

2205 双相不锈钢管焊缝韧度分析

李为卫 刘迎来, 熊庆人, 吉玲康
(中国石油管材研究所 石油管力学和环境行为重点实验室, 西安 710065)

摘 要: 2205 双相不锈钢具有优异的力学性能和耐腐蚀性能, 广泛用于运输、石油、天然气、海洋和化工等行业。与普通奥氏体不锈钢相比, 双相不锈钢焊接有许多特点, 被公认为是一种较难焊接的材料。某天然气集输管道最高操作压力 13.3 MPa, 最低操作温度-30℃, 对韧度提出了较高的要求。对该高压天然气管道钢管纵、环焊缝的冲击韧度和断裂韧度(CTOD)进行了试验、分析。结果表明, 纵焊缝(SAW 焊接方法)的冲击韧度和断裂韧度比环焊缝(TIG+SMAW 焊接方法)明显好。其主要原因是采用的填充金属不同, 以及因热输入量差异、焊后固溶处理与否而引起显微组织中两相比例的差异造成的。

关键词: 双相不锈钢; 钢管; 焊缝; 韧度

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)04-069-04



李为卫

0 序 言

双相不锈钢(DSS), 也称铁素体—奥氏体不锈钢, 其组合了铁素体钢和奥氏体钢的许多特点, 具有优良的力学和耐蚀性能。对大多数人而言, 双相不锈钢是一种相对较新的材料。2205 双相不锈钢是现代双相不锈钢中一种, 采用 N 元素作为合金元素其含量(质量分数%)高达 0.14%~0.20%, 在保证组织平衡和提高性能方面具有重要作用^[1]。2205 双相不锈钢具有优异的力学性能、耐腐蚀性能和焊接性能等, 是目前应用最普遍的双相不锈钢材料, 主要用在酸性油、气田, 还有运输、炼油、化工、石油化工以及海洋工程等领域^[2]。

自从 20 世纪 30 年代早期双相不锈钢发明以来, 焊接一直是一个重要的课题, 近 10 余年来, 焊接也是双相不锈钢应用的关键主题。现代的双相不锈钢由于采用氮合金化等技术, 焊接性能有很大改善, 但与普通奥氏体不锈钢相比焊接还是有许多特点, 被公认为是一种难焊接的材料^[1,3]。

中国西部某天然气田介质含有很高浓度的氯离子, 输送管道采用 2205 双相不锈钢材料, 其最高工作压力 13.3 MPa, 最低使用温度-30℃, 因此对焊缝低温韧度提出了较高的要求, 而熔化焊接方法往往使双相不锈钢的韧度变差。对工程所用 2205 双

相不锈钢钢管纵向和环向焊缝的韧度(包括夏比冲击韧度 CVN 和断裂韧度 CTOD)进行了测试、分析。

1 试验材料及方法

钢管材料采用芬兰 Outokumpu 公司提供的 2205 双相不锈钢管材, 其合金元素含量(质量分数, %)见表 1, 主要力学性能参数见表 2。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of test material

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0.014	0.38	1.45	0.001	0.021	22.67	5.69	3.23	0.170	余量

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test material

规格 mm	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A (%)	冲击吸收功 A_{KV} /J
$\phi 508 \times 15.9$	789	585	29	290(-40℃)
$\phi 323.9 \times 12.7$	770	556	26	276(-40℃)

钢管纵缝的焊接采用双面埋弧焊方法(SAW), 焊接材料采用瑞典 Sandvik 公司生产的埋弧焊丝和焊剂, 牌号分别为 22.8.3L 和 Sandivik 15W, 焊丝的典型化学成分(质量分数, %)为: C≤0.02, Si 0.5, Mn 1.6, Cr 23.0, Ni 9.0, Mo 3.2, N 0.16, 熔敷金属的典型力学性能屈服强度为 578 MPa, 抗拉强度为

收稿日期: 2006-06-23
基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(04B41101)

