



中华人民共和国国家标准

GB/T 28896—2012

金属材料 焊接接头准静态断裂韧度 测定的试验方法

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

(ISO 15653:2010, MOD)

2012-11-05 发布

2013-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

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	3
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 试样制备	13
10 试验装置、试验要求及步骤	14
11 试验后金相检查	14
12 试验分析	17
13 试验报告	20
附录 A (资料性附录) 试样缺口位置示例	22
附录 B (资料性附录) 试验前后金相检查示例	25
附录 C (规范性附录) 消除残余应力和预制疲劳裂纹方法	27
附录 D (规范性附录) pop-in 效应评定	29
附录 E (资料性附录) 浅缺口试样试验	35
参考文献	38



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准修改采用 ISO 15653:2010《金属材料 焊接接头准静态断裂韧性测定的试验方法》。

本标准的结构和技术内容(规范性引用文件除外)与 ISO 7087:1984 保持一致;规范性引用文件中分别用相应的国家标准代替对应的 ISO 标准:用 GB/T 20832 代替 ISO 3785,用 GB/T 21143 代替 ISO 12135。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位:天津大学、武汉钢铁(集团)公司、冶金工业信息标准研究院。

本标准主要起草人:王东坡、李荣锋、邓彩艳、霍立兴、邱保文、余立、董莉。

金属材料 焊接接头准静态断裂韧性 测定的试验方法

1 范围

本标准规定了测试金属材料焊接接头焊缝金属及其热影响区部位断裂韧性 K_{IC} 、 δ (裂纹张开位移, CTOD) 和 J 积分的具体试验过程与方法。

本标准是 GB/T 21143 的补充, GB/T 21143 涵盖了有关断裂韧性测试的所有方面, 与本标准在使用过程中有着非常紧密的联系。本标准所介绍的断裂韧性测试方法适用于测定工程意义上的启裂韧性而不能用于测试所谓的裂纹扩展阻力曲线。本标准介绍的测试方法采用的是金属材料经过焊接之后再机加工缺口并预制相应疲劳裂纹的试样, 缺口应位于焊缝金属或者热影响区部位的待测区域, 而待测区域和缺口方向的选择则由使用者根据实际情况来确定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 20832 金属材料 试样轴线相对于产品结构的标识(GB/T 20832—2007, ISO 3785:2006, IDT)

GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧性的统一试验方法(GB/T 21143—2007, 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

伸张区宽度是指裂纹钝化时所产生的裂纹延伸长度。而裂纹钝化一般发生在裂纹不稳定扩展、突进(pop-in)或者裂纹缓慢扩展之前, 其位置与预制疲劳裂纹在同一平面之上。

3.2

待测区域 target area

预制疲劳裂纹尖端在焊缝金属或热影响区中所处的位置。

注: 见 3.7 和 3.9。

3.3

突进 pop-in

在力-位移记录曲线上出现的不连续点, 一般具有位移陡然增加、力突然下降的特征, 而随后力与位移却能够继续增加。

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挤压处理。

注:见附录 C。

3.5

焊接 welding

焊接是通过加热、摩擦、加压或三者并用的方法,使两个或更多个工件之间形成结合的连接方式。

注:可用也可不用的填充材料,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(也称基材) parent metal (also known as base metal)

被焊接的金属材料。

3.9

热影响区 heat-affected zone

HAZ

由于受到焊接过程热循环的影响,使得金属材料显微组织发生变化的母材区域。

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

焊缝位置试样 weld positional specimen

WP

疲劳裂纹尖端位于焊接区域特定参考位置的试样。

注:如图 A.1 所示。

3.12

特定显微组织试样 specific microstructure specimen

SM

疲劳裂纹尖端位于特定显微组织区域内的试样。

注:如图 A.2 所示。

3.13

毛坯试样 specimen blank

缺口加工之前所制备的焊接接头试样。

3.14

焊后热处理 postweld heat 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 规定的以及下列符号、单位和说明适用于本标准,见表 1。

表 1 符号和说明

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,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
N		焊接法线方向
P		焊接平行方向
Q		贯穿焊接接头的厚度方向
$R_{p0.2b}$	MPa	母材在断裂试验温度条件下发生 0.2% 塑性变形量所对应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发生 0.2% 塑性变形量所对应的规定塑性延伸强度
R_{mb}	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	疲劳裂纹尖端与待测区域之间在裂纹平面方向上的距离(见图 12)
s_2	mm	疲劳裂纹尖端与待测区域之间在垂直于裂纹平面方向上的距离(见图 12)
V, V_1, V_2	mm	裂纹嘴张开位移
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
Δa_{pop}	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	在试验前后金相检查的特定显微组织区域的长度(参见图 B.2)

5 原理

本标准制定了单边缺口带预制疲劳裂纹焊接接头试样的断裂韧度测试程序。根据裂纹尖端位置把试样类型分为两种:

- 只需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是否有待测特定显微组织存在,并且其数量是否足够用于断裂韧度试验。

试样的几何尺寸和预制缺口方位确定后,施加一定的交变力,使疲劳裂纹扩展并进入到试样存有特定显微组织的区域。试验的目的是为了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度。

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,但按本标准进行试验时还需要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。

试验后应该通过金相检查判断裂纹尖端是否位于特定显微组织区域内且评定突进效应(pop-in)的有效性。

试验流程如图 1 所示。

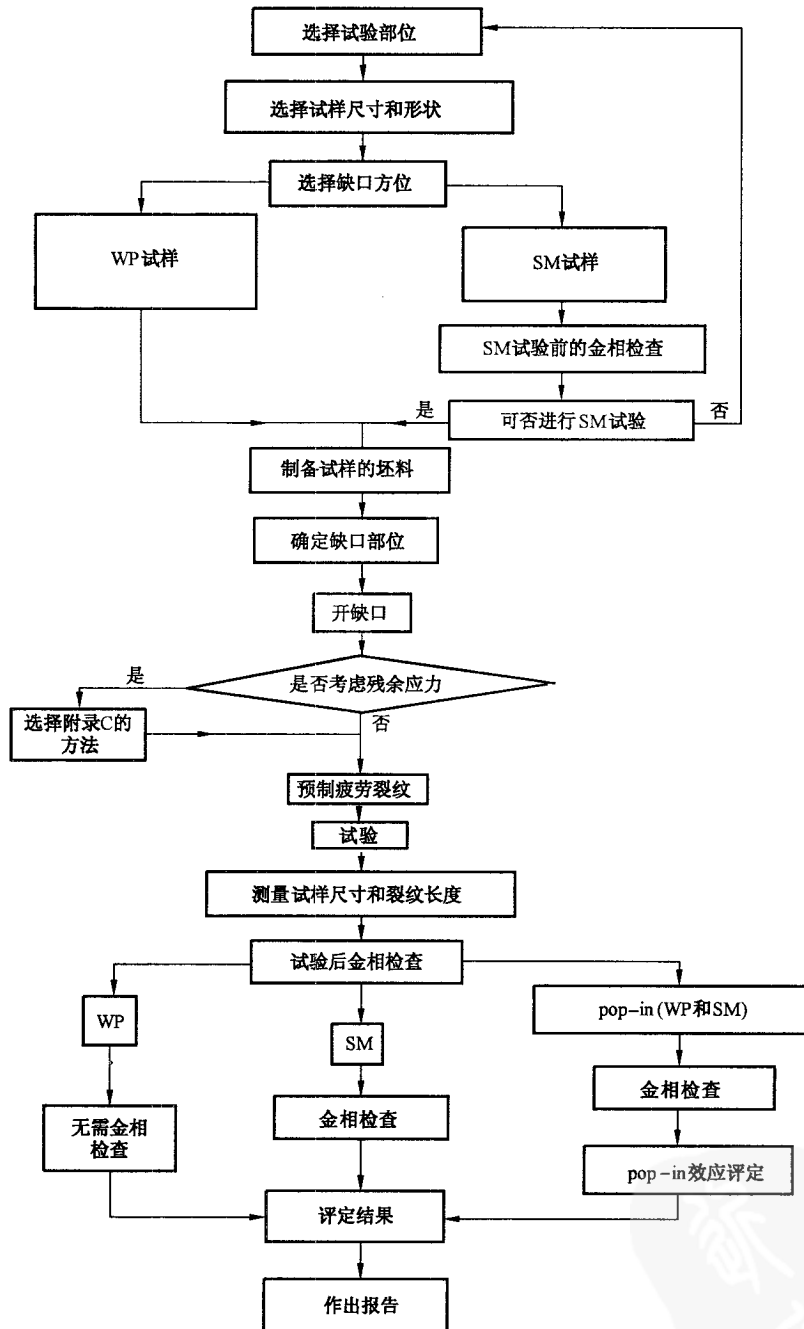


图 1 断裂韧度试验流程图

6 试样设计、方位和缺口位置选择

6.1 缺口处待测区域分类

WP 试样缺口在特定焊接区域的某参考位置(例如焊缝金属中心线位置)。

SM 试样缺口全部或部分疲劳裂纹前缘在试样中心 75%范围内的指定显微组织区域内。

注:典型 WP 和 SM 试样的缺口位置实例参见附录 A。

对于对中不好的双道或者多道焊焊缝,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时,可能得到错误的(过高的)断裂韧度值。对于这种焊接接头,本标准推荐使用 SM 试样进行断裂韧度测试,缺口位置分别参见图 A.2 d)和图 A.2 e)。

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弯曲试样或紧凑拉伸类型且试样侧面应刨平或开侧槽。沿试板厚度开缺口的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:焊接接头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)。

容许采用小尺寸(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)及(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。使用小尺寸及(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或者因为试验部分显微组织区域的不同,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。

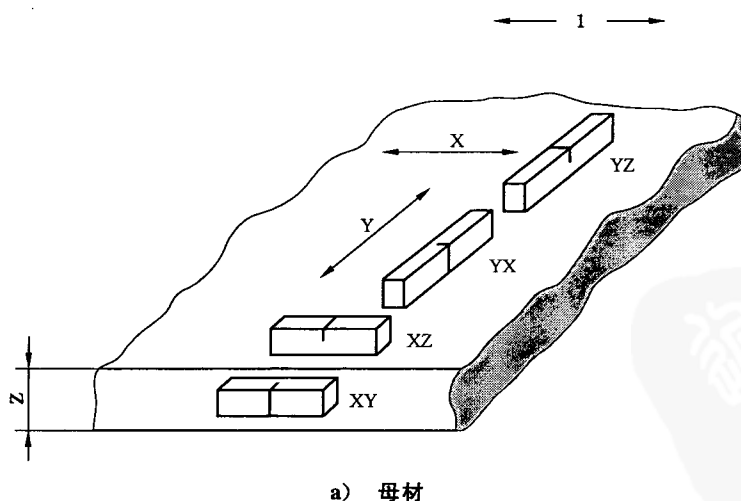
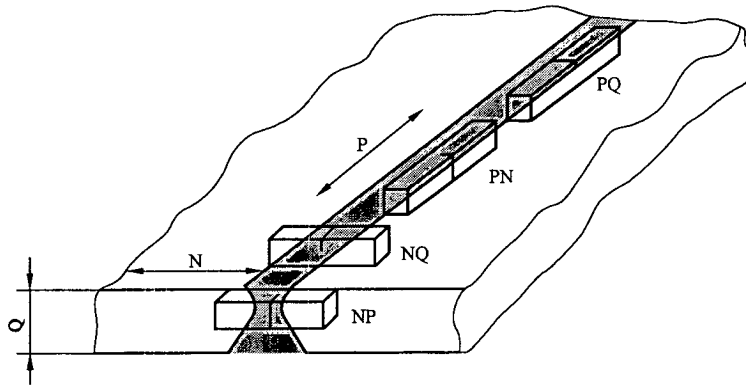


