

YI ZHONG NANHAN CAILIAO DE HANJIE  
XINGONGYIXINJISHU SHIYONG SHOUC

# 异种难焊材料的焊接 新工艺新技术实用手册



安徽文化音像出版社

# 异种难焊材料的焊接 新工艺新技术实用手册

第二卷

赵健军 主编

安徽文化音像出版社

# 第二章 异种低合金高强钢的焊接新工艺新技术

## 第一节 异种普通低合金钢的焊接新工艺新技术

焊接结构中经常遇到异种低合金结构钢的焊接(I + II组合或II + IV组合),在厚板结构和较大拘束度或低温条件施焊时,异种结构钢焊接有产生冷裂纹的可能性。采取一定的工艺措施,可避免产生冷裂纹。

熔化焊是异种低合金钢常用的焊接方法,焊接材料一般根据强度较低的母材选择,焊接工艺应根据强度较高的母材确定。异种低合金钢的焊接材料和预热温度见表2-2-1。手工电弧焊和埋弧焊条件下一些常见异种低合金钢焊缝及焊接接头的力学性能见表2-2-2。

表2-2-1 异种低合金钢的焊接材料和预热温度

被焊钢号	手工电弧焊 焊条型号	CO <sub>2</sub> 焊焊丝	埋弧自动焊		预热温度 /℃
			焊丝	焊剂	
16Mn + 20g	E4303, E4315	H08Mn2Si	H08A, H08MnA	HJ431	100 ~ 150 (手工电弧 焊 δ > 10mm)
			H10Mn2	HJ230	
				HJ130	
16Mn + 15MnV	E5016, E5015	H08Mn2Si	H08MnA, H10Mn2A	HJ431	不预热
16Mn + 15MnTi	E5016, E5003	H08Mn2Si	H08MnA, H10Mn2A	HJ431	不预热

续表

被焊钢号	手工电弧焊 焊条型号	CO <sub>2</sub> 焊焊丝	埋弧自动焊		预热温度 /℃
			焊丝	焊剂	
16Mn + 20MnMo	E5016, E5003	H08Mn2Si	H08MnA, H10Mn2A	HJ431	100
16Mn + 15MnVN	E5003, E5015	H08Mn2Si	H10Mn2A	HJ431	100
16Mn + 40Cr	E5001, E5015	H08Mn2Si	H10MnZ	HJ230	200
16Mn + 12CrZMoAlV	E5015	H08CrNi2MoA	H08CrNi2MoA	HJ431	150
Q235A + 16Mn	E5003, E5016, E5015	H08Mn2Si, H10MnSi	H08A, H08MhA, H10Mh2	HJ431	不预热
			H10Mn2	H230 HJ130	100 ~ 150 (手工电弧焊厚件)
20g + 20MnMo	E5015	H08Mn2Si	H08A, H08MnA	HJ431	200 (手工电弧焊)
			H10Mn2	HJ230	
15MnV + 20MnMo	E5503, E5515 - G	H08CrNi2MoA	H10Mn2	HJ431	200
14MnMoV + 20MnMo	E5501 - G	H08CrNi2MoA	H08MnMoA	HJ350	200
15MnV + 14MnMoV	E6015 - D1	H08CrNi2MoA	H08MnMoA	HJ350	200
14MnMoV + 18MnMoNb	E6015 - D1, E7015 - D2	H08CrNi2MoA	H08Mn2MOA	HJ350	200
			H08Mn2MoVA	HJ250	
12MoAlV + 12Cr2MoAlN	E5515 - B2	H12Cr3MnMoA	H12Cr3MnMoA	HJ350	200 ~ 250
15CrMo + 20CrMo9	E5515 - B2	H12Cr3MnMoA	H12Cr3MnMoA	HJ350	200 ~ 250
20CrMo9 + Cr5Mo	E6015 - B3	H12Cr3MnMoA	H12Cr3MnMoA	HJ350	200 ~ 350
20CrMo9 + 18MnMoNb	E7015 - D2	H08CrNi2MoA	H08Mn2Mo	HJ350	200

