



中华人民共和国国家标准

GB/T 24171.2—2009/ISO 12004-2:2008

金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定 第2部分：实验室成形极限曲线的测定

Metallic materials—Sheet and strip—Determinations of forming limit curves—
Part 2: Determinations of forming limit curves in laboratory

(ISO 12004-2:2008, IDT)

2009-06-25 发布

2010-04-01 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

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 薄板和薄带
成形极限曲线的测定
第2部分:实验室成形极限曲线的测定
GB/T 24171.2—2009/ISO 12004-2:2008

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

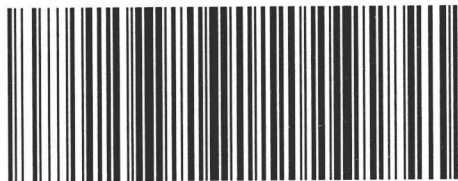
*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 43 千字
2009年11月第一版 2009年11月第一次印刷

*

书号:155066·1-38873 定价 27.00 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)68533533



GB/T 24171.2-2009

前 言

GB/T 24171《金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定》分为二个部分：

——第1部分：冲压车间成形极限图的测量及应用；

——第2部分：实验室成形极限曲线的测定。

本部分为 GB/T 24171 的第2部分。本部分等同采用国际标准 ISO 12004-2:2008《金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定 第2部分：实验室成形极限曲线的测定》(英文版)。

为了便于使用，本部分做了下列编辑性修改：

- a) “本国际标准”一词改为“本标准”；
- b) 用小数点‘.’代替作为小数点的逗号‘,’；
- c) 删除了国际标准的前言；
- d) 删除了国际标准中表1的法语、德语注释和注2；
- e) 删除了国际标准中的表2；
- f) 将国际标准中表2的公式 $\epsilon = \ln(1 + e)$ 合并到表1中；
- g) 在试样报告部分增加了“本标准编号”一项。
- h) 删除了附录E中的“下面的数据集和允许的分散度可以在因特网上相关文件中找到(见参考目录)。”一句。

本部分的附录A、附录B、附录C、附录D、附录F、附录H均为规范性附录，附录E、附录G为资料性附录。

本部分由中国钢铁工业协会提出。

本部分由全国钢标准化技术委员会归口。

本部分起草单位：武汉钢铁(集团)公司、太原钢铁(集团)公司。

本部分主要起草人：祝洪川、李荣锋、陈士华、王丽英、邱保文、杜丽影。

引 言

成形极限图(Forming Limit Diagram/FLD)——包含主应变/次应变点的图表。

FLD能够分辨某个应变数值对于某种材料来说是安全的还是破裂的,从安全点到破裂点的界线定义为成形极限曲线。

有两种不同的方法可以测定材料的成形极限:

- 1) 对冲废的零件进行应变分析,测定与零件外形和加工工艺有关的 FLCs。

在冲压车间,这些点的应变路径通常是未知的,成形极限曲线 FLC 依赖于材料、零件和所选择的成形条件。此方法见本标准第 1 部分。

- 2) 完善的实验室条件下的 FLCs 测定:

为了评价其成形性能,需要对给定材料绘制唯一的成形极限曲线 FLC。标准规定对 FLC 的测定需采用不同的线性应变路径。该方法可应用于材料的性能表征,见本标准第 2 部分。

对于 GB/T 24171 的本部分(关于实验室成形极限曲线的测定),下面的条件也是有效的:

成形极限曲线(FLCs)用于确定指定的材料在受到拉延、胀形或拉延胀形相结合时能够达到的变形程度。这种能力受到裂纹产生、局部缩颈的限制。存在有许多测量材料成形极限的方法,但应指出的是,采用不同的方法得到的结果不能用于比较的目的。

FLC 表征了经过一定热-机械处理后特定厚度材料的变形极限。材料的力学性能和材料在 FLC 测量前的历史等附加信息对于成形性能的判断都是重要的。

为了比较不同材料的成形能力,不仅要判断 FLC,而且下面的参数也是重要的:

- a) 至少主方向的力学性能;
- b) 最大力塑性延伸率,参照 GB/T 228;
- c) 给定变形区间的 r 值,参照 GB/T 5027;
- d) 给定变形区间的 n 值,参照 GB/T 5028。

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 符号及说明	1
3 原理	1
4 试样和试验设备	2
5 应变截面线分析和应变对(ϵ_1, ϵ_2)的测量	8
6 文档	12
7 试验报告	12
附录 A (规范性附录) 二阶导数和“过滤的”二阶导数	13
附录 B (规范性附录) 拟合区域宽度的计算	14
附录 C (规范性附录) “钟形曲线”的最佳拟合反抛物线的计算	15
附录 D (规范性附录) 网格的应用和测量 用放大镜或显微镜进行测量	16
附录 E (资料性附录) 用于验证计算程序的试验数据表	17
附录 F (规范性附录) FLC 的数学描述和表示	18
附录 G (资料性附录) 极端的横截面数据例子	19
附录 H (规范性附录) 从测量应变分布到 FLC 数值的流程图	20
参考文献	22

