

ICS 77.040.10
H 22
备案号: 46477-2014

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 20292—2014

核电厂用铁素体钢韧脆转变区参考温度 T_0 的测试方法

**Test method for determination of reference temperature, T_0 , for ferritic steels in
the ductile-to-brittle transition range for nuclear power plants**

2014 - 06 - 29 发布

2014 - 11 - 01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	1
4 符号和说明	3
5 试验原理与试验方法概述	4
6 仪器与设备	5
7 试样的形状、尺寸和制备	6
8 断裂韧性试验方法	14
9 断裂韧度的计算	19
10 确定参考温度 T_0	22
11 试验报告	25
附录 A (资料性附录) T_0 的估算精度	26

前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准参考ASTM E1921-11《确定铁素体钢韧脆转变区参考温度 T_0 的标准试验方法》编制，并根据我国实际情况做了适当修改。

本标准由国家能源行业标准化技术委员会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：上海核工程研究设计院、华东理工大学、中广核工程有限公司、中国核动力研究设计院。

本标准主要起草人：曹昱澎、贺寅彪、李辉、王秉熙、曹明、包章根、惠虎、李培宁、阴志英、李承亮

核电厂用铁素体钢韧脆转变区参考温度 T_0 的测试方法

1 范围

本标准规定了核电厂用铁素体钢韧脆转变区参考温度 T_0 的测试方法。

本标准适用于核电厂用规定屈服强度大于或等于 275 MPa 至 825 MPa 的铁素体钢，以及经过消除应力退火、与母材强度失配不超过 10% 的焊缝金属的参考温度 T_0 的测定。

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，仅所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 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法 (ISO 148-1:2006, MOD)

GB/T 4161—2007 金属材料 平面应变断裂韧度 K_{Ic} 试验方法 (ISO 12737:2005, MOD)

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 12160 单轴试验用引伸计的标定 (ISO 9513:1999, IDT)

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第 1 部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准 (ISO 7500-1:2004, IDT)

GB/T 21143—2007 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法 (ISO 12135:2002, MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

铁素体钢 ferritic steels

本标准所指的铁素体钢一般是碳钢、低合金钢，或高合金钢。典型的微观组织是铁素体和珠光体，也可以是贝氏体、回火贝氏体、回火马氏体，具有体心立方晶格，其断裂韧度呈现韧脆转变的特征。

注1：本术语和定义也见 GB/T 229。

注2：本定义并不意味着所有可能类型的铁素体钢已按本试验方法进行了分析验证。

3.2

韧脆转变 ductile-to-brittle transition

随着温度下降，铁素体钢的断裂机理表现出强烈的变化：由延性断裂（孔洞萌生，长大聚合机制）转变为脆性断裂机制（穿晶解理）。这种韧脆转变发生在相对较小的温度范围内。在这个温度范围内，几十摄氏度的温度变化也可能导致材料中值断裂韧度有数倍的变化。此外，即使在同一温度下测得的断裂韧度数据也呈现高度的分散性。

3.3

解理断裂 cleavage fracture

解理断裂是在正应力作用产生的一种穿晶的脆性断裂，即断裂面沿一定的晶面（即解理面）分离。解理断裂常见于体心立方和密排六方金属及合金，低温、冲击载荷和应力集中常促使解理断裂的发生。面心立方金属很少发生解理断裂。

3.4

弹塑性 elastic-plastic

J_c

解理起裂时的 J 积分。

3.5

弹塑性断裂韧度 K_{Jc} elastic-plastic

K_{Jc}

由 J_c 通过式(1)转换得到的弹塑性等效应力强度因子。

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c \frac{E}{1-\nu^2}} \dots \dots \dots (1)$$

式中:

E ——弹性模量;

ν ——泊松比。

3.6

累积失效概率 cumulative failure probability

P_f

从同一试验温度下大量试样中随机选择一个试样,当加载载荷达到特定的 K_{Jc} 时及达到此 K_{Jc} 之前发生失效的概率。

3.7

K_{Jc} 的韦布尔分布 Weibull distribution of K_{Jc}

三参数的韦布尔模型被用来描述在同一温度下 K_{Jc} 和累积失效概率 P_f 之间的关系,如式(2)所示:

$$P_f = 1 - \exp\{-[(K_{Jc} - K_{min}) / (K_0 - K_{min})]^b\} \dots \dots \dots (2)$$

式中:

K_{min} ——取 $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$;

b ——韦布尔斜率,取4。

3.8

韦布尔分布的尺度参量 Weibull scale parameter

K_0

式(2)中 K_0 为韦布尔分布的尺度参量,对应于63.2%的累积失效概率,即当 $P_f=0.632$ 时, $K_{Jc}=K_0$ 。尺度参数 K_0 通过极大似然法对一组断裂韧度数据拟合得到,见第10章的式(20)及式(21)。

