



不同热处理工艺对A/M异种钢焊接接头组织及性能的影响

张杰 钟正彬 魏伏 王学

【摘要】 对热丝TIG焊焊接的SA-213T91+SA-213TP347HFG异种钢接头，采用正常热处理（760℃/90min）、异常热处理（520℃/90min）、二次热处理（异常热处理+正常热处理）三种不同的热处理工艺进行处理，研究其对接头力学性能、硬度分布、金相组织的影响。正常热处理和二次热处理的接头常温拉伸、弯曲、硬度、冲击等力学性能均满足标准，熔合区组织为回火索氏体；异常热处理其接头T91侧热影响区的硬度明显增高，冲击值明显下降，熔合区组织为马氏体；二次热处理接头的常温力学性能与正常热处理接头相近，说明最终热处理决定接头的组织与性能。

关键词： 异种钢焊接接头；焊后热处理；金相组织；力学性能

随着电站锅炉向大容量、高参数发展，T91、TP347HFG等高等级材料在超（超）临界锅炉中大量使用，异种钢焊接接头大量出现，尤其以TP347HFG为代表的奥氏体不锈钢（A）和以T91为代表的马氏体（M）不锈钢组成的异种钢焊接接头在国内外电站得到了广泛的应用。

某1000MW超（超）临界机组锅炉高再管屏发现SA-213T91+SA-213TP347HFG $\phi 45\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$ 、 $\phi 45\text{ mm} \times 9.8\text{ mm}$ 焊接接头热影响区硬度偏高，异种钢接头脆性开裂失效。通过试样硬度检测：发现高再入口段管件编号1中T91侧热影响区硬度HB值为444、447、450，管件编号2中T91侧热影响区硬度HB值为429、437、

467（超出DL/T438—2016规定的上限 $\leq 290\text{ HBW}$ 的要求）。从接头的裂纹形貌及扫描电镜分析，开裂均在T91侧热影响区的近焊趾区域，裂纹断续沿圆周方向扩展，裂纹两侧有少量分支的短小沿晶裂纹，末端尖细（见图1、图2），裂纹产生在焊缝热影响区的粗晶区，沿晶界开裂，裂纹两侧的组织为粗大的板条马氏体，具有冷裂纹特征。

针对A/M异种钢接头T91侧

热影响区硬度偏高的问题，为了查找产生缺陷的原因，我们开展了工艺试验分析。通过分析研究焊接规范、热处理保温温度、焊后热处理时机等因素对接头热影响区硬度的影响，找到了造成接头过热区硬度偏高的原因：主要是由于热处理过程中操作不当，导致回火不足，焊后热处理不充分，造成接头热影响区硬度偏高。

通过模拟试验和分析，确定



图1 裂纹外观

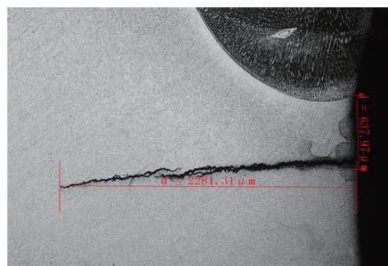


图2 裂纹深度及形貌

A/M异种钢接头热处理保温温度为520℃时，其T91侧热影响区硬度最高，达到峰值。在产品制造、安装过程中，为了降低异种钢接头硬度，通常需要对硬度偏高的接头进行二次热处理，为了评价异常热处理、二次热处理对接头力学性能、硬度分布、金相组织的影响，我们开展了正常热处理、异常热处理、二次热处理对焊接接头的组织及性能影响的试验研究。

1. 试样制备和试验方法

(1) 试样制备 异种钢对接接头SA—213T91+SA—213TP347HFG $\phi 50.8\text{mm} \times 12\text{mm}$ 焊缝坡口形式选用U形坡口，焊丝选用ERNiC—3、 $\phi 1.0\text{mm}$ ，在直管热丝TIG机上焊接试样3组，焊后热处理按3种热处理工艺执行：第一组试样编号S1，正常热处理（760℃/90min）参照图3，第二组试样编号S9，异常热处理（520℃/90min）参照图4，第三组试样编号S67，二次热处理（520℃/90min+760℃/90min）参照图3+图4执行。