金属材料 薄板和薄带 成形极限曲线的测定

第2部分:实验室成形极限曲线的测定

1 范围

GB/T 24171 的本部分规定了在室温和线性应变路径下测定成形极限曲线(FLC)的试验条件及方法。

本部分适用于试验材料是平直的、厚度在 0.3 mm~4 mm 之间的金属材料。

注: 4 mm 的厚度上限是由材料最大允许厚度与冲头直径的比值确定的。

对于薄钢板,推荐厚度的最大值为 2.5 mm。

2 符号及说明

本部分采用表 1 中的符号及说明。

表 1 符号及说明

符 号	说 明	单 位
e	工程应变	%
$\epsilon = \ln(1+e)$	真实应变(对数应变)	—
ϵ_1	主真实应变	—
ϵ_2	次真实应变	—
ϵ_3	厚向应变	—
σ	标准偏差	—
D	冲头直径	mm
D_{bh}	凹模直径	mm
$X(0), X(1)$ $X(m) \cdots X(n)$	X 方向位置	mm
$f(x) = ax^2 + bx + c$	最佳抛物线拟合公式	—
$f(x) = 1/(ax^2 + bx + c)$	最佳反抛物线拟合公式	—
$S(0), S(1) \cdots S(5)$	截面	—
n	X 方向位置点数	—
m	失效位置截面数量	—
w	拟合区域宽度	mm
t_0	初始板厚	mm
r	塑性应变比	—

3 原理

FLC 用于表示材料在设定的线性应变路径变形条件下的近似的固有极限。为了准确测定 FLC,在测量区域需要保持近乎无摩擦的状态。

首先,在平直无变形的板料表面印制造定的、尺寸精确的网格或随机斑点图案。然后采用 Nakajima 或 Marciniak 方法对板料进行变形直至破裂、停止试验。

测量宜使用“位置相关”的方法(见 5.2)。

注:“时间相关”方法正在开发中。

测量变形后试样的应变,应变处理时忽略结果中缩颈或者破裂部分,然后通过插值确定材料不发生失效所能承受的最大应变。插值曲线中的最大值被定义为成形极限。

成形极限由几种应变路径(ϵ_1 和 ϵ_2 之间的不同比值)测量得到。测量的应变路径范围从单向拉伸到双向拉伸(胀形)。不同应变状态下收集的单个成形极限数据点连接起来即可得到成形极限曲线。绘于图中的曲线表示了薄板表面两真实应变 ϵ_1 和 ϵ_2 的一种函数关系,即成形极限图。X 轴代表了次真实应变 ϵ_2 ,Y 轴代表了主真实应变 ϵ_1 (见图 1)。

标准的转换公式允许计算主真实应变(ϵ_1)和次真实应变(ϵ_2)。下文中,应变指真实应变,也称为对数应变。



图 1 六个不同应变路径的示意图

4 试样和试验设备

4.1 试样

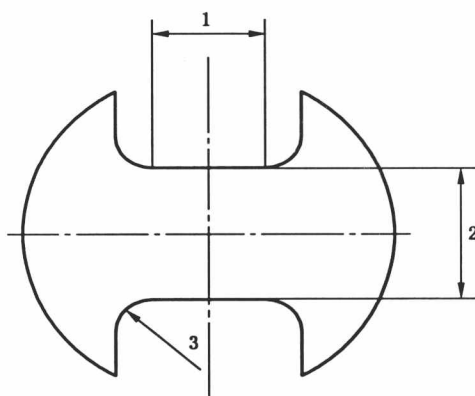
4.1.1 试样厚度

本试验使用厚度在 0.3 mm~4 mm 之间的平直金属薄板。

4.1.2 试样几何形状

推荐的试样几何形状如下:

哑铃型的试样在中间有超过冲头直径 25% 的平行部分(对于 100 mm 的冲头,建议平行部分的长度为 25 mm~50 mm,过度弧半径为 20 mm~30 mm),见图 2。



- 1——平行部分长度;
- 2——平行部分宽度;
- 3——过度弧半径: $R=20\text{ mm}\sim 30\text{ mm}$ 。

图 2 带平行部分的哑铃型试样(狗骨头形状)

$\epsilon_2 > 0$ 时,可以使用不同曲率半圆弧切边得到的试样。

对于钢板(主要是低强度级别的),如果试样在凹模圆角部位不发生破裂,采用不同宽度的矩形薄带试样就足够了,否则采用上述的试样形状。

相比于矩形带状试样,采用外圆弧形形状的板料可以获得分布更均匀一致的成形极限试验数据点。

4.1.3 试样的制备

在保证试样边缘不产生裂纹的前提下,可采用铣削、线切割或其他不会产生裂纹、加工硬化和改变显微组织的方法。

4.1.4 不同几何形状试样的数量

为了描述完整的 FLC 至少需要 5 组不同几何形状的试样(目的是得到从单向到等双向拉伸分布均匀的 FLC)。

如果不需要完整的 FLC,不同几何形状试样的数量可以减少但应在测试报告中予以说明。

4.1.5 每种几何形状试样的数量

试样数量应能保证至少 3 个有效的样本。

4.2 网格的使用

4.2.1 网格尺寸

推荐的网格尺寸取 1 倍左右的材料厚度(由于缩颈宽度的原因,网格尺寸同材料厚度有关),允许的最大网格尺寸为 2.5 倍材料厚度,对于 100 mm 的冲头允许的最大网格尺寸为 0.1 英寸(2.54 mm)。通常使用的网格尺寸为 1 mm 或 2 mm。小网格由于准确度不高而不常使用(如果未变形的网格在试验前不进行测量的话)。

