

埋弧焊焊丝 MK65HGX-III 的开发和应用

刘世泽¹, 董春明¹, 鲁科明², 曹炳亮¹

(1. 番禺珠江钢管有限公司, 广东 广州 511450; 2. 湖北猴王焊接材料有限公司, 湖北 仙桃 433000)

摘要: 介绍了用于焊接深海天然气输送用直缝埋弧焊管的焊丝 MK65HGX-III 的开发背景及研制过程。采用该焊丝和优化的 H08DG 焊丝与高碱度烧结焊剂 SJ102G 匹配焊接 11.525 万 t X65 钢级厚壁管线管, 其低温韧性、断裂韧性和焊接接头的横向拉伸性能均符合标准要求, 且性能稳定, 富余量较大。实际生产证明: MK65HGX-III 焊丝是一种高性能的新型埋弧焊焊丝, 所焊接的钢管焊缝具有高强度、高韧性和高塑性, 适用于大线能量(约 65 kJ/cm)的焊接, 可推广应用 to 更高钢级(X80)和抗 H₂S 腐蚀要求的焊管焊接。

关键词: 深海管线管; 埋弧焊接; 焊丝; 成分设计; 低温韧性; CTOD; 焊接工艺评定

中图分类号: TG422.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2013)02-0042-06

R & D and Application of MK65HGX-III Welding Wire for SAW Process

LIU Shize¹, DONG Chunming¹, LU Keming², CAO Bingliang¹

(1. Panyu Chukong Steel Pipe Co., Ltd., Guangzhou 511450, China;

2. Hubei Monkey King Welding Material Co., Ltd., Xiantao 433000, China)

Abstract: Elaborated in the paper are the development background and the R & D activities of the MK65HGX-III welding wire for making of the SAWL pipe for deep ocean pipeline service. 115, 250 tons of X65 heavy-wall linepipes have been made by the welding process employing the said welding wire and the optimized H08DG welding wire together with the SJ102G high-basicity sintered agent. The linepipes are in compliance with applicable standard in terms of low temperature toughness, rupture toughness and weld joint transversal tensile strength, and also have stable performance, and rather large allowance. Relevant operation practice demonstrates that as a new type hi-performance welding wire for SAW process, the MK65HGX-III welding wire is capable of making steel pipes with high strength, high toughness and high plasticity, being suitable for welding operation with a large linear energy (approximately 65 kJ/cm), and worth spreading for welding pipes in higher steel grades (e.g., X80), and pipes as required for proper H₂S corrosion resistance.

Key words: linepipe for deep ocean service; SAW; welding wire; chemical composition design; low temperature toughness; CTOD; evaluation of welding process

我国南海的石油天然气资源丰富, 根据探测结果, 其石油和天然气储量, 相当于我国油气资源总量的 1/3; 因此, 海洋油气田的开发是非常重要的, 是我国未来油气开发的重点。海洋油气田的开发已广泛使用了海底输送管线^[1-3]。

海底输送管线是在恶劣的环境下服役的, 它不

仅要承受较大的内压, 还要经受海水的外压以及风、浪、流、冰和地震等环境载荷造成的管道平移和振动作用; 因此, 要求钢管具有抗大变形的能力, 强度高、壁厚大、直径小、具有较大的厚径比(t/D), 以及具有优异的断裂韧性, 满足 CTOD(裂纹尖端张开位移)、DWT(落锤撕裂试验)和 CVN(夏比冲击试验)等性能指标的要求。

番禺珠江钢管有限公司(简称 PCK)为南海荔湾深海天然气开发项目(简称南海荔湾项目)制造的直

刘世泽(1936-), 男, 教授级高级工程师, 长期从事焊管(SAWH 和 SAWL)的工艺研究和技术管理工作。

缝埋弧焊管,分为浅海段用管(中国海洋石油公司承包)和深海段用管(国外赛班公司承包)。浅海段用管,其管径为 762 mm,最大壁厚为 30.2 mm,材质为 X65;深海段用管,其管径为 558.8 mm,最大壁厚为 27 mm,深海段用弯管,管径为 558.8 mm,最大壁厚为 31 mm,材质均为 SMYS 450F/X65(后缀 F 表示对钢管的断裂韧性有严格的要求)。深海段的管道是在 1 500 m 的深水下服役,外部压力为 15 MPa,内部压力为 29.4 MPa,这是我国首次对深海管线管的开发。

