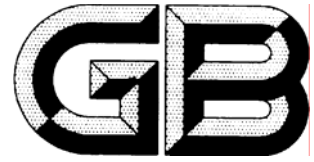


ICS 77.040.10
CCS H 22



中华人民共和国国家标准

GB/T 39635—2020

金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸 性能和残余应力

**Metallic materials—Measurement of indentation tensile properties and
residual stresses by an instrumented indentation test**

(ISO/TR 29381:2008, Metallic materials — Measurement of mechanical
properties by an instrumented indentation test — Indentation tensile properties,
NEQ)

(报批稿)

2020-12-14发布

2021-07-01实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言.....	II
引言.....	III
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.....	4
6 试验机.....	9
7 试样.....	11
8 试验程序.....	11
9 结果的不确定度.....	12
10 试验报告.....	12
附录 A（资料性） 单轴拉伸性能和压痕拉伸性能的比较.....	13
附录 B（资料性） 钻孔法、切割法、X 射线衍射法和仪器化压入试验法测试残余应力的比较.....	16
参考文献.....	19

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。

本文件使用重新起草法参考 ISO/TR 29381:2008《金属材料 仪器化压入试验测定力学性能 压痕拉伸性能》编制，与 ISO/TR 29381:2008 的一致性程度为非等效。

本文件与 ISO/TR 29381:2008 的主要差别如下：

- 修改标准名称为“金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力”，增加了测定残余应力部分，以指导仪器化压入试验方法进行压痕拉伸性能和残余应力的测定；
- 修改了范围，删除了 ISO/TR 29381:2008 第 1 章三种方法的叙述，增加了残余应力的叙述；
- 修改了术语和定义，增加了球形压头和维氏压头的术语和定义；
- 修改了符号和说明，增加了残余应力部分的符号和名称；
- 保留了 ISO/TR 29381:2008 的应力应变法 5.1.1 原理和 5.1.16 数据分析作为本文件的 5.1 压痕拉伸性能测量原理，调整了 ISO/TR 29318 附录 A 的 A.3 作为本文件的 5.2 为残余应力测量原理，并对内容进行修改；删除了没有应力应变法直接有效的有限元分析法和神经网络法的内容，增强了仪器化压入试验方法的可操作性；
- 增加了残余应力试验程序。

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：上海交通大学、冶金工业信息标准研究院、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、北京春秋阳光科技有限公司、浙江华电器材检测研究所有限公司、上海尚材验机有限公司、上海海关工业品与原材料检测技术中心、成都海光核电技术服务有限公司、宝山钢铁股份有限公司、北京时代之峰科技有限公司。

本文件主要起草人：余征跃、董莉、孙明成、许学龙、马恒、邓小伟、侯慧宁、卫志清、吴益文、苟渊、方健、陈天斌。

引 言

本文件给出了采用仪器化压入试验测定金属材料拉伸性能和残余应力的方法。以球形压头压入试样表面，同时测量压入试验力-深度曲线，通过该曲线来获取压痕屈服强度、抗拉强度和应变硬化指数，以此来表征金属材料的拉伸性能。分别以维氏压头和球形压头压入试样表面，对比测量有应力和无应力状态下金属材料的压入试验力-深度曲线，获得金属材料试样或构件的表面残余应力。

由于压头直径小和压入深度浅，仪器化压入试验方法是一种无损或微损的试验方法。尤其适用于对现场在役设备和构件无法切割或材料较小无法制作标准试样的情况下进行拉伸性能和残余应力的测定，在原材料快速检验、小试样检测和在役工程构件安全评估方面具有显著优势和广阔的应用前景。

与单轴拉伸试验相比，仪器化压入试验获取的压痕拉伸性能更多反映金属材料的局部性能，因此不能完全等同于单轴拉伸性能。但在无法进行拉伸试验时，该方法可以作为很好的补充和参考。

金属材料 仪器化压入法测定压痕拉伸性能和残余应力

1 范围

本文件规定了金属材料压痕拉伸性能和残余应力仪器化压入试验方法的术语和定义、符号及说明、试验原理、试验机、试样、试验程序、结果的不确定度和试验报告等。

本文件适用于金属材料压痕拉伸性能和残余应力的仪器化压入法测定。仪器化压入试验符合GB/T 21838.1的分类，属宏观范围，压入试验力为2 N~3 kN。

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—2019 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压入试验 第1部分：试验方法（ISO 14577-1:2015, IDT）

GB/T 21838.2 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压痕试验 第2部分：试验机的检验和校准（GB/T 21838.2—2008, ISO 14577-2:2002, MOD）

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

仪器化压入试验 instrumented indentation test

IIT

通过连续记录压头压入试样时的试验力-深度曲线来获得金属材料的力学性能的试验方法。

3.2

球形压头 spherical indenter

头部为球形的压头。

3.3

维氏压头 vickers indenter

顶端为两相对面夹角为 136 ° 正四棱锥金刚石压头。

3.4

压痕拉伸性能 indentation tensile properties

通过仪器化压入试验连续记录金属材料的压入试验力-深度曲线，通过建立应力应变关系所分析得到的拉伸性能，包括压痕屈服强度、压痕抗拉强度、应变硬化指数等。

注：单轴拉伸性能和压痕拉伸性能的对比关系，见附录A。

4 符号和说明

表 1 给出的符号适用于本文件，也可见图 1、图 2 和图 3。

表1 符号和说明

符号	说明	单位
A	接触面积	mm^2
A_s	残余应力状态下的接触面积	mm^2
a	考虑到弹性变形和凸起效应的真实接触半径	mm
a^*	只考虑弹性变形的接触半径	mm
b	材料的切线模量	N/mm^2
c	真应变与应变硬化指数之间的修正因子	—
d	维氏压痕对角线长度的算术平均值	mm
d_1	维氏压痕的对角线长	mm
d_2	维氏压痕另一条对角线长	mm
E_{IT}	压痕弹性模量	N/mm^2
F	压入试验力	N
F_C	在压缩残余应力状态下的试验力	N
F_{\max}	最大压入试验力	N
F_s	残余应力(压缩或者拉伸残余应力)状态下的试验力	mm
F_T	在拉伸残余应力状态下的试验力	N
H_{IT}	压痕硬度	N/mm^2
H_V	维氏硬度	N/mm^2
h	施加试验力作用下的压入深度	mm
h_c	压痕真实接触深度	mm
h_c^*	最大压入试验力 F_{\max} 作用下,只考虑弹性变形的压痕接触深度	mm
h_m	用来确定压入试验力所给定的压入深度	mm
h_{\max}	最大试验力作用下的最大深度增加h定义	mm
h_p	卸载后的残余压入深度	mm
h_{pile}	凸起-凹陷的表征量	mm
h_r	F_{\max} 处试验力卸载曲线的切线与压入深度坐标的交点处的深度(见图2)	mm
K	真应力和真应变关系式的强度系数	N/mm^2
k	压入试验力和维氏压入深度关系表达式	N/mm^2
$k_0^{r,t}$	无应力状态下压入试验力和维氏压入深度关系表达式	N/mm^2
k_0^r	无应力状态下参考部位压入试验力和维氏压入深度关系表达式	N/mm^2
k_0^t	无应力状态下目标部位压入试验力和维氏压入深度关系表达式	N/mm^2
l	在压头杆端部的球形压头长度	mm
n_{IT}	压痕应变硬化指数	—
p	某方向的残余应力与其正交方向的残余应力的比值	—
R	球形压头半径	mm
S	F_{\max} 处试验力卸载曲线切线的曲率	N/mm
s	两个随意接触半径的加载曲线曲率之比	—
α	维氏压头对面角的角度	°
ε_{IT}	压痕真应变	—
$\varepsilon_{IT,y}$	压痕屈服强度值时的压痕真应变	—
$\varepsilon_{IT,u}$	压痕抗拉强度值时的压痕真应变	—
η	确定非等轴残余应力的比例数	—
θ	球形压头和试样接触时接触角度的1/2	°
σ_{IT}	压痕真应力	N/mm^2
$\sigma_{IT,r}$	应变为0.08时的压痕强度,用仪器化压入试验测量	N/mm^2
$\sigma_{IT,y}$	压痕屈服强度	N/mm^2