3.9

中值断裂韧度 median toughness

$K_{Jc(\text{med})}$

同一温度下一组断裂韧度 K_{Jc} 数据的中值,对应50%的累积失效概率,可根据式(3),由 K_0 来确定:

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{min} + (K_0 - K_{min})[\ln(2)]^{1/4}, \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \dots \dots \dots (3)$$

式中:

K_{min} 取 $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

3.10

断裂韧度主曲线 Master Curve of fracture toughness

韧脆转变温度区的断裂韧度 K_{Jc} 数据随温度变化的曲线的形状与ASME K_{Ic} 和 K_{IR} 下包络设计曲线相似。在本方法中, 1T尺寸试样(见“第4章符号和说明”中的nT说明)的中值断裂韧度 $K_{Jc(\text{med})}$ 和试验温度 T 的关系曲线称为断裂韧度主曲线, 可用式(4)描述:

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)], \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \dots \dots \dots (4)$$

式中:

T ——试验温度, 单位为摄氏度(°C);

T_0 ——参考温度, 单位为摄氏度(°C)。

3.11

参考温度 reference temperature

T_0

1T尺寸试样的 $K_{Jc(\text{med})}$ 等于 $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 时的试验温度。

3.12

容许失效边界 tolerance bounds

给定累积失效概率 P_f 下的断裂韧度-温度关系曲线。例如: 2%容许失效边界, 以 $K_{Jc(0.02)}$ 表示, 即为2%累积失效概率时的断裂韧度 K_{Jc} 随温度 T 变化的临界线(见式(25))。

3.13

审定过程 censoring procedure

审定过程是指: a) 各断裂韧度 K_{Jc} 试验值的有效性判定; b) 无效断裂韧度并不完全舍弃, 而是用某些断裂韧度上限值(称为虚拟的断裂韧度值, dummy K_{Jc})替代的过程, 然后将这些替代的 K_{Jc} 数据和有效 K_{Jc} 数据一起共同用于统计分析求解 T_0 。

3.14

裂纹突进 pop-in

在试验的载荷位移曲线上出现不连续的情况。

注: 裂纹突进(pop-in)事件通常是可以听得见的, 是突然发生解理断裂起裂然后止裂的事件。试验记录的载荷位移曲线上该处显示随着位移的增加, 载荷略有下降, 但试样并未完全断裂。在这之后, 试验记录的载荷与位移继续增大。

4 符号和说明

本标准采用的符号和说明见表1。

表1 符号和说明

符号	单位	说明
K	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	应力强度因子
K_{max}	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	预制疲劳裂纹时的最大应力强度因子
K_f	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	预制疲劳裂纹扩展最后阶段的应力强度因子 K 的最大值
$K_{Jc\Delta a}$	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	发生慢稳定裂纹扩展的断裂韧度最大限定值
J	kJ/m^2	J 积分, 围绕着裂纹前缘, 从裂纹的一侧表面到另一侧表面的线积分或面积分, 用以表征裂纹前缘区域的局部应力应变场的强度
J_{Ic}	kJ/m^2	延性断裂韧度, 裂纹开始稳定扩展时 J 的工程估计值

表 1 (续)

符号	单位	说明
E	MPa	试验温度下的弹性模量
E_e	MPa	有效弹性模量
ν	-	泊松比
η	-	基于 J 积分变形理论, 关联施加在试样上的塑性功与裂纹扩展阻力的无量纲参量
a_0	mm	初始裂纹长度
Δa_{pe}	mm	从机加工缺口开始扩展的预制疲劳裂纹扩展的平均长度
Δa_f	mm	预制疲劳裂纹扩展最后阶段长度
W	mm	试样宽度
b_0	mm	初始韧带长度= $W-a_0$
S	mm	SE(B)试样的跨距, 见 GB/T 21143—2007 图 10
B	mm	试样厚度
B_N	mm	试样净厚度, 对于侧面开槽的试样, 两侧缺口根部之间的试样净厚度
nT	-	定义试样尺寸的代号, n 值表示 2.54 mm (1 in) 的倍数, 例如 0.5T 试样的厚度 B 为 1.27 mm (0.5 in)
$\dot{\Delta}_{LL}$	mm/s	加载线位移速率
T_{0Q}	°C	采用本标准试验方法计算的 T_0 暂定值。如果满足所有有效性判定标准, 则 $T_0=T_{0Q}$ 。
T_Q	°C	通过不符合本测试方法要求的试样或试验, 或在两者都不符合本标准的情况下, 得到了一组 K_{Ic} 数据。此时, 对应于 $K_{Ic(med)}=100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 的温度被定义为 T_Q , T_Q 不是 T_0 的暂定值。
\dot{K}	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{s}$	施加的应力强度因子的增量的速率
K_{max}	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	预制疲劳裂纹的应力强度因子 K 的最大值
K_f	$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	预制疲劳裂纹最后阶段的应力强度因子 K 的最大值
$R_{p0.2}$	MPa	在试验温度下材料在垂直于裂纹平面方向 0.2% 的规定塑性延伸强度
R_m	MPa	在试验温度下材料在垂直于裂纹平面方向的抗拉强度
P_m	MPa	预制疲劳裂纹时, 许用的最大载荷; 采用卸载柔度技术时, 开始测量裂纹扩展长度的最低载荷
注1: 本表格只列举了主要用到的参数符号, 其他参数符号将在相应的章条中予以说明。		
注2: 除非特别说明, 本表格所列举的各参数符号的数值均为试验温度下的测量或计算值。		

