

16MnR 低合金钢管板带极堆焊 工艺研究及应用

郭会民, 李万万

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710061)

摘 要: 某裂解反应器设计压力 0.94MPa, 设计温度 340℃, 工作介质为甲醇、氢、一氧化碳等, 换热器管板基体材料为 16MnR 低合金钢。为提高设备抗高温氢、一氧化碳等介质的腐蚀性能, 要求在其表面堆焊耐蚀不锈钢堆焊层。因此, 管板不锈钢堆焊质量是整个换热器制造的关键。本文通过对焊接方法、材料及工艺的选择等方面的研究确定出最佳的焊接工艺规范参数。试验证明此工艺方法合理、可行, 施焊效果良好, 各项试验结果均符合设计技术要求。

关键词: 低合金钢; 带极堆焊; 工艺研究; 应用

中图分类号: TG44

文献标识码: B

文章编号: (2006)03-0044-07

Application of surfacing welding with strip electrode on 16MnR low-alloy steel tubeplate

Guo Huimin, Li Wanwan

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710061, China)

Abstract: The design pressure of a pyrolytic reactor is 0.94MPa with the design temperature 340℃ and the working mediums are methanol, hydrogen and CO. The tubeplate base material of the heat exchanger is 16MnR low alloy steel. To reduce the corrosion of the high-temperature H₂ and CO to the equipment, its surface needs stainless steel plating layers. The quality of the stainless steel surfacing welding on the tubeplate is very important to the heat exchanger manufacturing. Through study on the welding method, material and the parameters, the optimum ones were selected and the welding was finished successfully.

Key words: low alloy steel; surfacing welding with strip electrode; technologic research; application

收稿日期: 2006-01-04; 修回日期: 2006-02-09。

作者简介: 郭会民 (1966—), 男, 高级工程师, 研究领域为焊接工艺。

1 引言

裂解反应器属于换热器，其技术关键在于在 16MnR 低合金钢管板上堆焊 6mm 不锈钢耐蚀堆焊层，以提高设备抗高温 H₂、CO 等介质的腐蚀。由于带极堆焊耐腐蚀堆焊层对于我们来讲是一个崭新的工艺，为此我们采用成都焊研威达自动焊接设备有限公司的带极堆焊系统进行带极堆焊试验，经过许多试验研究并通过焊接工艺评定确定出了最佳的焊接工艺规范参数，最后完成了产品

的焊接，各项技术指标均达到了设计要求。

2 产品制造技术条件

(1) 管板基体材料为 16MnR，直径 $\phi=1560\text{mm}$ ，板厚 $\delta=65\text{mm}$ ，堆焊层 $\phi1400\times6\text{mm}$ ，要求堆焊后盖面层平面度 $<3\text{mm}$ ，最厚与最薄之差 $\leq1\text{mm}$ 。

(2) 堆焊层最小厚度为 6mm，盖面层的化学成分要求如表 1 所示。

表 1 堆焊层的化学成分百分比含量要求

Tab.1 The required percentage of the building-up layer chemical composition

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb
含量/(%)	≤0.04	≤1.00	≤2.5	≤0.040	≤0.030	9~13	18~21	$8\times C\%\sim1.0$

(3) 按 JB4730-94《压力容器无损检测》标准，对堆焊层进行超声波探伤(UT)，要求达到 I 级要求。

(4) 按 JB4730-94《压力容器无损检测》标准，对堆焊层进行着色 (PT) 检查，必须全部合格。

(5) 盖面堆焊层按 GB/T4334.5-2000《不锈钢硫酸-硫酸铜腐蚀试验法》标准的规定进行晶间腐蚀试验，要求试验结果合格。

层的性能，应选择稀释率最小的焊接方法。常用的堆焊方法有焊条电弧焊、CO₂ 焊、TIG 焊、MIG 焊、丝极埋弧焊和带极埋弧焊、带极电渣堆焊等，根据可行性和可靠性，我们选择了带极埋弧堆焊。

3.2 堆焊材料的选择

为了防止过渡层的化学成分稀释，过渡层选用了高 Cr、高 Ni 的 H309L 焊带，盖面层选用 H347 焊带，同时 H347 焊带中含有 Nb 元素，优先与过渡层中的 C 元素形成碳化物，避免形成碳化铬而降低表面层的耐腐蚀性能。

