.2, 即 $2h/(W - a_0) > 0.2$ (贯穿厚度缺口试样见图 13a) 和图 13b, 表面缺口试样见图 14a) 和图 14b);
- 当裂纹偏离焊缝中心线: 有效焊缝宽度(在试样厚度中心 75% 范围内裂纹平面与焊缝熔合线之间的最短距离)与试样厚度中心 75% 范围内韧带尺寸之间的比值应大于 0.1, 即 $h/(W - a_0) > 0.1$ (贯穿厚度缺口试样见图 13c) 和图 13d, 表面缺口试样见图 14c) 和图 14d);
- 对 a)、b) 两种情况, 附加要求是焊缝金属与母材金属 0.2% 规定塑性延伸强度之比的限定范围应为 0.5~1.50, 即式(15)

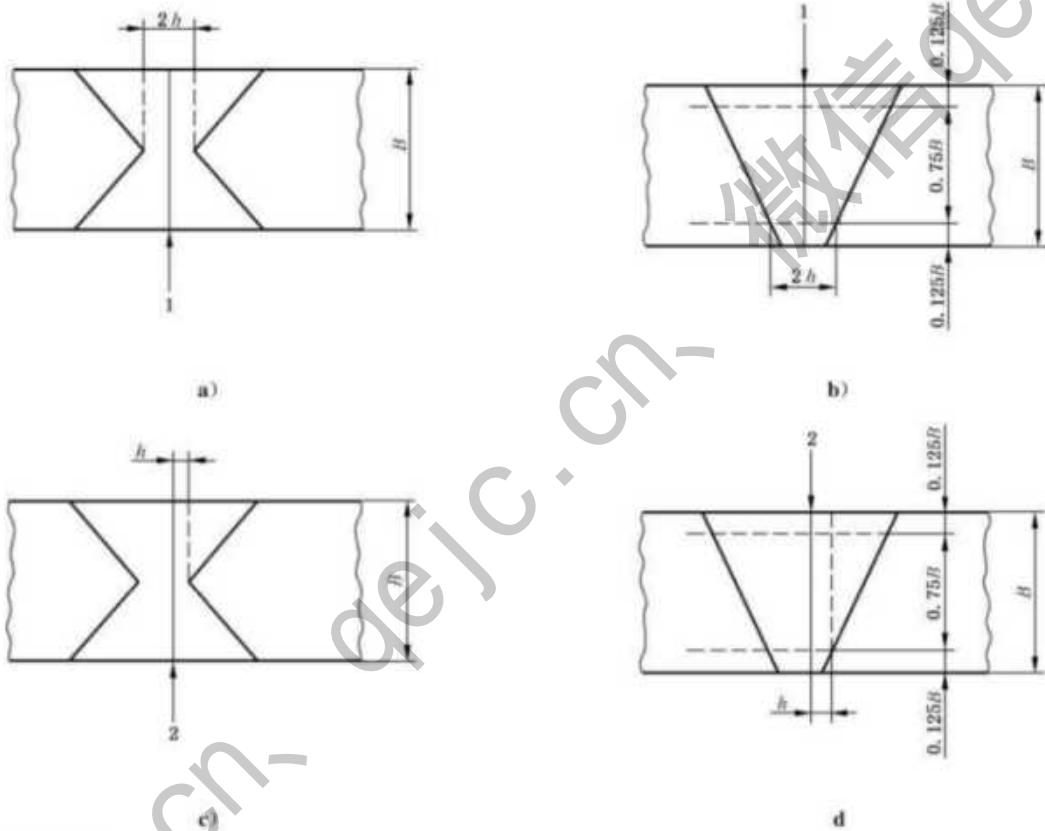
$$0.50 < \frac{R_{p0.2w}}{R_{p0.2h}} < 1.50 \quad \dots\dots\dots (15)$$

对于焊缝金属试样,如果焊缝金属与母材金属 0.2%规定塑性延伸强度之比为 0.5~1.25,则 J 积分评定程序^[8,7]应依据本文件,即式(16)

$$0.50 < \frac{R_{p0.2w}}{R_{p0.2b}} < 1.25 \quad \dots\dots\dots(16)$$

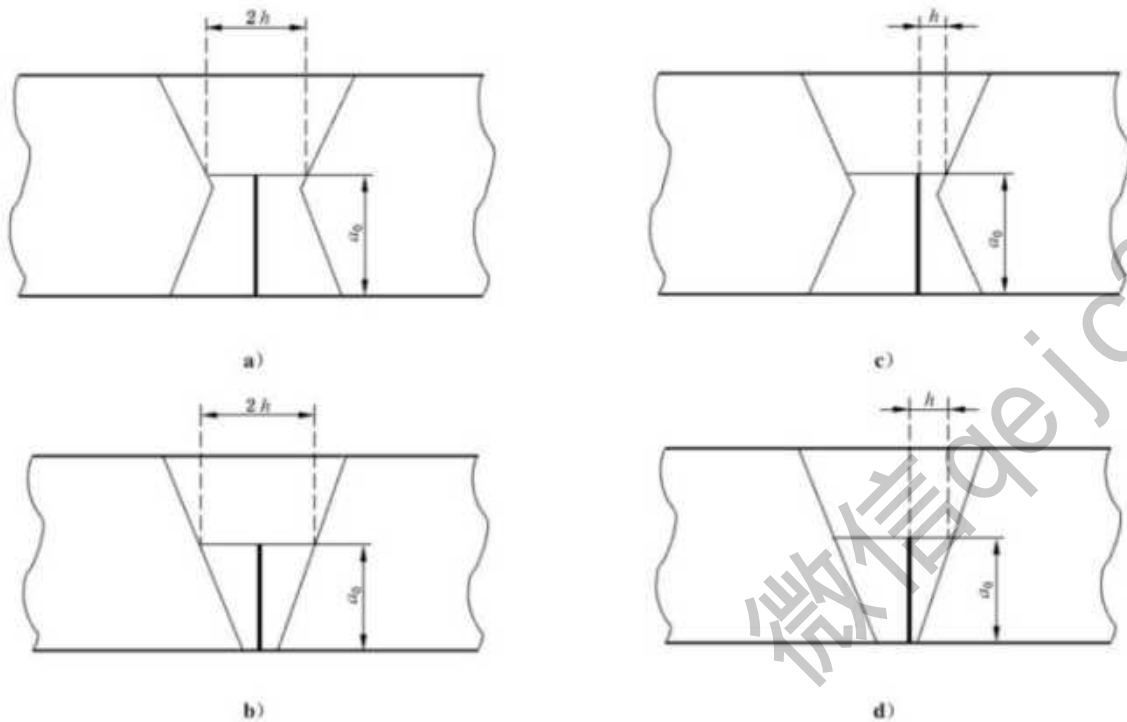
对于热影响区试样, δ 和 J 积分评定程序应采用 GB/T 21143 的相应规定(根据 12.1 选用屈服强度计算 δ)。在试验报告中应分列出母材和焊缝金属的 0.2%规定塑性延伸强度。

