



中华人民共和国国家标准

GB/T 38719—2020

金属材料 管 测定双轴应力-应变曲线的 液压胀形试验方法

Metallic materials—Tube—Determination of biaxial stress-strain curve of
tube by hydro-bulging test

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	Ⅲ
引言	Ⅳ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号及说明	2
5 原理	3
6 设备	4
7 试样	4
8 试验程序	4
9 曲率半径、应变和应力确定方法	4
10 结果处理	5
11 试验报告	6
附录 A (规范性附录) 试验设备	7
附录 B (规范性附录) 散斑喷涂方法	9
附录 C (资料性附录) 双向应力状态等效应力-应变曲线的确定方法	11
参考文献	12

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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：哈尔滨工业大学、大连理工大学、江苏界达特异新材料股份有限公司、冶金工业信息标准研究院、东莞材料基因高等理工研究院、深圳万测试验设备有限公司、鞍钢股份有限公司、宝山钢铁股份有限公司。

本标准主要起草人：何祝斌、苑世剑、王伟、李荣锋、董莉、林艳丽、凡晓波、黄星、吕丹、方健、侯慧宁、张坤、胡馨予、朱海辉。

引 言

本标准是应用管胀形试验测定金属管在双向应力状态无摩擦影响条件下的双轴应力-应变曲线的方法。和单向拉伸试验相比,本标准所提供的试验方法可以获得更大的应变量及接近管状零件实际成形时的应力状态。本标准是金属管胀形试样的轴向和环向曲率半径、应变、应力的测量方法和确定方法。

金属材料 管 测定双轴应力-应变曲线的 液压胀形试验方法

1 范围

本标准规定了金属材料管双轴应力-应变曲线液压胀形试验的术语和定义、符号及说明、试验原理、设备、试样、试验程序、双轴应力-应变曲线的计算和试验报告。

本标准适用于壁厚不小于 0.5 mm 且径厚比(外径与壁厚比)大于 20 的圆形截面薄壁金属管(包括无缝管和焊管)。

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。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法

GB/T 15825.2 金属薄板成形性能与试验方法 第 2 部分:通用试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