775 MPa, 断后伸长率为 33%, -40 ℃夏比冲击吸收功为 84 J。钢管纵向焊缝在工厂进行, 焊后进行了固溶处理(加热 1 050~1 100 ℃, 水淬)。

钢管环缝焊接采用单面焊双面成形工艺, 焊接方法为钨极氩弧焊(TIG)打底+焊条电弧焊(SMAW)填充和盖面, 焊接材料采用瑞典 AVESTA 公司生产的焊丝和焊条, 其牌号分别为 AVSTA 2205 和 AVESTA 2205-PW, 氩弧焊焊丝的典型化学成分(质量分数, %)为: C 0.02, Si 0.5, Mn 1.6, Cr 23.0,

Ni 8.5, Mo 3.1, N 0.17, 熔敷金属的典型力学性能屈服强度为 610 MPa, 抗拉强度为 805 MPa, 断后伸长率为 31%, -40 ℃夏比冲击吸收功为 170 J。焊条熔敷金属的典型化学成分(质量分数, %)为 C 0.02, Si 0.8, Mn 0.8, Cr 23.0, Ni 9.5, Mo 3.0, N 0.17, 熔敷金属的典型力学性能屈服强度为 635 MPa, 抗拉强度为 830 MPa, 断后伸长率为 33%, -40 ℃夏比冲击吸收功为 40 J。试件焊后不进行热处理。采用适中的焊接工艺参数, 试件焊接的主要条件见表 3。

表 3 试件焊接的主要条件
Table 3 Main welding condition of specimen

项目	试件规格 mm	焊接方法	坡口形式	保护气体	焊接位置	热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	层间温度 $T/^\circ C$
纵缝	$\phi 508 \times 15.9$ $\phi 323.9 \times 12.7$	SAW	X	—	平焊(1G)	12~20	<150
环缝	$\phi 508 \times 15.9$ $\phi 323.9 \times 12.7$	TIG+SMAW	单面 V	焊 枪: Ar+1.5% N ₂ 焊缝背面: Ar+5% N ₂	平焊(1G)	8~15	<150

不锈钢中加入氮可以稳定奥氏体组织, 提高强韧度和耐腐蚀性能, 并改善焊接性, 其作用相当于镍的 25 倍左右, 近年来, 以氮代镍的经济型高氮合金不锈钢迅速发展。焊接这类不锈钢时可采取保护气体中添加氮的方法来提高焊接接头的质量^[4]。因此, 环缝焊接时 TIG 焊枪和背面保护气中添加了一定比例的氮气, 目的是防止焊缝内部和表面脱氮。

焊缝韧度测量方法之一为冲击韧度试验, 试样加工成 10 mm×10 mm×55 mm 的夏比 V 形缺口冲击试样, 缺口位于焊缝中心, 试样缺口沿厚度方向, 试验在美国 TINIUS OLSEN 试验机上进行。

焊缝韧度另一测量方法为裂纹尖端张开位移(CTOD)试验, 采用尺寸($B \times W \times L$)为 10 mm×20 mm×80 mm 的三点弯曲试样, 在试样单侧用线切割加工深度为 2 mm 的缺口, 缺口沿板厚方向。然后在美国 MTS-800 试验机上预制疲劳裂纹, 其尺寸为 $a_0/w=0.45 \sim 0.55$ (a_0 为原始裂纹长度, mm; w 为试样宽度, mm), 跨距 $s=4w$ 。CTOD 测试按国家标准 GB-T 2358《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》进行, 试验温度为-20 ℃, 采用多试样法确定裂纹扩展阻力曲线。