对于随机图案,虚拟网格的尺寸宜同推荐的网格尺寸相一致,也可以使用更小的虚拟网格。

4.2.2 网格的印制

印制的网格(如:方形、圆形、点阵)宜具有良好的对比度,不会留下刻痕或改变材料的显微结构。一些常用的技术有电化学、照相、丝网印刷和网格转印。

随机图案(散斑)可以喷涂到试样表面,涂料同表面的结合力应在变形后予以检查,喷涂一层薄的、亚光的白色基底可以减少来自试样表面的反光,随后可以喷涂云雾状随机分布的黑色斑点(例如黑色的喷漆或墨粉)。

4.2.3 未变形网格的精度

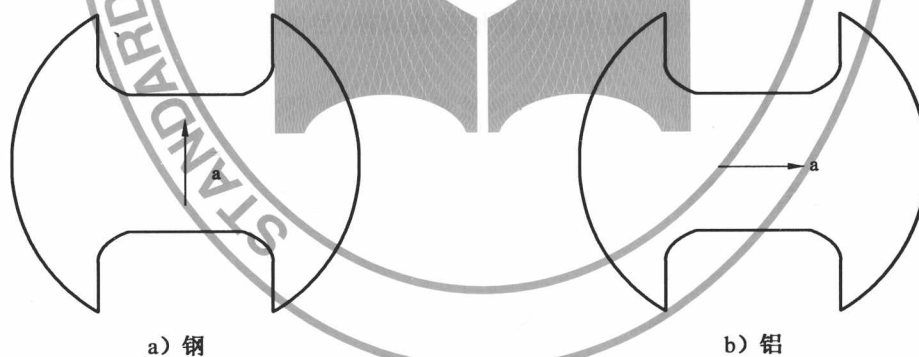
为了获得 2% 的系统准确度,基于 1 倍标准差(1σ)的初始网格的准确度应优于 1%。这种情况仅适用于不考虑对未变形条件进行评估的系统。

4.3 试验装置

4.3.1 一般要求

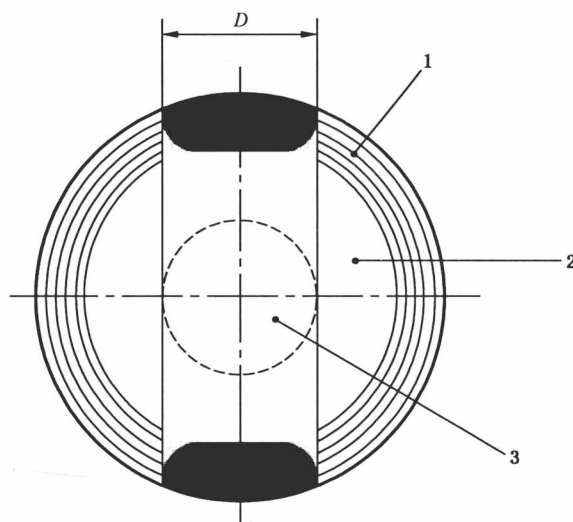
下面的参数对 Nakajima 和 Marciniak 试验都有效:

- 冲头速度: (1.5 ± 0.5) mm/s;
 - 防止材料流入: 为了保证近乎线性的应变路径应尽可能阻止材料的流入。可行的方法有: 用拉延筋, 合适的板夹持力, 锯齿状或滚花的模具 (在最后两种方法不会导致局部应变集中或者裂纹的前提下);
 - 板夹持力, 单位为千牛 (kN): 尽可能阻止材料流入;
 - 试验温度: $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$;
 - 试验方向: 对于给定的 FLC, 所有试样的主方向应取最低极限应变 e_1 或 e_2 的方向并且相对于轧制方向是一致的, 见图 3;
 - 铝: 纵向的 (平行部分平行于轧制方向);
 - 钢: 除了特殊情况一般为横向的 (平行部分垂直于轧制方向)。
- 如果测试方向 (纵向或者横向) 未知则应通过双向应变试验或其他合适方法检查;
- 冲头表面粗糙度: 冲头表面的接触部位需进行抛光;
 - 凹模材料及硬度: 硬化钢;
 - 压边圈形状: 圆环状压边圈, 见图 4;
 - 试验停止判据: 出现裂纹;
 - 裂纹检测: 目测或载荷下降。



a——轧制方向 (RD)。

图 3 平行部相对于轧制方向 (RD) 的取向



D ——落料宽度与冲头直径相等；

1——有切口的锯齿状压边圈；

2——板料；

3——冲头。

注：为了与理想的线性应变路径更接近和获得更均匀的真应变数值分布，可以使用有切口的圆环状压边圈（建议切口宽度等于冲头直径）。

图 4 有切口的压边圈

4.3.2 应变测量

a) 系统准确度：

测量系统在基于一倍标准偏差(1σ)下的系统准确度宜优于 2% (准确度依赖于网格准确度/分辨率、相机分辨率、测量区域、计算方法…)

