

# 高强高韧性管线钢埋弧用焊丝的研制

薛小怀<sup>1,2</sup>, 钱百年<sup>2</sup>, 国旭明<sup>2</sup>, 楼松年<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030; 2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 研制的高强高韧性管线钢用埋弧焊丝与 SJ101 和 SJ102 焊剂匹配后的熔敷金属不仅具有很高的强度( $\sigma_s \geq 540$  MPa), 而且还具有优良的低温韧性( $A_{KV-10} \geq 120$  J)。该焊丝的研制满足了屈服强度超过 500 MPa 以上管线钢对焊缝熔敷金属性能的要求。研究结果表明, 要保证熔敷金属具有较佳的强韧性匹配, 熔敷金属中的合金元素总量必须满足  $C_{eq} \geq 0.38$   $P_{cm} \geq 0.17$ , 才能保证熔敷金属的强度, 以及具有以针状铁素体为主焊缝组织; 在文中的合金系统下, 随着熔敷金属中 C、Mn 元素含量的增加, 熔敷金属的针状铁素体组织的含量增加, 韧性得到提高。随着焊剂碱度值的增加, 熔敷金属中的氧含量降低, C、Mn 元素增加, 使得熔敷金属中的合金元素更趋向于最佳的配比, 从而提高了韧性。

关键词: 管线钢; 埋弧焊丝; 熔敷金属; 韧性

中图分类号: TG423 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)05-23-05



薛小怀

## 0 序 言

随着我国低合金高强钢的迅速发展, 特别是管线钢、压力容器、工程机械以及桥梁、船舶等大形结构用钢的厚壁化以及低温服役环境, 对钢材的性能提出了更高的要求。为了结构的完整性, 不仅要求热影响区有很高的韧性, 焊缝金属同样也需要很高的韧性。目前虽然有在低温下保持优良低温韧性的埋弧焊丝, 但是这些焊丝的屈服强度一般不足 400 MPa, 高于 400 MPa 的焊丝也因 C 含量偏高而不能满足钢材对焊缝金属的成分要求。为了保证焊缝性能与母材匹配, 有必要研制一种具有较高强度并保持低温韧性的焊接材料。

## 1 焊丝的研制

### 1.1 焊丝研制指标及成分设计

研制焊丝熔敷金属的技术指标为  $\sigma_s \geq 500$  MPa,  $\sigma_b \geq 600$  MPa。成分设计的指导思想是通过晶粒细

化和微合金化技术来同时满足强度和韧性要求。通过降低 C 含量和添加 Mn、Mo 来降低裂纹敏感指数并保证强度。在低 C 的基础上添加微量元素 Ni、Cu 来提高熔敷金属的抗氢致裂纹(HIC)和硫化物应力腐蚀(SSCC)的能力。

### 1.2 焊丝熔敷金属性能试验

#### 1.2.1 试验设备

试板的焊接方法为埋弧焊, 焊接设备为美国产的 Miller 直流自动埋弧焊机。熔敷金属的化学成分采用化学分析法, 其中 O、N 的含量用美国力可公司生产的 TC-436 氧氮测定仪分析。拉伸试验在 DCS-25T 试验机上进行, 冲击试验在 JB-30B 冲击试验机上进行。

#### 1.2.2 试验材料

焊接材料为所研制的焊丝和锦州电焊条厂生产的两种烧结焊剂 SJ101、SJ102, 化学成分见表 1。焊接试板的材料选用 Q235 钢。

#### 1.2.3 试验方法

试板的焊接按照 GB12470-90 低合金钢埋弧

表 1 焊剂的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of flux

	CaO+MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MnO	SiO <sub>2</sub> +TiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	S	P	Basicity
SJ101	29.72	24.62	22.00	19.85	0.003	0.032	1.8
SJ102	34.46	23.72	12.35	25.35	0.002	0.018	3.5

收稿日期: 2002-04-01

基金项目: 国家 973 基金资助项目(G1998061511)