注:焊缝金属 δ 和 J 积分评定结果可能会产生 $\pm 10\%$ 左右的误差。当 $R_{p0.2w}/R_{p0.2b} > 1.50$ (对于 δ)和 > 1.25 (对于 J 积分),试验结果将比真实值高出 10%以上;而当 $R_{p0.2w}/R_{p0.2b} < 0.50$ (对于 δ 和 J ^[8,7]),试验计算结果将比真实值低出 10%以上。当 $0.7 < R_{p0.2w}/R_{p0.2b} < 2.5$ 时,热影响区 J 积分评定程序可能会产生 $\pm 5\%$ 左右的误差,热影响区 δ 评定程序所产生的误差范围介于 $-20\% \sim +10\%$ 之间^[1]。



标引序号说明:
 1——裂纹沿焊缝中心线;
 2——裂纹偏离焊缝中心线。

图 13 贯穿厚度缺口试样(NP)焊缝中 h 和 $2h$ 的定义

图 14 表面缺口试样(NQ)焊缝中 h 和 $2h$ 的定义

12.3.3 裂纹前缘平直度要求

裂纹长度的测量应符合 GB/T 21143 的要求。对于进行 δ 和 J 积分试验的采用三点弯曲试样时，中间 7 点裂纹长度与 9 点裂纹平均值的差值应不超过 $20\%a_0$ ；而对于进行 δ 和 J 积分试验的紧凑拉伸试样和进行 K_{Ic} 试验的试样（包括三点弯曲试样和紧凑拉伸试样两种）的疲劳裂纹前端的平直度要求则应完全符合 GB/T 21143 的要求。

注 1：对裂纹尖端平直度的要求是基于三点弯曲类型试样的经验获得的^[1]。

注 2：为满足 SM 和 WP 试验的要求，不能降低 K_{Ic} 试验和采用紧凑拉伸类型试样的 δ 和 J 积分试验对疲劳裂纹前端平直度的要求，采用 GB/T 21143 中更为严格的要求。

12.3.4 区别不同断裂韧度值的符号

除了在 GB/T 21143 已经定义过的用于区别不同断裂韧度值的符号之外，本文件中还应使用下列符号：

- 如果未采用按照附录 C 的相应步骤进行疲劳裂纹预制的试样获得的断裂韧度值，则应采用 K, J, δ （没有上标）来表示。
- 如果采用按照附录 C 的相应步骤进行疲劳裂纹预制的试样获得的断裂韧度值，则应采用 K^M, J^M, δ^M （以 M 为上标）表示。

12.3.5 贯穿厚度缺口试样

当按照 11.2 对 SM 试样切片所进行金相检验的结果满足下列条件时，应认定试验测定的断裂韧度是有效的，即试样厚度（ B 或者 B_N ）中心 75% 范围特定显微组织区域内，如未满足上述要求，则判定特定显微组织的断裂韧度值没有被测出，即应认为试验结果无效。

12.3.6 表面缺口试样

当按照 11.3 对 SM 试样切片所进行金相检验的结果满足下列条件时,应认定试验测定的断裂韧度结果有效:疲劳裂纹尖端位于特定显微组织或者 S_1 和 S_2 值(见 11.3.2)小于 0.5 mm。如果不能满足上述要求,则判定特定显微组织的断裂韧度值没有被测出,应认为试验结果无效。

13 试验报告

试验报告应符合 GB/T 21143 的要求,并给出以下信息:

- a) 试样类型,标明试验采用的是焊缝位置 WP 试样还是特定显微组织 SM 试样;
- b) 依照图 2、图 3 和图 4 指明裂纹平面方位;
- c) 焊缝及近缝区母材的原始厚度;
- d) 焊缝金属和母材金属拉伸性能及其试验方法;
- e) 疲劳裂纹尖端位置是否位于目标区域的确认结果。

如果需要,加入以下内容:

- f) 试验前宏观金相检查结果;
- g) 有效焊缝宽度(h);
- h) 预制平直疲劳裂纹前缘的具体方法,在试验报告应使用 12.3.4 规定的试验结果符号上标注规则;
- i) 按附录 D 给出 pop-in 效应的评定结果;
- j) SM 缺口的 S_1 和 S_2 值;
- k) 按附录 E 采用浅缺口三点弯曲试样进行试验,给出相应的 a_0/W 值。

附录 A
(资料性)
试样缺口位置示例

本附录给出了焊缝和热影响区(HAZ)贯穿厚度和表面缺口试样的典型缺口位置示例。图 A.1 给出了焊缝位置(WP)试样缺口位置示例,图 A.2 给出了特定显微组织(SM)试样缺口位置示例。

	方位	尺寸 (厚度×宽度)	缺口部位
a)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	焊缝金属中心线
b)	NQ	$B \times B$	起始于焊缝根部的 焊缝金属中心线
c)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	缺口与熔合区在板厚中心 相交的热影响区
d)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	缺口与熔合区在 $1/4$ 板厚 处相交的热影响区
e)	PQ	$B \times B$	横切焊缝
D)	PN	$B \times B$	横切焊缝和焊缝中心线

标引符号说明：
 B —— 试样厚度；
 W —— 试样宽度；
 a —— 标称裂纹长度。

图 A.1 焊缝位置(WP)试样缺口位置示例

	方位	尺寸 (厚度×宽度)	缺口部位
a)	NP	$B \times B$	焊缝中心线为柱状焊缝金属
b)	NQ	$B \times B$	焊根或双面焊后焊一侧焊缝金属
c)	NQ	$B \times B$	靠近柱状焊缝金属的GHAZ
d)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	堆敷柱状焊缝金属的最大体积处
e)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	柱状焊缝金属的最大体积处
f)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	裂纹前沿位于HAZ的一个特定组织区

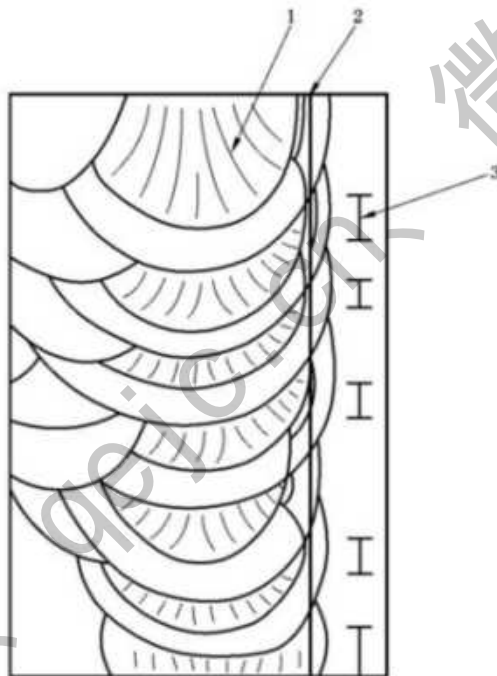
标引符号说明：
 B —— 试样厚度；
 W —— 试样宽度；
 a —— 标称裂纹长度。

图 A.2 特定显微组织(SM)试样缺口位置示例

附录 B
(资料性)
试验前后金相检查示例

对于 HAZ(热影响区)SM 试样,试验前要进行宏观腐蚀和金相检查。图 B.1 和图 B.2 给出了紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 显微组织数量的计算方法。图 B.2 显示了如何在试样厚度中心 75% 范围内的宏观金相切面(图 B.1)上绘制确定的特定显微组织分布图。在图 B.2 中沿着理想缺口线分布的各个 SM 特定显微组织块,其长度通常用 λ 比表示。在试样厚度中心 75% 范围内,长度 λ 的百分比之和($\sum \lambda$)即为 SM 试样特定显微组织的百分数。