$\sigma_{IT,u}$	压痕抗拉强度	N/mm^2
σ_{res}	残余应力	N/mm^2
$\sigma_{res,a}$	平均残余应力	N/mm^2
$\sigma_{z,d}$	沿压痕方向施加的剪切应力分量	N/mm^2
Ψ	平均接触压力与真应力的比值，塑性约束因子	—

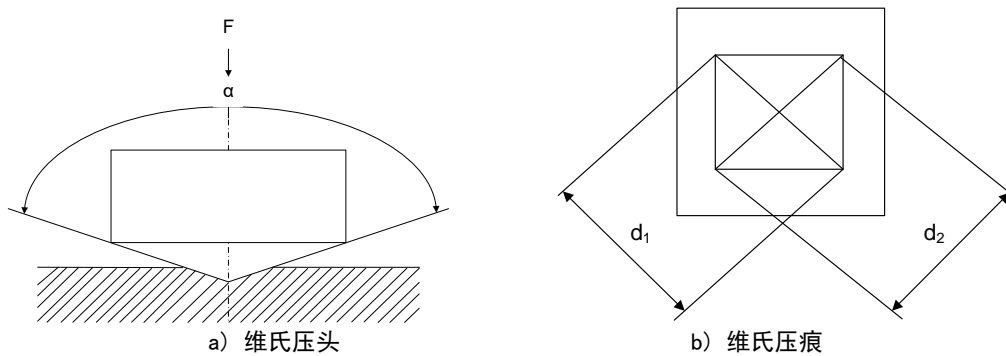
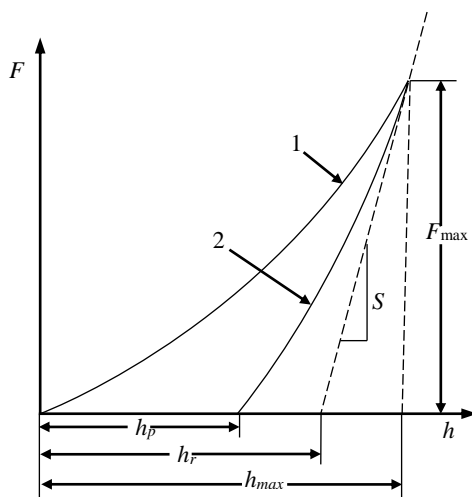


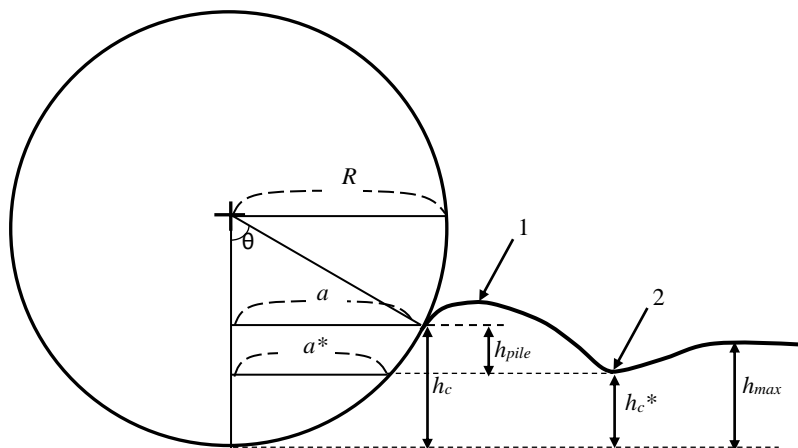
图 1 维氏压头和压痕



标引序号说明：

1——加载过程的压入试验力-深度曲线； 2——卸载过程的压入试验力-深度曲线。

图 2 仪器化压入试验方法获得的压入试验力-深度曲线



标引序号说明：

1——材料塑性堆积； 2——材料塑性凹陷。

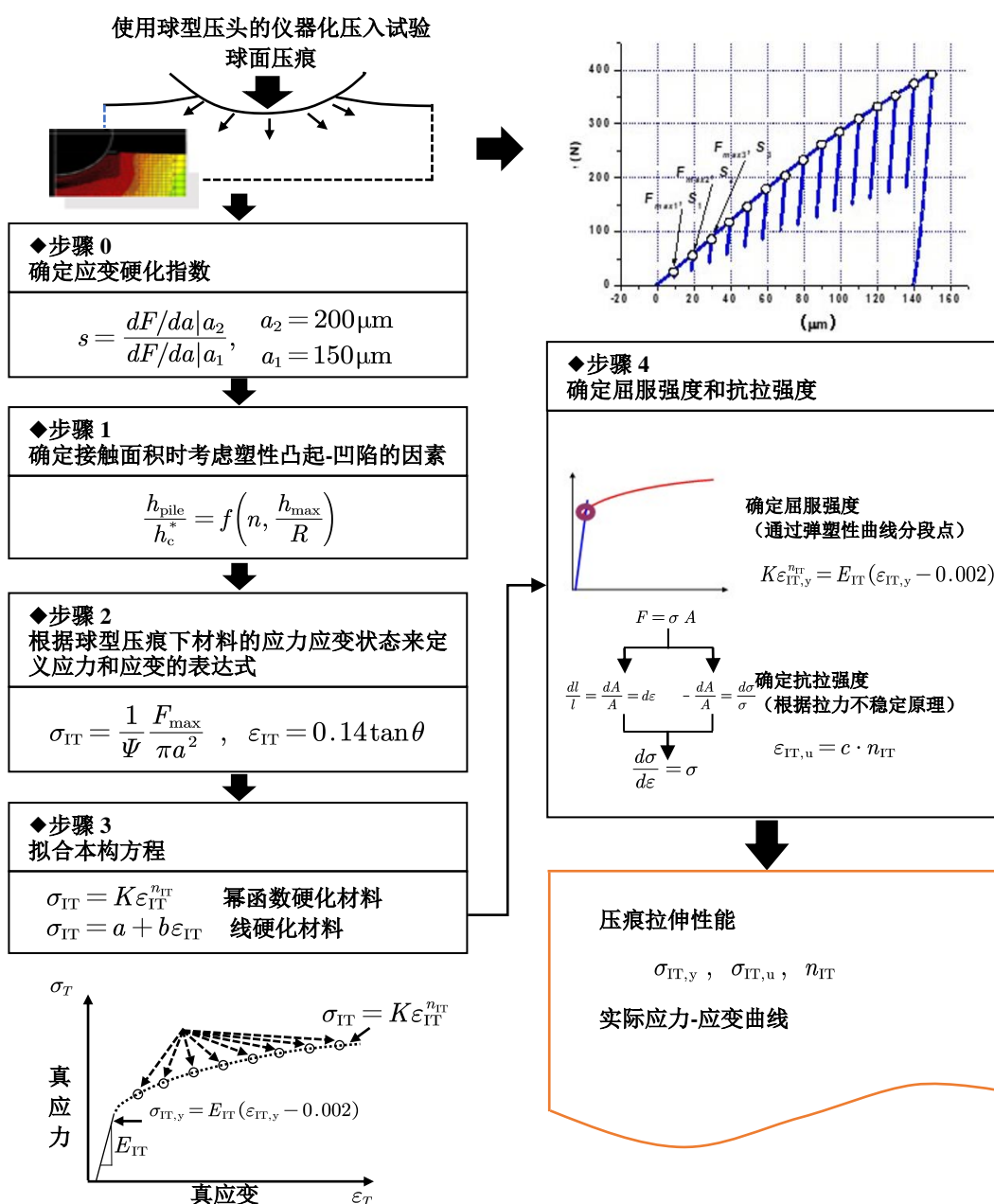
图 3 最大试验载荷下球形压头周围弹性和塑性变形（隆起）

5 原理

5.1 压痕拉伸性能测量原理

5.1.1 总则

仪器化压入试验法测定压痕拉伸性能原理如下：使用球形压头对金属材料表面施加试验力得到不同的压入深度（如图 3 所示），同时连续记录其压入试验力-深度曲线。压痕结果中表明了材料的应力应变关系。因此从压痕形状得到应变硬化指数和压痕半径，并通过几何关系获得表征真应变；通过压入试验力和压痕接触面积获得表征真应力；从而建立金属材料的表征真应力和表征真应变关系。并通过弹塑性曲线分段点确定压痕屈服强度，通过拉伸不稳定原理得到压痕抗拉强度。如图 4 所示。



