

承压类特种设备检验中的硬度检测分析

张立攀

广东省特种设备检测研究院东莞检测院, 广东省东莞市, 523000;

摘要: 承压类特种设备检验中的硬度检测主要用于分析材料性能、焊接质量、热处理效果及材料劣化情况, 具体应用包括材料强度评估、焊接接头质量控制、应力腐蚀风险识别等。承压特种设备是指在工业生产中承受一定压力并涉及生命安全的设备, 例如锅炉、压力容器等。这些设备在使用过程中由于受到高温、高压和腐蚀等恶劣环境的影响, 其材料性能可能会发生变化, 从而影响设备的安全运行。因此, 定期进行硬度检测等检验措施对于确保承压特种设备的安全和稳定运行至关重要。

关键词: 承压类特种设备; 硬度检测; 设备检验

DOI: 10.64216/3104-9664.25.01.016

承压类特种设备检验中的硬度检测是确保设备材料性能和安全性的关键环节。硬度检测能够快速、经济地反映材料的强度、组织结构及工艺效果, 广泛应用于锅炉、压力容器、压力管道等设备的现场检验和质量控制中。

1 硬度检测的主要目的

承压类特种设备检验中的硬度检测, 其主要目的是通过测量材料局部区域的硬度值, 来间接评估材料的焊接性。具体而言, 硬度检测在承压类特种设备检验中具有以下核心目的: 评估材料性能: 硬度是材料机械性能的重要指标之一, 通过硬度测试可以间接推断材料的强度、耐磨性等机械性能。在焊接过程中, 热影响区可能因高温导致组织变化, 硬度过高可能引起脆性增加, 从而影响焊接质量。检验热处理效果: 硬度检测常用于检验材料(如钢材)经过热处理(如淬火、正火、调质等)后的质量是否达到预期要求。鉴别材质: 通过硬度测试可以大致了解材料的金相组织, 从而对材料进行鉴别。间接判断强度: 一般情况下, 硬度较高的材料其强度也较高, 因此可以通过测试硬度来估算材料的强度。硬度试验因其操作简便、对零件损伤小、可直接在零件上进行等特点, 在承压类特种设备的原材料检验和零件热处理质量检查中得到了广泛应用。现场快速检测: 承压类特种设备检验中的硬度检测, 主要用于现场快速评估材料的机械性能和质量状态, 其核心目的包括: 判断材料强度等级, 通过硬度值间接反映材料的抗拉强度, 为设备承压能力评估提供依据^[1]。例如, 金属含碳量越高, 硬度通常越大, 可初步判断材料是否符合设计强度要求。

验证热处理效果, 硬度是热处理工艺质量的关键指标, 检测可确认零件是否达到预期的硬度范围, 避免因淬火、回火等工艺不当导致性能缺陷。鉴别材质与金相组织, 不同材料或金相组织(如退火态、淬火态)的硬度差异显著, 通过检测可快速鉴别材质或评估组织均匀性。检测表面处理层质量, 适用于镀层、渗层等表面改性工艺的硬度检测, 确保其耐磨性、抗疲劳性等性能达标。现场快速检测的适用方法, 洛氏硬度: 操作简便、压痕小, 适合成品或薄件检测, 广泛用于金属材料(如淬火钢)。维氏硬度: 测量范围广(软材料至超硬材料), 精度高, 适用于薄片、微小零件及表面处理层。布氏硬度: 压痕较大, 反映材料较大区域的平均硬度, 适用于退火钢、铸铁等较软材料。硬度检测因其操作简便、对零件损伤小, 成为承压类特种设备现场检验的高效手段, 但需结合其他检测方法(如耐压试验、裂纹检测)综合评估设备安全性。

2 硬度检测注意事项

在承压类特种设备检验中, 硬度检测是评估材料性能的关键环节, 需严格遵循规范以确保数据准确性和设备安全性。

2.1 测试前准备, 仪器校准

使用前需用标准硬度块校验设备, 确保压头、试台等部件安装正确且误差在允许范围内。试样要求: 试样表面需平整、无氧化皮或划痕, 粗糙度 $Ra \leq 0.80 \mu m$, 厚度至少为压痕深度的 10 倍以避免背面变形。环境控制: 测试温度建议在 $10 \sim 35^\circ C$ (高精度要求时 $23 \pm 5^\circ C$), 避免温湿度波动影响结果。

2.2 测试操作规范

方法选择：根据材料类型（如钢材、非铁金属）和硬度范围，选用布氏（HB）、洛氏（HRC/HRA）或维氏（HV）等标尺。操作要点：压头与试样接触需缓慢均匀，避免冲击。测试点间距需合理，避免相互干扰，且远离试样边缘。确保载荷方向与试样表面垂直，避免震动干扰。

