



中华人民共和国国家标准

GB/T 232—2024

代替 GB/T 232—2010

金属材料 弯曲试验方法

Metallic materials—Bend testing method

(ISO 7438:2020, Metallic materials—Bend test, MOD)

2024-03-15 发布

2024-10-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和说明	1
5 原理	2
6 试验设备	2
6.1 一般要求	2
6.2 支辊式弯曲装置	3
6.3 V型模具式弯曲装置	3
6.4 虎钳式弯曲装置	3
6.5 其他弯曲装置	3
7 试样	3
7.1 一般要求	3
7.2 试样的棱边	4
7.3 试样宽度	4
7.4 试样厚度	4
7.5 锻材、铸材和半成品的试样	4
7.6 大厚度和大宽度试样	4
7.7 试样的长度	5
8 试验程序	5
9 试验结果评定	6
10 试验报告	6
附录 A (规范性) 平面应变条件下的弯曲试验	7
A.1 概述	7
A.2 一般要求	8
A.3 试样	8
A.4 结果评定	9
A.5 试验报告	9
附录 B (资料性) 通过测量弯曲压头位移测定弯曲角度的方法	10
参考文献	11

前 言

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

本文件代替 GB/T 232—2010《金属材料 弯曲试验方法》，与 GB/T 232—2010 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了图 3(见图 3,2010 年版的图 3)；
- 增加了试样平面应变条件要求(见 7.3)；
- 更改了锻材、铸材和半成品的试样要求(见 7.5,2010 年版的 6.5)；
- 更改了部分符号和说明，增加了洛德(Lode)角参数 $\bar{\theta}$ 、应力三轴度 η 和支辊半径 R (见表 1,2010 年版的表 1)；
- 增加了描述平面应变条件下的弯曲试验(见附录 A)。

本文件修改采用 ISO 7438:2020《金属材料 弯曲试验》。

本文件与 ISO 7438:2020 相比做了下述结构调整：

- ISO 7438:2020 的 8.3 分为 8.3 和 8.4,ISO 7438:2020 的 8.4 顺延为 8.5；
- 调换了附录 A 和附录 B 的顺序。

本文件与 ISO 7438:2020 的技术差异及其原因如下：

- 增加了可使用符合弯曲试验原理的其他弯曲装置(见 6.5),保留了翻板式弯曲装置等,以符合我国国情；
- 增加了规范性引用文件 GB/T 2975(见 7.1),确保标准的可操作性；
- 将“内侧半径”更改为“压头直径”(见 9.2),更具可操作性；
- 将“ η 的平方根”更改为“ η 值”(见 A.2),保持与前一句内容一致。

本文件做了下列编辑性改动：

- 将标准名称修改为《金属材料 弯曲试验方法》；
- 增加了图 5 的提及[见 8.2 a)]。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：首钢集团有限公司、浙江金洲管道工业有限公司、日照市质量检验检测研究院[国家碳素结构钢产品质量检验检测中心(山东)]、铜陵市富鑫钢铁有限公司、湖南华菱湘潭钢铁有限公司、江苏澄信检验检测认证股份有限公司、宁夏建龙特钢有限公司、内蒙古包钢钢联股份有限公司、建龙西林钢铁有限公司、山东鑫大地控股集团有限公司、浙江省特种设备科学研究院、深圳三思纵横科技股份有限公司、吉林建龙钢铁有限责任公司、山东省特种设备检验研究院集团有限公司、冶金工业信息标准研究院、武汉泛洲中越合金有限公司。

本文件主要起草人：邱宇、杨伟芳、鹿宪宝、丁刚、邝永海、邹凡球、甘美露、汪世峰、马越、徐维利、付崇建、程东岳、刘杰、赵俊卿、姚小静、董莉、姚联、张清水、倪国良、崔磊、侯慧宁、张兴、苏赞、王书强、王彬、王尚坤、孙大勇、刘仲强、张海华、王春茂、李秋寒、张琦、牟雪萍、张强、周志超、吴朝晖、王伟。

本文件于 1963 年首次发布,1982 年第一次修订,1988 年第二次修订,1999 年第三次修订,2010 年第四次修订,本次为第五次修订。

金属材料 弯曲试验方法

1 范围

本文件描述了测定金属材料承受弯曲塑性变形能力的试验方法。

本文件适用于金属材料相关产品标准规定的试样的弯曲试验,不适用于金属管材全截面和金属焊接接头的弯曲试验,金属管材和金属焊接接头的弯曲试验由其他标准规定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件。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 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备(GB/T 2975—2018, ISO 377: 2017, MOD)

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 符号和说明

本文件使用的符号和说明见表1。

表1 符号和说明

符号	说明	单位
a	试样厚度或直径(或多边形横截面内切圆直径)	mm
b	试样宽度	mm
c	试验前支辊中心轴所在水平面与弯曲压头中心轴所在水平面之间的间距	mm
D	弯曲压头直径	mm
f	弯曲压头位移	mm
η	应力三轴度	—
L	试样长度	mm
l	支辊间距离	mm
p	支辊中心轴所在垂直面与弯曲压头中心轴所在垂直面之间的间距	mm
R	支辊半径	mm
r	试样弯曲后的弯曲半径	mm
$\bar{\theta}$	洛德角参数,例如应变路径方向	—
α	弯曲角度	°

5 原理

弯曲试验是以圆形、方形、矩形或多边形横截面试样在弯曲装置上经受弯曲塑性变形,不改变加力方向,直至达到规定的弯曲角度。

弯曲试验时,试样两臂的轴线保持在垂直于弯曲轴的平面内。在弯曲 180° 的弯曲试验中,按照相关产品标准的要求,可将试样弯曲至两臂直接接触或相互平行且相距规定距离,可使用垫块控制规定距离。

6 试验设备

6.1 一般要求

弯曲试验应在配备下列弯曲装置之一的试验机或压力机上完成:

- a) 配有两个支辊和一个弯曲压头的支辊式弯曲装置,见图 1;
- b) 配有一个 V 型模具和一个弯曲压头的 V 型模具式弯曲装置,见图 2;
- c) 虎钳式弯曲装置,见图 3。