说明:

π ——圆周率, 取3.1416。

图4 仪器化压入试验测定拉伸性能原理

5.1.2 确定压痕应变硬化指数 n_{IT}

5.1.2.1 考虑到压痕存在凸起-凹陷现象, 为了获得真实的接触半径 a , 首先需要获得压痕应变硬化指数 n_{IT} 。

5.1.2.2 在压入试验中, 压痕加载曲线的形状反映了被测试材料的硬化属性, 分析该曲线可以得到应变硬化指数—曲率比值 s 。 s 可以由两个任意压痕点的加载曲率之比得到, 并通过压入试验力 F 和接触半径 a 表示^[1], 见式(1)

$$s = \frac{dF/da|_{a_2}}{dF/da|_{a_1}} \dots\dots\dots (1)$$

5.1.2.3 这种方法得到的 n_{IT} 值与单轴拉伸试验得到的值具有很好的一致性(见A.2), 大多数金属材料该值的偏差在±20%以内。

5.1.3 确定真实接触半径 a

5.1.3.1 真实接触半径应在考虑到球形压头附近的弹性形变和凸起-凹陷现象之后进行修正。

5.1.3.2 当施加最大试验力时发生弹性形变而产生的接触深度 h_c^* 可由式(2)得到^[2], 如图1和图2所示。

$$h_c^* = h_{\max} - 0.75 \frac{F_{\max}}{S} \dots\dots\dots (2)$$

5.1.3.3 凸起-凹陷的表征量 h_{pile} 不仅随着应变硬化指数变化, 也与球形压痕的压入深度有关。有限元分析结果显示 h_{pile} 满足式(3)^[3]。最终考虑凸起-凹陷现象所得到的真实接触半径 a 可以由 h_c 得到($h_c = h_c^* + h_{pile}$), 而 $a = \sqrt{2Rh_c - h_c^2}$ 。

$$\frac{h_{pile}}{h_c^*} = f\left(n, \frac{h_{\max}}{R}\right) \dots\dots\dots (3)$$

5.1.4 确定真应力 σ_{IT} 和真应变 ε_{IT}

5.1.4.1 平均接触压力 P_m , 即仪器化压入试验时的试验力与接触面积的比值, 与完全塑性范围内和真应力之间存在比例关系^[4]。利用这个关系, 真应力可表示为式(4)。塑性约束因子 Ψ 取3.0, 这一值由数值分析得到(见A.3)。

$$\sigma_{IT} = \frac{P_m}{\Psi} = \frac{1}{\Psi} \frac{F_{\max}}{\pi a^2} \dots\dots\dots (4)$$

5.1.4.2 仪器化压入试验中测量球形压头下的剪切应变来推导真应变^[5, 6]。加入修正常数后, 仪器化压入试验中的真应变可以表示为式(5)。修正常数 ζ 取0.14, 由数值分析得到(见A.3)。

$$\varepsilon_{IT} = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - (a/R)^2}} \frac{a}{R} = \zeta \tan\theta \dots\dots\dots (5)$$

5.1.5 评价压痕拉伸性能

5.1.5.1 根据8.1的规定进行试验, 获得图5所示的压入试验力-深度曲线后, 可根据该曲线评估压痕拉伸性能。

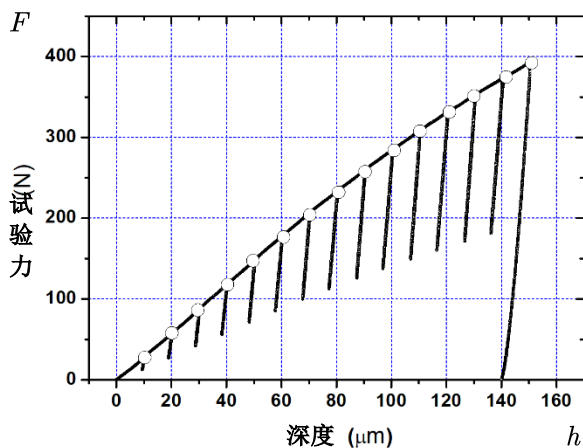


图5 仪器化压入试验得到的压入试验力-深度曲线

5.1.5.2 通过代入图5中每条卸载曲线的最大试验力 F_{max} 处的值得到真应力真应变数值。这些数据点应与幂硬化指数材料的关系式(6)或者线性硬化材料的关系式(7)所对应:

$$\sigma_{IT} = K \varepsilon_{IT}^{n_{IT}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_{IT} = a + b \varepsilon_{IT} \dots\dots\dots (7)$$

5.1.5.3 因为弹性模量是从仪器化压入试验中得到的^[2], 屈服强度就是弹性变形直线和塑性变形曲线的分段点。通常用0.2%的应变偏移量来确定屈服强度。真应变 $\varepsilon_{IT,y}$ 在压痕屈服强度处可以表示为式(8), 压痕屈服强度 $\sigma_{IT,y}$ 由式(9)确定(见A.4)。

$$K \varepsilon_{IT,y}^{n_{IT}} = E_{IT} (\varepsilon_{IT,y} - 0.002) \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_{IT,y} = K \varepsilon_{IT,y}^{n_{IT}} \dots\dots\dots (9)$$

5.1.5.4 抗拉强度出现在在颈缩发生前的最大应力处。基于拉伸不稳定性原理, 抗拉强度处的真应变 $\varepsilon_{IT,u}$ 可以由式(10)表示^[7]。尽管压痕抗拉强度处的真应变 $\varepsilon_{IT,u}$ 和应变硬化指数 n_{IT} 之间的线性关系已经验证, 但事实上不是完全线性关系。因此, 建议增加试验修正因子来获得准确的真应变 $\varepsilon_{IT,u}$ 。最后压痕抗拉强度 $\sigma_{IT,u}$ 由式(11)确定(见A.5)。

$$\varepsilon_{IT,u} = c \cdot n_{IT} \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma_{IT,u} = K \varepsilon_{IT,u}^{n_{IT}} \dots\dots\dots (11)$$

5.2 残余应力测量原理

5.2.1 总则

仪器化压入试验测定残余应力的原理如图6所示。当有应力目标部位和无应力参考部位的材料性能相同时, 使用维氏压头分别获得有应力目标部位和无应力参考部位的压入试验力-深度曲线, 通过比较得到同样压入深度下的试验力差, 从而获得目标部位的表面残余应力或平均残余应力。当两部位的材料性能不相同, 还需增加使用球形压头分别对两部位的压痕拉伸性能进行测量, 来修正无应力参考部位的压入试验力-深度曲线(压痕拉伸性能的测量见5.1)。

注: 本方法获得的残余应力为有应力目标部位的表面残余应力。无应力参考部位可以选取与目标部位相同材料的去应力试样或零应力标样。在现场试验时无法得到标样时, 可以选取应力较小处为无应力参考部位, 如焊接部位的远端。在无法确定参考部位是否有无应力时, 本方法获得的残余应力可认为是目标部位与参考部位之间的相对应力变化量。