图 2 母材和焊缝断裂韧度试样裂纹面取样方位



b) 焊缝

说明:

1 —— 轧制方向;

N —— 垂直焊缝方向;

P —— 平行焊缝方向;

Q —— 焊缝厚度方向。

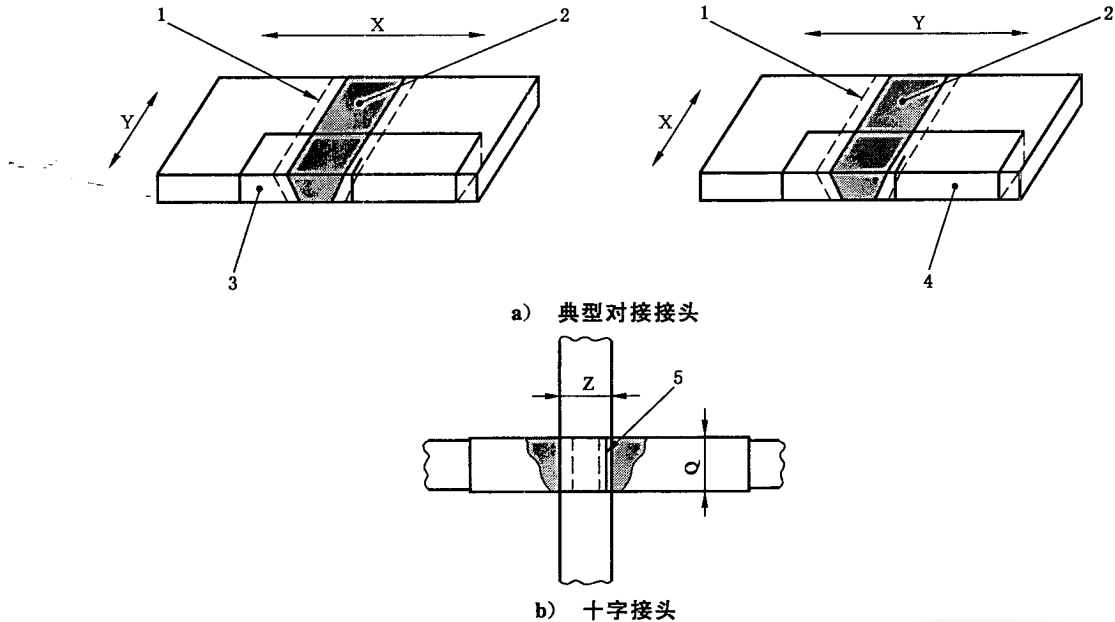
参考 ISO 3875 对 X、Y、Z 方向的定义。

第一个字母表示裂纹平面的法向,第二个字母表示预期裂纹扩展的方向。

NP 和 PN 为贯穿厚度缺口试样,NQ 和 PQ 为表面缺口试样。

图 2 (续)

对于 HAZ 试件,当母材轧制方向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,导致试样的焊缝和母材方向之间存在多种组合形式,具体实例见图 3 和图 4。



a) 典型对接接头

b) 十字接头

说明:

1 —— 热影响区;

2 —— 焊缝金属;

3 —— 焊缝试样取样方向 NP/XY;

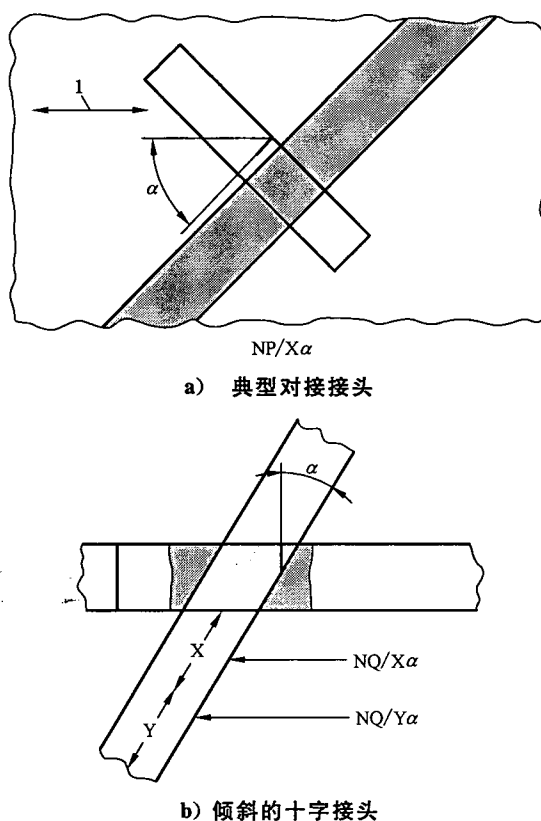
4 —— 焊缝试样取样方向 NP/YX;

5 —— 贯穿厚度裂纹, NP/ZX 或 NP/ZY;

X —— 轧制方向;

Q —— 焊接厚度方向。

图 3 典型对接接头和十字接头断裂韧性试样裂纹面



说明:

1——轧制方向。

图4 HAZ断裂韧性试样裂纹面与母材轧制方向成 α 角

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,应该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截取试样进行金相检查。横截面位置应该在即将进行试验的焊缝长度范围内选取,以确保特定显微组织出现在疲劳裂纹尖端部位来满足试验要求。在制备宏观金相检查试样时,应注意及时地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的金相检查,最后通过放大适当倍数对该样品进行观测,确认待测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为了判断裂纹尖端的位置:

- a) 对于贯穿厚度缺口试样,判断在中心 75% 厚度范围之内试样的疲劳裂纹尖端是否位于待测区域;
- b) 对于表面缺口试样,要求疲劳裂纹尖端距离待测区域不能超过 0.5 mm。

如果在待测区域内指定的显微组织不存在,或因其数量不足而难以确保试验结果的可靠性,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,则该焊接试板将因为不满足制备 SM 试样的标准要求而不能用于断裂韧性试验。在这种情况下,可重新选择待测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,则允许使用附录 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需要考虑上述原因所带来的相应影响。

7.2 有关热影响区试样试验的补充要求

当 SM 试样的待试区位于 HAZ 时,除遵照 7.1 规定之外,还应在经过磨削、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,其目的是判别特定显微组织是否存在于试样厚度中心 75% 范围之内且特定显微组织的数量可以满足成功地进行试验的相关要求。

当确认好待测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特定显微组织的具体位置,特定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特定显微组织存在于 $0.45 \leq a_0/W \leq 0.70$ 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,则考虑重新选择待测区域位置或者重新焊接试板,或使用 7.1 中提及的浅缺口试样。

8 机械加工

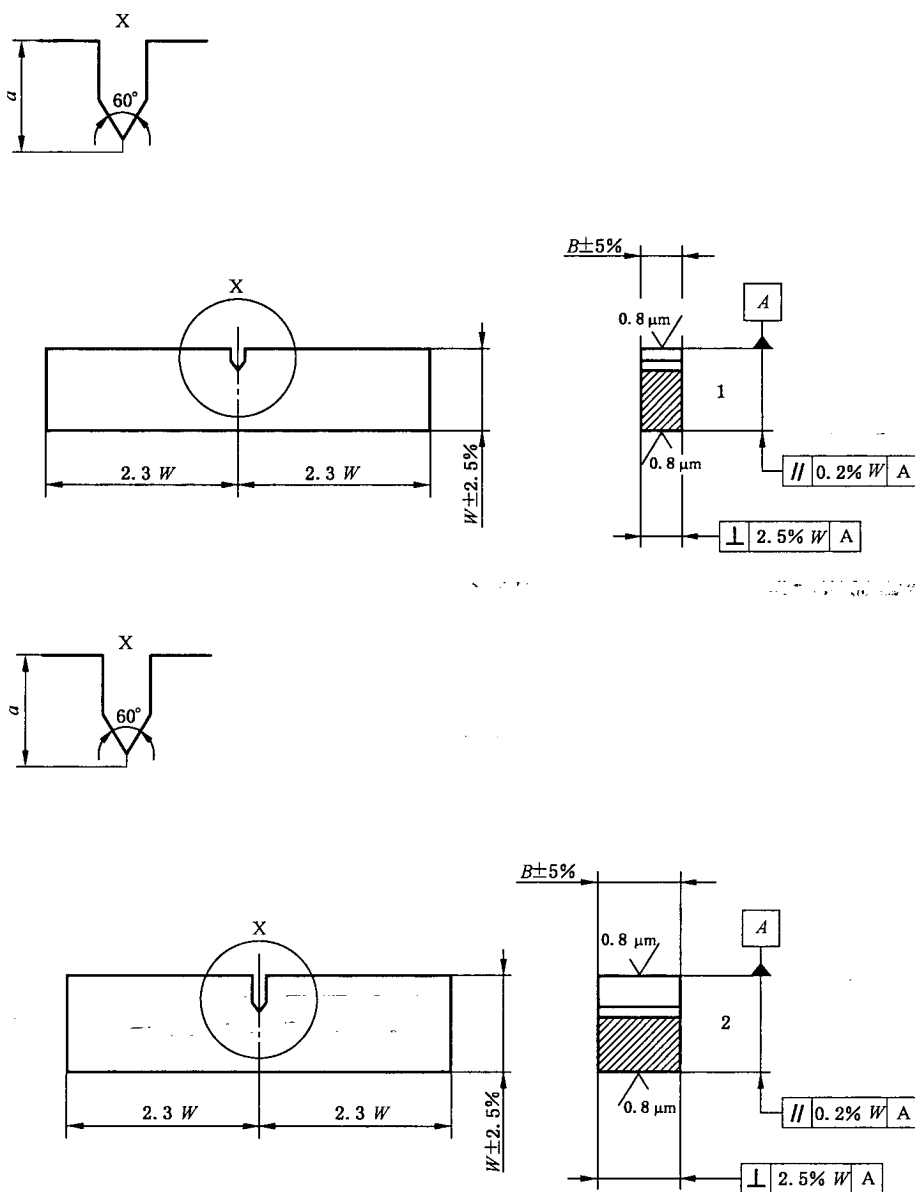
8.1 试样尺寸公差

为了保证试样缺口位置的正确性,首先在产品试板上切取试样样坯。试样样坯应机加工到满足尺寸公差要求后再开机械缺口。

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;弯曲类型试样的尺寸公差要求在图 5 中标出。当使用浅缺口弯曲类型试样时(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 中单边缺口弯曲试样的尺寸公差比 GB/T 21143 有所放松。

