



中华人民共和国国家标准

GB/T 24522—2020/ISO 22889:2013
代替 GB/T 24522—2009

金属材料 低拘束试样测定稳态裂纹 扩展阻力的试验方法

**Metallic materials—Method of test for the determination of resistance
to stable crack extension using specimens of low constraint**

(ISO 22889:2013, IDT)

2020-06-02 发布

2020-12-01 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	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 符号和说明	2
5 一般要求	3
5.1 概述	3
5.2 试样	4
5.3 试验前的要求	7
5.4 试验设备	8
5.5 试验要求	13
5.6 试验后裂纹测量	14
6 δ_5 - Δa 阻力曲线和 CTOA 的确定	17
6.1 总则	17
6.2 试验步骤	18
6.3 R-曲线图	18
6.4 临界 CTOA 的测定	20
7 试验报告	21
7.1 通则	21
7.2 试样、材料和试验环境	21
7.3 试验数据的有效性判定	22
7.4 δ_5 - Δa 曲线的判定	23
7.5 Ψ_c 的判定	14
附录 A (资料性附录) 试验报告实例	24
附录 B (资料性附录) 测量裂纹尖端张开位移 δ_5 的装置	28
附录 C (资料性附录) 裂纹尖端张开角 Ψ 的确定	30
附录 D (资料性附录) 断裂韧度特征值的测定	38

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 24522—2009《金属材料 低拘束试样测定稳定裂纹扩展阻力的试验方法》，与 GB/T 24522—2009 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 修改了规范性引用文件，用国际标准代替了我国标准（见第 2 章，2009 年版的第 2 章）；
- 增加了试样最大缺口宽度的要求（见 5.2.2.3，2009 年版的 5.2.2.3）；
- 修改了紧凑拉伸试样中最大预制疲劳载荷的限制条件（见 5.2.2.4.3，2009 年版的 5.2.2.4.3）；
- 修改了中心裂纹拉伸试样中最大预制疲劳载荷的限制条件（见 5.2.2.4.4，2009 年版的 5.2.2.4.4）；
- 更正了式（3）中的错误，将 a 更改为 a_0 （见 5.2.2.4.4，2009 年版的 5.2.2.4.4）；
- 将紧凑拉伸试样 a_0/W 比值范围从 0.45~0.65 修改为 0.40~0.70 [见 5.6.1.3 a)，2009 年版的 5.6.1.3 a)]；
- 修改了预制疲劳裂纹的长度要求 [见 5.6.1.3 d)，2009 年版的 5.6.1.3 d)]；
- 增加了最小裂纹扩展量 Δa_{\min} ，并增加了式（12）（见 6.4.2、6.4.3，2009 年版的 6.4）；
- 修改了数据判定的检查表 [见 7.3.5 d)、7.3.5 e)，2009 年版的 7.3.5 d)、7.3.5 e)]。

本标准使用翻译法等同采用 ISO 22889:2013《金属材料 低拘束试样测定稳态裂纹扩展阻力的试验方法》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 12160—2019 金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定 (ISO 9513:2012, IDT)
- GB/T 16825.1—2008 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 20832—2007 金属材料 试样轴线相对于产品织构的标识 (ISO 3785:2006, IDT)
- GB/T 21143—2014 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法 (ISO 12135:2002, MOD)

本标准做了下列编辑性修改：

- 图 4 的子图的次序进行了重新安排。

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：武汉钢铁有限公司、东莞材料基因高等理工研究院、华东理工大学、力试(上海)科学仪器有限公司、深圳万测试验设备有限公司、冶金工业信息标准研究院、中核武汉核电运行技术股份有限公司、内蒙古包钢钢联股份有限公司、中国石油大学(北京)。

本标准主要起草人：李荣锋、涂善东、张显程、董莉、刘冬、尚伦、王琼琦、王斌、黄星、刘明辉、唐毅、张建军、帅健、侯慧宁。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 24522—2009。

引 言

ISO 12135:2002 采用紧凑拉伸试样和弯曲试样确定稳态或失稳裂纹扩展起始点的特定断裂韧度,以及稳态裂纹扩展阻力。由于这些试样类型具有近方形剩余韧带,而维持裂纹尖端处于高拘束状态。如果满足尺寸要求,由此测定的 K_{IC} 、 $\delta_{0.2BL}$ 、 $J_{0.2BL}$ 对尺寸不敏感,并被认为是断裂韧度下限值。尽管没有特别说明,其裂纹扩展阻力曲线(R-曲线)同样对尺寸是不敏感的。

工程实践过程中,有些情况没有被 ISO 12135:2002 所覆盖,例如:

- 试样厚度远低于采用 ISO 12135:2002 测定尺寸不敏感性断裂性能的试样厚度要求;
- 可用的材料厚度不能保证经加工的试样满足尺寸不敏感性判据;
- 结构件的受力状态是拉伸而不是弯曲。

这些情况下结构件的拘束状态比 ISO 12135:2002 中规定试样的低,因此基于 ISO 12135:2002 的试验结果会导致过低预测结构件的裂纹扩展阻力和承载能力。

金属材料 低拘束试样测定稳态裂纹 扩展阻力的试验方法

1 范围

本标准规定了含裂纹的低拘束易塑性变形均质金属材料在承受准静态加载时稳态裂纹扩展阻力、裂纹张开位移 δ_5 和临界裂纹尖端张开角 Ψ_c 的测定方法。对含缺口的紧凑拉伸试样和中心裂纹拉伸试样,通过疲劳预制裂纹,在缓慢增加位移量的条件下进行试验。

本标准描述的试验方法涵盖那些不满足断裂性能尺寸不敏感的试样,例如尺寸相对较薄的紧凑拉伸试样和中心裂纹拉伸试样。

本标准给出了测定裂纹扩展阻力曲线(R-曲线)的方法。与 ISO 12135:2002 测定紧凑拉伸试样断裂韧性特征值类似,在附录 D 中给出了采用中心裂纹拉伸试样测定断裂韧性特征值的方法。

裂纹扩展阻力的测定可以使用多试样法和单试样法。多试样法要求将多个名义上相同的试样加载到不同位移。通过对韧性裂纹扩展区域的标识以及随后的断口裂纹扩展量的测量得到裂纹扩展阻力曲线。只要能够满足符合规定的精度要求,基于卸载柔度法和电位法的单试样法也能够测量裂纹扩展。推荐的单试样法由 ISO 12135:2002 描述。无论哪种方法,目的是获得足够多的数据点,以充分地描述材料裂纹扩展阻力行为。

测定 δ_5 相对简单易行。 δ_5 的结果由阻力曲线表示,显示裂纹扩展在限定范围内的唯一性。远离该限定范围,紧凑拉伸试样的 δ_5 阻力曲线显示了对试样宽度的强依赖性,而中心裂纹拉伸试样的 δ_5 阻力曲线显示了对试样宽度的弱依赖性。

CTOA 的试验确定较 δ_5 困难。临界 CTOA 由裂纹扩展一定程度后达到的稳定值表示。CTOA 的概念可以应用于裂纹扩展量非常大的场合,适用性超过现有 δ_5 的应用范围。

两种裂纹扩展阻力的测定均适用于结构评估。 δ_5 的概念是完整的,通过基于简单裂纹驱动力公式的现有评估步骤,可以应用于结构完整性问题。

CTOA 的概念总的来讲更准确。在结构应用方面需要数值方法,如有限元分析。

研究表明对紧凑拉伸试样和中心裂纹拉伸试样加载,直到最大载荷,稳定的 CTOA 与唯一的阻力曲线密切相关。在 δ_5 阻力曲线和临界 CTOA 之间建立解析的或数值的关系还有待进一步研究。

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。

ISO 3785 金属材料 试样轴线相对于产品织构的标识(Metallic materials—Designation of test specimen axes in relation to product texture)

ISO 7500-1 金属材料 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(Metallic materials—Calibration and verification of static uniaxial testing machines—Part 1: Tension/compression testing machines—Calibration and verification of the force-measuring system)

ISO 9513 金属材料 单轴试验用引伸计的标定(Metallic materials—Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing)

ISO 12135:2002 金属材料 准静态断裂韧度的统一测定方法(Metallic materials—Unified

method of test for the determination of quasistatic fracture toughness)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

裂纹张开位移 crack opening displacement; COD

δ_5

在预制疲劳裂纹尖端,裂纹两表面相对于原始未变形的裂纹平面的垂直位移,该位移在试样表面裂纹尖端 5 mm 原始标距测量。

3.2

裂纹尖端张开角 crack tip opening angle; CTOA

Ψ

距当前裂纹尖端位置后面 1 mm 处测量的(或计算的)裂纹两表面形成的相对角度。

3.3

稳态裂纹扩展 stable crack extension

Δa

在位移控制下的裂纹扩展量,只随位移量的增加而增加。

3.4

裂纹扩展阻力曲线 crack extension resistance curve

R-曲线

δ_5 随裂纹稳态扩展量 Δa 的变化曲线。

3.5

临界裂纹尖端张开角 critical crack tip opening angle

Ψ_c

相距当前裂纹尖端位置后面 1 mm 处裂纹尖端张开角 Ψ 的稳态值。

注:该值对面内尺寸不敏感,但是可能依赖于厚度。

4 符号和说明

本标准采用的符号和说明见表 1。对于所有参数,除非另有说明,温度指的是试验温度。

表 1 符号和说明

符号	单位	说 明
a	mm	裂纹长度
a_f	mm	最终裂纹长度($a_0 + \Delta a_f$)
a_m	mm	机械加工切口长度
a_0	mm	初始裂纹长度
Δa	mm	稳态裂纹扩展量
Δa_{\min}	mm	Ψ_c 接近稳态值时的最小裂纹扩展量
Δa_{\max}	mm	受 δ_5 或 Ψ_c 控制的最大裂纹扩展量

表 1 (续)

符号	单位	说 明
Δa_f	mm	最终稳态裂纹扩展量
B	mm	试样厚度
E	MPa	杨氏弹性模量
F	kN	施加的载荷
F_f	kN	预制疲劳裂纹时的最大载荷
$R_{p0.2}$	MPa	在试验温度下材料在垂直于裂纹平面方向的 0.2% 偏置下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
α	(°)	裂纹路径偏离度
W	mm	紧凑拉伸试样的宽度, 中心裂纹拉伸试样的半宽
$W-a$	mm	剩余韧带尺寸
$W-a_0$	mm	初始韧带尺寸
$W-a_f$	mm	最终韧带尺寸
Ψ	(°)	裂纹尖端张开角 (CTOA)
Ψ_c	(°)	临界裂纹尖端张开角 (临界 CTOA)
ν	—	泊松比
δ_5	mm	疲劳预制裂纹尖端 5 mm 标距的裂纹张开位移
注: 此处不是一个完整的参数列表, 仅列出主要参数, 其他参数在正文中定义和引用。		

5 一般要求

5.1 概述

金属材料稳态裂纹扩展阻力可以采用单点(特征)值表征(参见附录 D), 也可以采用在一定裂纹长度内断裂阻力与裂纹扩展量的连续关系曲线表征(见第 6 章)。本标准中列出的任意一种经疲劳预制裂纹的试样均可以用于测试或计算断裂阻力参数。试验通过对试样缓慢地增加位移, 测量对应的载荷、裂纹张开位移和角度, 结合试验前后对试样的测量用于确定材料的裂纹扩展阻力。本标准给出了测试断裂参量的细节和一般性信息, 图 1 给出了本标准可以采用的测试流程图, 表 2 给出了本标准采用表征断裂阻力的符号。

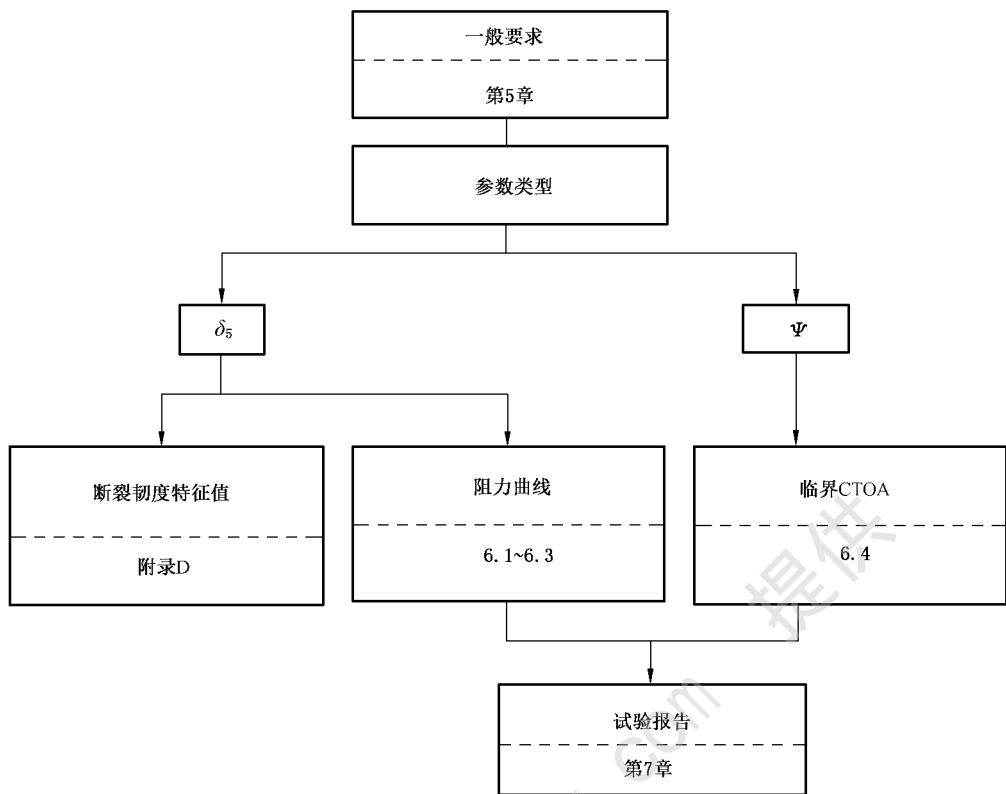


图 1 本标准试验方法的流程图

表 2 断裂阻力的符号

参数	尺寸不敏感性	尺寸敏感性 (试验对厚度 B 有规定)	有效性判据
δ_5 (断裂韧性特征值)	参见附录 D	不适用	—
δ_5 R-曲线	不适用	$a_0, (W - a_0) \geq 4B$	对于紧凑拉伸试样, $\Delta a < \Delta a_{\max} = 0.25(W - a_0)$
			对于中心裂纹拉伸试样, $\Delta a < \Delta a_{\max} = W - a_0 - 4B$
Ψ_c	不适用	$a_0, (W - a_0) \geq 4B$	$\Delta a > \Delta a_{\max} = 50/(5 + B)$, $\Delta a < \Delta a_{\max} = W - a_0 - 4B$ (见图 11)
注: 通过对板厚在 1 mm~25 mm 的铝合金和钢试样裂纹扩展表面测量建立了 Ψ_c 有效性条件 $\Delta a > \Delta a_{\min} = 50/(5 + B)$ 。			