选用 H309L 焊带配 SJ304 焊剂作为过渡层焊材，选用 H347 焊带配 SJ305 焊剂作为盖面层焊材，其化学成分如表 2、表 3 所示。

3 堆焊方法及焊接材料的选择

3.1 堆焊方法的选择

管板堆焊层的热强性和热稳定性，主要取决于堆焊材料的选择和堆焊工艺，这两者直接决定了母材对堆焊层稀释作用的大小。为了保证堆焊

表 2 焊带化学成分百分比含量

Tab.2 Chemical composition percentage of the weld bands

元素 含 量/(%) 焊带	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Mo
H309L	0.023	0.36	1.98	0.020	0.015	21.18	10.52	—	—
H347	0.039	0.25	1.62	0.014	0.0064	20.12	9.89	0.65	0.004

表 3 焊剂化学成分百分比含量

Tab.3 Chemical composition percentage of the welding flux

成分 焊剂 含 量/(%)	SiO ₂ +TiO ₂	CaF ₂ +CaO+MgO	Al ₂ O ₃ +MnO	其它	C	S	P
SJ304	35	40	15	10	0.060	0.020	0.021
SJ305	40	35	15	10	0.062	0.022	0.019

4 堆焊工艺的选择及焊接工艺评定

4.1 焊接性分析

4.1.1 可焊性计算

由国际焊接学会推荐的碳当量计算公式：

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

实际管板基层 16MnR 低合金钢的碳当量 $C_{eq}=0.393$ ，可焊性良好。

4.1.2 稀释率计算

根据试验，测得第一层堆焊后的实际平均熔

深为 0.9mm，堆焊层的宽度为 55mm，第一层堆焊后的焊缝厚度为 3.5mm，求得第一层堆焊后稀释率为 20%。

4.1.3 预测第一层堆焊后的组织

根据 $\delta=65\text{mm}$ 管板基体材料 16MnR 低合金钢的化学成分（见表 4）求得铬当量 $Cr_{eq}=0.48$ ，镍当量 $Ni_{eq}=5.5$ ，求得点 A（0.48，5.5），见图 1。

根据过渡层焊带 H309L 化学成分求得铬当量 $Cr_{eq}=21.72$ ，镍当量 $Ni_{eq}=12.2$ ，求得点 B（21.72，12.2），见图 1。

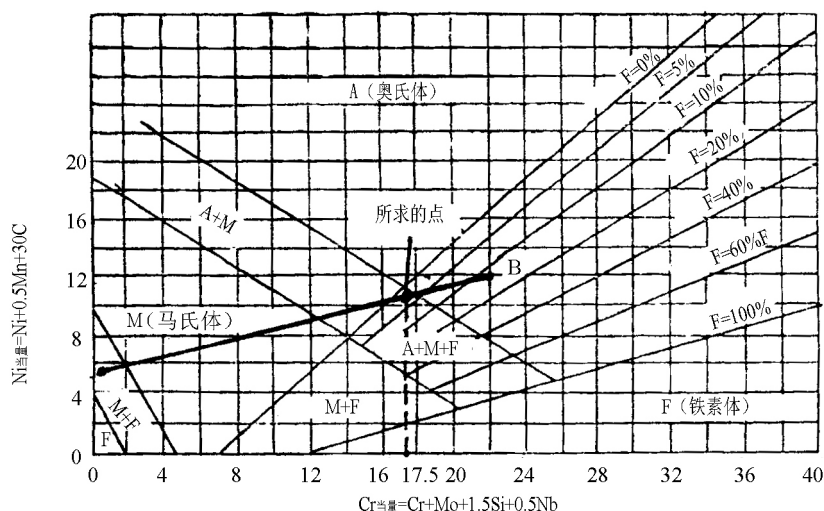


图 1 舍夫勒组织图

Fig.1 Schaeffler tissue chart

在舍夫勒图上找到 A、B 两点，并连线，在 AB 线段上对应铬当量 $Cr_{eq}=0.48+21.24\times 80\%=17.4$ 、镍当量 $Ni_{eq}=5.5+6.7\times 80\%=10.86$ 的点求得第一层堆焊后的组织为：A（奥氏体）+少量

M（马氏体）+5%F（铁素体）。由此分析，虽然，管板基层 16MnR 低合金钢的可焊性良好，但由于可能存在少量马氏体 M，故在焊前采取措施预热到 150℃。

表 4 管板基体材料 16MnR 低合金钢的化学成分百分含量

Tab.4 Chemical composition percentage of 16MnR low alloy steel of the tubeplate base material

