

# 低硬度 P91 钢管件布氏硬度转换值 存在偏差原因分析

杨超<sup>1</sup>, 汤淳坡<sup>2</sup>, 孙雄<sup>1</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102; 2. 国电泰州发电有限公司, 泰州 225327)

**摘要:**以不同硬度的 P91 钢管件和低合金钢管件作为研究对象,在消除外部因素(试样温度、刚性、质量及表面状况等)导致的误差后,通过硬度对比试验发现,相对于真实布氏硬度值,低硬度 P91 钢管件的布氏硬度转换值(HBHL D)仍然存在较大负偏差。根据力学性能试验结果,结合里氏硬度检测原理及强化理论,分析了 HBHL D 值产生偏差的内在原因。结果表明:P91 钢管件硬度的降低伴随着固溶强化及位错强化效果的减弱,致使屈强比降低,是导致其 HBHL D 值出现负偏差的主要原因;弹性模量的微小变化对其影响不大。

**关键词:**P91 钢管;里氏硬度;布氏硬度转换值;屈强比;弹性模量

**中图分类号:**TG115.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-4012(2015)09-0608-04

## Causes Analysis on HBHL D Deviation of Low Hardness P91 Steel Tubes

YANG Chao<sup>1</sup>, TANG Chun-po<sup>2</sup>, SUN Xiong<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Guodian Taizhou Power Generation Co., Ltd., Taizhou 225327, China)

**Abstract:** The P91 steel pipes and low alloy steel pipes with different hardness values were selected as the research objects to analyze. On the premise of eliminating error caused by environmental factors (such as specimen temperature, rigidity, weight and surface condition), through the hardness comparison test, it was found that the HBHL D value of low hardness P91 steel pipes remained negative deviation compared to the real HBW value. According to the results of the mechanical properties testing, the intrinsic reasons of HBHL D value deviation was analyzed combining Leeb hardness testing principle and the reinforcement theory. The results show that the decrease of hardness of P91 steel pipe accompanied by weakening of solid solution strengthening and dislocation strengthening effects resulted in the decrease of the yield ratio, which was the main reason for the negative deviation of the HBHL D, and the tiny change of elastic modulus had little effect on the deviation.

**Keywords:** P91 steel pipe; Leeb hardness; HBHL D; yield ratio; elastic modulus

里氏硬度检测为回弹式硬度检测方法的一种,便携式里氏硬度计解决了其他方法难以胜任的对不易移动的大型工件和不易拆卸的大型部件及构件的检验问题,具有操作快速简便、非破坏性等优点,已被广泛应用于电站合金钢管道的硬度检测工作。

由于 P91 钢在高温下具有良好的抗氧化性和组织稳定性,已被广泛应用于亚临界、超临界机组的锅炉高温集箱、主蒸汽管道及再热蒸汽热段管道。但近

年来频频出现 P91 钢管件硬度偏低、组织异常的问题,严重影响其使用寿命及安全性。现有的国内外标准规定了 P91 钢管件的压入式硬度值范围,例如 DL/T 438—2009《火力发电厂金属技术监督规程》附录 C 对 P91 钢管件硬度的推荐值为 180~250 HB。为了便于质量验收,通常使用便携式里氏硬度计进行硬度检测,然后利用仪器自带的换算功能将其转换为压入式硬度值。例如,D 型探头的里氏硬度值以 HLD 表示,由其转换的布氏硬度值以 HBHL D 表示。

里氏硬度计的测试误差与测试部位的表面粗糙

收稿日期:2015-01-31

作者简介:杨超(1979—),男,高级工程师,学士。

度、污物、曲率半径、表面温度、振动等因素有关<sup>[1]</sup>,在消除这些影响因素后,通过对比试验发现低硬度 P91 钢管件的 HBHLD 值仍普遍低于台式布氏硬度计所测的 HBW 值。笔者通过对不同类型管件的硬度对比试验及力学性能试验,基于里氏硬度检测的原理,从一个全新的视角分析了 P91 钢低硬度管件 HBHLD 存在偏差的内在原因,以便于对里氏硬度

