

ICS 77.040.10
CCS F 22

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2220—2021

电站金属材料力学性能仪器化压痕法 检测技术规程

Technical specifications for instrumented indentation method for testing
mechanical properties of metal materials in power stations

2021-01-07 发布

2021-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
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	2
6 检测人员	3
7 检测设备及环境	3
8 检测程序	3
9 现场检测	4
10 记录及报告	5
附录 A (规范性) 压痕力学性能计算方法	6
附录 B (资料性) 电站常用金属材料力学性能	9
附录 C (资料性) 小于或等于 M30 的高强度螺栓连接副的机械性能和硬度	11
附录 D (资料性) 仪器化压痕法现场检测夹具及固定方法	12
参考文献	14

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。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由电力行业电站金属材料标准化技术委员会（DL/TC 23）归口。

本文件起草单位：国能锅炉压力容器检验有限公司、上海明华电力科技有限公司、大唐锅炉压力容器检验中心有限公司、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、国家能源集团新能源技术研究院有限公司、西安热工研究院有限公司、苏州热工研究院有限公司、湖南省湘电锅炉压力容器检验中心有限公司、广西电网有限责任公司电力科学研究院、上海沧能电力技术有限公司、北京春秋阳光科技有限公司。

本文件主要起草人：胡先龙、常青、段鹏、王家庆、孙明成、梁军、唐丽英、张国栋、杨湘伟、杜晋峰、梁世容、蒋云、许学龙、杨朝、王松、刘俊健。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

电站金属材料力学性能仪器化压痕法 检测技术规程

1 范围

本文件规定了采用仪器化压痕法对电站部件金属材料力学性能进行检测的方法和要求。

本文件适用的部件为管道、集箱、受热面管、容器、轴、紧固件、铸锻件、机架等，适用的测试载荷范围为 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 21838.2 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

DL/T 931 电力行业理化检验人员考核规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

仪器化压痕法 instrumented indentation method

通过仪器自动连续测量压头压入测试件的载荷和压痕深度来评价材料力学性能的测试方法。

3.2

载荷-深度曲线 force-depth curve

施加到压头上的载荷和压头在测试件表面垂直压入深度之间的关系曲线。

3.3

零点 zero point

压头初次接触试件且载荷为零时的载荷-深度曲线参考点。

4 符号和说明

本文件中力学性能测试所用到的符号和说明见表 1。

表 1 力学性能测试的符号和说明

符号	名称	单位
s	两个任意压痕点的加载斜率之比	—
a^*	只考虑弹性变形的接触面积半径	mm
a	考虑到弹性变形和堆积效应的真实接触半径	mm
F_{\max}	最大载荷	N
h_{\max}	F_{\max} 作用下的最大压痕深度	mm

表 1 (续)

符号	名称	单位
h_t	初载荷卸载曲线的切线与压痕深度坐标的交叉点 (见图 1)	mm
h_p	卸载后的残余压痕深度	mm
h_c	在 F_{\max} 时压头与被测件的接触深度	mm
h_c^*	F_{\max} 作用下, 只考虑弹性变形的压痕接触深度	mm
K	真应力和真应变关系式的强度系数	N/mm^2
n	应变硬化指数	—
S	F_{\max} 处载荷卸载曲线切线的斜率	N/mm
σ_T	真应力	N/mm^2
ε_T	真应变	—
σ_Y	压痕屈服强度	N/mm^2
ε_y	压痕屈服强度值时的真应变	—
σ_u	压痕抗拉强度	N/mm^2
ε_u	压痕抗拉强度值时的真应变	—
Ψ	平均接触压力与真应力的比值, 塑性约束因子	—
R	球形压头半径	mm
θ	球形压头和测试件接触时接触角度的 1/2	°
d	球形压头直径或维氏压头对角线长度	mm