b) 未变形网格精度：

初始网格在基于一倍标准偏差(1σ)下的准确度宜优于 1% (仅对未变形条件不进行评估的系统有要求)。

c) 测量装置：

可以采用任何方便的测量装置，测量装置的不确定度应小于测量长度的 1%。推荐的相机和软件允许的在基于一倍标准偏差(1σ)下的准确度要优于 2%。

d) 应变测量：

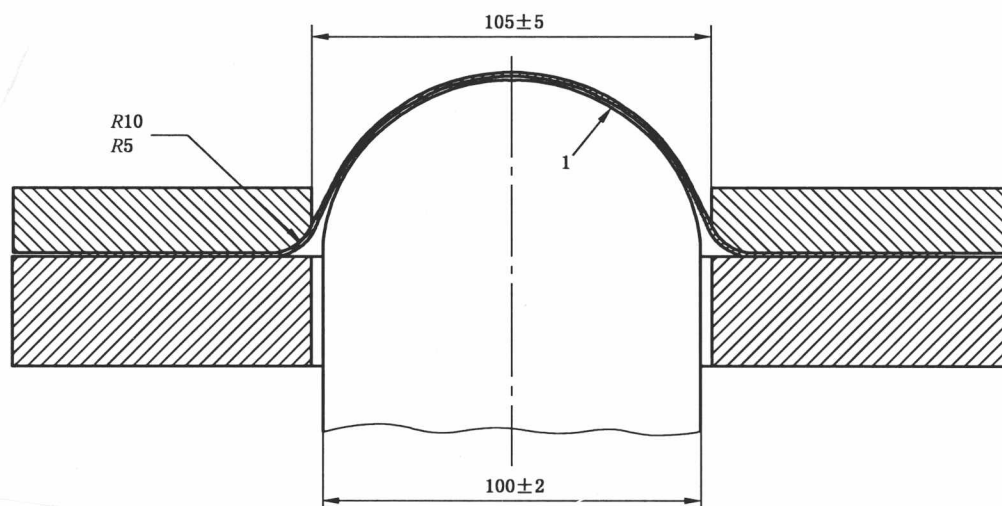
应变测量可以通过测量最终网格的尺寸进行，此时初始网格的准确度是知道的($<1\%$)，或者通过比较最终网格和初始网格的尺寸或采用增量方法进行，即参考初始网格大小计算应变。

4.3.3 Nakajima 试验

4.3.3.1 通则

采用半球冲头的 Nakajima 成形方法见图 5。

单位为毫米



1——润滑层。

图5 Nakajima 试验模具的横截面示意图

4.3.3.2 模具

- a) 冲头直径: (100 ± 2) mm;
- b) 凹模直径: 优先取 105 mm 并且不小于冲头直径加上 2.5 倍的材料厚度;
- c) 凹模圆角半径: 优先取 8 mm, 最小取 5 mm 或者 2 倍材料厚度两者之中的较大值。

4.3.3.3 试验条件

润滑方式:

只有调整润滑方式,使裂纹产生在距离拱顶 15% 的冲头直径范围内试验才有效。采用最佳的润滑方式可以使裂纹产生在非常接近拱顶的位置。在这种情况下,可以显著减少对称于拱顶的双缩颈问题(随后两个缩颈区域中的一个开始起裂),截面应变分布图中严重的双顶点现象可以减少。这使应变对 $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ 的自动测量更准确。在一个特定的 FLC 测量过程中,可不改变润滑方式。

推荐的润滑方式有:

- a) 冲头工作力小时(比较薄的钢板或抗拉强度相对低的材料。例如厚度小于 2 mm 的铝板):
 - 1) 油或油脂(如羊脂);
 - 2) 圆形 PE 或 PTFE 薄膜(如 0.05 mm 厚);
 - 3) 油或油脂。
- b) 冲头工作力大时(较厚的钢板或抗拉强度更高的材料):
 - 1) 简单的:

与 a) 相同但用更软的 PVC 代替 PTFE。
 - 2) 复杂的:
 - I) 油或油脂(如羊脂);
 - II) 圆形 PE 或 PTFE 薄膜(0.05 mm~0.1 mm 厚);
 - III) 油或油脂;
 - IV) 软 PVC 薄片(3 mm 厚);
 - V) 油或油脂;
 - VI) 圆形 PE 或 PTFE 薄膜(0.05 mm~0.1 mm 厚);
 - VII) 油或油脂。

润滑层 I 和 VII 是可选的。

使用这两种润滑方式,绝大多数试验都可以满足裂纹出现在拱顶的条件。从以前不同材料的试验情况来看,不存在一种通用的润滑方式(适合所有的材料和所有的厚度范围)。最困难的情况出现在试验厚度大的高强度材料中。根据个人的实践和经验可以使用替换的润滑方式。在这种情况下建议通过球冲胀形对润滑方式进行测试。能够获得最大的极限拱高并使裂纹出现在拱顶的润滑方式被认为是最合适的。

