

团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

面向在役承压设备安全评估的微压痕测试 方法

Microindentation test method for safety assessment of in-service
pressure equipment

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

目 次

前 言	II
引 言	IIII
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	2
5 测试设备	3
6 试样要求	4
7 试验程序.....	5
8 基于载荷—深度数据确定材料参数的方法	8
9 试验结果的不确定度	9
10 试验报告	10

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。

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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：浙江省特种设备科学研究院、XXX。

本文件主要起草人：王黎明、黄六一、胡永强、马琳琳、XXX。

引 言

承压设备用材料常服役于高温高压等恶劣环境中，其组织结构受高温等因素影响发生劣化，进而影响材料的性能，对设备的安全服役具有极大的风险。传统的无损检测只能探测材料缺陷和设备剩余壁厚，表面金相只能了解材料组织的变化，都不能真正评估在役承压设备材料的力学性能、断裂性能或蠕变性能的状况。而常规力学试验方法虽然能够进行材料各种性能的测试，但会对原设备结构造成明显的损伤和破坏。

微压痕测试技术是一种无损或微损测试方法，其工作原理是利用特定形状的压头在待测试样的表面进行压入试验，同时利用力传感器记录试验过程的力值，利用位移传感器记录压深量，获得材料的力-压深曲线，在材料的塑性和弹性变形过程中通过研究力和形变两者的关系来评定材料的特性。实验室纳米压痕仪能够检测承压设备用材料在微观尺度下的力学响应（如微小裂纹、局部塑性变形），适用于评估材料的老化、疲劳或蠕变损伤；便携式微压痕仪能够对在役设备进行材料力学性能检测，与常规力学试验方法进行对比，实现在役设备结构完整性的评估。

在役承压设备常常具有复杂的几何结构，如管道弯头、容器焊缝、管道与容器的连接处等，这些区域的材料性能评估尤为重要。传统的检测方法在这些几何复杂部位的适用性受到限制，而微压痕技术凭借其微小的检测区域和便携性，能够实现对这些关键部位的精确评估，对承压设备的长周期安全服役具有重大意义。

面向在役承压设备安全评估的微压痕测试方法

1 范围

本文件规定了在役承压设备（如压力容器、管道、核电装备等）关键部位力学性能评估的微压痕测试方法，包括原理、测试设备、试样要求、试验程序、试验结果的不确定度、试验报告等。

本文件适用于在役承压设备材料（含焊缝、母材及涂层）的硬度、模量、抗拉强度、屈服强度等性能评估，其压入深度在纳米量级至微米量级，其他可明确表面均匀二向应力分布的材料力学性能评估也可参照本文件执行。

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 21838.1 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压痕试验 第 1 部分：试验方法
GB/T 22458 仪器化纳米压入试验方法通则
GB/T 29459 在役承压设备金属材料小冲杆试验方法
GB/T 31339 在役压力容器安全评定
GB/T 37782 金属材料 压入试验 强度、硬度和应力-应变曲线的测定
GB/T 39635 金属材料 仪器化压入法测定 压痕拉伸性能和残余应力

