

# 团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

## 钢制承压容器焊后热处理效果评价-硬度 检测

Evaluation of Post-Weld Heat Treatment Effect on Steel Pressure  
Vessels - Hardness Testing

(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

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 评价方法..... 2

5 评价要求..... 4

6 评价结果..... 6

附录A（规范性）使用者对硬度计的日常检查..... 7

附录B（规范性）硬度计支撑环的要求..... 8

附录C（规范性）硬度与强度的近似换算..... 9

参考文献..... 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、甘肃省特种设备检验检测研究院、广东省特种设备检测研究院、无锡化工装备股份有限公司、吉林市特种设备检验中心（吉林市特种设备事故调查服务中心）、四川科新机电股份有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、西子清洁能源装备制造股份有限公司、四川惊雷科技股份有限公司、茂名重力石化装备股份公司、东方电气集团东方锅炉股份有限公司、山东北辰机电设备股份有限公司、二重（德阳）重型装备有限公司、四川石油天然气建设工程有限责任公司。

本文件主要起草人：汤杰、田雨阔、钟丰平、李沧、杜渭翔、李绪丰、傅如闻、曹洪海、袁云中、裴荣国、孙小伟、李飞、徐奇、钱丹、钟正彬、尹锋、邓守峰、张松、朱永有、曹晨思、祁哲、蒋阳春。

# 钢制压力容器焊后热处理效果评价-硬度检测

## 1 范围

本文件规定了钢制压力容器制造及返修过程焊后热处理效果的硬度检测的评价方法、评价要求和评价结果。

本文件适用于锅炉、钢制压力容器（不含气瓶）制造、返修过程及投用后焊接接头热处理后的效果评价。

## 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 17394.1 金属材料 里氏硬度试验 第1部分：试验方法
- GB/T 17394.4 金属材料 里氏硬度试验 第4部分：硬度值换算表
- GB/T 30579 承压设备损伤模式识别
- GB/T 30583 承压设备焊后热处理规程
- GB/T 38751 热处理件硬度检验通则
- GB/T 50184 工业金属管道工程施工质量验收规程
- DL/T 752 火力发电异种钢焊接技术规程
- HG/T 20582 钢制化工容器材料选用规范

## 3 术语和定义

GB/T 3357-1994 和 GB/T 7232-2023界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**焊后热处理** post-weld heat treatment

为改善焊接接头的组织和性能或消除残余应力而进行的热处理措施。

### 3.2

**硬度** hardness

固体坚硬的程度，即矿物或材料抵抗其他物体刻划或压入其表面的能力。

### 3.3

**压力容器** pressure-bearing vessel

指能够承载内部或外部压力的密闭设备，主要用于盛装气体、液体等介质。

### 3.4

**合金钢** alloy steel

指以碳钢为基础，通过添加铬、镍、钼等特定合金元素以优化强度、韧性、耐腐蚀性或高温性能的碳钢衍生物。

### 3.5

**铬钼钢** Cr-Mo steel

指以碳钢为基础，通过添加铬（Cr）和钼（Mo）元素以显著提升高温强度、抗蠕变性能及耐腐蚀性的中低合金钢。

### 3.6

**检验** test

对实体的一个或多个特性进行诸如测量、检查、试验或度量，并将其结果与规定的要求进行比较，以

确定每项特性的合格情况所进行的活动。

### 3.7

#### 校准 calibration

规定条件下，先确定测量标准提供的量值与相应示值之间的关系，然后确定由示值获得测量结果的关系。

### 3.8

#### 检定 verification

查明和确认测量仪器符合法定要求的活动。

## 4 评价方法

### 4.1 一般要求

焊后热处理效果的评价可采用硬度检测、金相检验、残余应力测试等多种方法。本文件规定以硬度检测作为基础的和普适的评价方法。当出现第4.2.5条所述情况时，应启动辅助检测方法进行综合分析判定。