表 2-2-2 异种低合金钢焊缝及焊接接头的力学性能

被焊钢号	焊接方法	焊接材料	焊缝拉伸			接头拉伸			接头冷弯 /(°) $d = 2a$	焊缝冲击 功/J
			屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断裂位置		
16Mn + Q235	埋弧焊	H08MnA + HJ431	—	—	—	—	40.9 ~ 46.8	Q235	100 <sup>①</sup>	78.4 ~ 92.5
16Mn + 20	埋弧焊	H08A + HJ431	—	—	—	25.1 ~ 26.8	44.1 ~ 45.5	20 钢	90 ~ 100 微裂	81.5 ~ 90.9
16Mn + 15MnTi	手工 电弧焊	J507	46.8	58.1	30	—	65.4	16Mn	180	152.9
	埋弧焊	H08A + HJ431	38.0	53.1	25.8	—	57.8	16Mn	180	84.7
14MnMoV + 20MnMo	手工电 弧焊	J607	—	—	—	43.0	59.5	20MnMo	180	141.1
15MnV + 18MnMoNb	手工电 弧焊	J606	49.1 ~ 50.5	65.8 ~ 73.5	21.7 ~ 24.7	38.6 ~ 41.4	52.3 ~ 52.7	15MnV	180	133.3
15MnV + 14MnMoV	手工电 弧焊	J606	—	—	—	42.4 ~ 43.7	58.0 ~ 59.3	15MnV	150	109.8
14MnMoV + 18MnMoNb	手工电 弧焊	J606	—	—	—	61.2 ~ 61.6	72.8 ~ 73.4	焊缝	180	116.8

①在 Q235 钢熔合区开裂。

## 第二节 异种低碳调质钢的 焊接新工艺新技术

焊接有淬火倾向的低合金钢时,冷却速度对焊接区的最终组织性能有决定性的影响。生产实践表明,焊接低合金高强钢时,如果冷却速度适当小,并保证热影响区组织中所形成的马氏体量不超过 25% ~ 30%,就可以保持焊缝的高强度。焊接淬火钢时热影响区最高硬度、马氏体量及形成裂纹倾向的关系见表 2-2-3。

表 2-2-3 淬火钢热影响区最高硬度、马氏体量及形成裂纹倾向的关系

最高硬度 HRC	抗拉强度/MPa	最高马氏体量/%	形成裂纹倾向
> 41	> 137	> 70	很可能形成焊道下裂纹
36 ~ 40	113 ~ 137	60 ~ 70	有可能形成焊道下裂纹
< 36	< 113	< 60	不会形成焊道下裂纹
< 28	< 91	< 30	不会形成焊道下裂纹

对被焊工件进行焊前预热是降低热影响区焊后冷却速度的最有效、最方便的方法,在生产中应用很广。但预热温度不能太高(低温预热),因为晶粒长大可能使钢的塑性,特别是冲击韧性大大降低。

抗拉强度 1300MPa 的 HQ130 钢碳当量( $C_{eq}$ ) = 0.56%,冷裂敏感指数( $P_{cm}$ ) = 0.31%;抗拉强度 700MPa 的 HQ70 钢碳当量( $C_{eq}$ ) = 0.51%,冷裂敏感指数( $P_{cm}$ ) = 0.28%。若选用“等强匹配”焊材进行焊接, HQ130 + HQ70 高强钢的最低预热温度计算值为 142℃。HQ130 + HQ70 高强钢试验用气体保护焊焊丝熔敷金属的成分与性能见表 2-2-4。

表 2-2-4 试验用气体保护焊焊丝熔敷金属的成分与性能

焊丝牌号	相当于 AWS	熔敷金属化学成分/%					力学性能			
		C	Si	Mn	Mo	Ni	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ /%	$A_{kv}$ /J
GHS-50	ER70S-G	0.08	0.4	1.10	—	—	520	420	25	140(20℃)
GHS-60	ER80S-G	0.08	0.56	1.20	0.3	—	620	520	24	60 (-40℃)
		0.07	0.60	1.45	0.38	—	670	545	25	85 (-40℃)
GHS-70	ER100S-G	0.07	0.45	1.24	0.42	1.51	750	700	21	100 (-40℃)
GHS-80C	ER100S-G	0.08	0.41	1.12	0.52	2.40	865	790	16	85 (-40℃)

