

T/CSCP

中国腐蚀与防护学会标准

T/CSCP 0003--2024

钢质管道非破坏极限承载能力 检测评价方法

Detection and Evaluation method of non-destructive Ultimate bearing capacity
of Steel Pipeline

2024年2月26日发布

2024年2月26日实施

中国腐蚀与防护学会发布

前 言

本文件参照 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》，GB/T 20001.4-2015《标准编写规则第 4 部分：试验方法标准》给出的规则起草。

本标准由河北省特种设备监督检验研究院、北京科技大学和中国特种设备检测研究院共同提出。

本标准由中国腐蚀与防护学会标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：河北省特种设备监督检验研究院、北京科技大学和中国特种设备检测研究院。

本标准主要起草人：王昱、孙占远、刘智勇、王立贤、王胤森、李广涛、李宁宁、赵博、刘超、代文贺、郭超、贾沈鹿、贾宝利、王同军、马君、王文娜。

本标准为首次发布。

钢质管道非破坏极限承载能力检测评价方法

1 范围

本文件规定了钢质管道元件承载能力非破坏检测的术语和定义、原理、评价方法、承载能力预测及验证的方法。

本文件适用于管线钢、碳钢、奥氏体不锈钢、铝及铝合金管道元件的极限承载能力非破坏检测与评价方法研究。

本文件适用于钢质管道元件在服役前或服役后的极限承载能力非破坏检测与评价方法研究。

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 150.1 压力容器第1部分：通用要求

GB/T 26929 压力容器术语

GB/T 20801.5 压力管道规范工业管道第五部分：检验与试验

GB/T 241 金属管液压试验方法

GB/T 30821 无损检测数字图像处理与通信

GB/T 22039 航空轮胎激光数字无损检测方法

TSG D7002 压力管道元件型式试验规则

3 术语和定义

GB/T 26929、GB/T 150.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 应变 strain

管道元件在充压过程中，某一方向上微小线段因变形产生的长度增量与原长度的比值。

3.2 微应变 microstrain

局部出现的尚未导致宏观变形且未破坏管件的服役性能的应变。

3.3 极限承载能力 ultimate bearing capacity

管道元件经爆破试验后，所能承受的最大压力值。

3.4 非破坏性试验 non-destructive testing

根据管道元件的信息，采用相应的非破坏试验压力进行充压下的承载能力试验。

3.5 破坏性试验 destructive testing

不断增加试验压力，直至是金属管出现渗漏或爆裂的试验。

[来源：GB/T 241—2007，3.7]

3.6 数字图像相关方法 digital image correlation , DIC

利用在物体表面喷涂随机散斑,通过在物体变形前后的散斑图像中精确匹配对应点,测量变形位移等数据的非接触式光学测量方法。

3.7 异常变形区域 abnormal deformation region

对管道元件进行微应变测试,应变分布云图中呈条带状较周围区域的应变出现明显差异的区域。可认为是管道潜在的破断区域,其在管件充压过程中产生应力集中,引起该区域异常形变并优先发生失效。

3.8 正常变形区域 normal deformation region

在管道元件应变分布云图中,未出现明显异常变形区域的一般观察区域。

3.9 管道元件 piping element

本标准管道元件仅包括三通、弯头、直缝钢管以及螺旋缝钢管。

3.10 试验温度 test temperature

进行微应变试验和爆破时,管道元件壳体的金属温度。

4 总则

4.1 管道元件非破坏极限承载能力检测工作应满足 TSG D7002 等国家相关法规标准的规定。

4.2 本方法用于评估管道元件的极限承载能力,包括三通、弯头、直缝钢管以及螺旋缝钢管。

4.3 非破坏极限承载能力检测是指:通过使用 DIC 技术结合小尺寸试样得出微应变评价模型,通过管道元件微应变测试获得应变云图,通过计算应变集中系数与模型对比,来预测管道元件极限承载能力的方法。