### 4.2 测试仪器要求

4.2.1 采用便携式里氏硬度计进行硬度检测。

4.2.2 在进行硬度测试前，硬度计应按照附录A进行检查。

4.2.3 硬度计按规定的检定周期进行检定，每年应不少于一次。

4.2.4 根据被测表面的形状，按照附录B选择合适的冲击装置支撑环，应使支撑环压紧在被测表面。

4.2.5 当仅凭硬度检测无法明确判定热处理效果，或出现以下情况之一时，宜启动金相检验、残余应力测试等其他方法进行综合判定：

- a) 硬度检测结果处于合格与不合格的临界值区域；
- b) 热处理后硬度值与工艺预期或历史数据存在显著偏差；
- c) 对重大、关键或采用新工艺的承压容器进行最终效果仲裁时；
- d) 硬度检测结果出现无法解释的异常离散。

### 4.3 测试环境要求

4.3.1 测试环境应清洁干燥、无振动、无腐蚀性气体。

4.3.2 测试场所的环境温度一般为10℃～35℃，记录测试时的温度。

4.3.3 应使用手持式高斯计（或同等功能的磁强计）测量测试部位的杂散磁场强度。当磁场强度超过 30 Gauss（或 3 mT）时，应采取磁屏蔽或消磁措施，直至磁场强度低于该限值后方可进行测试。

### 4.4 测试人员要求

测试人员应熟悉所用硬度计的测试原理、操作规程、测试方法、数据处理及相关热处理工艺，并经培训考核取得理化人员培训资格鉴定委员会颁发的Ⅱ级或Ⅱ级以上资格的人员。

### 4.5 测试表面要求

4.5.1 测试表面应打磨露出金属光泽、平整光滑，需要精心处理。

4.5.2 通过降低打磨转速、间歇打磨、采用水或压缩空气降温的方式避免由于打磨发热而造成硬度变化，通过多次轻磨或电解抛光、化学抛光方法避免在加工过程中由于加工硬化而造成硬度变化。具有脱碳层倾向材料的热影响区及母材应打磨掉表面脱碳层。

- 4.5.3 任何涂层、氧化皮、污物或者其他表面不规则性都需要完全清除。
- 4.5.4 测试表面不能有润滑剂。
- 4.5.5 对于不同冲击装置，测试位置的表面粗糙度参数的最大值应符合表1中的规定。

表1 推荐的表面粗糙度测试参数

| 硬度计冲击装置类型                                        | 测试表面粗糙度参数的最大允许值 |
|--------------------------------------------------|-----------------|
| D, DC, DL, D+15, S, E                            | 2.0 μm          |
| G                                                | 7.0 μm          |
| C                                                | 0.4 μm          |
| 注：如果测试表面太粗糙，将会出现不正确的测试结果。宜对测试表面进行加工和抛光，以达到表1的要求。 |                 |