焊用焊剂标准进行。试板的尺寸为450 mm×150 mm×20 mm。试板焊接时的工艺参数为:焊接电流420~450 A,电弧电压31~32 V,焊接速度23 m/h,层间温度100~150 ℃。金相样品均取自最后一道焊缝,经研磨抛光后用3%的硝酸酒精溶液腐蚀,显微组织的观察和定量分析采用奥地利莱卡公司产的

FEM-4显微镜。

1.3 熔敷金属的性能

研制焊丝典型熔敷金属的化学成分和力学性能分别见表2、表3。

1.4 X70 管线钢焊接接头冲击性能试验

选用宝钢最新轧制的X70钢和所研制的焊丝

表 2 试验焊丝熔敷金属化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of deposited metals of experimental welding wire

No.	C	Mn	Si	Mo	Ti	B	Ni	Cu
11 *	0.033	1.77	0.35	0.28	0.02	—	0.44	0.32
12	0.040	1.54	0.35	0.30	0.01	0.002	0.77	0.27
21 *	0.044	2.00	0.17	0.28	0.012	—	0.44	0.31
22	0.056	1.74	0.16	0.30	0.012	0.002	0.79	0.26
23	0.049	1.56	0.18	0.24	0.014	0.0017	0.26	0.25

\*Fist number 1 means the wire matching with SJ101 flux, 2 means matching with SJ102 flux

表 3 试验焊丝熔敷金属常温力学性能和低温冲击性能

Table 3 Room temperature mechanical properties and low temperature toughness of deposited metals

No.	$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_5$ (%)	$\psi$ (%)	$A_{KV-10\text{ }^{\circ}\text{C}}$ /J
11	565	629	25.4	70	100
12	559	626	25	75	123
21	640	653	21	68	141
22	631	653	21	66	127
23	586	654	23	70	144

匹配 SJ102 和 SJ101G (SJ101 改进型)焊剂做接头性能冲击试验,试验结果见表4。焊缝-10 ℃的冲击韧度平均值为139 J,焊缝-20 ℃的平均值为159 J,最低值也大于100 J,满足了高强高韧管线钢焊缝的低温韧性要求。表5为欧洲钢管公司 X80 直缝埋弧焊管的性能<sup>[1]</sup>,由此可知所研制的X80级别管线钢

表 4 X70 管线钢接头冲击性能试验( $A_{KV}$  / J)

Table 4 Impact experiment results of X70 steel SMAW joint

No	$T/^{\circ}\text{C}$	1	2	3	Average
E8+ SJ102	-10	104	152	160	139
E8+ SJ101G	-20	110	178	189	159

表 5 欧洲钢管公司 X80 直缝埋弧焊管接头的性能( $A_{KV}$  / J)

Table 5 Properties of X80 steel SMAW joint from Europe pipe company

$T/^{\circ}\text{C}$	1	2	3	Average
0	125	146	131	134
-40	85	89	59	77.8

埋弧焊用焊丝的接头性能已经达到了欧洲钢管公司的水平。

## 2 试验结果分析

2.1 熔敷金属组织与韧性的关系

用研制的焊丝与 SJ101 和 SJ102 焊剂匹配所得熔敷金属的组织主要为针状铁素体(AF)和晶界先共析铁素体组织,以及少量的侧板条铁素体组织,典型组织见图1。针状铁素体组织的比例大于80%,这是获得高韧性的主要原因,针状铁素体含量与韧性的关系见图2。

