

X80 管线钢埋弧焊匹配焊丝试验

张 敏, 姚成武, 付 磊, 吕振林

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)



张 敏

摘 要: 通过分析高强度低合金钢焊缝熔敷金属常见显微组织对其力学性能的影响, 确定 X80 管线钢用埋弧焊丝熔敷金属组织应以大量针状铁素体 (AF) 和少量粒状贝氏体 (GB) 的复合组织。从相变动力学原理出发, 结合针状铁素体 (AF) 非自发形核机制和微合金组织韧化理论, 选择 Mn—Ni—Mo—Ti—B 合金系进行 X80 管线钢匹配焊丝的试制。结果表明, 合理选择和控制合金元素, 可以获得理想的焊缝熔敷金属组织和强韧性以及低温韧性要求, 试制的 1 号焊丝能够满足 X80 管线钢的使用要求。

关键词: X80 管线钢; 埋弧焊; 低温韧性; 针状铁素体; 夹杂物

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X (2006) 04-064-05

0 序 言

X80 管线钢是现行已使用油气输送管道中强度级别最高的钢种。按照 API SPEC 5L 标准, X80 管线钢为高强度低合金钢 (HSLA), 力学性能为: 屈服强度 $R_{eL} \geq 551$ MPa, 抗拉强度 $R_m = 620 \sim 827$ MPa, 断后伸长率 $A \geq 18\%$, 冲击吸收功 $A_{kv} \geq 120$ J (-20°C)^[1]。德国 Mannesmann 公司于 1985 年成功研制了 X80 级管线钢并铺设了 3.2 公里的试验管道; 1994 年加拿大 IPSCO 公司生产的 X80 焊管开始在国内的管道上使用, 使高钢级焊管在长输管道上的使用成为现实^[2]。此后, X80 钢级管线钢的应用得到了不断发展。由于 X80 级管线钢相对于 X65、X70 级管线钢具有强度高、韧性好的特点, 不仅节约了大量的钢材, 并且具有良好的使用性能, 从而成为管线钢的发展方向。国内目前还没有 X80 钢级油气输送管道投入使用, 随着国内石油工业的发展, 研制 X80 级管线钢及其匹配焊接材料已成为当务之急。

从材料研究的角度来看, 根据性能确定材料的组织形态, 通过选择合金系和控制其合金的成分, 从而设计并生产获得所需要的组织, 是一个比较合理的途径。文中采用通过贝氏体强化针状铁素体的指导思想来设计焊缝金属合金系, 在降 C 的基础上, 添加适当的置换固溶合金元素提高焊缝的强度, 适量添加促进针状铁素体形成元素来控制组成相比例。依据以上思路, 对该钢级埋弧焊适用焊丝进行研究, 以满足石油焊管工业的需要。

1 合金成分的匹配设计

1.1 合金系的选择

研制 X80 级埋弧焊丝的主要目的是获得高强度和优良低温韧性的焊接接头。影响焊缝力学性能的根本原因在于材料的显微组织结构, 焊缝优良性能的获得最终要通过控制材料的金相组织来实现。

一般来说, 高强度低合金钢 (HSLA) 焊缝显微组织主要有先共析铁素体、针状铁素体、侧板条铁素体、粒状贝氏体、珠光体、马氏体等组织形态^[3]。已有的研究表明, 在以上这些组织形态中, 针状铁素体是晶内形核的贝氏体, 以大角度分布, 取向自由度大, 并具有很高的位错密度 (约 10^{14} m^{-2}), 其贡献强度接近 145 MPa, 所以针状铁素体组织中, 裂纹不易扩展, 并具有较高的强度和优良的抗断裂性能^[4,5]。另一方面, 从粒状贝氏体 (GB) 的组织性能来看, 虽然其韧性不如针状铁素体, 但强度较高, 如果二者能够有比较合适的比例混合, 可以达到使材料增强增韧的目的。

从 HSLA 钢焊缝固态相变过程来分析, 粒状贝氏体形成温度大致在贝氏体形成温度的上部, 并靠近针状铁素体的形成温度。因此, 可以通过合理地匹配合金元素, 并采用适当的焊接工艺, 使焊缝组织中完全有可能得到大量的针状铁素体 (AF) 和少量粒状贝氏体 (GB) 的复合组织。

