



中华人民共和国国家标准

GB/T 38684—2020

金属材料 薄板和薄带 双轴应力-应变 曲线胀形试验 光学测量方法

**Metallic materials—Sheet and strip—Biaxial stress-strain curve by
means of bulge test—Optical measuring systems**

(ISO 16808:2014, Metallic materials—Sheet and strip—Determination of
biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring
systems, MOD)

2020-03-31 发布

2020-10-01 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 符号和说明 1

3 原理 2

4 试验设备 2

5 光学测量系统 5

6 试样 5

7 试验程序 6

8 顶点曲率变形和应变的评价方法 6

9 双轴应力-应变曲线的计算 7

10 试验报告..... 8

附录 A (规范性附录) 光学测量系统的验证程序 9

附录 B (资料性附录) 基于响应面的曲率计算 12

附录 C (资料性附录) 屈服和加工硬化曲线等轴应力点的确定 13

参考文献 19

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用 ISO 16808:2014《金属材料 薄板和薄带 光学测量系统测定胀形试验双轴应力-应变曲线的方法》。

本标准与 ISO 16808:2014 相比,在结构上的调整是:删除了附录 A,将后续附录重新排序。

本标准与 ISO 16808:2014 相比存在技术差异,这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示,本标准与 ISO 16808:2014 的技术差异及其原因如下:

- 将第 5 章中的注改为正文,以引出规范性附录 A(见第 5 章);
- 增加了激光刻蚀的制样方法,并增加相应的注,以丰富网格类试样的加工方式,并提高散斑类试样的试验成功率(见 6.2.2);
- 删除了“这个时间范围能达到试验过程较缓慢,应变速率可被接受且时间成本较为经济的目的”(见 ISO 16808:2014 的 7.4);
- 将原理有关定义坐标轴的描述移至 7.6,便于标准使用者理解(见 7.6,ISO 16808:2014 的第 3 章);
- 增加了“附录 B 中给出了一个计算曲率和应变的替代方案”,以引出附录 B(见 8.5);
- 删除了试验报告中的实验室名称(见 ISO 16808:2014 的第 10 章)。

本标准做了下列编辑性修改:

- 在附录 A 中增加了在玻璃下进行标定的注释,提高标定成功率及光学测量系统精度(见附录 A,ISO 16808:2014 的附录 B);
- 修改了 B.1,将 $r_{1-100} \geq 10 \text{ mm}$ 改为 $r_{1-100} \leq 10 \text{ mm}$,修正国际标准编辑性错误(见附录 B,ISO 16808:2014 的附录 C);
- 在表 C.1 中增加 M 标注,便于读者理解及使用。

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:宝山钢铁股份有限公司、道姆光学科技(上海)有限公司、大连理工大学、深圳万测试验设备有限公司、冶金工业信息标准研究院。

本标准主要起草人:张建伟、杨新、董莉、方健、何祝斌、侯慧宁、黄星。

金属材料 薄板和薄带 双轴应力-应变 曲线胀形试验 光学测量方法

1 范围

本标准规定了金属材料薄板和薄带的双轴应力-应变曲线胀形试验光学测量方法的符号和说明、原理、试验设备、光学测量系统、试样、试验程序、顶点曲率变形和应变的评价方法、双轴应力-应变曲线的计算及试验报告。

本标准适用于厚度小于 3 mm 的金属薄板和薄带,在纯胀形过程中测定其双轴应力-应变曲线。

注:本标准中的术语“双轴应力-应变曲线”是简称。试验所测定的是“双轴真应力-真应变曲线”。

2 符号和说明

本标准使用的符号和说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	说明	单位
d_{dc}	凹模直径(内径)	mm
d_{BH}	压边圈直径(内径)	mm
R_1	凹模圆角半径(内部)	mm
h	拉深试样高度(外表面)	mm
t_0	试样初始厚度(未加工)	mm
t	试样真实厚度	mm
p	腔体压力	MPa
rms	标准偏差(均方根)	—
ρ	曲率半径	mm
r_1	确定曲率的曲面半径	mm
r_2	确定应变的曲面半径	mm
$r_{1,100}$	用 100 mm 凹模确定的曲面半径	mm
a_i, b_i	响应面系数	—
σ_B	双轴应力	MPa
e	工程应变	—
ϵ_1	真主应变	—
ϵ_2	真次应变	—

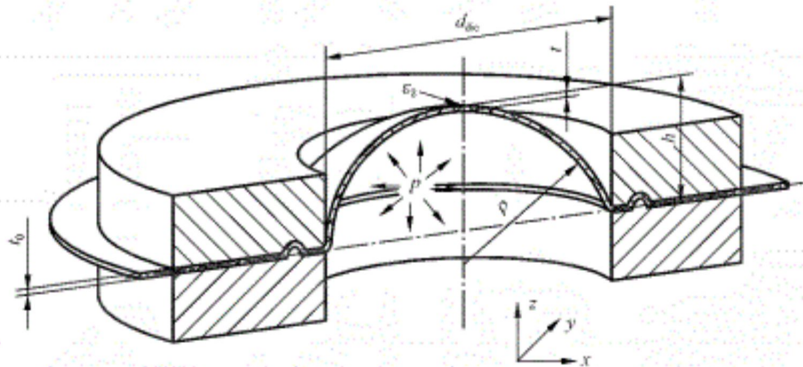
表 1 (续)

符号	说明	单位
ϵ_z	厚度真应变	—
ϵ_E	等效真应变	—
l_s	截面的坐标和长度	mm
dz	z 方向的位移	mm
dz_{mv}	移动校正后的位移	mm

3 原理

使用凹模和压边圈将圆形试样边部完全夹紧。在试样上施加流体压力，直至胀形出现破裂(图 1)。在试验过程中，测量流体的压力，并由光学测量系统^{[1]~[3]}记录试样的变形演化。根据获得的变形数据，可以获得试样中心附近的物理量：局部曲率、表面真应变以及试样的实际厚度(假设无压缩变形)。此外，通过假设试样中心部位为一个薄壁球形压力容器的应力状态，可以通过流体压力、试样厚度以及曲率半径得到试样所受的真应力。

注：除了参考文献[1]中提到及描述的使用光学测量系统的胀形试验之外，还有参考文献[4]~[6]中提及的激光系统，以及参考文献[7]~[9]中提及的触觉系统，对胀形试验同样适用，但本标准中未包含这些方法。



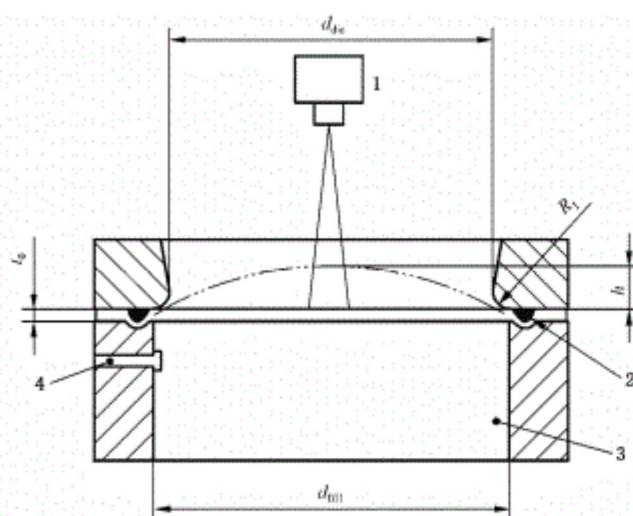
说明：

- t_0 —— 试样初始厚度(未加工)；
- p —— 腔体压力；
- d_{dc} —— 凹模直径(内径)；
- ρ —— 曲率半径；
- ϵ_z —— 厚度真应变；
- t —— 试样真实厚度；
- h —— 拉深试样高度(外表面)。