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

载荷—深度曲线 load-depth curve

施加到压头上的载荷和由此导致的压入深度之间的曲线，来源于加载—卸载循环过程中所采集的数据。

3.2

接触柔度 contact stiffness

与压头相接触试样的瞬时弹性响应，表示材料抵抗变形的能力，可通过载荷-深度曲线中卸载部分最大载荷处的切线的斜率来确定。

3.3

仪器柔度 instrument compliance

表示在压入载荷作用下机架、致动器、压头、试样台、砧座等的变形，它是由施加到试样上的载荷所导致的。

3.4

改进型玻氏压头 modified Berkovich indenter

尖端形状为正三棱锥，其中心线与棱面之间夹角为 65.27° 的压头。

注 1：在压入深度相同时，该类压头具有和维氏压头相同的投影面积。

注 2：纳米压痕仪通常采用此类压头。

3.5

球形压头 spherical indenter

尖端形状为球冠的压头。

3.6

压头面积函数 indenter area function

沿压头尖端中心线的投影面积(截面积)与压头顶点至截面距离之间的函数关系。

3.7

接触零点 contact zero point

压头垂直接触到试样表面的位置，为压头位移测量值转化成压入深度的参考点。

3.8

压入载荷范围 range of indentation load

仪器所能施加压入载荷的示值范围。

3.9

压入深度范围 range of indentation depth

仪器所能检测到压入深度的示值范围。

3.10

压入载荷 indentation load

仪器驱动压头作用在试样上的载荷。

注：等于驱动压头运动的电磁力或静电力减去支撑弹簧所承受的载荷。

3.11

压入深度 indentation depth

仪器驱动压头在试样表面以下的位移。

注：等于仪器位移测量值减去压头起始点到接触零点的距离、压杆和压头等仪器构件的变形量。

3.12

热漂移速率 thermal drift rate

仪器位移传感器测定的单位时间内由压头附近局部环境温度波动所引起的位移量。

注1：压头附近的局部环境温度波动会引起试样、压头和压杆等的膨胀或收缩，导致压入深度测量误差的增大。

注2：纳米压痕仪宜控制周边环境，以减少压头局部环境温度的变化。

3.13

曲面修正系数 curvature correction factor

用于修正曲面试样（如管道、容器壁等）测试结果的系数，以消除或减小由于试样表面曲率对压入试验结果的影响。

4 原理

微压痕测试是通过连续测量压入试验过程中的载荷和深度，确定硬度、模量、抗拉强度、屈服强度等材料参数的方法。试验过程可以是载荷控制(dF/dt 为常数)、深度控制(dh/dt 为常数)或者压入应变率控制($(dh/dz)/h$ 为常数)。在整个试验过程中，记录压入载荷 F ，及其对应的压入深度 h 和时间 t 。试验直接给出的是载荷随深度变化曲线，通过表征应力应变法将载荷随深度变化曲线转化成工程应力-应变曲线得到材料的屈服强度、抗拉强度。

在进行多次重复试验确定载荷和深度的情况下，每次试验都应单独指定载荷-深度测量的零点。

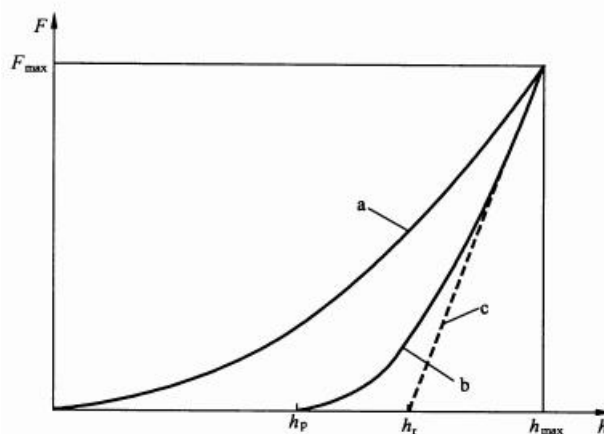


图 1 试验过程示意图

说明:

a——压入载荷施加曲线

b——压入载荷卸除曲线

c——曲线 b 在 $F_{\max}$ 的切线

5 测试设备

5.1 一般要求

测试设备分为实验室纳米压痕仪和便携式微压痕测试设备，实验室纳米压痕仪能够检测承压设备用材料在微观尺度下的力学响应（如微小裂纹、局部塑性变形），适用于评估材料的老化、疲劳或蠕变损伤；便携式微压痕仪能够对在役设备进行材料力学性能检测，与常规力学试验方法进行对比，实现在役设备结构完整性的评估。

5.2 测试压头

设备所用的压头可以具有多种形状，制作压头的材料硬度应远高于试样的硬度，可以是金刚石、蓝宝石、硬质合金等。实验室纳米压痕仪通常采用改进型玻氏压头，而便携式微压痕设备可根据测试需求选择不同类型的压头，如球形压头、尖锥压头等。

