

试验研究

大型原油储罐用高强钢焊接性能研究

侯 东 华

(济钢集团有限公司 技术中心,山东 济南 250101)

摘 要:采用实物焊接和热模拟的方法研究了大型原油储罐用610 MPa级高强度钢板大热输入焊接性能。结果表明,试验钢具有良好的抗大热输入量焊接的能力,原因是钢板中存在大量细小、弥散分布的TiN复合粒子,在焊接热循环的高温阶段,TiN粒子通过有效钉扎奥氏体晶界和促进铁素体晶内形核,抑制了焊接热影响区组织粗化;采用气电立焊和埋弧横焊焊接后,焊接对接接头的拉伸强度、低温冲击和冷弯性能优良,性能指标富余量大,试验钢板完全可以应用于10万m³及以上大型石油储罐的建造。

关键词:原油储罐用钢;焊接性能;大热输入;热模拟;埋弧横焊

中图分类号: TG406

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2012)04-0036-04

1 前 言

国家石油储备基地及石油公司石油储备用罐几乎全部采用单台储存容积在10万m³及以上的大型浮顶油罐^[1],这种原油储罐底部数圈采用屈服强度≥490 MPa、抗拉强度610~730 MPa的高强度钢板,其厚度通常在12~34 mm。为提高焊接施工效率,10万m³原油储罐的纵向焊缝采用气电立焊焊接,环缝采用埋弧横焊。要求所用的高强度钢板在经受气电立焊的大热输入焊接后,焊接热影响区不发生明显的“软化”和“脆化”,具有足够的强度和韧性,同时在埋弧横焊的小焊接热输入条件下,热影响区不发生明显的“硬化”^[2]。气电立焊热输入量可达90~100 kJ/cm^[3],焊接热冲击会造成钢板焊接热影响区的强度和韧性严重下降,使热影响区成为整个罐体最薄弱的环节^[4-6]。为保证大型浮顶油罐工程的安全性,进行的大型石油储备用钢焊接性能研究,对于大型浮顶油罐用钢的开发和实际应用有重要意义。本研究通过热模拟、实物埋弧横焊和气电焊接等方法,对济钢生产的610 MPa级高强度钢板大热输入焊接性能进行分析。

2 试验材料及方法

试验材料选自济钢生产的低合金高强度钢板,厚度规格为21.5 mm,钢板主要化学元素含量如下: C 0.09%, Si 0.30%, Mn 1.45%, P 0.008%, S 0.003%, Mo、Ni、Nb、V、Ti等适量。采用调质热处理生产。经检验,钢板的屈服强度 $R_{p0.2}=570$ MPa,抗拉强度 $R_m=670$ MPa,断后伸长率 $A_5=19.5\%$, -20 °C夏比冲击吸

收功平均值 $KV_2=250$ J。

2.1 热模拟粗晶区试验

将试验钢加工成 $\phi 10$ mm的圆棒拉伸热模拟试样以及11 mm×11 mm×55 mm冲击热模拟试样,在Gleeble 1500热模拟试验机上进行模拟焊接热循环试验。试验加热速率300 °C/s,初始温度20 °C,峰值温度1 400 °C,峰值停留时间1 s,分别模拟60、80、100、120 kJ/cm 4种大焊接热输入条件下焊接热影响区粗晶区。将焊接热模拟后的圆棒试样加工成 $\phi 6$ mm的圆棒拉伸试样,在2 000 kN力学拉伸试验机上进行拉伸试验。每组焊接热输入量进行2个拉伸,取平均值。将热模拟后的冲击试样加工成11 mm×11 mm×55 mm的标准冲击试样,在CDW-60冲击试验机(JB230B冲击试验机)上进行夏比V形缺口冲击试验。每组焊接热输入量进行3个试样的冲击试验,取平均值。

2.2 对接接头焊接试验

大型浮顶石油储罐建设主要焊接方法是纵缝气电立焊和横缝埋弧焊,为满足现场建设焊接施工的要求,对610 MPa钢板进行了气电立焊和埋弧横焊对接接头焊接试验。试板尺寸为21.5 mm×200 mm×600 mm,按照图1所示开坡口、组对,焊接中严格按照储罐建造现场工艺要求施焊,实际记录的焊接工艺见表1。