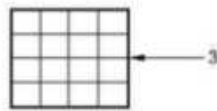
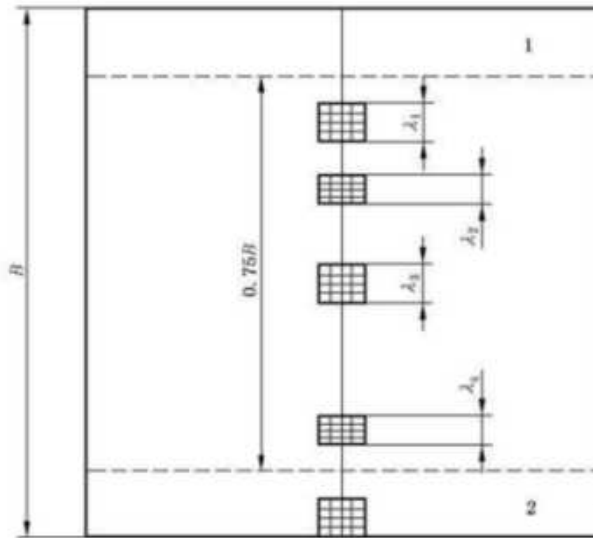
当规定进行 SM 试验时,需进行试验后的金相检查,以确认疲劳裂纹尖端是否落在目标微观组织。例如对图 10 的切面 A 应按照图 B.2 所示的方法绘制显微组织分布图。



标引序号说明:

- 1——柱状焊缝金属;
- 2——理想缺口线;
- 3——柱状焊缝金属对应的热影响区。

图 B.1 在宏观金相切面上紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 理想缺口线



标引序号说明：
 1——顶部；
 2——根部；
 3——目标热影响区。

注：特定微观组织所占百分比(厚度中心 75% 范围内) = $\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{0.75B} \times 100\%$ 。

图 B.2 紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 显微组织分布图

对于贯穿厚度缺口试样中心 75% 厚度范围内的特定显微组织区域累计长度总和值一般由试验各方协商确定。本附录参照 DNV OS B101^[2] 给出适用于粗晶热影响区试验后金相检查的相关要求示例：

(1) 在试样厚度 $t \leq 20$ mm 时, 见式(B.1)：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 3 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

(2) 在试样厚度 $20 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$ 时, 见式(B.2)：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 0.15t \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

(3) 在试样厚度 $t > 80$ mm 时, 见式(B.3)：

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 12 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

附录 C

(资料性)

消除残余应力和预制疲劳裂纹方法

C.1 总则

对焊态或应力部分释放试样,在预制疲劳裂纹之前,通常需采用 C.2、C.3 以及 C.4 介绍的技术手段进行预处理。经协商可采用其他文献列举并证实有效的预处理方法,并在试验报告中指明所使用预处理技术的名称。

注 1:对于通过焊后热处理消除应力的焊接接头试样一般不需采用此技术。

注 2:焊态或应力部分释放试样会存在一定数值的焊接残余应力,但试样内的残余应力大小与分布可能不同于制备试样的焊接试板。由于残余应力的存在可能导致疲劳裂纹前缘形状不可接受,更有甚者会影响断裂韧度值。经验表明:为了减少这些影响,在预制疲劳裂纹之前采用局部压缩的方法将降低残余应力大小并且使其分布均匀化^[10-11],当焊缝截面厚度较大时局部压缩处理法不方便采用时,采用其他的能够产生平直疲劳裂纹前缘的方法,例如阶梯高应力比方法^[12]或者反向弯曲法^[16-17]。然而,该方法的缺点是在疲劳裂纹尖端韧带区域($W-a_0$)仍然会保留一定的残余应力,从而影响断裂韧度的测试结果^[12]。

注 3:局部压缩方法在特定试验条件下会影响某些材料的断裂韧性,但其影响程度很难预测。经验表明与保证裂纹尖端平直度这一有利影响相比,该方法是可取的。

注 4:在选择上述改良技术但缺乏将相关技术用于受试材料的经验时,本文件建议在制定试验程序过程中考虑备用试样的准备,以保证能够获得足够数量的满足疲劳裂纹尖端平直度接受要求的试样。

C.2 局部压缩方法

局部压缩^[12-13]的具体方法是:在预制疲劳裂纹和开侧槽之前对包括缺口尖端在内的 88%~92%韧带($W-a$)部分用较硬的钢块进行挤压,使其产生约为试样厚度 1%的压缩塑性变形(见注 1 和注 2)。在进行机械缺口加工之前也允许进行局部压缩处理。矩形或方形截面试样的加载方式见图 C.1。根据试样厚度(B),既可采用单面压缩的方式,也可采用双面压缩的方式。如果采用双面压缩的方法,需保证两个面均产生 0.5%B 的压缩塑性变形(见图 C.1)。允许采用逐级分步方式加载至最终载荷。

针对 $B \times 2B$ 矩形截面试样,可采用施加压力较低、压块截面较小的多次局部压缩方法。针对 $B \times B$ 方形截面试样中使用这种方法,钢块压面尺寸需不小于 0.5B(见图 C.1)。此外,最后一次压缩变形区域需尽可能靠近缺口尖端。

施加力的次数需达到产生足够塑性变形量的要求,此时压缩塑性变形量测量最大允许误差为 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 或 $\pm 0.1\%B$,并在两者中取较大者。

对于局部压缩试样还应当注意的是在预制疲劳裂纹力和应力强度因子参量计算中,其 B 值需采用压缩之后的试样厚度进行计算。

注 1:有必要对试样两侧面的压缩韧带部分进行表面加工,以保证加压时表面光滑一致且变形均匀。

导致三点弯曲试样加载部位产生变形的任何韧带背面凸起需加工去除。

注 2:经验表明,1%B 的总变形量对一些焊缝和母材来说可能太大,因此为了得到更平直的疲劳裂纹前缘应减少塑性变形量,有必要通过试验获得最佳压缩值。

C.3 反向弯曲

在常规疲劳裂纹预制之前,对试样加工缺口施以压缩应力^[14-17,18,19](即对试样施加反向弯曲),目的是在机械加工缺口尖端诱导产生一定压缩塑性变形区域,使得贯穿整个厚度的拉伸残余应力均匀化。也就是在缺口侧施加一单循环弯曲载荷,建议反向弯曲采用四点弯曲的加载方式,避免出现加工缺口和整体刀口被挤压损坏。反向弯曲时压头不允许与机加工缺口面接触。反向弯曲载荷(P_r)由式 C.1

确定。

$$P_{rh} = L_r \cdot P_L = L_r \frac{B(W - a_m)^2}{S - S_s} R_{p0.2} \dots\dots\dots (C.1)$$

其中, B 、 W 、 a_m 、 $R_{p0.2}$ 等根据 GB/T 21143 给出, S_s 是四点弯曲的内施力点之间的短跨距; L_r 是 P_{rh} 与极限荷载 P_L [20] 之间的载荷比。反向弯曲的经验表明; L_r 的最佳实施范围为 0.6~1.0, L_r 的选择取决于试样的焊接残余应力条件。

由反向弯曲载荷所产生的压缩塑性区尺寸(ω_{rh})可由式(C.2)估算:

$$\omega_{rh} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{rh}}{L \cdot R_{p0.2}} \right)^2 \dots\dots\dots (C.2)$$