针状铁素体是中温相变产物, 形成温度范围为 $600^\circ\text{C} \sim$ 贝氏体点 (B_s)。由于针状铁素体是原奥氏体晶内细小的铁素体, 以片状的形式存在于原奥氏体晶粒内部, 并且大都是非自发形核的方式, 以夹杂

物为核心来形核长大。因此,针状铁素体相变需要大量的夹杂物^[9]。从降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变转变温度和增加形核质点角度上来考虑,X80 级管线钢埋弧焊丝焊缝熔敷金属合金系统宜选用 Mn—Ni—Mo—Ti—B 系较为合适。

1.2 合金成分的调控

在低合金钢(HSLA)焊缝常用的合金元素中,扩大 γ 区的主要元素有 Mn 和 Ni。这两种元素的存在会降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变温度,抑制金属液在较高温度下向先共析铁素体(PF)和侧板条铁素体(FSP)的相变,同时为焊缝中针状铁素体(AF)组织的形成提供条件。从合金元素固溶强化基体的角度来看,元素周期表中,Mn、Ni 靠近基体 Fe (Mn25, Fe26, Ni28),与 Fe 化学性质相同,原子半径接近,故对基体点阵造成的畸变最小,因而对韧性的危害也最小。由此可见,焊缝金属中应保证 Mn、Ni 元素的含量以确保强韧性和低温韧性的获得。为了分析 Mn、Ni 元素对焊缝性能的影响,作者设计了不同成分的焊丝材料,其合金系中 Mn 为 1.5%~2.5%,Ni 为 0~1.5%。

研究表明,加入微合金元素 Ti、B,在焊缝金属中将生成 Ti(CN)、TiO、BN 夹杂物颗粒而成为针状铁素体非自发形核的核心,可促使焊缝中形成针状铁素体的生成^[7]。另一方面,B 元素为表面活性物质,在焊缝组织转变过程中,向 γ 晶界聚集,降低了晶界能,使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变向中温方向移动,易于形成针状铁素体^[8]。但焊缝中 Ti、B 元素含量过低,难以形成针状铁素体形核的足够夹杂物(Ti(CN)、BN 等)质点,对焊缝金属的韧性提高作用不明显;而过高则会由于夹杂物质点增多而增加脆性。另外,如果 B 含量过高,将会弱化晶界而降低焊缝的低温冲击韧度。参考现有的有关 Ti、B 元素对焊缝金属作用的研究成果^[7,9],Ti 的含量选为 0.01%~0.025%,B 的含量为 0.0015%~0.005%较为合适。

在含 Ti 的 HSLA 钢焊缝中,加入 Mo 会降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度,并使相变温度区间缩短,但会产生置换固溶强化,引起基体点阵的晶格畸变,使材料的冲击韧度下降,并使材料冲击转折温度升高,从而降低材料的低温韧性。因此,过高的 Mo 元素显然对焊缝的韧性不利。在对 X80 管线钢的试验研究中,当 Mo>0.2%时,屈服强度增加很少,极限强度明显增大,但冲击韧度却减少,故 Mo 应控制在 0.2%~0.3%^[10]。

已有的研究表明,焊接材料中的轻稀土元素 Ce 在焊接过程中会富集在硅酸盐夹杂物中,使夹杂物球化,并以弥散状态分布,从而有利于针状铁素体

(AF)的形核,故加入 0.2%~0.3%的轻稀土 Ce 对针状铁素体的成形比较有利^[11]。

在焊接熔池金属连续冷却过程中,较低的含 C 量,将使得贝氏体转变曲线“鼻子”左移,从而容易在较宽范围的冷却速率下获得类贝氏体的针状铁素体。同时,C 元素为间隙固溶强化元素,由于引起基体点阵的强烈的显著畸变,致使基体微裂纹易于产生和扩展,因而将使焊缝金属的冲击功大大下降,故 C 元素的含量应控制在 0.03%~0.06%的较低范围内。

