A312 TP347H 的手工焊与窄间隙热丝 TIG 自动焊工艺比较

中国核工业第五建设公司（上海市 201512）魏宏兵　刘卫华　王怀

摘要　A312 TP347H 奥氏体不锈钢除了具有高温抗氧化性以及热稳定性外，因其中添加稳定化元素 Nb 并经 910℃稳定化热处理后使得其具有较强的抗晶间腐蚀性能。近年来，国内外关于 347 型奥氏体不锈钢的研究已越来越受到广泛关注并且其应用也逐渐被推上日程，但前期的多数研究主要集中在薄壁管，厚壁管的焊接工艺研究罕见报道。为了研究厚壁 A312 TP347H 的焊接工艺性能，特对 φ350×φ200mm 的 A312 TP347H 材料进行手工焊与窄间隙热丝 TIG 自动焊的工艺性能试验比较。试验结果表明：相比手工焊工艺，窄间隙热丝 TIG 自动焊工艺焊缝具有更高的熔敷效率及完美的外观成型，并表现出其焊缝较高的力学及抗腐蚀性能，同时也再次验证了手工焊并稳定化热处理后，其接头的力学性能难以合格的问题。A312 TP347H 奥氏体不锈钢材料窄间隙热丝 TIG 自动焊的应用成功解决了以往 A312 TP347H 型奥氏体不锈钢手工焊时，焊接及稳定化热处理过程中易产生裂纹及力学性能较差等问题，为厚壁 A312 TP347H 的焊接及稳定化热处理开辟了一条蹊径。

关键词：A312TP347H　窄间隙热丝 TIG 自动焊　稳定化热处理

0　前　言

A312 TP347H 奥氏体不锈钢有着较高的力学性能及耐腐蚀性能储备，但因其在焊接及焊后稳定化热处理过程中表现的较高裂纹倾向，使得其在工程实际中的推广应用受到很大的阻碍，尤其对于厚壁管道的应用影响更为显著。鉴于窄间隙热丝 TIG 自动焊的诸多工艺优点，进行厚壁 A312 TP347H 的手工焊与窄间隙热丝 TIG 自动焊工艺研究有着尤为重要的意义，其结果将为日后 A312 TP347H 的进一步应用产生重要影响。

1　试验材料及其裂纹敏感性分析

1.1　试验材料及其热裂纹敏感性

试验材料采用 A312 TP347H 奥氏体不锈钢，规格为 φ350×φ200mm，其化学成分见表 1，交货状态为固溶，常温时其抗拉强度及屈服强度分别为 565.4 MPa,226.5 Mpa，延伸率为 54.8%。通过其常温时的力学性能可以看出 A312 TP347H 有着较低的屈强比及较高的延伸率，反映出此材质具有高强度的同时，更兼具较高的塑性性能。

表 1　A312 TP347H 化学成分（质量分数%）

元素	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Nb
标准值	0.06～0.1	≤2.0	≤0.03	≤0.02	≤0.75	9～13	17～20	8×C%～1
实测值	0.077	1.65	0.029	0.002	0.35	9.47	17.15	0.86

由于各化学元素在熔敷金属的凝固过程中有着极为复杂的冶金反应，有的元素间形成低熔点共晶，有的则由于杂质元素的偏析形成膜状、球状、块状的共晶化合物从而对裂纹的产生有着显著的促进作用；而有的元素则可以抑制杂质元素的偏析或稳定 γ 相，或阻止δ→σ 的脆性转变。奥氏体不锈钢中各元素对热裂的促进与抑制概括起来可用“热裂指数”HCI（HCI=1080P+733S+13Si+0.2Ni-43C-3Mn-0.7Cr）来表示。尤其当 HCI≥15 时，表现出较高的热裂纹倾向。

由表 1 可求得 A312 TP347H 的热裂指数 HCI 为 18.964， 明显大于 15，可见 A312 TP347H 有着较明显的焊接热裂纹倾向。

1.2　A312 TP347H 奥氏体不锈钢的再热裂纹敏感性

由于含 Nb 的 A312 TP347H 奥氏体不锈钢焊后需要进行 910℃左右的稳定化处理，使得焊接过程中固溶的碳在高温时能以 NbC 的形式沉淀析出，致使晶格发生畸变和晶内硬化，而阻止晶内滑移，很可能使得弱化了的晶界应力集中，进而导致沿晶开裂。表 2 列出了集中奥氏体钢的碳化物的比热容和再热裂纹敏感性，可以看出碳化物的比热容越大，再热开裂敏感性越高。由此可知 347 型钢最易产生再热裂纹。尤其在厚壁 347 型不锈钢中，由于较高的焊接残余应力以及热处理过程中难以避免的温差应力更易加剧其再热过程中脆裂的发展。

表 2　奥氏体钢中碳化物比热容与再热脆裂敏感性

钢种	碳化物	相对于 γ 晶格的碳化物比热容	再热开裂敏感性
347、347H	NbC	1.91	高
321、321H	TiC	1.76	中
304	$M_{23}C_6$	1.15	低
316、316L	无	—	无