其中, K_{rh} 是反向弯曲荷载(P_{rh})条件下的应力强度因子, 在四点弯曲加载条件下的计算公式如式(C.3)所示:

$$K_{rh} = \frac{P_{rh}(S - S_s)}{B \times W^{1.5}} g_1 \left(\frac{a_m}{W} \right) \dots\dots\dots (C.3)$$

其中, 无量纲函数 [$g_1(a_m/W)$] 表达式见 ISO 12135:2021 附录 D。

公式中 L 为缺口约束系数, 矩形与方形截面试样的缺口约束系数取 2.3 [17]。反向弯曲后, 再根据 9.1 的要求预制疲劳裂纹。建议目标疲劳裂纹长度(a_1)在 $1.0\omega_{rh} \sim 1.5\omega_{rh}$ 之间。疲劳裂纹需扩展超过 ω_{rh} [17], 扩展超过 $1.5\omega_{rh}$ 的疲劳裂纹将承受反向弯曲塑性区之外的焊接残余应力。以加工缺口长度比 (a_m/W) 等于 0.475 为例, 表 C.1 给出了建议的载荷比、目标疲劳裂纹长度(a_1)。

表 C.1 推荐加载比率(L_r)、疲劳裂纹预制长度(a_1)目标值($a_m/W=0.475$)

L_r	ω_{rh}/W	a_1/W		$a_0/W = (a_m + a_1)/W$	
		$1.0\omega_{rh}/W$	$1.5\omega_{rh}/W$	$a_0/W = (a_m + 1.0\omega_{rh})/W$	$a_0/W = (a_m + 1.5\omega_{rh})/W$
0.6	0.012	0.012	0.018	0.487	0.493
0.7	0.017	0.017	0.025	0.492	0.500
0.8	0.022	0.022	0.033	0.497	0.508
0.9	0.028	0.028	0.042	0.503	0.517
1.0	0.034	0.034	0.051	0.509	0.526

能够采用其他缺口深度与试样宽度之比, 包括浅缺口三点弯曲试样。在这种情况下, 计算结果与表 C.1 所示类似, 并采用式(C.1)、式(C.2)、式(C.3)选择 a_m/W 。

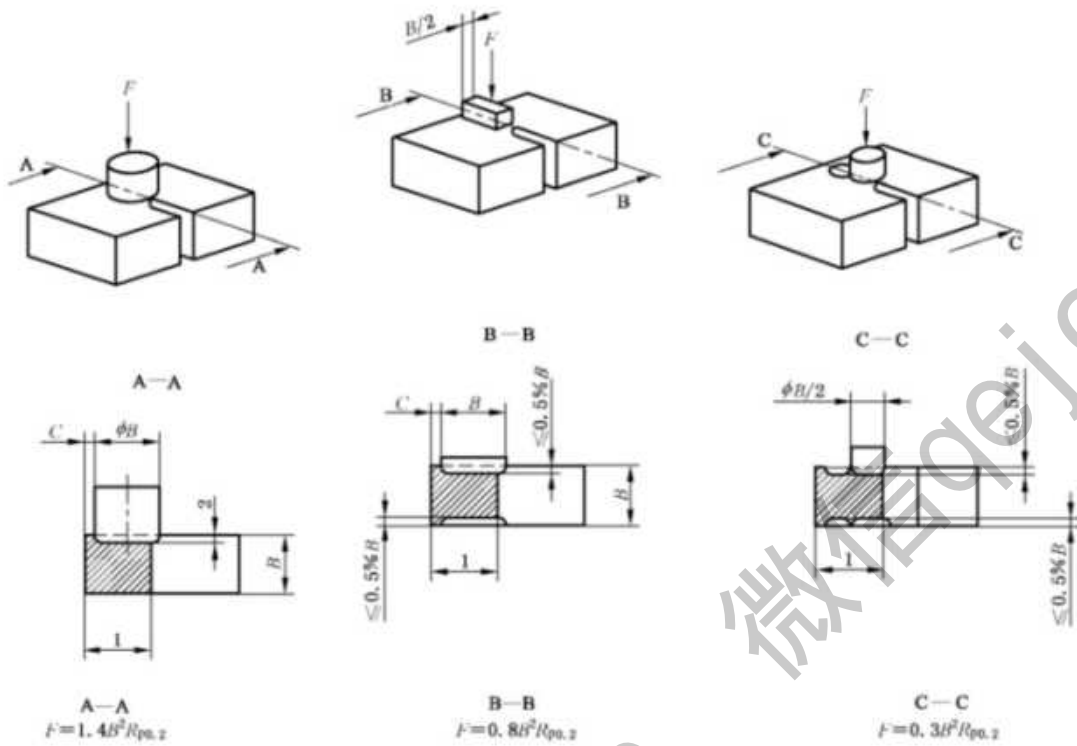
注 1: 经验表明, 测试大尺度(即厚度超过 50 mm)试样时, 当采用局部压缩有效性难以保证时, 采用反向弯曲方法可能是有效的。

注 2: 经验表明, 实施反向弯曲并不是总是有效的 [15-16], 并且不会显著降低疲劳裂纹尖端的焊接残余应力水平 [19], 然而残余应力的存在可能会影响试验结果。

C.4 阶梯高应力比方法

阶梯高应力比方法中 [14], 疲劳裂纹的预制分两步, 每步采用不同的疲劳循环应力比 R 。第一步采用循环应力比 $R=0.1$ (也就是常用的预制疲劳裂纹 R 值), 预制约 1 mm 长的疲劳裂纹。第二步的疲劳循环应力比 R 增加到 0.7 左右, 将疲劳裂纹扩展到预定的长度。需要注意的是在这两个疲劳裂纹预制阶段均采用同一 K_I 值(最大力所对应的应力强度因子值)。

注: 使用 $R>0.1$ 预制疲劳裂纹的方法与 GB/T 21143 的要求不一致, 经验表明这种预制疲劳裂纹的方法可能会使断裂韧度的测量值偏高 [12-20]。



标引序号说明：

1— W 减去机械缺口长度；

2— $1\%B$ (或两侧各 $0.5\%B$)。

注 1: $R_{p0.2}$ 取母材和焊缝金属的较低值；

注 2: C 取 $8\%(W-a) \sim 12\%(W-a)$ 。

图 C.1 $B \times 2B$ 矩形试样供选局部压缩处理方法

(针对 $B \times B$ 方形截面试样, 采用的圆柱形压块直径为 $B/2$, 压力 $F = 0.3B^2 R_{p0.2}$; 也能采用长宽均为 $B/2$ 方形截面压块, 压力 $F = 0.4B^2 R_{p0.2}$)