2. 试验方法及结果

(1) 试样探伤检测 3组试样热处理后异种钢接头100%RT探伤检测合格，100%PT探伤检测合格，PT探伤检测范围为焊缝及两侧各100mm区域。

(2) 接头力学性能 焊接接头力学性能试验检测数据如表1所示。

(3) 接头硬度试验 为了避免检测的偏差和数据的偶然性，分别对3组接头硬度进行

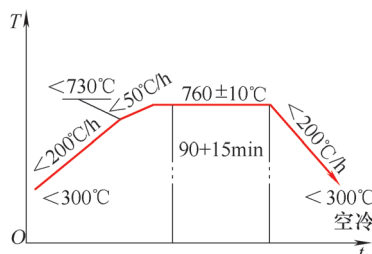


图3 正常热处理规范

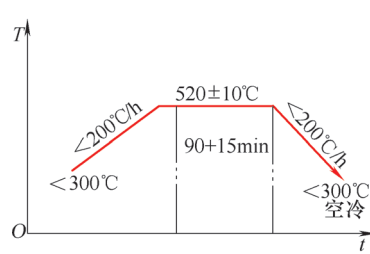


图4 异常热处理规范

表1 接头力学性能试验

试样编号	取样位置	抗拉强度 /MPa及断裂位置	弯曲 (D=4t)	冲击吸收能量/J				
				焊缝	HAZ1	母材1	HAZ2	母材2
S1	接头	628 焊缝上	正弯180° 未裂	123	150	258	188	238
		628 焊缝上	正弯180° 未裂	138	170	254	160	262
			反弯180° 未裂	127	134	262	160	266
			反弯180° 未裂					
S9	接头	637 焊缝上	正弯180° 未裂	126	108	269	192	277
		624 焊缝上	正弯180° 未裂	162	45	266	186	266
			反弯180° 未裂	144	38	280	209	250
			反弯180° 未裂					
S67	接头	608 焊缝上	正弯180° 未裂	124	130	282	156	190
		614 焊缝上	正弯180° 未裂	114	228	278	154	180
			反弯180° 未裂	128	283	272	158	180
			反弯180° 未裂					

注：试验温度为20℃，母材1、HAZ1为SA—213T91及其侧熔合区，母材2、HAZ2为SA—TP347HFG及其侧熔合区。

了两次检测，检测了布氏硬度HBW值和维氏硬度HV值，HBW检测数据如表2所示。

根据接头硬度HV试验结果，绘制出接头硬度分布如图5~图7所示。

(4) 金相试验 接头显微

组织：S1焊缝组织为奥氏体+碳化物，T91侧过热区组织为回火索氏体；S9焊缝组织为奥氏体+碳化物，T91侧过热区组织为马氏体；S67接头的焊缝组织为奥氏体+碳化物，T91侧过热区组织为回火索氏体。在近表层焊缝附

表2 接头硬度试验

试样编号	取样位置	HBW 2.5/187.5									
		焊缝	平均值	HAZ1	平均值	母材1	平均值	HAZ2	平均值	母材2	平均值
S1	接头	150		229		198		161		172	
		145	149	215	218	195	197	164	165	167	170
		153		211		198		170		170	
S9	接头	145		417		195		156		167	
		156	152	415	414	202	197	166	164	167	167
		156		409		195		169		167	
S67	接头	157		220		209		167		167	
		157	158	211	214	214	210	169	170	170	168
		160		211		207		173		168	