为了防止薄膜起皱,薄膜的直径宜小于冲头的直径。

4.3.4 Marciniak 试验

4.3.4.1 通则

Marciniak 成形方法使用平冲头,见图 6。

单位为毫米

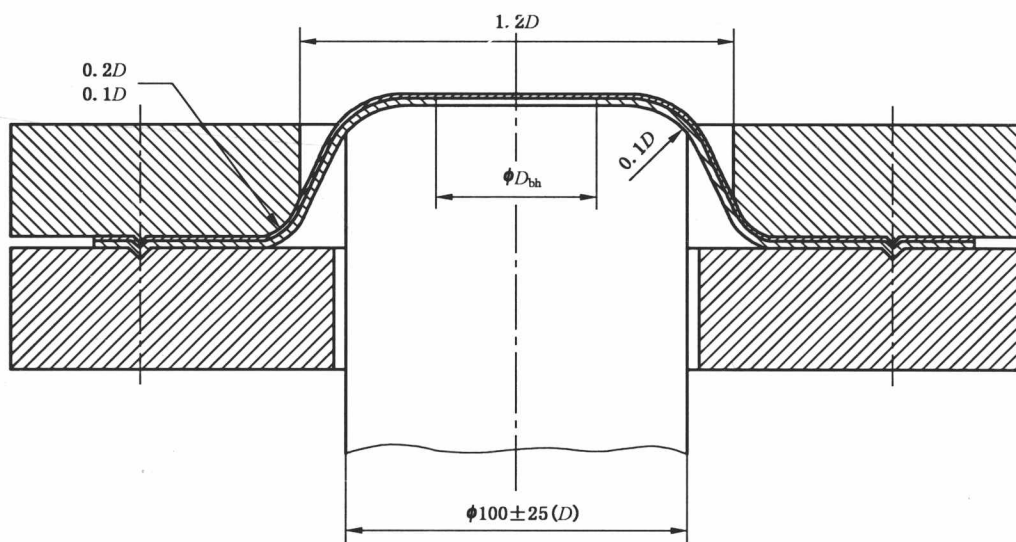


图 6 Marciniak 试验模具的横截面示意图

4.3.4.2 模具

- 冲头直径:直径 (100 ± 25) mm 的平冲头;
- 冲头的圆角半径:建议取 10% 的冲头直径;
- 凹模直径:建议取 120% 的冲头直径;
- 凹模圆角半径:10%~20% 的冲头直径。

4.3.4.3 垫板

为避免试样与冲头平面接触,必须使用垫板,这样可以确保裂纹出现在正确的位置并且获得均匀的应变分布。

垫板的塑性不低于被试验材料的塑性,垫板通过裁剪获得。在研究的材料出现裂纹前,垫板不应发生破裂。

垫板的最小厚度应为试样厚度的 0.8 倍左右,可以使用一块以上的垫板。

垫板的尺寸宜同试样或者双向应变试验板料的尺寸相等(使垫板的加工和存储更方便)。

垫板应有一个直径 D_{bh} (通常 32 mm~34 mm) 的中间孔,并与冲头对中。孔的边部质量必须能够避免早期裂纹的产生。试样发生破裂时垫板的孔径必须保持小于冲头平面部位的直径。如果需要,垫板可以切割为两部分(垂直于应变方向)。

垫板与试样的接触面有更高的粗糙度(例如喷砂)有益于提高垫板与试样间的摩擦力。

4.3.4.4 试验条件

垫板同试样之间不允许进行润滑,但通常冲头和垫板之间需要进行润滑。

试验的有效性:破裂必须发生在垫板孔上面的平面区域。

4.3.5 测量装置

相机和软件在基于 1 倍标准偏差(1σ)下的系统准确度要优于 1%。

5 应变截面线分析和应变对(ϵ_1, ϵ_2)的测量

5.1 一般说明

使用相机进行的测量可以采用不同的分析方法对横截面数据进行评价。

AM1——破裂试样的评价(离线)

成形以后对图像进行分析,但不直接在成形试验机上进行。

AM2——进行了初始网格尺寸标定的破裂试样的评价(离线)

对成形前后的图像进行分析,但不直接在成形试验机上进行。

AM3——直接在裂纹发生前进行的评价(在线)

相机直接安装在成形试验机上,记录初始及破裂前的一系列变形图像。这些图像将用于进行位置相关性的在线测量。在有裂纹的图像上确定垂直于裂纹的截面线,然后将图像回放到能看见裂纹之前的最后一张,目的是为了在裂纹张开前的截面上搜索应变(ϵ_1, ϵ_2)的大小。

以上三种方法采用了在垂直于裂纹的截面上搜索应变(ϵ_1, ϵ_2)的原理,在 5.2 中进行了描述。

注:时间相关的检测方法正在研究,将在标准本部分下次修订时加入。

5.2 采用横截面的测量方法(位置相关性测量)

5.2.1 通则

本方法的基本原理是沿预先确定的横截面对测量的应变分布进行分析。通过去掉缩颈区域的应变点,并对缩颈区域两边剩余的应变分布进行曲线拟合,重构这个范围内缩颈开始前的应变分布。可按以下步骤进行:

——确定包含缩颈的相关截面(见 5.2.2);

——采用客观的数学判据标示缩颈范围;如此就可以确定曲线拟合区域的内部边界(见 5.2.3);

——确定外部边界以获得最优的拟合区域宽度,使我们在缩颈两边获得最好的曲线近似相关性。

下面的子章节对这些步骤进行了详细的描述(见 5.2.4)。

对于最后两步(5.2.3 和 5.2.4)的数学方法不太熟悉的,5.2.3 的图 8 给出了程序的输出结果。

一些材料表现出非均匀的变形,导致非摩擦引起的多顶点。此类情况下横截面分析方法不能自动进行。附录 G 给出了一些极端的横截面数据。

如果测量准确度足够的话,其他方法(自动或手动)也可以使用(见附录 D)。

5.2.2 测量的位置和程序

为了成形极限测定的可重复性,裂纹两边截面线的长度均不能小于 20 mm,两边测量点均不得少于 10 个,见图 7。裂纹中间大约长 10 mm 的虚线确定了裂纹的起源位置:

1) 当 $\epsilon_2 \geq 0$ 时,截面线应尽可能垂直于裂纹(在 $\pm 25^\circ$ 内);

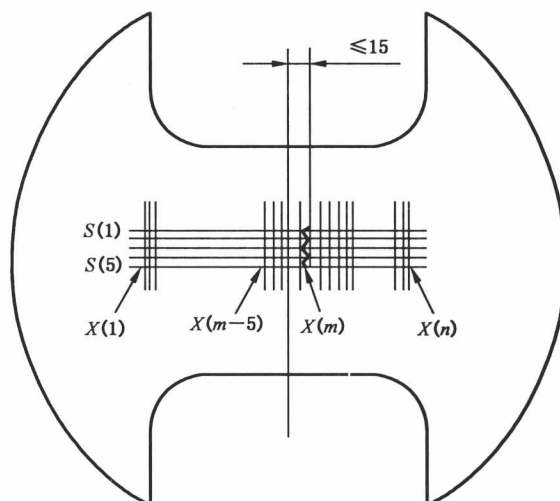
2) 当 $\epsilon_2 < 0$ 时(窄试样),截面线应平行于试样平行部方向,这样可以避免由于裂纹宽度大造成的截面线左右两边的平行位置偏差。

为了起裂后自动测量的稳定性,建议两种情况下插值线都保持与(虚拟的)网格主应变方向一致的取向。

第一条截面线穿过裂纹中心;另外在第一条截面线的两边间隔约 2 mm 分别布置 1 条或 2 条插值线。这些线的位置应与裂纹区主应变 ϵ_1 的方向保持一致,使裂纹穿过截面的中心。对于出现多个裂纹线(发散裂纹,对称胀形)的试样必须舍弃。

为了下面的计算,需要 X 坐标和每个截面点的 ϵ_1, ϵ_2 。X 坐标以第一个插值点为开始,根据截面与试样表面计算得到的弧长给出(例如以 $X(0)=0$ mm 作为截面的起始点)。

单位为毫米



$X(1)$ $X(1)$ ——坐标;
 $X(m-5)$ $X(m-5)$ ——坐标;
 $X(m)$ $X(m)$ ——坐标;
 $X(n)$ $X(n)$ ——坐标;
 $S(1)$ $S(1)$ ——截面;
 $S(5)$ $S(5)$ ——截面。

图7 横截面的位置

为了便于软件计算以表格的形式存储所有的截面线长度,可以将所有 FLC 数据以 ASCII 码的格式存储在一个文件中或每个截面线(m)分别存储在一个文件中。为方便起见最好将试样几何形状、试样编号和截面编号添加到所有数据中,可以得到下面的文件格式。

X-坐标/mm	ϵ_1	ϵ_2	试样几何形状	试样 #	截面
$X(1)$ -坐标-截面(m)	$\epsilon_1(1)$ -截面(m)	$\epsilon_2(1)$ -截面(m)	1	A	m
$X(2)$ -坐标-截面(m)	$\epsilon_1(2)$ -截面(m)	$\epsilon_2(2)$ -截面(m)	1	A	m
...	...	...			
$X(n)$ -坐标-截面(m)	$\epsilon_1(n)$ -截面(m)	$\epsilon_2(n)$ -截面(m)	1	A	m
...	...	...			
$X(n)$ -坐标-截面(m)	$\epsilon_1(n)$ -截面(m)	$\epsilon_2(n)$ -截面(m)	2	B	m
...	...	...			