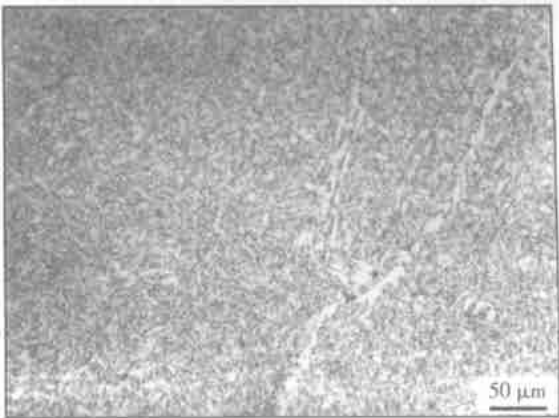


图 1 熔敷金属的针状铁素体和晶界铁素体组织

Fig. 1 Acicular ferrite and grain boundary ferrite of deposited metal

2.2 合金元素总量对熔敷金属组织和性能的影响

在不采用微合金化的C-Mn、Mn-Si焊缝中,文献[2~5]得出焊缝强度与C、Mn或Mn、Si的关

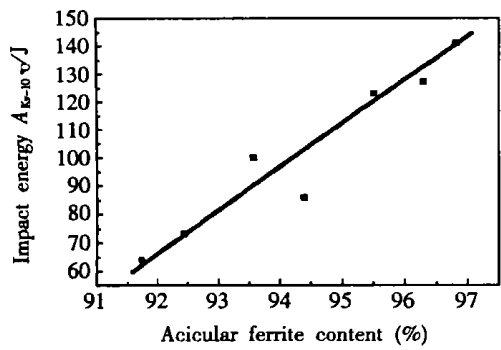


图 2 熔敷金属针状铁素体含量与韧性的关系  
Fig. 2 Relation of acicular content and impact toughness of deposited metal

系, 有的还考虑了 C、Mn 或 Si 的交互作用, 即  $C^* Mn, Mn^* Si$  与强度的关系。多元微合金化使得各元素之间的交互作用更加复杂, 其交互作用机制目前尚未清楚, 所以不能用简单的公式来反映元素与强度之间的关系。所研制焊丝熔敷金属的强度与碳当量的关系见图 3。从图中可以看出随着熔敷金属碳当量的增加, 其强度基本呈线性增加, 数据点对称地分布在图中直线的两侧。所以, 熔敷金属要获得高的强度, 必须提高熔敷金属的碳当量。而且用碳当量定性表示焊缝金属强度的也具有普适性。随着强度的增加, 合金元素带来的固溶强化作用也大大提高, 因强度提高对韧性带来的有害作用, 有时会抵消针状铁素体的有利作用, 最终反而会恶化韧性。另外随着合金化程度的增加强度提高, 焊缝组织可能出现贝氏体及马氏体, 焊缝的韧性下降。有的研究者认为,  $\sigma_s$  约大于 660 MPa 以后, 即使得到全针状铁素体组织的焊缝, 其韧性也并不高。  $\sigma_s$  约大于 700 MPa 以后, 针状铁素体可由 100% 减少到 20% 左右, 代之出现的是条状铁素体 (即贝氏体) 和马氏体, 焊缝韧性急剧下降<sup>[6, 7]</sup>。所研究的熔敷金属的强度级别基本上接近该合金系统的上限, 如果要再增加强度就要考虑其它的合金系统以满足熔敷金属的强度与韧性要求。

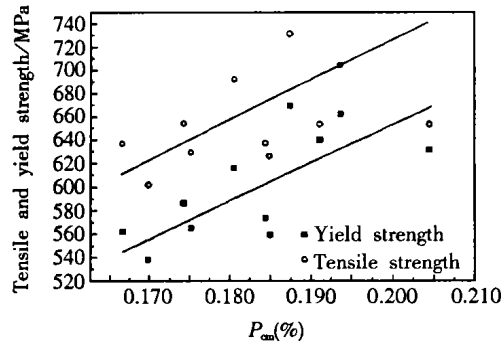


图 3 碳当量与强度的关系  
Fig. 3 Relation of carbon equivalent and strength

针状铁素体的含量不仅与微合金元素有关, 而且受到合金元素总量  $P_{cm}$  的影响, 研究表明, 随着  $P_{cm}$  的增加, 熔敷金属的针状铁素体组织随之增加, 在  $P_{cm} < 0.17$  时针状铁素体的组织较少, 当  $P_{cm} > 0.17$  时针状铁素体的比例提高将近 10% (见图 4)。该结果也与文献 [2] 的试验结果相吻合。