从 HSLA 钢焊缝其它合金元素对性能的影响来看,Si 元素以产生置换固溶强化的方式使基体点阵的晶格畸变,导致冲击韧度下降,冲击转折温度升高而低温韧性降低。从晶界上易形成脆性相的元素 S、P 来看,由于与基体 Fe 原子化学键合性质、原子半径差别较大,因而对基体点阵所造成的畸变更大,且显著地提高了材料韧性—脆性转变温度。因此,焊缝金属中应严格控制 Si、S、P 含量,所以其控制含量选为 Si<0.4%,S<0.01%,P<0.015%。

为提高焊缝金属耐腐蚀的能力,加入 0.2%~0.3%的 Cu 元素,同时为确定其对焊缝性能是否有害而设计其不同成分。

2 焊丝熔敷金属性能

2.1 试验材料和工艺

焊接方法为埋弧焊接,焊接设备为 ZD5—1000 型埋弧焊机。焊接材料为研制的焊丝和烧结焊剂 SJ101G,焊剂的化学成分见表 1。

表 1 焊剂的化学成分(质量分数 %)
Table 1 Chemical composition of flux

SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	S	P	余量
15~20	20~30	15~20	15~25	≤0.06	≤0.08	2.1

试验用钢板为武汉钢铁公司新研制的 X80 管线钢,厚度为 15 mm,采用双面焊接,坡口为不对称 X 形坡口,正面焊完后反面清根焊接,钢板化学成分见表 2。焊接时的工艺参数为:电流 520~530 A,电压 30~32 V,焊接速度 26 m/h。

表 2 X80 管线钢的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of X80 pipeline steel

C	Si	Mn	Nb	V	Ti	B	Cu	Ni	Mo	S	P	Fe
0.06	0.24	1.57	0.04	0.01	0.013	0.0006	0.045	0.14	0.29	0.005	0.033	余量

2.2 试验设备

试验焊丝焊接接头的硬度测试在 HV—120 型维式硬度计(98 N 荷重)上进行, JB—30B 冲击试验机上进行冲击韧度试验, 拉伸试验在 PCS—25T 试验机上进行。采用 Neophot—21 型卧式金相显微镜观察熔敷金属显微组织, 在 HITACHI S—3000N 型电子

扫描仪上进行断口分析。

2.3 熔敷金属的性能

研制焊丝熔敷金属的化学成分和试验焊丝焊接接头硬度测试值分别见表 3、表 4。试验焊丝匹配 SJ101G 焊剂, 所得焊接接头力学性能的试验结果见表 5 和表 6。

表 3 试验焊丝熔敷金属的化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of deposited metals of experimental welding wire

序号	C	Mn	Si	Mo	Ti	B	Ni	Cu	S	P	Fe
1 号	0.038	1.849	0.302	0.228	0.010	0.0012	1.084	0.19	0.007	0.019	余量
2 号	0.042	2.102	0.266	0.213	0.009	0.0010	0.534	0.20	0.006	0.015	余量
3 号	0.046	1.484	0.420	0.346	0.022	0.0023	0.320	0.008	0.016	0.021	余量

注: 1 号、2 号焊丝钢熔炼时加入 0.25% 的稀土 Ce, 3 号焊丝中未加入。

表 4 试验焊丝焊接接头硬度测试(HV10)

Table 4 Hardness of SAW joint of experimental welding wire

序号	熔合区				焊缝区				熔合区			
1 号	242	238	236	227	213	224	193	206	194	189	198	224
2 号	247	236	245	227	222	213	224	238	222	198	194	224
3 号	233	238	246	236	238	236	247	254	251	221	260	274

表 4 硬度测试结果表明, 1 号焊丝焊接接头最高硬度 $H_{\max}$ 出现在靠近熔合区部位, 其值为 242 HV, 符合 H_{2S} 环境中使用的 X80 管线钢最大允许硬度(248 HV)要求^[13]。

表 5 试验焊丝熔敷金属常温力学性能

Table 5 Room temperature mechanical properties of deposited metals of experimental welding wire