5.2 试样

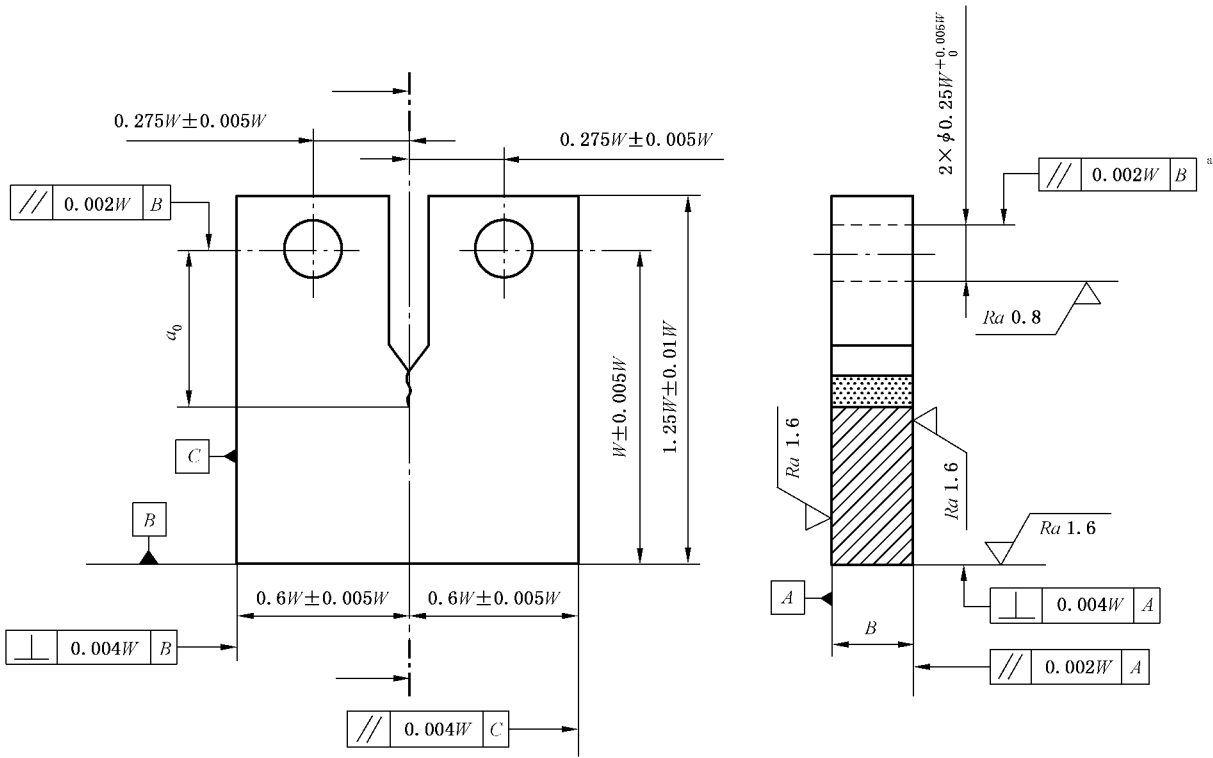
5.2.1 试样类型和尺寸

试样尺寸和公差应符合图 2 和图 3 中的规定。试样的设计选择应考虑试验的结果是 δ_5 还是 Ψ (见

图 1)、裂纹面方向、用于试验的材料的数量和条件等因素。对两种试样类型,均需满足条件 $[a_0, (W-a_0)] \geq 4B$ 。

注: 两种试样类型(见图 2 和图 3)均可测定 δ_5 或 Ψ_c 。

单位为毫米



裂纹起始缺口尖端与试样前后表面的交点距离上、下端面保持等间距且距离之差在 $0.005W$ 以内。

注 1: 起始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 4 和 5.2.2.4。

注 2: $W \geq 8B$ 且 $W \geq 150 \text{ mm}$ 。

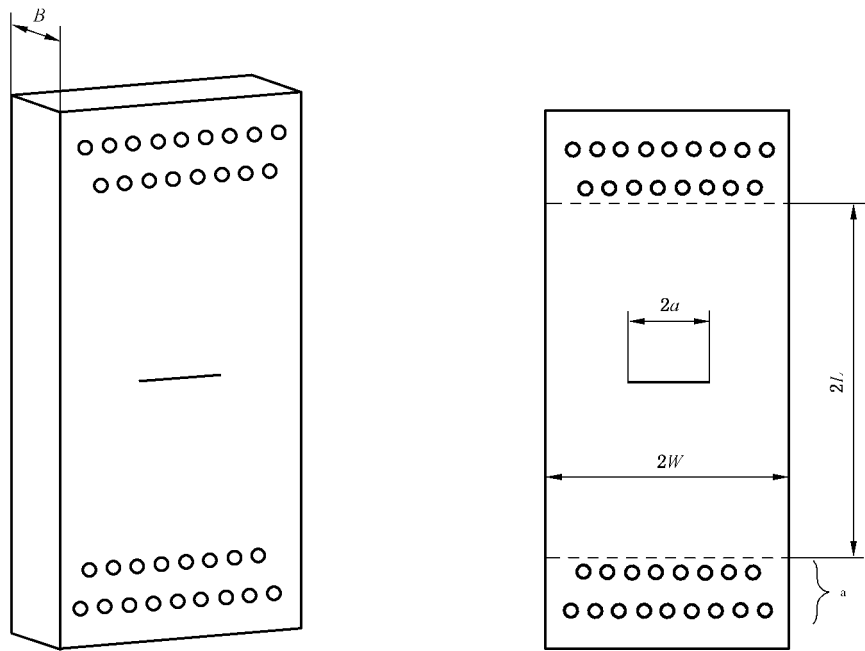
注 3: $0.4 \leq a_0/W \leq 0.7$ 。

注 4: 也可以采用销孔直径 $\phi = 0.188W + 0.004W$ 。

^a 两个孔。

图 2 直通型缺口紧凑拉伸试样的尺寸比例和公差

单位为毫米



注 1: 起始引发缺口和疲劳裂纹的形状见图 4 和 5.2.2.4。

注 2: $W \geq 8B, W \geq 150 \text{ mm}$ 。

注 3: $0.25 \leq a_0/W \leq 0.5$ 。

注 4: $L/W > 1.5$ 。

^a 夹持区域。

图 3 中心裂纹拉伸试样示意图

5.2.2 试样制备

5.2.2.1 材料状态

试样应从经过最终热处理并经过机加工的坯料中取样加工而成。某些例外情况下材料不能在最终状态下加工,如果试样的尺寸、公差、形状、表面粗糙度均可得到满足,最终热处理可以在加工试样后进行。机加工后试样尺寸明显地不同于加工前坯料尺寸时,应考虑尺寸效应对热处理显微结构和力学性能的影响。

5.2.2.2 裂纹面取向

裂纹面取向应在机加工前予以确定,按照 ISO 3785 的规定进行标识并记录,附录 A 的表 A.1 中的试验报告示例含有这些信息。

注: 裂纹扩展阻力取决于裂纹所在平面和裂纹扩展的方向,与机械加工、晶粒流动和其他形式的各向异性的主方向相关。

5.2.2.3 加工

试样缺口轮廓不应超过图 4 所示的包迹线。加工缺口根部半径不应大于 0.10 mm,且最大允许缺口宽度为 $W/30$ 。锯切、圆盘磨削或电火花加工缺口宽度不应超过 0.15 mm,见图 4 中的脚注 c。

5.2.2.4 疲劳预制裂纹

5.2.2.4.1 通则

5.2.2.4.1.1 预制疲劳裂纹应在材料经最终热处理、机加工后或具备环境条件后进行。在疲劳预制裂纹和测试之间的中间热处理旨在用于模拟特殊结构应用条件时才可采用,并且这种偏离推荐规范的情况需予以报告。

5.2.2.4.1.2 疲劳预制裂纹任意阶段的最大力值应精确到 $\pm 2.5\%$ 。

5.2.2.4.1.3 试样厚度 B 和宽度 W 按照 5.3.1 测量后应予以记录,并按照 5.2.2.4.3 和 5.2.2.4.4 规定确定最大疲劳预制裂纹载荷 F_f 。

5.2.2.4.1.4 除为加速引发裂纹可先施加一周或几周应力比为 -1 的疲劳载荷外,在预制疲劳期间的应力比应在 $0\sim 0.1$ 之间。

5.2.2.4.2 设备和夹具

应仔细安装疲劳预制裂纹用夹具,确保力沿试样厚度 B 面均匀分布,并且对称于预期裂纹面。

5.2.2.4.3 紧凑拉伸试样

对于紧凑拉伸试样,在疲劳预制裂纹到最终 1.3 mm 或 0.4 N 期间的最大载荷不应大于 F_f ,见式(1):

$$F_f = \xi E \left[\frac{B \sqrt{W}}{g_1(a_0/W)} \right] \dots\dots\dots (1)$$

其中 $\xi = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^{0.5}$,并且见式(2):

$$g_1(a_0/W) = \left[1 - \frac{a_0}{W} \right]^{-1.5} \left[2 + \frac{a_0}{W} \right] \left[0.886 + 4.64 \frac{a_0}{W} - 13.32 \left(\frac{a_0}{W} \right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_0}{W} \right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_0}{W} \right)^4 \right] \dots\dots (2)$$

5.2.2.4.4 中心裂纹拉伸试样

对于中心裂纹拉伸试样,在疲劳预制裂纹到最终 1.3 mm 或 0.4 N 期间的最大载荷不应大于 F_f ,见式(3):

$$F_f = \xi E B (2W) \left[\pi a_0 \sec \frac{\pi a_0}{(2W)} \right]^{-0.5} \dots\dots\dots (3)$$

其中 $\xi = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^{0.5}$ 。

5.3 试验前的要求

5.3.1 试验前的测量

5.3.1.1 试样尺寸应符合图 2 和图 3 中的规定。厚度 B 和宽度 W 的测量应精确到 0.02 mm 或 $\pm 0.2\%$,取其大者。

5.3.1.2 试验前,应沿裂纹扩展路径至少三个等间距位置测量试样厚度 B ,取其平均值作为 B 。

5.3.1.3 中心裂纹拉伸试样在裂纹面 $\pm 0.1W$ 的区域内至少三个等间距位置测量试样宽度 W ,取其平均值作为 W 。

5.3.1.4 紧凑拉伸试样宽度 W 应以加载孔中心连线为基准进行测量。通常地,先建立加载孔中心连线,然后在裂纹面上测量到裂尖前方试样边缘距离作为 W ,至少在三个尽可能紧靠裂纹面沿厚度方向

等间距位置进行测量。同时应在相同位置测量尺寸 $1.25W$ (裂尖前、后方试样边缘之间的距离)。

5.3.2 裂纹前缘形态和长度的要求

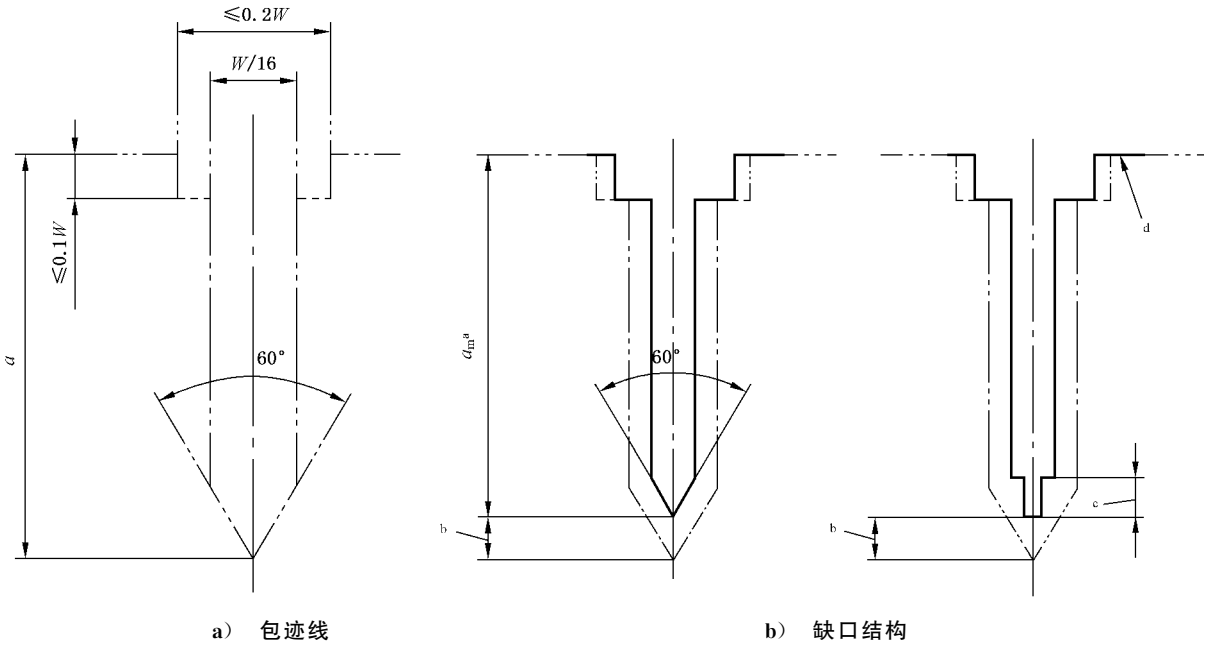
疲劳裂纹应从试样机加工缺口的根部预制,其长度要求为:

——对于紧凑拉伸试样(见图 2), a_0/W 应在 $0.40\sim 0.70$ 之间;

——对于中心裂纹拉伸试样(见图 3), a_0/W 应在 $0.25\sim 0.50$ 之间。

疲劳裂纹扩展量应至少为 1.3 mm 或 $2.5\%W$, 取其大者。缺口和疲劳裂纹应在图 4 所示包迹线内。

单位为毫米



- ^a 机械加工切口长度 a_m 。
- ^b 疲劳预制裂纹。
- ^c 电火花或者机加工缺口。
- ^d 紧凑拉伸试样的加载线或中心裂纹试样中心线。

图 4 疲劳裂纹包迹线和初始缺口

5.4 试验设备

5.4.1 校准

所有测量仪器均应通过不间断的溯源链直接或间接溯源到有资质的校准实验室。

5.4.2 载荷

5.4.2.1 力传感器和记录系统都应满足 ISO 7500-1 的要求。

5.4.2.2 试验设备应在恒位移速率下加载。

5.4.2.3 载荷测量系统的标称载荷应超过 $1.2F_L$, F_L 按式(4)或式(5)计算:

——对于紧凑拉伸试样:

$$F_L = \frac{B(W - a_0)^2}{(2W + a_0)} R_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

——对于中心裂纹拉伸试样：

$$F_L = 2B(W - a_0) R_m \quad \dots\dots\dots (5)$$

5.4.3 位移测量

用于测量 δ_5 的引伸计的输出应准确显示跨过疲劳预制裂纹尖端两侧相距 5 mm 精确定位点的相对位移。引伸计(或其他合适的传感器)和试样的设计应允许引伸计和试样之间的接触点自由旋转。裂纹嘴张开位移引伸计应按照 ISO 9513 进行校准,且不应低于 1 级。在使用期间应至少每周核查。引伸计应在测试温 $\pm 5^\circ\text{C}$ 进行校验。位移量在 0.3 mm 以内应精确到 ± 0.003 mm,在 0.3 mm 之上应精确到实际读数的 $\pm 1\%$ 。

注 1: 确定 δ_5 的方法和流程在附录 B 中给出。

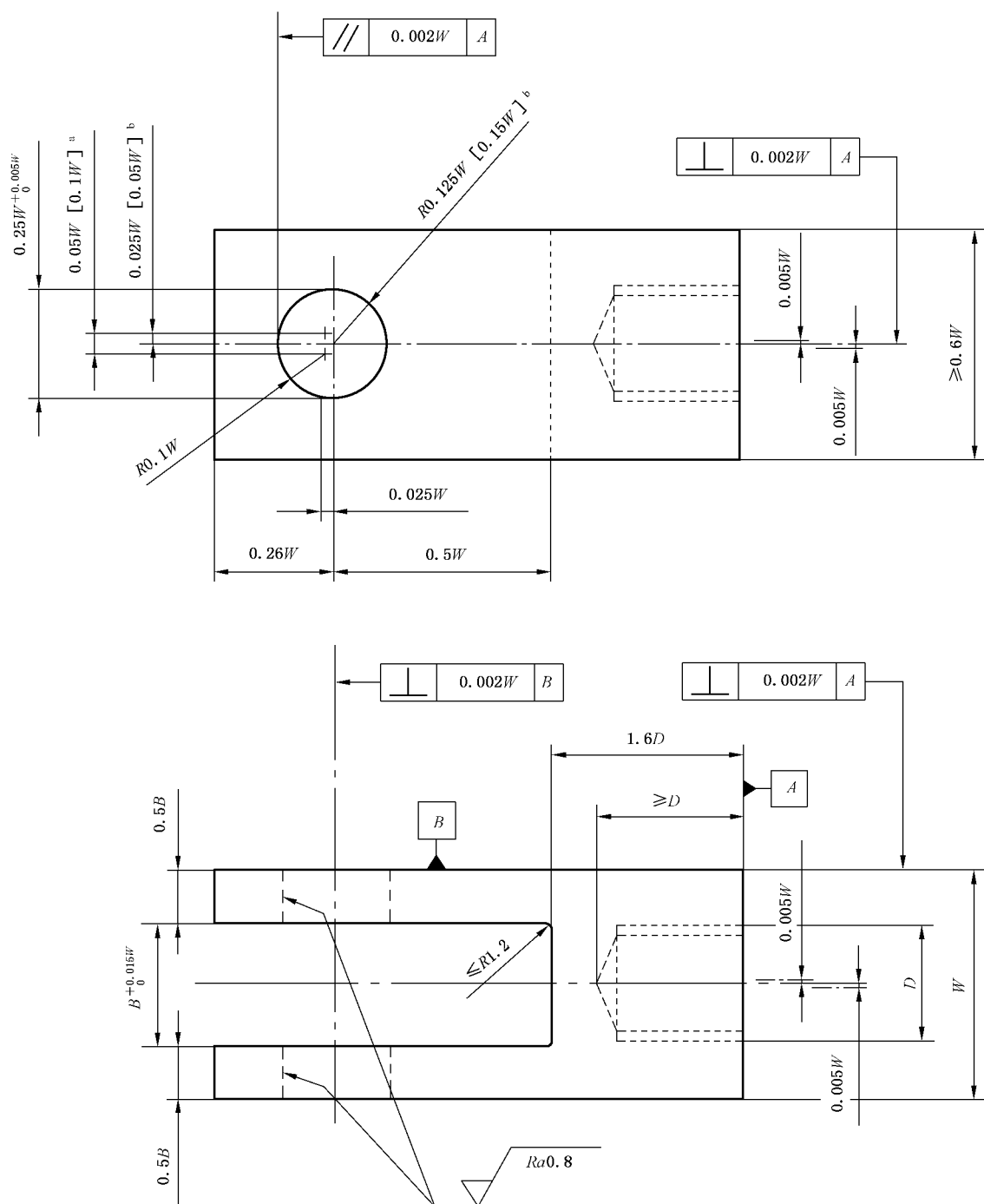
注 2: 裂纹嘴张开位移对于确定 δ_5 和 Ψ 。并不是必需的,但是载荷—裂纹嘴张开位移曲线的记录可以适用于评估本方法的有限元分析或其他断裂分析方法。经证明的引伸计设计实例在附录 B 中给出,类似引伸计已商品化。

注 3: 根据使用频度和双方约定,可能频繁校准引伸计。

5.4.4 试验夹具

为减小摩擦,紧凑拉伸试样应采用 U 型夹具和销钉加载。确保在拉伸承载条件下对中性良好。用于阻力曲线测定的 U 型夹具应设计成平底孔(见图 5),以保证销钉在整个试验过程中自由滚动。圆底孔(见图 6)不能用于卸载柔度法测试单个试样。夹具承载面硬度应大于 40 HRC(400 HV)或者屈服强度至少 1 000 MPa。中心裂纹拉伸试样应采用液压夹持或者靠摩擦传力的螺栓夹具加载。宜避免螺栓承载,以减小不均匀加载。安装方式应确保试样对中,使承受面内和面外弯曲最小。所有试样应安装防屈曲导板,如图 7 所示。抗屈曲的导板应覆盖试样的大部分。仅沿裂纹面进行支撑已被证实不能有效预防薄板材料在夹持线与裂纹面之间产生弯曲。对于小的中心裂纹拉伸试样($W < 600$ mm),采用平板就足够了,但是对于 W 超过 600 mm 的中心裂纹拉伸试样,需要采用平板和工字梁如图 7a)所示。适合紧凑拉伸试样的抗屈曲设计如图 7b)所示。

单位为毫米
表面粗糙度(R_a)单位为微米



注 1: 加载销钉的直径为 $0.24W - {}^0_{-0.005W}$ 。

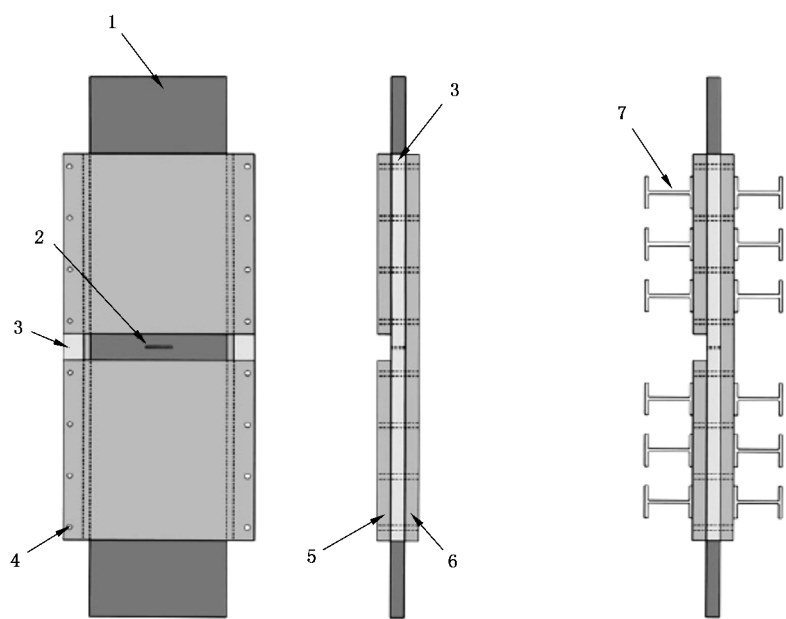
注 2: 为便于安装引伸计可以将 U 型夹具的角去掉。

注 3: U 型钩和加载销钉的硬度 ≥ 40 HRC。

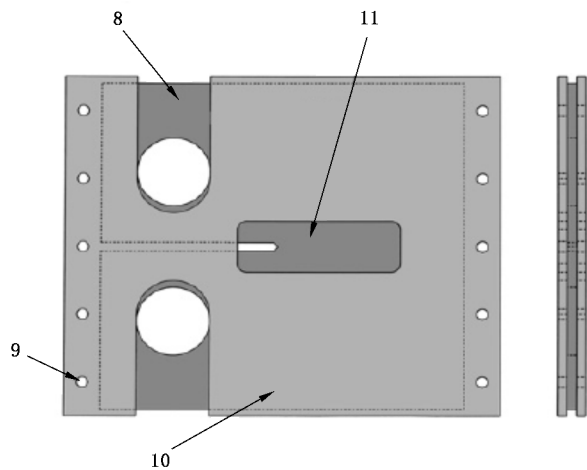
^a 加载平面。

^b 对于大位移量的试样,U型夹具销钉孔的直径应采用方括号内的尺寸。

图 5 用于紧凑拉伸试样的允许销钉转动的平底加载孔 U 型夹具的典型设计



a) 中心裂纹拉伸试样抗屈曲装置示意图



b) 紧凑拉伸试样抗屈曲装置示意图

- 说明：
- 1 ——中心裂纹拉伸试样；
 - 2 ——裂纹观察区；
 - 3 ——垫板；
 - 4 ——螺栓孔；
 - 5 ——前抗屈曲板,2 片；
 - 6 ——后抗屈曲板,1 片；
 - 7 ——工字梁；
 - 8 ——紧凑拉伸试样；
 - 9 ——螺栓孔；
 - 10 ——前后抗屈曲板；
 - 11 ——裂纹观察区。

图 7 抗屈曲装置示意图

5.5 试验要求

推荐抗屈曲导板安装到试样两侧,覆盖预期裂纹扩展路径的长度为初始裂纹长度的四倍。试样和抗屈曲导板之间的配合面使用惰性润滑剂(PTFE),以减少摩擦力。在一块抗屈曲导板上开通孔,以便安装测量 δ_5 的引伸计,或者用于电位法的导线敷设。

5.5.1 紧凑拉伸试验

5.5.1.1 试样和夹具安装

加载 U 形夹具对中度应在 0.25 mm 以内,试样相对加载销钉对中度应在 0.75 mm 以内。

5.5.1.2 裂纹张开位移 δ_5

裂纹张开位移 δ_5 的测量方法参照附录 B 执行。

5.5.1.3 裂纹尖端张开角 Ψ

裂纹尖端张开角 Ψ 的测量或者计算可参照附录 C 执行。

5.5.2 中心裂纹拉伸试验

5.5.2.1 试样和夹具安装

夹具的设计应确保载荷沿试样厚度面均匀分布。如果全过程可均匀加载时,夹具可以刚性连接到试验机,否则推荐通过可拆卸夹具和销钉加载。

5.5.2.2 裂纹尖端张开位移 δ_5

裂纹尖端张开位移 δ_5 的测量参照附录 B 进行。

5.5.2.3 裂纹尖端张开角 Ψ

裂纹尖端张开角 Ψ 的测量或者计算可参照附录 C 进行。测试报告样例见表 A.4。

5.5.3 试样试验温度

应以 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的准确度控制试样的试验温度。为此应在试样表面裂纹尖端 5 mm 区域内贴放热电偶或者铂电阻温度计。当预期裂纹扩展量较大时,还应沿预期路径贴放附加的温度传感器(热电偶或温度计),以确保特定的试验温度。试验应在合适的低温/高温介质中进行。测试开始前,试样表面温度达到试验温度后还需根据试样厚度进行保温,在液态介质中不低于 30 s/mm,在气体介质中不低于 60 s/mm,且保温时间不低于 15 min。测试试样的温度在整个试验过程中应保持在规定的试验温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 范围内,并按照第 7 章的要求予以记录。

5.5.4 记录

应记录载荷和对应的位移输出。

注:对应的位移是 δ_5 (旨在测定 δ_5 阻力曲线)或裂纹嘴张开位移 CMOD(并不是必需的,但是有益于补充性的评估)。

5.5.5 试验速率

试验应采用裂纹嘴张开/加载线/横梁位移控制。在线弹性加载阶段加载线位移速率对应的应力强

度因子增加速率应在 $0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}/\text{s} \sim 3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}/\text{s}$ 范围内。对每个系列试验,所有试样均应按同一名义速率加载。

5.5.6 试验分析

确定紧凑拉伸试样断裂韧性单点值(特征值)的方法在附录 D 中给出,测定 δ_5 阻力曲线的方法在第 6 章给出(见图 1)。

5.6 试验后裂纹测量

试验完毕后打开试样,在断面上确定初始裂纹长度 a_0 和最终稳态裂纹扩展量 Δa_f 。某些试验在打开试样前需要标记稳态裂纹扩展区,可以采用热着色或试验后二次疲劳方法。应注意尽量减小试验后试样的变形。对于铁素体钢冷脆化处理有助于减小变形。

5.6.1 初始裂纹长度 a_0

5.6.1.1 紧凑拉伸试样

应使用精确度不低于 $\pm 0.1\%$ 或 0.025 mm (取其大者)的测量仪器从销钉孔中心线到疲劳裂纹的尖端测量初始裂纹长度 a_0 。测量在试样厚度面 5 个位置点进行。 a_0 值是通过先对距离两侧表面 $0.01B$ 内的两个位置(见图 8)测量结果取平均值,再和内部等间距三点的测量长度取平均值得到的,见式(6)。

$$a_0 = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{a_{01} + a_{05}}{2} \right) + \sum_{j=2}^{j=4} a_{0j} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

