

石化装置用 SA335P91 厚壁炉管焊接工艺研究

中国石化集团茂名石化机械厂 黄嗣罗 余 松

摘 要 :分析了 SA335P91 厚壁炉管焊接的冷裂敏感性 ,研究了焊接线能量和层间温度对 P91 钢的焊接接头冲击韧性的影响 ,并规定了手工氩弧焊的焊接线能量上、下限值和合理的层间温度。

关键词 :石化装置 ;P91 钢管 ;焊接工艺 ;冲击韧性

中图分类号 :TG457.6 TG44 文献标识码 :B 文章编号 :1001 - 4837(2002)02 - 0042 - 04

Welding Procedure Research of SA335 P91 Thick - Wall Furnace Pipes in Petrochemical Plants

Maoming Petrochemical Machinery Plant HUANG Siluo YU Song

Abstract :In this article ,cold cracking sensitivity was investigated of welded P91 thick - wall furnace pipes . Impact toughness was directly and significantly subject to welding heat input and interpass temperature . Weld toughness ,especially for fused and heat - affected zones is weakened in case of increasing of heat input and interpass temperature .

Key words :petrochemical plants ;P91 steel ;weld technics ;impact toughness

P91 是一种铬钼类型马氏体耐热钢 ,具有良好的高温强度、抗高温氧化性和耐硫化氢腐蚀性能 ,在石化装置上的使用温度可达 500 ~ 600℃ ,有时应用到 600 ~ 700℃ ,已逐步取代 TP304 不锈钢及 12CrMoV 等钢管材 ,用于乙烯裂解对流段等装置上 ,它与其它铁素体耐热钢焊接时不存在异种钢焊接的种种弊病 ,与传统 Cr - Mo 钢相比 ,通过比较在同样的工作条件下(工作温度、压力和设计寿命) ,P91 和 P22、X22 等不同类型的 Cr - Mo 钢相比 ,它所需的设计壁厚是最小的 ,因此 ,P91 钢具有极大的优越性 ,可以用来减少结构的设计厚度 ,降低结构的整体重量和材料成本^[1]。

国内 P91 钢在石化装置上应用较少 ,为了保证焊接接头质量和运行的可靠性 ,合理地确定焊接线能量、预热温度及层间温度 ,作者进行了这方面的研究 ,并将研究结果应用于乙烯裂解装置对流段的制造中 ,取得了良好的效果。

1 试验材料及条件

材料取自日本生产的 $\varnothing 88.9 \times 11.3\text{mm}$ 的 SA335P91 钢管 ,其化学成分和力学性能如表 1、表 2 所示。

表 1 P91 钢的化学成分

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N
含量	0.09	0.45	0.36	0.004	0.016	8.89	0.15	1.01	0.08	0.21	0.045

表 2 P91 钢的力学性能

	σ_s MPa	σ_b MPa	δ %	$A_{KV}(+20^\circ\text{C})$ J	HV10
标准	≥ 415	585 ~ 870	≥ 20	≥ 41	—
复检	612	756	29	87	198

2 抗裂试验

试验用 P91 钢管壁厚 11.3mm 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验按日本 JIS - 23158 标准进行 ,用手工氩弧

焊在各种不同的预热温度下焊接试件。焊后试样自然静置 48h,用着色探伤法检查焊缝表面以及用光学显微镜低倍观察断面,其裂纹率如表 3。

表 3 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验数据

预热温度(℃)	室温	100	150	200	250	300
表面裂纹率(%)	100	0	0	0	0	0
断面裂纹率(%)	100	2.5	0	0	0	0

3 不同焊接线能量和层间温度下的接头韧性

3.1 焊接线能量

试验分别采用 10~40kJ/cm 每 10kJ/cm 一个台阶共 4 种不同的焊接线能量施焊试样,焊前预热 150℃,层间温度控制在 250℃左右,焊后进行 760℃×2h 高温回火处理。焊缝和热影响区分别在 -40℃~+20℃等不同的温度下进行 V 型缺口冲击试验,运用灰色系统理论中的关联分析法^[2]处理焊缝和热影响区各种温度下的夏比冲击功,用关联度(R)描述接头的韧性和焊接线能量的关系,其结果如图 1 所示。