4.4 非破坏极限承载能力检测工作包含六个步骤:获取管件信息、判定充压条件、微应变测试、评估、抽样检验、记录和报告,流程如图 1 所示。



图 1 极限承载能力检测流程图

5 管件信息和测试条件

根据管件壁厚、管径等信息,得到管道的理论失效压力 P_{\max} :

$$P_{\max} = \sigma_b \cdot \frac{2t}{D} \dots\dots\dots (1)$$

式中， σ_b 为管体材料的实际抗拉强度， t 为管壁厚度， D 为管子外径。
应通过对照表1确定管道元件微变形的充压程度。

表 1 管道微应变测试条件

管道材质	产品类型	管道规格		微应变充压程度/ P_{max}
		管径/mm	壁厚/mm	
L360	螺旋缝钢管	700-900	10-15	0.2
L555M	螺旋缝钢管	1100-1300	15-20	0.2
L485M	直缝钢管	800-1000	30-35	0.25
Q235B	弯头	600-800	10-15	0.3
	三通	600-800	10-15	0.3

6 微应变测试

6.1 测试装置

测试装置图2所示：

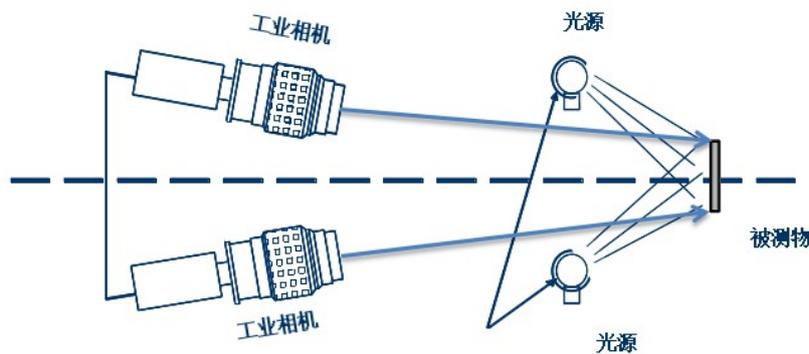


图 2 微应变测试装置图

将两个高分辨率的 2448×2048 像素 CCD 摄像机作为一组 DIC 图像采集设备，将多组 DIC 图像采集摄像头放置在待测量管件观测区周围的专用门架上，采用 LED 灯进行照明，对管件表面进行 360° 监测。数字图像相关方法原理如附录 A 所示。

6.2 试件前期准备条件

6.2.1 管道元件两端焊接封头做成试验系统。

注：焊接封头时应保证整管强度。

6.2.2 对于焊接管件，需要先对焊缝进行渗透检测或超声波检测等无损检验方式，确保焊缝焊接质量良好。

6.3 获取承压过程中的数字图像

6.3.1 将需要检测的管道元件放入爆破室。

6.3.2 在管件的塑性变形区域喷涂均匀的亚光白色底漆，确保底漆颜色均匀、无斑点形杂色区。

6.3.3 晾干后喷洒黑色散斑，确保黑色散斑细小且分布随机，每个像素区域有 2-4 个散斑为宜。

注：白色底漆是为了覆盖试样表面的金属光泽以免影响 DIC 图像的采集。

6.3.4 将多组 DIC 图像采集设备放置在待测量管件观测区周围的专用门架上，采用 LED 灯进行照明。然后开启图像采集。

6.3.5 DIC 图像采集的同时开始进行管道充压。通过增压系统控制给管道元件增压，其增压能力和压力传感器精度、采集量程等应满足 GB/T 241 金属管液压试验方法的一般要求。

6.3.6 继续提升管道元件内部压力，直到出现微形变。当管道元件局部微应变或正常变形达到 0.25% 时，停止实验。

6.3.7 得到微变形管道元件的应变分布云图，分析应变分布云图，判断是否存在异常变形区域。如存在异常变形区域，则采用下述方法计算应变集中程度。

6.4 计算应变集中程度

采用应变集中系数 k 对应变集中程度进行量化：

$$k = \frac{|\varepsilon_a - \varepsilon_m|}{\varepsilon_a} \dots\dots\dots (2)$$