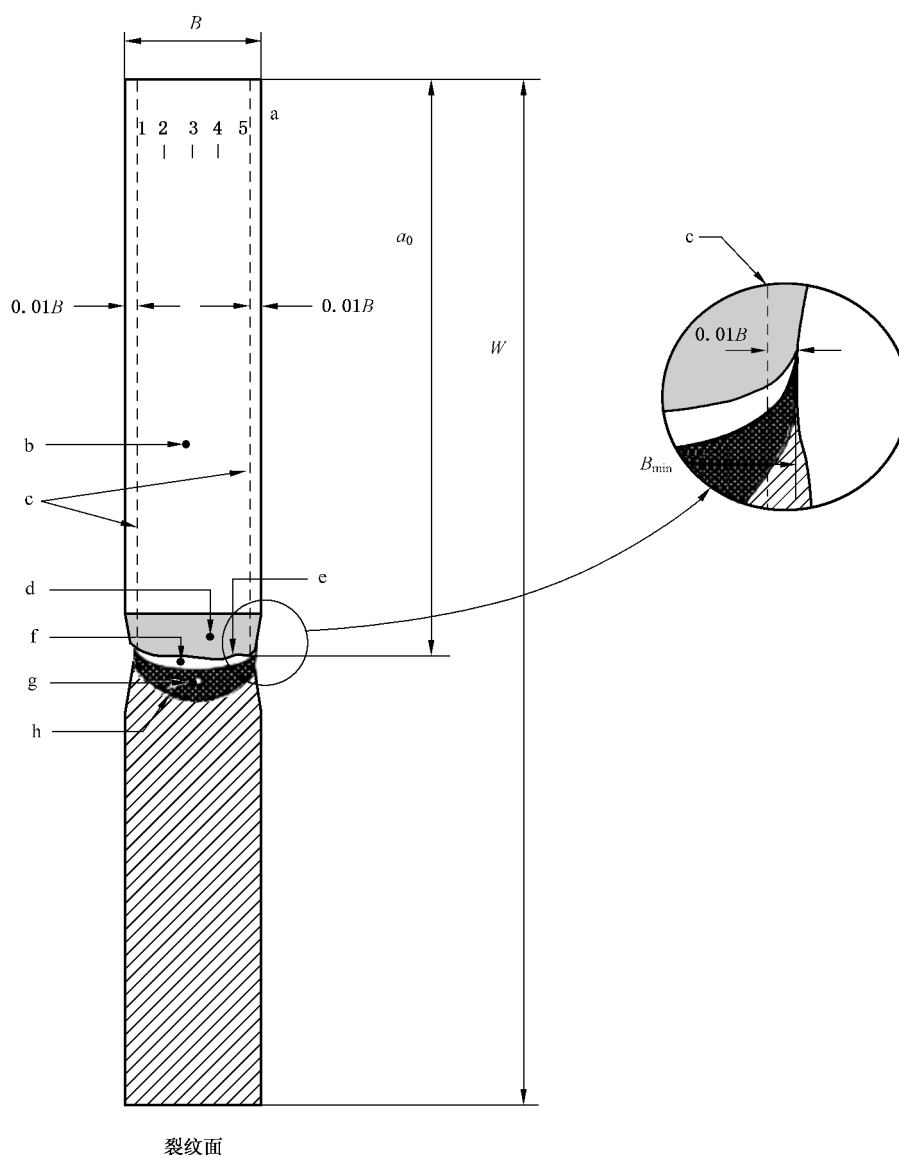
5.6.1.2 中心裂纹拉伸试样

初始裂纹长度 a_0 的测量值,是两个疲劳裂纹尖端总长度的一半,测量仪器的精确度不应低于 $\pm 0.1\%$ 或 0.025 mm (取其大者)。测量是在试样厚度面 5 个位置点进行的。 a_0 值是通过先对距离两侧表面 $0.01B$ 内的两个位置(见图 9)测量结果取平均值,再和内部等间距三点的测量长度取平均值,然后将结果除以 2 得到的,见式(7)。

$$a_0 = \frac{1}{8} \left[\left(\frac{2a_{01} + 2a_{05}}{2} \right) + \sum_{j=2}^{j=4} 2a_{0j} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

注:对于两种试样厚度 B 小于 5 mm 时,可采用三点平均法。 a_0 值是通过先对两侧表面位置处测量长度 a_{01} 和 a_{05} 取平均值,再和平面中心处测量长度 a_{03} 取平均值得到的:

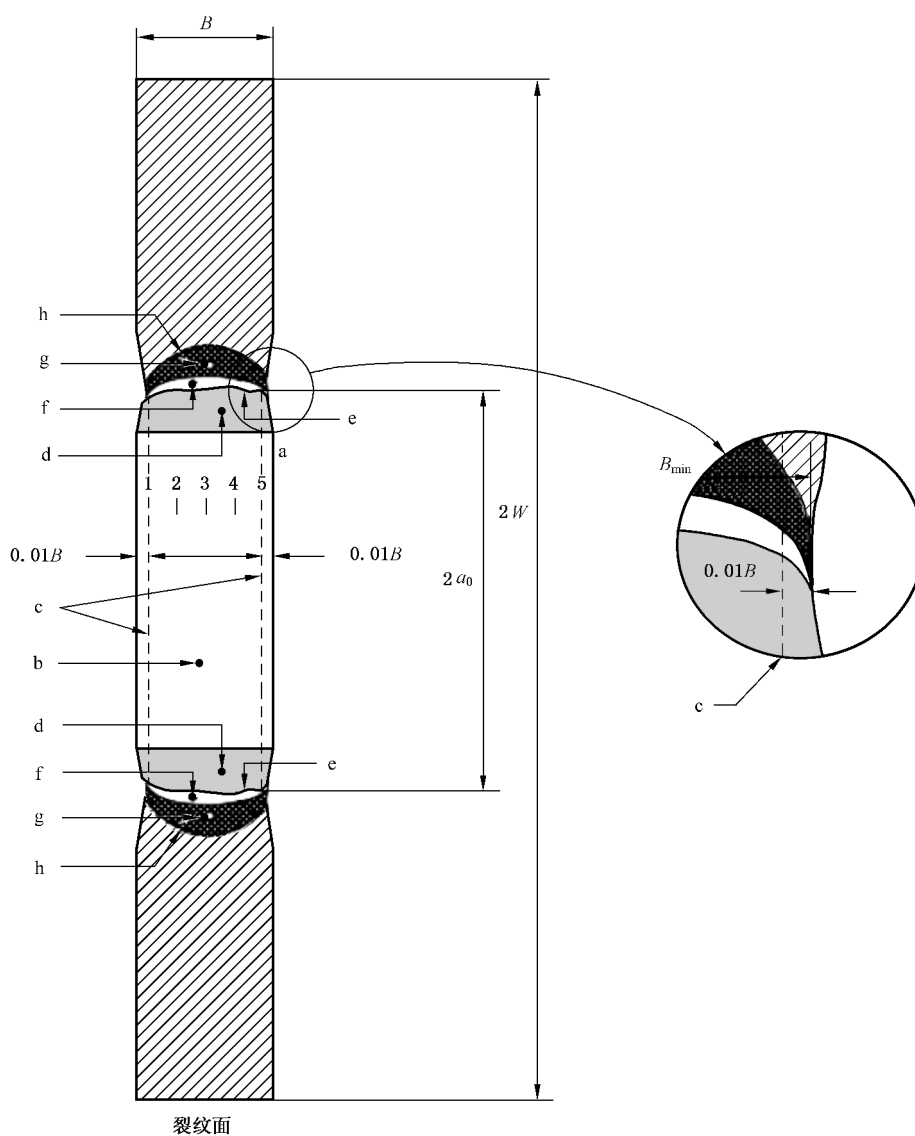
$$a_0 = 0.5[(a_{01} + a_{05})/2 + a_{03}]$$



说明：

- a——在 1 至 5 的位置测量初始和最终裂纹长度[见式(6)]；
- b——加工缺口；
- c——测量基准线；
- d——疲劳预制裂纹；
- e——初始裂纹前缘；
- f——伸张区；
- g——裂纹扩展；
- h——最终裂纹前缘。

图 8 紧凑拉伸试样裂纹长度的测量



说明：

a——在 1 至 5 的位置测量初始和最终裂纹长度[见式(7)];

b——加工缺口；

c ——参考线；

d——疲劳预制裂纹；

e——初始裂纹前缘；

f ——伸张区；

g——裂纹扩展；

h——最终裂纹前缘。

注：两端裂纹的平均值代表中心裂纹拉伸试样裂纹长度。

图 9 中心裂纹拉伸试样裂纹长度的测量

5.6.1.3 要求

初始裂纹长度 a_0 应满足下列要求:

- a) 对于紧凑拉伸试样, a_0/W 应在 0.40~0.70 之间;对于中心裂纹拉伸试样, a_0/W 应在 0.25~0.50 之间;
- b) 采用五点平均法计算 a_0 时, 试样中心三点中任一点的裂纹长度与五点平均值之差不应超过 $0.1a_0$;
- c) 采用三点平均法计算 a_0 时, 试样中心点的裂纹长度与三点平均值之差不应超过 $0.1a_0$;
- d) 疲劳预制裂纹前缘距离缺口前缘不应低于 1.3 mm 或 $0.013W$ 中的大者;
- e) 疲劳预制裂纹应在图 4 所示的包迹线之内。

如果上述要求不能满足, 根据本试验方法试验结果判定无效。

5.6.2 稳态裂纹扩展 Δa

总的最终裂纹扩展量(包括任何的裂纹尖端钝化区) Δa_f , 应借助测量精确度 ± 0.025 mm 的仪器按照 5.6.1 描述的平均值方法测量初始和最终裂纹长度。在厚度方向上的测量位置应根据最终裂纹尖端位置的收缩厚度确定。对于中心裂纹拉伸试样, 裂纹扩展量 Δa_f 由裂纹两端前缘测量的裂纹扩展量平均值给出。诸如星状和孤立的岛状等不规则形状的裂纹扩展, 应按照第 7 章的要求在报告中注明。

注 1: 忽略星状扩展区域或人为地平均裂纹扩展区域对于估算不规则裂纹扩展长度可能是唯一可行的办法。由高度不规则裂纹得到的试验结果应用于断裂分析时宜谨慎。在试验报告中注明裂纹的不规则性和提供附加的照片都是很有用的。所有的试验前和试验后的测量都需记录并按第 6 章进行计算。

注 2: 对于厚度 B 小于 5 mm 的试样, 建议使用 5.6.1.2 所述三点平均法。

5.6.3 裂纹扩展路径

在稳态裂纹扩展时裂纹面也会偏离原始疲劳预制裂纹面(垂直于外加载荷的平面)。典型的情况是试样表面出现剪切面。当剪切面保持与原始疲劳预制裂纹面同一斜向时, 称之为单剪切模式。当剪切面斜向发生变化, 在横截面上形成屋顶状, 即断裂的两面形成 V 型坡口, 称之为双剪切模式。剪切面通常倾斜 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。

注: 根据材料和试样厚度, 在试样厚度中央的断裂表面有可能仍然垂直于外载荷, 这是混合模式裂纹扩展。

5.6.3.1 裂纹扩展阻力

对于斜面断裂, 呈现双剪切模式的裂纹扩展阻力通常高于单剪切模式。双剪切模式的试验结果来表征材料性能是无效的。

5.6.3.2 裂纹扩展路径偏离

当初始平直疲劳预制裂纹面与偏离的扩展裂纹面夹角 α 超过 10° 时, 试验结果无效。

6 δ_5 - Δa 阻力曲线和 CTOA 的确定

6.1 总则

本标准采用 δ_5 (COD) 或者 Ψ (CTOA) 随裂纹扩展量 Δa 的变化表征断裂行为。需要强调的是, 此处不把 Ψ - Δa 曲线作为裂纹扩展阻力曲线。

6.2 试验步骤

按照 5.5 和 5.6 对试样加载和评估裂纹扩展量。

6.2.1 多试样法

将一系列标称尺寸相同的试样加载到预先选定的不同位移水平,并测定相应的裂纹扩展量。每个试样的试验结果都成为 δ_5 - Δa 阻力曲线(后面通称为 R -曲线)上的一个点。

注:构成一条 R -曲线需要六个或更多合适位置的点。将第一个试样加载到略微超过最大载荷,测量相应的稳态裂纹扩展量,并据此估计其他合适位置数据点所需的位移量。

6.2.2 单试样法

6.2.2.1 单试样法是利用电势法、弹性柔度法或其他技术通过单一试样的试验得到阻力曲线上的多个点的方法。ISO 12135:2002 描述了单试样法。

6.2.2.2 当 $\Delta a \leq 0.2(W - a_0)$ 时,利用直接法(如弹性柔度法)估计的最终裂纹扩展量 Δa_f 与测量的裂纹扩展量之差应不超过后者的 15% 或 0.15 mm,取其大者;当 $\Delta a > 0.2(W - a_0)$ 时,这一差值应在 $0.03(W - a_0)$ 以内。对需要预估初始裂纹长度 a_0 的测试技术,如采用卸载柔度法, a_0 的估计值应在试验后测量 a_0 值 $\pm 2\%$ 以内。

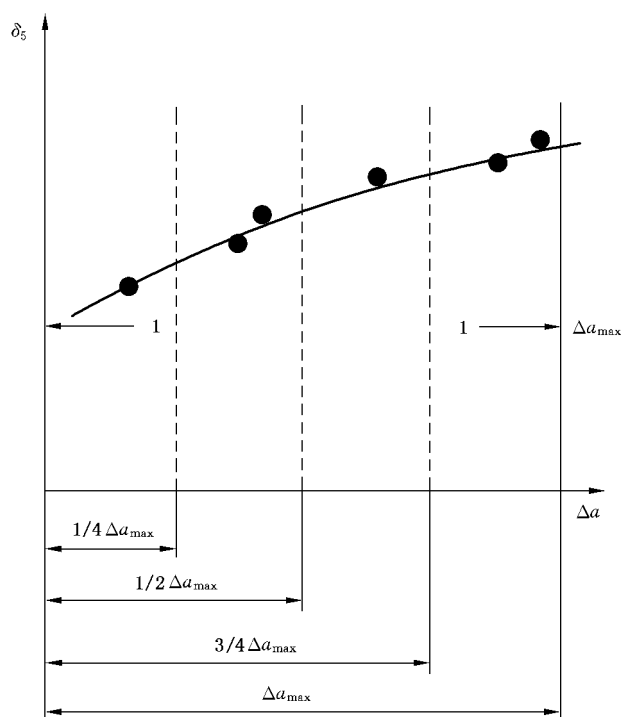
6.2.2.3 间接测量技术(如电势法)应将第一个试样用于建立试验输出与裂纹扩展量之间的关系,裂纹扩展量应超过 6.4 中定义的 Δa_{\max} 。至少应进行一次附加试验从而运用第一次建立的关系估算裂纹扩展量。估计值与实际 Δa 测量值之差应不超过后者的 15% 或 0.15 mm,取其大者;否则试验结果无效。