元素	C	Si	Mn	S	P
含量/(%)	0.16	0.32	1.40	0.010	0.013

4.2 焊接工艺评定规范参数

带极堆焊时各焊接工艺参数的影响叙述如下。

4.2.1 焊接电流

焊接电流过高时，熔深增加，则母材对焊缝的稀释率增大，使焊缝的 Cr、Ni 含量减少，电流过大也会使焊道厚度增加较多，使焊道成形较差；焊接电流过低，则会产生未焊透等缺陷。

4.2.2 电弧电压

电弧电压的变化会影响焊道的形状，电压升

高，焊道厚度与宽度都稍有增加；当电压太低时，带极粘连母材，堆焊过程不稳定。

4.2.3 焊接速度

在给定的焊接电流和电压下，随着焊接速度的增加焊道厚度及焊道宽度减小；当焊接速度太低时，生产效率低且母材受热作用时间长，使堆焊焊缝组织粗大。当焊接速度太高时，由于新卷入熔池的焊剂不能充分熔化而使渣池温度下降，使焊道堆高变薄并出现焊道中间低两侧高的不规则形状，影响焊道成形质量。

4.2.4 压道量

压道量过小，电弧直接作用于母材，母材熔化量多、焊缝稀释率高，同时，焊道之间的凹下量即道沟缺陷最易形成应力集中。压道量过大，使焊缝表面凹凸不平且浪费焊接材料。

经过多次调试，最稳定、成型最好的焊接工艺规范参数见表 5。

表 5 焊接工艺评定规范参数

Tab.5 Standard parameters of welding technologic evaluation

参数 层面	焊带 牌号	规格/ mm	焊剂	焊接电 流/A	电弧电压 /V	焊接速度/ (mm/min)	预热温度/ ℃	压道量/ mm	焊接 层数
过渡层	H309L	0.5×60	SJ304	660	28	130	150	8	1
盖面层	H347	0.5×60	SJ305	720	28	208	150	8	2

其中焊带伸出长度为 20mm，焊带端头形状为尖状（起弧时）。

4.3 无损检查结果

4.3.1 探伤检查

焊接后对堆焊层按 JB4730-94 进行着色探伤，未发现裂纹等缺陷；对堆焊层进行超声波探伤，按 JB4730-94 进行，结果为 I 级焊缝。

4.3.2 中间热处理

堆焊后的热处理一般有两种方法，其一是堆焊后采用较低温度（550~600℃）进行热处理；其二是不进行热处理。我们采用的是中间热处理，即第一、二层堆焊后进行热处理，然后堆焊第三层，之后不再进行热处理。

第一层、第二层焊后，进行中间消除应力热

处理的规范：入炉温度 380℃，随炉升温，保温 620℃×2h，并随炉冷至 400℃以下空冷。

由于第一层、第二层焊完后进行消除应力热处理，为了避免消除应力热处理对第三层耐腐蚀堆焊层的敏化作用，第三层焊完后不进行消除应力热处理，所以要计算在堆焊第三层时距离熔合线为 6mm 的 16MnR 低合金钢管板熔合线处的峰值温度。

在焊接热影响区，离熔合线距离 6mm 点的峰值温度 T_p 按下列经验公式进行峰值温度的计算：

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{4.13\rho C t y}{E'} + \frac{1}{T_m - T_0}$$
 (1)

式中， T_p ——峰值温度，℃；

T_m ——母材的熔点，℃；

T_0 ——母材的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;
 ρ ——密度, 不锈钢为 $7.93\times 10^{-6}(\text{kg}/\text{mm}^3)$;
 C ——比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{k})$, 对于不锈钢为 $460\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$;
 t ——母材的厚度, mm ;
 y ——所计算点离熔合线的距离, mm ;
 E' ——有效输入热量, J/mm 。
带极堆焊时, $t=40\text{mm}$, $T_{\text{m}}=1410^{\circ}\text{C}$, $T_0=150^{\circ}\text{C}$, $y=6\text{mm}$, $E'=720\times 28/3.47=5810\text{J}/\text{mm}$ 。

代入公式 (1) 计算得: $T_{\text{p}}=856^{\circ}\text{C}$ 。

由此可见, 在焊接热影响区, 离熔合线距离为 6mm 点的峰值温度 T_{p} 为 856°C , 已超过相变点, 故还需计算冷却时间 $T_{8/5}$ 。

焊接热影响区自 800°C 到 500°C 的冷却时间 $T_{8/5}$ 的计算式为

$$T_{8/5}=(0.67-5\times 10^{-4}\times T_0)\eta\times E'\left(\frac{1}{500-T_0}-\frac{1}{800-T_0}\right)\times\psi_3$$