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 ≥ 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时,可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。



1——长方形截面试样。

宽度 = W

厚度 = $B = 0.5W$

裂纹长度 = $a = 0.45W \sim 0.7W$

力跨距 = $4W$

缺口宽度 = $0.065W_{\max}$

试样平直度要求见图 6。

2——正方形截面试样。

宽度 = W

厚度 = $B = W$

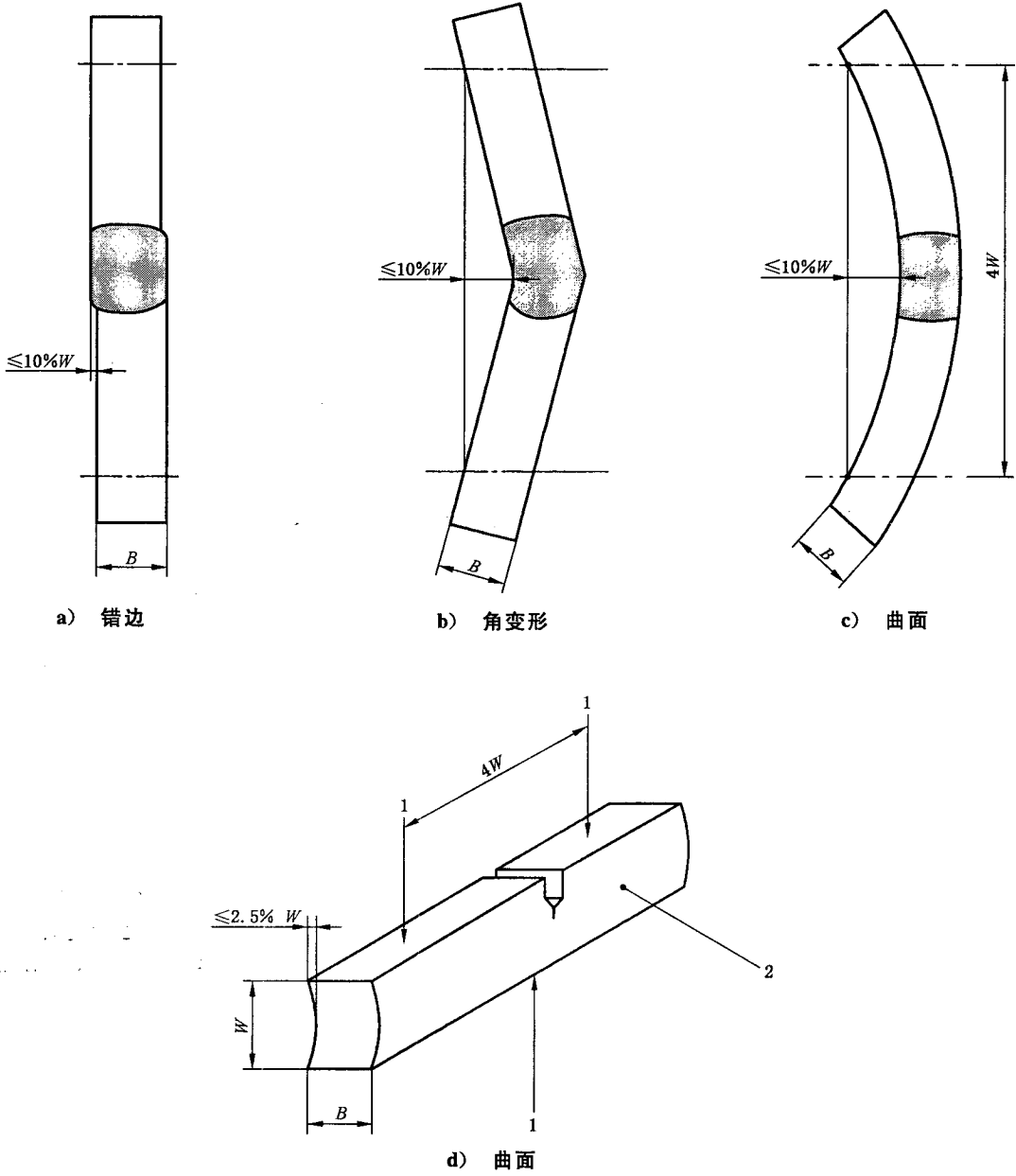
裂纹长度 = $a = 0.45W \sim 0.7W$

力跨距 = $4W$

缺口宽度 = $0.065W_{\max}$

试样平直度要求见图 6。

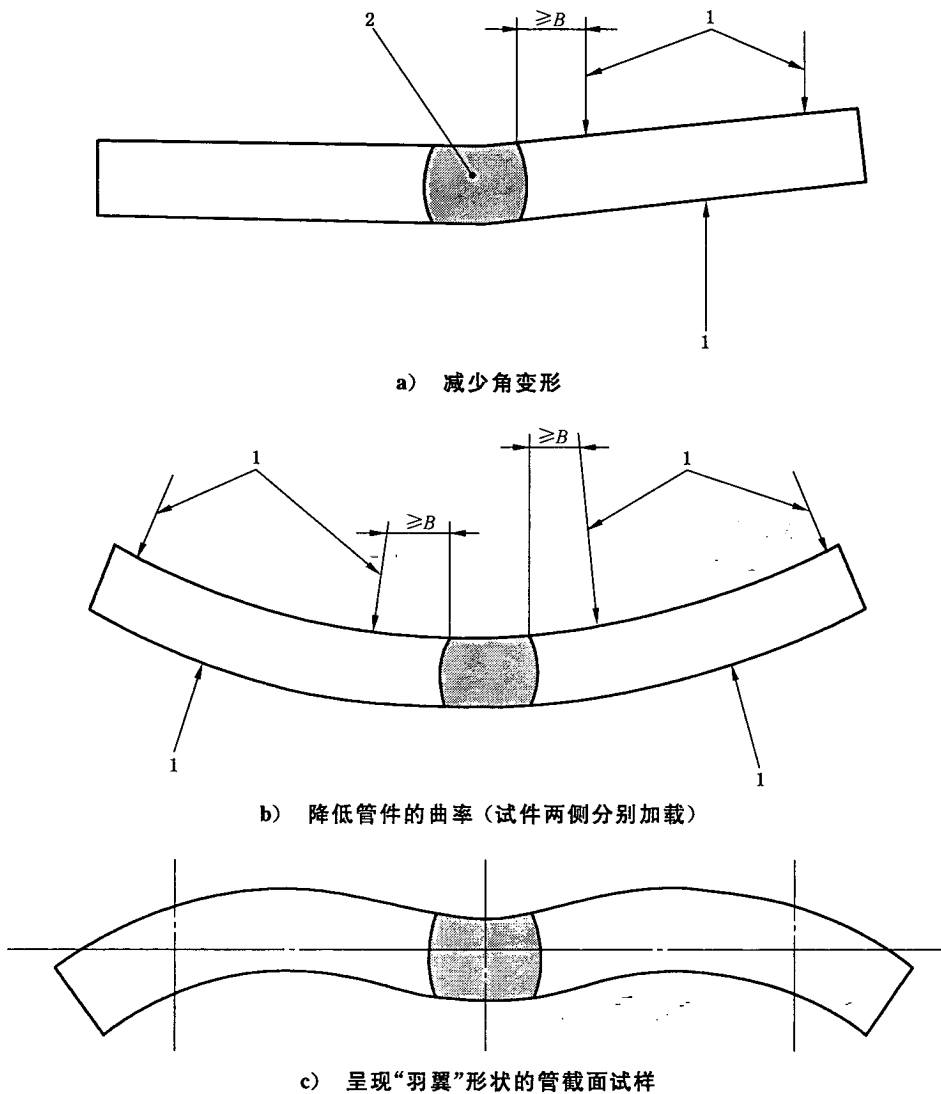
图 5 断裂韧性试验的弯曲试样尺寸



说明:

- 1 ——加载点;
- 2 ——弧面;
- 4W——跨距。

图 6 弯曲试样所允许的几何尺寸公差



说明：

1——矫直加载点；

2——焊缝。

图7 弯曲毛坯试样的平直方法

当取自管材的样坯无法矫直时,可从管材上取下一方形块并与一个适当长度的延伸板焊接在一起。该方形块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。方形块与延伸板的焊接位置应远离原焊缝以便不影响待测区域的显微组织。

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,以保证获得接近全尺寸厚度试样的试验结果并满足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。

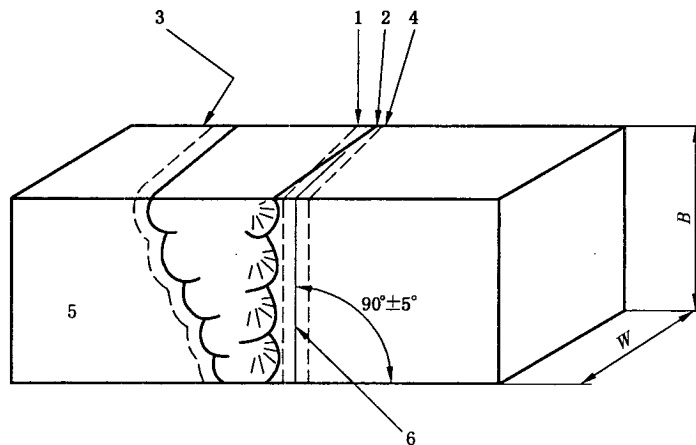
当焊缝两侧材料厚度相差10%或更多时,则应按厚度较薄一侧尺寸来加工试样,并应在报告中说明试样原始厚度与机加工后厚度的相应情况。

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。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 $a_0/W=0.5$ 的情况时,保证裂纹尖端最终落在目标区域(尤其是 HAZ 试件)。如果 $a_0/W \neq 0.5$,可对标识线进行适当调整来保证裂纹尖端最终落在目标区域。



说明:

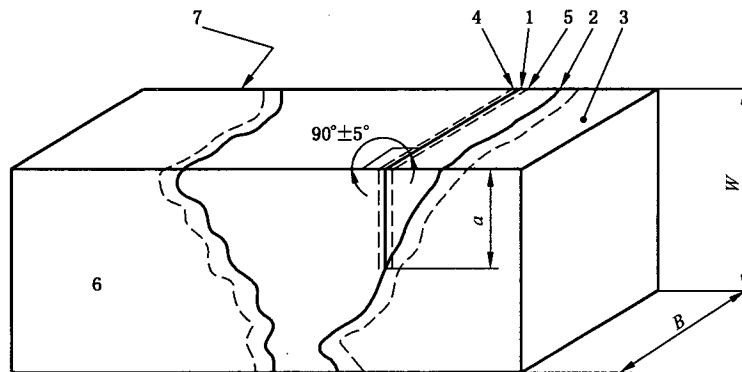
- 1——标识线 A;
- 2——熔合线;
- 3——面 B(不开缺口面);
- 4——标识线 B;
- 5——面 A(开缺口面);
- 6——缺口。