值有一个正确的认识,找出修正的思路。

## 1 试验方法与结果

### 1.1 试样

以来自于不同电厂的低硬度 P91 钢管件及正常硬度 P91, P22, 12Cr1MoV 钢管件作为试验对象,管件参数及硬度范围见表 1。

表 1 试样的相关参数

Tab.1 Parameters of specimens

试样名称	代号	材料	规格/mm	运行时间/( $\times 10^4$ h)	硬度/HBHLD
过热器三级减温器直段	JW	P91	$\phi 559 \times 88$	3.5	130~180
再热蒸汽热段管道 90°弯头	RW	P91	$\phi 732 \times 23$	5.7	140~155
主蒸汽管道 135°弯头	ZW	P91	$\phi 333 \times 30$	5.7	130~140
主蒸汽管道大小头	DXT	P91	$\phi 474/333 \times 53/30$	6.2	155~195
再热蒸汽热段管道直段	RZA	P91	$\phi 732 \times 23$	5.7	220~235
再热蒸汽热段管道直段	RZB	P22	$\phi 610 \times 25$	3.4	110~120
新管	RZC	P22	$\phi 610 \times 25$	0	155~160
主蒸汽管道直段	ZZ	12Cr1MoVG	$\phi 273 \times 40$	6.1	150~155

### 1.2 硬度对比试验

在不同管件上的不同硬度区域用线切割方式切取质量超过 5 kg 的条状试样,厚度均超过 20 mm。

依据 GB/T 17394—1998《金属里氏硬度试验方法》7.9 款,在同一试样上的 3 个区域进行布氏硬度及里氏硬度试验,如图 1 所示。

试验结束后将 15 个 HBHLD 值的平均值与 3 个布氏硬度的平均值作为一组对应值。重复以上试验,试验结果汇总后见表 2。

表 2 硬度试验结果

Tab.2 The results of hardness test

管件代号	硬度		管件代号	硬度		
	/HBHLD	/HBW		/HBHLD	/HBW	
JW	132	144	DXT	156	168	
	135	145		159	171	
	136	146		164	175	
	137	148		175	182	
	143	153		193	198	
	151	162	RW	141	163	
	154	164		146	165	
	159	168		152	168	
	170	174		225	212	
	172	179		230	214	
	178	184	235	218		
	ZW	132	143	RZC	156	169
		139	153		158	172
	RZB	110	128	ZZ	151	152
		114	128		155	154
119		131				

### 1.3 力学性能试验

为了分析 HBHLD 与 HBW 值存在偏差的内

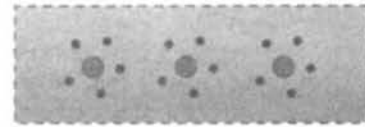


图 1 硬度试验位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of hardness test positions

在原因,选取硬度均匀的条状试样进行力学性能试验,测试试样的弹性极限、弹性模量及抗拉强度等性能指标。拉伸试样为  $\phi 10$  mm 标准 5 倍圆形横截面试样,弹性极限以产生 0.01% 塑性应变时的应力来表示,代表产生微量屈服时的强度。试验结果见表 3,表中还列出了根据试验结果计算得到的 HBHLD 值偏差及屈强比数据。

表 3 力学性能试验结果

Tab.3 The results of mechanical property test

管件代号	硬度/HBHLD	硬度/HBW (10/3000)	偏差/%	硬度 $R_{p0.01}$ /MPa	$R_m$ /MPa	屈强比/ $R_{p0.01}/R_m$	E /GPa
JW	143	153	-6.99	285	546	0.52	212
JW	154	164	-6.49	346	596	0.58	217
DXT	164	175	-6.70	357	618	0.58	210
RW	146	165	-13.0	270	589	0.46	199
RZA	235	218	7.23	548	747	0.73	219
RZB	119	131	-10.08	209	478	0.44	203
RZC	158	172	-8.86	250	605	0.42	200
ZZ	155	154	0.65	351	515	0.68	204

## 2 分析与讨论

### 2.1 里氏硬度检测的原理

里氏硬度检测是一种动载荷试验方法,如图 2

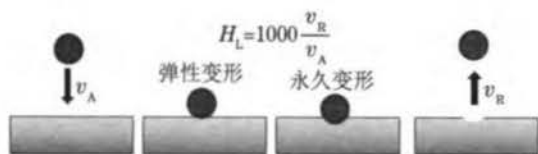


图2 里氏硬度检测原理

Fig.2 Leeb hardness test principle

所示,其原理是通过加载弹簧将一定质量和直径的碳化钨球弹出并撞击工件表面,通过电传感器测量距试样表面 1 mm 处球的回弹速度与冲击速度的比值来表征硬度的高低。

回跳法硬度值主要表征金属弹性变形功的大小<sup>[2]</sup>。该观点可以用图 3 来解释,碳化钨球的冲击能( $G_0$ )一部分转变为塑性变形功( $G_2$ )被试样吸收,另一部分转变为弹性变形功( $G_1$ )储存在试样中,当弹性变形恢复时,能量被释放,使碳化钨球回弹<sup>[3]</sup>,而里氏硬度值与回弹速度成正比,因此里氏硬度值取决于弹性变形功的大小。



