

15CrMoR+Incoloy825 复合板的焊接工艺

郭会民

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 通过大量的焊接工艺试验、分析及工艺评定试验验证, 确定了 15CrMoR+Incoloy825 复合板焊接及在 15CrMoR 基体上堆焊 Incoloy825 复合层最佳的焊接工艺规范参数及焊接工艺方法。熔敷金属 (包括堆焊金属) 的力学性能、化学成分及复合层的耐腐蚀性能等各项技术指标均达到了设计要求。

关键词: 复合板; 焊接; 堆焊

中图分类号: V46

文献标识码: A

文章编号: (2010) 04-0053-06

Welding technology of 15CrMoR+Incoloy825 composite plate

Guo Huimin

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Proper welding parameters for a 15CrMoR+Incoloy825 composite plate welding and Incoloy825 composite layer surfacing on 15CrMoR substrate were proposed based on extensive tests and analysis. Optimal standard parameters and methods were verified by welding assessment test. The mechanical properties and chemical composition of deposited metal (including surfacing metal) and corrosion resistance of composite layer met the design requirements.

Key words: composite plate; welding; surfacing welding

0 引言

主体材料为 15CrMoR 低合金钢的产品其复

合层及与物料接触的材料均为 Incoloy825 镍合金, 其内壁不仅要经受高温介质腐蚀, 而且要经受气体、液体、固体混合气的冲刷、磨损、腐蚀等作用, 工作环境非常恶劣。要求焊接后要进行

收稿日期: 2010-02-26; 修回日期: 2010-03-19。

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

100%无损检测。因此保证产品基体 15CrMoR 的高温强度和内壁 Incoloy825 复合层的耐腐蚀性能是保证产品制造质量和产品安全运行的关键。

1 产品焊接性分析

该产品结构复杂,壳体直径较小,壁厚较大,保证基体材料 15CrMoR 的力学性能、保证复合层 Incoloy825 晶间腐蚀性能及降低焊接接头的拘束应力是制造工艺中的技术难点。

1.1 基材 15CrMoR 可焊性分析

15CrMoR 属于珠光体耐热钢,含有不同数量的 Cr、Mo、W、V、Nb 等合金元素,钢中碳和合金元素的共同作用使钢的奥氏体稳定性增加,不易分解,而在较低温度时才发生马氏体转变。因此,焊接时如果冷却速度较大则易形成淬硬组织,导致裂纹发生。

通过计算得知基材 15CrMoR 的碳当量最小 $C_{Emin}=0.437$; 碳当量最大 $C_{Emax}=0.657$ 。

从以上数据可以看出,15CrMoR 的碳当量在 0.437 和 0.657 之间,可焊性尚好,但钢材的淬硬倾向增大,焊接时需要适当预热。为了防止冷裂纹,延长 t_{95} ,减少焊缝中淬硬组织马氏体 M 及贝氏体 B 的含量,改善接头的性能,焊接时必须预热,而预热温度的确定又是非常复杂的,根据有关资料介绍的预热温度计算公式如下:

预热温度 $T_0=350\sqrt{[C]-0.25}^{\circ}\text{C}$;

总碳当量 $[C]=[C]_L+[C]_P$;

成分碳当量 $[C]_L=C+\frac{1}{9}(Mn+Cr)+\frac{1}{18}Ni+\frac{7}{90}Mo$;

尺寸碳当量 $[C]_P=0.005\delta[C]_L$;

δ -板材厚度 (40mm)。

将 15CrMoR 化学成分代入以上公式,求得预热温度 T_0 最低为 108°C ,最高为 183°C ,考虑到壳体直径为 $\Phi 600$,拘束应力较大,最后选取较高的预热温度 $T_0=180^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 复合板的焊接性分析