注：试验温度为20℃，母材1、HAZ1为SA—213T91及其侧熔合区，母材2、HAZ2为SA—TP347HFG及其侧熔合区。

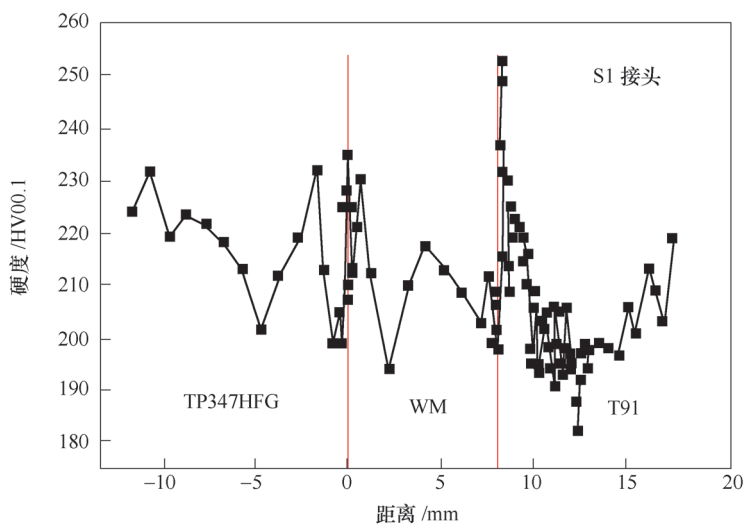


图5 S1接头的硬度分布

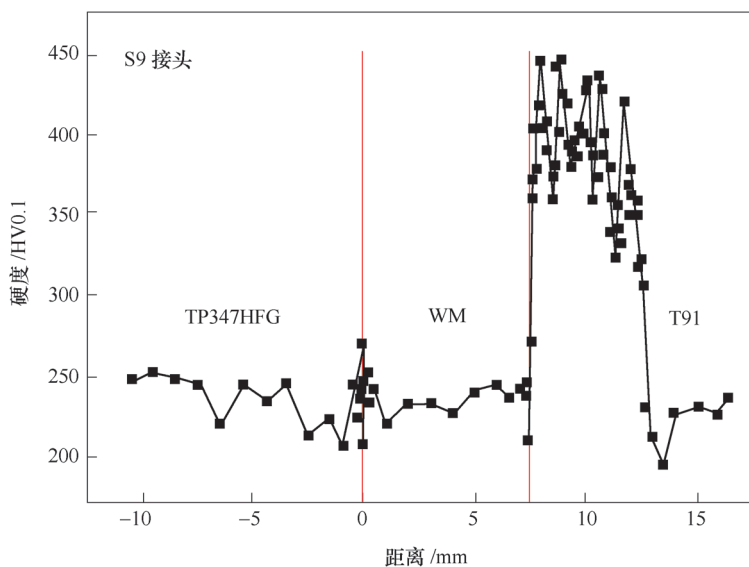


图6 S9接头的硬度分布

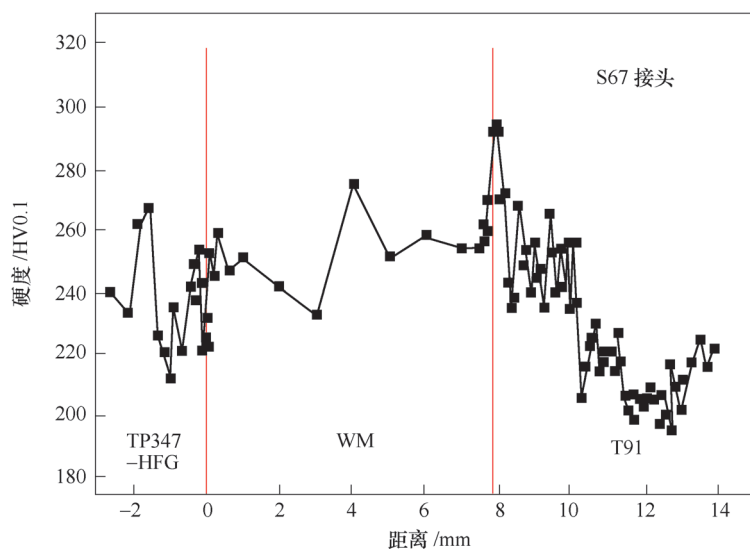
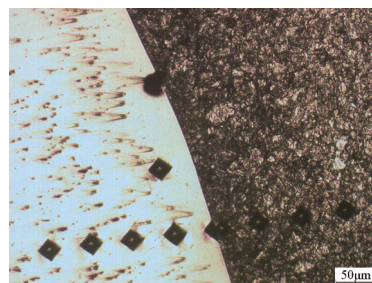
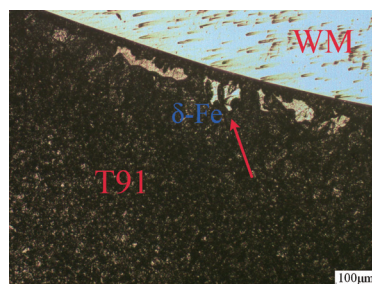


图7 S67接头的硬度分布

近T91侧熔合线附近均发现白亮的铁素体带(见图8~图10)。

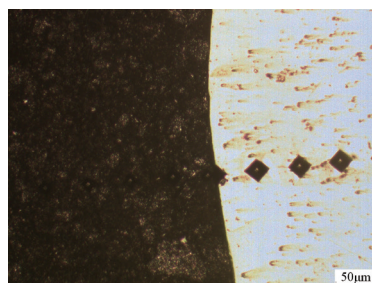


(a) WM/T91界面

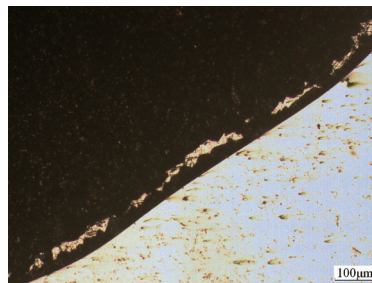


(b) WM/T91界面(有铁素体)

图8 S1接头的显微组织



(a) WM/T91界面

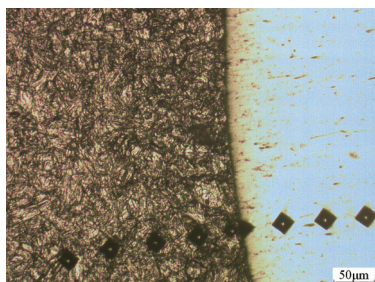


(b) WM/T91界面(有铁素体)