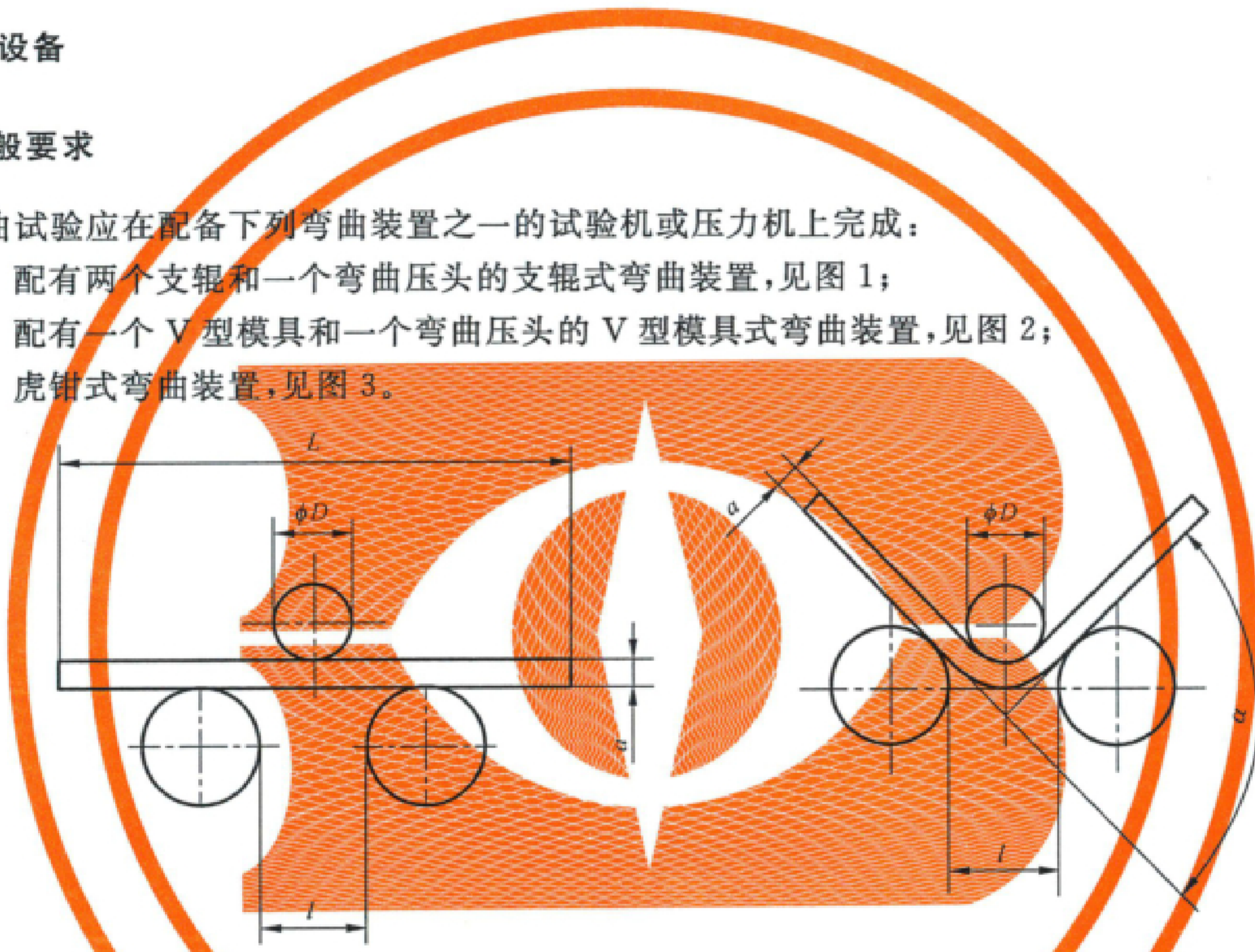


图 1 配有两个支辊和一个弯曲压头的支辊式弯曲装置

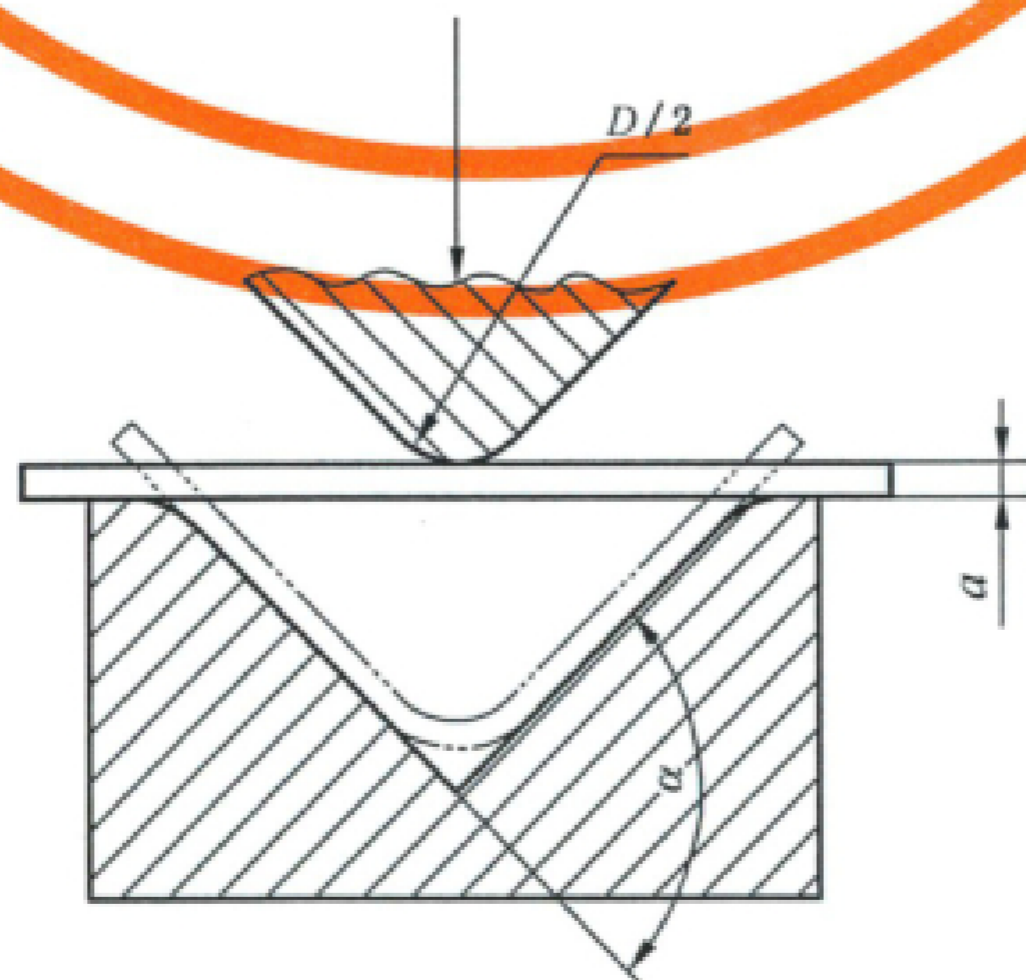
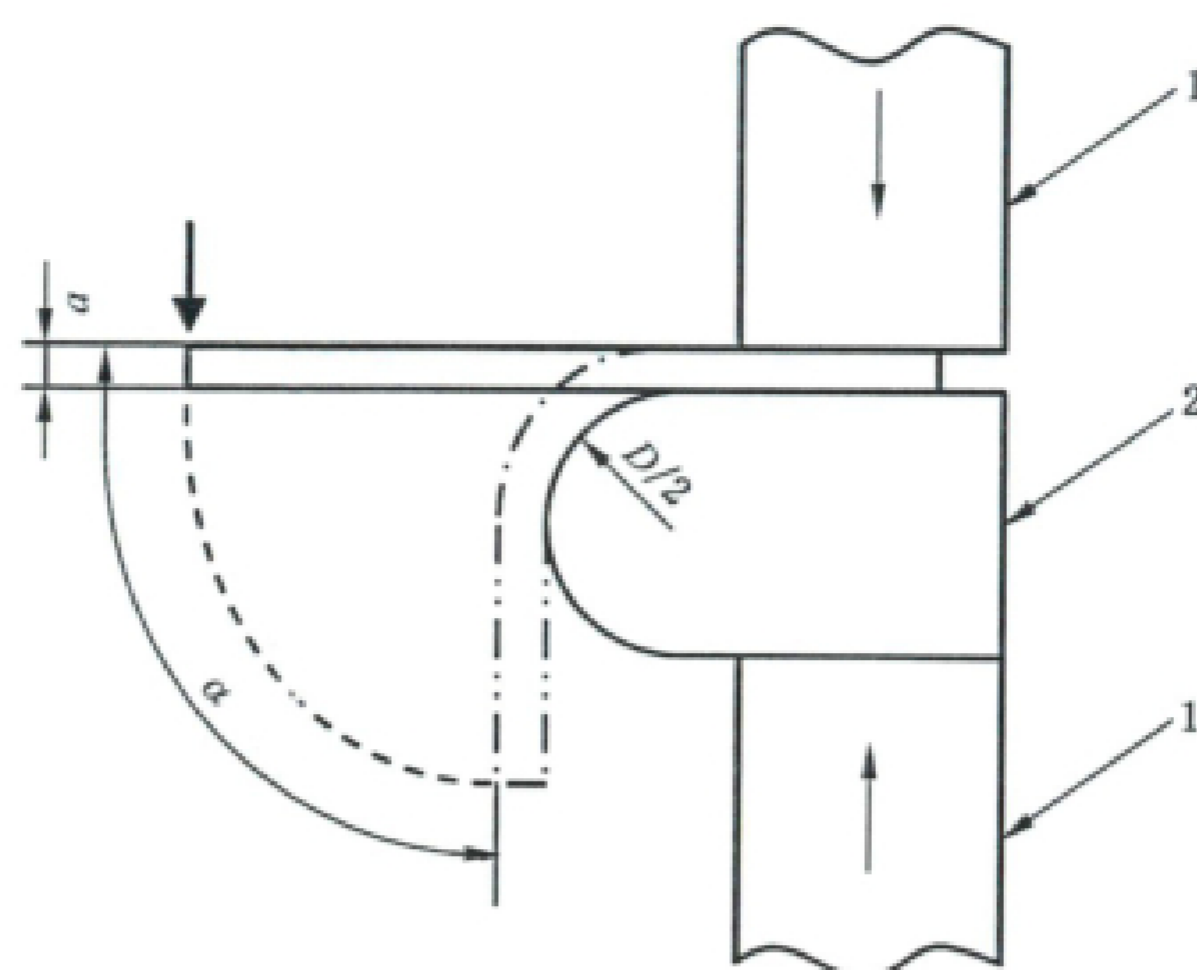


图 2 配有一个 V 型模具和一个弯曲压头的 V 型模具式弯曲装置



标引序号说明：

1——虎钳；

2——弯曲压头。

图3 虎钳式弯曲装置

6.2 支辊式弯曲装置

6.2.1 支辊长度和弯曲压头的宽度应大于试样宽度或直径(见图1)。弯曲压头的直径由产品标准规定。支辊和弯曲压头应具有足够的硬度。

6.2.2 除非另有规定,支辊间距离 l 应按照公式(1)确定。此距离在试验期间应保持不变。

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

注：若规定支辊间距离 l 不大于 $D + 2a$,在试验中会导致试样被夹紧,发生拉弯变形。

6.3 V型模具式弯曲装置

模具的V形槽的角度应为 $180^\circ - \alpha$ (见图2),弯曲角度 α 应在相关产品标准中规定。

模具的支承棱边应倒圆,倒圆半径应为1倍~10倍试样厚度。模具和弯曲压头宽度应大于试样宽度或直径并应具有足够的硬度。

6.4 虎钳式弯曲装置

装置由虎钳及具有足够硬度的弯曲压头组成(见图3),可配置加力杠杆。