复合板 (15CrMoR+Incoloy825) 的基层主要是满足结构强度和刚度的要求,复合层要满足耐腐蚀、耐磨损等特殊性能的要求。由于基层和复

合层由两种化学成分、力学性能差别迥异的金属复合而成,焊接时应针对基层和复合层分别进行焊接,其焊接性能要兼顾基层和复合层两种钢材的自身性能。

铁和镍能够无限互溶,不会形成金属间化合物,但焊接时也存在以下问题:由于液态镍基合金的粘度大,熔池中的气体很难逸出,容易形成气孔;由于 Ni 与 Fe、P、Pb 等产生化学反应,形成低熔点共晶物,且焊接时,在焊缝内形成方向性很强的单相奥氏体组织且晶粒比较粗大,所以凝固过程中在焊接拉应力的作用下,产生热裂纹。镍基合金对基层焊缝的稀释会引起熔敷金属开裂,而基层材料对镍基合金的稀释使复层的耐腐蚀性能下降,因此需要焊接过渡层,而复层应当采用多层多道焊。

基材 15CrMoR 钢板厚度大 ($\delta 28\sim 40$),结构中热应力、拘束应力、残余应力都较大,焊接时容易出现裂纹。要采取焊前预热、焊后立即进行消氢处理或消应力热处理等方法。Incoloy825 材料焊接性较好,主要保证其耐腐蚀性能。基层采用焊条电弧焊焊接,焊条 R307。复层选用手工氩弧焊焊接,焊丝 ERNiCrMo-3。由于焊丝 ERNiCrMo-3 中镍含量较高,可用于过渡层焊接。

1.3 15CrMo 法兰堆焊 Incoloy825 焊接性分析

焊接过渡层时,可选择与复层一样的 Incoloy825 用焊丝 ERNiCrMo-3。但焊接时易出现裂纹和气孔,堆焊时采用焊前预热,焊后立即消应力热处理并且进行堆焊工艺评定,按合格的焊接工艺评定规范参数施焊。

2 焊接工艺评定试验

2.1 复合板对接焊工艺评定

复合板焊接坡口型式及尺寸见图 1,其中尺寸 $a=0.5\sim 1.5\text{mm}$, $b=2.5\sim 4.0\text{mm}$ 。经过调试,最后确定的施焊参数见表 1。

焊后立即对工艺评定试板进行消氢处理,保温温度 350°C ,保温时间 110 分钟;随后对工艺评定试板进行回火消除应力热处理,保温温度 680°C ,保温时间 120 分钟。

对工艺评定试板进行 100%射线探伤符合 I 级底片要求。

对焊接接头进行力学性能试验：两次试验抗拉强度 σ_b 值分别为 538 MPa 和 540MPa，拉伸试样在热影响区断裂。三次基体焊缝冲击性能试验得到的 A_{KV} 值分别为 75 J、80 J 和 91J，热影响区冲击性能 A_{KV} 值分别为 221 J、182 J 和 238 J。

对焊接接头进行弯曲试验：取 4 个侧弯试样，在支座距离 $L=63\text{mm}$ ，弯轴直径 $D=40\text{mm}$ ，弯曲角度 $\alpha=180^\circ$ 的条件下进行弯曲，4 个试样均无缺陷。

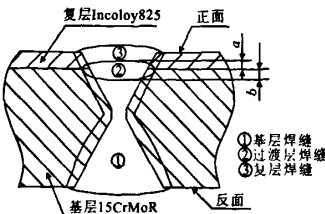


图 1 复合板焊接坡口型式及尺寸

Fig.1 Groove type and dimension for composite plate welding

对复层焊缝按照 ASTM G-28 标准进行晶间腐蚀试验，试样腐蚀率为 42 μm /月。

表 1 复合板焊接工艺规范参数

Tab.1 Standard parameters for composite plate welding

焊接部位及焊接层次		焊接方法	焊接材料及规格	焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	氩气流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	电源极性
正面基层	第 1 层	焊条 电弧焊	R307, $\Phi 3.2$	140	24~26	12~15	/	直流反接
	第 2 层		R307, $\Phi 4.0$	160~170				
反面基层	第 1~6 层							
过渡层	第 1~2 层	钨极	ERNiCrMo-3	150~160	11~13	8~10	15~20	直流正接
复合层	第 1~2 层	氩弧焊	$\Phi 2.5$	160~170				