图 1 胀形试验原理

4 试验设备

4.1 胀形试验应在一台配备凹模、压边圈以及液体腔的设备上进行。推荐的设备如图 2 所示。



说明:

- 1——应变测量系统;
- 2——压边圈;
- 3——液体腔;
- 4——压力测量系统。

图2 推荐的试验设备(原理图)

4.2 试验设备的布局应能保证在试验过程中连续测量试样外表面的变形,能够通过记录胀形试样表面一个网格点 XYZ 坐标的变化来确定其几何变形,从而计算试样胀形中心区域的形状变化和真应变曲线。

4.3 试验过程中,系统应能通过光学系统测定胀形试样表面网格点 XYZ 坐标(非接触式),通过这些坐标,计算所选区域每个网格点的真应变 ϵ_1 和 ϵ_2 ,厚度方向应变 ϵ_3 ,以及胀形试样圆顶的曲率半径 ρ 。

4.4 系统宜配有流体压力测量系统,也可采用间接测量系统。从系统最大量程 20%起,测量系统的精度宜满足 1 级。

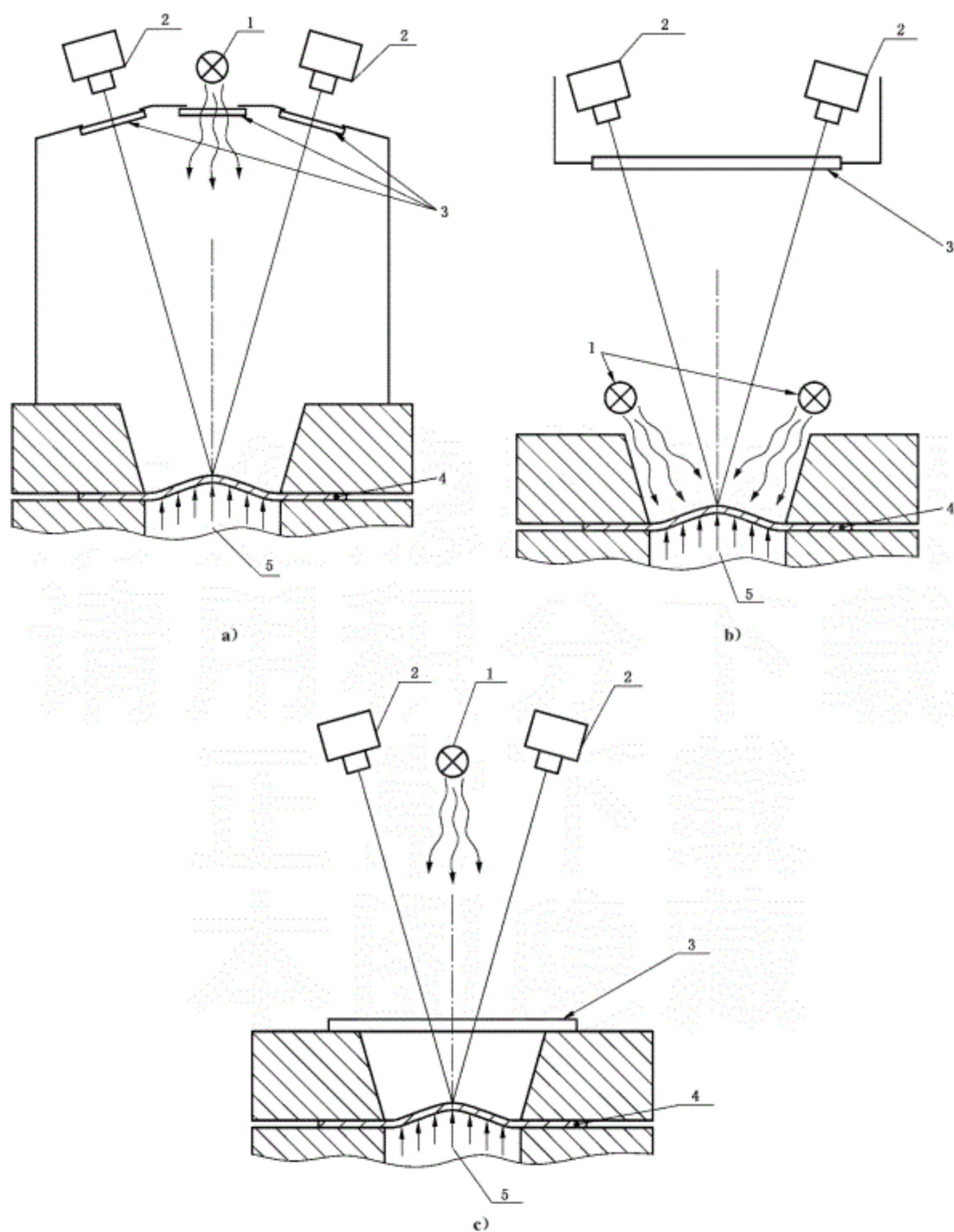
4.5 凹模、压边圈和液体腔均应有足够的刚度,从而保证试验过程中这些部位的变形最小。压边力应足够高从而保证压边圈的密闭性。试样在压边圈和凹模之间不应发生移动。通常在试验过程中,胀形压力会减弱压边力,在确定试验所需压边力时,应考虑这种作用对压边力的影响。

4.6 加压用流体介质应与试样表面充分接触(无气泡),杜绝因压缩空气泡所导致的储能作用在能量释放或破裂瞬间造成高能释压或油溅情况的发生。试验过程中,直至试样破裂前,流体不应通过压边圈、凹模或者板材以及其他任何地方泄漏。

4.7 推荐使用压延筋(或在圆形表面形状类似的装置)来阻止材料流动。压延筋的使用不应使材料产生裂纹。压延筋的位置可位于凹模和压边圈之间。压延筋的尺寸宜避免在试验过程中阻止材料流动,造成材料过度弯曲和起皱。

4.8 推荐在镜头和照明设备前放置玻璃板,确保在试样破裂时,飞溅的试验用油不会影响到光学测量系统。玻璃板可固定在压边圈上(厚玻璃)或者放置于镜头和照明系统前(薄玻璃),如图 3 所示。这种插入式的保护装置不应影响光学测量系统的测量质量。每次试验之后,玻璃板应擦拭干净,避免损坏或刮伤,并且精确地放回原位从而不需要重新校准测量系统。为在试验中获得较好的测量质量,光学系统的校准可在保护装置启用的状态下进行。

4.9 推荐的最小凹模直径与试样初始厚度的比 d_{die}/t_0 宜不小于 33(如图 2 所示)。凹模圆角半径不宜使试样在试验过程中产生裂纹,其推荐尺寸为 $(5 \times t_0) \sim (15 \times t_0)$ (最大 15 mm)。



说明：
 1——光源；
 2——摄像头；
 3——玻璃板；
 4——试样；
 5——流体介质。

图3 挡油板和照明灯位置示意图

5 光学测量系统

为测定试样表面曲率半径 ρ , 以及真应变 ϵ_1 和 ϵ_2 , 推荐光学测量系统需具备以下特性:

- 基于 2 个或者更多个摄像头的光学传感器。
- 测量范围, 应大于 $1/2$ 的凹模直径。所使用的测量区域宜是压边圈的同圆心, 其直径应大于压边圈直径的一半。在整个成形过程中, 拉深试样的任意高度下, 这个区域均可观察到。
- 局域分辨率(两个单独网格点间的距离): 在未变形试样上两个相邻的测量点间的距离 g_{\max} 应满足以下要求:

$$g_{\max} \leq \frac{d_{\text{凹}}}{50}$$

- 曲率的测定要求在直径为 $1/2d_{\text{凹}}$ 的压边圈同心圆区域内, 测量的精度可通过测试光学测量系统来进行验证, 见附录 A。z 轴坐标的精度宜满足:

$$\text{rms}(dz)_z = \frac{\text{rms}(dz) \cdot 100 \text{ mm}}{d_{\text{凹}}} \leq 0.015 \text{ mm}$$

注: 应变测量精度: $\text{rms}(\epsilon_1) = 0.003$, $\text{rms}(\epsilon_2) = 0.003$ 。对于上述均方根中提到的每个真应变的值, 可接受的测量范围如下:

—— $\epsilon_{\text{real}} = 0$, 可接受的测量范围: $-0.003 \sim 0.003$;

—— $\epsilon_{\text{real}} = 0.5$, 可接受的测量范围: $0.479 \sim 0.503$ 。

- 丢失的测量点: 为了避免曲率的不连续性, 在直径为压边圈直径一半的同心圆内, 只允许丢失不超过 5% 的测量点(不包括内插的点)。如果相邻的两点丢失, 则不应将该点拟合到圆内。

6 试样

6.1 总则

待测试样应平整且被压住后材料无法流动。推荐使用压延筋, 试样的边部需在压延筋外。只要试样的表面未被破坏(划痕或抛光), 就不会影响最终试验结果。试样形状可为圆形(推荐)或者多边形。

6.2 网格的使用

6.2.1 网格的种类

对于光学测量系统, 网格应满足以下要求:

- 可用于测定试样表面曲率半径;
- 可用于计算材料变形的应变。

6.2.2 网格的制备

网格(方形、圆形或点)宜有明显的对比度, 并且不会产生切口效应或改变材料的微观组织。一些常用的网格加工技术如下:

- 电化学腐蚀、光化学腐蚀、激光刻蚀、胶板印刷或者网格转印;
- 随机(散斑)图案, 可在试样表面喷油漆。材料变形后需检查油漆在试样表面的附着性, 如可能, 先在试样表面喷一层较薄的、不光滑的白色涂层从而减少试样表面的反射, 然后再喷一层随机分布的黑色点(如石墨或者黑色油漆), 表面喷涂的涂层应有一定弹性并有足够的韧性, 从

而在变形过程中不至于脱离或开裂。通过这些随机分布的细小的点,可测定试样上虚拟网格每个点的位置。图案宜有足够的黑白相间密度以及合适的尺寸,从而能够满足光学测量系统的要求,在相应的搜索区域确定每个点的位置特征。

注:试样表面油渍对油漆附着力有较大影响,留有油渍会发生油漆脱落的情况,清除油渍可获得更准确的数据。

7 试验程序

7.1 试验应在室温(23 ± 5)℃下进行。

7.2 测量试样的初始厚度,精确到 0.01 mm。

7.3 通过压边圈和凹模压紧试样。在试验过程中,应避免在试样和液压流体介质间出现气泡,以防止压缩空气在试样破裂时导致液压油飞溅。

7.4 推荐对试样变形区域使用 0.05 s^{-1} 的恒定应变速率。如果无法实现恒定应变速率,则宜保证冲头或液压流体介质的速度恒定。在测定双轴应力-应变曲线过程中,为避免对温度或应变速率较敏感的材料产生较大影响,胀形试验宜在 2 min~4 min 内完成。

7.5 试验过程中,测量液压流体介质的压力。

7.6 试验过程中,测量试样表面网格点的 XYZ 坐标。其中,坐标原点应位于压边圈中心位置。XY 平面平行于压边圈表面(平行于试验前被压住的金属板)。而且,X 轴方向对应于轧制方向。Z 轴应垂直于夹紧金属板材试样的表面,且正对光学传感器方向。

7.7 压力数据和成形数据应同步测量并保存。推荐在试验过程中,至少测定 100 组数据。为了展现整个应变和压力的变化过程,推荐记录至少 100 张胀形试验的图片。

7.8 当裂纹完全贯穿试样厚度方向时,应认为试样失效。即,可通过检测流体压力的下降来判断试样厚度方向出现裂纹。

7.9 准备足够多的试样,以保证至少获得三个有效的试验结果。

8 顶点曲率变形和应变的评价方法

8.1 为更好地解释以下的曲率和应变的计算方法,需在顶点附近假设一个球形表面(最佳拟合球面)。在试样失效前一张图片中,如 7.8 中所定义,选择变形最大的弧顶区域,定义为测定真应力和真厚度应变 ϵ_3 的位置。为了得到圆顶处稳定的曲率半径,可通过所选区域的点进行最佳拟合从而计算得到球面。对于所选定区域,在破裂前最后一张图片圆顶尖端附近位置定义一个半径 r_1 ,对于成形过程的各个阶段选择同样的点进行拟合(见图 4)。

8.2 由于在试验的初始阶段,因试样过平难以获得可靠的最佳拟合曲面,并且弯曲半径非常大,拟合结果也不可靠,因此需要将试验的初始阶段(图片)忽略掉。为了得到顶部真应变和厚度减薄的稳健值,需计算一系列所选网格点的平均值。因此,需要通过半径 r_2 以类似的方式定义第二个区域(见图 4)。

8.3 基于以上步骤,可计算成形过程中每一阶段(图片)球顶处的曲率半径、厚度应变以及对应的厚度和应力值。这个计算步骤可通过不同的 r_1 和 r_2 值来进行。

8.4 考虑到良好的收敛性和稳健性, r_1 和 r_2 的推荐范围见式(1)和式(2):

$$r_1 = (0.125 \pm 0.025) \times d_{\text{die}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$r_2 = (0.05 \pm 0.01) \times d_{\text{die}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

8.5 附录 B 中给出了一个计算曲率和应变的替代方案。

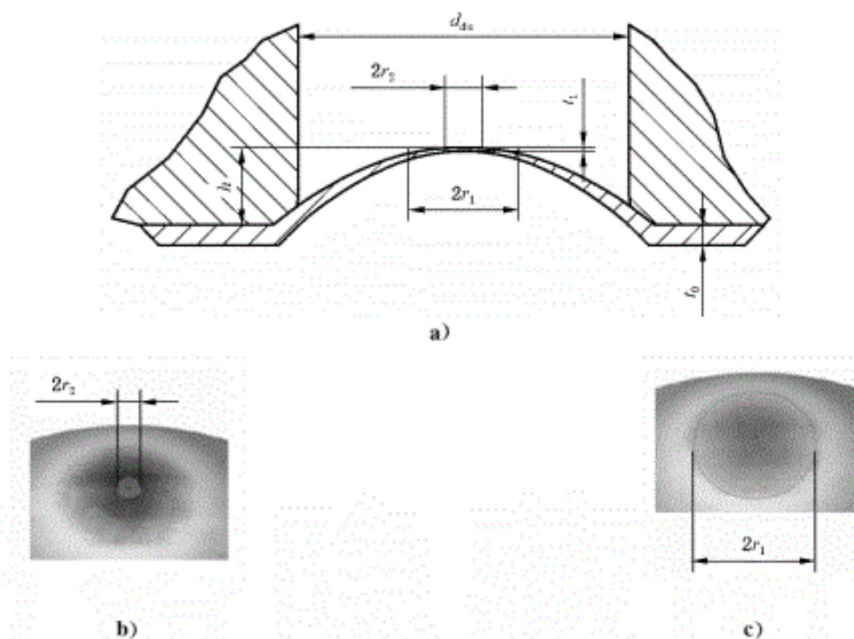


图 4 对成形过程的每个阶段,选取 r_1 和 r_2 计算真应力和真应变

9 双轴应力-应变曲线的计算

9.1 对于双轴应力-应变曲线的计算,需假设试样的中心是一个简单应力状态的薄壁球形压力容器,从而可以进行以下简化:

a) 等轴应力状态,见式(3):

