

# T92/HR3C 异种钢焊接接头性能研究

顾福明<sup>1</sup> 罗晓明<sup>1</sup> 叶上云<sup>2</sup> 杨振国<sup>3</sup>

1: 上海市特种设备监督检验技术研究院

2: 上海锅炉厂有限公司

3: 复旦大学

**摘要:** 针对采用手工氩弧焊 GTAW 打底, 手工电弧焊 SMAW 焊接的 T92/HR3C 异种钢接头的组织性能进行了研究结果表明: 焊接接头满足标准要求, 具有良好的力学性能, 焊缝区是常温下整个接头中最薄弱的环节。

**关键词:** 接头性能, 异种钢焊接, T92, HR3C

## 0 引言

近年来: 随着高参数、大容量超临界(USC)火电机组的大力推广, 具有更高热、更强性能的锅炉用新型耐热钢材料也得到了不断的发展. 为满足使用温度可达 625℃ 以上, 承受的压力上升到 30MPa 的实际需要, 在已有的 9-12%Cr 马氏体钢的基础上, 通过调整材料的合金元素组分, 添加微量合金元素等, 开发了一系列新型 9%Cr 高铬马氏体耐热钢, 诸如 T91/P91、T92/P92、NF616、HCM12、AE911 等, 用于制造电厂的主要设备部件。在国内, 从上个世纪七、八十年代开始从国外引进了不少发电机组与相关技术。奥氏体耐热钢的热强性与高温抗腐蚀、氧化性一般都优于马氏体等其他耐热钢种, 因此锅炉中运行条件最为苛刻的一些部件目前仍主要采用奥氏体型耐热钢。其中, 近些年研发出来的 TP347HFG (TP347H 细晶, 18Cr10NiNb)、Super304H (18Cr9NiCuNbN)、HR3C<sup>1</sup> (25Cr20NiNbN) 等, 在 600~700℃ 的温度范围内仍然具有良好的高温蠕变强度和抗氧化能力。我国华能 1000MW 等级 USC 机组的末级过热器和末级再热器的主要材料, 就分别选用了 Super304H 和 HR3C。因此研究 T92 为代表的新型马氏体耐热钢与新型奥氏体耐热钢间异种钢焊接问题显得至关重要, 其焊接接头在性能的可靠性对预防相关事故的发生具有深远意义。本文对 T92 与新型奥氏体耐热钢 HR3C 的异种钢焊接接头进行了组织结构与性能的研究, 为其在 USC 机组中的安全可靠应用提供理论参考和依据。

---

<sup>1</sup> 注: HR3C 为日本住友公司的商品名, ASME 标准中牌号为 TP310HCbN。

## 1、选材与试样制备

T92 与 HR3C 母材的规格均为 OD 41.3×t 6 mm，它们的化学成分及热处理工艺见表 1。经金相试验打磨、抛光，并用苦味酸、盐酸、酒精、水的混合溶液，及硫酸铜、盐酸、酒精混合溶液分别腐蚀 T92 与 HR3C 母材，它们的显微组织结构如图 1 所示。其中，T92 钢为典型的板条状马氏体显微组织，HR3C 则是明显的块状奥氏体结构，晶粒度大小约为 7 级。通过上述试验可得，进行异种钢焊接选用的 T92 与 HR3C 母材都符合材料标准。

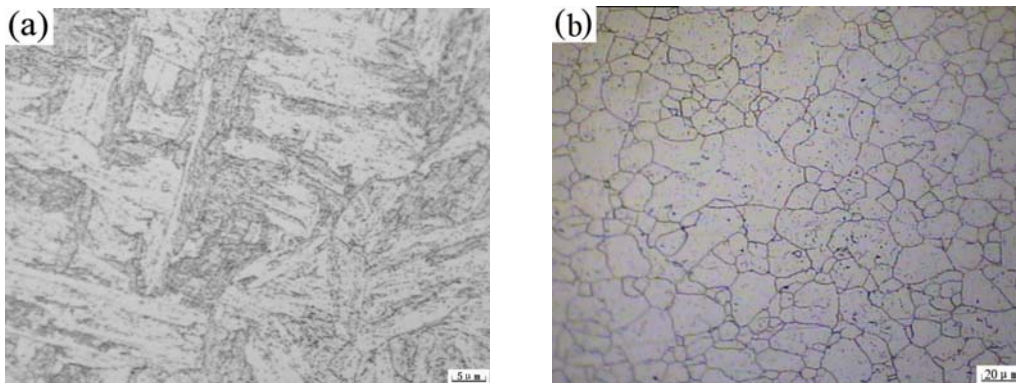
表 1. T92 与 HR3C 化学成分及热处理工艺 (wt %)