4.6 测试部位和测试点数

- 4.6.1 测试部位应选择焊缝及其两侧热影响区及母材区域。
- 4.6.2 采用D型冲击装置测试时，测试部位厚度应大于5 mm。测试部位小于等于5 mm时，采用C型或G型冲击装置测试。
- 4.6.3 每个位置应进行五次的硬度测量，测点间距≥3~4mm，测点与边缘的距离≥5mm。五点硬度值去掉最大值和最小值，其余三点硬度值的算术平均值作为该位置的测量值。测量值相互之差应不超过20HB，但允许其中一个点不超出要求范围的5HB。若余下三点硬度值差异超过20HL（或10HB），需增加测试次数至结果稳定。
- 4.6.4 在硬度测试前，一般先测一点，以检验工作条件是否正常，该点不计入测试点数。
- 4.6.5 分别在焊缝、两侧的热影响区及两侧母材区各测量一组硬度值，每组五点硬度值，共计五组25点硬度值。
- 4.6.6 如果焊接接头存在超标缺陷需进行返修，应分别测量返修前与返修后的焊接接头硬度。
- 4.6.7 每条焊缝硬度测试数目按照沿焊缝方向均布原则，每3米或不足3米进行一次硬度测试。
- 4.6.8 当同炉热处理多样品时，每个样品应至少选择1个典型焊接接头进行测试。典型接头的选择应满足以下条件：
  - a) 位于设备应力集中区域（如封头与筒体连接处）；
  - b) 代表设备的最大厚度或最复杂焊接结构；
  - c) 若设备结构相似，按每炉设备总数的20%抽样（至少2台）进行测试。
- 4.6.9 根据热源类型（油、气、电）对加热均匀性的影响，测试点选择应遵循以下原则：
  - a) 油/气加热炉：在炉膛内不同温度区域（高温区、中温区、低温区）各选取1个焊接接头，每个接头按4.5.5规定测试；
  - b) 电加热炉：因温度分布较均匀，可减少至每炉至少2个焊接接头，均匀分布于炉内对称位置。
- 4.6.10 炉外整体与局部热处理测点选择：
  - a) 炉外整体热处理（如内燃法）：沿焊缝长度方向每5米布置1个测试接头，且每个容器不少于3个接头，覆盖容器轴向和环向焊缝；
  - b) 局部热处理（如电加热法）：在加热区域中心及边缘各选1个测试接头，并延伸至非加热区边缘的母材区域，每个接头按4.5.5规定测试。
- 4.6.11 每个容器或每炉次应至少选择3个焊接接头进行测试，优先选择以下接头：
  - a) 返修过的接头；
  - b) 厚度最大或合金含量最高的接头；
  - c) 承受高应力或腐蚀介质的接头。

#### 4.6.12 在同一接头上，测试位置应满足：

- a) 焊缝区域：沿焊缝中心线均匀分布，避开起弧和收弧点；
- b) 热影响区：距熔合线2 mm处；
- c) 母材区：距热影响区边缘10 mm处；
- d) 对于异种钢接头，需在两侧母材区分别测试，并增加熔合线附近测点。

### 5 评价要求

#### 5.1 一般要求

5.1.1 若设计图中对焊接接头硬度有要求，应按设计图要求对焊接接头热处理后效果进行评价。

5.1.2 为更科学地评价热处理效果，宜在热处理前后对同一焊接接头进行硬度测试并对比分析，热处理前后硬度对比评价指南见附录D。

5.1.3 当热处理后硬度检测出现异常或争议时，宜采用金相检验等方法进行辅助分析与判定。

#### 5.2 不同材料焊接接头硬度要求

##### 5.2.1 碳钢焊接接头硬度要求

所测各点的里氏硬度值换算成布氏硬度值 $\leq 200\text{HB}$ 。

##### 5.2.2 合金钢焊接接头硬度要求

根据承压容器焊接接头的合金总含量，所测各点的里氏硬度值换算成布氏硬度值应不超过以下规定：

- a) 合金总含量 $< 3\%$ ，布氏硬度值 $\leq 250\text{HB}$ ；
- b) 合金总含量 $3\% \sim 10\%$ ，布氏硬度值 $\leq 270\text{HB}$ ；
- c) 合金总含量 $> 10\%$ ，布氏硬度值 $\leq 300\text{HB}$ 。

##### 5.2.3 碳钼钢、锰钼钢、铬钼钢焊接接头硬度要求

- a) 碳钼钢、锰钼钢、铬钼钢( $\text{Cr} \leq 0.5\%$ )，布氏硬度值 $\leq 225\text{HB}$ ；
- b) 铬钼钢( $0.5\% < \text{Cr} \leq 2\%$ )，布氏硬度值 $\leq 225\text{HB}$ ；
- c) 铬钼钢( $2\% < \text{Cr} \leq 10\%$ )，布氏硬度值 $\leq 241\text{HB}$ ，对于化工容器应 $\leq 235\text{HB}$ 。