DIC 测量系统 digital image correlation measurement system

采用数字图像相关方法(DIC,digital image correlation),跟踪物体变形的散斑图像,计算出物体表面全场的三维坐标、位移和应变的测量系统。

3.2

散斑 speckle

试样表面随机分布的斑点。

3.3

胀形区中间点 intermediate point of the bulging zone

位于胀形区中间横截面上的壁厚最薄点。

注:见图 1 a)中 P 点。

3.4

等效应力 equivalent stress

复杂应力状态折算成单轴应力状态的当量应力。

3.5

等效应变 equivalent strain

复杂应变状态折算成单轴应力状态的当量应变。

3.6

双轴应力-应变曲线 biaxial stress-strain curve

在双向应力状态下得到的等效应力-应变曲线。

4 符号及说明

本文件使用的符号及说明见表1。

表1 符号及说明

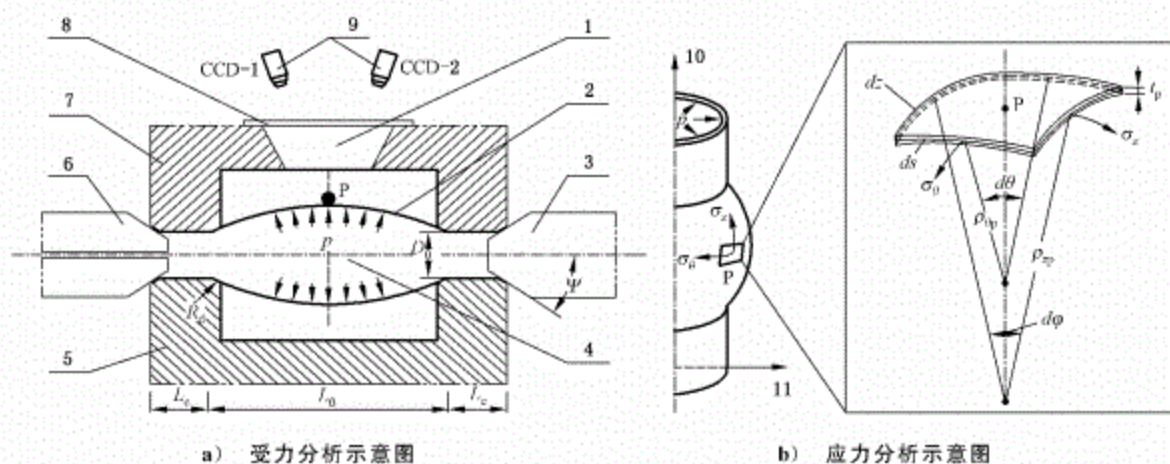
符 号	说 明	单 位
ds	受力分析微元体中性层环向弧长	mm
dz	受力分析微元体中性层轴向弧长	mm
$d\theta$	受力分析微元体环向圆心角	rad
$d\varphi$	受力分析微元体轴向圆心角	rad
D_0	试样初始外径	mm
F	轴向推力	kN
$F_{\text{合}}$	合模力	kN
h	胀形区最高点距离试样轴线的距离	mm
h_{end}	胀形破裂时胀形区最高点距离试样轴线的距离	mm
L	试样长度	mm
L_0	胀形区长度	mm
L_c	夹持区长度	mm
p	液体介质压力	MPa
R_0	试样初始外半径	mm
R_d	模具圆角半径	mm
R_m	抗拉强度	MPa
ΔR	试样胀形区中间点径向位移(外表面)	mm
ΔR_{end}	试验结束后试样胀形区中间点径向位移(外表面)	mm
S_0	试样原始外周长	mm
S_{end}	胀形破裂时试样最大截面周长	mm
t_0	试样初始壁厚	mm
t_{end}	试验结束后试样胀形区中间点壁厚	mm
t_p	试样胀形区中间点实时壁厚	mm
ε_z	胀形区中间点轴向应变	—
ε_θ	胀形区中间点环向应变	—
ε_r	胀形区中间点厚向应变	—
ε_{e}	等效应变	—
η	胀形过程中某一时刻试样的膨胀率	%
η_{max}	胀形破裂时的极限膨胀率	%
λ	胀形区长度与试样初始外径的比值	—
$\rho_{\theta p}$	胀形区中间点环向曲率半径	mm

表 1 (续)

符 号	说 明	单 位
ρ_{zp}	胀形区中间点轴向曲率半径	mm
σ_z	胀形区中间点轴向应力	MPa
σ_θ	胀形区中间点环向应力	MPa
σ_r	胀形区中间点厚向应力	MPa
σ_i	等效应力	MPa
ϕ	试样与模具圆角接触部分圆弧所对应的圆心角	(°)
Ψ	塞头的锥角	(°)

5 原理

将试样两端密封且轴向固定,利用液体介质对试样施加内压力进行胀形,测量胀形过程中的液体压力、位移、壁厚、应变等数据,分析获得试样在内压作用下变形时的等效应力、等效应变并绘制应力-应变曲线。试样应力分量可由液体压力、胀形区中间点 P 点的厚度、P 点的轴向与环向曲率半径计算。计算所得 P 点的应力分量和测量所得 P 点的应变分量用于确定试样双轴应力-应变曲线,如图 1 所示。



说明:

- 1 —— 观察孔;
- 2 —— 管试样;
- 3 —— 右塞头;
- 4 —— 液体介质;
- 5 —— 下模;
- 6 —— 左塞头;
- 7 —— 上模;
- 8 —— 玻璃板;
- 9 —— CCD 镜头;
- 10 —— 轴向;
- 11 —— 径向。

图 1 管状试样液压胀形试验原理

6 设备

液压胀形试验所用设备应符合附录 A 的规定。

7 试样

7.1 试样为一段圆形截面的管材。

7.2 试样长度由式(1)确定,见图 1 a)。

$$L = 2L_0 + L_0 + 5 \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$L_0 = (1.0 \sim 3.0)D_0$, 推荐 $L_0 = 1.5 D_0$ 。