由于虎钳左端面的位置会影响测试结果,因此虎钳的左端面(见图3)不能达到或者超过弯曲压头中心垂线。

6.5 其他弯曲装置

符合弯曲试验原理的其他弯曲装置(例如翻板式弯曲装置等)亦可使用。

7 试样

7.1 一般要求

试验应使用圆形、方形、矩形或多边形横截面的试样,试样表面不应有影响试验结果的划痕或损伤。

样坯的切取位置和方向应符合相关产品标准的规定。如未具体规定,对于钢产品,应按照 GB/T 2975 的要求。试样应去除由于剪切、火焰切割或类似的操作而影响材料性能的部分。如果试验结果不受影响,试样受影响的部分可不去除。

7.2 试样的棱边

矩形和多边形横截面试样的棱边应倒圆,倒圆半径不应超过以下数值:

- 1 mm,当试样厚度小于 10 mm 时;
- 1.5 mm,当试样厚度大于或等于 10 mm 且小于 50 mm 时;
- 3 mm,当试样厚度大于或等于 50 mm 时。

棱边倒圆时不应形成影响试验结果的横向毛刺、伤痕或刻痕。如试验结果不受影响,试样的棱边可不倒圆。

7.3 试样宽度

试样宽度应符合相关产品标准的规定,如未具体规定,应按照以下要求:

- a) 当产品宽度不大于 20 mm 时,试样宽度为产品宽度;
- b) 当产品宽度大于 20 mm 时:
 - 1) 当产品厚度小于 3 mm 时,试样宽度为 (20 ± 5) mm;
 - 2) 当产品厚度大于或等于 3 mm 时,试样宽度在 20 mm 和 50 mm 之间。