#### 5.3 同种钢焊接接头与异种钢焊接接头的硬度要求

##### 5.3.1 同种钢焊接接头硬度要求

同种钢焊接接头热处理后的硬度值，应不低于母材标准硬度下线的90%且不超过母材布氏硬度值加100HB。

##### 5.3.2 异种钢焊接接头硬度要求

异种钢焊接接头热处理后的硬度值，应不超过两侧母材的实际布氏硬度平均值的30%且不低于较低侧硬度值的90%。

#### 5.4 返修焊接接头硬度要求

返修前与返修后焊缝及热影响区的布氏硬度值应符合图样且不高于设计值。

#### 5.5 服役不同工况材料硬度要求

具有应力腐蚀开裂材料焊接接头热处理后硬度要求如表2所示：

表2 应力腐蚀开裂倾向材料硬度要求

| 服役工况损伤倾向  | 材料                                | 硬度范围(HB)       |
|-----------|-----------------------------------|----------------|
| 碳酸盐应力腐蚀开裂 | 碳钢、低合金钢                           | 依据设计图要求或材料标准   |
| 碱应力腐蚀开裂   |                                   |                |
| 氨应力腐蚀开裂   |                                   |                |
| 硫化物应力腐蚀开裂 |                                   | 依据HG/T 20582标准 |
| 氢氟酸致氢应力开裂 |                                   | ≤237           |
| 氢氰酸致氢应力开裂 |                                   | ≤200           |
| 氢脆        | 碳钢、低合金钢、铁素体不锈钢、<br>马氏体不锈钢、沉淀硬化不锈钢 | ≤235           |

5.6 从严适用要求

如符合以上评价标准中多条规则，以最严格标准对承压容器焊接接头热处理后效果进行评价。

6 评价结果

所测承压容器热处理后焊接接头的硬度值如符合本文件中的评价要求，则该容器焊接接头热处理后效果评价为合格。若评价不合格，应记录不合格原因，制定返修方案并经审批后执行，需重新热处理并复测，直至符合要求。

## 附 录 A

### (规范性)

#### 使用者对硬度计的日常检查

- A.1 使用者应在每天使用硬度计之前，对所使用的硬度计进行检查。
- A.2 应使用符合GB/T 17394.3规定的标准硬度块进行日常检查，检查时应在标准块上至少打出三个压痕。如果测试的三个压痕硬度值的算术平均值与标准硬度块标准值之差在GB/T 17394.2中给出的允许误差之内，则该硬度计检查合格。如果误差超出规定的允许值，应立即对其进行间接检验。
- A.3 所测数据应当保存一段时间，以便监测硬度计的复现性和稳定性。

附 录 B

(规范性)

硬度计支撑环的要求

B.1 支承环应与测试位置的表面轮廓相匹配。冲击速度矢量应垂直于要测试的局部表面区域。

注：这可能需要选择合适的仪器或试件工装卡具。

B.2 可以在曲面试样的表面上（凹面或凸面）进行测试，但需使用与曲面相匹配的支承环。对于G型冲击装置，测试位置的曲率半径应不小于50 mm；对于其他型式的冲击装置，曲率半径应不小于30 mm。

B.3 宜根据试件的刚度（通常由局部厚度决定）以及试件的质量选择冲击装置型式与其相适应的硬度计。试件的质量小于试验允许的最小质量，或者试件的质量足够大但局部厚度小于试验允许的最小厚度（见表B.1）能够影响到试验结果时，需要根据仪器使用说明书对试件进行刚性支承和（或）耦合到牢固的支承物上进行试验。

注1：如果不能提供足够的支承和耦合，将会出现不正确的测试结果。

注2：耦合指的是这样一种方式：试件与更重的支承物进行牢固连接，且试件不会出现应力或应变。比如，试件表面和重的支承物之间可以施加粘性薄膜。这种组合提供了更大的质量，可以阻止冲击体受到撞击。

注3：对于一些几何形状特殊的试件，例如薄板或管子表面，当试件的厚度小于表B.1中给出的最小厚度时，需要对测试位置提供额外的支承以便进行测试。例如在管子上，对支承的要求可以表示为管子直径D与管子壁厚s之间的比例，作为试样刚度的一种测量。如果不能施加支承，则需根据D/s来确定测量值的修正系数。