续表

焊丝牌号	相当于 AWS	熔敷金属化学成分/%					力学性能			
		C	Si	Mn	Mo	Ni	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta_5$ /%	$A_{kv}$ /J
EF035041	E70T5	0.06	0.37	1.32	—	—	564	433	25	58 (-30℃)

注: GHS-80 焊丝还含 Co 0.4%; EF035041 药芯焊丝含 S 0.016%, P 0.016%。

### 一、焊接工艺及参数

不预热条件下焊接低碳调质高强度钢,控制焊接线能量( $q/v$ )是保证焊接质量的关键。HQ130 + HQ70 高强钢焊接线能量( $q/v$ )的确定以抗裂性和热影响区韧性的要求为依据,合理的焊接线能量范围是:上限取决于热影响区粗晶区不出现上贝氏体(Bu)和粒状贝氏体(Bg)等脆性组织,下限取决于焊缝中不产生冷裂纹。

针对工程机械典型产品 HQ130 + HQ70 高强钢焊接,从工艺性和使用性两方面进行的试验研究和理论分析表明:尽管 HQ130 钢和 HQ70 钢淬硬性都较大,有产生焊接裂纹的倾向,只要合理选择焊接方法和焊材,焊接工艺措施得当,利用国产焊接材料在不预热条件下焊接,仍然可以保证焊接质量,焊接接头性能达到国外公司样机同等水平。焊接工艺性及抗裂性试验表明,针对 HQ130 + HQ70 高强钢焊接,防止焊接冷裂纹(主要是根部裂纹)可采取如下工艺措施。

#### 1. 气体保护焊(CO<sub>2</sub> 焊,或 Ar + 20% CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊)

严格控制 CO<sub>2</sub> 气体含水量(不高于 1.0g/m<sup>3</sup>),用半自动或全自动焊接设备完成焊接过程;选用“低强匹配”焊材(GHS-60、GHS-50 或 EF035041 药芯焊丝)可在不预热条件下焊接,但必须限制焊缝扩散氢含量在超低氢水平(不超过 5mL/100g)。对于焊缝抗拉强度 700 ~ 900MPa 的低碳调质钢,应采用 Ar + CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊,承载焊缝情况下用 H08Mn2SiNiMoA 焊丝。对于焊缝抗拉强度  $\sigma_b \leq 600$ MPa 的低合金高强钢或非承载的焊接结构,可采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊,焊丝用 H08Mn2SiA 或 H08Mn2SiMoA。

### 2. 焊接接头处开双面 V 形坡口(坡口角度 60°)

严格清理坡口表面,采用多层多道焊工艺施焊,每条焊缝均应两面连续焊接完成。第二层焊道保证尽可能高的层温,使第一道焊道起预热作用(也有利于氢的扩散逸出),限制焊道长度,尽量不打焊渣连续施焊,中途不得停歇。两面施焊的对接焊缝,焊后立即清理焊缝根部。

### 3. 严格控制焊接线能量

为了消除焊接裂纹和保证焊缝金属韧性,焊接时应控制焊接线能量( $q/v = 10 \sim 20\text{kJ/cm}$ ),采用双面 V 形坡口多层多道焊,使焊缝金属获得以钎状铁素体(AF)为主的混合组织,限制先共析铁素体(PF)和侧板条铁素体(FSP)数量。当焊缝金属为细小 AF + Bg 时,可达到提高焊缝金属强韧性的目的。

厚度 12mm 的 HQ130 + HQ70 高强钢采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊或 Ar + CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊对接焊时,焊接线能量应控制在 10 ~ 20kJ/cm 的范围。典型产品 HQ130 + HQ70(或 HQ80)高强钢焊接的工艺参数见表 2-2-5。

表 2-2-5 HQ130+HQ70(或 HQ80)高强钢焊接的工艺参数

焊接方法	保护气体	气体流量/ L·min <sup>-1</sup>	焊接电压 /V	焊接电流/A	焊接线能量/ kJ·cm <sup>-1</sup>
GMAW	CO <sub>2</sub> (实丝)	8 ~ 10	30 ~ 32	200 ~ 220	15.2 ~ 17.1
	CO <sub>2</sub> (药丝)	8 ~ 10	31 ~ 34	210 ~ 240	15.5 ~ 18.3
	Ar + CO <sub>2</sub> (80:20)	8 ~ 10	32 ~ 33	220 ~ 23	15.3 ~ 16.5