序号	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A(\%)$	收缩率 $Z(\%)$	冲击吸收功 A_{kv}/J
1 号	567	681	24.2	55.47	210.7
2 号	555	662	21.6	56.76	156.8
3 号	548	655	20.7	48.24	174.8

由表 5 和表 6 可见, 1 号焊丝焊缝常温冲击韧度平均值为 210.7 J, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冲击韧度平均值为 168.3 J, 最低值为 137.2 J, 满足了 API 5L 对 X80 管线钢的低温韧性要求。

表 6 试验焊丝接头低温($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)冲击吸收功(J)

Table 6 Low temperature($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) impact experiment results of SAW joint

序号	试件 1	试件 2	试件 3	平均值
1 号	137.2	196.0	172.4	168.5
2 号	96.4	73.5	102.3	90.7
3 号	129.9	68.6	102.9	100.5

表 7 为部分国外公司 X80 焊管性能数据^[13, 14], 对比可知, 试验的 1 号焊丝焊缝及接头力学性能基本达到了 X80 焊管的水平。

表 7 国外公司 X80 焊管性能数据

Table 7 Properties of X80 welded pipe from abroad pipe company

公司名称	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	冲击吸收功 A_{kv}/J	
			母材	焊缝
住友	552	621	258($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	206($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
曼内斯曼	569	736	202($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)	101($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)
NSCI	586	710	334($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	145($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)
SM2	599	720	210($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	189($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

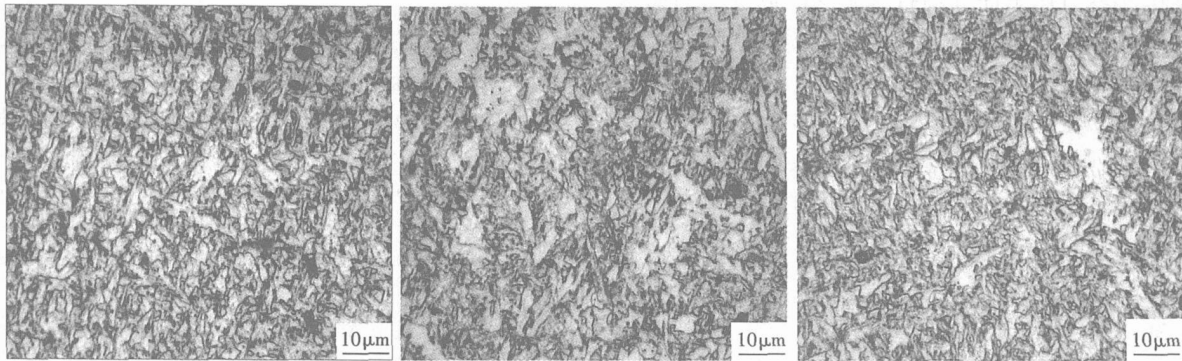
3 试验结果分析

3.1 试验焊丝熔敷金属组织

研制的三种焊丝与 SJ101G 焊剂匹配, 所得到的焊接接头熔敷金属的典型组织见图 1。从图中可以看出, 三种焊接材料焊接接头的焊缝组织主要为针

状铁素体(AF), 呈篮筐编结形态, 晶态大小不等, 相互之间的位向关系不定, 为混杂分布形式。另外, 针状铁素体间析出的白色小颗粒岛状相为粒状贝氏体(GB), 以及少量的块状先共析铁素体(GPF)组织。

由此说明, 合金系的选择是合适的, 合金成分的设计达到了预期的效果, 并获得了以针状铁素体(AF)为主和少量粒状贝氏体(GB)的复合组织。



(a) 1 号 (b) 2 号 (c) 3 号

图 1 试验焊丝熔敷金属组织

Fig. 1 Optical microscopy of deposited metal of perimental welding wire

3.2 熔敷金属的强韧性

由表 4 和表 5 可见, 试制的 1 号焊丝具有很高强度和韧性以及优良的低温韧性。比较 1 号、2 号、3 号焊丝熔敷金属显微组织(分别见图 1a、b、c), 1 号焊丝熔敷金属的针状铁素体含量明显多于 2 号、3 号焊丝, 并且 1 号焊丝焊缝中块状先共析铁素体(GPF)最少, 弥散状分布的粒状贝氏体也比较均匀。