如相关方同意厚度大于 3 mm 的试样保持平面应变条件(附录 A 对平面应变进行了解释),弯曲试验应按照附录 A 执行。

7.4 试样厚度

7.4.1 对于板材、带材和型材,试样厚度应为产品厚度。如果产品厚度大于 25 mm,试样厚度可机加工减薄至不小于 25 mm,并保留一侧原表面。弯曲试验时,试样未经机加工的表面应置于受拉变形面。

7.4.2 直径(圆形横截面)或内切圆直径(多边形横截面)不大于 30 mm 的产品,其试样横截面应为产品的横截面。对于直径或多边形横截面内切圆直径大于 30 mm 但不大于 50 mm 的产品,可将其机加工成横截面内切圆直径不小于 25 mm 的试样。直径或多边形横截面内切圆直径大于 50 mm 的产品,应将其机加工成横截面内切圆直径不小于 25 mm 的试样(见图 4)。弯曲试验时,试样未经机加工的表面应置于受拉变形面。

单位为毫米

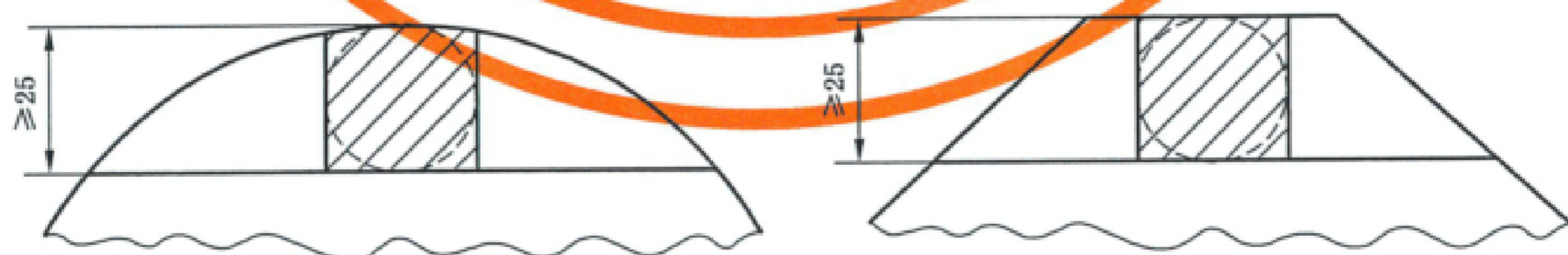


图 4 圆形横截面试样的直径和多边形横截面试样的内切圆直径

7.5 锻材、铸材和半成品的试样

对于锻材、铸材和半成品,其试样的尺寸和取样方法应在交货要求或协议中规定。

7.6 大厚度和大宽度试样

经协议,可使用大于 7.3 规定宽度和 7.4 规定厚度的试样进行弯曲试验。

7.7 试样的长度

试样长度应根据试样厚度(或直径)和所使用的试验设备确定。

8 试验程序

警告: 试验过程中应采取足够的安全措施和防护装置。

8.1 试验一般在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的室温范围内进行。对温度要求严格的试验,试验温度应为 $(23\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

8.2 按照相关产品标准规定,应采用下列方法之一完成试验:

- a) 试样在给定的条件和力作用下弯曲至规定的弯曲角度(见图 1、图 2、图 3 和图 5);
- b) 试样在力作用下弯曲至两臂相距规定距离且相互平行(见图 6);
- c) 试样在力作用下弯曲至两臂直接接触(见图 7)。