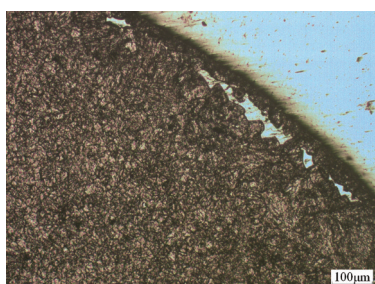
图9 S9接头的显微组织

3. 试验结果分析

(1) 接头常温力学性能分析 从试验结果可见,在3种焊后热处理工艺下,T91+TP347HFG异种钢接头的常



(a) WM/T91界面



(b) WM/T91界面 (有铁素体)

图10 S67接头的显微组织

温力学性能差异不大，均具有良好的拉伸强度、塑性，常温拉伸试样均断在焊缝。它们最大的差别在于异常热处理接头的T91侧HAZ硬度明显偏高（超过400HBW），其冲击韧性明显下降。二次热处理接头的常温力学性能与一次正常热处理接头相近，说明最后的补充高温热处理最终决定接头的组织与性能。

(2) 接头硬度分布分析 S1接头的硬度分布如图5所示，焊缝的硬度低于两侧母材，TP347HFG侧熔合线附近HAZ的硬度较该侧母材低，而T91侧熔合线附近HAZ的硬度较高。在距T91侧熔合线4.3mm处出现硬度谷底，该部位在靠近母材的FGHAZ。S9接头的硬度分布如图6所示，与S1相比，母材与焊缝区的硬度略有升高，但T91侧HAZ硬度的升高更为明显。在靠近母材的HAZ也出现了硬度的波谷，距离T91侧熔合线6mm处

的硬度最低。S67接头的硬度分布如图7所示，与S9相比，母材与焊缝区的硬度相近，但T91侧HAZ的硬度的明显降低，与S1相近，在距T91侧熔合线4.5mm处出现硬度的波谷。

硬度试验结果显示：异种钢接头检测的HBW值和HV值都呈现相同的趋势，存在一致性，与正常热处理相比，异常热处理的焊接接头T91侧HAZ硬度明显偏高（超过400HB），二次热处理接头的硬度值与一次正常热处理接头相近。

由于焊后T91热影响区会进行奥氏体-马氏体转变，最终形成淬硬马氏体结构，硬度太高对材料的韧性往往不利，为此焊后需要对焊接接头进行回火热处理。进行正常热处理和二次热处理的异种钢接头，T91热影响区的硬度是整个接头硬度最高的区域，但和其他区域相比并没有高出太多，说明焊后热处理已经明显改善T91热影响区的韧性。经过焊后热处理的T91热影响区的组织已经在基体上析出了许多弥散分布的碳化物粒子，从而降低了硬度。T91异种焊接接头焊后热处理是可以显著改善接头的性能。

(3) 金相分析 正常热处理的接头S1的显微组织看到，焊缝晶粒粗大，T91侧FGHAZ的晶粒非常细小，比母材还细，在近表层焊缝附近T91侧沿熔合线形成白亮的铁素体带（见图8b）；二次热处理接头S67的显微组织特征与S1类似。T91侧熔合区组织均为回火索氏体。

异常热处理接头S9的显微组

织照片与S1相比，主要差异在于异常热处理接头T91侧热影响区腐蚀后的颜色明显偏暗，说明其组织耐腐蚀程度低，T91侧FGHAZ组织容易被腐蚀，其组织回火温度低于正常回火温度，回火不充分，接近于淬火态组织，造成组织中碳化物弥散度较大所致。值得注意的是，在近表层焊缝附近T91侧熔合线附近也发现白亮的铁素体带（见图9b），说明铁素体是在焊接过程中形成的，焊后热处理工艺对其没有影响，T91侧熔合区组织为马氏体。

(4) 接头开裂分析 异种钢接头焊后热处理不充分，导致T91钢侧热影响区粗晶区硬度值高，其塑性、韧性大大降低，冲击韧性较差，同时焊接接头内部存在较大的轴向残余应力，微观组织恢复不到位，由于存在马氏体回火脆性、中温蠕变脆化等因素的影响。在结构应力、温差应力、焊接残余应力等作用下，形成局部的拉伸应力集中，促进裂纹在该部位的萌生和扩展，属于淬硬脆化裂纹引起的开裂。

4. 结语

通过本次试验，不仅减少了业主对异种钢接头二次热处理不必要的担心，消除了业主的顾虑，而且为评价接头的状况，分析缺陷的产生提供了依据。

作者简介：张杰等，东方电气集团东方锅炉股份有限公司；王学，武汉大学动力与机械学院。

MW 20170808