

川气东送工程用直缝埋弧焊管的断裂韧性控制

徐 亮, 刘世泽

(番禺珠江钢管有限公司, 广东 广州 511450)

摘 要: 韧性是钢管重要的综合性能指标, 结合川气东送工程用直缝埋弧焊管的韧性试验测试结果, 分析了钢板化学成分、微观组织, 焊丝、焊剂匹配, 焊接线能量控制对钢管断裂韧性的影响。阐述了高强度管线管断裂韧性的控制因素。由断裂韧性试验结果可知, 该工程用直缝埋弧焊管的断裂韧性优良。

关键词: 直缝埋弧焊管; 断裂韧性; 钢板化学成分; 微观组织; 焊丝、焊剂匹配; 焊接线能量

中图分类号: TG115 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2010)06-0047-07

Control of Fracture Toughness of LSAW Pipes for Sichuan-East Gas Pipeline Project

Xu Liang, Liu Shize

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

Abstract: Toughness is regarded as one of the critical properties of steel pipes. Based on the results of the toughness tests as made to the LSAW pipes to be used for the Sichuan-East Gas Pipeline Project, the main factors as influencing the fracture toughness of the steel pipes are analyzed, including the chemical composition and micro structure of the steel plate, matching of the welding wire with the welding flux, and the welding heat input, etc. Also discussed are the elements to be controlled for proper fracture toughness of the hi-strength linepipe. The result of relevant fracture toughness test shows that the fracture toughness of the said LSAW pipes is excellent.

Key words: LSAW pipe; Fracture toughness; Chemical composition of the steel plate; Microstructure; Matching of the welding wire with the welding flux; Welding heat input

0 引 言

川气东送工程管线西起四川省宣汉县, 东至上海, 干线全长 1 700 km, 具有线路长、地形地质条件复杂等特点。番禺珠江钢管有限公司(简称番禺珠江钢管)承担了川气东送工程的部分制管任务, 已成功研制生产出 X70 钢级 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 17.5\ \text{mm}$ UOE 直缝埋弧焊管 5.3 万 t 和 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 21\ \text{mm}$ JCOE 直缝埋弧焊管 5.2 万 t, 加上支线用管和站场用管, 已供应川气东送工程用管共计约 14 万 t。

韧性是钢管最重要的性能之一, 是钢管强度和塑性的综合性能指标。钢管的韧性设计值一般由管

线钢强度应力水平、管径、壁厚和输送介质所决定。强度越高、工作压力越大、管径越大, 则所需要的韧性值越大^[1]。番禺珠江钢管生产的川气东送主干线管管径为 1 016 mm, 钢级 X70, 设计输送压力为 10 MPa, 壁厚分别为 17.5 mm 和 21.0 mm, 传输介质为天然气。按川气东送工程技术规格书要求: -20℃母材单个冲击功 $\geq 140\ \text{J}$, 平均值 $\geq 190\ \text{J}$; 焊缝中心单个冲击功 $\geq 60\ \text{J}$, 平均值 $\geq 90\ \text{J}$; -5℃母材落锤撕裂试验单个剪切面积 $\geq 70\%$, 平均值 $\geq 85\%$ 。以上韧性值要求远远高于 API Spec 5L 标准(43 版)对断裂韧性值的要求。同时该工程技术规格书还要求进行钢管静水压爆破试验, 以验证其承载能力。因此, 对这两种壁厚规格(17.5, 21.0 mm)的直缝埋弧焊管必须做好断裂韧性的设计与控制。本文主要对此进行讨论。

徐 亮(1981-), 男, 硕士, 理化室副主任, 从事理化实验的技术管理和 SAWL 焊管的工艺研究工作。

1 化学成分的控制

1.1 钢板化学成分

化学成分设计对于管线钢的性能来说是至关重要的。按管线钢微合金化理论,主要化学元素的影响如下。

(1) C: C 元素是必须严格控制元素之一,

C 元素含量及碳当量的增加不但会降低钢的焊接性能,而且会降低钢的韧性。

川气东送工程技术规格书要求 $C \leq 0.09\%$,但从表 1 可以看出 A 厂和 N 厂所供钢板的 C 含量(质量分数)平均控制值分别为 0.046% 和 0.050%,属于超低碳的范围。

表 1 A 厂和 N 厂钢板实物化学成分(质量分数)