5.3 测试载荷

设备应具备在所要求的范围内施加预定载荷的能力。实验室纳米压痕仪通常具有微纳米级的载荷控制精度，适用于精细的材料参数测定；便携式微压痕设备应具备较宽的载荷范围，以适应不同强度材料的测试需求。

5.4 数据系统

设备应具备在整个试验循环过程中采集和存储原始的压入载荷、压入深度和时间等数据的能力，并具备修正、分析所采集到的原始数据的能力，正至少包括：接触零点、热漂移速率和仪器柔度。对于现场测试设备，还应具备抗干扰能力，以减小环境因素对数据采集的影响。便携式微压痕设备宜配备实时数据处理功能，便于现场评估材料性能。

5.5 设备校准

设备应定期进行直接校准或间接检验，检验时应采用满足要求的标准样品。对于现场使用的设备，应在每次测试前后进行功能检查和校准确认。

5.6 其他要求

便携式微压痕设备应满足便携性、抗干扰性和适应复杂环境的要求，以适应在役承压设备的现场测试需求。设备应具有防尘、防振、防电磁干扰等性能，能够在不同温度、湿度条件下稳定工作。同时，应考虑设备的电源供应方式，保证现场测试的连续性和稳定性。对于管道、容器等弧形表面的测试，设备应配备适当的夹具或支撑装置，确保测试过程中压头与试样表面垂直接触。夹具应具有良好的稳定性和适应性，能够适应不同直径和曲率的管道或容器表面，同时不对测试区域施加额外的应力，以免影响测试结果。

6 试样要求

6.1 一般要求

6.1.1 试样厚度

为避免试验结果受到试样支座的影响，试样厚度应大于或等于压入深度的10倍或者压痕半径的6倍，两者取其较大者。对于在役设备，应确认测试部位的壁厚满足要求，必要时可通过超声测厚等方法确定实际壁厚。

6.1.2 测试面粗糙度

为使试样测试面粗糙度对压入深度不确定度的影响小于5%，压入深度 h 应至少是粗糙度 R_a 的20倍。当压入深度小于或等于 $0.2\mu\text{m}$ 时，为了降低试验结果平均值的不确定度，可以增加试验次数，这应在试验报告中加以陈述。对于实验室纳米压痕方法，试样表面的制备应使受热或冷加工等因素对表面硬度和/或残余应力的影响减至最小。由于显微和纳米范围试验时的压入深度很浅，在试样制备时应避免损伤；对于在役设备表面，若粗糙度较大，应进行适当的表面处理，以满足测试要求。

6.1.3 测试面表面处理

测试面表面与压头接触的部位应进行局部打磨抛光；先采用粗磨进行表面平整处理和去除金属表面氧化层，打磨时用力要均匀适当，避免产生附加应力；焊缝区应打磨平整，防止表面凹凸不平影响测试结果；粗磨后推荐采用400目~600目砂纸进一步抛光打磨，减小由粗磨引入的附加应力。对于现场测试，可采用便携式打磨工具进行局部表面处理，必要时可使用电动工具，但应控制打磨压力和速度，避免产生过高的表面温度，影响材料表面性能。

6.1.4 测点标记

用记号笔或其他合适的方法进行测点标记，方便压头对准与测试点位置记录。对于需要多次测试或长期跟踪的部位，应建立永久性标记系统，确保测试位置的可重复性。可采用划线、打点或贴标签等方式，并在设备图纸上记录测点的精确位置。

6.1.5 测试面清洁度

除非试验所必需，试样测试面不得有液体或润滑剂，也不能有灰尘颗粒等外来物。对于现场测试，应使用适当的清洁剂（如酒精、丙酮等）清除测试表面的油污、锈蚀和氧化层，确保测试表面干净、干燥。