5 试验原理与试验方法概述

5.1 试验原理

铁素体钢在微观上是非均质的, 这是由于晶粒取向不同, 加之晶界也具有与晶内不同的性质。两者都包含碳化物或者非金属夹杂物, 这些脆性的第二相都可以成为解理微裂纹的形核点。这些形核点在裂纹前缘的所处位置是随机的, 导致即使在同一温度下, 试验测得的断裂韧度也是非常分散的。本标准用弹塑性应力强度因子 K_{Ic} 表征断裂韧度, 它是根据解理失稳断裂时 J 积分值 J_c 计算得到。断裂韧度值的分散结果, 可用统计的方法来表征。本标准采用三参数韦布尔分布式描述断裂韧度数据的分散性(见式(2)), 韦布尔斜率 b 固定取 4, 门槛断裂韧度 K_{min} 取 $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

在韧脆转变温度区，断裂韧度随着温度的降低而迅速下降。不同的铁素体钢或者是同一种钢经时效损伤后(例如辐照前和辐照后)的断裂韧度—温度曲线的形状都是相似的，不同的仅仅是在温度轴上的位置，其位置和温度的关系显示了该材料的断裂性能，高韧度钢具有低的转变温度，低韧度钢具有高的转变温度，辐照后的转变温度将会升高。本标准采用参考温度 T_0 作为材料的转变温度，用主曲线(式(4))描述任意铁素体钢材料的1T试样的中值断裂韧度 $K_{Jc(\text{med})}$ 与 $(T-T_0)$ 的关系。不同铁素体钢的 $K_{Jc(\text{med})}$ 与 $(T-T_0)$ 的关系曲线是同一条曲线，但不同铁素体钢的参考温度 T_0 是不同的。

因而，当测得了材料的参考温度 T_0 值，即已获得该材料的1T厚试样在任一累积失效概率 P_f 时的断裂韧度 K_{Jc} 与温度 T 的关系曲线，如式(25)所示。参考温度 T_0 的移动表征了某些因素导致的转变温度的变化，例如，由冶金损伤机制、辐照脆化、回火脆化等导致的韧脆转变温度的变化。

本标准采用“最弱链理论”将不同厚度试样的断裂韧度值换算成1T厚试样的断裂韧度值，见式(19)。

5.2 试验方法概述

本试验方法包含对预制疲劳裂纹的三点弯曲试样及紧凑拉伸试样进行断裂韧度试验。在试验温度下，试样是发生解理断裂或发生裂纹突进(pop-in)的。在试验过程中，通过自动记录仪或计算机采集装置记录载荷与缺口张开位移。计算出失稳时积分值 J_c ，并转化为等效的应力强度因子 K_{Jc} 。为了进行统计分析，对 K_{Jc} 数据要进行有效性限定。

本标准提供了单温度法和多温度法两种确定参考温度 T_0 的方法。单温度法应在单一温度 T 下重复进行断裂韧度试验，多温度法须在 $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$ 区间内不止一个温度下进行断裂韧度试验。应尽量选择中值断裂韧度 $K_{Jc(\text{med})}$ 等于 $100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 时的温度作为试验温度，本标准推荐了估算此试验温度的方法。至少重复六次试验。对于小试样，例如预制裂纹夏比(PCVN)试样，可能要在 T_0 温度以下(对应的 $K_{Jc(\text{med})}$ 明显小于 $100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)进行试验。在这种情况下，如8.4规定所述需要额外增加试样的数量。

采用重复试验得到的一组 K_{Jc} 数据，按以下四步确定参考温度 T_0 。

- 按审定过程处理断裂韧度 K_{Jc} ，见8.7.2、10.3.1、10.3.2及10.4.2；
- 经过审定，非1T大小试样的 K_{Jc} 数据转换成1T大小试样的断裂韧度数据，见10.2；
- 酌情选择单温度法、多温度法计算 T_{0Q} ，见10.3及10.4；
- 若 T_{0Q} 满足有效性判定，则 $T_0=T_{0Q}$ ，见10.5。