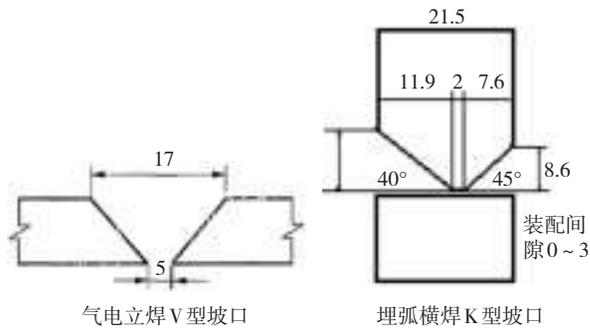
表1 对接接头焊接工艺

焊接方法	焊接材料	坡口	焊接层数	电流/电压/A	电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	热输入量/(kJ·cm ⁻¹)
气电立焊	DWS-60G	V型		410	40	9.6	103.0
埋弧横焊	US-49	K型	4道	360	26	40.0	14.0
	MF-33H		3道	400	26	40.0	15.6

对接接头试板焊接完毕,放置48 h探伤,探伤合格后,按照JB 4708-2000《钢制压力容器焊接工艺评定》的要求对焊接接头进行拉伸、冷弯试验及不

收稿日期:2012-06-21

作者简介:侯东华,男,1977年生,2005年毕业于太原科技大学材料加工工程专业,硕士。现为济钢技术中心工程师,从事中厚板产品开发及焊接工艺技术服务。



气电立焊V型坡口

埋弧横焊K型坡口

图1 21.5 mm规格对接接头焊接坡口型式

同位置冲击试验。拉伸试验采用全厚度试样(21.5 mm),按照GB/T 228-2010《金属弯曲试验方法》进行;冷弯试验采用全厚度侧弯试样,试样宽度为21.5 mm,试样厚度为10 mm,侧弯试样为4件,按照GB/T 232-2010《金属弯曲试验方法》进行。焊接接头冲击试样取样按照JB 4 708-2000《压力容器焊接工艺评定》的要求,横向取样。分别对不同焊接工艺的对接头焊缝金属、热影响区取样进行冲击试验,冲击试验按照GB/T 229-2010《金属夏比冲击试验》在JB-50A冲击试验机上进行。

从气电立焊对接接头焊接区取样,经过磨制、抛光后,用4%硝酸酒精溶液侵蚀,采用XL30型扫描电镜观察微观组织形貌。利用金相显微镜确定热影响区粗晶区位置,对确定的焊接热影响区粗晶区切取成500 μm 薄片,磨至100 μm ,在5%高氯酸+95%乙酸溶液中电解双喷,在Tecnai G2 F30 S-TWIN 300 KV型场发射透射电镜下观察组织精细结构。对母材及气电立焊焊接热影响区粗晶区进行碳萃取复型,利用透射电镜观察母材及粗晶区在焊接热循环下的析出物种类和形貌等特征,研究钢中第二相粒子的行为。考虑到由于埋弧横焊热输入小、冷速高,淬硬倾向大,对其焊接接头进行了硬度检测。垂直于焊接方向截取试样,在距离上表面2 mm、中心、距下表面2 mm的3个位置检测。所有位置检测均包括在焊缝中心测量1个点及离左右熔合线每0.5 mm测量1个点。

3 试验结果

3.1 热模拟粗晶区力学性能

经不同热输入焊接热模拟粗晶区拉伸试验及冲击试验结果见图2。与母材相比,热影响区粗晶区强度和低温韧性均有所下降,但是各项指标仍满足标准要求,而且在60~100 kJ/cm热输入条件下,抗拉强度和冲击吸收功富余量充裕,表现出良好的强度和低温韧性。当热输入量为60 kJ/cm时,试验材料-20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功(KV_2)由母材平均248 J下降为161 J,抗拉强度(R_m)由670 MPa下降至655

MPa。当热输入量为80和100 kJ/cm时,试验材料-20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功和拉伸强度稍低于热输入量60 kJ/cm的结果,但是二者非常接近,说明试验钢抗大热输入(≤ 100 kJ/cm)的性能较强。但当热输入量增加到120 kJ/cm时,冲击功下降到65 J,抗拉强度下降到625 MPa,尽管也符合标准要求,但是富余量较小。从图2来看,随着热模拟焊接热输入的增大,试验材料冲击吸收功和强度在逐渐下降。