## 二、焊接裂纹倾向

强度级别不同的两种低碳调质钢(HQ130、HQ70)的淬硬性都很大,有产生焊接裂纹的倾向。采用强度级别较高的焊材(如GHS-80焊丝),焊接裂纹倾向明显增大,必须采取焊前预热措施。采用“低强匹配”焊材和 CO<sub>2</sub> 或 Ar + CO<sub>2</sub> 气体保护焊,控制焊缝扩散氢含量在超低氢水平(不超过 5mL/100g),可实现在不预



热条件下的焊接。

采用斜 Y 坡口“铁研试验”,采用不同强度级别的焊材(GHS - 50、GHS - 60、GHS - 70、GHS - 80 及 EF035041 药芯焊丝),在不预热条件下考察不同强度级别焊材对 HQ130 + HQ70 高强钢焊接裂纹倾向的影响,其结果见表 2-2-6。

表 2-2-6 不同强度组别焊材的“铁研试验”结果

编号	焊接方法	焊接材料	焊接线能量/ kJ·cm <sup>-1</sup>	裂纹率/%	
				表面 C <sub>f</sub>	断面 C <sub>s</sub>
01	CO <sub>2</sub> 焊	GHS - 80	15.0 ~ 17.0	100	100
02	CO <sub>2</sub> 焊	GHS - 70	15.0 ~ 17.0	90	100
03	CO <sub>2</sub> 焊	GHS - 60	15.0 ~ 17.0	50	70
04	CO <sub>2</sub> 焊	GHS - 50	15.0 ~ 17.0	0	13
05	Ar + CO <sub>2</sub> 焊	GHS - 50	15.5 ~ 17.0	0	11
06	CO <sub>2</sub> 焊	EF035041	15.9 ~ 17.0	0	10

由表 2-2-6 可见,焊接裂纹倾向随焊材强度级别的提高而增大。采用名义强度 800MPa 和 700MPa 的 GHS - 80 和 GHS70 焊丝不预热焊,焊接裂纹敏感性大(表面裂纹率和断面裂纹率大于 90%);名义强度 600MPa 的 GHS60 焊丝施焊的裂纹率仍大于 50%;采用名义强度 500MPa 的 GHS - 50 焊丝和 EF035041 药芯焊丝时,裂纹敏感性大大降低。不预热条件下焊材强度对 HQ130 + HQ70 高强钢裂纹敏感性的影响见图 2-2-1。根据峰值温度到 100℃ 临界冷却时间( $t_{100}$ )判断,焊接线能量  $q/v = 9.6 \sim 22.3 \text{ kJ/cm}$  时,  $t_{100}$  小于  $(t_{100})_{cr}$  约 45% ~ 50%。因此不

预热时 HQ13 + HQ70 高强钢的冷裂纹倾向十分明显。“铁研试验”的结果也表明,由于 HQ130 + HQ70 高强钢淬硬性大,采用 GHS - 60、GHS - 70 和 GHS80 焊丝时,为了防止焊接裂纹,焊前需预热;但采用 GHS - 50 或 EF035041 焊丝并严格控制焊接工艺参数,可以在不预热条件下进行焊接。

用较高强度焊材焊接 HQ130 + HQ70 高强钢导致裂纹敏感性增大,为消除或减小裂纹倾向需采用预热焊工艺,但会导致调质钢热影响区软化失强,而这在实际焊接生产中是不希望出现的。为了防止焊接裂纹和提高焊缝的塑韧性储备,选择适当的“低强匹配”焊材是有利的。

“铁研试验”结果表明(见表 2 - 2 - 6),用 GHS - 50(或 EF035041)焊材焊接 HQ130 + HQ70 高强钢,试验焊缝表面裂纹率为 0;断面裂纹率最大值为 16.7%,最小值仅 6.3%(远小于 20%的临界值),能满足焊接结构对抗裂性的要求。