据试验数据拟合的 δ_R 曲线见图 2。

表 4 焊缝冲击吸收功试验结果
Table 4 Test result of impact absorbing energy of welds

温度 $T/^\circ C$	夏比冲击吸收功 A_{kv}/J			
	纵 缝/mm		环 缝/mm	
	$\phi 508 \times 15.9$	$\phi 323.9 \times 12.7$	$\phi 508 \times 15.9$	$\phi 323.9 \times 12.7$
20	220	—	—	45
	210	—	—	44
	205	—	—	47
	210	—	—	42
0	200	—	—	41
	200	—	—	43
	195	—	—	39
	205	—	—	40
-20	210	—	—	41
	165	161	42	40
	160	167	44	35
	170	180	45	38
-40	125	—	—	30
	95	—	—	30
	105	—	—	29

表 5 -20 ℃下焊缝 CTOD 测试结果
Table 5 Test result of CTOD (at -20℃) of welds

取样位置	阻力曲线方程	特征 CTOD 值	
		$\delta_{0.05mm}/mm$	δ_I/mm
纵缝	$\delta=1.177 \times (1.844 \times 10^{-8} + \Delta a)^{0.8246}$	0.099	0.312
环缝	$\delta=0.3384 \times \Delta a^{0.5504}$	0.065	0.139

2 试验结果及分析

焊缝的冲击吸收功试验结果见表 4, 系列温度下夏比冲击吸收功 A_{kv} 随试验温度 T 的转变曲线见图 1。-20 ℃焊缝 CTOD 测试结果见表 5(纵缝为 15.9 mm 厚度试件, 环缝为 12.7 mm 厚度试件), 根

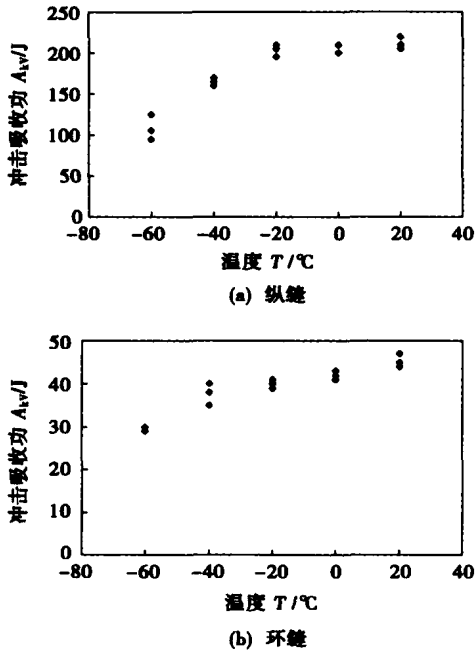


图 1 焊缝夏比冲击吸收功随试验温度的转变曲线
Fig. 1 Transformation curve of Charpy V notch impact absorbing energy with test temperatures