图 8 应用参考标识线来确定贯穿厚度缺口试样的切口位置

8.3 表面缺口试样缺口位置的确定

表面缺口试样缺口位置的确定如图 9 所示。首先将试样的两个侧面在进行磨削加工之后腐蚀出焊缝和热影响区。在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。两条标识线的横向中间位置进行机械缺口加工。

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。



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。

图 9 表面缺口试样缺口位置的确定

8.4 缺口加工

缺口加工应遵循 GB/T 21143 的要求。

9 试样制备

9.1 疲劳裂纹预制

疲劳裂纹预制的一般要求与 GB/T 21143 完全相同。对于焊缝(中心)金属试样,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_1 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,所预制疲劳裂纹的最大力应当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,这样使得因疲劳裂纹前缘弯曲而导致裂纹尖端偏离特定待测区域的可能性降到最低。

当预制疲劳裂纹过程中满足 12.4 中有关疲劳裂纹前端平直度的相应要求出现困难时,尤其对于焊态或局部消除焊接残余应力的试样,这时应当考虑使用附录 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,则可不按照附录 C 的相应规定进行疲劳裂纹预制。

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。

如果所预制的疲劳裂纹不满足 12.4 中对其前缘不平度的相应要求,则应按照附录 C 的要求修改预制疲劳裂纹的方法。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当按照 12.4.4 所述方法进行计算。

9.2 侧面开槽试样

对于侧面开槽试样,疲劳裂纹预制按 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 概述

对于 SM 试样,为了辨别疲劳裂纹尖端位置是否落在指定的显微组织区域之内,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。

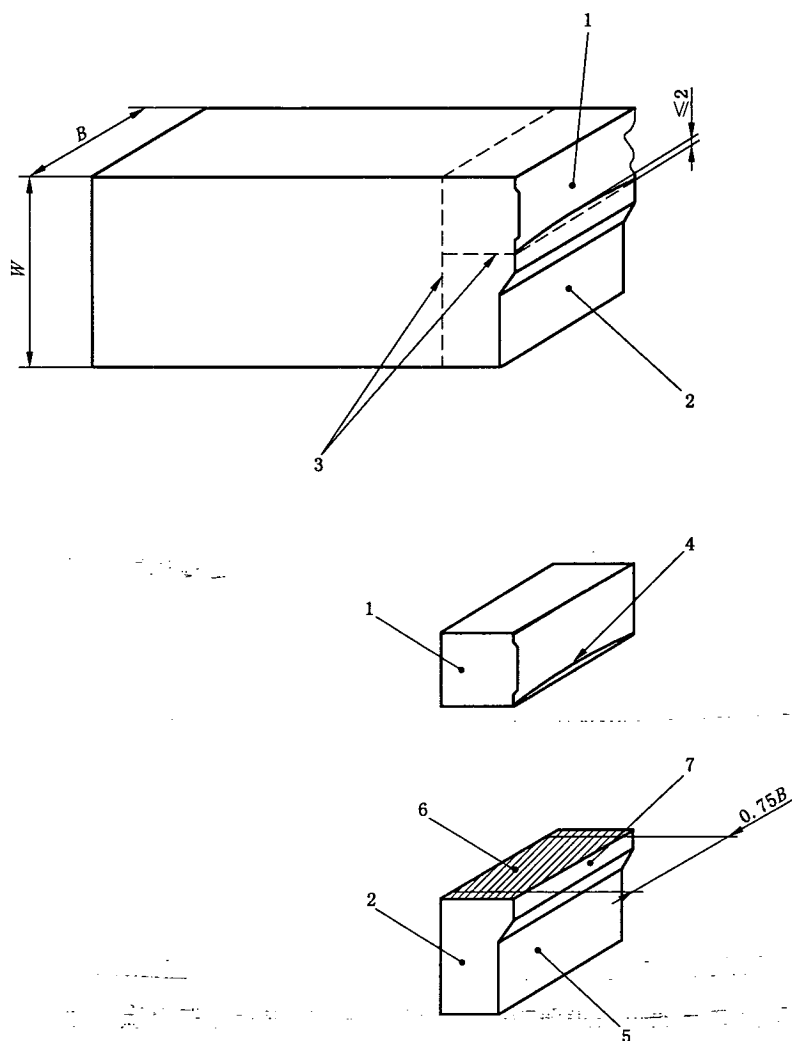
WP 试样试验后不要求进行切片金相检查。

在脆性断裂情况下,如果已证实疲劳裂纹尖端落入特定显微组织区域之内,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 的评定过程中所采用的方法类似,详见附录 D。

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 中切片 A)。然后,对切片进行金相检查确定疲劳裂纹尖端是否位于特定显微组织范围之内。



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切取法

11.2.2 评定

切片金相检查是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特定显微组织并记录在试样厚度中心 75% 范围内特定显微组织区域的长度及其相应位置。热影响区缺口试样的切片金相检查实例见附录 B。

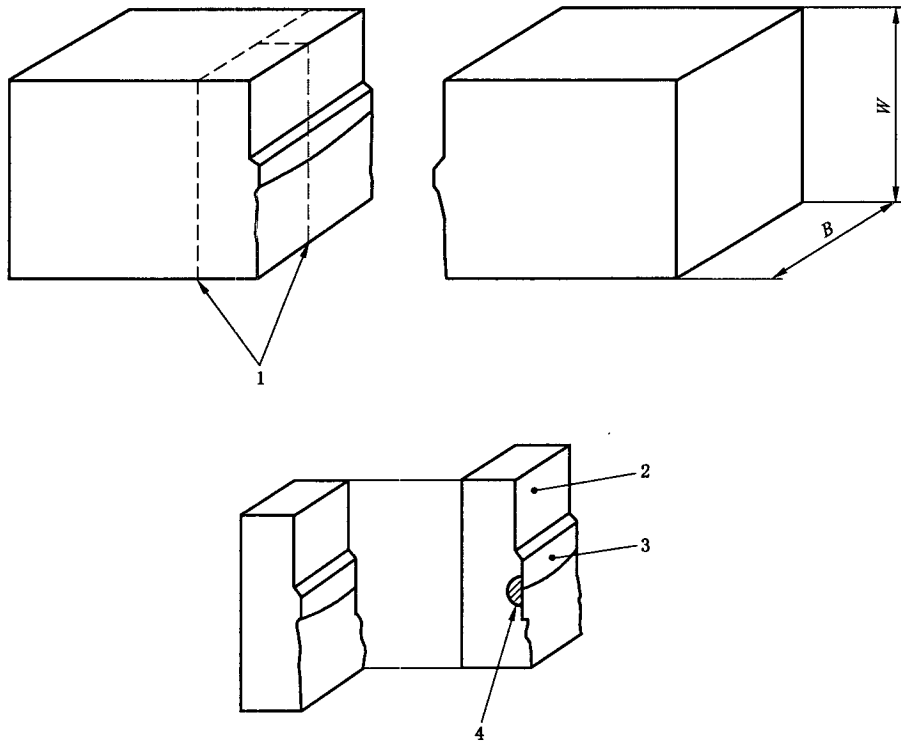
11.3 表面缺口试样

11.3.1 切片

如果试样发生解理断裂, 那么需要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。应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，切片应在疲劳裂纹尖端最深处截取。

裂纹萌生位置的确定需要目测，有时也会借助于光学显微镜或扫描电镜进行观察确认。



说明：

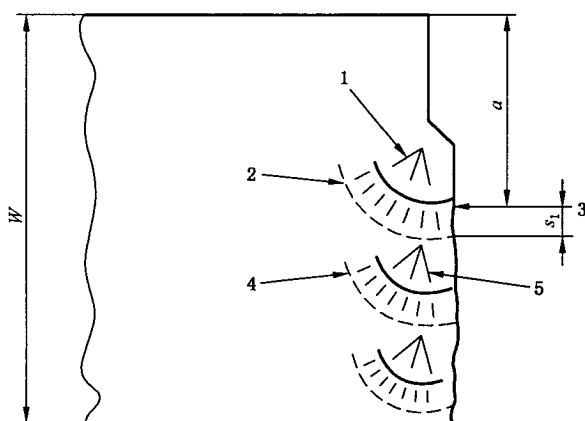
- 1——切口；
- 2——机械缺口；
- 3——疲劳预制裂纹；
- 4——待检测表面(抛光和腐蚀)。

图 11 表面缺口试样试验后金相检查切片的切取方法

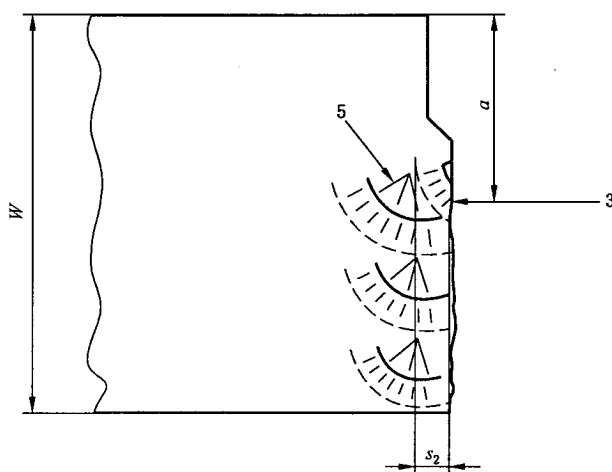
11.3.2 评定

切片金相检查用以确认疲劳裂纹尖端是否位于特定显微组织区域内。当特定显微组织区位于疲劳裂纹尖端前面时，这两者之间最小距离用 s_1 [s_1 的测量准确度至少为 ± 0.05 mm, 见图 12 a)]表示。当特定显微组织区位于疲劳裂纹尖端的一侧时，两者之间最小距离用 s_2 [s_2 的测量准确度也至少为 ± 0.05 mm, 见图 12 b)]表示。

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) 待测区域微观组织位于疲劳裂纹尖端前沿



b) 待测区域微观组织位于疲劳裂纹尖端一侧

说明:

- 1——焊珠;
- 2——再热焊缝金属;
- 3——疲劳裂纹尖端;
- 4——再热焊缝金属;
- 5——SM 试样(待测区域微观组织)。

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,该 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: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。

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:

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

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

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

当 170<HV10<330,焊缝: $R_{mw} = 3.0HV10 + 22.1$ (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,低温时的屈服强度关系可用式(5)估算^[2]:

$R_{p0.2} = R_{p0.2}(\text{室温下}) + 10^5 / (491 + 1.8T) - 189$ (5)