5 原理

图 1 为压头压下时产生的载荷-深度曲线, 在同一位置, 多次加载和卸载能够产生多循环的载荷-深度曲线。图 2 为最大测试载荷下球形压头周围的弹性和塑性变形, 通过表征应力应变法将载荷-深度曲线转化成工程应力-应变曲线得到被测材料的屈服强度、抗拉强度。通过分析载荷-深度曲线得到材料强度性能的方法按照附录 A。

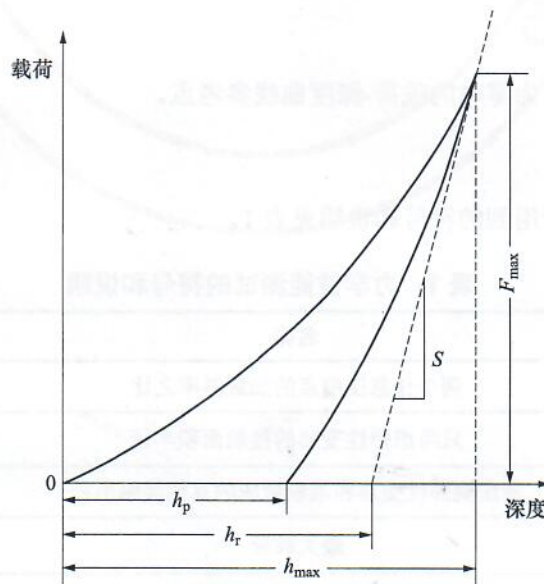


图 1 压头压下时的载荷-深度曲线

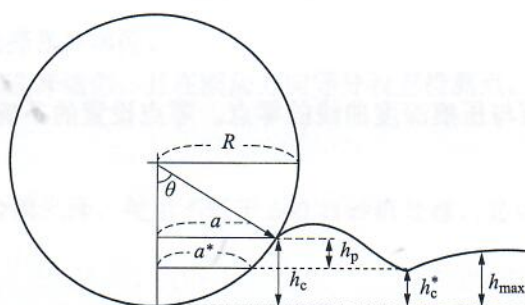


图2 最大测试载荷下球形压头压痕示意图

6 检测人员

检测人员应按 DL/T 931 的规定，取得力学性能Ⅱ级以上技术证书，且经过仪器化压痕检测方法的专门技术培训并合格。

7 检测设备及环境

7.1 检测设备

7.1.1 检测设备包括驱动装置、压头、载荷和深度测量装置及夹具等。要求如下：

- 驱动装置可对试件施加连续载荷，载荷误差范围宜在±1.0%以内。
- 球形压头宜选用碳化钨硬质合金，压头直径宜采用 0.5 mm、1 mm、2.5 mm；维氏压头宜采用金刚石正棱锥体压头。
- 检测设备能够连续采集和存储检测过程中的载荷、压痕深度数据。
- 夹具可采取底座、磁铁、链条等对测试件进行固定及位置调整。

7.1.2 设备的校准按照 GB/T 21838.2 执行。

7.2 检测试件

7.2.1 试件表面与压头接触区域不应有影响检测的氧化物、润滑剂等异物。

7.2.2 试件厚度不应小于压痕深度的 10 倍及压痕直径的 3 倍的较大值。

7.3 检测环境

7.3.1 检测过程中环境温度宜为 10℃~35℃，应相对稳定，温度波动幅度不超过±10℃。

7.3.2 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。

8 检测程序

8.1 检测设备的固定

试件应被牢固支撑，测试面法线与加载方向夹角不应大于 1°。

8.2 检测部位的选择

压痕位置与试件边缘或相邻压痕之间应保持足够的距离，见表 2。

表 2 检测位置要求

位置要求	球形压头	维氏压头
相邻压痕的几何中心距离	$\geq 5d$	$\geq 3d$
压痕中心到试件边缘的距离	$\geq 3d$	$\geq 2.5d$