7.3 试样端部应去除毛刺、打磨光滑,不应存在初始裂纹或较深、较尖锐的划痕,并且制样时保证试样表面没有损伤(划痕、裂纹等缺陷)。

7.4 试样外表面应清理干净以喷涂散斑,具体喷涂方法及注意事项见附录 B。

7.5 制样过程中应防止试样产生变形。

8 试验程序

8.1 试验时应记录试验温度,试验一般在室温 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行。

8.2 测量试样的初始壁厚、初始外径,沿环向等间隔测量出 8 个点,测量工具的分辨力不低于 0.01 mm 。

8.3 对试验所用模具、试验装置进行必要的清洗、检查,检查压力控制系统能否正常运行和压力管路是否存在漏液。

8.4 试验前,空载条件下检查设备是否能够正常运行并检查塞头和模具密封段是否配合良好。

8.5 将准备好的试样放入模具中,合模后利用塞头进行扩口密封。

8.6 根据 8.2 测量的壁厚分布确定最薄点所在区域并做标记,以便采用 DIC 测量系统分析数据时找到胀形区中间点。

8.7 向试样内部预加注液体(乳化液或液压油),排除试样内部的气体,然后增加塞头推力以实现管端密封。

8.8 利用压力传感器测量试验过程中的液体压力。

8.9 利用 DIC 测量系统,与 8.8 同步测量试验过程中试样表面散斑图像。

8.10 按同一时间刻度,记录并保存试样内压力数据和 DIC 测量系统所测量的变形数据。推荐每分钟至少记录 60 组数据。为了保证足够的数量,胀形测试过程中应至少拍摄 100 张图像。

8.11 按照一定的增压速率(推荐 $0.05\text{ MPa/s} \sim 0.1\text{ MPa/s}$)加载直至试样破裂,结束试验,记录胀破压力值,保存试验数据。

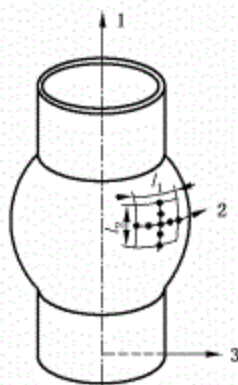
8.12 为保证获得至少三个有效的试验结果,应准备足够多的试样。

9 曲率半径、应变和应力确定方法

9.1 曲率半径(ρ_{cp} 、 ρ_{op})

需要求解的曲率半径为胀形区中间点的轴向和环向曲率半径。试样胀形时中间点附近区域外表面轴向的轮廓为椭圆形,环向的轮廓为圆形。以胀形区中间点为中心在 DIC 测量范围中选择一个局部矩

形区域进行分析,如图2中所示。所选区域的长度 l_1 建议取值为 $l_1=(0.2\sim 0.5)D_0$,宽度 l_2 建议取值为 $l_2=(0.2\sim 0.4)L_0$,也可以根据实际视窗大小做调整。在所选区域内的轴向方向上均匀选取若干个(推荐至少选取5个点,点与点之间距离应大于2 mm),提取所选取点的坐标信息,根据椭圆方程采用最小二乘法拟合可确定胀形区中间点的轴向曲率半径;在所选区域内的环向方向上均匀选取若干个(推荐至少选取5个点,点与点之间距离应大于2 mm),提取所选取点的坐标信息,根据圆的方程采用最小二乘法拟合可确定胀形区中间点的环向曲率半径。必要时,也可以协商采用其他拟合方法或计算方法确定曲率半径。



说明:

1——轴向;

2——环向;

3——径向。

图2 选择分析区域用于计算轴向和环向曲率半径

9.2 应变(ϵ_z 、 ϵ_θ)

胀形区中间点的轴向和环向应变可以由 DIC 测量系统直接输出,得到轴向和环向应变(ϵ_z 、 ϵ_θ),根据体积不变原理按式(2)计算得到胀形区中间点的壁厚应变(ϵ_r):

$$\epsilon_r = -\epsilon_\theta - \epsilon_z \quad \dots\dots\dots (2)$$

按式(3)计算胀形区中间点的壁厚(t_p)为:

$$t_p = t_0 \exp(\epsilon_r) = t_0 \exp(-\epsilon_\theta - \epsilon_z) \quad \dots\dots\dots (3)$$

9.3 应力(σ_z 、 σ_θ)

轴向和环向的应力分量由式(4)确定。

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{p(\rho_{\theta p} - t_p)^2}{2t_p(\rho_{\theta p} - t_p/2)} \\ \sigma_\theta = \frac{p(\rho_{\theta p} - t_p)}{2t_p(\rho_{\theta p} - t_p/2)}(2\rho_{zp} - \rho_{\theta p} - t_p) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