由此可见, 以针状铁素体为主和少量粒状贝氏体的复合组织是焊缝获得强韧性的主要原因。

3.3 轻稀土 Ce 对夹杂物的影响

图 2 是 1 号焊丝焊缝冲击断口扫描电镜球形夹杂物形貌, 利用电子探针(JCXA-733 型)对图 3 中的夹杂物 A 进行微区分析, 该夹杂物尺寸为 0.38 μm, 能谱分析夹杂物中各元素的重量百分比如表 8 所示。

由于夹杂物 A 中轻稀土元素 Ce 的含量较高(0.99%), 而 S 元素含量极少而无法检测到, 可见稀土元素对净化焊缝中的 S 元素有着重要的作用。由夹杂物尺寸及成分, 可以推测其组成相可能为 Ti(CN)、TiO、CaO、(TiMn)_xO 等, 并可以确定该夹杂物为针状铁素体的形核核心^[15, 16]。

综合以上分析不难看出, 虽然 1 号焊丝中 B 元素的含量很少, 但由于焊丝中加入了 0.25% 轻稀土 Ce, 从而在焊接过程中向焊缝金属中过渡轻稀土元素, 对焊缝金属起到净化和变质的作用。与此同时,

稀土元素对焊缝金属中夹杂物的细化、球化作用进一步增加了针状铁素体形核核心, 从而为获得较多的针状铁素体组织提供了条件。由此可见, 轻稀土 Ce 是增加焊缝中针状铁素体数量的原因之一。

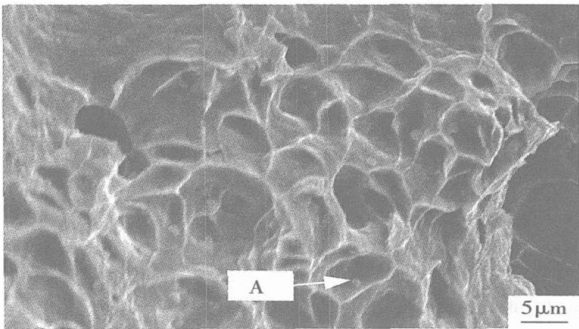


图 2 1 号焊丝熔敷金属夹杂物形貌

Fig. 2 Mophology of inclusions of No. 1 deposited metal

表 8 夹杂物 A 中各元素的含量(质量分数, %)

Table 8 Content of different element in inclusion A

C	N	O	S	Si	Ce	Ca	Mn	Ni	Ti	Fe
0.28	1.56	16.4	0.00	6.78	0.99	14.57	17.23	0.35	5.49	36.35

另外, 由于 B、Ce 均为活泼元素, 焊丝钢冶炼过程中成分难以控制, 从实际生产的角度来看, 采用埋弧焊剂向焊缝中过渡 B、Ce 元素的方法较为可行。

3.4 Mn 和 Ni 及 Cu 对焊缝金属的影响

比较 1 号、2 号焊丝熔敷合金成分(见表 2), 1 号

焊丝和 2 号焊丝不同之处主要是 Mn、Ni 元素含量。

Mn、Ni 虽然都是降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变温度,但其结果却不相同,高 Mn 低 Ni 的 2 号焊丝熔敷金属组织针状铁素体数量较少,先共析铁素体较多(见图 1)。由此可见,高 Mn 并不能代替 Ni 的作用来抑制先共析铁素体(PF),并获得针状铁素体。其原因在于 Ni 元素使先共析铁素体开始转变温度降低程度明显大于针状铁素体,从而有利于针状铁素体的形成,而 Mn 元素的这一特性则不明显。

与 3 号焊丝相比较,1 号、2 号焊丝中均加入了含量为 0.20% 的 Cu,但其对焊接接头的韧性影响不大。可以认为,少量的 Cu 元素的存在,对焊缝的韧性没有明显的损害。