6.2 曲面试样特殊要求

6.2.1 曲面试样测试

对于管道、容器等弧形表面的测试，除满足上述一般要求外，还应满足一些特殊要求。

6.2.2 曲率要求

应确保测试点周围区域的曲率变化平缓，避免急剧变化的曲面影响测量结果的准确性。对于小直径管道（直径小于 100mm）或曲率半径小的容器表面，应选择曲率变化较小的区域进行测试，或采用特殊的曲面适配器确保压头与试样表面的垂直接触。

6.2.3 测试设备的固定

必要时可采用专用夹具固定试样或测试设备，确保测试面与压头垂直接触。夹具设计应考虑不同直径的管道和不同曲率的容器表面，具有良好的适应性和稳定性。夹具的安装不应应对测试区域施加额外的应力，以免影响测试结果。对于水平和垂直管道，应分别考虑重力对测试设备稳定性的影响，采取相应的支撑和固定措施。垂直管道测试时，应特别注意防止测试设备滑落，可采用卡箍式夹具或磁性固定装置确保设备稳固安装。

6.2.4 大型容器测试

对于大型容器的内表面测试，应考虑操作空间的限制，选择合适的测试设备和辅助工具。必要时可采用延长杆或柔性连接装置，确保压头能够垂直接触测试表面。

6.2.5 曲率校正

曲面试样的测试数据应采用曲面修正系数进行校正，消除或减小曲率对测试结果的影响。修正系数可通过理论计算或与标准平面试样对比试验确定，并应在试验报告中说明修正方法和依据。

6.3 特殊区域要求

6.3.1 焊缝区域

对于焊缝及其热影响区的测试，应在测试前进行金相腐蚀，显示出焊缝金属、热影响区和母材的边界。测试点的布置应能反映各区域的力学性能分布情况，通常沿垂直于焊缝方向布置，间距根据热影响区宽度确定。焊缝表面的余高应打磨平整，确保压头与测试表面良好接触。

6.3.2 应力集中区

对于管道弯头、容器开口、支座附近等应力集中区域，应特别关注其力学性能的变化。测试点的布置应覆盖应力梯度变化区域，通常从应力集中处向外按一定间距布置，以获取应力梯度对材料性能影响的分布规律。

6.3.3 腐蚀区域

对于存在腐蚀的区域，应先清除表面腐蚀产物，再进行测试。对于局部腐蚀较严重的区域，应在腐蚀坑边缘和未腐蚀区域分别进行测试，比较其力学性能的差异。测试结果可作为评估腐蚀对材料性能影响的重要依据。

7 试验程序

7.1 测试环境

试验应在规定的温度和湿度范围内操作，应记录试验温度和湿度。实验室纳米压痕仪：推荐试验条件为环境温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，其波动小于 1°C ；试验时的热漂移速率小于或等于 0.05 nm/s ；相对湿度小于50%。便携式微压痕测试设备：检测过程中环境温度范围宜为 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，温度波动不超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度范围是20%~80%。现场微压痕时应尽可能避免或减少冲击、振动和电磁干扰等对检测结果不利的因素。对于不可避免的环境影响，应采取相应的防护措施，并在试验报告中说明测试条件及采取的措施。

7.2 试样安装

7.2.1 一般要求

实验室纳米压痕仪：试样应被牢固支撑，确保试验机柔度无明显增加。试样应放置在与压入方向一致的刚性样品架上或固定在适当的样品支承台上。试样样品架和支承台间的接触面应无可能增加机架柔度(减少刚度)的外来污物。便携式微压痕测试设备：对于不能拆卸的在役设备，如管道、容器等，应使用专用夹具对测试区域进行固定，确保测试设备与被测表面稳定接触。夹具设计应考虑不同直径的管道和不同曲率的容器表面，具有良好的适应性和稳定性。夹具的安装不应测试区域施加额外的应力，以免影响测试结果。