10 结果处理

10.1 双轴应力-应变曲线计算

根据测量得到的数据(σ_z 、 σ_θ)和(ϵ_z 、 ϵ_θ),确定双向应力状态下的等效应力-应变曲线。确定过程参照附录C给出的方法进行。

10.2 加工硬化指数和强度系数

采用幂指数硬化模型对所得的等效应力-应变曲线进行拟合,从而确定加工硬化指数和强度系数,参见附录C。

10.3 极限膨胀率

试样的极限膨胀率按式(5)计算:

$$\eta_{\max} = \frac{2h_{\text{end}} - D_0}{D_0} \times 100\% \text{ 或 } \eta_{\max} = \frac{(D_0 + 2\Delta R_{\text{end}}) - D_0}{D_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中: h_{end} 和 ΔR_{end} 为试样破裂前一瞬间的数值。

极限膨胀率也可以利用试样胀破后最大截面外周长与原始试样截面外周长按式(6)计算:

$$\eta_{\max} = \frac{S_{\text{end}} - S_0}{S_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(6)$$

11 试验报告

11.1 试验报告应包括以下内容:

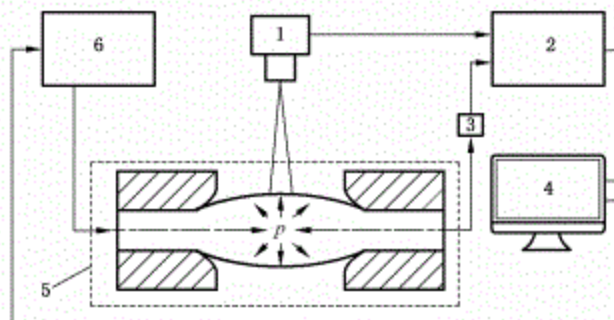
- 本标准编号;
- 试样标识;
- 试样的厚度、外径、长度、长径比,材料牌号和状态;
- 拟合的双轴应力-应变曲线;
- 试验的测量计算结果,包括:胀破压力、极限膨胀率、加工硬化指数和强度系数等;
- 试验日期、试验人员等。

11.2 试验报告还可包括下述内容:

- 试验过程描述;
- 双轴应力-应变曲线的确定方法;
- 试样准备记录;
- 试验后样品整体外观照片;
- 试验中的其他说明。

附 录 A
(规范性附录)
试验设备

A.1 管状试样液压胀形试验设备示意图见图 A.1。



说明:

- 1——DIC 测量系统;
- 2——数据采集模块;
- 3——压力测量模块;
- 4——控制系统;
- 5——机身主体;
- 6——高压系统。

图 A.1 试验设备示意图

A.2 试验设备应具有向试样内部提供液体介质的装置和控制系统。所提供的液体压力 p 应满足式(A.1),其中轴向抗拉强度 R_m 按照 GB/T 228.1 测得:

$$p > \frac{2t_0 R_m}{D_0} \quad \text{..... (A.1)}$$

A.3 试验设备应提供足够大的轴向推力以满足试样端部的密封要求。所提供的轴向推力 F 应满足式(A.2):

$$F > 1.3p\pi \left[\frac{(D_0 - 2t_0)}{2} \right]^2 \quad \text{..... (A.2)}$$

A.4 试验设备应提供足够大的合模力。所提供的合模力 F_1 应满足式(A.3):

$$F_1 > 1.2(D_0 - 2t_0)Lp + \frac{2F}{\pi} \quad \text{..... (A.3)}$$

A.5 试验设备应配备一个试样内部液体压力测量系统,也可以配备间接测量系统。从最大测量压力值的 20%起,测量误差不大于实际测量值的 1%。

A.6 在试验过程中,采用 DIC 测量方法获得试样外表面散斑点的 X、Y、Z 坐标。测试设备应保证在测试过程中对试样外表面进行连续测量。

A.7 模具和塞头应具有足够的刚度。塞头用于对试样端部密封并防止试样在胀形过程中产生轴向滑动。塞头推力应足以使试样端部扩口密封,但不应使试样端部在扩口密封时出现裂纹。建议塞头的锥角 ϕ 为 30° ,也可以根据实际情况进行调整,达到密封效果即可。

A.8 设备应具有排气功能,以在试验前排除试样内部的气体,防止破裂时气体瞬间释放引起液体飞溅。

A.9 建议在镜头和灯具前放置一块玻璃板,以防止试验结束试样发生破裂时液体飞溅对设备造成损

坏,以保护 DIC 测量系统。放置的保护装置不应影响 DIC 测量系统的测量精度。

A.10 上模具需要留观察孔,观察孔的设置应既便于 DIC 测量系统的测量又不影响模具的整体刚度。

A.11 模具圆角半径 R_d 依据试样初始直径和壁厚选取。由 $R_d = D_0 t_0 / 20$ 计算确定 R_d 的所在范围,根据表 A.1 确定 R_d 的实际取值。