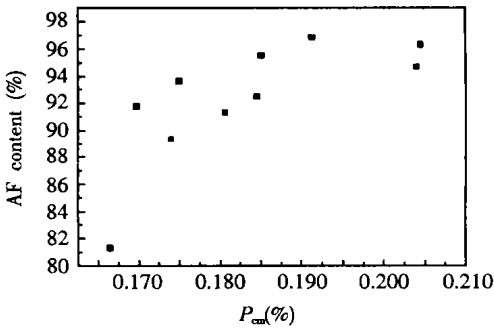


图 4  $P_{cm}$  与针状铁素体含量之间的关系  
Fig. 4 Relation of  $P_{cm}$  and AF content

2.3 合金元素 C、Mn 对熔敷金属韧性的影响

对于现代管线钢而言, 其强度是通过控制轧制和控冷技术的应用而得到的, 钢材中的碳含量得到大幅度的降低, 如果焊缝中存在大量的 C, 因其显著的淬硬性, 有可能在焊缝中引起冷裂纹<sup>[8]</sup>。所以一般都严格控制焊材中的 C 含量。现在出现的超低碳贝氏体焊接材料就是这方面的典型例子。C 对于韧性的影响, Evans<sup>[3]</sup> 在手弧焊焊缝金属中得出, Mn 在 1.4% 左右时, C 能促使针状铁素体的形成, 并且减少晶界铁素体, 但熔敷金属的硬度增加, 而且得出最佳韧性的获得是 C 在 0.07% ~ 0.09% 时。而 Surian E<sup>[9]</sup> 则认为 C 在 0.05% ~ 0.07% 范围内取值时可获得最佳的韧性。研究中通过金相观察, 随着 C 含量的增加, 针状铁素体的比例增加。由此可见, C 作为主要的合金元素对熔敷金属的组织 and 性能的影响比较大, 在一定范围内增加 C 含量对韧性和强度都有益。

Mn 也是保证强度的主要合金元素之一, 它的强化能力仅次于 C, 由于焊缝中 C 元素的减少, 一般通过添加 Mn 来弥补焊缝的强度损失。添加 Mn 元素还有一个重要的作用是该元素能有效的降低  $\gamma \rightarrow \alpha$  的转变温度, 抑制晶界先共析铁素体的形成, 促使焊缝中形成针状铁素体组织。许多研究者在其研究结果中都推荐 Mn 的最佳含量范围为 1.4% ~ 1.6%, 认为 Mn 在 0.6% ~ 1.8% 范围内能有效的抑制晶界先共析铁素体和侧板条铁素体, 使针状铁素体的比例增加<sup>[4, 10, 11]</sup>。随着 Mn 含量的增加, 确实增加了针状铁素体的比例, 甚至在高达 2.0% 左右时都可获

得很高的韧性。图 5 是利用人工神经网络研究 C、Mn 对熔敷金属韧性影响的研究结果,与试验结果相符。图 6 是 Mn/C 比与熔敷金属韧性的关系,随着 Mn/C 比的增加,韧性有所降低。这与 C 含量在一定范围内增加对韧性有利是相一致的。所以在该合金系统中,不能一味的强调降低 C 含量,必须考虑到与 Mn 的合理配比。在 C 含量为 0.04%~0.05%, Mn 在 1.5%~2.0% 的范围内,可以保证高韧性的获得。

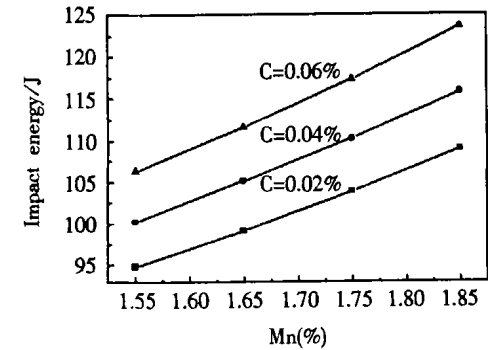


图 5 C、Mn 对韧性的影响

Fig. 5 Effects of C and Mn on deposited metals impact toughness(-10 °C)