6.2.3 最终裂纹前缘的平直度

最终裂纹长度定义为按照 5.6.1 和 5.6.2 描述的五点平均值法测定的初始裂纹长度加上稳态裂纹扩展量。采用五点平均值法时,中间三点的裂纹长度与五点平均值之差不应大于 $0.1a_0$;采用三点平均值法时,试样中心点的裂纹长度与三点平均值之差不应超过 $0.1a_0$;否则试验结果无效。

6.3 R -曲线图

δ_5 与 Δa 的点组成了 R -曲线(见图 10)。数据可以用表格或图形的形式表达。为了便于分析也可以将数据拟合成方程或将拟合方程以曲线的形式作出来。



说明:

Δa —— 稳态裂纹扩展量;

δ_5 —— 裂纹张开位移;

1 —— 边界线。

图 10 测定 R -曲线的数据间隔

6.3.1 图的绘制

δ_5 与 Δa 的断裂阻力曲线由 5.5.1.2、5.5.2.2 和 5.6.2 得到的数据点组成(见图 10)。

对于紧凑拉伸试样, Δa_{\max} 按式(8)计算:

$$\Delta a_{\max} = 0.25(W - a_0) \quad \dots\dots\dots (8)$$

对于中心裂纹拉伸试样, Δa_{\max} 按式(9)计算:

$$\Delta a_{\max} = (W - a_0) - 4B \quad \dots\dots\dots (9)$$

绘制 δ_5 - Δa 的曲线图示见图 10。

对试验中止于失稳断裂的情况应予以报告。如果在断裂表面能够测量稳态裂纹扩展量, 请将此数据点加在 R -曲线上。在 R -曲线上清楚标记失稳断裂点, 并在试验报告中注明。

注: 失稳断裂点依赖于试验尺寸和几何形状。

6.3.2 数据点分布和曲线拟合

6.3.2.1 至少需要六个数据点定义 R -曲线。

6.3.2.2 拟合 R -曲线时, 在四个等间距的裂纹扩展区内, 至少有一个数据点, 如图 10 所示。对 0 和 Δa_{\max} 边界线之间的数据点按指数方程[式(10)]进行拟合。

$$\delta_5 = \alpha + \beta \Delta a^\gamma \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

α 和 $\beta \geq 0, 0 \leq \gamma \leq 1$ 。

6.3.2.3 估算 α 、 β 和 γ 常数的方法见 ISO 12135:2002 中附录 H。如果从线性回归得到的 α 或 β 小于 0, 那么结果无效, 拟合方程不能代表 R -曲线。这种情况下, 建议作补充试验或采用单试样法。

6.3.2.4 由此获得的 R -曲线表征了对应厚度和几何形状的试验材料特性, 与紧凑试样和中心裂纹拉伸试样的面内尺寸无关。

6.4 临界 CTOA 的测定

6.4.1 Ψ 的稳态值(平均值) Ψ_c 在裂纹扩展超过最小裂纹扩展量后就可以确定下来。

6.4.2 Ψ 与 Δa 的关系图由 5.5.1.3、5.5.2.3 和 5.6.2 得到的数据点组成(见图 11)。

6.4.3 对于每一测试试样, Δa_{\max} 按式(11)计算:

$$\Delta a_{\max} = (W - a_0) - 4B \quad \dots\dots\dots (11)$$

并且最小裂纹扩展量 Δa_{\min} 是如图 11 中 Ψ 达到稳定值后对应的 Δa 。按式(12)计算:

$$\Delta a_{\min} = 50 / (5 + B) \quad \dots\dots\dots (12)$$

6.4.4 两者共同构成估计临界 CTOA 值 Ψ_c 的裂纹扩展量的上下边界。式(11)和式(12)都适用于紧凑拉伸和中心裂纹拉伸试样。

注: 由于 CTOA 方法还在发展中, Δa 极限值的规定基于有限的试验。

6.4.5 有四种方法(光学显微法、数字图像相关法、显微形貌分析法和有限元分析方法)可用于测定 CTOA。具体细节参见附录 C。

6.4.6 CTOA 可以在任意的裂纹扩展量下测量, 特别是在最大和最小裂纹扩展量之间。超出裂纹扩展量限定范围测量的 CTOA 值仅供参考。 Ψ_c 由裂纹扩展上下边界内的 Ψ - Δa 曲线图确定。

6.4.7 绘制 Ψ - Δa 关系如图 11 所示, 根据裂纹扩展上下边界内的 Ψ - Δa 关系图确定 Ψ_c 。

注: 因存在裂尖钝化和隧道效应, 在裂纹扩展初始阶段试样表面测得的裂纹尖端张开角一般较大。但是在内部处于局部高约束状态的区域, Ψ 值通常比表面值低, 见图 11。

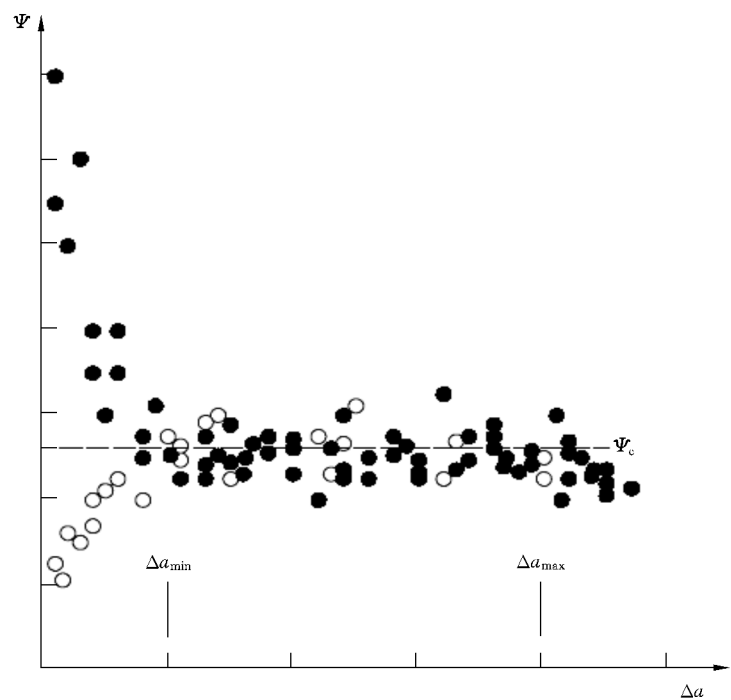
6.4.8 对于 CTOA 试验, Ψ_c 的临界值由式(13)计算:

$$\Psi_c = \sum_{i=1}^N \Psi_i / N \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

Ψ_i ——满足裂纹扩展上下边界要求的值;

N ——测量值的总数目。



说明：
 Δa —— 稳态裂纹扩展量，单位为毫米(mm)；
 Ψ —— 裂纹尖端张开角，单位为度(°)；
 Ψ_c —— 临界裂纹尖端张开角，为常量；
○ —— 外表表面；
● —— 内部区域。

图 11 临界 CTOA 值的测定

7 试验报告

7.1 通则

根据本标准制定试验报告，应包括三个部分(7.2~7.5)。测试材料、试样和试验条件，包括试验环境的详细情况都应依照 7.2 报告。机械加工，疲劳预制裂纹，裂纹前缘的平直度和裂纹长度数据都应符合 7.3 的规定。断裂参数的确定应按照 7.4 和 7.5 予以有效性验证。附录 A 给出了一些试验报告的参考格式。

7.2 试样、材料和试验环境

建议采用表 A.1 给出的格式报告下列项目。

7.2.1 试样描述

- a) 试样编号；
- b) 类型；
- c) 名义 a_0/W ；
- d) 裂纹面取向；

- e) 取样位置。

7.2.2 试样尺寸

- a) 厚度 B , 单位为毫米(mm);
- b) 宽度 W , 单位为毫米(mm);
- c) 初始相对裂纹长度, a_0/W 。

7.2.3 材料描述

- a) 材料的化学成分和标准编号;
- b) 产品形式(板、锻造、铸造等)和状态;
- c) 疲劳裂纹预制温度下的拉伸性能(参考值或实测值);
- d) 试验温度下的拉伸性能(参考值或者实测值)。

7.2.4 试验环境

- a) 温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);
- b) 位移加载速率, 单位为毫米每分(mm/min);
- c) 位移控制的类型。

7.2.5 疲劳预制裂纹的条件

- a) F_f , 单位为千牛(kN);
- b) 预制疲劳裂纹温度, 单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

7.3 试验数据的有效性判定

7.3.1 通则

所有的数据都应满足本标准中相应的要求, 确保数据的有效性, 只有有效的数据才能用以定义断裂韧度。建议参照表 A.2、表 A.5 和表 A.6 中的格式记录 7.3.2 中描述的数据。

7.3.2 裂纹长度的测量

按照图 8 和图 9 所示, 在等间隔的五点上测量裂纹长度。试样厚度 B 小于 5 mm 时, 采用等间隔的三点上测量裂纹长度就足够了, 见 5.6.1.2。下述数据应该在报告中注明:

- a) 机械加工切口长度(a_m);
- b) 初始裂纹长度(a_0)。

7.3.2.1 多试样法

- a) 预制疲劳裂纹长度($a_0 - a_m$);
- b) 最终裂纹长度(a_f);
- c) 平均的裂纹扩展量($\Delta a = a_f - a_0$)。

7.3.2.2 单试样法

- a) 裂纹长度(a);
- b) 平均的裂纹扩展量($\Delta a = a - a_0$)。

7.3.3 断口的形貌

- a) 记录断口特殊形貌的信息；
- b) 记录失稳扩展，如解理断裂的信息。

7.3.4 阻力曲线

建议按照表 A.3 记录包含从单试样法试验得到的构成阻力曲线的所有数据。

7.3.5 数据判定的检查表

如果符合下述要求，则数据有效：

- a) 试样应满足 5.2.1 尺寸和公差的要求。
- b) 试验装置应满足 5.4 误差和同轴度的要求。
- c) 试验机和引伸计符合 5.4 的精确度要求。
- d) 平均初始裂纹长度 a_0 对于紧凑拉伸试样在 $0.40W \sim 0.70W$ 之间，对于中心裂纹拉伸试样在 $0.25W \sim 0.50W$ 之间。
- e) 疲劳预制裂纹的扩展量(从机加工缺口的根部算起)不小于 1.3 mm 或 0.4 N(取其大者)。
- f) 试样两表面的疲劳预制裂纹在包迹线(见图 4)之内。
- g) 采用五点平均值法时，中间三点的裂纹长度与五点平均值之差不应大于 $0.1a_0$ ；采用三点平均值法时，试样中心点的裂纹长度与三点平均值之差不应超过 $0.1a_0$ 。
- h) 对于单试样法直接计算的裂纹扩展量，当裂纹扩展量小于 $0.20(W-a_0)$ 时，计算的最终裂纹扩展量与测量的裂纹长度之差小于后者的 15% 或 0.15 mm，取其大者；当裂纹扩展量大于 $0.20(W-a_0)$ 时，这一差值应在 $0.03(W-a_0)$ 以内。
- i) 单试样法估计的初始裂纹长度 a_0/W 与测量的初始裂纹长度 a_0/W 之差小于后者的 2%；对于单试样法间接测量裂纹长度，第一个试样用于建立试验输出与裂纹扩展量之间的关系，以后运用该关系估计裂纹扩展量的估计值与 Δa_f 测量值之差应不超过后者的 15% 或 0.15 mm，取其大者。
- j) 应满足 6.3.2 中数据点数量和间隔的要求以测定 δ_5 - Δa 曲线。
- k) 应满足 6.3.2 中数据点数量和间隔的要求以测定 Ψ - Δa 曲线。
- l) 应满足 5.6.3 中关于裂纹扩展路径的要求。

7.4 δ_5 - Δa 曲线的判定

按照 6.3.2 对数据进行幂乘回归，拟合 δ_5 阻力曲线。若数据按 7.3 判定有效，回归拟合有效。

7.5 Ψ_c 的判定

临界 CTOA 值 Ψ_c 是对满足 6.4 中要求的稳态数据进行拟合得到的。若裂纹扩展量左、右边界内的数据按 7.3 判定有效，则回归拟合得到的 Ψ_c 有效。

附 录 A
(资料性附录)
试验报告实例

试验报告的主要内容参见表 A.1～表 A.6,也可采用其他格式。

表 A.1 试样、材料和试验环境

A.1				
试样标识：		试验员：	日期：	
试样				
	类型（紧凑拉伸或中心裂纹拉伸）			
	裂纹面取向			
	取样位置			
材料				
	材料名称			
	材料的形式或状态			
基本尺寸				
	B		mm	
	W		mm	
	a_0/W （名义值）		—	
拉伸性能				
	温度		℃	测量值(M)
		参考值(R)		
	E		MPa	
	n		—	
	$R_{p0.2}$		MPa	
	R_m		MPa	
预制裂纹				
	疲劳温度		℃	
	最终的 F_f		kN	
	最终的 K_f		$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	
	最终的 K_f/E		$\sqrt{\text{m}}$	
基本试验信息				
	位移控制类型		裂纹嘴张开量/加载线位移/横梁位移	
	位移速率		mm/min	
	试验温度		℃	

表 A.2 数据判定

A.2			
裂纹长度测量信息			试样标识
裂纹测量表			
点	位置 mm	预制裂纹长度 mm	Δa mm
1			
2			
3			
4			
5			
6			
a_0	平均初始裂纹长度 ^a		mm
$a_0 - a_m$	平均疲劳预制裂纹长度 ^a		mm
Δa	平均裂纹扩展量 ^a		mm
$a_0 + \Delta a_f$	平均最终裂纹长度 ^a		mm
估计裂纹长度			
$a_{0,est}$	估计疲劳裂纹长度		mm
$a_{f,est}$	估计最后裂纹长度		mm
断口形貌			
发生解理断裂			(是/否)
对异常断裂特征如层状撕裂、岛状、金相特征等予以记录			
^a 见 5.6。			

表 A.3 阻力曲线数据

A.3				
数据点	F/kN	a/mm	$\Delta a/\text{mm}^a$	δ_s/mm
<p>^a UC=卸载柔度。 ACPD=交流电势降法。 DCPD=直流电势降法。</p>				