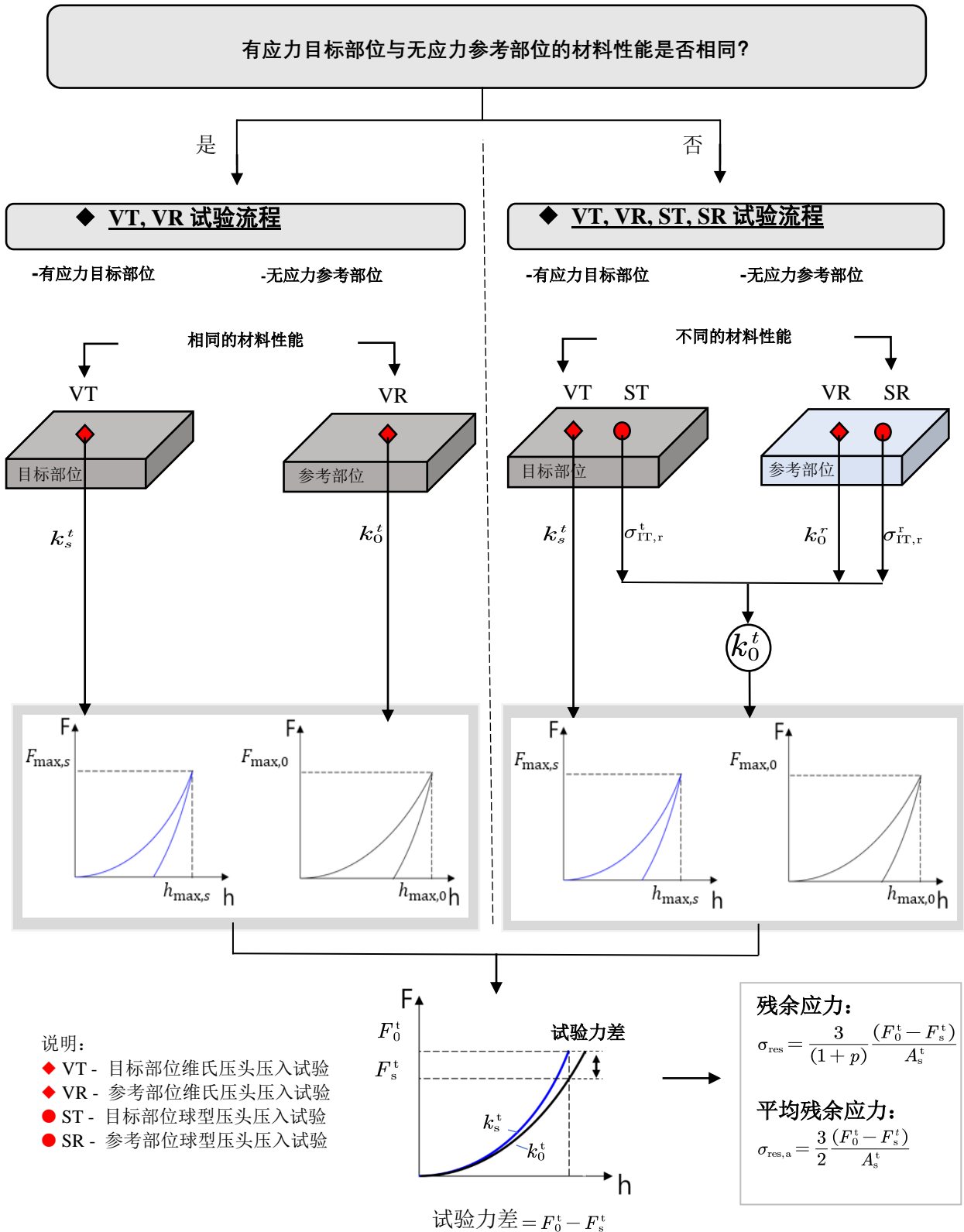


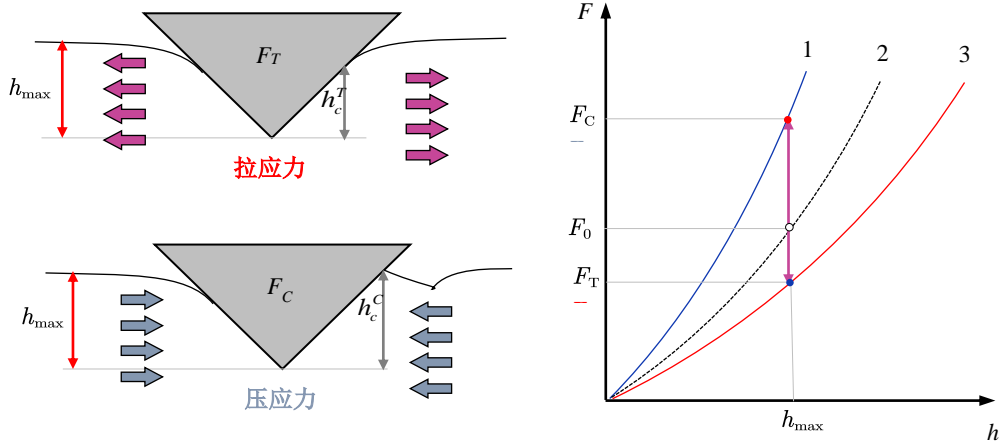
图6 仪器化压入试验测定残余应力的原理

5.2.2 残余应力下试验力-压入深度变化

5.2.2.1 材料存在残余应力时的压入试验力-深度曲线的曲率不同于无应力状态，受拉伸应力时其曲率小于无应力状态，受压缩应力时其曲率大于无应力状态，如图7所示。对于给定的压入深度，处于拉伸残余应力作用下的压入试验力比无应力状态下所需的小，处于压缩残余应力作用下则相反。通过压入

试验力之间的差值可以评价残余应力的大小^[8,9]。待测部位的残余应力 σ_{res} 与压入试验力之间的差值存在关系^[8],其关系如式(12)所示:

$$\sigma_{res} = \eta \frac{(F_0 - F_s)}{A_s} \dots\dots\dots (12)$$



a) 残余应力作用下的压入状态

b) 不同残余应力作用下的压入曲线

标引序号说明:

- 1——压应力下的压痕曲线;
- 2——无应力下的压痕曲线;
- 3——拉应力下的压痕曲线。

图 7 存在残余应力时压入试验力-压入深度变化

5.2.2.2 考虑金属材料产生非等方向二轴残余应力时,其中平行一个轴的残余应力设为 σ_{res} ,与其正交方向的残余应力为 $p\sigma_{res}$ (p 为实数)。假设垂直于材料表面方向(压入试验方向)无残余应力,只有两个方向上的残余应力 σ_{res} 和 $p\sigma_{res}$ 引起压入试验力-深度曲线的变化。两个方向应力可以分解为静水应力和偏应力。只有偏应力部分 σ_d 施加在压痕测试方向(z)上为 $\sigma_{z,d}$ 。当压痕测试沿着 z 方向进行时, $\sigma_{z,d}$ 会引起压入试验力-深度曲线的变化。具体的关系如式(13)所示^[8]:

$$\sigma_{z,d} = \frac{1+p}{3} \sigma_{res} = \frac{(F_0 - F_T)}{A_s} \text{ or } = \frac{(F_0 - F_C)}{A_s} \dots\dots\dots (13)$$

