

Instance of a New Type of Brinell Hardness Tester Applied in the Thermal Power Construction Site

Chaofeng Ye, Hui Yang

He'nan NO.1 Thermal Power Construction Company, Zhengzhou He'nan
Email: hpccycf@163.com

Received: Mar. 14th, 2015; accepted: Mar. 26th, 2015; published: Mar. 31st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the new kind of Brinell hardness tester, the author measured the weld hardness of the reheat pipe weld and main Steam pipe adopted P92 steel used in superheater of ultra-supercritical coal-fired unit with 2 × 660 MW located in one power plant. The working principle as well as the advantages and disadvantages of Leeb hardness tester and Brinell hardness tester was compared, and the technical rationality and site suitability of this new type of Brinell hardness tester were also discussed so as to truly and accurately reflect the heat treatment hardness of weld joint after welding in the thermal power construction site. Results showed that this new type of Brinell hardness tester has advantages including indicating value of good repeatability, high precision, and real data.

Keywords

Brinell Hardness Tester, Thermal Power Construction, Application, Hardness after Welding

新型布氏硬度计在火电施工现场的应用实例

叶朝峰, 杨 慧

河南第一火电建设公司, 河南 郑州
Email: hpccycf@163.com

收稿日期: 2015年3月14日; 录用日期: 2015年3月26日; 发布日期: 2015年3月31日

摘 要

对某电厂 2×660 MW超超临界火力发电机组的P92钢主蒸汽和再热热段管道焊缝硬度，应用新型布氏硬度计进行工业实践。对比里氏硬度计与布氏硬度计的工作原理及其优缺点，探讨此种新型布氏硬度计的技术合理性、现场适用性，以期真实、准确的反映火电施工现场管道焊缝的焊后热处理硬度。结果表明，该新型布氏硬度计具有示值重复性好、精度高、数据真实的优点。

关键词

布氏硬度计，火电施工，应用，焊后硬度

1. 引言

由我公司承建的某电厂 2×660 MW超超临界火力发电机组，属于超超临界参数运行的火电机组，主要参数为：锅炉蒸发量 2060 t/h，过热蒸汽出口压力及温度 27.5 MPa/610 °C再热蒸汽出口压力及温度 6.19 MPa/608 °C给水温度 293 °C主蒸汽和再热热段管道材质均为 A335P92 钢，属于 9Cr-1Mo 马氏体耐热钢，根据 DL/T869-2012《火力发电厂焊接技术规程》中的相关规定，其焊接和热处理工艺要求比较复杂，焊缝热处理后硬度合格指标为 180 HBW~270 HBW，此硬度指标为检验焊后热处理质量的唯一标准，超过这一指标范围就评定为热处理不合格，需要进一步做金相检验，以确定马氏体组织是否破坏。所以，准确测量焊缝的焊后热处理硬度也是整个质量控制过程中的关键环节。

2. 焊接及热处理工艺

2.1. 焊接方法

采用 GTAW + SMAW, GTAW 打底层和填充第一层内充氩保护，预热温度为：GTAW 100°C~200°C、SMAW 填充及盖面 200°C~250°C，层间温度 200°C~300°C，焊接过程中严格控制焊接线能量不能超过 15 KJ/cm，层间温度不能超过 300°C，采用多层多道焊接。