表 B.1 试样的质量与重量要求

| 冲击设备类型                | 最小质量   | 最小厚度（未耦合） | 最小厚度（耦合） |
|-----------------------|--------|-----------|----------|
| D, DC, DL, D+15, S, E | 5 kg   | 25 mm     | 3 mm     |
| G                     | 15 kg  | 70 mm     | 10 mm    |
| C                     | 1.5 kg | 10 mm     | 1 mm     |

## 附 录 C

(资料性)

### 硬度与强度的近似换算

检验人员可根据硬度检测结果，利用以下推荐公式进行近似换算：

$$R_{eL} = 3.55HB \quad (\text{适用于 } HB \leq 175 \text{ HB}) \quad \cdots \cdots (C. 1)$$

$$\text{母材: } R_{eL} = 3.28HV - 221 \quad \cdots \cdots (C. 2)$$

附 录 D  
(资料性)

热处理前后硬度对比评价指南

D.1 总则

本附录为使用者提供了通过热处理前后硬度数据对比，更科学地评价焊后热处理（PWHT）工艺有效性的指导性方法。本附录适用于对热处理工艺有深入研究需求、热处理后硬度值处于临界状态或对重要设备进行质量仲裁等场景。

D.2 热处理前硬度测试

D.2.1 测试情形

在以下情形之一时，宜进行热处理前的焊接接头硬度测试：

- a) 重大或关键承压设备的焊接接头；
- b) 首次应用的新材料或新焊接工艺；
- c) 需要进行返修的焊接接头；
- d) 合金总含量 $\geq 3\%$ 的焊接接头；
- e) 设计文件、工艺规程或客户规范中特别要求的焊接接头。

D.2.2 测试方法

热处理前的硬度测试应遵循本文件第4章的规定。测试前应在接头示意图或照片上明确标记测试点的准确位置，确保热处理后能在相同位置进行复测。所有测试位置、硬度值及环境条件应予以详细记录。

D.3 热处理后测试与数据对比

热处理后的测试应严格按照本文件第4章及第5章的要求执行，并确保与热处理前测试点的位置一一对应。

D.4 数据分析与效果判定

D.4.1 热处理前硬度合格

当热处理前硬度已合格时，热处理后的效果判定宜参考以下准则：

- a) 对于碳钢及低合金钢（合金总含量 $< 3\%$ ），热处理后的硬度值宜较热处理前降低。若降幅不明显（如 $< 5\%$ ）或硬度值未发生预期下降，即使最终硬度合格，也应视为异常情况，并按D.4.3执行。
- b) 对于中高合金钢（合金总含量 $\geq 3\%$ ），热处理后的硬度应符合本文件5.2~5.6的要求。建议关注其硬度变化趋势，作为工艺稳定性的参考。

D.4.2 热处理前硬度不合格

热处理前硬度超出规定值时，热处理效果的判定准则如下：

- a) 热处理后硬度必须符合本文件5.2~5.6的要求。
- b) 若热处理后硬度合格，且较热处理前有显著降低（建议降幅超过20%或50HB），可明确判定本次热处理有效。
- c) 若热处理后硬度仍不合格，应判定热处理无效，需重新评估并制定热处理工艺。

D.4.3 异常情况综合判定

当出现以下情况时，不应仅依据硬度值做出结论，而应结合金相检验等方法进行综合判定：

- a) 热处理前后硬度均合格，但变化不符合预期（如不降反升）；

- b) 热处理后硬度值处于标准规定的合格临界值；
- c) 怀疑存在回火脆化、未回火马氏体、晶粒异常长大等微观组织缺陷。

金相检验的取样和分析方法应符合相关标准的规定。最终结论应基于硬度数据和微观组织特征的综合分析。

#### D.5 记录与报告

所有热处理前后的硬度测试数据、位置对应关系、判定过程及综合分析的结论，均应纳入检测报告或质量档案，其保存期限应不少于设备的设计寿命。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 17394.2-2022 金属材料 里氏硬度试验 第2部分：硬度计的检验与校准
  - [2] GB/T 17394.3-2022 金属材料 里氏硬度试验 第3部分：标准硬度块的标定
-