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B \quad (3)$$

b) 通过平均曲率半径表示曲率,见式(4):

$$\rho = [1/2(1/\rho_1) + 1/\rho_2]^{-1} \quad (4)$$

c) 双轴真应力可通过液压介质的压力 p 、曲率半径 ρ 和实际厚度 t ,运用式(5)计算:

$$\sigma_B = \rho p / 2t \quad (5)$$

实际厚度 t 由式(6)得出:

$$t = t_0 (\exp \epsilon_3) \quad (6)$$

d) 假设材料变形为塑性非压缩变形,且弹性段应变可以忽略,总的厚度应变可通过总的真主应变和真次应变估算出,见式(7):

$$\epsilon_3 \approx -\epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (7)$$

e) 基于塑性功原理,双轴应力-应变曲线是塑性厚度应变的函数: $\sigma_B(-\epsilon_3^p)$,也可参照附录 C。假设材料为各向同性的线弹性材料,不存在压缩塑性变形,厚度方向的塑性变形如式(8)所示:

$$\epsilon_3^p = -\epsilon_1 - \epsilon_2 + 2 \frac{1-\nu}{E} \sigma_B \quad (8)$$

9.2 对于弹性模量 E 和泊松比 ν ,文献中的数据表明其足以扣除弹性段对结果的影响。例如,钢的弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.33,铝合金的弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33。

9.3 凹模直径和试样厚度的比值宜在合理范围内大一些,从而保证试样处于近似薄壁的应力状态,且可以忽略弯曲的影响。对于凹模直径和试样厚度比值小于 100 的试验,建议检查弯曲应变和实际的厚度 ϵ_3 应变相比是否足够小,确定弯曲应变的公式见式(9):

$$\epsilon_{\text{bending}} \approx -\ln\left[1 - \frac{t_0}{2\rho} \exp(\epsilon_3)\right] \dots\dots\dots (9)$$

注：双轴应力-应变曲线的获得未使用任何基于屈服准则的假设。双轴应力-应变曲线可用来确定等轴应力的屈服轨迹点，以及估算材料在达到均匀延伸前的加工硬化曲线。

9.4 附录 C 给出了获得等双轴应力点屈服准则的建议方法以及用液压胀形试验获得的双轴应力-应变曲线外推基于单轴拉伸试样的等效应力-应变曲线的方法。

10 试验报告

试验报告应至少包含以下信息：

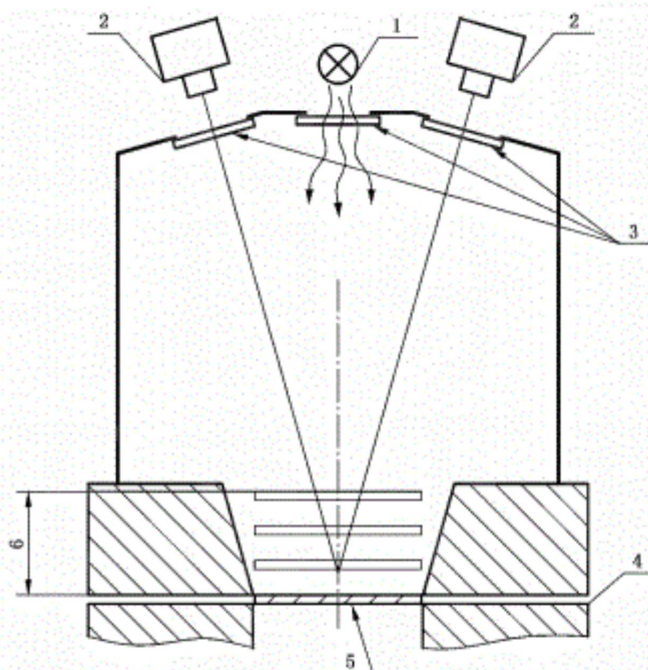
- a) 本标准编号；
- b) 操作人员；
- c) 材料牌号；
- d) 试样的初始厚度；
- e) 网格、摄像机及所使用的软件；
- f) 保护玻璃的位置；
- g) 试验设备的吨位；
- h) 胀形或者活塞的速度；
- i) 胀形试验计算方法，尤其是计算曲率和平均应变的参数；
- j) 重复试验的数量；
- k) 对每个胀形试验，需列出表格，记录半径 ρ 、压力 p 、厚度应变的绝对值和双轴真应力随时间的变化；
- l) 试验获得的双轴应力-应变曲线。

附录 A
(规范性附录)
光学测量系统的验证程序

A.1 试验程序

A.1.1 根据光学测量系统的要求(详见第5章)及根据图3所示搭建光学测量系统后,应考虑到光路中的玻璃板会对测量结果产生重大影响。为检查整体试验装置的最终测定质量,建议采用下列程序(见图A.1)。

注:也可以采用在玻璃板下方放置标定板对光学测量系统全场标定的方法。



说明:

- 1——光源;
- 2——摄像头;
- 3——玻璃板;
- 4——金属薄板;
- 5——参考基准面;
- 6——最大高度。

图 A.1 光学测量系统的验证

A.1.2 应使用直径不小于 $1/2$ 凹模直径的刚性测试物体(例如:板,3 维曲面)。在试验过程中,被测品不应出现变形。而且,被测物品表面可被测量系统观测。

A.1.3 在没有保护玻璃板的情况下,应在初始夹紧位置对被测样品进行一次测量(参考测量)。

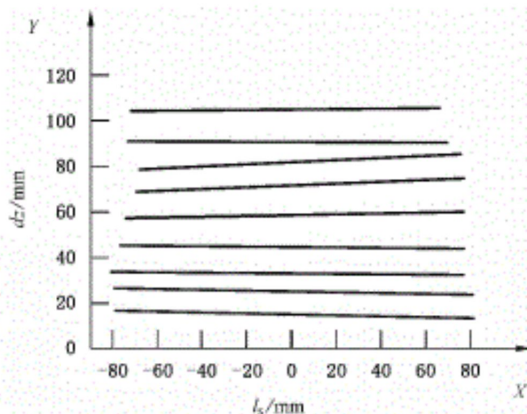
A.1.4 在初始板材夹紧位置和最大估算凸起高度 h_{\max} 之间的不同位置(5 个~10 个位置),应使用完整的测量系统(包括玻璃板)测量试验对象(见图 A.1)。

A.2 后处理

A.2.1 应确定所有测量点在各阶段的坐标。

A.2.2 刚体运动矫正应通过最小二乘拟合完成,而且每一个阶段的 3D 坐标都应参考测量对齐。为了实现这一拟合,应使用一个直径为 1/2 凹模直径的同轴区。

A.2.3 z 轴(dz)的剩余偏差表示测量质量损失。图 A.2 和图 A.3 展示了在九个不同位置测量的示例。

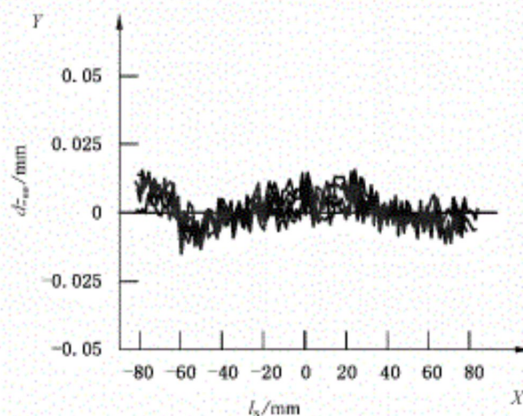


说明:

X —— l_s , 单位为毫米(mm);

Y —— dz , 单位为毫米(mm)。

图 A.2 参照板横截面的原始位移 dz ($d_{\text{die}} = 200 \text{ mm}$)



说明:

X —— l_s , 单位为毫米(mm);

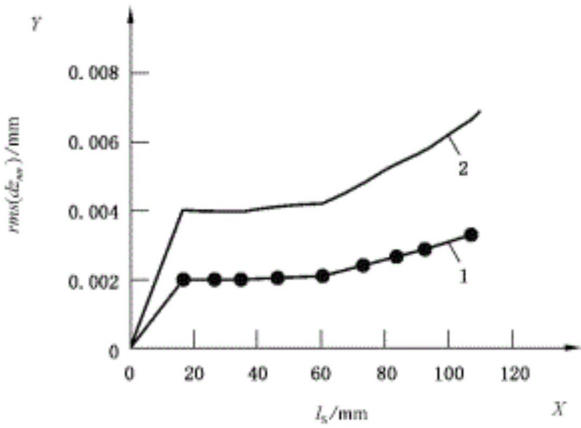
Y —— dz_{res} , 单位为毫米(mm)。

图 A.3 运动矫正后参照板横截面的位移 dz

A.3 归一化标准偏差的确定

应确定直径为 1/2 凹模直径同轴区的 z 、 ϵ_1 和 ϵ_2 (见第 5 章) 的标准偏差。图 A.4 给出了基于上文示例所确定的 $rms(dz_{\text{res}})$ 。以图 A.4 为例, 直径 $d_{\text{die}} = 200 \text{ mm}$, 所有位置的归一化标准偏差均小于限

值 $[rms(dz_{mv})_n \leq 0.015 \text{ mm}]$ 。



说明：

X —— dz ，单位为毫米(mm)；

Y —— $rms(dz_{mv})$ ，单位为毫米(mm)；

1 —— 原始曲线；

2 —— 归一化后曲线。

图 A.4 运动矫正后的原始标准偏差 $rms(dz)$ 和归一化后标准偏差 $rms(dz_{mv})$ 曲线

附录 B
(资料性附录)
基于响应面的曲率计算

B.1 综述

B.1.1 式(B.1)给出一个全二次多项式的函数,可用于确定圆顶顶点的曲率(以 7.6 所定义的坐标系为基础)。其中,线性参数 a_i 通过将残差平方和减至最小得出。同时,残差通过测量形状的 z 坐标和响应面的相应拟合值之间的差得出。

$$z(x, y) = a_0 x^2 + a_1 y^2 + a_2 xy + a_3 x + a_4 y + a_5 \quad \text{.....(B.1)}$$

B.1.2 对每个测量结果执行该程序,用于评估双轴应力-应变曲线。响应面的参数选择在 r_1 球面内的任意一点。此外,测量网格的点不但展示了相对于图纸方向的最大变形,而且还被认为是该球面的中点位置,其半径 r_1 由式(B.2)得出。

$$r_1 = \frac{r_{1,100}}{100} \times d_{\text{av}} \quad \text{.....(B.2)}$$

式中:

$$r_{1,100} \leq 10 \text{ mm}。$$

B.1.3 圆顶顶点的坐标(x_D, y_D, z_D)是响应面的静止点。式(B.3)、式(B.4)、式(B.5)、式(B.6)给出了相对于圆顶顶点曲率半径的计算方法($x = x_D, y = y_D$)。

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad \text{.....(B.3)}$$

$$\kappa = \frac{\kappa_x + \kappa_y}{2} = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \quad \text{.....(B.4)}$$

$$\kappa_x = \frac{2a_0}{[1 + (2a_0 x_p + a_2 y_p + a_3)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{.....(B.5)}$$

$$\kappa_y = \frac{2a_1}{[1 + (2a_1 y_p + a_2 x_p + a_4)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{.....(B.6)}$$

B.2 圆顶顶点材料厚度的计算

B.2.1 在计算材料厚度时,应考虑到球面(r_2)定义了应变状态。球面中点与圆顶顶点重合。半径 r_2 通过测量网格(SLMG)的边长得到,见式(B.7):

$$r_2 = 3 \cdot \text{SLMG} \quad \text{.....(B.7)}$$

B.2.2 通过网格测量,材料厚度的计算以 ϵ_3 为基础,由坐标轴 x 和 y 定义并在离散点给出。 ϵ_3 是在计算 ϵ_1 和 ϵ_2 在塑性不可压缩假设下的数值以及通过忽略弹性应变分布的基础上确定。式(B.8)给出了响应面函数,该函数与 ϵ_3 近似。

$$\epsilon_3(x, y) = b_0 x^2 + b_1 y^2 + b_2 xy + b_3 x + b_4 y + b_5 \quad \text{.....(B.8)}$$

B.2.3 参数 b_i 是通过将残差平方和减至最小而确定的;残差通过响应面所获得的 ϵ_3 值与测量数据所导致离散场之间的差获得;坐标 x_0 和 y_0 与圆顶顶点一致。式(B.9)给出了圆顶顶点的 ϵ_3 应力和厚度之间的关系。

$$t = t_0 \cdot e^{\epsilon_3(x_D, y_D)} \quad \text{.....(B.9)}$$

附录 C

(资料性附录)

屈服和加工硬化曲线等轴应力点的确定

C.1 综述

在获得等双轴应力-应变曲线的液压胀形试验中,主应力和次应力的平均值与塑性真实厚度应变的绝对值相对应。通常情况下,由轧制方向上的单轴拉伸试验获得的真实应力-应变曲线可作为计算材料硬化和屈服点参考曲线。通过比较等双轴应力状态的应力-应变数据和单轴参考曲线,我们可以计算出等双轴应力点,而且等双轴应变曲线可变换成一个等效应力-应变曲线,该曲线提供了应变高于拉伸试验均匀应变时的加工硬化数据。C.2 描述如何确定等双轴应力比以及如何将胀形试验结果在单轴应力-应变曲线上延伸到超过均匀延伸率的过程。

C.2 程序

C.2.1 下文所描述的程序是处理胀形试验中应力-应变数据的其中一种方法。使用该方法前用户有责任检查基础假设是否充分满足,以便此方法与实际材料行为一致。如果有疑问,强烈建议咨询该领域的专家。本程序作出的假设如下:

- 各向同性硬化;
- 屈服轨迹形状不随应变而变化;
- 加工硬化与应变路径无关(应力路径);
- 试验的加载路径和应变路径是恒定的;
- 胀形试验的应变速率和温度接近拉伸试验的应变速率和温度。如果不满足这个条件,就应知应变速率和温度对材料强度的影响,以决定是否需要校正。

C.2.2 沿轧制方向拉伸试验所获得的均匀伸长的真实性应变 ϵ_{1-UE} 作为等效应变 ϵ_{E-ref} 参考点,见式(C.1),从该点作为后均匀应变范围的外推出发点。

$$\epsilon_{E-ref} = \epsilon_{1-UE} \quad \text{.....(C.1)}$$

C.2.3 该点被认为是拉伸试验真应力真应变曲线的最后一个有效点,硬化曲线将从该点利用胀形试验数据外推。因此,拉伸试验的均匀应变处的应力被用作参考流动应力 σ_{f-ref} ,即极限拉伸强度变换成真应力。胀形试验的相应参考应力值 σ_{B-ref} 可通过式(C.2)获得, ϵ_{3-ref} 定义为胀形试验的参考厚度应变。

$$\sigma_{B-ref} \cdot |\epsilon_{3-ref}| = \sigma_{f-ref} \cdot \epsilon_{E-ref} \quad \text{.....(C.2)}$$