确定了 T_0 之后，可以绘制出材料的主曲线和容许失效边界曲线，见式(4)和式(25)。

6 仪器与设备

6.1 测试仪器的精度

需要测量施加在试样上的载荷和加载线位移，以便获得作用在试样上的功。载荷与加载线位移可通过计算机记录，或者自动记录在x-y绘图仪上。计算机的数字信号分辨率应分别为载荷传感器信号量程的1/4 000和位移传感器信号量程的1/32 000。

6.2 紧凑拉伸试样用夹具

紧凑拉伸试样加载时使用的开有平底销孔的U形钩，其设计方案推荐参考GB/T 4161—2007的图D.2。U形钩和加载销应当由足够强度的钢制成，以使压痕只产生弹性变形(硬度不小于40 HRC或试样硬度，取其大者)。

6.3 三点弯曲试样夹具

GB/T 4161—2007的图D.1提供了一种适用于三点弯曲试验的固定夹具的设计方案。此设计考虑了在试验过程中，支承辊可以旋转，以尽量减少摩擦力的影响。固定装置和支承辊应由高硬度钢制成（HRC >40）。

6.4 紧凑拉伸 C(T) 试样用位移引伸计

本标准需要测量位移，以通过试验记录的载荷-位移曲线下包围的面积（测量所做的功）确定 J 积分值。参考本标准推荐的方法选取试验温度时，测量延性裂纹扩展量并不重要，一般在失稳之前不会发生明显的慢稳定裂纹扩展。不过，作为补充信息，建议测量试样断口上的延性裂纹扩展长度，结果可附在报告中。

在测量稳态裂纹扩展时主要推荐用卸载柔度法，参见GB/T 21143—2007。裂纹扩展的测量也可以采用其它技术，例如，电位法，但是应注意在低温下试验时，避免试样受热。

推荐测量紧凑拉伸C(T)试样的加载线位移来确定 J 积分值。但是，也可测量距离加载线0.25*W*的前端面处的位移，再按7.1所推荐的方法将其转换获得加载线处的位移。

用于测定缺口张开位移和施力点位移的引伸计应按GB/T 12160的规定进行校准，并应至少达到1级，准确度达到±1%。

6.5 三点弯曲试样 SE(B) 用位移引伸计

SE(B)试样位移引伸计有两种安装方法。在加载线的刀口上安装引伸计，测量加载线位移，主要用于计算 J 积分。如果能够根据夹具的弹性柔度扣除额外的位移，也可以基于加载线位移的弹性柔度计算裂纹尺寸。

也可采用裂纹嘴的刀口上安装引伸计，测量裂纹嘴张开位移（CMOD）来确定 J 积分的塑性分量 J_p 。但是，此时应使用专门适用于裂纹嘴张开位移的 η 因子，按照9.3描述的方法来计算 J_p 。不建议采用由裂纹嘴张开位移推算加载线位移的方法。

引伸计的校准按6.4要求。所用的引伸计不应温度敏感。

6.6 载荷传感器

试验应该在按GB/T 16825.1检验合格的试验机上进行。施加的载荷通过传感器测量，该传感器的噪声比应小于它信号范围的1/2000。每年应按照GB/T 16825.1对力传感器进行校验。