3.2 层间温度

在焊接线能量为 21kJ/cm($I = 150A, U = 15v, V = 9cm/min$) 预热温度为 150℃的条件下,层间温度从 150℃、250℃、350℃、450℃ 分别进行焊接试样制备,并进行焊后 760℃×2h 焊后高温回火处理,再检验焊缝和热影响区各种温度下的 V 型缺口冲击功,数据处理方法同 3.1 所述。其结果如图 2 所示。

4 分析与讨论

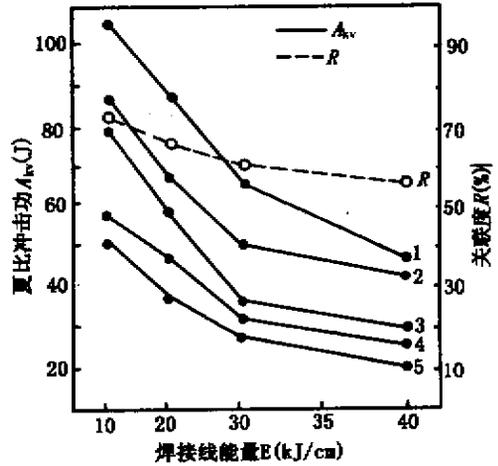
4.1 预热温度

在 P91 的焊接中,需要采用恰当的预热温度和预热措施来防止氢致裂纹的产生。为此规定较高的预热温度是必要的,但不应高过马氏体完全转变温度点 M_f 的温度,否则当焊件完成最终热处理时,将残留部分未转变的奥氏体可能最终转变成马氏体组织,而失去了焊后热处理的基本作用,这一点要特别引起重视。参考试验结果,对于 $\varnothing 88.9 \times 11.3mm$ 的 P91 炉管焊前的预热温度控制在 150℃~200℃左右较为合适。

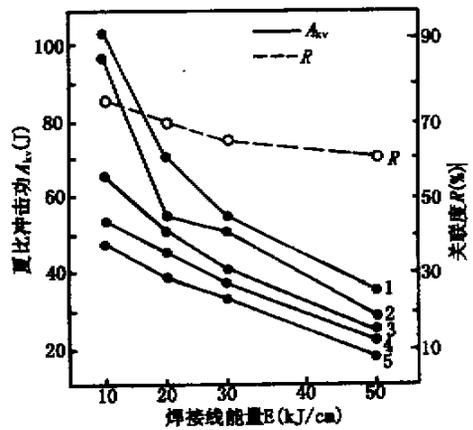
4.2 线能量和层间温度对接头韧性的影响

从图 1 可看到,随着焊接线能量的增加,焊缝和热影响区的夏比冲击功值呈下降趋势,变化较明显。从金相分析来看,接头焊后经最终热处理后,马氏体万方数据

体板条经高温回火后变成回火马氏体,焊接线能量



(a) 焊缝区



(b) 热影响区

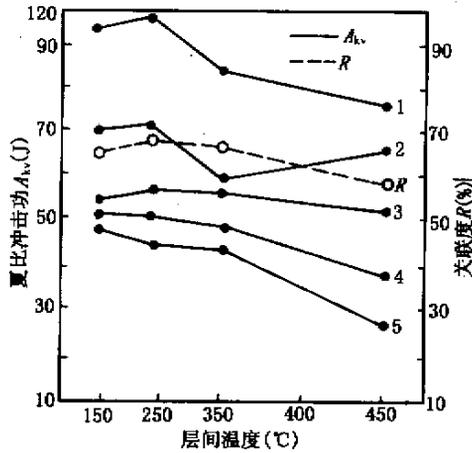
序号表示温度: 1. 20℃ 2. 0℃ 3. -20℃ 4. -30℃ 5. -40℃