4 结 论

(1) 根据相变动力学和相变形核机制理论,从微合金化组织机理出发,选择 Mn—Ni—Mo—Ti—B 合金系焊丝配比。再通过合理的合金成分控制,可以获得以针状铁素体为主,其间析出少量粒状贝氏体的焊缝复合组织,这种复合组织是埋弧焊丝焊缝获得高强韧性和优良低温韧性的主要原因。

(2) 轻稀土可以起到了净化、细化和球化焊缝金属中夹杂物的作用,并增加针状铁素体形核核心,从而为焊缝中获得较多的针状铁素体提供帮助。

(3) Ni 元素的存在使先共析铁素体转变温度降低程度明显大于针状铁素体,从而有利于针状铁素体的形成;而 Mn 元素的这一特性则不明显。从提高焊接接头的抗腐蚀性能出发,焊丝中加入微量的 Cu,对焊接接头的韧性无明显影响。

(4) 所研制的 1 号焊丝,匹配碱性焊剂 SJ101G,其焊缝熔敷金属能够满足 X80 管线钢的高强韧性和低温韧性要求。

参考文献:

[1] 孔君华,郭 斌,刘昌明,等. 高钢级管线钢 X80 的研制与发展[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 23—25.

[2] 马秋荣,霍春勇,冯耀荣. 国外 X80 管道钢管的研究现状与应用研究[J]. 油气储运, 2000, 19(11): 9—13

[3] 吕德林. 焊接金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987

[4] Sugden A B B, Bhadeshia H K D H. Lower acicular ferrite [J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20(9): 1811—1818

[5] Yang J R, Bhadeshia H K D H. The dislocation density of acicular ferrite in steel welds [J]. Welding Research Supplement, 1990, 69(8): 305s—307s.

[6] Babu S S, Bhadeshia H K D H. Mechanism of the transition from kairite to acicular ferrite [J]. Materials Transaction, JIM, 1991, 32(2): 679—688

[7] 许祖泽. 新型微合金钢的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[8] Trindade Filho Da V B, Guimarães A S, Paiva Filho J da C, *et al.* Normalizing heat treatment effect on low alloy steel weld metals [J]. Journal of the Brazil Society of Mechanics Sciences and Engineering, 2004, 26(1): 62—66.

[9] Snyder J P, Pense A W. The effects of titanium on submerged arc weld metal [J]. Welding Research Supplement, 1982, 61(7): 201—211.

[10] Kong Junhua, Zhen Lin, Guo Bin, *et al.* Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel [J]. Materials and Design 2004, 25(8): 723—728.

[11] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[12] Onweg M, Frankel G S, Bruce W A, *et al.* Effect of welding parameters and H_2S partial pressure on the susceptibility of welded HS-LA steels to sulfide stress cracking [J]. Welding Journal, 2003, 82(6): 136—144.

[13] 黄开文. 国外高钢级管线钢的研究与使用情况[J]. 焊管, 2003 26(3): 1—10.

[14] 钱百年, 国旭明, 李晶丽, 等. 高强度管线钢 X80 的研究[J]. 焊接, 2002(8): 14—17.

[15] 杨 军, 范红刚, 薛 锦, 等. 低合金高强度钢焊缝针状铁素体形核问题的探讨[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(9): 89—93.

[16] Casper V E, John W. Effects of titanium containing oxide inclusions on steel weld ability [A]. The 6th International Conference on Trends in Welding Research [C], Georgia, USA, 2002, 15—19.

作者简介: 张 敏,男,1967 年 7 月出生。博士,教授。主要从事新型焊接材料、焊接结构断裂强度及焊接工程结构方面的研究,已发表论文 40 余篇。

Email: ZHMMN@263.net

tractions of welding easier. In addition, the feature-based modeling system provides the robotic welding off-line programming system with adequate information and is successfully applied.