2.3 结果处理与记录

数据记录：每次测试后立即记录硬度值，并标注测试位置、环境条件等。重复验证：同一试样至少测试 3 次取平均值，若超差需隔离前批次并调整工艺。标准对比：结果需与 GB/T230（洛氏）、GB/T4340（维氏）等国家标准对比，判断是否符合设计要求。

2.4 安全与维护

设备维护：定期检查压头磨损情况，避免直接触碰试台。人员防护：操作时需佩戴防护装备，防止试样飞溅或压头意外损伤。通过以上措施，可有效提升承压类特种设备硬度检测的可靠性和安全性，为设备寿命评估提供关键依据。

3 承压类特种设备检验中的硬度检测分析

3.1 材料类别与强度分析

在承压类特种设备检验中，硬度检测是评估材料性能的关键手段，其材料类别与强度分析密切相关。以下是主要材料类别及对应的硬度检测方法与强度关系：材料类别与硬度检测方法，钢及其合金，低碳钢（含碳量 $<0.25\%$ ）：推荐布氏硬度计（HB），因其塑性好，需注意表面清洁和压头直径选择。中高碳钢（含碳量 $0.25\%-0.60\%$ 及以上）：常用洛氏硬度计（HRC），适用于高硬度材料如刀具、弹簧。不锈钢（如 304、316、410、420）：根据类型选择布氏或洛氏硬度，需控制热处理工艺以避免脆化。工具钢：高硬度材料，推荐洛氏硬度计（HRC）。其他材料，12CrMoV 合金钢：需综合维氏（HV）、洛氏（HRC）、布氏（HB）硬度检测，适用于不同厚度和热处理状态。渗碳冶炼物：通过压入硬度（如布氏、维氏）评估表面硬化层性能。硬度与强度关系，正相关性：硬度通常与材料抗拉强度正相关，硬度越高，强度一般越高。例如，高碳钢的 HRC 值越高，其耐磨性和抗压强度越优^[2]。检测标准：需遵循国际（如 ISO、ASTM）和国内标准，确保数据可比性。例如，洛氏硬度（HRC）通过压痕深度间接反映强度。检测注意事项，表面处理：

试样需清洁、光滑，避免油污或锈迹影响精度。方法选择：薄材料用维氏硬度，中厚材料用布氏硬度，快速检测选洛氏硬度。误差控制：多次测量取平均值，避免组织结构不均匀导致的偏差。承压类特种设备的硬度检测需根据材料类型（如钢、合金）选择合适方法（布氏、洛氏、维氏），并结合硬度与强度的正相关性评估材料可靠性。严格遵循标准操作和表面处理是确保检测精度的关键。

3.2 焊接与热处理质量检测

承压类特种设备检验中的硬度检测是评估焊接与热处理质量的关键环节，主要通过测量材料抵抗局部塑性变形的能力来反映其组织性能和工艺合理性。硬度检测方法，维氏硬度测试，采用金刚石正四棱锥压头，适用于焊缝热影响区等微小区域，精度高且不受压头尺寸限制，符合 ISO9501/GB/T2654 标准。布氏硬度测试，使用硬质合金球压头，适用于较软材料（如铝焊丝），通过压痕直径计算硬度值。洛氏硬度测试，快速评估焊接材料硬度，需控制载荷时间和表面平整度。显微硬度测试，用于分析微观组织（如晶界、相变区域），需高倍显微镜配合。检测范围与标准，焊缝及热影响区硬度：需测定硬度分布梯度，避免脆硬相（如孪晶马氏体）导致失效。热处理后硬度限值：根据合金含量规定上限（如合金总含量 $>10\%$ 时， $HB \leq 350$ ）。硬度与强度相关性：通过经验公式推算抗拉强度，验证材料力学性能。检测流程与要求，试样制备：确保表面平整、无氧化层，避免污染影响结果。测试点定位：焊缝中心、热影响区需精确划分，避免干扰。数据验证：异常硬度值需复检并重新热处理，记录检测报告。相关机构与技术支持，中国特检院结构研究所：提供特种设备结构安全性能测试及失效分析服务。焊材中心：开展力学性能测试、化学成分分析及焊接工艺制定。硬度检测需结合金相分析、断口检验等综合评估，确保承压设备安全运行。

3.3 材料损伤与劣化评估

承压类特种设备检验中的硬度检测是评估材料损伤与劣化的重要手段，主要通过测量材料抵抗局部塑性变形或表面损伤的能力，间接反映材料强度、耐腐蚀性及性能退化情况。硬度检测与材料损伤的关联，损伤类型识别，承压设备常见损伤包括腐蚀减薄、裂纹、机械损伤和材质劣化（如晶粒长大、渗氮、球化等）。硬度变化可辅助判断材质劣化程度，例如：晶粒长大：高温长期使用导致晶粒粗化，硬度下降，抗拉强度降低。渗