生产厂	C	Mn	S	P
A 厂	≤ 0.04 (占 47%)	1.30~1.44(占 20%)	≤ 0.002 (占 65.3%)	≤ 0.008 (占 82%)
	0.04~0.06(占 52%)	1.45~1.55(占 60%)	≤ 0.003 (占 34.5%)	0.009~0.011(占 18%)
	> 0.06 (占 1%)	1.56~1.64(占 20%)	≤ 0.004 (占 0.2%)	平均值: 0.007
	平均值: 0.046	平均值: 1.50	平均值: 0.002 2	最大值: 0.011
	最大值: 0.070	最大值: 1.64	最大值: 0.004 0	最小值: 0.006
N 厂	0.04~0.06(占 97%)	1.45~1.55(占 100%)	≤ 0.002 (占 98.4%)	≤ 0.008 (占 90%)
	> 0.06 (占 3%)	平均值: 1.50	≤ 0.004 (占 1.6%)	0.009~0.012(占 10%)
	平均值: 0.050	最大值: 1.45	平均值: 0.001 4	平均值: 0.007
	最大值: 0.070	最小值: 1.55	最大值: 0.003 0	最大值: 0.012
	最小值: 0.040		最小值: 0.001 0	最小值: 0.004
标准要求	≤ 0.09	≤ 1.65	≤ 0.005	≤ 0.020
生产厂	Mo	Nb	V	Ti
A 厂	< 0.18 (占 5.4%)	< 0.040 (占 3%)	0.020~0.024(占 15%)	< 0.012 (占 10%)
	0.18~0.22(占 85%)	0.040~0.055(占 83%)	0.025~0.035(占 77%)	0.012~0.016(占 83%)
	> 0.22 (占 4.6%)	> 0.055 (占 14%)	0.036~0.042(占 8%)	> 0.016 (占 7%)
	平均值: 0.20	平均值: 0.048	平均值: 0.030	平均值: 0.014
	最大值: 0.23	最大值: 0.060	最大值: 0.042	最大值: 0.020
N 厂	< 0.18 (占 0.6%)	< 0.055 (45%)		< 0.012 (占 17%)
	0.18~0.22(占 98.3%)	0.055~0.065(55%)		0.012~0.016(占 79%)
	> 0.22 (占 1.1%)	平均值: 0.060	-	> 0.016 (占 4%)
	平均值: 0.20	最大值: 0.065		平均值: 0.014
	最大值: 0.23	最小值: 0.040		最大值: 0.018
标准要求	最小值: 0.12			最小值: 0.007
	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.06	≤ 0.025

注:统计炉数 A 厂 516 炉, N 厂 630 炉。

(2) Mn: 为了弥补降低 C 含量带来的强度损失,增加了 Mn 元素的含量,通过固溶强化、晶界强化来提升钢板的屈服强度。不仅如此, Mn 元素还能降低钢 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的相变温度,起到细化晶粒,改变相变后微观组织的作用。当 Mn 含量(质量分数)提高至 1.5%~2.0%时,可进一步降低相变温度,奥氏体转变成针状铁素体^[1]。但是 Mn 含量也不能过高,因为 Mn 含量增加,对 HIC 敏感性就会增加。从表 1 中可以看出,钢板中 Mn 元素的实际含量(质量分数)控制在 1.5%左右。

(3) Mo: Mo 是较昂贵的金属,但 Mo 元素能促进针状铁素体的形成,同时能降低管线钢的韧-

脆转变温度,钢板实物中 Mo 元素的平均含量(质量分数)是 0.20%。

(4) Nb、V、Ti: 在管线钢中 Nb、V、Ti 元素的作用是细化晶粒,沉淀强化。它们形成的氮化物、碳化物和碳氮化物“钉扎”在晶界上,阻止奥氏体晶粒长大,微小的含量即有十分明显的效果,它们的实际含量见表 1。

(5) P、S: P、S 是钢中的有害元素,直接影响钢板的韧性和焊接性,在管线钢中是必须严格控制的元素。川气东送工程中要求 $P \leq 0.02\%$ 、 $S \leq 0.005\%$,从表 1 中可以看出 P 元素的平均含量(质量分数)是 0.007%,S 元素的平均含量控制得

更低，A 厂的平均含量(质量分数)是 0.002 2%，N 厂的平均含量(质量分数)是 0.001 4%，达到了抗 HIC 管 $S \leq 0.002\%$ 的控制水平。