其中， ε_m 为应变集中处的最大应变， ε_a 为均匀变形处的应变。

7 评估方法

将步骤 6.4 计算的应变集中系数 k 进行评估，评估方法如下表所示：

表 2 微应变测试评估方法

应变集中系数 (K)	评估结果
$R_1 > k \geq 1$	合格
$R_2 > k \geq R_1$	存疑
$k \geq R_2$	不合格

注： R_1 和 R_2 的具体数值见附录 B。

8 管道爆破试验

8.1 爆破试验管件数量

表 3 爆破试验管件数量

评估结果	爆破数量
合格	0%
存疑	50%
不合格	100%

抽取 50% 评估结果为存疑的管件进行爆破检验，另外 50% 根据检验结果进行处置。

8.2 爆破试验流程

爆破试验流程按照 GB/T 241 金属管液压试验方法进行。

9 实验报告

试验报告应当包括下列内容：

- a) 本标准号；
- b) 实验目的；
- c) 试验编号；
- d) 试验方法，包括表面微形变基准线 A；
- e) 试样的标识及描绘（规格、材质、类型）；
- f) 试验升压曲线及表面微形变二维图；
- g) 试验件变形前后外观照片；
- h) 试件极限承载能力的评判结果，包括定性和定量的评定。

附录 A
(资料性)
数字图像相关方法原理

A.1 DIC 采集系统

DIC 采集系统由三角支架、CCD 相机和计算机组成，如图 A.1 所示。试验过程中通过 CCD 相机对试件进行垂直拍照并将采集的散斑照片实时保存在计算机中。DIC 作为一种目标跟踪技术，在概念上非常简单，是通过比较试件变形前后的散斑图像间差异来计算试件的位移变化量信息。

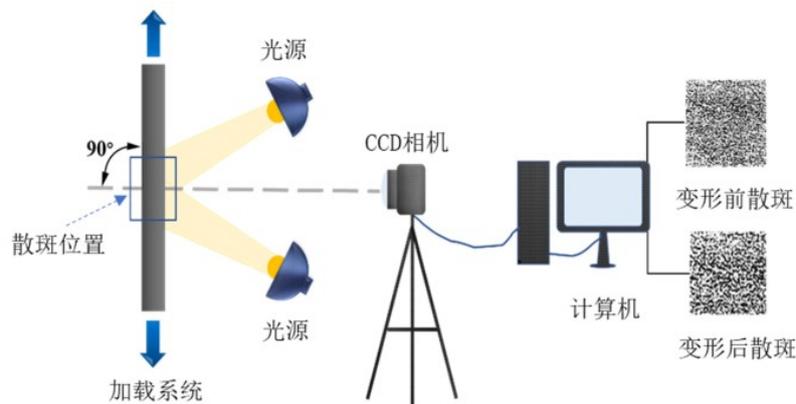


图 A.1 DIC 图像采集系统

A.2 DIC 原理

当物体受到外载荷作用时，待测物体的散斑会随着待测物体的变形而发生形变，因此常通过观测散斑图像的变化获得物体的变形信息。在散斑图案变形前后的相关性匹配计算之前，需要对目标散斑图进行合理的划分子集，其中子集的大小通常为步长的 4 倍。DIC 的匹配计算过程如图 A.2 所示，在散斑图像中选取目标子集(红色方框)和目标像素点(红色点)，其中图 A.2 右边两张散斑图为变形之后形貌，通过匹配物体变形前后散斑图中目标子集与目标像素点位置变化计算该子集在 x 、 y 、 z 三个方向的位移偏置量。以此类推，通过计算观测区域内每个子集的位移偏移量可以计算出整个待测区域的位移场及应变场。