图3 里氏硬度检测中能量的转换

Fig.3 The conversion of energy in Leeb hardness test

弹性变形功又称弹性比功( $G_1$ ),以应力-应变曲线上弹性变形阶段的面积来表示(图 4),其大小决定于弹性模量和弹性极限。

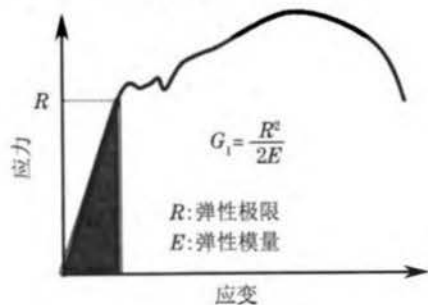


图4 弹性比功

Fig.4 Elastic strain energy

## 2.2 HLD 值向 HB 值转换的偏差

表 2 中 HBHLD 值是硬度计将 HLD 值自动换算后的布氏硬度值,检测时已基本消除了试样表面状况及环境引起的测量误差,但 HBHLD 值与台式布氏硬度计的测试值仍有较大偏差。如表 3 所示, RW 管件 HBHLD 值最大偏差达到 -13%,其他低硬度 P91 钢管件的偏差也超过 -6%。

综上所述,HBHLD 值存在偏差为硬度计算关系不准确所致。进口里氏硬度计应用的是瑞士版换算关系,该仪器对钢铁材料仅有两条换算曲线,检验人员通常使用的是“钢及铸钢”的换算曲线,因此在对低硬度 P91 钢进行硬度转换时出现了较大偏差。

## 2.3 弹性模量对 HBHLD 值存在偏差的影响

里氏硬度值大小取决于弹性模量和弹性极限,弹性极限表示材料对微量塑性变形的抗力<sup>[2]</sup>,是一个强度指标,因此里氏硬度值只有在弹性模量相同的材料试验时才能互相比较大小;同理,在将其转换为布氏硬度值时,不同弹性模量的材料具有不同的换算关系。表 4 所示的数据来自于 GB/T 17394-1998,列举了几种不同弹性模量金属材料 HLD 值与 HB 值的对应关系,可见弹性模量越大,相同的 HLD 值转换的 HB 值也越大。

表4 弹性模量对硬度转换的影响

Tab.4 Effect of elastic modulus on hardness transformation

里氏硬度 /HLD	材料	布氏硬度转换值 /HBHLD	弹性模量 /GPa
450	碳钢、低合金钢和铸钢	162	210
	铸铝合金	110	65~85
	铜锌合金	126	85~130
	铜铝合金及铜锡合金	133	94~130
	纯铜及低铜合金	145	110~135

对于钢铁材料,合金化、热处理(显微组织)、冷塑性变形对弹性模量的影响较小,表 4 所示的 P91 钢管件的弹性模量略高于 P22, 12Cr1MoVG 管件的,这种差别不足以导致 HBHLD 值出现如此大的偏差;另外 RW 管件的弹性模量与 ZZ 管件的弹性模量接近,但其 HBHLD 偏差却很大(ZZ 管件的 HBHLD 无明显偏差)。综上所述,合金含量高的 P91 钢管件的弹性模量略高于低合金钢的弹性模量不是造成 HBHLD 值存在偏差的主要原因。

## 2.4 屈服比对 HBHLD 值存在偏差的影响

在弹性模量不变的前提下,回跳式硬度值表示材料对微量塑性变形的抗力,而压入式硬度值表征材料大量塑性变形抗力及应变硬化能力<sup>[2]</sup>,它们在真应力-真应变曲线上对应的位置见图 5。因此里氏硬度向布氏硬度转换时,还需要考虑  $R_{p0.01}$  与  $R_m$  之间的差距,这个差距的大小可以用两者的比值来表示,即屈服比。不难理解,当屈服比低于某特定范围(硬度计换算关系所对应的范围)时, $R_{p0.01}$  与  $R_m$  之间差距过大,其实际 HBW 值就会大于换算得到