1.2 焊缝化学成分

焊缝金属特殊的热循环过程和复杂的成分，使得焊缝金属与母材相比呈现出品粒粗大，杂质含量高，偏析较大等特点。因此，要提高焊缝的韧性就必须采取焊缝微合金化和控制焊接线能量的措施。通过焊接工艺评定，番禺珠江钢管内外焊采用的是三丝焊和四丝焊，壁厚 21.0 mm 以下采用的是三丝焊，壁厚 21.0 mm 采用四丝焊。焊丝、焊剂匹配选用的是 S 型氟碱类烧结焊剂+C 型和 D 型焊丝。选用焊丝的化学成分见表 2 和表 3。

表 2 C 型焊丝化学成分(质量分数)							%
C	Mn	Si	S	P	B	Ti	Mo
0.07	1.46	0.17	0.003	0.009	0.006	0.04	0.34

表 3 D 型焊丝化学成分(质量分数)							%
C	Mn	Si	S	P	B	Ti	Mo
0.09	1.72	0.06	0.003	0.010	0.005	0.13	0.30

焊缝金属的化学成分决定于焊接材料的熔敷金属和母材的化学成分及其熔合比的大小，其控制的难度比较大。表 4 和表 5 分别为壁厚 17.5，21.0 mm 直缝埋弧焊管焊缝金属的光谱分析结果。

表 4 X70 钢级 Φ1 016 mm×17.5 mm 直缝埋弧焊管焊缝和母材的化学成分(质量分数)								%
类别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	
焊缝	0.07	0.26	1.56	0.008	0.004	0.03	0.04	
母材	0.04	0.19	1.57	0.009	0.001	0.04	0.01	
类别	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Al	N	
焊缝	0.24	0	0.016	0.02	0.05	0.006 2	0.008 2	
母材	0.21	0	0.015	0.02	0.06	0.030 0	0.005 2	

表 5 X70 钢级 Φ1 016 mm×21.0 mm 直缝埋弧焊管焊缝和母材的化学成分(质量分数)								%
类别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	
焊缝	0.046	0.25	1.56	0.012	0.004 2	0.043	0.10	
母材	0.039	0.20	1.58	0.008	0.002 4	0.029	0.16	
类别	Mo	V	Ti	Cu	Nb	Al	N	
焊缝	0.28	0.014	0.014	0.12	0.022	0.020	0.004 8	
母材	0.22	0.026	0.020	0.15	0.043	0.027	0.004 7	

17.5 mm 规格的钢板来自 N 厂，21.0 mm 规格的钢板来自 A 厂，所以对各元素的含量控制不尽相同。从表 4 和表 5 中可以看出，Mo、Ti、Nb、P、S 元素的控制都比较好。其中，Mo、Ti、Nb 元素都是促进细小针状铁素体形成，从而提高焊缝金属韧性的重要元素。P、S 元素的控制同样重要，可以减少夹杂物的产生，提高焊缝金属韧性。

2 焊接线能量的控制

焊接线能量既可改变焊缝金属一次结晶组织，又可改变焊缝金属的二次固态相变组织。还可通过改变熔合比而影响焊缝的化学成分。因而对焊接线能量的控制，可在较大程度上改变焊缝金属的韧

性^[4]。焊接线能量增大，熔池金属易过热，并形成粗大的柱状晶。同时，焊接线能量增大，热影响区的晶粒增大，易发生冷脆。焊接线能量增大，虽说是埋弧焊，也不可避免地会增大电弧与空气的接触面积，容易产生大量的 N₂ 和 O₂ 等离子体，使得进入焊缝金属的 N 和 O 含量增加^[4]，增大了焊缝金属的脆性，降低了韧性。通过焊接工艺评定，番禺珠江钢管将焊接线能量控制在 40 kJ/cm 左右，取得了良好的韧性试验结果。Φ1 016 mm×17.5 mm、Φ1 016 mm×21.0 mm 直缝埋弧焊管的焊缝宏观形貌分别如图 1 和图 2 所示，焊缝参数见表 6。