5.2.2.3 根据式(13)、式(12)可表示为式(14),从而用户可以确定平行于一轴方向的应力为 σ_{res} ,垂直于该方向的其他应力为 $p\sigma_{res}$:

$$\sigma_{res} = \frac{3}{1+p} \frac{(F_0 - F_s)}{A_s} \dots\dots\dots (14)$$

5.2.2.4 压头和无应力状态下材料的真实接触面积由式(15)确定。

$$h_c = h_{max} - 0.75 \frac{F_{max}}{S} \dots\dots\dots (15)$$

5.2.2.5 将式(15)带入式(16),压痕硬度可以表达为:

$$H_{IT,0} = \frac{F_0}{24.5h_c^2} \dots\dots\dots (16)$$

5.2.2.6 残余应力对硬度影响可以忽略^[2,8,9],可用无应力状态下的硬度来计算残余应力作用下的真实接触面积,如式(17):

$$A_s = \frac{F_s}{H_{IT,0}} \dots\dots\dots (17)$$

5.2.3 残余应力测量

5.2.3.1 压入试验力-深度曲线的测量

用维氏和球形压头分别对有应力目标部位和无应力参考部位进行仪器压入试验，分别得到每个部位的压入试验力-深度曲线。维氏压头测量的压入试验力-深度曲线按式（14）确定压入试验力差和接触面积。球形压头测量的压入试验力-深度曲线用于评价压痕拉伸性能。

注：无应力是指没有残余应力的状态。

5.2.3.2 目标部位无应力状态下的压入试验力-深度曲线的推导

5.2.3.2.1 由维氏压痕获得无应力状态下的压入试验力-深度曲线，其关系可以表示为式（18）：

$$F = k_0^{r,t} \cdot h^2 \dots\dots\dots (18)$$

5.2.3.2.2 在无应力状态下的参考部位，通过拟合式（18）所表示的维氏压痕的压入试验力-压入深度，可测得无应力状态下的压入试验力-深度曲线（ k_0^r ）。

5.2.3.2.3 对于在役的焊接部位，技术上很难直接通过维氏压痕来得到无应力状态下的压入试验力-深度曲线。为了减小这种局限性，推导出如下目标部位的无应力状态下的压入试验力-深度曲线（ k_0^t ）。

$$k_0^t = k_0^r \cdot \frac{\sigma_{IT,r}^t}{\sigma_{IT,r}^r} = k_0^r \cdot \frac{H_V^t}{H_V^r} \dots\dots\dots (19)$$

注1： $\sigma_{IT,r}$ 为仪器化压入试验中应变0.08时对应的应力值。

注2： k_0^r 由无应力状态的参考部位（母材金属）的维氏压入试验获得。

注3：可以用维氏硬度的比值替代应变0.08时的应力比值。

5.2.3.2.4 $\sigma_{IT,r}^r$ ， $\sigma_{IT,r}^t$ 可从5.1中球形压入试验中获得。因为残余应力对压痕拉伸性能没有影响^[10]，所以通过式（19）中的 $\sigma_{IT,r}^r$ ， $\sigma_{IT,r}^t$ 和 k_0^r ，可以推导出目标部位无应力状态下的压入试验力-深度曲线（ k_0^t ）。

5.2.3.3 非等方向二轴残余应力测试

有应力状态目标部位的维氏压入试验力-深度曲线是通过5.2.1得到，目标部位无应力状态下的维氏压头压入试验力-深度曲线通过式（18）和式（19）得到。因此能求出测量残余应力所必要的两种曲线的试验力差值。此外，维氏压头和材料之间的接触面积是通过式（17）求得。将试验力差值和接触面积带入式（20）求得拉伸或者压缩残余应力，得到残余应力 σ_{res} 。在式（20）中，两向应力状态时 p 取1.0，单向状态时 p 取0，焊接部位的 p 取1/3。根据努氏压头的正交两向异性形状，使用努氏压头进行额外的压入试验来确定 p 值。在不能判断 p 的取值时，可以用平均残余应力表示，如式（21）。将式（20）代入式（21）后得到式（22）平均残余应力的表达式，可见平均残余应力与 p 值无关。

$$\sigma_{res} = \frac{3}{(1+p)} \frac{(F_0^t - F_s^t)}{A_s^t} \dots\dots\dots (20)$$

$$\sigma_{res,a} = \frac{1}{2} (\sigma_{res} + p\sigma_{res}) \dots\dots\dots (21)$$

$$\sigma_{res,a} = \frac{3}{2} \frac{(F_0^t - F_s^t)}{A_s^t} \dots\dots\dots (22)$$

6 试验机

6.1 试验机应能够提供本文件范围内的试验力，并应符合GB/T 21838.2的要求。试验力校准应采用可溯源的方法测量。用校准过质量的砝码通过机械效益加一个准确到±0.2%以内的力，使该力与被测试

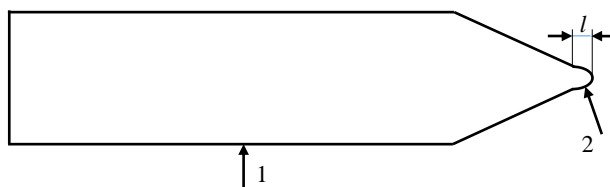
验力相平衡；对于用于校准的每个测量点，测量值和标称试验力之间的差值应在 $\pm 1.0\%$ 的允差范围内。

6.2 试验仪器能够在测试循环中测量和记录压入试验力、压入深度以及时间。

6.3 测量压入深度的试验机应能测量500 nm或以下的压入深度的能力。所要求的位移校准装置的分辨力取决于要测量的最小压入深度的尺寸，其分辨率不得大于100 nm。

6.4 在测量压痕拉伸性能时使用球形压头，在测量残余应力时使用维氏压头和球形压头。

6.5 所用的球形压头，最好将球形压头和压头柄做成一体来减小试验误差（见图8）。压头柄尽可能减小试验机的柔度，并与试验机紧密连接。



标引序号说明：

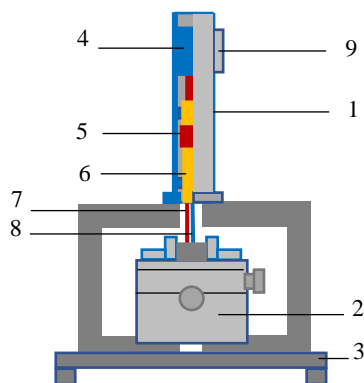
- 1——压头柄；
2——球形压头。

图8 完整的球形压头

6.6 球形压头应用碳化钨或者比测试材料刚度大得多的材料制作。对完整的球形压头，与图8中一致的球形压头部分长度 l 应与球形压头半径一致。球形压头的直径为0.5 mm~1.0 mm。

6.7 试验机应在8.1中所表述的允许温度范围内使用，因温度变化引起的压入深度位移偏移不得大于500 nm，其最大允差为1%h。

6.8 为满足不同试验需求，建议使用基础试验台固定主机单元进行试验。主机单元应包括：驱动电机、力传感器、传力装置、位移传感器、压头柄和压头以及连接计算机接口等，如图9所示。在现场可以根据实际情况使用U型夹具、V型夹具、磁性座、链条或者机器臂来牢固固定主机单元后进行试验。



标引序号说明：

- | | | |
|---------------|----------|-------------|
| 1——主机单元； | 4——驱动电机； | 7——位移传感器； |
| 2——试样夹持及移动单元； | 5——力传感器； | 8——压头柄和压头； |
| 3——基础试验台； | 6——传力装置； | 9——连接计算机接口。 |

图9 仪器化压入试验机示意图

7 试样

7.1 试样表面与压头接触部位不应有氧化物、异物、润滑剂等。为确保试验结果的重合度，试样测试表面应进行细砂打磨处理，建议使用600目以上的砂纸进行打磨。压入试验方向应与试样测试表面垂直，偏差小于 1° 。

7.2 制备试样时应使由于过热或冷加工等因素对试样表面硬度的影响减至最小。

7.3 为减小试样固定件对测试结果等影响，试样应足够厚或压入深度足够小。按照GB/T 21838.1—

2019中6.3要求，试样厚度应加工为最大压入深度 h_{\max} 的10倍以上或者压头半径的3倍以上。

8 试验程序

8.1 一般要求

8.1.1 记录试验温度。除非另有规定，试验一般在-10 °C~40 °C范围内进行，对于温度要求严格的试验，试验应在23 °C ± 5 °C进行。为了减少在试验过程中温度的变化对压入深度的影响，试验仪器和试样的温度在一个测试循环中要保持稳定。