式中:

T——试验温度,单位为摄氏度(°C)。

12.2 K_{IC}

测定 K_{IC} 的试验数据分析应根据标准 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}。

12.3 δ 和 J 积分

标准弯曲或紧凑拉伸试样的 δ 和 J 积分的验数据分析应根据 GB/T 21143 的有关规定执行,但还应同时遵循 12.1 的各项要求。当在试验过程中采用浅缺口弯曲试样(0.10 ≤ a₀/W ≤ 0.45)时,则 δ 和 J 积分试验的数据分析计算应按附录 E 的有关规定执行。

12.4 有效性评定

12.4.1 概述

除按 GB/T 21143 的有关规定进行有效性评定外,还应增加下述评定内容。

12.4.2 焊缝宽度与韧带尺寸比

当裂纹位于焊缝金属中心时,如果还可以满足如下条件^[3,4],则 δ 试验的相应步骤应依据本标准进行:

- a) 当裂纹位于焊缝中心线:要求焊缝宽度(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大于 0.2,即 $2h / (W - a_0) > 0.2$ (贯穿厚度缺口试样参见图 13a)和图 13 b),表面缺口试样参见图 14a)和图 14b);
- b) 当裂纹偏离焊缝中心线:要求有效焊缝宽度(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大于 0.1,即 $h / (W - a_0) > 0.1$ (贯穿厚度缺口试样参见图 13c)和图 13d),表面缺口试样参见图 14c)和图 14d);
- c) 对于 a)、b)两种情况,附加要求是焊缝金属与母材金属 0.2% 塑性变形量所对应的规定塑性延伸强度之比的限定范围是 0.5~1.50,即

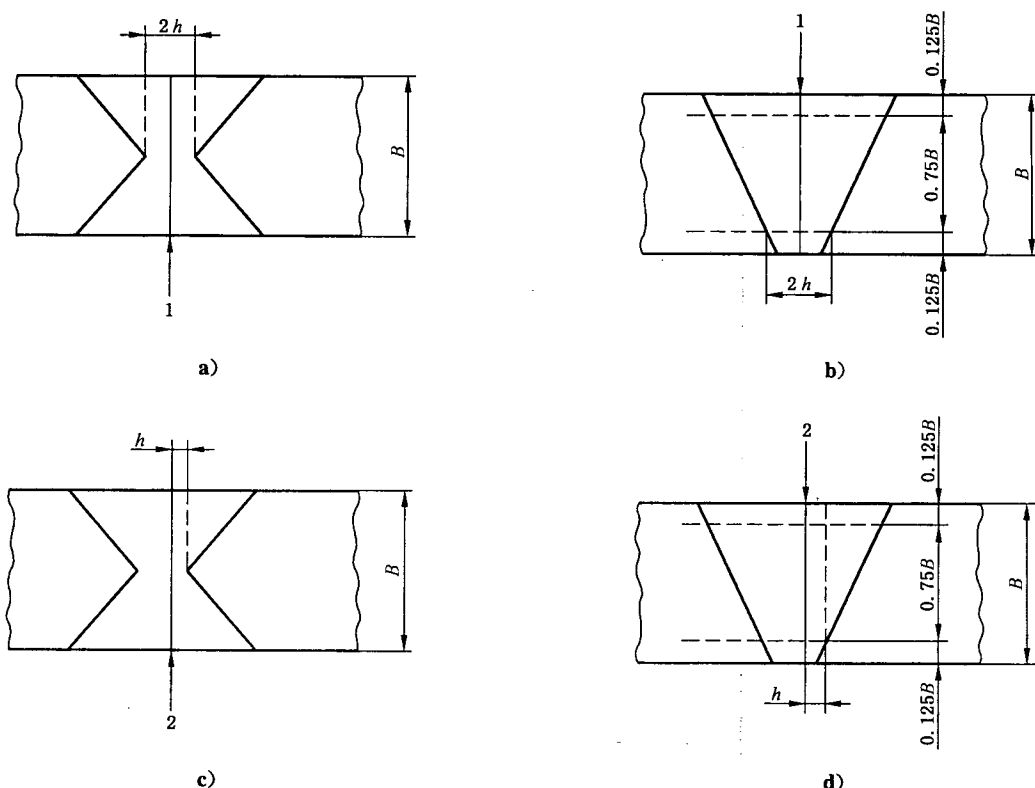
$0.5 < R_{p0.2w} / R_{p0.2b} < 1.50$ (6)

对于焊缝金属试样,如果焊缝金属与母材金属 0.2% 塑性变形量所对应的规定塑性延伸强度之比为 0.5~1.25,则 J 积分评定程序^[3,4]应依据本标准,即

$$0.5 < R_{p0.2w}/R_{p0.2b} < 1.25 \quad \dots\dots\dots(7)$$

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% 塑性变形量所对应的规定塑性延伸强度。

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) 或 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 [3,4]), 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 [5]。



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

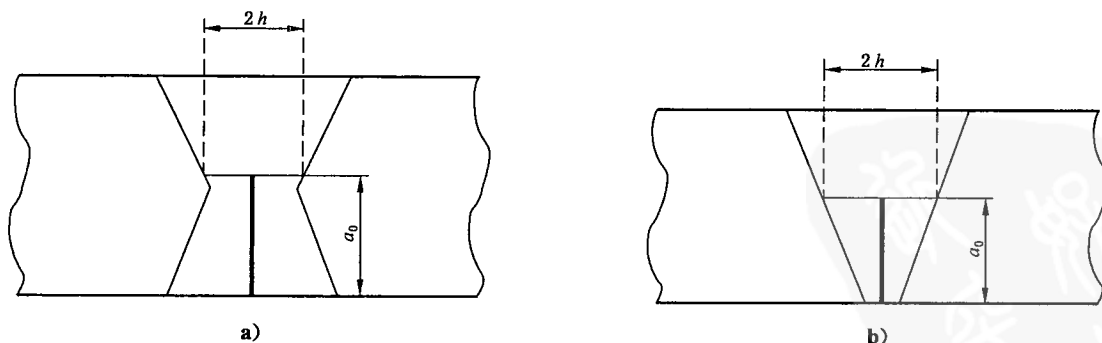


图 14 表面缺口试样(NQ)焊缝中 h 和 $2h$ 的定义

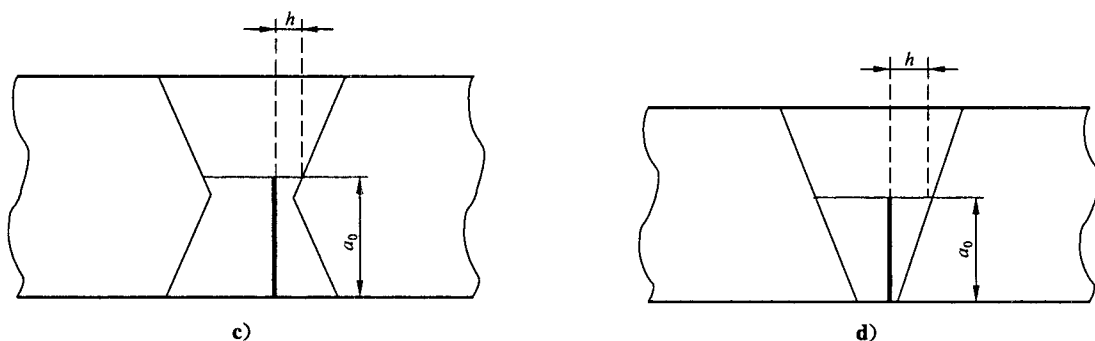


图 14 (续)

12.4.3 裂纹平直度要求

当采用弯曲试样进行 δ 和 J 积分试验时,疲劳裂纹前端平直度的要求可放宽到 $20\%a_0$,而对紧凑拉伸试样则不适用。 K_{IC} 试验(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遵循 GB/T 21143。

注 1:对裂纹尖端平直度的要求是基于弯曲类型试样的经验获得的^[6]。

注 2:为满足 SM 和 WP 试验的要求,不允许降低 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,如果有必要可采用标准 GB/T 21143 中更为严格的要求。

12.4.4 区别不同断裂韧度值的符号

除了在标准 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,本标准中还将有下列符号被使用:

- 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, J, δ (没有上标)来表示;
- 如果采用没有按照附录 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 (M 为上标)表示。

12.4.5 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,才可认定试验测定的断裂韧度是有效的,即疲劳裂纹尖端位于试样厚度中心 75% 范围(B 或者 B_N)指定的显微组织区域内。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,即试验结果无效。

12.4.6 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,才可认定试验测定的断裂韧度结果有效:疲劳裂纹尖端位于待测区域或者 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,试验结果无效。

13 试验报告

应在 GB/T 21143 的有关要求所出具的试验报告基础之上加入以下内容:

- 指明试样类型,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;
- 依照图 2、图 3 和图 4 指明裂纹平面方位;

- c) 列出焊缝及近缝区母材的原始厚度；
- d) 列出试验前宏观金相检查结果(如果需要)；
- e) 列出焊缝金属和母材金属拉伸性能及其试验方法；
- f) 列出有效焊缝宽度 h (如果需要)；
- g) 指明预制平直疲劳裂纹尖端的具体方法,在试验报告应使用 12.4.4 规定的试验结果符号上标注规则(如果需要)；
- h) 根据附录 D,应给出 pop-in 效应的评定结果(如果需要)；
- i) 给出疲劳裂纹尖端位置是否位于待测区域的确认结果；
- j) 给出 SM 缺口的 s_1 和 s_2 值(如果需要)。

根据附录 E 采用浅缺口弯曲试样进行试验,应给出相应的 a_0/W 值(如果需要)。

附录 A
(资料性附录)
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 WP 试样缺口位置示例,图 A.2 给出了 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	$B \times B$	起始于焊缝根部的中心线
c)	NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	缺口与熔合区在板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

图 A.1 WP 试样缺口位置示例

	方位	尺寸 (厚度×宽度)	缺口部位
f)	PN	$B \times B$	横切焊缝和焊缝中心线

图 A.1 (续)

	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	$B \times B$	先焊一侧焊缝的根部
c)	NQ	$B \times B$	靠近柱状焊缝金属的 GCHAZ
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