表 A.4 裂纹尖端张开角数据

A.4						
数据点	F/kN	a/mm	$\Delta a/\text{mm}^{a,b}$	$\Psi_1/(\text{°})^c$	$\Psi_2/(\text{°})^c$	$\Psi_3/(\text{°})^c$
<p>^a 见 5.6.2。 ^b 在试样表面处测量。 ^c OM=光学法;DIC=数字图像相关法。</p>						

表 A.5 δ_5 -R-曲线的判定

A.5			
a_0		mm	
B		mm	
$W-a_0$		mm	
幂乘拟合方程 $\delta_5=\alpha+\beta\Delta a^\gamma$ 的系数:			
α	=		
β	=		
γ	=		
$\Delta a_{\max}=0.25(W-a_0)$			mm
测量的最终裂纹扩展量(使用单试样法时)			mm
估计的最终裂纹扩展量(使用单试样法时)			mm
估计的最终裂纹长度相对测量的最终裂纹长度的误差百分率			%
裂纹扩展路径偏离 α			(°)
要求 (见 7.4):			

数据需要符合 5.6.3.2 和 7.3 的要求。

如果满足所有的要求,依照本标准用幂律函数来拟合 δ_5 -R-曲线。

表 A.6 Ψ_c 的判定

A.6			
a_0		mm	
B		mm	
$W-a_0$		mm	
Δa_{\min}		mm	
$\Delta a_{\max} = (W-a_0) - 4B$			mm
测量的最终裂纹扩展量(使用单试样法时)			mm
估计的最终裂纹扩展量(使用单试样法时)			mm
估计的最终裂纹长度相对测量的最终裂纹长度的误差百分率			%
裂纹扩展路径偏离			(°)
要求(见 7.5):			

数据需要符合 5.6.3.2 和 7.3 的要求。

如果满足所有的要求,则 Ψ_c 代表了本标准所指的临界 CTOA。

附录 B
(资料性附录)

测量裂纹尖端张开位移 δ_5 的装置

测量裂纹尖端张开位移 δ_5 的基本安装图见图 B.1。 δ_5 是在试样表面预制疲劳裂纹尖端 5 mm 原始标距处测量的位移。预期裂纹扩展路径附近区域需要经过抛光处理。预制疲劳裂纹后,使用维氏硬度压痕法在试样表面预制疲劳裂纹尖端上下两侧各 2.5 mm 处打点,得到 5 mm 原始标距。带针头的 δ_5 夹式引伸计安装在硬度压痕坑里,对紧凑拉伸试样使用如图 B.2 所示杠杆机构固定。类似的方式也可用于中心裂纹拉伸试样。也可以采用数字图像技术。图 B.3 所示为 δ_5 夹式引伸计详细设计图。

单位为毫米

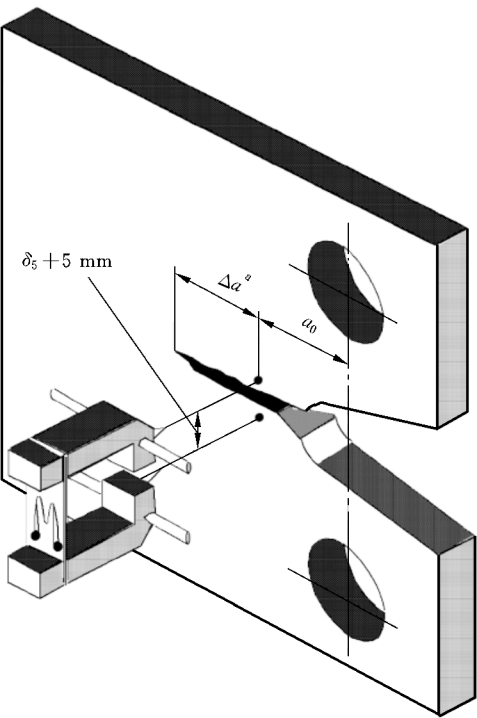


图 B.1 测量裂纹尖端张开位移 δ_5 的基本安装示意图

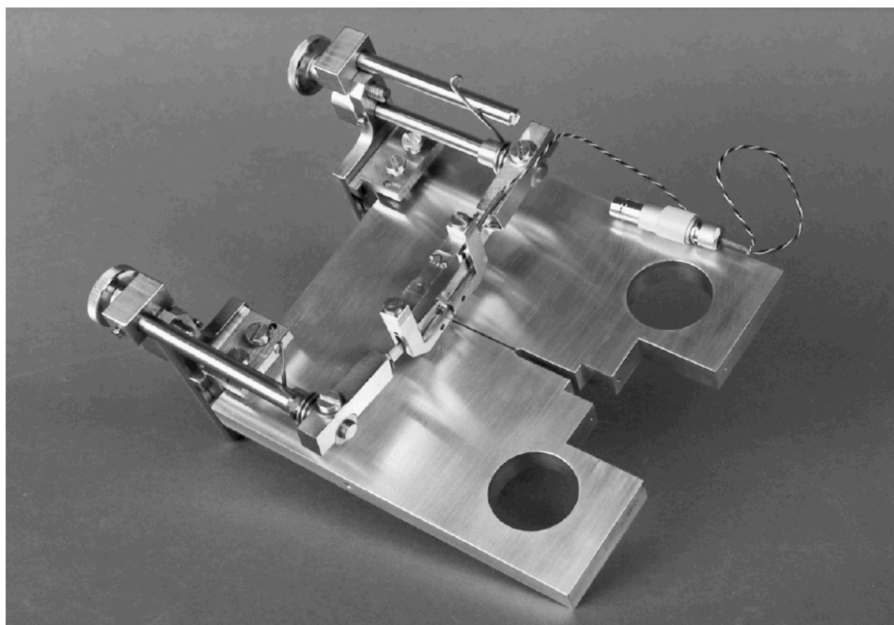
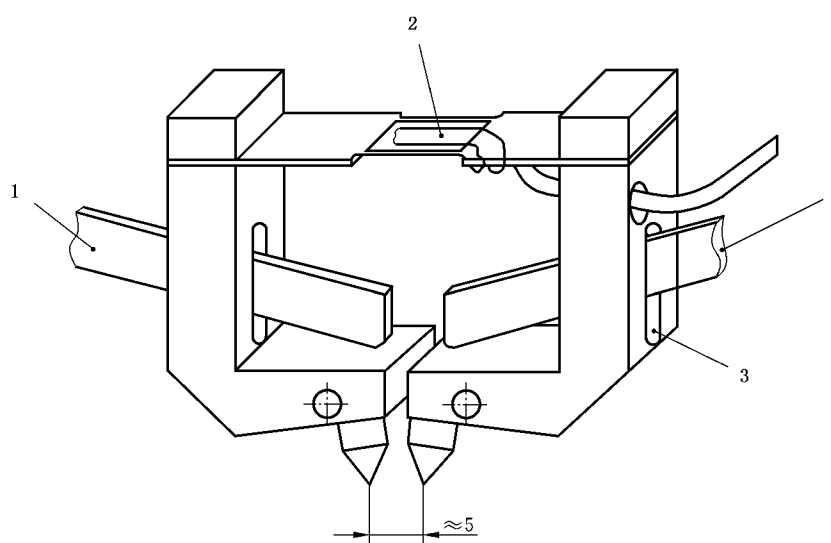


图 B.2 紧凑拉伸试样 δ_5 夹式引伸计的安裝

单位为毫米



说明:

- 1——固定臂;
- 2——应变规;
- 3——固定标定器的开口。

图 B.3 δ_5 夹式引伸计的示意图

附录 C

(资料性附录)

裂纹尖端张开角 Ψ 的确定

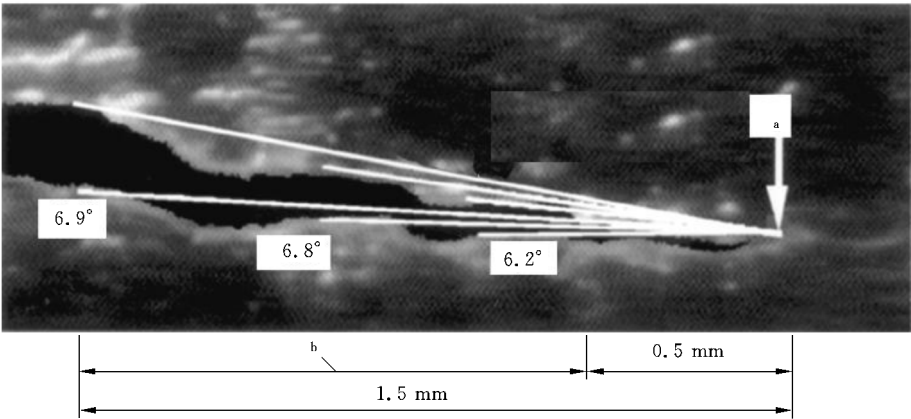
C.1 通则

下列方法均可用于确定 CTOA:

- a) 稳态撕裂过程中直接测量法(光学显微和数值图像相关方法);
- b) 试验后测量(显微形貌法);
- c) 有限元分析;
- d) 通过 δ_5 间接测量。

直接测量 Ψ (CTOA)法是在稳态撕裂过程中采用光学显微或数字图像相关法。两种方法产生近似相同的结果。显微形貌法通过试验后对断裂表面的测量重构稳态撕裂过程。该方法允许在试样内部测定 CTOA。有限元分析通过匹配断裂试样的失效载荷确定临界 CTOA。使用该方法,临界 CTOA 实际上是考虑裂纹前缘拘束效应沿厚度方向的平均值。对于众多材料和试样形式,使用恒定临界 CTOA 值的有限元分析显示 CTOA 和 δ_5 阻力曲线之间在达到最大载荷之前存在唯一性的对应关系。

直接测量 CTOA 是在裂尖后 0.5 mm~1.5 mm 之间的区域进行,见图 C.1。当 $\Delta a < \Delta a_{\min}$ 时,裂尖后的测量距离可小于 0.5 mm。通过有限元计算 CTOA 也是在相同的区域进行的,通常是裂尖后 1 mm。



- ^a 裂尖。
- ^b 测量区间。

图 C.1 通过光学显微法(OM)测定 CTOA 的测量范围

C.2 直接测量法

C.2.1 光学显微法(OM)

C.2.1.1 光学显微法采用如下仪器:

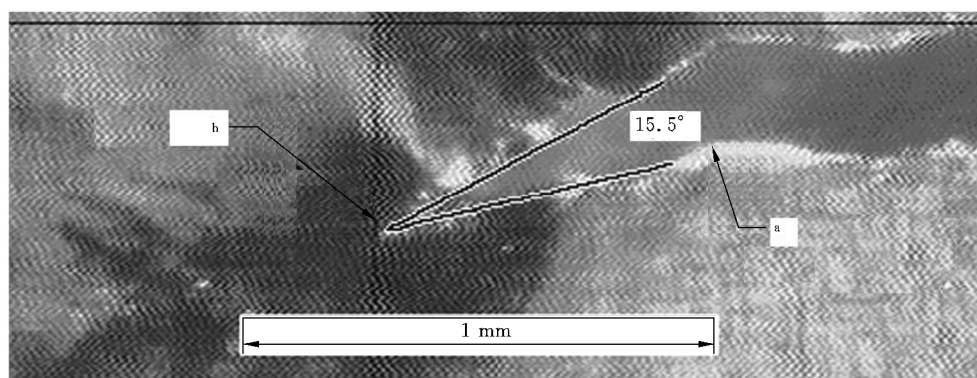
- a) 长焦距显微镜;

- b) 视频摄像机,具有 512×512 像素分辨率,用于获取稳态撕裂裂纹的图像;
- c) 视频记录仪存储图像;
- d) 配置显示器和软件的计算机系统,可以精确确定长焦距显微镜三维位置以及分析试验图像得到 CTOA。

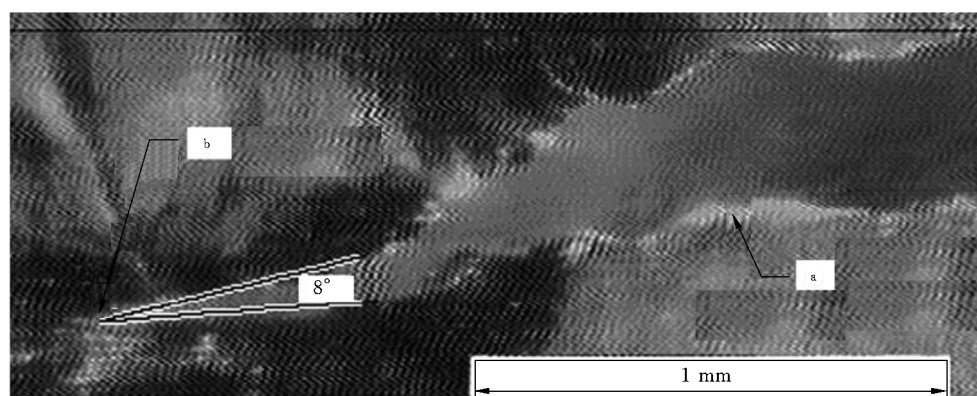
C.2.1.2 使用 OM 时,为得到清晰的裂纹图像,试样表面应抛光成镜面,应仔细控制对裂纹区域的照明以获得最佳的对比度和清晰度。通过 OM 得到的典型图像如图 C.2 所示。第一幅图像,如图 C.2a),显示了疲劳裂纹稳态扩展约 0.75 mm。第二、三幅图像,如图 C.2b)、图 C.2c)所示,显示了同一裂纹稳态扩展分别约 1.3 mm 和 6 mm。CTOA 的测定是通过视频录像回放图像来实现:

- a) 定位裂尖;
- b) 在试样两个裂纹表面裂尖后 0.5 mm~1.5 mm 范围设置三对分离点;
- c) 绘制通过裂尖和每个分离点的直线;
- d) 然后计算直线间夹角—裂纹尖端张开角 Ψ 。