在深海管线管前期的试制过程中, PCK 采用国内现有的焊接材料,有针对性地进行了大量的 X65 钢级厚壁板焊接试验研究,焊缝中心和熔合线的夏比冲击吸收功总是偏低,有时还出现不符合要求等情况;因此, PCK 与湖北猴王焊接材料有限公司联合开发专用于南海荔湾深海管线管焊接的新型埋弧焊焊丝,牌号为 MK65HGX-III。本文重点介绍此种焊丝的开发应用情况。

1 埋弧焊焊丝 MK65HGX-III 的研制

1.1 焊缝合金的组成

管线钢管的韧性是钢管最重要的性能指标之一,足够的韧性是管线钢管安全性的保证。焊缝的韧性,取决于焊缝的合金成分。对于 $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 的深海管线管,其焊接方法是先作混合气体 ($\text{Ar}+\text{CO}_2$) 保护焊预焊,然后采用四丝埋弧焊作内、外焊,焊接接头如图 1 所示。

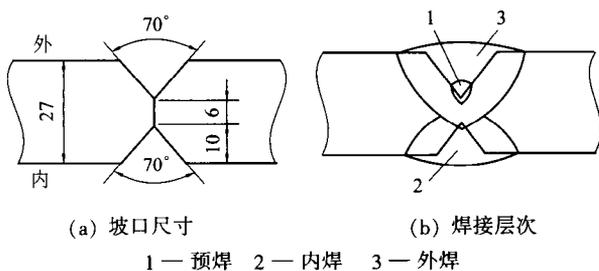


图 1 $\Phi 558.8 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 深海管线管焊接接头示意

表 1 MK65HGX-III 焊丝的化学成分(质量分数)设计

C	Si	Mn	Mo	Ni	Ti	B	P	S
0.04~0.09	0.10~0.30	1.50~1.80	0.30~0.50	0.10~0.50	0.06~0.15	0.004~0.010	<0.012	<0.003

(1) C 元素的含量对焊缝的强韧塑性及其组织均有较大的影响^[6]。当 C 含量较低时,焊缝强度较低,焊缝金属中铁素体比例较高;当 C 含量较高

要提高焊缝的韧性,就应调整焊缝的成分。由于母材的成分已确定,预焊的焊接材料也已选定,所以调节埋弧焊接材料的合金成分是控制焊缝金属成分的主要手段。调节焊接参数也可作为控制焊缝金属成分的辅助手段,因为控制焊接参数可以改变熔合比,从而调节焊缝的合金成分。

焊缝的合金成分既有焊剂熔化渗合金的作用,也有预焊焊丝熔化后的合金成分,但主要是母材和焊丝熔化后的合金成分。笔者认为:在大线能量的多丝埋弧焊接中,母材的熔合比约占 40%,焊缝中焊丝熔化的合金占比约 50%;因此,焊丝熔合金属的力学性能是决定焊缝力学性能的主要因素。

1.2 用户对焊管焊缝力学性能的要求

按南海荔湾项目用管深海段和浅海段标准^[4-5],用户对埋弧焊焊接头的力学性能要求如下。

(1) 焊接接头的低温韧性:在试验温度为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$,试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ 时,焊缝中心、FL(熔合线)、FL+2、FL+5 的单个最小值 $\geq 38 \text{ J}$,平均值 $\geq 45 \text{ J}$ 。

(2) 焊缝的断裂韧性:浅海段用管在试验温度为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,CTOD 值 $\geq 0.20 \text{ mm}$;深海段用管在试验温度为 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,CTOD 值 $\geq 0.15 \text{ mm}$ 。

(3) 焊接接头横向拉伸强度: $R_m \geq 535 \text{ MPa}$,在焊接接头横向拉伸试验时,不允许断在焊缝上,即焊缝的抗拉强度,必须大于母材的抗拉强度。