7.2.2 弧形表面安装

对于弧形表面，应使用适配器或特殊夹具确保压头与表面垂直接触。适配器设计应考虑不同曲率的表面，能够自动调整压头的角度，保证压头轴线与试样表面法线重合。安装过程中应避免过大的外力，防止对设备表面造成变形或损伤。夹具的固定力应适当，既能确保测试设备的稳定性，又不会对被测表面施加过大的压力。对于薄壁管道和容器，应特别注意控制夹具的固定力，避免因夹具压力导致局部变形，影响测试结果。

7.2.3 大型装置表面安装

对于大型容器的内表面测试，应考虑操作空间的限制，选择合适的测试设备和辅助工具。必要时可采用延长杆或柔性连接装置，确保压头能够垂直接触测试表面。在狭小空间内操作时，应注意保持测试设备的平稳，避免因操作不当导致设备或压头损坏。当进行垂直表面或倾斜表面测试时，应考虑重力对测试设备的影响，采取相应的支撑和固定措施。可采用磁性固定装置、机械夹具或真空吸附装置等方式固定测试设备，确保测试过程中设备不会滑动或脱落。

7.3 选择试验位置

7.3.1 一般要求

试验结果可能受到界面、自由表面或其他压入试验所造成塑性变形的影响，这取决于压头形状和试样性能。压入位置点和界面或自由表面之间的距离应至少是压痕半径的6倍，相邻压入位置点的间距应至少是压痕半径的10倍。在压痕的棱角上，偶尔会有开裂现象发生。发生开裂时，压痕半径应包含裂纹。有开裂发生的试验数据应剔除。以上所规定的最小间距适用于陶瓷和金属试样，例如铁及其合金。对于其他材料的试样，推荐压入位置点的间距至少是压痕半径的20倍。建议将第1次压入试验的数据与系列试验中后续试验的数据相对比。如果有显著的不同，压入点可能太近，建议间距加倍。

7.3.2 特殊部位要求

对于在役设备特殊部位的测试，如焊缝热影响区、应力集中区等，应根据评估目的合理安排测试点位置和间距，确保获取的数据能够代表该区域的真实力学性能。对于焊缝区域，测试点应沿垂直于焊缝

方向布置,覆盖焊缝金属、热影响区和母材,间距应根据热影响区宽度确定,通常不大于 1mm。对于应力集中区,测试点应从应力集中处向外按递增间距布置,以获取应力梯度对材料性能影响的分布规律。对于腐蚀区域的测试,应在腐蚀坑边缘和未腐蚀区域分别设置测试点,比较其力学性能的差异。测试点的选择应避免严重的表面缺陷,如深度腐蚀坑、裂纹等,以确保测试结果的准确性。

7.3.3 长期服役设备要求

对于长期服役设备需进行定期检测的部位,应建立测试点的定位系统,确保不同时期的测试位置一致,便于数据的对比分析。可采用划线、打点或贴标签等方式,并在设备图纸上记录测点的精确位置。

7.4 确定零点

7.4.1 一般原则

对于每次试验,都应单独指定零点。应报告零点的不确定度。零点位置的不确定度不宜超过压入最大深度的 1%;如超过,应记录在试验报告中。对于现场测试,由于环境因素的影响,零点确定的不确定度可能较大,此时应增加测试次数,减小不确定度对最终结果的影响。

7.4.2 零点确定方法

7.4.2.1 零点确定范围

在载荷-深度曲线最初 10%的位移范围内,应采集足够多的数据点,以便能在允许的不确定度范围内指定零点。推荐采用以下两种方法确定零点:

7.4.2.2 方法一:判断试验载荷或接触刚度增加的首个拐点的方法

在零点附近,载荷或位移的步长应足够小,以使零点的不确定度小于极限要求。典型的载荷步长小于 $5\mu\text{N}$ 。于现场测试,由于环境干扰可能影响信号质量,应采集更多的数据点,并通过数据滤波等方法减小噪声影响。

7.4.2.3 方法二:外推拟合函数(例如 2 次多项式)的方法

拟合从零到不超过 10%最大深度范围内的数据。计算零点的不确定度来源于拟合函数、拟合参数和外推的长度。对于曲面试样,应考虑曲率对拟合函数的影响,必要时引入曲率修正项。