图 A.2 SM 试样缺口位置示例

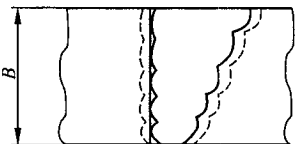
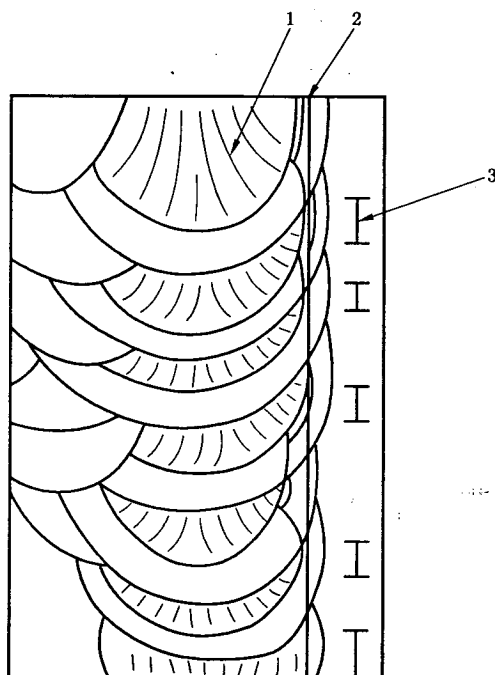
		方位	尺寸 (厚度×宽度)	缺口部位
f)		NP	$B \times B$ 或 $B \times 2B$	裂纹前沿位于 HAZ 的一个特定组织区

图 A.2 (续)

附录 B
(资料性附录)
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。

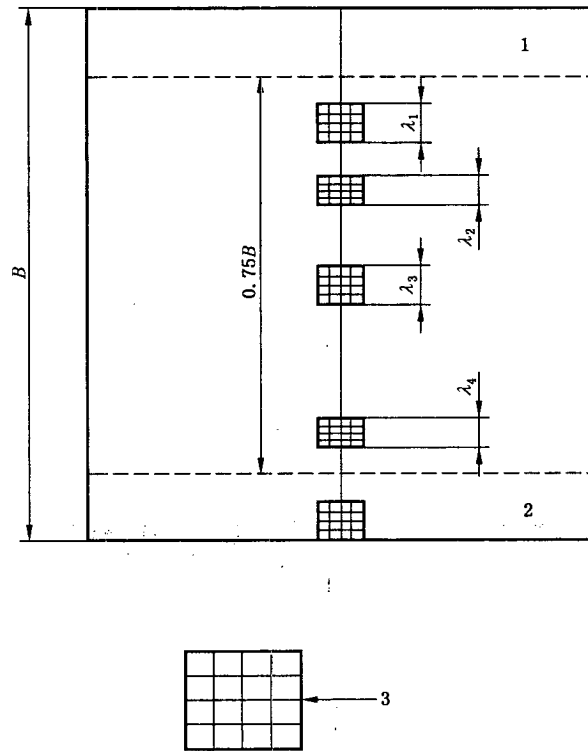
对于 SM 试件,当要求特定显微组织应出现在疲劳裂纹尖端附近时,对图 10 的切面 A 要按照图 B.2 所示的方法绘制显微组织分布图并进行显微组织百分数统计。



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



说明：

- 1——顶部；
- 2——根部；
- 3——指定的热影响区。

$$\text{指定的微观组织(在厚度的中心 75\% 部位)} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \lambda}{0.75B} \times 100$$

图 B.2 紧邻柱状焊缝金属的 HAZ 显微组织分布图

附 录 C (规范性附录)

消除残余应力和预制疲劳裂纹方法

C.1 概述

对焊态或应力部分释放试样,在预制疲劳裂纹之前,可以考虑采用 C.2 或 C.3 介绍的技术手段进行预处理,经相关方协商,其他文献列举并证实有效的预处理方法也可以被采用。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,可以在预制疲劳裂纹之前采用局部压缩的方法降低残余应力大小并且使其分布均匀化^[7,8],当焊缝截面厚度较大时局部压缩处理法不方便采用,这时可采用另一种能够产生平直疲劳裂纹前缘的双循环应力比方法^[9]。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^[10]。

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,但是其影响程度很难预测。但是经验表明,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。

C.2 局部压缩方法

局部压缩的具体方法^[7,8]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($W-a_0$)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)。矩形截面试样的加载方式参见图 C.1。根据试样厚度(B),即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,应保证两个面均产生 0.5% B 的压缩塑性变形(见图 C.1)。

也可以采用压力较低的多次压缩方法,在这种情况下钢块压面尺寸应大于 0.5 B (见图 C.1)。在实施压缩过程应注意最后压缩部位应靠近缺口尖端,此时压缩塑性变形量测量准确度应取±0.025 mm 或±0.1% B 中的较大值。

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 值应采用压缩之后的试样厚度进行计算。

注 1: 可以对试样两侧面的压缩韧带部分进行表面加工,以便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应加工去除。

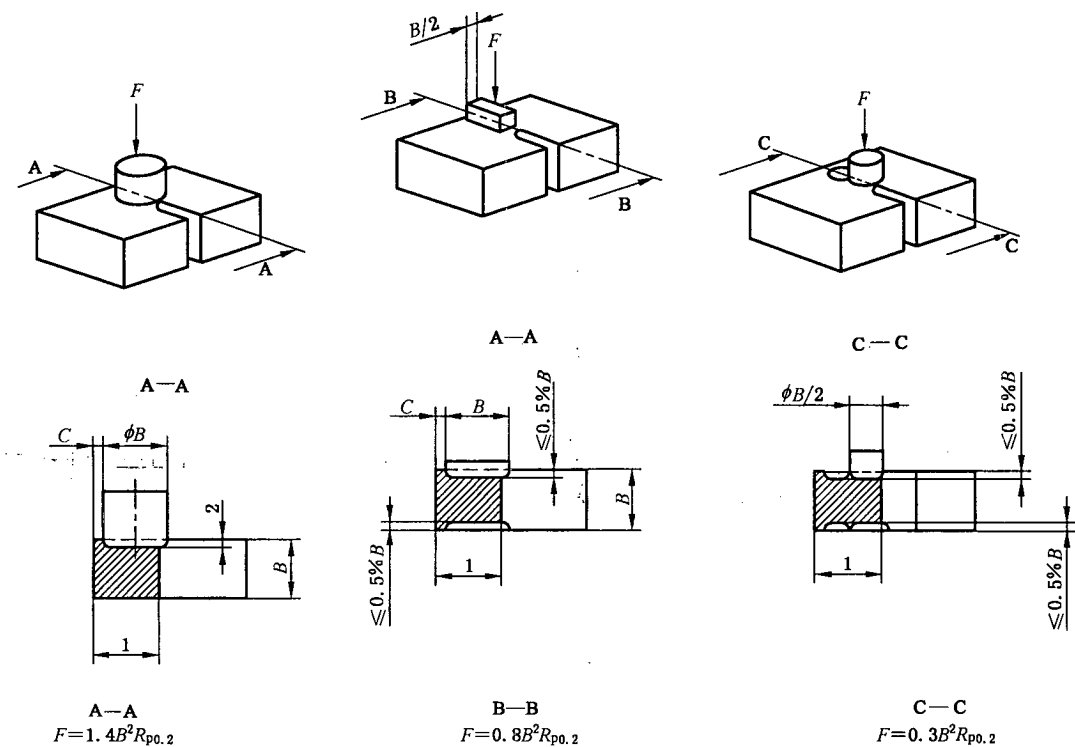
注 2: 经验表明,1% B 的总变形量对于一些焊缝和母材来说可能太大。因此,为了得到更平直的疲劳裂纹前缘,应减少塑性变形量,有必要通过试验获得最佳压缩值。

注 3: 无论选用哪种方法,或者在选用方法时没有可借鉴的经验情况下,建议以实现平直的裂纹尖端为目标。

C.3 双循环应力比方法

双循环应力比方法中,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 $K_{I,max}$ 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^[8,11]。



说明：

1—— W 减去机械缺口长度；

2—— $1\%B$ (或两侧各 $0.5\%B$)。

$R_{p0.2}$ 取母材和焊缝金属的较低值。

$C = (8\% \sim 12\%)(W - a)$

图 C.1 局部压缩处理的几种方法

附 录 D
(规范性附录)
pop-in 效应评定

D.1 概述

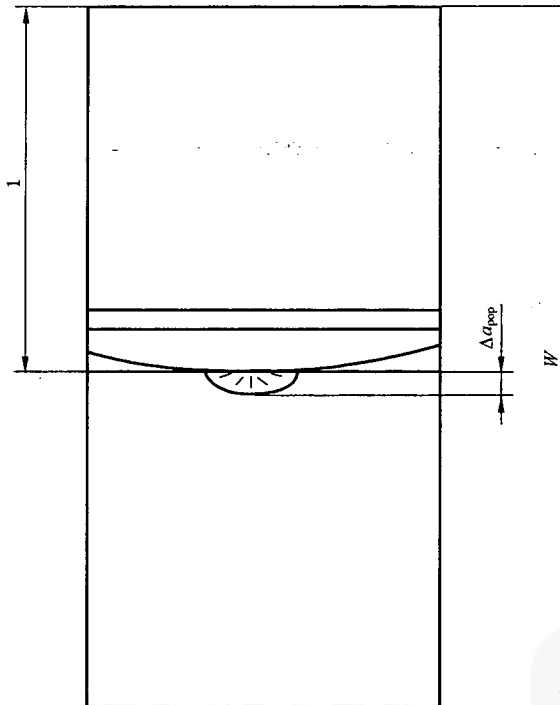
此评定步骤用于评定由 11.4 确定为有效的 pop-in 效应。

根据 GB/T 21143 确认为有效的 pop-in 效应,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,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 $\text{SZW}(\Delta a_{\text{pop}})$ 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 效应的确认仍按 GB/T 21143 的有关规定进行。



说明:

1—— a 或 $a + \Delta a$ 。

图 D.1 Δa_{pop} 的测量

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有必要用不同裂纹面方位的其他试样来确定^[12,13]。关于撕裂 pop-in 效应的有效性评定已超出本标准的范围。

D.3 切片与金相检查

将含有脆性裂纹止裂痕迹的两个断面或其中的一个断面用光学显微镜或扫描电镜进行检查,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,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。