建议 X-坐标格式: #.#.#。

建议真应变格式: #.#.#.#。

试样几何形状编号(1,2,3...),每种几何形状的试样编号(A,B,C...)及截面(m ,以编号 a,b,c...给出)以附录 F 给出的格式同 FLC 数值对齐保存在一个文件中。

5.2.3 根据试验数据点提取“钟形曲线”和确定最佳拟合曲线的内部边界

确定拟合边界时宜遵循下面的步骤:

a) 裂纹位置的确定:

- 1) 对于 AM1 和 AM2,可以获得截面线上点的实际 X 坐标。如果知道裂纹的实际位置,则根据实际位置确定,否则需要通过一个最佳抛物线拟合进行确定 [$f(x) = ax^2 + bx + c$]。在进一步计算前,如果裂纹宽度大于 0.5 mm (目视判断,0.5 mm 准确度)的话就需要从

钟形插值截面线的中间将其减去。裂纹两侧拟合范围的宽度应至少分别有 4 mm 或 3 个点。抛物线的最大值确定了裂纹的位置。

2) 对于 AM3, 裂纹的路径和截面线的方向设定在开始发生起裂后的首张图像上, 并转回到记录的裂纹张开之前的图像上。这张裂纹萌发前的标示有截面线的图像被用于确定试样的成形极限应变。对于在线测量, 在开裂前的最后阶段需要选择每秒不少于 10 帧的图像记录速度。裂纹的位置要通过抛物线 $[f(x) = ax^2 + bx + c]$ 的最佳拟合来确定。测量区域的中心由最高的截面应变数据 ϵ_1 给出, 区域的宽度是 8 mm, 但至少有 5 个点, 抛物线的最大值确定了裂纹的位置。

b) 不进行平滑和过滤分别在裂纹的两边(确定内部边界需要进行随后的曲线回归)计算应变数据 ϵ_1 的二阶导数(见附录 A)。

c) 在 6 mm 但至少包含 4 点的范围内确定所有二阶导数(见附录 A)的顶点中最高点(两边较小的局部最大)的位置。如果二阶导数在裂纹的边沿有最高值的话, 裂纹边沿的最大值被定义为一个顶点。

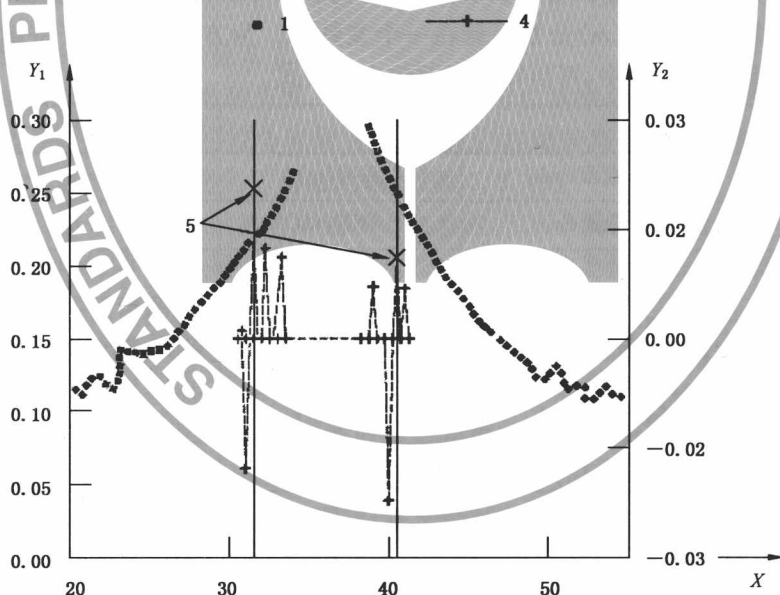
d) 使用范围是 5 点的抛物线拟合重复进行“过滤的”二阶导数的计算(见附录 A)。

e) 下面的检查需要对裂纹位置的两侧单独进行:

检查范围 $R=5$ 点[见 d)]的二阶导数的最大值对应的位置是否距离依据 c) 得到的原始位置在 ± 1 点范围内:

1) 如果是, 则用于后续曲线回归的裂纹两侧的内部边界位置由 c) 确定。图 8 是这种方法的输出结果, 图中显示了主应变的分布, 包括它的二阶导数。

2) 如果否, 则内部边界定为距离裂纹位置 3 mm[见 5.2.3 a)]。这个位置至少要距离裂纹 1 个点远。



X ——弧长, 单位为毫米;

Y_1 ——主真应变 ϵ_1 ;

Y_2 ——主真应变 ϵ_1 对弧长的二阶导数;

1——测量的应变分布;

4——6 倍原始厚度距离位置的二阶导数;

5——二阶导数的最大值, 标识了回归的内部边界。

图 8 分别在裂纹的两边用二阶导数的极大点确定两个内部边界

5.2.4 最佳拟合区域的外部边界确定及“钟形曲线”的最佳拟合反抛物线的计算

- 上面确定的两个位置是两个拟合区域的两个内部边界[5.2.3 c)~e)]。拟合区域的宽度 w 最少包括 5 点,按照附录 B 所述以区域左右两边 ϵ_1 和 ϵ_2 边界值为函数的方式进行确定。通过对规定区域内的应变使用最佳拟合逼近,可以如图 9 和附录 C 中图 C.1 描述的确定极限应变 ϵ_1 和 ϵ_2 。
- 每个“钟形曲线”可以确定一对 (ϵ_1, ϵ_2) 。
- 每个试样可以从不同的横截面上得到所有的应变对 (ϵ_1, ϵ_2) 。举例来说就是,一种几何尺寸,3 个横截面的 3 个试样可以获得 9 对 (ϵ_1, ϵ_2) ;一种几何尺寸,5 个横截面的 3 个试样可以获得 15 对 (ϵ_1, ϵ_2) 。