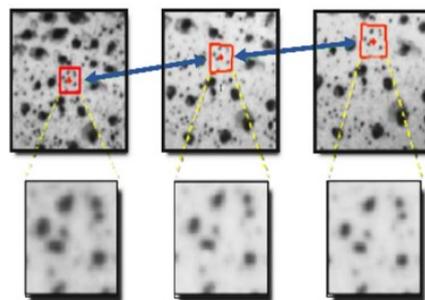


图 A.2 试件变形前后的散斑图

DIC技术是通过相关函数匹配物体变形前后的散斑图像上子集来提取物体表面各点的变形信息，如图A.3所示。将待测的散斑图像划分为若干个正方形子区，在变形前散斑图像中取中心点为 $P(x_0, y_0)$ 的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素大小的正方形子区作为参考子区而目标像素中心点P位置会随着物体变形发生偏移，变形后该点新的位置为 $P'(x'_0, y'_0)$ 且二者的坐标关系如下：

$$\begin{cases} x'_0 = x_0 + u \\ y'_0 = y_0 + v \end{cases} \dots\dots\dots (A.1)$$

其中， u 、 v 分别代表像素点变形前后 x 和 y 方向位移偏量。

在目标像素点周围选取任意像素点 $Q(x_i, y_i)$ ，形变后移动到 $Q'(x'_i, y'_i)$ ，变形前后该点坐标关系为：

$$\begin{cases} x'_Q = x_i + x_Q \\ y'_Q = y_i + y_Q \end{cases} \dots\dots\dots (A.2)$$

Q 点在待测物体形变前后子区间的灰度表达式如下：

$$\begin{cases} f(Q) = f(x_i, y_i) \\ g(Q') = g(x'_i, y'_i) \end{cases} \dots\dots\dots (A.3)$$

其中， $f(Q)$ 和 $g(Q)$ 分别是 Q 点变形前后的灰度分布。

$$u_Q = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \dots\dots\dots (A.4)$$

$$v_Q = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\Delta x = x_i - x_0, \Delta y = y_i - y_0 \dots\dots\dots (A.6)$$

将上式中未知矢量定义 $P=[u, u_x, u_y, v, v_x, v_y]^T$ ，为了进一步确定未知矢量 P ，需要利用相关系数 $C(f, g)$ 对变形前后的目标图像进行相关性匹配，其中相关系数 $C(f, g)$ 的定义为：

$$C(f, g) = C(x_i, y_i, x'_i, y'_i) \dots\dots\dots (A.7)$$

通过对上述函数进行最小值求解，可以找到与目标像素点最相关的子区，计算得到目标子区的位移偏量，并以此类推遍历整个待测区域的所有子集可得到整体位移场。

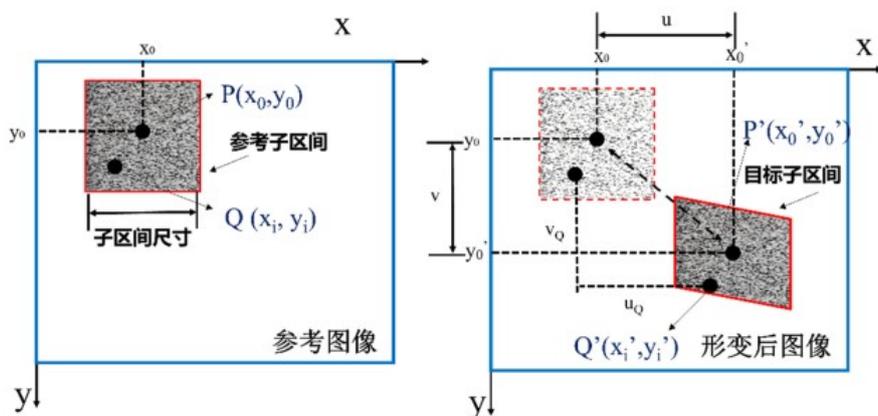


图 A.3 变形前后参考图像与形变后图像子区间示意图

在进行参考图像与目标图像的相关匹配过程中,是通过对相关函数进行最小值求解来匹配最相关的子区。当参考图像与目标图像的子区间完全匹配时,灰度差的绝对值总和是最小的。因此,常将灰度差的绝对值总和达到最小作为确定最相关子区的判据。表A.1介绍了三种常见的相关函数公式,用于参考图像与目标图像的相关匹配。在选择判据函数时,需要根据具体情况考虑各种因素,并权衡可靠性、抗干扰性和计算速度等要求。