图 1 焊缝区、热影响区夏比冲击功与焊接线能量的关系和关联分析结果

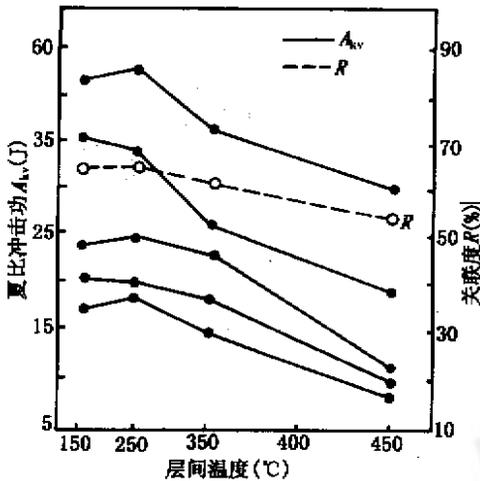
为 10kJ/cm 的试样,焊缝和近缝区、热影响区的马氏体组织尺寸比较小,板条界面较为模糊,且位向不明显,未见有明显的碳化物析出,如图 3 所示。但焊接线能量为 40kJ/cm 的试样,虽经高温回火,粗大组织的板条界面仍然较清晰,回火马氏体的尺寸仍然比较粗大,而且板条成束较宽,位向仍然存在且较为明显,如图 4 所示,尤其是熔合区附近晶粒长大最为明显,方向性强,这与文献[3]所述是一致的;由于过大的焊接线能量使组织严重过热,晶粒尺寸生长过大,而高温回火又在 Ac_1 温度以下,所以长大的晶粒尺寸不可能得到重新细化,它对焊缝组织的影响也只能在细微结构的调整上,而粗大马氏体束的尺寸和位向没有得到根本改变。粗大的马氏体束尺寸是造成冲击韧低的主要原因;同时,析出的碳化物

是粗大的颗粒状 $M_{23}C_6$ ，不是通常所说的片状渗碳体 Fe_3C ^[4]，它们在晶界或晶内析出或聚集，而且不均匀，加剧了该区域冲击韧性的下降。所以，综合考虑，手工氩弧焊的焊接线能量上、下限值也应该选下线 12~15kJ/cm 为好，满足下限值则不出现冷裂纹（配合预热措施），满足上限值则保证较好的韧性。

低了焊接冷却速度，其效果和增加焊接线能量基本



(a) 焊缝区



(b) 热影响

序号表示温度: 1. 20°C 2. 0°C 3. -20°C 4. -30°C 5. -40°C

图2 焊缝区、热影响区夏比冲击功与层间温度的关系和关联分析结果

层间温度对焊接接头韧性的影响基本上和焊接线能量的影响相似。不同的是，层间温度在 250°C 以下时，冲击功随层间温度的升高而略有增加或变化不大，之后则随着层间温度的升高而降低，这是因为适当的层间温度就相当于焊接的预热温度，使焊缝在冷却过程中避免产生硬脆而使韧性下降，另外可保证每一道焊缝基本上都转变为马氏体组织，在下一道焊缝的热循环作用下得到部分回火。但是层间温度的提高本身就是增加了焊接热量的输入，降



(a) E = 10kJ/cm 时焊缝组织 500×



(b) E = 10kJ/cm 时熔合区组织 500×



(c) E = 10kJ/cm 时热影响区组织 500×

图3

上是相同的，所以，过高的层间温度和焊接线能量共同作用会加剧接头组织的长大粗化、碳化物的析出和球化，使韧性降低^[5]。而且使后继焊道由于前面焊道已经成为粗大的马氏体组织相当于“正火”循环，却不能获得“正火”的效果，晶粒不能细化，甚至可能进一步长大，恶化接头性能。所以，层间温度不能过高，从 P91 钢的 CCT 连续冷却转变曲线^[5]可以知道，为了有利于马氏体组织的转变，最高层间温度不应高过马氏体转变的开始温度，目的是要使焊缝获得全马氏体组织。结合图 3 的结果来综合考虑，层间温度选择 250°C 左右较为合适。

5 焊接工艺评定

采用 TIG 焊接方法对 P91 炉管进行了焊接工艺

评定,选用焊丝为 TGS-9cb,直径 2.5mm,其化学成分如表 4,60°单 V 焊接坡口,焊接电流 95~150A,电弧电压 12~14V,Ar 气流量 7~8L/min. 预热温度 150℃,层间温度 250℃。焊接试样接头均经 760℃ × 2h 热处理。工艺评定结果列于表 5。