2.2. 热处理工艺

焊接结束后需降温至 80°C~120°C，恒温 1 h，进行马氏体转变后再进行焊后热处理。

升降温速度：6250/ δ (单位为°C/h， δ 为焊件壁厚，单位为 mm)，且不超过 150°C/h；

恒温温度：760°C \pm 10°C；

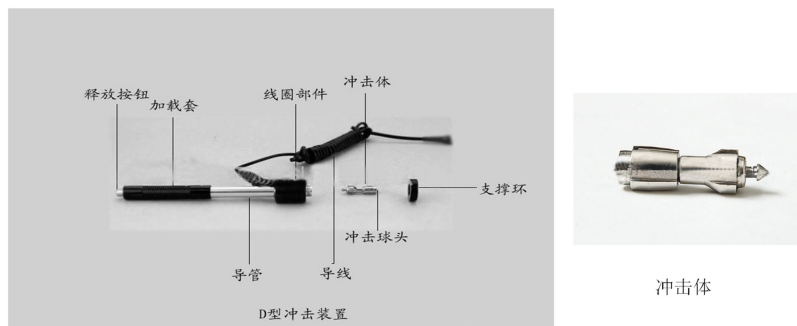
恒温时间：1 h/25 mm，且不少于 4 h。

3. 里氏硬度检验

目前火力发电安装施工现场应用最广泛的硬度检验方法是采用里氏硬度计进行检验，我公司使用的里氏硬度计型号为：TH160 型，D 型冲击装置，国家标准 GB/T17394-1998《金属里氏硬度试验方法》中对 D 型冲击装置及试样的要求见表 1。

3.1. 里氏硬度计工作原理

D 型冲击装置示意图：



Hardness tester type D impact device

Table 1. The national standard of Leeb hardness tester type D impact device and sample request
表 1. 国家标准对里氏硬度计 D 型冲击装置和试样的要求

D 型冲击装置	数值要求	试样	数值要求
冲击体质量	5.5 g	表面粗糙度 Ra	≤1.6 μm
冲击能量	11 N·m	试样质量	>5 Kg (稳定放置)
冲击头直径和材质	3 mm/碳化钨	试样最小厚度	5 mm
试验范围	200~900 HLD	表面硬化层深度	≥0.8 mm
示值误差	±12 HLD	表面曲率半径	≥30 mm

1978 年，瑞士人 Leeb 博士首次提出了一种全新的测硬方法，它的基本原理是具有一定质量的冲击体在一定的试验力作用下冲击试样表面，测量冲击体距试样表面 1 mm 处的冲击速度与回跳速度，利用电磁原理，感应与速度成正比的电压。里氏硬度值以冲击体回跳速度与冲击速度之比来表示。

计算公式：

$$HL = 1000 \times (Vb/Va)$$

式中：HL——里氏硬度值；Vb——冲击体回跳速度；Va——冲击体冲击速度。

3.2. 里氏硬度计测量范围及误差

1) 根据里氏硬度原理，只要材料具备一定刚性，能形成反弹，就能测出准确的里氏硬度值，但很多材料里氏与其它制式的硬度没有相应的换算关系，因此里氏硬度计目前只装了 9 种材料的换算表。具体材料如下：钢和铸钢，合金工具钢，灰铸铁，球墨铸铁，铸铝合金，铜锌合金，铜锡合金，纯铜，不锈钢。

D 型冲击装置的测量范围为 200~900 HLD，施工现场使用方便、应用广泛。这也是其优点之一。

2) 里氏硬度换算为其它硬度时的误差包括两个方面：一方面是里氏硬度本身测量误差，这涉及到按方法进行试验时的分散和对于多台同型号里氏硬度计的测量误差。另一方面是比较不同硬度试验方法所测硬度产生的误差，这是由于各种硬度试验方法之间不存在明确的物理关系，并受到相互比较中测量不可靠因素影响的原因[1]。

3) 其他影响硬度值的因素[2]

a) 被测试工件质量大小影响

冲击能量在被测试工件上产生的弹性变形的大小与被测试工件的质量大小有很大关系，若被测试工件的质量小，冲击能量在工件上产生的弹性变形和工件的位移大，因此被释放掉的能量大，冲击体获得反弹的能量小，反弹速度低，测试的硬度值就小，所获得的测试结果是不准确的。

b) 冲击体质量大小的影响

冲击体质量和球头直径大小与被测工件硬度压痕上产生弹性功和塑性功的大小是有直接影响的。如 G 型冲击体比 D 型冲击体实测误差小些。这是因为里氏硬度计 G 型冲击体质量和球头直径比 D 型冲击体的大。那么在工件表面上产生硬度压痕就相应的大些。硬度压痕大说明冲击能量在硬度压痕上更有机会产生合理的弹性应变和塑性应变。于是能获得较完善的综合机械性能的硬度压痕。因此说冲击体质量和球头直径大，可减少测试误差的影响[3]。