为了保证在大批量生产情况下,焊缝的冲击韧性 100% 的满足标准要求,本研制项目规定在四丝埋弧焊试验的焊接工艺评定时,焊缝冲击功的目标值应大于标准要求的 2 倍(考虑了管坯在形变强化时对焊缝冲击韧性的影响)。

1.3 埋弧焊焊丝 MK65HGX-III 的化学成分设计

根据厚壁 X65 钢级管线钢力学性能设计情况,综合考虑焊缝的强度、低温冲击韧性和塑性等技术要求,进行了该焊丝的化学成分设计,见表 1。其化学成分各元素的设计机理如下:

时,焊缝韧性和塑性下降,焊缝中珠光体比例增加,影响焊缝中针状铁素体含量。

(2) 加入一定的 Si 可以使焊缝金属镇静,加

快熔池金属的脱氧过程,保证焊缝的致密性,也提高了焊缝的强度。但过高的 Si 含量,易出现硅裂。

(3) Mn 元素是焊缝强韧化的有效元素。Mn 可以细化晶粒,提高焊缝的低温冲击韧性,并有脱氧脱硫作用。同时, Mn 的加入,可弥补因降碳而引起的强度下降所失去的强度。

(4) Mo 元素有利于提高焊缝中针状铁素体的含量,减少先共析铁素体,并有细化铁素体晶粒的作用,提高焊缝的强韧性。Mo 还是强化晶界的元素,有助于提高焊缝抗热蠕变强度。

(5) Ni 元素有助于提高焊缝金属的韧性,降低韧脆转变温度。此外, Ni 还能有效地阻止因 Cu 元素的热脆性引起的网裂,并有显著提高钢和焊缝的耐腐蚀性能。但过高的 Ni 含量,在大线能量焊接时,与焊缝中的 B 元素形成低熔共晶,从而显著降低焊缝的冲击韧性。

(6) Ti 元素是一种在焊接峰值下能通过 TiO 和 TiN 来控制晶粒长大的有效元素,且 TiO 和 TiN 均能促使焊缝中的针状铁素体形成,从而使焊缝的韧性提高。但若 Ti 过量,会形成大量的 TiC 和 TiN 质点,将使焊缝韧性降低^[7]。

(7) 加入微量的 B 元素可以强化晶界,并且能和一定比例的 Ti 相互作用起到很强的细化晶粒作用,从而提高焊缝的低温韧性。微量 B 在超低碳下,可获得 B 贝氏体组织,提高焊缝的强度。但 B 过量,将产生热脆现象^[6],使焊缝韧性降低。

(8) S、P 元素是焊缝中的主要有害元素,它们显著降低焊缝金属的低温冲击韧性和塑性^[6]。为了消除 S 对焊缝的热脆作用和 P 对焊缝的冷脆作用,在冶炼焊丝钢时应尽量降低 S、P 的含量^[8]。

上述化学成分设计,考虑了焊丝各合金元素性能的叠加效应。

试验研究表明:选用焊剂 SJ102G 与焊丝 MK65HGX-Ⅲ 匹配焊接 SMYS 450F/X65 厚壁板,可有效提高焊缝的冲击韧性。SJ102G 属高碱度低氢烧结焊剂,其后缀 G 表示对焊剂的 S、P 含量和扩散氢进行了更严格的控制。

母材的力学性能是影响焊缝力学性能的重要因素,该项目选用的 SMYS 450F/X65 钢板是由 POSCO(韩国浦项制铁公司)、南京钢铁有限公司(简称南钢)和武汉钢铁(集团)公司(简称武钢)3 家供应的。POSCO 钢板的组织以针状铁素体为主体,而南钢和武钢的钢板组织是属于针状铁素体型的钢。3 个厂钢板的显微组织均不相同,但原材料的低温冲击韧性均在 350 J 以上,同时在高强度下,伸长率 A_{50} 均在 45% 以上;因此,母材的高强韧塑性就为焊缝的高强韧塑性创造了重要条件。

1.4 MK65HGX-Ⅲ 焊丝熔敷金属试验

采用 MK65HGX-Ⅲ 焊丝($\Phi 4.0$ mm)和 SJ102G 焊剂匹配,按 GB/T 12470—2003《埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂》标准进行了熔敷金属焊接试验,检验结果见表 2 和表 3。