8.3 零点设置

每次检测时都应设置载荷与压痕深度曲线的零点，零点设置的不确定度不宜超过最大压痕深度的1%。

8.4 检测程序

8.4.1 预测试

压头安装后，首次检测前应进行预测试，当不少于3条载荷-深度曲线基本重合后，可开始正常检测。

8.4.2 加载-卸载循环

试验循环采用控制压痕深度的方法。最大的压入比为0.6，压痕深度增加和减少速率均不大于 $5\ \mu\text{m}/\text{s}$ ，压痕深度保持时间不小于0.5 s，载荷卸载率为50%~70%，载荷的加载和卸载次数均不小于15次，试验曲线如图3所示。一般单个检测区域内，进行3次~5次检测。检测点之间距离满足8.2的要求。

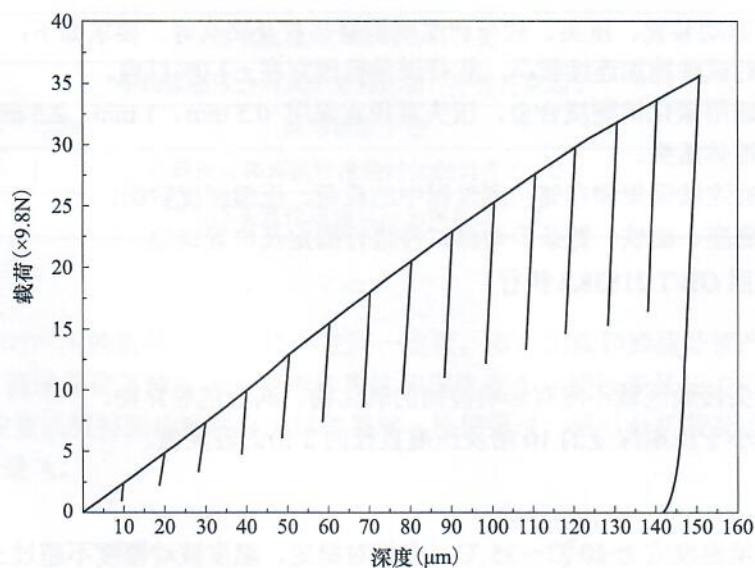


图3 压痕法测定的拉伸性能试验曲线

8.4.3 数据处理

按照附录A对试验数据进行处理。电站常用金属材料力学性能见附录B，小于或等于M30的高强度螺栓连接副的机械性能和硬度见附录C。

9 现场检测

9.1 检测位置的选择

- 检测管道、集箱、容器等部件的母材和焊缝时，可根据管件或筒节的规格大小在环向、轴向上等分设置检测点。测试焊接接头热影响区时，应进行抛光、腐蚀以区分不同区域。
- 检测汽缸、阀门、三通等铸锻件时，宜选择在应力集中区域。

- c) 检测紧固件时, 应选择光杆部位。
- d) 检测轴类部件时, 应选择端部, 且在圆周方向等分设置检测点。

9.2 表面处理

检测区域表面应打磨见金属光泽, 使用不低于 600 目砂纸处理, 必要时抛光。

9.3 夹具固定

- a) 夹具与检测设备固定应满足 8.1 的要求。
- b) 管道、集箱、容器等部件检测时一般选用链条固定, 见附录 D。当外径较大 (≥ 500 mm) 时, 也可选用曲面磁铁。检测设备底座与部件无法完全接触时, 可使用垫铁。
- c) 铸锻件检测一般选用曲面磁铁固定; 条件满足时, 也可使用链条固定。
- d) 水冷壁检测时可选用曲面磁铁固定。过热器、再热器等受热面管宜选用专用夹具, 如 V 形夹具, 见附录 D。
- e) 紧固件检测时宜选用 V 形夹具, 紧固件直径过小不满足夹具要求时, 可使用垫片。
- f) 轴类部件、塔架可选用链条或曲面磁铁固定。

9.4 检测

按照 8.4 进行检测。

10 记录及报告

检测记录及报告应给出检测的详细信息, 包括但不限于:

- a) 执行标准;
- b) 试件名称、材质、规格、热处理状态、运行时间等;
- c) 环境温度;
- d) 检测、报告日期;
- e) 仪器、压头类型及规格等;
- f) 试验循环控制方法;
- g) 最大压痕深度或最大试验载荷;
- h) 压痕深度增加和减少速率;
- i) 加载、卸载次数;
- j) 载荷卸载率;
- k) 载荷-深度曲线;
- l) 测试点部位 (附图);
- m) 试验、校对人员;
- n) 试验数据及结论。

附录 A
(规范性)
压痕力学性能计算方法

A.1 确定接触半径 a 和接触面积

采用应变硬化指数 n 的初值，根据载荷-深度曲线的深度值与卸载曲线的斜率，使用公式 (A.1) 计算接触深度 h_c^* 。

接触半径 a 是与接触深度 h_c 直接相关的。对于球形压头来说，根据几何关系可以得到未考虑修正的接触半径 a^* 和接触深度的关系。

$$a^{*2} = 2Rh_c^* - h_c^{*2} \dots\dots\dots (A.1)$$

采用卸载曲线计算接触深度，即

$$h_c^* = h_{\max} - h_d \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

- h_c^* ——未考虑堆积/沉降影响的接触深度；
- h_{\max} ——最大压深；
- h_d ——弹性压深，采用公式 (A.3) 计算弹性压深。

$$h_d = \omega(h_{\max} - h_r) \dots\dots\dots (A.3)$$

h_r 是卸载曲线的切线与深度轴的交点 (见图 A.1)， ω 是压头形状系数，考虑了卸载时接触面积的变化。对于平面压头 $\omega=1$ ，锥形压头 $\omega=0.72$ ，对于抛物线形压头 $\omega=0.75$ 。

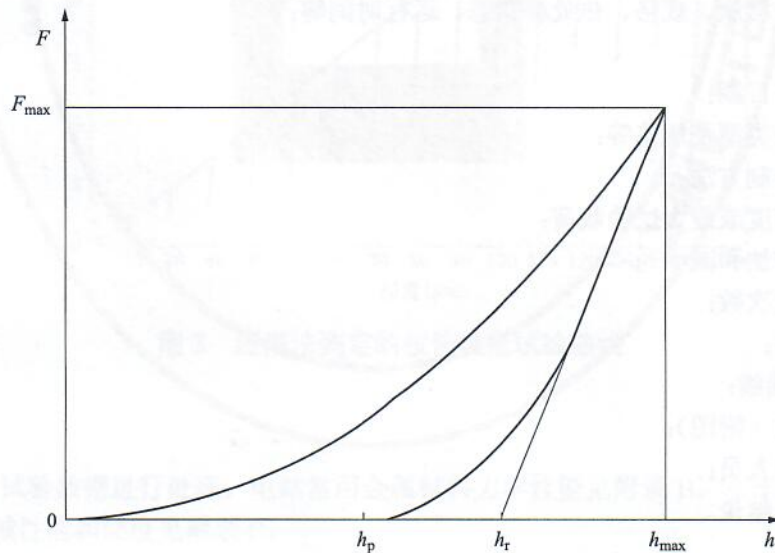


图 A.1 载荷-深度曲线

在计算接触半径和接触面积时，考虑材料堆积/沉降的修正办法，即

$$c^2 = \frac{a^2}{a^{*2}} = \frac{5}{2} \times \frac{2-n}{4+n} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$a^2 = \frac{5}{2} \times \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

- n ——材料的应变硬化指数;
- R ——压头半径;
- a ——接触面积的半径;
- a^* ——未经修正的接触半径。

A.2 确定表征应力和表征应变

根据公式 (A.6) 计算表征应变 ε_r :

$$\varepsilon_r = \alpha \frac{1}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} = \alpha \tan \gamma \quad \text{..... (A.6)}$$