对给定的裂纹长度, Ψ 值定义为三对直线间夹角 Ψ_1 、 Ψ_2 和 Ψ_3 的平均值。值得提醒的是,OM 测量 CTOA 并没有考虑周围材料的变形的影响。

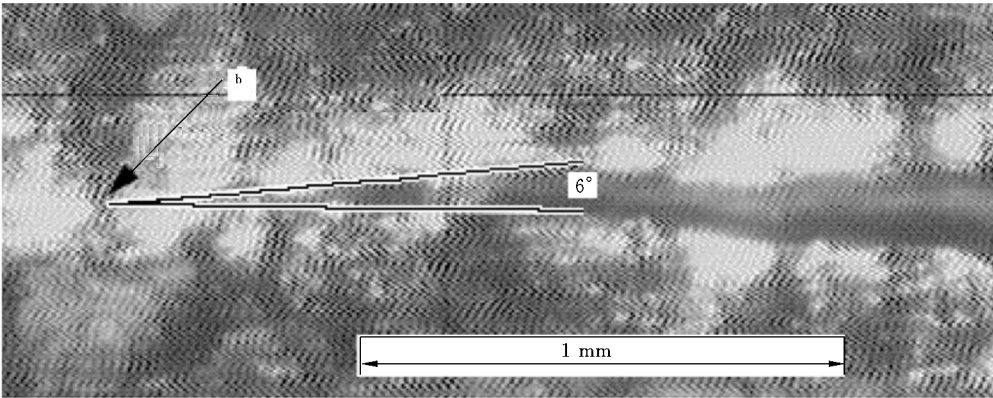


a) 稳态撕裂约 0.75 mm 的光学显微图像



b) 稳态撕裂约 1.3 mm 的光学显微图像

图 C.2 2.3 mm 厚 2024-T3 铝合金稳态撕裂裂纹典型光学显微图像和 CTOA 测量



c) 稳态撕裂约 6 mm 的光学显微图像

- ^a 疲劳预制裂纹尖端。
^b 稳态撕裂后裂纹尖端。

图 C.2 (续)

C.2.2 数字图像相关法(DIC)

数字图像相关法采用如下仪器：

- a) 科研用 CCD、CMOS 或类似相机；
- b) 物镜和延伸器，以获得 80 像素/mm~130 像素/mm 的分辨率（例如 2 倍变焦 200 mm 焦距的物镜，配合具有 1 024×1 024 像素点阵的相机可以产生 125 像素/mm 的分辨率）；
- c) 移动平台使相机平行于试样表面移动，确保扩展裂纹尖端始终保持在相机拍摄的视野范围内（用于视频跟踪扩展裂纹）；
- d) 显示器，用于试验过程中观察裂尖区域；
- e) 具有将图像数字化处理并存储的能力；
- f) 试样表面随机花样，具有足够的对比度以利于花样匹配（花样“空间”频率达到 3 像素/mm~5 像素/mm，使用于测量的局部区域（子集）尺寸最小）；
- g) 用软件进行图像关联和确定子集位移。

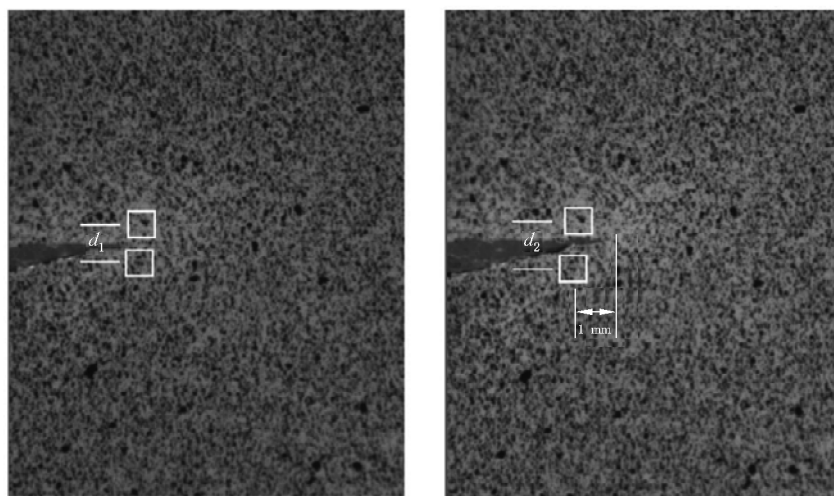
DIC 法类似 OM 法，但有如下区别：

- 在试验时视频摄像机平行于试样表面移动；
- 通过测量试样表面上选定区域（称为子集）的分离来确定裂纹张开位移。摄像机平移前后，当前和上一副裂纹尖端区域图像至少重叠 100 个像素从而获得连续的裂纹扩展过程。

图像分辨率最少在 80 像素/mm~130 像素/mm，大于 100 像素/mm 的解析能力为佳。对试样表面轻微喷涂白色丙烯酸涂料，在干燥前敷以黑色激光打印机墨粉，在试样表面形成高对比度的白光随机斑点图案。如果干燥后图案不够致密，抹去涂层，重复上述过程直至成功。也可以在涂层干燥后敷上墨粉，然后 90 ℃ 烘焙 25 min 使墨粉黏附于涂层表面。少数情况下，如果试样表面允许图像匹配，可以通过平版印刷技术形成表面花样，或者在裸露试样表面形成光学图像。

通过裂纹扩展期间记录的裂尖区域图像来测定 CTOA。存储的图像经后处理测定裂纹扩展量来估计对应的 CTOA 值。在图 C.3 的裂纹尖端区域图像中给出了一对典型的用于估计 CTOA 的子集。典型的子集尺寸是 12×12 像素至 20×20 像素，其选择尽量靠近裂纹面。图 C.3a) 显示了初始选定裂纹长度处的子集。这些子集为参考图像。它们在试样表面相距为 d_1 。图 C.3b) 显示了裂纹扩展量为 r_{1-2} 的同一对子集。通常用 0.5 mm~1.5 mm 的裂纹扩展量（图例显示约 1 mm）定义为前一裂尖后名义上

1 mm 处的 CTOA。新的子集相距为 d_2 。



a) 裂尖区参考图像

(初始裂纹扩展后)

b) 裂尖区图像

(裂纹进一步扩展后)

注: d_1 和 d_2 是白色“方框”在裂纹稳态扩展 1 mm 前、后垂直分离量。

图 C.3 裂纹扩展前后的 DIC 图像(试样表面高对比度、随机斑点花样,用于 DIC 法测定 CTOA)

裂纹张开位移矢量(记为 u_i 和 l_i , 分别代表相对裂纹面法向的上、下子集)从数字图像中计算。计入裂纹线的法向矢量 n_i , CTOA 按式(C.1)计算:

$$\Psi = 2 \arctan \left[\left| \sum_{i=1}^{i=2} (u_i - l_i) n_i \right| / (2r_{1-2}) \right] \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

u_1 ——上子集的水平位移, 定义为垂直于记录用相机 CCD 像素点阵的列向;

u_2 ——上子集的垂直位移, 定义为平行于记录用相机 CCD 像素点阵的列向;

l_1 ——下子集的水平位移, 定义为垂直于记录用相机 CCD 像素点阵的列向;

l_2 ——下子集的垂直位移, 定义为平行于记录用相机 CCD 像素点阵的列向;

r_{1-2} ——图 C.3a) 与图 C.3b) 之间的裂纹扩展量, 通常定义为裂纹尖端之间的直线段;

n_1, n_2 ——垂直于由裂纹扩展增量所定义的裂纹线的矢量。

u_i 和 l_i 的值由计算机对上、下子集的二维位移分量计算后确定, 准确到亚像素, 以便精确评估 CTOA。通常软件执行数字图像相关法, 优化测量规定裂纹扩展量时参考子集的位移, 如图 C.3b) 所示。

Δa_{\min} 和 Δa_{\max} (定义于 6.4) 之间的 Ψ 平均值作为临界 CTOA 值 Ψ_c 。

但是应注意以下方面的选取:

——裂纹扩展量;

——用于估计裂纹张开位移的子集位置。

由本方法采用两幅连续图像测定的裂纹张开位移包含两个分量: 因裂纹张开引起的位移和有限尺寸子集的塑性变形。因为试样断裂过程中总塑性应变可超过 10%, 尽可能靠近基准裂纹尖端位置选取参考子集尤其重要, 最大限度减小后续裂纹扩展引起的子集变形, 减小对 CTOA 测定造成的误差。因此, 为了估计裂纹尖端后 1 mm 处的 CTOA, 连续图像之间的裂纹扩展不得超过 1 mm。

一般情况下, 应选取小的(即不超过 20×20 像素)、紧邻裂纹线的、而且具有高对比度(如用于最大可能精度的 DIC 分析)的子集。

估计 Ψ 值的主要误差来源是裂纹尖端的识别。原因可能是试样表面和裂纹之间对比度不够, 裂尖

裂纹张开过小,试样开裂过程中涂层出现裂纹。为减小这些效应带入的误差,确定 Ψ 的数据应通过裂尖后至少 0.6 mm 处的子集来获取。

C.3 试验后测量法(显微形貌法)

C.3.1 通则

显微形貌法是试验后测量 Ψ (和其他参数) 的测试技术,通过直接测量和断裂表面变形分析即可实现,试验中不需要特殊的考虑或特殊仪器(虽然可以采集 CMOD 和加载线位移数据用来验证分析精度)。单个试样可给出完整的 Ψ - Δa 曲线数据。显微形貌法另一个的优点是能够在试样内部测量 Ψ (即使在 2.5 mm 厚铝板材试样中, Ψ 在裂纹扩展早期也能显著的沿厚度方向变化)。

裂纹扩展过程中裂纹尖端产生不可逆塑性变形使通过显微形貌分析获得 Ψ 成为可能。产生 Ψ 的裂尖断裂过程,在断裂表面留下裂尖扩展的痕迹。打断(通过一些名义上的弹性方法,如疲劳或者解理断裂)正常试验后的试样,测量和记录断口的断裂表面的高度。由此获得两个离散定义的数学表面, $U'(x, y)$ 和 $L'(x, y)$, 分别对应于物理上、下断裂表面。 y 向(裂纹扩展方向)空间增量 0.1 mm 对于 Ψ 的分析通常是足够的。断裂表面的高度测量分辨率要有足够的精度,名义的 Ψ 值越低,高度测量所需的分辨率越高。应记录 x 向和 y 向的两套数据集,以确定材料瞬时分离的共同点的相关性。表面分离差分函数定义为式(C.2):

$$D_j(x, y) = [U_0(x, y) \cdot P_j(a_j, y)/2] - [L_0(x, y) \cdot P_j(a_j, y)/2] + (z_{j-1} + \Delta z_j) \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

j ——裂纹张开增量 Δz 和对应的裂纹扩展量 Δa ;

$L_0 = L'$;

$U_0 = U' - t(x, y)$, 这里 $t(x, y)$ 是平面倾斜修正函数,定义了初始差分条件值 $D_0(x, y)$ 在疲劳预制裂纹区域名义上为零。

$P_j(y)$ 是假设以裂纹扩展试样的旋转中心 R_j 为中心点,绕 x 轴平面转动的试样整体转动修正项(角度修正函数)。

P 是 a_j 和 y 的线性函数,并且 $P_0 = 0$ 。

由此定义了裂纹张开的初始态和扩展态。 D 值小于零没有物理意义,表示裂尖区域没有因裂纹扩展而分离。见式(C.3):

$$D_i(x, y) = [U_0 \cdot P_j(a_j, y)/2] - [L_0 \cdot P_i(a_i, y)/2] + (z_{i-1} + \Delta z_i) \dots\dots\dots (C.3)$$

用于定义 P , 差分函数 D_i 在试验后的弹性断裂区名义上为零。对于对称试样,如中心裂纹拉伸试样,伴随名义对称裂纹扩展, P_j 总是为零。 D_0 和 D_i 代表裂纹扩展过程的两个参考状态,分别对应初始态和终止态。裂纹长度增量 $a_j(x)$ 由 $D_j(x, y) = 0$ ($x-y$ 平面上裂尖边沿) 对应的 y 值而确定。在某一固定 x 位置的不同裂纹张开/扩展量下的 D_j-y (名义裂纹扩展方向) 样例显示于图 C.4, 由此可以确定相关的分析参数。

表面(轮廓) D_j 的平均斜率 C_j 按式(C.4)计算:

$$C_j = \Delta D_j / \Delta y \mid y : [(a_j - 1 \text{ mm}), a_j] \dots\dots\dots (C.4)$$

在 y 向,选定的 x 位置(典型的,试样厚度中位面),在 $y : [(a_j - 1 \text{ mm}), a_j]$ 范围内(标准中定义, $y = a_j$ 是瞬时裂尖位置)与增量 Ψ 的关系式为式(C.5):

$$\Psi_j = 2 \arctan(-C_j/2) \dots\dots\dots (C.5)$$

在定义范围内的离散高度数据进行最小二乘拟合定义平均斜率 C_j 。数据应经过检查剔除无效数据点(不在 D 的总体趋势内),或者 D_j 函数在分析前平滑处理以消除测量误差和少数数据点的关联误差。经过上述处理可作为最终的 Ψ_j - Δa_j 有效数据,用于作图和分析。须重点强调的是,在早期裂纹张开阶段伴随裂尖钝化(CTOD 是该阶段的定义参数),没有明显撕裂。该阶段 Ψ 没有实际意义。由于钝

化和 D 函数的非线性特征,在该区域不考虑变形过程影响,单单从测量的 C_j 推得的 Ψ 值将导致错误的结果。因此 Ψ 只能从稳态撕裂阶段的采集数据确定的 C_j 来计算(见图 C.4)。从钝化到稳态撕裂的转变点通常由 $|C_j|$ 从快速增加向显著降低、更缓慢变化的转变来确定。

C.3.2 与转动修正函数 P 相关的误差

在韧性断裂过程中会发生不同程度的与裂纹扩展无直接联系的大范围塑性变形。

注:这种贯穿剩余韧带区的大范围塑性变形促使试样整体转动。在常规 CTOD 分析中这是一个重要因素,因为局部裂纹尖端张开位移是从裂纹嘴张开位移 CMOD 测量值演算而来。比值 $H = \text{CMOD}/\text{CTOD}$ 取决于裂纹长度 a 和试样整体转动中心点的位置 $R \approx 0.4(W-a)$,通常在 4~6 范围内,由理论推导确定。在显微形貌法中,整体试样旋转对局部 CTOD 的影响如下:

$$S = (R - \text{CTOD}/2)/R \approx 0.95 - 0.98$$

在典型尺寸的试样中观察到,CTOD 越低,即韧性越低, S 更接近临界值,该比值接近 1.0(没有误差)。

对于非对称试样如紧凑拉伸试样,试样整体转动造成即时裂尖后的断裂表面也发生转动。但是试样整体转动引入的误差本质上具有自限性,只占 Ψ 的测量很小部分。高韧度材料,大范围塑性变形更强烈,试样整体转动更大,对应的 Ψ 也更大。对于低韧度材料,反过来讲也是正确的:整体转动愈小,对应的 Ψ 也愈小。