6.7 测温仪器

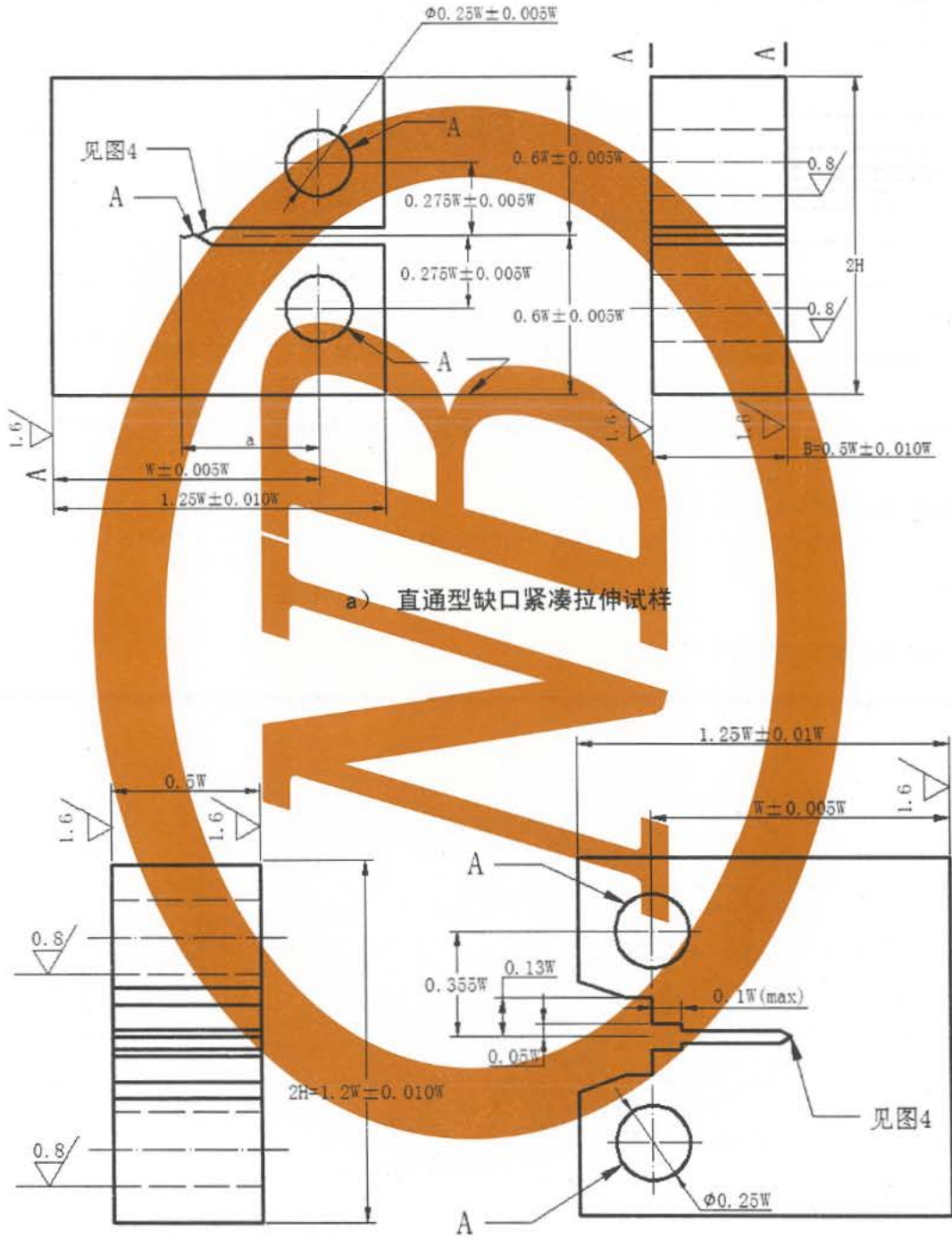
试样的温度用热电偶导线和电位计进行测量。推荐将两个热电偶金属线分开贴在试样的表面上，可以采用焊接，如点焊，或机械的方式粘贴，例如钻孔、用坚固的机械夹持装置固定。采用机械粘贴的方式应验证其具有相当的温度测量精度。将热电偶金属丝分别贴在试样表面上目的是使测试材料成为热电偶电路的一部分（见8.2.4）。温度测量的准确度应在实际温度的上下3℃以内，试样温度测量的重复性在2℃以内。测量的精确度应在±1℃或更好。为确保达到试验所要求的测温准确度，温度测量仪器应每六个月检查一次。

7 试样的形状、尺寸和制备

7.1 紧凑拉伸 C(T) 试样

三种推荐的紧凑拉伸试样的设计如图1所示。图1中b)、c)所示的两种试样的设计主要考虑能够测量加载线位移，为在加载线位置上设置刀口预留了空间。当采用图1中a)的直通型缺口紧凑拉伸试样，在

其前端面处（距离加载线 $0.25W$ 的裂纹嘴处）测量位移时，可通过测量值乘以常数 0.73 得到加载线位移。所有类型 and 尺寸的C(T)试样的高度与宽度之比 ($2H/W$) 均为 1.2 。初始裂纹尺寸 a_0 应为 $0.5W \pm 0.05W$ 。试样的宽度 W 为 $2B$ 。