式中:

- $\tan \gamma$ ——接触边缘的剪切应变;
- α ——与材料无关的常数, 推荐 $\alpha = 0.14$ 。

在完全塑性变形的情况下, 根据公式 (A.7) 计算表征应力 σ_r :

$$\sigma_r = \frac{1}{\Psi} \frac{F}{A} = \frac{1}{\Psi} \frac{F}{\pi a^2} \quad \text{..... (A.7)}$$

式中:

- Ψ ——塑性约束因子, 与塑性区的扩展程度有关, 即与材料屈服应变及应变硬化指数有关。
- 通过大量的工作, 塑性约束因子 Ψ 已确定, 建议 $\Psi = 3$ 。

A.3 确定材料弹塑性曲线

根据 A.2 所得的表征应力和表征应变的点, 按照公式 (A.8) 拟合得到材料的弹塑性曲线。如果所得的应变硬化指数 n 与初值不同, 则用所得的 n 值重复第一步至第三步的计算直至两者相同为止。

$$\sigma_y = E \varepsilon_y = K \varepsilon_y^n \quad \text{..... (A.8)}$$

式中:

- σ_y ——材料的屈服强度;
- ε_y ——材料屈服时对应的应变。

A.4 确定材料弹性模量

采用压痕法进行测试时, 金属材料的弹性模量与弹性接触刚度之间存在以下的关系式:

$$S = \frac{dF}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad \text{..... (A.9)}$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad \text{..... (A.10)}$$

式中:

- S ——弹性接触刚度, 也就是卸载曲线最初的斜率;
- F ——施加在压头上的载荷;
- h ——压头压入的深度;
- A ——压头与材料接触面的投影面积;
- E_r ——折算的弹性模量;
- E 、 ν 和 E_i 、 ν_i ——分别为材料和压头的弹性模量与泊松比。

A.5 确定材料屈服强度和抗拉强度

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。

$$\sigma_y = K \epsilon_y^n = E(\epsilon_y - 0.002) \dots\dots\dots (A.11)$$

材料的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。因此对工程应力函数求导为零时，所得到的工程应力为抗拉强度，此时真应变 $\epsilon = n$ ，抗拉强度 σ_u 计算公式为

$$\sigma_u = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

e ——自然对数的底， $e = 2.71828$ 。

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。



附录 B

(资料性)

电站常用金属材料力学性能

电站常用金属材料力学性能见表 B.1。

表 B.1 电站常用金属材料力学性能

牌号	抗拉强度 R_m MPa	下屈服强度 R_{el} 或规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa
20G	410~550	245
15CrMoG	440~640	295
12Cr1MoVG	470~640	255
10CrMo910	450~600	269~280
12Cr2MoWVTiB	540~735	345
10Cr9Mo1VNbN	≥ 585	415
1Cr18Ni9	≥ 520	205
1Cr19Ni11Nb	≥ 520	205
T/P11	≥ 415	205
T/P12	≥ 415	220
T/P22	≥ 415	205
T/P91	≥ 585	415
T/P92	≥ 620	440
TP304	515	205
TP304H	515	205
TP310H	515	205
TP310HCbN	655	295
TP316	515	205
TP316L	485	170
TP316H	515	205
TP347	515	205
TP347H	515	205
TP347HFG	550	205
35	510	265
45	637	353
20CrMoA	637	490
35CrMoA (>50 mm)	765	590
35CrMoA (≤ 50 mm)	834	686
42CrMoA (>64 mm)	790	660
42CrMoA (≤ 64 mm)	860	720

表 B.1 (续)