表 A.1 三种常见的相关函数表

相关函数	公式
绝对差相关函数	$C_1 = 1 - \frac{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x, y) - u(x, y) }{255 \times (2k + 1)^2}$
最小差值平方和相关函数	$C_2 = \sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} [(v(x, y) - u(x, y))]^2$
正则化互相关函数	$C_3 = \frac{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x, y)u(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x, y)^2 \sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} u(x, y)^2}}$

附录 B
(资料性)
评估方法的建立

B.1 小尺寸试样拉伸试验及建立评估方法

B.1.1 试样制备

B.1.1.1 进行了全壁厚试件和含缺陷全壁厚试件的拉伸试验。拉伸板材取自待测 X70 钢管，从整管管段中切取全壁厚拉伸试样，取样位置、试样尺寸如图 B.1 所示。

B.1.1.2 先后用 240 目、400 目、800 目、1500 目、2000 目砂纸对试样表面进行打磨，使其塑性变形区域光亮且无划痕。

B.1.1.3 打磨后采用电火花方法在试样标距段中心制造人为缺陷，缺陷尺寸如表 B.2 所示。

注：缺陷的设计是模拟管道元件薄弱位置。

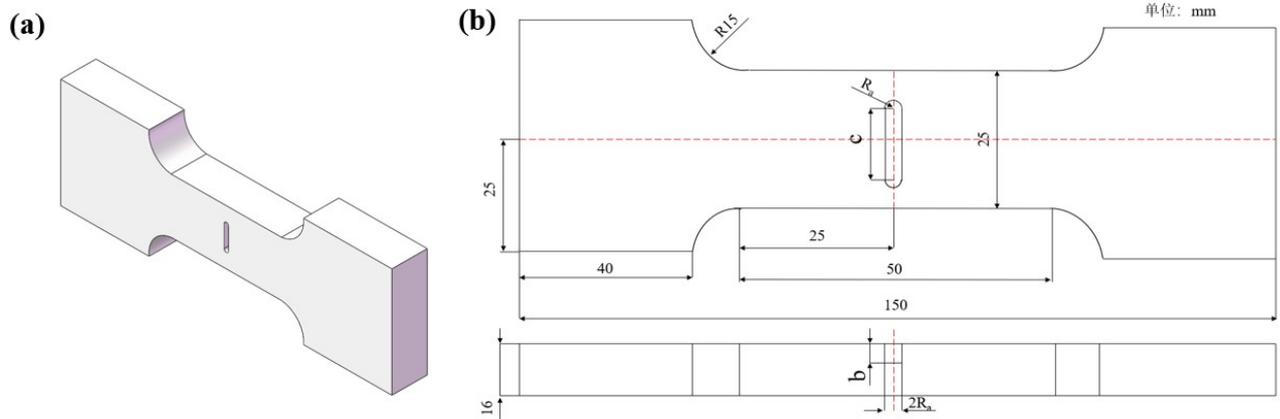


图 B.1 全壁厚拉伸试件示意图

表 B.1 缺陷尺寸

Ra/mm	b/mm	c/mm
1	4、6、8、10、12	10

B.1.2 喷漆处理

B.1.2.1 在缺陷背面的塑性变形区域喷涂均匀的亚光白色底漆，确保底漆厚薄适中。

B.1.2.2 晾干后喷洒黑色散斑，确保黑色散斑细小且分布随机。

注：白色底漆是为了覆盖试样表面的金属光泽以免影响 DIC 图像的采集。

B.1.3 拉伸试验及图像采集

B.1.3.1 将步骤 B.1.2 得到的试样装载至拉伸试验机。

注：全壁厚试样采用 MTS 810 试验机进行测试。矩形截面试样采用 LETRY-NL 100 试验机进行测试。

B.1.3.2 试验在室温下进行，采用位移加载方式。加载速度为 2mm/min，属于准静态张力。在拉伸过程中，图像采集和位移加载同时进行。

注：图像相关分析采用 Vic-3D 系统。

B.1.3.3 将两个高分辨率的 2448 × 2048 像素 CCD 摄像机放置在样品前方的角度约为 30°。采两个 LED 灯进行照明。

注：全壁厚试样的子集大小为 29 × 29 像素，步长为 7 像素，表明 Vic-3D 软件每 7 像素跟踪一个子

集。矩形截面试样的子集大小为 23×23 像素，步长为 5 像素。

B.1.3.4 拉伸测试后，将试样从 LETRY-NL 100 试验装置中取出，得到拉伸曲线数据和采集到的图像。