成分	C	Cr	Mo	V	Nb	Ni	Mn	P	S	Si	N	Al	W	B
T92 试样	0.11	8.76	0.36	0.21	0.059	0.25	0.46	0.016	0.002	0.39	0.044	0.01	1.63	0.0033
ASME SA-213 T92	0.07~ 0.13	8.50~ 9.50	0.30~ 0.60	0.15~ 0.25	0.04~ 0.09	≤ 0.40	0.30~ 0.60	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.50	0.03~ 0.07	≤ 0.04	1.50~ 2.00	0.001~ 0.006
HR3C 试样	0.06	24.63	/	/	0.49	20.29	1.24	0.012	0.001	0.39	0.24	/	/	/
ASME SA-213 TP310HCbN	≤ 0.10	23.00~ 27.00	/	/	0.20~ 0.60	17.00~ 23.00	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.030	≤ 1.50	0.15~ 0.35	/	/	/

热处理条件：

T92: 1050℃×20 min (正火) + 760℃×60 min (回火)

HR3C: 最低 1110℃固溶处理



(a) T92, 1500×

(b) HR3C, 400×

图 1 T92 与 HR3C 母材的显微组织结构

以 ERNiCr-3 (INCONEL 82/182, Φ1.0mm) 为焊丝，采用手工氩弧焊 GTAW

打底，手工电弧焊 SMAW 对异种钢接头进行焊接，并在 760~770℃ 的温度范围内焊后热处理 2 小时，以消除残余应力。ERNiCr-3 的化学成分见表 2。

表 2. 焊丝 ERNiCr-3 的化学成分(wt %)

成分	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Ti	Cr	Nb+Ta
ERNiCr-3 焊丝	0.030	2.90	1.30	0.004	0.001	0.04	0.01	72.5	0.31	20.0	Nb 2.40
ASME SFA-5.14 (AWS) ERNiCr-3	≤ 0.10	2.5~ 3.5	≤ 3.0	≤ 0.030	≤ 0.015	≤ 0.50	≤ 0.50	≥ 67.0	≤ 0.75	18.00~ 22.00	2.0~ 3.0

## 2、试验结果与讨论

焊后的 T92/HR3C 异种钢接头拉伸试样尺寸如图 2 所示。分别按 ASTM E8-04, E290-97a(2004) 和 E92-82(2003)e2 标准对 4 组接头进行常温拉伸、弯曲和硬度测试。同时，利用金相显微镜分别观察接头的五大区域，即 T92 母材、T92 HAZ、焊缝、HR3C HAZ 及 HR3C 母材的显微组织结构。

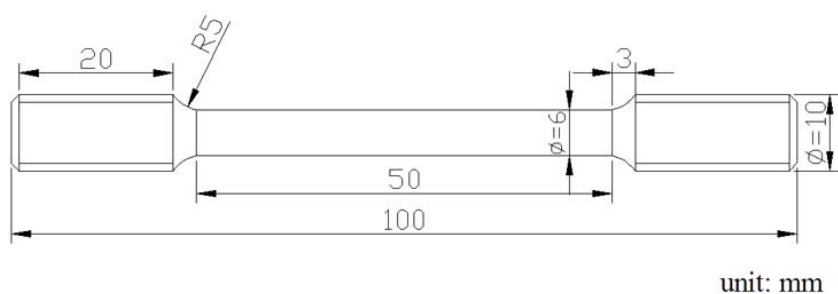


图 2 T92/HR3C 异种钢焊接接头拉伸试样尺寸

### 2.1、力学性能测试

表 3 为 T92/HR3C 焊接接头常温拉伸试验结果，拉伸断裂在焊缝位置，抗拉强度符合标准要求，表 4 的弯曲性能试验结果，在弯面未发现裂纹产生。接头的显微硬度分布如图 3 所示，可见焊缝硬度最低，两个热影响区硬度最高。

表 3. T92/HR3C 焊接接头常温拉伸试验结果

试验编号	抗拉强度 ( $\sigma_s$ , MPa)					断裂位置
	①	②	③	④	平均	
1	661	666	/	/	664	焊缝
2	718	738	735	724	729	焊缝

3	675	694	698	686	688	焊缝	
4	668	667	/	/	668	焊缝	
T92 标准						$\geq 620$	/
HR3C 标准						$\geq 655$	/

表 4. T92/HR3C 焊接接头常温弯曲试验结果

弯曲类型	测试条件	试样编号	测试结果
面弯	D=4T, $\alpha=180^\circ$ D=3T, $\alpha=50^\circ$	1	合格
		2	合格
		3	合格
		4	合格
背弯	D=4T, $\alpha=180^\circ$ D=3T, $\alpha=50^\circ$	1	合格
		2	合格
		3	合格
		4	合格