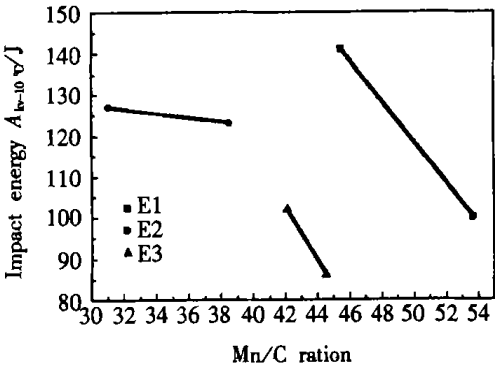


图 6 Mn/C 比对韧性的影响

Fig. 6 Effects of Mn/C ratio on of deposited metals impact toughness

2.4 氧对熔敷金属韧性的影响

氧含量对熔敷金属的组织 and 韧性有重要的影响,见图 7、图 8。图 7 为熔敷金属中氧含量与针状铁素体含量的关系。由图中可知,随着熔敷金属氧含量的增加,针状铁素体的含量基本呈线性减少,其中出现的异常点是由于其  $P_{cm} < 0.17$ , 所以其针状铁素体的组织比例较小。所以得出,在熔敷金属的碳当量  $P_{cm} > 0.17$  时,其针状铁素体的含量随氧含量的增加而减少。由图 8 可知,随着氧含量的增加,熔敷金属的韧性呈下降趋势。这与随氧含量的增加针状铁素体的比例减少相一致。但是对韧性的影响

更加强烈,当氧含量从 0.033% 增加到 0.051% 时,其冲击吸收功从 144 J 下降到 64 J。

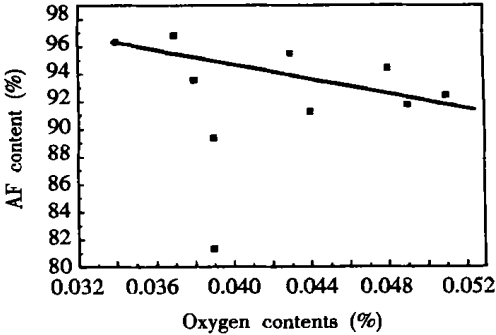


图 7 熔敷金属氧含量与针状铁素体含量的关系

Fig. 7 Effects of oxygen contents on AF content

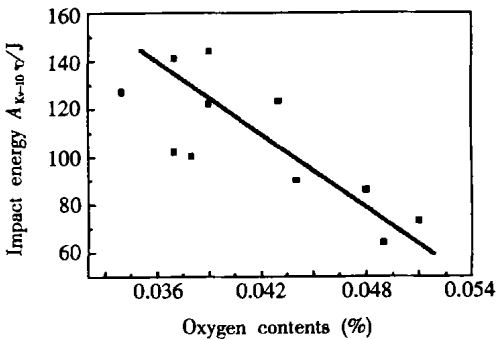


图 8 熔敷金属氧含量与韧性的关系

Fig. 8 Effects of oxygen contents on impact toughness

一般将焊缝中的氧含量分为低氧( $< 0.02\%$ )、中氧( $0.02\% \sim 0.05\%$ )和高氧( $> 0.05\%$ )。虽然氧也作为合金元素,但是含量过高或过低对韧性都不利。这可以通过从氧对焊缝金属的连续冷却状态图<sup>[12]</sup>的影响分析得知低氧时,由于促使形成针状铁素体形核的氧化夹杂物少,使得侧板条铁素体得到大量发展而恶化韧性;在高氧时,大量的氧化物夹杂虽然使奥氏体晶粒细化,但是氧含量的增加使转变温度提高,为晶界铁素体的形成提供了有利条件,促使晶界先共析铁素体的形成,使焊缝中的晶界铁素体含量增加,针状铁素体的含量减少,降低了焊缝的韧性(如图 7、图 8 所示)。在本文氧含量范围内,低于 0.04% 的氧对保证熔敷金属的高韧性是有好处的。