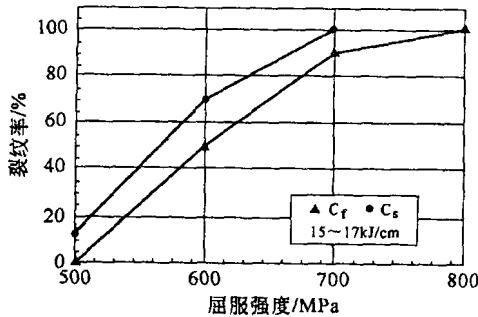


图 2-2-1 焊材强度对 HQ130 + HQ70 高强钢裂纹敏感性的影响

确定焊接线能量要兼顾防止冷裂和热影响区脆化,从防止冷裂纹角度,焊接线能量( $q/v$ )应大一些,但  $q/v$  过大会使热影响区粗晶区韧性下降。HQ30 + HQ70 高强钢“铁研试验”结果表明,焊接裂纹随线能量呈非单调变化,同等条件下以中等焊接线能量(约 16.0kJ/cm)时的裂纹率最小,焊接线能量过小( $q/v \leq 9.6\text{kJ/cm}$ )或过大( $q/v \geq 22.3\text{kJ/cm}$ )都会使裂纹率增加。这是由于焊接线能量过小,淬硬性大,冷裂纹倾向增大;但焊接线能量过大,会使近缝区晶粒粗化,降低了接头的抗裂性能。

不预热条件下焊接低碳调质钢,控制焊接线能量是保证焊接质量的关键。

HQ130 + QJ63 高强度钢“铁研试验”中发现中等焊接线能量( $q/v = 16 \text{ kJ/cm}$ )时的裂纹率最低。实际工程机械中,12mm厚度的调质高强钢  $\text{CO}_2$  焊或  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  混合气体保护焊时,焊接线能量应控制在  $10 \sim 2 \text{ kJ/cm}$  的范围。

HQ130 + HQ70 高强钢焊接中未发现热裂纹,这与两种钢 C、S、P 含量低, Mn 含量较高有关。Mn/S 比值大对防止热裂十分有利,焊接中当 Mn/S 比大于 25 时,一般不产生热裂纹。经计算, HQ130 钢 Mn/S 比为 201.7, HQ70 钢为 98.6; HQ130 钢的热裂纹敏感系数  $H_{\text{CS}} = 1.7$ , 比可能产生热裂纹的临界值( $H_{\text{CS}} = 4$ )小很多。

此外, HQ130 钢的再热裂纹敏感系数  $P_{\text{SR}} = 0.82$  (小于 0), 表明该钢再热裂纹倾向也很小。

低碳调质异种钢焊接中,为了保证焊接区的抗裂性和韧性要求,有时不得不牺牲一些强度而保证工艺焊接性。这种情况下可以选用“低强匹配”焊接材料在不预热条件下进行焊接。但是,采用“低强匹配”焊材获得的焊缝金属强韧性如何,可否满足使用要求,必须通过试验进行考察。

### 三、焊接接头性能

#### 1. 抗拉强度

焊接试板尺寸应充分考虑拉伸、弯曲和冲击试验取样的需要并留有一定的余地,要符合有关国家标准的规定。焊接试板开双面 V 形坡口从两面焊透,坡口角度  $60^\circ$ , 坡口面采用机械方法加工。试板长度为 500mm, 宽度(单块)为 125mm(对接焊成后为 250mm)。每块试板拉伸和弯曲试样各取 3 个;冲击试样开夏比 V 形缺口,缺口分别开在焊缝中部、熔合区和热影响区 3 个位置处,每一位置取 3 个试样,均采用锯割。

焊缝金属的力学性能直接影响焊接结构使用的可靠性,而抗拉强度和冲击韧性是最关键的技术指标。由于低碳调质高强度耐磨钢焊接结构在工程中占有极其重要的地位,对高强钢焊缝金属强韧性的要求更为重要。HQ130 + HQ70 高强钢不同工艺条件下的焊接接头拉伸和弯曲试验在 WE-60 型万能材料试验机上进行,试验结果见表 2-2-7。

表 2-2-7 HQ130+HQ70 高强钢焊接接头拉伸和冷弯试验结果

试样编号	焊接方法	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	冷弯角 $\alpha$ /(°)	断裂位置
10	CO <sub>2</sub> 焊(实芯焊丝)	740.9,699.9(720.4)	62	焊缝
20	CO <sub>2</sub> 焊(药芯焊丝)	741.2,755.5(74.3)	67	焊缝
30	Ar + CO <sub>2</sub> 焊	776.7,842.3(809.5)	133	焊缝