焊接评定各项性能均满足产品技术条件要求,在生产实践中按所拟定的焊接及热处理的工艺进行焊接及热处理,接头质量优良,焊缝一次合格率在 98% 以上。

6 结论

(1)对于 P91 厚壁炉管的焊接,焊前预热是必需的,预热温度应低于 P91 钢的马氏体完全转变温度,规定在 150℃~200℃较为合适;

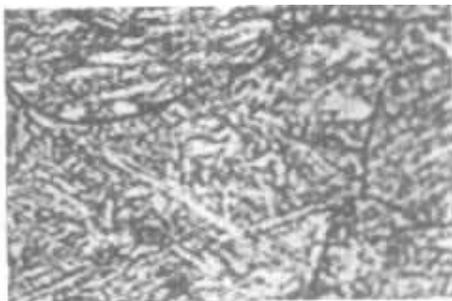
(2)焊接线能量和层间温度对焊缝和热影响区的韧性有重要的影响,随着焊接线能量的增大,接头的冲击韧性呈明显下降趋势;恰当的层间温度有利于接头韧性的改善,但过高的层间温度也会使接头的冲击韧性降低。其原因都是因为马氏体束的尺寸变大和球状碳化物析出的缘故;

(3)对于 Ø88.9 × 11.3mm 的 P91 炉管的手工氩弧焊工艺,焊接线能量的上、下限值控制在 12kJ/cm 和 15kJ/cm 比较合适,层间温度则不超过 P91 钢的马氏体上转变温度,选取 250℃左右为宜;

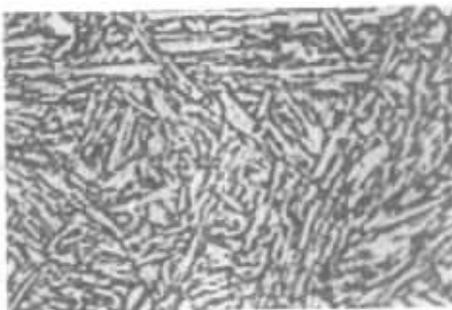
(4)所有试验结果均用于 10 万 t/a 乙烯裂解炉对流段的制造生产实践中,取得了满意的效果并获得了较大的经济效益。



(a) E = 40kJ/cm 焊缝组织 500 ×



(b) E = 40kJ/cm 熔合区组织 500 ×



(c) E = 40kJ/cm 热影响区组织 500 ×

图 4

表 4 焊接 P91 焊丝化学元素成分

焊丝牌号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Nb
TGS-9cb	0.08	1.56	0.37	0.003	0.005	8.82	0.48	0.98	0.17	0.21	0.02

表 5 P91 炉管手工 TIG 焊工艺评定试验结果

材质规格 mm	抗拉强度 MPa	弯曲角 d = 3a		接头硬度 HB			金相组织		
		面弯	背弯	焊缝	热影响区	熔合线	焊缝	热影响区	母材
P91 Ø88.9 × 11.3mm	713	合格	合格	213	224	219	回火 马氏体	回火 马氏体	回火 马氏体

参考文献

1. P91/T91 钢焊接工艺暂行规定[S]. 国家电力公司.
2. 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 华中工学院出版社, 1985.
3. Microstructural stability of creep resistant alloys for high temperature plant applications[M]; Conference Proceedings, Sheffield, 1997.
4. 龙昕等. 9% Cr-1% Mo 耐热钢焊缝金属连续冷却组织转

变[J]. 焊接学报 2000 (1) 53-56.

5. 王然等. 热处理对 P91 钢金相组织及显微硬度的影响[J]. 金属热处理 2000 (11) 6-8.

收稿日期 2001-10-26

作者简介 黄嗣罗,男,高级工程师。主要从事压力容器和化学工业炉焊接技术及其质量控制工作。通讯地址:广东省茂名市环市西路 91 号,邮编 525024.