2.2 镍合金 Incoloy825 对接焊工艺评定

对接焊坡口型式见图 2，经过调试，最后确定的施焊参数见表 2。

对工艺评定试板进行 100%射线探伤符合 I 级底片要求。

焊接接头力学性能试验：抗拉强度 σ_b 分别为 677/669MPa，拉伸试样断在热影响区。

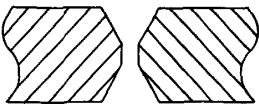


图 2 对接焊坡口型式

Fig.2 Groove type for butt welding

表 2 对接焊工艺规范参数

Tab.2 Butt welding standard parameters

焊接部位及焊接层次		焊接方法	焊丝及规格	焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	氩气流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	电源极性
正面	第 1~2 层	钨极氩 弧焊	ERNiCrMo-3 $\Phi 2.5$	110~120	11~13	8~10	15~20	直流正接
反面	第 1~2 层			130~140				
	第 3 层			110~120				

焊接接头弯曲试验：取 4 个弯曲试样，在支座距离 $L=45\text{mm}$ ，弯轴直径 $D=28\text{mm}$ ，弯曲角度 $\alpha=180^\circ$ 的条件下进行了 2 个面弯，2 个背弯，4 个试样均无缺陷。

对焊接接头按照 ASTM G-28 标准进行晶间腐蚀试验，试样腐蚀率为 $39.74\mu\text{m}/\text{月}$ 。

2.3 低合金钢堆焊工艺评定

低合金钢基体 15CrMo 厚度 $\delta 20$ 堆焊 Incoloy825，堆焊焊缝型式见图 3(a)，经过调试，最后确定的施焊参数见表 3。

对工艺评定试板进行 100% 超声波探伤符合 I 级要求，堆焊焊缝与基体熔合良好。

焊接接头弯曲试验：取 4 个侧弯试样，在支座距离 $L=63\text{mm}$ ，弯轴直径 $D=40\text{mm}$ ，弯曲角度 $\alpha=180^\circ$ 的条件下进行了侧弯，4 个试样均无缺陷。如化学成分取样位置图 3(b)所示，在堆焊金属上距离试板底面 23mm、24mm、25mm 高度分别取样进行堆焊金属化学成分分析，化学成分光谱试验结果见表 4。

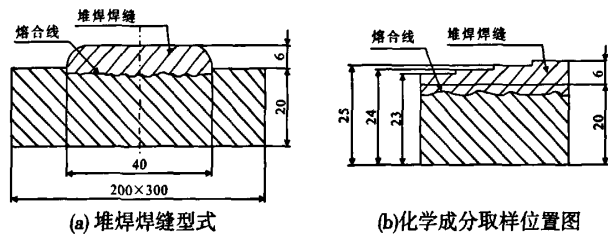


图 3 堆焊焊缝型式及化学成分取样位置图

Fig.3 Surfacing welding seam and sampling positions for chemical composition analysis

表 3 堆焊工艺规范参数

Tab.3 Surfacing welding standard parameters

焊接部位及焊接层次		焊接方法	焊条及规格	焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	电源极性
过渡层	第 1 层	焊条 电弧焊	ENiCrMo-3	120~130	24~26	20~21	直流反接
盖面层	第 2~3 层		$\Phi 4.0$	130~140			

表 4 化学成分光谱试验结果

Tab.4 Spectral analysis of chemical composition

距试板底面高度	C	S	P	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	Nb	Ni
23mm	0.031	0.0011	0.011	20.66	8.45	0.54	0.034	8.57	3.27	基体
24mm	0.028	0.0012	0.012	21.22	8.67	0.56	0.029	5.93	3.48	基体
25mm	0.028	0.0013	0.013	21.37	8.80	0.59	0.025	3.94	3.47	基体

以上数据与 ENiCrMo-3 焊条标准规定的熔敷金属化学成分进行对比分析，可以看出，在堆焊金属上距离试板底面 24mm、25mm 高度上的堆焊金属化学成分均符合 ENiCrMo-3 焊条标准规定