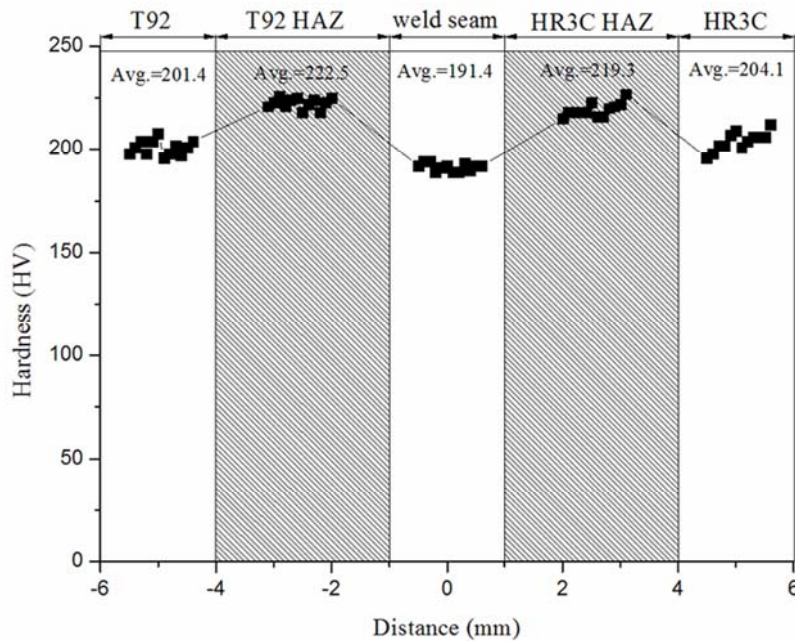
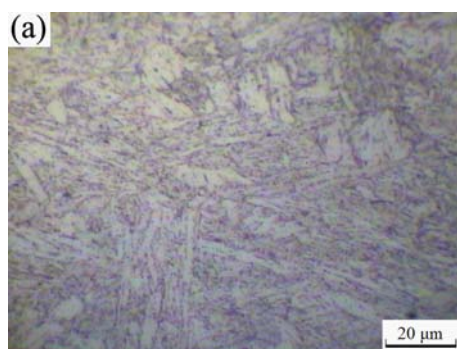


图 3 T92/HR3C 焊接接头硬度分布

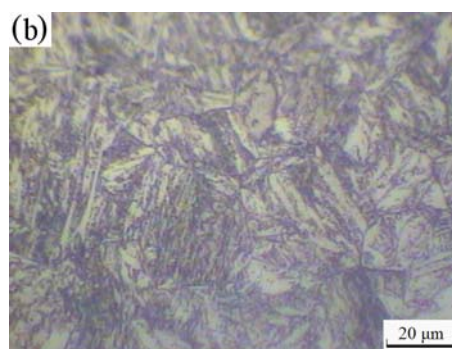
## 2.2 金相组织检验

图 4 为 T92/HR3C 焊接接头 5 个区的显微组织结构。如图 4(a)所示，与焊

接前的母材相比，T92 母材组织在焊后未发现明显的变化，依然是晶粒较细的板条状马氏体结构。但在 T92 热影响区，可看到有发生明显粗化的索氏体板条，见图 4(b)，板条宽度约为 T92 母材马氏体板条的 2 倍。图 4(c)所示为 T92 热影响区侧的焊缝熔合线，而焊缝的显微组织见图 4(d)，从图中可看出，焊缝具有带状的奥氏体组织结构，带宽约为 20 $\mu\text{m}$ 。同样地，图 4(e)为清晰的 HR3C 侧焊缝熔合线。与图 4(g)所示的 HR3C 母材奥氏体结构相比，HR3C 热影响区的奥氏体晶粒更为粗大，这也将造成这个区域硬度上升。上面所述的整个 T92/HR3C 焊接接头 5 大区域的整体结构示意图可参见图 4(h)。