2.5 焊剂碱度对熔敷金属组织和性能的影响

采用 SJ102 焊剂匹配相同的焊丝焊接所得的熔敷金属与采用 SJ101 焊剂时的熔敷金属相比,韧性得到提高。其主要原因是熔敷金属的化学成分发生了变化,促使熔敷金属的组织发生变化。不同焊剂对化学成分、组织和韧性的影响见表 6。由表 6 可知, SJ102 焊剂的使用提高了熔敷金属中的 C、Mn 合金元素的含量,降低了 Mn/C 比,降低了熔敷金属中的氧含量,熔敷金属中的针状铁素体组织的比例增

加, 从而使熔敷金属的韧性得到提高。虽然采用碱度值大的焊剂时使熔敷金属中的 N 含量增加, 对韧性不利, 但是与其它因素引起韧性的提高相比, 其危害得到缓和。所以在文中的情况下, 采用高碱度值

的焊剂对合金元素的过渡及其合理配比、氧含量的降低产生有利的影响, 建议采用高碱度值的焊剂与焊丝匹配以获得高强韧性的熔敷金属。

表 6 不同焊剂对熔敷金属化学成分(质量分数, %)、组织和韧性的影响  
Table 6 Effects of basicity on chemical composition microstructure, and toughness of deposited metals

	Wire E1			Wire E2			Wire E7		
Effects of basicity on chemical composition									
	C	Mn	O	C	Mn	O	C	Mn	O
SJ101	0.033	1.77	0.038	0.040	1.54	0.043	0.042	1.87	0.048
SJ102	0.044	2.00	0.037	0.056	1.74	0.034	0.048	2.02	0.037
Effects of basicity on AF contents(%)									
SJ101	93			94			94		
SJ102	97			96			—		
Effects of basicity on impact toughness $A_{KV-10}^{\circ}C/J$									
SJ101	100			123			86		
SJ102	141			127			102		

3 结 论

- (1) 研制的焊丝基本满足了屈服强度超过 500 MPa 以上管线钢对焊缝熔敷金属力学性能的要求, 用该焊丝匹配 SJ101, SJ102 焊剂焊接得到的熔敷金属不仅具有较高的强度, 而且具有优良的低温韧性。
- (2) 要保证熔敷金属具有较佳的强韧性匹配, 熔敷金属中的合金元素总量必须满足  $C_{eq} \geq 0.38$ ,  $P_{cm} \geq 0.17$ , 才能保证熔敷金属的强度, 以及具有以针状铁素体为主的焊缝组织。
- (3) 在合金系统中, 随着熔敷金属中 C、Mn 元素含量的增加, 熔敷金属的针状铁素体组织的含量增加, 韧性得到提高。随着氧含量的增加, 熔敷金属的韧性下降, 显著恶化了韧性。推荐熔敷金属的化学成分(质量分数, %)为: 0.04 ~ 0.05 C + 1.5 ~ 2.0Mn + < 0.040 和适当的微合金化元素即可获得高的韧性。
- (4) 随着焊剂碱度的提高, 熔敷金属的化学成分趋于最佳的配比, 从而改善了熔敷金属的韧性。

参考文献:

[1] 杨柯, 单以银. 新一代钢铁材料重大基础研究—高性能管线钢重大基础研究[R]. 沈阳: 沈阳金属研究所, 2000.

[2] Grong O, Matlock D K. Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals[J]. International Metals Reviews, 1986, 31(1): 27 ~ 47.

[3] Evans G M. The effects of carbon on the microstructure and

properties of C-Mn all-weld deposits[J]. Welding Journal, 1983, 62(11): 313s ~ 320s.

[4] Evans G M. The effects of manganese on the microstructure and properties of C-Mn all-weld deposits[J]. Welding Journal, 1980, 59(3): 67s ~ 75s.