注:括号中的数据为试验平均值。

低碳调质高强度耐磨钢焊接应综合考察接头区的强度和韧性,除焊缝强度外,焊接裂纹和热影响区韧性更应受到关注。少许牺牲焊缝强度而使塑韧性储备提高,对防止产生焊接裂纹有利。用“低强匹配”焊材焊接强度较高的钢时,因合金元素的溶入和冷速较快,焊缝强度将提高较多。特别是焊接大型结构时,由于高强钢母材对焊缝的拘束强化作用,接头强度还会提高。

CO<sub>2</sub> 气体保护焊实芯焊丝、药芯焊丝和 Ar + CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊条件下, HQ130 + HQ70 高强钢三种“低强匹配”工艺焊后的接头强度均大于所选焊材名义强度值约 40% 以上,并已接近接头两边强度较低侧母材 HQ70 钢的强度(见表 2-2-7)。其中 Ar + CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊施焊的焊接接头,因保护效果好,减少了有害元素(O、N、H)的侵入,同时合金元素烧损少,焊缝强度几乎和 HQ70 母材强度相当。

## 2. 冲击韧性

HQ130 + HQ70 高强钢焊接接头冲击韧性试样开缺口前,配制 3% 硝酸酒精溶液侵蚀试样,清楚地显示出焊接区后,再开 V 形缺口。缺口轴线垂直于焊缝

表面,分别开在焊缝、熔合区和机影响区,每一缺口位置取 3 个试样,试验结果见表 2-2-8。

表 2-2-8 HQ130 + HQ70 高强钢焊接接头区域的冲击功

焊接方法	冲击功 $A_{kv}$ /J				
	HQ130 钢		焊缝金属	HQ70 钢	
	热影响区	熔合区		熔合区	热影响区
CO <sub>2</sub> 焊(实丝)	139,110,141 (128) <sup>①</sup>	82,89,89 (87)	81,93,91 (89)	70,66,69 (68)	—
CO <sub>2</sub> 焊(药丝)	67,75,96(79)	—	83,83,81(82)	—	63,82,83(76)
Ar + CO <sub>2</sub>	80,91,84 (85)	97,100,112 (103)	113,127,100 (113)	93,75,63 (77)	—

①缺口位置接近热影响区回火区。

注:括号中的数据是试验平均值。

低碳调质钢熔合区和热影响区冲击韧性受焊缝形状、热影响区组织梯度和缺口位置的影响,精确地测定各区域的冲击韧性十分困难。按熔合区 V 形缺口位置进行冲击试验,所得冲击功是综合性的。名义上是熔合区的冲击功,实际上缺口破断区域包含有焊缝和热影响区粗晶区部分;热影响区的冲击功也包含有热影响区淬火区和回火区部分。

试验中采用的是“低强匹配”焊材,三种焊接工艺的焊缝韧性均高于母材的韧性。其中 Ar + CO<sub>2</sub> 混合气体保护焊的焊缝韧性最高,实芯和药芯焊丝 CO<sub>2</sub> 焊的焊缝韧性稍低,但仍高于 HQ130 钢母材的冲击韧性约 30%,高于 HQ70 钢的冲击韧性约 10%。表明“低强匹配”焊材施焊的焊缝金属具有较高的塑韧性储备,可有效缓解熔合区附近的应力集中,有利于防止焊接裂纹的产生。

对于低碳调质高强度耐磨钢焊缝金属,最有害的脆化元素是 S、P、N、O、H,必须加以限制。焊接材料直接影响焊缝金属中有害杂质的数量及其存在形式,从而影响焊缝的韧性。强度级别越高的焊缝,对这些杂质的限制越要严格。铁素体化元素对焊缝韧性有不利影响,除了 Mo 在很窄的含量范围内(约 0.3% ~ 0.5%)有较好的作用外,其余铁素体化元素均在强化焊缝的同时恶化韧性,V、