8.1.2 使用合适的试样夹持工具固定试样，尽量避免对刚度产生影响。在对被测结构件进行试验时，试验机与被测结构件之间应紧密固定，两者之间应没有间隙。

8.1.3 每次试验之前都应重新设置压入试验力-深度曲线的接触零点位置。接触零点的偏差小于最大压入深度的1%。接触零点（基准接触点）是GB/T 21838.1—2019中7.3方法2所规定的试验初期压入试验力开始增加点。在接触零点位置上，试验力增加量应最小。

注：常用的最小试验力增加量为 $10^{-2} F_{\max}$ 。

8.1.4 试验过程中，试验机应远离振动、空气流动和温度变化等能显著影响试验结果的因素。

8.2 拉伸性能试验程序

8.2.1 循环加载试验可以选用压入深度控制或者压入试验力控制，推荐使用压入深度控制试验机。

注 1：压入深度的增加-减少速率、压入试验力加载-卸载速率、压入试验力保持时间、压入深度保持时间等和试验仪器的驱动能力和材料的特性有关，所以在取用试验曲线中以重合度好的压入试验力-深度曲线。

注 2：推荐的试验条件为最大的压入比为 0.6，压入深度增加-减少速率为 5 μm/s，压入深度的保持时间为 0.5 s，试验力卸载率为 30 %，建议采用的试验力加载-卸载次数为 10~15 次。使用者可以根据实际情况调整上述试验条件。

注 3：最大压入深度比是最大压入深度和压头半径的比值。最大压入深度设定时考虑到了压头的半径，因为这样可以获得一致的真应变，见 5.1.4.2。

注 4：一些有偏差的试验力卸载曲线应该记录在试验中。试验力卸载量取决于试验力卸载率。每个有偏差的试验力卸载曲线起始于同一个区间。

8.2.2 任一压痕中心与试样边缘的距离至少应为压痕直径的 3 倍，两相邻压痕中心的距离至少应为最大压痕直径的 5 倍。

注：压痕直径指投影球形压头产生的压痕时所形成的圆形直径。

8.3 残余应力试验程序

8.3.1 试验周期采用压入深度控制或者压入试验力控制。推荐使用压入试验力控制试验机。

注 1：卸载开始位置的定义是以卸载开始时的压入试验力（采用压入深度控制方式为深度）除以最大压入试验力（采用压入深度控制方式为深度）而得到值。

注 2：考虑到试验机的驱动系统和材料特性，压入试验力-深度曲线重合度好的话，位移（试验力）加载和卸载率，保持时间的长度需要记录下来。通常来说，位移（试验力）加载和卸载率，保持时间的长度在一次试验周期的每步中变化不大。

8.3.2 建议最大试验力为 50 kgf。

8.3.3 试验中维氏压头的使用见表 2，或见 GB/T 21838.1—2019 中 7.7 的规定。

表 2 维氏压痕的位置

名称	参数
两个最近的维氏压痕的几何中心距离	大于 $3d$
压头压痕中心到压痕边缘的距离	大于 $2.5d$
注： d 为两条对角线 d_1 和 d_2 的算术平均值。	

9 结果的不确定度

一份完整的不确定度评估是根据JJF 1059.1—2012测量不确定度评定与表示得到。不确定性可以分为以下两类：

a) A型不确定度包括：

——零点设置；

- 压痕载荷和压头位移的测量；
 - 压痕载荷卸载曲线的重合度；
 - 试验条件的选择。
- b) B型的不确定度包括：
- 试验机的载荷和位移；
 - 试验机的柔度；
 - 球形压头的直径（半径）；
 - 试样表面的倾斜度。

10 试验报告

试验报告应至少包括以下信息，除非双方另有约定：

- a) 本标准编号；
- b) 试样的详细说明；
- c) 压头的材料和直径（或半径）；
- d) 试验条件（拉伸性能测量见8.2.1，残余应力测量见8.3.1）；
- e) 试验中接触零点的调整方法；
- f) 不在本文件规定中或者可选的所有试验操作；
- g) 试验温度；
- h) 试验日期和时间；
- i) 控制类型（试验力或位移）；
- j) 试验力（或位移）加载速率和卸载速率；
- k) 每个试验力保持时间的长度和位置；
- l) 试验力卸载的起始位置；
- m) 最大试验力、最大压入深度或最大位移；
- n) 试验力卸载速率；
- o) 试验力卸载曲线数量；
- p) 数据采集频率（数据点的数量）
- q) 拉伸性能测量还应包括用来获取压痕拉伸性能的所有常数；
- r) 残余应力测量还应包括测点位置、残余应力分布；
- s) 试验结果，总的不确定度和试验次数；
- t) 如有需要，可提供从压入试验力-深度曲线中获得的数值。

附录 A

(资料性)

单轴拉伸性能和压痕拉伸性能的比较

A.1 概述

A.1.1 本附录给出了单轴拉伸试验测得的拉伸性能和本文件所介绍的仪器化压入试验所得到的压痕拉伸性能的信息。

A.1.2 由于压痕拉伸性能试验受本文件8.1所示试验条件的影响，应选择最佳的试验条件以与单轴拉伸试验保持一致。

注：为了对比两种试验方法所测的拉伸性能，仪器化压入试验的最优条件见8.2.1注2。这些参数的获得采用Taguchi方法中的信噪比，并随着材料的属性和试验条件有所差异^[11]。

A.1.3 在计算压痕拉伸性能例如屈服强度 $\sigma_{IT,y}$ ，抗拉强度 $\sigma_{IT,u}$ 和应变硬化指数 n_{IT} 时，参数的选择应见本文件5.1规定的修正常数 ζ ，塑性约束因子 Ψ ，屈服强度下的真应变 $\varepsilon_{IT,y}$ 和抗拉强度下的真应变 $\varepsilon_{IT,u}$ 。

A.2 曲率比值法来确定应变硬化指数

基于32种材料的两种固定值($a_1 = 150\mu\text{m}$, $a_2 = 200\mu\text{m}$)的曲率比值，通过仪器化压入法得到应变硬化指数。如图A.1所示，大部分金属材料的偏差在 $\pm 20\%$ 的范围内。

