

低碳高强度钢焊接工艺分析

中船重工集团公司第七一三研究所 (河南郑州 450015) 赵四强

低碳高强度钢材料除具有很高的强度外,又具有良好的缺口韧性和塑性。这类钢由于对冶炼质量要求较高,通常只在对材料综合力学性能要求较高的特殊场合下使用。

921A 钢板是按照 GJB1663—1993 冶炼的一种潜艇耐压壳体及其他结构专用钢板,厚度为 10~35mm,牌号为 10CrNi3MoV,属于典型的低碳高强度钢。

某型潜望镜支撑筒结构如右图所示,主筒体由钢板卷弯焊接制成,两端为焊接法兰,外圆周分布有多条纵筋和环筋,所用材料均为 921A 钢板。

由于该产品为水下用耐压壳体,对焊缝质量要求很高,而这种专用材料在一般机械行业应用并不广泛,缺乏足够的相关技术资料和操作经验,所以如何控制焊接质量成为该类产品的生产难点。本文在总结潜望镜支撑筒焊接的成功经验上,以 921A 钢板为例,介绍这类低碳高强度钢的焊接方法,以供相关技术人员参考。

1. 低碳高强度钢焊接性能分析

(1) 材料化学成分和力学性能分析 低碳高强度钢化学成分区别于普通高强度钢的突出特点是含碳量很低,但为了获得较高的强度,钢中通常都加入了 Mn、Cr、Mo 和 V 等微量元素,同时对 S、P 等有害杂质的含量控制非常严格。

921A 钢的主要化学成分见表 1。钢中较低的含碳量保证了 921A 材料较好的焊接性, Ni 元素的加入,提高了钢的韧性和塑性,降低了钢的脆性转变温度, Ni 与适

当的 Cr 元素同时加入,提高了钢的淬透性, Mn、Mo 及 V 等其他多种合金元素的加入,确保了材料良好的综合力学性能。

表 1 921A (10CrNi3MoV) 化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	S	P
0.07	0.17	0.30	2.60	0.90	0.20	0.04	≤	≤
~	~	~	~	~	~	~	0.015	0.020
0.14	0.37	0.60	3.00	1.20	0.27	0.10		

921A 钢主要力学性能见表 2, 该材料既有高的强度,又有较好的缺口韧性和塑性,属于低碳高强度调质钢。这类钢经调质处理后的组织多为回火马氏体或贝氏体,可获得高的强度和良好的塑性和韧性。

表 2 921A (10CrNi3MoV) 力学性能

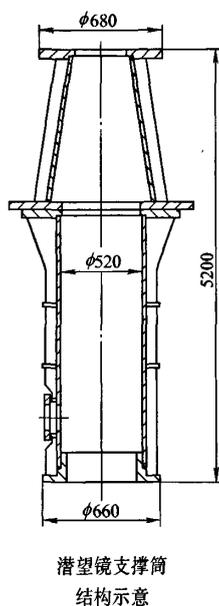
项目	R_m /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	A (%)	Z (%)	A_{kv} /J	Fa (%)
性能	590~745	670~850	≥16	≥50	≥80	≥100

(2) 焊接性分析 低碳高强度钢中含碳量很低,由此可以初步判定这类钢具有较好的焊接性。那么究竟这类材料焊接性能如何呢?我们以 921A 钢为例,从是否容易产生焊接最严重的缺陷——裂纹来具体分析。

焊接裂纹的形成机理分为热裂纹和冷裂纹两种。热裂纹的形成主要是由于硫在晶间形成低熔点的硫化物及共晶晶体所引起的。低碳高强度钢中的 P、S 含量都很低,这显然对焊接是非常有利的。同时 Mn 能与 S 结合成 MnS 而有利于除硫,并能改善硫化物的性能、形态及其分布特点。再加上这类材料含碳量很低, Mn/S 比值较大,所以在焊接过程中热裂纹形成的倾向不大。冷裂纹是焊接高强度钢的主要问题,在钢中热裂纹形成中热裂纹一般仅占 10%,而冷裂纹占到了 90%。引起冷裂纹的主要原因是材料的淬硬组织和含氢量。

评价材料淬硬组织的主要依据为碳当量,国际焊接学会推荐的碳当量计算公式如下:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 (\%)$$



根据该公式计算出 921A 材料碳当量为 $C_{eq} = 0.52\% \sim 0.75\%$ 。仅从碳当量来看, $C_{eq} > 0.5\%$ 则属于高淬硬倾向、焊接性差的钢种。921A 钢具有高淬硬性, 本应具有较大冷裂性, 但是由于该材料含碳量较低, 而且加入了微量元素 V, 有细化晶粒的作用, 实际冷裂性并不突出。根据其化学成分分析, 在淬火状态下的金相组织应该是强度和韧性都较高的低碳马氏体 + 贝氏体。按照等温淬火的原理, 焊接过程中如果我们能够在稍高于马氏体点 M_s 以上温度范围内较长时间保温, 就可以使过冷奥氏体发生贝氏体转变, 从而获得较多的贝氏体组织, 减少冷裂纹的形成倾向。贝氏体的获得, 在不降低材料抗拉强度的前提下, 可明显改善材料的韧性和塑性。因此对于 921A 这样的低碳高强度钢, 在焊前采用 100°C 左右预热和小热输入施焊, 焊后在 $200 \sim 350^\circ\text{C}$ 缓冷可有效防止冷裂纹的形成。