D.4 评定

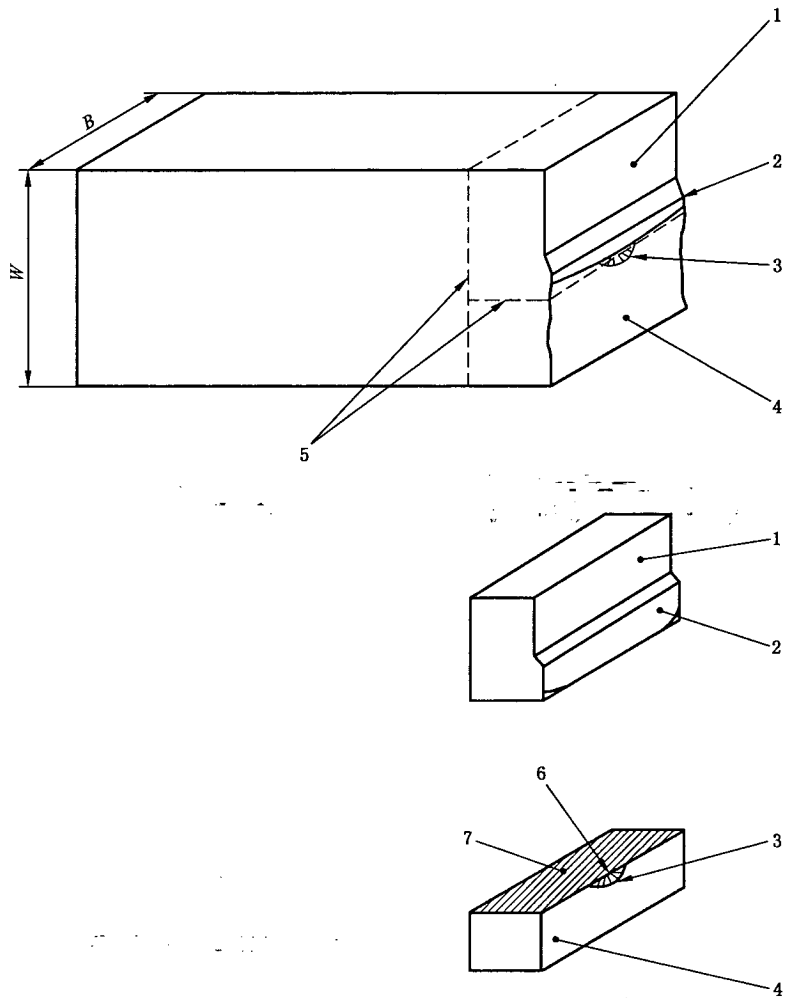
对于贯穿厚度缺口试样,需要测量裂纹产生区域与裂纹尖端平行的特定显微组织长度 d_1 以及在试样厚度中心 75% 范围内与裂纹尖端不相交的相似显微组织长度,并记录其最大值 d_2 ,如图 D.4 所示。当疲劳裂纹尖端不在切片内时,为了测量 d_2 ,有必要在疲劳裂纹尖端后面再截取切片。对于表面缺口试样,需要测量产生 pop-in 效应的显微组织整体长度 d_1 ,注意该长度应是位于疲劳裂纹尖端前面的显微组织长度,如图 D.5(为测量 d_1 尺寸可截取多个切片)所示。

D.5 确认 pop-in 效应

根据金相检查结果,判断 pop-in 效应是否可以忽略:

- a) 对于贯穿厚度缺口试样,根据 GB/T 21143 计算得到参数 P ,如果 P 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 小于 5% 且 $\Delta a_{\text{pop}} < d_1$,则可忽略该 pop-in 效应。

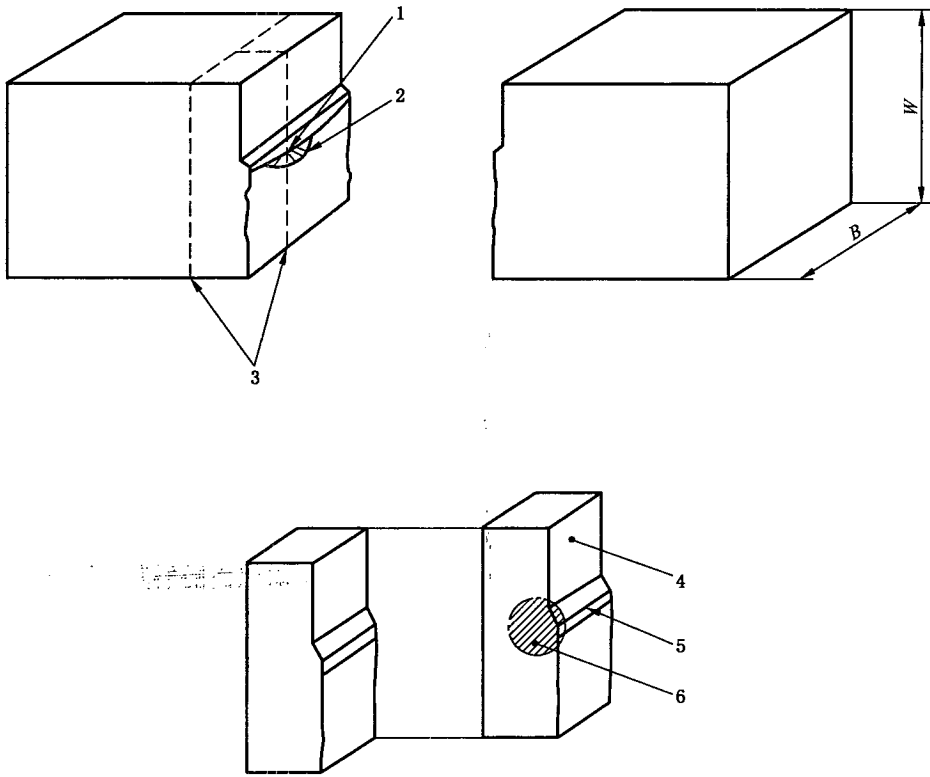
如果 $d_1 < d_2$ 或 $\Delta a_{\text{pop}} > d_1$,则确认该 pop-in 效应有效而不能忽略,因为如果取样时获得更多的脆性显微组织或者它们出现在裂纹尖端时,程度更大的 pop-in 效应就可能会出现,因此需进一步试验来确认或排除这种可能性。图 D.6 为 pop-in 评定的流程图。



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)。

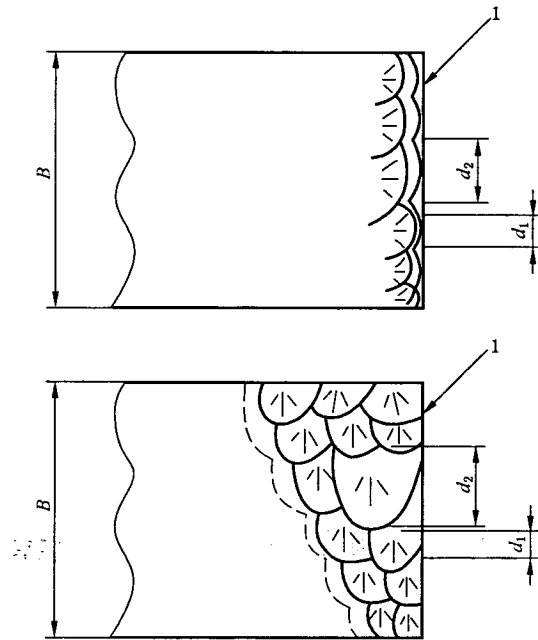
图 D. 2 试验后贯穿厚度缺口试样切片的切取方法及断裂起始点的显微组织检测



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



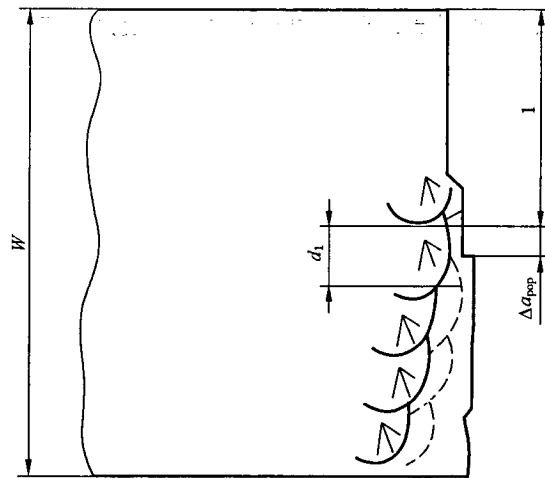
说明：

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)



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)

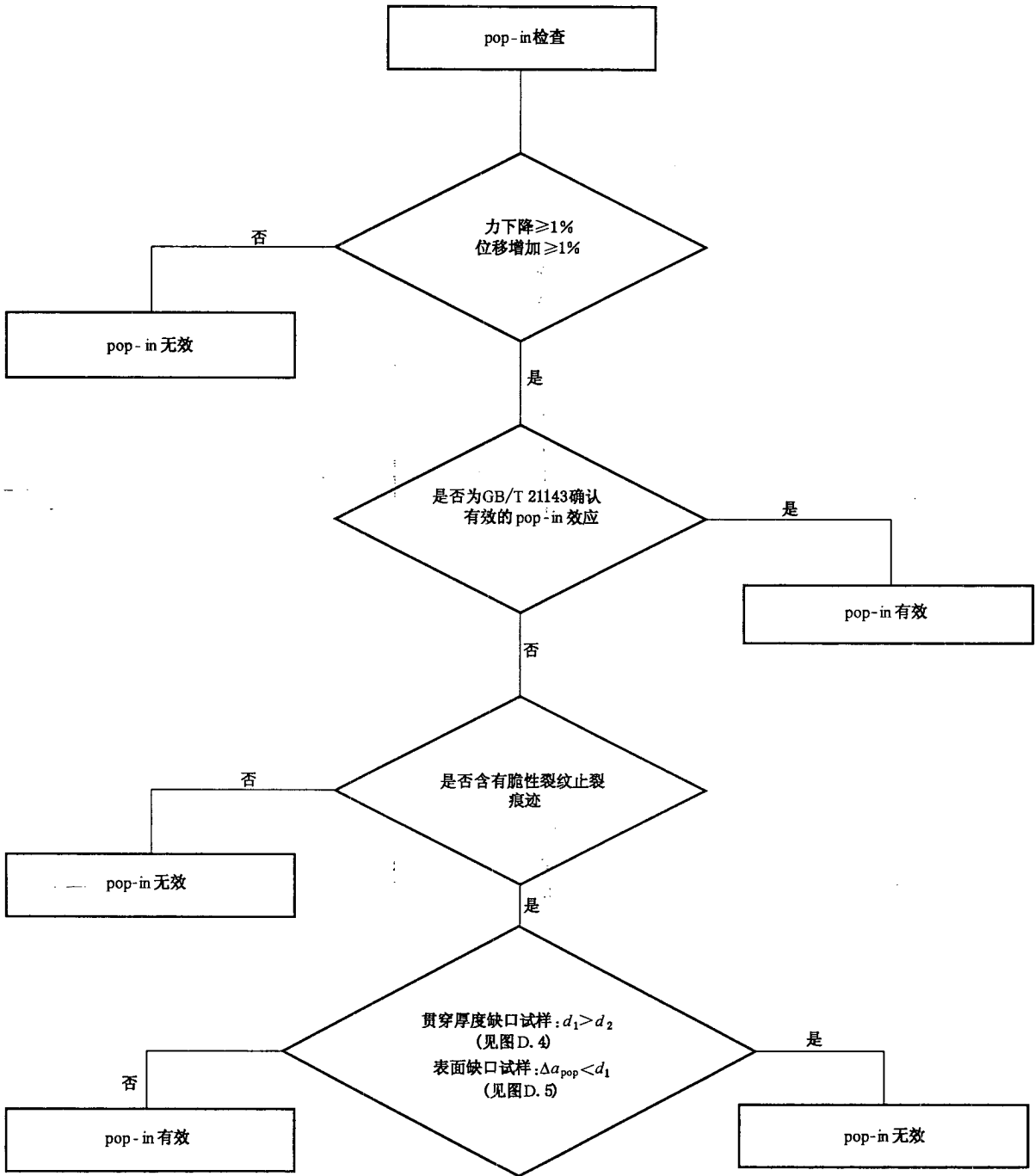


图 D.6 pop-in 评定流程图

附 录 E
(资料性附录)
浅缺口试样试验

E.1 概述

当只能采用浅裂纹弯曲加载试样($0.1 \leq a_0/W \leq 0.45$)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 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。