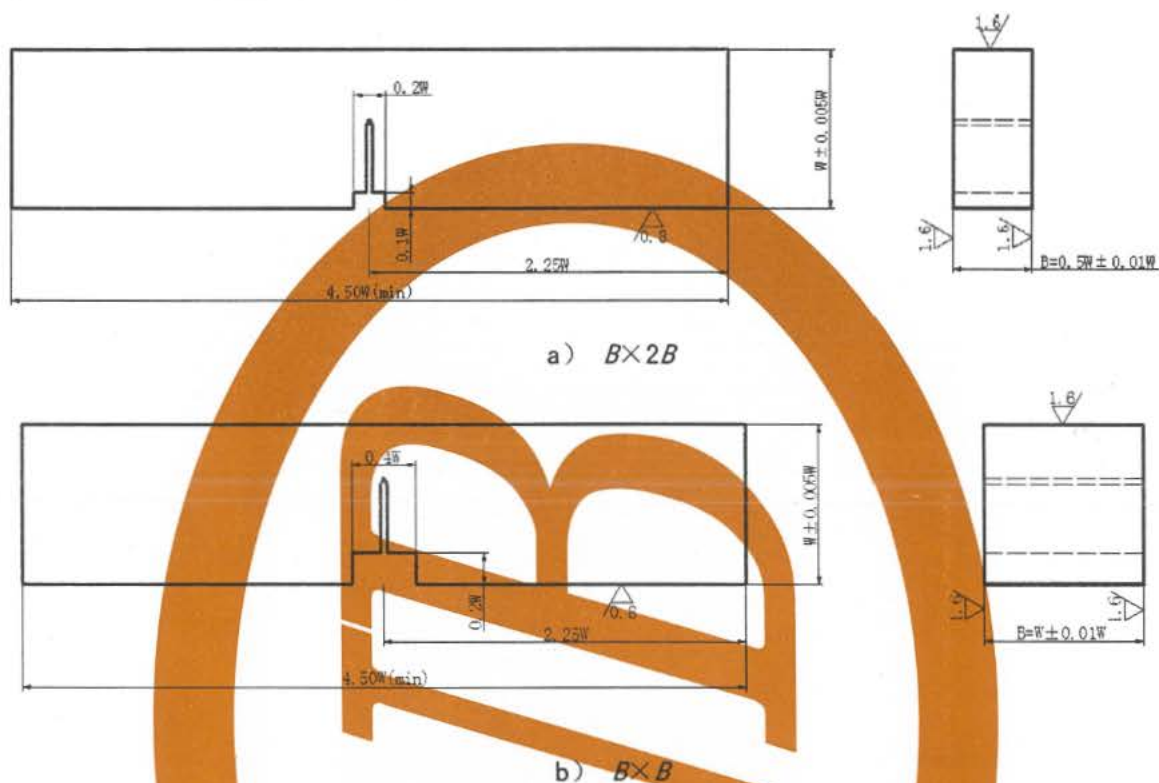


a) 直通型缺口紧凑拉伸试样

b) 台阶型缺口紧凑拉伸试样 (销钉直径 0.24ϕ)

7.3 三点弯曲 SE(B) 试样

推荐的SE(B)试样的设计如图3所示。试样的跨距与试样宽度之比为 $S/W=4$ 。宽度 W 为1倍或2倍的试样厚度，即 $1B$ 或 $2B$ 。初始裂纹尺寸 a_0 为 $0.5W \pm 0.05W$ 。

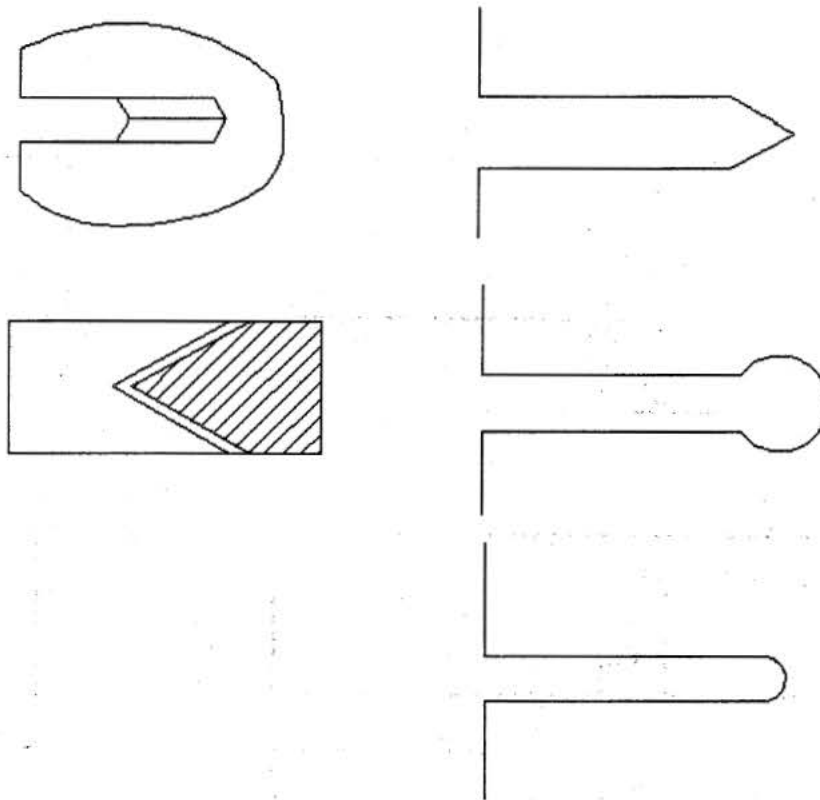


所有表面相互垂直和平行，公差在 $0.001W$ 以内。
裂纹引发缺口垂直于试样表面，公差在 2° 以内。

图3 三点弯曲试样的尺寸比例和公差

7.4 机加工缺口的设计

三种疲劳裂纹引发缺口的设计如图4所示。这些缺口可以是穿透试样厚度的直缺口或山形缺口。用于试验的所有试样的机加工缺口及疲劳裂纹应位于图5所示的包迹线之内。为了促进在低应力强度因子水平下的疲劳裂纹扩展，直通型槽末端的V型缺口的根部半径应不大于 0.08 mm 。如果采用山形缺口，根部半径应不大于 0.25 mm 。在缺口末端钻孔的情况下，有必要在孔的末端提供一个尖锐的应力集中源。