从表 6 可以看出，焊接线能量得到了很好的控制，获得了较好的焊缝形貌。

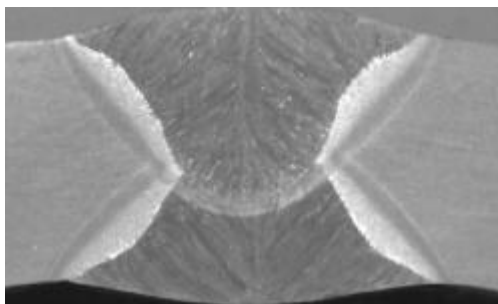


图 1 Φ1 016 mm×17.5 mm 焊管焊缝宏观形貌

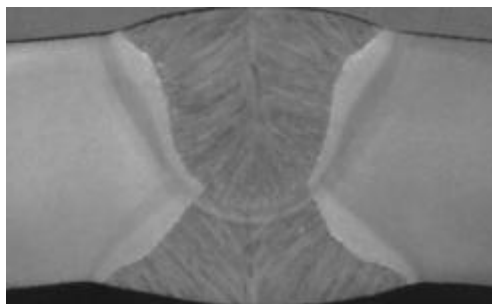


图 2 Φ1 016 mm×21.0 mm 焊管焊缝宏观形貌

表 6 两种壁厚规格焊管的焊缝参数

壁厚	内焊缝余高	外焊缝余高	内焊缝宽度	外焊缝宽度	熔透深度
17.5	0.8	1.8	22.5	22.5	2.8
21.0	2.1	2.0	20.1	21.0	3.0
技术要求	0.5~2.5	0.5~2.5	-	-	≥1.5

3 对钢板与焊缝微观组织的控制

微观组织是决定钢管力学性能的内因。要获得好的断裂韧性，就必须控制好钢管金属晶粒的大小、夹杂物及组织结构。通过检验发现，供应川气

东送工程的钢板晶粒度达到 ASTM E112 第二标准级别图的 12 级以上，A、B、C、D 四类夹杂物控制在 0.5 级以下。两种规格直缝埋弧焊管母材和焊缝的金相组织见表 7 和图 3~10 所示。

表 7 两种规格 X70 钢级焊管母材和焊缝的金相组织

焊管规格/mm	母材	焊缝	热影响区	
			熔合线	细晶区
Φ1 016×17.5	B _粒 +少量 PF+P	IAF+B _粒 +PF+P	B _粒	PF+P
Φ1 016×21.0	B _粒 +少量 PF+P	IAF+B _粒 +PF+P	B _粒	PF+P

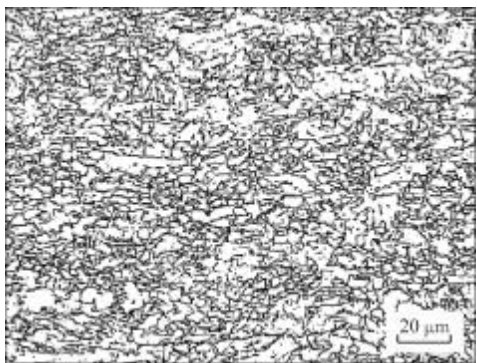


图 3 壁厚 17.5 mm 焊管母材中心组织

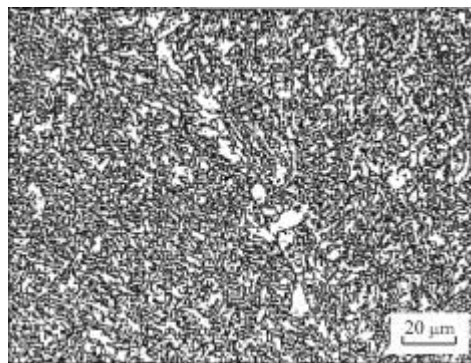


图 4 壁厚 17.5 mm 焊管焊缝中心组织

4 实物断裂韧性值

通过采取以上控制措施，番禺珠江钢管生产出符合川气东送工程技术规格书要求的两种壁厚规格的 X70 钢级直缝埋弧焊管。送检成品管在川气东

送项目检验中的 -20℃ 夏比冲击试验和 -5℃ 落锤撕裂试验均获得了非常好的断裂韧性结果。经统计，N 厂所有炉批钢管母材夏比冲击功平均值为 300 J，单个值 >200 J；A 厂所有炉批钢管母材的夏比冲