[5] 尹士科. 焊接接头性能调控与应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993. 10 ~ 14.

[6] 张炳范, 李午申, 曾悦坚. 高韧性焊条的研究[J]. 焊接学报, 1993, 14(4): 227 ~ 232.

[7] 陈伯鑫, 周运鸿. 高强钢埋弧焊焊缝的强韧化研究[J]. 焊接学报, 1987, 8(3): 153 ~ 161.

[8] Yuyioka N. TMCP steels and their welding[J]. Welding in the World, 1995, 35(6): 375 ~ 382.

[9] Surian E, Troniti J, Henera R, et al. Influence of carbon on mechanical properties and microstructure of weld metal from a high-strength SMA electrode[J]. Welding journal, 1991, 70(6): 133s ~ 140s.

[10] Es-Souni M. Microstructure and AEM studies of self-shielded flux cored arc weldments[J]. Welding Journal, FEB, 1992, 71(2): 35s ~ 45s.

[11] Surian E. Influence of chromium on the mechanical properties and microstructure of weld metal from a high-strength SMA electrode[J]. Welding Journal, 1994, 73(3): 45s ~ 53s.

[12] Liu S, Olson D L. The role of inclusions in controlling HSLA steel weld microstructures[J]. Welding Journal, 1986, 65(6): 139s ~ 146s.

作者简介: 薛小怀, 男, 1971 年出生, 现为上海交通大学材料科学与工程学院博士后。主要从事焊接材料、工艺及异种材料的连接。参加国家 973 钢铁材料重大基础研究项目, 研究工作获 2002 年师昌绪三等奖。申请专利 2 项, 发表论文 20 篇。

Email: xlxue@mr.ac.cn

bad was carried out by utilizing the ANSYS programming package. The von Mises equivalent stress of welded joint and the hysteresis loops were obtained. The dissipative coefficient was introduced and used as an index to evaluate the dissipative capacity of the welded connection under the seismic load. The dissipative coefficient of two types of welded connection was computed and the results indicated that the earthquake resistant performance of the "Dog Bone" connection was better than that of the typical welded connection.

**Key words** FEM; welded connection; cyclic load; dissipative coefficient

**Development of Seam Tracking Technology with Ultrasonic Sensor in CO<sub>2</sub> Welding** HU Sheng-sun (School of Material Sciences & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China), TU Wan-hong, SUN Dong, SHAN Ping, p19~22

**Abstract** In this paper, the seam tracking technology with non-contact ultrasonic sensor is introduced into gas shield arc welding. Because the protective atmospheres are different, the attenuation of the ultrasonic signal is different. Through experiments, the influences of the gases such as Ar, CO<sub>2</sub> and Ar + CO<sub>2</sub> on the ultrasonic signal are studied. The results show that the signal attenuation is smaller in Ar and it is greater in CO<sub>2</sub>. The seam tracking system with ultrasonic sensor can not work normally in CO<sub>2</sub> arc welding without adopting measures. Based on the theory analysis the main reason of ultrasonic signal attenuation in CO<sub>2</sub> is the relaxation absorption effect. It is difficult to eliminate the relaxation absorption effect in CO<sub>2</sub> arc welding seam tracking with ultrasonic sensor. Thus the physical isolation methods are advanced in this paper, and one of them is "a sleeve + a axial fan". It is useful for preventing CO<sub>2</sub> entering the space of the ultrasonic signal transmission. The results of experiments show that the non-contact ultrasonic sensor can be applied in CO<sub>2</sub> arc welding seam tracking, and the CO<sub>2</sub> arc welding seam tracking system with ultrasonic sensor can satisfies the requirements in real welding engineering.