3.3. 现场实际应用

本工程对主蒸汽管道(P92 ID292 × 75) 13#焊缝和再热热段管道 8#焊缝进行了焊后热处理，热处理的参数及曲线都符合规程要求，采用便携式里氏硬度计进行硬度检测，其布氏硬度平均值为主汽焊缝 280 (HBHLD)、再热热段焊缝 294 (HBHLD)，均高于《火力发电厂焊接技术规程》中规定的 180-270HB 的硬度范围。但是金相组织分析其焊缝组织为回火马氏体(见图 1、图 2)，符合标准要求。

4. 布氏硬度检验

4.1. 布氏硬度检验原理

布氏硬度试验(HBW)：见图 3，是以一定的试验力 F 如：187.5 kg\250 kg\3000 kg 等载荷把一定直径 D 的钢球或硬质合金球压入材料表面，保持一段时间，去载后，负荷 F 与压痕面积之比值，即为布氏硬度值(HBS\HBW)，单位为 N/mm² (MPa)。

计算公式为：

$$HBW = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

公式中字母含义：HBW——布氏硬度(硬质合金球)；F——试验载荷，单位 N；D——合金球直径，mm；d——试件表面压痕平均直径，mm。

在钢管标准中，布氏硬度用途最广，往往以压痕直径 d 来表示该材料的硬度，既直观又方便。布氏硬度计压头：通常分为 Φ 2.5 mm，Φ 5 mm，Φ 10 mm，和 Φ 1 mm 四种，布氏硬度值与抗拉强度值之间存在较好的对应关系[4]。目前多为试验室台式硬度计，并不适用于火电安装施工现场管道焊缝的硬度检验。

本工程中应用的是一种新型便携式布氏硬度计(见图 4)，其原理与台式布氏硬度计相同[5]。

其特点为：测试速度快。直接测量并显示布氏硬度值，淘汰了光学测量系统，测量自动完成，测试值自动显示；初试验力的采用降低了对试样表面的要求，对试样表面粗糙度不敏感；采用高精度力传感器，试验力准确；采用高精度位移测量系统，压痕深度测量准确；示值重复性好，精度高；数据真实：按照真实的布氏硬度试验原理测试，并非其他便携式仪器(例如里氏硬度计)得到的失真较大的换算值。