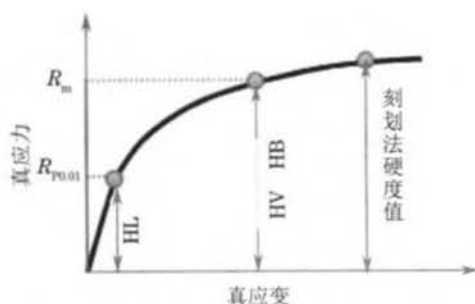


图5 几种硬度值在应力应变曲线上的位置  
Fig.5 The relationship between hardness and stress-strain curve

的 HBHLD 值,即 HBHLD 值出现负偏差;同理,高于此范围时,HBHLD 值出现正偏差。

表 3 中的 HBHLD 值偏差与屈服比数据可以验证上述观点。如图 6 所示,对于 P91 钢管件,随着屈服比的升高,HBHLD 值的负偏差越来越小;当屈服比高于 0.6~0.7 以后,HBHLD 值变为正偏差;对于低合金钢管件有相似规律。

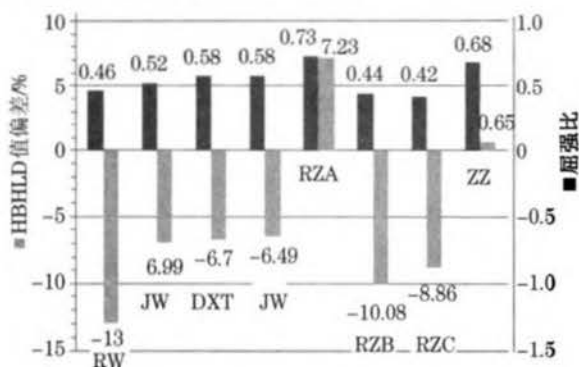


图6 屈服比与 HBHLD 值偏差对应关系  
Fig.6 The relationship between yield ratio and the deviation of HBHLD

### 2.5 HBHLD 值存在偏差的原因分析

屈服比与塑性、变形硬化指数及静力韧度等参数均没有明显的对应关系<sup>[4]</sup>,从表 3 可知,对于 P91 钢管件,屈服强度  $R_{p0.01}$  越高,屈服比越高,其 HBHLD 值负偏差越小,因此可以从 P91 钢的强化理论方面来分析 HBHLD 值存在负偏差的原因。

影响低碳钢屈服比的主要显微因素为强化机制,其中位错强化及间隙固溶强化(即碳、氮的固溶强化)对屈服比的影响最大,能在不提高抗拉强度的情况下提高屈服强度,细晶强化及沉淀强化的影

响次之<sup>[5]</sup>。T/P91 钢的正常显微组织应为细的回火板条马氏体,马氏体板条在高温回火时并不发生板条解体的再结晶,而是只发生高温回复;其主要强化机制为位错强化及固溶强化<sup>[6]</sup>。P91 钢管件硬度的降低通常伴随着马氏体板条的消失和碳化物的析出聚集,屈强比因位错强化及固溶强化效果的削弱而降低,当低于某个特定值后,HBHLD 值就会出现负偏差。

### 3 结论

(1) 低硬度 P91 钢管件在里氏硬度检测时,在消除外部因素导致的测量误差后,其布氏硬度转换值 HBHLD 与实测布氏硬度相比,仍会存在较大的负偏差。

(2) 合金含量高的 P91 钢管件的弹性模量略高于低合金钢的弹性模量,不是造成其 HBHLD 值存在偏差的主要原因。

(3) 低硬度 P91 钢管件因其马氏体板条消失和碳化物析出导致位错强化及固溶强化效果的减弱,进而致使其屈服比降低,这是 HBHLD 值出现负偏差的主要原因。

(4) 材料屈服比在某特定范围内时,HBHLD 值相对准确,偏离这个范围则会产生较大偏差,可以从影响屈服比的显微因素来考虑如何对 HBHLD 值进行修正。

### 参考文献:

- [1] 刘持森,张宜.现场因素对里氏硬度测量值的影响[J].理化检验-物理分册,2005,41(10):513-515.
- [2] 束德林.工程材料力学性能[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 侯旭明.金属力学性能[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 欧阳志英,舒志强,袁鹏斌.屈服比对高强度高塑性钻杆性能的影响[J].理化检验-物理分册,2013,49(1):17-21.
- [5] 魏恒,郑少波,王森,等.影响低碳钢屈服比的显微因素[J].上海金属,2012,34(2):19-22.
- [6] 胡光立,谢希文.钢的热处理[M].西安:西北工业大学出版社,1993.



访问我们的官方网站了解更多内容

扫描二维码关注 1