7.4.3 初始段数据处理

压入曲线的最初部分(例如 5%)可能受振动和其他噪声的影响。拟合范围的上限应小于接触响应发生改变(例如,由开裂和塑性屈服引起)的深度。对于现场测试,外部振动和电磁干扰可能更为显著,应采取适当的防护措施,如使用防振垫、电磁屏蔽装置等,减小外部因素对初始段数据的影响。必要时,可采用数据滤波和平滑处理技术,提高零点确定的准确性。

7.5 试验循环

试验循环应采用控制试验力或控制压入深度的方法。控制参数可采用连续式变化或步进式变化。试验报告应给出试验循环所有的详细信息,包括:

- a) 控制方法(如控制试验力或位移,控制参数采取步进式变化或连续式变化);
- b) 最大试验力(或位移);
- c) 施加试验力(或位移)的函数;
- d) 每次保持试验力(或位移)不变的试验部分的时长和在试验循环中的位置;
- e) 数据采集频率(或数据量)。

注：纳米范围和显微范围试验循环的例子：施加试验力的时间为30s；在最大试验力时保持时间为30s；卸除试验力的时间为10s。测量热漂移的保持时间为60s。

试验时间会影响试验结果，为获得具有可比性的试验结果，试验时间应考虑在内。

7.6 现场测试

7.6.1 环境因素控制

对于现场测试，应充分考虑环境因素(如温度波动、振动、电磁干扰等)对测试结果的影响，并采取相应的防护措施。在温度波动较大的环境中，应监测并记录测试过程中的温度变化，必要时对测试结果进行温度修正。对于存在振动的环境，如运行中的设备附近，应采用防振措施，如防振垫、隔振装置等，减小振动对测试的影响。在存在强电磁场的环境中，应采用电磁屏蔽装置，保护测试设备和信号传输系统。现场测试时，应对测试设备进行充分预热和稳定，确保其性能满足测试要求。一般情况下，设备预热时间不少于30分钟，待设备各部件温度趋于稳定后再进行测试。必要时，可采用多次重复测试的方法，提高测试结果的可靠性。对于重要部位的测试，建议采用不少于5次的重复测试，取平均值作为最终结果。

7.6.2 不同几何形状设备的测试

对于不同形式的在役设备，如水平管道、垂直管道、容器壁等，应根据其几何特征选择合适的测试方法和工装夹具，确保测试过程中压头与试样表面保持垂直接触，减小几何因素对测试结果的影响。对于水平管道，可采用支架式夹具，将测试设备固定在管道上，通过调整支架的高度和角度，确保压头与管道表面垂直接触。对于垂直管道，可采用卡箍式夹具或磁性固定装置，防止测试设备在垂直方向滑动。对于大型容器的外表面，可采用吸附式夹具或磁性固定装置；对于内表面，可采用延长杆或柔性连接装置，确保压头能够垂直接触测试表面。

7.6.3 特殊形状设备的测试

对于弯管、三通、异径管等特殊形状的部件，应根据其具体形状设计专用测试夹具，确保测试的准确性和可靠性。对于这些特殊形状部件的测试结果，应采用适当的修正方法，消除或减小几何形状对测试结果的影响。

8 基于载荷—深度数据确定材料参数的方法

8.1 总则

微压痕方法压入的载荷—深度数据可以用来确定硬度和多种材料参数。在测定硬度和材料参数时，如果涉及到压头面积函数，推荐采用已确定的面积函数。

8.2 马氏硬度

马氏硬度HM定义为试验载荷F除以压头压入试样的表面积 $A_S(h)$ ，见式(1)：

$$HM = \frac{F}{A_S(h)} \dots\dots\dots (1)$$

马氏硬度是针对维氏和玻氏两种棱锥压头定义的，它反应了材料抵抗弹塑性变形的能力，因此对所有材质均适用。马氏硬度可用于评估材料的整体性能变化，特别是对于服役时间较长的设备，通过比较不同服役时间的硬度变化，可以评估材料的劣化程度。