牌号	抗拉强度 R_m MPa	下屈服强度 R_{el} 或规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa
40CrMoVA	860	720
45Cr1MoVA	825	725
25Cr2MoVA	785	686
21Cr12MoV	800	600
25Cr2Mo1VA	785	686
20Cr1Mo1V1A	835	735
20Cr1Mo1VNbTiB	785	670
20Cr1Mo1VTiB	785	685
22Cr12NiWMoV (C-422)	930	760
18Cr11NiMoNbVN	930	760
20Cr11MoNiNbVN	900	780
14Cr11W2MoNiVNbN	930	760
12Cr10Mo1W1NiVNbN	1000	750
2Cr11Mo1VNbN	965	780
R-26	1000	555
GH4145	1000	550
1Cr11Co3W3NiMoVNbNB	890	620
2Cr11Mo1NiWVNbN	965	690
GH6783	1100	725

附录 C

(资料性)

小于或等于 M30 的高强度螺栓连接副的机械性能和硬度

螺栓的机械性能见表 C.1, 螺栓、螺母、垫圈的硬度规定见表 C.2。

表 C.1 螺栓的机械性能

性能等级	抗拉强度 R_m MPa	规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ MPa	断后伸长率 A %	断面收缩率 Z %	冲击吸收功 KU_2 J
10.9S	1040~1240	940	10	42	47
8.8S	830~1030	660	12	45	63

表 C.2 螺栓、螺母、垫圈的硬度规定

类别	性能等级	维氏硬度		洛氏硬度	
		min	max	min	max
螺栓	10.9S	min: 312HV30	max: 367HV30	min: 33HRC	max: 39HRC
	8.8S	min: 312HV30	max: 296HV30	min: 24HRC	max: 31HRC
螺母	10H	min: 222HV30	max: 304HV30	min: 98HRB	max: 32HRC
	8H	min: 206HV30	max: 289HV30	min: 95HRB	max: 30HRC
垫圈	—	329HV30~436HV30		35HRC~45HRC	

附录 D

(资料性)

仪器化压痕法现场检测夹具及固定方法

D.1 链条夹具

链条单元可相互拆卸、安装，根据测试件尺寸调整链条整体长度。先把底座放在测试件上，并保证检测位置基本位于底座中心，用螺栓将链条支架安装到底座两侧，与拉紧装置连接，并锁紧，防止设备在测试过程中晃动。之后把主设备安装在底座上，通过试运行来确定测试位置。如果测试位置不符合要求，可以通过可调节型底座进行调整，或重新进行附件连接步骤。链条夹具及连接方式示意如图 D.1 所示。

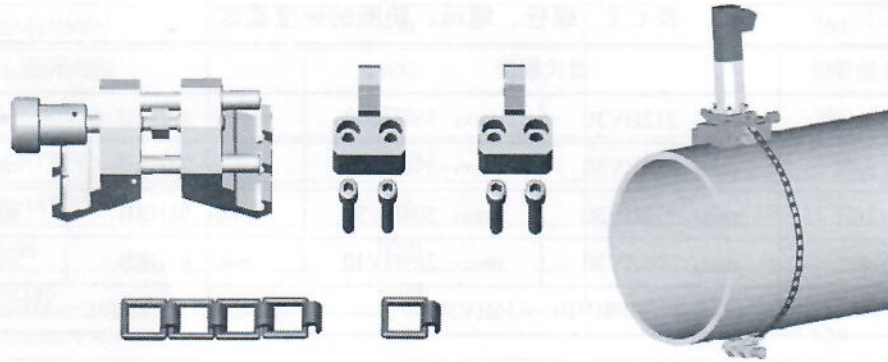


图 D.1 链条夹具及连接方式示意图

D.2 V形夹具

先把 V 形块底座放在水平面上，并保证 V 形块底座不晃动，将测试件放在 V 形块底座上，用螺栓将 V 形块支架安装到燕尾滑块底座两侧，与 V 形块底座相连接，并锁紧，防止设备在测试过程中晃动。之后把主设备安装在燕尾滑块底座上，通过试运行来确定测试位置。如果测试位置不符合要求，可以通过燕尾滑块底座进行调整，或重新进行附件连接步骤。V 形夹具及连接方式示意如图 D.2 所示。