Ti、Nb 的作用最坏。奥氏体化元素中 C 对韧性最为不利, Mn、Ni 则在相当大的含量范围内有利于改善焊缝韧性。

焊接接头区冲击韧性试验表明, 焊接线能量为 14kJ/cm 时熔合区和热影响区冲击韧性最佳, 而且冲击功随着焊接线能量的增加而降低(见图 2-2-2); HQ130 钢热模拟试验发现,  $t_{8/5} \geq 20s$ (对应的线能量  $q/v \geq 20kJ/cm$ ) 时热影响区粗晶区韧性开始恶化。

### 3. 硬度分布

硬度是金属耐磨性指标之一, 与金属组织密切相关, 硬度越高越耐磨, 强度也越高, 但脆性也随之增大。为了了解焊接接头区域硬度分布规律, 判断组织淬硬性和耐磨性, 对 HQ130 + HQ70 高强钢焊接区域的硬度进行了测定。

a. 热影响区最高硬度 参照 GB4675.5—84 规定, 分别在 HQ130 钢和 HQ70 钢试件上堆焊, 然后在试样横截面上测定硬度。测定结果表明: HQ130 钢热影响区最高硬度为 HRC45(HV 430); HQ70 钢热影响区最高硬度为 HRC31(HV296)。

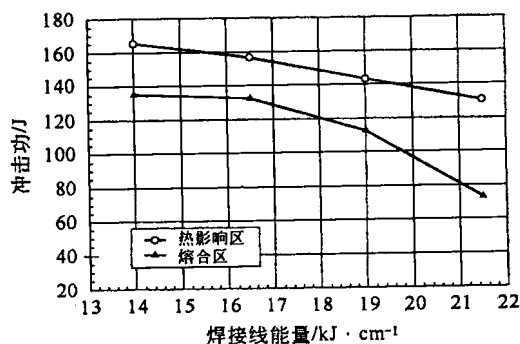


图 2-2-2 焊接线能量对 HQ130 钢熔合区及热影响区 (HAZ) 冲击功的影响

b. 焊接接头区硬度 HQ130 + H + 70 高强钢焊接接头区域的硬度分布如图 2-2-3(a)、(b) 所示, 表明 HQ130 钢侧和 HQ70 钢侧的热影响区均存在淬硬区和软化区。

但热影响区软化区的硬度仍高于焊缝金属的硬度(因焊缝采用“低强匹配”焊材), 热影响区综合性能可以满足产品使用要求。

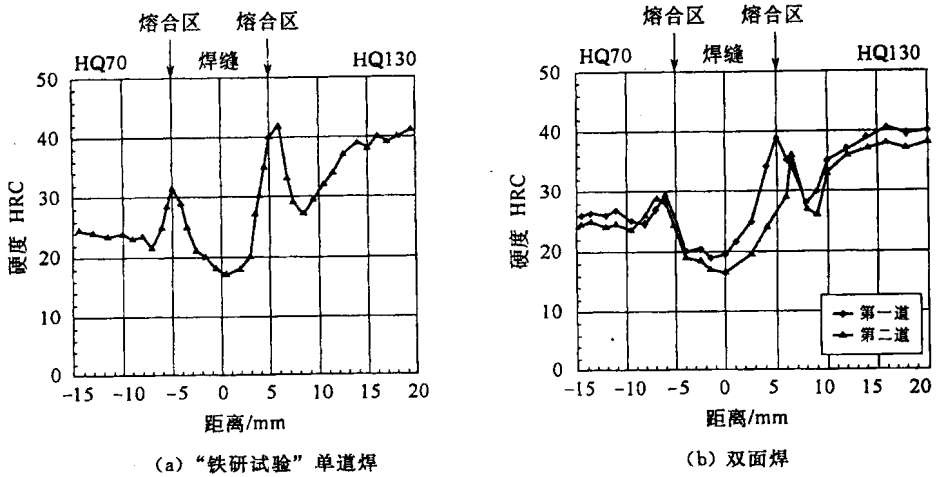


图 2-2-3 HQ130 + HQ70 高强钢焊接区域硬度分布

美国 HY80 和 HY130 低碳调质高强度钢焊接时为了防止裂纹,焊缝金属硬度较低。钢材强度级别越高,焊缝硬度越低(少许牺牲强度而提高韧性储备)。熔合区附近有明显淬硬倾向,硬度较高;焊接热影响区存在回火软化区,但软化区的硬度仍高于焊缝硬度。