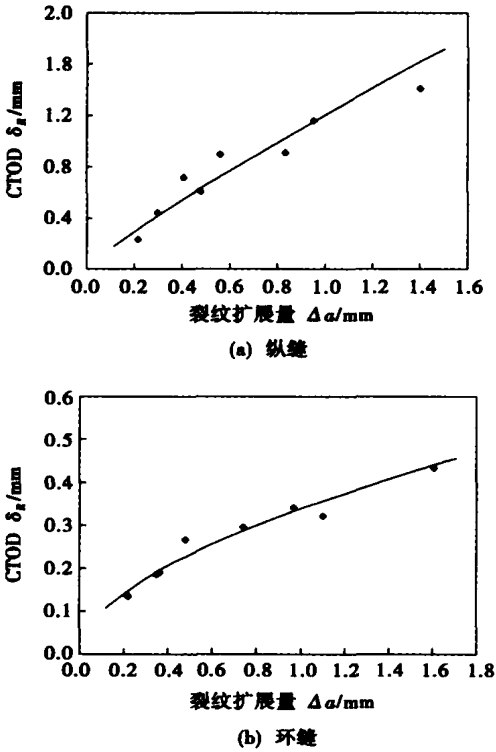


图 2 焊缝的 $\delta_R - \Delta a$ 曲线
Fig. 2 $\delta_R - \Delta a$ curve of welds

从冲击韧度试验结果来看, 纵缝的冲击吸收功高, 韧脆转变温度低, 韧度好, 环焊缝相对较差。由于纵缝所承受的应力为环向的两倍, 考虑高压(最大

13.3 MPa)输气管道在低温下(最低 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)下运行, 为防止脆性断裂, 对钢管纵缝的夏比冲击韧度提出较高要求($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平均值 $\geq 70\text{ J}$, 单个最小值 $\geq 54\text{ J}$), 而环焊缝的要求较低($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平均值 $\geq 34\text{ J}$)。从试验结果看, 不论纵缝还是环缝, 焊缝在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下的夏比冲击吸收功, 不仅满足一般标准 $\geq 27\text{ J}$ 的要求, 且满足工程技术条件的要求。

从 CTOD 测试结果看, CTOD 值与冲击韧度也有很好的对应性, 纵焊缝显示比环缝更高的 CTOD 值。从工程应用的角度讲, 对双相不锈钢 CTOD 研究的还不透彻、全面, 目前还提不出具体量的要求^[1]。

造成纵、环焊缝韧度差异的原因首先与采用的填充金属有关。纵缝埋弧焊接采用碱性烧结型焊剂, 焊缝金属的氧含量和氢含量较低。而环焊缝中的 TIG 焊缝是打底焊缝, 厚度很薄, 试验结果主要是反映焊条电弧焊缝的韧度。焊条电弧焊采用工艺性能良好的金红石酸性药皮焊条, 其焊缝金属中的氧含量和氢含量较高, 因而造成两种焊缝韧度较大的差异。

造成纵、环焊缝韧度差异的另一原因与采用的焊接热输入量及焊后热处理有关。

双相不锈钢的两相组织中, 铁素体是脆性相, 奥氏体是韧性相。韧性试验时脆性断裂一般产生于铁素体中, 特别是在低温下, 铁素体中裂纹以解理断裂产生的, 而在奥氏体中则是受显微空穴聚集机制的影响而产生的^[1]。焊缝金属中的奥氏体还能起到细化晶粒、减少氮化物的析出等作用^[4]。图 3 为 2205 双相不锈钢夏比冲击试样二次裂纹沿铁素体晶粒扩展情况。

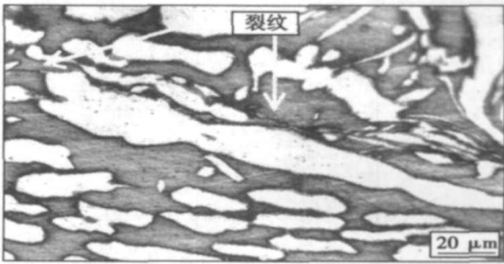


图 3 2205 双相不锈钢冲击试样中二次裂纹
Fig. 3 Secondary crack in impact specimen

焊接热输入是影响焊接接头中的相比比例的一个重要参数, 焊接采用高热输入时, 尽管会使凝固组织铁素体晶粒易长大, 但却会促使较多的奥氏体转变。同时相比比例又影响着焊接接头的拉伸、冲击韧度等力学性能^[3]。奥氏体量相对较多, 对塑韧性和耐蚀性有利, 也就是说韧度随着铁素体量的增加而变差^[5, 9]。

双相不锈钢熔化焊最为突出特点是焊接热循环

对接头的显微组织有很大的影响。2205 双相不锈钢焊缝结晶过程中首先析出的铁素体(α)，随着温度的降低，部分铁素体转变为奥氏体(γ)。纵缝采用的埋弧焊方法热输入较大，焊缝冷却过程较慢，奥氏体析出充分，冷却到室温后焊缝中的奥氏体含量较高，因而对焊缝韧度有利。而环缝采用的焊条电弧焊方法与此相反。