(2)

式中, T_0 ——母材的初始温度, $^{\circ}\text{C}$;
 η ——热效率系数;
 E' ——有效输入热量, J/mm ;
 ψ_3 ——焊缝成形系数。

带极堆焊时, $T_0=150^{\circ}\text{C}$, $\eta=1.0$, $E'=5810\text{J}/\text{mm}$, $\psi_3=1.0$; 代入公式 (2) 计算得: $T_{8/5}=45.6\text{s}$ 。

查 16Mn 钢的焊接 CCT 图可知: 焊接热影响区的组织为 10%M (马氏体)+F (铁素体)+P (珠光体); 同时查得熔合线附近热影响区的硬度为 220Hv。

根据计算结果可以看出, 热影响区金相组织中有极少量的马氏体, 所以 16MnR 基体不会产生淬硬组织及裂纹。

4.4 理化检查结果

4.4.1 化学成分分析结果

化学成分分析结果见表 6, 分析结果全部符合图纸技术要求。

表 6 化学成分百分比含量分析结果

Tab.6 Analytical results of chemical composition percentage

元素 含量 / (%) 位置	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb
A 处	0.039	0.66	1.21	0.021	0.012	10.16	18.81	0.75
B 处	0.039	0.70	1.19	0.021	0.012	10.20	18.81	0.74
C 处	0.046	0.84	1.21	0.022	0.012	8.93	16.01	0.72

注: A、B、C 三处分别指距离试板底部 45、44、42mm 高度处 (见图 2)。

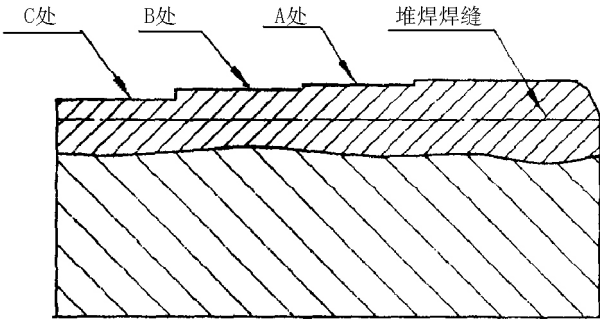


图 2 化学成分取样位置图

Fig.2 Chemical composition sampling location

4.4.2 弯曲试验结果

取 4 个 10 mm 侧弯试样，均无缺陷。

4.4.3 晶间腐蚀试验结果

按 GB/T4334.5-2000《不锈钢硫酸—硫酸铜腐蚀试验法》取 2 个试样进行弯曲，均无裂纹。

4.4.4 热影响区冷裂敏感性

碳当量与热影响区最高硬度之间存在下列关

系 $Hv = 1200 C_{eq} - 200$ ，按现行公认的准则：低合金钢热影响区最高的容许硬度为 350Hv，如超过此临界值就可能出现冷裂纹，经过实际测试，在焊缝边缘靠近基体 16MnR 低合金钢一边，硬度平均值为 203.6Hv，见表 7，可见管板热影响区不会出现冷裂纹，这种结果与计算值基本吻合。

表 7 硬度值测试结果

Tab.7 Hardness value testing results

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
硬度值/Hv	212	206	201	212	214	199	199	204	195	197	201
平均硬度值/Hv	203.6										

4.5 金相组织

熔合线下方的母材热影响区组织为铁素体及少量珠光体组织，与 16MnR 母材组织相比，铁素体晶粒明显长大，珠光体含量减少，属正常组织，见图 3。

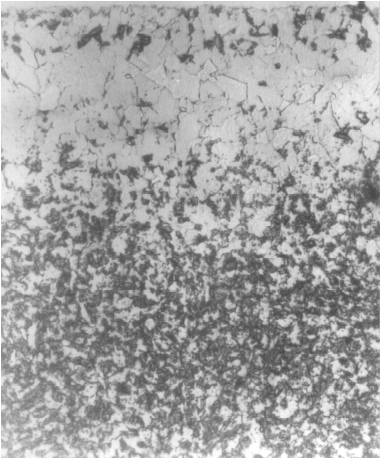


图 3 熔合线下方的母材热影响区组织
Fig.3 Tissue in parent material heat affected zone below melt run