附录 D
(规范性)
pop-in 效应评定

D.1 通则

此评定步骤应用于评定由 11.4 确定为有效的 pop-in 效应。

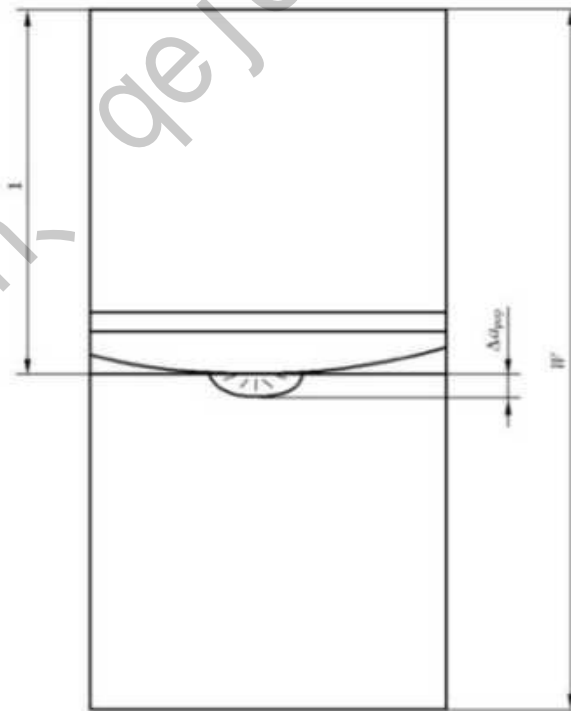
根据 GB/T 21143 确认为有效的 pop-in 效应(例如按照 GB/T 21143 的要求,计算出的 $P_{pop-in} > 5\%$),无需在试验后进行断口分析和金相检查,即可判定为有效的 pop-in 效应。如果根据 GB/T 21143 被判定确认为无效的 pop-in 效应(按照 GB/T 21143 的计算得到的 $P_{pop-in} < 5\%$,但是力下降和位移均大于 1%的情况),应根据 D.2~D.5 逐步进行断口分析与金相检查来确定其有效性。

除经过金相检查后被确认无效的 pop-in 效应之外,所有 pop-in 效应都应予以重视。第一次出现 pop-in 效应的 δ 和 J 积分值应分别标记为 δ_{pop} 和 J_{pop} 。

D.2 断口分析

对两个断裂表面进行仔细检查,确认在疲劳裂纹平面内有无脆性裂纹止裂现象,并且测出不包括伸张区 SZW(Δa_{pop})在内的脆性裂纹扩展量(见图 D.1)。如果在疲劳裂纹平面内无脆性裂纹止裂现象出现,该 pop-in 效应的确认仍应按 GB/T 21143 的有关规定进行。

垂直于疲劳预制裂纹面扩展的裂纹被止住时也可能引起 pop-in 效应,这情况被认为是“撕裂”。对于由撕裂 pop-in 效应获得的断裂韧度应在报告中予以说明,但此结果可能并不代表预期裂纹面方位材料的断裂韧度,撕裂面的断裂韧度可能有必要用不同裂纹面方位的其他试样来确定^[22-23]。关于撕裂 pop-in 效应的有效性评定已超出本文件的范围。

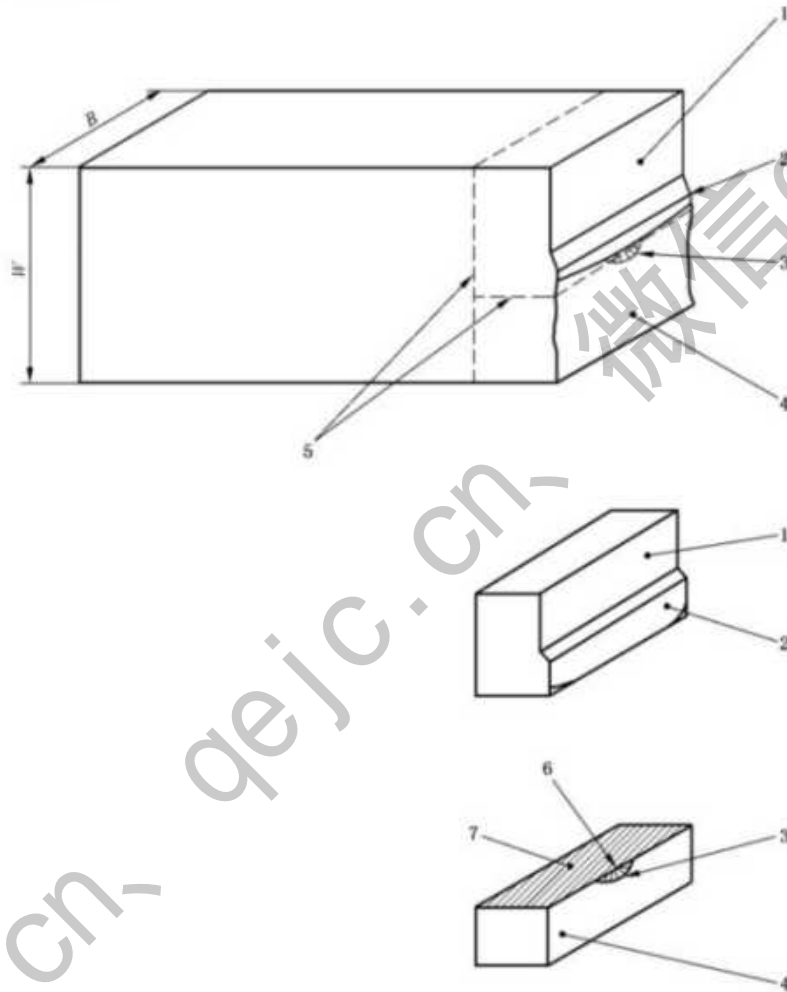


标引序号说明:
1—— a 或 $a + \Delta a$ 。

图 D.1 Δa_{pop} 的测量

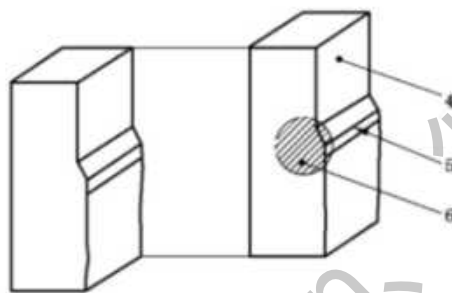
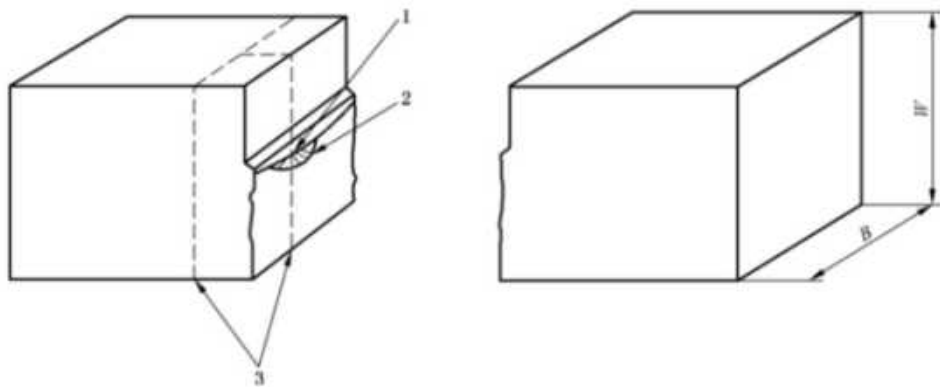
D.3 切片与金相检查

应用光学显微镜和/扫描电镜检查含有脆性裂纹止裂痕迹的两个断面或其中的一个断面,确认裂纹起始部位。如果裂纹尖端位于热影响区内,则应检查靠近焊缝一侧的断面。确认完毕起裂点位置之后,应在起裂点部位并沿垂直于疲劳裂纹面的方位截取金相检查切片,用于对起始点进行金相检查。贯穿厚度缺口试样的切片截取方法见图 D.2,表面缺口试样的切片截取方法见图 D.3。切片试样的抛光、腐蚀应按常规的金相方法进行。