表 2 焊缝及焊丝化学成分(质量分数)实测

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
焊缝	0.04	0.28	1.53	0.016	0.003 9	0.08	0.20	0.292
焊丝	0.06	0.19	1.76	0.011	0.001 0	-	0.24	0.380
项目	Nb	V	Ti	Cu	Al	B	N	
焊缝	0.001	0.007	0.010	0.12	0.012	0.002 4	0.008 0	
焊丝	-	-	0.061	-	-	0.005 8	-	

表 3 焊缝圆棒横向拉伸性能

屈服强度 $R_{0.05}$ / MPa	抗拉强度 R_m / MPa	伸长率 A_{50} / %	屈强比 $R_{0.05}/R_m$	夏比冲击吸收功/J					平均
				1	2	3	4	5	
580	645	30	0.90	80	69	65	56	47	63

注:夏比冲击试验温度为 -40 °C;试样尺寸为 10 mm \times 10 mm \times 55 mm;吸收功的平均值是去掉一个最大值和一个最小值后的平均数值。

从表 2 可发现:在焊接的过程中,焊丝中的 Ti 和 B 过渡到焊缝时烧损严重;因此 Ti 和 B 的配

方按上限控制。从表 3 看出:熔敷金属(焊缝)的力学性能是优良的。

1.5 MK65HGX-Ⅲ焊丝焊接工艺评定

1.5.1 评定情况

先后进行了两次内外埋弧焊均为四丝的焊接工艺评定, 结果见表4。

1.5.2 评定结果分析

1.5.2.1 夏比冲击吸收功

第1次和第2次的焊接评定均采用南钢的原材料, 除了焊丝的组合不一样外, 其他焊接条件均相同。第1次焊缝中心的夏比冲击功平均值大于第2次的, 但两次试验的结果焊缝的冲击功平均值在试

验温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均大于 90 J ; 因此均符合预定的目标值。从降低成本方面考虑, 采用第2次焊接评定的方案进行了试生产, 其结果均满足要求。这是因为中2丝和后丝主要是对盖面和表层起主要作用, 焊缝的冲击试样是在表层 2 mm 以下和中心部位取样, 而余高和表层在加工试样时已去除, 同时前丝和中1丝的焊接电流比中2丝和后丝大2倍以上, 因此前丝和中1丝对去除余高后填充金属的贡献在70%左右, 所以对于焊缝中心的冲击功起主要作用的是前丝和中1丝。

表4 MK65HGX-Ⅲ焊丝焊接工艺评定情况

序号	预焊焊丝 牌号	双面埋弧焊 焊丝组合	$A_{\text{W}}(-20\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{J}$			焊缝中心 CTOD 位移量 δ/mm
			位置	单个值	平均值	
第1次	CHW-60C	前丝, MK65HGX-Ⅲ 中1丝, MK65HGX-Ⅲ 中2丝, MK65HGX-Ⅲ 后丝, MK65HGX-Ⅲ	上表层焊缝中心	79, 148, 100	109	1.248 0
			焊缝中心	220, 152, 201	191	1.176 1 0.292 0
第2次	CHW-60C	前丝, MK65HGX-Ⅲ 中1丝, MK65HGX-Ⅲ 中2丝, H08DG 后丝, H08DG	上表层焊缝中心	102, 81, 103	95	0.811 5
			焊缝中心	165, 104, 121	130	0.512 1 0.440 3

注: ①采用的南钢钢板材质为 SMYS 450F/X65; ②钢管规格为 $\Phi 558.8\text{ mm}\times 27\text{ mm}$; ③预焊均采用 CO_2 保护气体; ④双面埋弧焊使用的焊剂均为 SJ102G; ⑤焊缝中心 CTOD 试验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.5.2.2 焊缝中心的 CTOD 试验

无论是 CVN, 还是 DWTT, 它们所提供的冲击功和韧脆断口面积比只有相对意义, 这些性能指标只能表示材料韧性的相对大小。冲击功值并不能代表实际管道结构能够承受的冲击能量。目前, 断裂韧性作为材料的本质性能指标的引入, 在管线钢管的抗断裂安全评定中发挥了重要的作用^[9]。