B.1.3.5 使用 Vic-3D 软件对采集的图像进行相关性分析，获得变形后的应变分布，得到应变分布云图。

B.1.4 建立预测模型

B.1.4.1 对试样应力进行计算，计算公式如下所示：

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：F 为试样所受瞬时受力， A_0 为试样标距段横截面积。通过该式得到全壁厚试样和缺陷试样的拉伸曲线。

B.1.4.2 为了建立缺陷尺寸与外加应变的关系，无缺陷试样的应变如式 B.2 所示：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{EA_0} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中： ε 为试样瞬时应变； σ 为无缺陷试样所受瞬时应力；E 为材料的弹性模量。

而对于含缺陷试样，定义当量缺陷因子 r^* ， r^* 的计算公式如式 B.3 所示：

$$r^* = \frac{A_c}{A_0} \cdot \frac{|\sigma_0 - \sigma_c|}{\sigma_0} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中， A_c 为缺陷的最大横截面积； σ_0 为试样的抗拉强度； σ_c 为缺陷强度，一般与缺陷类型有关，例如，本文中引入的缺陷拉伸试样中的缺陷强度视为 0，而实际管道中焊缝引起的缺陷强度略大于试样的抗拉强度。根据式 (B.3) 的定义，可以得知，缺陷的横截面积占材料横截面积越大、缺陷强度与材料强度差距越大，缺陷对试样影响越大，其当量缺陷因子越大。

因此含有缺陷试样缺陷位置的瞬时应变如公式 (B.4) 所示：

$$\varepsilon_c = \frac{F}{EA_0(1-r^*)} \dots\dots\dots (B.4)$$

由公式 (B.3) (B.4) 可知，缺陷的尺寸越大、缺陷与母材的强度差异越大，试样在弹性变形阶段缺陷所导致的应变集中程度越大。大量实验结果表明，当应变值 $\leq 0.25\%$ 时试样应变集中程度较小（如图 B.2 所示）；当应变值 $\geq 0.40\%$ 时试样产生大量应变集中（如图 B.3 所示）。因此，取试样弹性变形阶段应变值 0.25%，从图 B.2 中可以看出，随着缺陷深度的增加，试样拉伸至 0.25% 应变时的最大应变增加，说明缺陷的增大会导致在试样拉伸相同应变的情况下应变集中程度增大。应变集中程度可以用应变集中系数进行表征，由于实际管道存在焊缝、孔洞等不同缺陷，这些不同的缺陷会导致试件局部强度的差异导致局部应变的增大或减小，最终它们都会引发试件的断裂，因此可以将应变集中系数表示为式 (B.5)、(B.6)：

$$k = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}, \varepsilon_c > \varepsilon_0 \dots\dots\dots (B.5)$$

$$k = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}, \varepsilon_c < \varepsilon_0 \dots\dots\dots (B.6)$$