随着焊接线能量的增大, HQ130 钢热影响区不完全淬火区的宽度增大。因此可以通过控制焊接线能量来减小热影响区  $A_{cl} \sim A_{c3}$  不完全淬火区的宽度。用显微镜硬度计对不同焊接线能量(9.6kJ/cm、16kJ/cm 和 22.3kJ/cm)条件下的热影响区进行显微硬度测定。试验表明,焊接线能量较小时焊接热影响区冷速快,组织较细小,显微硬度较高(见图 2-2-4)。就同一焊接线能量而言, HQ130 钢热影响区由粗晶区到细晶区,显微硬度明显提高,但由于不完全淬火区组织的不均匀性,导致显微硬度有所降低。

采用“低强匹配”焊材和  $CO_2$  或  $Ar + CO_2$  气体保护焊,控制焊缝扩散氢含量在超低氢水平(不超过 5mL/100g),可实现在不预热条件下焊接 HQ130 + HQ70 高强钢。若采用强度级别较高的焊材(如 GHS-60、GHS-70 等),焊接裂纹倾向明显增大,必须采取焊前预热措施。

工程装载机铲斗的铲刀刃板在作业时受到砂石的强烈撞击和磨损,要求具有较高强度、硬度、耐磨性以及承受较大的冲击载荷的能力。从减少和防止焊接

裂纹的角度出发,为了提高焊缝金属的塑韧性储备,选择适当的“低强匹配”焊材进行焊接是有利的。在不预热条件下对装载机铲刀刃和斗壁板高强度异种钢进行焊接,装载机铲斗焊接结构实际服役证明该焊接工艺是可行的,焊接接头区性能可以满足使用要求。

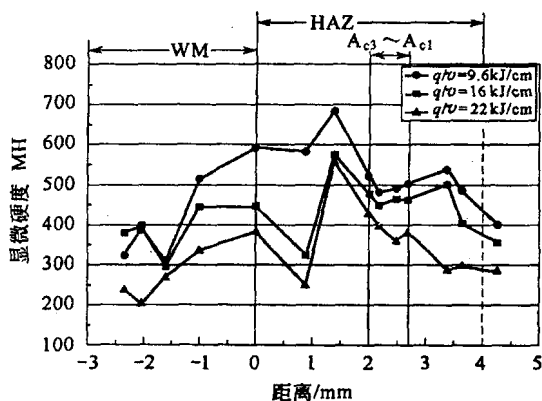


图 2-2-4 HQ130 钢 HAZ 金相组织及显微硬度分布  
WM—焊缝金属;HAZ—热影响区



# 第三章 珠光体钢与高铬钢的 焊接新工艺新技术

## 第一节 珠光体钢与高铬钢的焊接特点

### 一、珠光体钢与铁素体钢的焊接特点

珠光体钢与铁素体钢焊接时,存在着与同种铁素体钢焊接同样的问题,即热影响区过热区晶粒急剧长大而引起脆化,且含 Cr 量越高,高温停留时间越长,接头脆性倾向就越严重。焊后接头区域的室温冲击韧性很低,焊接接头容易产生裂纹。由于珠光体钢与铁素体钢物理性能、化学成分(尤其是含 Cr 量)存在差异,影响了焊接接头的力学性能、使用性能及抗裂能力。

焊接异种高铬钢构件,除要求常温的力学性能、物理致密性(无气孔、夹渣、裂纹等)外,还有一些附加要求,如耐蚀性、耐热性、导磁性等。铬的大量烧损,会大大降低焊缝金属的耐蚀性和热稳定性等,所以必须减小和避免铬和其他合金元素的氧化烧损,选择焊条时,应选用低氢型药皮的焊条。

含铬量为 25% ~ 30% 的铁素体钢,尽管 1100℃ 以下在含硫介质中工作也有很好的热稳定性,但对于在含硫介质中工作的构件,不能选用含镍很高的奥氏体焊条(如 A102、A307 等),这类焊条不耐亚硫酸腐蚀。

珠光体钢与铁素体钢焊接时,应采用较小的焊接线能量和窄焊道进行焊接,焊道层间要充分冷却(100℃ 以下)以免焊接热影响区晶粒粗大。如果异种钢接