在管线钢断裂韧性的评定方法中, 普遍采用的是 CTOD 评定法, 这是因为该方法的概念直观, 测试准确^[9]。

从表4的评定结果得知: 焊缝中心 CTOD 的测试值均符合标准要求, 而且富余量较大。

1.5.2.3 焊接接头的横向拉伸试验

用户要求: 焊接接头在作横向拉伸试验时, $R_m \geq 535\text{ MPa}$, 且不允许断在焊缝上。通过上述两次的焊接工艺评定, 焊接接头在作横向拉伸试验时均断在母材, 说明采用 MK65HGX-Ⅲ的焊丝能满足焊缝强度的要求(详见 MK65HGX-Ⅲ的两次焊接工艺评定报告)。

1.6 静水压爆破试验

为了检验用 MK65HGX-Ⅲ焊丝和 SJ102G 焊剂匹配焊接 SMYS 450F/X65 钢制成的焊管的整体力学性能, 随机抽取了1根 $\Phi 558.8\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 的钢管, 进行静水压爆破试验。

爆破实测压力值为 54.3 MPa , 大于按理论屈服强度计算的爆破压力值(48.6 MPa)和按该管的拉伸试验值计算的爆破压力值(53.2 MPa), 且爆破口距焊缝 740 mm , 爆破口长度为 910 mm , 这说明钢管管体及焊缝的整体力学性能和母材的止裂性能优良。该管爆破口的全貌如图2所示。



图2 $\Phi 558.8\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}$ 焊管爆破口全貌

1.7 MK65HGX-Ⅲ焊丝的创新点

1.7.1 配方的创新

该焊丝由七元合金组成,显示了多元合金的优越性,同时控制了S、P和H的含量。用该种焊丝和高碱度烧结焊剂SJ102G匹配焊接X65钢级厚壁(31 mm等)钢管,焊缝具有高强度($R_m > 680$ MPa)、高韧性(在 -20 °C时, $A_{kv} > 100$ J)和高塑性($A_{50} > 28\%$)。同时,在 -10 °C时CTOD值 > 0.4 mm^[10-12]。

1.7.2 合金体系的创新

目前,管线钢焊丝的合金体系只有Mn-Mo-Si、Mn-Mo-Ti、Mn-Mo-Cr、Mn-Mo-Ni、Mn-Mo-Ni-Cr、Mn-Mo-Ni-V、Mn-Mo-Ti-B系^[5],而没有Mn-Mo-Ni-Ti-B系。MK65HGX-Ⅲ焊丝的合金体系是Mn-Mo-Ni-Ti-B系,是一种创新^[10]。

1.7.3 适用于大线能量的焊接

用该种焊丝和SJ102G焊剂匹配焊接X65钢级厚壁钢管,采用四丝埋弧内、外单层焊,线能量达65 kJ/cm,焊缝中心的平均冲击吸收功,在试验温度为 -20 °C时仍在100 J以上,且焊缝中心的CTOD值在试验温度为 -10 °C时大于0.4 mm。

2 埋弧焊焊丝 MK65HGX-Ⅲ的应用

2.1 南海荔湾项目用管线管的小批量试制

在该项目大批量生产前,进行了1 500 t小批

量试制。试制材料为武钢生产的X65钢级钢板,试制钢管规格是管径762 mm,壁厚28.6 mm和30.2 mm。四丝内外埋弧焊的焊丝是以MK65HGX为主,匹配高碱度烧结焊剂SJ102G进行焊接。