式中， ε_0 为试样平均应变值 0.25%。

因此可以通过给实际管道施加相同的应变（0.25%），观测此时的应变集中程度，与小尺寸试样缺陷导致应变集中系数进行对比，从而得到对应含缺陷小尺寸试样与不含缺陷小尺寸试样强度差异，进而对管道的极限爆破强度进行预测。

B.1.4.4 通过对不同厚度的小尺寸试样进行拉伸试验的 DIC 检测，得到系列全壁厚试件和含缺陷全壁厚试件的应变分布云图。

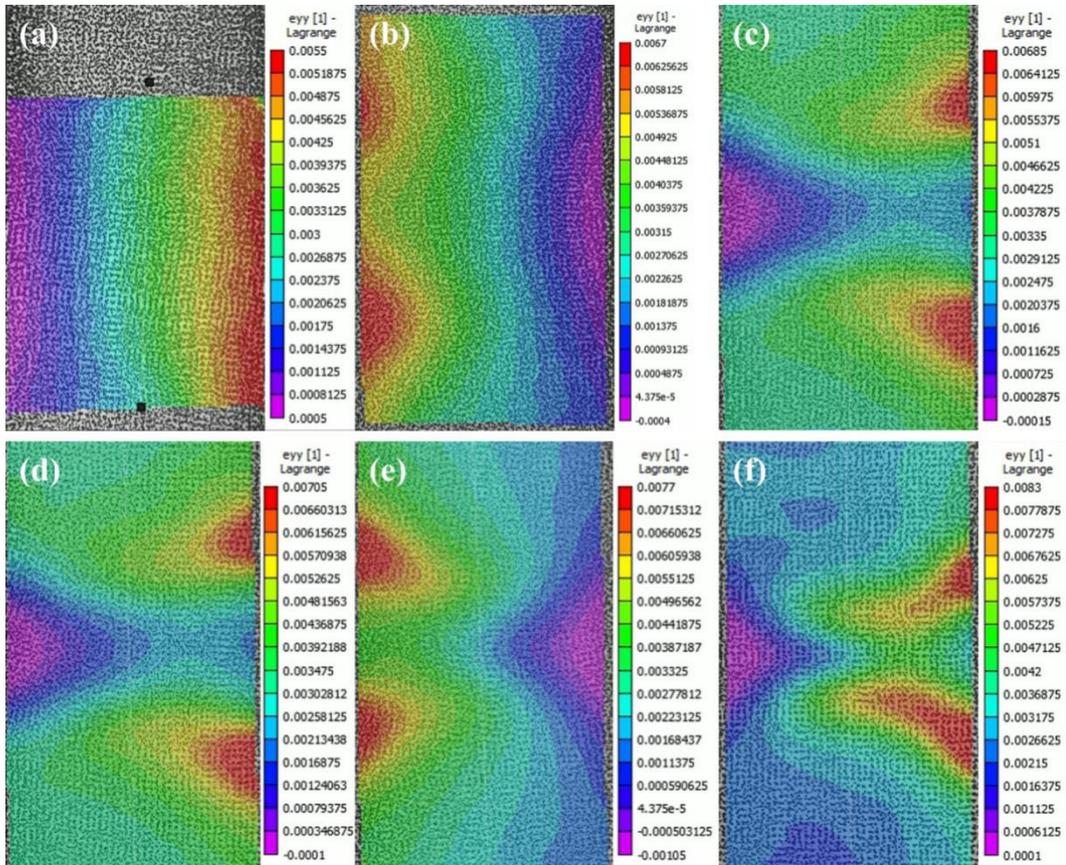


图 B.2 含不同缺陷试样拉伸至 0.25%应变时的 DIC 云图

(a)无缺陷；(b) $b = 4 \text{ mm}$ ；(c) $b = 6 \text{ mm}$ ；(d) $b = 8 \text{ mm}$ ；(e) $b = 10 \text{ mm}$ ；(f) $b = 12 \text{ mm}$ 。