Key words: geometric model of weld; feature extraction of welding list structure of features; feature-based modeling; Solid-Works

Melting characteristic of twin electrode single arc welding

II Self-regulating effect of arc on two cores melting HAN

Bin¹, ZOU Zeng-da², QU Shi-yao² (1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Petroleum University of China Dongying 257061, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China). p61—63, 80

Abstract: Two cores melting speed can keep consistence is very important for twin electrode single arc welding to be stabilized. The melting consistency of two cores is influenced by electrode type, welding current etc. The sufficient condition of two cores melting coincidence is the effective anode drop equal to the effective cathode drop, the more the difference of two values the more the melting inconsistent degree. The arc has a self-regulating effect on melting of two cores, that is, during the arc burning, even if the ends of two cores have different length in the arc, two cores can keep uniformly melting speed, and the arc can stably burn. The principle of the self-regulating effect is that different heat production of cathode and anode make two cores length in the arc different. The longer weld core stretching into the arc column gets more heat from the arc column to accelerate its melting. In general, the self-regulation effect of arc increases with the reducing of two-core span and increasing of welding current.

Key words: twin electrode; single arc welding; two cores melting; self-regulation effect

Submerged arc welding wire matched with X80 pipeline steel

ZHANG Min, YAO Cheng-wu, FU Chong, LV Zhen-lin (School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p64—68

Abstract: By analyzing the influence of the microstructure for weld deposited metal of high strength low-alloy steel on mechanical properties, the compound microstructure deposit with mainly the acicular ferrite (AF) and a small quantity of the granular bainite (GB) was applied to the welding wire for X80 pipeline steel. Based on the driving force concept of microstructure transformation, and combined with the acicular ferrite nucleated mechanism at nonmetallic inclusions and microalloy toughness theory, the Mn—Ni—Mo—Ti—B alloy was selected to study the welding wire of X80 pipeline steel. The results of experiments show that the weld deposited metal will fulfil the demands of strength and toughness and low-temperature toughness by choosing and controlling alloy elements rationally, and the developed 1# welding wire can be used for X80 pipeline steel.

Key words: X80 pipeline steel; submerged arc welding; low

temperature toughness; acicular ferrite; inclusion

Effect of TiO₂ on detachability of stainless steel electrode LI

Ping, MENG Gong-ge (Harbin University of Science & Technology, Harbin 150080, China). p69—72

Abstract: With uniform design method, taking the coating ingredients as independent variables and slag detachability as the target function in the formula and usability test, the effects of coating components on the detachability of stainless steel electrode were studied. Based on the calculates and analysis result, the two bigger effective supplementary materials rutile and the powder of TiO₂ were studied. When they (mainly TiO₂) increase, the microscopic structure in the slag will form branchlike or the stronger directive frame-like structure. The white fir-tree crystal phase gets more and the detachability turns better, as the branches get longer, the branching area bigger and denser.

Key words: uniform design; mechanism; detachability; microstructure

3D finite element simulation on stress-strain distributions in all position root butt welding of pip HUANG Si-luo^{1,2}, XUE

Yong¹, ZHANG Jian-xun¹, Chen Zong-qiang² (1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Maoming Petrochemical Machinery Plant, Maoming 525024, Guangdong, China). p73—76, 84

Abstract: Based on thermal—elastic—plastic theory, a 3—D finite element model of root butt welding of SA335 P91 steel pipe was carried out with ANSYS software. Using moving heat source, the transient temperature field and welding stress-strain field in root butt welded joint of a pipe were analyzed. Moreover, the distributions of axial and hoop transient stresses to close the two-half seam joint were investigated. The calculation results show that the axial and hoop stresses at the keyhole center are tensile, specially, the edge stress effect is remarkable where the hoop stresses are stronger than the axial ones, and how the holding time of heat source in the keyhole and the welding current influences the distribution of stresses and strain during the high temperature solidification is also discussed.

Key words: SA335 P91 steel pipe; numerical simulation; stress-strain field; solidification cracking

Evaluation of welding procedure specification with crack tip opening displacement in steel box beam MIAO Zhang-mu¹,

WU Wei-guo¹, TAO De-xin², XIE Zhi-hua³ (1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Logistics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. The Seventh Engineering Company Ltd., Of China Railway Major Bridge Bureau, Jiujiang 332004, Jiangxi, China). p77—80

Abstract: The limitations and problems of evaluation of welding procedure specification (WPS) of steel box beam with impact test were analyzed. It is necessary to use the crack tip opening displacement (CTOD) test to evaluate WPS of steel box beam. The CTOD