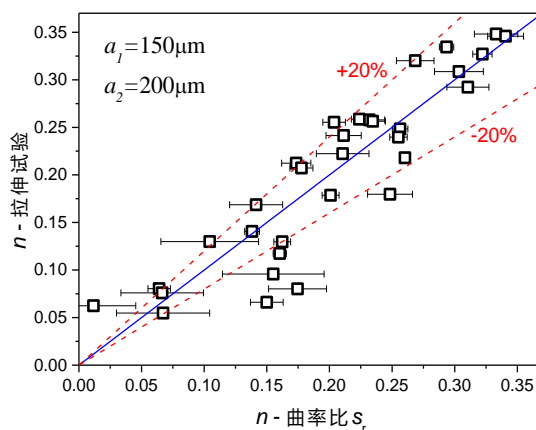


图 A.1 单轴拉伸获得的真应变 ε_u 和压入试验得到的应变硬化指数 n 之间的比较

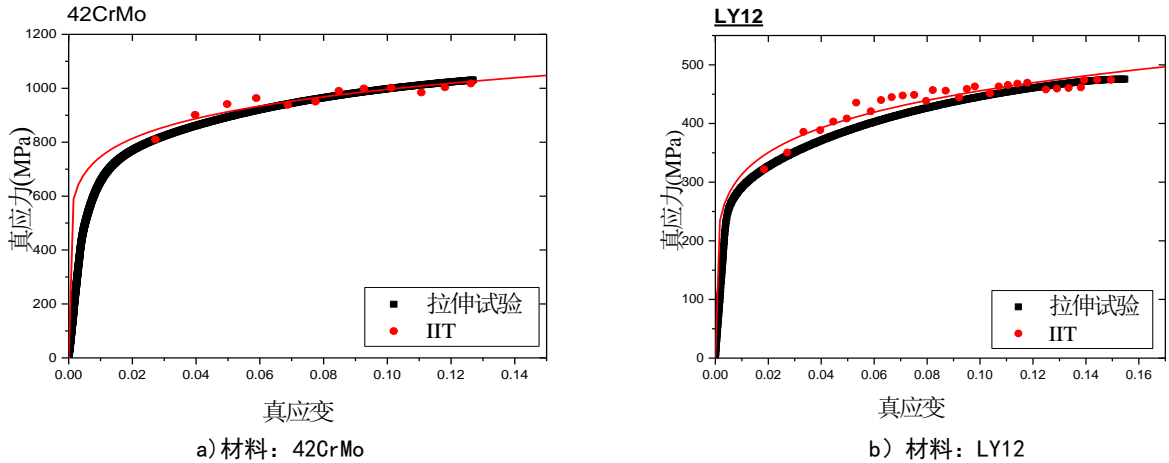
A.3 修正常数 ζ ，塑性约束因子 Ψ 的确定

A.3.1 基于对40种材料的有限元分析，包括钢材，非钢材还有理想幂化应变指数材料，修正常数 ζ ，塑性约束因子 Ψ 的确定流程可以见参考文献^[4, 12]。

A.3.2 考虑一下三种参数：弹性特性，应变变化程度和塑性特性。首先，弹性性质可以表示为屈服强度和弹性模量的比值，即屈服应变。其次，压入深度影响应变变化程度，因为应变随球形压痕的深度而变化。最后，塑性应变硬化指数，即塑性变形的应变硬化行为的程度。

A.3.3 塑性约束因子与弹性特性和不同应变水平两者都不全是调整常数。另一方面，当应变硬化指数不同时，塑性约束因子 Ψ 只有当 $\zeta = 0.14$ 时可以表示为一个恒定值大约3.0。塑性约束因子这个值是与早期研究一致的。图A.2显示了压痕拉伸曲线与单轴拉伸试验曲线的一致程度。所有压入试验的应力-应变数据点与单轴拉伸曲线得到很好地重合。

注：塑性约束因子随着修正常数的变化与应变硬化指数呈正相关或者负相关，但是修正常数为0.14时不存在这种现象。这意味着塑性约束因子可能是应变硬化指数的函数。



a) 材料: 42CrMo

b) 材料: LY12

图A.2 单轴拉伸曲线和压痕拉伸曲线的对比 ($\zeta = 0.14, \Psi = 3.0$)

A.4 真应变 ε_u 和应变硬化指数 n_{IT} 的比较和确定

如图A.3所示, 大约20种材料显示单轴拉伸所获得的真应变 ε_u 和曲率法所获得的应变硬化指数 n_{IT} 之间存在线性关系。经过试验得到的修正因子 $c = 0.7$, 可以得到精确的真应变 ε_u 。

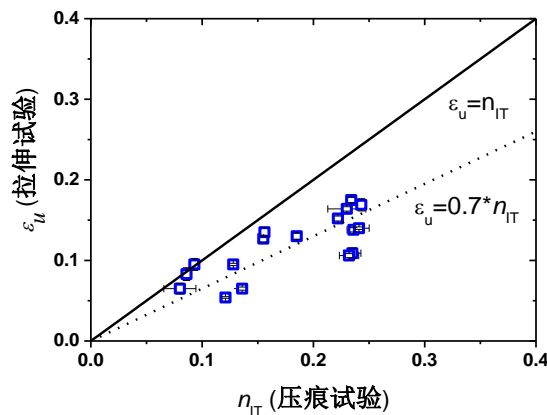
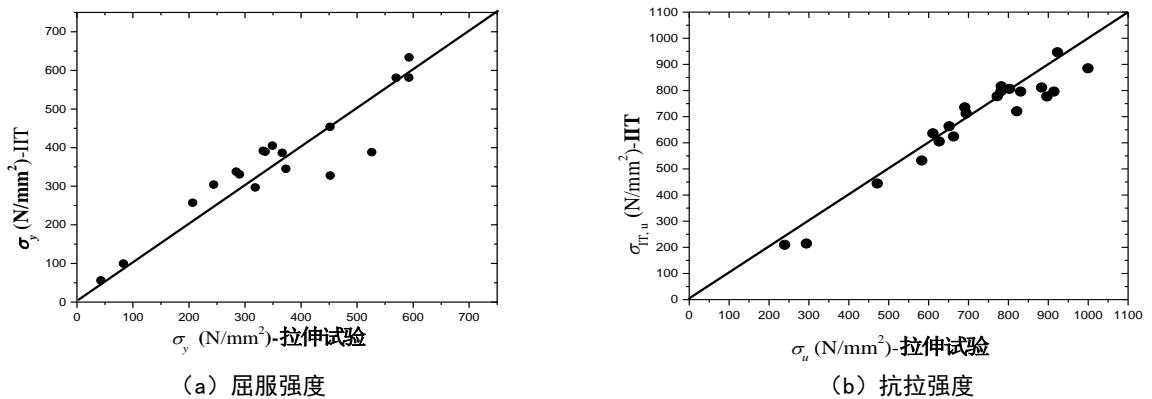


图 A.3 单轴拉伸获得的真应变 ε_u 和压入试验得到的应变硬化指数 n_{IT} 之间的比较

A.5 压痕屈服强度和压痕抗拉强度的验证

图A.4展示了仪器化压入法由式(9)和(11)测得的屈服强度和抗拉强度与单轴拉伸试验所测得的对比, 试验选用了20种金属材料(见表A.1), 包括钢材与非钢材。 $\varepsilon_{IT,y}$ 和 $\varepsilon_{IT,u}$ 分别由式(8)和(10)确定, 涉及到分段点和拉伸不稳定的情况。可见压痕拉伸性能与单轴拉伸性能的结果都较为一致。



(a) 屈服强度

(b) 抗拉强度

图A.4 仪器化压入法与单轴拉伸试验所测得的屈服强度和抗拉强度对比

表A.1 压痕拉伸性能与单轴拉伸性能对比所用的20种材料牌号

种 类	材料牌号			
碳素钢	20	45	Q235	—
合金钢	10Cr9Mo1VNbN	12Cr2MoG	15CrMo	—
模具钢	9CrWMn	42CrMo	4Cr5MoSiV1	—
工具钢	T9	T10	—	—
不锈钢	Y1Cr18Ni9	00Cr18Ni9	0Cr17Ni12Mo2	—
管线钢	L450	L485	—	—
有色金属	LY12	LF2	LC9	T2

附录 B (资料性)

钻孔法、切割法、X 射线衍射法和仪器化压入试验法测试残余应力的比较

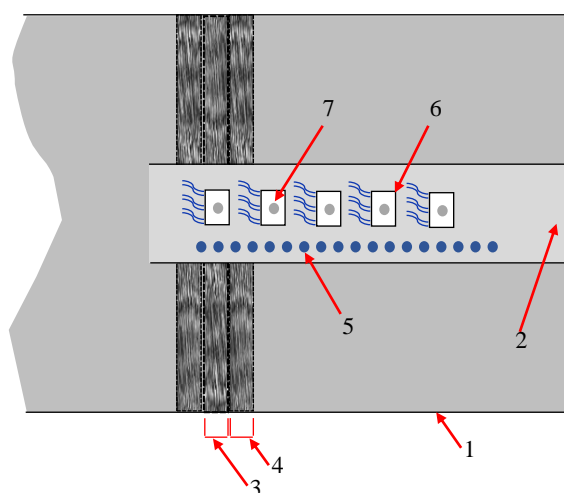
B.1 概述

本附录是通过常用的破坏残余应力测试方法中的钻孔法、切割法、X 射线衍射法测得的钢焊接部位残余应力和符合本文件的仪器化压入试验测得的残余应力相互比较的参考资料。

B.2 残余应力测试方法

B.2.1 钻孔法

表面打磨后，如图B.1所示粘贴钻孔用三轴应变计。用光学显微镜确定应变计中心的孔后打出8组的2mm深度的孔。观察各组的应变计的变化量来测试不同方向的残余应力(参见ASTM E 837^[13])。