的熔敷金属化学成分。

在距试板底面 24mm 以上取样对堆焊层表面焊缝金属按 GB/T4334.5-2000 要求进行晶间腐蚀试验，取晶界试样 1 个，弯曲后无裂纹。

在距试板底面 24mm 以上取样对堆焊层表面焊缝金属按照 ASTM G-28 标准进行晶间腐蚀试验, 试样腐蚀率为 45 $\mu\text{m}/\text{月}$ 。

从以上试验数据可以得出结论: 在实际生产中只要保证堆焊金属最小厚度 $\geq 4\text{mm}$, 即可保证熔敷金属的化学成分要求和晶间腐蚀性能。

对工艺评定试板进行高温回火消除应力热处理, 保温温度 685 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间 150 分钟。

通过以上三个焊接工艺评定试验可以看出, 各项试验结果均满足技术条件及工艺评定标准的要求, 可以根据评定合格的焊接工艺评定规范参数进行产品的焊接。

3 产品焊接

生产中为了明确每个焊接接头的焊接方法及焊接工艺, 依据焊接工艺评定报告编制了《焊接工艺规程》指导生产实践。

3.1 纵、环缝复合板焊缝对接

组对纵、环焊缝时, 要控制复合层内壁一侧错边量 $\leq 0.15\text{mm}$, 间隙 $3\pm 0.5\text{mm}$, 同时在纵焊缝的延长线上组对产品焊接试板, 按《焊接工艺规程》要求进行施焊, 产品焊接试板与纵焊缝同时、同规范施焊。

焊前清除坡口及其附近 50mm 范围内的油污等杂质, 焊前预热 180 $^{\circ}\text{C}$, 基层焊接时层间温度不低于 150 $^{\circ}\text{C}$;

按照焊接工艺评定规范参数焊条电弧焊施焊基层母材, 焊条 R307, JB/T4747-02。先焊基层内坡口, 焊条 $\Phi 3.2$, 直流反接, 焊道表面距复合界面约 4mm 时, 外面清根, 磁探, 坡口内用 $\Phi 4.0$ 焊条连续焊完外坡口。

按照焊接工艺评定规范参数手工氩弧焊施焊过渡层及复合层, 焊丝 ERNiCrMo-3, SFA-5.14, $\Phi 2.5$, 直流正接。过渡层焊道表面高出复合界面 0.5~1.5mm。过渡层至少焊一层, 盖面层焊一层。焊后立即进行消氢处理。产品焊接试板与之同炉热处理。焊缝经 100%射线检测合格。

3.2 法兰内孔及端面堆焊 Incoloy825 复合层

粗车外圆及端面见光, 按 JB4726-2000 III 级

锻件要求进行超声波探伤。与所配封头 (圆筒) 实测尺寸协调一致后, 内孔缩小 10mm 车制, 这样可保证车加工后堆焊层厚度 $\geq 5\text{mm}$ 。

堆焊时, 待焊面去油污, 清洗干净; 焊前预热 180 $^{\circ}\text{C}$, 层间温度应严格控制在 180 $^{\circ}\text{C}$; 按照焊接工艺评定规范参数焊条电弧焊堆焊内孔及端面过渡层, 焊条 ENiCrMo-3, SFA-5.11, $\Phi 4$, 直流反接, 过渡层焊道表面距复合界面 2~3mm, 至少一层。堆焊过渡层时要求小电流焊接, 减少基体金属对焊缝熔敷金属的稀释率。焊条电弧焊堆焊复层, 至少两层, 堆焊总厚度约 7mm, 焊条 ENiCrMo-3, SFA-5.11, $\Phi 4$ 。堆焊完后立即进行消应力热处理。堆焊层表面经 100%渗透检测, 无裂纹, 合格。堆焊层经 100%超声波-I 级检测合格, 堆焊层厚度 $\geq 5\text{mm}$ 。

3.3 焊后处理

焊接后对产品 A、B 类对接焊缝按照 JB/T4730-05《承压设备无损检测》进行 100%射线检测, II 级合格; 进行 100%超声波检测, I 级合格; 进行 100% 渗透检测, I 级合格。