8.3 压入硬度

压入硬度 H_π 定义为试验载荷 F 除以压头和试样接触的投影面积 $A(h_c)$ ，见式（2）：

$$H_\pi = \frac{F}{A(h_c)} \dots\dots\dots (2)$$

要得到压入硬度，需确定载荷和接触投影面积，常用的幂函数关系拟合卸载阶段的载荷—深度数据，见式（3）：

$$F = B(h - h_f)^m \dots\dots\dots (3)$$

式中 B 、 m 和 h_f 为拟合参数。

对于曲面试样，接触投影面积会受到表面曲率的影响，需要进行曲率修正。修正方法可采用理论计算或与标准平面试样对比试验确定，修正后的接触投影面积应用于压入硬度的计算。

8.4 压入模量

压入模量 E_π 按式（4）和式（5）计算：

$$E_\pi = \frac{1 - v_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - v_i^2}{E_i}} \dots\dots\dots (4)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

E_r ——压入折合模量；

E_i 和 v_i ——压头的弹性模量和泊松比，金刚石分别取1140GPa和0.07；

v_s ——试样的泊松比；

β ——与压头几何形状有关的常数，玻氏压头的 $\beta=1.034$ ，维氏压头的 $\beta=1.012$ 。

上述分析基于弹性接触理论，仅适用于材料的压入凹陷情况，这时的压入模量与杨氏模量是可比的。如果材料是压入凸起的，压入模量与杨氏模量可能存在明显差异。对于在役设备，压入模量是评估材料弹性性能变化的重要指标，特别是对于高温服役的设备，模量的变化可能反映材料的蠕变性能和组织劣化程度。

8.5 抗拉强度

对于金属材料，抗拉强度由拉伸曲线不稳定条件给出。抗拉强度出现在颈缩发生前的最大应力处，即抗拉强度是工程应力-应变曲线中的最大值：

$$\sigma_u = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \dots\dots\dots (6)$$

式中：

e ——自然对数的底， $e=2.71828$ ；

K ——真应力和真应变关系式的强度系数；

n ——由于采用了多次循环加载卸载，测点的应力应变水平已经接近或超过抗拉强度，因此表征应力应变法可准确测得抗拉强度值。根据这些应力应变点拟合可准确得到应变硬化指数 n 的数值。

对于常见的在役承压设备材料，如碳钢、不锈钢、铬钼钢等，应建立相应的转换关系，提高估算结果的准确性。转换关系可通过大量的对比试验确定，考虑材料的化学成分、热处理状态、服役条件等因素对转换系数的影响。对于特殊材料或特殊服役条件下的设备，应通过专门的试验确定其转换关系。

8.6 屈服强度

在材料弹塑性曲线确定之后，在应变 0.2% 处以弹性模量 E 为斜率作一条直线，该直线与材料的弹塑性曲线的交点确定了材料的屈服强度。：

$$\sigma_y = E(\varepsilon_y - 0.002) \dots \dots \dots (7)$$

式中：

ε_y ——压痕屈服强度值时的真应变。

对于在役时间较长的承压设备材料，屈服强度的变化是评估材料劣化程度的重要指标，应给予特别关注。通过对比同一材料不同服役时间的屈服强度变化，可以评估材料的使用寿命和安全状况。对于重要设备，建议结合其他检测方法，如超声检测、金相检测等，全面评估材料的性能状况。

9 试验结果的不确定度

9.1 方法一：单一不确定度

这种确定不确定度的方法只考虑了与标准样品有关的试验机总体测量性能相关的不确定度，这些性能的不确定度(通过间接验证)反映了所有单独的不确定度的综合效果。重要的是，在试验过程中使用此方法，单个机器组件采用完全相同的方法用来估计不确定度间接验证的公差。