2　焊接工艺

2.1　焊接坡口设计

为了减小 A312 TP347H 母材化学成分对焊缝的稀释所带来的影响，通常需要减少熔合比即大坡口或小熔深焊接，故手工焊的坡口设计采用图 1 所示。但对于窄间隙焊，坡口的增大势必会增加焊缝金属的熔敷量，并无可避免带来焊接应力的增加，同时也失去窄间隙、窄坡口的意义，故坡口设计采用图 2 所示。

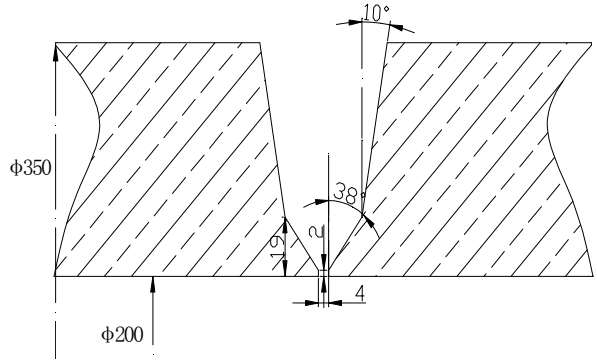


图 1　手工焊坡口设计

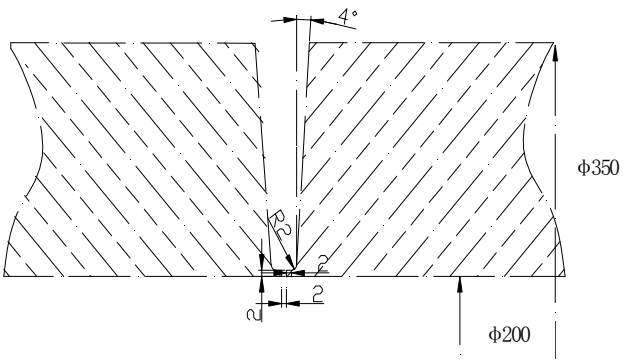


图 2　窄间隙焊坡口设计

2.2　焊接工艺

由 1.1 及 1.2 知 A312 TP347H 在焊接及稳定化热处理过程中表现出较高的裂纹倾向，故对手工焊而言，控制焊接线能量及层间温度将显得尤为重要。手工焊试验采用手工氩弧焊打底，热输入不大于 12KJ/cm，层间温度不高于 150℃；焊条电弧焊填充盖面，热输入不大于 17KJ/cm，层间温度不高于 150℃。焊丝及焊条牌号分别为 Φ2.4 的 H0Cr20Ni10Nb 及 Φ3.2 的 A137 焊条。

表 3 给出了窄间隙热丝 TIG 自动焊的焊接工艺参数，焊丝选用 Φ0.8 的 MIG347。

表 3　A312 TP347H 窄间隙热丝 TIG 自动焊工艺参数

名称	焊材规格 mm	峰值电流 A	基值电流 A	热丝比例 %	脉冲频率 Hz	电压 V	速度 cm/min	层间温度 ℃
打底	0.8	120-180	75-100	20-40	1.5-5	9-12	40-60	≤150
热焊	0.8	140-220	85-120	20-40	1.5-5	9-12	40-60	≤150
填充	0.8	180-300	100-140	40-80	1.5-5	9-12	50-70	≤150
盖面	0.8	160-280	80-120	30-70	1.5-5	9-12	50-70	≤150

2.3　稳定化热处理

焊后热处理工艺采用 ASME 标准推荐规范，局部热处理的加热宽度全宽 $5(rt)^{1/2}$，其中 r 为管子的内半径，t 为管子的厚度；保温宽度为 $10(rt)^{1/2}$，即在加热宽度的两侧加 $2.5(rt)^{1/2}$；加热速度为 220×25/t(℃/h)，其中 t（mm）为管子的厚度；稳定化保温温度为 910℃，保温时间为 t/25（hr）；空冷；400℃以下不控温。

稳定化热处理曲线示意图见图 3。

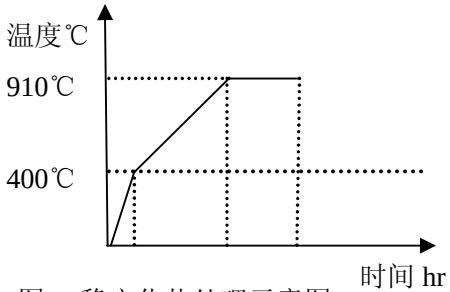
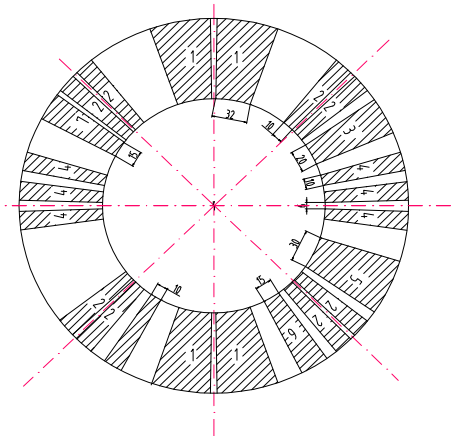