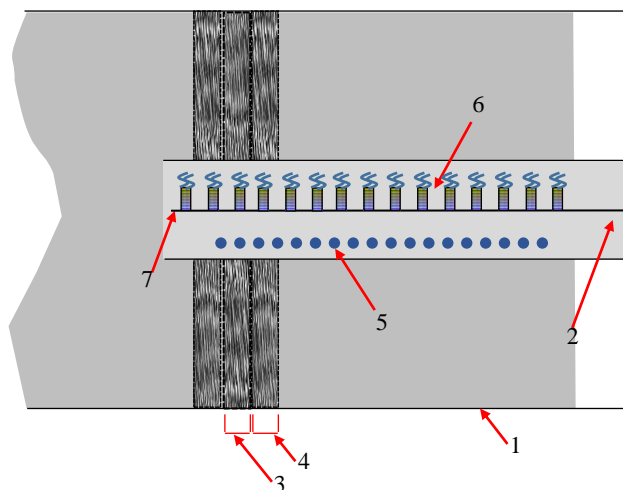
标引序号说明：

1——金属基材； 2——抛光面； 3——焊接金属； 4——热影响区；
5——压入试验； 6——三向应变片； 7——钻孔区。

图 B.1 焊接接头残余应力评定有效性试验(钻孔法)

B.2.2 切割法

切割试验是与焊接线垂直方向粘贴切割用应变计后进行试验。在切割过程中测试应变片的弯曲变形率，得到较为连续性的残余应力的变化。如图 B.2 所示。



标引序号说明：

1——金属基材； 2——抛光面； 3——焊接金属； 4——热影响区；
5——压入试验； 6——单向应变片； 7——切割线。

图B.2 焊接接头残余应力评定有效性试验(切割法)

B.2.3 X射线衍射法

X射线衍射法测量残余应力是一种无损检测方法，其原理是基于弹性力学及X射线晶体学理论。理想的多晶体在无应力的状态下，不同方位的同族晶面间距相等，而存在一定的表面残余应力时，不同晶粒的同族晶面间距随晶面方位及应力的发生有规律的变化，致使X射线衍射谱线发生位偏移，根据位偏移的大小即可计算残余应力。

B.3 不同残余应力测试方法结果比较

B.3.1 L450M/X65M 钢管（石油输送管道）

图B.3是对管线钢进行钻孔试验,切割试验,压入试验测试残余应力后的对比图。一般来说对金属的完整性有确定影响的焊接区和热影响区，仪器化压入方法测得的残余应力与另外两种方法有很好的一致性。特别的，焊料金属的最大拉伸和压缩残余应力与焊接部位的应力值有较好的一致性。

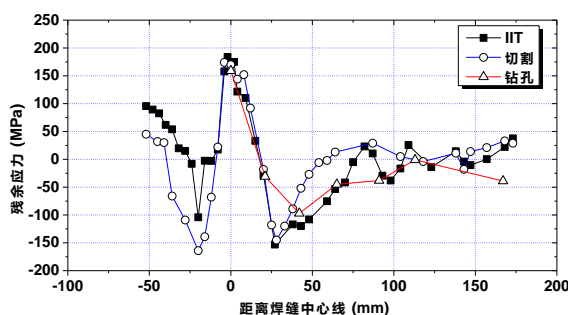


图 B.3 仪器化压入、钻孔和切割试验测试焊接接头残余应力对比（材料：L450M/X65M）

B.3.2 Q235A 结构用钢材（普通结构用钢）

如图B.4所示是对Q235A钢通过钻孔法，切割法，仪器化压入法测得残余应力对比图，由图表明其结果非常接近，重合度很高。

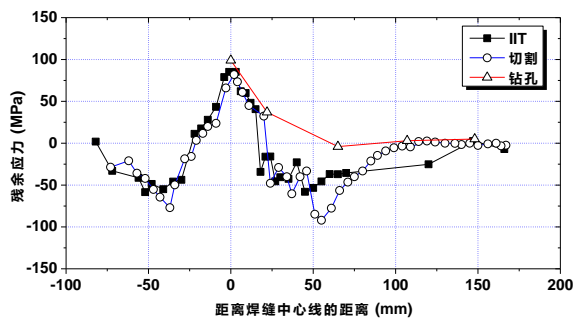
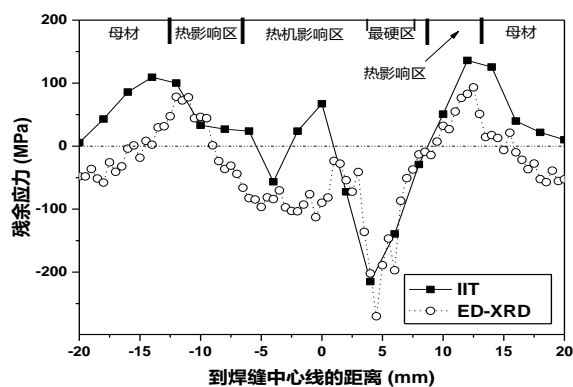


图 B. 4 仪器化压入、钻孔和切割试验测试焊接接头残余应力对比（材料：Q235A）

B. 3.3 L555M 钢管(石油输送管道)

如图B. 5所示是对L555M钢管通过仪器化压入法和X射线衍射法测得的残余应力对比图，由图表明其结果较为一致，重合度很高。



图B. 5 仪器化压入和X射线衍射（ED-XRD）试验测试焊接接头残余应力对比（材料：L555M）

参 考 文 献

- [1] Kang, Seung-Kyun, Kim, Young-Cheon, Kim, Kug-Hwan, Kim, Ju-Young, & Kwon, Dongil. Extended expanding cavity model for measurement of flow properties using instrumented spherical indentation. *International Journal of Plasticity*, 2013, 49, 1-15.
 - [2] Oliver, W.C, Pharr, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6):1564-1583.
 - [3] Kim S H, Lee B W, Choi Y, et al. Quantitative determination of contact depth during spherical indentation of metallic materials—A FEM study[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 415(1-2):59-65.
 - [4] D. Tabor, "The Hardness of Metals" Clarendon Press, Oxford, UK (1951).
 - [5] Ahn, Jeong-Hoon, Kwon, Dongil. Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations: Examination of strain definition and pileup effect. *Journal of Materials Research*, 2001, 16(11): 3170-3178.
 - [6] Ahn, Jeong-Hoon, Choi, Yeol, Kwon, Dongil. Evaluation of Plastic Flow Properties of Materials through the Analysis of Indentation Load-Depth Curve. *Journal of Korea Inst. of Metals and Materials*, 2000, 38(12): 1606-1611.
 - [7] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy* McGraw-Hill, London, UK (1988)
 - [8] Yun-Hee Lee, & Dongil Kwon. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. *Acta Materialia*, 2004, 52(6):1555-1563.
 - [9] Lee, Yun-Hee, & Kwon, Dongil. Residual stresses in dlc-si and au-si systems: application of a stress-relaxation model to the nanoindentation technique. *Journal of Materials Research*, 2002, 17(04):901-906.
 - [10] Swadener, J. G., Taljat, B., & Pharr, G.M. Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters. *Journal of Materials Research*, 2001, 16(07):2091-2102.
 - [11] E.C. Jeon, J.S. Park, and D. Kwon, Optimum definition of true strain beneath a spherical indenter for deriving indentation flow curves. *J. of Engineering Materials and Technology*, 2006, : 406(1-2):196-201
 - [12] J.R. Matthews. Indentation hardness and hot pressing. *Acta Metallurgica*, 1980, 28(3):311-318.
 - [13] ASTM E 837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method
-