氮：表面形成硬脆层，硬度显著升高，但韧性下降。球化：珠光体渗碳体球状化，硬度降低，强度下降。检测方法选择，布氏硬度（HB）：适用于低硬度材料（如铸铁、非铁金属），通过压痕直径计算硬度值。洛氏硬度（HR）：操作简便，广泛用于热处理质量检查（如HRB测非铁金属，HRC测淬火钢）。维氏硬度（HV）：用于表面硬度测量，通过压痕对角线长度计算，精度较高。硬度检测在检验中的应用，结合无损检测技术，硬度检测常与宏观检查、超声检测（UT）、磁粉检测（MT）等配合使用，综合评估设备安全状态。例如：宏观检查发现表面异常后，通过硬度测试量化损伤程度。超声检测发现内部缺陷时，硬度数据可辅助判断材料性能退化是否超标。案例分析与标准参考，某石化装置检验中，硬度测试结合金相分析发现球化现象，为设备寿命评估提供依据。国际标准（如ASME、EN）对低温低应力工况下的冲击功和硬度要求更严格，国内标准可借鉴其科学性和可操作性。注意事项与局限性，检测部位选择：需避开焊缝、应力集中区，避免数据偏差。环境因素：温度、介质腐蚀可能影响硬度值，需结合工况分析。局限性：硬度检测无法直接反映裂纹扩展速率或疲劳寿命，需与其他检测方法互补。硬度检测是承压设备材料损伤评估的关键环节，需结合多种检测技术及标准规范，确保设备安全运行。

3.4 检测方法与技术分类

承压类特种设备检验中的硬度检测方法主要分为静态压痕法和动态回弹法两大类，静态压痕法，通过施加恒定载荷使压头压入材料表面，测量压痕尺寸或深度确定硬度值，适用于实验室或现场精密检测。布氏硬度（HB），使用淬火钢球或硬质合金球压头，测量压痕直径计算硬度值，适用于软金属或粗晶材料（如退火钢、铸铁）。标准依据：ISO6506、ASTME10。洛氏硬度（HR），采用金刚石圆锥或钢球压头，通过压痕深度差直接读取硬度值，操作快速，广泛用于热处理件检测。常用标尺：HRB（软材料）、HRC（硬材料）。维氏硬度（HV），使用金刚石正四棱锥压头，测量压痕对角线长度计算硬度，适用于薄层或显微区域高精度测试。标准依据：ISO6507、ASTME92。显微硬度，基于维氏或努氏原理，极低载荷下测量微小压痕，用于涂层、细小部件检测。动态回弹法，通过测量压头冲击材料后的回弹高度或能量损失评估硬度，适用于大型或不便移动的工件。里氏硬度（HL），

采用球形压头冲击试样，通过回弹速度计算硬度值，便携且适用于现场快速检测。标准依据：ISO16589、ASTMA965。技术要点与适用范围，压痕法需控制载荷、压头几何形状及环境条件（如温度、表面粗糙度）以确保精度。动态法对工件形状适应性更强，但需校准冲击方向与表面状态。硬度与强度、耐磨性相关，检测结果可用于评估材料性能及热处理质量。

4 硬度检测在承压类特种设备检验中的应用

4.1 检测方法与设备

常用方法：包括布氏硬度（HB）、洛氏硬度（HR）、维氏硬度（HV）和里氏硬度（HL）等。里氏硬度计因便携、操作简便，广泛应用于现场检测大型工件（如管道、储罐）。设备特点：便携式里氏硬度计可自动转换不同硬度值，适合无法移动或切割的工件，如大型模具、锻造件。

4.2 应用场景

关键部件检测：对承压设备的接管部位、罐体壁厚等关键区域进行硬度测试，结合测厚、探伤等技术排查缺陷。材质验证：通过光谱仪确认材料成分，再结合硬度检测验证是否符合设计要求。

4.3 操作规范与质量控制

标准化流程：检验人员需按作业指导书操作，如信阳分院通过实操演练提升硬度检测的规范性和准确性。数据记录：检测结果需及时记录，发现硬度异常时需调整工艺并隔离问题批次。

4.4 技术优势与局限性

优势：里氏硬度计可灵活测试不同部位，效率高且对工件无损伤。局限性：需确保检测表面平整，且结果需与其他方法（如金相分析）结合验证。

总之，硬度检测在承压类特种设备检验中具有多重作用，包括材料强度判断、工艺质量评估及损伤监测等。结合标准化的换算方法和现场检测技术，可有效提升设备安全性和检验效率。

参考文献

- [1] 刘磊. 硬度检测在承压类特种设备检验中的应用. 2022.
- [2] 王晓丽. 关于承压类特种设备检验中的硬度检测分析. 2023.