熔合线上方的不锈钢焊带熔化区为铸状枝晶组织，枝晶沿板厚方向生长，可见少量奥氏体再结晶晶粒。

在 160 倍显微镜下观察接近表面的盖面层焊缝区域为正常的铸状枝晶组织，枝晶沿板厚方向

生长，见图 4，显微组织正常。



图 4 盖面层焊缝区组织
Fig.4 Welds zone tissue of capping beds

由于没有铁素体含量理化分析设备，根据实际化学成分对 C 处过渡层组织计算查表如下：

铬当量 $Cr_{eq}=17.63$ ，镍当量 $Ni_{eq}=10.92$ ，查舍夫勒组织图可知，此处的组织含 5%铁素体，铁素体含量小于 10%。

通过以上试验分析，证明焊接工艺参数是合理的，且焊接工艺评定符合 JB4708-2000《钢制压力容器焊接工艺评定》的规定。

5 产品焊接

5.1 堆焊方式

采用直线式堆焊。

5.2 堆焊顺序

堆焊 A 面第一层→堆焊 B 面第一层、第二层→堆焊 A 面第二层→进行中间热处理→堆焊 A 面第三层→最后堆焊 B 面第三层, 见图 5。

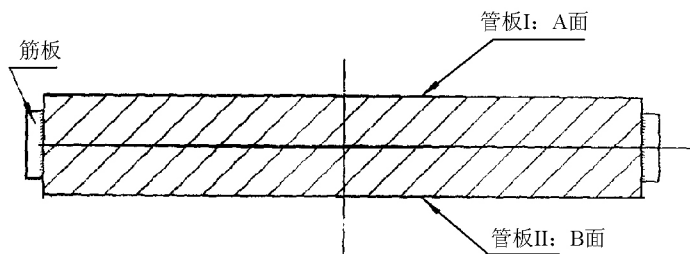


图 5 管板堆焊定位图

Fig.5 Location chart of tubeplate welding

单面每一层堆焊时, 分区分散堆焊, 不能在一处集中堆焊。为了保证蓝图要求的 6mm 熔敷金属堆焊层厚度, 在堆焊时要堆焊三层 (每层堆焊层厚度约 2.5mm), 第一、第二层堆焊层最后将保留成为堆焊熔敷金属, 而第三层则最后需要部分加工掉, 以保证堆焊层表面的平整, 同时保证设计要求的 6mm 熔敷金属堆焊层厚度。

5.3 焊接变形

管板整体堆焊后进行车加工, 保证堆焊层厚度不小于 6mm, 最后打开定位焊缝和定位立筋进行测量, 管板表面不平度在 3mm 以内, 基本上满足图纸技术要求。

6 应用

在 $\delta=65\text{mm}$ 的 16MnR 管板基体上堆焊不小于 6mm 的耐蚀不锈钢堆焊层, 比用纯不锈钢管板可节约大量的经费和资源, 此项技术除在本台裂解反应器上应用外, 又成功应用于丙稀酸成套装置第一反应器 (JL05-5501-1) 16MnR 管板 ($870\times\phi 2880$) 及第二反应器 (JL05-5502-1) 16MnR 管板 ($860\times\phi 2580$) 的堆焊。设备从开车到现在运行正常。

7 结论

(1) 低合金钢大面积堆焊不锈钢, 带极堆焊是

首选方法, 其熔敷效率高, 稀释率低, 质量可靠。

(2) 过渡层选用 H309L, 盖面层选用 H347 焊带, 抗剥离性好。

(3) 选择的焊接工艺参数合理, 堆焊产品经无损检测, 贴合率良好, 所堆焊的管板成功地用于裂解反应器等多台设备的制造, 该设备自投产以来, 运行状态良好。

(4) 根据设计要求盖面层可选用不同焊带, 若要求为超低碳时, 则可选用 H347L 焊带进行试验。

(5) 过渡层焊后进行中间热处理, 盖面层焊后不进行热处理, 抗晶间腐蚀性能符合图纸及标准要求。

(6) 通过试验证明此工艺方法合理、可行, 施焊效果良好, 各项试验结果均符合设计技术要求。

参考文献:

- [1] 陈裕川. 低合金结构钢的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社. 1992.
- [2] 陈伯鑫. 焊接冶金原理[M]. 北京: 清华大学出版社. 1991.
- [3] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺[M]. 北京: 机械工业出版社. 1983.
- [4] 黄嗣罗. 2.25Cr1Mo 不锈钢带极堆焊工艺研究及应用[J]. 压力容器, 1996(5).

(编辑: 陈红霞)