对试制的1 500 t钢管进行了全面的理化性能检验,其焊缝中心夏比冲击功如图3所示,CTOD试验结果见表5。

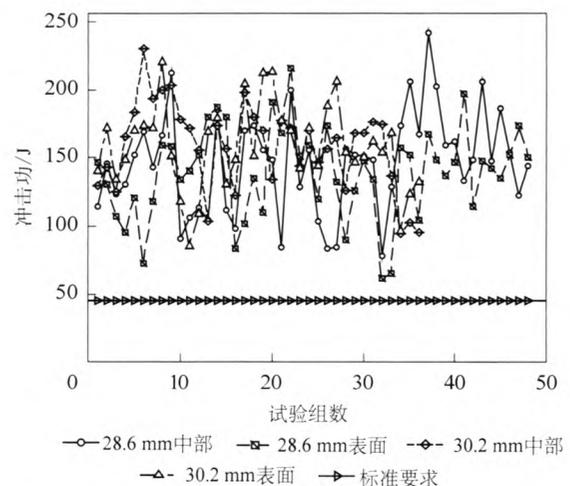


图3 $\Phi 762$ mm \times 28.6/30.2 mm海底管线钢管不同壁厚位置焊缝中心夏比冲击功(-20 °C)

小批量生产证明:钢管的力学性能完全满足标准要求,焊缝的低温冲击韧性和CTOD值极佳。

表5 $\Phi 762$ mm \times 28.6/30.2 mm海底管线钢管CTOD试验结果

试样类型	钢板厚度 T /mm	试样厚度 B /mm	试样宽度 W /mm	原始裂纹长度 a_0 /mm	a_0/W 比值	V_p 值/mm	F /kN	δ /mm
6072 焊-1	30.2	15.14	30.07	15.300	0.508 8	1.516 8	23.898	0.457 3
6072 焊-2	30.2	15.03	30.09	15.260	0.507 1	1.569 7	24.466	0.475 9
6072 焊-3	30.2	15.09	30.12	15.000	0.498 0	2.144 6	24.561	0.650 3
6072 热-1	30.2	15.03	30.11	15.280	0.507 5	4.541 8	23.768	1.305 0
6072 热-2	30.2	15.08	30.01	14.940	0.497 8	4.557 8	24.511	1.344 4
6072 热-3	30.2	14.97	30.09	15.090	0.501 5	3.723 2	24.329	1.093 9
2731 焊-1	28.6	14.06	28.00	13.922	0.497 0	3.849 3	24.560	1.150 6
2731 焊-2	28.6	14.06	28.00	13.835	0.494 0	3.598 8	24.880	1.087 7
2731 焊-3	28.6	14.06	28.00	13.558	0.484 0	2.893 6	25.620	0.906 4
2731 热-1	28.6	14.06	28.00	13.832	0.494 0	3.894 4	24.680	1.173 2
2731 热-2	28.6	14.06	28.00	13.842	0.494 0	3.806 7	24.310	1.145 4
2731 热-3	28.6	14.06	28.00	13.974	0.499 0	3.533 6	24.410	1.054 0

注:①试样类型中,“焊”指焊缝区,“热”指热影响区;② V_p 表示引伸计位移的塑性分量, F 表示对应取 V_p 的力值, δ 表示裂纹尖端的位移量。

2.2 南海荔湾项目用管线管的大批量生产

埋弧焊焊丝以MK65HGX-Ⅲ为主并与SJ102G

焊剂匹配,焊接了南海荔湾项目浅海段用钢管6.5万t,深海段用钢管5万t,深海段用弯管250 t。以

上所有厚壁钢管的焊接接头实物质量的冲击功均大于标准规定的 2 倍以上。对焊缝中心 CTOD 值, 浅海段和深海段先后进行了 15 次试验, 焊缝实物的 CTOD 值均满足了标准要求, 而且富余量较大。焊接接头的横向拉伸试验全部断在母材上, 试验证明焊接接头具有高的强韧塑性。试验的全过程均是在监理的见证下进行的: 深海段用钢管的各种试验均是在 Husky [哈斯基(中国)公司]、Saipem [塞班(意大利)公司] 和 ABS (美国船级社) 的监理见证下进行的, 而浅海段用直缝埋弧焊管的各种试验均是在 CCS (中国船级社) 和 TGRC (中国石油集团石油管工程技术研究院) 的监理见证下进行的。