9.2 方法二：合成不确定度

这种方法考虑每个参数对不确定度的影响来计算合成不确定度，合成不确定度可分为随机不确定度和系统不确定度。单个参数对总不确定度可以贡献一种或两种类型的不确定度。例如，测量位移的不确定度可分为由于所用位移传感器的分辨率和振动噪声等产生的随机分量加上由于位移传感器标定的不确定的产生的系统分量。应考虑以下不确定度的来源：

- 零点的确定；
- 力和位移的测定(比如地基产生的本底噪声，包括环境条件波动和磁场强度变化等的影响)；
- 卸除试验力曲线的拟合方法；
- 热漂移速率；
- 由于表面粗糙度引起的接触面积的变化；
- 试验力和位移；
- 设备柔度；
- 压头面积函数的校准值；
- 上次校准后，由于设备温度变化和时间推移引起的校准值的漂移；
- 试样表面的倾斜度。

9.3 现场测试的不确定度

分别定量地给出所有的不确定度分量有时是不可能的。此时，可以采用试样的多次压入试验的统计分析来进行 A 类标准不确定度的评估。注意：可能与 A 类不确定度相关的 B 类不确定度不能被重复计算。对于在役承压设备的现场测试，额外的不确定度来源可能包括：

- 设备表面几何形状偏差；

- 现场环境波动（温度、湿度、振动等）；
- 便携式测试设备的稳定性；
- 操作人员的技能水平差异。

这些因素应在不确定度评估中加以考虑，以确保测试结果的可靠性和准确性。对于重要设备的测试，应采用多次重复测试的方法，计算测试结果的平均值和标准偏差，评估测试结果的可靠性。

10 试验报告

试验报告应包括如下内容：

- a) 本部分标准编号。
- b) 与试样有关的详细资料，包括设备名称、部位、材质、服役时间等。对于在役设备，还应包括设备运行条件（如温度、压力等）、历史维修记录、上次检测结果等信息，以便于对比分析和趋势评估。
- c) 所用压头的材料、形状和详细的面积函数。
- d) 试验循环（控制方法和试验过程的完整描述），包括：
 - 1) 设置点的值；
 - 2) 试验力或位移的施加速率和施加时间；
 - 3) 试验力或位移保持恒定的开始位置和持续时间；
 - 4) 试验循环中每阶段数据的采集频率或采集的数据量。
- e) 试验结果，总的扩展不确定度和试验次数。对于现场测试，应说明环境条件对测试结果的影响及采取的防护措施。
- f) 确定零点的拟合方法和函数。对于曲面试样，应说明曲率修正的方法和依据。
- g) 本部分规定以外或本部分可选的各项操作。
- h) 各种可能影响试验结果的细节。包括但不限于表面处理方法、表面粗糙度、环境干扰因素等。
- i) 试验温度和环境条件。
- j) 试验日期和时间。对于需要长期跟踪的设备，应建立测试日期与设备运行时间的对应关系，便于评估材料性能的变化趋势。
- k) 分析方法和评估结果，包括硬度、模量、强度等参数的计算值。对于在役设备，应与设计值、上次检测结果等进行对比，评估材料性能的变化趋势。
- l) 如有要求，给出所有信息，包括从试验力-压入深度曲线上测定的数值和有关不确定估算的详细信息。
- m) 对在役设备安全状况的评估意见和建议。根据测试结果，结合设备的运行条件、设计要求和相关标准，对设备的安全状况进行评估，提出合理的使用建议和维护措施。对于发现异常的部位，应提出针对性的处理建议，如加强监测、局部修复、减载运行或停机检修等。
- n) 测试点位图和照片。为便于后续检测 and 对比分析，应提供测试点位的分布图和测试现场照片，清晰标明测试点的位置和编号。对于重要部位的测试，建议采用多角度拍摄，保留测试前后的表面状态记录。

注：通常要求试验报告中描述试样上压入的位置和设备的唯一标识信息(或测试所使用的设备具体设置)。