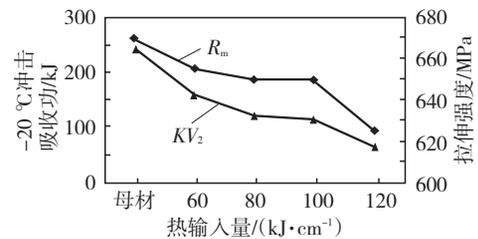


图2 热模拟粗晶区拉伸及冲击性能

3.2 对接接头力学性能

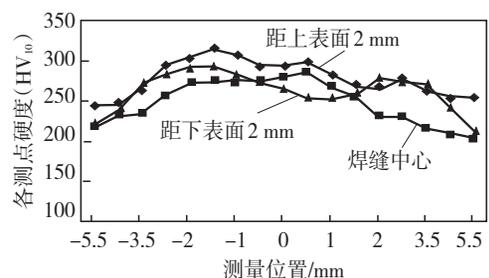
对接接头焊接试板的拉伸、冲击试验结果见表2。接头180 $^{\circ}$ 冷弯试验($d=4a$)无裂纹。

表2 埋弧横焊和气电立焊对接接头力学性能

焊接方法	R_m /MPa	断裂位置	-20 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功 KV_2 /J	
			焊缝	熔合线
气电立焊	655	热区	79, 80, 85	107, 121, 102
埋弧横焊	650	焊缝	89, 82, 93	97, 95, 108
				116, 120, 123
				136, 121, 135

610 MPa级高强度钢板属于低合金调质钢,对于该类钢板,焊接接头热影响区的软化和脆化是焊接热影响区的主要问题。从表2可以看出,钢板经过103 kJ/cm的大热输入气电立焊及埋弧焊后,焊接接头拉伸强度、低温冲击韧性仍保持较高水平,说明钢板具有较好的焊接性,完全可以满足大型石油储罐焊接工艺的要求。

埋弧横焊对接接头焊接热影响区硬度见图3。热影响区硬度主要用于评价钢板的抗冷裂纹性能,一般认为,钢板焊接热影响区最高硬度 $>HV350$ 时,即有一定的冷裂纹倾向。由结果可见,实物焊接热影响区最高硬度为316(HV_{10}),说明钢板冷裂纹倾向不大。



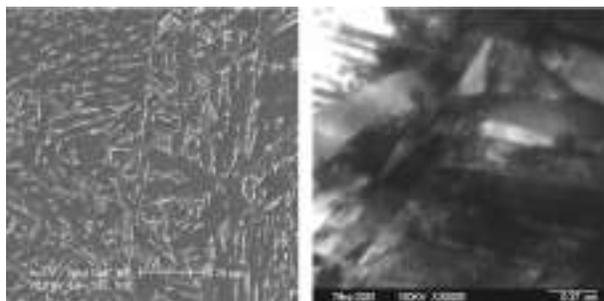
测量位置0表示焊缝中心,其余为HAZ与熔合线距离。

图3 埋弧横焊对接接头焊接热影响区硬度变化情况

3.3 母材及焊接热影响区微观结构特征

图4为试验钢板经过线能量为103 kJ/cm的气

电立焊焊接后焊接热影响区粗晶区扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)组织。



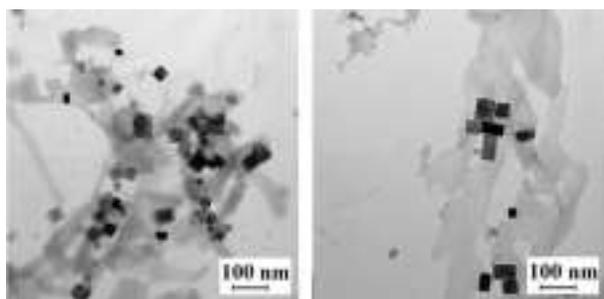
a SEM 2 000 ×

b TEM 30 000 ×

图4 气电立焊焊接热影响区粗晶区微观组织

从SEM组织来看,试验钢板经过103 kJ/cm大热输入焊接后,粗晶区组织以板条贝氏体为主,晶粒没有明显粗化(见图4a);从TEM组织来看,热影响区贝氏体组织细小,贝氏体板条束很规则,束间呈交错分布,在贝氏体基体上、贝氏体束间以及原奥氏体晶界发现大量的析出物(见图4b)。这种组织有很好的止裂性和强度。

图5为母材及气电立焊粗晶区第二相粒子的形貌特征。



a 母材

b 粗晶区

图5 母材及气电立焊粗晶区第二相粒子析出形貌

从图5a可以看出,母材中含有大量的第二相粒子,粒子形态以方形为主,少量为圆形,在视域内呈现弥散分布。粗略统计大部分粒子平均直径在22~27 nm,粒子单位面积密度在25~30个/ μm^2 。衍射光谱分析表明,方形粒子为面心立方结构,点阵常数为0.434 5 nm。选取典型粒子进行EDAX分析,结果表明其主要元素为Ti、Nb,质量分数分别为70.51%与29.49%。综合上述特征判断该母材中的粒子是以TiN为主的碳氮化铌钛复合粒子。