- 标引序号说明:
- 1——切片 A;
 - 2——疲劳预制裂纹;
 - 3——裂纹停止;
 - 4——切片 B;
 - 5——切口;
 - 6——起裂;
 - 7——待检测表面(抛光和腐蚀)(见图 D.4)。

D.2 试验后贯穿厚度缺口试样切片的切取方法及断裂起始点的显微组织检测



标引序号说明：

1——起裂；

2——裂纹停止；

3——切口；

4——机械缺口；

5——疲劳预制裂纹；

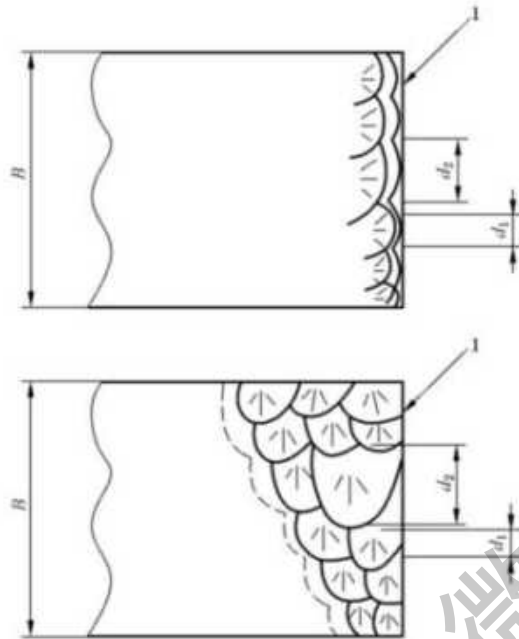
6——待检测表面(抛光和腐蚀)(见图 D.5)。

图 D.3 试验后表面缺口试样切片的切取方法及断裂起始点的显微组织检查

D.4 评定

对于贯穿厚度缺口试样，应测量裂纹产生区域与裂纹尖端平行的特定显微组织长度(d_1)以及在试样厚度中心 75% 范围内与裂纹尖端不相交的相似显微组织长度，并记录其最大值(d_2)，如图 D.4 所示。当疲劳裂纹尖端不在切片内时，为了测量 d_2 ，有必要在疲劳裂纹尖端后面再截取切片。

对于表面缺口试样，应测量产生 pop-in 效应的显微组织整体长度(d_1)，注意该长度只应是位于疲劳裂纹尖端前面的显微组织长度(如图 D.5 所示)。为测量 d_1 可截取多个切片。



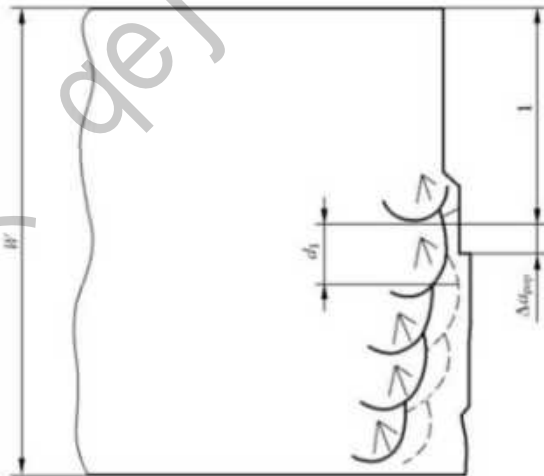
标引序号和符号说明：

1 —— 疲劳预制裂纹；

d_1 —— 位于疲劳裂纹面之上且落入断裂萌生区域内的特定 HAZ 组织长度(上面的图)或焊缝金属组织长度(下面的图)；

d_2 —— 试样厚度中心 75% 范围内特定 HAZ 组织最大长度(上面的图)或焊缝金属组织最大长度(下面的图)。

图 D.4 贯穿厚度缺口试样切片显微组织 d_1 (位于疲劳裂纹前沿)和 d_2 (位于疲劳裂纹一侧)的测量(图 D.2 切面 B)



标引序号说明：

1 —— a 或 $a + \Delta a$ 。

图 D.5 表面缺口试样切片 d_1 和 Δa_{pop} 的测量, 见图 D.3 (HAZ 示例)

D.5 确认 pop-in 效应

根据金相检查结果, 判断 pop-in 效应是否应忽略:

- a) 对于贯穿厚度缺口试样, 根据 GB/T 21143 计算得到参数 (P_{pop-in}), 如果 P_{pop-in} 小于 5% 且 $d_1 > d_2$, 则可忽略该 pop-in 效应;

b) 对于表面缺口试样,如果 P_{pop-in} 小于 5% 且 $\Delta a_{pop} < d_1$, 则可忽略该 pop-in 效应。

如果 $d_1 < d_2$ 或 $\Delta a_{pop} > d_1$, 则确认该 pop-in 效应有效而不应忽略, 因为如果取样时获得更多的脆性显微组织或者它们出现在裂纹尖端时, 程度更大的 pop-in 效应就可能会出现, 因此, 可能需通过进一步试验来确认或排除这种可能性。图 D.6 为 pop-in 评定的流程图。