C.4 临界裂纹尖端张开角 Ψ_c 的有限元计算

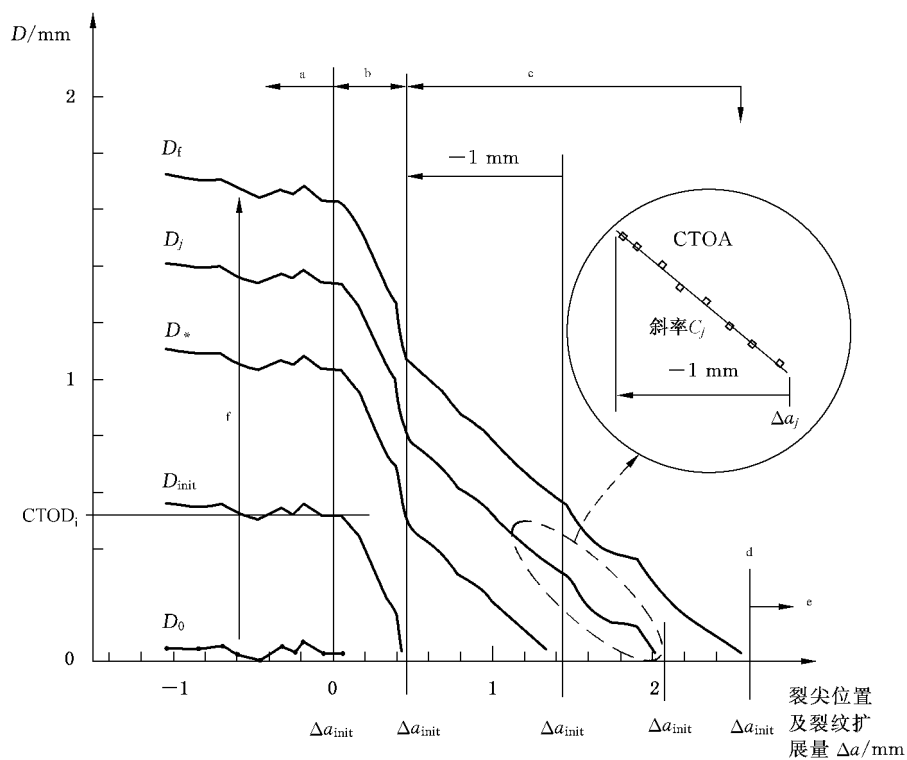
弹塑性有限元分析(FE)程序已经用于通过载荷—裂纹扩展量数据确定临界裂纹尖端张开角 Ψ_c 。该方法假设从起始到失稳, Ψ_c 为常量。通过不断的试错,找到与最大载荷对应的 Ψ_c 值。目前为止采用的 FE 程序包括二维恒应变和线性应变程序,壳分析程序以及三维线性应变程序。对不同材料的稳态撕裂行为研究表明,裂尖区划分 0.5 mm 的恒应变单元网格即可满足沿着裂纹扩展线的载荷-裂纹扩展行为的模拟。三维 FE 程序和壳单元分析程序的研究表明,对于控制屈曲的试样在宽范围内对稳态撕裂建模,划分 1 mm 的线性应变单元网格是足够的。如果裂纹长度和剩余韧带的判据($a/B > 4$ 和 $b/B > 4$)均得到满足,临界 Ψ_c 与试样类型无关。上述条件模拟得到的 Ψ_c 值成功地预测了铝合金薄板复杂结构的稳态撕裂行为。

C.5 间接测量法

C.5.1 δ_5 阻力曲线和 Ψ 之间的相关性

δ_5 - R -曲线的测量比 Ψ_c 测量简单,费用低,所以倾向于从 δ_5 阻力曲线的测量中推算 Ψ_c 。它们之间的相关性仍在研究,已有的裂纹扩展有限元分析模拟表明存在这样的可能性。

图 C.5 显示了弹塑性有限元分析对大量的不同宽度的 2 024-T351($B = 6.35$ mm)铝合金紧凑拉伸和中心裂纹拉伸试样的分析结果。分析在 $\Psi_c = 6.35^\circ$ 条件下进行,对于每个试样得到一条 δ_5 阻力曲线,图中结果仅显示到每个试样的最大载荷。结果表明,对于一个恒定 Ψ_c ,只有一条唯一的 δ_5 阻力曲线相对应。两个断裂参数之间解析或数值的关系尚需要进一步的研究。



说明：

D ——表示的函数状态;

D_0 ——预制裂纹闭合；

D_{init} ——撕裂初始状态;

D_* —— 第一个有效 CTOA 状态;

D_j ——中间扩展状态;

D_f ——撕裂扩展终止状态;

Δa ——裂尖位置及扩展量。

^a 预制裂纹区。

^b 钝化区。

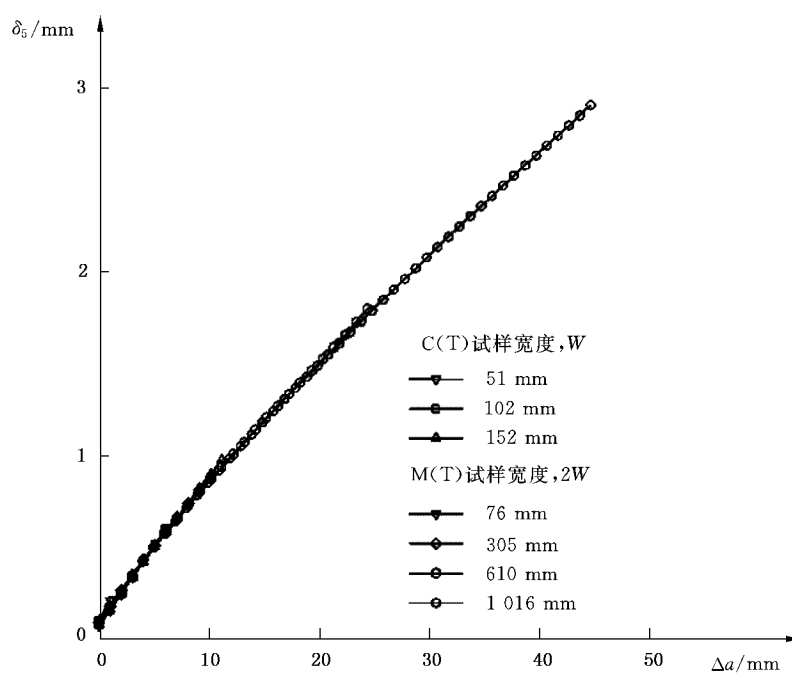
c 撕裂区。

^d 撕裂扩展终止点。

^e 试验后测量区(疲劳或解理)。

^f 有代表性的断裂增量。

图 C.4 利用表面高度差分函数 $D(x, y)$ 分析 CTOA 的图解



有限元分析:

2 024-T351 (LT)

$B = 6.35$ mm

C(T): $a/W = 0.4$

M(T): $2a/W = 1/3$

$\Psi_c = 6.35^\circ$

图 C.5 不同试样形式从定值 Ψ_c 计算出的 δ_5 曲线

附录 D

(资料性附录)

断裂韧性特征值的测定

D.1 $\delta_{5,0.2BL}$ 的测量和判定

R-曲线按照 6.3 和图 D.1 绘制和拟合。按照式(D.1)在图 D.1 中构造钝化线:

$$\delta_5 = 1.87(R_m/R_{p0.2})\Delta a \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

R_m 和 $R_{p0.2}$ 为试验温度下的抗拉强度和规定塑性延伸强度。

在裂纹扩展量 0.10 mm、0.30 mm 和 0.50 mm 处平行于钝化线绘制裂纹扩展偏置线。要求在 0.10 mm 和 0.30 mm 裂纹扩展偏置线之间至少有一个数据点,在 0.1 mm 和 0.50 mm 裂纹扩展偏置线之间至少有两个数据点(见图 D.1)。

在图上偏置 0.2 mm 处作钝化线的平行线,最佳拟合曲线与该偏置线的交点定义为 $\delta_{5,0.2BL}$ 。

对于紧凑拉伸试样, $\delta_{5,max}$ 按照式(D.2)、式(D.3)、式(D.4)计算,取最小值:

$$\delta_{5,max} = B/30 \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

$$\delta_{5,max} = a_0/30 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

$$\delta_{5,max} = (W - a_0)/30 \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

如果 $\delta_{5,0.2BL}$ 不大于 $\delta_{5,max}$, 那么 $\delta_{5,0.2BL}$ 对试样尺寸不敏感。

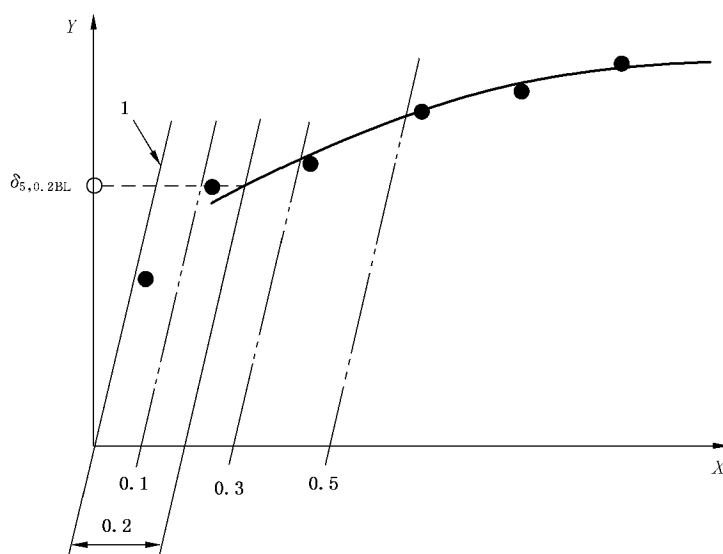
如果 $\delta_{5,0.2BL}$ 不大于由式(D.3)和式(D.4)计算出的 $\delta_{5,max}$, 而又大于由式(D.2)计算出的 $\delta_{5,max}$, 那么 $\delta_{5,0.2BL}$ 对试样面内尺寸不敏感, 却有可能与厚度相关。

如果 δ_5 - Δa 曲线在 0.2 mm 偏置线交点处的斜率 $(d\delta_5/da)_{0.2BL}$ 不满足式(D.5)的要求:

$$1.87 \left[\frac{R_m}{R_{p0.2}} \right] > \left[2 \left(\frac{d\delta_5}{da} \right) \right]_{0.2BL} \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

那么按上述定义确定的 $\delta_{5,0.2BL}$ 有效。

注: 类似的要求不适用于中心裂纹拉伸试样。



说明:

X —— 稳态裂纹扩展量 Δa , 单位为毫米(mm);

Y —— 裂纹张开位移 δ_5 , 单位为毫米(mm);

1 —— 钝化线。

图 D.1 测定 $\delta_{5,0.2BL}$ 的数据分布

D.2 $\delta_{5,i}$ 的测定和判定

R-曲线按照 6.3 绘制。

按照 ISO 12135:2002 附录 D 中的确定临界伸张区宽度 Δa_{SZW} 。

平行于 δ_5 轴通过 Δa_{SZW} 作一条直线, 如图 D.2 所示。按照 6.3.2 描述的方法, 用所有横坐标大于 Δa_{SZW} 的 δ_5 - Δa 数据点拟合最佳曲线。该拟合曲线与 Δa_{SZW} 平行线的交点定义为 $\delta_{5,i}$ 。

通过原点和 $\delta_{5,i}$ 点作一条直线 (见图 D.2)。至少应有一个数据点位于该直线的 0.2 mm 偏置线以内。

对于紧凑试样:

如果 $\delta_{5,i} \leq \delta_{5,max}$ (由图 D.1 规定), 那么 $\delta_{5,i}$ 对试样尺寸不敏感。

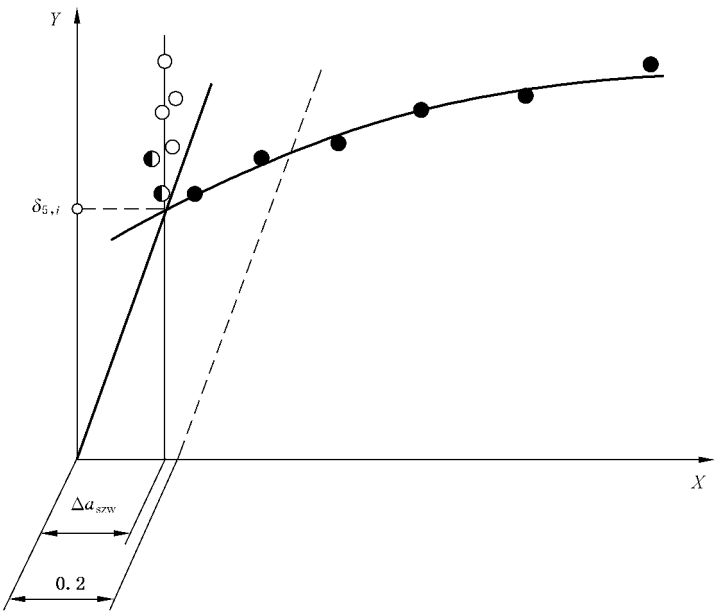
如果 $\delta_{5,i} \leq \delta_{5,max}$ [由式 (D.3)、式 (D.4) 计算], 那么 $\delta_{5,i}$ 对试样面内尺寸不敏感, 但有可能与厚度相关。

计算 δ_5 - Δa 拟合曲线在 $\delta_{5,i}$ 点处的斜率 $(d\delta_5/da)_i$; 定义直线 L 为原点和 $\delta_{5,i}$ 点连成的线, 计算其斜率 $(d\delta_5/da)_L$, 如果用式 (D.6):

$$(d\delta_5/da)_L < 2(d\delta_5/da)_i \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

则按照本方法得到的 $\delta_{5,i}$ 无效。

注: 类似的要求对中心裂纹拉伸试样不适用。



说明：

X —— 稳态裂纹扩展量 Δa ，单位为毫米(mm)；

Y —— 裂纹张开位移 δ_5 ，单位为毫米(mm)；

○ —— δ_5 - Δa 数据；

● —— 有效的伸张区数据；

● —— 无效的伸张区数据。

图 D.2 $\delta_{5,i}$ 的测定

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 低拘束试样测定稳态裂纹
扩展阻力的试验方法

GB/T 24522—2020/ISO 22889:2013

*

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(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

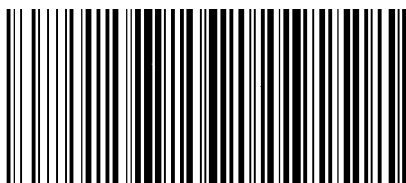
服务热线: 400-168-0010

2020年6月第一版

*

书号: 155066 • 1-65179

版权专有 侵权必究



GB/T 24522-2020