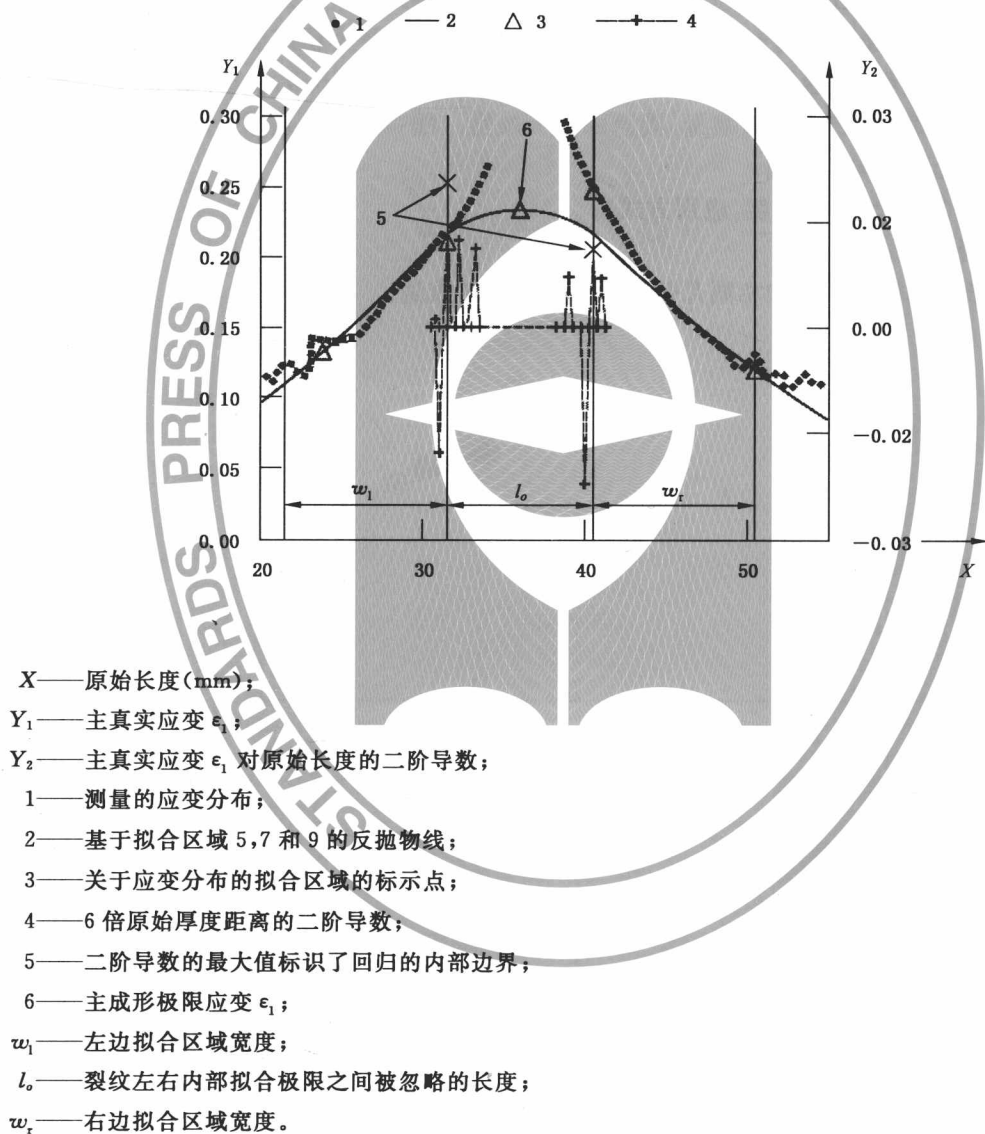


图 9 两个内部边界(图 8)的确定,外部边界(附录 B),
主应变分布的曲线拟合及极限应变的确定

以上是关于 FLC 检测中如何从试样测量的应变到应变 (ϵ_1, ϵ_2) 的计算的描述。附录 E 是一些用于检验基于本部分开发的实验室计算程序有效性的示例。附录 H 提供了一个总结性的分类流程图,可为那些想编写本方法的计算程序的人员提供参考。

6 文档

试样参数和测量得到的应变值 ϵ_1 、 ϵ_2 以数据表和图的方式存档。图中应使用十进制表示刻度(见附录 F)。

图、表中由应变 ϵ_1 、 ϵ_2 计算得到的工程应变也应加上。这些图可以采用百分比尺度。

异于上述的任何参数应记录在文件中。

7 试验报告

试验报告应包括以下信息：

- a) GB/T 24171 的本部分编号；
- b) 检测 FLD 的实验室名称, 操作者姓名；
- c) 采用的成形方法(Nakajima 或 Marciniak)；
- d) 材料标识(如: 名称, 钢卷号)；
- e) 薄板的厚度；
- f) 试样相对于轧制方向的取向；
- g) 使用的网格(如: 大小, 准确度, 应用方式)；
- h) 采用的润滑方式；
- i) 不同几何形状试样的数量和相同几何形状试样的重复数量。