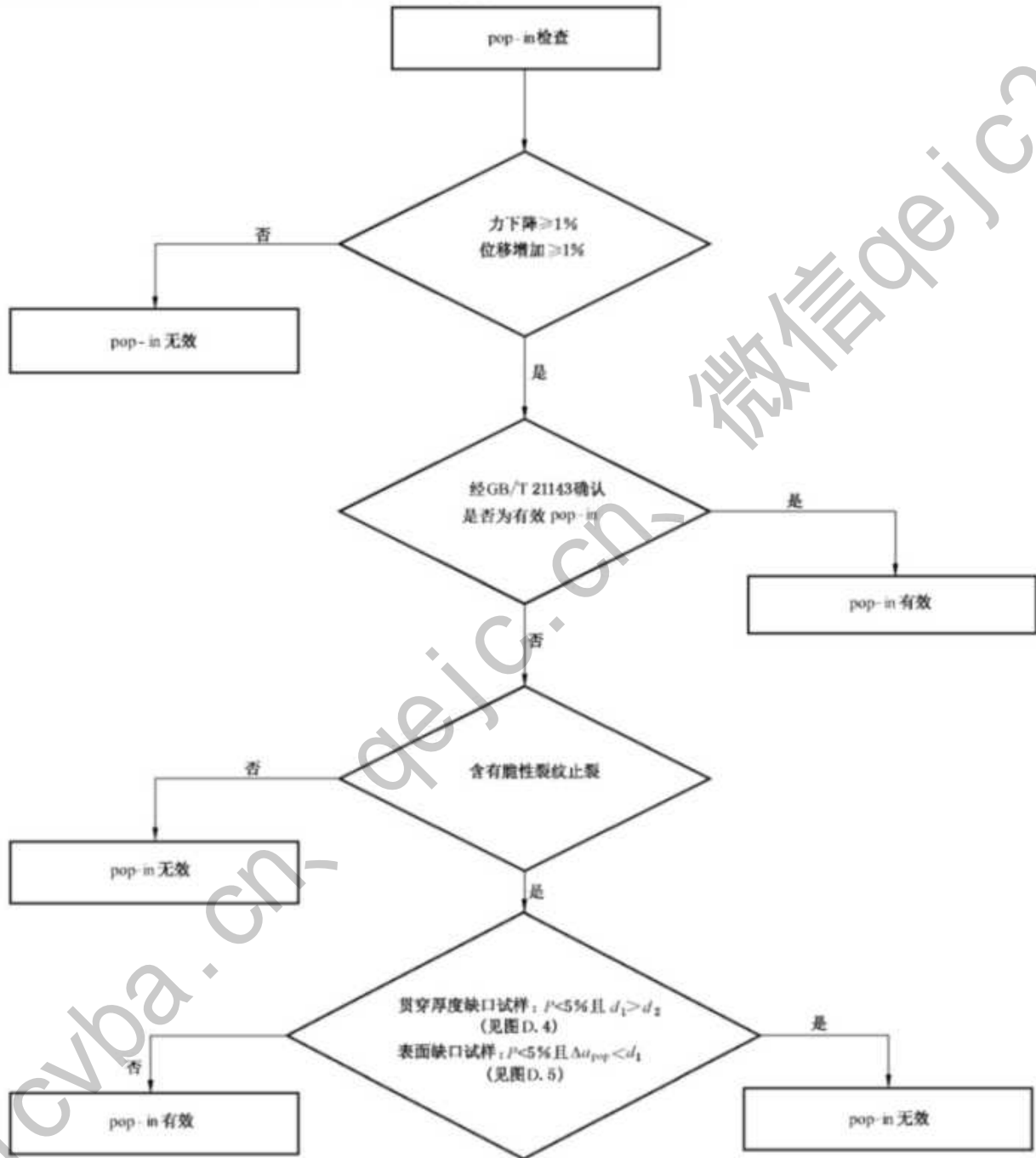


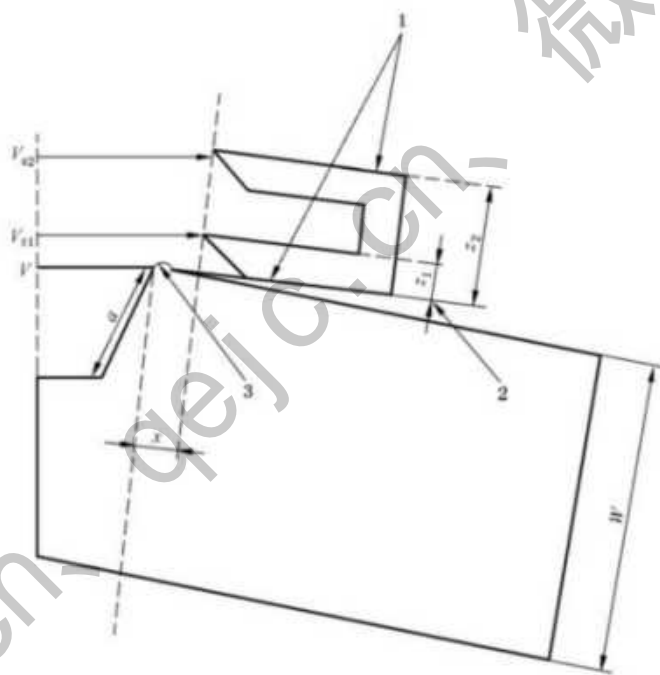
图 D.6 pop-in 评定流程图

附录 E
(规范性)
浅缺口试样试验

E.1 总则

当只能采用浅裂纹三点弯曲加载试样($0.1 \leq a_0/W < 0.45$)测试特定显微组织的断裂韧度时,经相关方协商,可根据本附录进行相应的断裂韧度测试。除了根据 E.2 和 E.3 及 E.4 进行修正外,浅裂纹试样制备和评定步骤与有关深裂纹试样标准的相应规定完全相同。

注:焊接的特点决定了某些特定显微组织只出现在靠近表面的位置,这样就排除了使用标准深缺口试样的可能性。采用浅缺口试样能够完成这些显微组织断裂韧度的测定工作。由于浅缺口试样裂纹尖端拘束度较低,在针对完全相同的疲劳裂纹尖端区域显微组织所进行的断裂韧度测试过程中,采用浅缺口试样测量值一般比深缺口标准试样($0.45 \leq a_0/W < 0.7$)要高,这是由于浅缺口试样裂纹尖端拘束度较低的缘故。考虑到最终应用,这种情况能否忽略需由涉及的相关方进行评估。



标引序号说明:

1——刀口;

2——垫片;

3——微弧 TIG 焊或激光焊。

注 1: 刀口与采用微弧 TIG 焊或激光焊方法焊在试样缺口嘴处的钢垫片连接。

注 2: 刀口高度 z_1 和 z_2 包括钢垫片的高度。

图 E.1 用于计算裂纹嘴张开位移(V)的双钳式引伸计的刀口设计和位置图

E.2 试样制备和试验设备

除了裂纹长度在 $0.1 \leq a_0/W < 0.45$ 范围之外,三点弯曲类型试样应遵循 8.1 和图 5 所示的有关规定。试样刀口类型可以选择 GB/T 21143 中介绍的整体刀口,也可采用图 E.1 所示的附加刀口。当采用整体刀口方式时,通过引伸计直接测量裂纹嘴张开位移(V),当 $a_0 < 5$ mm 时不应采用整体刀口。

用附加刀口方式时应选取双引伸计测量裂纹尖端张开位移,并使用该测量值估算裂纹嘴张开位移(V)。

注:对于 a_0/W 接近 0.1 的试样,疲劳裂纹尖端达到 12.3.3 对平直度的要求是很困难的。但是采用附录 C 介绍的局部压缩等方法对试样进行处理,有利于保证疲劳裂纹平直度。对于方形($B=W$)或矩形($B=2W$)的表面缺口试样,采用过方形试样进行疲劳裂纹预制能够更有利于获得平直的疲劳裂纹尖端,然后在预制疲劳裂纹之后,再将试样加工到规定尺寸。

采用双引伸计测量裂纹尖端张开位移时,根据双引伸计的测量值,使用式(E.1)估算 V:

$$V = V_{z1} - z_1 \left(\frac{V_{z2} - V_{z1}}{z_2 - z_1} \right) - 2x \cos \left[\arcsin^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_{z2} - V_{z1}}{z_2 - z_1} \right) \right] \right] \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

V_{z1} 与 V_{z2} ——分别为对应于安装在缺口表面上 z_1 和 z_2 处钳式引伸计的张开位移值,见图 E.1;

x ——图 E.1 中缺口边缘到刀口边缘的距离。

E.3 J 的求解

除了计算公式不同,J 的求解步骤按照 GB/T 21143 的有关规定执行。

三点弯曲类型试样的 K_0 按式(E.2)计算:

$$K_0 = \left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} g_1(a_0/W) \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

K_0 ——用于计算 F_c, F_o, F_w 和 F_m 对应试样断裂韧度的参量,其确切含义在 GB/T 21143 中定义;

S ——GB/T 21143 中所定义的跨距;

$g_1(a_0/W)$ ——无量纲应力强度因子系数,具体关系表达式见 GB/T 21143。

三点弯曲类型试样^[1,6,7,21]的 J_0 按式(E.3)计算:

$$J_0 = \frac{K_0(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_p A_p}{(BB_N)^{0.5}(W-a_0)} \quad \dots\dots\dots (E.3)$$