C.2.4 在本附录的最后部分,解释了该方法的理论背景。由于胀形试验曲线由离散值给出,将不存在完全满足式(C.2)中所示条件的一对应力和应变,因此,胀形试验数据中的点 m 与下列条件匹配,见式(C.3)、式(C.4):

$$\sigma_{B,m} \cdot |\epsilon_{3,m}| \leq \sigma_{f-ref} \cdot \epsilon_{E-ref} \quad \text{.....(C.3)}$$

且

$$\sigma_{B,m+1} \cdot |\epsilon_{3,m+1}| \geq \sigma_{f-ref} \cdot \epsilon_{E-ref} \quad \text{.....(C.4)}$$

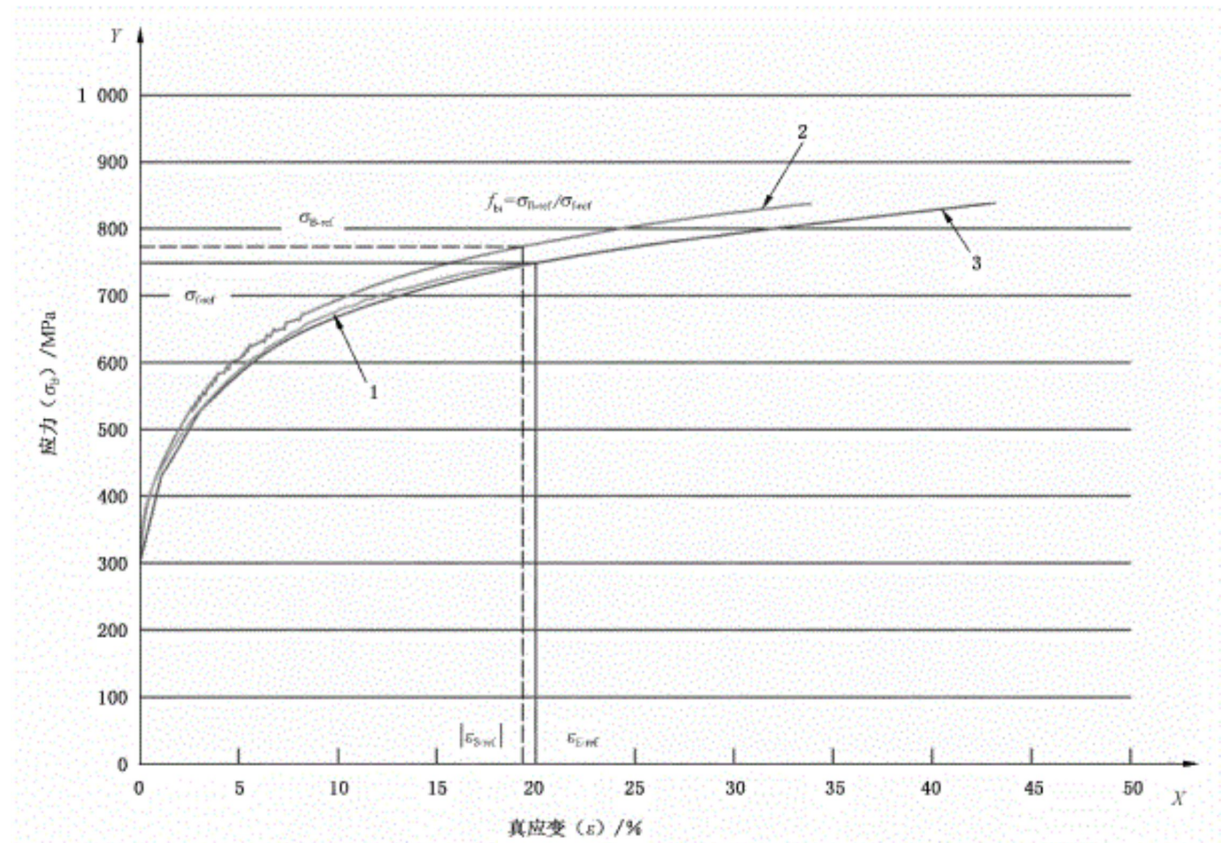
C.2.5 胀形试验所要求的参考应力可按式(C.5)通过简单的线性插值来计算:

$$\sigma_{B,ref} = \sigma_{B,m} + \frac{\sigma_{B,m+1} - \sigma_{B,m}}{\sigma_{B,m+1} \cdot |\epsilon_{3,m+1}| - \sigma_{B,m} \cdot |\epsilon_{3,m}|} \cdot (\sigma_{B,ref} \cdot \epsilon_{E,ref} - \sigma_{B,m} \cdot |\epsilon_{3,m}|) \dots\dots\dots (C.5)$$

C.2.6 通过式(C.6)可获得双轴应力比：

$$f_{bi} = \frac{\sigma_{B,ref}}{\sigma_{E,ref}} \dots\dots\dots (C.6)$$

C.2.7 通过式(C.6)中所定义的双轴应力因子，胀形试验曲线可变换成一个等效的应变-应力曲线。在与拉伸试验的单轴应力-应变曲线结合后，该变换曲线可用于外推超过均匀延伸后的加工硬化曲线。示例如图 C.1。



- 说明：
- 1——单轴试验的 σ_t ；
 - 2——胀形试验的 σ_B ；
 - 3——胀形试验的 σ_{ti} 。

图 C.1 材料的单轴应力-应变和等双轴应力-应变曲线示例，包括参照点的双轴应力计算和基于比例性胀形试验结果的硬化曲线

C.2.8 表 C.1 给出了如何利用胀形试验数据计算等轴应力因子以及如何外推单轴应力-应变曲线。通过将等效应变(在表 C.1 的第 9 列和第 10 列中给出)的胀形试验数据加到单轴拉伸试验均匀应变后(在表 C.1 的第 2 列和第 3 列中给出)来实现外推。表 C.2 为根据表 C.1 数据所做出的示例。

表 C.1 计算屈服轨迹参数和硬化曲线外推的程序说明

单轴曲线				胀形试验的等双轴曲线					
i^a	$\varepsilon_i = \varepsilon_E$	σ_{fi}	$\sigma_{fi} \cdot \varepsilon_i$	k^b$	|\varepsilon_{2k}|$	σ_{f2k}	$\sigma_{f2k} \cdot |\varepsilon_{2k}|$	$\varepsilon_{f2k} = |\varepsilon_{2k}| \cdot f_{f2k}$	$\sigma_{f2k} = \sigma_{f2k} / f_{f2k}$
1	$\varepsilon_1 = 0$	σ_{f1}	0	1	$|\varepsilon_{21}|$	σ_{f21}	0	$\varepsilon_{f21} = 0$	σ_{f21}
2	ε_2	σ_{f2}	$\sigma_{f2} \cdot \varepsilon_2$	2	$|\varepsilon_{22}|$	σ_{f22}	$\sigma_{f22} \cdot |\varepsilon_{22}|$	ε_{f22}	σ_{f22}
3	ε_3	σ_{f3}	$\sigma_{f3} \cdot \varepsilon_3$	3	$|\varepsilon_{23}|$	σ_{f23}	$\sigma_{f23} \cdot |\varepsilon_{23}|$	ε_{f23}	σ_{f23}
...
...
...
...
...
...
				m$	|\varepsilon_{2m}|$	σ_{f2m}	$\sigma_{f2m} \cdot |\varepsilon_{2m}|$	ε_{f2m}	σ_{f2m}
					$|\varepsilon_{2m+1}|$	σ_{f2m+1}	$\sigma_{f2m+1} \cdot |\varepsilon_{2m+1}|$	ε_{f2m+1}	σ_{f2m+1}
n	$\varepsilon_n = \varepsilon_{B-ref}$	$\sigma_{fn} = \sigma_{B-ref}$	$\sigma_{fn} \cdot \varepsilon_n$	...	...	...	...	...	...
			