焊后必须进行热处理, 一般采用高温回火, 回火温度 670~700 $^{\circ}\text{C}$ 。在热处理前必须对产品进行严格的检查, 确保热处理后不在母材上施焊。最终热处理不仅是为了消除焊接应力、结构应力, 而且须通过最终热处理来获得母材与焊接接头最佳抗回火脆化性能和理想的综合力学性能。

最终热处理规范如下: 80 $^{\circ}\text{C}$ 入炉, 随炉升至 400 $^{\circ}\text{C}$ 后以 100 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升至保温温度, 升至 680~690 $^{\circ}\text{C}$ 时, 保温时间 90min, 然后以 150 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率冷至 300 $^{\circ}\text{C}$ 以下出炉空冷, 焊后热处理曲线见图 4。产品焊接试板与产品同炉热处理。

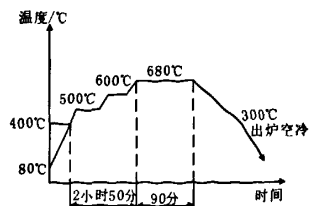


图 4 焊后热处理曲线

Fig.4 Heat treatment curve after welding

最后,对在纵焊缝的延长线上组对的产品焊接试板进行检查。检查结果表明,基层力学性能以及复合层焊缝熔敷金属的化学成分、晶间腐蚀速率均满足了产品设计技术条件的要求,产品质量合格。

4 结论

焊接前通过理论计算得出产品的合理预热温度,焊后立即对产品进行消氢处理,保证了产品的焊缝未产生焊接冷裂纹。通过特定的焊接工艺评定试验确定出产品的焊接规范参数,使 15Cr-MoR 基体材料的力学性能满足要求,同时也保证了 Incoloy825 复层的晶间腐蚀性能。在实际生产中只要保证堆焊金属最小厚度 $\geq 4\text{mm}$ 即可保证熔敷金属的化学成分要求和晶间腐蚀性能,使产品满足设计质量要求。

(编辑:陈红霞)

(上接第 52 页)

5 结束语

通过多批产品的验证,应用此种数控加工,满足了复杂形状壳体高质量的要求,解决了对人力、时间、资源的浪费问题,提高了加工效率,缩短了制造周期。可视化数控文件在生产中的应用,保证了每一批产品质量状态相同,可以避免因工艺人员及数控操作人员变化而引起的产品质量问题,在实际生产中起到了良好的作用。通过对复杂形状壳体的数控加工研究,得出以下结论。

(1) 通过本次数控加工研究,解决了产品变形问题,提高了加工效率,加工速度提高了 3.3 倍。提高了合格率,过去合格率为 70%,现在合格率为 100%。提高了产品精度。

(2) 对于形状复杂、难以加工的产品,应该大量使用数控虚拟技术,提前解决生产中的问

参考文献:

- [1] 柯玉雄. 15CrMoR 钢材的焊接 [J]. 焊接技术, 2004, 33(3): 70.
- [2] 郭会民, 赵仕哲, 李万万. 溶化极混合气体保护焊工艺研究与应用[J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 57-62.
- [3] 王辉. 钛合金张力贮箱焊接工艺改进 [J]. 火箭推进, 2001, 27(5): 40-44.
- [4] 丁新玲. 液体火箭发动机喷管延伸段制造新技术[J]. 航天制造技术, 2006, (6): 4-8+17.
- [5] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [6] 陈裕川. 低合金结构钢的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

题,在生产中应该加大使用。

(3) 可视化工艺文件的应用,提高了车间生产管理水平,此工艺方法可作为一种管理方法推广,应用在复杂产品的生产及复杂产品的装配中。

参考文献:

- [1] 雒亚涛. 不锈钢弯管用预制椭圆孔翻边成形圆孔[J]. 火箭推进, 2009, 35(1): 50-53.
- [2] 梁炳文. 钣金冲压工艺手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] 巩水利, 陈振藩, 于琴. 三通翻边模具研制[J]. 机械制造, 2001, 39(3): 10-13.
- [4] 赵如福. 金属机械加工工艺人员手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006.
- [5] 王笑天. 金属材料学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

(编辑:王建喜)