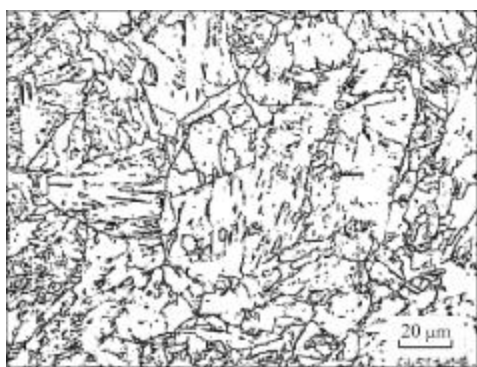


图5 壁厚 17.5 mm 焊管热影响区熔合线组织

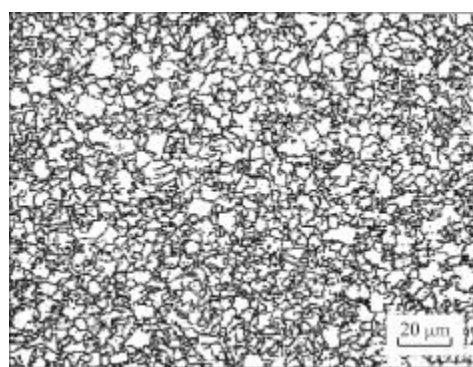


图6 壁厚 17.5 mm 焊管热影响区细晶区组织

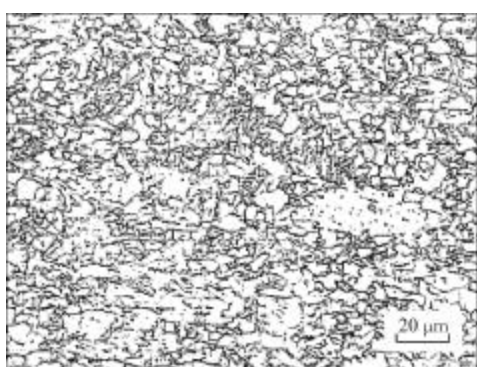


图7 壁厚 21.0 mm 焊管母材中心组织

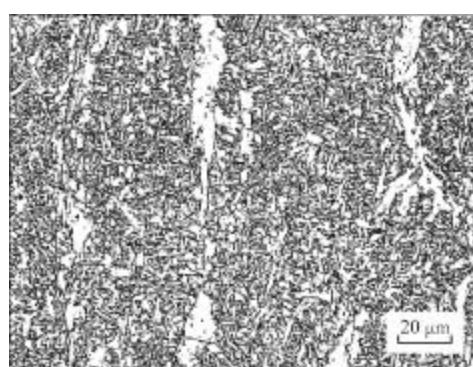


图8 壁厚 21.0 mm 焊管焊缝中心组织

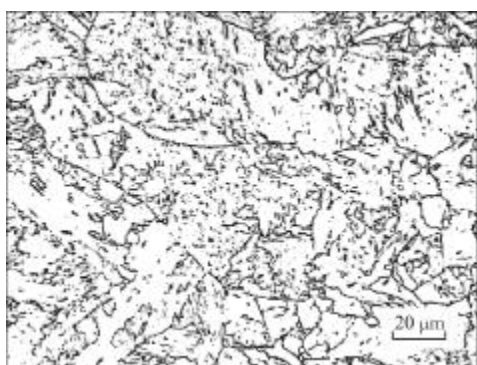


图9 壁厚 21.0 mm 焊管热影响区熔合线组织

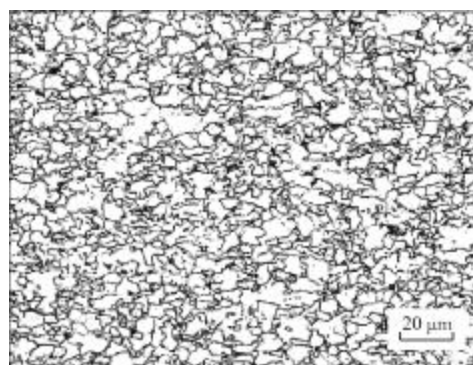


图10 壁厚 21.0 mm 焊管热影响区细晶区组织

击功平均值为 350 J, 单个值 >200 J。

落锤撕裂试验是测试管线钢材料韧性的一种试验方法, 广泛应用于对材料抗脆性断裂扩展性能的评价^[2]。对于落锤撕裂试验, 经统计, A 厂所有炉批 DWTT 剪切面积为 95%, 单个值 >90%; N 厂所有炉批 DWTT 剪切面积也为 95%, 单个值 >90%。