			
				M	...	...	...	...	...

本表中的下列数量定义为：

n = 根据式(C.5)所确定的单轴试验的最后一个应变点，作为双轴应力因子参考点；

M = 胀形试验最后应变点；

m = 满足下列条件则表示该数据点在胀形试验中有效：

$$\sigma_{f2m} \cdot |\varepsilon_{2m}| \leq \sigma_{fn} \cdot \varepsilon_n \text{ 以及 } \sigma_{f2m+1} \cdot |\varepsilon_{2m+1}| > \sigma_{fn} \cdot \varepsilon_n$$

在数据点 m 和 $m+1$ 插值的基础上，通过计算参照双轴应力点可确定双轴应力因子。

$$\sigma_{B-ref} = \sigma_{f2m} + \frac{\sigma_{f2m+1} - \sigma_{f2m}}{\sigma_{f2m+1} \cdot |\varepsilon_{2m+1}| - \sigma_{f2m} \cdot |\varepsilon_{2m}|} \cdot (\sigma_{fn} \cdot \varepsilon_n - \sigma_{f2m} \cdot |\varepsilon_{2m}|) \text{ 和 } f_{f2k} = \frac{\sigma_{B-ref}}{\sigma_{f2k}}$$

^a i = 由轧制方向的单轴拉伸应力-应变曲线上确定的点序号。

^b k = 胀形试验中确定的等双轴应力-应变曲线点的点序号。

表 C.2 根据表 C.1(如图 C.1 所示)计算屈服轨迹参数和硬化曲线外推程序的示例

单轴曲线(RD)				胀形试验的等双轴曲线					
i^a	$\varepsilon_i = \varepsilon_E$	σ_{fi}	$\sigma_{fi} \cdot \varepsilon_i$	k^b$	|\varepsilon_{2k}|$	σ_{f2k}	$\sigma_{f2k} \cdot |\varepsilon_{2k}|$	$\varepsilon_{f2k} = |\varepsilon_{2k}| \cdot f_{f2k}$	$\sigma_{f2k} = \sigma_{f2k} / f_{f2k}$
1	0.000	351.7	0.0	1	0.000	306.7	0.0	0.000	297.4
2	0.010	437.1	4.4	2	0.010	441.0	4.4	0.010	427.6
3	0.020	488.7	9.8	3	0.020	502.9	1.1	0.021	487.5
4	0.030	529.0	1.9	4	0.030	546.4	1.4	0.031	529.7
5	0.040	561.9	2.5	5	0.040	579.8	23.2	0.041	562.1
6	0.050	589.4	2.5	6	0.050	607.3	30.4	0.052	588.7

表 C.2 (续)

单轴曲线(RD)				胀形试验的等双轴曲线					
i^a	$\varepsilon_i = \varepsilon_E$	σ_{Ei}	$\sigma_{Ei} \cdot \varepsilon_i$	k^b$	|\varepsilon_{2a}|$	σ_{Ea}	$\sigma_{Ea} \cdot |\varepsilon_{2a}|$	$\varepsilon_{Ea} = |\varepsilon_{2a}| \cdot f_{Ea}$	$\sigma_{Ea} = \sigma_{Ea} / f_{Ea}$
7	0.060	612.7	3.8	7	0.060	629.8	37.8	0.062	610.6
8	0.070	632.6	44.3	8	0.070	649.2	45.4	0.072	629.4
9	0.080	649.8	52.0	9	0.080	666.2	53.3	0.083	645.8
10	0.090	664.8	59.8	10	0.090	681.0	61.3	0.093	660.2
11	0.100	677.8	67.8	11	0.100	694.3	69.4	0.103	673.1
12	0.110	689.2	75.8	12	0.110	706.1	77.7	0.113	684.6
13	0.120	699.2	83.9	13	0.120	717.0	86.0	0.124	695.1
14	0.130	708.1	92.1	14	0.130	726.8	94.5	0.134	704.6
15	0.140	716.1	100.2	15	0.140	735.8	10.0	0.144	713.3
16	0.150	723.1	108.5	16	0.150	744.0	11.6	0.155	721.3
17	0.160	729.5	116.7	17	0.160	751.6	12.3	0.165	728.6
18	0.170	735.2	125.0	18	0.170	758.5	128.9	0.175	735.4
19	0.180	740.4	133.3	19	0.180	764.9	137.7	0.186	741.5
20	0.190	745.2	141.6	20	0.190	770.9	146.5	0.196	747.4
21	0.200	749.5	149.9	21	0.200	776.6	155.3	0.206	752.9
				22	0.210	782.1	164.3	0.217	758.3
				23	0.220	787.4	173.2	0.227	763.4
				24	0.230	792.5	182.3	0.237	768.3
				25	0.240	797.4	191.4	0.248	773.1
				26	0.250	802.3	200.6	0.258	777.8
				27	0.260	806.9	209.8	0.268	782.2
				28	0.270	811.3	219.1	0.279	786.5
				29	0.280	815.7	228.4	0.289	790.8
				30	0.290	819.9	237.8	0.299	794.8
				31	0.300	824.0	247.2	0.309	798.8
				32	0.310	826.0	256.1	0.320	800.8
				33	0.320	830.0	265.6	0.330	804.6
				34	0.330	833.7	275.1	0.340	808.3
				35	0.340	837.4	284.7	0.351	811.8
				36	0.350	840.9	294.3	0.361	815.2
				37	0.360	844.3	304.0	0.371	818.5
				38	0.370	847.8	313.7	0.382	821.9
				39	0.380	851.0	323.4	0.392	825.0

表 C.2 (续)

单轴曲线(RD)				胀形试验的等双轴曲线					
i^a	$\epsilon_i = \epsilon_E$	σ_i	$\sigma_i \cdot \epsilon_i$	k^b$	|\epsilon_{2k}|$	σ_{2k}	$\sigma_{2k} \cdot |\epsilon_{2k}|$	$\epsilon_{2k} = |\epsilon_{2k}| \cdot f_{2k}$	$\sigma_{2k} = \sigma_{2k} / f_{2k}$
				40	0.390	854.2	333.1	0.402	828.1
				41	0.400	857.5	343.0	0.413	831.3
				42	0.410	860.6	352.9	0.423	834.3
<p>本表中的数据是根据表 C.1 所述的程序得到:</p> <p>$n=21$, 单轴拉伸试验最后的应变点;</p> <p>$M=42$, 胀形试验最后的应变点;</p> <p>$m=20$, 胀形试验数据有效点满足以下公式条件:</p> $\sigma_{2m} \cdot \epsilon_{2m} \leq \sigma_{2k} \cdot \epsilon_{2k} \text{ 和 } \sigma_{2m+1} \cdot \epsilon_{2m+1} > \sigma_{2k} \cdot \epsilon_{2k}$ <p>通过插入数据点 m 和 $m+1$ 计算参考双轴应力点, 得到双轴应力因子:</p> $\sigma_{2k-ref} = \sigma_{2m} + \frac{\sigma_{2m+1} - \sigma_{2m}}{\epsilon_{2m+1} \cdot |\epsilon_{2m+1}| - \sigma_{2m} \cdot |\epsilon_{2m}|} \cdot (\sigma_{2k} \cdot \epsilon_{2k} - \sigma_{2m} \cdot |\epsilon_{2m}|) = 773.1 \text{ 和 } f_{2k} = \frac{\sigma_{2k-ref}}{\sigma_{2k}} = 1.032$ <p>^a i = 单轴应力-应变曲线点的序号。</p> <p>^b k = 等双轴应力-应变曲线点的序号。</p>									