**Key words** non-contact ultrasonic sensor; seam tracking; CO<sub>2</sub> arc welding

**Development of Submerged Arc Welding Wire for High Strength and High Toughness Pipeline Steel** XUE Xiao-huai (Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China), QIAN Bai-nian, GUO Xu-ming, LOU Song-nian, p23~27

**Abstract** The wire for high strength and toughness pipeline steel submerged arc welding is developed in this paper, the deposited metals obtained by matching SJ101 and SJ102 type flux, has not only high strength ( $\sigma_s \geq 540$  MPa) and also has high low temperature toughness ( $A_{KV-10} \geq 120$  J). This wire fulfills the requirement of high strength ( $\sigma_s > 500$  MPa) pipeline steel to the properties of the deposited metals. Experimental results show that  $C_{eq}$  and  $P_{cm}$  should be higher than 0.38 and 0.17 respectively, which can ensure the high strength and high toughness of the deposited metals. With increasing C, Mn content, the acicular ferrite is increased and the toughness is improved. [O] is deleterious to the toughness of deposited metals, with the increasing [O] content, the toughness is lowered. Higher basicity flux increased the C, Mn contents and lowered the [O] contents, which made the deposited metals chemical composition to tend to more suitable and improved the toughness.

**Key words** pipeline steel; submerged arc welding wire; deposited met-

als; toughness

**Evaluation of Powder's Thermal Behavior in Plasma Transferred-Arc Space (II) — Study on Heat Transfer Between Powder Particle and Plasma** WANG Xi-bao (The Centre of Surface Engineering Research, The College of Materials Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China), JIA Feng-suo, p28~30

**Abstract** The heating processes of Fe-base alloy and B<sub>4</sub>C particles in the plasma transferred-arc (PTA) space were theoretically evaluated in this article based on heat conduction theories. It was found that most of the Fe-base particles would be fully melted while they transporting through the central plasma field with 200 A surfacing currents. And the particles with a diameter less than  $0.5 \times 10^{-4}$  m might be fully evaporated. However, for the boron carbide (B<sub>4</sub>C) particles, only the one with a diameter less than  $0.5 \times 10^{-4}$  m could be melted in the same PTA space. Most of B<sub>4</sub>C particles are only pre-heated at its solid state when they were fed through the central field of PTA plasma when the surfacing current is equal or less than 200 A. When the arc current was smaller than 100 A, only the particles smaller than  $0.5 \times 10^{-4}$  m could be melted in the PTA space for the Fe-base alloy. Almost none of the discussed B<sub>4</sub>C particles could be melted in the 100 A PTA space.

**Key words** plasma transferred-arc; powder surfacing; thermal behavior; powder

**Simulation Study of Shielded Metal Arc Welding Inverter Using Simulink Software** GAI Zhi-wu (Electromechanical Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China), LI Dong-sheng, MA Yan, PU Chen-hua, p31~34

**Abstract** Shielded metal arc welding inverter and the arc load is a typical kind of non-linear system, it's difficult to establish a model and find accurate transient response solution. Moreover, other simulation methods can only get approximate solution within small signal range. Simulink software is superior for simulating this kind of system. We setup a Simulink simulation model for SMAW inverter especially the PWM model and arc load model. The relation between voltage, current, arc height and time is studied by simulation. Using LEM sensor and scope that can store data experiment results obtained are consistent with simulation results. So the model is very useful for studying SMAW inverter.

**Key words** arc welding electric source; Simulink model; simulation

**Effect of Strength Mis-Matching on Fracture Behavior for Nuclear Pressure Vessel Steel A508-III Welded Joints** JING Hong-yang (Tianjin University, Tianjin 300072, China), ZHU Zheng-qiang, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, p35~37, 44

**Abstract** The effect of strength mis-matching on the fracture behavior of A508-III welded joints was analyzed by fracture mechanics test and FE-calculation, the fracture behavior for HAZ was emphasized especially. It has been shown that the opening stress and stress triaxiality in the vicinity of crack tip are reduced for well-crack specimen, and increased for HAZ-crack specimen, if the over-matching weld is used. In other words, over-matching could improve the fracture resistance for weld crack specimen, and deteriorate for HAZ crack specimen. This tendency was confirmed by the test result.

**Key words** strength mis-matching; fracture behavior; welding heat affected zone; welded joint