对焊缝中心 -20 ℃夏比冲击试验, A 厂钢板生

产钢管共统计 503 炉, N 厂钢板生产钢管共统计 629 炉。数据显示: 95% 的数据分布在 100~200 J, 3% 的数据分布在 62~100 J, 2% 的数据分布在 200~230 J, 平均为 150 J。Φ1 016 mm×17.5 mm、Φ1 016 mm×21.0 mm 直缝埋弧焊管焊缝中心冲击数据直方图分别如图 11 和图 12 所示。

材料的韧-脆转变温度决定了材料的低温韧性, 是衡量材料韧-脆性转变倾向的重要指标, 它直接

影响到材料的应用范围^[1]。在检验中,按照冲击能量评定法则绘制出 CVN 韧-脆转变温度曲线,按

照断口形貌评定法则绘制出 DWTT 韧-脆转变温度曲线,如图 13~16 所示(试样取向均为母材横向)。

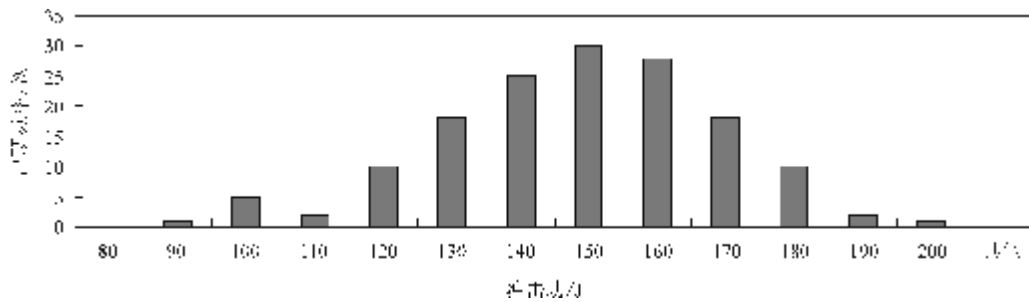


图 11 壁厚 17.5 mm 焊管焊缝中心冲击功(部分炉批)