初试验力：布氏 15 kg；

总试验力：布氏 187.5 kg；

测量范围：100~650 HBW；

显示内容：标尺、试验力、硬度值、统计平均值；

分辨率：布氏 1 HBW；

试验力误差：≤±1%；

示值误差：GB/T231.2；

重复性误差：GB/T231.2；

重量：约 5.7 kg。

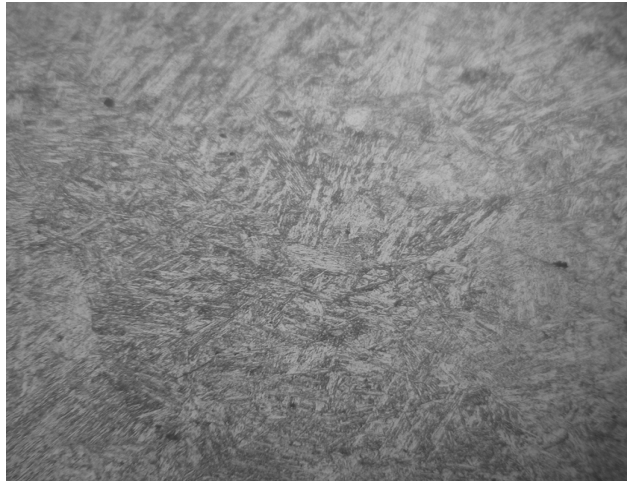


Figure 1. 13# Main steam weld microstructure
图 1. 13#主汽焊缝金相组织



Figure 2. 8# Hot section again weld microstructure
图 2. 8#再热热段焊缝金相组织

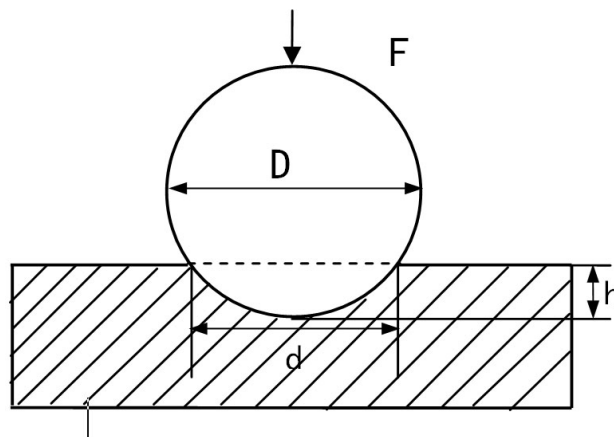


Figure 3. Brinell hardness tester principle diagram
图 3. 布氏硬度计原理示意图

4.2. 试验要求

由于试样的大小、厚薄、材质、硬度不同，一种试验力、一种压头不能满足要求，在试验力和压头球直径的选择上需要遵循两个规则[6]：

规则一，试验力与压头球直径的平方之比为常数，即布氏硬度压痕相似原理：不同的压头球直径 D_1 、 D_2 在不同的试验力 F_1 、 F_2 作用下压入试样表面，所得到的压痕直径是不同的，但只要压入角 ψ 相同，压痕就具有相似性，这时试验力与压头球直径的平方之比就是一个常数，在同一试样上测得的硬度值是相同的，在不同的试样上测得的硬度值是可以相互比较的。

规则二，试验后使压痕直径的范围处于 $0.24 D \sim 0.6 D$ 之间。

4.3. 现场应用

我公司应用此种新型便携式布氏硬度计对 13#主蒸汽和 8#再热热段管道焊缝进行了布氏硬度检验。

4.3.1. 焊缝打磨

按照 GB/T231.1-2009《金属布氏硬度试验第 1 部分试验方法》第 6 条的要求，对焊缝金属打磨并进行抛光，见图 5。

4.3.2. 固定布氏硬度计进行硬度测试

将便携式布氏硬度计的冲压压头对准打磨好的焊缝硬度待测点，并保证仪器两端与焊缝两侧母材紧



Figure 4. Portable Brinell hardness tester
图 4. 便携式布氏硬度计



Figure 5. Welds hardness polishing
图 5. 焊缝硬度打磨

密接触，旋转其两端的两个磁力旋柄开关，靠磁力吸附于管道上。然后慢慢旋转仪器顶端的圆形旋钮(加力时顺时针旋转，不可逆时针转动)，观察仪器数字显示屏，当加载力达到 187.5 Kg 时停止加力，并且在此加载力下稳定 10 秒钟后，卸掉加载力(快速的逆时针旋转圆形旋钮)，仪器的数字显示屏显示焊缝的布氏硬度值，测试结束(见图 6)。

经检测，该主汽焊缝的平均布氏硬度值为 255 HB，再热热段焊缝的平均布氏硬度值为 260 HB，硬度符合标准要求[7]。对比说明里氏硬度计检验的误差较大。

4.3.3. 技术合理性分析

影响布氏硬度测量准确性的因素主要有：试样、硬度计、环境、操作

1) 试样

火电施工安装现场主蒸汽和再热热段管道管径大、管壁厚，单根管子的重量都在 8~10 吨以上，而且试验力加载缓慢、达到规定试验力后保持时间长，所以在进行布氏硬度测试时不会产生明显的塑性变形和弹性变形，布氏硬度试验本身对试样表面粗糙度要求不高，此影响因素可以排除。