从图5b明显看出,经过气电立焊大热输入焊接后钢板组织中的粒子密度有所减少,尺寸有所增大。粗略统计,粒子平均直径在32~40 nm,粒子单位面积密度在12~16个/ μm^2 ,形态仍为方形。衍射光谱分析表明,粒子为面心立方结构,点阵常数为0.438 2 nm。EDAX分析粒子成分为Ti 92.36%、Nb 7.64%,可判断粗晶区中的第二相粒子仍以TiN为主,而且其含量更高。

4 讨论分析

气电立焊(VEGA)是由熔化极气体保护焊和电渣焊发展而形成的一种熔化极气体保护电弧焊方式,利用电弧热熔化金属,通过气体(一般采用 CO_2)保护金属熔池,水冷铜滑块挡住熔融的金属,强迫焊缝成形,以实现立向上位置的焊接。同其他常见焊接方法的最大区别在于焊缝一道成形。因此气电立焊的热输入非常集中。对普通的低合金高强度钢而言,集中的大热输入焊接会导致峰值温度提高,奥氏体高温停留时间延长原奥氏体过热严重导致晶粒尺寸增大,800℃冷却至500℃的时间也相应增加,冷却速度降低,影响组织转变类型,容易出现高温转变组织,如粗大的晶界铁素体、晶界铁素体侧板条和粗大的上贝氏体等^[7-9],同时由于奥氏体过热严重导致M-A岛粗大,易成为裂纹源和裂纹扩展的通道,进一步降低粗晶区的强韧性。因此,组织演变是在大热输入焊接热循环条件下造成低温韧性和强度降低的主要因素。

为提高高强度钢板抗大热输入量焊接的性能,国内外主要通过添加Ti等元素,控制形成高温稳定的微细粒子,通过第二相粒子抑制奥氏体晶粒长大,促进热影响区中强韧性组织的形成,来改善热影响粗晶区性能^[10]。钢板中的析出物对于钢板的焊接性有着重要的意义。根据第二相粒子理论,粒子对晶界的钉扎力(F):

$$F=K \cdot f/r,$$

其中 f 为单位体积的钢中粒子数, r 为粒子的半径。因此,组织中析出的二相粒子数量越多,尺寸越小,粒子对原始奥氏体晶界的钉扎力越大^[11]。粒子必须有足够的数量且细小、弥散分布并具备高温稳定性,才能够通过钉扎奥氏体晶界、促进铁素体晶内形核等有效抑制焊接热影响区晶粒的粗化。试验结果显示,试验材料中第二相粒子是以TiN为主的碳氮化铌钛复合粒子,Nb对大热输入焊接性并不好^[12],而TiN是所有析出物中固溶温度最高、热稳定性最好且相对难溶的析出物^[13-14]。从610 MPa钢大热输入焊接粗晶区金属薄膜透射电镜中可以观察到大量的析出物,结合其母材和粗晶区碳膜萃取复型第二相粒子变化情况,可以断定在焊接热循环的高温阶段(包括升温 and 冷却过程中),TiN粒子始终存在且有效钉扎晶界,阻止奥氏体晶界移动,抑制奥氏体晶粒长大,促进晶内形核^[15],避免粗大贝氏体、魏氏体及块状铁素体等形成,从而使得610 MPa级高强度钢板在103 J/cm的大热输入冲击下保持较好的低温冲击韧性和强度。

5 结论

5.1 在60~100 kJ/cm焊接热输入范围内,610 MPa级大热输入高强度钢热影响区粗晶区强韧性良好,在120 kJ/cm焊接热输入下热影响区粗晶区组织强韧性相对较差,但仍满足标准要求,说明该钢种具有良好的抗大热输入量焊接的性能。

5.2 钢板在采用大热输入量(103 kJ/cm)和较低热输入量(15 kJ/cm左右)条件下,气电立焊和埋弧横焊对接焊接接头拉伸强度、低温冲击和冷弯性能优良,性能指标富余量大,钢板淬硬倾向小,焊接工艺性好,完全可以应用于10万m³及以上大型原油储罐的建造,安全可靠。

5.3 钢板中存在大量以TiN粒子为主的复合粒子,粒子尺寸细小,弥散分布在基体中,在焊接热循环的高温阶段(包括升温和冷却过程中),TiN粒子始终存在且有效钉轧奥氏体晶界和促进铁素体晶内形核,抑制了焊接热影响区组织的粗化和劣化,是保证610 MPa钢大热输入焊接性能的主要原因。

参考文献:

- [1] 张汉谦,江来珠.大型原油储罐用B610E高强度调质钢板的研制[J].宝钢技术,2006(4):20-22.
- [2] 张汉谦.大型原油储罐用高强度钢板国产化进展[J].石油化工建设,2011(2):15-17.
- [3] 季伟明.高效焊接技术在10万m³油罐施工中的综合应用[J].