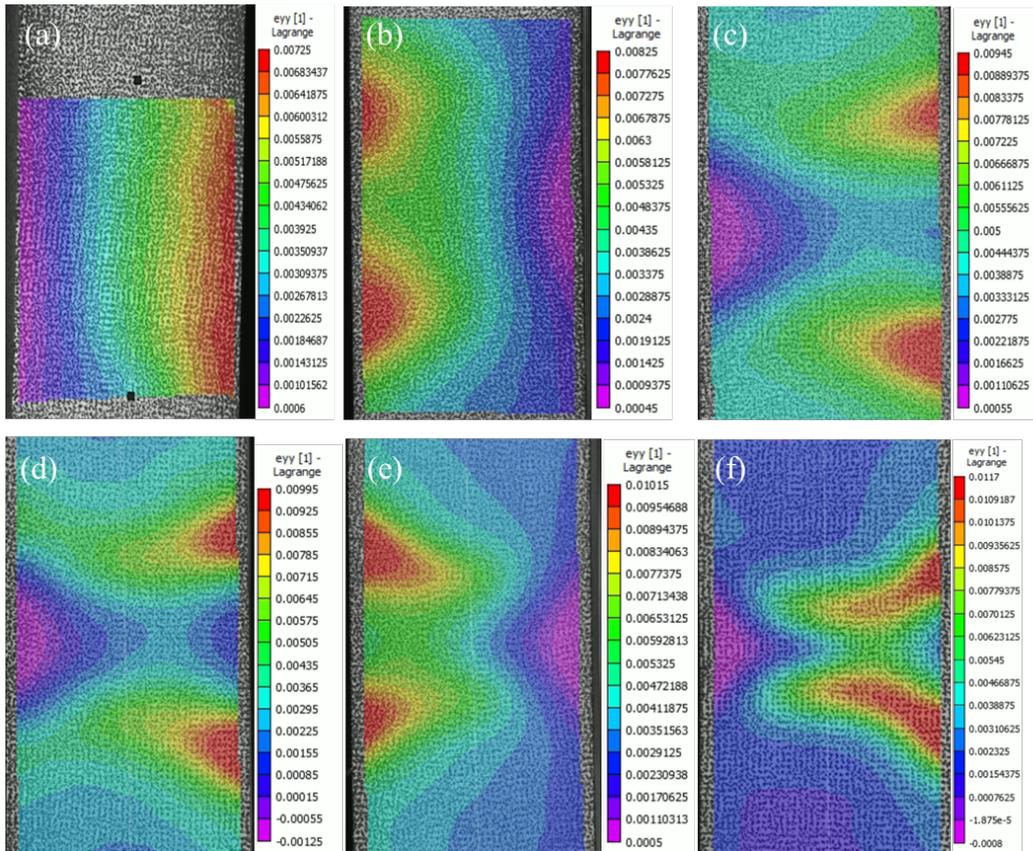


图 B.3 含不同缺陷试样拉伸至 0.40%应变时的 DIC 云图

(a)无缺陷；(b) $b = 4 \text{ mm}$ ；(c) $b = 6 \text{ mm}$ ；(d) $b = 8 \text{ mm}$ ；(e) $b = 10 \text{ mm}$ ；(f) $b = 12 \text{ mm}$ 。

B.1.5 建立评估方法

根据公式 (B.1) — (B.6) 计算得出：小尺寸试样计算得应变集中系数临界值 R_1 、 R_2 。其中 R_1 是由施加 0.25%应变计算得出； R_2 是由施加 0.40%应变计算得出。

表 B.2 小尺寸试样厚度与管道元件应变集中系数临界值

小尺寸试样厚度	R_1	R_2
10-15	2.2	2.5
15-20	2.4	2.7
30-35	3.0	3.3