式中:

A_p ——对应于力-裂纹嘴张开位移曲线之下的塑性区域面积,与裂纹开口位移曲线的关系如下:

- 使用在张开位移(V_c)处对应的 K_c, F_c 和 A_c 计算出的 J_0 计为 J_c ;
- 使用在张开位移(V_o)处对应的 K_o, F_o 和 A_o 计算出的 J_0 计为 J_o ;
- 使用在张开位移(V_w)处对应的 K_w, F_w 和 A_w 计算出的 J_0 计为 J_w ;
- 使用在张开位移(V_m)处对应的 K_m, F_m 和 A_m 计算出的 J_0 计为 J_m ,并且

$$\eta_p = 3.667 - 2.199 \left(\frac{a_0}{W} \right) + 0.437 \left(\frac{a_0}{W} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (E.4)$$

由于公式 E.3 中的 J_0 与 GB/T 21143 中的 J 公式有所不同,在 $a_0/W = 0.45$ 时求解得到的 J 值会存在差异。因此,在 $a_0/W = 0.45$ 时,用以求解 J 的公式应在商议后确定。

E.4 δ 的求解

对于三点弯曲试样 δ_0 按式(E.5)、式(E.6)求解:

$$\delta_0 = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \times g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{mR_{p0.2}E} \right] + r \cdot C_{Vp} \frac{0.43(W-a_0)V_p}{0.43(W-a_0) + a_0} \quad \dots\dots\dots (E.5)$$

其中:

$$C_{Vp} = -1.74 \left\{ \left(\frac{a_0}{W} \right) - 0.45 \right\}^2 + 1 \quad \dots\dots\dots (E.6)$$

除 C_{Vp} 之外,其余变量定义见 12.2.2 与 GB/T 21143。

参 考 文 献

- [1] GB/T 20832 金属材料试样轴线相对于产品织构的标识
- [2] ISO 12135:2021 Metallic materials—Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness
- [3] DNV-OS-B101-2021 Metallic materials
- [4] WANG Y.Y. Development of fracture assessment and testing procedures for HAZ cracks. Progress report—Development of J and CTOD correlation equations, EWI Report 06224-CPG/1/97, December 1997
- [5] WANG Y.Y. Fracture Mechanics Analysis of HAZ and Interfacial Cracks, CRP summary, EWI report MR9819, November 1998
- [6] HART P.H.M. Yield strength from hardness data, TWI Research Bulletin, Vol. 16, No. 6, June 1975, p.76
- [7] BS 7910: 2013, + A1: 2015 (incorporating corrigendum No. 1), Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in welded structures, BSI Standards Publication
- [8] KAWABATA T., TAGAWA T., SAKIMOTO T., KAYAMORI Y., OHATA M., YAMASHITA Y., TAMURA E., YOSHINARI H., AIHARA S., MINAMI F., MIMURA H., HAGHARA Y. Proposal for a new CTOD calculation formula, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 159, 2016, pp.16-36
- [9] PISARSKI H.G., WANG Y.Y., KIRK M., GORDON J.R. The effect of strength mismatch on CTOD and J estimation procedures for weld metal fracture toughness determination, Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE '95) Conference, Copenhagen, Denmark, ASTM, Vol. 3, 1995, pp.77-85
- [10] PISARSKI H.G., WANG Y.Y., KIRK M., GORDON J.R. The effect of strength mismatch on CTOD and J estimation procedures for weld metal fracture toughness determination, IIW Sub-Commission X-F "Weld Mismatch Effect", GKSS, Geesthacht, Germany, 24-15 April 1995
- [11] HADLEY I., & DAWES M.G. Fracture toughness testing of weld metal - Results of a European round-robin, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 19, No. 8, 1996, pp. 963-973
- [12] DAWES M.G. Fatigue precracking weldment fracture mechanics specimens, Metal Construction and British Welding Journal, February 1971, pp. 61-65
- [13] TOWERS O.L., & DAWES M.G. Welding Institute research on the fatigue precracking of fracture toughness specimens, in ASTM STP 856, Elastic-Plastic Fracture Test Methods; The User's Experience, 1985, pp. 23-26
- [14] KOCAK M., SEIFERT K., YAO S., LAMPE H. Comparison of fatigue precracking of fracture toughness testing of weldments, Proc. Int. Conf. Welding 90 - Technology, Material, Fracture, GKSS, Geesthacht, Germany, October 1990, IITT-International, France, pp. 307-318
- [15] REEMSNYDER H.S., PISARSKI H.G., Residual stresses and fatigue precracking techniques for weldment fracture toughness specimens, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 20, No.6, November 1991, pp. 416-423
- [16] MACHIDA S., MIYATA T., TOYOSADA M., HAGIHARA H., Study of methods for CTOD testing of weldments, Fatigue and fracture testing of weldments, ASTM STP1058, 1990, pp. 142-156
- [17] SAKANO K. Precompression cracking method for fracture toughness test -2nd report,

Ishikawajima-Harima Heavy Industry(IHI) Engineering Review, Vol. 13, No.3, 1980, pp.1-7

[18] JEONG S., KIM H., SHIN S., PARK T. Effect of reverse bending method on pre-crack straightness in CTOD test of welded thick steel plates, Proceedings of IMECE 2014, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Montreal, Quebec, Canada, 2014, ASME, Paper IMEC 2014-37909

[19] MIKAMI Y., KAWABATA T., TAGAWA T., KITANO H., KIUCHI A., KAYAMORI Y., KANNA S., SAKURAI T., IMAI Y., OHATA M., MOCHIZUKI M., MINAMI F., AIHARA S., HAGIHARA Y. Numerical simulation of residual stress modification by reverse bending of notched fracture toughness test specimens of multipass welds, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol.92, 2017, pp. 214-222

[20] NEVALAINEN M., & DODD R.H. Numerical investigation of 3-D constraint effects on brittle fracture in SE(B) and C(T) specimens, International Journal of Fracture, Vol.74, 1995, pp. 131-161

[21] STEFFAN A.A. On the effect of R-ratio and K_{max} on fracture toughness measurement, fatigue crack propagation and fatigue closure, Dissertation, Southern Methodist University, Texas, USA, December 1987

[22] WIESNER C. S., & PISARSKI H.G. Significance of pop-ins during initiation fracture toughness tests, 3R International, Vol.35, October/November 1996, pp. 638-643

[23] PISARSKI H.G., HAMMOND R., WATT K., Significance of splits and pop-ins observed during fracture toughness testing of pipeline steel, Proceedings of IPC 2008, 7th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2008, ASTM, Paper IPC 2008-64676

[24] KIRK M.T., & DODDS R.H. J and CTOD estimation equations for shallow cracks I single edge notch bend specimens, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol.21, No.4, July 1993, pp. 228-238

[25] KAWABATA T., TAGAWA T., KAYAMORI Y., OHATA M., YAMASHITA Y., KINEFUCHI M., YOSHINARI H., AIHARA S., MINAMI F., MIMURA H., HAGIHARA T. Applicability of new CTOD calculation formula to various a_0/E conditions and $B \times B$ configuration, Engineering Fracture Mechanics, Vol.179, 15 June, 2017, pp.375-390