A.12 试验模具的结构、形状、尺寸应满足试验原理和试验条件。

A.13 试验设备的其他要求,可按 GB/T 15825.2 的规定。

表 A.1 R_d 的取值

单位为毫米

R_d 计算值范围	R_d 建议取值
≤ 2.5	2.5
$> 2.5 \sim 5$	5.0
$> 5 \sim 7.5$	7.5
$> 7.5 \sim 10$	10.0
> 10	15.0

附录 B

(规范性附录)

散斑喷涂方法

B.1 概述

采用 DIC 测量系统测量试样胀形时的应变和几何形状时,需要在试样表面喷涂散斑,散斑的质量决定测量系统能否进行准确测量以获得准确的数据,因此本附录对散斑喷涂做了相关规定。

B.2 喷涂随机散斑

B.2.1 喷涂散斑的步骤如下:

- 第 1 步,首先将试样表面清理干净,确保不会出现影响散斑喷涂和粘附的油污等;
- 第 2 步,在待测试样上喷涂一层薄薄的哑光白色底漆以减小试样表面光泽的影响;
- 第 3 步,待上一步白色底漆将要晾干时喷涂黑色散斑,如图 B.1 所示为供参考的散斑图案。

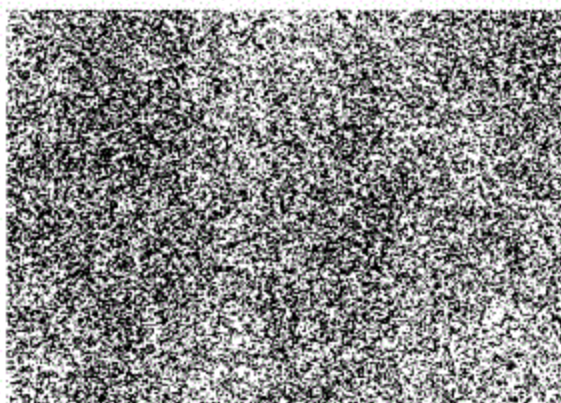


图 B.1 参考散斑图案

B.2.2 对于喷涂用喷漆的品牌及规格不作规定,以喷涂效果和 DIC 测量系统观测效果为准。推荐使用哑光白喷漆进行喷涂。喷涂散斑后的试样应尽快进行试验测试,防止久置后试样变形时散斑脱落。

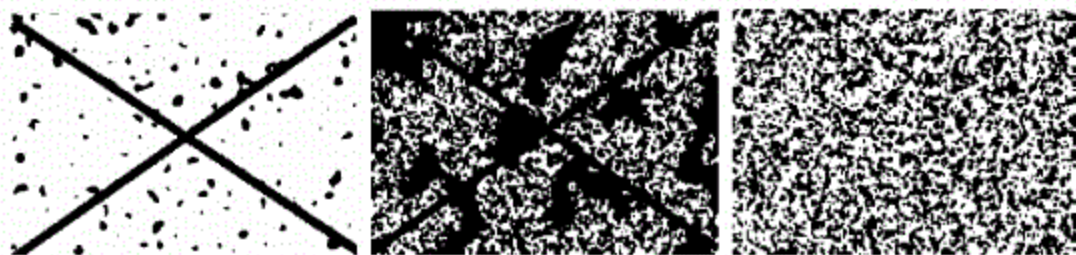
注意:喷漆可能含有有毒溶剂,请遵守喷漆罐上的警告,不要吸入喷出的气体,一定要在良好的通风条件下使用喷漆;避免喷漆接触皮肤和眼睛;喷出的漆雾一般具有可燃性,因此,应远离火源;在喷漆之前检查试件表面是否适合喷漆。

B.3 散斑质量要求

试样表面的散斑质量会对测量产生影响,因此,被测试样表面所喷涂的散斑应满足以下要求:

- a) 为了获得高对比度的随机灰度分布图像,试样表面喷涂的散斑应具有随机特征,以保证参考图像中的像素区域和目标图像中对应的像素区域相匹配;
- b) 所使用的油漆应该有足够的弹性和强度以免涂层开裂或脱落,散斑应能够随着试件一起变形且不会过早损坏;
- c) 试样表面特征需要有良好的对比度,以保证图像匹配精度;