缺口宽度应不小于1.6 mm，但不应超过0.063 W
 引发裂纹缺口的表面与试样两侧面的交点到试样上下边缘的距离应相等，公差在0.005 W 以内

图4 裂纹引发缺口

7.5 试样的刀口

试样的刀口可以是整体的，也可以是附加的。试样刀口的设计参见GB/T 21143—2007的5.4.2.3。两个刀刃应互相平行。

7.6 试样尺寸的要求

裂纹前缘的平直度应满足8.7.1中的要求。剩余韧带尺寸 b_0 应有足够大的尺寸，以保持断裂时裂纹前缘处于高拘束状态。因而规定试样 K_{Jc} 的最大限度值为：

$$K_{Jc(\text{limit})} = \sqrt{\frac{Eb_0R_{p0.2}}{30(1-\nu^2)}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$b_0 = W - a_0$

超过了 $K_{Jc(\text{limit})}$ 限定值的 K_{Jc} 值可用于断裂韧性数据审定过程。单温度法数据的审定过程详见8.7.2和10.3.2，多温度法的审定过程详见8.7.2和10.4.2。

7.7 小试样

相对于试样的尺寸和材料流动性能而言，对于较高的断裂韧度 K_{Jc} ，由于过度塑性流动引起的裂尖拘束松弛，其在满足式(5)要求的情况下，可能并不总是能唯一地描述裂纹尖端的应力应变场。这种情况有可能会出现在低应变硬化材料中。当这种情况发生时，一组有效断裂韧度数据中最高的一些 K_{Jc} 值可能会导致所得到的 T_0 值比用高拘束试样试验得到的 T_0 值低。

可采用适当的科学方法，例如Beremin解理断裂局部法模型，对拘束度进行修正，取得修正后的 T_0 值。但应在试验报告中首先报告原测得的 T_0 值，再详细报告拘束修正的方法和过程，以及经拘束修正后的 T_0 值。

注：Beremin解理断裂局部法模型是1983年法国巴黎高等矿业学院的F.M. Beremin研究小组从细观力学角度出发，提出了一个解理断裂的局部法模型。Beremin模型非常适合解决拘束度效应对解理断裂韧性的影响，弹塑性有限元计算是Beremin模型分析的基本手段。

7.8 侧面开槽试样

可选用侧面开槽的试样。推荐在侧面开槽前先预制疲劳裂纹，尽管这样试样表面的裂纹扩展比内部的裂纹扩展会稍落后一些。在预制裂纹后再在试样侧面开槽能够提高初始裂纹前缘的平直度。对于正方形截面的三点弯试样，侧面开槽是控制裂纹前缘平直度必不可少的方法。侧面开槽的总深度不应超过 $0.25B$ 。通常，坡口角度为 45° 、根部半径为 $0.5\text{ mm}\pm 0.2\text{ mm}$ 的侧面开槽试样会得到理想的试验结果。

7.9 试样类型对 T_0 的影响

由于本标准所允许的几种试样之间存在拘束度差异，在给定的试验温度下，中值断裂韧度 $K_{Jc(\text{med})}$ 会因试样类型的不同而变化。断裂韧度 K_{Jc} 随试样类型的差异程度是材料流变特性的函数。在屈服强度一定的情况下，应变硬化越强， K_{Jc} 的差异越小。 K_{Jc} 与试样类型的相关性最终导致由同一种材料不同类型试样测得的 T_0 值存在差异。通常，由C(T)试样测得的 T_0 值比SE(B)试样测得的 T_0 值高。比较C(T)和SE(B)试样的 T_0 值，平均偏差大约 10°C ，甚至可达 15°C 。但是，个别的、较少的试验数据未必能反映出这种的趋势。由包含C(T)及SE(B)试样的一组试样测得的 T_0 值可能介于单独由这两种试样测得的 T_0 值之间。因此，在报告、分析和讨论试验结果时，应一并报告试样的类型。

7.10 疲劳裂纹的预制

7.10.1 一般要求

许用疲劳载荷值应受到限制，要求预制疲劳裂纹时施加的最大应力强度因子 K_{max} 值远低于后续断裂韧度试验测得的材料断裂韧度 K_{Jc} 值。在预制裂纹和断裂韧度试验之间不允许对试样进行中间热处理。引发裂纹缺口和疲劳裂纹均应满足图5所示的要求。有多种方法可以促使尽早引发疲劳裂纹：

- 采用非常尖锐的缺口尖端；
- 使用山形缺口（图4）；
- 对试样预施加压缩静载荷，使缺口尖端在预计产生的裂纹面的垂直方向上受压，但此力不能超过按式(6)和(7)计算的 P_m ：

$$\text{SE(B)试样,} \quad P_m = \frac{0.5Bb_0^2}{S} \left(\frac{R_{p0.2} + R_m}{2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{C(T)试样,} \quad P_m = \frac{0.4Bb_0^2}{(2W+a_0)} \left(\frac{R_{p0.2} + R_m}{2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