2.3 推广应用

在多丝埋弧焊时, MK65HGX-Ⅲ焊丝和其他适宜的焊丝组合匹配 SJ101 或 SJ102 的焊剂, 除可焊接 X65 钢级的管线钢管外, 还可焊接 X60、X70 或 X80 钢级的管线钢管, 同样具有高的强韧塑性, 并适用于厚壁大线能量的焊接。同时, 因该焊丝的 S、P 含量低, 纯净度高, 能满足输送含 H₂S 的天然气用管抗腐蚀性能要求。PCK 已将该焊丝推广应用到所属各地 6 个分厂焊接高性能的管线钢管的生产上。湖北猴王焊接材料有限公司也在全国各地推广应用该焊丝。

3 结论

(1) 新开发的专用于南海荔湾深海天然气开发项目直缝埋弧焊管的埋弧焊焊丝 MK65HGX-Ⅲ属 Mn-Mo-Ti-Ni-B 合金体系, 显示了多元合金的优越性, 是一种高性能的新型埋弧焊焊丝。

(2) 通过该焊丝和高碱度烧结焊剂 SJ102G 匹配焊接熔敷金属的试验, 焊缝的力学性能优良: $R_{0.5}=580$ MPa, $R_m=645$ MPa, $A_{50}=30\%$, -40 °C 时的 A_{KV} 均值为 63 J。这说明用该焊丝焊接的焊缝具有高强度、高韧性和高塑性。

(3) 以该焊丝为主的四丝埋弧焊和 SJ102G 匹配进行了 X65 钢级厚壁板的焊接工艺评定。其结果是: 焊缝中心的 A_{KV} 值均大于标准规定的 2 倍, 焊缝中心的断裂韧性(CTOD 值)均高于标准规定的要求; 焊接接头的横向拉伸试验均断在母材上。这说明该焊丝适用于大线能量(约 65 kJ/cm)的焊接。

(4) 在成品管中随机抽取 1 根 $\Phi 558$ mm \times 25.4 mm 焊管进行了静水压爆破试验。试验结果表明母

材和焊缝的整体力学性能优良。爆破口起裂处离焊缝 740 mm。

(5) 以该焊丝为主的四丝和 SJ102G 焊剂匹配焊接南海荔湾项目用材质为 X65 钢级的各种厚壁管 11.525 万 t, 全部交货的钢管低温韧性、断裂韧性(CTOD 值)和焊接接头的横向拉伸性能均符合标准要求, 且性能稳定, 富余量较大。

(6) MK65HGX-Ⅲ焊丝和其他相适应的焊丝组合与 SJ101 或 SJ102 匹配可焊接 X60~X80 钢级的焊管, 同样具有高性能; 同时也适用于天然气输送管抗 H₂S 腐蚀的焊接。

感谢徐亮、张坤鹏、邓航、卢亮先生提供试验资料。

4 参考文献

- [1] 张业圣, 李志卫. 海洋石油用管的发展现状和前景展望[J]. 钢管, 2009, 38(5): 1-10.
- [2] 王旭. 油气输送管线钢管制造与装备技术的现状及展望[J]. 钢管, 2012, 41(1): 7-13
- [3] 胡松林. 海洋用厚壁 HFW 管线管的研发[J]. 钢管, 2012, 41(3): 28-32.
- [4] Det Norske Veritas. DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems[S]. 2007: 70-72.
- [5] Det Norske Veritas. DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems[S]. 2000: 47-50.
- [6] 天津大学, 中国石化第四建设公司. 工程焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 115-131.
- [7] Evans G M, Bailey N. Metallurgy of basic weld metal [C]. Woodhead Publishing Ltd., 1999: 211-255, 315-356.
- [8] 张文铨. 焊接冶金学: 基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 227-230.
- [9] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 190.
- [10] 杨英明. 一种高强度管线钢埋弧焊焊丝[M]//最新焊丝造型设计生产制造与专利技术配方标准大全. 北京: 中国化工出版社, 2009: 723-729.
- [11] 中国石油天然气集团公司. 一种 X80 级管件用埋弧焊丝, 中国: 200910242734[P]. 2009-10-24.
- [12] 徐亮, 刘世泽. 海洋管线管焊缝全壁厚试样与减薄试样的 CTOD 值分析[J]. 钢管, 2012, 41(1): 72-74.

(收稿日期: 2012-10-30; 修定日期: 2013-03-02)