- d) 散斑表面宜没有面积较大的持续强光区域,例如大的斑点,图 B.2 分别显示了不合格的散斑和合格的散斑。



a) 不合格的低对比度散斑 b) 干扰点过大的高对比度散斑 c) 较好的高对比度散斑

图 B.2 散斑实例

附录 C

(资料性附录)

双向应力状态等效应力-应变曲线的确定方法

C.1 要获得双向应力状态等效应力-应变曲线就需要先获得等效应力和等效应变。

C.2 由于试样为薄壁管,可忽略厚度方向的应力,应力状态可近似为平面应力状态。

C.3 假设试样材料为各向同性,满足 Mises 屈服准则,则等效应力、等效应变为式(C.1):

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \sigma_\theta \sigma_z + \sigma_z^2} & a) \\ \epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_\theta^2 + \epsilon_\theta \epsilon_z + \epsilon_z^2} & b) \end{cases} \dots\dots\dots (C.1)$$

C.4 若试样材料为各向异性,满足 Hill48 屈服准则,则等效应力、等效应变为式(C.2):

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_z \sigma_\theta + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_\theta^2} & a) \\ \epsilon_i = \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{1+r_0+r_{90}} \left(\frac{1+r_{90}}{r_{90}} \epsilon_z^2 + 2\epsilon_z \epsilon_\theta + \frac{1+r_0}{r_0} \epsilon_\theta^2 \right)} & b) \end{cases} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

r_0, r_{90} ——分别为试样沿轴向与环向的厚向异性系数。

C.5 若试样材料为各向异性,满足 Hosford 屈服准则,则等效应力、等效应变为式(C.3):

$$\begin{cases} \sigma_i = \left[\frac{1}{r_{90}(1+r_0)} (r_{90} |\sigma_\theta|^M + r_0 |\sigma_z|^M + r_0 r_{90} |\sigma_\theta - \sigma_z|^M) \right]^{1/M} & a) \\ \epsilon_i = \frac{[r_{90}(1+r_0)]^{1/M} (\sigma_\theta \epsilon_\theta + \sigma_z \epsilon_z)}{[r_{90} \sigma_\theta^M + r_0 \sigma_z^M + r_0 r_{90} (\sigma_\theta - \sigma_z)^M]^{1/M}} & b) \end{cases} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

M ——材料参数,对于体心立方 $M=6$,对于面心立方 $M=8$ 。

C.6 若材料满足其他屈服准则,则按其他屈服准则计算等效应力、等效应变。

C.7 计算得到的等效应力、等效应变为散点,需要采用函数进行拟合得到应力-应变曲线,式(C.4)为一种常用的拟合函数,也可以选用其他的函数利用最小二乘法进行拟合。

$$\sigma_i = K \epsilon_i^n \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

K ——强度系数;

n ——加工硬化指数。

参 考 文 献

- [1] GB/T 38684 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
 - [2] 林艳丽.薄壁管液压胀形壁厚线性模型与力学性能测试方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文, 2012.
 - [3] Hwang Y M, Lin Y K. Analysis and Finite Element Simulation of the Tube Bulge Hydro-forming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 126(3): 821-825.
 - [4] Hwang Y M, Lin Y K. Analysis of Tube Bulge Forming in an Open Die Considering Anisotropic Effects of the Tubular Material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 1921-1928.
 - [5] Hwang Y M, Lin Y K, Altan T. Evaluation of Tubular Materials by a Hydraulic Bulge Test [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 343-351.
 - [6] Hwang Y M, Lin Y K. Evaluation of Flow Stresses of Tubular Materials Considering Anisotropic Effects by Hydraulic Bulge Tests[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129(3): 414-421.
 - [7] Hwang Y M, Wang C W. Flow Stress Evaluation of Zinc Copper and Carbon Steel Tubes by Hydraulic Bulge Tests Considering Their Anisotropy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9, 1): 4423-4428.
 - [8] He Z B, Yuan S J, Lin Y L, et al. Analytical model for tube hydro-bulging test, part I: Models for stress components and bulging zone profile [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 87: 297-306.
 - [9] He Z B, Yuan S J, Lin Y L, et al. Analytical model for tube hydro-bulging tests, part II: Linear model for pole thickness and its application[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 87: 307-315.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 管 测定双轴应力-应变曲线的
液压胀形试验方法
GB/T 38719—2020

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3月第一版

书号: 155066 · 1-64852

版权专有 侵权必究



GB/T 38719-2020