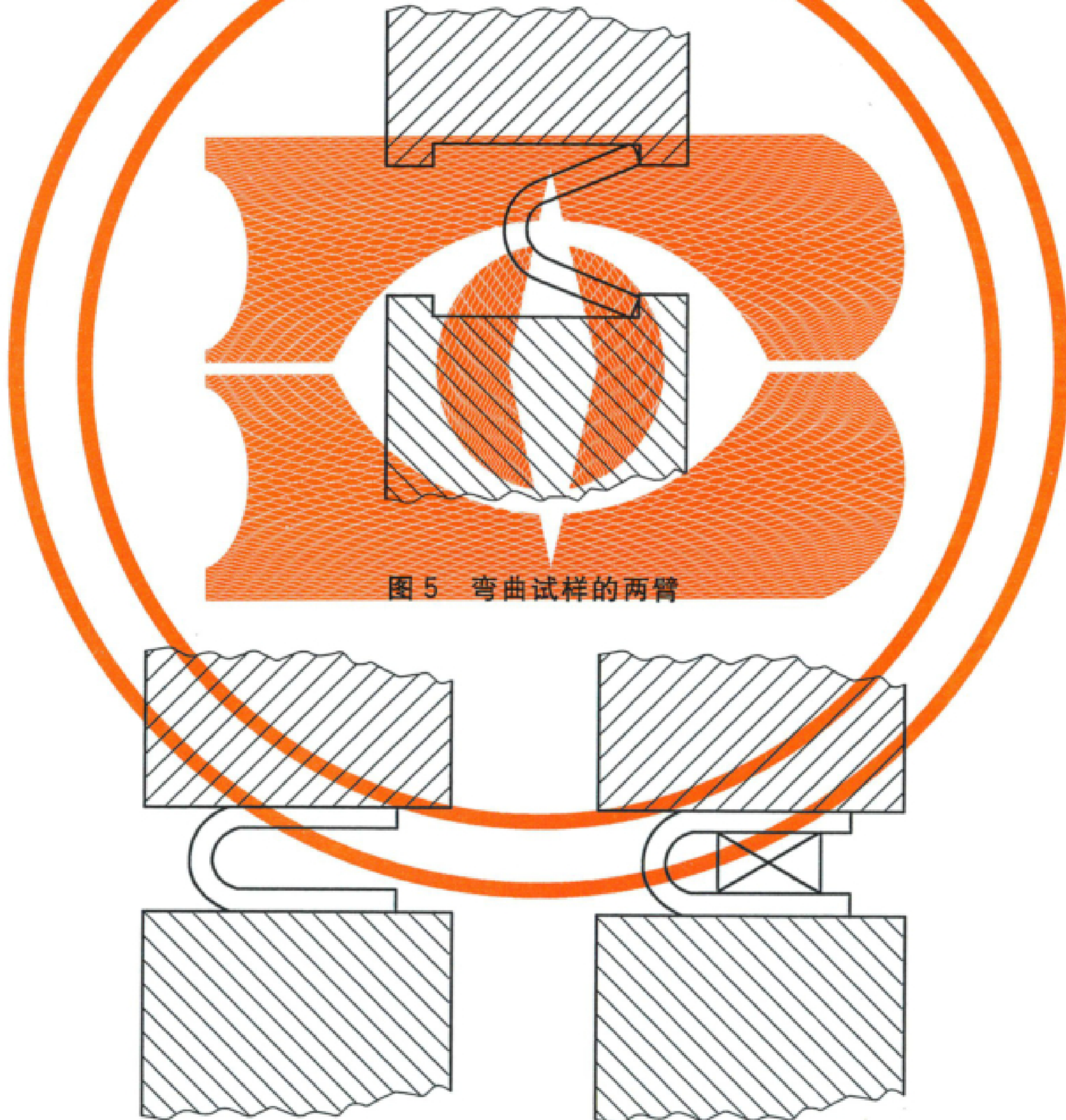


图 5 弯曲试样的两臂

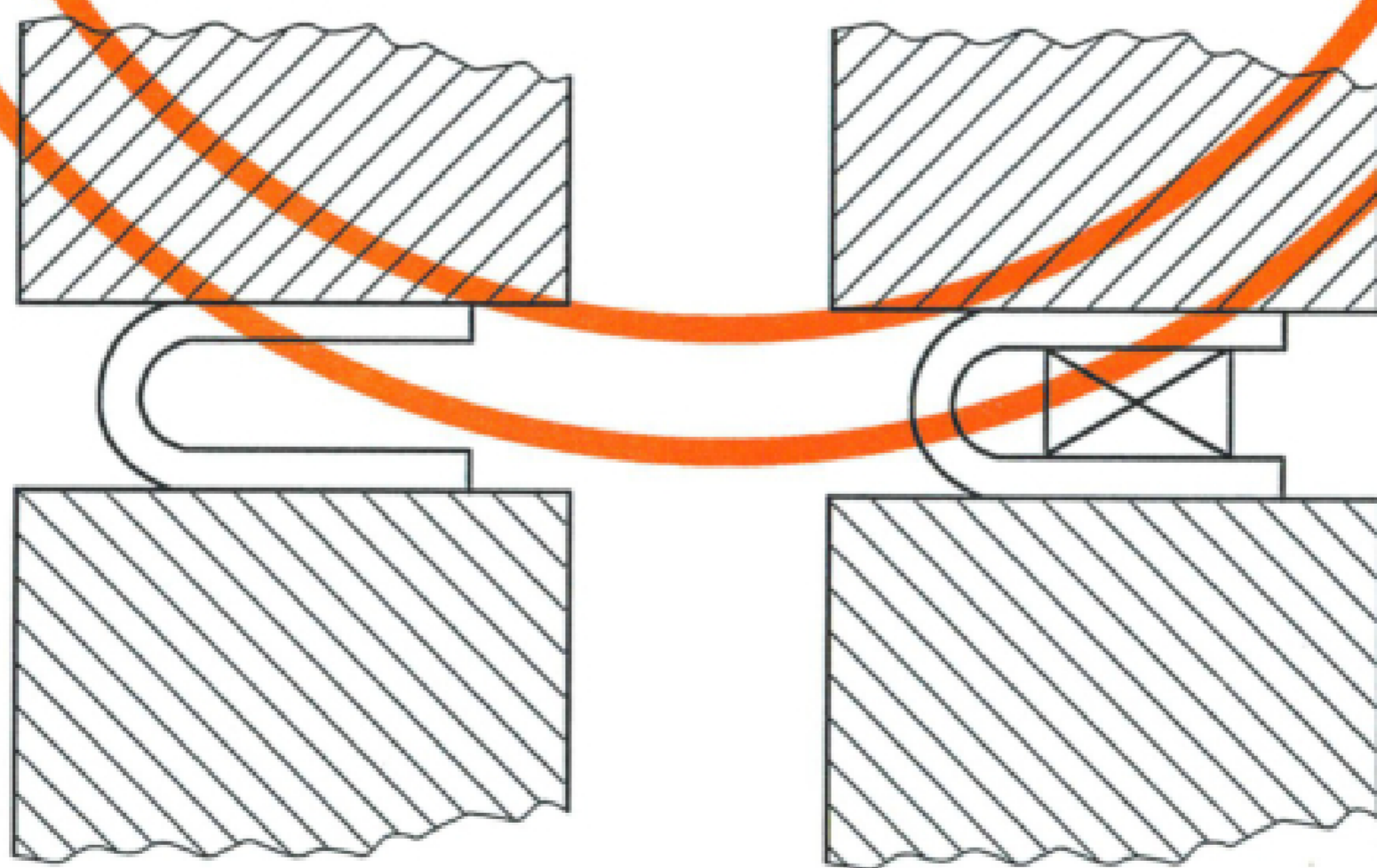


图 6 试样的两臂相互平行

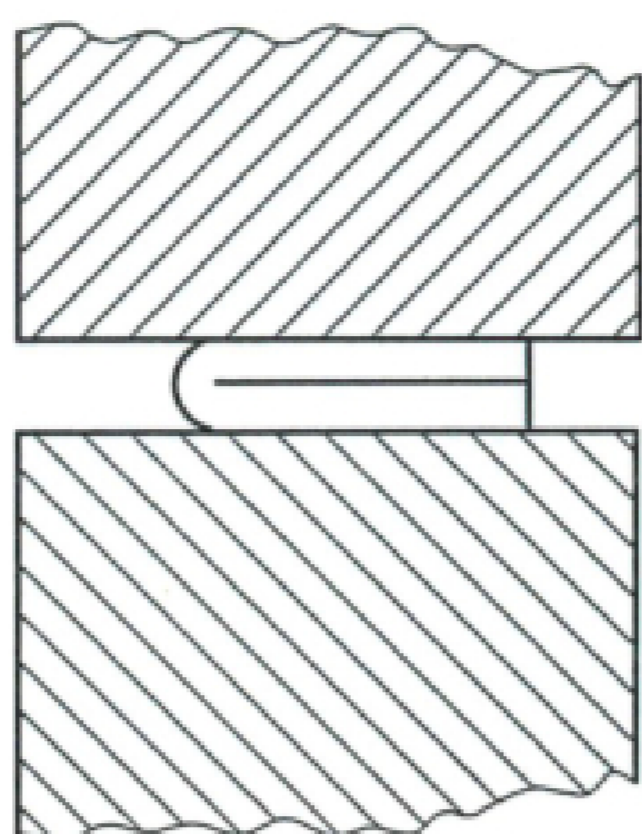


图7 试样的两臂相互接触

8.3 试样弯曲至规定弯曲角度的试验。应将试样放于两支辊(见图1)或V型模具(见图2)上,试样轴线应与弯曲压头轴线垂直,弯曲压头在两支辊之间的中点处对试样连续施加力使其弯曲,直至达到规定的弯曲角度。弯曲角度 α 可以通过测量弯曲压头的位移计算得出,见附录B。