采用浅缺口试样可以完成这些特定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试样要高,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。

E.2 试样制备和试验设备

除了裂纹长度在 $0.1 \leq a_0/W \leq 0.45$ 范围之外,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,可以通过引伸计直接测量裂纹嘴张开位移 V ,当采用附加刀口方式时,应采用双引伸计测量裂纹尖端张开位移。

注:对于 a_0/W 接近 0.1 的试样,疲劳裂纹尖端达到 12.4.3 对平直度的要求是很困难的。但是采用附录 C.2 的局部压缩方法对试样进行处理,有利于保证疲劳裂纹平直度。

E.3 J 和 δ 的求解

J 和 δ 的求解步骤按照 GB/T 21143 的有关规定执行,求解方程如下:

三点弯曲类型试样的 K_0 按式(E.1)计算:

$$K_0 = \left(\frac{S}{W}\right) \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \cdot g_1(a_0/W) \quad \dots\dots\dots(E.1)$$

S 为 GB/T 21143 中所定义的跨距, $g_1(a_0/W)$ 的具体关系表达式参见 GB/T 21143。

K_0 是用于计算 F_c, F_u, F_{uc} 和 F_m 对应试样断裂韧度的参量,其确切含义已在 GB/T 21143 中予以具体定义。

三点弯曲类型试样^[3,4,5,14]的 J_0 按式(E.2)计算:

$$J_0 = \frac{K_0^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_c A_0}{(BB_N)^{0.5}(W-a_0)} \quad \dots\dots\dots(E.2)$$

其中, A_0 为对应于力-裂纹嘴张开位移曲线之下的塑性区域面积:

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_u 处对应的 K_u, F_u 和 A_u 计算出的 J_0 计为 J_u ;

使用在张开位移 V_{uc} 处对应的 K_{uc}, F_{uc} 和 A_{uc} 计算出的 J_0 计为 J_{uc} ;

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 。

$$\eta_c = 3.785 - 3.101\left(\frac{a_0}{W}\right) + 2.018\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 \dots\dots\dots (E.3)$$

当不采用整体刀口时,可用式(E.4)采用双钳式引伸计计算裂纹嘴张开位移。

$$CMOD = V_1 - z_1\left(\frac{V_2 - V_1}{z_2 - z_1}\right) - 2x \cdot \cos\left[\arcsin^{-1} \frac{1}{2}\left(\frac{V_2 - V_1}{z_2 - z_1}\right)\right] + 2x \dots\dots\dots (E.4)$$

V_1 与 V_2 分别是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 为图 E.1 中的距离。

将式(E.2)计算得到的 J_0 带入式(E.5)用来计算 δ_0 。如果试样的疲劳缺口开在母材或焊缝金属位置,则采用式(E.6)、式(E.7)和式(E.8)进行计算;如果试样的疲劳缺口位于热影响区部位,则应采用式(E.9)~式(E.18)进行计算^[6]。

$$\delta_0 = \frac{J_0}{m\left(\frac{R_{p0.2} + R_{mw}}{2}\right)} \dots\dots\dots (E.5)$$

$$m = 1.221 + 0.793(a_0/W) + 2.751n - 1.418n(a_0/W) \dots\dots\dots (E.6)$$

$$n = 1.724 - \frac{6.098}{R} + \frac{8.326}{R^2} - \frac{3.965}{R^3} \dots\dots\dots (E.7)$$

$$R = \frac{R_{mw}}{R_{p0.2w}} \dots\dots\dots (E.8)$$

对于缺口开在焊缝金属位置的试样,在式(E.6)和式(E.8)中分别用 $R_{p0.2w}$ 和 R_{mw} 代替 $R_{p0.2b}$ 和 R_{mb} 。
对于热影响区(HAZ)试样:

$$\delta_0 = \frac{J}{m\sigma_{nom}} \dots\dots\dots (E.9)$$

$$m = -0.111 + 0.817(a_0/W) + 1.36R_{nom} \dots\dots\dots (E.10)$$

$$R_{nom} = \frac{R_{mb} + R_{mw}}{R_{p0.2b} + R_{p0.2w}} \dots\dots\dots (E.11)$$

当 $M < 1$ 时:

$$\sigma_{nom} = \lambda_u R_{p0.2w} + (1 - \lambda_u) R_{p0.2b} \dots\dots\dots (E.12)$$

当 $M = 1$ 时:

$$\sigma_{nom} = R_{p0.2} \dots\dots\dots (E.13)$$

当 $M > 1$ 时:

$$\sigma_{nom} = \lambda_0 R_{p0.2w} + (1 - \lambda_0) R_{p0.2b} \dots\dots\dots (E.14)$$

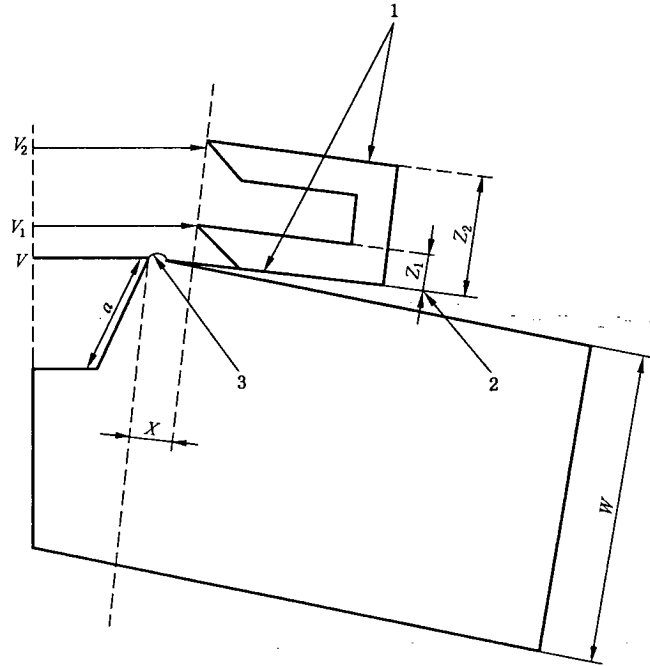
$$M = \frac{R_{p0.2w}}{R_{p0.2b}} \dots\dots\dots (E.15)$$

$$\lambda_0 = 0.5 \exp[-(1 + 0.01n^2)(M - 1)] \dots\dots\dots (E.16)$$

$$\lambda_u = 1 - 0.5 \exp\left[-(1 + 0.01n^2)\left(\frac{1}{M} - 1\right)\right] \dots\dots\dots (E.17)$$

$$n = \frac{41.34}{[1.464 + 82.68(R_{\text{nom}} - 1)]^{0.5} - 1.210} \dots\dots\dots (E.18)$$

注：数值分析结果表明，在 $0.1 < a_0/W < 0.5, 0.75 < M < 1.50, h/(W - a_0) > 0.1^{[3,4]}$ 的情况下， J 积分与 δ 按上述步骤试验获得的焊缝金属断裂韧性测试结果的误差小于 10%；在 $0.1 < a_0/W < 0.5, 0.70 < M < 2.50, 0.5 < h/B < 1.25^{[5,15]}$ 的情况下，获得的热影响区断裂韧性测试结果的误差小于 10%。



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



参 考 文 献

- [1] Hart P H M: 'Yield strength from hardness data'. TWI Research Bulletin, Vol. 16, No. 6, June 1975, pp. 76.
- [2] Irwin G R: 'Linear fracture mechanics, fracture transition and fracture control'. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, No. 2, 1968, pp. 241-257.
- [3] Pisarski H G, Wang Y Y, Kirk M and 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, ASME Vol. 3, 1995, pp. 77-85.
- [4] Pisarski H G, Wang Y Y, Kirk M and Gordon J R: 'The effect of strength mismatch on CTOD and J estimation procedures for weld fracture toughness measurement'. IIW Sub-Commission X-F 'Weld Mismatch Effect', GKSS, Geesthacht, Germany, 24-15 April 1995.
- [5] 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.
- [6] Hadley I and Dawes M G: 'Fracture toughness testing of weld metal—results of a European round-robin'. Fatigue Frac. Engng. Mater. Struct. Vol. 19, No. 8, 1996, pp. 963-973.
- [7] Dawes M G: 'Fatigue precracking weldment fracture mechanics specimens'. Metal Construction & British Welding Journal, February 1971, pp. 61-65.
- [8] Towers O L and Dawes M G: 'Welding Institute research on the fatigue precracking of fracture toughness specimens'. ASTM STP 856, 1985, pp. 23-26.
- [9] Koçak M, Seifert K, Yao S and Lampe H: 'Comparison of fatigue precracking methods for fracture toughness testing of weldments'. Proc. Int. Conf. Welding 90-Technology, Material, Fracture-GKSS, Geesthacht, Germany, October 1990, i. i. t. t. International, France, pp. 307-318.
- [10] Reemsnyder H S, Pisarski H G and Dawes M 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.
- [11] Steffan A A: 'On the effect of R-ratio and $K_{I\max}$ on fracture toughness measurement, fatigue crack propagation and fatigue closure'. Dissertation, Southern Methodist University, Texas, USA, December 1987.
- [12] Wiesner C S and Pisarski H G: 'Significance of pop-ins during initiation fracture toughness tests' 3R International, 35, October/November 1996, pp. 638-643.
- [13] Pisarski H G, Hammond R and Watt K: 'Significance of splits and pop-ins observed during fracture toughness testing of line pipe steel'. Proceedings of IPC2008, 7th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2008, ASME, Paper IPC2008-64676.
- [14] Kirk M T and Dodds R H: 'J and CTOD estimation equations for shallow cracks in single edge notch bend specimens'. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 21, No. 4, July 1993, pp. 228-238.
- [15] WANG, Y. Y., Fracture Mechanics Analysis of HAZ and Interfacial Cracks, CRP summary, EWI report MR9819, November 1998.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 焊接接头准静态断裂韧性
测定的试验方法
GB/T 28896—2012

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

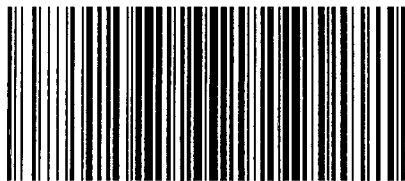
开本 880×1230 1/16 印张 2.75 字数 76 千字
2013年4月第一版 2013年4月第一次印刷

*

书号: 155066·1-47030 定价 39.00 元

*

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 28896-2012