2) 硬度计

此种便携式布氏硬度计的试验原理与台式布氏硬度计完全相同，如前所述，试验力采用高精度力传感器，压痕深度测量采用高精度位移测量系统，电脑控制，硬质合金球压头及压痕测量装置均符合 GB/T231.2-2012《金属布氏硬度试验 第 2 部分 硬度计的检验与校准》的规定，保证了测试的准确性。

3) 环境

管道安装施工现场环境干燥、无振动、焊缝打磨清洁，此因素可以忽略。

4) 操作

根据第 4.2.2 条所述，此种便携式布氏硬度计的操作稍显复杂，第一需要把仪器固定牢固，要求测试硬度焊缝的两侧管道处于水平状态，否则仪器不能固定牢固或者不能正常加载试验力；第二是加载速度、时间，加载速度要缓慢，否则惯性力加大，使压痕增大，导致布氏硬度值偏低，反之则硬度值偏高。当加载力达到规定值后，此仪器的试验力保持时间由电脑给出(10 秒)，所以试验力保持时间能够保证不会



Figure 6. Fixed Brinell hardness tester

图 6. 固定布氏硬度计

过长或过短。布氏硬度计测量对操作者的要求较高。

4.4.4. 现场适用性分析

通过现场应用，分析此种便携式布氏硬度计优点主要有：

- 1) 受试样表面粗糙度影响小，对试样研磨要求不高；
- 2) 加载力、加载时间控制准确；
- 3) 试样不会产生明显的塑性变形和弹性变形；
- 4) 与台式硬度计原理相同，测量准确度高、误差小。

分析此种便携式布氏硬度计的缺点主要有：

- 1) 重量较大、现场测试固定不方便；对于小径管及狭小空间不适用；
- 2) 只适用于焊缝两侧管道处于同一水平面的硬度测试，对于异径管、弯头或者焊缝两侧管道不在同一水平面的焊缝不能正确固定，导致加载力不能正确加载，测试失败；
- 3) 对操作要求较高，试验力需手动控制、缓慢加载。

5. 结论

综上所述，此种新型便携式布氏硬度计在火电安装施工现场具有一定的应用范围，其优点还是非常突出的，在不破坏试样的情况下，能够准确测量出试样的布氏硬度，并且其示值重复性好、精度高、数据真实，但是，由于前述其缺点的存在，也使其应用受到了很大的限制，相信经过技术改进，克服这些缺点后在火电施工现场推广应用的前景及空间还是巨大的，但完全取代里氏硬度计并不现实，目前，可以应用于管径较大($\phi 133$ 以上)的直线管道(管道外表面处于同一水平面)焊缝及母材硬度的测试，其示值重复性、准确性均高于里氏硬度计。

参考文献 (References)

- [1] 张恒岩, 等 (2010) 浅谈影响里氏硬度计测量精度的因素. *计测技术*, **2**, 50-51.
- [2] 强敏 (2005) 里氏硬度检测的主要影响因素分析. *冶金标准化与质量*, **5**, 5.
- [3] 黄山松 (2013) 里氏硬度计的测量原理与准确性分析. *科技创业家*, **4**, 52.
- [4] 薄鑫涛 (2013) 硬度与强度的差别. *热处理*, **6**, 73.
- [5] 朱旭明, 李矛, 翁俊, 等 (2010) 一种便携式布氏硬度计. *上海计量测试*, **1**, 21.
- [6] 周启玲 (2002) 对正确使用布氏硬度测试技术几个问题的探讨. *现代机械*, **4**, 99.
- [7] 徐连勇, 李蒙 (2013) P92 钢异常硬度安全性能的研究. 天津大学, 天津.