弯曲试验可采用图3所示的方法进行。试样一端固定,绕弯曲压头进行弯曲,可绕过弯曲压头,直至达到规定的弯曲角度(详见6.4)。

对于三种方法(见图1、图2和图3),应缓慢施加弯曲力,以使材料能够自由地进行塑性变形。

当出现争议时,弯曲压头的位移速率应为 (1.0 ± 0.2) mm/s。

使用上述方法如不能直接达到规定的弯曲角度,应直接施力压试样两端使其进一步弯曲,直至达到规定的弯曲角度(见图5)。

8.4 试样弯曲至两臂相互平行的试验。首先对试样进行弯曲(见图5),然后将试样置于两平行压板之间,连续施加力压其两端使之进一步弯曲,直至两臂平行(见图6)。试验时可加或不加垫块。垫块厚度应按相关标准或协议规定。

8.5 试样弯曲至两臂直接接触的试验,首先对试样进行预弯曲,然后将试样置于两平行压板之间,对试样两端连续施加压力进行进一步弯曲,直至两臂直接接触(见图7)。

9 试验结果评定

9.1 应按照相关产品标准的要求评定弯曲试验结果。产品标准未规定时,不使用放大辅助设备观察弯曲后的试样,弯曲外表面无目视可见裂纹应评定为合格。

9.2 如相关产品标准规定弯曲角度,该值为试验最小值;如规定压头直径,该值为试验最大值。

注:弯曲试样受拉应力一侧的未加工表面存在氧化层,会影响对试验结果的评定。这一般由产品标准或相关方进行规定。

10 试验报告

试验报告至少应包括下列内容:

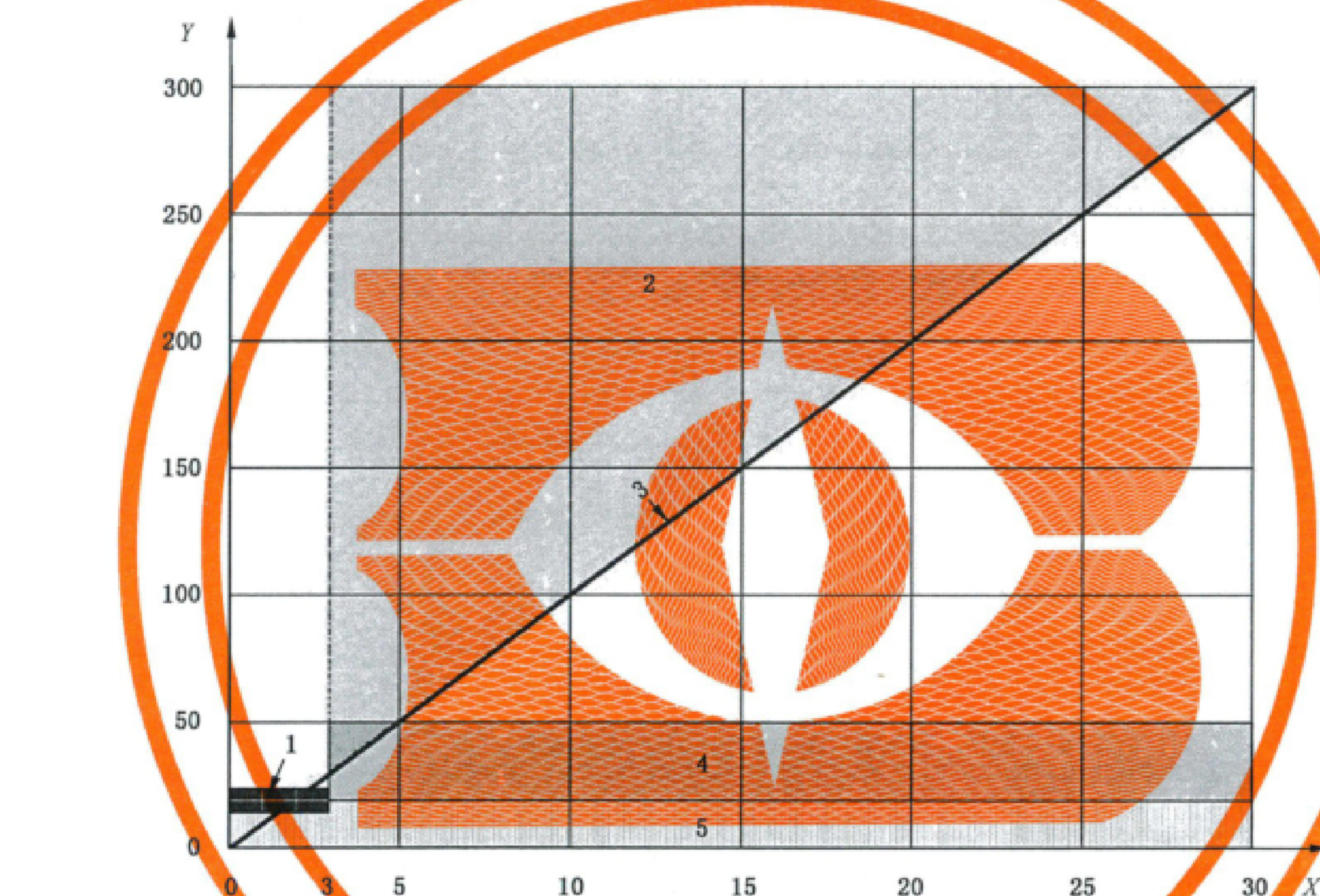
- a) 本文件编号;
- b) 试样标识(材料牌号、炉号、取样方向等);
- c) 试样的形状和尺寸;
- d) 试验条件(弯曲压头直径、弯曲角度);
- e) 与本文件的偏离;
- f) 试验结果。

附 录 A
(规范性)
平面应变条件下的弯曲试验

A.1 概述

试样宽度的选取可参考 7.3a) 和 7.3b) 中厚度和宽度的不同组合, 以及图 A.1 所示的平面应变条件。图 A.1 中的加粗黑线是平面应变和非平面应变条件的分界线。

单位为毫米



标引序号说明:

- X —— 厚度 a , 单位为毫米(mm);
- Y —— 宽度 b , 单位为毫米(mm);
- 1 —— $b = 20 \pm 5$, 当 $a < 3$ [见 7.3 b) 1)];
- 2 —— $b \geq 10 \times a$, 当 $a > 3$;
- 3 —— 平面应变条件 $b \geq 10 \times a$;
- 4 —— $20 < b < 50$, 当 $a \geq 3$ [见 7.3 b) 2)];
- 5 —— $b \leq 20$ [见 7.3 a)].