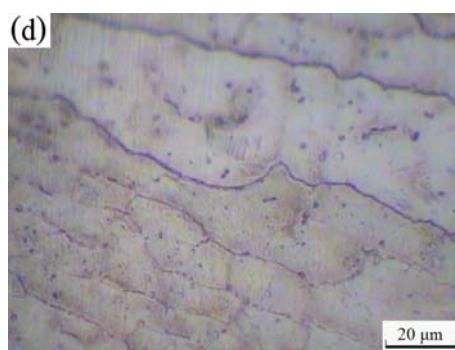
(a) T92 母材



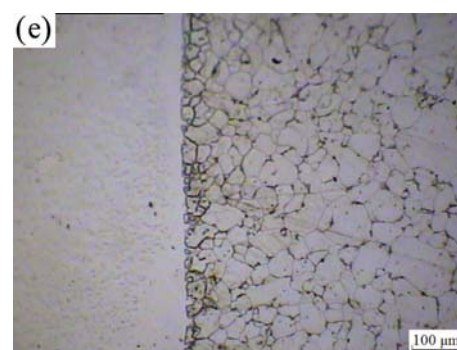
(b) T92 HAZ



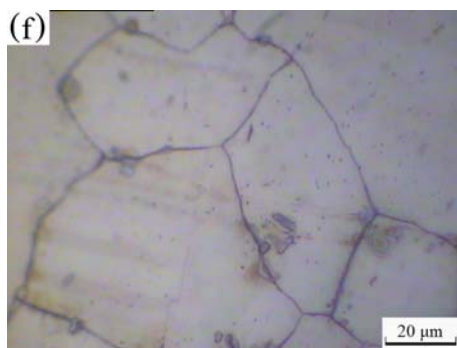
(c) T92 HAZ 侧焊缝熔合线



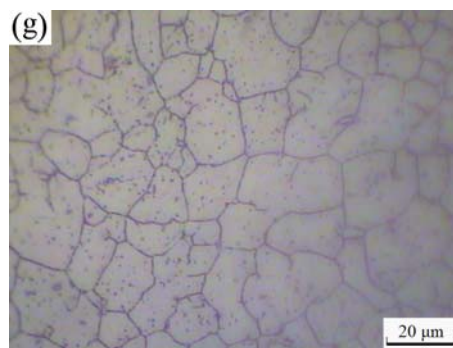
(d) 焊缝



(e) HR3C HAZ 侧焊缝熔合线



(f) HR3C HAZ



(g) HR3C 母材



(h) 焊接接头示意图

图 9 T92/HR3C 焊接接头金相组织

### 2.3、结果分析

通常，焊接过程中产生的热量主要集中在接头两个热影响区。温度过高会导致 T92 HAZ 的晶粒完成高温回复过程，使板条粗化，形成粗大的索氏体板条基体，这从图 4(b)中已得到证明。同时，这一由高温引起的晶粒粗化现象在 HR3C HAZ 也可观察到，见图 4(f)。一般而言，晶粒粗化往往会造成材料的硬度上升、韧性降低。对接头各区显微硬度测试结果也表明，T92 HAZ 与 HR3C HAZ 的硬度确实是最高的，分别达到了 222.5 与 219.3 HV。

焊接采用的焊料为高镍焊丝 ERNiCr-3，镍含量高达 72.5%。因镍为奥氏体形成元素，所以焊缝区的显微组织结构为条状的奥氏体，见图 4(d)。并且，焊料在焊接过程中经历了完整的熔融—结晶过程，奥氏体晶粒得到了充分的生长，故而焊缝区的奥氏体晶粒也较为粗大。但由于镍元素本身的硬度与强度均不高，造成焊缝区是常温下整个接头中最薄弱的环节。表 4 及图 3 所示的显微硬度测试与拉伸试验结果，均证明了这一点，即焊缝区的硬度是 5 个区域中最低的，并且拉伸断裂位置也都发生在焊缝。

### 3、结论

(1): 对 T92/HR3C 异种钢焊接接头拉伸试验、弯曲试验冲击试验，结果表明焊接接头满足标准，具有良好的力学性能。

(2): T92/HR3C 异种钢焊接接头的显微硬度测试与拉伸试验表明焊缝区是常温下整个接头中最薄弱的环节。

### 参考文献

- 1: 李益民, 史志刚, 贾建民等. P91 主蒸汽管道焊缝断裂韧度与其它力学能的关系[J]. 中国电机工程学报, 2005, 2(3): 153–157
- 2: 瓦卢瑞克·曼内斯曼钢管公司. T92/P92 钢手册[A]. 超(超)临界锅炉用钢及焊接

- 技术论文集[C]. 电力行业电力锅炉压力容器安全监督管理委员会, 2005, 285-302
- 3: 史春元, 田锡唐. 异种钢接头沿界面蠕变脆断的力学控制参量[J]. 焊接学报, 1995, 10(4): 185-189
- 4: 张建强, 吴苏, 赵海燕等. 马氏体/贝氏体异种钢耐热钢焊接接头的力学性能及界面失[J]. 机械工程学报, 2003, 2: 58-61
- 5: 肖强, 张建强, 章应霖. 9Cr1MoVNbN/12Cr2MoWVTiB 异种钢焊接接头的力学性能及界面失效行为研究[J]. 焊接技术, 2002, 4: 16-18
- 6: 王亮, 刘宗德, 陈鹏等. T92 钢时效硬度变化实验及蠕变寿命预测研究[J]. 试验研究, 2008, 125(3): 3-6