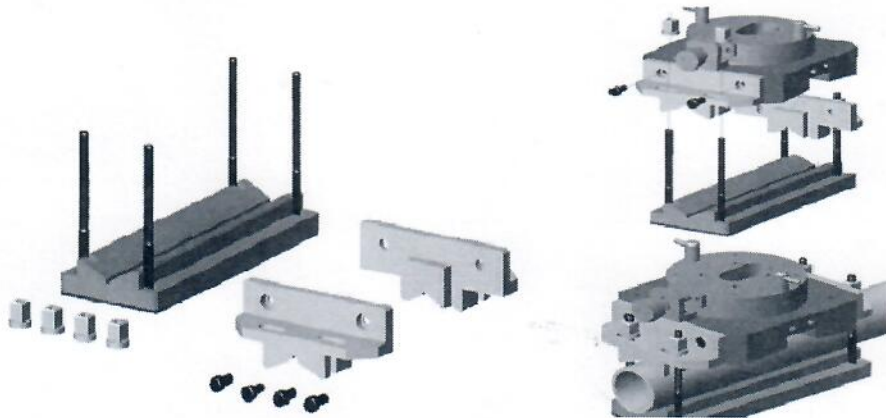


图 D.2 V形夹具及连接方式示意图

D.3 U形夹具

先把U形块底座放在水平面上，并保证U形块底座不晃动，根据测试件尺寸选择U形尺寸，将测试件放在U形块底座上，用螺栓将U形块支架安装到燕尾滑块底座两侧，与U形块底座相连接，并锁紧，防止设备在测试过程中晃动。之后把主设备安装在燕尾滑块底座上，通过试运行来确定测试位置。如果测试位置不符合要求，可以通过燕尾滑块底座进行调整，或重新进行附件连接步骤。U形夹具及连接方式示意如图D.3所示。

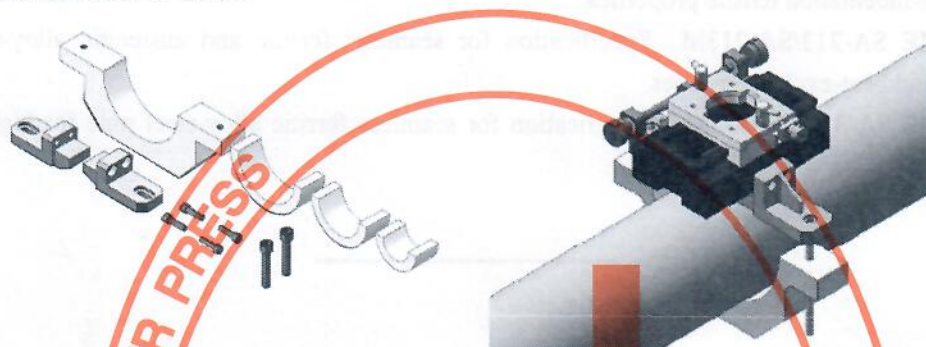


图 D.3 U形夹具及连接方式示意图

参 考 文 献

- [1] GB/T 5310 高压锅炉用无缝钢管
 - [2] DL/T 439 火力发电厂高温紧固件技术导则
 - [3] ISO/TR 29381 Metallic materials-Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test-indentation tensile properties
 - [4] ASME SA-213/SA-213M Specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat-exchanger tubes
 - [5] ASME SA-335/SA-335M Specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service
-

中华人民共和国
电力行业标准
电站金属材料力学性能仪器化压痕法
检测技术规程

DL/T 2220—2021

*

中国电力出版社出版、印刷、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

*

2021年10月第一版 2021年10月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 1印张 35千字

*

统一书号 155198·3118 定价 15.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电力出版社官方微信



中国电力百科网网址



电力标准信息微信

为您提供最及时、最准确、最权威的电力标准信息



155198.3118