再者，纵缝试件焊后进行了固溶处理，使焊缝的两相组织的比例得到很好的平衡，使焊缝的性能达到最佳。环缝一般在现场进行焊接，焊后不可能进行固溶处理，另外焊接时采用含镍量通常比母材高 2%~4% 的填充金属，正常焊接情况下可以保证得到适当比例的奥氏体，没有必要进行固溶处理，但其韧度相对较差。

图 4 为两种焊缝的显微组织照片，用图像分析

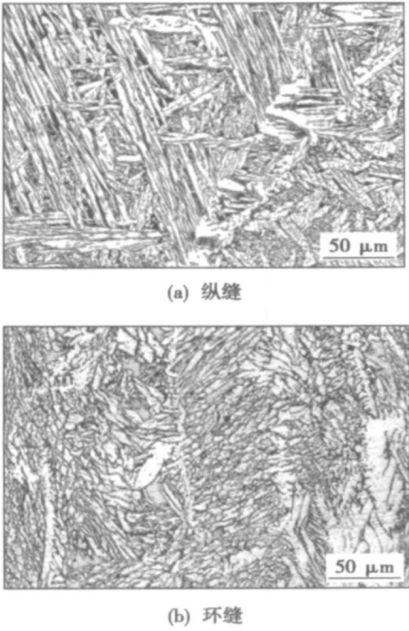


图 4 焊缝的显微组织

Fig. 4 Microstructure of welds

仪测得纵缝、环缝中的奥氏体相比例(体积分数)分别为 75% 和 60%，奥氏体量有较大的差异。

3 结 论

(1) 纵焊缝在制管厂进行焊接，焊接条件好，焊缝韧度高，而环焊缝受现场焊接条件的限制，韧度相对较差。

(2) 纵、环焊缝采用的焊接填充金属的种类不同，焊缝中氢含量和氧含量不同，是造成两者韧度差异的主要原因之一。

(3) 造成纵、环焊缝韧度差异的另一主要原因是采用的焊接热输入量的不同，以及焊后热处理与否，而造成焊缝显微组织两相比比例差异引起的。

参考文献:

[1] Mats Liljas. The welding metallurgy of duplex steel [C] // International Duplex Stainless Steel Conference, Beijing, China, 2003: 25—39.
[2] 吴 玖, 姜世振, 韩俊媛, 等. 双相不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
[3] Rouault P, Bonnet C. Make the duplex and superduplex welding easier through metallurgical and practical simple recommendations[C] // International Duplex Stainless Steel Conference, Beijing, China, 2003.
[4] 栗卓新, 李国栋, 魏 琪, 等. 不锈钢焊接冶金的研究进展[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2): 184—186.
[5] 金晓军, 霍立兴, 张玉凤. 热输入对双相不锈钢管接头力学和腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 109—112.
[6] Chen T H, Yang J R. Microstructural characterization of simulated heat affected zone in a nitrogen-containing 2205 duplex stainless steel [J]. Materials Science and Engineering, 2002, A338: 166—181.

作者简介: 李为卫, 男, 1965 年出生, 高级工程师。主要从事油气输送管材料及焊接研究, 获省部级科技进步二、三等奖共 4 项, 发表论文 30 余篇。

Email: liww@tjrc.org

grated. Non-instruct topology information of product-department-joint was described in the model. Structure of model and consistence of operation were analyzed. An example data of product structure tree was showed. Integration method of graphic data between CAD and welding computer aided process planing (WCAPP) based on litmus-less meta file was analyzed. The solution of process document based on multi-type template mechanism was offered, which ensure the criterion of data operation and outputting of process document.