图 A.1 7.3 中的试样在平面应变条件下的宽度和厚度组合

适用于所有应用和产品尺寸的弯曲试验可测定在极端状态下的产品弯曲性能。试样在呈现平面应变状态时, 会形成弯曲的极端状态。当宽度厚度比 (b/a) 不小于 10 时, 试样会呈现出平面应变状态。但是如果试样的宽度太小, 这个临界状态(平面应变)不会形成^[1-5]。

本附录给出的规定仍会导致以下影响:

- 与 7.3 规定宽度的试样相比, 有效的弯曲角度 α 减小;
- 试样可能会不合格;
- 加载试验力会增加;

- 试样重量会增加；
- 可能不会满足产品标准中的弯曲性能要求。

对于一些应用,按照本附录测定的结果会更贴合实际。

由于大多数圆形或正六边形截面(棒)的试样不会形成临界状态(平面应变),因此不涉及本附录内容。

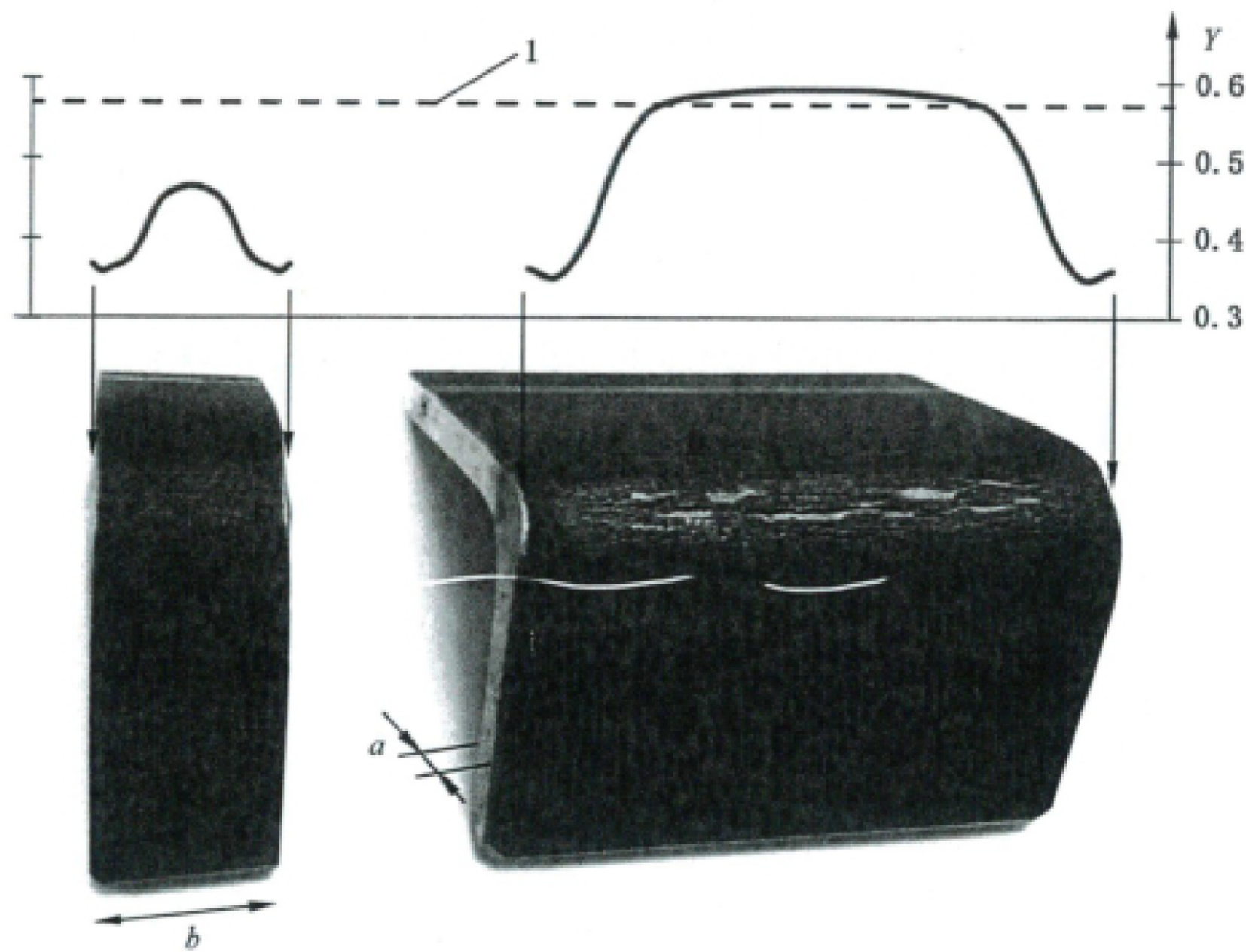
A.2 一般要求

薄板或薄带(矩形试样)的弯曲性能很大程度上取决于试样的宽度。不同的试样宽度会呈现出不同的应变状态。宽度过小的试样可提高弯曲试验结果判定为合格的可能性,见图 A.2。采用相同的弯曲压头进行试验,由于试样宽度不同,结果相差很大。左侧试样的宽度厚度比(b/a)是 4,没有达到平面应变(拉伸)^[6]所要求的应力三轴度临界条件($\eta[\bar{\theta}=0]=+1/\sqrt{3}\approx 0.58$)。应力三轴度临界条件值可根据应力三轴度 η 和洛德角参数 $\bar{\theta}$ ^[7-9] 的关系[见公式(A.1)]获得,令 $\theta=0$ (代表平面应变路径),计算 η 值。

$$\cos\left[\frac{\pi}{2}(1-\bar{\theta})\right] = -\frac{27}{2}\eta\left(\eta^2 - \frac{1}{3}\right) \dots\dots\dots (A.1)$$

图 A.2 显示了应力三轴度的估计值(采用有限元模拟),证实了造成评定不合格的区域和达到高于平面应变临界条件的应力三轴度具有良好的相关性。

注:虽然洛德角参数和应力三轴度在平面应变条件的力学背景资料中有所涉及,但是它们并不会在试验中被直接使用。A.3 中的规定可以满足平面应变条件。



- 标引序号说明:
- Y —— 应力三轴度 η ;
 - 1 —— 平面应变状态时的 η 值($\eta=0.58$)。

图 A.2 取决于试样宽度(b)的弯曲性能的差异性

A.3 试样

为了满足平面应变条件,应使用宽度厚度比(b/a)大于或等于 10 的试样。7.3 中的一些薄板试样已经满足了这个要求,见图 A.1。

A.4 结果评定

对于矩形试样,由于棱边加工不良萌生裂纹,这些棱边裂纹不是 9.1 中规定的弯曲试验试样不合格的依据,9.1 的试验评定不应包含长度不超过两倍试样厚度棱边处萌生的裂纹。如棱边处萌生的裂纹长度超过两倍的试样厚度,试样应评定为不合格。