石油工程建设,2000(6):16-19.

- [4] 张建国,徐德明,周继恩.大型立式圆筒形钢制焊接油罐自动焊接工艺[J].焊接技术,2003,32(2):53-54.
- [5] 陈颜堂,丁庆丰,刘惟忠,等.大线能量焊接用钢模拟热影响区的组织与性能[J].金属热处理,2005,30(9):18-21.
- [6] 张朋彦,高彩茹,朱付先.新研制610D大热输入焊接热模拟组织性能分析[J].热加工工艺,2009,38(15):5-10.
- [7] 陈茂爱,武传松,王建国,等.含Ti微合金钢中的第二相粒子对焊接粗晶热影响区组织及韧性的影响[J].焊接学报,2002,23(3):37-40.
- [8] 陈茂爱,唐逸民,楼松年.Ti对低合金高强度钢焊接粗晶热影响区组织及韧性的影响[J].特殊钢,2001,22(5):5-8.
- [9] 陈俊华,亓效刚,李华宾,等.Ti-V-Nb微合金钢中第二相粒子及其对焊接热影响区奥氏体晶粒长大的影响[J].热加工工艺,2004(6):13-15.
- [10] 余圣甫,杨可,雷毅,等.大热输入焊接高强度低合金钢热影响区的晶粒细化[J].焊接学报,2008,29(3):17-20.
- [11] Nordberg H, Aromsson B. Solubility of niobium carbide in austenite [J].Journal of Iron and Steel Institute, 1968, 206(12): 1 263-1 266.
- [12] 张英乔,刘伟明,张汉谦,等.焊接热循环及钕对原油储罐用钢粗晶热影响区组织和性能的影响[J].焊接,2005(5):23-28.
- [13] Dumitrescu L F, Hillert M. Reassessment of the solubility of TiC and TiN in Fe[J].ISIJ International, 1999, 39(1):84-90.
- [14] Maugis P, Goune M. Kinetics of vanadium carbonitride precipitation in steel[J].Acta Materialia, 2005, 53(12):3 359-3 367.
- [15] 张莉芹,袁泽喜,陈晓,等.大线能量低焊接裂纹敏感性钢的焊接(一)[J].焊接技术,2002,19(7):29-34.

Research on the Welding Performance of High-strength Steel for Large Oil Storage Tank

HOU Dong-hua

(The Technology Center of Jinan Iron and Steel Group Corporation, Jinan 250101, China)

Abstract: The welding performance of 610 MPa high-strength steel plate for large oil storage tank was studied by large heat input real welding and thermal simulation. The results showed that the test steel had better ability to bend large heat input welding. There are many fine and dispersed second-phase TiN complex particles in the test steel, which can refine HAZ grain by prevent growth of primitive austenite and promote phase transformation of ferrite as nucleus. The mechanical properties of the test steel after welding by electro gas arc welding and submerged arc welding were very well, it is feasible to manufacture large oil storage tank with 0.1 million m³ capacity or above by the 610 MPa high-strength steel.

Key words: steel plate for oil storage tank; welding performance; large heat input; thermal simulation; submerged arc welding

(上接第35页)

Cause Analysis on Plane Fault in Curling Process of J55 Steel for Casing Pipe

LI Bo-tao, ZHU Yan-shan

(Jinan Iron and Steel Group Corporation, Jinan 250101, China)

Abstract: The problem of plane faults in curling process of J55 steel for casing pipe were analyzed. It was found that the differences of the hardness and microstructure in adjacent positions were main reasons. At the same time, the mechanism of phase transformation behavior of J55 was researched with MMS-200 thermal simulator. The results showed that J55 steel has good hardenability. When the cooling rate is about 15 °C/s, the ferrite and bainite mixed structure appeared easily in part, which induced the hardness nonuniform and led to the plane faults in curling process. By adjusting the production processes, such as increasing curling temperature to (600 ± 20)°C from (570 ± 20)°C and reducing the cooling rate to 12 °C/s, the problem was resolved.

Key words: J55 steel for casing pipe; plane fault in curling; microstructure; hardness; curling temperature