含氢量高是产生焊接冷裂纹的另一个主要影响因素, 但只要选择适当的低氢型焊材, 同时将待焊部位认真清理, 焊丝保持干净, 焊条或焊剂按要求烘干, 就可有效地降低焊缝金属的含氢量。

综上所述, 低碳高强度钢有相对较好的焊接性能, 只要采取适当的预防措施, 控制好工艺参数, 即可有效抑制焊接缺陷的形成。

2. 低碳高强度钢焊接工艺方案

(1) 焊接方法的选择 适于焊接低碳高强度钢的焊接方法主要有真空电子束焊、埋弧焊以及焊条电弧焊等。

真空电子束焊是最为理想的焊接方法, 它具有焊接热输入小、焊缝窄、不需开坡口、容易焊透及焊接自动化程度高等优点, 但该方法设备投资很大, 在国内还未广泛应用。

埋弧焊比焊条电弧焊自动化程度高, 焊接质量受焊工技术因素影响小, 焊接质量重复性较好。该方法的主要缺陷是对复杂产品的多数焊接部位, 由于机头很难伸缩到位而不容易实现。

焊条电弧焊设备投资最小, 使用最为灵活和方便, 但对焊工的操作技术要求也最高, 焊缝质量稳定性差。

对于潜望镜支撑筒, 我们选择了埋弧焊和焊条电弧焊相结合的方法。关键的几条穿透性环焊缝和纵焊缝采用埋弧焊, 筋板的焊接则采用焊条电弧焊。

(2) 焊接材料的选择 低碳高强度钢在研制过程

中, 通常根据其使用环境的特殊性, 同时也配套研制有专用焊材。针对 921A 钢的焊接, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所开发研制有一系列的专用焊材。支撑套柱的焊接中, 埋弧焊焊丝我们选用 H921A, 焊剂选用 705-CH, 手弧焊条选用 ZS60A。焊丝、焊条的主要化学成分见表 3。

表 3 焊丝焊条化学成分 (质量分数) (%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Ti	S	P
H921A	0.055		1.75	2.20		0.20	0.04	0.05		
	-	≤	-	-	≤	-	-	-	≤	≤
	0.095	0.03	2.10	2.50	0.20	0.40	0.10	0.15	0.01	0.01
ZS60A	≤	≤	1.05	3.10	0.10	0.10	-	-	≤	≤
	0.04	0.12	~	~	~	~	-	-	0.015	0.018
			1.45	3.40	0.24	0.24				

从表中可以看出, H921A 焊丝和 ZS60A 焊条的 C、S、P 含量都非常低, 这对减小冷裂纹倾向是十分有利的, 同时含量较高的 Mn 能与 S 结合成 MnS 而有利于除硫, 较高含量的 Ni 和较低含量的 Cr 有利于提高钢的韧性和塑性, 降低钢的脆性转变温度。

(3) 焊接参数的确定 低碳高强度钢不同钢种、不同焊材、不同焊接方法, 其焊接参数的选择也不同。这类钢焊接的共同特点是, 焊条需按要求烘干, 并在短时间内使用完, 工件需要焊前预热和焊后缓冷。

对于 921A 钢板的焊接, 焊条 ZS60A 烘干温度 $450 \sim 470^\circ\text{C}$, 保温 2h, 705-CH 焊剂烘干温度 400°C , 保温 2h, 随焊冷到 150°C 出炉。定位焊缝隙和正式焊缝焊前预热温度和道间温度控制在 $80 \sim 150^\circ\text{C}$, 焊后缓冷 250°C , 保温 1 ~ 2h。焊条电弧焊打底选用焊条直径 3.2mm, 焊接电流 $100 \sim 150\text{A}$, 正式焊接选用焊条直径 4mm, 焊接电流 $160 \sim 200\text{A}$ 。埋弧焊焊接电流 $450 \sim 550\text{A}$, 焊接速度 $30 \sim 40\text{m}/\text{min}$ 。

3. 结语

在潜望镜支撑筒的焊接过程中, 我们根据对低碳高强度钢的焊接性能分析情况, 选择适当的焊接方法和确定合理的工艺参数, 产品焊接后完全达到了预期的设计要求: 关键焊缝经射线探伤均达到了 CB125-1998 规定的 III 级要求, 其他焊缝经磁粉探伤均达到了 JB3965-1985 规定的 I 级要求。在此总结成文, 希望能够为同行业技术人员提供参考。MW (20080319)