图 3 稳定化热处理示意图

3　焊接性能分析

按照图 4 分别进行稳定化热处理后的手工焊及窄间隙焊焊接接头性能取样。



1. 全截面拉伸
2. 侧弯试样
3. 晶间腐蚀试样
4. 冲击试样
5. 化学分析试样
6. 宏观试样
7. 微观试样（含晶粒度测定）
8. 硬度试样

图 4　Φ350×Φ200mm 的 A312 TP347H 性能取样

3.1　力学性能

两组焊口稳定化热处理后拍片均合格，按图 4 取样要求，拉伸及横向侧弯分上下两层取样，焊缝上下部分拉的伸厚度及横向侧弯宽度均为 38mm。

拉伸及弯曲结果分别见表 4 与表 5。

表 4　手工焊及窄间隙焊的拉伸试验结果

方法	试样编号	抗拉强度（Mpa）	断裂部位	备注
手工焊	M1-1	568	母材	焊缝上部
	M1-2	548	母材	焊缝下部
	M2-1	564	母材	焊缝上部
	M2-2	552	母材	焊缝下部
窄间隙焊	N1-1	543	母材	焊缝上部
	N1-2	562	母材	焊缝下部
	N2-1	558	母材	焊缝上部
	N2-2	526	母材	焊缝下部

表 5　手工焊及窄间隙焊的横向侧弯试验结果

试样编号	手工焊结果	窄间隙焊结果	备注
M1-1	完好	完好	焊缝上部
M1-2	完好	完好	焊缝下部
M2-1	断裂	完好	焊缝上部
M2-2	0.6mm 裂纹	完好	焊缝下部
N3-1	断裂	完好	焊缝上部
N3-2	完好	完好	焊缝下部
N4-1	断裂	完好	焊缝上部
N4-2	3.8mm 裂纹	完好	焊缝下部

由表 4 结果看出两种方法的焊口经稳定化热处理后拉伸性能比较接近，无太大出入，并且和母材性能也较为一致，断裂部位均在母材，符合国家标准要求。而由表 5 结果可知手工焊焊口稳定化热处理后横向侧弯性能较低，无法满足国家标准要求；而窄间隙热丝 TIG 自动焊焊口分层取样后的 8 个弯曲试样完好，无任何裂纹，表现出了良好的塑性性能，完全符合国家标准要求。

3.2　晶间腐蚀性能

为了验证稳定化热处理后焊接接头的抗晶间腐蚀效果，特对以上两组焊口的手弧与氩弧层分别进行晶间腐蚀试验试验标准按 GB4334.5-2000 执行。

晶间腐蚀试验结果见表 6。

表 6　手工焊及窄间隙焊的晶间腐蚀试验结果

试样编号	手工焊试验结果	取样位置	窄间隙焊试验结果	取样位置	备注
M1-1/N1-1	断裂，金相法不合格	GTAW	无晶间腐蚀倾向，合格	焊缝	敏化 650℃，1h
M1-2/N1-2	断裂，金相法不合格	GTAW	无晶间腐蚀倾向，合格	焊缝	敏化 650℃，1h
M2-1/N2-1	无晶间腐蚀倾向，合格	SMAW	无晶间腐蚀倾向，合格	热影响区	敏化 650℃，1h
M2-2/N2-2	无晶间腐蚀倾向，合格	SMAW	无晶间腐蚀倾向，合格	热影响区	敏化 650℃，1h

由表 6 结果来看，手工焊氩弧层的晶间腐蚀不合格，故晶间腐蚀性能无法满足设计需要，而对于窄间隙焊口，其焊缝及热影响区均表现出良好的晶间腐蚀性能，符合国家标准要求，满足了设计需要。

4 结论

（1）φ350×φ200mm 的 A312 TP347H 奥氏体不锈钢按以上工艺的手工焊并稳定化热处理后，尽管避免了裂纹的产生，且拉伸性能合格，但弯曲性能及氩弧层的晶间腐蚀性能均不符合相应的国家标准要求。

（2）φ350×φ200mm 的 A312 TP347H 奥氏体不锈钢按以上工艺的窄间隙热丝 TIG 焊并稳定化热处理后，接头的拉伸，弯曲及晶间腐蚀性能均符合相应的国家标准要求，满足设计需要。

（3）窄间隙热丝 TIG 自动焊有着较低的熔敷金属量及较高的熔敷效率，同时因焊接时的直流脉冲作用，可以有效抑制焊缝金属晶粒的形核与长大，另外焊接过程中辅助的热丝电流除了能保证较高的熔敷效率同时也为较低的焊接热输入提供了有力保证，进而为焊接接头保持较低的焊接残余应力提供了有利条件，这是普通手工焊方法难以达到的。

（4）类似 347 型对焊接工艺要求较高的材料（如稳定化钢、高合金钢、耐热钢、镍合金等），推荐应用窄间隙热丝 TIG 自动焊，有利于保证焊接接头的综合性能。

参考文献

[1]《焊接工程缺欠分析与对策》　　陈伯蠡