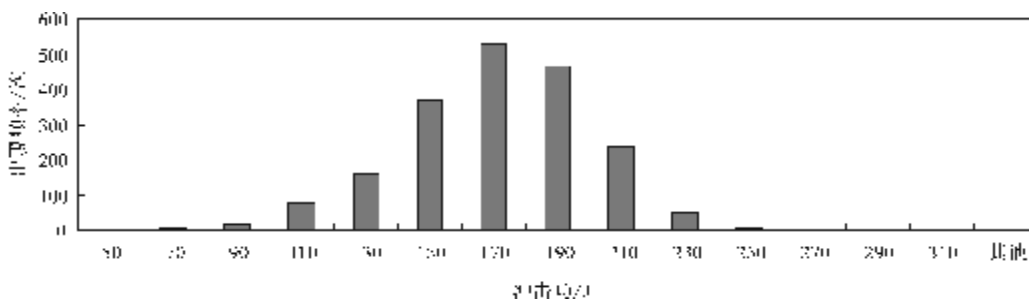


图 12 壁厚 21.0 mm 焊管焊缝中心冲击功

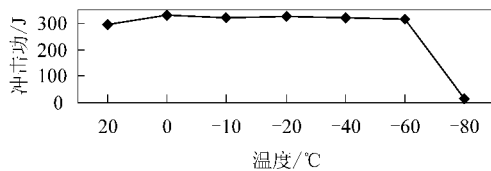


图 13 壁厚 17.5 mm 焊管韧-脆转变温度曲线

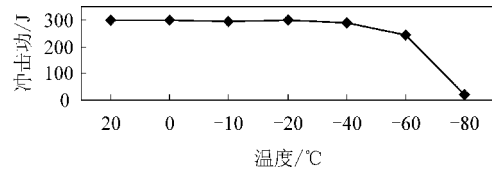


图 14 壁厚 21.0 mm 焊管韧-脆转变温度曲线

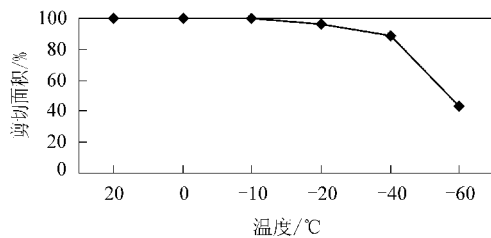


图 15 壁厚 17.5 mm 焊管 DWTT 韧-脆转变温度曲线

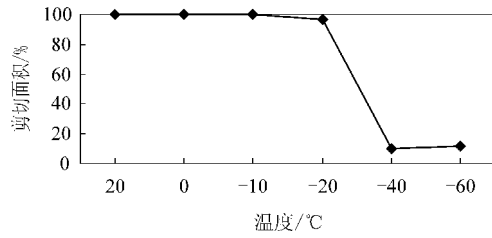


图 16 壁厚 21.0 mm 焊管 DWTT 韧-脆转变温度曲线

通过以上数据和韧-脆转变温度曲线可以看出钢管实物的韧性值远远超过川气东送工程技术规格书的要求,表现出优良的韧性。

按照川气东送工程的技术要求,番禺珠江钢管进行了两根实物管的静水压爆破试验。 $\Phi 1016$ mm $\times$ 17.5 mm 规格钢管实际爆破压力为 22.3 MPa,

大于理论计算值(19.6 MPa),爆破过程承受最大压力为 23.3 MPa; $\Phi 1016$ mm $\times$ 21.0 mm 规格钢管实际爆破压力为 28.1 MPa,大于理论计算值(23.6 MPa),爆破过程承受最大压力为 29.6 MPa;破口均为韧性撕裂。实物爆破口形貌分别如图 17 和图 18 所示。



图 17 $\Phi 1016 \text{ mm} \times 17.5 \text{ mm}$ 焊管爆破口全貌



图 18 $\Phi 1016 \text{ mm} \times 21.0 \text{ mm}$ 焊管爆破口全貌

5 结 论

(1) 低碳, 合理添加 Mn、Mo、Nb、Ti 等细化晶粒元素, 保持低的 P、S 含量是高强度管线钢获得良好韧性的必要前提。

(2) 通过焊接工艺评定, 合理选择高韧性的焊丝、焊剂匹配, 控制好焊接线能量是获得良好焊缝韧性的关键。

(3) 严格控制晶粒度和夹杂物级别, 以及选用针状铁素体型组织的材料可以获得好的母材韧性。

(4) A 厂和 N 厂供应钢板稳定的实物性能和番禺珠江钢管成熟的制管工艺, 保证了公司川气东

送工程制管任务的圆满完成。

6 参考文献

- [1] 高惠临. 管线钢组织、性能和焊接行为[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [2] Ryuji M, Nobuyuki, Shigeru E. Evaluation for abnormal fracture appearance in drop weight tear test with high toughness tine pipe[C]//Proceedings of OMAE 2002, 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OSLO, 2002: 18-20.

(收稿日期: 2010-07-12)

● 信 息

俄罗斯联合冶金公司维克松钢厂钢管产量再创历史新高

2010 年以来俄罗斯联合冶金公司维克松钢厂钢管产销情况十分良好。前 10 个月该厂的钢管产量已超过去年的全年产量 (150 万 t) 达到 160 万 t, 若与去年同期的钢管产量 (125 万 t) 相比, 增长了 28.7%; 前 10 个月该厂大直径电焊管的产量已达到 105.39 万 t, 与去年同期产量 (80.9 万 t) 相比增长了 30.3%, 再创历史新高, 因为从建厂以来维克松钢厂大直径电焊管的年产量从没有突破过 100 万 t, 2009 年也仅为 96.72 万 t。

(攀钢集团成都钢钒有限公司 杜厚益)

宝山钢铁股份有限公司完成 $\Phi 137.7$, 200 mm 经济型气密封套管 BG-PC 产品工业生产

宝山钢铁股份有限公司 (简称宝钢) 完成 $\Phi 137.7$, 200 mm ($5\frac{1}{2}$, $7\frac{7}{8}$ in) 经济型气密封套管 BG-PC 产品工业生产。2010 年 7 月, 宝钢生产的 $\Phi 137.7 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$ N80-Q 钢级套管在青海油田涩北二号气田成功实现 5 口井下井试验, 并于 10 月 25 日完成了青海油田组织的项目评审; 生产的 $\Phi 200 \text{ mm} \times 10.92 \text{ mm}$ BG-T95/BG110S BG-PC 非标准套管, 由塔里木油田和中国石油集团石油管工程技术研究院监督, 在宝钢完成了实物性能试验, 试验结果符合产品设计、满足油田工况要求, 已于 11 月下旬在塔里木油田下井。

(宝山钢铁股份有限公司钢管条钢事业部 潘利伟)