- 使用负值的疲劳载荷比，载荷比值越负，对于给定的最大疲劳载荷，裂纹起裂可能越早，压缩

载荷峰值不应超过 P_m 。

注：当不能在将进行断裂韧性试验的最终热处理状态下进行预制疲劳裂纹时，一种折衷的方法是在预制疲劳裂纹的最后阶段保持更低的最大载荷 K_f ，推荐取 $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

7.10.2 预制疲劳裂纹的方法

预制疲劳裂纹时可以采用载荷控制、位移控制或者应力强度因子 K 控制的方式。疲劳循环使用正弦波，在接近可实现的最高频率的频率下进行。在没有恶劣环境的情况下，100 Hz 以下的频率范围不会对疲劳裂纹的形成产生显著的影响。试样需要准确地安装在加载装置上，保证均匀、对称地施加载荷。仔细观察试样，直至在试样的一侧发现裂纹起裂。如果在裂纹首先起裂的一侧已经可以观察到明显的裂纹扩展，而另一侧还观察不到裂纹起裂，需要暂停疲劳循环，查找原因，并纠正这种非对称的扩展。有时，只需要翻转试样就能解决这个问题。

预制疲劳裂纹可以采取连续平滑的方式也可以采取分阶段的方式来逐步降低最大应力强度因子 K_{max} 。当分阶段降低最大应力强度因子 K_{max} 时，每阶段 K_{max} 下降幅度不应超过 20%。建议在每一阶段都产生了可测量的裂纹扩展之后，再继续下一阶段的预制疲劳裂纹扩展。通常在采用最小载荷与最大载荷之比 $P_{\text{min}}/P_{\text{max}}$ 为 0.1 时，预制疲劳裂纹最为有效。各阶段实际的最大载荷值 P_{max} 的精度应控制在设定值上下偏差的 $\pm 5\%$ 以内。

图6显示了在预制裂纹过程中许用的 K_{max} 包络曲线。表3和表4总结了对 K_{max} 和疲劳裂纹扩展的各项要求。只要 K_{max} 处在包络曲线内并且最大疲劳载荷小于 P_m ，允许采用任何加载方式预制疲劳裂纹。施加在试样裂尖上的 K_{max} 在任一疲劳裂纹长度时都不应超过 $25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。此外，对于小试样或低屈服强度材料的试样或者低屈服强度材料制成的小试样， K_{max} 还可能受到 P_m 的限制。当预制疲劳裂纹时的温度高于试验温度时，在图6所示的预制疲劳裂纹最后阶段 Δa_f (即图6中施加 K_f 阶段)， K_f 不应超过 $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ，裂纹扩展最后阶段长度 Δa_f 不得低于 0.2mm。当预制疲劳裂纹温度等于或低于试验温度时， K_f 不应超过 $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。 Δa_{sh} 应大于等于从最大应力强度因子 $K_{\text{max}}=25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 降至 K_f 所导致的塑性区尺寸变化量。以 K_{max} 下降时裂尖塑性区前端维持稳定不变为条件定义了 Δa_{sh} 的最小值，即：

$$\Delta a_{\text{sh}} \geq r_{p1} - r_{p2} \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$$r_{p1} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_{\text{max}}}{R_{p0.2}} \right)^2, \quad K_{\text{max}} = 25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}};$$

$$r_{p2} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_f}{R_{p0.2}} \right)^2。$$

注：如果屈服强度 $R_{p0.2}$ 未知，使用一个较低的 $R_{p0.2}$ 估计值可以保守地计算得到一个较大的 Δa_{sh} 估计值。

从机加工缺口开始扩展的预制疲劳裂纹扩展的平均长度 Δa_{pc} (使用 8.6 规定的方法测量) 应大于或等于机加工缺口半宽 $0.5N$ 和表 2 中所示的 Δa_{min} 两者中的较大尺寸。对于宽缺口 ($N \geq 0.01W$)， Δa_{min} 为 1.3 mm，对于窄缺口 ($N < 0.01W$)， Δa_{min} 为 0.6 mm。预制疲劳裂纹必须满足 8.7.1 对裂纹前缘平直度的要求，在机加工缺口沿着试样厚度方向的所有位置上，都必须有明显的疲劳裂纹扩展。为了保证厚度 $B > 25.4 \text{ mm}$ (即 1 in) 的试样能满足以上这些条件，建议通过光学观测的方法检查试样两侧表面是否都已有疲劳裂纹扩展，或者保证 Δa_{pc} 足够长，使得在试样整个厚度方向上所有点处，均发生了疲劳裂纹扩展，并且能满足 8.7.1 规定的要求。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/127044030134006032>