Key words: welding computer aided process planing; extended Marked language; welding process; process card

Self-optimizing control for laser cutting quality based on coaxial vision

ZHANG Yongqiang^{1,2}, CHEN Wuzhu¹, ZHANG Xudong¹, SHAN Jiguo¹ (1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shougang Technical Research Institute, Beijing 100041, China). p58—60

Abstract: A sensing and control system, which includes coaxial vision sensor, DSP processor and open NC system, was designed for CO₂ laser cutting. By coaxially detecting the images of the sparks jet, it is found that the maximal sparks length of the coaxial image, which can be determined by the highest pixels of different brightness ranges of the sparks image, corresponds to the best roughness of cutting face. Experiments for self-optimizing control of laser cutting quality were performed by utilizing the images of sparks jet. The results show that the optimal cutting speed for the best roughness of the bottom edge could be found automatically and quickly.

Key words: laser cutting; quality monitoring; visual vision; self-optimizing control

Laser sintering experiment of Fe—C mixed powder

FAN Chunhua, DONG Lihua, WANG Dongsheng (Engineering Training Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China). p61—64

Abstract: The Fe—C mixed powder without low melting-point adhesive was sintered by selective laser sintering machine, and the effect of sintering parameters on sintering formation was studied. The relationship between sintering thickness with laser power, scan interval and scanning velocity were analyzed. The relation formula between scan interval and sintering thickness was established and was verified with experiment. The sintering mechanism and balling-phenomena were studied through microstructure. The complex metal part with comparative accuracy and density was obtained under reasonable sintering parameters.

Key words: laser sintering; metal powder; process parameters

In situ synthesis of TiC-VC particles reinforced Fe-based metal matrix composite coating by laser cladding

DU Baoshuai, LI Qingming, WANG Xinhong, ZOU Zengda (School of Materials Sci-

ence and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China). p65—68

Abstract: Using a 5 kW CO₂ laser, in situ synthesized TiC-VC particles reinforced Fe-based alloy composite coating was prepared by preplaced ferrotitanium, ferrovanadium and graphite etc. The microstructure and properties of the composite coatings were investigated by optical microscope, X-ray diffractometer, electron probe microanalyzer and microhardness tester. Results indicated that TiC-VC particles are produced by direct metallurgical reaction among ferrotitanium, ferrovanadium and graphite during laser cladding process. It was also found that fine TiC-VC particles are dispersed in the matrix. The microhardness of the coatings, which was enhanced by the TiC-VC particles, was much greater than that of the Q235 substrate.

Key words: laser cladding; in situ synthesis; TiC—VC particles

Analysis for toughness of 2205 duplex stainless steel pipe welds

LI Weiwei, LIU Yinglai, XIONG Qingren, JI Linggang (The Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods, CNPC, Xi'an, 710065, China). p69—72

Abstract: 2205 duplex stainless steel possesses favorable mechanical properties and good corrosion resistance, and is applied widely in transport, oil and natural gas, ocean and chemistry industry, etc. Compared to general austenitic stainless steel, duplex stainless steel is its difficult to weld. One natural gas the maximum operation pressure in one collection pipe of natural gas transport is 13.3 MPa and still generally considered as material which are minimum operation temperature is -30°C, and very high toughness was required for the pipe welds. The Charpy impact toughness and fracture toughness (CTOD) of longitudinal welds (used SAW methods) and girth welds (used GTAW+ SMAW methods) of 2205 duplex stainless steel pipe used for high pressure nature gas transport were tested and analyzed. The results show that the impact toughness and fracture toughness of longitudinal welds is better than that of the girth weld markedly. The main reason of these results is concern with difference of filler metal and microstructure phase ratio caused by difference heat input and postweld heat treatment.

Key words: duplex stainless steel; pipe; weld; toughness

Factors influenced arc-excited ultrasonic intensity

HU Xing, HAO Hongwei, WEN Xiongwei, HE Longbiao, LI Luming, WU Minsheng (Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). p73—76

Abstract: To enhance the understanding and control of arc-excited ultrasonic, factors that influence the arc-excited ultrasonic intensity were studied. Firstly, a welding information acquisition system was built to track the signal variations during the welding process, and it was effective to record the signal. Secondly, the varia-