上文所述硬化曲线的外推方法解释如下:

首先采用等效应变所定义的塑性功原理, 见式(C.7):

$$\sigma_i \cdot d\epsilon_E = \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3 \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

- σ_i ——流变塑性应力;
- $d\epsilon_E$ ——等效塑性应变增量;
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——1, 2, 3 方向上的主应力;
- $d\epsilon_1, d\epsilon_2, d\epsilon_3$ ——对应的主应力增量。

在单轴拉伸试验中, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 。因此, 将式(C.7)简化为式(C.8):

$$\sigma_i \cdot d\epsilon_E = \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

对于胀形试样, 假设两个方向应力相等: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B$ 和 $\sigma_3 = 0$ 。利用塑性不可压缩条件, $d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = 0$, 可推得式(C.9)适用于胀形试验:

$$\sigma_i \cdot d\epsilon_E = \sigma_B \cdot d\epsilon_1 + \sigma_B \cdot d\epsilon_2 = -\sigma_B \cdot d\epsilon_3 = \sigma_B \cdot |d\epsilon_3| \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

假设各向同性硬化是指单轴应力和塑性流动应力之间存在固定比值 $f_m = \sigma_1 / \sigma_i$, 且双轴应力与流变塑性应力也存在固定比值 $f_w = \sigma_B / \sigma_i$ 。则, 轧制方向(RD)上的单轴应力-应变曲线就是等效应力-应变曲线的参考曲线, $f_m = \sigma_1 / \sigma_i = 1$ 。

对于轧制方向的单轴拉伸试验, 采用式(C.10):

$$d\epsilon_E = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \cdot d\epsilon_1 \Leftrightarrow d\epsilon_E = f_m \cdot d\epsilon_1 = d\epsilon_1 \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

对于胀形试验, 采用式(C.11):

$$d\epsilon_E = \frac{\sigma_B}{\sigma_i} \cdot |d\epsilon_3| \Leftrightarrow d\epsilon_E = f_w \cdot |d\epsilon_3| \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

通过式(C.11)可得到胀形试验的等效应变。假设各项同性硬化, 即一个常量 f_w , 胀形试验公式(C.12):

$$\int_0^{\epsilon_E} d\epsilon_E = \int_0^{|\epsilon_3|} f_w \cdot |d\epsilon_3| \Leftrightarrow \epsilon_E = f_w |\epsilon_3| \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

通过对比式(C.12)和式(C.11)可得出一个结论:由于各向同性硬化,式C.10中的增量应变被式(C.11)中的总应变替代。将这一结论用于式(C.9),则胀形试验如式(C.13)所示:

$$\sigma_I \cdot \epsilon_E = \sigma_B \cdot |\epsilon_3| \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

通过式(C.13)和 f_w 的定义,胀形双轴应力-应变曲线可以转换为式(C.1)~式(C.6)所描述的等效应力-应变曲线。对于等双轴应力和单轴应力在轧制方向上的固定比 f_w 的计算,可由恒定等效应变所获得的屈服面对应的应力点获得。

通常将双轴应变比 $r_w = \epsilon_{TD}/\epsilon_{RD}$ 作为屈服准则的输入项。

注:普遍认为,该参数不能从本标准描述的液压胀形方法中直接获得。

除此以外,还有很多方法,例如 Kuwabara^[10]、Barlat^[11]、Yoon^[12]和 Sigvant^[13]所提出的方法,基于总塑性功原理,且不限于各项同性硬化。

利用该方法,在 $\epsilon_E \leq \epsilon_{Eref} = \epsilon_{1-UE}$ 区间内,可将胀形试验得到的等效应力-应变曲线与单轴应力-应变曲线进行对比,验证各向同性强化的假设。当两者在 $0.02 < \epsilon_E \leq \epsilon_{Eref}$ 区间应变偏差大于2%,建议在报告中注明。

在胀形试验中,低应变阶段的数据一般不太准确。出于这个原因,使用曲线的初始部分宜谨慎。不建议直接通过初始屈服点获得双轴应力比。使用本方法还要求应力-应变曲线不能波动太大,因为式(C.6)中只用一个应力点来确定双轴应力因子。例如在镁基铝合金中,产生这种波动的原因可能是动态应变时效。在这种情况下,需要对应力-应变曲线进行平滑处理。

参 考 文 献

- [1] Keller S, Hotz W, Friebe F. Yield curve determination using the bulge test combined with optical measurements. IDDRG. 2009. pp. 319-30.
- [2] Klein M, Friebe H, Berger H, Müller E. Optical 3D Measuring Solutions in Optimization of Sheet Metal Development and Manufacturing. 4th Forming Technology Forum Zurich 2011: Zero Failure Production Methods. May 17th—18th. 2011. Zurich. Switzerland
- [3] Hallfeldt T, Keller S, Staud D, Merklein M, Güner A, Brosius A, et al. Vereinheitlichung der Versuchsbedingungen für die Fließkurvenermittlung in der hydraulischen Tiefung. Fortschritte der Kennwerteermittlung für Forschung und Praxis. 2009. pp. 129-36.
- [4] Vrenegor J. & Noll R. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt SHAPE. Teilvorhaben "Multi-PunktLasertriangulation mit adaptiver Belichtungsregelung für die 3D-Formänderungsanalyse". Fraunhofer Institut für Lasertechnik. Aachen. 2005
- [5] Blumbach M, M. Bleck, W. Noll, R. Vrenegor, J. Online-Fließkurvenermittlung im hydraulischen Tiefungsversuch mit Hilfe des Laserlichtschnittverfahrens. 20. Aachener Stahlkolloquium. 2005
- [6] Blumbach M. Laseroptische Fließkurvenermittlung im hydraulischen Tiefungsversuch. Dissertation. RWTH Aachen. 2006
- [7] Ranta-Eskola A.J. Use of the hydraulic bulge test in biaxial tensile testing. Int. J. Mech. Sci. 1979. 21 pp. 457-465.
- [8] Santos A.D. & Teixeira P. da Rocha, A.B. Barlat, F. On the determination of flow stress using bulge test and mechanical measurement. NUMIFORM 2010: Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921—2009). AIP Conference Proceedings. Volume 1252. pp. 845-852 (2010).
- [9] Nasser A, Yadav A, Pathak P, Altan T. Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP600, DP780, DP780-CR, DP780-HY and TRIP780) using the uniaxial tensile test and viscous pressured bulge (VBP) tests. J. Mater. Process. Technol. 2010. 210 pp. 429-436.
- [10] Kuwabara T, Van Bael B, Iizuka E. Measurement and analysis of yield locus and work hardening characteristics of steel sheets with different r-values. Acta Mater. 2002. 20 pp. 3717-3729.
- [11] Barlat F, Aretz H, Yoon J.W., Karabin M.E, Brem J.C, Dick R.E. Linear transformation-based anisotropic yield functions. Int. J. Plast. 2005. 21 pp. 1009-1039.
- [12] Yoon J.H, Cazacu O, Yoon J.W, Dick R.E. Earing predictions for strongly textured aluminium sheets. Int. J. Mech. Sci. 2010. 52 pp. 1563-1578.
- [13] Sigvant M, Mattiasson K, Vegter H, Thilderkvist P. A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. Int. J. of Mat. Forming 2009. 2. pp. 235-242.