注:对于宽度厚度比(b/a)为 10 的试样,平面应变区域位于宽度方向上占试样总宽度 60% 的中心区域。试样棱边萌生的裂纹未扩展到平面应变区域,试验结果评定不需要考虑这些裂纹,如采用平面应变弯曲试验方法,试验结果评定只需要考虑平面应变区域的裂纹。

A.5 试验报告

除第 10 章中 a)~f) 的要求以外,报告还应包含试样所使用的尺寸,以及注明参考本附录。

示例: GB/T 232—2024,附录 A。

附录 B
(资料性)

通过测量弯曲压头位移测定弯曲角度的方法

本附录描述了试样在压力作用下弯曲角度 α 的测定方法。由于直接测量弯曲角度 α 比较困难,因此,宜使用通过测量弯曲压头位移 f 计算弯曲角度 α 的方法。试样在力的作用下弯曲角度 α 由弯曲压头的位移来测定,其计算值见图 B.1,计算方法见公式(B.1)~公式(B.4):

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{p \times c + W \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \dots\dots\dots(B.1)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{W \times p - c \times (f - c)}{p^2 + (f - c)^2} \dots\dots\dots(B.2)$$

其中

$$W = \sqrt{p^2 + (f - c)^2 - c^2} \dots\dots\dots(B.3)$$

$$c = R + a + \frac{D}{2} \dots\dots\dots(B.4)$$

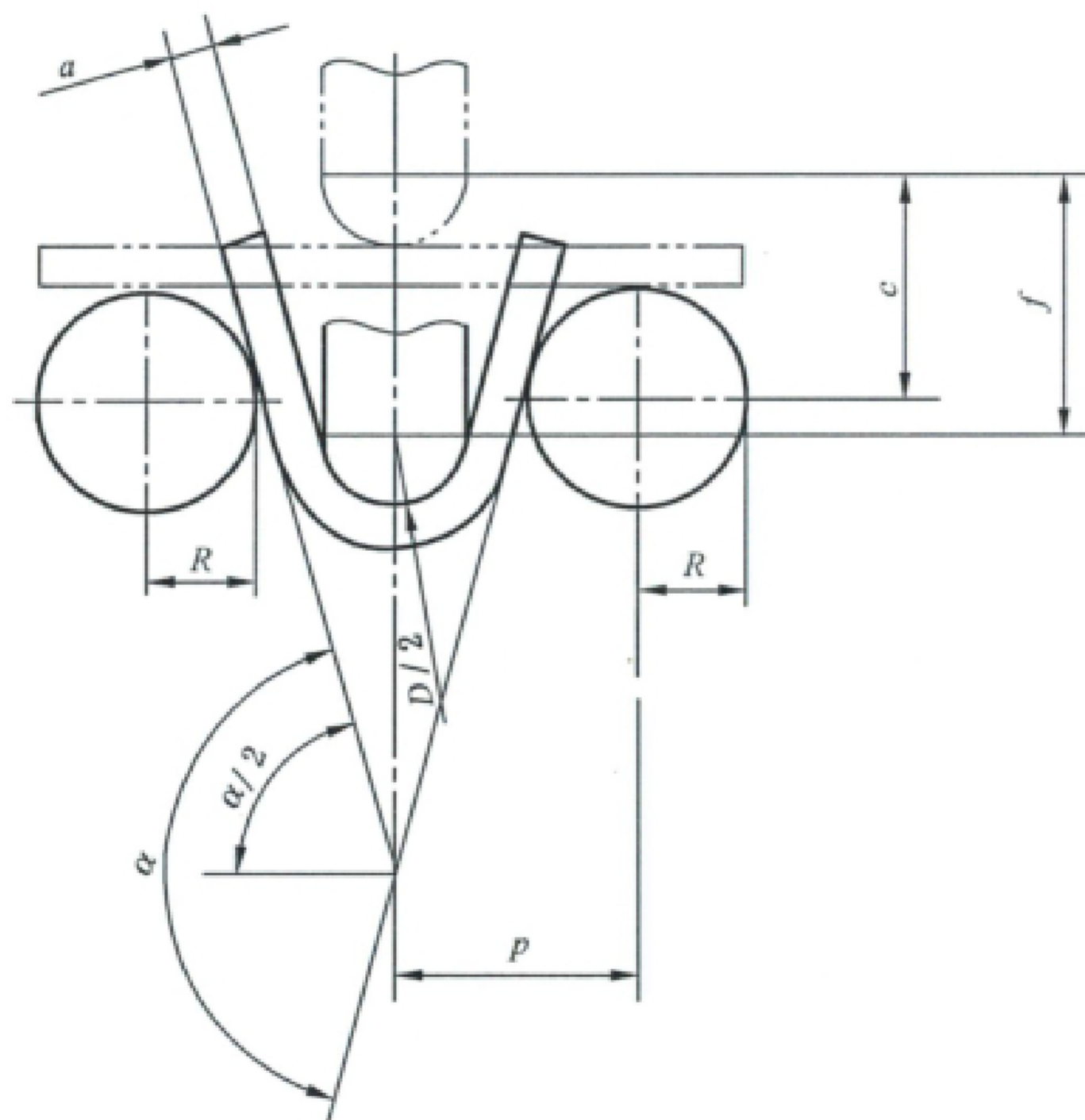


图 B.1 弯曲角度 α 的计算值

参 考 文 献

- [1] Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Clarendon Press, Oxford, (1950)
- [2] Crafoord R., Plastic sheet bending, Ph. D. Thesis, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, (1970)
- [3] Duncan J. L. The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold Ltd., London, (1992)
- [4] Chan W.M., Chew H.P., Lee B.T., Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes, Int. Journal of Materials Processing Technology, 148, 15-24, (2004)
- [5] Cheong K. et al., Evaluation of the VDA 238-100 Tight Radius Bending Test using Digital Image Correlation Strain Measurement, Int. Journal of Physics, Conf. Ser. 896 012075, (2017)
- [6] Li Y., Wierzbicki T., Prediction of plane strain fracture of AHSS sheets with post-initiation softening, Int. Journal of Solids and Structures 47, 2316-2327, (2010)
- [7] Bai Y., Wierzbicki T., A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence, Int. Journal of Plasticity 24, 1071 - 1096, (2008)
- [8] Wierzbicki T., Xue L. On the Effect of the Third Invariant of the Stress Deviator on Ductile Fracture. Technical Report, Impact and Crashworthiness Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. (2005)
- [9] Bai Y., Wierzbicki T., Application of extended Mohr-Coulomb criterion on ductile fracture, Int. Journal of Fracture 161, 1-20 (2010)
-